戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）第２期
／自動運転（システムとサービスの拡張）
仮想空間での自動走行評価環境整備手法の開発

令和３年度　報告書

令和4年　3月　31日

学校法人幾徳学園　神奈川工科大学
三菱プレシジョン株式会社
日本ユニシス株式会社
日立 Astemo 株式会社
パイオニアスマートセンシングイノベーションズ株式会社
株式会社デンソー
株式会社 SOKEN

本報告書は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)が管理法人を務め、内閣府が実施した「戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）第 2 期／自動運転（システムとサービスの拡張）」(NEDO 管理番号：JPNP18012)の成果をまとめたものです。

目　次

1. 事業の目的 6

2. 事業の位置付け 6

3. 事業内容 7

4. 事業計画 9

4. 1 令和3年度の成果 11

5. 各パートごとの成果 15

5. 1「A1. 走行環境モデルの構築」のための研究開発 15

5. 1. 1「A1. 走行環境モデル構築」（三菱プレシジョン株式会社） 15

（1）令和3年度の成果（まとめ） 17

（2）令和3年度の成果 18

（3）次年度以降の計画 29

5. 1. 2「A1. 走行環境モデル定義」（株式会社 SOKEN） 30

（1）令和3年度の成果（まとめ） 32

（2）令和3年度の成果 33

（3）次年度以降の計画 54

5. 1. 3「A2. テストシナリオ及びテストデータ生成ツール構築」(三菱プレシジョン株式会社) 55

（1）令和3年度の成果（まとめ） 58

（2）令和3年度の成果 59

（3）次年度以降の計画 66

5. 1. 3. 1「A2. 評価シナリオ記述方式等の検討」（ 三菱プレシジョン株式会社、SOLIZE 株式会社） 67

（1）令和3年度の成果（まとめ） 69

（2）令和3年度の成果 70

（3）次年度以降の計画 99

5. 2「B.センサリファレンスモデル構築と評価ツールの構築」のための研究開発 100

5. 2. 1「B0. プロジェクト推進・シミュレーション PF 評価」（学校法人幾徳学園神奈川工科大学） 100

（1）令和3年度の成果（まとめ） 102

（2）令和3年度の成果 103

（3）次年度以降の計画 207

5. 2. 2「B1. カメラ リファレンスモデル構築」（学校法人幾徳学園神奈川工科大学） 209

5. 2. 2. 1「B5. カメラ知覚モデルの構築」（学校法人幾徳学園神奈川工科大学、ソニーセミコンダクタソリューションズ株式会社） 209

（1）令和3年度の成果（まとめ） 212

（2）令和3年度の成果 213

（3）次年度以降の計画 218

5. 2. 2. 2「B1.カメラ認識モデルの結合性評価」（日立 Astemo 株式会社） 219

(1) 令和3年度の成果(まとめ) 221
(2) 令和3年度の成果 222
(3) カメラ認識部の評価まとめ 238
(4) 次年度以降の計画 239
5. 2. 3 「B6. ミリ波レーダ認識モデル構築」(学校法人幾徳学園神奈川工科大学、学校法人 トヨタ学園豊田工業大学) 240
(1) 令和3年度の成果(まとめ) 242
(2) 令和3年度の成果 243
(3) 次年度以降の計画 258
5. 2. 4 「B7. センサーモデル評価手法の標準化」(学校法人幾徳学園神奈川工科大学、トヨタテクニカルディベロップメント株式会社) 259
(1) 令和3年度の成果(まとめ) 261
(2) 令和3年度の成果 262
(3) 次年度以降の計画 276
5. 2. 5 「B2. ミリ波レーダ リファレンスモデル構築」 (株式会社デンソー) 277
(1) 令和3年度の成果(まとめ) 279
(2) 令和3年度の成果 280
(3) 次年度以降の計画 285
5. 2. 6 「B3-1. LiDAR リファレンスモデル構築」(パイオニアスマートセンシングイノベーションズ株式会社) 286
(1) 令和3年度の成果(まとめ) 289
(2) 令和3年度の成果 290
(3) 次年度以降の計画 321
5. 2. 7 「B3-2. LiDAR リファレンスモデル構築」(学校法人畿徳学園神奈川工科大学、パイオニア株式会社) 322
(1) 令和3年度の成果(まとめ) 325
(2) 令和3年度の成果 326
(3) 次年度以降の計画 353
5. 2. 8 「B4. センサモデル構築のためのデータ取得」(株式会社 SOKEN) 354
(1) 令和3年度の成果(まとめ) 356
(2) 令和3年度の成果 357
(3) 次年度以降の計画 364
5. 3 「D.自動運転バリテーションプラットフォームのアーキテクチャ構築」のための研究開発 365
5. 3. 1 「D1.モジュール間 I/F の標準化」(日本ユニシス株式会社) 365
(1) 令和3年度の成果(まとめ) 367
(2) 令和3年度の成果 368
(3) 次年度以降の計画 369
5. 3. 2 「D2.シミュレーションプラットフォームの研究開発」 (日本ユニシス株式会社) 370

(1) 令和3年度の成果(まとめ) 372
(2) 令和3年度の成果 373
(3) 次年度以降の計画 382
5. 3. 3 「D3-1. DIVP®開発の「走行環境～電波伝搬～センサーモデル」出力データのモニター企業における自動運転性能シミュレーションの有効性に関する研究」 (日本ユニシス株式会社) 383
(1) 令和3年度の成果(まとめ) 385
(2) 令和3年度の成果 385
(3) 次年度以降の計画 385
5. 3. 4 「D3-2. DIVP®開発の「走行環境～電波伝搬～センサーモデル」出力データのモニター企業における自動運転性能シミュレーションの有効性に関する研究:対象センサーメーカ」(日本ユニシス株式会社) 386
(1) 令和3年度の成果(まとめ) 389
(2) 令和3年度の成果 389
(3) 次年度以降の計画 393
5. 3. 5 「D3-3. DIVP®開発の「走行環境～電波伝搬～センサーモデル」出力データのモニター企業における自動運転性能シミュレーションの有効性に関する研究:対象 OEM、センサーメーカ」 (日本ユニシス株式会社) 394
(1) 令和3年度の成果(まとめ) 396
(2) 令和3年度の成果 397
(3) 次年度以降の計画 402
5. 3. 6 「D4. ミリ波レーダ知覚モデル構築、評価」 (日本ユニシス株式会社、株式会社ユーシン) 403
(1) 令和3年度の成果(まとめ) 405
(2) 令和3年度の成果 406
(3) 次年度以降の計画 415
5. 4 「E. 認識不調シナリオデータベース構築」のための研究開発 416
5. 4. 1 「E0. 認識不調シナリオデータベース構築」(学校法人幾徳学園神奈川工科大学) 416
(1) 令和3年度の成果(まとめ) 419
(2) 令和3年度の成果 420
(3) 次年度以降の計画 429
5. 4. 2 「E1. センサ不調シナリオ探索(AI)の開発」(学校法人幾徳学園神奈川工科大学、トヨタテクニカルディベロップメント株式会社) 430
(1) 令和3年度の成果(まとめ) 434
(2) 令和3年度の成果 435
(3) 次年度以降の計画 476
6. 他、令和3年度の活動成果 477
7. その他特記事項(当該年度分についてのみ記載) 478

1. 事業の目的

本事業では、自動運転システムの安全性の評価を仮想空間上で効率的に実施するための、標準化された評価プラットフォームの構築を行い、これらの標準を国内関係プレーヤ間で公開することにより、自動車産業界における自動運転システムの評価可能性の向上への貢献及び国内ベンダーの競争力向上を目指すことを目的とする。

2. 事業の位置付け

本事業は以下 Figure 1、Figure 2 に示す通り、日本自動車工業会(以下、JAMA)が検討する安全性評価のためのシナリオ体系を元に、センサによる交通環境認識の評価を主目的として、仮想空間での自動運転の安全性評価プラットフォームの構築を行う。また、経済産業省(以下、METI)が実施する「高度な自動走行システムの社会実装に向けた研究開発・実証事業(自動走行システムの安全性評価技術構築に向けた研究開発プロジェクト)」(以下、METI 事業)から提供される交通流シナリオも本事業で構築するプラットフォームで評価可能にする。

METI 事業は交通流のテストシナリオの作成を担い、本事業では認識評価用のテストシナリオ作成を担当するため、METI 事業で実施される内容との重複はない。また、本事業においては仮想空間での評価を可能にするための環境モデル、テストデータ生成ツール、センサモデル、走行計画モデルを具備した評価プラットフォーム(DIVP® : Driving Intelligence Validation Platform)を構築することを主目的としており、この点においても METI 事業で実施される内容との重複は無い。

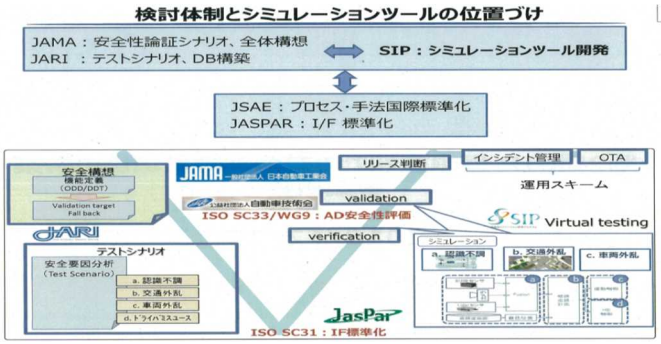


Figure 1 周辺事業との分担

	概念	データ				構造・I/F
	シナリオ体系	走行データ計測	シナリオ作成	物標データ作成	テストデータ生成ツール	シミュレーションPF
交通流	JAMA	METI（高速） ※交差点・一般道も対応予定	METI（高速） ※交差点・一般道も対応予定	SIP	SIP	SIP ②車両性能評価
認識性能・認識不調	JAMA	SIP	SIP			SIP ①センサー認識評価 ②車両性能評価

Figure 2 METI 事業とのデマケーション

3. 事業内容

本研究においてはセンサ不調等に起因する自動運転システムの性能限界の評価が可能な評価環境を目指すが、知覚から車両挙動までの一連の自動運転システムを精緻に仮想空間上に再現することは、演算負荷等の観点から現実的ではない。

そのため本研究では、現実的な演算負荷で一連のシステム評価を行うシミュレーションを構築した上で、センサごとに物理現象を再現可能な程度に精密化したシミュレーションを構築していく。これらをリアルタイム性の高い「機能シミュレーション」と、精緻なセンサ不調を再現する「物理シミュレーション」と定義する。

Table 1. 目指すシミュレーションの定義

■ 機能 シミュレーション	■ 入力～出力一貫したシステム評価を可能とする、 軽量でリアルタイム性が高いシミュレーション
■ 物理 シミュレーション	■ センサ不調などに起因する限界性能の精緻な評価が可能だが、 演算負荷が高くリアルタイム性が低い、 自動運転システムとの接続性が限定的なシミュレーション

一方で、自動運転を仮想環境で行うシミュレーション環境は国内外の複数のベンダーより提供されているが、現実との一致性検証に基づく評価可能性が不明確で活用範囲の判断が困難、評価したいセンサ等の置き換えができず開発における運用効率性が低い、等の課題がある。

そこで本研究では、前述のシミュレーション体系を構築し、このインターフェースを標準案として提案することを成果目標とし、自動車産業やベンダーの開発力向上への貢献を目指す。

2021 年度からはこれら研究成果に基づくデータベース構築による評価環境の拡張と評価プロセスの構築を進め 2022 年度以降の社会実装に備える。

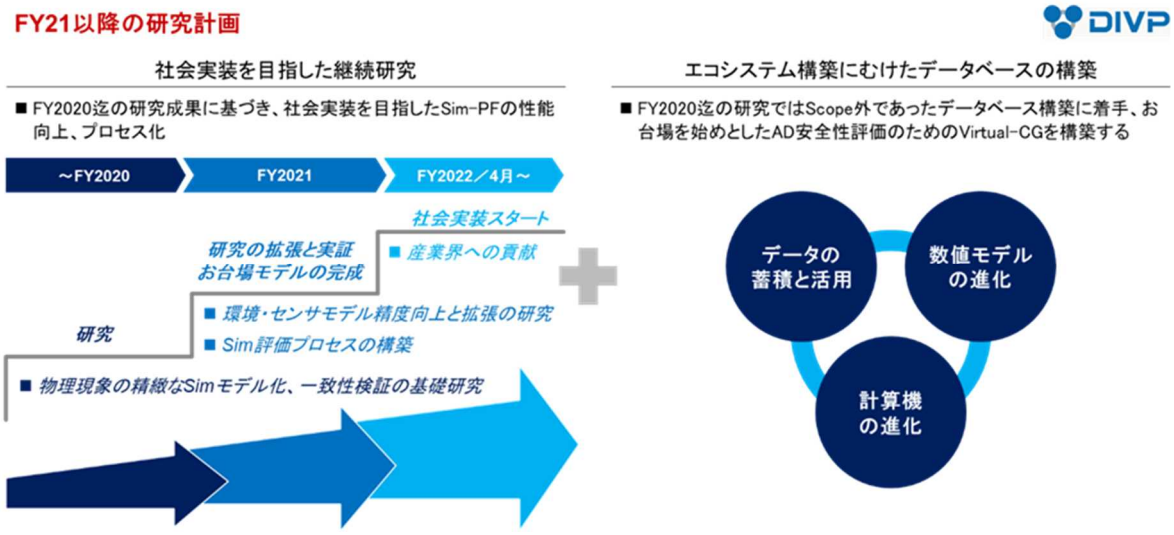


Figure 3. 2021 年度以降の事業構想

尚、本研究開発に当たり、海外の代表的なツールや現在進行中の各種標準化の議論もベンチマークし親和性を考慮する。

研究の実施にあたっては「センサモデル」を中心に、これに入力される外界を模した「環境モデル」、センサ以降のセンサフュージョン等の自動運転機能を模した「自動運転モデル」、これらを動作させる「評価プラットフォーム」の研究テーマを設定、それぞれのエキスパートの参加によるコンソーシアム形式で研究を実施し成果の創出を目指す。

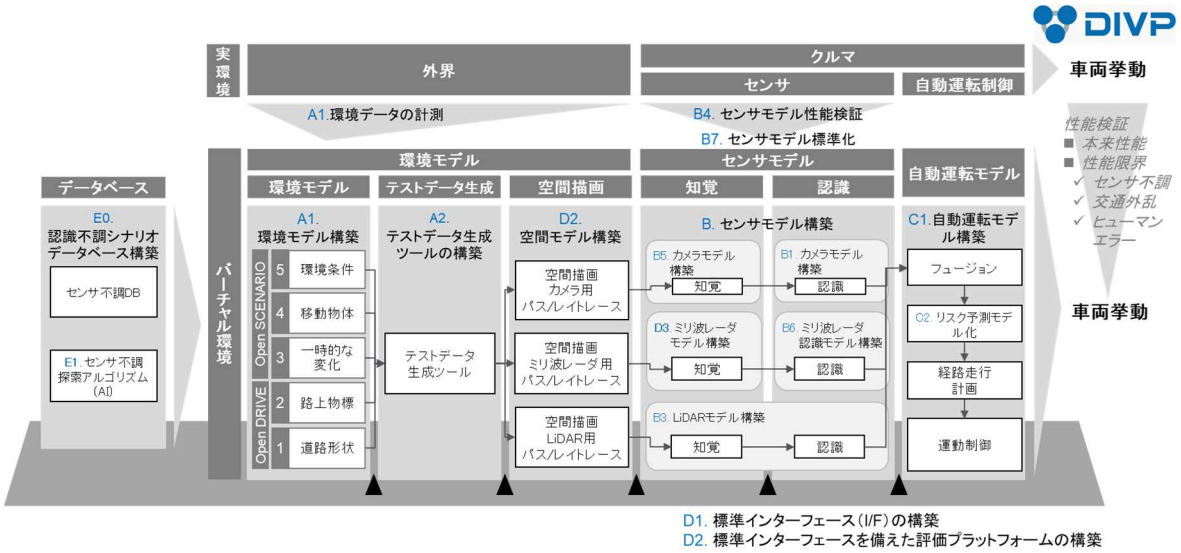


Figure 4 評価プラットフォーム構築のための研究開発課題設計

Table 2 DIVP®コンソーシアム体制

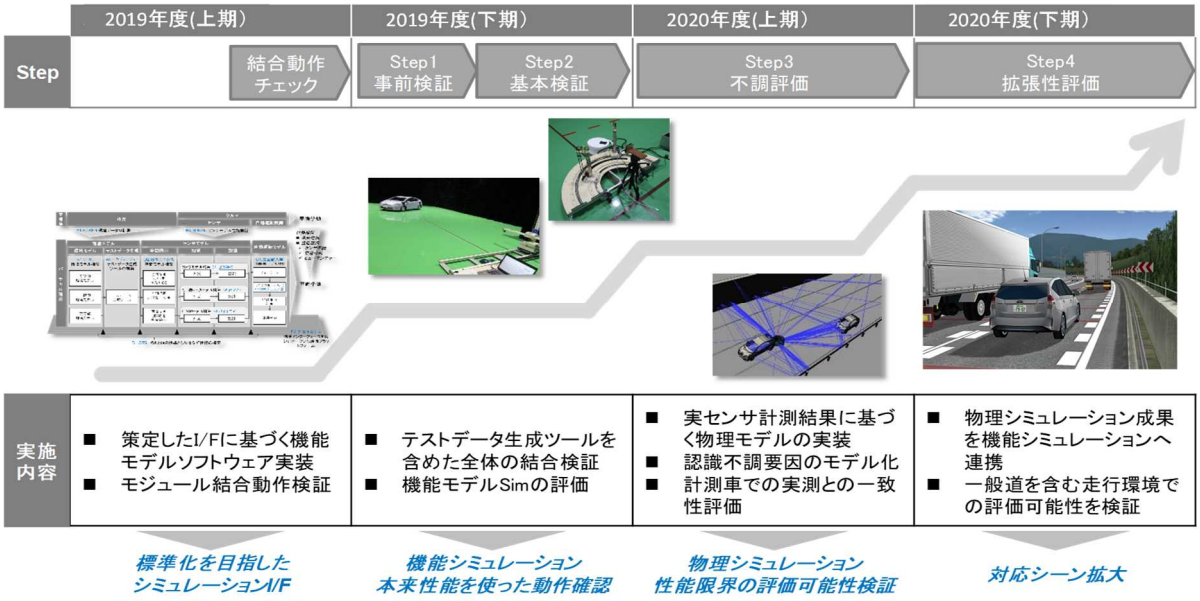
参加団体	研究パート	
学校法人幾徳学園神奈川工科大学	B0	■ センサシミュレーションモデルの結合・評価及びプロセス化の検討 ■ 国際連携、国際標準化の運営 ■ 認識不調シナリオデータベースの構築
	C2	■ リスク予測のモデル化
	E0	■ 認識不調シナリオデータベース構築
三菱プレシジョン株式会社	A1	■ 環境モデルの構築
	A2	■ 安全性評価テストデータ生成ツールの構築
日本ユニシス株式会社	D1	■ 評価環境の標準となり得るインターフェースの検討
	D2	■ 評価プラットフォームの構築、ミリ波レーダ知覚モデルの構築
	D3	■ モニター企業における有効性に関する研究
日立Astemo株式会社*1	B1	■ カメラ認識モデルの結合性評価
パイオニアスマートセンシングイノベーションズ株式会社*1	B3	■ LiDARリファレンスモデルの構築
株式会社デンソー*2	B2	■ ミリ波レーダ リファレンスモデル構築
株式会社SOKEN	A1	■ 環境モデル化に必要な実環境特性データの計測
	B4	■ センサモデル性能の評価に必要な実環境データの計測
SOLIZE株式会社	A2	■ 評価シナリオ記述方式等の検討
パイオニア株式会社	B3	■ LiDARモデルの構築 ■ LiDARモデルユーザ評価
ソニーセミコンダクタソリューションズ株式会社	B5	■ カメラモ知覚デルの構築 ■ カメラモデルユーザ評価
学校法人 トヨタ学園 豊田工業大学	B6	■ ミリ波レーダ認識モデルの構築
トヨタテクニカルディベロップメント株式会社	B7	■ 安全性評価プロセスの構築
	E1	■ センサ不調探索アルゴリズム(AI)
株式会社ユーシン	D4	■ ミリ波レーダ知覚モデル構築、評価

*1：日立 Astemo 株式会社、パイオニアスマートセンシングイノベーションズ株式会社は 2021 年 9 月 30 日に契約終了
*2：株式会社デンソーは 2021 年 6 月 30 日に契約終了

4. 事業計画

本事業は 2022 年度までの事業を計画、2018～2020 年度は 4 段階での評価環境構築を目指す。
尚、2018 年度は準備段階として、評価環境構築のための枠組み（フレームワーク）の整理を行う。

- ✧ Dec –2018　　事前検証
- ✧ Sept–2019　Step1　結合動作チェック　標準化を目指したシミュレーション I/F の設計
- ✧ Mar –2020　Step2　基本検証　本来性能による機能シミュレーションの動作確認
- ✧ Sept–2020　Step3　不調評価　物理シミュレーションによる性能限界の評価可能性検証
- ✧ Mar –2021　Step4　拡張性検証　評価シーンの拡大検討



出所 ：(株)SOKEN,三菱プレシジョン(株)提供画像

Figure 5 プロジェクト研究計画

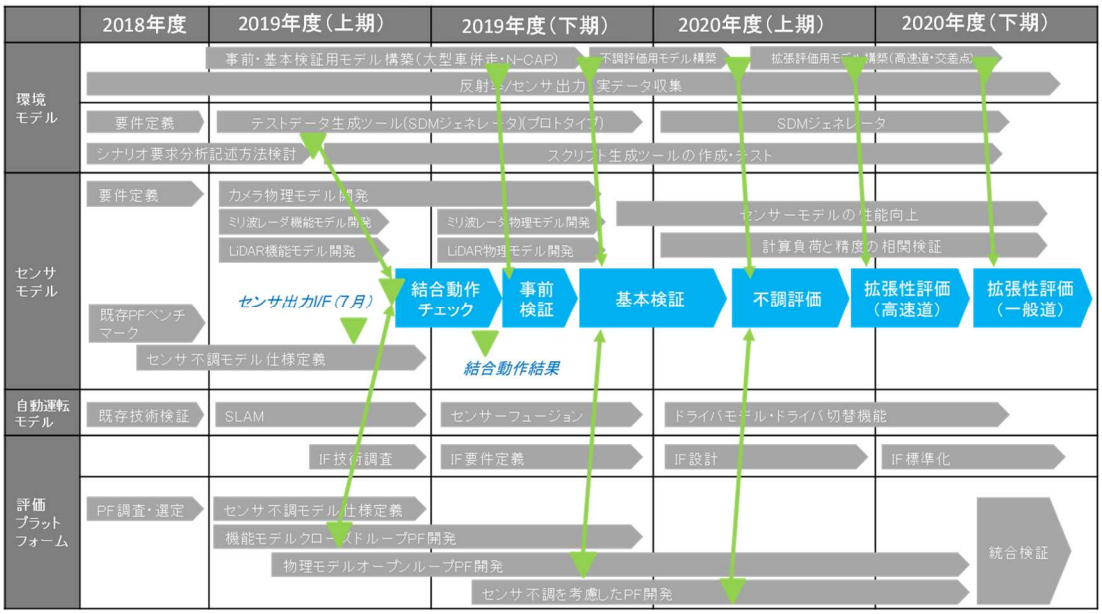


Figure 6 プロジェクト全期間の研究開発計画

2021 年度からは 2022 年度内の社会実装を目指し、産業界他に広く参加者を募った受容性検証をマイルストーンとし、事業を進めていく。

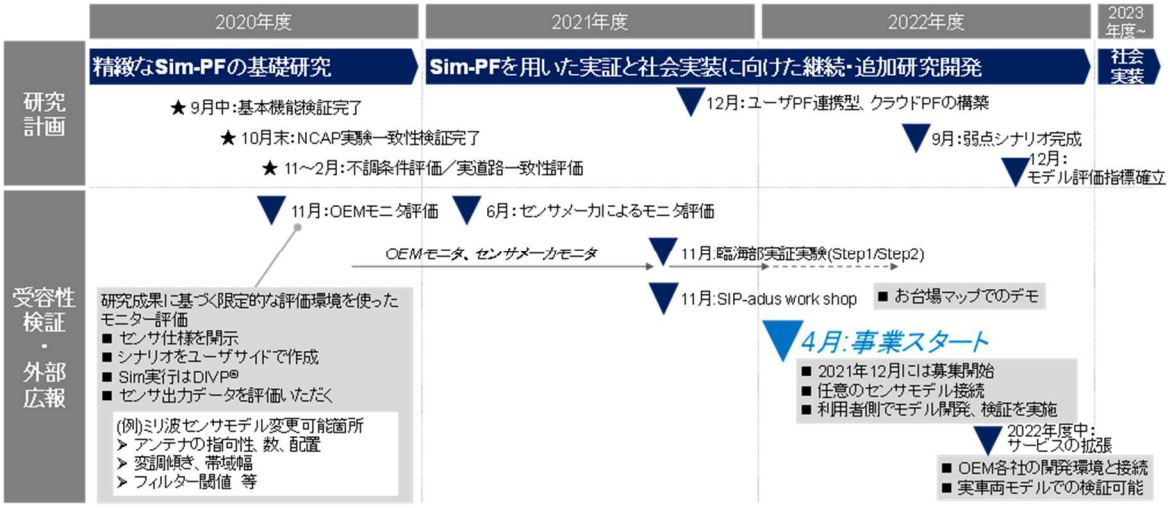


Figure 7 2022 年度の社会実装を見据えた事業マイルストーン

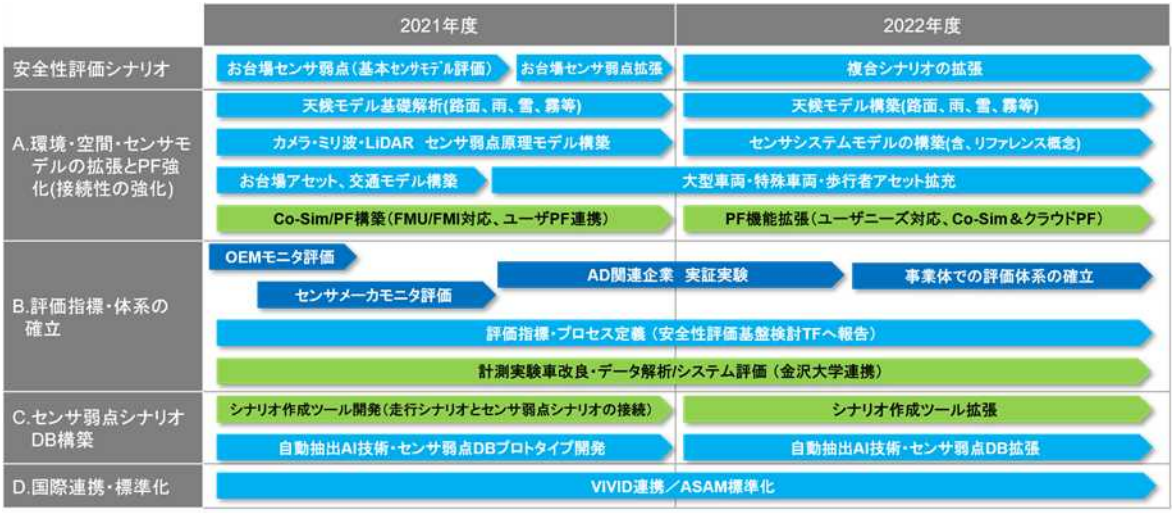
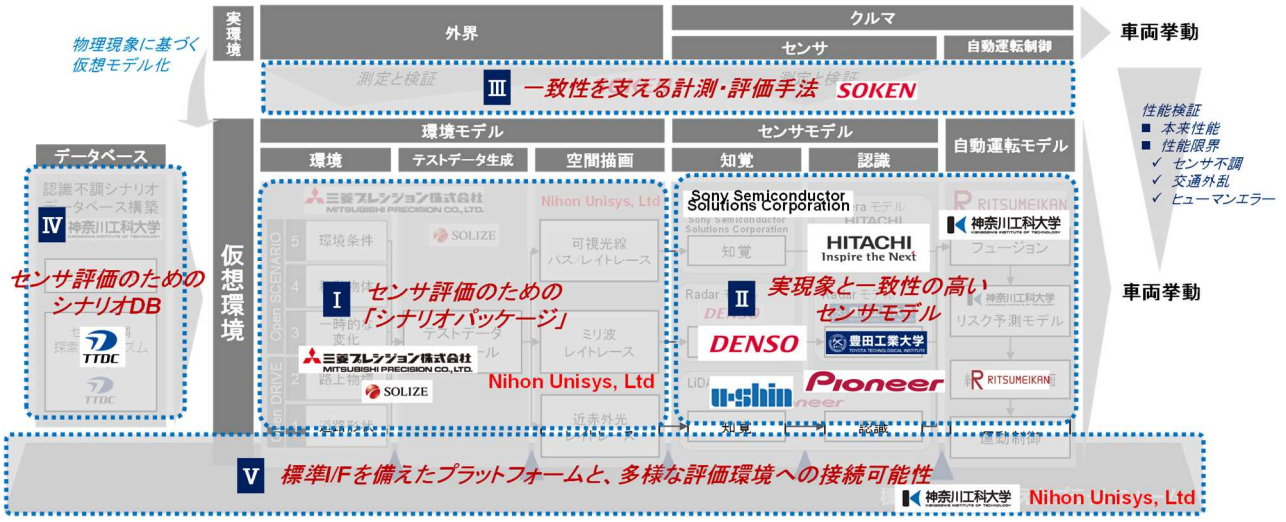


Figure 8 プロジェクト全体の研究開発計画(2021 年度～2022 年度)

4. 1　令和3年度の成果

DIVP®コンソーシアム全体の研究開発ロードマップとして、AD/ADAS 評価に使用する環境モデル・評価シナリオの組合せをシナリオパッケージとして定義し、令和 4 年度末までの 2 ヵ年計画を立案、当該計画に沿ってシミュレーション環境の構築と一致性検証を実施した。

また、ユーザ利用価値向上に向けて、プラットフォーム接続性強化、シナリオツール機能拡張を行い、AD-URBAN プロジェクトとの協業で実施した「仮想空間を用いた自己位置推定・認識機能の評価」を通して、DIVP®の活用価値を実証できた。



出所：学校法人幾徳学園　神奈川工科大学

Figure 9 プロジェクト成果の関係

■シナリオパッケージ構築

計測技術としての進展、モデル化の為の計測プロセスの標準化により、環境モデル、空間描画（電波伝搬）モデル、センサモデルの拡張が進展し、アセスメントパッケージ 24 件、お台場センシング弱点シナリオパッケージ 13 件のモデル化が完了（次年度も継続実施予定）。

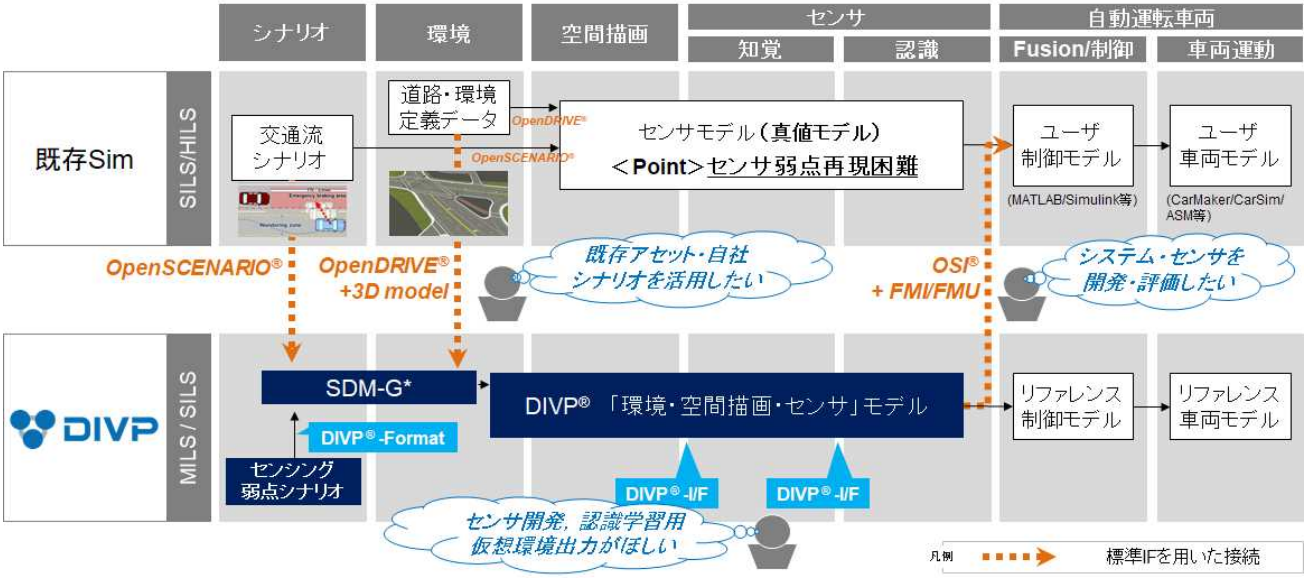
出所：学校法人幾徳学園　神奈川工科大学

Figure 10 DIVP®のシナリオパッケージ

■プラットフォーム接続性強化

DIVP®を活かす為の入力となるシナリオとの接続性、出力となるADシステムとの接続性の確保にむけて、共に国際的な標準I/Fへの対応が達成できた。

- シナリオ（入力側）：ASAM-OpenDRIVE/OpenSCENARIO対応
- ADシステム（出力側）：ASAM-OSI、FMI/FMU、MATLAB/Simulink対応、ユーザ使用ツールへの幅広い対応が可能となった

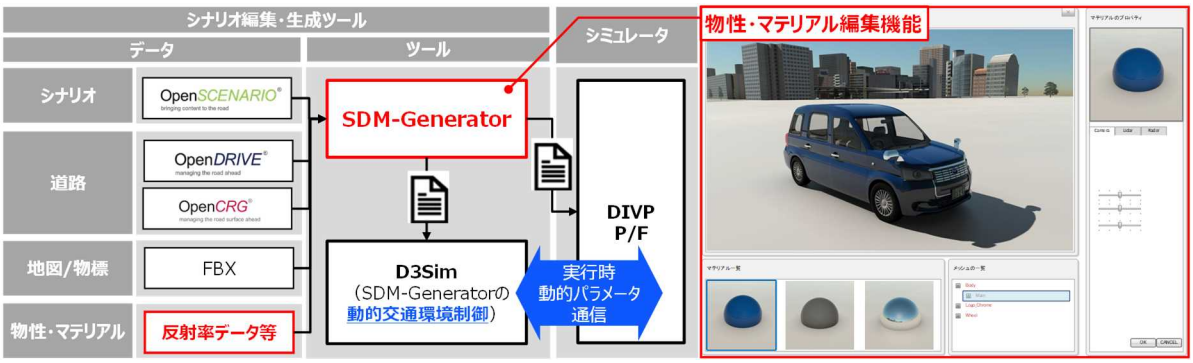


出所：学校法人幾徳学園　神奈川工科大学

Figure 11 DIVP®プラットフォームの接続性

■シナリオツール機能拡張

シナリ編集・生成ツール（SpaceDesignModel-Generator）の機能を拡張し、新規性の高い物性・マテリアル結合機能を開発した、また、静的／動的な交通環境生成機能に加え、他の既存シミュレータとの接続を可能とする柔軟なアーキテクチャを構築した（次年度も継続開発予定）。



出所：学校法人幾徳学園　神奈川工科大学

Figure 12 SDM-Generator のアーキテクチャイメージ

■仮想空間を用いた認識限界の検証

AD-URBAN プロジェクトの AD システムと、DIVP®のシミュレータを接続し、認識限界の検証を行った。

実車評価では容易に変更できない環境条件（天候、降雨量等）を、シミュレーションのパラメータとして変更させる事で、認識限界の指標を得る事ができ、DIVP®の有効性が実証できた。

逆光による信号認識不調の再現

雨天による信号認識不調の再現

ビル反射による信号認識不調の再現

出所：学校法人幾徳学園　神奈川工科大学

Figure 13 DIVP®を用いた認識限界の検証

■成果物一覧

令和 3 年度の成果物を下表に纏める。

Table 3 令和 3 年度成果物

分類		モデル・機能	備考
環境モデル	マップ 3D モデル	一般道（お台場）	有明地区
		一般道（かすれ白線）	
	物標 3D モデル	普通車両（10 台）	
		大型車両（4 台）	
		2 輪車	
		歩行者	歩行アニメーションにも対応
		段ボール	
		工事看板、作業灯	
		サッカーボール	
		マンホール	
	材料反射率	濡れた路面（アスファルト）	
		カラーチャート（赤外線領域含む）	
		グレイチャート（赤外線領域含む）	
	光源	信号機	
空間モデル	カメラ	赤外線領域対応	
		水たまり再現	
		ヘッドライト配光特性（TypeA）対応	
	ミリ波	降雨減衰再現	
	LiDAR	センサ面雨滴付着再現	
センサモデル	カメラ	ローリングシャッター仕様検討	次年度検証実施
		赤外線領域仕様検討	次年度検証実施
	ミリ波	TD-MIMO 方式対応	
	LiDAR	Medium Range LiDAR 追加	
認識モデル	ミリ波	クラスタリングアルゴリズム対応	
		トラッキングアルゴリズム対応	
Sim.PF	標準 I/F 等	MATLAB/Simulink 対応	
		FMI/FMU 対応	
	Sim.実行	高速化（マルチ GPU レンダリング）対応	
		クラウド化対応	次年度継続開発
	Viewer	Web ブラウザ（WebGL）対応	
走行環境生成	標準 I/F 等	OpenDRIVE、OpenSCENARIO のインポート/エクスポート対応	
		FBX のインポート/エクスポート対応	
	3D 走行環境生成	OpenDRIVE データからの道路モデル作成機能対応	
		路面標識、道路標識、建造物等の配置機能対応	
		物性・マテリアル編集機能対応	
	シナリオ生成	論理シナリオ対応（イベント/判定条件考慮した具体シナリオ生成）	次年度継続開発
シナリオ	アセスメントパッケージ	NCAP 検証シナリオ	
		ALKS 検証シナリオ	
	お台場センシング弱点パッケージ	反射特性関連検証シナリオ	高反射路面、黒革歩行者、かすれ白線等
		光源関連検証シナリオ	逆光、夜間ヘッドライト等
		降雨関連検証シナリオ	降雨空間減衰等（一部次年度継続開発）

出所：学校法人幾徳学園　神奈川工科大学

5. 各パートごとの成果

5. 1 「A1. 走行環境モデルの構築」のための研究開発

5. 1. 1 「A1. 走行環境モデル構築」（三菱プレシジョン株式会社）

本研究では、仮想環境における自動運転システムの安全性を評価するための検証用走行環境モデルを構築する。

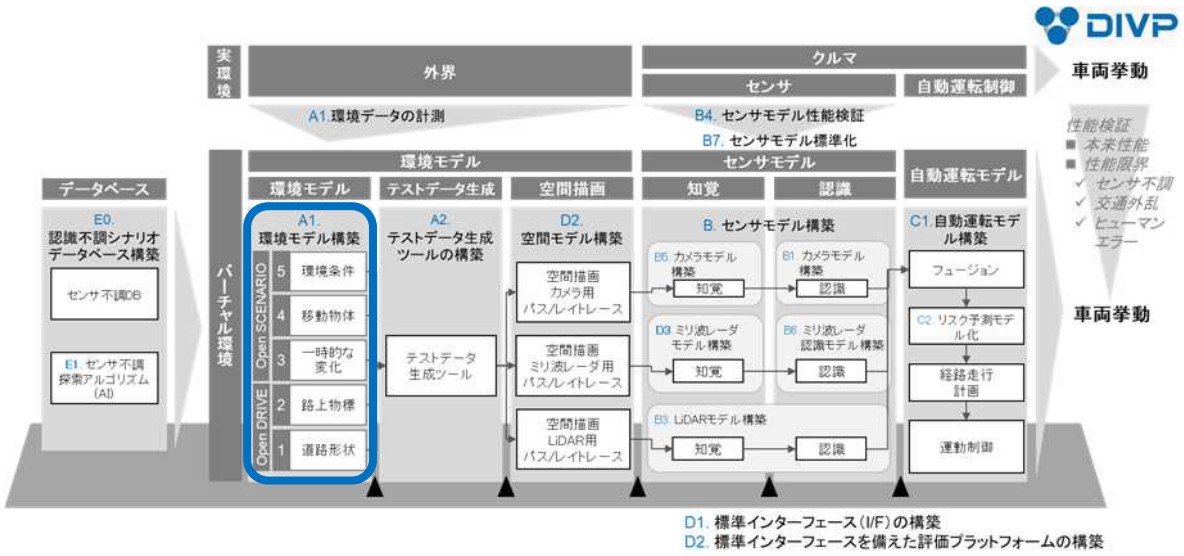


Figure 14　本研究の位置付け

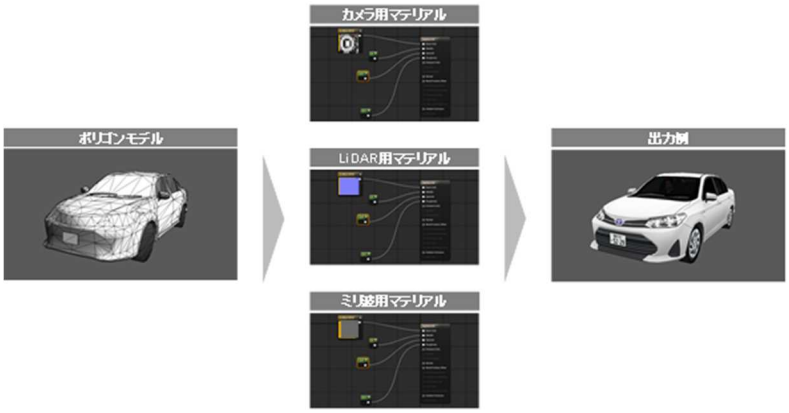
■ 事業目的

カメラ、ミリ波レーダ、LiDAR において検証用となる走行環境モデルを作成する。

■ 事業概要

検証用となる環境モデルについて、以下の実物を測定し作成する。

- Jtown（特異環境試験場、多目的市街地）
- 高速道路
- 一般道路
- 物標（自車、他車、自転車、ダミー人形等）
- 不調条件拡張（大型車両、特殊車両、歩行者、濡れた路面等）
- Virtual-CG 構築(臨海副都心、信号、普通車両、バスなどの交通参加者等)



出所：三菱プレシジョン（株）

Figure 15 走行環境モデル構築例

■ 実施計画

事業項目　A１パート	2018年度	2019年度				2020年度				2021年度				2022年度			
	第3四半期 第4四半期	第１四半期	第２四半期	第３四半期	第４四半期	第１四半期	第２四半期	第３四半期	第４四半期	第１四半期	第２四半期	第３四半期	第４四半期	第１四半期	第２四半期	第３四半期	第４四半期
	12 1 2 3	4 5 6 7 8 9 10 11 12 1 2 3				4 5 6 7 8 9 10 11 12 1 2 3				4 5 6 7 8 9 10 11 12 1 2 3				4 5 6 7 8 9 10 11 12 1 2 3			
① 事前検証用走行環境の実測																	
㋑ 検証用走行環境データ調査																	
㋺ 検証用走行環境データ実測																	
② 事前検証・基本検証用走行環境モデル構築(地図データ、物標)																	
㋑ 物標モデル(アセット)作成																	
㋺ 地図モデル(アセット)作成																	
③ 基本検証用走行環境モデル構築(シナリオ込み)																	
㋑ 道路ネットワーク(OpenDRIVE)作成																	
㋺ 基本検証用走行シナリオ作成																	
④ 不調条件データ実測																	
㋑ 検証用走行環境データ調査																	
㋺ 検証用走行環境データ実測																	
⑤ 不調評価用走行環境モデル構築																	
㋑ 不調評価用(アセット)作成																	
㋺ 不調評価用シナリオ作成																	
⑥ 高速道路 環境モデル＋シナリオ																	
㋑ 検証用走行環境データ調査																	
㋺ 検証用走行環境データ実測																	
㋩ 地図モデル(アセット)作成																	
㋥ 道路ネットワーク(OpenDRIVE)作成																	
㋭ 高速道路シナリオ作成																	
⑦ 交差点・一般道 環境モデル＋シナリオ																	
㋑ 検証用走行環境データ調査																	
㋺ 検証用走行環境データ実測																	
㋩ 地図モデル(アセット)作成																	
㋥ 道路ネットワーク(OpenDRIVE)作成																	
㋭ 交差点・一般道シナリオ作成																	
⑧ 不調条件拡張のための環境モデル																	
㋑ 不調条件拡張のための環境モデル検討																	
㋺ 大型車両等物標モデル(アセット)作成																	
㋩ 歩行者等物標モデル(アセット)作成																	
㋥ 濡れた路面物標モデル(アセット)作成																	
㋭ 積雪路面物標モデル(アセット)作成																	
⑨ Virtual-CG構築のための環境モデル																	
㋑ Virtual-CG構築検討																	
㋺ 検証用走行環境データ実測																	
㋩ 地図モデル(アセット)作成																	
㋥ 交通参加者等物標モデル(アセット)作成																	
㋭ 道路ネットワーク(OpenDRIVE)作成																	
㋬ 簡易交通流シナリオ作成																	

(1)令和3年度の成果(まとめ)

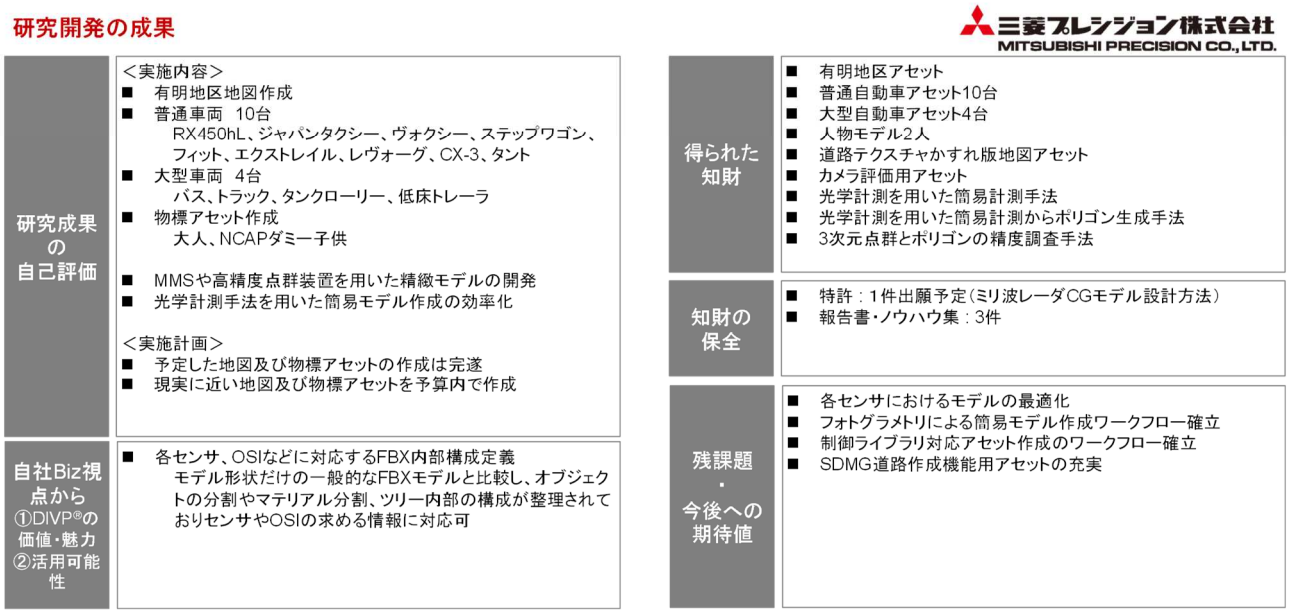


Figure 16 研究開発の成果

本研究では、仮想環境における自動運転システムの安全性を評価するための検証用走行環境モデルを構築する。検証用となる走行環境モデルについては、MMS や高精度点群取得装置を用いた精緻なモデルや光学系測定手法などを用いた簡易モデルを作成した。

(2)令和3年度の成果

⑧ 不調条件拡張のための環境モデル

物標モデルとして、大型自動車、人物アセットを作成した。作成した不調条件拡張のための環境モデルを Table 4 に示す。作成した物標モデルを Figure 17 に示す。

Table 4 作成した不調条件拡張のための環境モデル

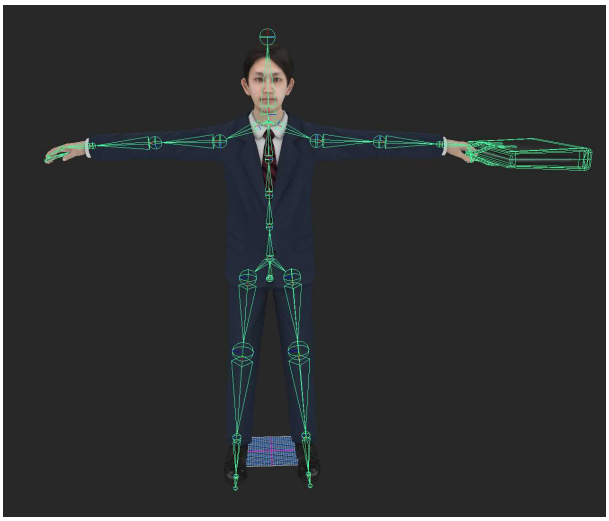
	2021 年度
物標モデル	■ トラック ■ タンクローリー ■ 低床トレーラ ■ 人物モデル(大人) ■ NCAP ダミー子供 ■ NCAP ダミーPTW ■ NCAP ダミーE-Scooter

出所:三菱プレシジョン(株)

出所:三菱プレシジョン(株)

Figure 17 作成した物標モデル

人物モデル（大人）に関して、Figure 18 のような手荷物や Table 5 に示す多様な動作（アニメーション）を付加しており、様々なシナリオで活用できる。



出所：三菱プレシジョン（株）

Figure 18　手荷物（スマフォとカバン）を持った人物モデル

Table 5　作成した人物モデルの動作一覧

No	動作
1	歩行
2	走行
3	立ち止まり[右振り向き確認]
4	立ち止まり[左振り向き確認]
5	スマホ見ながら歩行

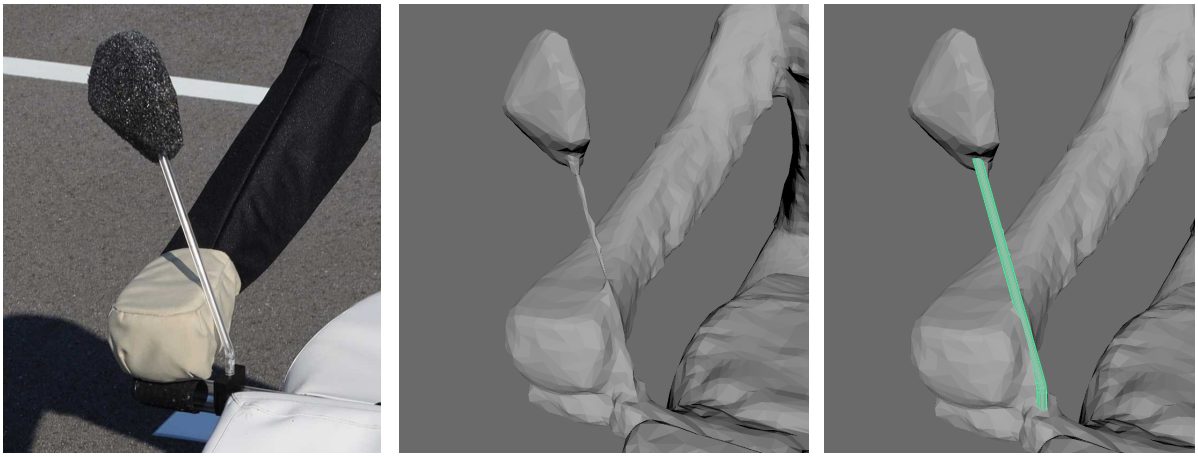
出所：三菱プレシジョン（株）

NCAP ダミー子供、PTW 及び e-Scooter は、光学映像撮影装置を用いて物標をさまざまな角度から撮影し、そのデータを解析、統合しモデル化を実施するフォトグラメトリ技術を活用して作成した。フォトグラメトリ技術は、組み立て毎に形状が変形する NCAP 人形やレーザー測定が難しい物標などの物標モデルの作成効率化が期待できる手法である。一つのモデル化する物標に対して、以下に示すように周囲から光学映像撮影装置にて 100 枚程度画像を取得し、その結果を基にメッシュ化し、モデル化を行う。

出所：三菱プレシジョン（株）

Figure 19　光学系測定手法を用いた簡易モデル作成（右：計測の様子、中：計測からメッシュ化、左：メッシュからモデル化）

ただし、この手法では複数画像の特徴点を紐づけてモデル化を行うため、特徴点を得られない、もしくは、紐づけできない個所のモデル化ができない。例えば、光沢や半透明の箇所、細長い形状や薄い形状、撮影が難しい奥側の個所などのモデル化は難しい。Figure 20 では、細長い形状のサイドミラーのポール部のモデル化が本手法では難しいため、別途計測した情報を基にモデルを作成し置き換えた例である。本手法は、ある程度は精度良く簡単にモデルを作成できる反面、苦手な個所や形状も多く、撮影時に注意を払う必要がある。



出所：三菱プレシジョン（株）

Figure 20　フォトグラメトリ手法を用いたモデル作成の課題（右：実際の形状、中：計測からメッシュ化、左：CG モデルの置き換え）

19 年度にレーザー計測を基に作成した NCAP ダミー大人と本年度フォトグラメトリ手法で作成した NCAP ダミー子供について比較を行った。組み立てる度に形状が変わるためモデル化した際の精度保証が難しいNCAPダミー人形などでは本年度のフォトグラメトリ手法により Table 6 に示すように約 20%と大幅な作成効率化が図れた。ただし、レーザー測定については、モデル化する際に 1cm 以内の誤差で作成可能であるがフォトグラメトリ手法では、撮影する環境に大きく影響されるため概ね数 cm 以内の誤差でのモデル化となる。NCAP ダミー子供では代表点を計測したところ、概ね 1cm 以下の誤差であった。

Table 6　各手法による作成時間

測定手法	レーザー測定	フォトグラメトリ
モデル名	NCAP ダミー大人	NCAP ダミー子供
測定時間	60Hr	2 Hr
モデル化作成期間 （形状調整、材質分割、アニメーション作成など）	200Hr	55Hr

出所：三菱プレシジョン（株）

⑨ Virtual-CG 構築のための環境モデル

①で実施した実測を基に臨海副都心の有明北地区、及び、有明南地区について地図モデル、及び、お台場の Virtual-CG 化に向けた交通参加者となる普通車両を作成した。作成した Virtual-CG 構築のための環境モデルを Table 6 に示す。

Table 7　Virtual-CG 構築のための環境モデル

	2021 年度
地図モデル	■ 臨海副都心の有明北地区、及び、有明南地区
物標モデル	■ 普通車両　10 台 ■ 大型車両（バス）　1 台

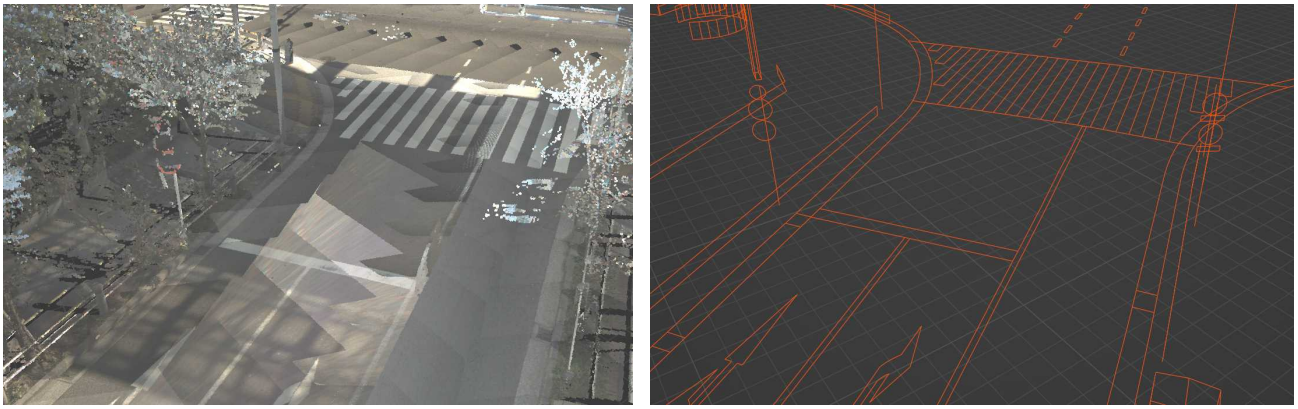
出所：三菱プレシジョン（株）

作成した地図モデルのエリアを Figure 21 に示す。

出所：三菱プレシジョン（株）

Figure 21　臨海副都心の環境モデル作成エリア

昨年度、MMS 計測車両で取得した点群データを活用して台場、青海地区の環境モデルを作成した。その際、一般交通環境下では駐車車両などにより取得した道路の点群データに欠損が多く、計測データを活用したマップの作成が困難であった。本年度は、取得した点群の欠損を補完する目的で、Figure 22 のように道路の点群データのベクトル化を行った。そのベクトルデータをリファレンスとすることで明確に道路や道路周辺地物の形状が把握できるためモデルを作成、配置の効率的に行えることができた。



出所：三菱プレシジョン（株）

Figure 22　臨海副都心の計測データ（左：点群データ、右：ベクトルデータ）

作成したベクトルデータを基に作成した臨海副都心の地図モデルを Figure 23 に示す。

出所：三菱プレシジョン（株）

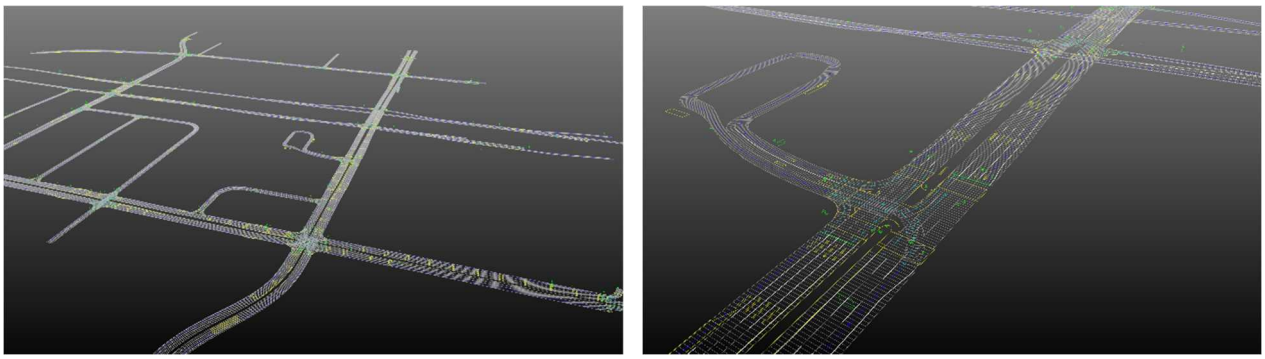
Figure 23　臨海副都心の地図モデル（左：東京ビッグサイト付近、右：東京都水の科学付近）

また、有明北、南地区における信号機やバス停などの道路周辺地物を Figure 24 に示す。

出所：三菱プレシジョン（株）

Figure 24　臨海副都心の道路周辺地物

作成した地図モデルに対して道路ネットワークを作成した。作成した道路ネットワークを Figure 24 に示す。



出所：三菱プレシジョン（株）

Figure 25　臨海副都心の道路ネットワーク（左：東京ビッグサイト付近、右：国際展示場駅付近）

普通車両については、本プロジェクトの初期に一致性を確認、検証する目的として、mm 精度の計測機を用いて計測データを基にモデルを作成した。今期作成した物標モデルは、Virtual-CG 構築における実際の交通環境の模擬を行う観点から図面やカタログを代表的な寸法における精度を確保して作成をしている。また、本プロジェクトで活用する物標モデルは、マテリアルを詳細に模擬する観点んから、模様などをテクスチャで表現するのでなく、Figure 26 に示すように材料が異なるパーツ毎に形状を分ける必要がある。

出所：三菱プレシジョン（株）

Figure 26　材料毎に物標モデルのパーツ分割

作成した普通車両を Figure 27、大型車両を Figure 28 に示す。

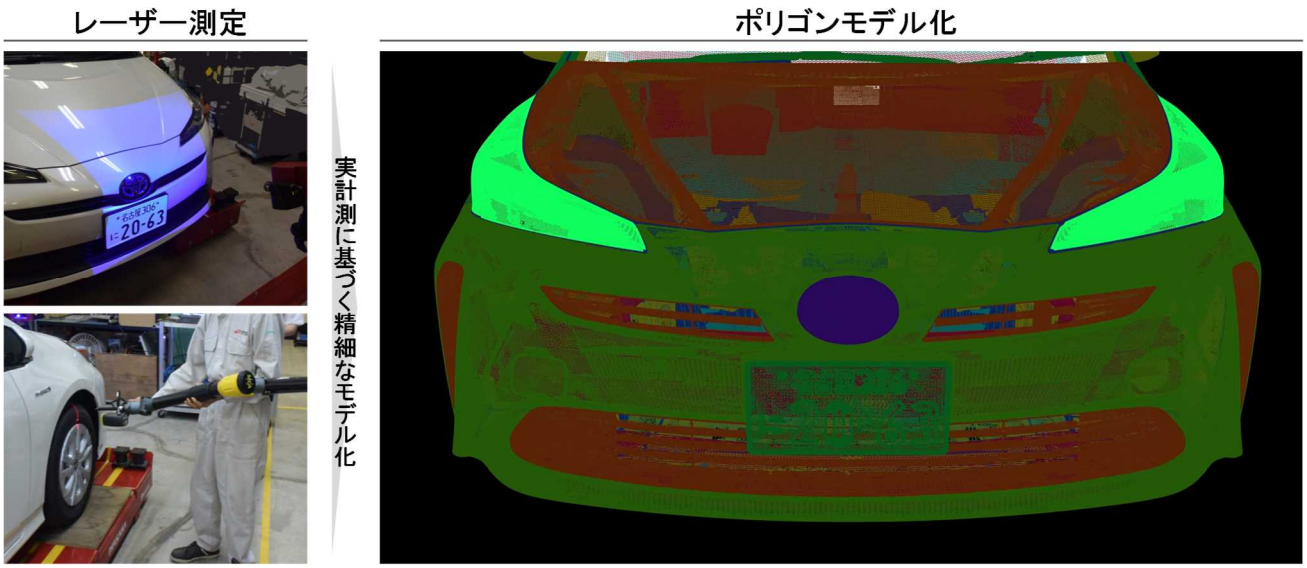
出所：三菱プレシジョン（株）

Figure 27　普通車両モデル

出所：三菱プレシジョン（株）

Figure 28　大型車両モデル

以下に示す 19 年度に作成したレーザー測定を基にした精緻な車両モデルと本年度作成した図面情報を基にした車両モデルの一致性を確認した。

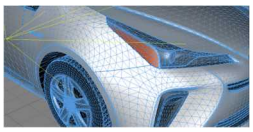


出所：三菱プレシジョン（株）

Figure 29　実測に基づく精緻な車両モデル

レーザー測定を基にした精緻な車両モデルのポリゴン密度を段階的に変更し 3 つの詳細度のモデルをそれぞれ Hi、Mid、Low モデルとして作成した。また、図面情報より作成したモデルを ExLow モデルとした。各モデルの諸元を Table 8 に示す。

Table 8　モデルの諸元

モデル名	Hi モデル	Mid モデル	Low モデル	ExLow モデル
情報	測定情報	測定情報	測定情報	カタログ情報
ポリゴン数	2,000 万ポリゴン	500 万ポリゴン	50 万ポリゴン	20 万ポリゴン
ファイルサイズ	530MB	160MB	20MB	7MB
表示例				

出所：三菱プレシジョン（株）

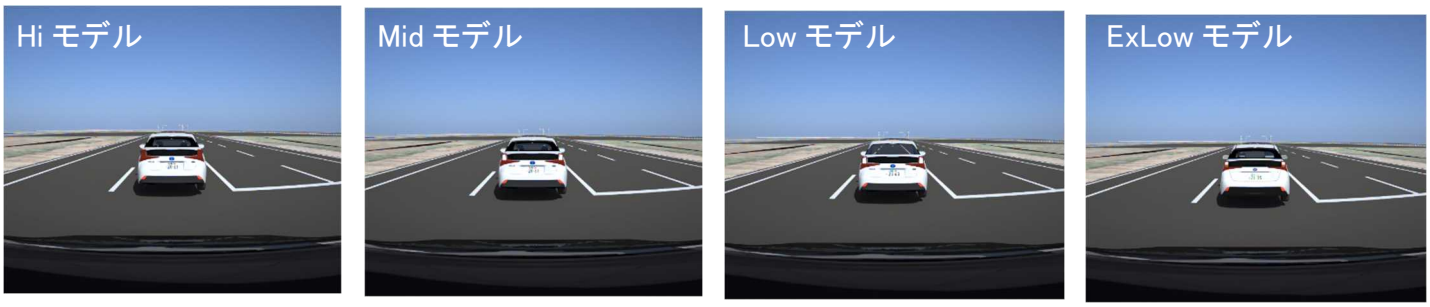
まず、車両のカタログ情報と各モデルの計測値を比較した。比較した計測値の表を以下に示す。ExLow モデルもレーザー計測モデルと遜色なく概ね 1cm 以内の誤差範囲内でモデルを作成できていることが確認できた。

Table 9　カタログ情報と各モデルの計測値の比較表（単位:m）

モデル名	カタログ情報	Hi モデル	Mid モデル	Low モデル	ExLow モデル
LENGTH	4.575	4.574	4.574	4.574	4.577
WIDTH	1.760	1.756	1.765	1.765	1.758
HEIGHT	1.470	1.486	1.486	1.486	1.483
WheelBase	2.700	2.699	2.700	2.700	2.700
Front　Overhang	0.960	0.956	0.956	0.956	0.959
Rear　Overhang	0.915	0.917	0.917	0.917	0.919
TREAD FRONT	1.530	1.531	1.531	1.531	1.530
TREAD REAR	1.540	1.542	1.542	1.542	1.540

出所：三菱プレシジョン（株）

次に一致性が確認できている Hi モデルを基にして、その他のモデルにカメラセンサを活用して、センサと各モデルとの距離を 5、10、20m と変更し比較する。



出所：三菱プレシジョン（株）

Figure 30　車間距離 5[m]時の描画例

カメラ映像について Hi モデルの描画結果との各モデルの描画結果を、人の見た目に近い劣化具合を評価する指標である SSIM で比較した。SSIM で比較した結果を Table 10 に示す。SSIM は、0.98 以上で人の目で認識不可能とされ、ここでも ExLow モデルはレーザー計測モデルを基にした Mid、Low モデルと遜色のない結果が確認できた。

Table 10　SSIM による比較

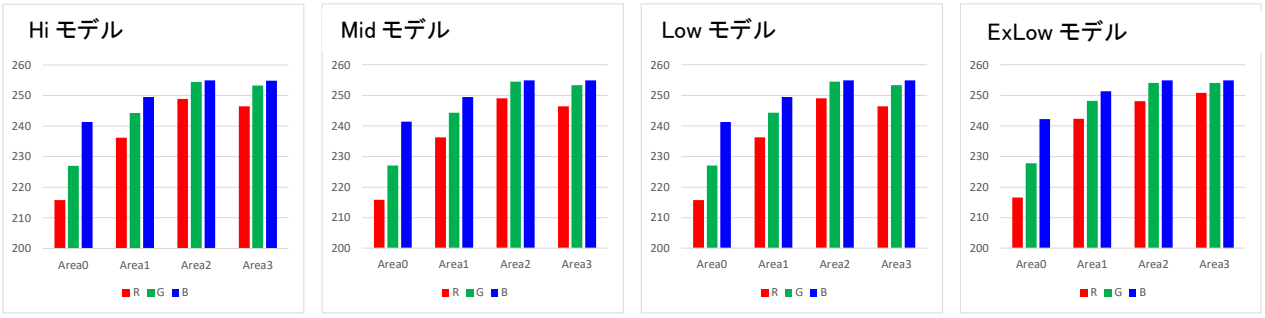
番号	車間距離[m]	モデル名	SSIM
1	5	Mid モデル	0.999573
2		Low モデル	0.998484
3		ExLow モデル	0.994826
4	10	Mid モデル	0.999815
5		Low モデル	0.999484
6		ExLow モデル	0.998166
7	20	Mid モデル	0.999937
8		Low モデル	0.999876
9		ExLow モデル	0.995040

出所：三菱プレシジョン（株）

次に車間距離 5m においてカメラ映像の Figure 31 に示す測定点の画素の値を各モデルで比較する。各モデルにおける測定点の画素値を Figure 32 に示す。レーザー計測を基に作成された Hi、Mid、Low モデルと図面を基に作成した ExLow モデルの画素値についても一致性が確認できた。

出所：三菱プレシジョン（株）

Figure 31　比較する測定点の位置



出所：三菱プレシジョン（株）

Figure 32　各モデルにおける測定点の画素値

(3)次年度以降の計画

⑧　不調条件拡張のための環境モデル

期間：2022 年 4 月　～　2022 年 12 月

内容：センサ認識不調の要因となる環境モデル（大型車両、特殊車両、歩行者、濡れた路面など）を作成する。

⑨　Virtual-CG 構築のための環境モデル

期間：2022 年 4 月　～　2022 年 12 月

内容：お台場の Virtual-CG 化に向けた環境モデル（普通車両などの交通参加者等）を作成する。

5. 1. 2 「A1. 走行環境モデル定義」（株式会社 SOKEN）

本研究では、センサシミュレーション精度を向上するための、反射特性データベースを構築する。

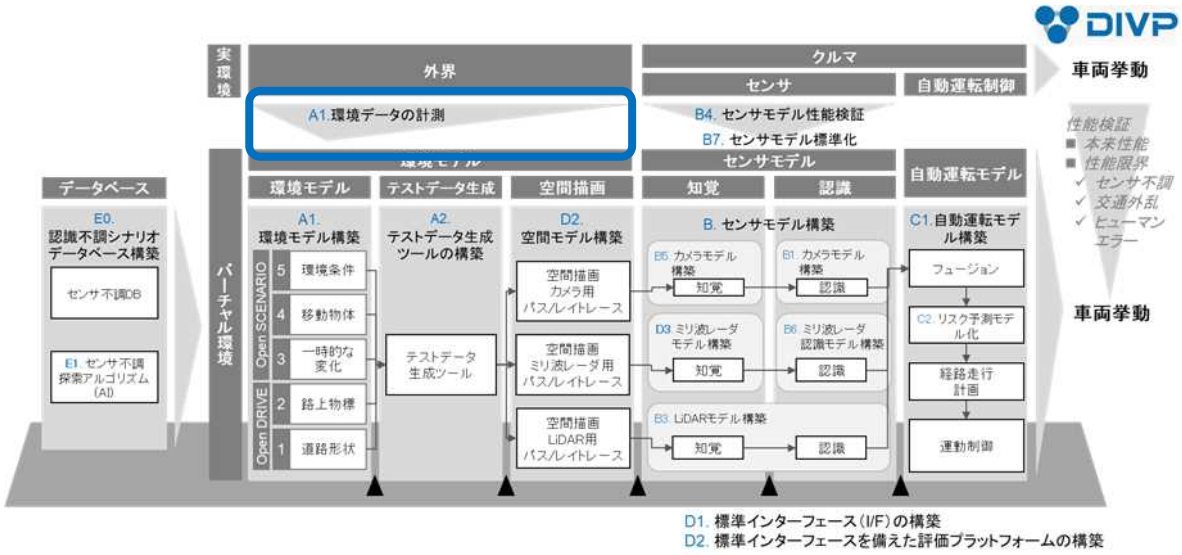


Figure 33　本研究の位置付け

■ 事業目的

センサの仮想環境で自動運転システムの安全性を評価するために、センサ物理モデル評価用の物体データベースを構築し、センサシミュレーション精度を向上することを目的とする。

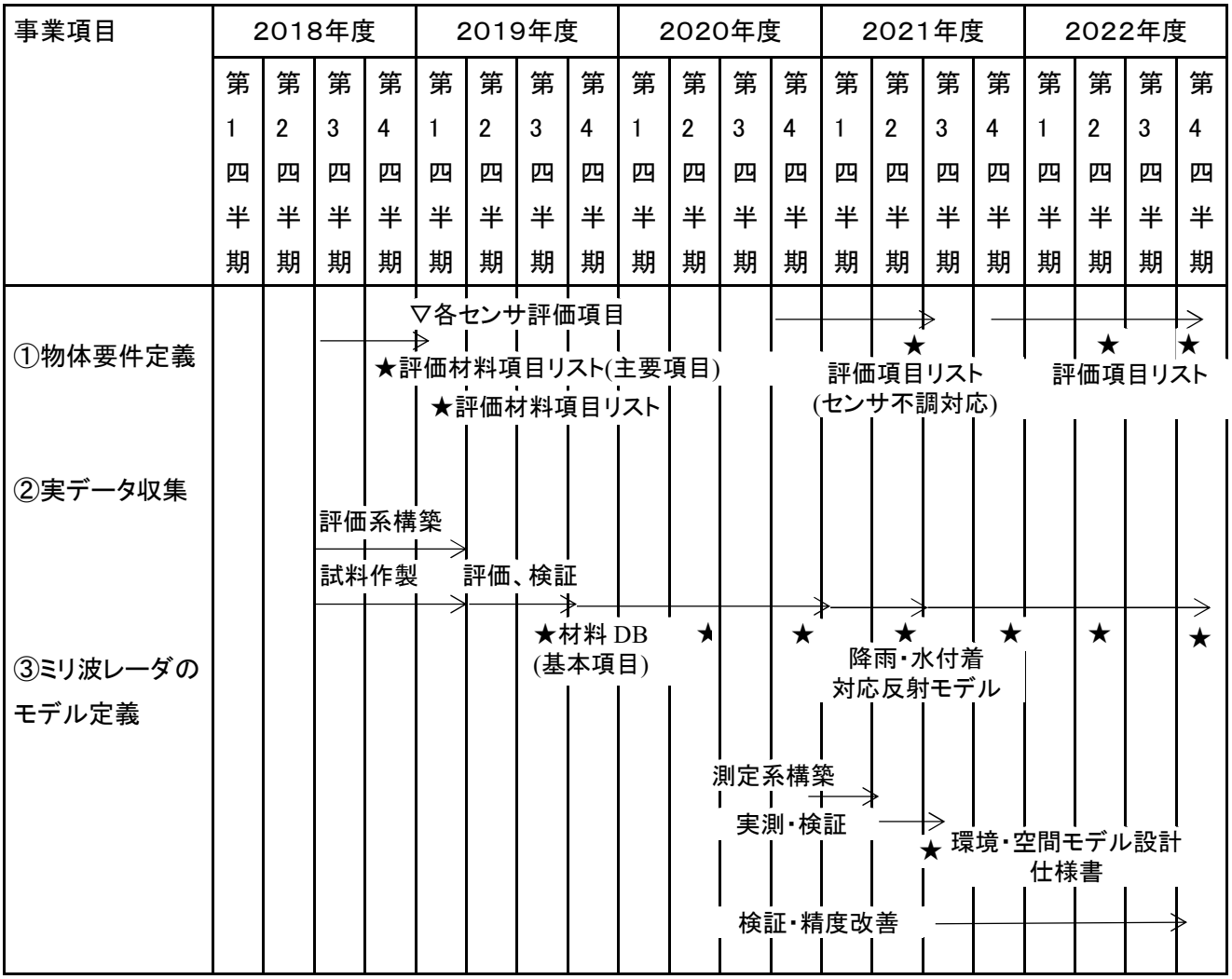
■ 事業概要

各センサ（ミリ波レーダ/カメラ/LiDAR）の電磁波波長における空間伝搬、物体での反射特性を実測評価し、シミュレーション精度を向上可能な物体の特性データベースを構築する。

特性データベースを反映して、各センサの電磁波波長の物理特性を再現可能な環境モデルを作成し、シミュレーション結果と実測結果を比較検証する。

■ 実施計画

▽インプット　　★アウトプット（成果物）



(1)令和3年度の成果(まとめ)

反射率モデルの改良により、各センサの不調現象を再現を可能とした
センサ種類拡張のための機能向上、他Sim連携に期待

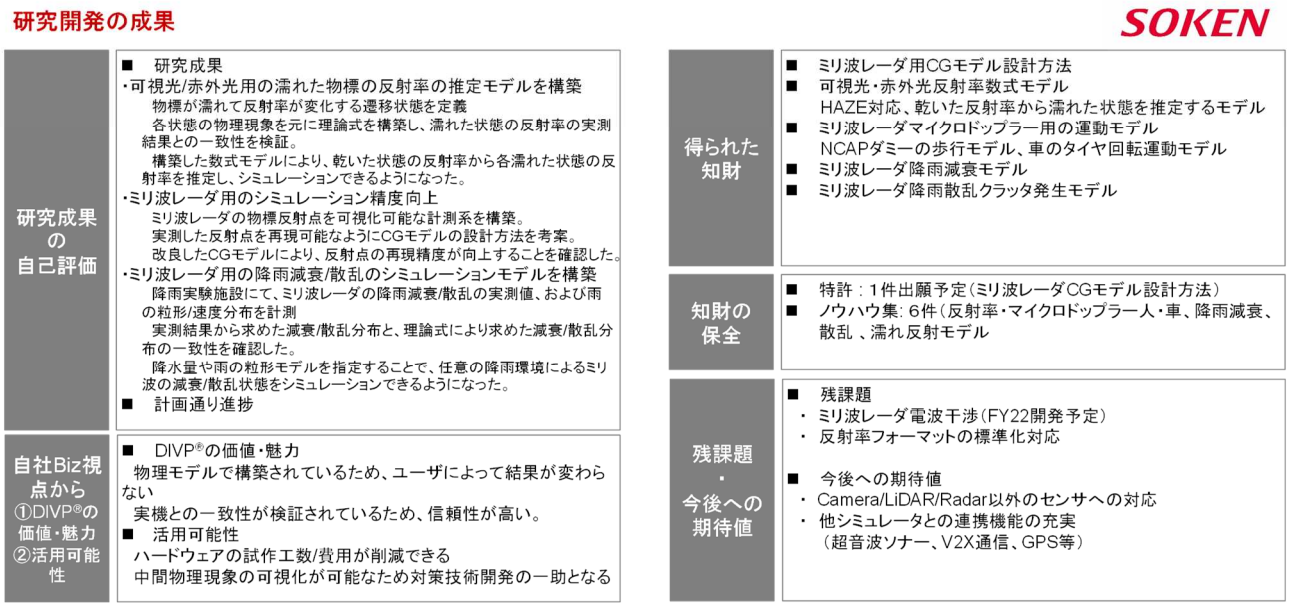


Figure 34 研究開発の成果

令和2年度までに、センサ物理モデルシミュレーション精度向上に必要となる評価材料及び反射特性の測定項目を定義し、定義した反射特性項目を測定可能な測定系の設計及び実機構築を行った。構築した測定系によってミリ波レーダ/カメラ/LiDAR の反射特性を計測し、開発したシミュレーションプラットフォームに提供した。

本年度は、各センサが苦手とする環境シーン(雨や夜間など)でのシミュレーションの実現を目指した。物標が濡れた時の反射率、夜間赤外線カメラ用の赤外線領域反射率、ミリ波レーダにおける降雨空間減衰・散乱率を計測した。また、CG モデルの各パーツに対して計測した反射特性を割り当てることで、シミュレーションで雨や夜間のセンサの苦手シーンを再現できるようにした。

(2)令和3年度の成果

① 物体要件定義

（ア）カメラ／LiDAR　濡れた物標状態定義

路面などの物標が雨に濡れると、色が暗くなることは一般的に知られている。従来技術として、Lekner と Dorf[1]によって、乾燥状態の反射率から濡れた状態の反射率を予想可能な数式モデルが提案されている。

Lekner と Dorf のモデル(L&D モデル)によれば、濡れた物標の反射率ρ_{d_wet}は乾燥状態の反射率ρ_{d_dry}から下式で求めることができる。

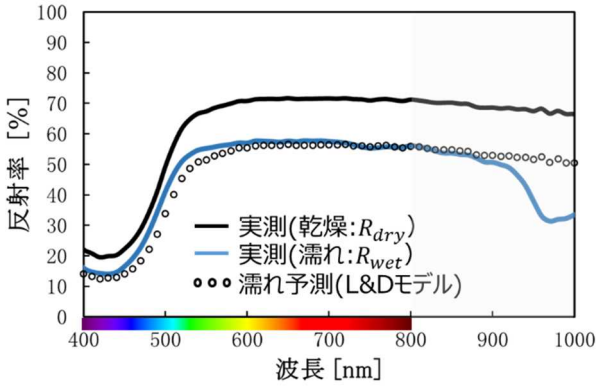
$$\rho_{d\_wet} = 1 - \frac{(1 - R_l)a_{wet}}{1 - p(1 - a_{wet})}$$

$$a_{wet} = \rho_{d_{dry}} \left(\left(1 - \rho_{d_{dry}}\right) \frac{1 - R_{ave}\left(\frac{n_s}{n_l}\right)}{1 - R_{ave}(n_s)} + \rho_{d_{dry}} \right)$$

ここで、pは水膜の裏面反射率、a_{wet}は水膜と材料表面の境界における光吸収率である。

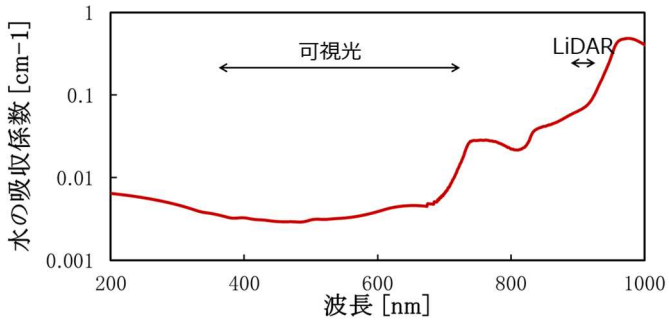
しかし、経験的に濡れた路面では、LiDAR の受光レベルが低下したり、対向車のヘッドライトが強く反射したりする現象が知られており、L&D モデルだけでは表現できないことが分かっている。

また、下図のように L&D モデルは赤外線領域で予測精度が悪化することが分かっている。これは水の吸収係数が、可視光領域ではほぼ無視できるレベルなのに対して、赤外線領域では吸収係数の影響が無視できなくなるからである。



出所：SOKEN, INC.

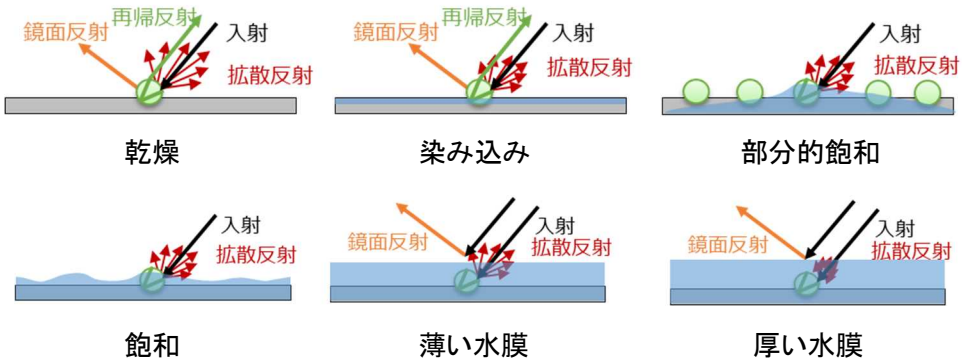
Figure 35　乾燥状態の反射率から濡れた状態の反射率の予測結果



出所：SOKEN, INC.

Figure 36　水の吸収係数の波長特性

そこで、下図に示すように新たに 5 段階の濡れた状態定義して、降雨によって物標が濡れていく状態遷移を乾燥状態含めて 6 段階で表現することとした。

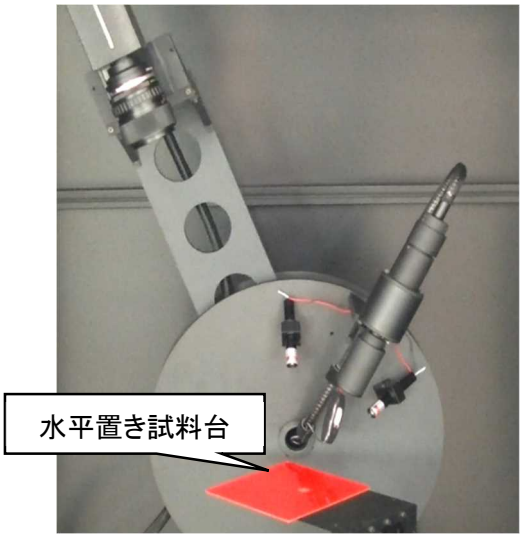


出所：SOKEN, INC.

Figure 37　物標の濡れた状態定義

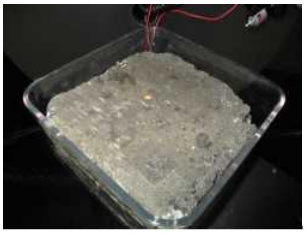
上記の 6 段階の濡れた状態で反射率の計測を行った。

本プロジェクトで構築した反射率の計測系は、試料を水平設置できるように設計したため、濡れた状態でも計測が可能である。水槽に測定対象試料を入れ、水の注入量を変えることで、濡れた状態を調整して計測を行った。



出所：SOKEN, INC.

Figure 38　反射率測定装置



(a)アスファルト乾燥状態

(b)アスファルト濡れた状態

Figure 39　計測サンプル(路面アスファルト)

複数の測定試料を計測した結果をもとに、濡れた状態と反射成分の関係を下表としてまとめた。

第一段階として、材質が濡れると水が材質表面から染み込んでいく。この状態では、色が暗くなったように観測され、反射成分としては拡散反射成分が低下している。この変化は、前述した L&D モデルによって予測が可能である。

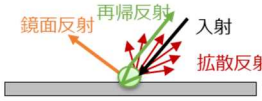
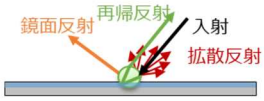
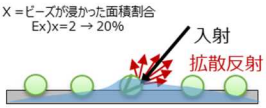
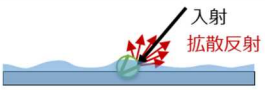
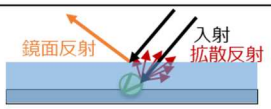
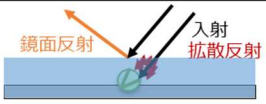
さらに水が染み込んでいくと第二段階の飽和状態になる。材質内部に水が飽和して、これ以上染み込まない状態となり、材質表面に水滴が表れ始める。水滴に当たった光は、水滴の曲面の影響を受けて、鏡面反射の方向がオフセットし、本来の鏡面反射方向では、鏡面反射成分が観測されなくなる。また、再帰反射はプリズムパターンやプリズムビーズで発生しているが、水滴の影響により反射方向が変わってしまい、LiDAR では受信できなくなってしまう。そのため、飽和状態では鏡面反射、再帰反射成分が観測されなくなり、拡散反射成分のみが観測される状態となる。厳密は、オフセットした鏡面反射成分と再帰反射成分が存在するが、センサ入力への影響が軽微であるため、無視するものとした。

また、第一段階のしみこみ状態と、第二段階の飽和状態の間に、徐々に鏡面反射・再帰反射が減少していく段階が存在していることが LiDAR の走行テスト結果から分かった。この状態を部分的な飽和状態と定義した。材質表面からしみだしてくる水滴の分布は離散的であるため、LiDAR のレーザースポット面積の一部にのみ水滴が存在する場合、水滴の占有面積割合に応じて鏡面反射・再帰反射が減少する状態と定義した。

さらに水が増えると、材質の表面に水滴がくっついて、表面に薄い水膜が張った状態になる。水膜の表面はなめらかであるため、水膜の表面で鏡面反射が発生するようになる。この時の鏡面反射は、水膜の表面での反射が支配的であるため、水の屈折率による鏡面反射特性を代入するものとした。

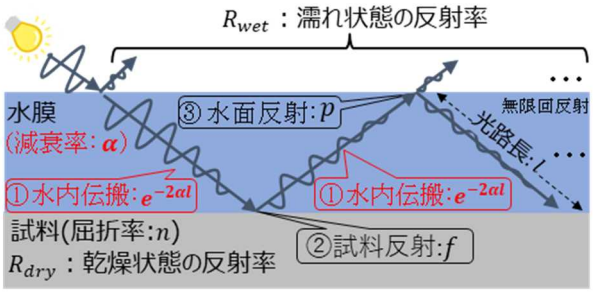
また前述したように赤外領域では水の吸収係数が無視できなくなるため、L&D モデルを拡張し、水の吸収特性を考慮した、予測モデルを導出した。

Table 11　物標の濡れた状態と反射成分の関係

		拡散反射	鏡面反射	再帰反射
Level 0 乾燥		材質の拡散特性	材質の鏡面特性	材質の再帰特性
Level 1 しみこみ 濡れた場所が暗くなる状態		レベルが低下	↑	↑
Level 1.x 部分的飽和状態 表面から水がしみ出てくる レーザスポット面積内の一部の 再帰反射ビーズが水に浸かる		↑	面積割合に比例して 鏡面反射が減衰	面積割合に比例して 再帰反射が減衰
Level 2 飽和状態 表面から水がしみ出てくる 再帰反射ビーズが水に浸かる		↑	鏡面反射が消失 (=拡散反射)	再帰反射が消失 (=拡散反射)
Level 3 薄い水膜 1~2mmの水膜が張っている		↑	水の鏡面反射が発生	↑
Level 4 厚い水膜 数mm厚の水膜が張っている		赤外光領域で レベルがさらに低下	↑	↑

出所：SOKEN, INC

下図に、材質表面に水膜が張った状態の光の反射および各パラメータを定義した。



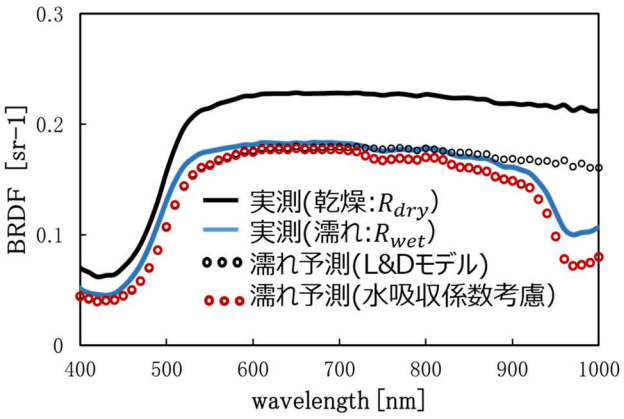
出所：SOKEN, INC.

Figure 40　水膜が張った状態のパラメータ定義

従来モデルで無視していた水内伝搬による減衰項$e^{-2\alpha l}$を考慮して、導出した予想モデルは下式となる。

$$R_{wet} \approx (1-r)\sum_{k=0}^{\infty} p^k f^k(n, R_{dry})\, e^{-2k\alpha l}$$

本式を用いて、乾燥状態の反射率から濡れた状態の反射率を下図に示す。従来再現できていなかった、赤外線領域での反射率の落ち込みを、水の吸収係数を考慮して導出した数式モデルを用いることで再現できていることが分かる。



出所：SOKEN, INC.

Figure 41　乾燥状態の反射率から濡れた状態の反射率の予測結果

路面や白線の乾燥状態の実測反射率から、水の吸収係数を考慮した数式を用いて濡れた反射率データを、濡れた状態毎に算出し、反射率データとして提供した。

② 実データ収集

(ア) ポータブル評価系構築

下図は、一般財団法人日本自動車研究所の保有設備である、自動運転評価拠点 Jtown の多目的市街地の路面状態を撮影したものである。2019 年春にアスファルトを敷き直したため、2019 年 8 月時点では路面の色が暗いが、徐々に色が明るく変化していっていることが見て取れる。このような材料反射率の経年変化を、現在の反射率測定系では再現できないため、シミュレーションと実測の一致性の誤差要因の一つとなっている。

出所：SOKEN, INC.

Figure 42 路面状態の経年変化

そのため、実際の実験を行った日時・場所において、現地現物の反射率の計測を行うことが必要である。そこで可視光用及び赤外光の再帰反射特性用の 2 種のポータブル反射率計測器を導入した。下図に示す、昨年度までに構築および精度検証済みであるフルスペックの反射率計測器の計測結果と比較することで、精度検証を行った。

出所：SOKEN, INC.

Figure 43 可視光/赤外光の反射特性測定器

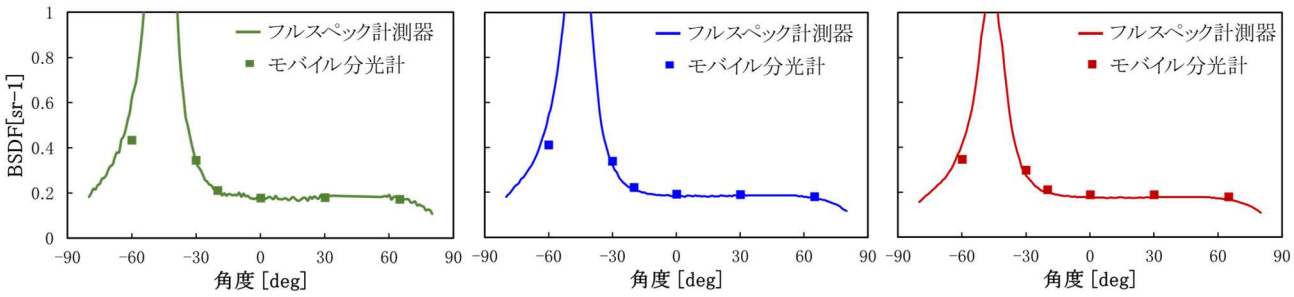
・メーカー　BYK-Gardner
・型式　　BYK-mac color

主な仕様		
	反射率測定範囲	0～400%
	スペクトルレンジ	400～700nm
	スペクトル間隔	10nm
	測定角度	-15, 15, 25, 45, 75, 110度
	寸法	218×81×147mm
	重量	約1.3kg

出所：SOKEN, INC.

Figure 44 ポータブル分光計

下図は、上記ポータブル分光計で白色塗装板の反射特性を計測した結果である。比較として、フルスペック計測器で同試料の反射特性を計測した結果を実線で示してある。モバイル分光計での測定結果は、フルスペック計測器の測定精度である±5%以内に収まっている。



(a) 440nm　(b) 540nm　(c) 700nm

出所：SOKEN, INC.

Figure 45 ポータブル分光計の測定精度検証結果

LiDAR 使用波長である 905nm の再帰反射を計測可能なポータブル計測器が存在しなかったため、隣接波長の 932nm で再帰反射が計測可能な RoadVista 932 Vision の測定波長を 905nm に変更した。

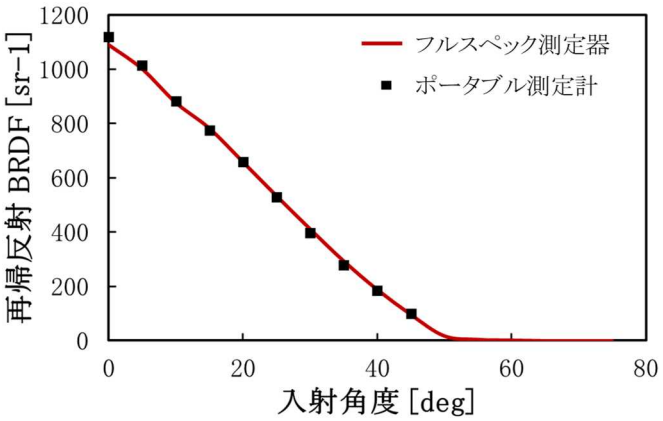
・メーカー　RoadVista
・型式　932Handheld Retroreflectometer
Model932Vision(Customize)

主な仕様		
	反射率測定範囲	0～10000%
	スペクトルレンジ	905nm (カスタマイズ) (半値全幅HPBW:10nm)
	測定角度範囲	-45～45度
	寸法	380×115×325mm
	重量	約2.2kg

出所：旭光通商株式会社

Figure 46 ポータブル再帰反射測定計

下図は、上記ポータブル再帰反射測定計で、道路標識に用いられる再帰反射シート（3M 社製 4095）の再帰反射の入射角度特性を計測した結果である。測定波長は 905nm である。比較として、フルスペック計測器で同試料の反射特性を計測した結果を実線で示してある。ポータブル再帰反射測定計での測定結果は、フルスペック計測器の測定精度である±5%以内に収まっている。



出所：SOKEN, INC.

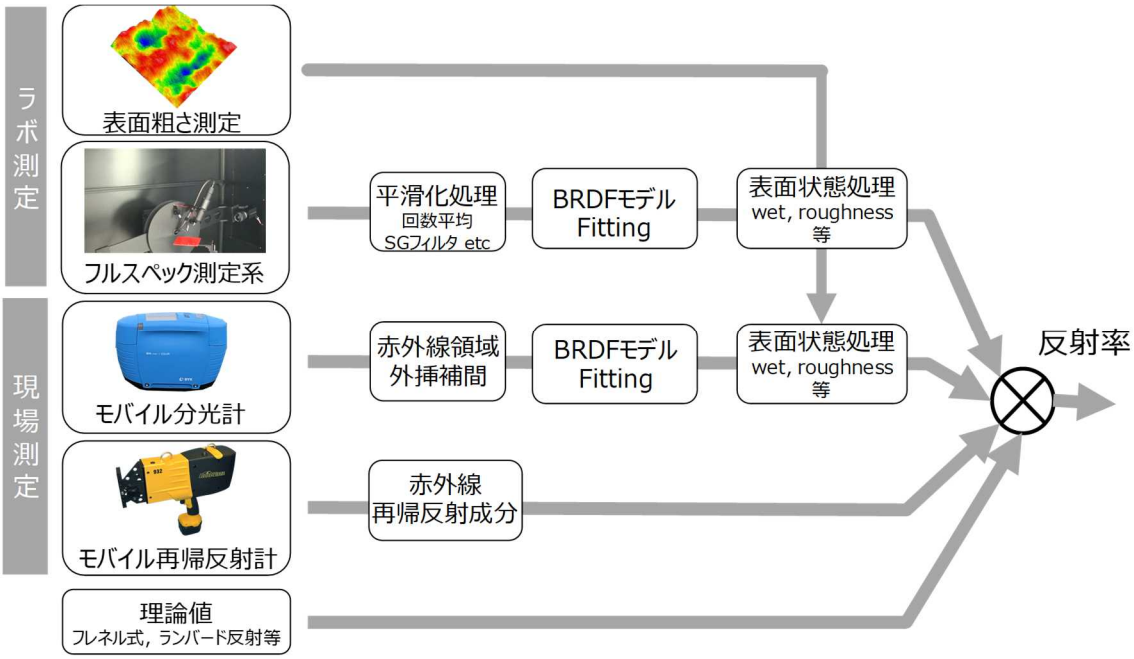
Figure 47 ポータブル再帰反射測定計の測定精度検証結果

（イ）シミュレーション用反射ファイルへの変換

実測した反射率の角度および波長特性データをシミュレーションでそのまま使うと、測定系の精度による不連続性などにより、ノイズとしてシミュレーション結果として現れる。そのため反射モデルにフィッティングすることで、反射率の特性に不連続性が表れないようにしている。下式が使用している反射率(BSDF)モデルである。

$$BSDF = p_d \frac{1}{\pi} + \max\left\{ \underbrace{p_s \frac{Fresnel}{4(L \cdot H)} exp\left(-\left(\frac{\tan\theta_{hs}}{{\beta_s}^2}\right)^{\alpha_s}\right)}_{\text{鏡面反射成分}}, \underbrace{p_r exp\left(-\left(\frac{\tan\theta_{hr}}{{\beta_r}^2}\right)^{\alpha_r}\right)}_{\text{再帰反射成分}} \right\}$$

下図のように、複数の測定器で計測した反射率をパラメータ化し、反射率モデルパラメータに代入することで、様々な複合した反射モデルを作成ができる。



出所：SOKEN, INC、旭光通商株式会社

Figure 48 各測定機器のデータ複合例

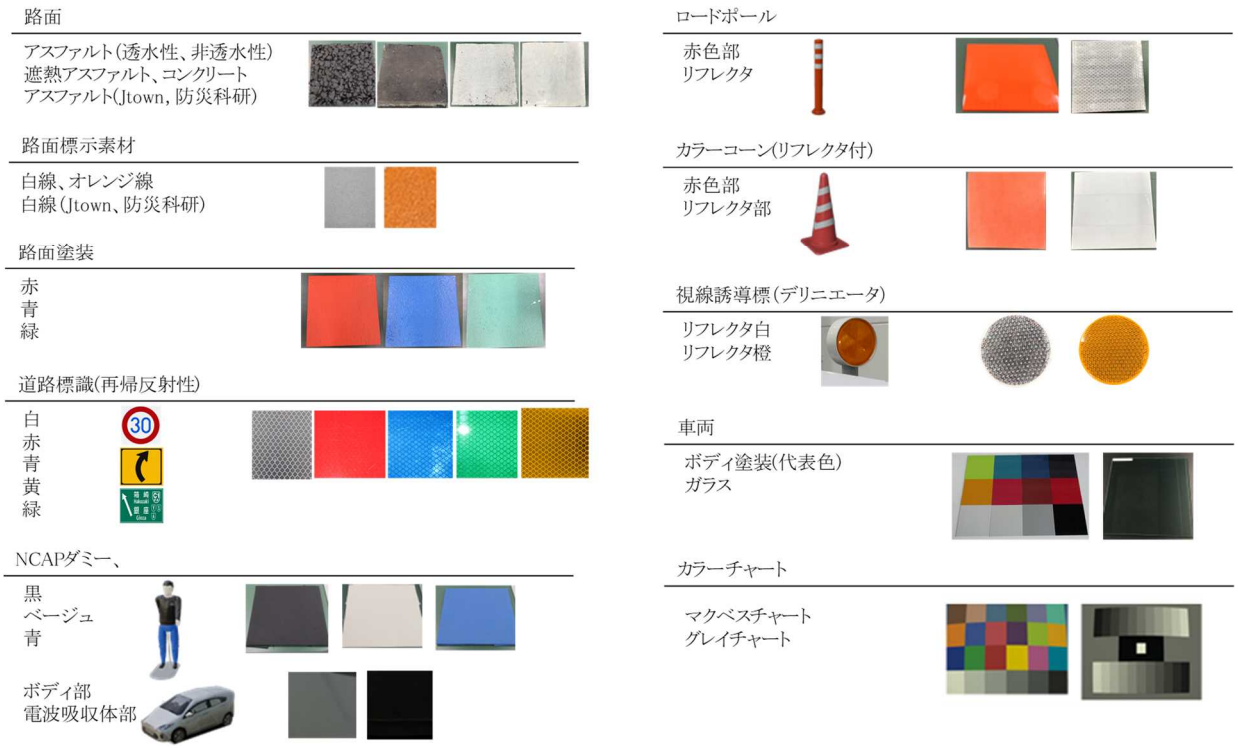
従来のシミュレータでも Phong や Desny など様々な反射率モデルが用いられている。しかし、映像がリアルに近くなるように映像エンジニアがパラメータを感性・主観的に調整する必要があった。上記方式では測定結果からパラメータを抽出するため、作業者に依存することなく、物理現象を再現することが可能となる。

・測定物標一覧

下図に、反射特性及びミリ波帯の電気特性を計測した試料を示す。

従来は 390nm～730nm の可視光領域の反射率のスペクトラム特性をシミュレーションに用いていた。本年度は、赤外線カメラに対応するため、全物標の反射率の波長領域を 390～1000nm に拡張した。

また、前述した実験現場である Jtown や防災科研の降雨試験場で計測した反射率、カメラの一致性検証のための基準カラーチャートの反射率を計測した。



出所：SOKEN, INC.

Figure 49　測定物標一覧

(ウ) ミリ波レーダの反射率効果検証

前項までに、材質単体の反射特性の計測を行い、一致性を検証している。本項では、材質の反射率を3DCG モデルに反映させたシミュレーション結果と実測結果の比較し、反射率の妥当性を確認した結果を示す。

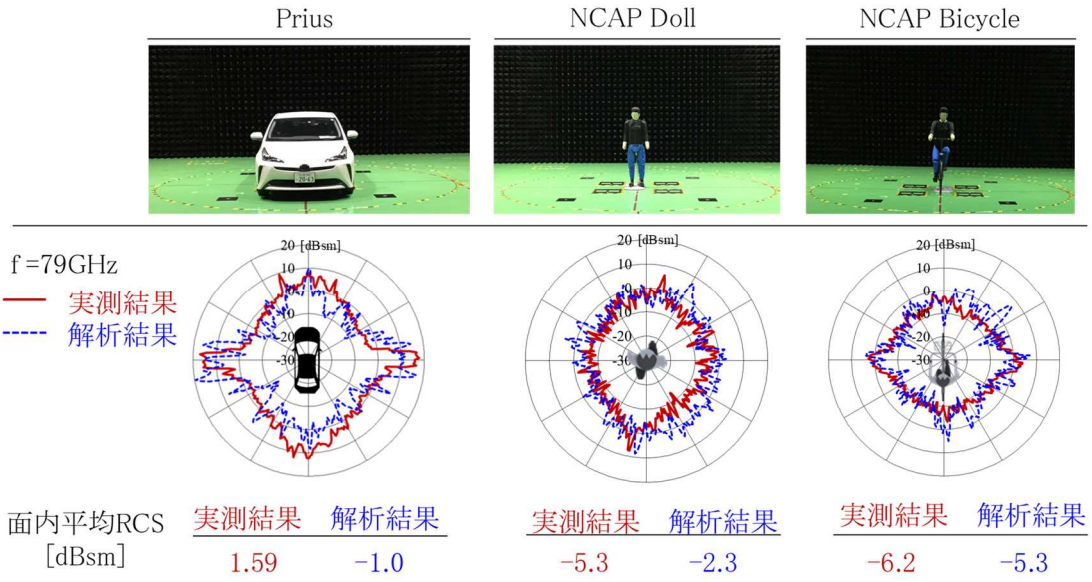
下図にレーダ断面積(RCS:Radar Cross Section)の比較検証結果を示す。

評価対象としては、主たる車載レーダの認識対象ターゲットとなる車両、歩行者／自転車のダミー人形を用いた。

上記ターゲットは波長(約 3mm)に対して数百～千倍のスケールを持つため、RCS は 0.1 度観測方向が変わっただけでも数 10dB 変動する。そのため、比較しやすいように、実測/シミュレーションともに 0.1 度刻みで計測/解析を行い、2 度範囲(21 点)平均を行った結果を表示している。

シミュレーションの RCS は、最大値および面内平均は、実測に比べて 3dB 以内の誤差となっており、角度特性の傾向も得られている。しかし、ピークの発生位置が異なるなど、誤差が大きい部分も見て取れる。

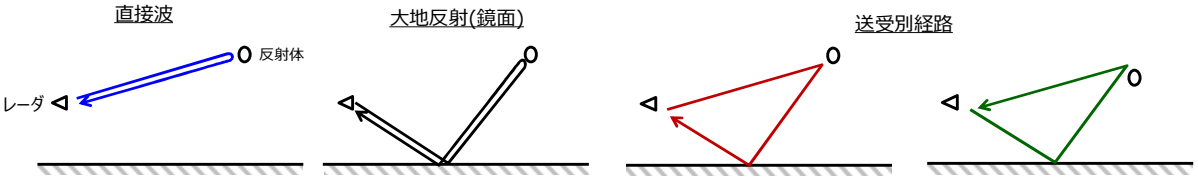
誤差の要因として、車両のバンパなど反射特性計測が出来ていないため代替品の樹脂反射特性を割り当てたパーツの反射特性や、RCS 計算に用いている Physical Optics 近似の弱点である曲面形状の計算誤差が考えられる。



出所：SOKEN, INC.

Figure 50 レーダ断面積の検証結果

下図は、レーダから発射されたミリ波電波が、再度レーダで受信されるまでの反射経路例を示したものである。簡単のために、反射体と大地のみでの反射を考えている。この時、反射経路の組み合わせにより、下記 4 つの経路が発生する。4 つの経路は、それぞれ経路長が異なるため、受信する電波に位相差が生じる。この位相差が同相であれば強め合い、逆相になれば弱め合いが発生し、受信信号レベルに影響を与える。



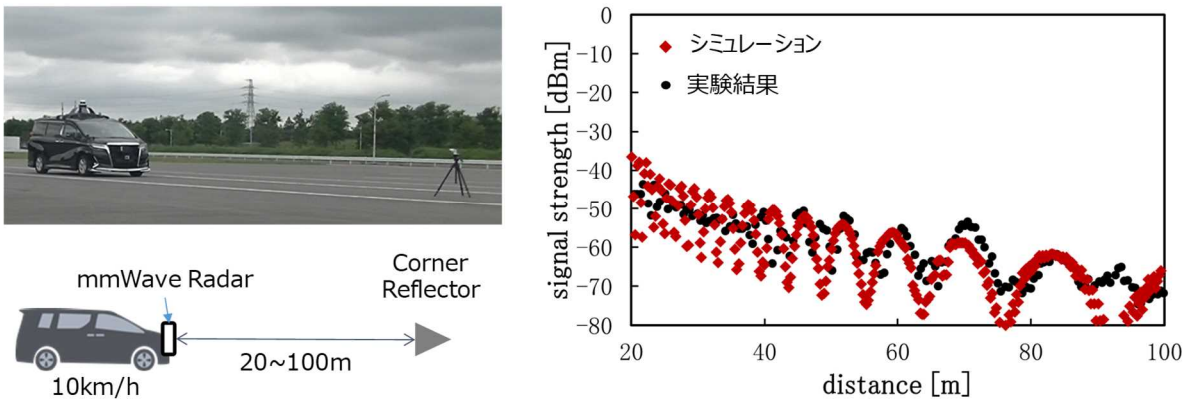
出所：SOKEN, INC.

Figure 51　電波の反射経路（大地反射モデル）

経路長が受信信号レベルへの影響を検証するため、レーダと反射体の距離を変えながら受信信号レベルを観測する。レーダと反射体の距離が変わると、各経路長も変わるため、強め合い・弱め合いが交互に発生し、信号レベルの変動が観測される。

下図は、レーダと反射体の距離と受信信号レベルの関係を比較検証した結果である。反射体にはコーナーリフレクターを用い、設置高さはレーダと同一高さの 0.891mとしている。シミュレーションの路面には、実測した路面アスファルトの反射率を割り当てた。

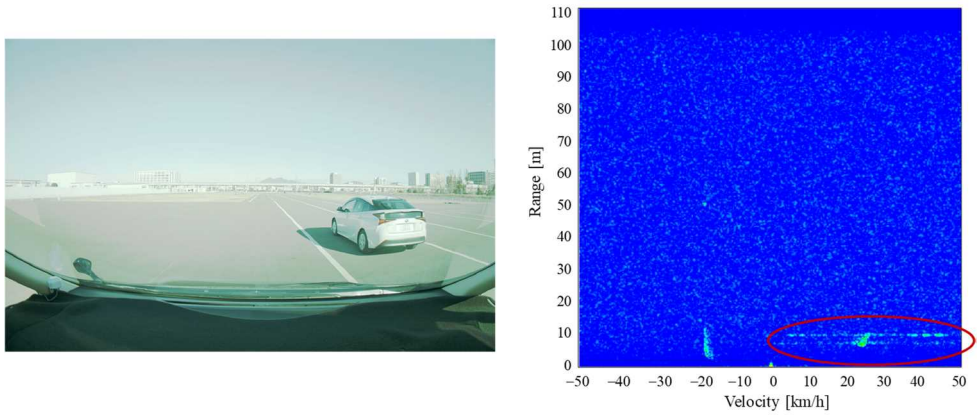
複数経路の受信波が強め合い、弱め合いが発生する距離は実測、シミュレーションともに良い一致を示した。一方、弱め合いにより発生するヌルの深さが異なっている。これは実験時の路面反射率と、シミュレーションに用いた路面サンプルを計測した反射率が異なっているためだと考えられる。また、40m 以下の距離で実験結果の変動が発生していないが、シミュレーションでは信号が大きく変動している点に差異がみられる。これは、実機のレーダのアンテナ指向性が垂直方向に絞られており、近距離では大地経由の信号レベルが大幅に減少するため、直接波が支配的になるためである。下記結果のシミュレーションではアンテナ指向性を反映していなかったため変動が発生してしまっているが、実機相当のアンテナ指向性を考慮することで、この点は再現可能であると考える。



出所：SOKEN, INC.

Figure 52　レーダ・反射体間距離と受信信号レベルの検証結果

下図は、ミリ波レーダにおいて Range-Velocty(RV)マップ上で観測されるマイクロドップラーといわれる現象の一例である。左図の車載フロントカメラ画像において、自車右側車線を追い抜いていく白い車両の反射信号が、右図の RV マップ上で距離 10m 速度 25 ㎞/h 付近に観測されている。この時、赤丸で囲った範囲において、速度方向に反射点が広がるような分布が確認できる。この現象をマイクロドップラーと呼んでいる。

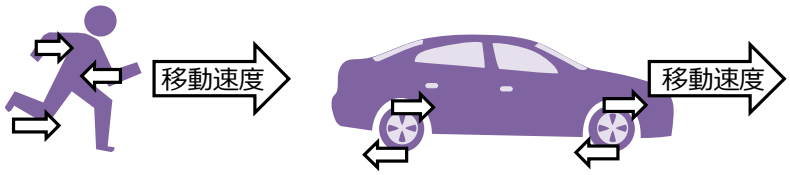


（a）マイクロドップラー発生時の車載フロントカメラ画像　（b）レーダ観測結果（RV マップ）

出所：SOKEN, INC.

Figure 53　レーダ・反射体間距離と受信信号レベルの検証結果

マイクロドップラーは移動物標において、部分的に異なる速度成分を持つ稼働パーツがある場合に発生する。具体的な例をあげると、下図に示した歩行者の手足の動きや、車のタイヤの回転などが考えられる。マイクロドップラーは、誤ったピーク抽出による誤検知要因になるなど性能への悪影響の面もあるが、RV マップのパターン認識による物標識別などに有効活用できる面もある。いずれにせよ、ミリ波レーダを用いた物理シミュレーションを構築するためには再現が必要な現象であると考える。



出所：SOKEN, INC.

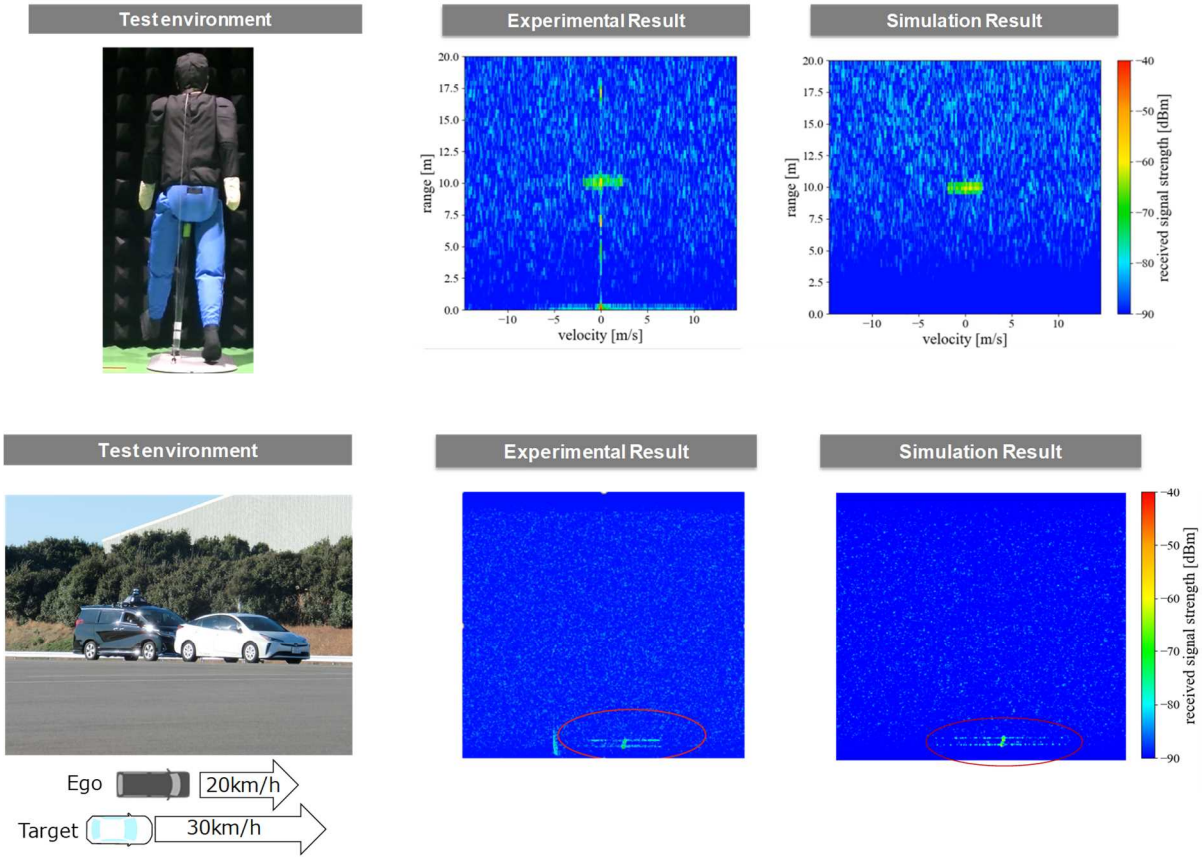
Figure 54　マイクロドップラーの発生イメージ

シミュレーションは時間において離散的である。センサ動作タイミングに合わせて、CG モデルは次の時間の座標へワープする。シミュレーションをするその瞬間において、CG 空間は全てが静止した世界であり、CG モデルは速度情報を有していない。そのため、シナリオで定義した移動情報を元に速度を求め、ミリ波の反射信号に速度情報を加算している。ここには、歩行者の手足の運動や、タイヤの回転運動は含まれていない。

現在、シミュレーション結果に後処理でマイクロドップラーの効果を追加する方法を検討中である。

下図は、歩行者の手足が振り子運動、車のタイヤが等速回転運動していると仮定した場合に、マイクロドップラー現象が再現可能かどうかテストした結果である。

両社とも実測に類似するパターンが RV マップ上に現れていると考える。ただし、発生範囲や強度など不一致な点が多くあるため、運動モデルや反射点の分布など、次年度改良していく予定である。



出所：SOKEN, INC.

Figure 55　マイクロドップラーの再現テスト結果

（エ）ミリ波レーダの空間減衰、空間散乱

ミリ波レーダは雨等の環境に強いといわれているが、近年の車載レーダの最大検知距離が 300m を超えるような製品も登場してきており、往復 600m 伝搬を考えると雨の空間減衰による最大距離が悪化する現象を無視できないようになってきた。

電波の空間減衰については、気象レーダ分野で古くから研究されており、損失量K_rは下式で表現される。

$$K_r = 10log_{10}e * 10^3 \int_0^{D_{max}} \delta_{total}(D)N^s(D)dD \quad [dB/km]$$

ここで、D は雨粒の直径、$\delta_{total}(D)$は雨粒の全散乱断面積、N^sは雨滴粒形分布である。

気象レーダの X バンド(9GHz 帯)での波長は約 30mm であり、雨粒の大きさ(=数mm)に対して十分大きい。そのため、雨粒の大きさが無視できるため、全散乱断面積にはレイリー散乱を用いることが多い。しかし、ミリ波レーダ 77GHz の波長約 3.5mm は、雨粒と同程度であるため、雨粒の大きさに影響が大きい。そのため、全散乱断面積の計算には、下式のミーの散乱方程式を用いるものとした。

$$\delta_{total}(D) = \frac{\lambda^2}{2\pi}\mathrm{Re}\sum_n (2n+1)(a_n + b_n)$$

ここで、a_n,b_nはベッセル関数の展開係数である。

上記式の妥当性を検証するために、国立研究開発法人 防災科学研究所様の大型降雨実験施設(茨城県つくば市)において、降雨減衰量の実測を行い、比較検証を行った。

出所：SOKEN, INC.

Figure 56 大型降雨実験施設

実験は、40m 先の空間に基準反射体であるコーナーリフレクターを設置し、雨を降らせてないときのレーダの受信強度を基準とし、雨を降らせた場合の受信強度との差を取ることで減衰量を算出した。

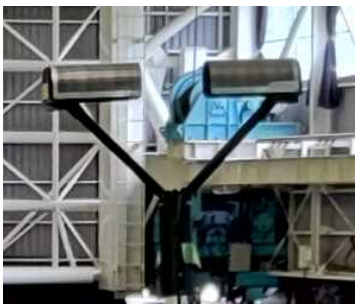
降水量を 20～340mm/h で可変とし、同一降水量でも噴射ノズルを変化させることで雨粒の大きさを変え、雨滴粒形分布を変化させた。

出所：SOKEN, INC.

Figure 57　降雨減衰実験条件

雨滴粒形分布は、単位体積あたりに直径 D の雨粒が何個存在するかを表した分布である。

雨滴粒形分布は、下図のディストロメータ(Parsivel2)の計測結果から算出した。ディストロメータは、計測値は直径 D、落下速度vの雨粒が何個通過したかを表した分布であり$N(D_i, v_j)$と表される。



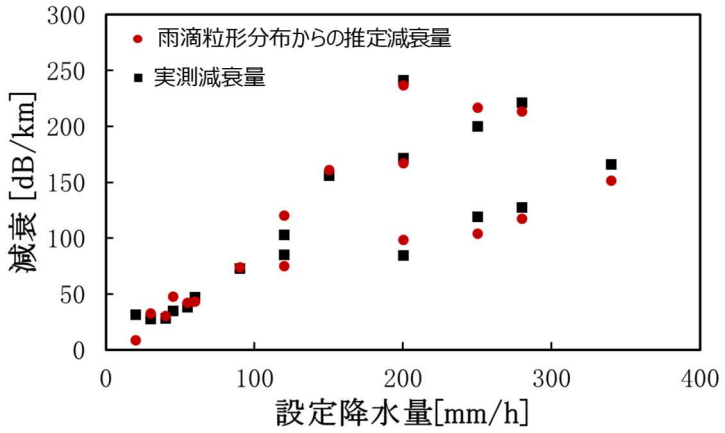
出所：SOKEN, INC.

Figure 58　使用したディストロメータ(Parsivel2)

ディストロメータの計測値$N(D_i, v_j)$を、計測面積・計測時間で割り、単位体積あたりに換算し、落下速度で積分することで雨滴粒形分布に変換した。

$$N^s(D_i) = \sum_{j=1}^{n_v} \frac{N(D_i, v_j)}{A\Delta t v_j(D_i)\Delta D}$$

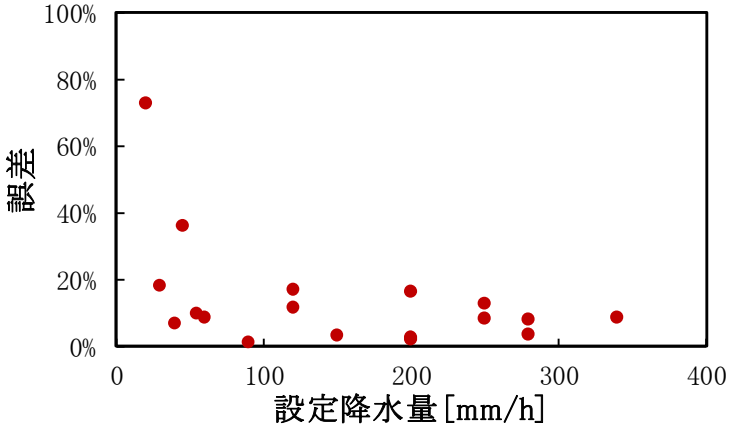
下図に、実測したミリ波レーダの空間減衰量と、計測した雨滴粒形分布から推定したミリ波レーダの空間減衰量を比較した結果を示す。降水量が増加するほど空間減衰量が増加する傾向しており、推定結果も傾向をとらえている。



出所：SOKEN, INC.

Figure 59　ミリ波レーダの空間減衰量の検証結果

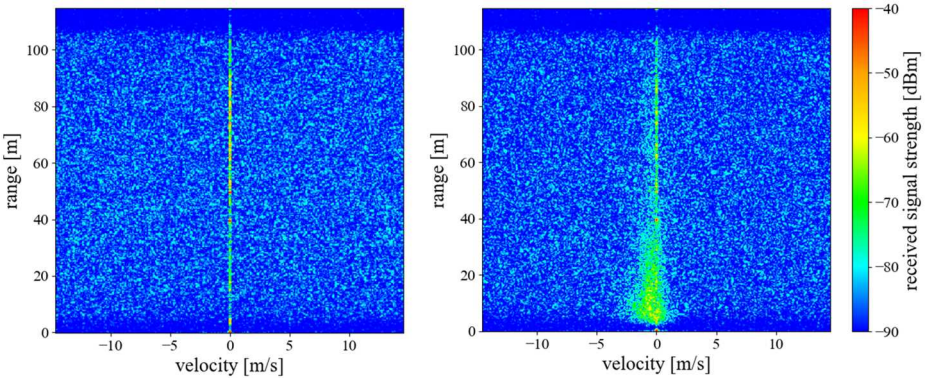
下図は、実測と推定結果の誤差を示している。概ね 20%以下の誤差に納まっているが、降水量が少ない場合に非常に大きい誤差が生じてしまっている。これは、実測の空間減衰量が少なすぎるために、減衰量を正しく計測できていないことが原因と考えられる。



出所：SOKEN, INC.

Figure 60　ミリ波レーダの空間減衰量の推定誤差

ミリ波レーダは物標の距離と速度が観測できる。空間散乱は、空間中の雨粒による散乱波がクラッタとして観測される事象であり、下図に示す距離-速度電圧分布(RVMap)に観測される。自動車用レーダにおいては、静止物標が自車前方に存在することと同義であり、緊急自動ブレーキの誤動作につながる恐れがある。



(a) 降水量 0　　(b) 降水量 30mm/h

出所：SOKEN, INC.

Figure 61　ミリ波レーダにおける降雨散乱（実測値）

ミリ波における雨の空間散乱は、雨の空間減衰と同様にミーの散乱式から算出することができる。空間減衰では、吸収と散乱を考慮した雨粒の全散乱断面積を求めたが、散乱の場合は雨粒の後方散乱のみを考慮すればよいため、下式のように表される。

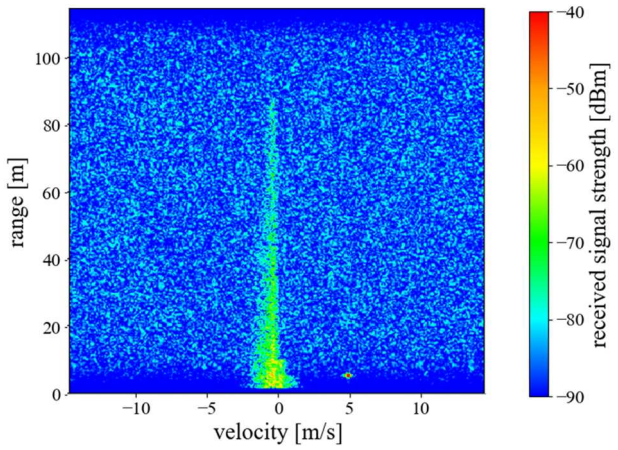
$$\delta_{scatter}^{backward}(D) = \frac{\lambda^2}{2\pi}\left|\sum_{n=1}^{\infty}(2n+1)\,(-1)^n(a_n - b_n)\right|$$

単位体積あたり、速度毎の散乱断面積はミーの後方散乱式を用いて、下式として表される。

$$\sigma(v) = \int_0^{D_{max}} \sigma_{scatter}^{backward}(D)\,\frac{N(D_i, v_j)}{A\Delta t v_j(D_i)\Delta D}\,dD$$

シミュレータでは、解析する空間を一定間隔で離散化する。各離散化した空間ごとに上記式により散乱断面積$\sigma(v)$を求め、各空間に$\sigma(v)$の反射体が存在すると仮定することで空間散乱を再現した。

下図に降水量 30mm/h 時に実測した雨滴粒形分布をもとに、空間散乱をシミュレーションで算出した結果を示す。先に示した実測結果に比べて、速度方向の広がりが少ない、近距離での分布の形状が違うなど細部に違いはあるものの、傾向は表現できているのではないかと考える。



出所：SOKEN, INC.

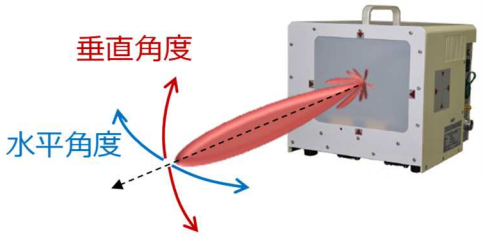
Figure 62　ミリ波レーダにおける降雨散乱（シミュレーション結果）

③ ミリ波レーダのモデル定義

昨年度までの取り組みで、ミリ波レーダは反射モデルだけでは再現が困難であることが分かった。

そこで、認識物標のどの箇所でミリ波の電波が反射したかを把握するため、ミリ波電波を可視化するイメージングレーダを構築した。

下記にミリ波レーダの反射点可視化計測に用いたイメージングレーダ諸元を示す。ビーム幅の狭いペンシルビームのアンテナを機械的に垂直角度、水平角度に掃引し、送受信した電波の時間遅延から距離を換算することで、3 次元的に反射強度を計測することができる。今回、距離分解能を向上させるために、使用周波数帯域幅を標準の 500MHz から、900MHz まで拡張している。



・メーカー　Keycom
・型式　　RCS11-76.5G-SOKEN-1

主な仕様		
	レーダ方式	FMCW
	周波数	76.5GHz
	周波数帯域幅	500, 700, 900MHz
	測定角度範囲	水平:-16.5度～16.5°　垂直:-10度～10度
	測定角度分解能	3度(送受アンテナ利得 6dBビーム幅)
	最大検知距離	150,105,80m
	測定距離分解能	1.00, 0.71, 0.56m
	寸法	215×232×311mm
	重量	約5kg

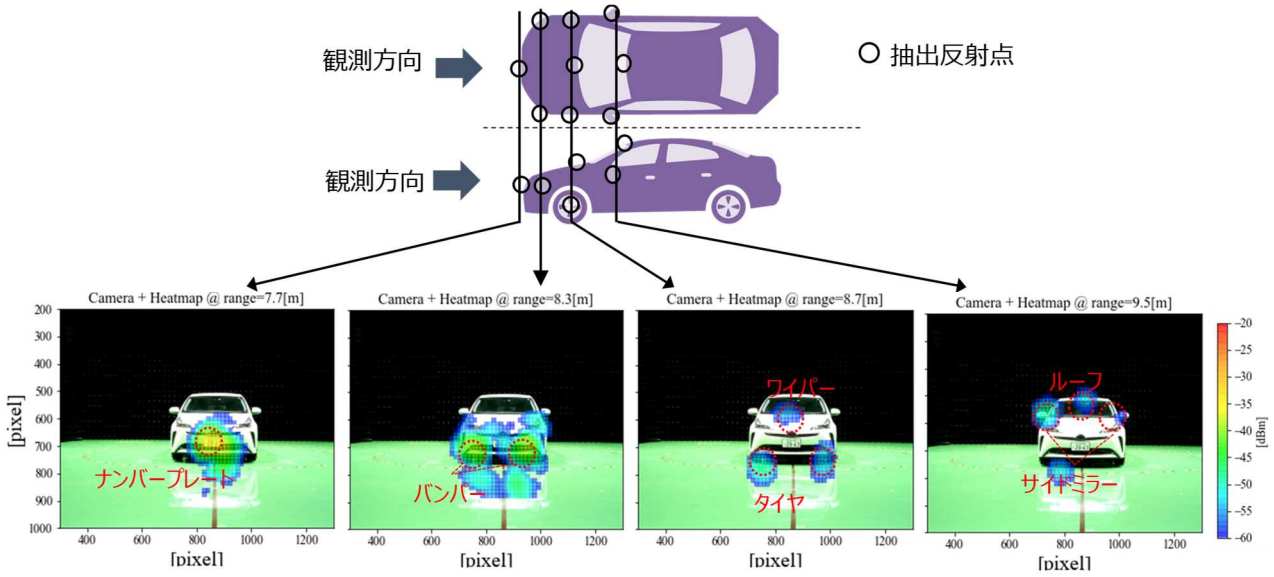
出所：SOKEN, INC.

Figure 63　ミリ波イメージングレーダ諸元

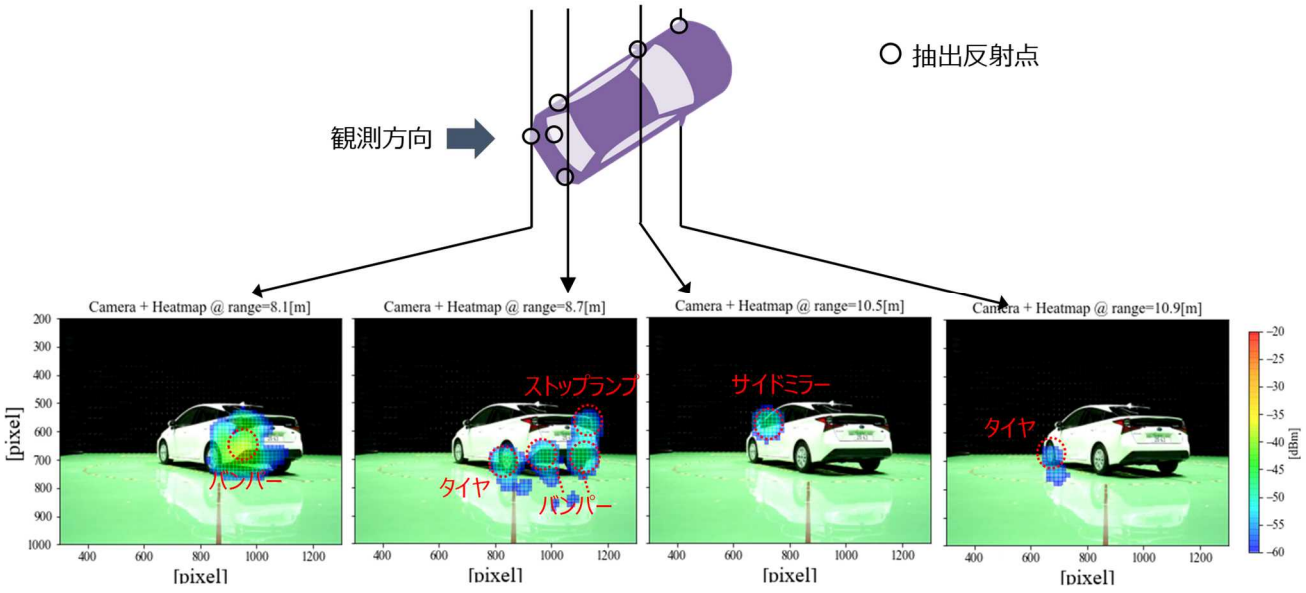
下図に、イメージングレーダで車両の反射点を可視化した例を示す。

計測した 3 次元の反射強度データでは、目視による反射点の認識は難しいため、代表的な距離における断面反射電力マップをカメラ画像に重畳表示した。また、代表的な反射点と、反射点の推定パーツ名を記載している。

強度は弱くなるが入射方向に反射しやすい曲面部やパーツの端部、強い反射強度が得られる正対した平面部が主たる反射点になっていることが分かる。



(a) 車両正面からの観測結果例



(b) 車両左後方 45 度からの観測結果例

出所：SOKEN, INC.

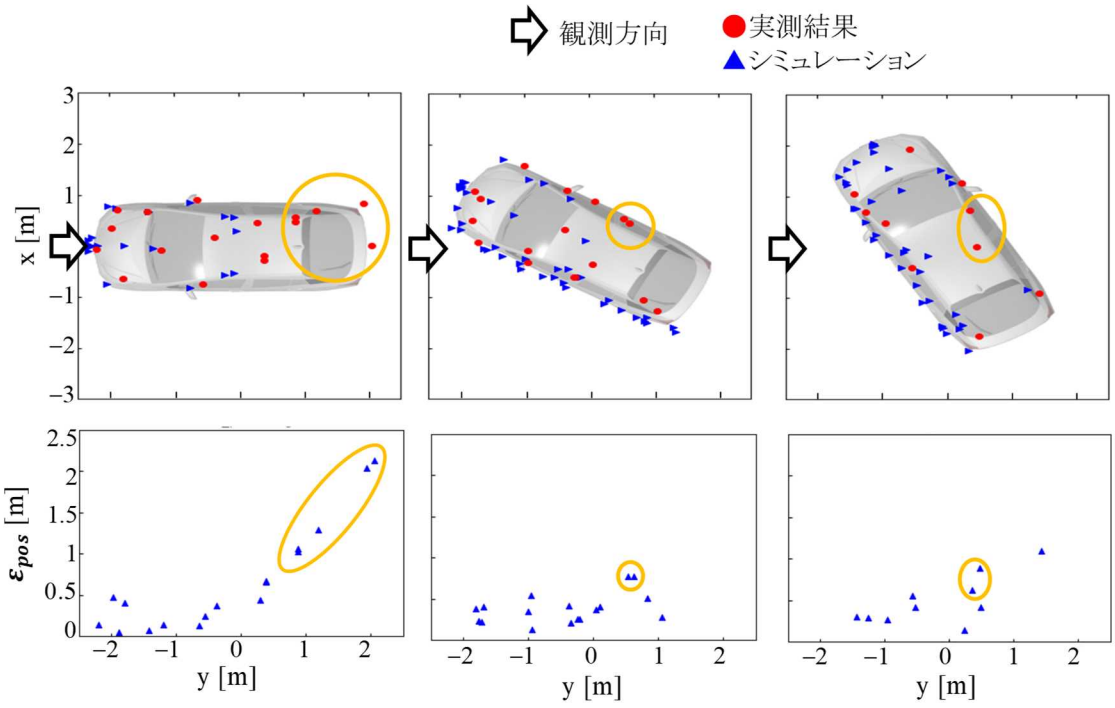
Figure 64 ミリ波イメージングレーダ諸元

前記イメージングレーダで計測した 3 次元反射強度マップからピーク抽出を行い、反射点を抽出した結果を下図に示す。赤点が実測結果、青点がシミュレーションにおける反射点である。実測とシミュレーションの反射点の誤差を下式より算出した。反射点の位置情報しか考慮していないため、反射強度が大きく異なる反射点が選択されてしまっている場合があることが、誤差評価方法の課題である。

実測で観測された反射点は、概ねシミュレーションでも再現されており、実測反射点の 0.5m 以内はシミュレーション反射点が存在していた。ただし、橙色の丸で囲った部分の実測結果の反射点において、シミュレーションで再現ができていない。誤差の大きい反射点は、観測方向に対して物標の裏側／反対側に存在している。また、図示してはいないが、反射点の高さが 0.7m 程度であるため、地面を反射して車両の下を潜り抜けた経路ではなく、ガラスを透過して車室内で反射したものと予想される。

今後は、可視化した反射点をもとに、反射点付近を精緻にモデル化するなど、ミリ波レーダシミュレーションに適したシミュレーション用 CG モデルの設計指針を立案していく。

$$\varepsilon_{pos} = \min\left(\sqrt{(x_{i\_sim} - x_{i\_exp})^2 + (y_{i\_sim} - y_{i\_exp})^2 + (z_{i\_sim} - z_{i\_exp})^2}\right)$$



出所：SOKEN, INC.

Figure 65　ミリ波の反射点抽出結果およびシミュレーションの誤差評価結果

(3)次年度以降の計画

① 物体要件定義

・反射率データ書式定義

反射モデルは数式で定義されており、濡れた状態、材質表面が粗い状態などの反射ファイルを任意に生成できる。しかし、現状の反射率は、数式をもとに入射角・出射角・波長に対する反射率のデータを計算して反射ファイルとして、事前に用意しておく必要がある。シミュレータ全体機能を考えた場合に、シナリオ（雨のシーンなど）と連動して自動的に反射率の割り当てを変更できるよう反射率定義方法を検討する。

・雪環境再現に必要なデータ定義

本年度実施し取得した雪環境での走行試験データを分析し、カメラ・LiDAR・ミリ波レーダにおいて、雪環境シナリオに必要な空間モデルの定義を行う。必要だと判断された場合には、実験により、データの取得を実施する。

② 実データ収集

・LiDAR の検知距離限界の誤差改善

LiDAR の検知距離限界の誤差改善に向けた、拡散反射の角度特性を精緻に測定し、反射モデルの改良のための基礎データ収集を行う。また、検証結果を基に反射モデルの数式を改良し、検知距離限界の精度向上を目指す。

・ミリ波レーダ干渉再現

複数のミリ波レーダの信号が混ざり合い、干渉波が発生する問題について各社と協力して再現を目指す。干渉波を発生させた状態を作り出し、ミリ波レーダ観測実験を行い、シミュレーション結果との比較検証を行う。

③ ミリ波レーダのモデル定義

・ミリ波用 CG モデルの設計指針立案

今年度の取り組みで、ミリ波レーダにおける反射点を可視化する計測技術を構築できた。計測した反射点をもとに、関係各社と連携して CG モデルを試作し、シミュレーションで精度検証を行う。また車両以外の物標についても、反射点計測とシミュレーション精度検証を実施していく。上記結果をもとに、ミリ波レーダシミュレーションに適したシミュレーション用 CG モデルの設計指針を立案する。

・マイクロドップラー運動モデル構築

ミリ波レーダで発生するマイクロドップラーにおける歩行者の手足運動および車のタイヤ回転について、構築した運動モデルでシミュレーションした結果の一致性検証おこない、モデル向上による精度向上を図る。

本章の参考文献:

[1] John Lekner and Michael C. Dorf “Why some things are darker when wet”, 1 April 1988, APPLIED OPTIC Vol. 27, No. 7 pp1278-1280

5. 1. 3 「A2. テストシナリオ及びテストデータ生成ツール構築」(三菱プレシジョン株式会社)

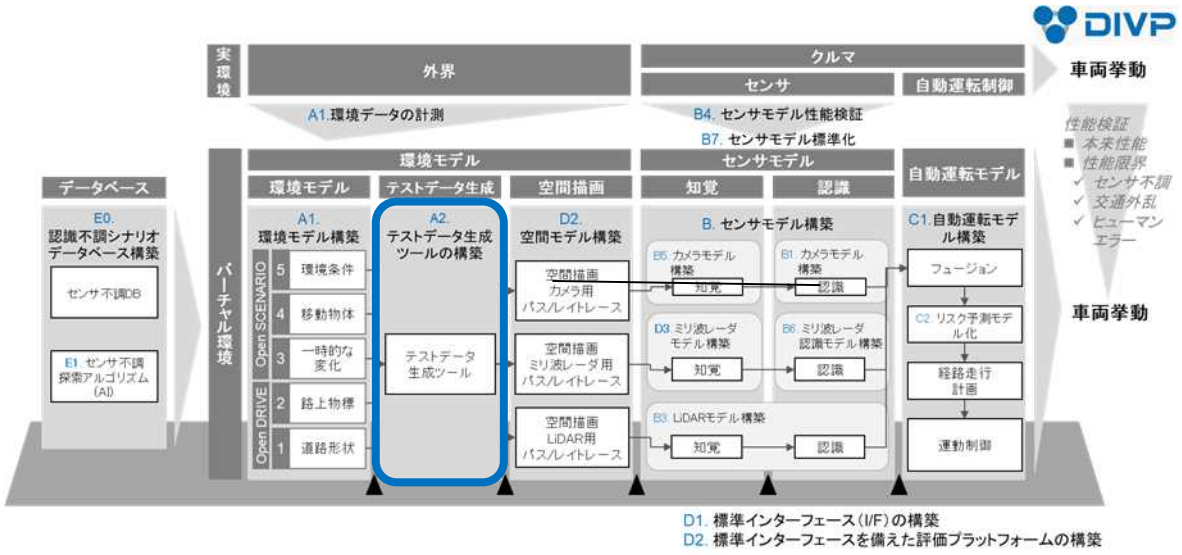


Figure 66　本研究の位置付け

走行環境のデータベースから、評価で使用するテストシナリオに適合したテストデータを生成するためのツールとして、SDM ジェネレータ(Space Design Model Generator)を開発する。

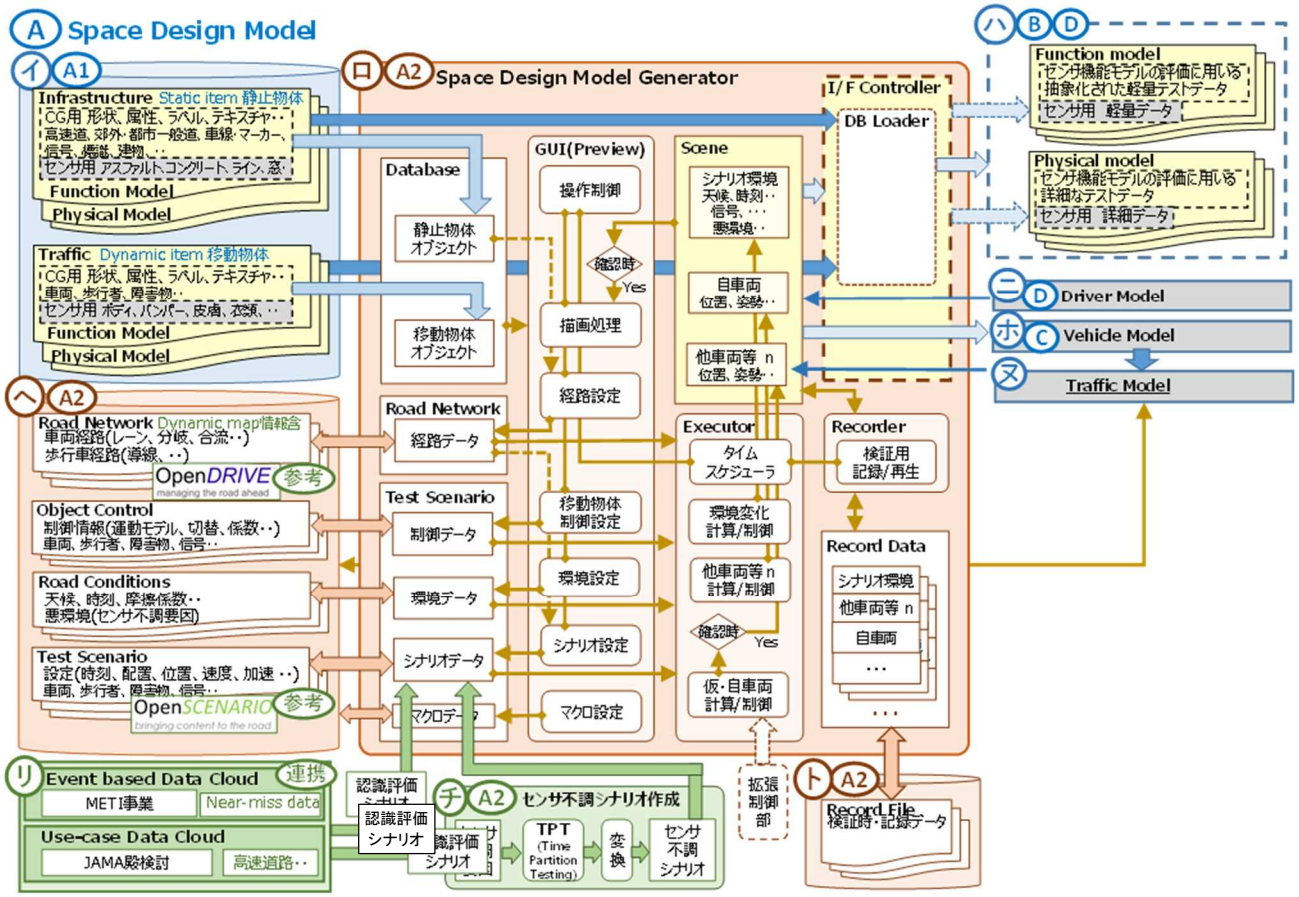
■ 事業目的

本事業としては、自動運転システムの評価可能性の向上及び国内ベンダーの競争力向上を目指す目的で、自動運転システムの安全性の評価を仮想空間上で効率的に実施するための、標準化された評価プラットフォームの構築を行う。

その中で、A パートは、走行安全性をシミュレーションで評価するための、走行環境モデルの構築を行うが、A2 パートは、走行環境のデータベースから、評価で使用するテストシナリオに適合したテストデータを生成するためのツールとして、SDM ジェネレータを開発する。

■ 事業概要

Figure 67 は A.走行環境モデルの構築（Space Design Model）に関する、データと処理概要の想定ブロック図である。



出所：三菱プレシジョン（株）

Figure 67 Space Design Model の想定ブロック図

■ 実施計画

事業項目　A２パート
2018年度
2019年度
2020年度
2021年度
2022年度
第3四半期
第4四半期
第１四半期
第２四半期
第３四半期
第４四半期
12 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 1 2 3
① 各パートとの各種I/F調整
② 標準化フォーマットの認識関連の継続調査
㋑ 標準化団体ASAM Japanに対する調査
㋺ 海外渡航調査（ドイツASAM・・等）
③ 実行環境の調査
④ 試験用環境モデル検討と検証環境の整備
㋑ 試験用環境モデル検討
㋺ 実行検証環境の整備
⑤ SDMジェネレータ（プロトタイプ）の製作
㋑ 要求分析
㋺ 設計
㋩ 単体試験用モデル作成
㋥ コーディング、デバッグ、試験
⑥ SDMジェネレータ（プロトタイプ）の実行確認
⑦ SDMジェネレータ（改善版）の製作
㋑ 要求分析
㋺ 設計
㋩ 単体試験用モデル作成
㋥ コーディング、デバッグ、試験
⑧ SDMジェネレータ（改善版）の実行確認
⑨ 認識不調要因発生環境のテストデータ作成
㋑ 移動物体モデル（アセット）作成
㋺ 地形モデル（アセット）作成
㋩ 道路ネットワーク（OpenDRIVE）設定
㋥ 認識不調シナリオ設定
⑩ SDMジェネレータ（拡張版）の製作
㋑ 要求分析
㋺ 設計
㋩ 単体試験用モデル作成
㋥ コーディング、デバッグ、試験
⑪ SDMジェネレータ（交通モデル対応版）の製作
㋑ 要求分析
㋺ 設計
㋩ 単体試験用モデル作成
㋥ コーディング、デバッグ、試験
⑫ 安全性評価のためのテストデータの検討
㋑安全性評価指標検討
㋺ テストデータI/F検討
⑬ SDMジェネレータ（拡張シナリオ対応版）の製作
㋑ 要求分析
㋺ 設計
㋩ 単体試験用モデル作成
㋥ コーディング、デバッグ、試験

(1)令和3年度の成果(まとめ)

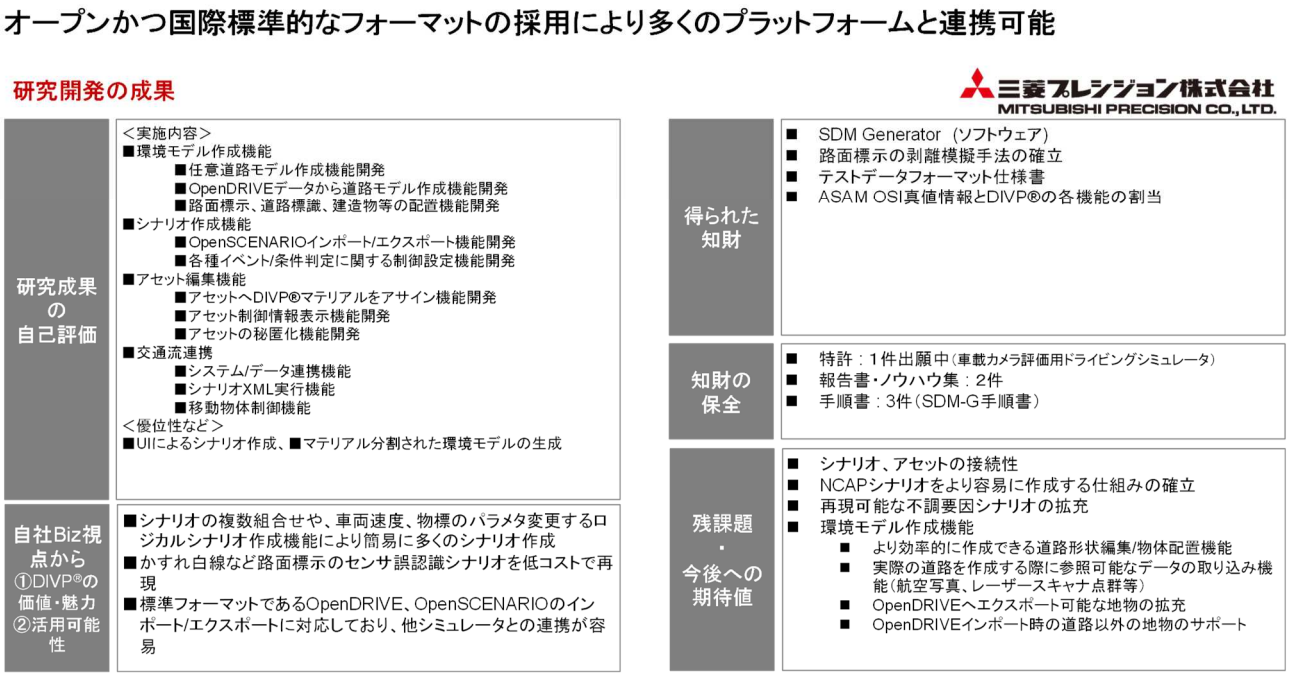


Figure 68 研究開発の成果

各種 I/F 調整、及び、標準化フォーマットの継続調査を実施した。SDM ジェネレータの改善版、交通モデル対応版、及び、拡張シナリオ対応版の作成を行っている。安全性評価のためのテストデータ検討では、安全性評価合同推進委員会の活動において評価指標や ASAM における標準シナリオフォーマットの検討している。

(2)令和3年度の成果

②標準化フォーマットの認識関連の継続調査

ドイツ PEGASUS プロジェクトで採用の標準化フォーマット OpenDRIVE、OpenSCENARIO 等について、センサ認識関連と設計可能レベルの詳細内容を継続的に調査する。

㋑ 標準化団体 ASAM Japan に関する調査

日本で実施された、ASAM Regional Meeting Japan 2021 に参加し、OpenDRIVE、OpenSCENARIO に対する各 OEM、TierX へのニーズ、評価を調査した。

㋺ 海外渡航調査(ドイツの ASAM のカンファレンス等)

海外渡航調査はコロナ禍の影響で未実施である。

⑩SDM ジェネレータ(拡張版)の製作

㋑ 要求分析

昨年度の SDM ジェネレータ(改善版)では、具体シナリオを定義したテストデータに対し、論理シナリオを付加する機能を追加することにより、大量のテストデータ作成が可能となった。ただし、他システムとの連携のためには、標準規格である OpenDRIVE、OpenSCENARIO への対応が求められる。

㋺ 設計

SDM ジェネレータ(拡張版)では、Table 12 を製作対象とした。

Table 12 SDM ジェネレータ(拡張版)の機能

番号	機能	内容
1	OpenDRIVE 情報の読み込み	シナリオ編集で使用する OpenDRIVE(道路ネットワーク情報)の読み込み
2	道路ネットワーク走行シナリオ編集機能	OpenDRIVE 形式で記述されたレーン上を走行するシナリオの編集と、編集結果のプレビュー表示
3	OpenSCENARIO のインポート/エクスポート	OpenSCENARIO 形式でのシナリオファイルの入出力に対応
4	シナリオイベントの充実	OpenSCENARIO で定義されているシナリオイベントの編集ができるよう対応

出所:三菱プレシジョン(株)

㈧ 単体試験用モデル作成

SDM ジェネレータ(拡張版)の動作確認時に、Table 13 のアセットモデルを使用した。

Table 13　動作確認時に使用したアセットモデル

番号	分類	モデル
1	地図モデル	Jtown 多目的市街地、特異環境試験場、臨海副都心、首都高 C1
2	物標モデル	複数車両、カラーコーン、マンホール、人物、NCAP 車両、NCAP 人形等

出所：三菱プレシジョン（株）

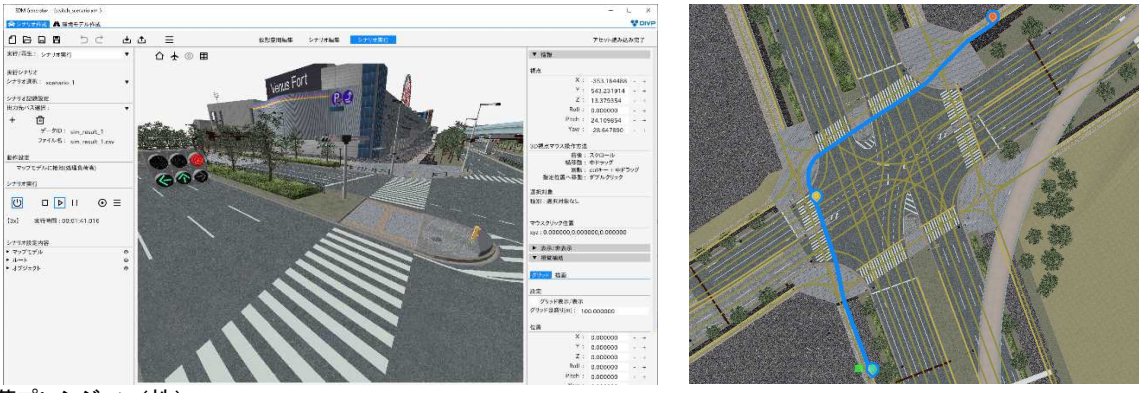
㈨ コーディング、デバッグ、試験

SDM ジェネレータ(拡張版)のコーディング、デバッグ・試験を実施した。Figure 69 は、OpenDRIVE 形式で記述されたレーン上を走行するシナリオの編集画面を示している。

出所：三菱プレシジョン（株）

Figure 69　SDM ジェネレータの表示例(OpenDRIVE のレーン上を走行)

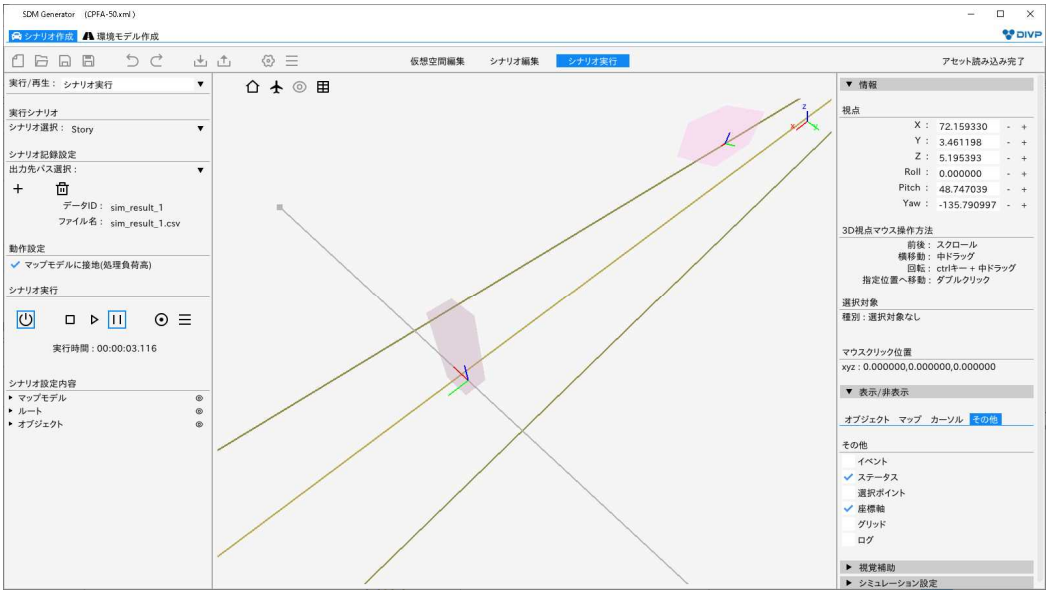
OpenDRIVE 情報の読み込みでは、レーンなどの基本情報の読み込み経路を生成する機能を追加した。それ以外に以下に示すように信号機情報(ID、位置情報)の読み込みと表示に対応、歩道データの読み込み歩行者ルートの作成にも対応した。



出所:三菱プレシジョン(株)

Figure 70　SDM ジェネレータの OpenDRIVE 情報の読み込み例
(左:信号機のシナリオプレビュー表示、右:歩道上のルート作成)

OpenSCENARIO 対応では、Figure 71 のように各種 OpenSCENARIO で定義されているイベントなどに対応することで、他社仕様で作成されたシナリオを読み込み、実行できることが確認できた。



出所:三菱プレシジョン(株)

Figure 71　SDM ジェネレータの OpenSCENARIO 情報の読み込み例

⑪SDM ジェネレータ（交通モデル対応版）の製作

㋑ 要求分析

交通モデルに対応するため、より詳細な道路環境を模擬する機能が求められる。具体的には、地物の配置、道路標示の編集、レーン形状の編集などが挙げられる。

㋺ 設計

SDM ジェネレータ(交通モデル対応版)では、Table 14 を製作対象とした。

Table 14　SDM ジェネレータ(交通モデル対応版)の機能

番号	機能	内容
1	地物の配置機能	道路周辺に存在する標識、建築物、植栽などの配置
2	道路標示の編集機能	区画線やその他の道路標示の配置および編集
3	レーン形状の編集機能	レーンの幅、レーンセクションの作成および編集
4	道路標示の剥離模擬機能	区画線やその他の道路標示のペイント部の剥離を模擬する機能

出所：三菱プレシジョン（株）

㋩ 単体試験用モデル作成

Table 14 の機能を利用/確認するため、Table 15 のアセットモデルを作成し、使用した。

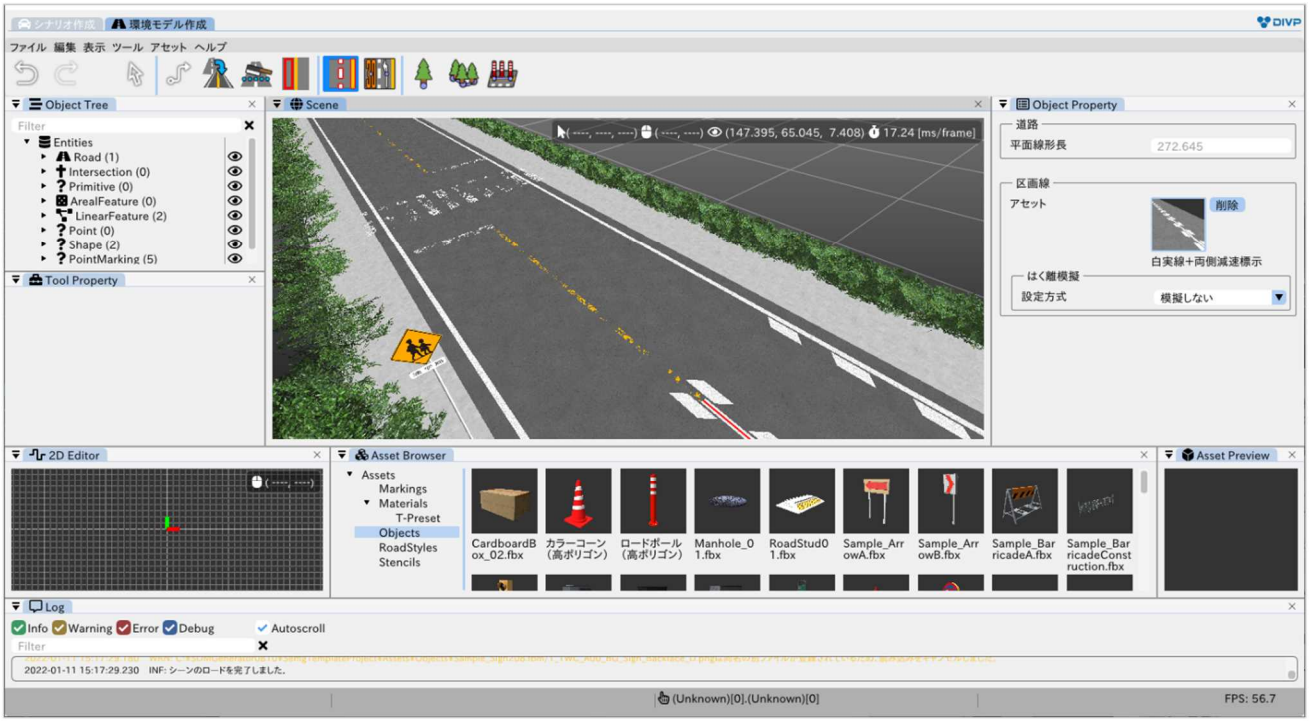
Table 15　作成したアセットモデル

番号	分類	内容
1	道路断面データ	車道、路側帯、縁石、歩道、区画線、を組み合わせた断面データ
2	区画線データ	色、幅、線種を組み合わせた区画線データ
3	物標モデル	カラーコーン、マンホール、ガードレール、各種標識、建物、植栽等
4	路面標示データ	最高速度標示、一時停止標示、停止線、横断歩道、矢印標示等
5	テクスチャ	アスファルト、コンクリート、草地、舗装タイル等

出所：三菱プレシジョン（株）

㈡ コーディング、デバッグ、試験

SDM ジェネレータ(交通モデル対応版)のコーディング、デバッグ・試験を実施した。Figure 72 は、道路交通環境モデルを作成する際の編集画面を示している。



出所：三菱プレシジョン（株）

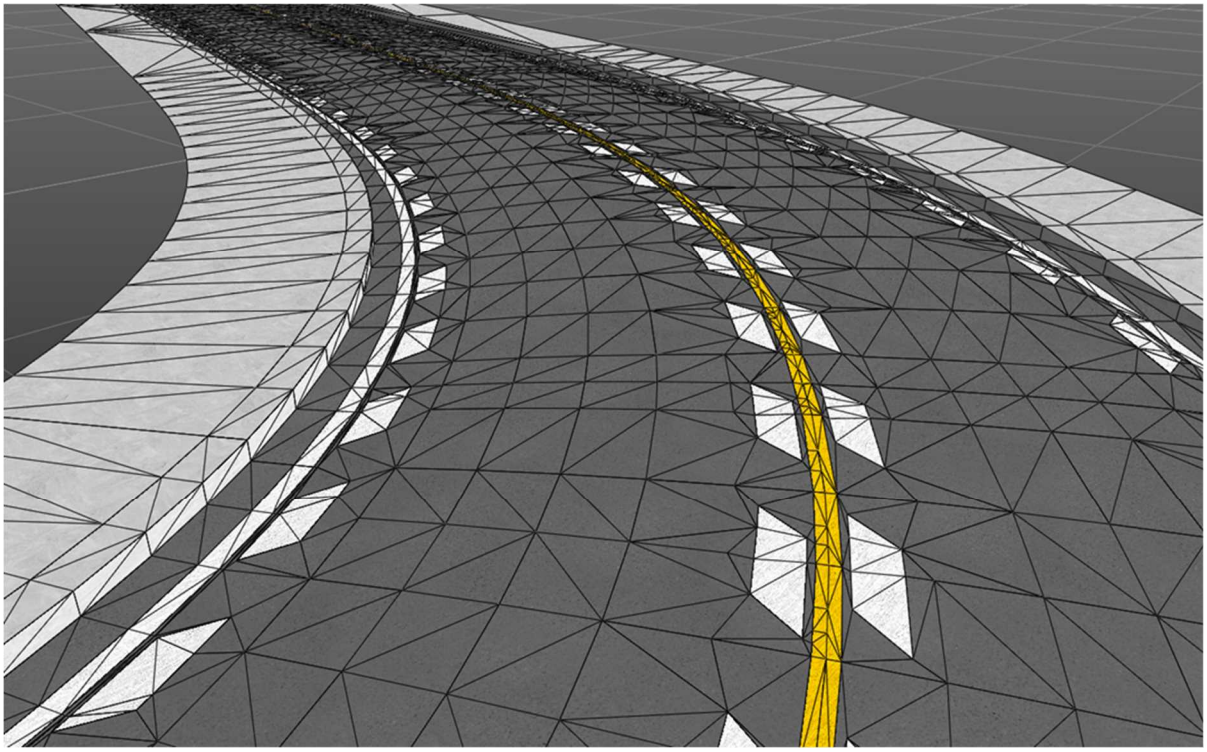
Figure 72　SDM ジェネレータの道路交通環境モデル　編集画面

地物配置として、道路周辺に標識、建築物や植栽などを指定した位置や指定する曲線状に沿って連続的に配置する機能を追加した。地物配置機能を使用して道路周辺に標識などを配置した例を Figure 73 を示す。

出所：三菱プレシジョン（株）

Figure 73　SDM ジェネレータの地物配置処理例

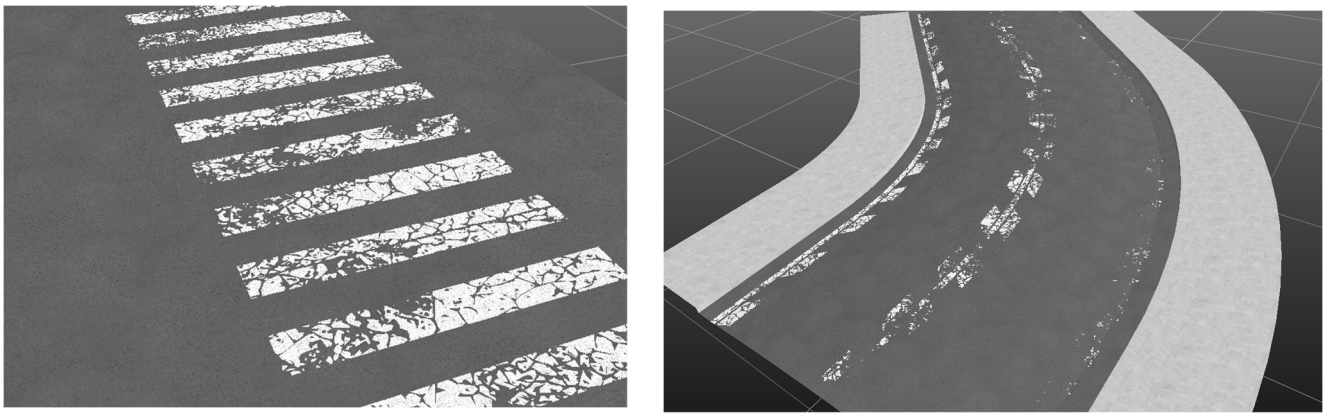
道路標示編集として、区画線や道路標示などを道路に対して設定、編集する機能を追加した。また、ポリゴンに対して物性情報を割当てる必要があるため、路面が重なる箇所を Figure 74 に示すように切り抜きモデル化する処理も作成した。



出所：三菱プレシジョン（株）

Figure 74　SDM ジェネレータの道路標示の編集機能による道路の切り抜き処理

道路標示の剥離模擬機能として区画線やその他の道路標示のペイント部の剥離を模擬する以下に示すような機能を作成した。ユーザ定義もしくは剥離率を指定して剥離を自動生成する機能を作成した。



出所：三菱プレシジョン（株）

Figure 75　SDM ジェネレータの道路標示の剥離模擬（左：横断歩道の剥離模擬例、右：区画線の剥離模擬例）

⑫安全性評価のためのテストデータの検討

㋑ 安全性評価指標検討

安全性評価合同推進委員会の活動にて、仮想環境実用化の優先シナリオを定義し評価指標を検討している。

㋺ テストデータ I/F 検討

標準シナリオフォーマットとして、OpenSCENARIO を用いて基本シナリオ(アセスメント、ALKS)が適切に表現され、また、基本シナリオが SDM ジェネレータ上で動作することを確認した。また、不調シナリオについては、安全性評価合同推進委員会の活動にて、検討している。

⑬SDM ジェネレータ(拡張シナリオ対応版)の製作

㋑ 要求分析

今年度の SDM ジェネレータ(拡張版)では、標準規格である OpenDRIVE、OpenSCENARIO への対応を行うことにより、他システムへの連携可能なシナリオを作成することが可能となった。今後は、ユーザからの要望に基づく改善や、様々なシナリオをいかに効率的に作成できるかが求められる。

㋺ 設計

SDM ジェネレータ(拡張シナリオ対応版)では、Table 16 を製作対象とした。

Table 16 SDM ジェネレータ(拡張シナリオ対応版)の機能

番号	機能	内容
1	シナリオ作成効率化	車両等の配置、走行軌跡作成、シナリオイベント作成の効率化
2	交通シナリオ編集の拡張	信号現示情報の編集、信号不調シナリオの再現
3	不調シナリオ編集の拡張	センサ不調を誘発するシナリオ編集機能の拡充

出所:三菱プレシジョン(株)

(3)次年度以降の計画

②標準化フォーマットの認識関連の継続調査

ドイツ PEGASUS プロジェクトで採用の標準化フォーマット OpenDRIVE、OpenSCENARIO 等の認識関連と設計可能レベルの詳細内容を、バージョンアップに沿って継続的に調査する。

㋑ 標準化団体 ASAM Japan に関する調査

㋺ 海外渡航調査(ドイツの ASAM のカンファレンス等)

⑪SDM ジェネレータ(交通モデル対応版)の製作

㋩ 単体試験用モデル作成

㋥ コーディング、デバッグ、試験

⑫安全性評価のためのテストデータの検討

㋑ 安全性評価指標検討

㋺ テストデータ I/F 検討

⑬SDM ジェネレータ(拡張シナリオ対応版)の製作

㋩ 単体試験用モデル作成

㋥ コーディング、デバッグ、試験

5. 1. 3. 1「A2. 評価シナリオ記述方式等の検討」（三菱プレシジョン株式会社、SOLIZE 株式会社）

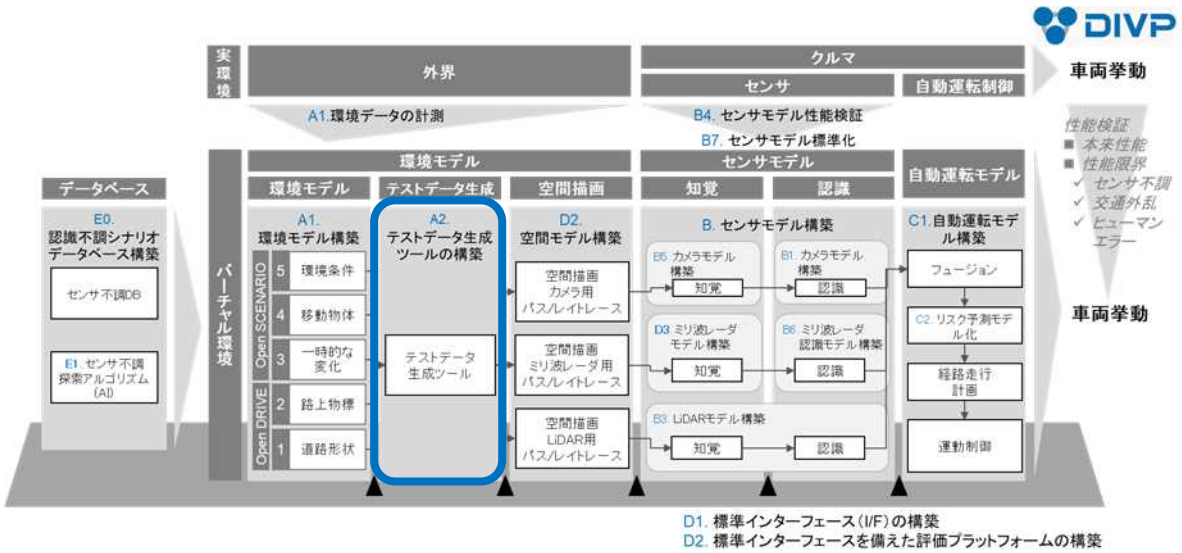


Figure 76　本研究の位置付け

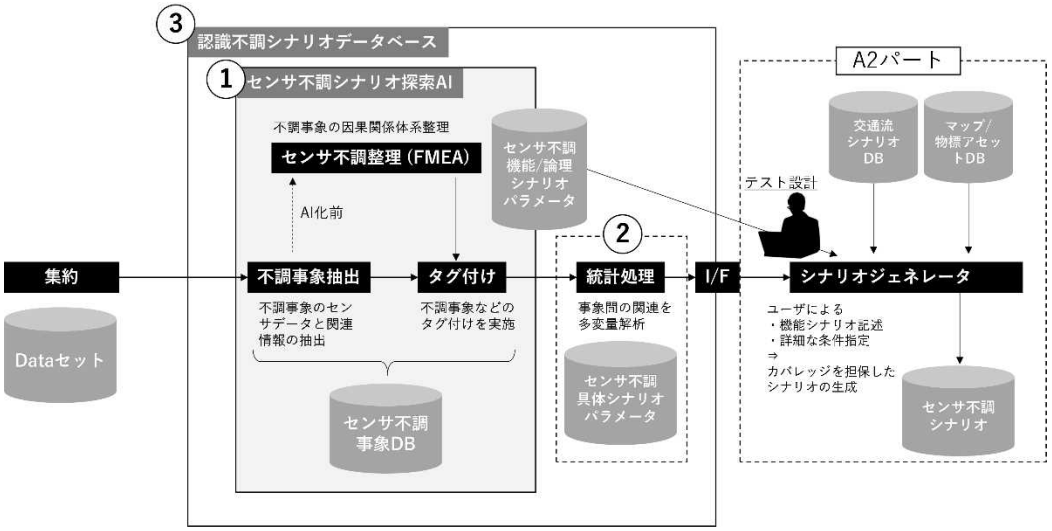
■ 事業目的

本事業としては、自動運転システムの評価可能性の向上及び国内ベンダーの競争力向上を目指す目的で、自動運転システムの安全性の評価を仮想空間上で効率的に実施するための、標準化された評価プラットフォームの構築を行う。

その中で、A パートは、走行安全性をシミュレーションで評価するための、走行環境モデルの構築を行うが、A2 パートは、走行環境のデータベースから、評価で使用するテストシナリオに適合したテストデータを生成するためのツールとして開発される SDM ジェネレータの入力として、センサ不調に関するテストシナリオを生成する環境を構築する。

■ 事業概要

SDM ジェネレータの入力となるセンサの不調シナリオについて、記述方法の検討と記述されたシナリオからシミュレータで実施可能なフォーマットでのテストシナリオの自動生成環境を構築する。



出所学校法人幾徳学園　神奈川工科大学

Figure 77　認識不調シナリオデータベースからのシナリオ群展開の概念図

■ 実施計画

事業項目	2018年度		2019年度				2020年度				2021年度				2022年度			
	第3四半期	第4四半期	第1四半期	第2四半期	第3四半期	第4四半期	第1四半期	第2四半期	第3四半期	第4四半期	第1四半期	第2四半期	第3四半期	第4四半期	第1四半期	第2四半期	第3四半期	第4四半期
① センサ不調シナリオの要求分析																		
② センサ不調の記述方法の検討																		
③ 不調スクリプトの生成ツールの作成1																		
④ 不調スクリプトの生成ツールの作成2																		
⑤ 不調シナリオの実行																		
⑥ 走行条件データベースとセンサ不調データベースの結合モジュールの構造設計と要件定義																		
⑦ 走行条件データベースとセンサ不調データベースの結合モジュールのプロトタイプ構築																		
⑧ シナリオ生成に関する標準化のための国際連携																		

(1)令和3年度の成果(まとめ)

センサ弱点DBとDIVP®プラットフォームとの連携モジュールの要件定義とプロトタイプ実装
国際連携の実施

研究開発の成果

SOLIZE

研究成果の自己評価	<実施内容> ■ センサ弱点DB、および、連携インターフェースの要件定義 センサ弱点DBスキーマとしてのタグ、および、センサ弱点DBと連携するソフトウェアインターフェースの要件定義 ■ センサ弱点推測エンジンとDIVP®プラットフォームとの連携モジュールのプロトタイプ実装 センサ弱点の推測結果をもとにシナリオを生成・選択する機能を有するソフトウェアプロトタイプの実装 ■ 実験データのシナリオ変換作業 実験の測定データのシミュレーションシナリオへの変換 <成果(アウトカム)> ■ センサ弱点DBのプロトタイプ実装を完了 ■ 特定のシナリオにおいて、要件およびプロトタイプの挙動を確認 <優位性> ■ センサ出力の一致性を確保するDIVP®プラットフォームには、センサ弱点を適切に表現するタグ構造・シナリオ構造が必要だが、これまでのシナリオ生成ツールでは、考慮されていない。それを作ろうとする先進的な取り組みである。
自社Biz視点から ①DIVP®の価値・魅力 ②活用可能性	■ センサ弱点が起こりうる確率を実測データから評価・推測してシナリオとして構築できることにより、センサの挙動を含んだ自動運転車両、機能の評価が実現できる ■ 交通流だけにとどまらない自動運転の安全性評価シナリオ構築の価値が高まり、自動運転に関わるエンジニアリング機会が増加する

得られた知財	■ センサ弱点シナリオの優先度評価の手法 ■ センサ弱点DBのタグ構造 ■ センサ弱点DBとプラットフォームの連携モジュール(シナリオジェネレータ)のシナリオ選択方法 ■ センサ弱点シナリオツール(ソフトウェア)
知財の保全	■ 特許:0件 ■ 報告書・ノウハウ集:1件(センサ弱点DB要件書) ■ 手順書:1件(シナリオ変換手順書) ■ ASAM標準:0件
残課題・今後への期待値	■ 現時点では、ある特定のセンサ弱点現象、センサ弱点シナリオに対して機能することを確認した段階。想定される多くのセンサ弱点DBやセンサ弱点シナリオに対応するためには、センサ弱点シナリオ構造の拡張、および、ソフトウェアの強化が必要。 ■ 自動運転の安全性評価において、センサ弱点を含んだ形でのシナリオ化は重要な一要素であり、継続的な議論、開発、さらには国際連携が必要。

Figure 78 研究開発の成果

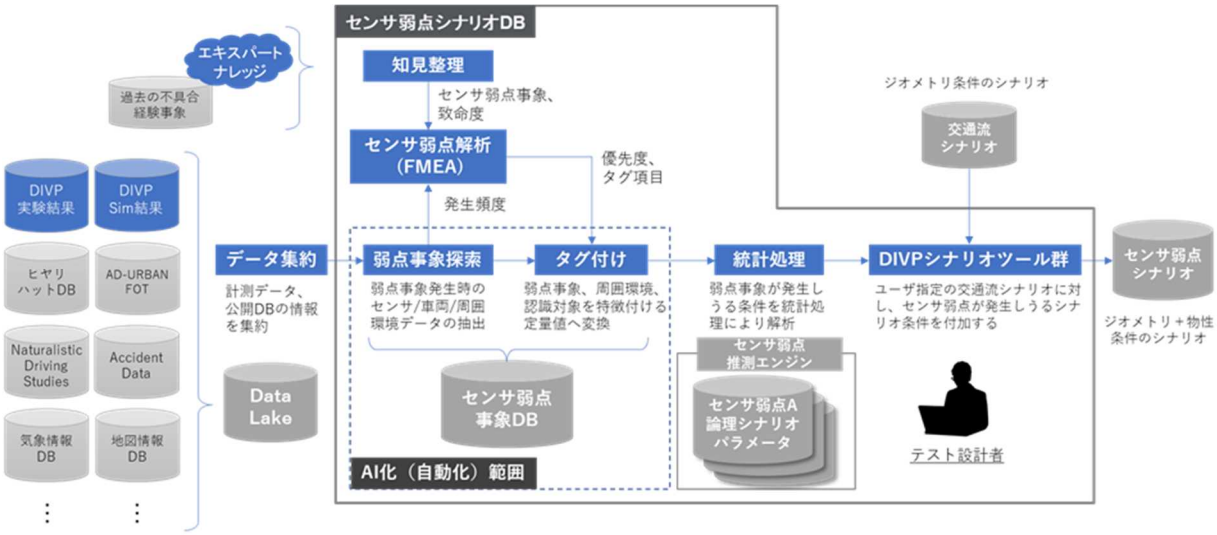
今年度は、センサ弱点データベースとその連携インターフェースの要件定義を行い、各インターフェースの詳細を定めた。その上で、センサ弱点推測エンジンと DIVP®プラットフォームとの連携モジュール(センサ弱点シナリオツール)のプロトタイプを実装し、一連の要件および仕様の妥当性を確認する活動を行った。
それ以外に、実験データのシナリオ変換ツールを統合し、実験データの DIVP®プラットフォーム向けシナリオへの変換を多くの人ができるようになった。

(2)令和3年度の成果

⑥ 走行条件データベースとセンサ不調データベースの結合モジュールの構造設計と要件定義

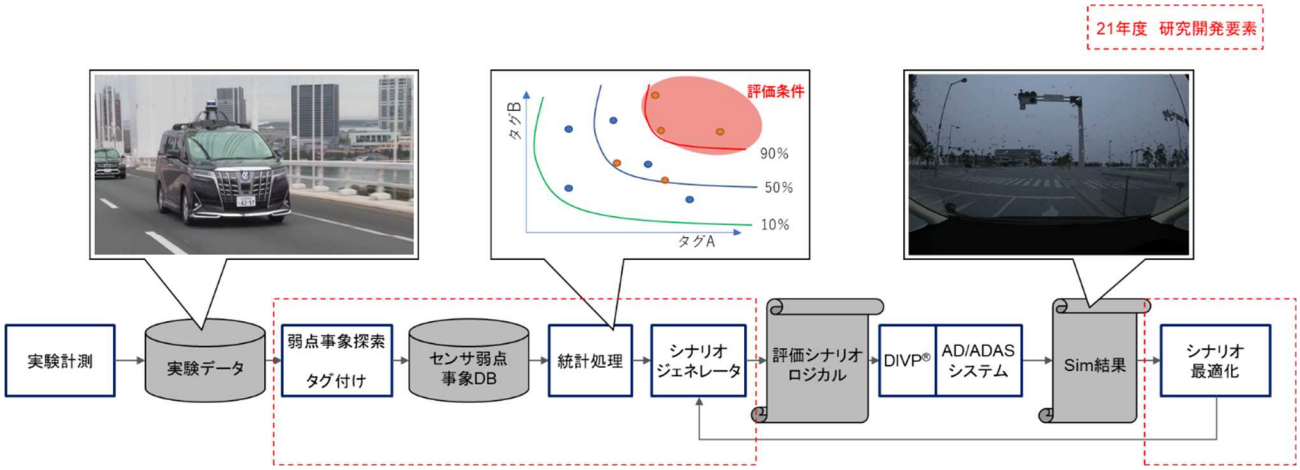
既存の自動運転シミュレーションで想定されているシナリオは、道路トポロジーの定義をした上で、交通参加者の挙動を定義する、または交通参加者の制御方法を指定する、という形式を持つ場合が多い。すなわち、交通流を再現するために必要なものになっている。ここでは、これを交通流シナリオと呼ぶ。一方で、センサ弱点現象を再現するシミュレータでは、交通流に加えて、天候や時間帯などの環境情報、交通参加者や道路周辺環境の物性など、センサのセンシング結果に影響があると考えられる情報を含めた形で指定できるようなシナリオを構築、適用することではじめて意図した結果を得られることになる。このシナリオのことをセンサ弱点シナリオと呼ぶ。(センサ弱点シナリオという言葉は、センサの性能限界や弱点が実際に発生するシナリオを表現する場合もあるが、ここでは、それを設定できるだけの情報をもつシナリオとして定義する)

本プロジェクトでは、センサ弱点シナリオを効率的に見つけるためのモジュールとしてセンサ弱点データベースを構築している(E0 参照)。



出所:学校法人幾徳学園　神奈川工科大学

Figure 79　センサ弱点シナリオデータベース構成



出所：学校法人幾徳学園　神奈川工科大学

図 1 センサ弱点事象 DB とその関連モジュールの全体像

センサ弱点データベースはセンサ弱点情報を蓄積するデータベースであるが、情報を蓄積するためにはセンサ弱点情報を入力するモジュールとの連携が必要である。多様なセンサがあり、また今後も開発されることが想定されるため、センサ弱点現象のデータを取得する方法を固定することは現実的ではない。そのため、データベースのスキーマをベースにとして、一般的なインターフェースであるべきと考え、JSON でデータベースのスキーマに変換しやすい形で表現することとした。

センサ弱点データベースからの出力としては、センサ弱点データベースの情報をまとめて取得し統計的に処理することで、センサ弱点現象が起きる条件を確率として出力するモジュールとのインターフェースをまず優先的に検討するとことした。こちらは、統計処理がしやすいフォーマットとして、CSV フォーマットを採用した。

また、それらを実現するセンサ弱点データベースのスキーマとしてのセンサ弱点表現のためのタグ構造についても検討した。

以下、それぞれの詳細について説明する。

センサ弱点表現のためのタグ構造

センサ弱点現象のためのタグ構造は、以下のような特徴をもつものとして定義した。

- 人や人工知能によるタグ付けが可能となるような定性的（抽象的）な情報

  センサ弱点現象の特定は、大量のセンサデータの中からある特徴を持ったシーンを取り出してタグ付けするという作業であり、人工知能を利用した認識処理による効率的な処理と、人間の眼による事象の識別の両方を活用して実施することが想定される。そのため、人と人工知能の両方が理解できるタグが必要である。そのため、Yolo v5 など既知の認識エンジンが認識可能なタグを含み、人間が十分に評価できるレベルの抽象度を持つように設計した。

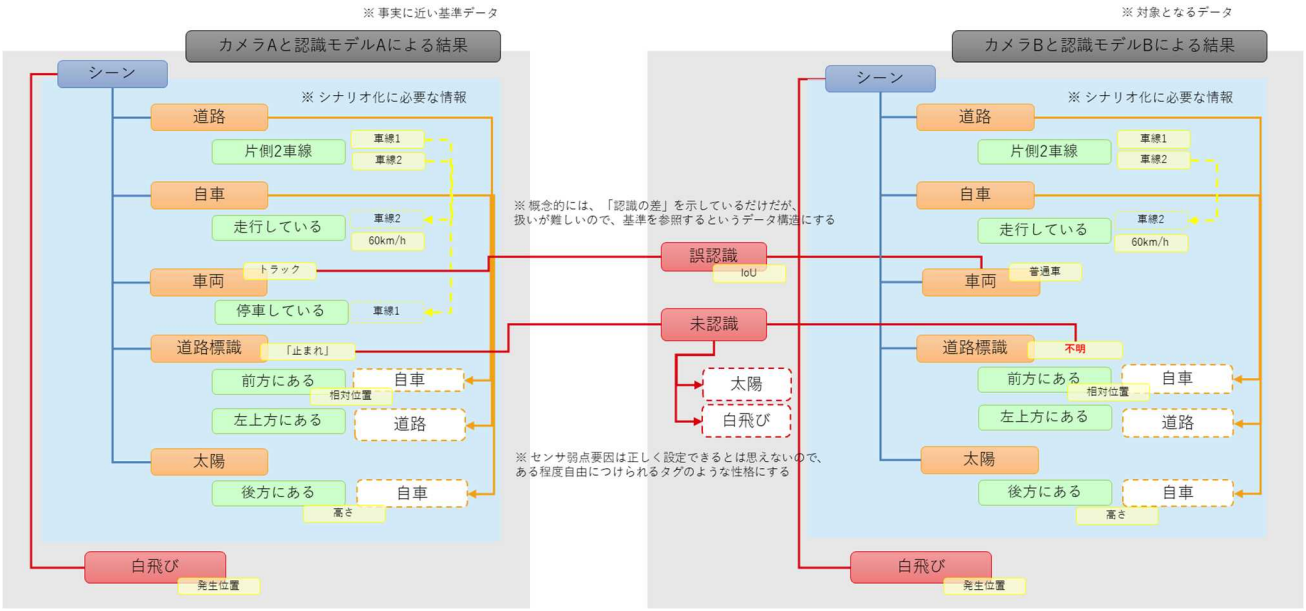
- 自車を中心とした相対的な位置表現

  センサ弱点現象は、センサとの位置関係で現れるものなので、センサからの位置を表現するのが適切である。ただ、センサ位置からの位置関係で表現するとセンサの位置の情報を把握する必要があるなど複雑になりやすい。また、自車のセンサ装着情報を考慮したタグ付けの実現は前項の抽象度に照らし合わせても、また、必要な情報の精度という意味でも、それほど意味がない。そのため、自車からの相対位置で代表して

位置表現を行うこととした。

- 基準データとの差異を表現できるようにして、センサ弱点現象を記述
  センサ弱点現象は、真値または真値を見なせる状況を基準とした差異として表現される。そのため、対象となるデータを正しく表現できるだけでなく、基準となる状況との差異を表現できるようにした。

タグ情報を模式的に記載すると以下のようになる。



出所：SOLIZE 株式会社

Figure 80 タグ情報の例

左側「カメラ A と認識モデル A による結果」は基準となる状況を表すデータであり、右側「カメラ B と認識モデル B による結果」が実際のセンサデータである。多くのタグが定性的な情報となっていて、タグ付けしやすくなっている。また、シーンに現れる要素の位置関係は多くの場合自車基準で表現されている。

左側の基準となる状況を表すデータと右側の実際のセンサデータの差異が「認識レベルでのセンサ弱点」として現れる。上記例では、車両の種類を誤認識している点、道路標識を認識できていない点が、認識レベルでのセンサ弱点である。認識レベルでのセンサ弱点は、知覚レベルでのセンサ弱点（この例では「白飛び」）や、それらのセンサ弱点を引き起こしていると考えている要因（この例では「太陽」）などが関係づけられている。

タグの一覧を以下に示す。タグを設定することができる「もの」のことをエンティティとし、エンティティにはシナリオで動作を制御できる「交通参加者（動作制御実体）」、動作を制御できない「非制御実体」、別のエンティティに付随してシナリオに現れる「付随実体」、付随実体の中でも物理的実体のない「非物理付随実体」のように分類している。

Table 17 タグ一覧

エンティティ					
	交通参加者（動作制御実体）				
		人			
			NCAP ダミー歩行者		
			姿勢別の人		
				その他	
				しゃがんでいる人	
				倒れている人	
				立っている人	
			年齢毎の人		
				その他	
				大人	
				子供	
				老人	
			自転車を押している人		
			車いすに乗っている人		
		車両			
			形状別の車両		
				その他	
				トランクが開いている車両	
				ドアが開いている車両	
			種類毎の車両		
				その他	
				牽引有無	
				トラック	
					平トラック
					アルミバントラック
					アドトラック
					トレイラートラック
					低床キャリアトラック
				バイク	
				バス	
				バン	
				乗用車	
				自転車	
					NCAP ダミー自転車
				路面電車	
			車格毎の車両		
				その他	

				大型自動車
				普通車
				軽自動車
				軽車両
	色			
		その他		
		グレー		
		シルバー		
		ブラウン		
		白		
		緑		
		赤		
		青		
		黄		
		黒		
	質感			
		その他		
		ラメ		
		光沢		
		半透明		
		非光沢		
	付随実体			
		センサ		
			Camera	
			LiDAR	
			Radar	
		センサ付随実体		
			センサの汚れ	
			水滴	
				雨滴
			雪氷	
		所持物		
			その他	
			リュック	
			傘	
			鞄	
			黒革の衣服	
			黒革の鞄	
		白線付随実体		
			その他	
			白線のかすれ	
			白線の汚れ	

		車両付随実体			
			その他		
			エンブレム		
			ステッカー		
			車両の汚れ		
		道路付随実体			
			その他		
			つなぎ目		
			わだち		
			マンホール		
			水たまり		
			水の巻き上げ		
			道の穴		
	回避物				
		その他			
		ボール			
		リフレクター			
		段ボール			
	認識対象物				
		信号機			
		歩行者用の信号機			
		車両用の信号機			
		信号機の光			
			信号機の点滅		
			信号機の色		
					緑
					黄
					赤
		標識			
			横断歩道の標識		
		標識の光			
		白線→路面標示？			
			ゼブラゾーン		
			停止線		
		白線の種類			
			実線の白線		
			破線の白線		
		路面標示			
			横断歩道		
			路面速度表示		
		踏切			
	道路				

		レーン		
		交差点		
			その他	
			T 字路	
			Y 字路	
			三叉路 （分けるのか？）	
			分岐	
			十字路	
			合流	
		形状毎の道路		
			その他	
			右カーブの道路	
			左カーブの道路	
			直線の道路	
		勾配		
			上り	
			下り	
			平坦路	
		バンク		
			バンク右	
			バンク左	
			バンクなし	
		状況毎の道路		
			その他	
			乾いている道路	
			凍っている道路	
			水がたまっている道路	
			濡れている道路	
			雪が積もっている道路	
		舗装面毎の道路		
			舗装道路	
				その他
				アスファルトの道路
				コンクリートの道路
				タイルの道路
			非舗装道路	
				その他
				砂利の道路
				鉄板の道路
	非制御実体			
		ガードレール		
		トンネル		

		ビル			
		橋			
			その他		
			歩道橋		
			高架橋		
		空にあるもの			
			その他		
			太陽		
			月		
			雲		
		道路周辺物			
			その他		
			歩道		
			街灯		
			街路樹		
			路側壁		
			防音壁		
	非物理付随実体				
		光			
			信号機の光		
				信号機の点滅	
			日光		
			標識の光		
			灯火の光		
				その他	
				ウインカーの光	
				テールランプの光	
				ブレーキランプの光	
				ヘッドライト	
					他車のヘッドライト
					自車のヘッドライト
			街灯の光		
		周辺の明るさ			
			ひなた		
			日陰		
		影			

センサ弱点現象	
	クラッタ
	ゴースト
	ノイズ
	フリッカ

	マルチパス
	低コントラスト
	偽点
	反射
	反射強度上昇
	反射強度低下
	反射指向性変化
	反射率変化
	受信信号低下
	映り込み
	白線誤認識
	白飛び
	遮蔽
	鏡面
	類似物標
	高反射
	'背景色(類似色、保護色)'
	ブラックスポット
	認識未検出
	認識誤検出
	認識クラス誤り
	認識低 IoU

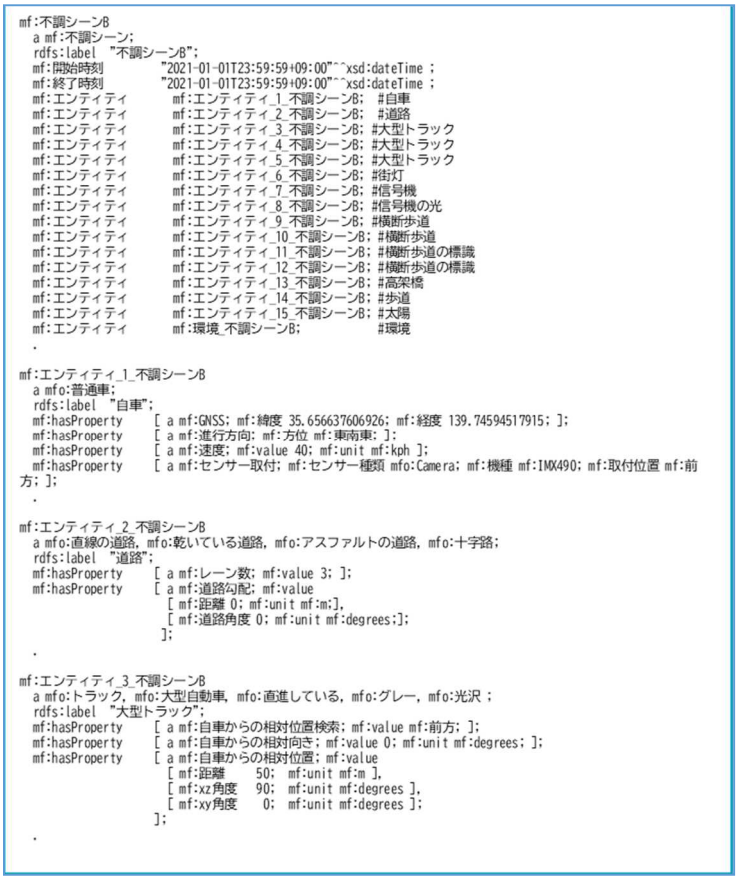
動作			
	人の動作		
		その他	
		横切っている	
		止まっている	
		歩いている	
		走っている	
	車両の動作		
		その他	
		停止している	
		加速している	
		後退している	
		曲がっている	
			右へ曲がっている
			左へ曲がっている
		減速している	
		直進している	

環境			
	天候		
		晴れ	
		曇り	
		雨	
		雨	
			その他
			豪雨
			霧雨
		雪	
			その他
			小雪
			豪雪
		霧	
			その他
			濃霧
			靄
		風	
			その他
			地吹雪
			桜吹雪
			落ち葉を舞い上げる風
	時間帯		
		夕方	
		夜間	
		昼間	
		朝方	

出所 SOLIZE（株）

センサ弱点データベースのスキーマ

センサ弱点データベースは、タグ間の複雑な関係性を表現できるオントロジーデータベース（RDF DB）を採用している。そのため、タグの情報をそのまま利用してデータベース化している。



```
mf:不調シーンB
  a mf:不調シーン;
  rdfs:label  "不調シーンB";
  mf:開始時刻          "2021-01-01T23:59:59+09:00"^^xsd:dateTime ;
  mf:終了時刻          "2021-01-01T23:59:59+09:00"^^xsd:dateTime ;
  mf:エンティティ       mf:エンティティ_1_不調シーンB;  #自車
  mf:エンティティ       mf:エンティティ_2_不調シーンB;  #道路
  mf:エンティティ       mf:エンティティ_3_不調シーンB; #大型トラック
  mf:エンティティ       mf:エンティティ_4_不調シーンB; #大型トラック
  mf:エンティティ       mf:エンティティ_5_不調シーンB; #大型トラック
  mf:エンティティ       mf:エンティティ_6_不調シーンB; #街灯
  mf:エンティティ       mf:エンティティ_7_不調シーンB; #信号機
  mf:エンティティ       mf:エンティティ_8_不調シーンB; #信号機の光
  mf:エンティティ       mf:エンティティ_9_不調シーンB; #横断歩道
  mf:エンティティ       mf:エンティティ_10_不調シーンB; #横断歩道
  mf:エンティティ       mf:エンティティ_11_不調シーンB; #横断歩道の標識
  mf:エンティティ       mf:エンティティ_12_不調シーンB; #横断歩道の標識
  mf:エンティティ       mf:エンティティ_13_不調シーンB; #高架橋
  mf:エンティティ       mf:エンティティ_14_不調シーンB; #歩道
  mf:エンティティ       mf:エンティティ_15_不調シーンB; #太陽
  mf:エンティティ       mf:環境_不調シーンB;            #環境
  .

mf:エンティティ_1_不調シーンB
  a mfo:普通車;
  rdfs:label  "自車";
  mf:hasProperty     [ a mf:GNSS; mf:緯度 35.656637606926; mf:経度 139.74594517915; ];
  mf:hasProperty     [ a mf:進行方向; mf:方位 mf:東南東; ];
  mf:hasProperty     [ a mf:速度; mf:value 40; mf:unit mf:kph ];
  mf:hasProperty     [ a mf:センサー取付; mf:センサー種類 mfo:Camera; mf:機種 mf:IMX490; mf:取付位置 mf:前
方; ];
  .

mf:エンティティ_2_不調シーンB
  a mfo:直線の道路, mfo:乾いている道路, mfo:アスファルトの道路, mfo:十字路;
  rdfs:label  "道路";
  mf:hasProperty     [ a mf:レーン数; mf:value 3; ];
  mf:hasProperty     [ a mf:道路勾配; mf:value
                       [ mf:距離 0; mf:unit mf:m;],
                       [ mf:道路角度 0; mf:unit mf:degrees;];
                     ];
  .

mf:エンティティ_3_不調シーンB
  a mfo:トラック, mfo:大型自動車, mfo:直進している, mfo:グレー, mfo:光沢 ;
  rdfs:label  "大型トラック";
  mf:hasProperty     [ a mf:自車からの相対位置検索; mf:value mf:前方; ];
  mf:hasProperty     [ a mf:自車からの相対向き; mf:value 0; mf:unit mf:degrees; ];
  mf:hasProperty     [ a mf:自車からの相対位置; mf:value
                       [ mf:距離     50;  mf:unit mf:m ],
                       [ mf:xz角度   90;  mf:unit mf:degrees ],
                       [ mf:xy角度    0;  mf:unit mf:degrees ];
                     ];
  .
```

出所 SOLIZE（株）

Figure 81　データベースに入力されたシーンの例（抜粋）

センサ弱点データベースの入力インターフェース

センサ弱点データベースの入力インターフェースは、一般的なプログラム（特に認識処理などで比較的用いられることの多い Python ベースのプログラム）でも人間でも理解しやすく編集しやすい JSON のフォーマットとした。

```
"title": "Schema for a sensor weakness data",
"description": "the schema for a sensor weakness data",
"type": "object",
"properties": {
    "perception_error": {
        "$ref": "perception_error.schema.json"
    },
    "ego_vehicle": {
        "$ref": "ego_vehicle.schema.json"
    },
    "vehicles": {
        "type": "array",
        "items": {
            "$ref": "vehicle.schema.json"
        }
    },
    "pedestrians": {
        "type": "array",
        "items": {
            "$ref": "pedestrian.schema.json"
        }
    },
    "obstracles": {
        "type": "array",
        "items": {
            "$ref": "obstacle.schema.json"
        }
    },
    "traffic_signs": {
        "type": "array",
        "items": {
```


出所 SOLIZE（株）

Figure 82　センサ弱点データベースの入力インターフェース JSON スキーマ（抜粋）


```
{
    "sensor_weakness_data": [
    {
        "perception_error": {
            "year":"2020",
            "date_time": "11/26 14:43:03.900000",
            "timeslot": "daytime",
            "place": [35.63446944,139.7879481,4.896135807],
            "sensor": {
                "sensor_id": 1,
                "sensor_type": "camera",
                "sensor_model": "SONY IMX490",
                "sensor_position": [0.960,0,1.595],
                "sensor_angle": [0,0,0]
            },
            "error_area": [[241,0],[482,234]],
            "error_type": ["halation"],
            "cutout_movie": "/home/divp/Tsuda/2021-11-25_14h02m55s/halation_1.mp4"
        },
        "ego_vehicle":
        {
            "year":"2020",
            "date_time":"11/26 14:43:03.900000",
            "position": [35.63446944,139.7879481,4.896135807],
            "rotation": [0,0,15],
            "velocity": [0,0,0],
            "sensors": [
            {
                "sensor_id": 1,
                "sensor_type": "camera",
                "sensor_model": "SONY IMX490",
```


出所 SOLIZE（株）

Figure 83　センサ弱点データベース入力データサンプル（抜粋）

データ構造は、上記タグの構造にデータ取得日時、位置情報（緯度経度）など、センサデータのパスなど、元データから得られる情報を付与したものとなっていて、JSON Schema として規定している。

センサ弱点データベースの出力インターフェース

センサ弱点データベースの出力は、様々な統計処理で効率的に利用できるようにするため、CSV のインターフェースとして定義している。タグ構造がもつ関係性の複雑さをそのまま CSV インターフェースにすることは難しいため、認識対象物ごとの情報を 1 データとして表現することで、認識対象物単位での統計処理を実施しやすくした。

⑦ 走行条件データベースとセンサ不調データベースの結合モジュールのプロトタイプ構築

センサ弱点データベースの構築と、センサ弱点データベースとDIVP®プラットフォームや SDM ジェネレータとの結合モジュールとしての「シナリオジェネレータ（センサ弱点シナリオ探索モジュール）」のプロトタイプを実装した。

これら二つのモジュールを含むセンサ弱点シナリオデータベースの一連のプロトタイプは、特定のセンサ弱点シナリオにおいての有効性を検証するために実装したものだが、その前提として優先すべきシナリオを選択する方法も検討し、それに基づいてシナリオの選択を実施した。

センサ弱点シナリオの優先度検討

センサ弱点シナリオは、安全性評価のための重要な要素であり、何らかの基準をもとに網羅的に準備することが望ましい。ただし、センサ弱点現象の種類は多く、その要因となる事物、事象も多岐にわたるため、すべての弱点シナリオをすべからく確認することは難しく、安全性評価の観点から優先的に確認すべきシナリオを選ぶ必要があると考える。

シナリオの選択方法としては、センサの動作原理に基づく性能限界や弱点のリストアップを行ったうえで、それぞれの弱点現象の「致命度・影響度」と「シミュレーションの必要性」を数値化し、その積によって順位付けしている。「センサ弱点現象の致命度・影響度」は弱点現象が安全性評価にどの程度影響するかを 3 段階評価したものであり、「センサ弱点現象のシミュレーションの必要性」はシミュレーション評価の実機評価に対する優位性（コスト、繰り返し可能性など）を 3 段階評価したものである。

以下に優先度付けの結果を示す。最初はミリ波レーダに関する結果である。

Table 18 センサ弱点現象の優先度付け(ミリ波レーダ その 1)

センサ	ID	不調原理	不調現象	結果	スコア	致命度	致命度・影響度説明	Sim	Sim必要性
ミリ波	19	低S/N	センサ前面の付着物、エンブレム、バンパ等の破損により信号が減衰する	未認識（FN）	2	小	検知距離低下、低反射物が検出できない	中	再現テストが容易になる
ミリ波	20	低S/N	雨や雪、砂や虫などの空間障害物により信号が減衰する	未認識（FN）	4	中	検知距離低下、低反射物が検出できない	中	遭遇頻度低
ミリ波	21	低S/N	認識対象の形状、大きさ、姿勢などにより反射強度が低下する	未認識（FN）	6	大	検知距離低下、低反射物が検出できない	中	再現テストが容易になる
ミリ波	22	低D/U	路面等によるマルチパスフェージング	未認識（FN）	6	大	認識対象をロストする	中	再現テストが容易になる
ミリ波	23	低D/U	車両姿勢、道路傾き、搭載ばらつきなどによりアンテナ指向性方向が変わりクラッタが増えて信号が埋もれる	未認識（FN）	4	中	認識対象をロストする	中	再現テストが容易になる
ミリ波	24	低D/U	路面や周辺および上方構造物によるクラッタで認識対象の信号が埋もれる	未認識（FN）	4	中	検知距離低下、低反射物が検出できない	中	再現テストが容易になる
ミリ波	25	低D/U	雨や雪、砂や虫などの空間障害物によるクラッタで認識対象の信号が埋もれる	未認識（FN）	4	中	検知距離低下、低反射物が検出できない	中	再現テストが容易になる
ミリ波	26	低D/U	他車レーダの電波が干渉し、認識対象の信号が埋もれる	未認識（FN）	4	中	検知距離低下、低反射物が検出できない	中	再現テストが容易になる
ミリ波	27	U増大	車両姿勢、道路傾き、搭載ばらつきなどによりアンテナ指向性方向が変わりクラッタが増える	誤認識（FP）	4	中	前方に物標があると誤認識する	中	再現テストが容易になる
ミリ波	28	U増大	路面や周辺および上方構造物によるクラッタを誤認識する	誤認識（FP）	4	中	前方に物標があると誤認識する	中	再現テストが容易になる
ミリ波	29	U増大	雨や雪、砂や虫などの空間障害物によるクラッタを誤認識する	誤認識（FP）	4	中	前方に物標があると誤認識する	中	遭遇頻度低
ミリ波	30	U増大	他車レーダの電波が干渉し、干渉信号を誤認識する	誤認識（FP）	4	中	前方に物標があると誤認識する	中	再現テストが容易になる

出所：SOLIZE 株式会社

Table 19 センサ弱点現象の優先度付け(ミリ波レーダ その 2)

センサ	ID	不調原理	不調現象	結果	スコア	致命度	致命度・影響度説明	Sim	Sim必要性
ミリ波	1	周波数	信号周波数の異常（センサ本体の不調でのみ発生）	両方	2	小	距離/速度の誤認識、未認識	中	実車での再現が困難
ミリ波	2	反射(閉塞波)	壁等の路側構造物あるいは周辺移動物によるマルチパスゴースト	誤認識（FP）	4	中	ゴーストを誤認識する	中	再現テストが容易になる
ミリ波	3	反射(閉塞波)	壁等あるいは周辺移動物によるマルチパスゴーストと本来の物標が分離できず水平方向の位置検出精度が落ちる	未認識（FN）	4	中	目の前の車両が認識できない	中	再現テストが容易になる
ミリ波	4	屈折	バンパ、エンブレム等による電波の屈折	誤認識（FP）	4	中	車両の方位を誤る	中	再現テストが容易になる
ミリ波	5	屈折	搭載ばらつき、搭載ズレによる屈折の変化	誤認識（FP）	4	中	車両の方位を誤る	中	再現テストが容易になる
ミリ波	6	屈折	D	誤認識（FP）	2	小	車両の方位を誤る	中	再現テストが容易になる
ミリ波	7	屈折	バンパ、エンブレム等の破損による屈折の変化	誤認識（FP）	2	小	車両の方位を誤る	中	再現テストが容易になる
ミリ波	8	伝搬遅延変化	バンパ、エンブレム等による伝搬遅延	誤認識（FP）	4	中	車両の方位を誤る	中	再現テストが容易になる
ミリ波	9	伝搬遅延変化	搭載ばらつき、搭載ズレによる伝搬遅延の変化	誤認識（FP）	4	中	車両の方位を誤る	中	再現テストが容易になる
ミリ波	10	伝搬遅延変化	センサ前面の付着物による伝搬遅延の変化	誤認識（FP）	2	小	車両の方位を誤る	中	再現テストが容易になる
ミリ波	11	伝搬遅延変化	バンパ、エンブレム等の破損による伝搬遅延の変化	誤認識（FP）	2	小	車両の方位を誤る	中	再現テストが容易になる
ミリ波	12	Sなし(部分的)	路側または上方構造物により認識対象の一部が隠れる	未認識（FN）	4	中	認識対象をロストする	中	再現テストが容易になる
ミリ波	13	Sなし(部分的)	雨や雪、砂や虫などの空間障害物により認識対象信号の一部が消失する	未認識（FN）	4	中	認識対象をロストする	中	遭遇頻度低
ミリ波	14	折返し	観測範囲を超える強信号の折返し(エイリアシング)によるゴースト	誤認識（FP）	4	中	遠方の物標を近傍に誤認識する	中	再現テストが容易になる
ミリ波	15	高調波	回路歪によるゴースト	誤認識（FP）	2	小	ゴーストを誤認識する	中	再現テストが容易になる
ミリ波	16	高調波	多重エコーによるゴースト	誤認識（FP）	2	小	ゴーストを誤認識する	中	再現テストが容易になる
ミリ波	17	S強度変大	隣接する強信号による小信号の埋没、精度劣化	未認識（FN）	6	大	車両横のバイク、歩行者を検出できない	中	再現テストが容易になる
ミリ波	18	低S/N	車両姿勢、道路傾き、搭載ばらつきなどによりアンテナ指向性方向から認識対象が外れる	未認識（FN）	4	中	検知距離低下、低反射物が検出できない	中	再現テストが容易になる

出所 SOLIZE（株）

次に、LiDAR に関する結果を示す。

Table 20 センサ弱点現象の優先度付け（LiDAR その 1）

センサ	ID	不調原理	不調現象	結果	スコア	致命度	致命度・影響度説明	Sim難	Sim必要性
LiDAR	31	スキャンタイミング	自車両が動いている場合、フレーム内でのビーム出射タイミングの違いにより、空間全体の点群が位置ずれをおこす。	未認識（FN）	4	中	影響度は自車両速度に依存。位置(距離・角度)ずれが発生する。	中	再現性、組み合わせ評価の低コスト化
LiDAR	32	スキャンタイミング	ターゲットが動いている場合、フレーム内でのビーム出射タイミングの違いにより、ターゲットの点群が位置ずれを起こす。	未認識（FN）	2	小	影響度は、自車両と対象物の相対速度に依存。位置(距離・角度)ずれが発生する。	中	再現性、組み合わせ評価の低コスト化
LiDAR	33	S強度/飽和	近距離に反射率の高い物体がある場合、受信光が飽和し、距離誤差が大きくなる。	未認識（FN）	4	中	近距離の測距誤差が大きくなる。	中	
LiDAR	34	S強度/減衰	物標反射特性の違いにより、反射率の低いターゲットは受信光量が少なく、検出できない。	未認識（FN）	9	大	反射率の低い物体(ex 黒革服)、鏡面性を持つ物体の検出ができない。	大	常に発生。 再現性、組み合わせ評価での低コスト化
LiDAR	35	S強度/減衰	ターゲットへの入射角の違いにより、入射角が浅い場合は、受信光量が少なく検出できない。	未認識（FN）	9	大	入射角の浅い物体(ex.地面)の見える範囲が近距離のみになる。	大	常に発生。 再現性、組み合わせ評価の低コスト化
LiDAR	36	S強度/減衰	ターゲット上の付着物により、受信光量が減少し、ターゲットを検出できない。	未認識（FN）	9	大	付着物の量と何が付着するかに依存	大	常に発生。 再現性、組み合わせ評価の低コスト化
LiDAR	37	S強度/減衰	ターゲットにビームフットプリントの一部しか当たらないことにより、受信光量が少なくなり検出できない。	未認識（FN）	9	大	遠方において影響大	大	常に発生。 再現性、組み合わせ評価の低コスト化
LiDAR	38	S強度/減衰	ターゲットまでの光路中に透過特性を持つ物体(雨、ガラスなど)が存在し、受信光量が減少し、ターゲットを検出できない。	未認識（FN）	4	中	ガラス越しに物標を検出する場合に必要	中	
LiDAR	39	S強度/減衰	ターゲットまでの距離が遠くなることにより受信光量が減衰し、ターゲットが検出できない。	未認識（FN）	9	大	同じ反射率であっても、距離により未検出になる。	大	常に発生。 再現性、組み合わせ評価の低コスト化
LiDAR	40	S強度/減衰	雨や雪、砂や虫などの空間障害物による受信光量が減衰し、ターゲットを検出できない。	未認識（FN）	9	大	検出可能距離が短くなり、最終的には検出できない状態になる。	大	常に発生。 再現性、組み合わせ評価の低コスト化
LiDAR	41	S強度/減衰	センサ前面の付着物により、受信光量が減衰し、ターゲットを検出できない。	未認識（FN）	9	大	FOV内に部分的に検出できないエリアができる。FOV全体または一部エリアの検出可能距離が短くなる。	大	常に発生。 再現性、組み合わせ評価の低コスト化

出所：SOLIZE 株式会社

Table 21 センサ弱点現象の優先度付け（LiDAR その 2）

センサ	ID	不調原理	不調現象	結果	スコア	評価結果	致命度・影響度説明	Sim	Sim必要性
LiDAR	42	S強度/減衰	センサ前面の破損(傷・ヒビ等)により、受信光量が減衰し、ターゲットを検出できない。	未認識（FN）	6	大	FOV内に部分的に検出できないエリアができる。FOV全体または一部エリアの検出可能距離が短くなる。	中	
LiDAR	43	S強度/減衰	センサ前面の形状変化(歪み等)により、異なる方向にビームが照射され、ターゲットとは異なる物体を検出してしまう。	誤認識（FP）	1	小	設計値としてのビーム照射方向と実際の照射方向がずれる→物標にあたらず、未検出となる。	小	遭遇頻度低
LiDAR	44	S強度/減衰	センサ前面の形状変化(歪み等)により、異なる方向にビームが照射され、ターゲットが検出できない。	未認識（FN）	1	小	設計値としてのビーム照射方向と実際の照射方向がずれる→他物体にあたり誤検出を引き起こす。	小	遭遇頻度低
LiDAR	45	S強度/減衰	LiDAR搭載パラツキ・姿勢変化により、設計と異なる方向にビームを照射することによりターゲットとは異なる他物体を検出してしまう。	誤認識（FP）	6	中	設計値としてのビーム照射方向と実際の照射方向がずれる→物標にあたらず、未検出となる。	大	実機検証より容易(コスト低)
LiDAR	46	S強度/減衰	LiDAR搭載パラツキ・姿勢変化により、設計と異なる方向にビームを照射することによるターゲットが検出できない。	未認識（FN）	6	中	設計値としてのビーム照射方向と実際の照射方向がずれる→他物体にあたり誤検出を引き起こす。	大	実機検証より容易(コスト低)
LiDAR	47	S強度/遮蔽	ターゲットが、他物体により(一部、または完全に)隠されることにより検出できない。	未認識（FN）	9	大	遮蔽によりターゲットの物標が隠される。	大	遭遇頻度高。 再現性、組み合わせ評価での低コスト化
LiDAR	48	S伝搬方向	ターゲットの反射特性が鏡面性を持つ場合、光線がターゲット面で反射し、受信光量がたりず、検出できない。	未認識（FN）	9	大	鏡面性をもつ物標面での光線の反射による位置(距離)ずれ、もしくは未検出	大	再現性、組み合わせ評価での低コスト化
LiDAR	49	S伝搬方向	ターゲットまでの光路にビームの屈折を引き起こす物体がある場合、ビームがターゲットにあたらず、検出できない。	未認識（FN）	1	小	空間浮遊物(雨)による信号屈折により、想定と異なる位置をビームが照射することにより物標にあたらず未検出、もしくは位置ずれが発生する。	小	遭遇頻度低
LiDAR	50	S伝搬方向	ターゲットまでの光路にビームの屈折を引き起こす物体がある場合、ビームがターゲットにあたらず、検出できない。	未認識（FN）	1	小	ガラス(ウインドシールド)面による信号屈折により、想定と異なる位置をビームが照射することにより、物標にあたらず未検出、もしくは位置ずれが発生する。	小	遭遇頻度低

出所：SOLIZE 株式会社

Table 22 センサ弱点現象の優先度付け（LiDAR その 3）

センサ	ID	不調原理	不調現象	結果	スコア	評価結果	致命度・影響度説明	Sim	Sim必要性
LiDAR	51	N要因	ターゲット面に太陽光があたることにより、太陽光も受信してしまう。結果、受信信号のノイズ量が増大し、受信信号がノイズに埋もれてしまうことで、間違ってノイズを検出してしまう。	誤認識（FP）	6	中	太陽光の影響によりノイズが増え、受信光が埋もれてしまい、ノイズを検出してしまう。	大	遭遇頻度高。 再現性、組み合わせ評価での低コスト化
LiDAR	52	N要因	ターゲット面に太陽光があたることにより、太陽光も受信してしまう。結果、受信信号のノイズ量が増大し、受信信号がノイズに埋もれてしまうことで、ターゲットを検出できない。	未認識（FN）	6	中	太陽光の影響によりノイズが増え、信号受信光が埋もれてしまい物標が検出できない。	大	遭遇頻度高。 再現性、組み合わせ評価での低コスト化
LiDAR	53	N要因	他車両に搭載されてるLiDARのビームを受信してしまうことで、他車両からのビームを受信信号と間違って検出してしまうことで、偽点が発生する。	誤認識（FP）	6	大	他光源のパルス状ノイズを信号戻り光と間違え、誤検出。	中	発生頻度はLiDARのスキャン方式に依存(MEMSスキャン方式は頻度低)
LiDAR	54	U要因	ターゲットの反射特性が鏡面性を持つ場合、光線がターゲット面で反射し、反射した光線が他物体にあたることで、異なった距離が算出される。(偽点が発生する。)	誤認識（FP）	9	大	鏡面性をもつ物体(ex.水たまり)で反射し、反射後にビームのあたる物体を誤検出する。(水たまりであれば、地面下に点が検出される。)	大	遭遇頻度高。 再現性、組み合わせ評価での低コスト化。
LiDAR	55	U要因	ターゲットまでの光路にビームの反射を引き起こす物体(雨、雪、ウインドシールドなど)がある場合、ビームが物体面で反射し、偽点が発生する。	誤認識（FP）	4	中	空間に浮遊している雨、雪、虫を誤検出する。	中	遭遇頻度低。実機での検証は条件をそろえるのが難しいことから、低コスト化にはなる。
LiDAR	56	U要因	ターゲットまでの光路にビームの反射を引き起こす物体(雨、雪、ウインドシールドなど)がある場合、ビームが物体面で反射し、偽点が発生する。	誤認識（FP）	2	中	車室内にLiDARを設置した場合、ウインドシールドを誤検出する。	小	LiDAR設置位置に依存
LiDAR	57	U要因	ターゲットまでの光路にビームの屈折を引き起こす物体がある場合、ビームが屈折し、他物体にあたることで、異なった距離が算出される。(偽点が発生する。)	誤認識（FP）	1	小	空間浮遊物(雨)による信号屈折により、想定と異なる位置をビームが照射することにより偽点が発生する。	小	遭遇頻度低
LiDAR	58	U要因	ターゲットまでの光路にビームの屈折を引き起こす物体がある場合、ビームが屈折し、他物体にあたることで、異なった距離が算出される。(偽点が発生する。)	誤認識（FP）	1	小	ガラス(ウインドシールド)面による信号屈折により、想定と異なる位置をビームが照射することにより偽点が発生する。	小	遭遇頻度低

出所：SOLIZE 株式会社

最後に、カメラに関する結果である。

Table 23 センサ弱点現象の優先度付け(カメラ その 1)

センサ	ID	不識原理	不識現象	結果	スコア	致命度	致命度・影響度説明	Sim	Sim必要性
カメラ	59	S弱すぎ	•映像が暗く認識に必要な信号（光）が十分得られない	未認識（FN）	6	大	回避必須の障害物を検出できない	中	繰返し性必要
カメラ	60	S強すぎ	•映像が明るく白飛びして認識に必要なコントラスト情報不足	未認識（FN）	6	中	白飛びした部分の扱いを判断できない	大	繰返し性必要 遭遇頻度低
カメラ	61	S強度逆大	•明るい部分に露光設定され、暗い部分に対し必要なコントラスト情報不足 （明るい部分が主体の環境で、暗い部分が見えない）	未認識（FN）	9	大	回避必須の障害物を検出できない	大	繰返し性必要 遭遇頻度低
カメラ	62	S強度逆大	・暗い部分に露光設定され、明るい部分が白飛びし必要なコントラスト情報不足 （暗い部分が主体の環境で、明るい部分が見えない）	未認識（FN）	6	中	白飛びした部分の扱いを判断できない	大	繰返し性必要 遭遇頻度低
カメラ	63	S無し(部分的)	・FOV範囲境界で対象物の見える範囲が少なく認識不可	未認識（FN）	4	中	回避必須の障害物検出能力が低下	中	繰返し性必要
カメラ	64	S無し(部分的)	・FOV範囲境界で対象物の見える範囲が少なく違う物体と推定	誤認識（FP）	2	小	周辺部が原因の不要な回避行動による事故の誘発	中	繰返し性必要
カメラ	65	S無し(部分的)	・障害物（物体）で対象物の見える範囲が少なく認識不可	未認識（FN）	4	中	回避必須の障害物検出能力が低下	中	繰返し性必要
カメラ	66	S無し(部分的)	・障害物（物体）で対象物の見える範囲が少ない、あるいは障害物と干渉して違う物体と推定	誤認識（FP）	2	小	周辺部が原因の不要な回避行動による事故の誘発	中	繰返し性必要

出所：SOLIZE 株式会社

Table 24 センサ弱点現象の優先度付け(カメラ その 2)

センサ	ID	不識原理	不識現象	結果	スコア	致命度	致命度・影響度説明	Sim	Sim必要性
カメラ	67	S無し(部分的)	・障害物(空間(雨、雪、霧)) がノイズとなり認識不可	未認識（FN）	9	大	回避必須の障害物を検出できない	大	遭遇頻度低い 繰返し性必要
カメラ	68	S無し(部分的)	・障害物(車両(ワイパ、ガラス汚れ（ワイパ跡含む）)) がノイズとなり認識不可	未認識（FN）	6	大	回避必須の障害物を検出できない	中	繰返し性必要
カメラ	69	S無し(部分的)	・対象物の掠れ、汚れが対象物を部分的に隠し認識不可	未認識（FN）	6	大	回避必須の障害物を検出できない	中	繰返し性必要
カメラ	70	S無し(部分的)	・道路形状（曲率、勾配）により路面や街路樹で見える範囲が制限され認識不可	未認識（FN）	9	大	回避必須の障害物を検出できない	大	遭遇頻度低い 繰返し性必要 実車で危険
カメラ	71	S無し(部分的)	・道路形状（曲率、勾配）により路面や街路樹で見える範囲が制限され、あるいは干渉して違う物体と推定	誤認識（FP）	6	中	走行レーン内の画像が原因の不要な回避行動による事故の誘発	大	遭遇頻度低い 繰返し性必要 実車で危険
カメラ	72	S無し(部分的)	・画素欠陥の影響で未認識(モデル化予定無し)	未認識（FN）	3	小	カメラの個体差、不具合拡大により、画像上小さい対象の認識性能が低下	大	遭遇頻度低い 繰返し性必要
カメラ	73	屈折	・環境と被写体の空間にある屈折率の異なる物体、対象物が歪むなどして認識不可	未認識（FN）	6	大	回避必須の障害物を検出できない	中	遭遇頻度低い 繰返し性必要
カメラ	74	屈折	・環境と被写体の空間にある屈折率の異なる物体、蜃気楼の発生等で存在しない物体（別の位置にある物体）を誤って認識（位置ずれ）	未認識（FN）	4	中	走行レーン内の画像が原因の不要な回避行動による事故の誘発	中	遭遇頻度低い 繰返し性必要
カメラ	75	屈折	・フロントガラスの屈折で位置を誤り認識（位置ずれ）	未認識（FN）	9	大	障害物の回避判定を正しく行えない	大	繰返し性必要

出所：SOLIZE 株式会社

Table 25 センサ弱点現象の優先度付け(カメラ その 3)

センサ	ID	不識原理	不識現象	結果	スコア	致命度	致命度・影響度説明	Sim	Sim必要性
カメラ	76	屈折	・フロントガラス付着物（水滴など）によるノイズで認識不可	未認識（FN）	9	大	回避必須の障害物を検出できない	大	繰返し性必要
カメラ	77	屈折	・カメラの取り付け、レンズ位置ずれで位置を誤り認識 （レンズ位置ずれはモデル化予定なし）	未認識（FN）	3	小	カメラ・車両の個体差、不具合拡大により、画像上小さい対象の認識性能が低下	大	遭遇頻度低い 繰返し性必要 実車実験時の調整大変
カメラ	78	屈折	・カメラのMTF低下の影響で、周辺部の画像を未認識 （周辺部MTF低下モデル化は未定）	未認識（FN）	3	小	カメラの個体差、経年変化で、画像周辺部の小さい対象の認識性能が低下	大	遭遇頻度低い 繰返し性必要
カメラ	79	反射	・対象物の反射による、当該反射物自体の認識不良	未認識（FN）	9	大	回避必須の障害物（先行車など）を検出できない	大	遭遇頻度低い 繰返し性必要
カメラ	80	反射	・反射物に映りこんだ物体を誤認識	誤認識（FP）	6	中	走行レーン内の画像が原因の不要な回避行動による事故の誘発	大	遭遇頻度低い 繰返し性必要
カメラ	81	反射	・路面反射による路面及び路面マーカの認識不良	未認識（FN）	4	中	走行レーン、停止位置を検出できない	中	繰返し性必要
カメラ	82	反射	・路面反射による映り込み対象の誤認識	誤認識（FP）	6	中	走行レーン内の画像が原因の不要な回避行動による事故の誘発	大	遭遇頻度低い 繰返し性必要
カメラ	83	S変化	・対象物に影がかかり認識不良	未認識（FN）	9	大	回避必須の障害物を検出できない	大	遭遇頻度低い 繰返し性必要
カメラ	84	S変化	・影を対象物と誤認識	誤認識（FP）	9	大	走行レーン、停止位置を誤って検出する 、走行レーン内の画像が原因の不要な回避行動による事故の誘発	大	遭遇頻度低い 繰返し性必要
カメラ	85	S変化	・光源（明るさ、スペクトラム）の影響で、対象や背景物の見かけが変化し未認識 （対象の色情報が重要な場合や背景と対象コントラストへの影響に伴う）	未認識（FN）	9	大	回避必須の障害物を検出できない	大	遭遇頻度低い 繰返し性必要

出所：SOLIZE 株式会社

Table 26 センサ弱点現象の優先度付け(カメラ その 4)

センサ	ID	不識原理	不識現象	結果	スコア	致命度	致命度・影響度説明	Sim	Sim必要性
カメラ	86	S変化	・光源（明るさ、スペクトラム）の影響で、対象や背景物の見かけが変化し誤認識　（対象の色情報が重要な場合に発生）	誤認識（FP）	6	中	標示や標識を誤って認識する	大	遭遇頻度低い 繰返し性必要
カメラ	87	S変化	・環境の半透明物の影響で、対象にあたる光のスペクトラムや、対象から届く光のスペクトルが変化し未認識 （対象の色情報が重要な場合や背景と対象コントラストへの影響に伴う）	未認識（FN）	9	大	回避必須の障害物を検出できない	大	遭遇頻度低い 繰返し性必要
カメラ	88	S変化	・環境の半透明物の影響で、対象にあたる光のスペクトラムや、対象から届く光のスペクトルが変化し誤認識　（対象の色情報が重要な場合に発生）	誤認識（FP）	6	中	標示や標識を誤って認識する	大	遭遇頻度低い 繰返し性必要
カメラ	89	S変化	・経年変化でレンズ、フィルタ、センサ感度特性が変化し、未認識 （経年変化はモデル化予定なし）	未認識（FN）	3	小	経年変化で回避必須の障害物を検出できなくなる	大	経年劣化の再現が大変
カメラ	90	S変化	・経年変化でレンズ、フィルタ、センサ感度特性が変化し、誤認識（特に色合いに影響を受けるケース） （経年変化はモデル化予定なし）	誤認識（FP）	3	小	経年変化で走行レーン内の画像が原因の不要な回避行動が発生し事故を誘発	大	経年劣化の再現が大変
カメラ	91	S変化	・温度変化でレンズ特性、センサ特性(熱雑音変化含む）が変化し、未認識 (温度変化は現在未定)	未認識（FN）	9	大	回避必須の障害物を検出できない	大	条件を満たす環境の準備が大変
カメラ	92	S変化	・温度変化でレンズ特性、センサ特性(熱雑音変化含む）が変化し、誤認識 (温度変化は現在未定)	誤認識（FP）	6	中	走行レーン内の画像が原因の不要な回避行動による事故の誘発	大	条件を満たす環境の準備が大変
カメラ	93	フリッカ	・対象物の高速な明るさの変化とカメラの露光タイミングの関係により、画像がちらつく、部分により明るさが異なる、画像の一部のみしか映らない現象が発生し未認識 （**グローバルシャッタでも発生する。ローリングシャッタでは現象が複雑となる。**） （シャッタモデル、環境モデル対応未定）	未認識（FN）	9	大	回避必須の障害物を検出できない	大	繰返し性必要 実車環境の準備（スキャン動作の異なる標識など）が大変

出所：SOLIZE 株式会社

Table 27 センサ弱点現象の優先度付け(カメラ その 5)

センサ	ID	不識原理	不識現象	結果	スコア	優先度	致命度・影響度説明	Sim	Sim必要性
カメラ	94	フリッカ	・対象物の高速な明るさの変化とカメラの露光タイミングの関係により、画像がちらつく、部分により明るさが異なる、画像の一部のみしか映らない現象が発生し、別の物体等と誤認識 （**グローバルシャッタでも発生**する。ローリングシャッタでは現象が複雑となる。） （シャッタモデル、環境モデル対応未定）	誤認識（FP）	6	中	走行レーン内の画像が原因の不要な回避行動による事故の誘発、標識の誤った認識に伴う不適切走行	大	繰返し性必要 実車環境の準備（スキャン動作の異なる標識など）が大変
カメラ	95	フリッカ	・照明の点滅で対象物がちらつき未認識 （**グローバルシャッタでも発生**する。ローリングシャッタでは現象が複雑となる。） （シャッタモデル、環境モデル対応未定）	未認識（FN）	9	大	回避必須の障害物を検出できない	大	繰返し性必要 実車環境の準備（特定の照明環境を持つ外光遮断環境）が大変
カメラ	96	画像ブレ・流れ	・画像内での対象の位置変化と露光時間に伴うフレーム内のブレ、流れ、変形に伴う認識不良。 （**グローバルシャッタでも発生**する。ローリングシャッタでは変形も伴う） （シャッタモデル、環境モデル対応未定）	未認識（FN）	9	大	回避必須の障害物を検出できない	大	遭遇頻度低い 繰返し性必要 実車で危険
カメラ	97	低D/U（低コントラスト）	・背景と対象物の色合いの関係でコントラスト不足し、未認識。 (階調、色合いはISP処理依存要因あり)	未認識（FN）	9	大	回避必須の障害物を検出できない	大	繰返し性必要
カメラ	98	低D/U（低コントラスト）	•光が弱く、コントラストが不足し、未認識	未認識（FN）	6	大	回避必須の障害物を検出できない	中	繰返し性必要
カメラ	99	低D/U（低コントラスト）	・光源の影響で背景と対象物の見かけが類似してコントラストが不足し、未認識。 (階調、色合いはISP処理依存要因あり)	未認識（FN）	6	大	回避必須の障害物を検出できない	中	遭遇頻度低
カメラ	100	低D/U（低コントラスト）	・半透明の空間障害物で背景と対象物の見かけが類似してコントラストが不足し、未認識。 (階調、色合いはISP処理依存要因あり)	未認識（FN）	4	中	回避必須の障害物（生物以外が対象）を検出できない	中	遭遇頻度低

出所:SOLIZE 株式会社

Table 28 センサ弱点現象の優先度付け(カメラ その 6)

センサ	ID	不識原理	不識現象	結果	スコア	優先度	致命度・影響度説明	Sim	Sim必要性
カメラ	101	低D/U（低コントラスト）	・対象物が（半）透明で、背景に対するコントラストが弱く、未認識。(階調、色合いはISP処理依存要因あり)	未認識（FN）	6	中	回避必須の障害物（生物以外が対象）を検出できない	大	繰返し性必要 実車環境の準備（模擬建物など）が大変
カメラ	102	低D/U（低コントラスト）	・ロープや糸など細い対象では対象の画像情報が不十分で（背景とのコントラストが画像的に十分得られず）未認識	未認識（FN）	6	大	回避必須の障害物を検出できない	中	繰返し性必要 実車で危険 （特に接近速度早い場合）
カメラ	103	低S/N	・雨、霧、雪、煙、砂塵などがノイズとなり対象を未認識。	未認識（FN）	9	大	回避必須の障害物を検出できない	大	環境再現が大変 走行試験では時期と場所に制限あり
カメラ	104	低S/N	・雨、霧、雪、煙、砂塵などノイズとなる情報を誤認識	誤認識（FP）	6	中	走行レーン内の画像が原因の不要な回避行動による事故の誘発	大	環境再現が大変 走行試験では時期と場所に制限あり
カメラ	105	低S/N	・映り込み、影、逆光がノイズとなり対象を未認識	未認識（FN）	9	大	回避必須の障害物を検出できない	大	環境再現が大変 走行試験では時期と場所に制限あり
カメラ	106	低S/N	・映り込み、影などノイズとなる情報を誤認識	誤認識（FP）	6	中	走行レーン内の画像が原因の不要な回避行動による事故の誘発	大	環境再現が大変 走行試験では時期と場所に制限あり
カメラ	107	低S/N	・対象物の掠れ、汚れがノイズとなり認識不可	未認識（FN）	6	大	回避必須の障害物を検出できない	中	繰返し性必要
カメラ	108	低S/N	・対象物の掠れ、汚れ（ノイズ）を別の対象と推定	誤認識（FP）	4	中	走行レーン内の画像が原因の不要な回避行動による事故の誘発、レーンの誤った認識による不適切位置の走行	中	繰返し性必要
カメラ	109	低S/N	・障害物(車両(ワイパ、ガラス汚れ（ワイパ跡含む）))を誤認識	誤認識（FP）	6	中	走行レーン内の画像が原因の不要な回避行動による事故の誘発	大	遭遇頻度低い 繰返し性必要

出所:SOLIZE 株式会社

Table 29 センサ弱点現象の優先度付け(カメラ その 7)

センサ	ID	不調原理	不調現象	結果	スコア	危険度	致命度・影響度説明	シーン	Sim必要性
カメラ	110	低S/N	・カメラレンズ自体の反射、色収差、センサ自体で発生するノイズ（熱雑音以外）の影響で、対象物にノイズが乗り認識不良（フレア、スミアはモデル化予定無し）	未認識（FN）	6	中	回避必須の障害物を検出できない	大	繰返し性必要 遭遇頻度低
カメラ	111	低S/N	・カメラレンズ自体の反射、色収差、センサ自体で発生するノイズ（熱雑音以外）を誤認識 （フレア、スミアはモデル化予定無し）	誤認識（FP）	6	中	走行レーン内の画像が原因の不要な回避行動による事故の誘発	大	繰返し性必要 遭遇頻度低
カメラ	112	低S/N	・センサ自体で発生する熱雑音の影響で、対象物にノイズが乗り認識不良	未認識（FN）	6	中	回避必須の障害物を検出できない	大	繰返し性必要 遭遇頻度低
カメラ	113	低S/N	・センサ自体で発生する熱雑音による画像への影響を誤認識	誤認識（FP）	6	中	走行レーン内の画像が原因の不要な回避行動による事故の誘発	大	繰返し性必要 遭遇頻度低

出所：SOLIZE 株式会社

この手法による優先度評価は、センサ弱点現象の評価にとどまっており、センサ弱点シナリオはこの結果をもとに別途検討する必要があること、また安全性評価の観点において頻度が考慮されていないなど、センサ弱点シナリオの評価という意味では、いくつか欠点があった。

そのため、2 つめの方法でセンサ弱点シナリオの優先度付けを行った。これは「認識における問題事象への影響を重要度とし、頻度もあわせて影響度を計算する方法」である。これは、自動車工業会が発行している「自動運転の安全性評価フレームワーク」（以下、安全性評価フレームワーク：https://www.jama.or.jp/safe/automated_driving/）の考え方に基づいて、センサ弱現原理の影響度、およびセンサ弱点要因の頻度を再計算することで、センサ弱点シナリオの優先度を評価しようとするものである。

最初に、安全性評価フレームワークで表現されている発生原理をセンサ弱点原理とみなし、その重要度を、各センサ弱点原理が認識結果に対する影響度合いで評価する。これは、誤認識の事象を、6 つの要素（認識対象物の有無の誤認識、認識対象物の種類の誤認識、認識対象物の固有識別情報の誤認識、認識対象物の位置の誤認識、認識対象物の速度の誤認識、認識対象物の形状の誤認識）に分解してそれぞれ 3 段階（強く影響があるものを 3 点、影響があるものを 1 点、影響がないものを 0 点とする）で評価する方法である。また、6 つの要素のうち、影響度が大きいと思われる「認識対象物の有無の誤認識」はウェイトを 3、対象物の位置および速度の誤認識はウェイトを 2、それ以外は 1 と重み付けして加算した。各スコアはプロジェクト内の知見に基づいており、主観的な部分もある。

次に、安全性評価フレームワークで表現されている認識外乱要因をセンサ弱点要因とみなし、各センサ弱点要因がどのような頻度で発生するかを評価する。評価軸も安全性評価フレームワークに表現されている「地域性」、「気象・気候」、「空間密度」という評価軸を利用した。（安全性評価フレームワークには「使用方法」という評価軸があるものの意図が不明であったため利用しなかった）ただし、各評価軸の詳細についての詳細についてはプロジェクト内で以下のように定義し直した。

〇「地域性」：地域性および、道路環境の遭遇頻度を評価するもの

環境に依存するもの

日本全国、一般道・高速道にかかわらず起こる：4

日本全国、一般道または高速道で起こる：3

寒地・寒冷地のみで起こる：2

寒地・寒冷地、温暖地、暖地のいずれか、一般道または高速道で起こる:1

起こらない:0

環境に依存しないもの

一般道・高速道にかかわらず起こる:4

一般道または高速道で起こる:3

起こらない:0

〇「気候・気象」:季節や気象頻度を評価するもの

一年を通して頻度高く(月に数回程度以上)起こる:4

ある季節では頻繁に起こる:3

頻度は低い(月に数回以下)が年間に 5 回程度起こる:2

年間を通して 5 回程度未満:1

起こらない:0

〇「空間密度」:空間における密度を(FOV の視点を考慮して)評価するもの

空間上の広がりがあり、センサ FOV を広く(半分以上)覆う:4

(気象現象など)

空間上の広がりがあり、センサ FOV をやや広く(2 割以上)覆う:3

(近接した対向車の影響、雨上がり後の路面の水たまり)

空間上の広がりは限定的(1 割程度)である

または、地図上決まった箇所のみに存在する:2

(橋やガードレールの影響など)

空間上広がっていない:1

(自車の故障)

起こらない:0

以上をもとに、安全性評価フレームワークの「認識外乱要因と発生原理のマトリックス」を参照してセンサ弱点要因とセンサ弱点原理の組み合わせのスコアを上記 2 種のスコアの積としてスコアリングし、そのスコアをもとに優先度付けを行った。

$$(\textit{センサ弱点シナリオの優先度スコア}) = (\textit{センサ弱現原理の重要度}) * (\textit{センサ弱点要因の頻度})$$

センサ弱点の代表シナリオは安全性評価フレームワークにて規定されているため、これによりセンサ弱点シナリオの評価ができていることになる。

以下に、結果を示す。

Table 30 センサ弱点原理(カメラ)の重要度スコア

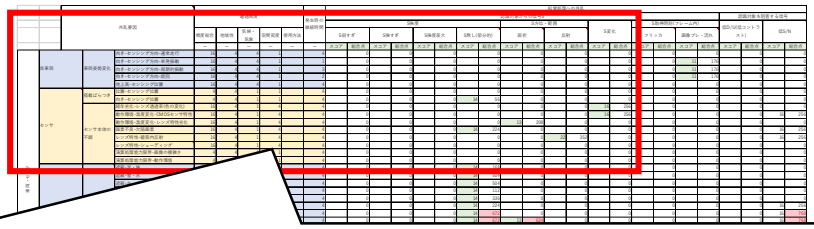
No.		元ID	不調原理	不調現象が起きる状況	不調現象の原理説明	不調現象の影響	重要度スコア
59	カメラ	L01	S弱すぎ	映像(全体)が暗い	認識に必要な信号（光）が十分得られない	対象物を認識できない	16
60	カメラ	L02	S強すぎ	映像(全体)が明るく白飛びする	認識に必要なコントラスト情報不足	対象物を認識できない	16
61	カメラ	L03	S強度差大	明暗差の激しい場面（逆光や西日、トンネルの出入り口など）	暗い部分に対し必要なコントラスト情報不足（明るい部分が主体の環境で、暗い部分が見えない）	対象物を認識できない	16
62	カメラ	L04	S強度差大	明暗差の激しい場面（逆光や西日、トンネルの出入り口など）	明るい部分が白飛びし必要なコントラスト情報不足（暗い部分が主体の環境で、明るい部分が見えない）	対象物を認識できない	10
63	カメラ	L05	S無し(部分的)	FOV範囲境界附近に障害物（対象物）がある	対象物の見える範囲が少ない	対象物を認識できない	10
64	カメラ	L06	S無し(部分的)	FOV範囲境界附近に障害物（対象物）がある	対象物の見える範囲が少ない	対象物を異なる物体として誤認識する	10
65	カメラ	L07	S無し(部分的)	対象物に一部（	背景と対象物のコントラスト（色の差、明度差）が不足	対象物を認識できない	9
66	カメラ	L08	S無し(部分的)	対象物に一部（	背景と対象物のコントラスト（色の差、明度差）が不足	対象物を異なる物体として誤認識する	12

一部拡大表示

No.		元ID	不調原理	不調現象が起きる状況	不調現象の原理説明	不調現象の影響	重要度スコア	
59	**カメラ**	L01	S弱すぎ	映像(全体)が暗い	認識に必要な信号（光）が十分得られない	対象物を認識できない	**16**	A
60	カメラ	L02	S強すぎ	映像(全体)が明るく白飛びする	認識に必要なコントラスト情報不足	対象物を認識できない	16	A
61	**カメラ**	L03	S強度差大	明暗差の激しい場面（逆光や西日、トンネルの出入り口など）	暗い部分に対し必要なコントラスト情報不足（明るい部分が主体の環境で、暗い部分が見えない）	対象物を認識できない	**16**	A
62	カメラ	L04	S強度差大	明暗差の激しい場面（逆光や西日、トンネルの出入り口など）	明るい部分が白飛びし必要なコントラスト情報不足（暗い部分が主体の環境で、明るい部分が見えない）	対象物を認識できない	10	B
63	カメラ	L05	S無し(部分的)	FOV範囲境界附近に障害物（対象物）がある	対象物の見える範囲が少ない	対象物を認識できない	10	B

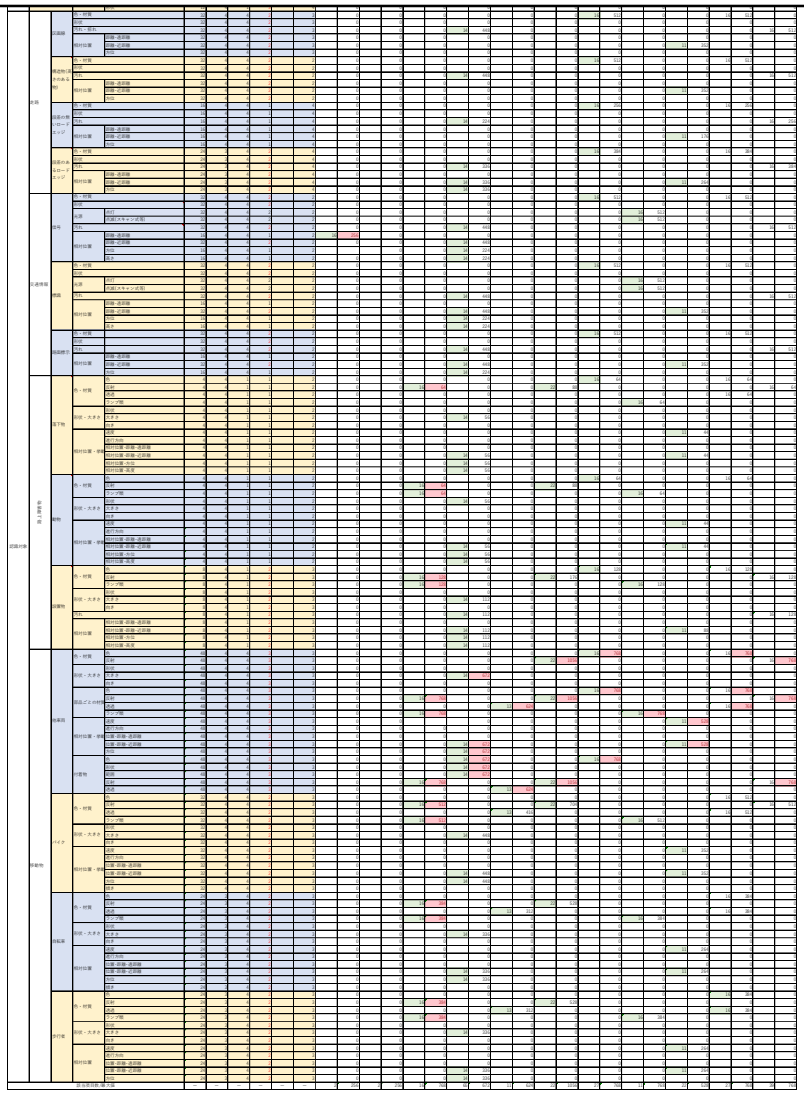
出所：SOLIZE 株式会社

Table 31 センサ弱点要因(カメラ)の頻度評価



一部拡大表示

外乱要因				遭遇頻度					発生時の継続時間	知覚処理への外乱											
										認識対象からの信号S											
										S強度							S方位・範囲				S変化	
				頻度総合	地域性	気候・気象	空間密度	使用方法		S弱すぎ		S強すぎ		S強度差大		S無し(部分的)		屈折		反射			
				—	—	—	—	—	—	スコア	総合点	スコア	総合点	スコア	総合点	スコア	総合点	スコア	総合点	スコア	総合点	スコア	総合点
	自車両	車両姿勢変化	向き-センシング方向-通常走行	16	4	4	1		4		0		0		0		0		0		0
			向き-センシング方向-単発振動	16	4	4	1		1		0		0		0		0		0		0
			向き-センシング方向-周期的振動	16	4	4	1		3		0		0		0		0		0		0
			向き-センシング方向-旋回	16	4	4	1		2		0		0		0		0		0		0
			地上高-センシング位置	16	4	4	1		4		0		0		0		0		0		0
	センサ	搭載ばらつき	位置-センシング位置	4	4	1	1		4		0		0		0		0		0		0
			向き-センシング位置	4	4	1	1		4		0		0		0	14	56		0		0
		センサ本体の不調	経年劣化-レンズ透過率(色の変化)	16	4	1	4		4		0		0		0		0		0	16	256
			動作環境-温度変化-CMOSセンサ特性	16	4	1	4		4		0		0		0		0		0	16	256
			動作環境-温度変化-レンズ特性劣化	16	4	1	4		4		0		0		0		0	13	208		0
			画素不良-欠陥画素	16	4	1	4		4		0		0		0	14	224		0		0
			レンズ特性-鏡筒内反射	16	4	1	4		4		0		0		0		0		0	22	352		0
			レンズ特性-シェーディング	16	4	1	4		4		0		0		0		0		0		0		0



出所:SOLIZE 株式会社

Table 32 センサ弱点現象およびシナリオ(カメラ)の優先度評価結果

順位	セルの値	不調要因					不調原理	シナリオ番号	備考
1	1056	周辺環境	周辺移動物	反射	鏡面		反射	122、123	
2	1056	周辺環境	周辺移動物	反射	鏡面以外		反射	122、123	鏡面以外は意味不明
3	1056	認識対象	移動物	他車両	色・材質	反射	反射	30	反射？ 下に反射ではないものはあり
4	1056	認識対象	移動物	他車両	部品ごとの材質	反射	反射	31	
5	1056	認識対象	移動物	他車両	付着物	反射	反射	47	反射？
6	792	周辺環境	周辺構造物	路面	路面状態	路面全体-反射	反射	12、**18**、55	狭義には18（水たまり）のみ
7	768	車両・センサ	[illegible]	[illegible]	[illegible]・氷		低S/N	8	
24	768	認識対象	移動物	他車両	付着物	反射	S強度差大	47？	
25	768	認識対象	移動物	他車両	付着物	反射	低S/N	47？	

一部拡大表示

順位	セルの値	不調要因				
1	1056	周辺環境	周辺移動物	反射	鏡面	
2	1056	周辺環境	周辺移動物	反射	鏡面以外	
3	1056	認識対象	移動物	他車両	色・材質	反射
4	1056	認識対象	移動物	他車両	部品ごとの材質	反射
5	1056	認識対象	移動物	他車両	付着物	反射

出所：SOLIZE 株式会社

Table 33 センサ弱点原理(LiDAR)の重要度スコア

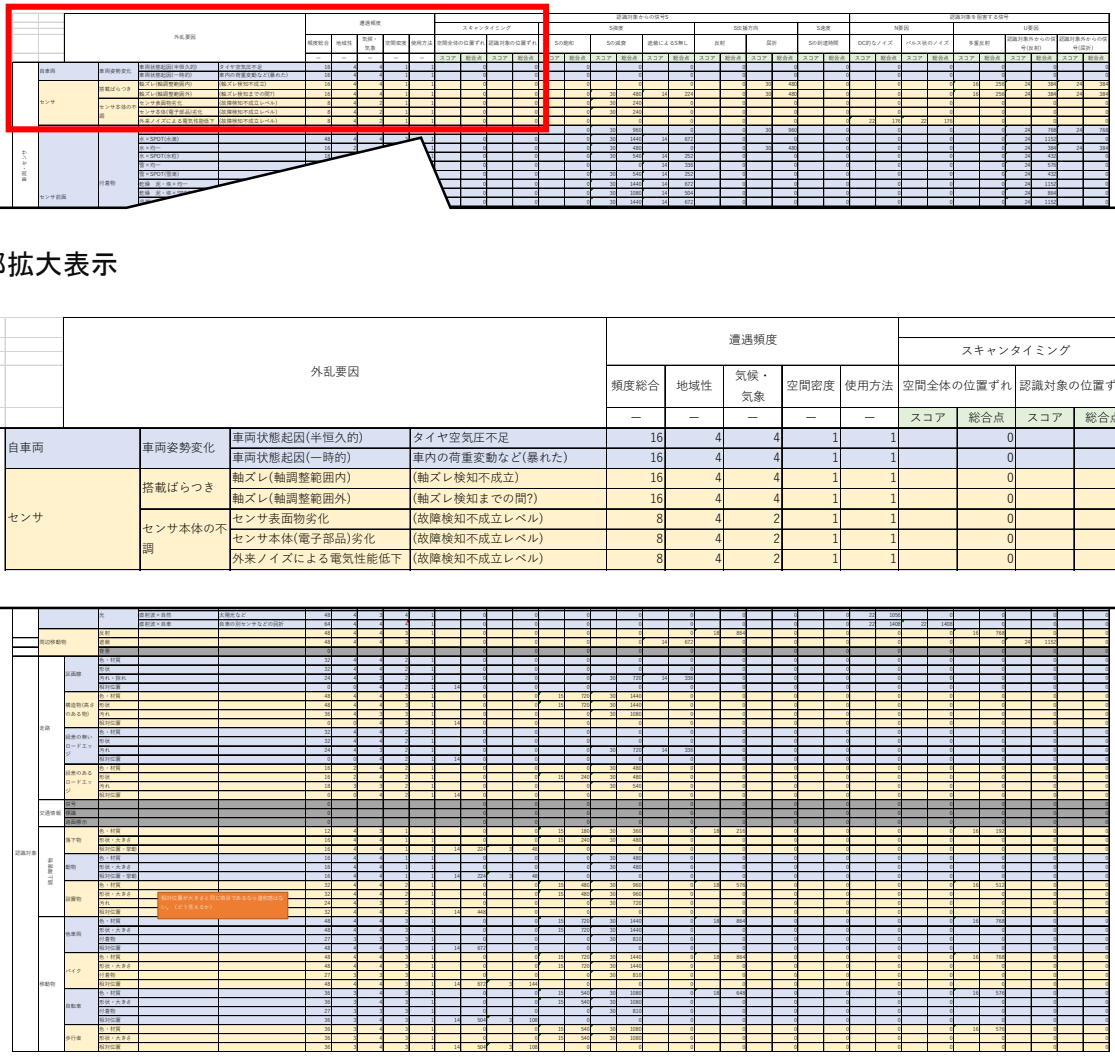
	元ID	不調原理	不調現象が起きる状況	不調現象の原理説明	不調現象の影響	影響に関する説明（オリジナル）	重要度スコア	対象物の有無	対象物の種類	固有識別情報	（相対）位置	（相対）速度	形状	備考
LiDAR	L01	スキャンタイミング	自車両が動いている	フレーム内でのビーム出射タイミングの違い	空間全体の点群が位置ずれを起こす	影響度は自車両速度に依存。位置(距離・角度)ずれが発生する。	14	[illegible]	B	B	A	B	B	
LiDAR	L02	スキャンタイミング	ターゲットが動いている	フレーム内でのビーム出射タイミングの違い	ターゲットの点群が位置ずれを起こす	影響度は、自車両と対象物の相対速度に依存。位置(距離・角度)ずれが発生する。	3	[illegible]	B	B	C	C	B	
LiDAR	L03	S強度/飽和	近距離に反射率の高い物体がある	受信光の飽和	距離誤差が大きくなる。	近距離の測距誤差が大きくなる。	15	[illegible]	B	B	A	A	B	
LiDAR	L04	S強度/減衰		物標反射特性の違い	反射率の低いターゲットは受信光量が少なく、検出できない。	反射率の低い物体(ex 黒革服)、鏡面性、**透明に近い物体**を持つ物体の検出ができない。	22	[illegible]	A	A	B	B	A	
LiDAR	L05	S強度/減衰	ターゲットへの入射角が浅い	ターゲットへの入射角の違い	受信光量が少なく検出できない。	入射角の浅い物体(ex.地面)の見える範囲が近距離のみになる。	16	[illegible]	A	A	B	B	A	
LiDAR	L06	S強度/減衰	ターゲット上の付着物	受信光量の減少	ターゲットを検出できない。	付着物の量と何が付着するかに依存	30	[illegible]	A	A	A	A	A	
LiDAR	L07	S強度/減衰		ターゲットにビームフットプリントの一部しか当たらないことにより、受信光量が少なくなる	ターゲットを検出できない。	遠方において影響大	0	[illegible]	C	C	C	C	C	これはセンサ不調なのか？
LiDAR	L08	S強度/減衰	ターゲットまでの光路中に透過特性を持つ物体(雨、ガラスなど)が存在	受信光量の減少	[illegible]ない。	ガラス越しに物標を検出する場合に必要	6	B	B	B	C	C	B	
LiDAR	L09	S強度/減衰	ターゲットまでの距離が遠くなる	受信光量の減[illegible]	[illegible]	同じ反射率であっても、距離により未検出になる。	30	A	A	A	A	A	A	これはセンサ不調なのか？
LiDAR	L10	S強度/減衰	雨や雪、砂や虫などの空間障害物	[illegible]	[illegible]	検出可能距離が短くなり、最終的には検出できない状態になる。	30	A	A	A	A	A	A	「虫」は空間透過性を下げるような虫の大量発生のこと
LiDAR	L23	[illegible]	[illegible]してしまう	[illegible]出してしまう	[illegible]	[illegible]間違え、誤検出。	[illegible]							
LiDAR	L24	U要因/多重反射	ターゲットの反射特性が鏡面性を持つ	光線がターゲット面で反射し、反射した光線が他物体にあたる	異なった距離が算出される。(偽点が発生する。)	鏡面性をもつ物体(ex.水たまり)で反射し、反射後にビームのあたる物体を誤検出する。(水たまりであれば、地面下に点が検出される。)	16	A	B	B	B	B	B	
LiDAR	L25	U要因/反射	ターゲットまでの光路にビームの反射を引き起こす物体(雨、雪、ウインドシールドなど)がある	ビームが物体面で反射	偽点が発生する。	空間に浮遊している雨、雪、虫を誤検出する。	24	A	B	B	A	A	B	
LiDAR	L26	U要因/反射	ターゲットまでの光路にビームの反射を引き起こす物体(雨、雪、ウインドシールドなど)がある	ビームが物体面で反射	偽点が発生する。	車室内にLiDARを設置した場合、ウインドシールドを誤検出する。	24	A	B	B	A	A	B	56と同一
LiDAR	L27	U要因/屈折	ターゲットまでの光路にビームの屈折を引き起こす物体がある	ビームが屈折し、他物体にあたる	異なった距離が算出される。(偽点が発生する。)	空間浮遊物(雨)による信号屈折により、想定と異なる位置をビームが照射することにより偽点が発生する。	24	A	B	B	A	A	B	
LiDAR	L28	U要因/屈折	ターゲットまでの光路にビームの屈折を引き起こす物体がある	ビームが屈折し、他物体にあたる	異なった距離が算出される。(偽点が発生する。)	ガラス(ウインドシールド)面による信号屈折により、想定と異なる位置をビームが照射することにより偽点が発生する。	24	A	B	B	A	A	B	58と同一

一部拡大表示

	元ID	不調原理	不調現象が起きる状況	不調現象の原理説明	不調現象の影響	影響に関する説明（オリジナル）	重要度スコア
LiDAR	L01	スキャンタイミング	自車両が動いている	フレーム内でのビーム出射タイミングの違い	空間全体の点群が位置ずれを起こす	影響度は自車両速度に依存。位置(距離・角度)ずれが発生する。	14
LiDAR	L02	スキャンタイミング	ターゲットが動いている	フレーム内でのビーム出射タイミングの違い	ターゲットの点群が位置ずれを起こす	影響度は、自車両と対象物の相対速度に依存。位置(距離・角度)ずれが発生する。	3
LiDAR	L03	S強度/飽和	近距離に反射率の高い物体がある	受信光の飽和	距離誤差が大きくなる。	近距離の測距誤差が大きくなる。	15
LiDAR	L04	S強度/減衰		物標反射特性の違い	反射率の低いターゲットは受信光量が少なく、検出できない。	反射率の低い物体(ex 黒革服)、鏡面性、**透明に近い物体**を持つ物体の検出ができない。	22
LiDAR	L05	S強度/減衰	ターゲットへの入射角が浅い	ターゲットへの入射角の違い	受信光量が少なく検出できない。	入射角の浅い物体(ex.地面)の見える範囲が近距離のみになる。	16
LiDAR	L06	S強度/減衰	ターゲット上の付着物	受信光量の減少	ターゲットを検出できない。	付着物の量と何が付着するかに依存	30
LiDAR	L07	S強度/減衰		ターゲットにビームフットプリントの一部しか当たらないことにより、受信光量が少なくなる	ターゲットを検出できない。	遠方において影響大	0

出所：SOLIZE 株式会社

Table 34 センサ弱点要因（LiDAR）の頻度評価



一部拡大表示

外乱要因				遭遇頻度					スキャンタイミング			
				頻度総合	地域性	気候・気象	空間密度	使用方法	空間全体の位置ずれ		認識対象の位置ずれ	
				—	—	—	—	—	スコア	総合点	スコア	総合点
自車両	車両姿勢変化	車両状態起因(半恒久的)	タイヤ空気圧不足	16	4	4	1	1		0		0
		車両状態起因(一時的)	車内の荷重変動など(暴れた)	16	4	4	1	1		0		0
センサ	搭載ばらつき	軸ズレ(軸調整範囲内)	(軸ズレ検知不成立)	16	4	4	1	1		0		0
		軸ズレ(軸調整範囲外)	(軸ズレ検知までの間?)	16	4	4	1	1		0		0
	センサ本体の不調	センサ表面物劣化	(故障検知不成立レベル)	8	4	2	1	1		0		0
		センサ本体(電子部品)劣化	(故障検知不成立レベル)	8	4	2	1	1		0		0
		外来ノイズによる電気性能低下	(故障検知不成立レベル)	8	4	2	1	1		0		0

出所：SOLIZE 株式会社

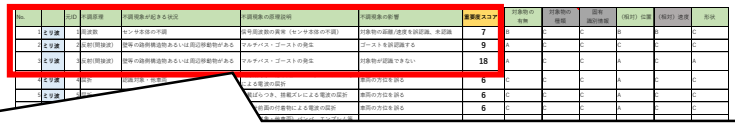
Table 35 センサ弱点現象およびシナリオ（LiDAR）の優先度評価結果

一部拡大表示

順位	セルの値	不調要因				不調原理	シナリオ番号	備考
1	1920	車両・センサ	センサ前面	付着物	洗車WAX×均一(拭き忘れ)	Sの減衰	対象外	環境等に影響しない付着物はシナリオ化対象外
2	1920	車両・センサ	センサ前面	付着物	洗車WAX×均一(拭き忘れ)	屈折	対象外	環境等に影響しない付着物はシナリオ化対象外
3	1536	車両・センサ	センサ前面	付着物	洗車WAX×均一(拭き忘れ)	認識対象外からの信号(屈折)	対象外	環境等に影響しない付着物はシナリオ化対象外
4	1440	車両・センサ	センサ前面	付着物	水×SPOT(水滴)	Sの減衰	8、19	
5	1440	車両・センサ	センサ前面	付着物	乾燥　泥・埃 x SPOT	Sの減衰	なし	このシナリオはあってもよい
6	1440	車両・センサ	センサ前面	付着物	乾燥　泥・埃 x SPOT	Sの減衰	8、19	道路環境の設定が必要？
7	1440	車両・センサ	センサ前面	付着物	WAX×SPOT(拭き残し)	Sの減衰	対象外	環境等に影響しない付着物はシナリオ化対象外
8	1440	車両・センサ	センサ前面	付着物	WAX×SPOT(拭き残し)	屈折	対象外	環境等に影響しない付着物はシナリオ化対象外

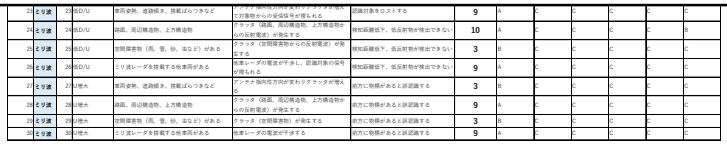
出所：SOLIZE 株式会社

Table 36 センサ弱点原理（ミリ波レーダ）の重要度スコア



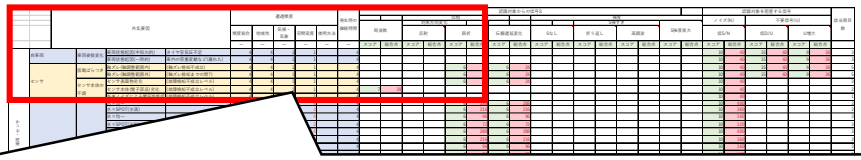
一部拡大表示

No.		元ID	不調原理	不調現象が起きる状況	不調現象の原理説明	不調現象の影響	重要度スコア	
1	ミリ波	1	周波数	センサ本体の不調	信号周波数の異常（センサ本体の不調）	対象物の距離/速度を誤認識、未認識	7	B
2	ミリ波	2	反射(間接波)	壁等の路側構造物あるいは周辺移動物がある	マルチパス・ゴーストの発生	ゴーストを誤認識する	9	A
3	ミリ波	3	反射(間接波)	壁等の路側構造物あるいは周辺移動物がある	マルチパス・ゴーストの発生	対象物が認識できない	18	A



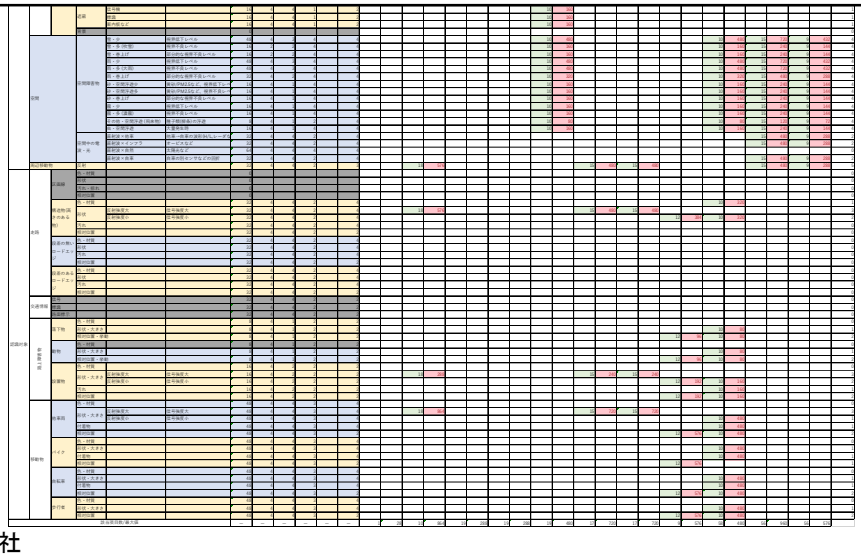
出所：SOLIZE 株式会社

Table 37 センサ弱点要因（ミリ波レーダ）の頻度評価



一部拡大表示

外乱要因				遭遇頻度					発生時の継続時間	認識対象からの位相							
				頻度総合	地域性	気候・気象	空間密度	使用方法		到来方向変化							
										周波数		反射		屈折		伝搬遅延変化	
				—	—	—	—	—	—	スコア	総合点	スコア	総合点	スコア	総合点	スコア	総合点
自車両	車両姿勢変化	車両状態起因(半恒久的)	タイヤ空気圧不足	4	4	1	1		4								
		車両状態起因(一時的)	車内の荷重変動など(暴れた)	4	4	1	1		4								
センサ	搭載ばらつき	軸ズレ(軸調整範囲内)	(軸ズレ検知不成立)	4	4	1	1		4					6	24	6	24
		軸ズレ(軸調整範囲外)	(軸ズレ検知までの間?)	4	4	1	1		4					6	24	6	24
	センサ本体の不調	センサ表面物劣化	(故障検知不成立レベル)	4	4	1	1		4					6	24	6	24
		センサ本体(電子部品)劣化	(故障検知不成立レベル)	4	4	1	1		4	7	28						
		外来ノイズによる電気性能低	(故障検知不成立レベル)	4	4	1	1		4								
		水×均一		48	4	3	4		4					6	288	6	288



出所：SOLIZE 株式会社

Table 38 センサ弱点現象およびシナリオ(ミリ波レーダ)の優先度評価結果

順位	セルの値	不調要因						不調原理	シナリオ番号	備考
1	960	周辺環境	周辺構造物	路面	材質	アスファルト	デフォルト・凹凸少	低D/U	25	
2	960	周辺環境	周辺構造物	路面	材質	コンクリート	反射係数差・凹凸中	低D/U	25	
3	864	周辺環境	周辺構造物	路側構造物	反射	防音壁		反射	4	マルチパス・ゴースト
4	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	6	ゴースト
5	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	反射	防音壁		折り返し	4	遠方の物標を近傍に誤認識

一部拡大表示

順位	セルの値	不調要因						不調原理
1	960	周辺環境	周辺構造物	路面	材質	アスファルト	デフォルト・凹凸少	低D/U
2	960	周辺環境	周辺構造物	路面	材質	コンクリート	反射係数差・凹凸中	低D/U
3	864	周辺環境	周辺構造物	路側構造物	反射	防音壁		反射

19	576	周辺環境	周辺構造物	路側構造物	反射	橋の欄干		反射	4	マルチパス・ゴースト
20	576	周辺環境	周辺構造物	路側構造物	反射	道路標識		反射	4	マルチパス・ゴースト

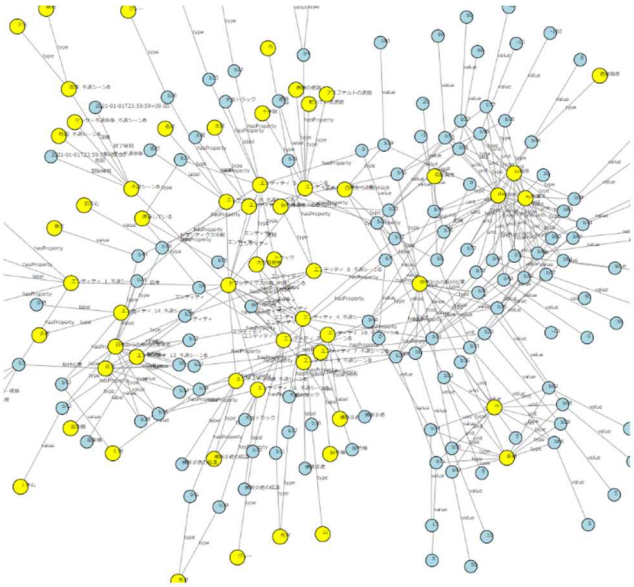
出所:SOLIZE 株式会社

この方法により、センサ弱点データベースにおいて優先的に進めるべきセンサ弱点シナリオを規定した。この手法も主観に基づく評価が多く改善の余地があるものの、得られた結果が複数の関係者の目から見ても妥当であろうと判断されたことにより、この結果をもとにプロジェクトを進めることとした。

センサ弱点データベースの構築

センサ弱点データベースの構築は、オープンソースのオントロジー構築ソフトウェアとして知られる Protégé (https://protege.stanford.edu/)と RDF データベースシステムとして知られる Apache Jena Fuseki (https://jena.apache.org/documentation/fuseki2/index.html)を利用した。Protégé を用いてタグ構造をオントロジーとして登録し、そのスキーマ(TTL)を利用して、Apache Jena Fuseki 上にデータベースを構築している。

タグ情報としては、タグ構造として定めた情報がほとんど利用されているが、位置関係など一部数値化しているものもある。

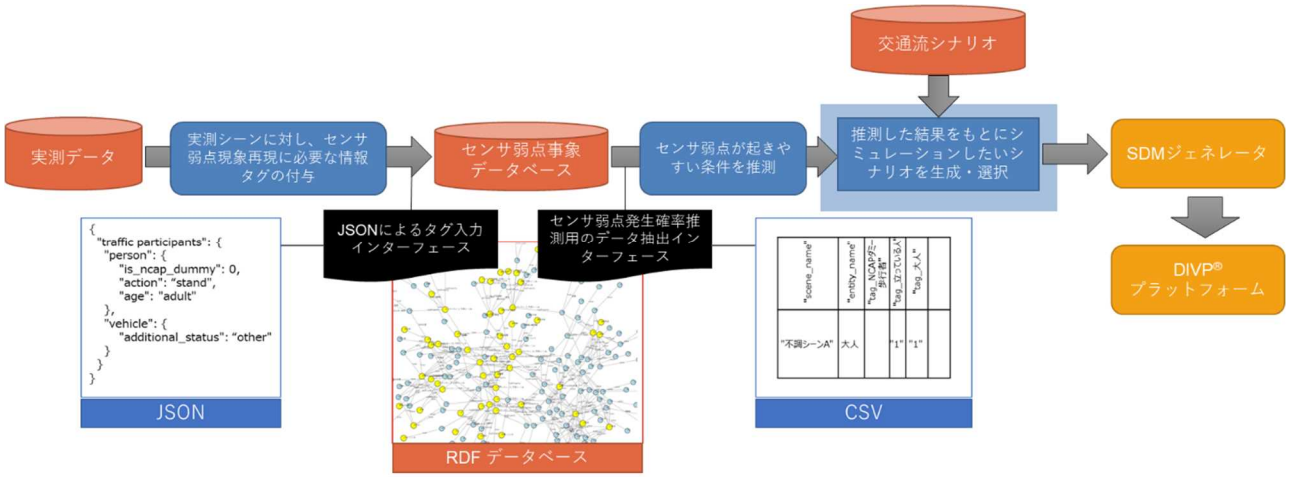


出所 SOLIZE(株)

Figure 84　Apache Jena Fuseki 上で構築したデータ(可視化したもの)

シナリオジェネレータ（センサ弱点シナリオ探索モジュール）

「シナリオジェネレータ（センサ弱点シナリオ探索モジュール）」は、センサ弱点データベースのデータを統計処理して得られたセンサ弱点の発生確率をもとに、センサ弱点シナリオを探索するためのモジュールである。このモジュールによって、ベースとなるシナリオを選択または生成した上で、センサ弱点に関わる条件を振りながら、センサ弱点の発生確率をもとに目的にあったシナリオを探索することができる。



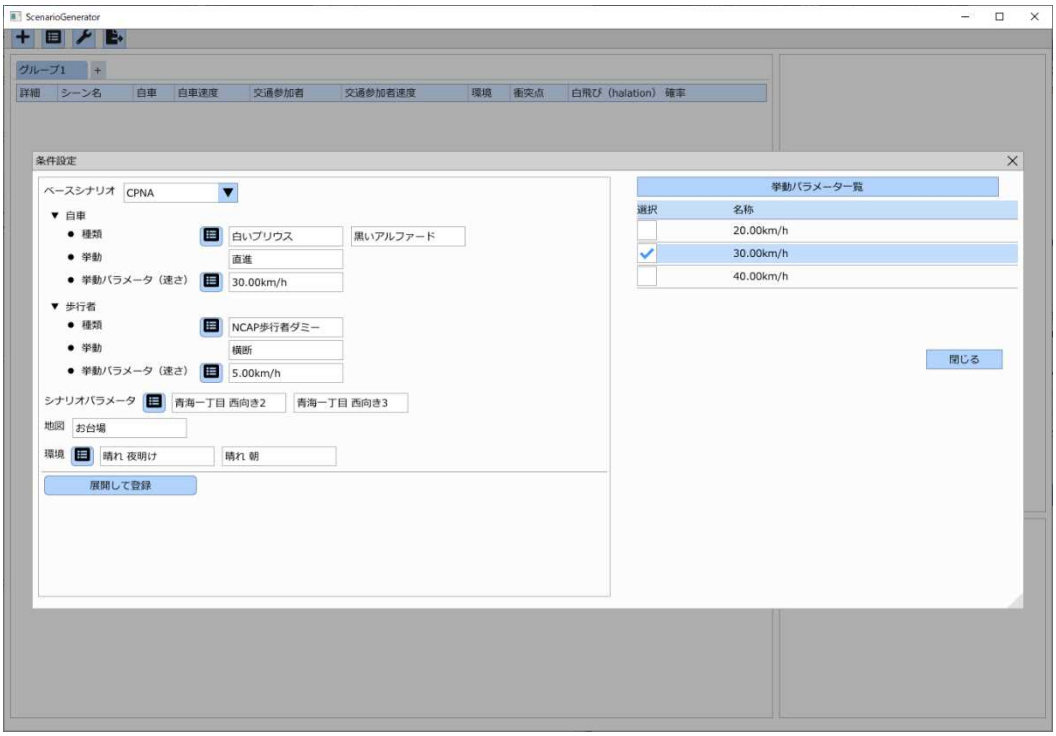
出所 SOLIZE（株）

Figure 85　シナリオジェネレータ（青の網部分）

今年度は、現実的ではあるものの特定の交通流シナリオに対して様々な条件を設定できるようにすることで、センサ弱点データベースの一連の構想が機能するかどうかを確認するためのプロトタイプ実装を行った。特定の交通流シナリオとしては、お台場の特定の交差点において、歩行者が横断する前を自車が通るシナリオ、すなわち EURO NCAP の CPNA50 シナリオを実際の地図上で実現するシナリオである。このため、以下のような機能を持つモジュールを構築した。

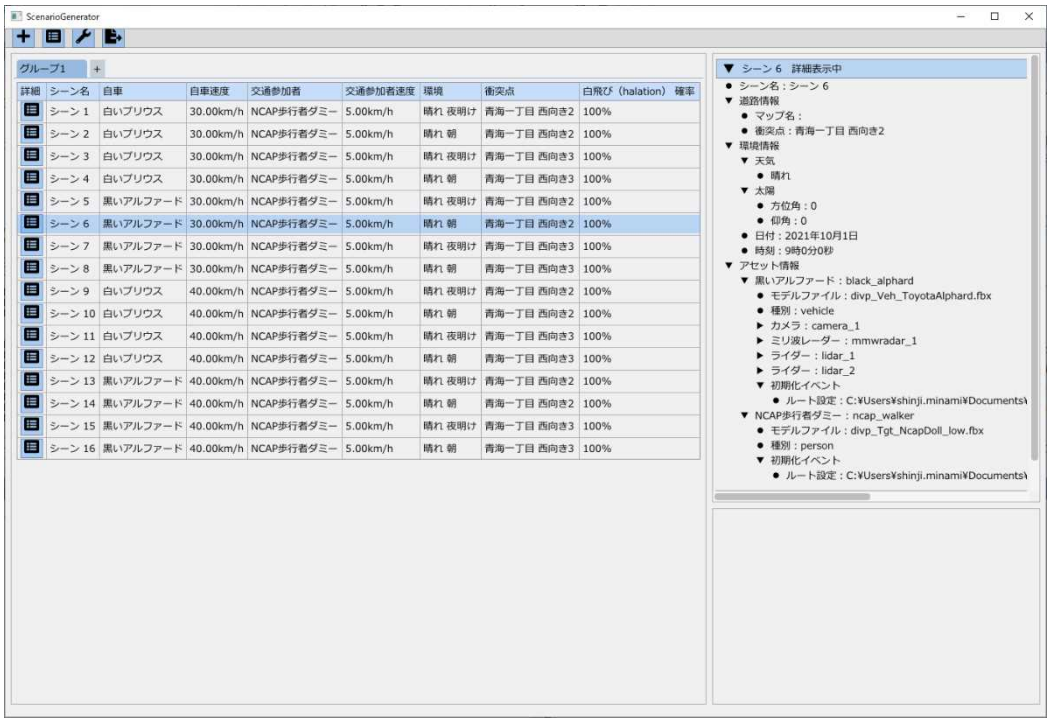
- ベースとなるシナリオを読み込んだり、プリセットされたリストから選んだりすることができるような機能。今回の例では、CPNA のシナリオを選択する。
- ベースとなるシナリオに対して、様々な設定の選択肢から複数の選択肢を選ぶことができる機能。交通参加者、交通参加者の挙動パラメータ（今回の例では、自車や歩行者の速度）、環境、シナリオに関わるパラメータ（今回の例では衝突位置）などの選択肢を提示して、その中からシナリオの生成に利用する複数の選択肢を選ぶことができる。
- 具体シナリオの展開。前ステップで選択した選択肢をもとに複数のシナリオを生成する。その際、選択したシナリオパラメータや挙動パラメータに応じて、交通参加者の挙動も設定する。
- 展開した具体シナリオのパラメータを編集する機能。
- センサ弱点推測エンジンに問い合わせてセンサ弱点の発生確率を表示する機能。
- シミュレートしたいシナリオを選択して、DIVP®用のシナリオフォーマットで出力する機能。

上記モジュールによって、センサ弱点データベースとその周辺のモジュールのインターフェースが機能することを確認した。



出所：SOLIZE 株式会社

Figure 86 シナリオツール　候補選択画面



出所：SOLIZE 株式会社

Figure 87 シナリオツール　候補リスト表示・編集画面

⑧ シナリオ生成に関する標準化のための国際連携

日独連携の活動 VIVID の分科会 JTTT5 において、センサ弱点現象を再現するシミュレーションのためのシナリオの構造、特にパラメータのリストやパラメータのあり方について、議論を進めた。今年度は、JTTT5 の活動として、JAMA 安全性評価フレームワークをベースとした日本側のシナリオ選定の方針、ドイツ側のセンサモデル・シナリオのための要件定義のアプローチである PerCollECT についての議論、および、DIVP®で利用しているシナリオパラメータの考えた方について議論を行った。

その他、「④不調スクリプトの生成ツールの作成 2」に関連して、これまで様々な実測データに対応するスクリプトが別に存在していたものを統合して、一つの変換スクリプトとしてリリースした。それを利用して、今年度行われた実験などの変換を行った。

⑶次年度以降の計画

⑤ 不調シナリオの実行

新たに実験で得られたセンサ弱点シナリオのプラットフォームでの実行ができるように、データの変換を行ったり、センサ弱点シナリオツールの強化を行ったりしていく。

⑦ 走行条件データベースとセンサ不調データベースの結合モジュールのプロトタイプ構築

対応可能センサおよびシナリオの強化を進める。カメラ以外のセンサのセンサ弱点シナリオを設定できるようなインターフェースを構築する。

さらに、センサ弱点シナリオをより効率的に評価・選択できる手法を検討する。UI における探索や絞り込み機能の強化や半自動的にセンサ弱点シナリオを探索する手法も検討する。

⑧ シナリオ生成に関する標準化のための国際連携

ASAM 活動（主に OpenSCENARIO2.x 活動）や日独連携 VIVID の枠組みを通じて、DIVP®のシナリオの構造やパラメータ構造の標準化に向けて引き続き活動する。

5. 2 「B.センサリファレンスモデル構築と評価ツールの構築」のための研究開発

5. 2. 1 「B0. プロジェクト推進・シミュレーション PF 評価」(学校法人幾徳学園神奈川工科大学)

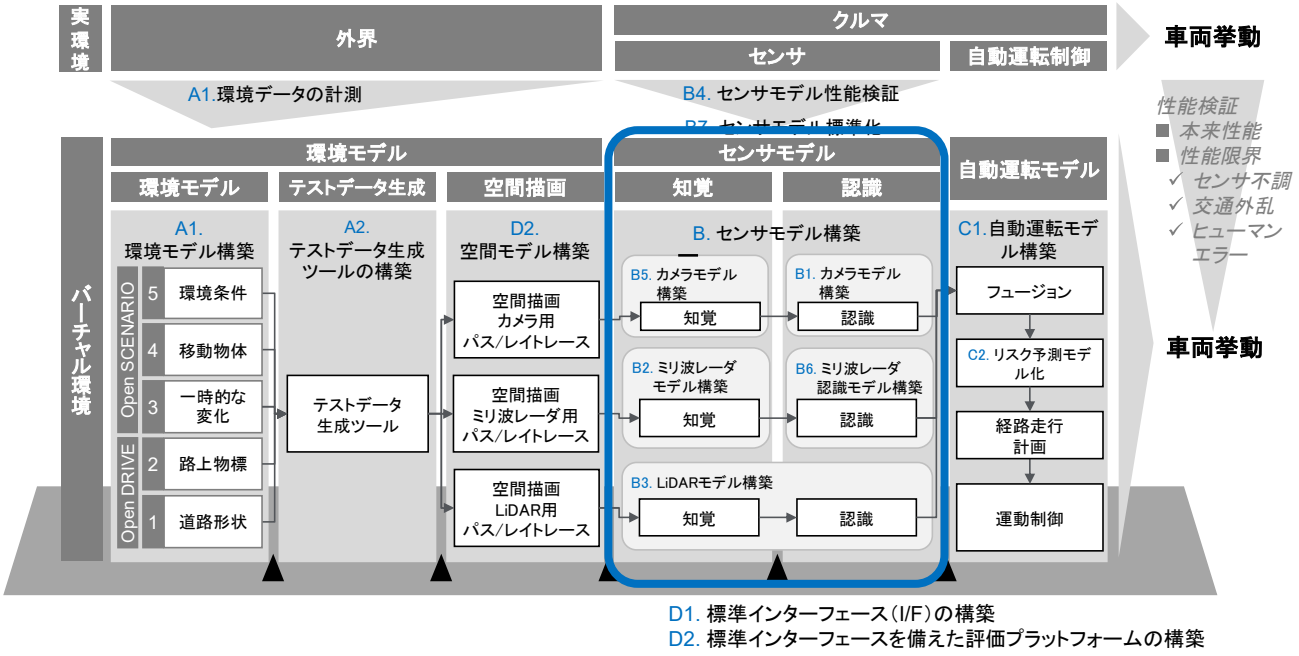


Figure 88　本研究の位置付け

■ 事業目的

A～D パートを統括したプロジェクト全体の進捗、予算、課題、成果物の各管理を行い、より優れた活動成果を得られるようにする。また、A～D パートで構築したテストケース、モデル、ツールを結合評価し、実機測定の結果との比較等を通してシミュレーションの性能を確認する。

併せてコンソーシアムの代表機関として、成果を取りまとめ国際連携を推進する。

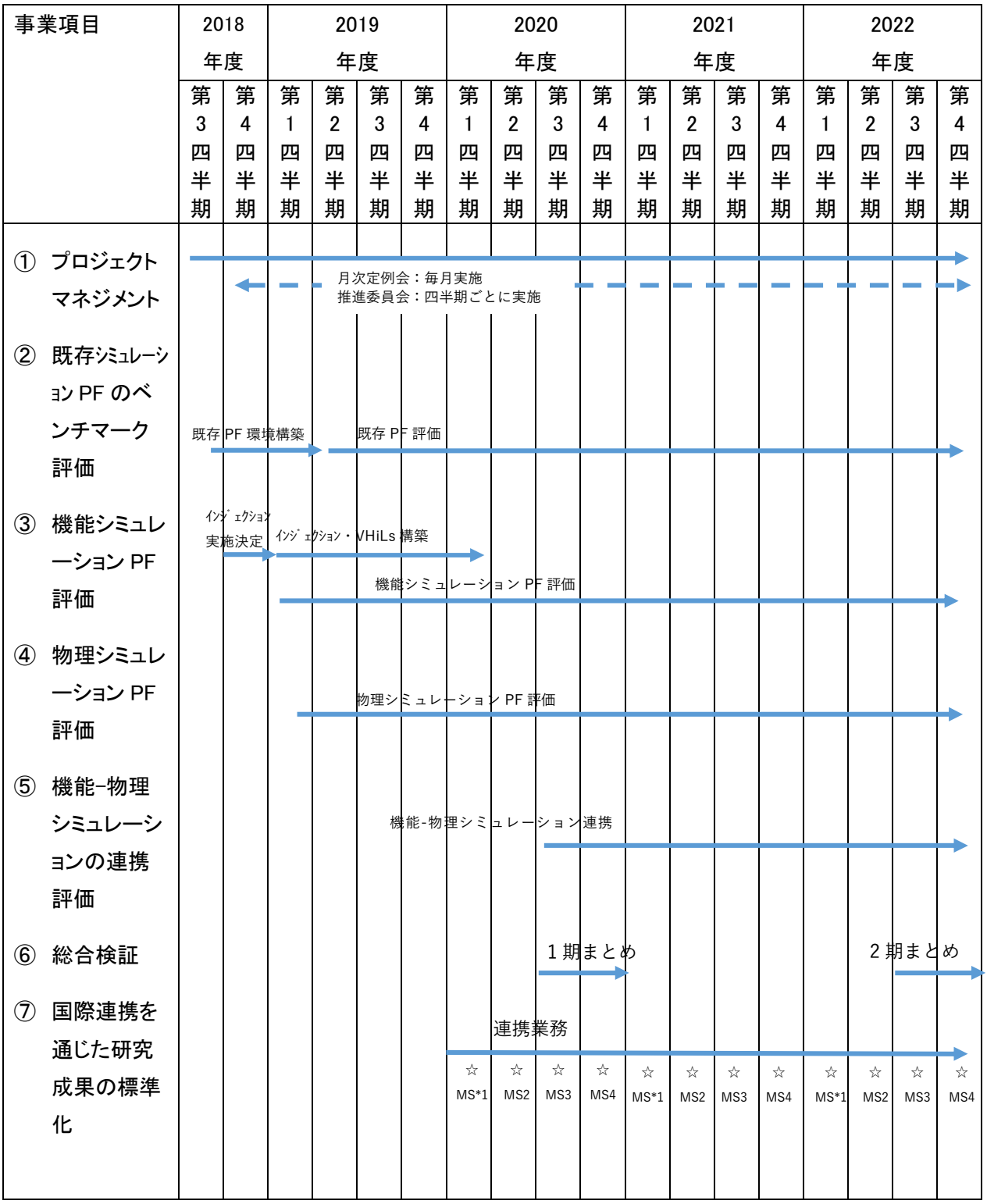
■ 事業概要

活動全体のマネジメントとして、全体の進捗、予算、課題、成果物の各管理を継続的に実施する。また月次で全体ミーティングを開催し、成果を確実なものとする。

カメラ、ミリ波レーダ、LiDAR の各センサを用いた機能モデルシミュレーション(行動計画まで含めた AD システム評価を可能にする Closed Loop シミュレーション)、および物理モデルシミュレーション(センサ単体の高精度な評価を可能にする Open Loop シミュレーション)について、A～D の各パートで構築するテストデータ、センサモデル、行動計画モデル、シミュレーション PF を結合してシミュレーションを実施し、シミュレーションの性能を確認する。

本研究開発の成果について、日独間の連携プロジェクト VIVID(German Japan Joint Virtual Validation Methodology for Intelligent Driving Systems)へ参加し、DIVP®を国際的に競争力のある評価環境とすべく国際的な標準化を目指す。

■ 実施計画



*MS: Milestone

(1)令和3年度の成果(まとめ)

プロジェクトマネージメント/国際連携の取り纏めを行い、プロジェクトの推進を実施
自動運転システムとDIVP®を結合評価し、接続性向上や認識限界性能評価を可能とした

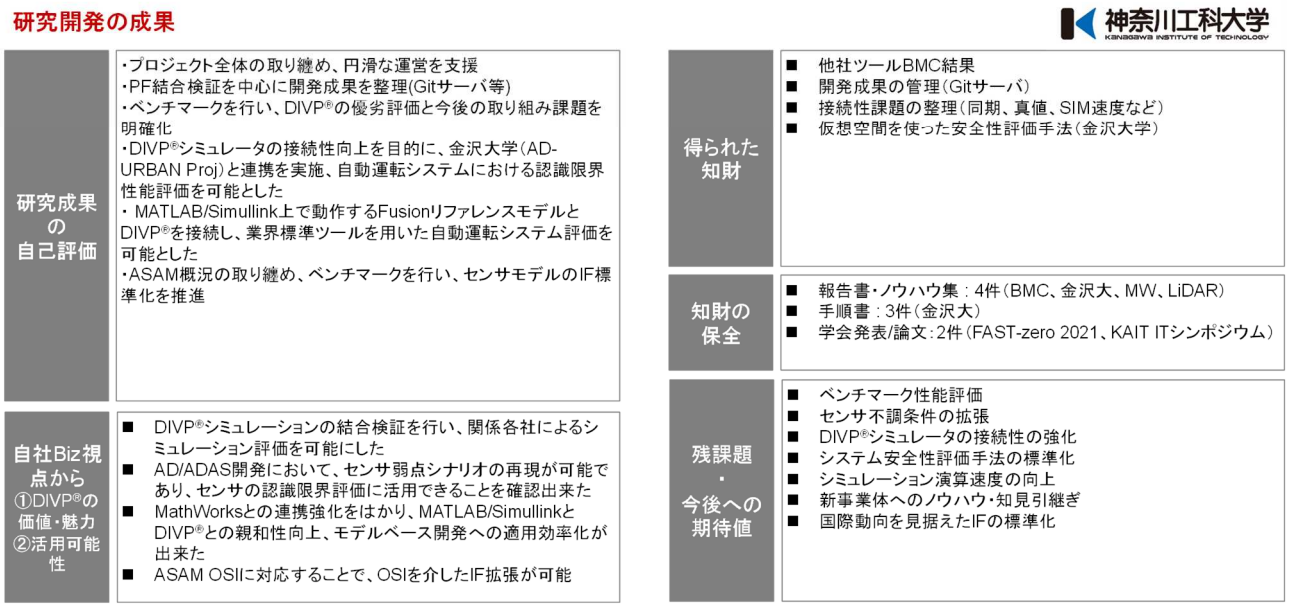


Figure 89 研究開発の成果

本年度は、前年度に引き続き DIVP®プロジェクト全体の取り纏め、円滑な運営を支援してきた。また、技術・コンソ外連携・事業化の観点で体制を明確化しプロジェクトを推進した。更に DIVP®コンソーシアム全体の研究開発ロードマップとして AD/ADAS 評価に使用するシミュレーションモデル・アセット・シナリオ条件のパッケージングであるシナリオパッケージを立案し、FY22 までの全体計画の立案を行った。

また、複数の企業で並行開発した各モデルを一元的にバージョン管理できる環境を構築・運営、システムとして結合検証を実施した。

既存シミュレータのベンチマークを実施、DIVP®シミュレータの課題を明確化し、接続性向上を目的とした MathWorks 社の MATLAB/Simulink との接続性強化を実施した。また、金沢大学(AD-URBAN Proj)の自動運転システムと連携を行い、システムの認識限界性能評価を可能とした。

更に ASAM 概況の取り纏めを推進し、DIVP® IF の標準化活動を推進した。

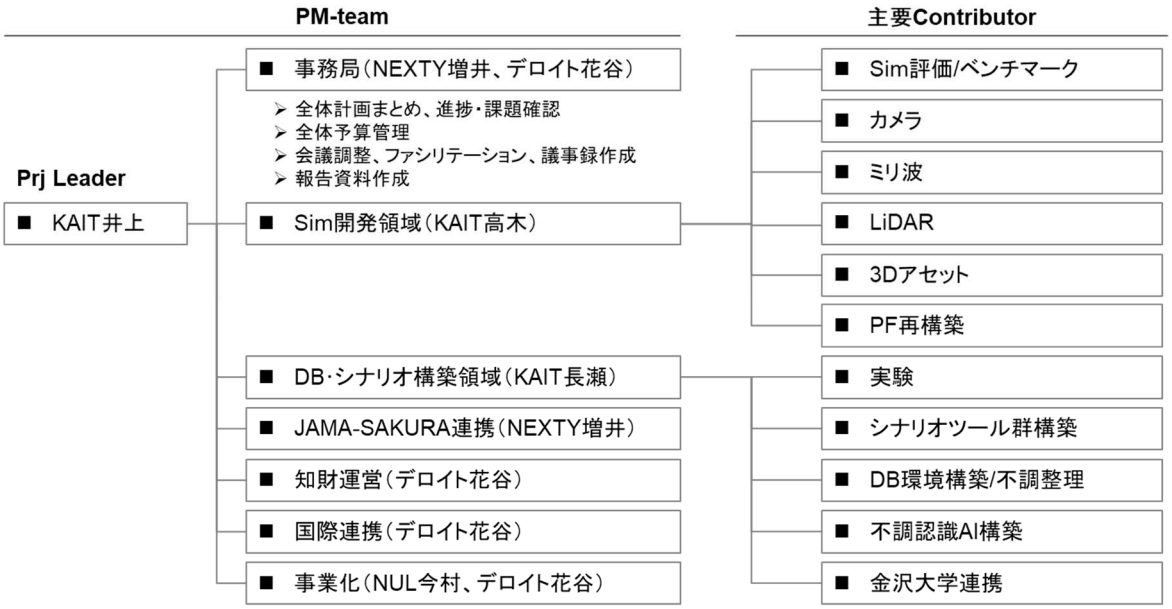
次年度は、ユーザの PF 活用に向けた不足分の研究開発、他 Sim との連携、評価シナリオ DB の整備、評価手法の標準化を目指す。

(2)令和3年度の成果

① プロジェクトマネジメント

（ア） プロジェクト推進

プロジェクト内のマネジメントとして、A～D パート全体に渡るプロジェクト管理を行った。コンソーシアム全団体が集まり各社進捗・課題共有を行う月次定例会や、課題解決に向けた個別会議などを実施した。また、技術・コンソ外連携・事業化の観点で体制を明確にし、プロジェクトを推進した。結果、各社が計画に沿った研究開発を推進でき、全体の成果として創出することができた。



出所：学校法人幾徳学園　神奈川工科大学

Figure 90　DIVP®体制図

（イ） 報告会・ワークショップ推進

以下にあげる報告会・ワークショップに対する資料作成・発表者調整を取りまとめ、広く本プロジェクトの重要性や有用性を理解してもらうことができた。

Table 39　参加した報告会・ワークショップ一覧

分類	開催日	報告会・ワークショップ名	報告内容
定期報告会	3ヶ月に1回	SIP システム実用化 WG	・研究進捗 ・AD-URBAN 連携内容
	3ヶ月に1回	SIP 臨海部実証実験 TF	・モニター評価進捗 ・事業化検討状況
	4ヶ月に1回	安全性評価合同推進委員会	・AD-URBAN、自動車工業会、SAKURA Prj.との連携取り組み内容

イベント・ワークショップ	2021 年 10 月 18 日	SIP 研究拠点視察	・研究進捗 ・事業化検討状況
	2021 年 11 月 9～10 日	SIP-adus Workshop 2021	・21 年度取り組み内容 ・国際連携会議
	2021 年 12 月 6 日	安全性評価合同推進ワークショップ	・DIVP®提供価値に基づく技術紹介 ・ニーズヒアリング

出所：学校法人幾徳学園　神奈川工科大学

（ウ）研究開発ロードマップ（シナリオパッケージ）の立案

DIVP®コンソーシアム全体の研究開発ロードマップとして AD/ADAS 評価に使用するシミュレーションモデル・アセット・シナリオ条件のパッケージングであるシナリオパッケージを立案した。コンソーシアム参加の各団体には本シナリオパッケージをもとに必要な研究開発項目を整理していただき、各団体の実施計画へ反映いただいた。

シナリオパッケージは既存の ADAS 評価アセスメントである NCAP シナリオなども含めた「アセスメントパッケージ」と、実際の交通環境にて起こりえるセンサが苦手とする条件（センサ弱点シナリオ）とマップ/ターゲットアセット、天候モデル等を含めた「お台場コミュニティパッケージ」の 2 種類を定義した。お台場コミュニティパッケージはコンソーシアムに参加しているセンササプライヤの知見や各種ワークショップを通じて得た自動車メーカーの要望などをもとに優先度を設定している。

出所：学校法人幾徳学園　神奈川工科大学

Figure 91　シナリオパッケージ概要

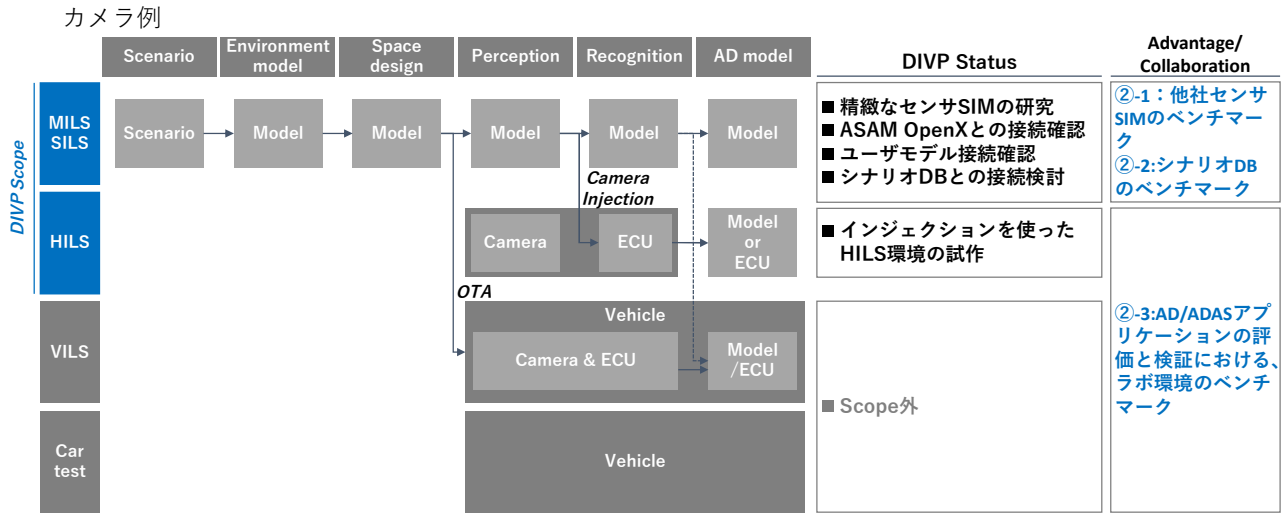
② 既存シミュレーション PF のベンチマーク評価

DIVP®は、カメラ、LiDAR、Radar の「センサモデル」を中心に、これに入力される外界を模した「環境モデル」、センサ以降のセンサフュージョン等の自動運転機能を模した「自動運転モデル」から構成され、シミュレーション手法としては MILS/SILS に該当する。

本項目では、MILS/SILS といった各評価手法における②-1:既存センサシミュレーションツールのベンチマーク結果、②-2:シナリオデータベースのベンチマーク結果を記載する。

また HILS、VILS における DIVP®への適用可能性検討として、②-3:AD/ADAS アプリケーションの評価と検証における、ラボ環境のベンチマークを行った。

下記の図は縦軸に各評価手法(XILS)と横軸にシナリオ、環境モデル、空間描画モデル、センサ知覚モデル、センサ認識モデル、Fusion 以降の制御や車両モデルを模した機能概略図となっており、各ベンチマークの位置づけを示している。



出所:学校法人幾徳学園 神奈川工科大学

Figure 92 各評価プロセスにおけるベンチマーク結果の位置付け

Table 40 にベンチマーク対象とする既存シミュレーション PF とそれぞれの選定理由を示す。

Table 40 ベンチマーク対象とする既存シミュレーション PF

メーカー	シミュレータ名称/バージョン	調査対象	選定理由
IPG Automotive	CarMaker/10.0.1～10.2.1	センサモデル シナリオ生成	運転シミュレータとして実績が多く、他ツールとの連携機能が豊富
Siemens	Prescan/2021.1, 2021.2, 2021.3	センサモデル シナリオ生成	物理ミリ波モデルの機能拡張に注力している
ANSYS	VRXPERIENCE/2021R1, 2021R2	センサモデル シナリオ生成	カメラモデルを中心に物理モデルに注力している
NTT データ オートモビリジェンス研究所	GARDEN Scenario Platform /acacia	シナリオ生成	オープンソースのシミュレーション PF

出所:学校法人幾徳学園 神奈川工科大学

■②-1:既存センサシミュレーションツールのベンチマーク結果

DIVP®の優位性である「反射物性表現定義の環境～センサモデル」のさらなるベンチマークに加え、課題であった「接続性」「データベース」「国際標準化」についてベンチマークを実施した。ベンチマークの評価軸として、6 つの評価軸を設定し評価を行った。設定した 6 つの評価軸を Table 41 に示す。

Table 41 既存センサシミュレーションツールベンチマーク評価軸

評価軸	評価項目	調査内容
センサモデル	● センサ弱点の再現可能性 ● センサごとの Sim 性能	● センサ弱点の再現機能調査 ● 一致性、速度、等
シナリオジェネレータ	● UI の使いやすさ ● シナリオジェネレータ機能	● 画面構成、設定機能の分かりやすさ ● シナリオの作り易さ、拡張性
データベース(DB)	● アセットの充実度	● 環境モデルの品ぞろえ、等
接続性	● 一般シナリオとの接続性 ● 反射物性定義データ/センサモデルの接続性	● 一般シナリオ(ジオメトリ、交通流等)との接続 ● 反射物性、センサモデルへの接続
国際標準化	● 国際標準規格などへの対応	● ASAM OpenX への対応調査
事業化	● ユーザの各種ユースケースへの対応	● Co-sim 連携、HILS 接続、等

出所:学校法人幾徳学園 神奈川工科大学

➢ センサモデルのベンチマーク結果

センサモデルの調査対象として、DIVP®で構築するカメラモデル、LiDAR モデル、Radar モデルを調査対象とした。センサモデルのベンチマークとして、センサ物理現象を再現できる機能を持っているのかを評価する「機能評価」とセンサ物理現象の再現度合いを評価する「性能評価」の 2 つの評価軸から評価を行った。「機能評価」はユーザガイドなどからセンサモデルの機能評価を行い、「性能評価」はシミュレーション実行結果を比較し評価を行った。なお、「性能評価」はセンサモデルの基礎的な性能について評価した。

✧ センサモデルのベンチマーク結果(機能評価)

カメラモデルについての結果を Table 42 に、Radar モデルについての結果を Table 43 に、 LiDAR モデルについての結果を Table 44 に、それぞれ示す。

ここでのベンチマーク項目は、DIVP®で再現予定のものを中心に各センサモデルで考えられる現象から構成されている。ベンチマークとして、製品のバージョンアップでの対応状況確認も行っているが、表での結果は調査の時点で最新バージョンのものを用いている。現象に対応し実機検証があるものを「◎」、現象に対応しているが実機検証がないものを「○」、一部対応しているものを「△」、非対応のものを「×」、として評価している。

Table 42 カメラモデルベンチマーク結果

現象区分	現象	CarMaker (10.2.1)	VRXPERIENCE (2021R2)	Prescan (2021.3)	DIVP®
光源	一般光源(車両ランプなど)	○	○	○	◎
光源	太陽光の放射輝度	○	○	○	◎
光源	天空光の放射輝度	×	×	△	◎
光源	間接光	○	○	○	◎
光物性	物体表面での反射、拡散、透過	△	○	△	◎
光物性	物体表面の経年劣化の影響	×	×	○	◎ (アスファルト)
光物性	付着物による影響	×	×	△	×
伝達	空間中での散乱 (関与媒質)	○	×	○	○ (霧)
センサ	車両挙動による影響	○	△	△	○
センサ	温度特性による影響	×	○	×	×
センサ	センサの経年劣化の影響	×	×	×	×
センサ	レンズ歪み	○	○	○	○
センサ	フレア	○	×	○	○
センサ	ゴースト	×	×	×	×
センサ	付着物による影響 (フロントガラス)	△	×	△	○ (雨粒)

出所:学校法人幾徳学園 神奈川工科大学

Table 43 ミリ波センサモデルベンチマーク結果

現象区分	現象	CarMaker (10.2.1)	VRXPERIENCE (2021R2)	Prescan (2021.3)	DIVP®
光源	他車両光源(干渉)	×	×	×	×
光物性	物体表面での反射、散乱、透過	△	△	△	◎
光物性	物体表面の劣化の影響	×	×	×	○ (アスファルト)
光物性	付着物による影響	△	×	×	○ (雨粒)
光物性	反射時の位相／偏波の変化	○	○	○	◎
光物性	回折	×	×	×	×
伝達	複数回反射、透過	△	△	△	◎
伝達	空間中での散乱(＝減衰)、干渉	○	×	○	◎
伝達	ドップラー	○	○	○	◎
伝達	マイクロドップラー	○	○	○	◎
センサ	電波源(変調方式の再現)	△	○	○	◎
センサ	車両挙動による影響	○	△	△	○
センサ	温度特性による影響	○	×	○	×
センサ	センサの経年劣化の影響	×	×	×	×
センサ	付着物による影響	×	×	×	×
センサ	内部反射	×	×	×	×

出所:学校法人幾徳学園　神奈川工科大学

Table 44 LiDAR モデルベンチマーク結果

現象区分	現象	CarMaker (10.2.1)	VRXPERIENCE (2021R2)	Prescan (2021.3)	DIVP®
光源	他車両光源(干渉)	×	×	×	×
光源	その他光源(ハロゲンランプ)	×	×	×	◎
光源	太陽光の放射輝度	×	×	×	◎
光源	天空光の放射輝度	×	×	×	◎
光物性	物体表面での反射、散乱、透過	△	△	○	◎
光物性	物体表面の劣化の影響	×	×	×	◎ (アスファルト)
光物性	付着物による影響	△	×	×	◎ (雨粒)
伝達	複数回反射、透過	○	○	○	◎
伝達	ビームの広がり	○	○	○	◎
伝達	空間中での散乱(減衰)	○	○	○	◎
センサ	自光源(ビーム大きさ等)	×	○	○	◎
センサ	走査	×	○	○	◎

センサ	車両挙動による影響	○	△	△	○
センサ	温度特性による影響	×	×	×	×
センサ	センサの経年劣化の影響	×	×	×	×
センサ	付着物による影響	×	×	×	○ （雨粒）

出所：学校法人幾徳学園　神奈川工科大学

ベンチマークから得られた DIVP®のセンサモデルの特徴・優位性を Table 45 に示す。

Table 45　ベンチマーク結果による DIVP®優位性の考察

	DIVP®の特徴
Camera	1. 実機計測に基づく一致性検証 2. センサ原理に基づく反射特性を再現 （CarMaker：反射、透過に対応、Prescan：反射のみに対応） 3. センサの付着物による影響に対応
Radar	1. 実験計測に基づく一致性検証 2. 物体表面での反射、散乱、透過のすべてに対応 3. センサの付着物による影響、反射時の位相・偏波変化に対応
LiDAR	1. 実験計測に基づく一致性検証 2. 太陽光の放射輝度、天空光の放射輝度、物体表面での反射・散乱・透過、物体表面の劣化、物体への付着物による影響に対応 3. センサの付着物による影響に対応

出所：学校法人幾徳学園　神奈川工科大学

✧　センサモデルのベンチマーク結果(性能評価)

下記の 5 つの評価項目にてシミュレーション結果を比較し、センサモデルの性能評価を行った。

Table 46　センサモデル性能評価項目

センサ	評価項目
Camera	Semantic Segmentation 結果比較
Radar	レーダ方程式との比較
Radar	検知距離、相対速度、受信強度の確認
Radar	度折り返しゴーストの確認
LiDAR	アセット反射特性の確認

- 【Camera】Semantic Segmentation 結果の比較

➢　評価方法

DIVP®と同様にオリジナルのレンダリングエンジンを採用している CarMaker 10.1.0.1 と VRXPERIENCE 2021R2 において歩行者ダミー横断シナリオを実行しカメラ画像の画像認識(Semantic Segamentation)結果の比

較を行った。なお、歩行者ダミーのアセットはそれぞれのシミュレータに標準で搭載している NCAP 大人歩行者ダミーを使用した。

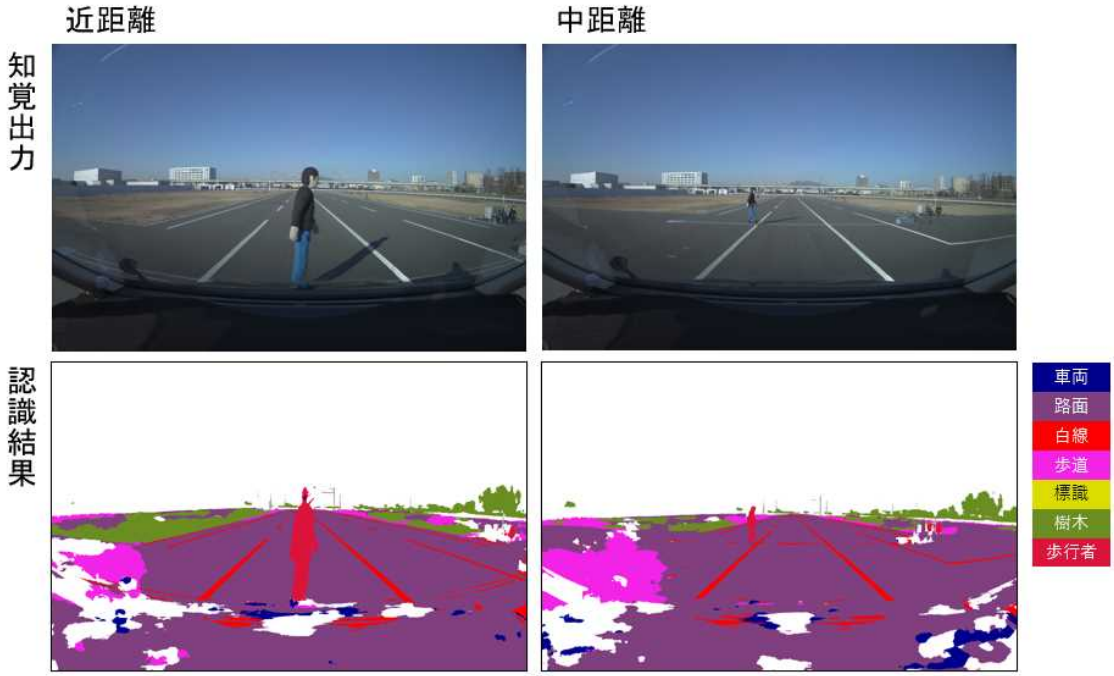
実機カメラで撮影した画像を解析すると、歩行者について頭部の一部は正しく認識できていないものの、上半身及び下半身が歩行者として認識されている。また、路面と白線についても正しく認識しているが、自車の内装部分を誤認識している。各 PF でのシミュレーション結果に対して、この解析を実行し歩行者、路面等の認識結果を比較した。

- 結果

各 PF でのシミュレーション画像を解析すると、歩行者について、CarMaker では特に近距離において歩行者の下半身の一部を“車両”、“歩道”と誤認識、下半身の一部を未認識し(Figure 94①、Figure 95①)、VRXPERIENCE では歩行者の一部を“車両”、“歩道”と誤認識、下半身の一部を未認識し(Figure 94②、Figure 95②)、DIVP®では、近距離にて、上半身の一部を“車両”と誤認識した(Figure 94③)。また、路面、白線について、CarMaker では、一部を“車両” と誤認識、一部を未認識し(Figure 94④、Figure 95③)、VRXPERIENCE では、画像下部 4 分の 1 の路面を未認識し(Figure 94⑤、Figure 95④)、DIVP®では、一部を未認識した(Figure 94⑥、Figure 95⑤)。また、CarMaker と VRXPERIENCE では、空の一部を“車両”と誤認識していた(Figure 94⑦、⑧、Figure 95⑥、⑦)。

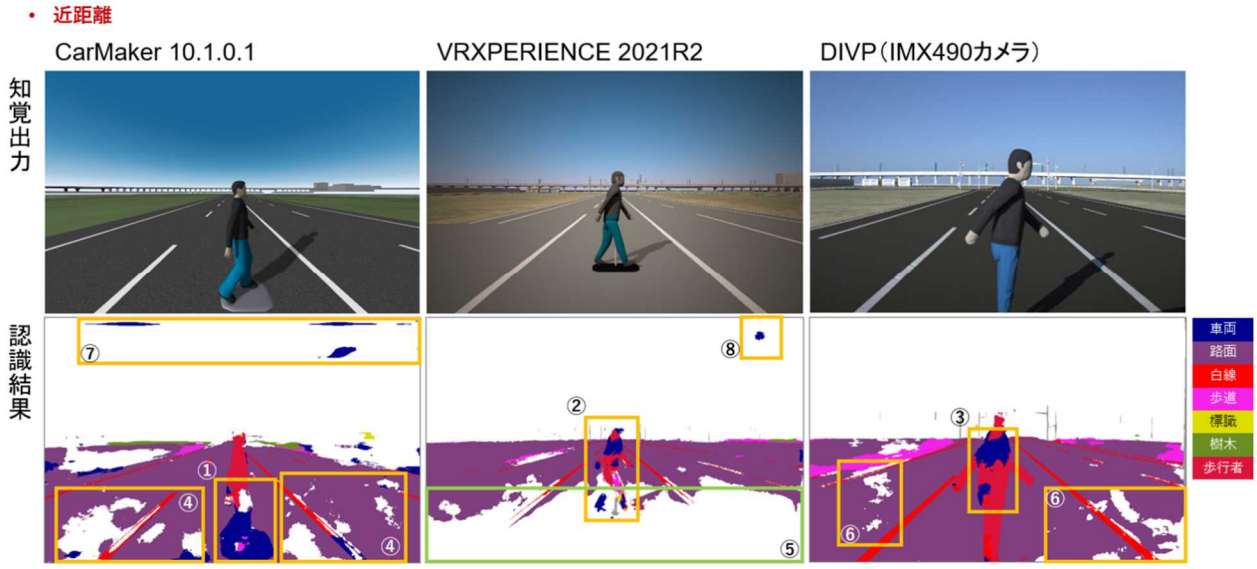
- 考察

このことから各 PF でのシミュレーション画像を解析すると、歩行者、路面、白線について誤認識、未認識しており、DIVP®の画像を用いた認識が、CarMaker、VRXPERIENCE の画像を用いた認識よりも歩行者・路面を認識できていることが分かった。



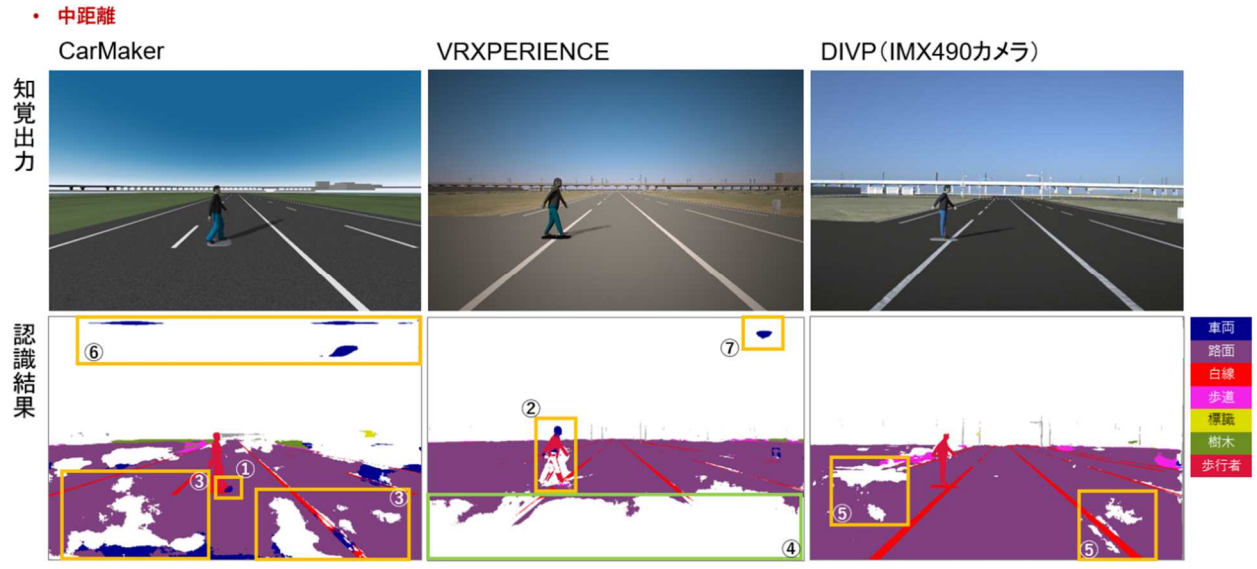
出所:学校法人幾徳学園　神奈川工科大学、AD-URBAN

Figure 93　実機カメラ画像と認識結果



出所：学校法人幾徳学園　神奈川工科大学、AD-URBAN

Figure 94　近距離でのシミュレーション画像の認識結果



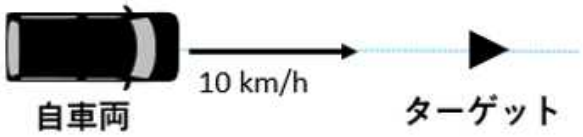
出所：学校法人幾徳学園　神奈川工科大学、AD-URBAN

Figure 95　中距離でのシミュレーション画像の認識結果

- 【Radar】レーダ方程式との比較

➢ 評価方法

自車両正面にターゲットを配置し、ターゲットに速度は一定で接近していくシナリオを実行し受信電力の値とレーダ方程式から求めた理論値を比較した。また、路面での複数回反射が発生しないようにマップ、自車両、ターゲットを設定した。ターゲットは DIVP®では C/R(コーナーリフレクタ)のアセット、Prescan では C/R のアセットが無いため球のアセットを使用し、CarMaker と VRXPERIENCE では球のアセットもないため、球のアセットを作成し追加した。Radar センサは自車両前面に設置し、CarMaker、VRXERIENCE、Prescan では、距離と相対速度の検知範囲が同等になるようにパラメータを設定し、DIVP®ではデフォルトのパラメータを使用した。



走行シナリオ

出所:学校法人幾徳学園　神奈川工科大学

Figure 96　走行シナリオ

Table 47　センサパラメータ設定

	CarMaker	VRXPERIENC	Prescan	DIVP
距離検知範囲 [m]	74.95	74.64	74.95	115
速度検知範囲 [km/h]	±70.08	-70.08～69.38	±70.08	±52

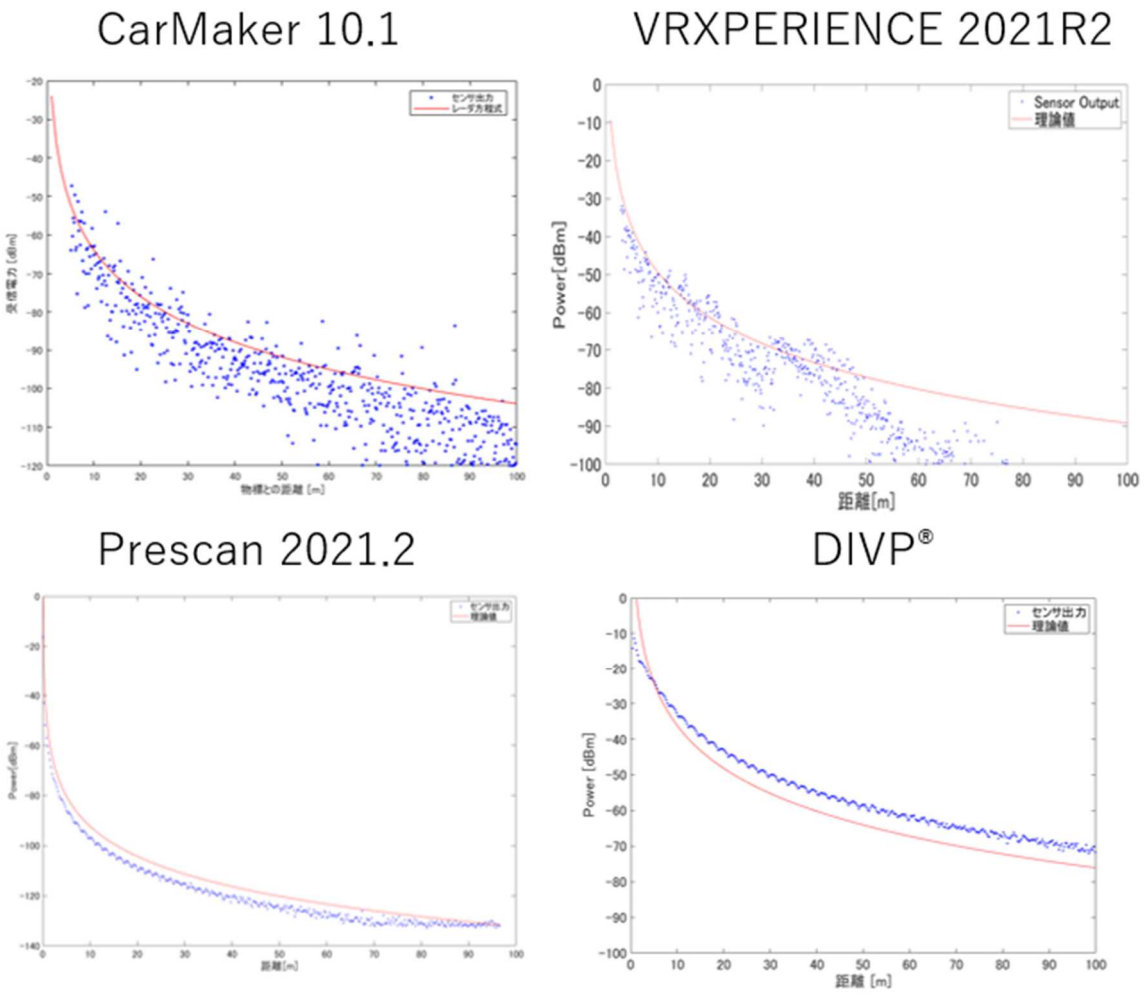
出所:学校法人幾徳学園　神奈川工科大学

➢ 結果考察

各 PF でのシミュレーション結果とレーダ方程式理論値との比較結果を Figure 97 に示す。VRXPERIENCE では、アンテナ利得を確認することができなかったため、アンテナ利得を 15 dB と仮定して理論値を計算した。その為、理論値との比較を行うことができなかった。また、各 PF にて使用したアセット、アンテナ利得の特性が異なっている為、グラフの受信電力(縦軸)のレンジが異なっている。

CarMaker の結果を見ると、センサ受信電力はレーダ方程式理論値付近に分布しているが、Prescan や DIVP®の結果と比べると値のばらつきが大きい。値がばらついた原因として、作成した球のアセットに課題があると考えられる。また、Prescan と DIVP®の結果においてもセンサ受信電力はレーダ方程式理論値と近しい値をとっており、値のばらつきは数 dB 程度である。

これらの結果より、CarMaker、Prescan、DIVP®にてレーダ方程式をモデル化できていると考えられる。VRXPERIENCE では前述の通りアンテナ利得を仮定している為、レーダ方程式との比較評価を実施していない。また、C/R のアセットは Radar 実験によく使用されるアセットであり、アセット充実度の観点から DIVP®に優位性があると考えられる



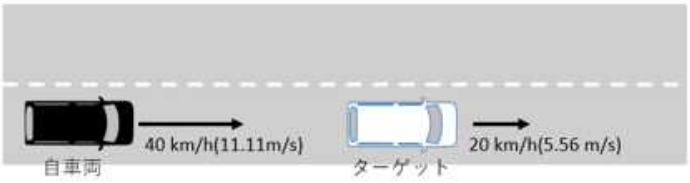
出所:学校法人幾徳学園　神奈川工科大学

Figure 97　レーダ方程式との比較結果

- 【Radar】検知距離、相対速度、受信強度の確認

➢ 評価方法

走行する自車両(40 km/h)が自車両の前方を同一方向に走行する車両(20 km/h)に接近していくシナリオを実行し、Radar センサ RV-map 出力を比較する。車両の速度は一定とし、車両は各シミュレータ標準のアセットから色、形状の近いものを選択する。Radar センサは自車両前面に設置し、CarMaker、VRXPERIENCE、Prescan では、距離と相対速度の検知範囲が近しくなるようにパラメータを設定し、DIVP®ではデフォルトのパラメータを使用する。センサは“【Radar】レーダ方程式との比較”で使用したものを使用した。



走行シナリオ

CarMaker	Tesla Model3 2019
VRXPERIENCE	プリウス(2009※)
Prescan	プリウス(2011※)
DIVP SimulinkPF	プリウス(2018)

※年代については形状より推察

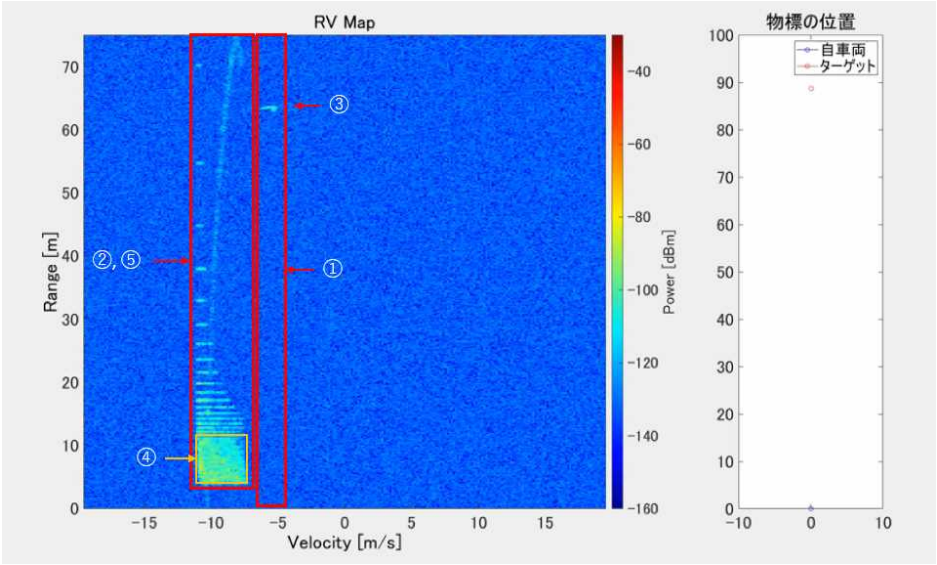
使用アセット

出所:学校法人幾徳学園　神奈川工科大学

Figure 98　走行シナリオと使用アセット一覧

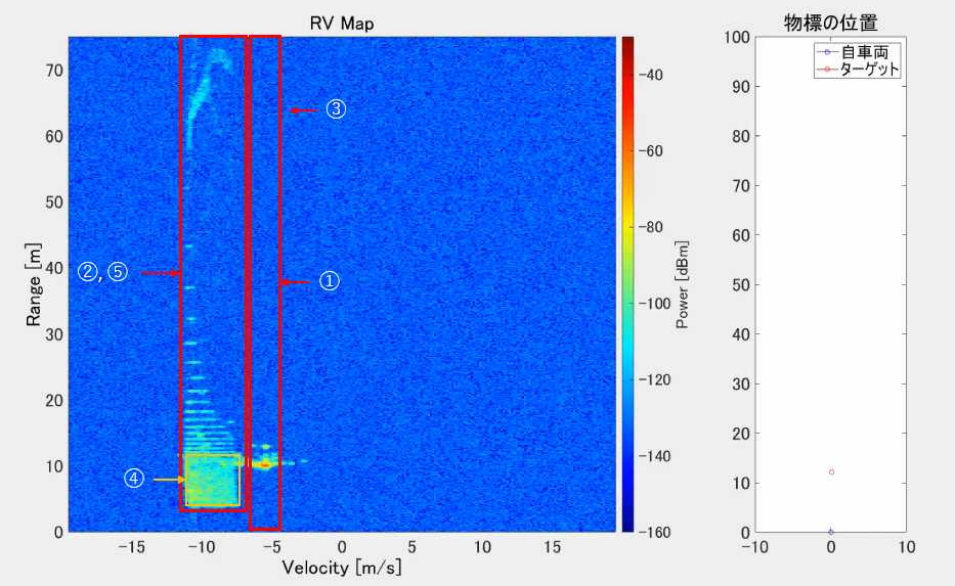
➢ 結果考察　CarMaker 10.0.1

CarMaker の結果(Figure 99、Figure 100)を見ると、相対速度-5 m/s と-11 m/s に強い反射がみられ、先行車両が遠方にいるときにも相対速度-5 m/s に少し強い反射が見られる(①～③)。また、路面反射が相対速度方向に広く縞模様のように見える(④、⑤)。このことから Radar センサ原理をモデル化できているが路面反射の再現に課題があることが確認できた。また、先行車両との距離と先行車両からの反射の受信電力をプロットすると(Figure 101)、受信電力がレーダ方程式と同様に物標との距離の 4 乗に反比例しているように見えることから、物標との距離と受信電力の関係を考慮できていることが確認できた。



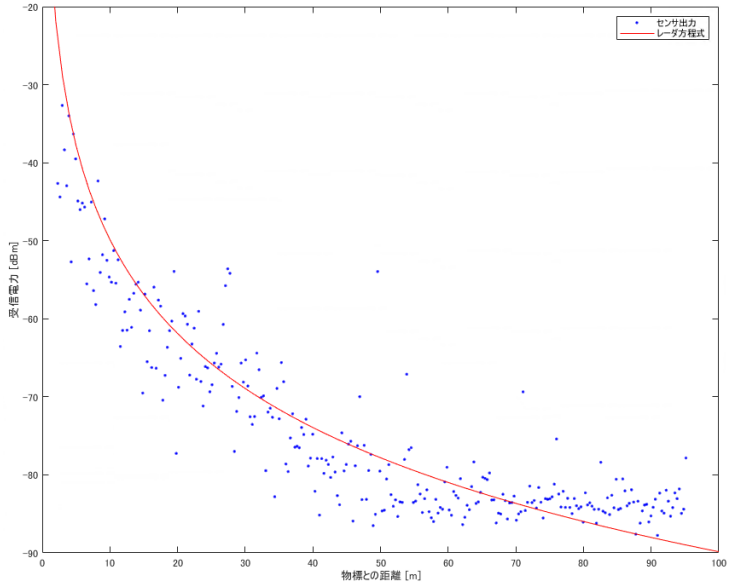
出所:学校法人幾徳学園　神奈川工科大学

Figure 99　RV Map と自車両と先行車両の位置関係(遠距離)



出所：学校法人幾徳学園　神奈川工科大学

Figure 100　RV Map と自車両と先行車両の位置関係(近距離)

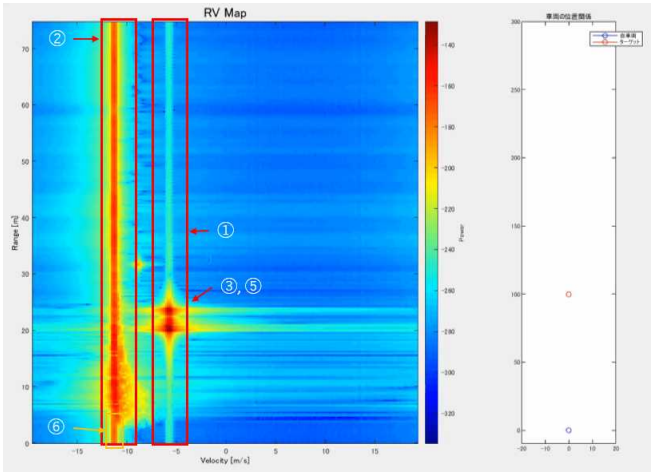


出所：学校法人幾徳学園　神奈川工科大学

Figure 101　先行車両との距離と受信電力のグラフ

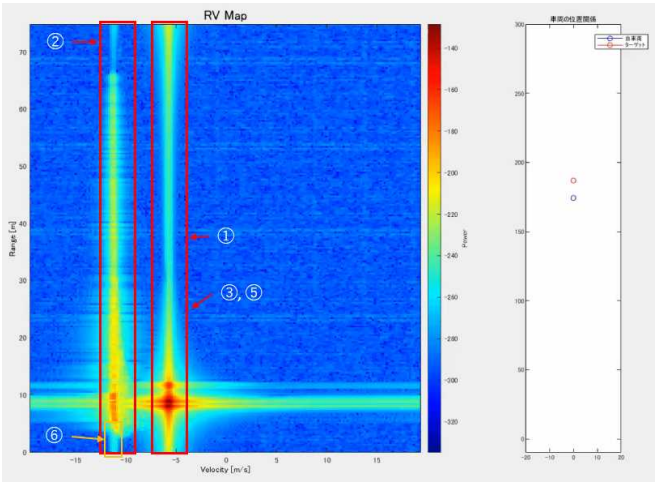
➢　結果考察　VRXPERIENCE 2021R1

VRXPERIENCE(2021R1)の結果を見ると(Figure 102、Figure 103)、相対速度-5 m/s と-11 m/s に強い反射が見られ、先行車両が遠方にいるときにも相対速度-5 m/s に少し強い反射が見られ(①～③)、路面と車両からの反射が距離方向に長すぎるように見える(⑤、⑥)。また、全体的に値が小さい結果となった。このことから、Radar センサ原理をモデル化できているが受信強度の再現に課題があることが分かった。また、先行車両との距離と先行車両からの反射の受信電力をプロットすると(Figure 104)、先行車両との距離が 20 m 以下の時、受信電力は先行車両との距離の 4 乗に反比例していないように見える((Figure 104　①)。このことから物標との距離と受信電力の関係の再現に課題があることが分かった。



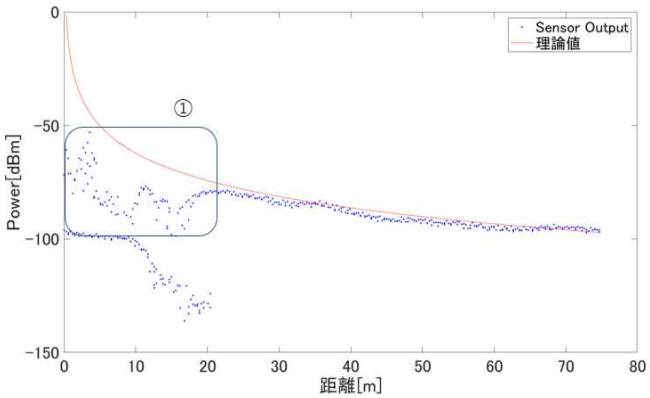
出所:学校法人幾徳学園　神奈川工科大学

Figure 102　RV Map と自車両と先行車両の位置関係(遠距離)



出所:学校法人幾徳学園　神奈川工科大学

Figure 103　RV Map と自車両と先行車両の位置関係(近距離)



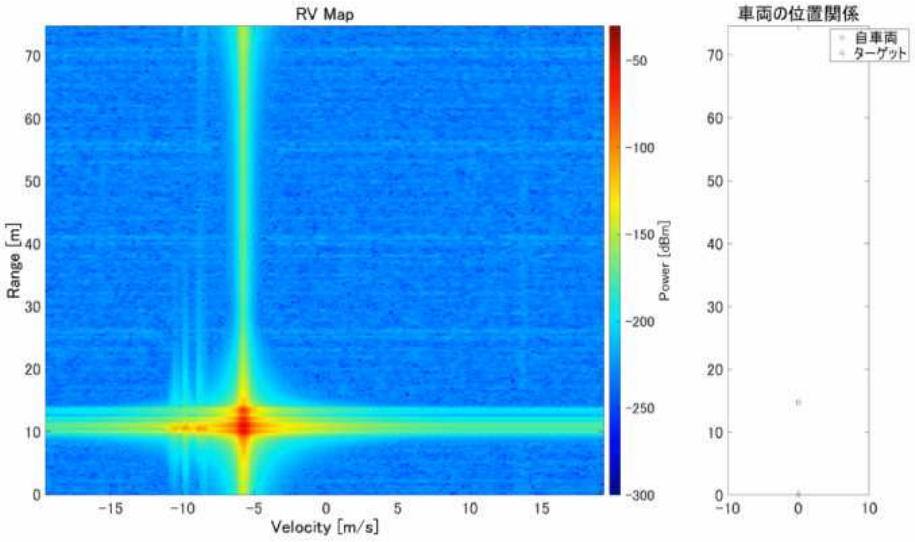
出所:学校法人幾徳学園　神奈川工科大学

Figure 104　先行車両との距離と受信電力のグラフ

➢ 結果考察 VRXPERIENCE 2021R2

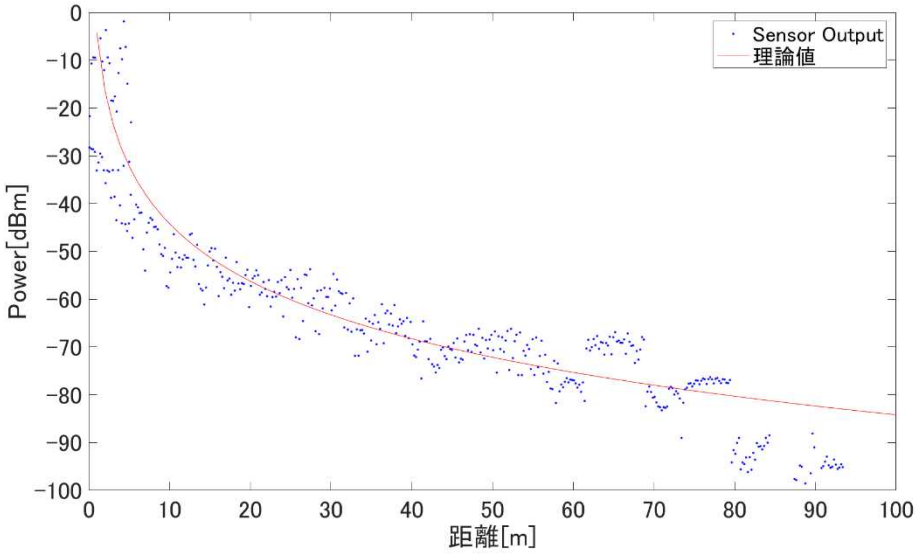
VRXPERIENCE2021R1 から 1 つ新しいバージョンの VRXPERIENCE2021R2 において、受信電力の再確認を行った。この評価では、路面でのマルチパスなどの影響を受けない条件にて評価を行った。

先行車両との距離と先行車両からの反射の受信電力のグラフ(Figure 106)を見ると、受信電力がレーダ方程式と同様に物標との距離の 4 乗に反比例しているように見えることから、物標との距離と受信電力の関係を考慮できていることが確認できた。また、Figure 105 を見ると、先行車両からの反射以外の部分の受信電力は小さすぎるままである。このことから、熱雑音の再現に課題があることが分かった。



出所:学校法人幾徳学園 神奈川工科大学

Figure 105 RV Map と自車両と先行車両の位置関係(近距離)

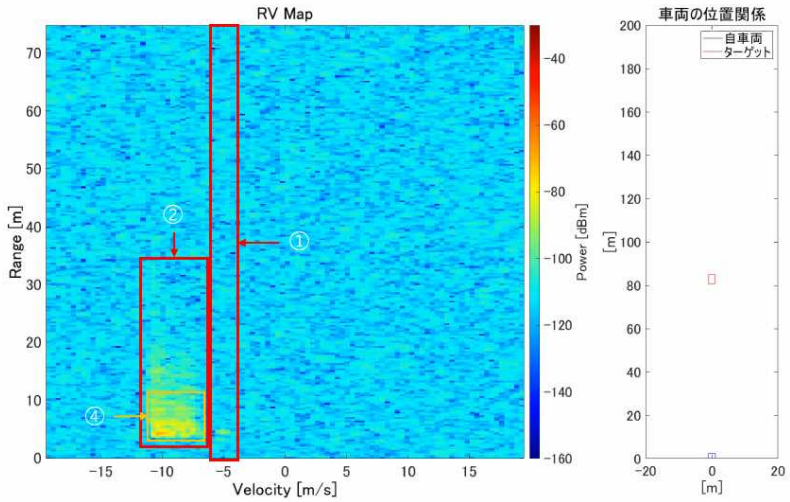


出所:学校法人幾徳学園 神奈川工科大学

Figure 106 先行車両との距離と受信電力のグラフ

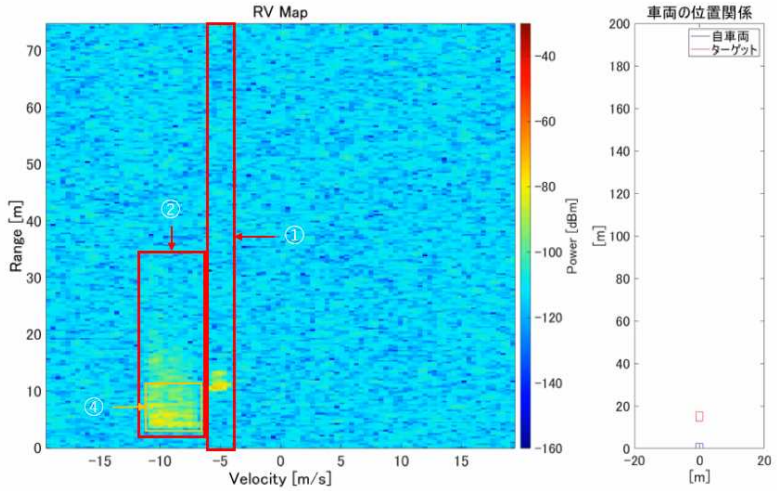
➢ 結果考察 Prescan 2021.1

Prescan の結果(Figure 107、Figure 108)を見ると、相対速度-5 m/s と-11 m/s に強い反射がみられ(①、②)、先行車両が遠方にいるときにも相対速度-5 m/s に少し強い反射が見られ(Figure 107)、路面からの反射が相対速度方向に広いように見える(④)。このことから Radar センサ原理をモデル化できているが路面反射の再現に課題があることが確認できた。また、先行車両との距離と先行車両からの反射の受信電力をプロットすると(Figure 109)、受信電力がレーダ方程式と同様に物標との距離の 4 乗に反比例しているように見えることから、物標との距離と受信電力の関係を考慮できていることが確認できた。



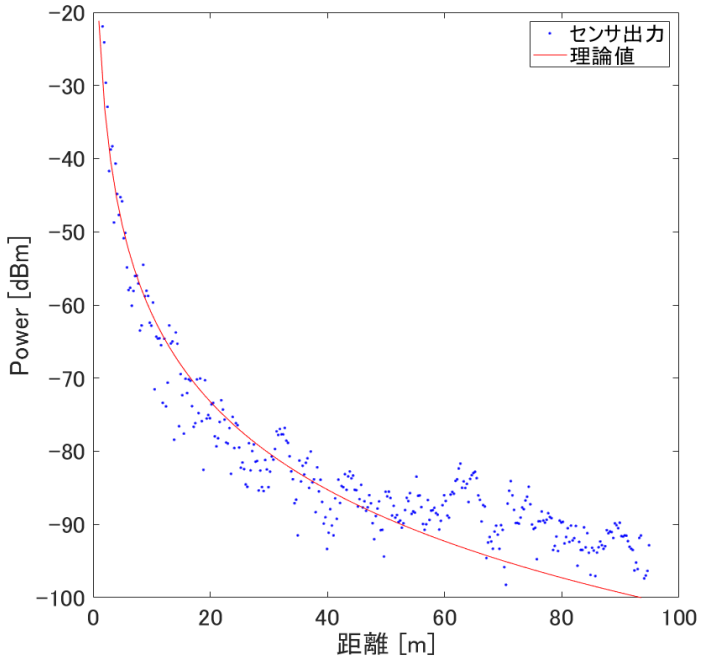
出所:学校法人幾徳学園 神奈川工科大学

Figure 107 RV Map と自車両と先行車両の位置関係(遠距離)



出所:学校法人幾徳学園 神奈川工科大学

Figure 108 RV Map と自車両と先行車両の位置関係(近距離)

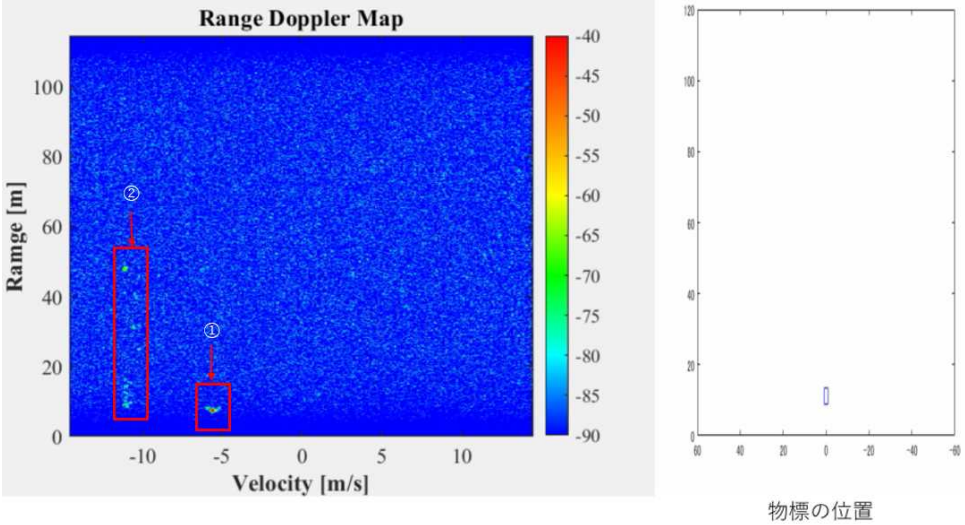


出所：学校法人幾徳学園　神奈川工科大学

Figure 109　先行車両との距離と受信電力のグラフ

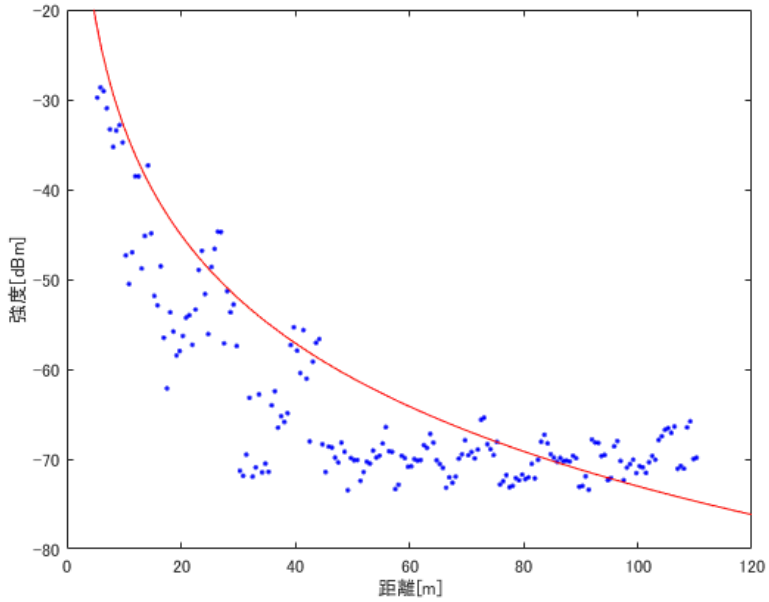
➢　結果考察　DIVP®

DIVP®での結果を見ると(Figure 110)、相対速度−5 m/s と−11 m/s に強い反射が見られる(①、②)。このことから、Radar センサ原理をモデル化できていることが確認できた。また、先行車両との距離と先行車両からの反射の受信電力をプロットすると(Figure 111)、受信電力がレーダ方程式と同様に物標との距離の 4 乗に反比例しているように見えることから、物標との距離と受信電力の関係を考慮できていることが確認できた。



出所：学校法人幾徳学園　神奈川工科大学

Figure 110　RV Map と自車両と先行車両の位置関係(近距離)



出所：学校法人幾徳学園　神奈川工科大学

Figure 111　先行車両との距離と受信電力のグラフ

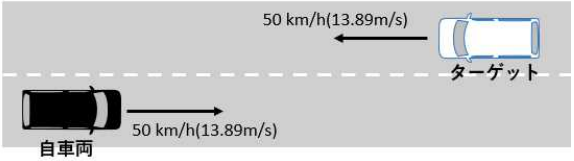
➢　考察まとめ

どの PF でのシミュレーション結果においても、設定した条件通りに強い反射強度が見られたことから、Radar センサ原理をモデル化できていることが確認できた。しかし、CarMaker、Prescan では路面反射の再現に、VRXPERIENCE では熱雑音の再現に課題があることが確認できた。また、どの PF でのシミュレーション結果においても、物標からの受信強度はレーダ方程式と同様に物標との距離の 4 乗に反比例しているように見えることから、物標との距離と受信電力の関係を考慮できていることが確認できた。

● 【Radar】速度折り返しゴーストの確認

➢　評価方法

50 km/h で走行する自車両に対して、ターゲット車両が対向車線を 50 km/h で接近するシナリオを実行し、Radar センサ RV-map 出力を比較した。ターゲット車両のセンサが検知できる相対速度以上の速度の時、実機と同様に速度折り返しゴーストが発生するかどうかを確認した。車両の速度は一定とし、車両は各シミュレータ標準のアセットから色、形状の近いものを選択した。Radar センサは自車両前面に設置し、CarMaker、VRXERIENCE、Prescan では、距離と相対速度の検知範囲が近しくなるようにパラメータを設定、DIVP®ではデフォルトのパラメータを使用した。アセット、センサは“【Radar】検知距離、相対速度、受信強度の確認”で使用したものを使用した。

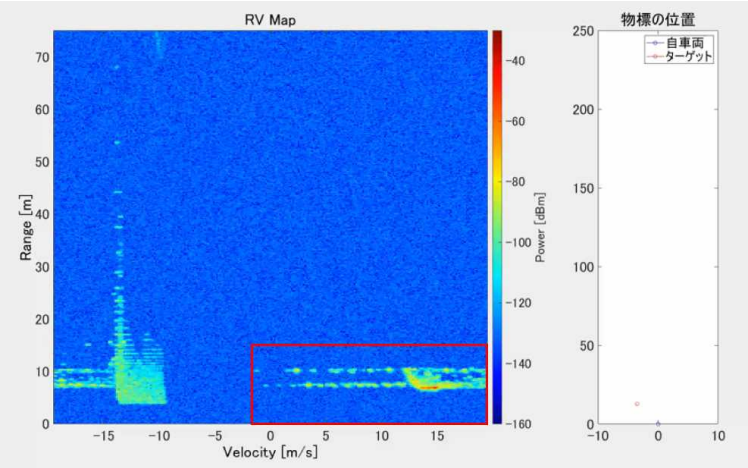


出所：学校法人幾徳学園　神奈川工科大学

Figure 112　走行シナリオ

➢ 結果考察 CarMaker 10.0.1

CarMaker の結果(Figure 113)を見ると、図の赤枠部分が対向車両からの反射であり、速度折り返しゴーストが発生していることが分かる。しかし、対向車両からの反射が速度方向に広すぎるように見える。このことから、Radar センサ原理をモデル化できているが対向車両からの反射の再現に課題があることが確認できた。

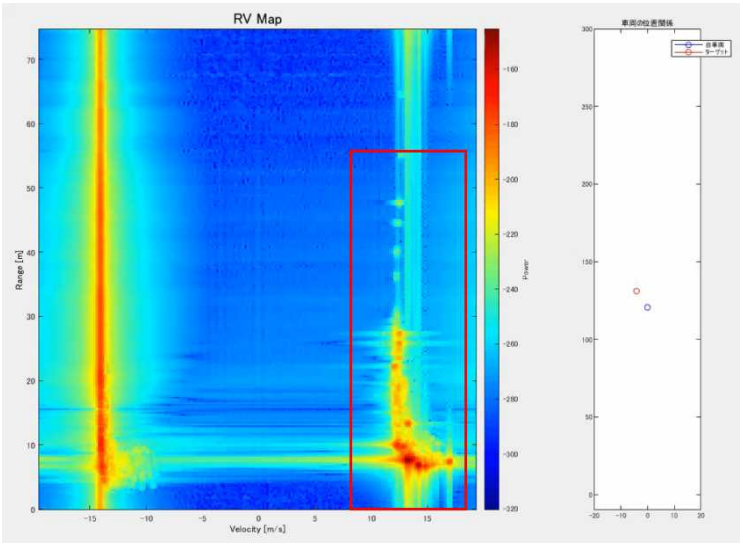


出所:学校法人幾徳学園 神奈川工科大学

Figure 113 RV Map と自車両と先行車両の位置関係

➢ 結果考察 VRXPERIENCE 2021R1

VRXPERIENCE の結果(Figure 114)を見ると、図の赤枠部分が対向車両からの反射であり、速度折り返しゴーストが発生していることが分かる。しかし、対向車両からの反射が距離方向に広すぎるように見える。このことから、Radar センサ原理をモデル化できているが対向車両からの反射の再現に課題があることが確認できた。

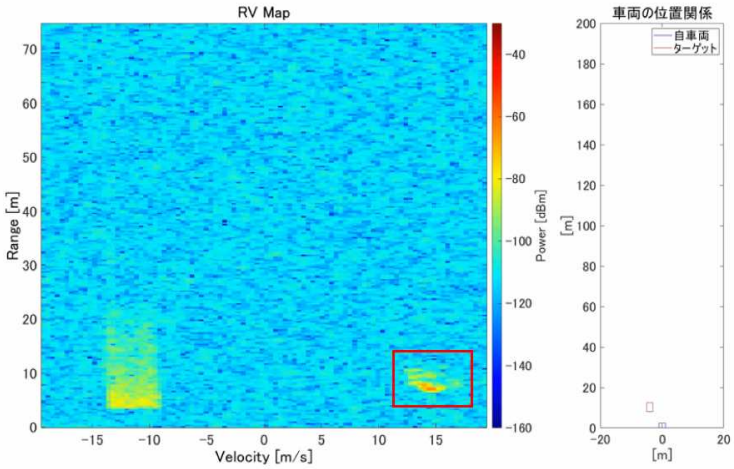


出所:学校法人幾徳学園 神奈川工科大学

Figure 114 RV Map と自車両と先行車両の位置関係

➢ 結果考察 Prescan 2021.1

Prescan の結果(Figure 115)を見ると、図の赤枠部分が対向車両からの反射であり、速度折り返しゴーストが発生していることが分かる。このことから、Radar センサ原理をモデル化できていることが確認できた。

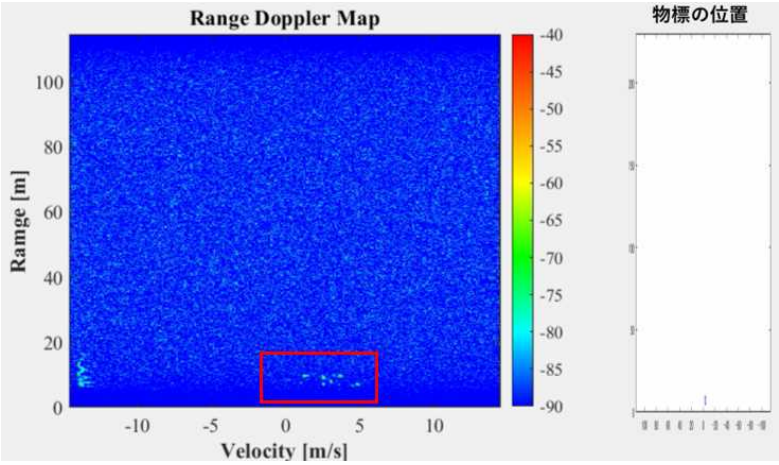


出所：学校法人幾徳学園　神奈川工科大学

Figure 115　RV Map と自車両と先行車両の位置関係

➢　結果考察　DIVP®

DIVP®の結果（Figure 116）を見ると、図の赤枠部分が対向車両からの反射であり、速度折り返しゴーストが発生していることが分かる。このことから、Radar センサ原理をモデル化できていることが確認できた。



出所：学校法人幾徳学園　神奈川工科大学

Figure 116　RV Map と自車両と先行車両の位置関係

➢　考察まとめ

シミュレーション結果より、どの PF のセンサモデルにおいても速度折り返しゴーストを再現しており、Radar センサ原理をモデル化できていることが確認できた。しかし、CarMaker と VRXPERIENCE において、対向車両からの反射の再現に課題があることが確認できた。

- 【LiDAR】アセット反射特性の確認

➢ 評価方法

自車両から 10 m前方の位置に車両を配置し、LiDAR 点群出力を比較した。車両は各シミュレータ標準のアセットから色、形状の近いものを選択した。LiDAR センサは自車両ルーフ上に設置し、CarMaker・VRXPWRIENCE・Prescan での LiDAR センサパラメータは“VLS-128 User Manual Rev.2”を参考にパラメータを設定、DIVP®では V 社 LiDAR モデルを使用した。ターゲットは“【Radar】検知距離、相対速度、受信強度の確認”で使用したものを使用した。

出所：学校法人幾徳学園　神奈川工科大学

Figure 117　走行シナリオ

Table 48　センサパラメータ設定

	CarMaker 10.2.1	VRX 2021R2	Prescan 2021.3
VLS-128ユーザガイドから設定したパラメータ	ビーム波長 ビーム広がり角 ビーム照射角	ビーム波長 ビーム広がり角 ビーム照射角 ビーム照射時刻	ビーム波長 ビーム広がり角 ビーム幅、高さ ビーム照射角 ビーム照射時刻
その他共通にした項目	センサ回転速度 照射電力 受信素子面積 最大検知距離 最大反射回数		

出所：学校法人幾徳学園　神奈川工科大学

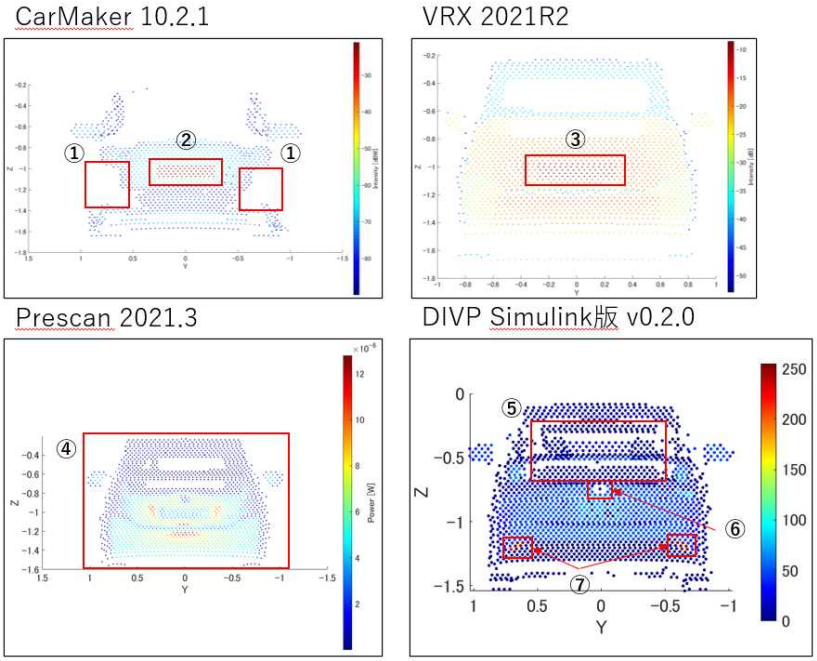
➢ 結果考察

各 PF でのターゲットが後ろ向きの時の点群出力結果を Figure 118 に示す。CarMaker と VRX では、ナンバープレートに高い反射率が設定されており、角度特性が考慮されているかどうかを確認するため受信強度の対数をとった値でグラフ化している。また、各シミュレータごとに受信強度の単位が異なっているため、レンジが異なったグラフとなっている。

Figure 118 よりどの PF においてもアセットの角度特性を考慮できていることがわかる。また、サードミラー部などに鏡の特性が設定されていないように見える。それぞれの結果について個別にみていくと、CarMaker では、低迎角部分の点群がない(①)、ナンバープレートに高い反射率が設定されている(②)結果となった。VRXPERIENCE でもナンバープレートに高い反射率が設定されている(③)結果となった。Prescan では、反射板、ミラー、内装の設定はされていないような結果(④)となった。DIVP®では、内装部分からの反射がみられ(⑤)、エンブレム付近からの点群が 1 つしかなく(⑥)、再帰性反射の強い反射板が設定されている(⑦)結果となった。この結果より、DIVP®での結果のみ反射板、内装が設定されていることが確認できた為、DIVP®のアセットの再現性が高いと考えられる。

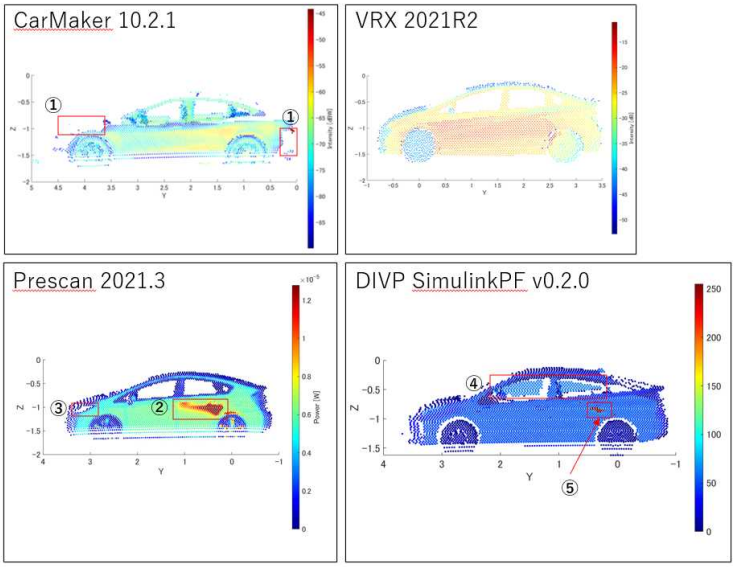
次に各 PF でのターゲットが左向きの時の点群出力結果を Figure 119 に示す。この図においても Figure 118 と同様の理由でグラフのカラーマップのレンジが異なっている。また、VRXPERIENCE では、車両の原点が前輪

車軸中心に設定されており、他 PF と比べて 2.8 m 遠い位置での結果となっている。それぞれの結果について個別にみていくと、CarMaker では、後ろ向きの時と同様に低仰角部分の点群がない(①)結果となった。Prescan では車体の一部に強い反射強度の点群が見られ(②)、ヘッドライト部分の点群が見られない(③)結果となった。DIVP®では、ターゲット車両右側のサイドウインドウから反射した点群が見られ(④)、車両の一部分から反射した点群の受信強度が、それらの周りの点群の受信強度と比べて明らかに高い(⑤)結果となった。DIVP®にてサイドウインドウからの反射点群が見えており、受信強度が明らかに高い部分があることから、空間描画とセンサモデルの設定の確認が必要であることが分かった。



出所:学校法人幾徳学園　神奈川工科大学

Figure 118　点群出力(後ろ向き)



出所:学校法人幾徳学園　神奈川工科大学

Figure 119　点群出力(左向き)

➢ シナリオジェネレータベンチマーク結果

シナリオジェネレータについて UI の扱い易さ、機能についてのベンチマークを行った。評価軸として「画面構成」、「シナリオの作り易さ」、「シナリオ再利用性」の 3 つを設定した。「シナリオの作り易さ」の評価では、NCAP 歩行者飛び出しシナリオの新規作成にかかる時間から評価を行い、一般交通環境の作成についての評価は本評価では行っていない。

ベンチマーク結果を Table 49 に示す。ベンチマークより UI の扱い易さ、シナリオ作成効率は他の既存シミュレーション PF と同等であることが確認できた。

Table 49 シナリオジェネレータベンチマーク結果

	CarMaker (10.1)	VRXPERIENCE (2021R2)	Prescan (2021.2)	GARDEN (acacia)	DIVP®
画面構成 (各種設定のわかりやすさ、使い易さ)	△ 走行軌跡と走行速度の設定が別のウィンドウ	○ 設定が 1 つのウィンドウに集約	○ 設定が 1 つのウィンドウに集約	△ 複数のサブツールを行き来する必要がある	○ 設定が 1 つのウィンドウに集約
シナリオの作り易さ (NCAP 歩行者飛び出しシナリオの新規作成所要時間)	○ 30 分～1 時間	× 1～2 時間 ツールごとに座標軸が異なる	○ 30 分～1 時間	× 現状は歩行者を配置不可	○ 30 分～1 時間
シナリオ再利用性 (設定・パラメータ等の部品化、外部ファイル保存等)	○ Map 車両設定 センサ個別パラメータ	○ Map センサ個別パラメータ	○ Map センサ個別パラメータ	△ Map Waypoint センサ個別パラメータ設定不可	○ Map 走行軌跡 車両設定

出所:学校法人幾徳学園 神奈川工科大学

➢ データベースベンチマーク結果

走行環境データベースの充実度、アセットの充実度についてのベンチマーク結果を Table 50 に示す。ベンチマークよりアセットの充実度は他の既存シミュレーション PF に劣後していることが分かった。

Table 50 データベースベンチマーク結果

Layer	アセット項目	CarMaker (10.1)	VRXPERIENCE (2021R2)	Prescan (2021.2)	DIVP®
1	Map	31	12	0	12
2	道路標識	8 か国	6 か国	4 か国	1 か国
	信号	16	1	36	1
3	静止物標 (建物など)	583(※1)	76	117	13
4	移動物標 (車、歩行者など)	536(※2)	63	83	17
5	天気	3 (晴れ、曇り、雨)	1 (晴れ)	2 (晴れ、雨)	3 (晴れ、曇り、雨)

※1:建物(大、中、小)や色違い、ポール/バス停/ゴミ袋/段ボール等小物含む

※2:車両メーカー複数(色違い含み)が 400 程度、歩行者(大人、子供、服違い)

出所:学校法人幾徳学園 神奈川工科大学

➢ 接続性ベンチマーク結果

接続性についてのベンチマーク結果を Table 51 に示す。ベンチマークにより、一般シナリオ(ジオメトリ)との接続性や真値出力に課題があるが、反射物性定義との接続性は優位性があることが分かった。センシング弱点シナリオ DB との接続性を確立することで、さらなる差別化を推進することができることが分かった。

Table 51 接続性ベンチマーク結果

	CarMaker (10.1)	VRXPERIENCE (2021R2)	Prescan (2021.2)	DIVP®		
				FY20	FY21	FY22
一般シナリオとの接続 (ジオメトリ、交通流等)	○	-	△	×	△	○
物性データファイルとの接続	×	△	×	○	○	○
センシング弱点シナリオ DB との接続	×	×	×	-	△ DB 構築着手	○

出所:学校法人幾徳学園 神奈川工科大学

➢ 国際標準化の対応状況ベンチマーク結果

国際標準規格などへの対応状況についてのベンチマーク結果を Table 52 に示す。ベンチマークより OpenX への対応については、他の既存シミュレーション PF 含め、徐々に対応を推進している状況であることが分かった。

Table 52 国際標準化の対応状況ベンチマーク結果

	CarMaker (10.1)	VRXPERIENCE (2021R2)	Prescan (2021.2)	GARDEN (acacia)	DIVP®		
					FY20	FY21	FY22
Open SCENARIO	○	-	○	×	×	△	○
Open DRIVE	○	○	○	△ エクスポートのみ	○	○	○
Open CRG	○	○	×	×	×	×	○
3D モデル	OBJ DAE KNZ	FBX OBJ DAE 3DS DXF	DAE IVE OSG OSGB OSGT	OBJ	FBX	FBX	FBX

出所:学校法人幾徳学園 神奈川工科大学

➢ 事業化ベンチマーク結果

ユーザの各種ユースケースへの対応状況についてのベンチマーク結果を Table 53 に示す。ベンチマークより、が MATLAB/Simulink、FMI/FMU 対応等でユーザモデルとの接続性が強化できると思われる。ユーザの認識、Fusion モデル開発でニーズのある真値(正解値)も今後強化していくことを検討する必要性があることが分かった。

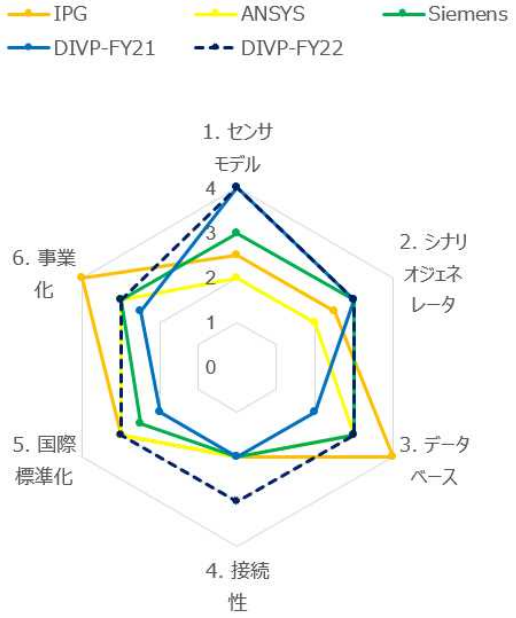
Table 53 事業化ベンチマーク結果

	CarMaker (10.1)	VRXPERIENCE (2021R2)	Prescan (2021.2)	DIVP®		
				FY20	FY21	FY22
真値出力 (ジオメトリ)	○	-	△	×	△	○
FMI/FMU (ユーザモデル接続)	○	○	○	×	○	○
MATLAB/Simulink (ユーザ開発環境)	○ 2018b から 2020b	○	○ 2015b から 2019b	×	○	○
HILS	○	△	○	△	△	△

出所:学校法人幾徳学園 神奈川工科大学

➢ 既存センサシミュレーションツールのベンチマークまとめ

既存センサシミュレーションツールのベンチマークを行い、精緻なセンサモデルは DIVP®に優位性があることが確認できた。一方で、データベース、接続性、国際標準化、事業化については、欧州老舗ツールに劣後している部分があり、今後も対策を進めながら、リカバリしていく必要性があることが分かった。



出所：学校法人幾徳学園　神奈川工科大学

Figure 120　ベンチマーク結果まとめ

Table 54　DIVP®の現状と Next step の考察

	現状	Next step
センサモデル	実験計測に基づき、実環境との一致性が検証されている	センサ評価性能に立脚した安全性評価体系化を目指す
シナリオジェネレータ	UI の扱い易さ、シナリオ作成効率は競合同様	客先ニーズに基づく使い勝手向上を図る
データベース	アセット数、一般シナリオ DB について競合に劣後と想定	真値 Sim.接続でユーザシナリオ DB の活用強化、アセット継続増強
接続性	一般シナリオ(ジオメトリ、交通流等)との接続性課題は、標準 IF に準拠し対応済み	センシング弱点シナリオ DB との接続性を確立し、さらなる差別化を推進する
国際標準化	日独 VIVID が進展し、ASAM OpenX(シナリオ)/OSI(センサ)へ DIVP®成果を反映中	DIVP®は、SAKURA プロジェクトとの連携により対応を加速する
事業化	後発のためユーザ利用実績が不足	ユーザの現在のニーズのある真値 Sim.も強化(ツールチェーンの接続性強化での拡張も)

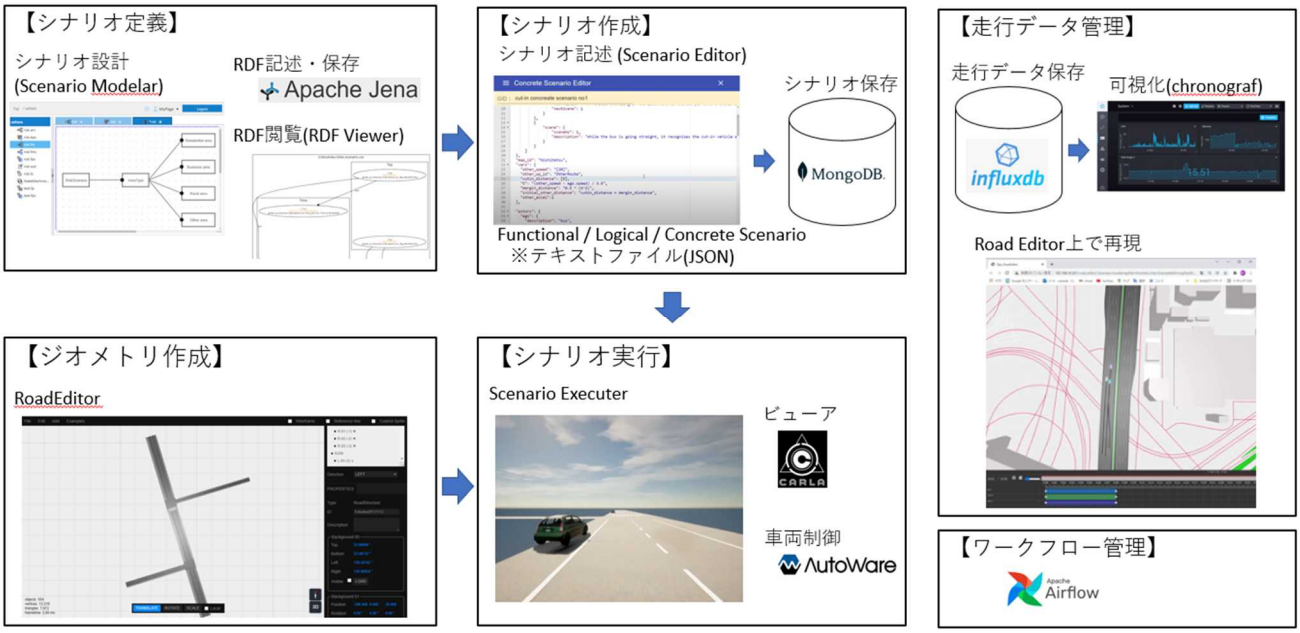
出所：学校法人幾徳学園　神奈川工科大学

■②-2:シナリオデータベースのベンチマーク結果

オープンソースのシミュレーション PF である GARDEN acacia に関して調査を行った結果を以下に記す。

GARDEN はシミュレーションを実行するためのオープンソースソフトウェアの集合体に、一部独自のソフトウェアを追加したものである。以下の 6 機能に大別される。

- シナリオ定義
- シナリオ作成
- ジオメトリ作成
- シナリオ実行
- 走行データ管理
- ワークフロー管理



出所:学校法人幾徳学園　神奈川工科大学

Figure 121　GARDEN 概要

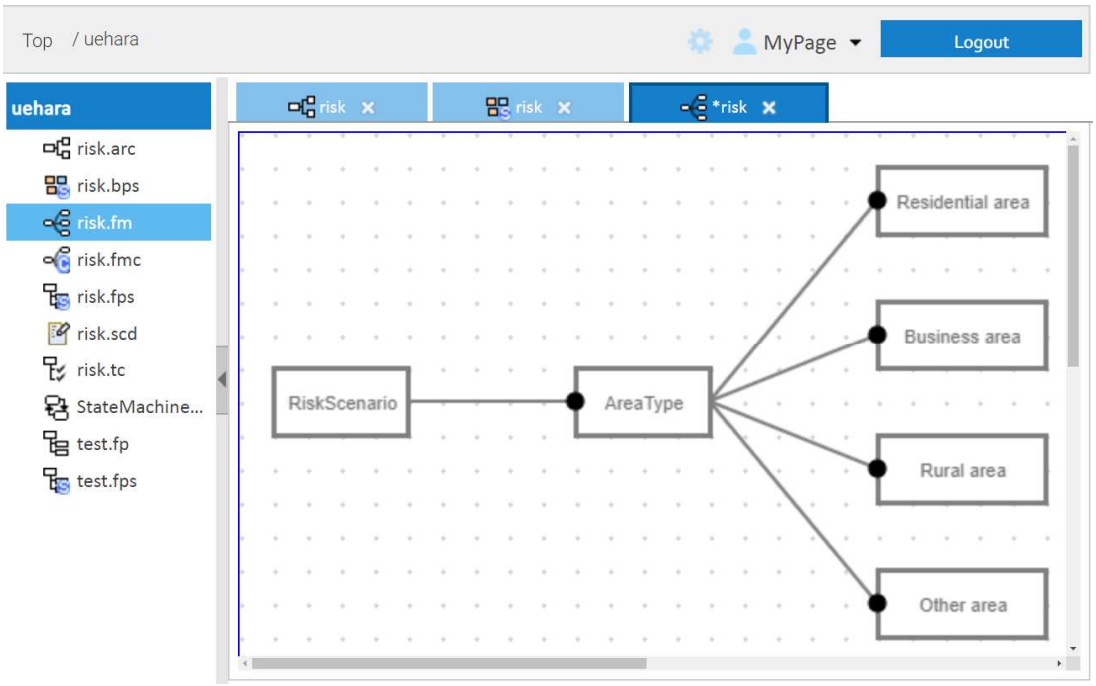
以下に各機能別に調査結果を記す。

1)シナリオ定義

シナリオ項目を定義する機能である。以下のツールが利用できる。

➢ Scenario Modeler

GARDEN 独自のツールであり、Feature Model 等に基づいてシナリオ項目を定義できる。



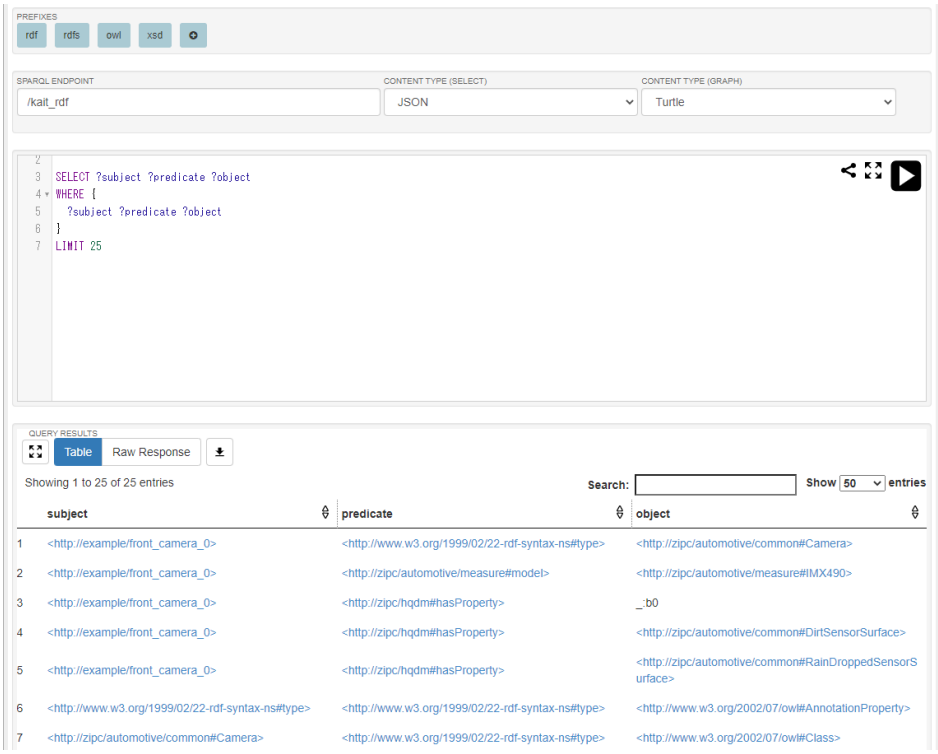
出所:学校法人幾徳学園　神奈川工科大学

Figure 122　Scenario Modeler

- Apache Jena Fuseki

GARDEN はオープンソースの Apache Jena Fuseki を内包しており、RDF 定義と保存および検索が行える。

Apache Jena Fuseki ： https://jena.apache.org/documentation/fuseki2/

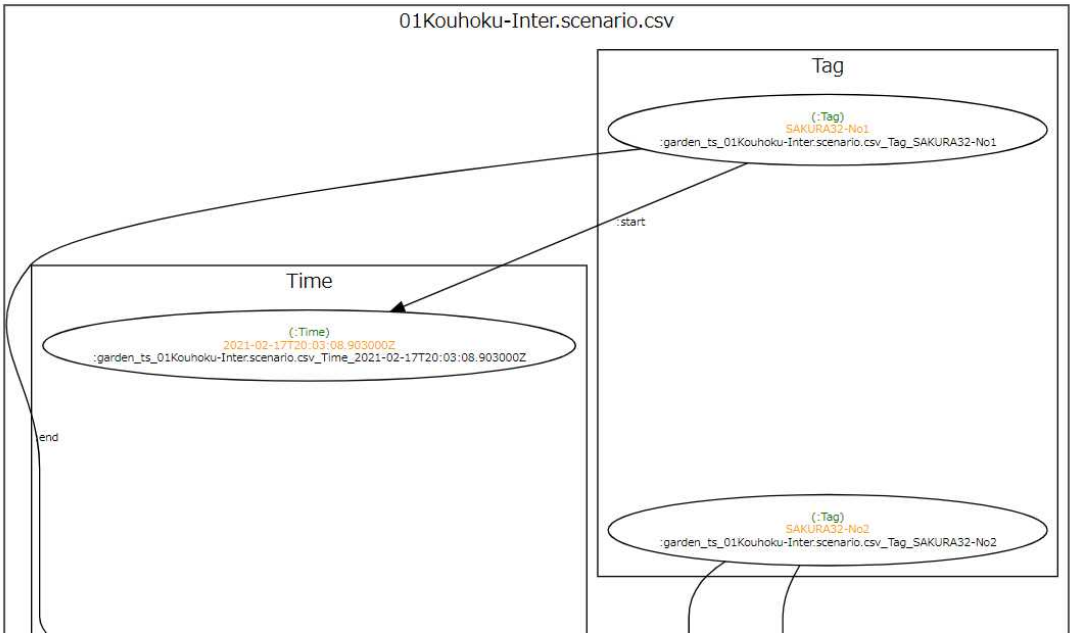


出所:学校法人幾徳学園　神奈川工科大学

Figure 123　Apache Jena Fuseki

➢ RDF Viewer

GARDEN 独自のツールであり、RDF 定義を視覚化できる。



出所：学校法人幾徳学園　神奈川工科大学

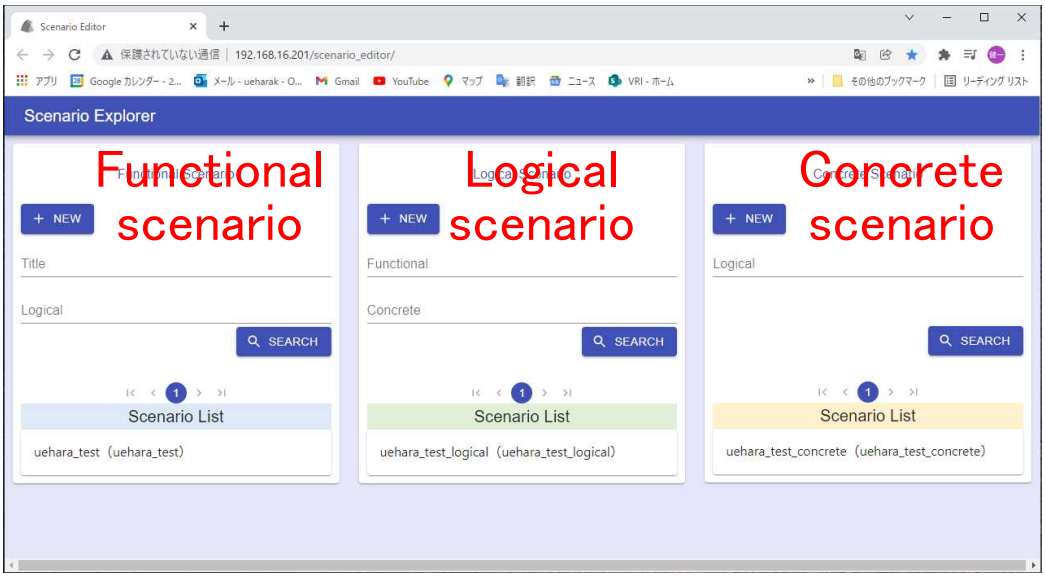
Figure 124　RDF Viewer

2）シナリオ作成

シナリオを作成する機能である。以下のツールが利用できる。

➢ Scenario Editor

GARDEN 独自のツールであり、Functional scenario、Logical scenario、Concrete scenario を紐づけて作成、管理できる。



出所：学校法人幾徳学園　神奈川工科大学

Figure 125　Scenario Editor シナリオ管理画面

各シナリオの記述はテキストベースで行う。フォーマットは GARDEN 独自の JSON フォーマットとなっている。作成したシナリオはオープンソースの MongoDB に保存される。

MongoDB ： https://www.mongodb.com/

出所：学校法人幾徳学園　神奈川工科大学

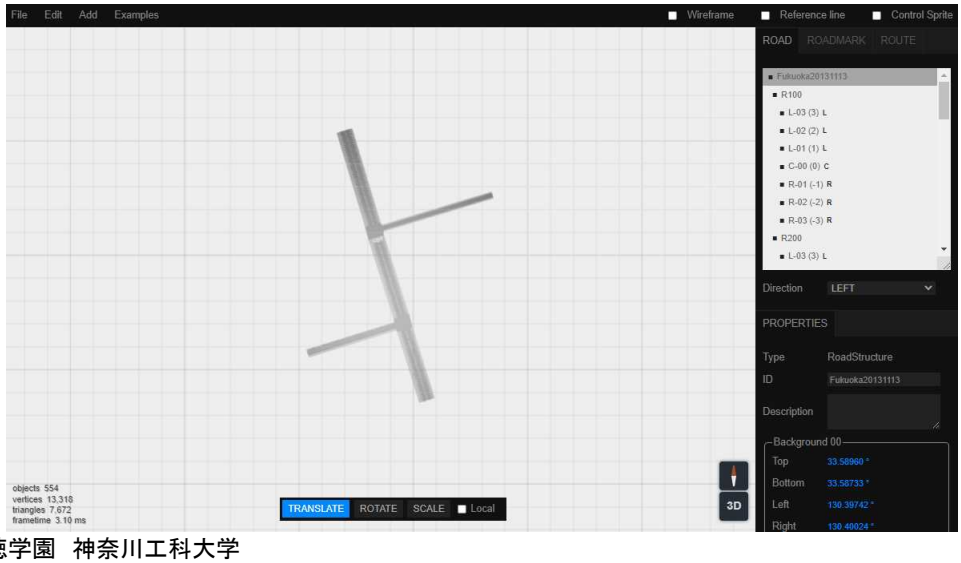
Figure 126　Scenario Editor シナリオ編集画面

3）ジオメトリ作成

主に道路構造をジオメトリとして作成する機能である。以下のツールが利用できる。

- Road Editor

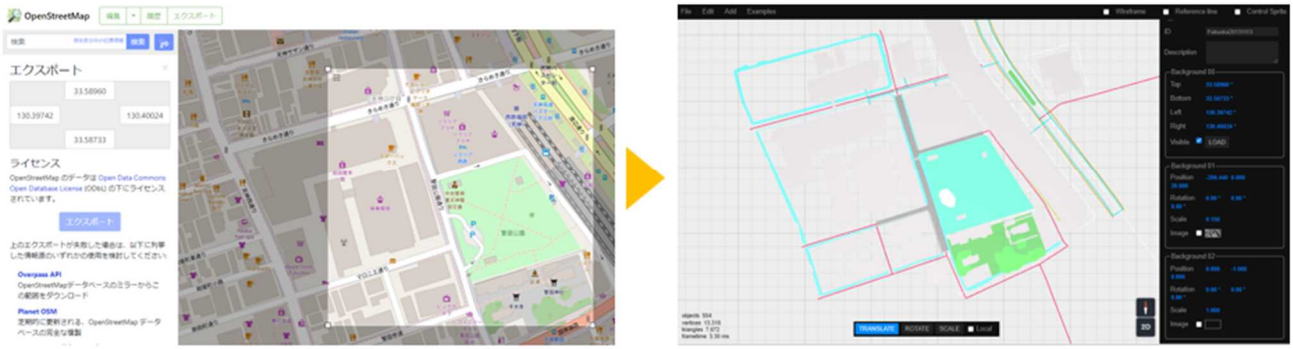
GARDEN 独自のツールであり、道路構造をジオメトリとして作成するツールである。道路、交差点等の作成や経路（Waypoint）の定義が行える。建物や信号といったオブジェクトには対応していない。作成したジオメトリは独自フォーマットで保存されるが、別途 GARDEN 独自変換ツール（OpenDriveConverter）を使用することで OpenDrive1.6 形式に変換することができる。また、OBJ 形式のインポート／エクスポート機能を有する。



出所：学校法人幾徳学園　神奈川工科大学

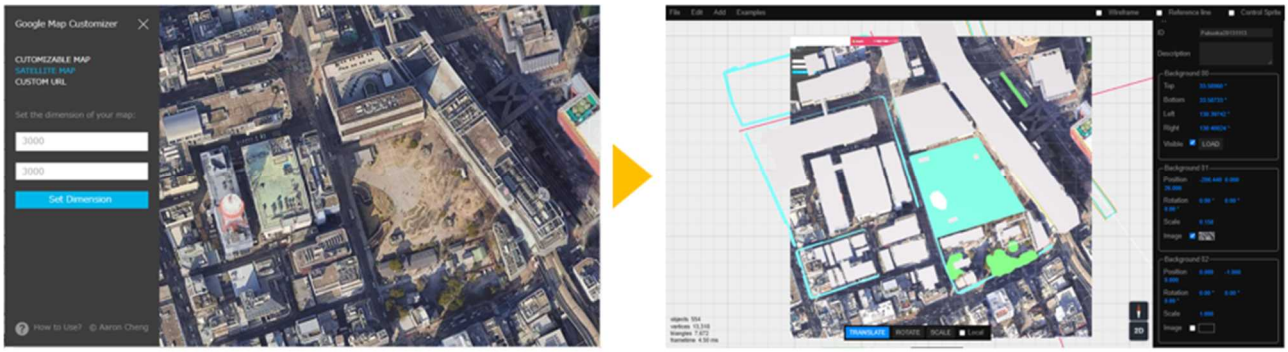
Figure 127　Road Editor

Open Street Map の地図情報や Google Map の衛星画像をインポートして Road Editor 編集画面の背景として表示し、道路構造作成時の補助とする機能を有する（背景を参考に道路を手動で作成する必要がある）。



出所：学校法人幾徳学園　神奈川工科大学

Figure 128　Open Street Map を背景表示



出所：学校法人幾徳学園　神奈川工科大学

Figure 129　Google Map を背景表示

4）シナリオ実行

GARDEN で作成したシナリオを実行する機能である。以下のツールが利用できる。

- Scenario Executor

Scenario Editor で作成したシナリオを Road Editor で作成したジオメトリ上で実行するツールである。GARDEN にはオープンソースのシミュレータである Carla（0.9.11）が内包されており、シナリオ実行は Carla 上で行われる。車両制御にはオープンソースの Autoware（1.14.0）を使用している。ただし、自己位置推定は Carla の Odometry センサのみを使用した簡易的なものとなっている。GARDEN で作成したシナリオとジオメトリを Carla と Autoware で実行できるようにするためのプログラムが GARDEN 独自部分として追加されている。

Carla ： https://carla.org/

Autoware ： https://www.autoware.org/autoware

GARDEN で作成したシナリオとジオメトリを Scenario Executor 上で実行した例を次図に示す。

出所：学校法人幾徳学園　神奈川工科大学

Figure 130　Scenario Executor (Carla)

構造物等を追加するためには、Carla 上で直接追加する必要がある。

出所：学校法人幾徳学園　神奈川工科大学

Figure 131　Carla で構造物等を追加した例（GARDEN 付属のサンプル）

5)走行データ管理

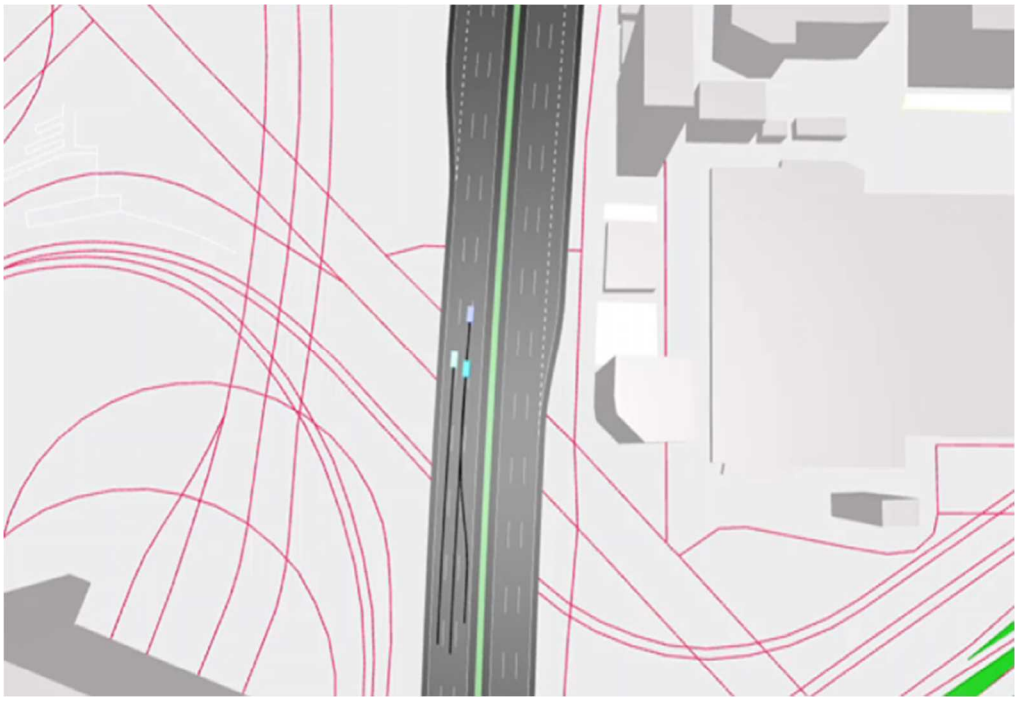
実車の走行データを管理する機能である。以下のツールが利用できる。

- influxdb

influxdb はオープンソースの時系列データベースである。GARDEN はこの influxdb を内包しており、走行データを influxdb 上で管理するものとしている。

Influxdb ： https://www.influxdata.com/

なお、走行データは Road Editor 上で再現表示することができる。



出所:学校法人幾徳学園　神奈川工科大学

Figure 132　走行データの再現表示

- Chronograf

Chronograf は influxdb に蓄積されたデータを可視化するためのオープンソースのツールである。GARDEN はこの Chronograf を内包しており、influxdb 上の走行データをグラフ等に可視化することができる。

Chronograf ： https://www.influxdata.com/time-series-platform/chronograf/

出所：学校法人幾徳学園　神奈川工科大学

Figure 133　Chronograf

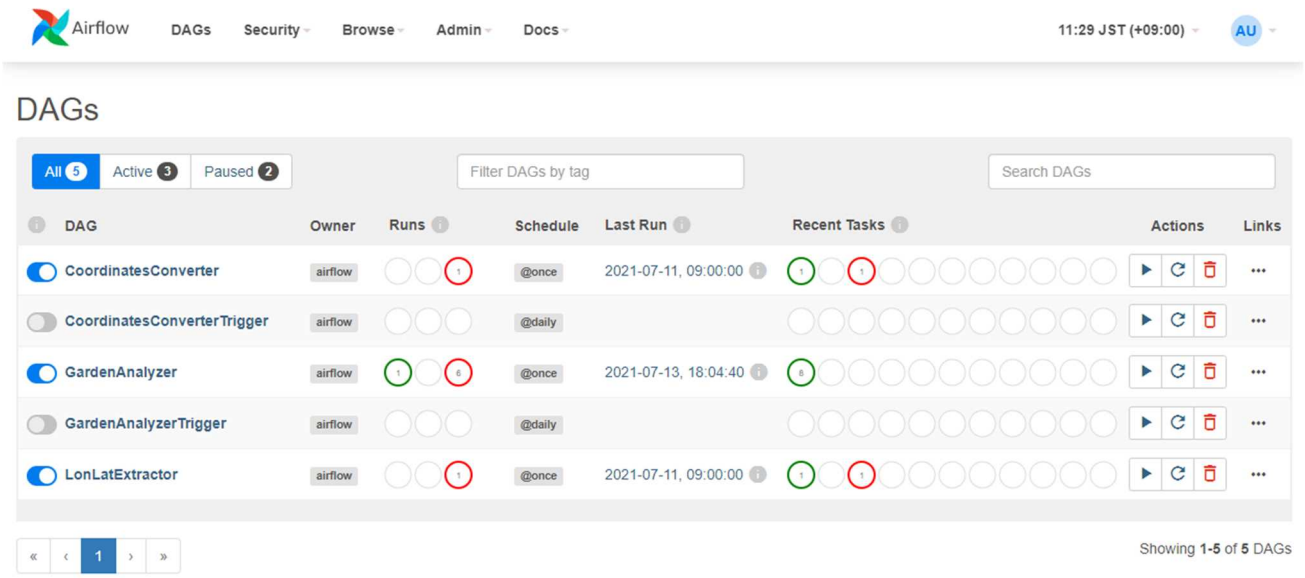
6）ワークフロー管理

走行データから該当シーンを抽出するといった、ワークフローを管理する機能である。以下のツールが利用できる。

➢ Apache Airflow

Apache Airflow はオープンソースのワークフロー管理ツールである。シェルや Python プログラム等の実行制御やスケジューリングが行える。GARDEN は Apache Airflow を内包しており、前述の influxdb と接続して、走行データを解析し、該当シーンを抽出するといったことに利用できる。

Apache Airflow ： https://airflow.apache.org/



出所：学校法人幾徳学園　神奈川工科大学

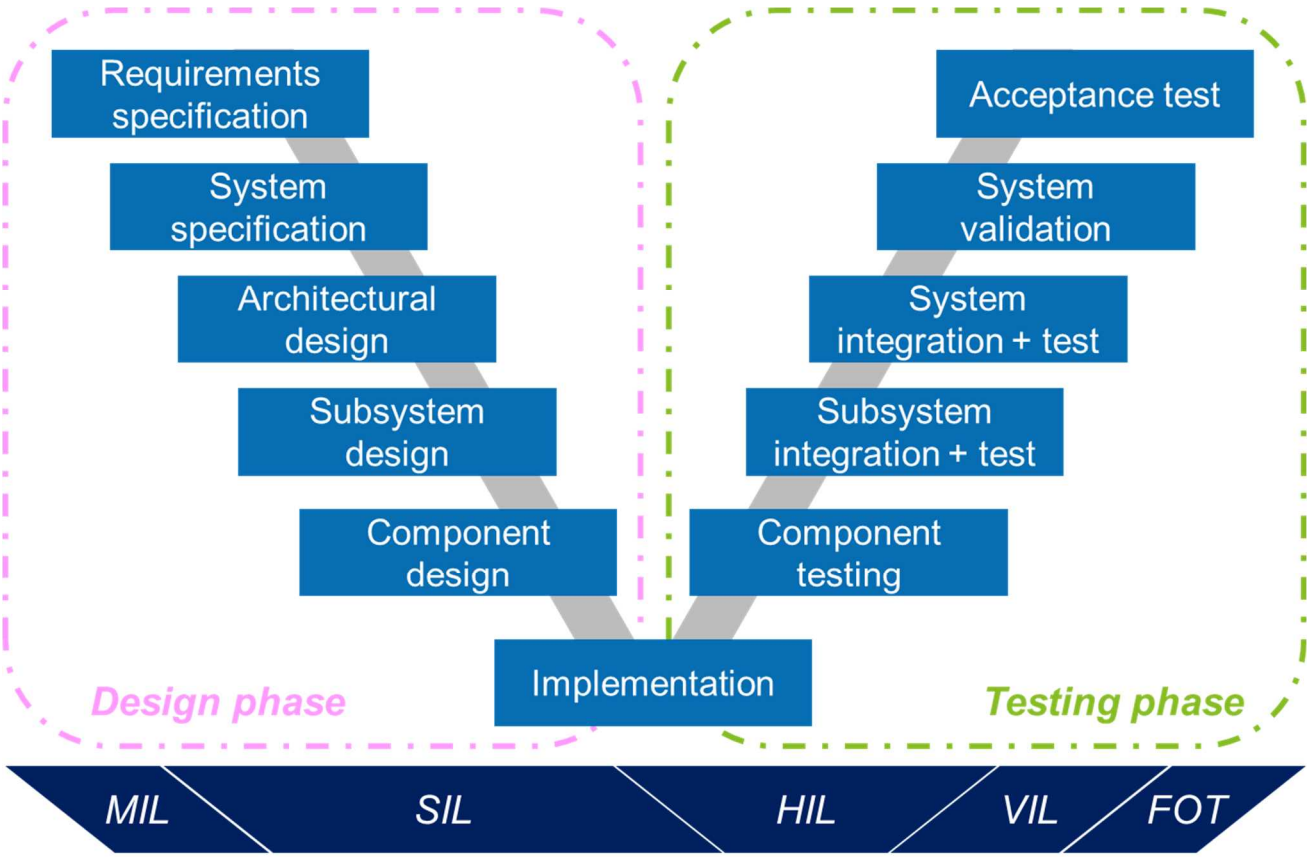
Figure 134　Apache Airflow

■②-3:AD/ADAS アプリケーションの評価と検証における、ラボ環境のベンチマーク結果

自動車開発のプロセスモデルとして広く用いられている V 字ダイヤグラムを下図に示す。この V 字ダイヤグラムは設計フェーズ（V 字ダイヤグラムの左半分）と評価フェーズ（V 字ダイヤグラムの右半分）に大別される。

設計フェーズでは、ユーザからの要求（Requirements specification）を考慮して車両全体の仕様（System specification）を検討し、次に各システムの仕様を設計（Architectural design）し、システムの構成要素であるサブシステムの仕様（Subsystem design）、コンポーネントの仕様（Component design）という形で、全体から個別の構成要素にブレークダウンしながら設計していく。

一方、評価フェーズではその逆となり、設計に基づき個別のコンポーネントから評価（Component testing）を行い、条件をクリアすれば部品を組み上げてサブシステム評価（Subsystem integration + test）を行い、さらに条件をクリアすればシステム評価（System integration + test）という形で最終的に車両としてのテスト（System validation、Acceptance test）へ進んでいく。



出所：学校法人幾徳学園　神奈川工科大学

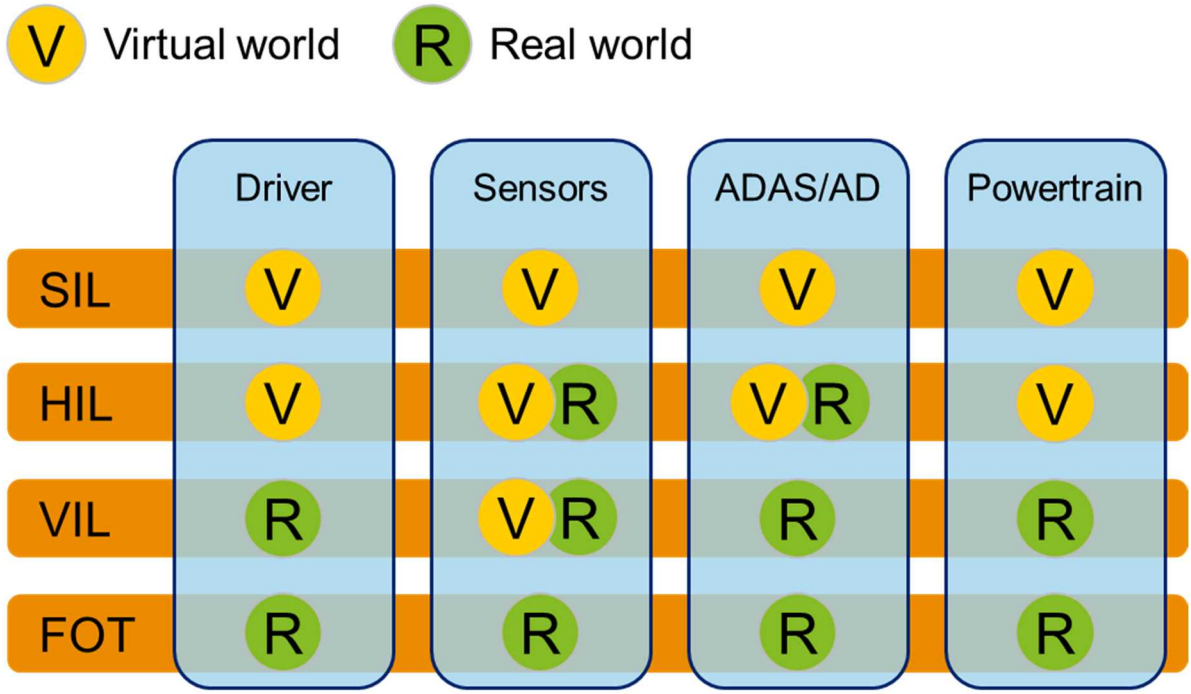
Figure 135　自動車開発の V 字プロセス

従来は実際にプロトタイプを製作し、設計と評価のループを回していたが、近年は CAE（Computer Aided Engineering）を始めとするシミュレーション技術の進歩によりループの一部あるいは全部をシミュレーションで代替する所謂、X-in-the-Loop(XIL)という手法、日本で言うところの MBD（モデルベース開発）が進展している。X-in-the-Loop の”X”は、その評価対象（制御モデルやソフトウェア、ハードウェア等）によって呼び方が変わる。

例えば、制御モデルを含めたすべてをシミュレーションする場合 Model-in-the-Loop（MIL）、実際のソフトウェアをシミュレーションループに取り込む場合 Software-in-the-Loop(SIL)、ソフトウェアだけでなく実物の ECU ハー

ドをシミュレーションループに取り込む場合 Hardware-in-the-Loop(HIL)、車両全体をシミュレーションループに取り込む場合 Vehicle-in-the-Loop method(VIL)となる。

XIL をドライバー、センサ、ADAS/AD システム、パワートレインシステムの 4 つの観点で、仮想/実環境に分類した結果を下図に示す。SIL はドライバーからパワートレインシステムまですべて仮想環境である。HIL はセンサもしくは ADAS/AD システムが実環境で、ドライバーとパワートレインシステムは仮想環境である。VIL はセンサの一部が仮想環境の場合があるが、ドライバーや ADAS/AD システム、パワートレインシステムが実環境である。FOT（Field Operational Test）はドライバーからパワートレインシステムまですべて実環境である。



出所：学校法人幾徳学園　神奈川工科大学、エイヴィエルジャパン（株）

Figure 136 XIL の仮想/実環境の分類

自動運転の安全性評価という観点では、XIL を開発フェーズや用途に応じて使い分けることが重要である。例えば、前述の V 字ダイヤグラムの設計フェーズでは MIL や SIL により各種実機（ハードウェア）がなくても評価が可能で、所謂フロントローディングが可能となる。一方、V 字ダイヤグラムの評価フェーズでは HIL や VIL により各種実機とシミュレーションを織り交ぜた評価が可能で、膨大で複雑な走行シナリオを用いた実機評価が可能となる。

・本ベンチマークの位置づけ

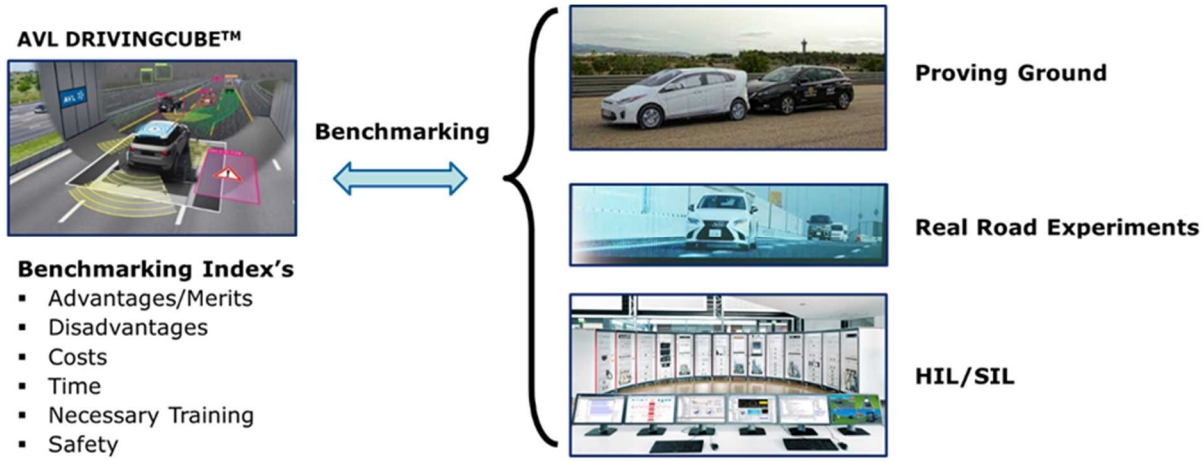
DIVP®は、カメラ、LiDAR、Radar の「センサモデル」を中心に、これに入力される外界を模した「環境モデル」、センサ以降のセンサフュージョン等の自動運転機能を模した「自動運転モデル」から構成され、前述の XIL の区分に当てはめると SIL に相当する。このように自動運転における「センサモデル」は外部と接続する必要があり、センシングに関係する XIL 技術という観点で HIL や VIL のベンチマークを実施することとした。

・本ベンチマークの目的

本ベンチマークの目的は大きく 2 点ある。1 点目は SIL、HIL、VIL、FOT の長所・短所を明確にすること、2 点目はセンシング評価における HIL や VIL の有効性を検証することである。

・本ベンチマークの概要

AD/ADAS アプリケーションの評価と検証の為、試験室環境として AVL DRIVINGCUBE™の技術的ベンチマークを実施した。また、実際の走行テストと比較し、効率化・最適化が可能となるかを検討した。



出所：学校法人幾徳学園　神奈川工科大学、エイヴィエルジャパン（株）

Figure 137　AVL DRIVINGCUBE™の技術的ベンチマーク

【取り組み概要】

A.試験シナリオ、ケースの定義

テストシナリオと、実走行および仮想走行試験で実行されるテストケースとして、下記テストケースを実施。

1）車両力学を検証するための参照となる走行　例：円形走行、スラローム

2）センサモデルを検証するための基準となる走行　例：ハンドリングコース

3）標準的な ADAS/AD 試験　例：NCAP 車対歩行者試験

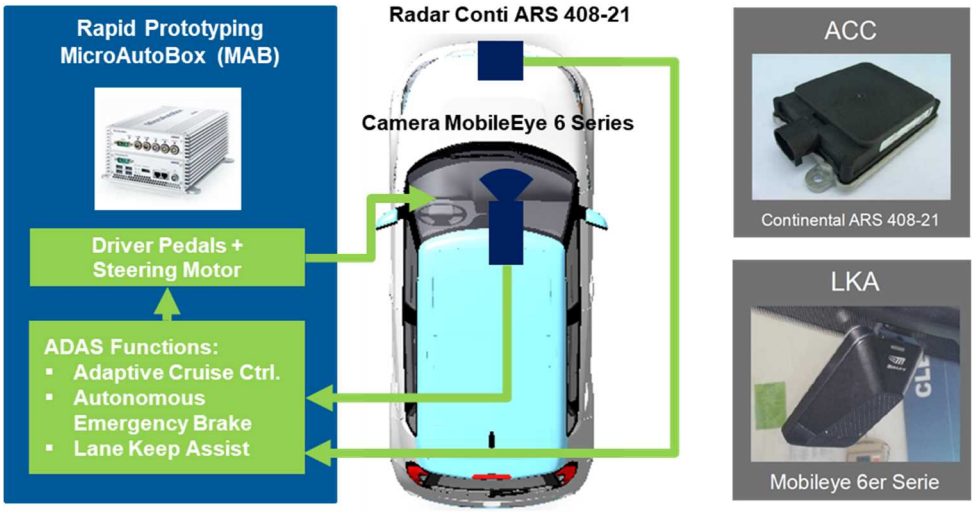
4）高速道路シナリオ　例：追従車両、追い越し車両、カットイン車両

5）市街地シナリオ　例：交差点、道路接合部

B.実走行試験の実施

試験車はベルリン工科大学が所有する KIA Soul EV の改造車である。

本車両には実走行試験で完全な自動運転を行うために、センサ・アクチュエータ・インターフェース・制御装置が搭載されている。



出所：学校法人幾徳学園　神奈川工科大学、エイヴィエルジャパン（株）

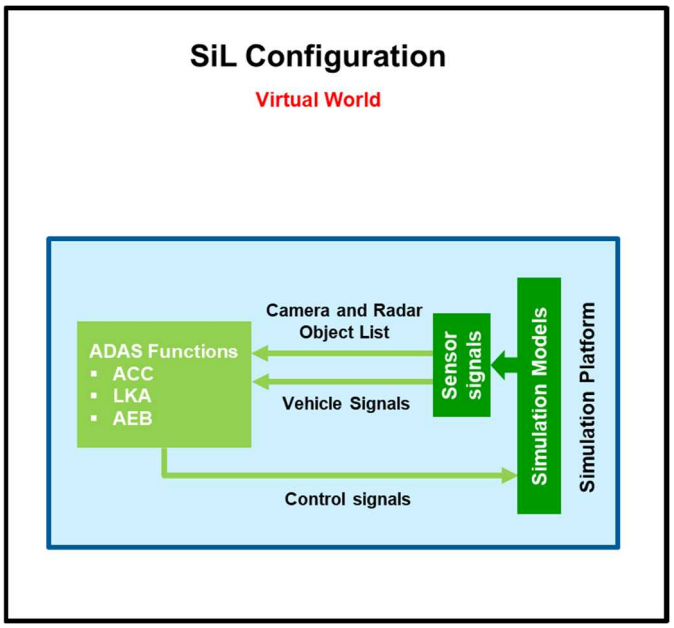
Figure 138　試験車 KIA Soul EV

出所：学校法人幾徳学園　神奈川工科大学、エイヴィエルジャパン（株）

Figure 139　試験車 KIA Soul EV 装備

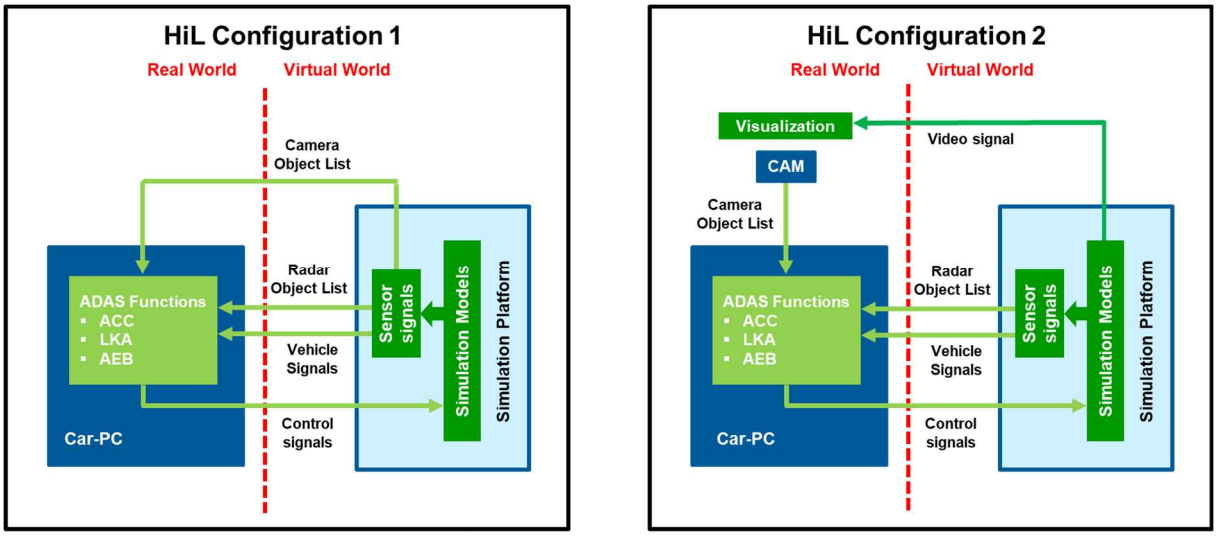
C.SiL と HiL システムにおける仮想走行実施

定義されたすべてのシナリオとテストケースを、ベルリン工科大学が有するテストシステム上で実行した。また、走行試験では利用した車両モデルの検証を実施。Figure 140 に示す SiL（リアルタイムよりも高速）と Figure 141 に示す HiL（リアルタイム）の 2 つの構成で試験を行った。HiL システムはカメラセンサに関して、センサシミュレーションとセンサスティミュレーションの 2 つの手法で構成される。



出所：学校法人幾徳学園　神奈川工科大学、エイヴィエルジャパン（株）

Figure 140　センサ SIM の SiL レイアウト



出所：学校法人幾徳学園　神奈川工科大学、エイヴィエルジャパン（株）

Figure 141 センサシミュレーションの HiL(左)とセンサスティミュレーションの HiL(右)

D. DRIVINGUCBE 上での仮想運転試験の実施（Vehicle-in-the-Loop）

ベルリン工科大学で行われた目標は以下となる。

1）DRIVINGCUBE で使用するための車両モデルのパラメータ化のプロセスの説明

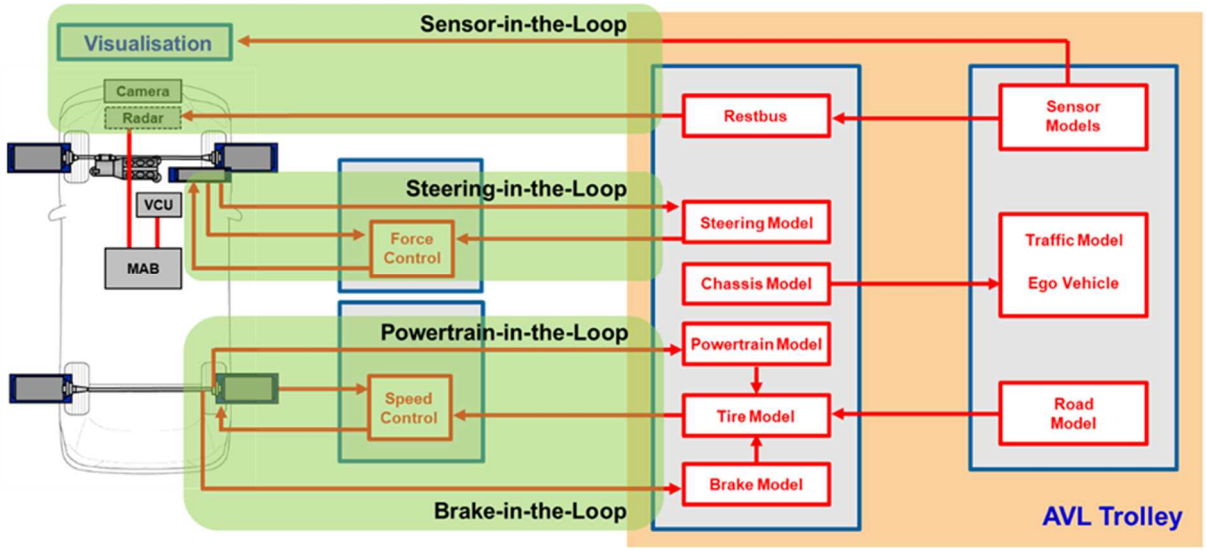
2）定義されたシナリオとテストケースを DRIVINGCUBE 上で実行

3）DRIVINGCUBE 上での実試験と仮想試験の相関性の分析

4）DRIVINGCUBE 上での仮想試験再現性の分析

出所：学校法人幾徳学園　神奈川工科大学、エイヴィエルジャパン（株）

Figure 142　DRIVINGCUBE 上での仮想運転試験の概略



出所：学校法人幾徳学園　神奈川工科大学、エイヴィエルジャパン（株）

Figure 143　DRIVINGCUBE の X-in-the-Loop

E. AEB システム評価のための標準的な AD/ADAS 試験（一例）

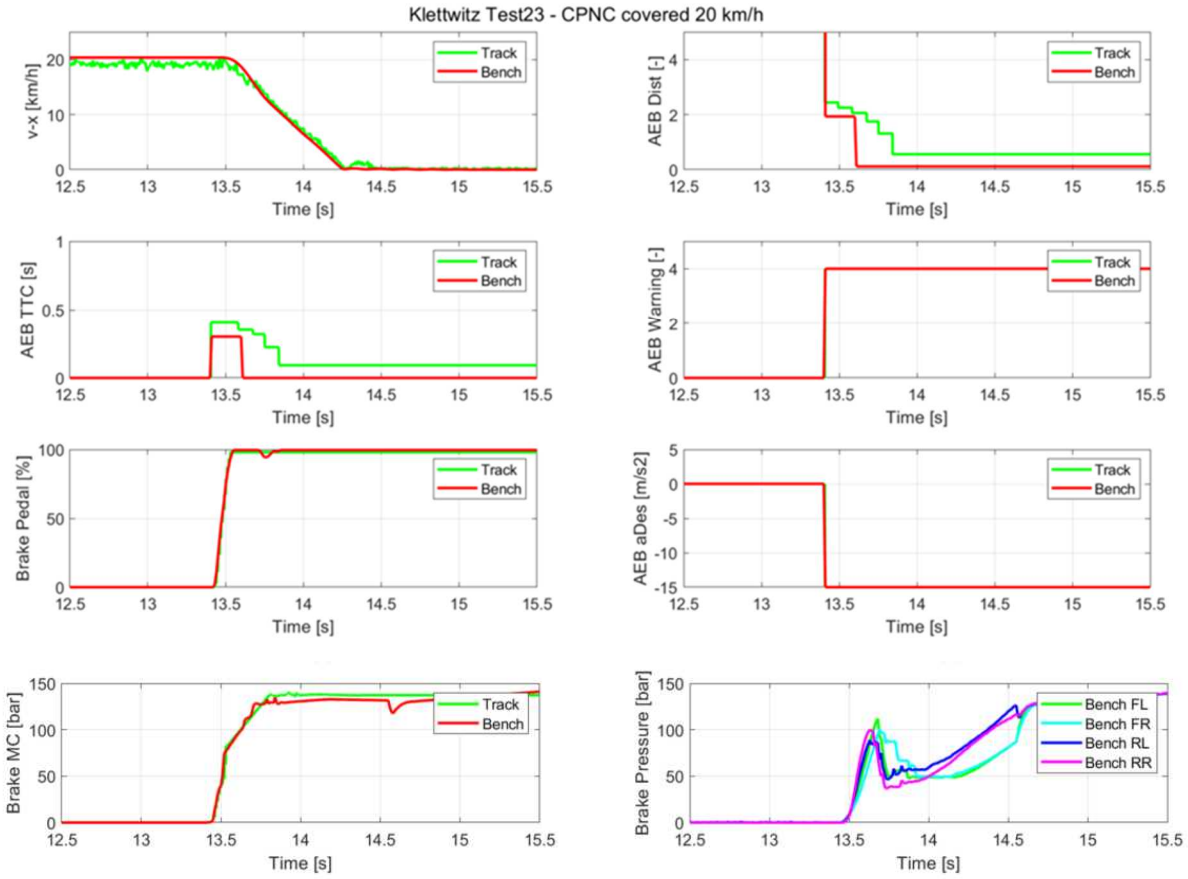
NCAP CPNA の 20km/h 走行試験は、Figure 144 に示すように、ダミー人形を乗せた試験場で実施。

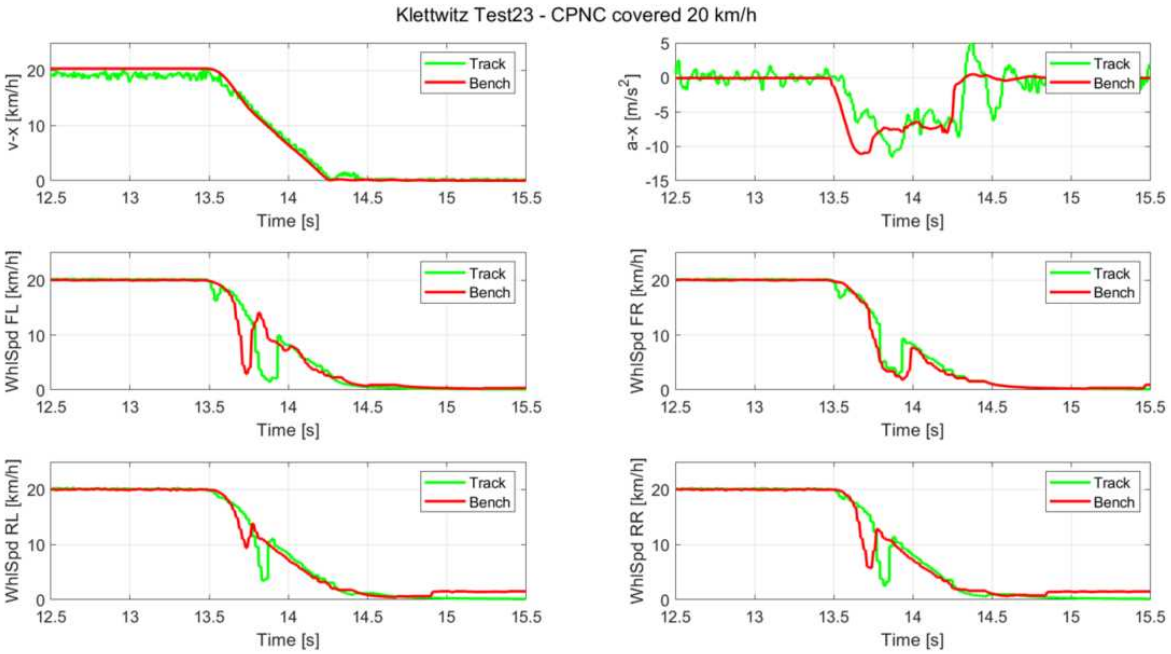
また、MicroAutoBox に実装された AEB 機能と全く同じ設定でベンチ試験を行っている。

出所：学校法人幾徳学園　神奈川工科大学、エイヴィエルジャパン（株）

Figure 144　NCAP 試験　－　実路とベンチの様子

このテストでは、結果の車輪速・減速・EPS の介入における良い相関性が示された。センサによる走行距離と TTC の計算値の差は、実レーダ信号とベンチでの理想的な模擬レーダ信号との偏差によるものである。



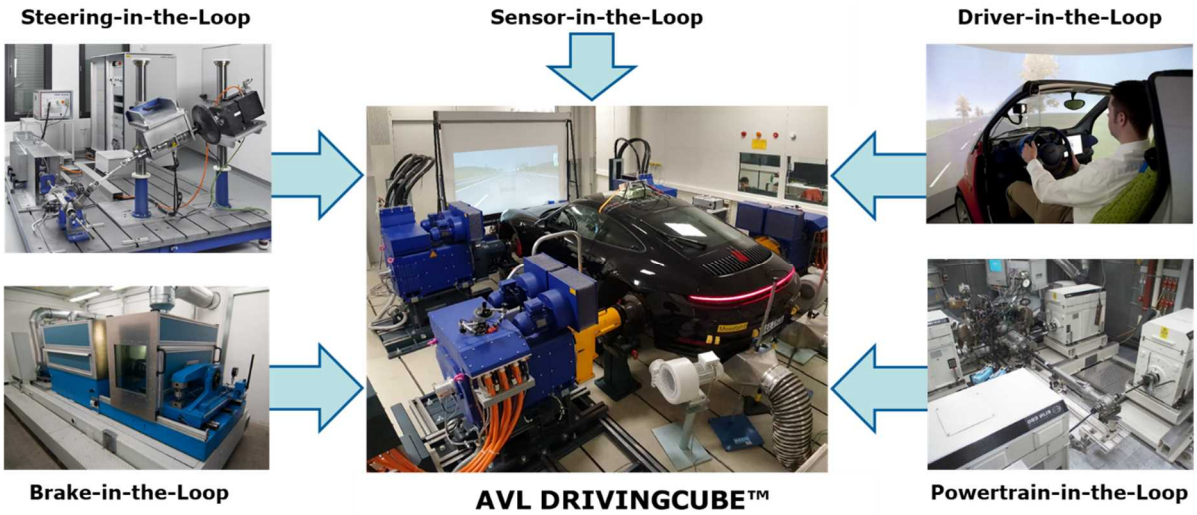


出所：学校法人幾徳学園　神奈川工科大学、エイヴィエルジャパン（株）

Figure 145　NCAP 試験 － 相関性確認

【結果】

パワートレイン、ステアリング、ブレーキ in-the-Loop を統合することで、車両の動的限界までを再現するような非常に現実に近い試験を可能とした。実装されたプロトタイプの ADAS 機能で運転操作をすると実路試験と同じようにベンチ上でセンサや機能の弱点を検出することが出来た。これにより、実際の走行テストと比較して、より効率的な最適化と検証が可能となった。



出所：学校法人幾徳学園　神奈川工科大学、エイヴィエルジャパン（株）

Figure 146　AVL DRIVINGCUBE™上の XiL システム

本ベンチマークを通じての SIL、HIL、VIL、FOT の長所・短所を下表に示す。

Table 55　SIL、HIL、VIL、FOT の長所・短所一覧

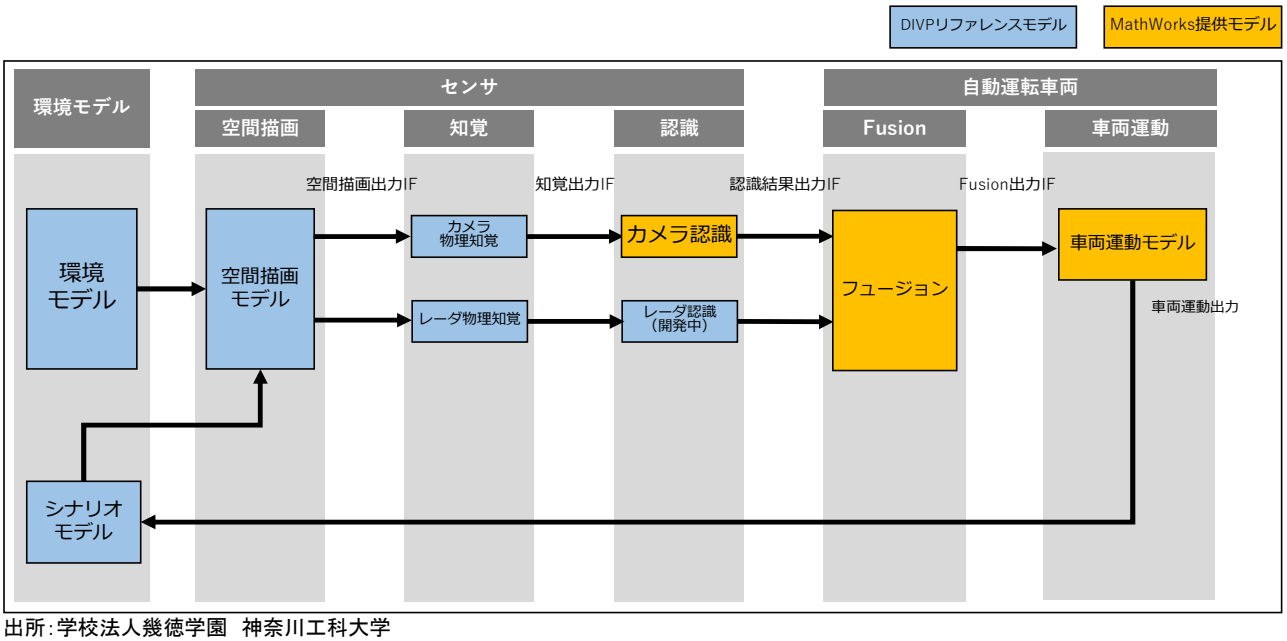
	Advantages	Disadvantages
SIL（DIVP®）	・開発初期への**フロントローディング**が可能 ・モデルの**再利用**による合理的開発が可能 ・手戻りがなくなることによる**効率化**が可能 ・膨大なテストケースを短時間で実行可能 ・センサ弱点シナリオ（性能低下につながる）での評価が可能	・評価に際して、一致性検証が必要（物理的計測方法）
HIL	・操作そのものは低コストだが、環境構築や設定に高い専門知識が必要 ・認証審査プロセスの一部である（1st step） ・モデルやツールチェーンの検証が可能	・センサ弱点シナリオ（性能低下につながる）での評価が困難
VIL	・これまで認証審査や車両開発で実績がある ・FOT にかなり近い条件で評価可能 ・完成車（すべての機能やシステム挙動が備わっている）で評価可能 ・車両全体を用いて複雑なシナリオで評価可能 ・センサ Sim やセンサインジェクション技術を用いて仮想環境と実車を組合せた評価可能 ・認証審査プロセスの一部である（2nd step） ・真値評価（動的な位置検出精度）が可能	・VIL の環境構築に膨大なコストがかかる ・試験装置を取り扱う際、細心の注意を払う必要がある ・センサ弱点シナリオ（性能低下につながる）での評価が困難
FOT	・リアルな危険事象やシステム課題を抽出可能 ・予期せぬ不調現象を収集できる可能性がある	・膨大な時間とコストがかかる ・機械的な評価が難しく、時々刻々と条件が変化する ・環境に対する再現試験が困難（再現性）

本ベンチマークにより HIL や VIL では正常認識でのシステム制御性能の評価が可能であることが分かった。今回、カメラと Radar は“Over-the-Air”技術を用いて評価したが、より広角なカメラを評価するには神奈川工科大学の球面スクリーンのような装置が必要であることが分かった。一方、Radar は真値評価（動的な位置検出精度）が可能であることが分かったので、DIVP®としては動的な位置精度検出評価に一考の価値がある。今後は、HIL や VIL のジオメトリと DIVP®の物理特性を組み合わせて、認識とシステム制御を合わせた安全性評価が検討課題である。

③機能シミュレーション PF 評価

A～D パートの成果物を結合し、機能シミュレーション PF（MATLAB/Simullink モデル）とのクローズドループシミュレーション環境の構築を実施。Mathworks 社が提供している Automated Driving Toolbox 内の高速道路用自動車追従モデルをベースに DIVP®の各センサの認識出力を MATLAB/Simulink の Fusion モデルに接続し、車両ダイナミクス計算モデルを含めたクローズドループシミュレーション環境における連携シミュレーション評価を実施した。機能構成イメージは下図参照。

また環境構築にあたり、カメラ知覚モデルは実機をモデル化した知覚モデルを使用、レーダ認識モデルは開発中であるため、IF のみ結合する構成とした。



出所：学校法人幾徳学園　神奈川工科大学

Figure 147　クローズドループシミュレーション環境

構築したクローズドループ環境において先行車追従シナリオの動作を確認した。本検証結果は⑤機能-物理シミュレーションの連携評価にて報告する。

④ 物理シミュレーション PF 評価

A,B,D パートの成果物を結合し、物理シミュレーション PF の評価を実施した。

物理シミュレーションでは、主に各センサ固有の認識不調に至る事象を組み込んだテストシナリオに対して、MAP やアセットに対するセンサモデルの知覚/認識出力の結果を確認。

センサ固有の認識不調をシミュレーションで再現可能かを検証し、再現困難な場合は各担当へフィードバックし修正・改善を行った。

また、物理シミュレーション PF（DIVP®）の機能拡張内容を Table 56 へ示す。2021 年度は Version0.8 対応を実施している。

Table 56　物理シミュレーション PF（DIVP®）機能拡張対応表

Ver	リリース内容	環境モデル	センサモデル	自動運転モデル
0.1	結合評価用PF（初版）	・MAP　Jtown再現	・全センサ（Camera,Radar,LiDAR）ベースモデルを結合	―
0.2	事前検証用PF	・アセット追加 アルファード	・RadarセンサモデルのCUDA化 （距離・速度FFT）	・正解値センサによるリファレンス 自動運転モデル構築
0.3	基本検証用PF	・MAP　Jtown（10cm刻み）再現 ・天空光　曇天、薄曇りを再現 ・アセット追加 NCAP歩行者・自転車ダミー アルファード内装にパーツ追加 （フロントガラス、ミラー等）	・機能追加 Camera空間描画をIMX490相当へ変更 LiDAR空間描画のOptixライブラリモデルの追加 Radar空間描画をPO近似モデルに変更	・Camera/Radar/LiDARの 認識モデルを結合
0.4	―	・シナリオ座標系を右手系に統一	・LiDAR空間描画の更新（車両位置補間など）	・外部車両モデル連携機能追加 （CarMaker連携）
0.5	NCAP, ALKS検証用PF	・ MAP　JARI 特異環境試験場追加 ・天空光　2020年9月12日　晴れ、薄曇り、曇り　追加 ・アセット追加 NCAPダミー人形、自転車 GST(NCAPダミー車両) NCAPダミー車両バルーン アルファード黒　（ターゲット、障害物用） キャッツアイ	・カメラ　IMX490モデルが動作可能 （SSS様からモデルを提供いただく必要あり	・認識モデル含めた自動運転モデル 環境構築
0.6	センサ不調評価用 リリース	・アセット追加 アルファード（光源） プリウス（光源、黒） NCAPダミー人形（黒革） JARI 特異環境試験場の光源追加 マンホール 段ボール 夜間NCAP用街灯	・LiDAR　PSSI製LiDARモデルが動作可能 （パイオニア様からモデルを提供いただく必要あり）	―
0.7	首都高C1/お台場 拡張性評価用リリース	・MAP　首都高C1 /お台場追加 ・天空光ファイル追加 2020年11月25日　晴れ、薄曇り、曇り　追加 2020年12月22日　晴れ、薄曇り、曇り　追加	・LiDAR反射率に鏡面反射成分を追加	―
0.8	臨海部実証実験用リリース	・MAP　走行経路に隣接する構造物追加 （バス停、看板や換気口など） ・アセット機能追加 アルファード（光源）の配光特性TypeA対応	・LiDAR　PSSI製LiDARモデル（Medium Range）が動作可能 （パイオニア様からモデルを提供いただく必要あり）	―

出所：学校法人幾徳学園　神奈川工科大学

<V0.8>

臨海部実証実験用 PF

東京臨海副都心台場 MAP において、走行経路に隣接する、構造物（バス停、看板や換気口など）を設置。

また、東京臨海副都心台場（北）MAP において、物理シミュレーションに必用な GPU メモリの消費量を低減する為、東京臨海副都心台場（北）MAP モデルの 3 分割を実施した。

パイオニアスマートセンシングイノベーションズ株式会社様より提供頂いた PSSI 製 LiDAR モデル（Medium Range）をセンサモデルとして追加した。

（PSSI 製 LiDAR モデルを使用する場合は別途パイオニア株式会社様より提供頂く必要有り）

アルファードのヘッドライト設定について、配光特性 TypeA 対応を実施。（Figure 148 参照）

出所：学校法人幾徳学園　神奈川工科大学

Figure 148 アルファードヘッドライト　配光特性 TypeA 対応確認

東京臨海副都心台場（北）での各センサ（Camera,Radar,LiDAR）結合評価環境の構築を行った。結合評価環境構築における、物理シミュレーション検証用高速計算機の環境情報を以下に示す。

Table 57 物理シミュレーション検証用高速計算機 環境情報

環境	物理シミュレーション検証用高速計算機
OS	Ubuntu 18.04
UnrealEngine	UnrealEngine 4.21
Carla	0.9.5
Carla(ros-bridge)	0.9.5.1
ROS	ROS Melodic Morenia
CPU	Intel Core i9-10900K CPU @3.70GHz × 20
メモリ	62.7 GiB
GPU	GeForce RTX 8000 GPU メモリ：48GB
GPU Driver	440.95.01
CUDA	10.2

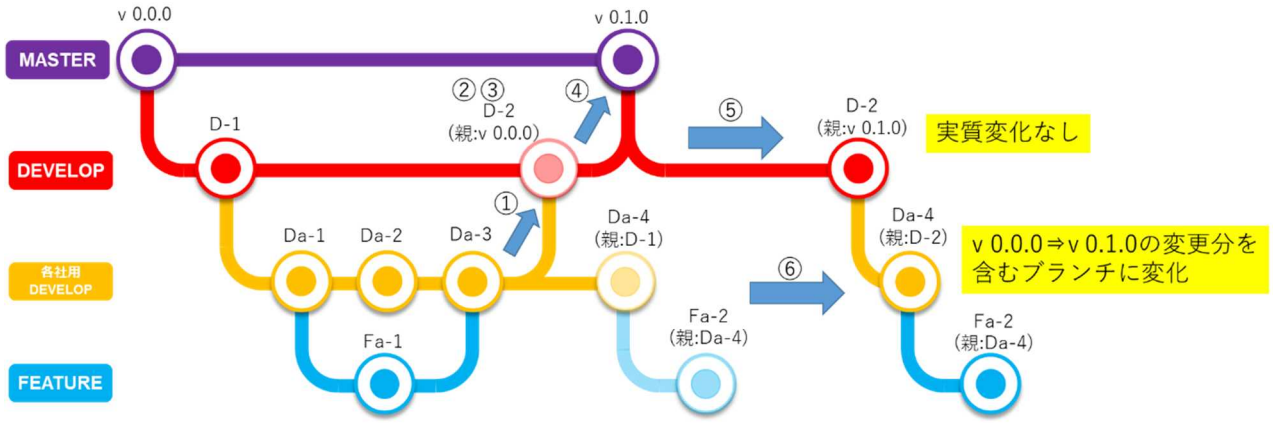
出所：学校法人幾徳学園 神奈川工科大学

■ プラットフォーム開発を効率的に進めるため、2020 年度よりコンソーシアム参加団体のみがアクセスできるファイルサーバを神奈川工科大学内に設置。(Figure 149)

■ 実験データの管理を行うファイルシステムとプラットフォームのソースコードを共有/管理するための GIT システムを導入し、効率的なプラットフォーム開発を推進した。(Figure 150)
また、2021 年度よりサーバの故障・メンテナンス・災害によるデータ破損、及び膨大な成果物データの消失、且つプロジェクト活動が停止するリスクを低減するため、サーバのミラー環境構築を実施。

出所:学校法人幾徳学園 神奈川工科大学

Figure 149 KAIT ファイルサーバ



手順	担当	内容	期日
①	各社	各社用DEVELOPをDEVELOPへマージ	④予定日の2週間前
②	日本ユニシス	DEVELOPのコンパイル確認	-
③	KAIT	DEVELOPの動作確認	-
④	KAIT	MASTERの更新 (DEVELOPをMASTERへマージ)	-
⑤	KAIT	DEVELOPのブランチし直し	-
⑥	各社	各社DEVELOPを新DEVELOPでリベース or 新DEVELOPから各社DEVELOPのブランチし直し	⑤完了後すみやかに

出所:学校法人幾徳学園 神奈川工科大学

Figure 150 ソースコード管理フロー

■DIVP®の物理シミュレーションと Carla シミュレーションの比較評価

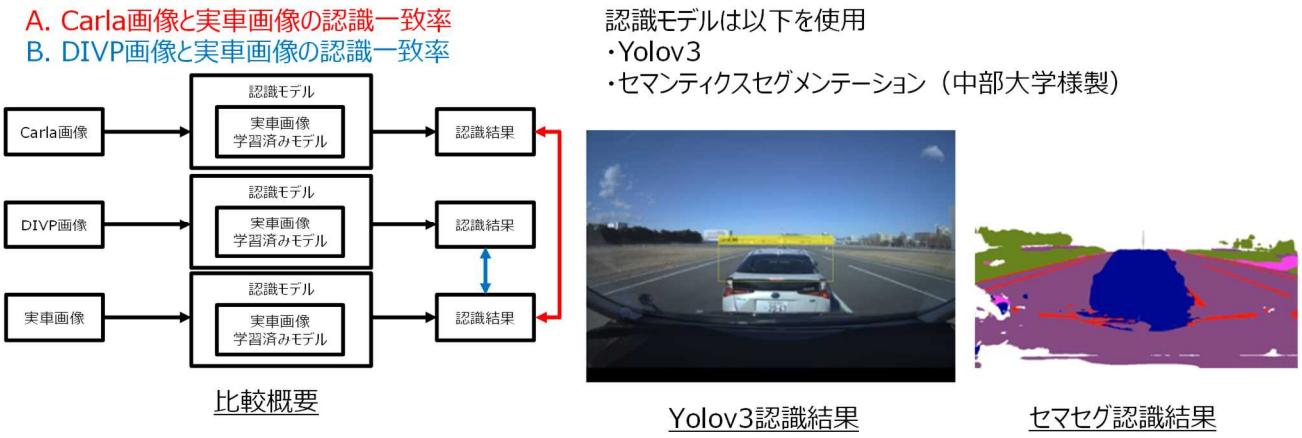
【概要/目的】

DIVP®物理シミュレーション PF の有効性検証の為、カメラシミュレータで比較的よく利用されている Carla シミュレータとの比較評価を実施する。また比較にあたり、Carla/DIVP®のシミュレーションにおいて画像生成を行い、カメラ認識における一致性評価を行う。

【評価方法】

実車の認識率(スコア)を基準に、Carla のシミュレーション画像の認識率比較と DIVP®シミュレーション画像の認識率比較を実施し、Carla と DIVP®の認識率の評価を行う。

また、認識モデルとしては Yolo(Version3)と HRNet(セマンティック・セグメンテーション、中部大学様製)を用いた認識結果比較を実施する。以下に比較概要のイメージを示す。



出所:学校法人幾徳学園 神奈川工科大学、AD-URBAN

Figure151 Camera 知覚出力の評価方法

Carla と DIVP®の認識率の評価を行うシナリオを以下の表に示す。Jtown 直線離間シーンでは、Jtown 多目的市街地における前方車両が離間していく比較的認識がし易いシーンでの検証を実施。また、お台場逆光シーンでは、東京臨海部副都心 お台場青海 1 丁目交差点における、逆光による信号機・交通標識の認識結果評価を実施した。

Tabel58 Camera 知覚出力の対象シナリオ

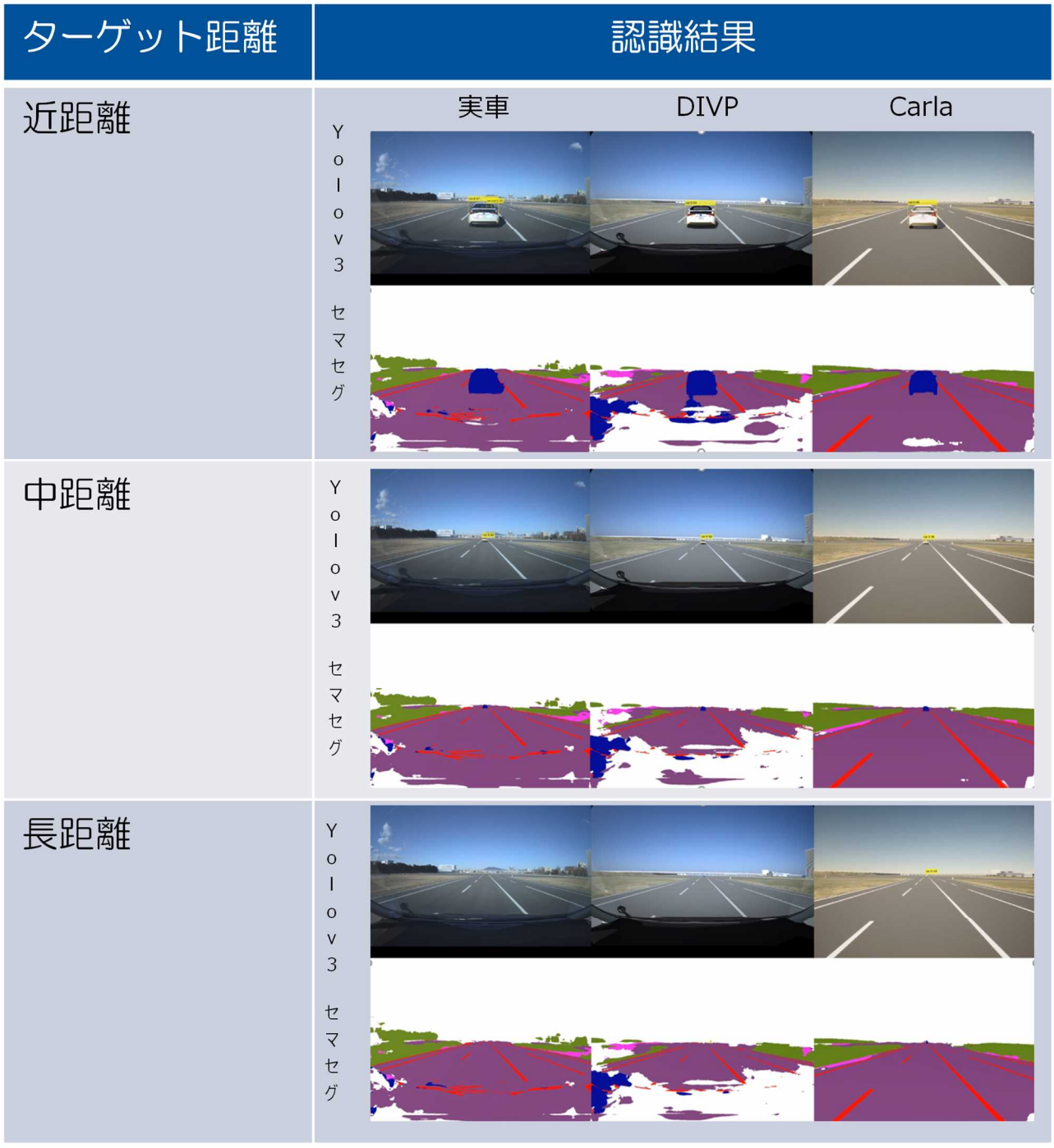
シーン	Map	認識対象
Jtown 直線離間	Jtown 多目的市街地(10 ㎝精度)	前方車 道路・白線
お台場逆光	臨海副都心台場地区(北側 Area03)	信号 道路・白線

出所:学校法人幾徳学園 神奈川工科大学

【評価結果】

・「Jtown 直線離間シーン」Camera 知覚出力の認識評価結果

「Jtown 直線離間シーン」における実車/ DIVP®/Carla の Camera 知覚出力結果の Yolo(Version3)と HRNet(セマンティック・セグメンテーション、中部大学様製)認識結果を以下に示す。



出所:学校法人幾徳学園　神奈川工科大学、AD-URBAN

Figure 152　「Jtown 追い抜かれシーン」Camera 知覚出力の実車/ DIVP®/Carla 認識結果

・「Jtown 直線離間シーン」評価結果まとめ

「Jtown 直線離間シーン」の評価結果を下記に示す。

＜車両認識（Yolov3）＞

実車/ DIVP®/Carla の車両認識のスコアは**距離が 55m まではほぼ変わらない**

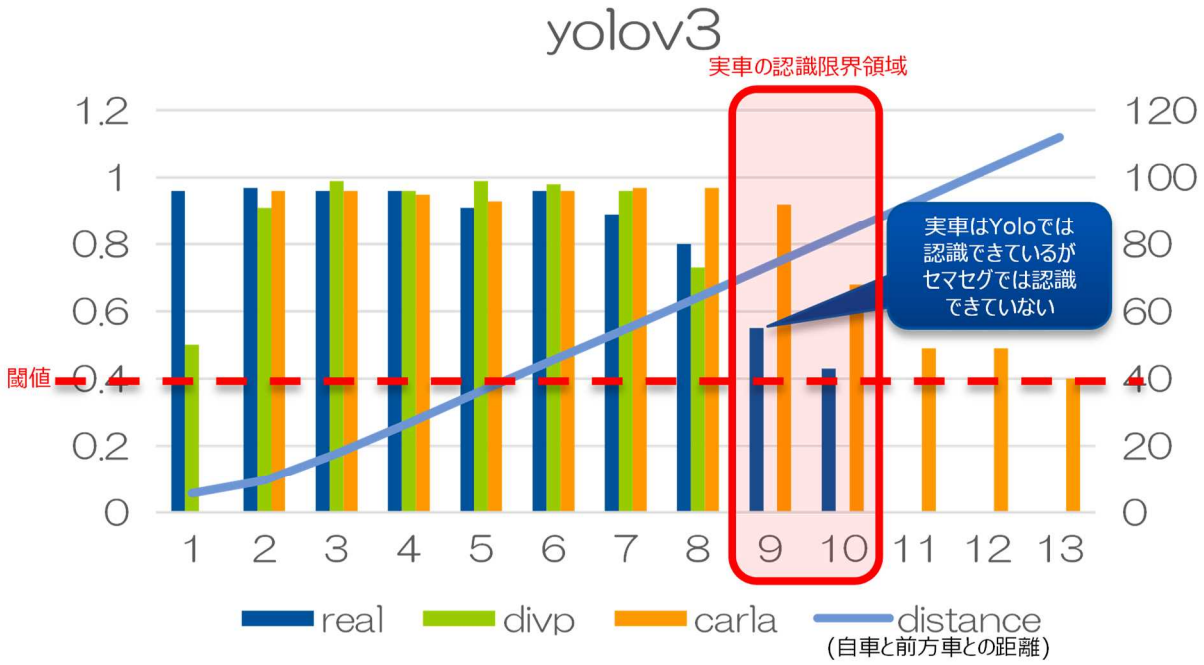
距離が遠くなると認識スコアに差がつく

・DIVP®は実車の認識限界距離より**約 15m 先に認識されなくなり**、

・Carla は実車の認識限界距離より**約 25m 先まで認識された**

＜白線認識（セマセグ）＞

・特段大きな差はなし



※ 認識の閾値(threshold)を0.4に設定しているため、スコアが0.4より小さい場合は検出されない（スコアが0）

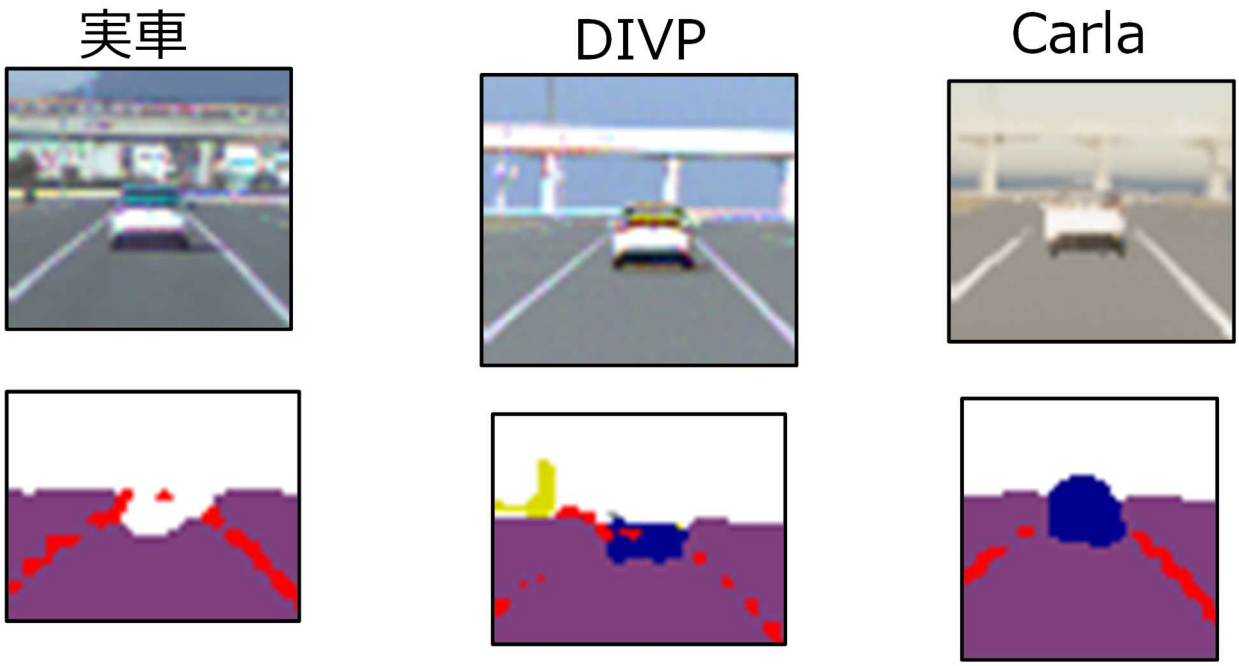
出所：学校法人幾徳学園　神奈川工科大学

Figure 153　「Jtown 直線離間シーン」Camera 知覚出力の比較評価結果

【考察】

遠方の認識で DIVP®が実車より認識可能距離が短いことが確認出来た。想定される要因として、DIVP®の車の背景の構造物が車と同化して認識しづらくなっていると想定される。また遠方の認識精度を向上させる場合、背景の構造物の作りこみが必要だと推測される。

更に遠方における認識において、Carla が実車より認識可能距離が長くなっていることが確認できた。想定される要因として、実車/ DIVP®ともに偽色が発生しており、この結果が認識に影響を与えていると推測する。逆に Carla では偽色が発生しておらず比較的形状の輪郭がクリアに見えているため、実車と比べ遠方の認識率が高いと想定される。

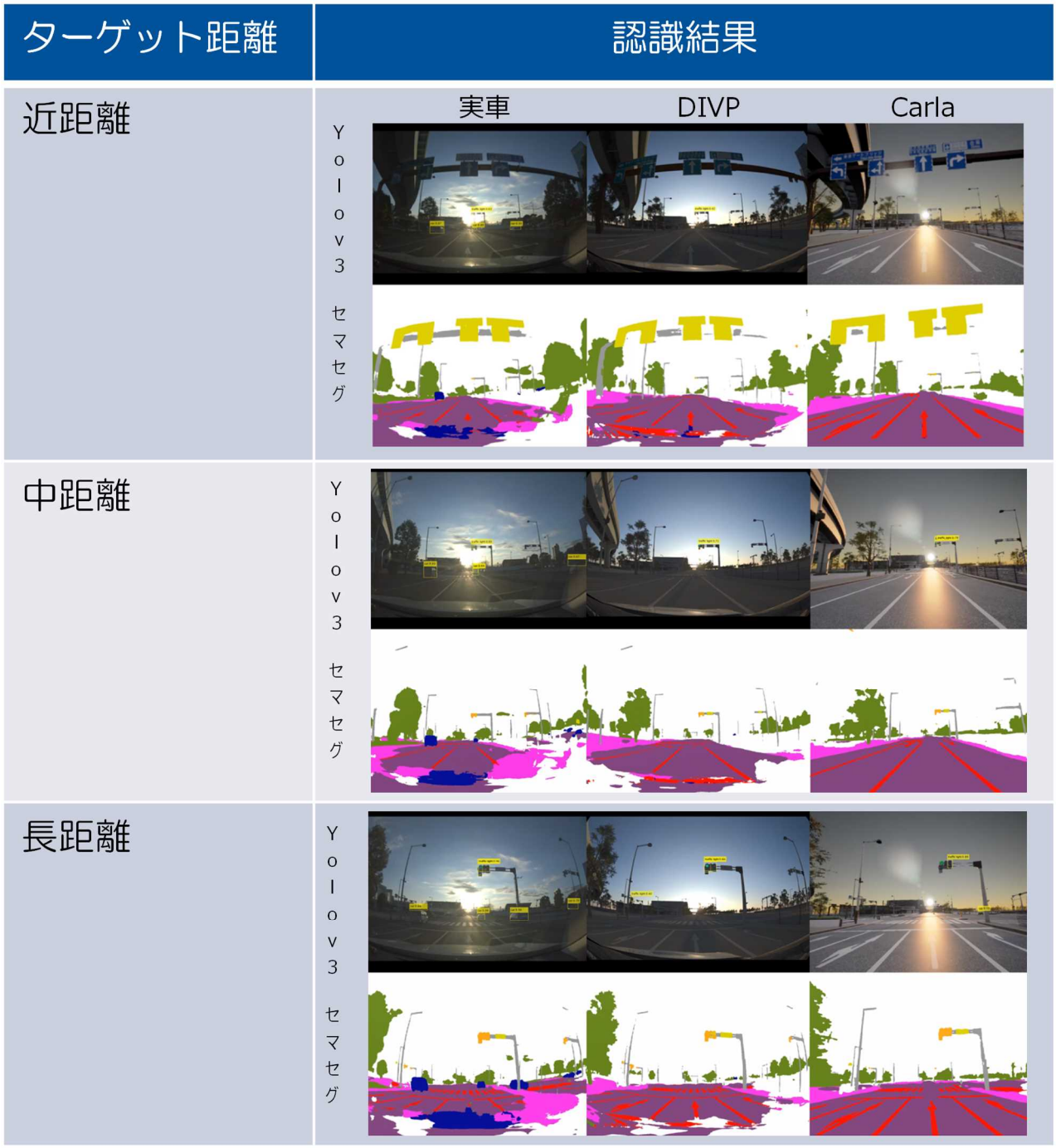


出所：学校法人幾徳学園　神奈川工科大学、AD-URBAN

Figure154　「Jtown 直線離間シーン」Camera 知覚出力の実車/DIVP®/Carla 認識結果

▪「お台場逆光」Camera 知覚出力の認識評価結果

「お台場逆光」における実車/ DIVP®/Carla の Camera 知覚出力結果の Yolo(Version3)と HRNet(セマンティック・セグメンテーション、中部大学様製)認識結果を以下に示す。



出所：学校法人幾徳学園　神奈川工科大学、AD-URBAN

Figure 155　「お台場逆光」Camera 知覚出力の実車/DIVP®/Carla 認識結果

・「お台場逆光」評価結果まとめ

「お台場逆光」の評価結果を下記に示す。

＜信号機認識（Yolov3）＞

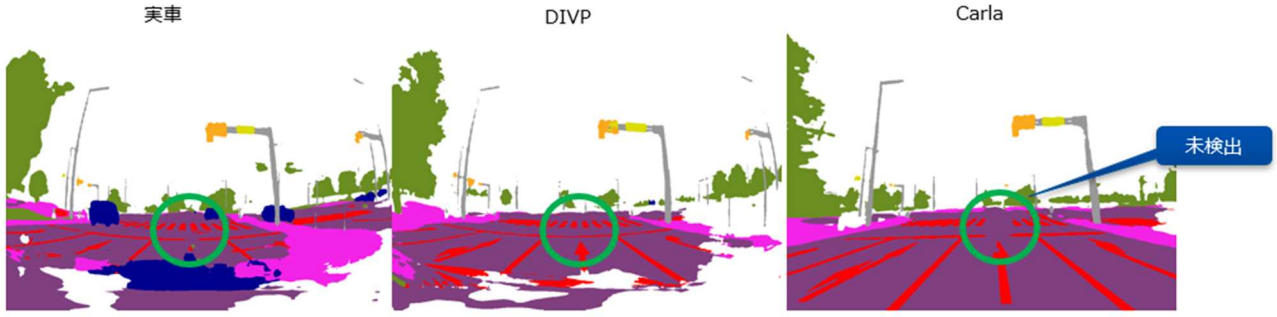
・信号機の認識について、実車、DIVP®が認識し Carla が認識できないケースがある

出所：学校法人幾徳学園　神奈川工科大学

Figure 156　「お台場逆光」Camera 知覚出力の実車/DIVP®/Carla 認識結果（信号機）

＜横断歩道認識（セマセグ）＞

横断歩道で実車、DIVP®が認識し Carla が認識できないケースがある（路面の照り返しの強さが要因）



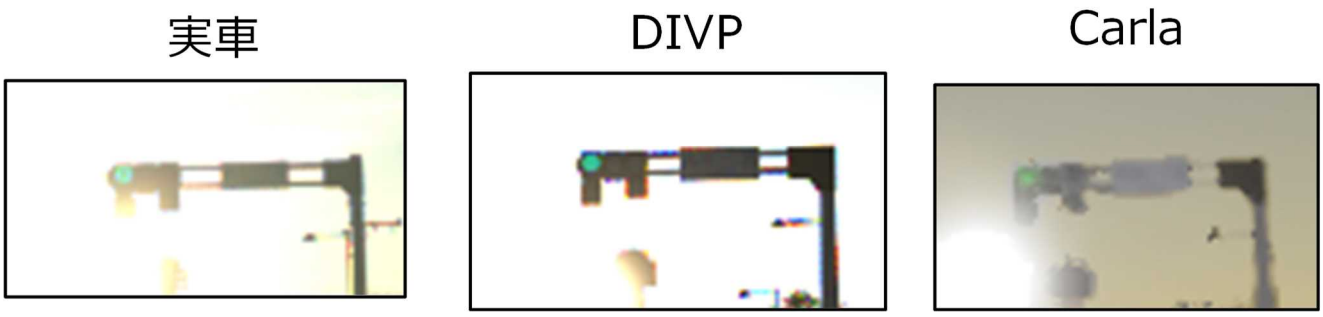
出所：学校法人幾徳学園　神奈川工科大学、AD-URBAN

Figure 157　「お台場逆光」Camera 知覚出力の実車/ DIVP®/Carla 認識結果（白線）

【考察】

信号機認識について実車、DIVP®が認識し Carla が認識できていないことが分かった。これは太陽が実車・DIVP®は光に広がりを持っているのに対し、Carla は光に広がりがなく太陽の境目が不自然で信号と少しかぶってしまっているのが認識を妨げていると推測される。また、Carla では逆光であるのに対し、信号機横の看板が白く見えている＆信号機形状に糸状の物体がみえている等、実車と見え方が違う点も認識を妨げている原因と推測される。

一方で DIVP®は信号がきれいにみえすぎている。これは DIVP®が現在太陽位置を分刻みで時刻を指定できず、太陽位置が正確に合わせられなかったことが要因である(DIVP®の太陽位置の分刻み指定は 2022 度 5 月実装予定)



出所:学校法人幾徳学園 神奈川工科大学

Figure 158 「お台場逆光」Camera 知覚出力の実車/DIVP®/Carla 信号認識結果

横断歩道認識について、Carla では路面の太陽の照り返しが不自然に強いため白線が認識できないことが分かった。一方で DIVP®では路面の照り返しが弱い。これはお台場の路面に DIVP®マテリアルを割り当てておらず、鏡面反射成分と拡散反射成分が弱い為と推測される。認識評価を行う場合は路面の反射率を割り当てる必要があるため、今後反射率の改善を検討していく。

出所:学校法人幾徳学園 神奈川工科大学

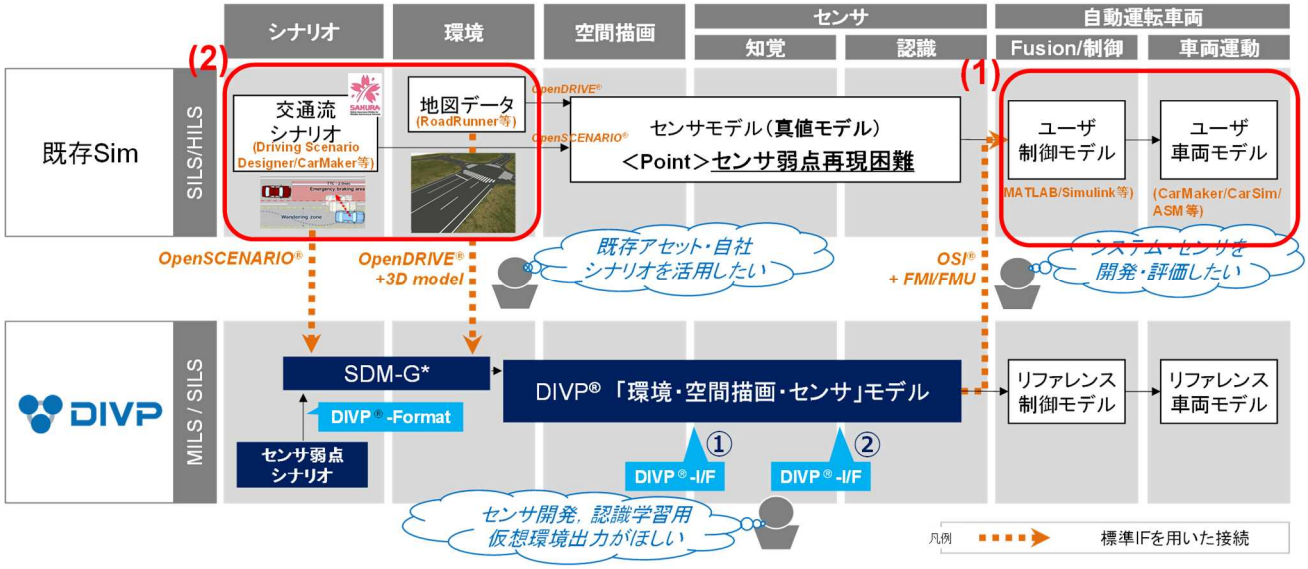
Figure 159 「お台場逆光」Camera 知覚出力の実車/ DIVP®/Carla 横断歩道認識結果

⑤ 機能-物理シミュレーションの連携評価

③機能シミュレーション PF 評価にて構築したクローズドループ環境に対し、A～D パートの成果物を結合し、DIVP®の物理シミュレーションと機能シミュレーション PF（MathWorks 社 MATLAB/Simulink）との連携シミュレーション評価を実施した。

連携にあたり、(1)Fusion モデルとの接続を行い、DIVP®シミュレータの接続課題抽出と対策検討を実施。

また、(2)仮想ユーザシナリオ・環境モデルを構築し、ユーザのシナリオ資産の流用検討、及びシナリオ接続性の検討を行った。



出所：学校法人幾徳学園　神奈川工科大学

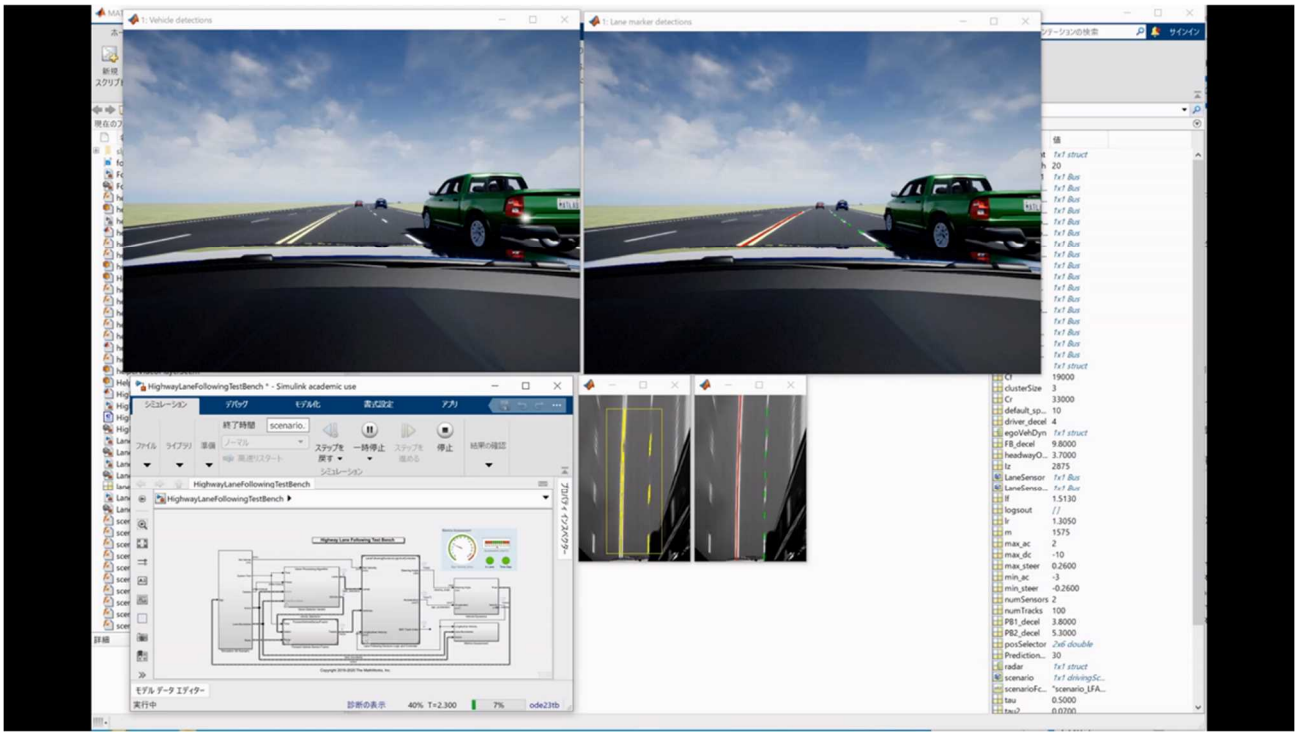
Figure 160　目的に応じたシミュレーション類型の整理

(1)Fusion モデルと DIVP®シミュレータの接続検討

■概要

Mathworks 社の高速用自動車追従モデルサンプル（Automated Driving Toolbox 付属、以下 Fusion リファレンスモデルと記載）を Fusion リファレンスモデルとして活用し、DIVP®シミュレータのセンサ出力結果と接続し、シミュレーション評価を行った。

本 Fusion リファレンスモデルはレーンキープ機能と先行車追従機能を持っており、車線内を走行するように車両を制御し、同じ車線を走行する先行車に対して設定された速度や安全距離を維持する機能を持っている。また、カメラから車線と車両を検出し、検出した車両はレーダで検出した車両とフュージョンして認識のロバスト性を持たせている。車両制御モデルは、車線検知、車両検知、設定速度をもとに、ステアリングやアクセルを制御する。本 Fusion リファレンスモデルのイメージを以下に記載する。

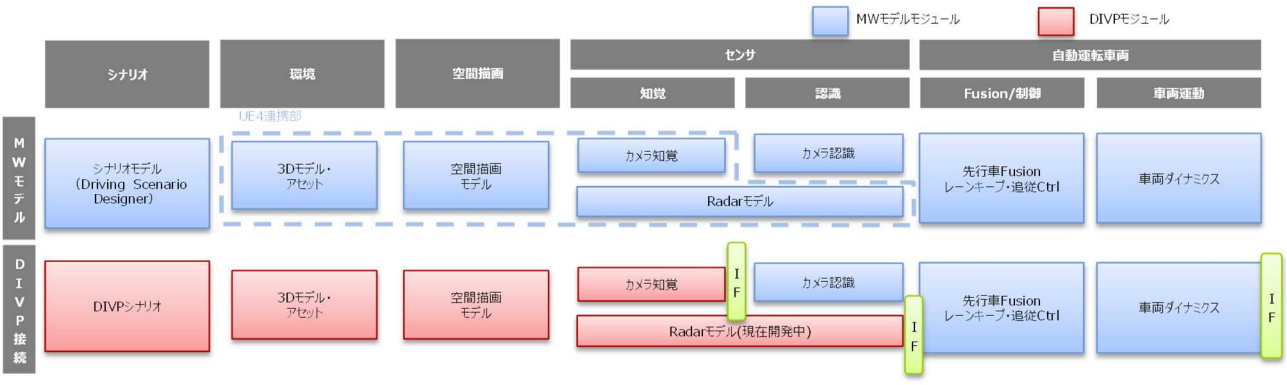


出所：学校法人幾徳学園　神奈川工科大学

Figure 161　Mathworks 社の Fusion リファレンスモデル例

■機能構成

Mathworks 社の Fusion リファレンスモデルの機能構成図を下図に示す。また、本 Fusion リファレンスモデルと DIVP®のセンサ出力を接続した機能構成を示す。DIVP®のカメラ知覚出力と Radar モデル認識結果を MathWorks 社 Fusion リファレンスモデルに接続する構成を検討した。またこの検討にあたり、Radar 認識モデルは開発中であるため、IF のみ結合する構成とした。



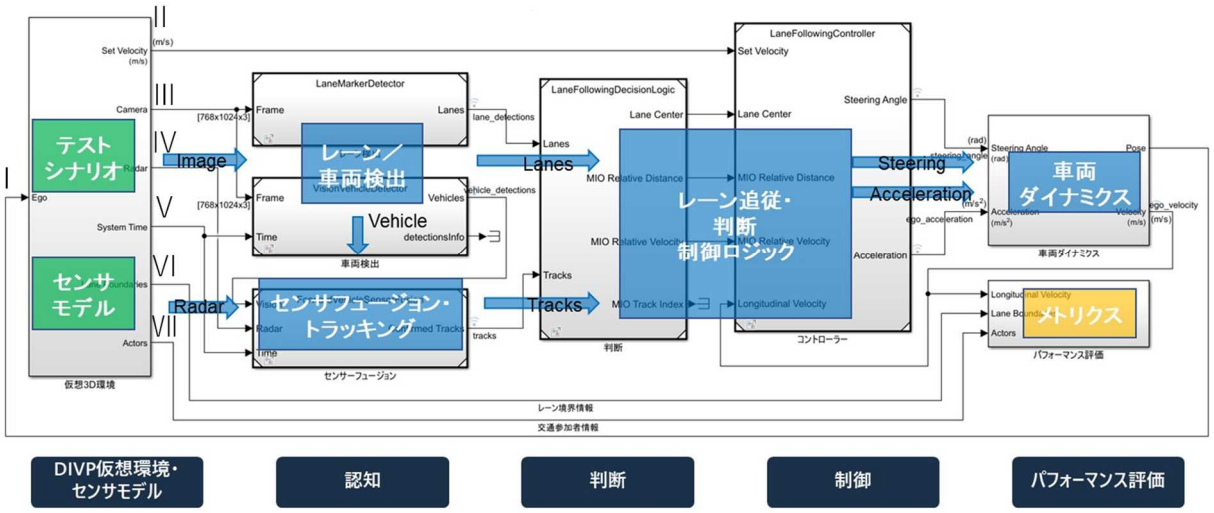
出所：学校法人幾徳学園　神奈川工科大学

Figure 162　Mathworks 社　高速用自動車追従モデルと DIVP®接続モデルの構成図

■接続課題検討

DIVP®のシナリオモデル、環境モデル、空間描画モデル、カメラ知覚モデル、ミリ波認識モデルを Fusion リファレンスモデルと接続を実施。(Figure 163)

接続検討にあたり、IF 接続課題の抽出と対策検討、及び対策実装し Fusion リファレンスモデルの Closed Loop Simulation の構築を行った。(Table 59)



出所:学校法人幾徳学園　神奈川工科大学

Figure 163　Mathworks 社の Fusion リファレンスモデルと DIVP®接続モデル

Table 59　DIVP®-IF 接続課題

No	信号	入出力	概要	課題	課題分類
1	Ego	入力	自車の位置/速度/姿勢	—(特に課題無し)	—
2	Set Velocity	出力	設定車速	—(特に課題無し)	—
3	Camera	出力	カメラ(知覚)出力	—(特に課題無し)	—
4	Radar	出力	ミリ波レーダ 認識出力	DIVP®のミリ波レーダ認識出力 I/F に物標分類(classification)がない	センサ I/F
5	System Time	出力	時刻	—(特に課題無し)	—
6	Lane	出力	レーン境界座標	本真値未サポート	シナリオ・真値
7	Actors	出力	他車・物標の位置/速度/ 姿勢	—(特に課題無し)	—

出所:学校法人幾徳学園　神奈川工科大学

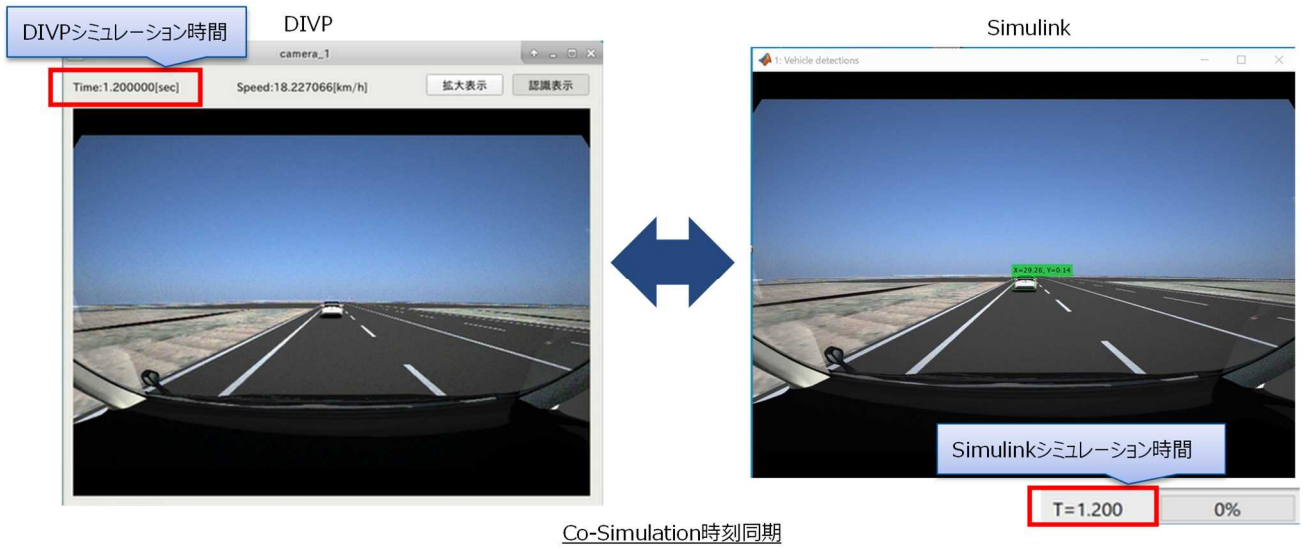
また、IF 接続課題以外のシミュレーション接続における時刻同期課題の抽出を実施。(Table 60)

また、時刻同期シミュレーションが出来ているかを確認する為、DIVP®シミュレーション時刻と MATLAB/Simullink の Fusion リファレンスモデルのシミュレーション時刻が同時刻で連携シミュレーション出来ているか比較・確認を実施した。(Figure 164)

Table 60　DIVP®時刻同期課題

課題分類	課題内容	備考
Co-Sim 同期/ DIVP®-PF との入力メッセージ同期	複数の入力メッセージがある場合(カメラ+ミリ波など)、全てのメッセージを受信するまで待つロジックの実装が必要	ROS(c++/python)では以下の入力同期機能が提供されている message_filters/synchronizer
Co-Sim 同期/ DIVP®-PF との時間同期	Co-Simulation のため DIVP®出力の受信ブロックで同期待ちロジックの実装が必要	-

出所:学校法人幾徳学園　神奈川工科大学



Co-Simulation時刻同期

出所:学校法人幾徳学園　神奈川工科大学

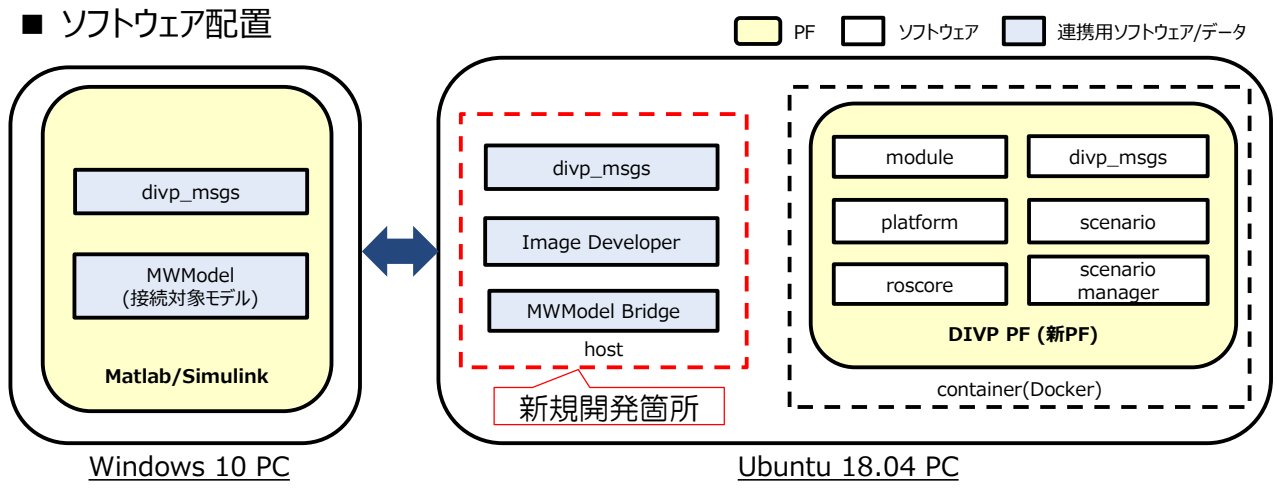
Figure 164　DIVP®シミュレーション時刻と MATLAB/Simullink 上のシミュレーション時刻の比較

■接続構成

DIVP®シミュレーションと MATLAB/Simullink の Fusion リファレンスモデルとの接続を実施した、各ソフトウェアとデータの構成を Figure 165 に示す。

また、各連携用ソフトウェアとデータの意味を Table 61 に示す。Ubuntu18.04 OS をベースに Docker のコンテナイメージとして DIVP®シミュレーション環境が構築されている。各 module ノード、platform ノード、roscore ノード mdivp_msgs ノード、scenario ノード、senario manager ノードの詳細は DIVP®ユーザマニュアルを参照。

また、Windows 10 OS をベースに、MATLAB/Simullink(Ver2021a)環境が構築されており、LAN 経由で Ubuntu18.04 PC と ROS 通信し、連携シミュレーションを実現している。



出所:学校法人幾徳学園 神奈川工科大学

Figure 165 DIVP®シミュレーションと MATLAB/Simullink の接続ソフトウェア構成

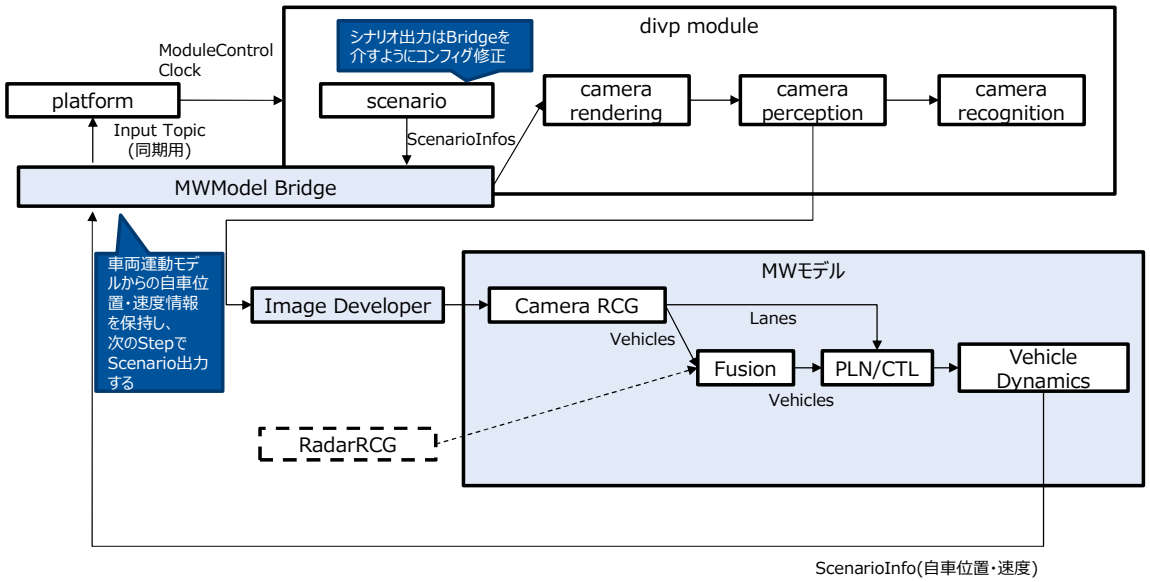
Table 61 連携用ソフトウェア/データの一覧表

連携用ソフトウェア/データ	内容
MWModel (接続対象モデル)	Mathworks 社の Automated Driving Toolbox で提供している 高速用自動車追従モデルサンプル。 本モデルの認識入力に DIVP®センサ出力を、本モデルの車両運動出力を DIVP®空間描画入力に接続している。
MWModel Bridge	MWModel の車両運動出力を DIVP®PF に反映するブリッジ用ノード。
Image Developer	現像ノード。
divp_msgs	DIVP® PF が用意している ROS メッセージ群。 車両運動出力を DIVP®空間描画に送るためシナリオ情報メッセージを利用。

出所:学校法人幾徳学園 神奈川工科大学

また、DIVP®シミュレーションと MATLAB/Simullink の Fusion リファレンスモデルとの間のメッセージフローを Figure 166 に示す。ScenarioInfos の詳細設定は Figure 167 を参照。

■ メッセージフロー



出所：学校法人幾徳学園　神奈川工科大学

Figure 166　DIVP®シミュレーションと Fusion リファレンスモデル間メッセージフロー

■ ScenarioInfos設定詳細

ScenarioInfos

名称	型	単位	説明
header	std_msgs/Header	-	
actor_num	uint32	-	配列長
actor_info	ScenarioInfo[]	-	

bridgeノードで**自車両の位置・速度情報**を上書き

ScenarioInfo

型	名称	説明	設定ソース	備考
int32	obj_id	object id	シナリオノード	-
float32	pos_x	position x[m]	MWモデル	-
float32	pos_y	position y[m]		-
float32	pos_z	position z[m]		MWModelは高さを扱っていないため MWModelで固定値でJtownの高さを格納
float32	roll	roll[deg]		MWModelは0固定で格納
float32	pitch	pitch[deg]		MWModelは0固定で格納
float32	yaw	yaw[deg]		-
float32	vel_x	velocity x[m/s]		-
float32	vel_y	velocity y[m/s]		-
float32	vel_z	velocity z[m/s]		MWModelは0固定で格納
int32	head_light	head light 1:OFF 2:LO 4:Hi	シナリオノード	-
int32	fog_light	fog light 0:OFF 1:ON		-
int32	turn_signal	turn signal 0:OFF 1:RIGHT 2:LEFT 3:HAZARD		-
int32	brake_light	brake light 0:OFF 1:ON		-
int32	back_light	back light 0:OFF 1:ON		-
int32	other_light	other light 0:OFF 1:ON		-
int32	front_wiper	front wiper 1:OFF 2:LO 4:HI 8:AUTO 16:INT		-
int32	rear_wiper	rear wiper 1:OFF 2:LO 4:HI 8:AUTO 16:INT		-

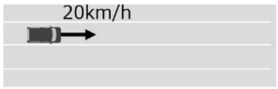
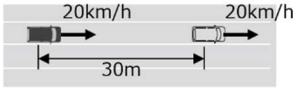
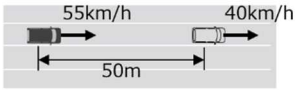
出所：学校法人幾徳学園　神奈川工科大学

Figure 167　ScenarioInfos 詳細

■接続動作確認

連携シミュレーションの動作確認を実施したシナリオ 3 つを Figure 168 に示す。また各シナリオの動作確認結果を Figure 169～Figure 171 に示す。いずれも白線認識、先行車両認識・追従が問題無くシミュレーション出来ていることが確認出来た。

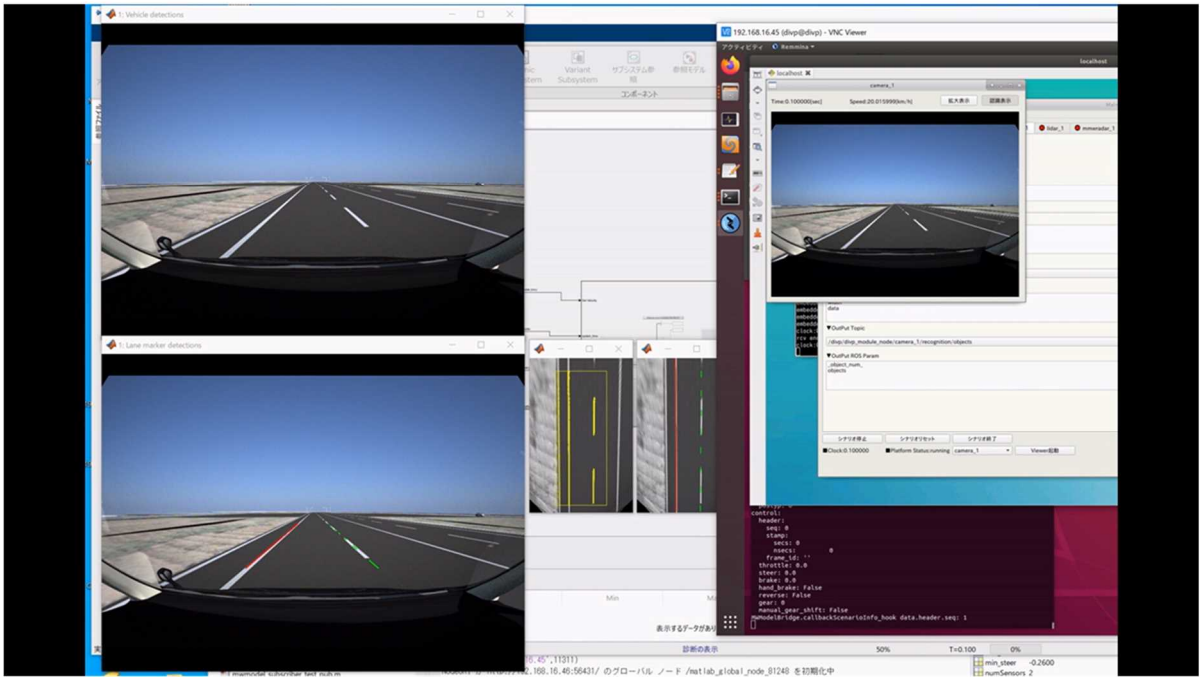
■ IF接続動作確認シナリオ　自車　他車

No	シナリオ（Jtown/晴れ）	評価対象				結果
		認識		判断・制御		
		車両認識	白線認識	車両追従	レーンキープ	
1	直線/先行車なし/定速 		○			OK
2	直線/先行車あり/定速 	○				OK
3	直線/先行車あり/自車追いつき 			○		OK

出所：学校法人幾徳学園　神奈川工科大学

Figure 168　連携シミュレーション動作確認シナリオ

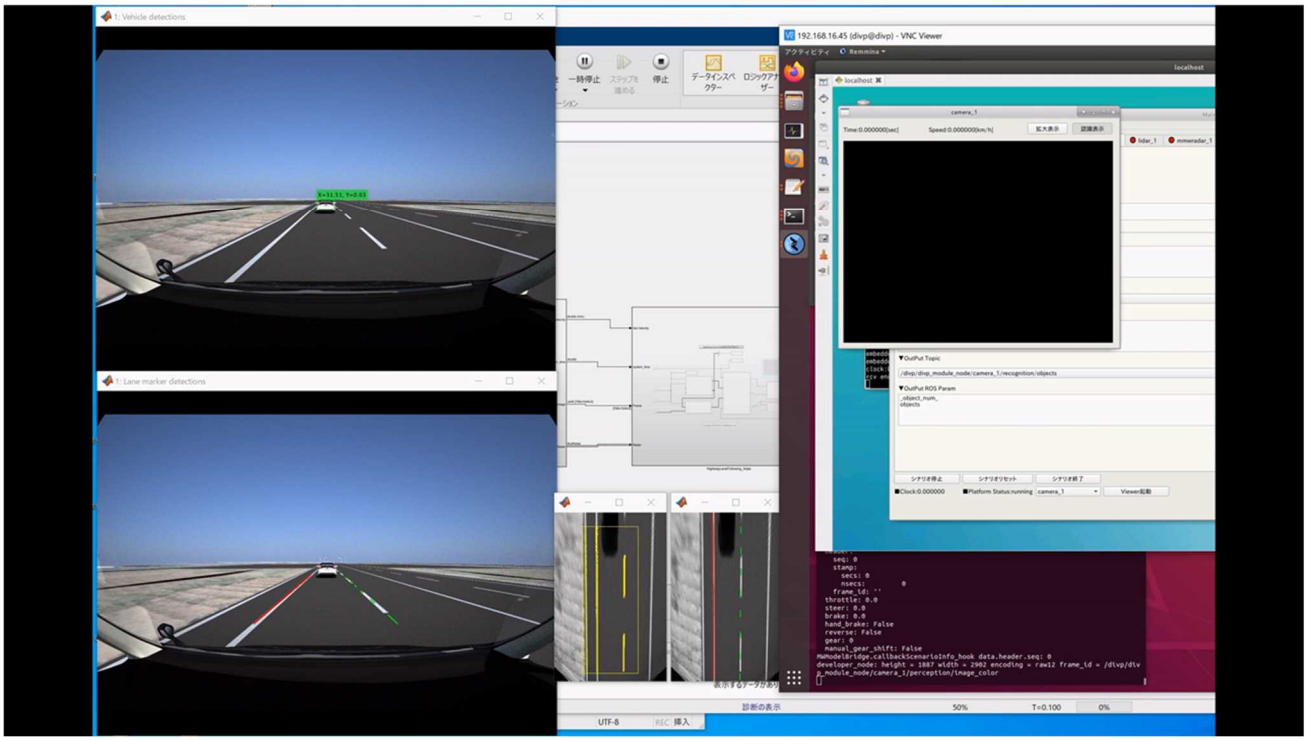
■ 1. 直線/先行車なし/定速



出所：学校法人幾徳学園　神奈川工科大学

Figure 169　動作確認結果①

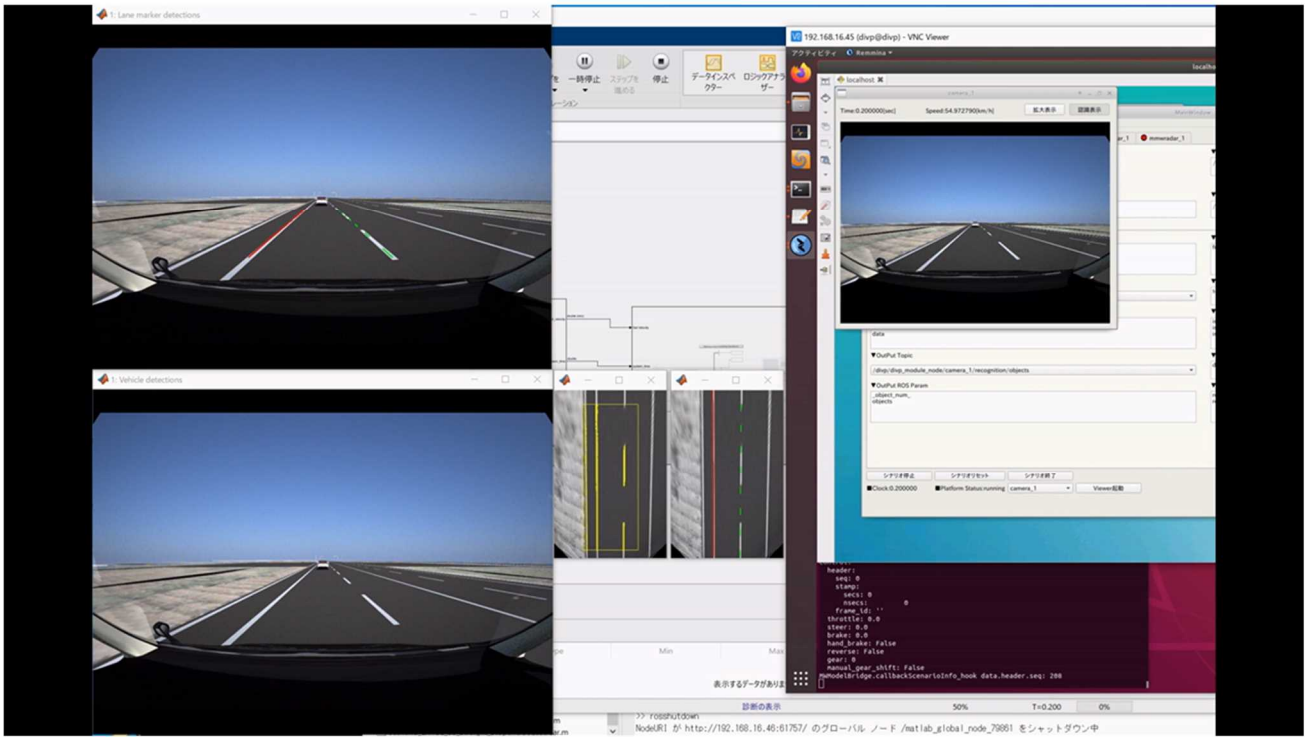
■ 2. 直線/先行車あり/定速



出所：学校法人幾徳学園　神奈川工科大学

Figure 170　動作確認結果②

■ 3. 直線/先行車あり/自車追いつき



出所：学校法人幾徳学園　神奈川工科大学

Figure 171　動作確認結果③

■Fusion リファレンスモデルとの CoSIM パフォーマンス計測

DIVP®-PF と MATLAB/Simullink の Fusion リファレンスモデルを接続し、シミュレーションを実施した時のシミュレーション速度（パフォーマンス）計測を行った。以下に結果を示す。

【前提条件】

・DIVP®は docker 版を使用（V0.9）

・計測のため rosbag 保存処理を平行で行っており、rosbag 内のメッセージより処理時間を出している

・シナリオは「直線/先行車あり/自車追いつき」のしなりを使用

【パフォーマンス計測結果】

条件 1：シミュレーション周期：100ms、空間描画サンプリング回数：10

プロセス	1フレームの平均処理時間(秒)
シナリオ出力	0.29
カメラ空間描画	4.93
カメラ知覚	5.56
現像(CPU)	0.78
認識/車両制御/車両運動	0.65
合計	12.21

シミュレーション1秒にかかる実時間：122秒(約2分)

出所：学校法人幾徳学園　神奈川工科大学

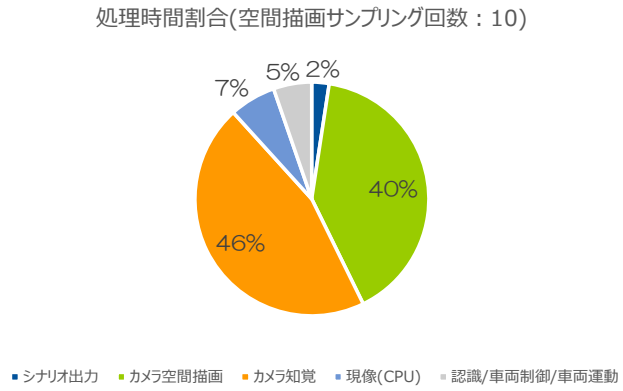


Figure 172　条件 1 におけるパフォーマンス計測結果

条件 2：シミュレーション周期：100ms、空間描画サンプリング回数：100

プロセス	1フレームの平均処理時間(秒)
シナリオ出力	0.3
カメラ空間描画	37.95
カメラ知覚	5.55
現像(CPU)	0.78
認識/車両制御/車両運動	0.65
合計	45.23

シミュレーション1秒にかかる実時間：452秒(約7分)

出所：学校法人幾徳学園　神奈川工科大学

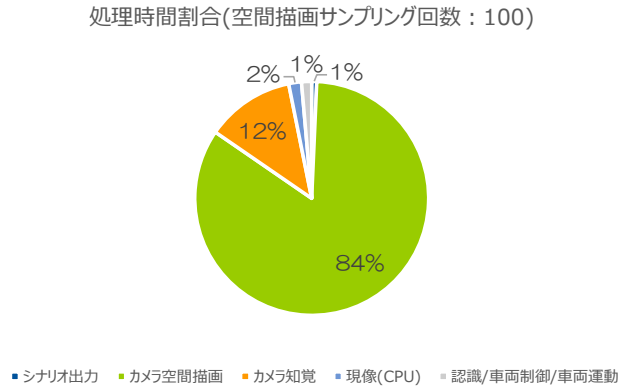


Figure 173　条件 2 におけるパフォーマンス計測結果

【パフォーマンス計測結果の課題検討】

本計測結果より、カメラ空間描画モデルとカメラ知覚モデルがボトルネックとなっていることが改めて確認出来た。また、カメラ空間描画のサンプリング回数を 10 回から 100 回にすることで約 7.7 倍に処理時間が増えることが確認出来た。今後、この精緻な DIVP®シミュレーションをユーザの開発プロセスにサービスインし、効率的なシミュレーション評価を実施する為には、GPU の並列処理による高速化検討、また目的に応じた縮退モデルの検討と目的に応じた高速化の為の設定ガイドライン（カメラ空間描画のサンプリング回数や画素数など）の検討が有効と考える。

■Fusion リファレンスモデルとの接続課題まとめ

DIVP®シミュレーションと MATLAB/Simullink の Fusion リファレンスモデルとの接続における課題の一覧と対策案を Table 62 に示す。一部 Co-Sim 同期に関する課題と高速化に関する GPU の並列処理機能の課題は DIVP® Version0.10 よりサポート済である。今回の Fusion リファレンスモデルとの接続では課題とならなかったが、各センサモデルの動作周波数違い（例、カメラ 30Hz、ミリ波 20Hz で動作など）が模擬出来ないことは課題と考えている。

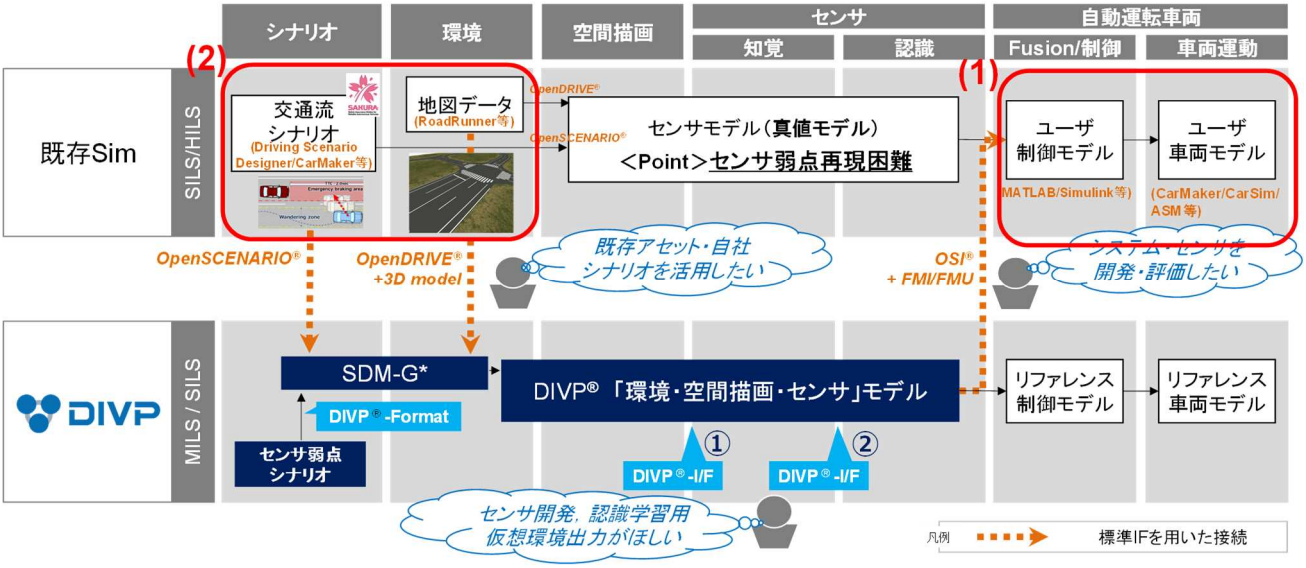
また、ミリ波レーダの認識出力 IF に不足の物標分類とレーン境界座標の真値対応については、2022 年度での対応を検討する。DIVP®のミリ波認識モデルは開発中であるため、ミリ波認識モデルを含め、フュージョンを機能させた検証を 2022 年度に検討していく。

Table 62　連携シミュレーション連携課題と対策一覧表

課題分類	課題内容	対応
センサ I/F	DIVP®のミリ波レーダ認識出力 I/F に物標分類（classification）がない	物標分類を IF に追加（FY22 実装計画）
シナリオ・真値	レーン境界座標がとれない。DIVP®では（現状）本真値未サポート	レーンの真値サポート（FY22 実装計画）
Co-Sim 同期	複数の入力メッセージがある場合（カメラ+ミリ波など）、全てのメッセージを受信するまで待つロジックの実装が必要	DIVP®V0.10 より同期機能実装済
Co-Sim 同期	Co-Simulation のため DIVP®出力の受信ブロックで同期待ちロジックの実装が必要	DIVP®V0.10 より同期機能実装済
モデル高速化	カメラ空間描画モデル、カメラ知覚モデルがボトルネックになっており、シミュレーション速度が遅い	・DIVP®V0.10 より GPU の並列処理機能実装済 ・目的に応じた縮退モデルの検討 ・目的に応じた高速化の為の設定ガイドライン（カメラ空間描画のサンプリング回数や画素数など）の検討
マルチサンプリング	今回の Fusion リファレンスモデルとの接続では課題とならなかったが、各センサモデルの動作周波数違い（例、カメラ 30Hz、ミリ波 20Hz で動作など）が模擬出来ないことは課題と考える	マルチサンプリング機能の実装（FY22 における DIVP®V0.11 で実装予定）

出所：学校法人幾徳学園　神奈川工科大学

(2)ユーザシナリオ・環境モデル接続



出所:学校法人幾徳学園　神奈川工科大学

Figure 174 目的に応じたシミュレーション類型の整理

■概要

ユーザのシナリオ・環境モデル(アセット)の流用検討を実施。本検討の目的と評価項目を以下に示す。

Table 63 シナリオ・環境モデル(アセット)の流用検討評価項目

No	目的	評価項目
1	ユーザのシナリオが流用できること	OpenScenario が DIVP®で流用できること
2	ユーザの道路情報が流用できること	OpenDrive が DIVP®で流用できること
3	ユーザのマップの 3D Model が流用できること	3D Model(マップ)が DIVP®で流用できること
4	ユーザのオブジェクトの 3D Model が流用できること	3D Model(オブジェクト)が DIVP®で流用できること。 DIVP®の物性情報を適用できること

(2)-1:OpenSCENARIO/OpenDRIVVE のデータの接続性検討

【評価項目】

本検討項目である OpenScenario/OpenDrive の流用について、評価対象(Scope)を以下に示す。

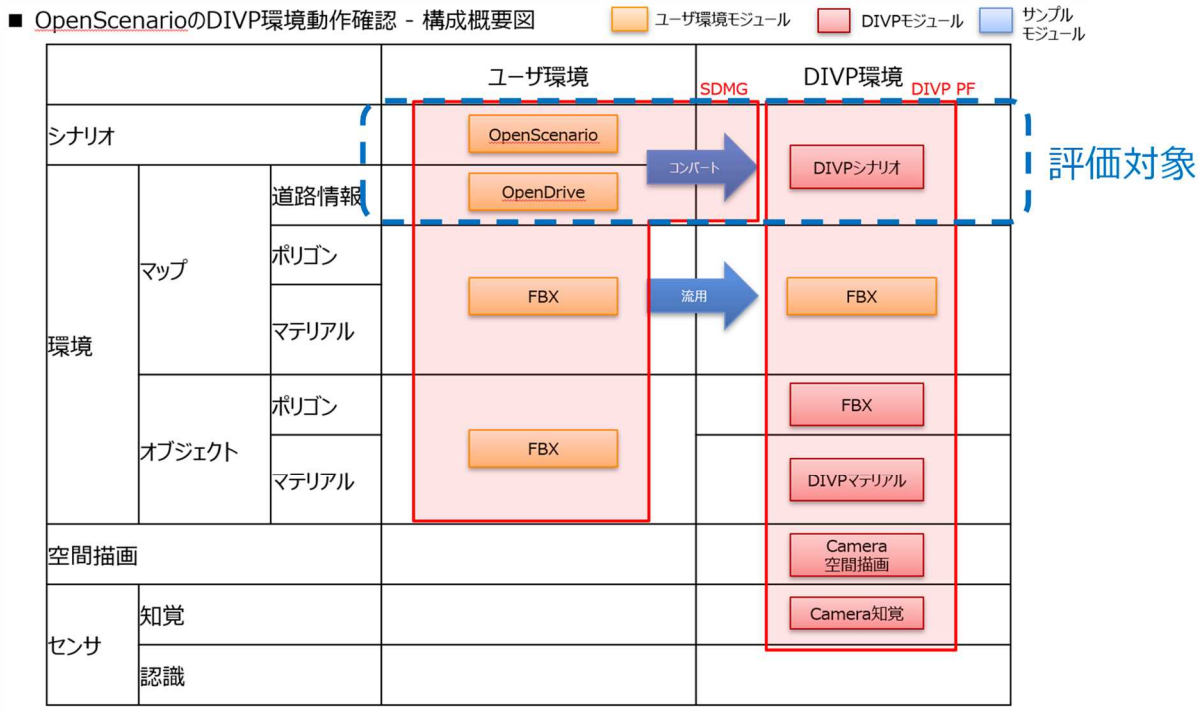
Table 64 シナリオ・環境モデル(アセット)の流用検討評価項目

No	評価項目	対象
1	OpenScenario が DIVP®で流用できること	○
2	OpenDrive が DIVP®で流用できること	○
3	3D Model(マップ)が DIVP®で流用できること	
4	3D Model(オブジェクト)が DIVP®で流用できること DIVP®の物性情報を適用できること	

出所:学校法人幾徳学園　神奈川工科大学

【評価方法】

OpenSCENARIO/OpenDRIVVE データを SDM-Generator にインポートし、そのシナリオを DIVP®-PF で動作することを確認する。



出所:学校法人幾徳学園　神奈川工科大学

Figure 175 OpenSCENARIO/OpenDRIVVE データの Scope

【評価方法】

OpenScenario の正解の振る舞いと SDMG のシナリオ実行との振る舞いを比較する。

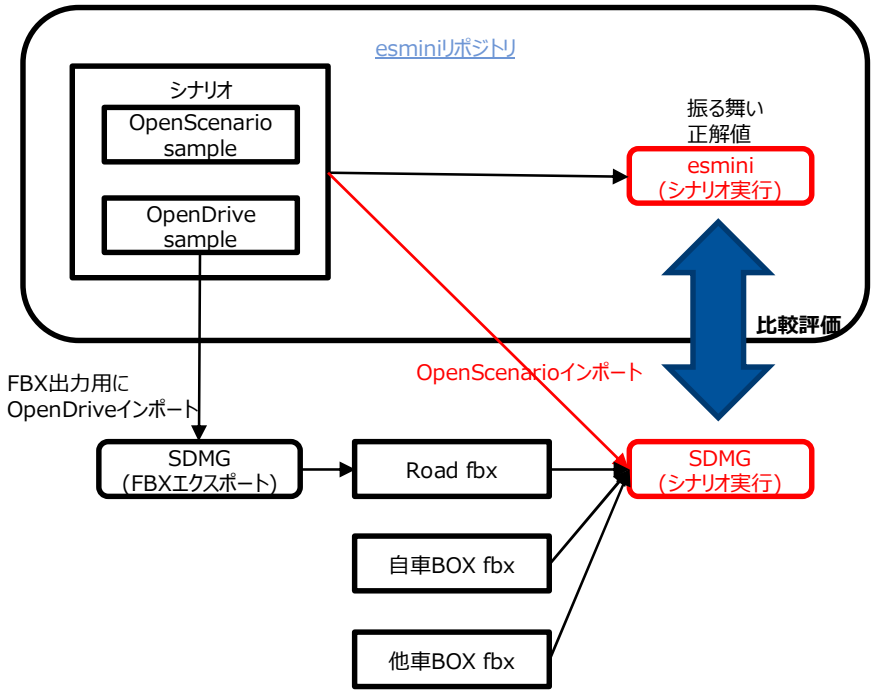
正解の振る舞いとして OpenScenario ビューアとして代表的な esmini を使用する。(SAKURA Project でも使用)

評価対象シナリオは以下の 2 パターンとした。

Tabel65　Camera 評価対象シナリオ

シーン	シナリオ/道路ネットワーク
カットインシーン	SAKURA プロジェクトで作成した OpenSCENARIO/OpenDRIVE のデータ
合流シーン	esmini プロジェクトで公開されている OpenSCENARIO/OpenDRIVE のデータ

出所:学校法人幾徳学園　神奈川工科大学



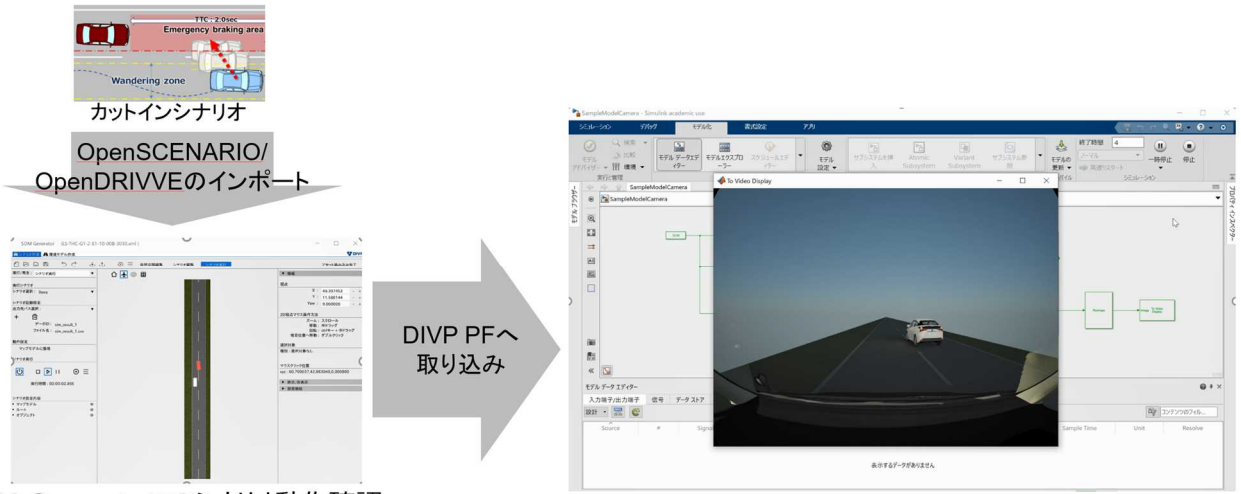
学校法人幾徳学園　神奈川工科大学

Figure 176 OpenSCENARIO/OpenDRIVVE データの流用性検討

【評価結果】

・カットインシーン

以下に、OpenScenario で作成されたカットインシナリオを SDM-Generator にインポート後、DIVP®-PF に取込み、シミュレーションが正常に実行出来ている様子を示す。SAKURA プロジェクトで作成したシナリオの読み込みは特に問題無く、正常にシミュレーション出来ることが確認出来た。



出所：学校法人幾徳学園　神奈川工科大学

Figure 177 OpenSCENARIO/OpenDRIVVE データの接続動作確認

・合流シーン

前提条件として、以下の esmini プロジェクトで提供されているシナリオを使用した。

OpenScenario:esmini/highway_merge.xosc at master · esmini/esmini · GitHub

OpenDrive　　:esmini/soderleden.xodr at master · esmini/esmini · GitHub

また、以下に esmini と SDMG でシナリオ実行の振る舞いを確認している様子を示す。

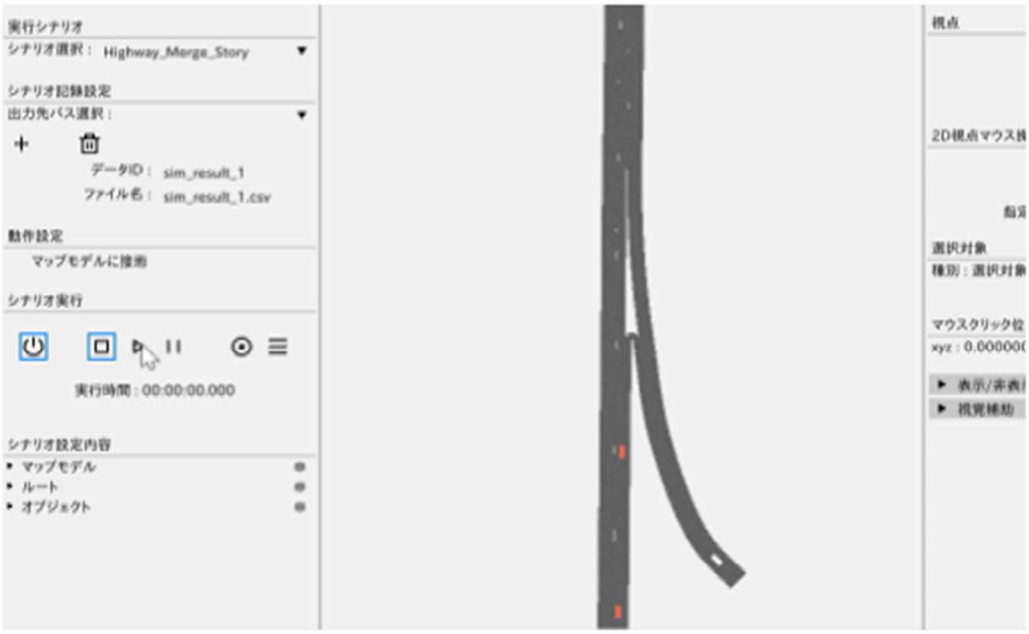
出所：学校法人幾徳学園　神奈川工科大学

Figure 178 OpenSCENARIO/OpenDRIVVE データの接続動作確認 1

シナリオを実行し、振る舞いを確認した結果、**「車の走行方向が逆になる場合があり、本シナリオでは自車・他車ともに期待と逆方向に進む」**ことが分かった。

原因としては、シナリオでは右側通行を期待していたが、SDMG 側の道路設定で左側通行と設定していたのが問題であることが分かった。SDMG 側の道路設定を右側通行に変更してインポートしなおすと動作が改善されたことが確認出来た。

また、上記設定でシナリオ実行をした場合に、SDMG では自車が合流せずに途中で止まる現象を新たに確認した。本現象については、現在解析中であり、今後改善対応を行う方針である。



出所：学校法人幾徳学園　神奈川工科大学

Figure 179 OpenSCENARIO/OpenDRIVVE データの接続動作確認 2

(2)-2:ユーザの 3D マップ/3D オブジェクト(アセット)の流用検討

【評価項目】

本検討項目であるユーザの 3D マップ/3D オブジェクト(アセット)の流用について、評価対象(Scope)を以下に示す。

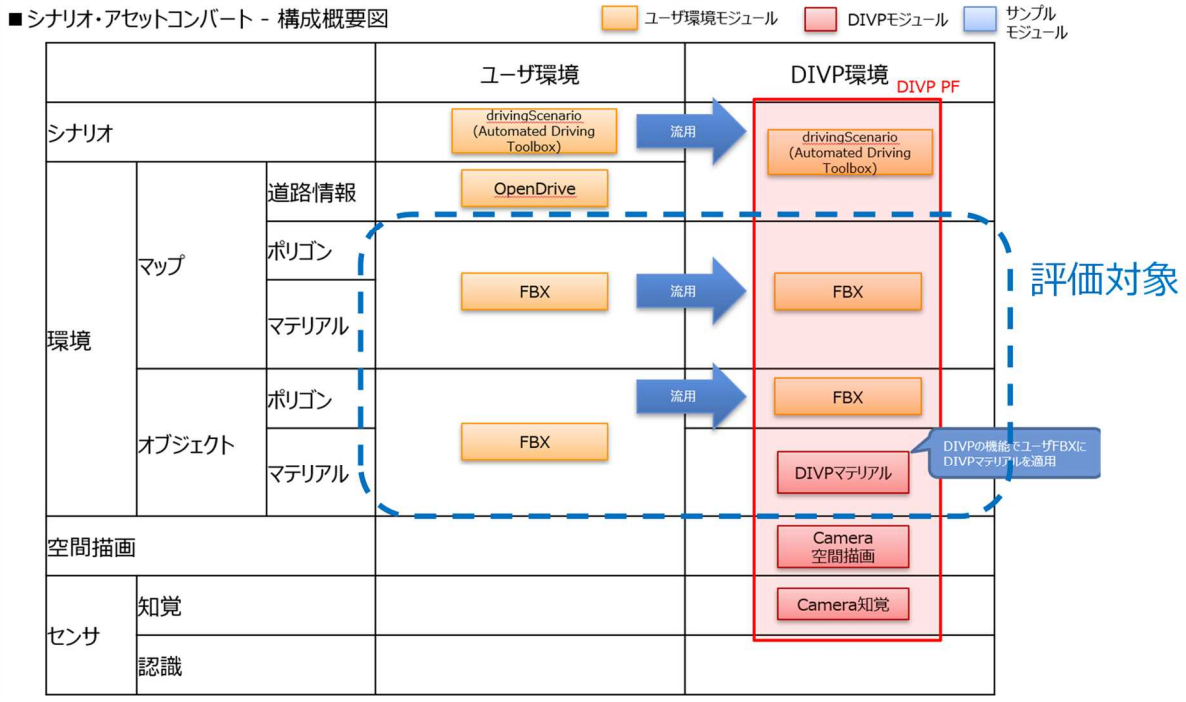
Table 66 シナリオ・環境モデル(アセット)の流用検討評価項目

No	評価項目	対象
1	OpenScenario が DIVP®で流用できること	
2	OpenDrive が DIVP®で流用できること	
3	3D Model(マップ)が DIVP®で流用できること	○
4	3D Model(オブジェクト)が DIVP®で流用できること DIVP®の物性情報を適用できること	○

出所:学校法人幾徳学園 神奈川工科大学

【評価方法】

仮想のユーザを想定し、MathWorks 社の RoadRunner による 3D モデル作成、及び MathWorks 社の Driving Scenario Designer を用いたシナリオ作成を実施する。また作成した MAP/アセットとシナリオは Carla/UE4 にインポートし、仮想のユーザ環境の構築を行う(STEP1)。構築した仮想ユーザ環境をベースに 3D マップ、3D オブジェクト(アセット)の DIVP®への流用可能性の検討を行う(STEP2)。

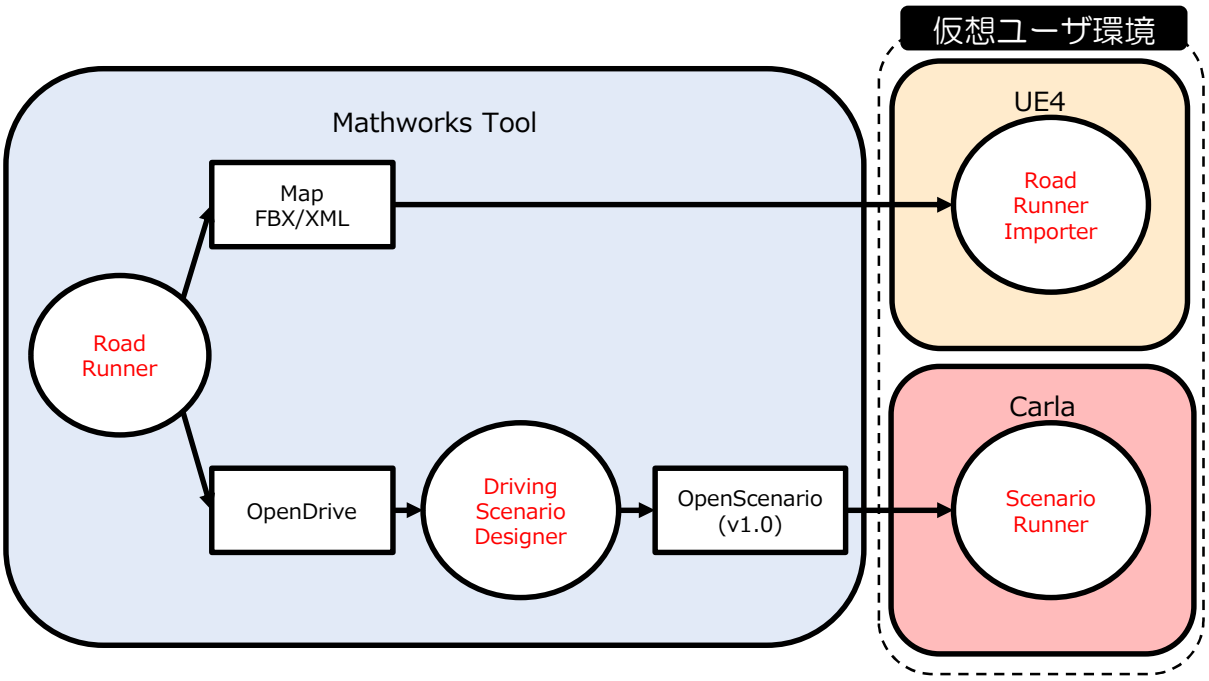


出所:学校法人幾徳学園 神奈川工科大学

Figure 180 OpenSCENARIO/OpenDRIVVE データの Scope

【STEP1:仮想ユーザ環境構築】

以下に仮想ユーザ環境の構築フロー、及び使用したツール群一式を示す。



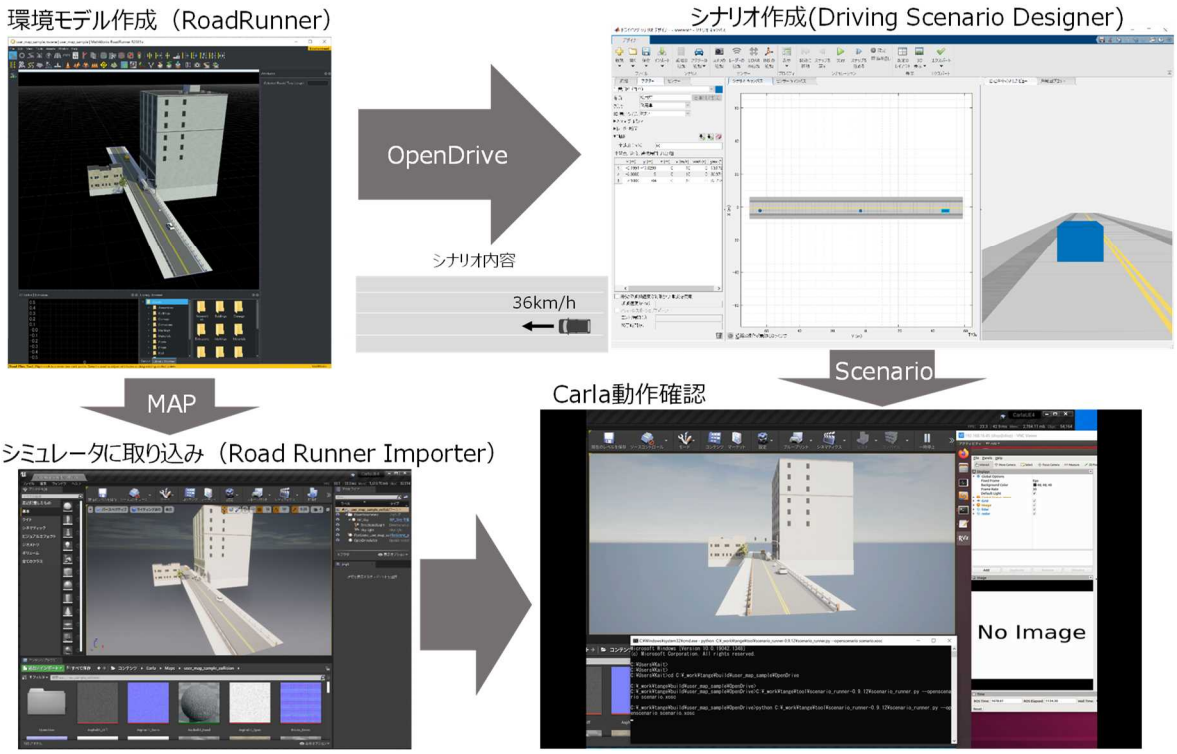
出所:学校法人幾徳学園　神奈川工科大学

Figure 181　仮想ユーザ環境の構築概略

ツール	内容
RoadRunner	Mathworks 製品の自動運転シミュレーション用 Map 作成ツール
Driving Scenario Designer	Mathworks 製品のシナリオ作成ツール。Automated Driving Toolbox 付属
Road Runner Importer	Mathworks が提供する RoadRunner からエクスポートしたアセットを UE4 へインポートするための UE4 プラグイン
Scenario Runner	Carla が提供する OpenScenario を読み込んで自車・他車を動作させるためのツール

出所:学校法人幾徳学園　神奈川工科大学

また、以下に「STEP1:仮想ユーザ環境構築」の結果を示す。具体的には MathWorks 社の RoadRunner を用いた環境モデル（MAP/アセット）作成から MathWorks 社の Driving Scenario Designer を用いたシナリオ作成を行い、Carla をベースとしたシミュレーション環境を構築した。実際のモデルイメージと構築プロセスイメージを以下に示す。



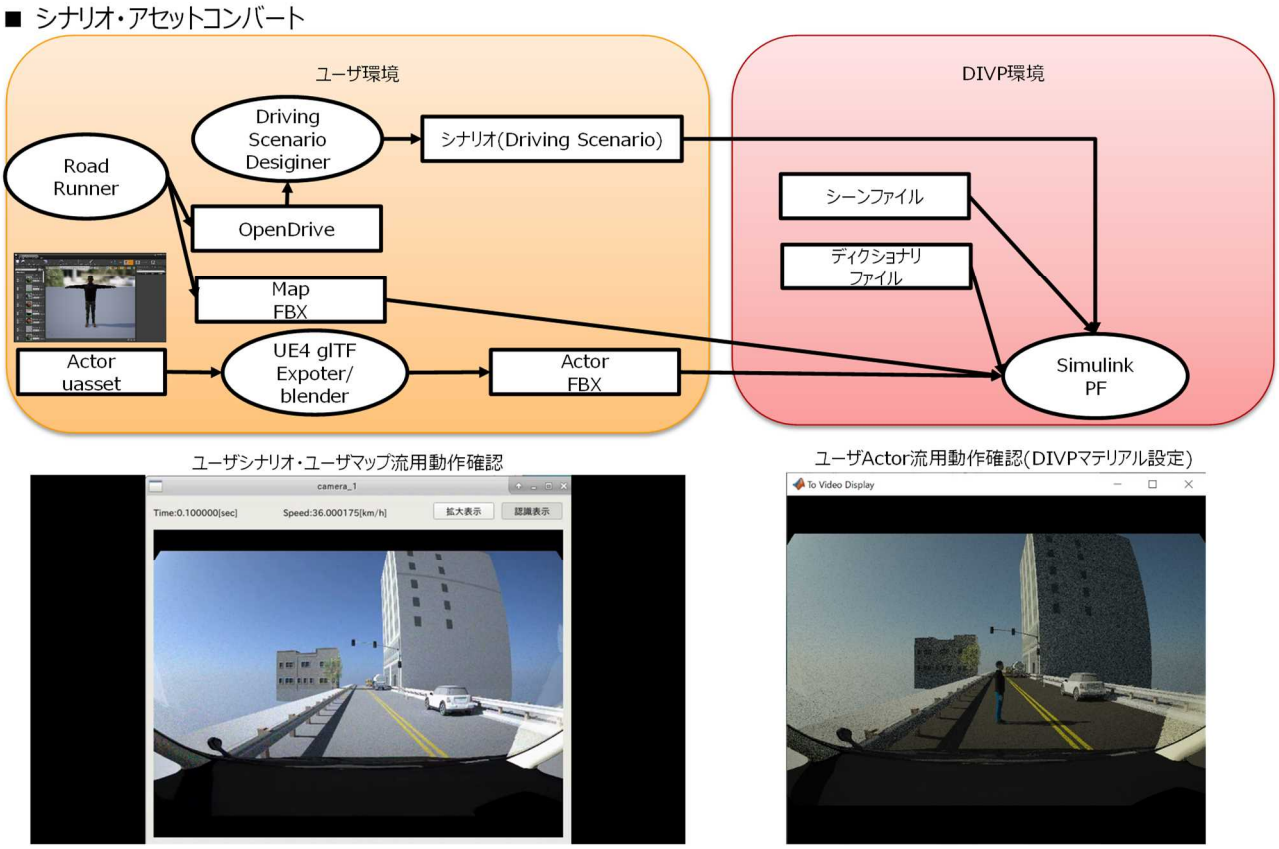
出所：学校法人幾徳学園　神奈川工科大学

Figure182　仮想ユーザ環境の構築プロセス

【STEP2: 3D マップ、3D オブジェクト（アセット）の DIVP®への流用検討結果】

仮想ユーザ環境におけるシナリオ/アセットの DIVP®へのインポート検討結果、及びインポートフローを以下に示す。

シナリオについては、MathWorks 社の Driving Scenario Designer で作成したシナリオの取込が DIVP®-PF で容易に可能であることが確認出来た。また環境モデル（マップ/オブジェクト）についても FBX として DIVP®環境に取り込めることから、ユーザのシナリオ/環境モデル（MAP、アセット）が流用可能であることが分かった。反射率設定について、ユーザアセットには反射率設定が無い為、手動で DIVP®の反射率設定を割り付けることで反射率を加味したシミュレーションが可能であることが確認出来た。



出所：学校法人幾徳学園　神奈川工科大学

Figure183　仮想ユーザシナリオ/環境の DIVP®への流用フロー

・3D マップ、3D オブジェクト（アセット）のの流用確認

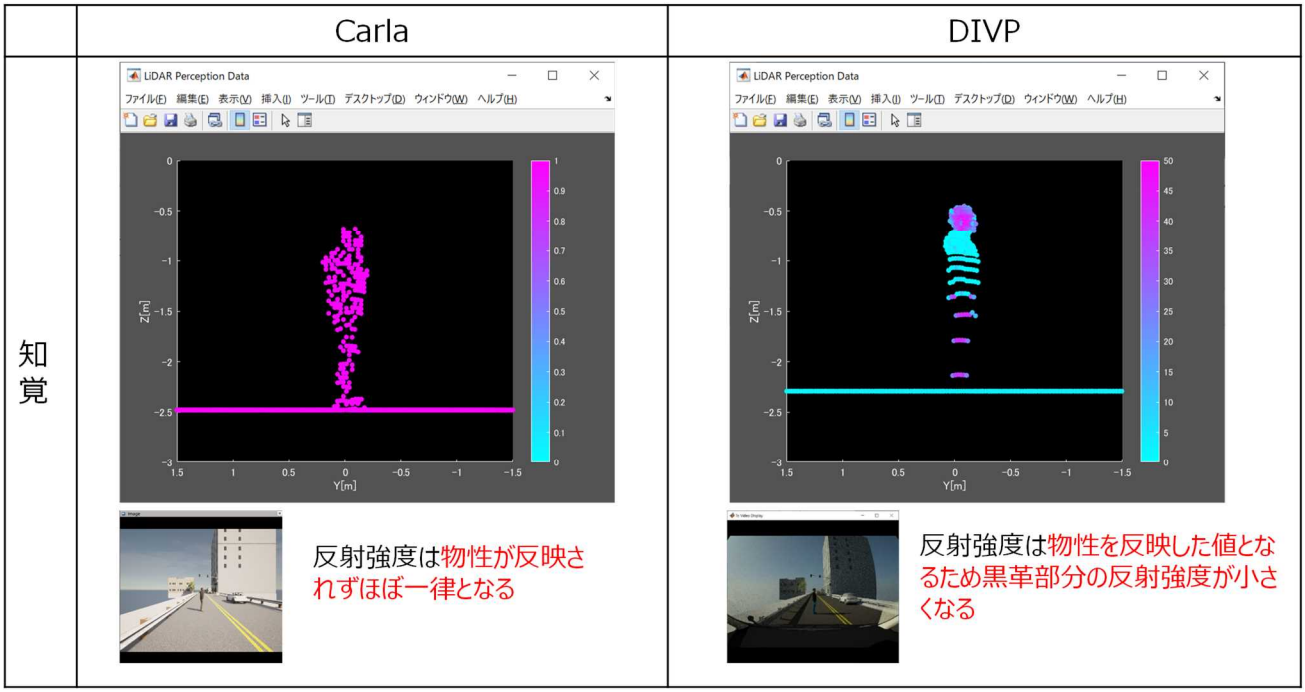
カメラ/LiDAR モデルを用いて、DIVP®でアセット流用が出来ているかシミュレーション評価を行った。

実施内容としては、自車の前方に黒革歩行者を配置し、自車と黒革歩行者それぞれ停止状態で LiDAR モデルシミュレーション、計測を実施した。以下にシミュレーションイメージを示す。

出所：学校法人幾徳学園　神奈川工科大学

Figure184　LiDAR シミュレーションシナリオ

上記シナリオにおける、Carla と DIVP®シミュレーションの LiDAR 知覚出力結果を以下に示す。DIVP®では物性を考慮したシミュレーションになっているため、黒革部分の反射強度が小さく、精緻なシミュレーションが出来ているのに対し、Carla では物性が反映されていない為、反射強度は一律となる結果を得ることが出来た。



出所：学校法人幾徳学園　神奈川工科大学

Figure185　LiDAR シミュレーション結果比較（Carla VS DIVP®）

■仮想ユーザシナリオ・環境モデル流用検討まとめ

・現状カメラ、LiDAR についてはクリティカルな課題はなし。Radar は継続調査が必用である。

・Carla アセットを DIVP®で流用する際に、UE4 の FBX エクスポータを使用するとテクスチャが外れる為、UE4 glTF Expoter で対応が必用

・Carla アセットの歩行者のポーズが手を広げた状態がデフォルトだったため、手を閉じた状態に FBX を加工して対応（手順 1：ボーンの位置を修正してポーズを変更、手順 2：ポーズをメッシュに反映）

Table 67　アセット流用確認項目

項目		ユーザシミュレータ環境(Carla)			DIVP(SimulinkPF)		
		Camera	LiDAR	Radar	Camera	LiDAR	Radar
シナリオ	drivingScenario object	-			○		
	OpenScenario	○			-		
環境モデル	RoadRunner asset	○	○	未確認	○	○	未確認
	Carla asset	-	-	-	○	○	未確認

出所：学校法人幾徳学園　神奈川工科大学

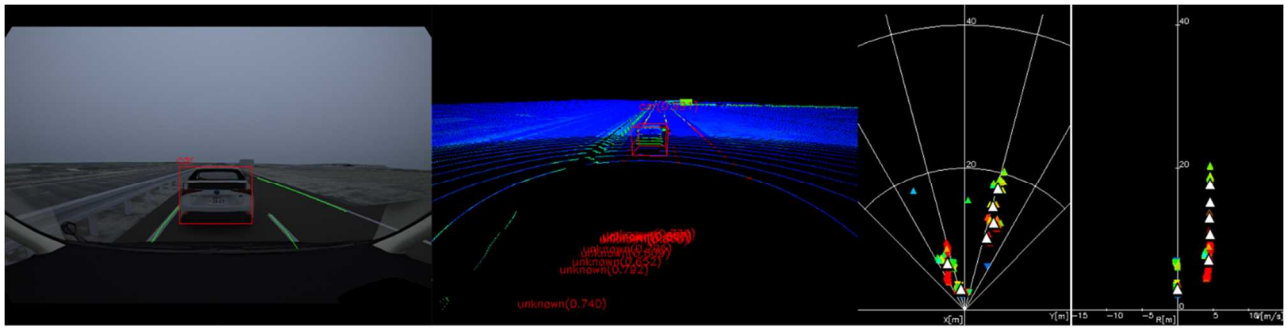
⑥ 統合評価

（ア）マルチ GPU による計算速度比較

センサシミュレーションの計算速度向上を目的に、DIVP®v0.10.0 より各センサモデルのシミュレーションを複数台の GPU で並列分散して演算する機能（マルチ GPU 機能）を追加した。有効性の確認として同一の計算機、同一のシミュレーション条件において、マルチ GPU 機能が無い v0.9.0 と計算速度の比較を行った。

シミュレーション条件

DIVP®のサンプルシナリオである J-Town での先行車追従シナリオに対し、すべての設定をデフォルトのまま使用した。本シナリオによるシミュレーション結果と設定詳細を以下に示す。



出所：学校法人幾徳学園　神奈川工科大学

Figure 186　センサシミュレーション結果

Table 68　主要な設定一覧

項目	設定値
フレームレート	10 fps
使用センサ	カメラ x1、 LiDAR x1、 ミリ波 x1 各認識モデルも使用
天候	11 時　曇り
カメラパストレース数	100 回/pixel
カメラ解像度	2896x1876
LiDAR パストレース数	約 230,000 回/frame
ミリ波パストレース数	3,600 回/frame

出所：学校法人幾徳学園　神奈川工科大学

計算機スペック

計算機は GPU を 2 枚搭載した筐体、GPU を 8 枚搭載した筐体の 2 種類を比較した。使用した計算機の主要なスペックを以下に示す。

Table 69 計算機スペック

項目	GPU2 枚	GPU8 枚
CPU	Intel Xeon Gold 6132 x2	Intel Xeon Gold 6154 x2
メモリ	DDR4 768GB	DDR4 192GB
GPU	NVIDIA RTX6000 x2	NVIDIA RTX8000 x8

出所:学校法人幾徳学園 神奈川工科大学

検証結果

シングル GPU のみで演算する v0.9.0 とマルチ GPU で演算可能な v0.10.0 で上記のシミュレーションを行った演算速度を以下に示す。マルチ GPU 機能による改善が GPU2 枚搭載機:1.78 倍速、GPU8 枚搭載機:3.31 倍速となった。シングル GPU に対し、8 枚のマルチ GPU ではレイトレースなどの GPU 処理が 7 倍ほどになると予想できるが半分ほどの速度向上にとどまっている。これはフレームごとの車両位置更新や大容量データの通信など、マルチ GPU に対応していない処理の割合が大きいことが要因と考えられる。今後は、処理ごとの処理時間を解析することでより効率的な速度向上に取り組む。

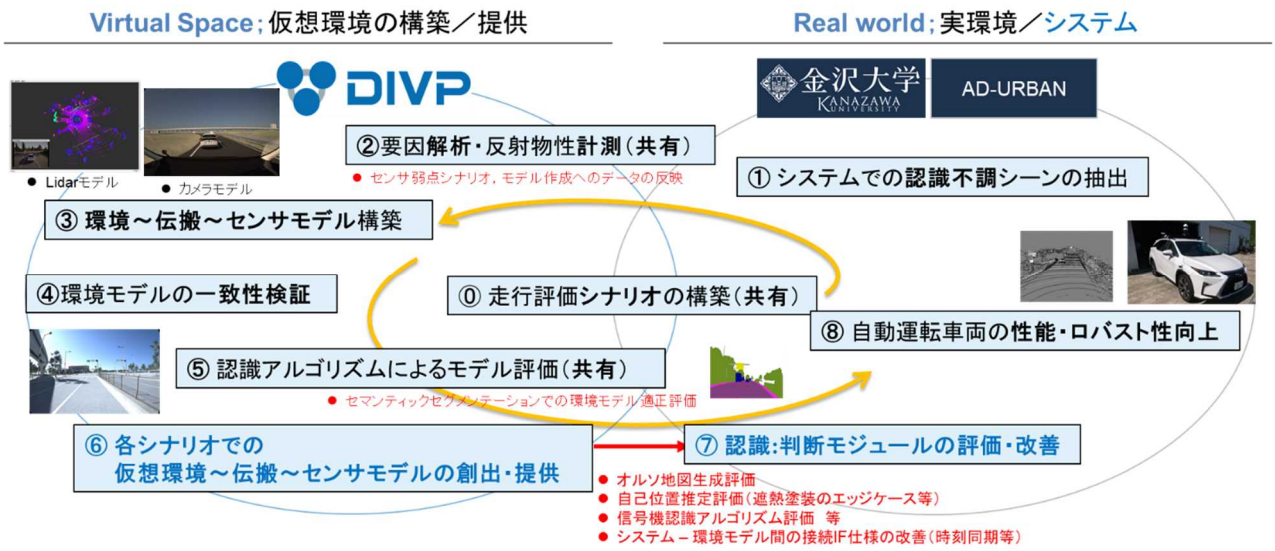
Table 70 計算機スペック

DIVP®バージョン	GPU2 枚(実時間比)	GPU8 枚(実時間比)
v0.9.0	50sec/frame (500 倍)	43sec/frame (430 倍)
v0.10.0	28sec/frame (280 倍)	13sec/frame (130 倍)
速度向上	x1.78	x3.31

出所:学校法人幾徳学園 神奈川工科大学

AD-URBAN 連携

SIP 事業内での連携の一環として「自動運転技術(レベル 3、4)に必要な認識技術等の研究」プロジェクト(以下、AD-URBAN)との研究連携を推進した。AD-URBAN プロジェクトでは、市街地での Level4 相当の自動運転車の認識・判断技術を構築している。また、こうした自動運転技術を通して、市街地での自動運転に必要となる道路設備および通信設備等のインフラの見極めを行っている。本連携活動では、下図に示すようなシステムでの認識不調シーンの共有、不調シーンを再現可能な Sim 環境の構築、環境モデルの一致性検証、システムのロバスト性評価というフローに基づき実施した。



出所：学校法人幾徳学園　神奈川工科大学、AD-URBAN

Figure 187　DIVP®, AD-URBAN プロジェクトの研究連携概要

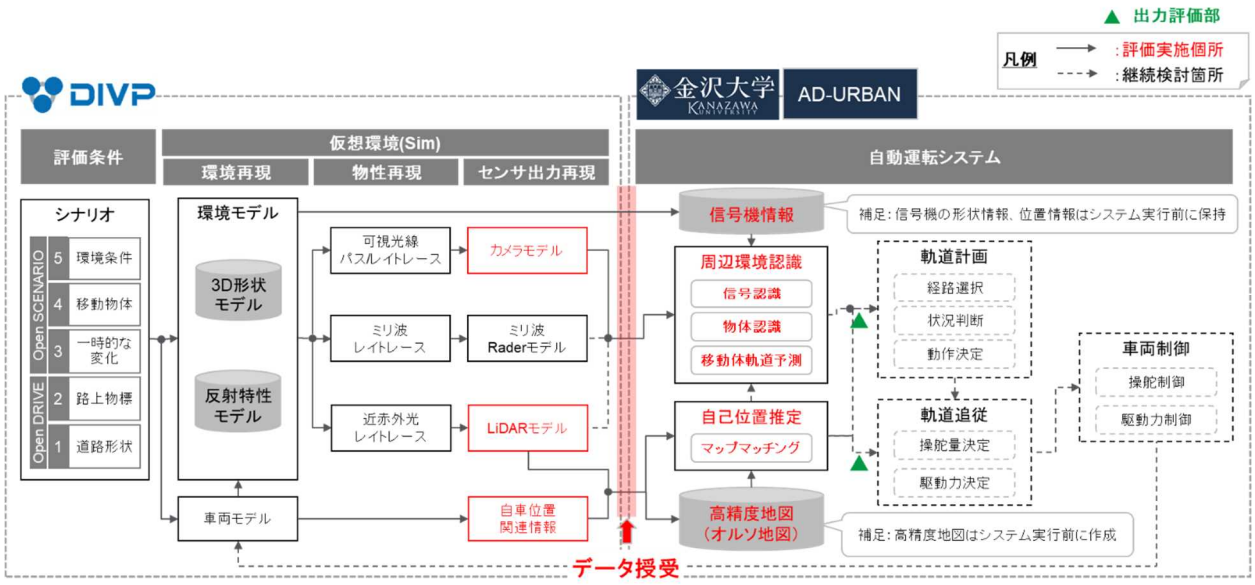
各検証プロセスの詳細を下表に示す。

Table 71　検証プロセス詳細

項番	説明
0	システムから実車評価の課題を提供してもらい優先的なセンサ弱点シナリオとして共有
1	システムでの認識不調シーンの抽出
2	要因解析および反射物性計測によるセンサ弱点シナリオおよび仮想環境モデルへの反映
3	環境～伝搬～センサモデルの構築
4	環境モデルの一致性検証
5	セマンティック・セグメンテーション等の認識アルゴリズムによるモデル適正評価
6	各センサ弱点シナリオでの環境～伝搬～センサモデル結果の提供
7	認識・判断モジュールの評価および改善
8	自動運転車両の性能およびロバスト性評価

出所：学校法人幾徳学園　神奈川工科大学

FY2021 では DIVP®仮想環境と AD-URBAN 自動運転システムの統合環境を構築し、Open Loop 評価を実施した。本統合環境は下図のようなシステム構成となっており、DIVP®のシナリオ～環境～伝搬～センサモデルの出力結果を、AD-URBAN 自動運転システムの認識モデルに接続している。AD-URBAN 自動運転システムでは高精度自己位置推定技術、信号機認識技術、遠距離の物体検知技術、交通参加者の行動予測推定とそれに基づくパスプランニング技術等の開発を行っている。FY2021 では高精度自己位置推定機能、信号機認識機能、遠距離の物体検知機能の評価を実施した。



出所:学校法人幾徳学園　神奈川工科大学、AD-URBAN

Figure 188　DIVP®仮想環境と AD-URBAN 自動運転システムの統合環境概要

評価スケジュールおよび評価シナリオを下図に示す。

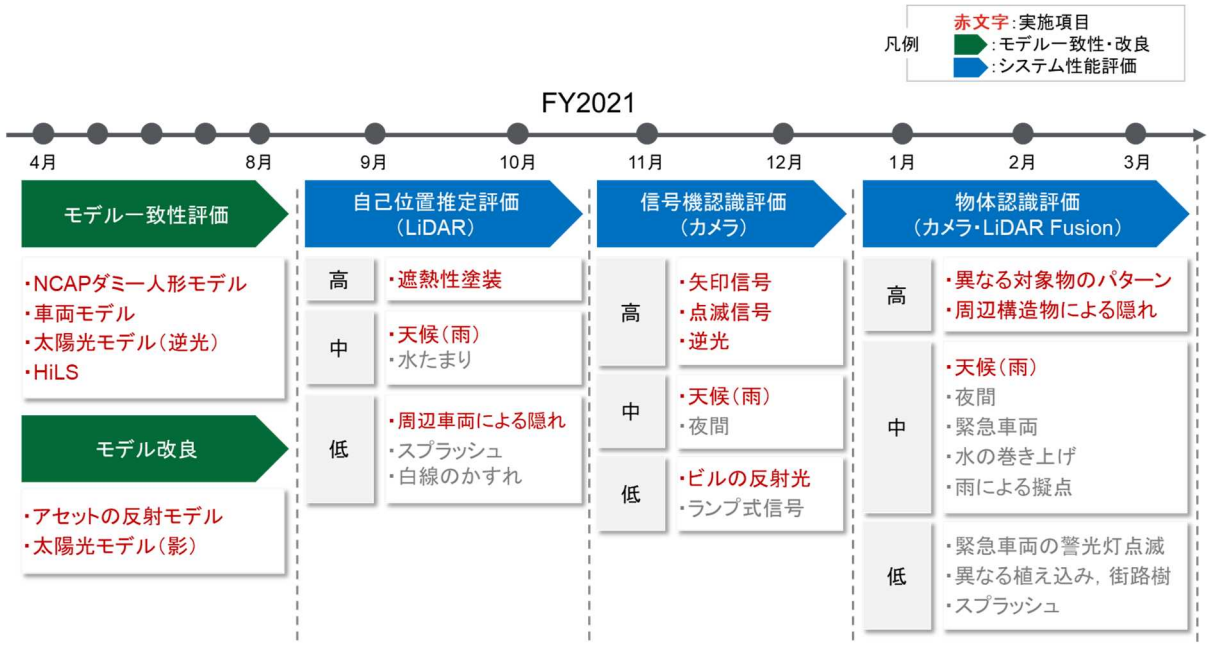
FY2021 の 4 月～8 月は DIVP®のモデル一致性評価およびモデル改良を実施した。評価対象は、NCAP ダミー人形モデル、車両モデル、太陽光モデル、FY2020 で構築したカメラ HiLS(Hardware-in-the-loop Simulation)である。一致性評価を通して、各アセットの反射モデルおよび太陽光モデルを改良した。

9 月・10 月は LIDAR および GNSS/INS を用いた自己位置推定評価を実施した。評価内容としては、遮熱性塗装への塗り替えや、降雨による路面濡れ、周辺車両による白線隠れ発生時の自己位置の精度評価である。

11 月・12 月はカメラを用いた信号機認識評価を実施した。評価内容としては、矢印灯や逆光、降雨によるフロントガラスへの雨滴付着、ビル反射発生時の信号機の点灯状態の認識評価である。

1 月～3 月はカメラと LiDAR の Fusion 技術を用いた物体認識評価を実施した。評価内容としては、大型・特殊車両等の対象物、周辺構造物による隠れ、降雨による路面濡れおよびフロントガラスへの雨滴付着発生条時のターゲットまでの観測距離および認識精度を評価した。

FY2021 ではすでに DIVP®でモデル化完了乃至評価実施期間内にモデル化されたものに対して、センサ弱点シナリオに優先順位を付けて評価を実施した。(下図赤文字箇所)

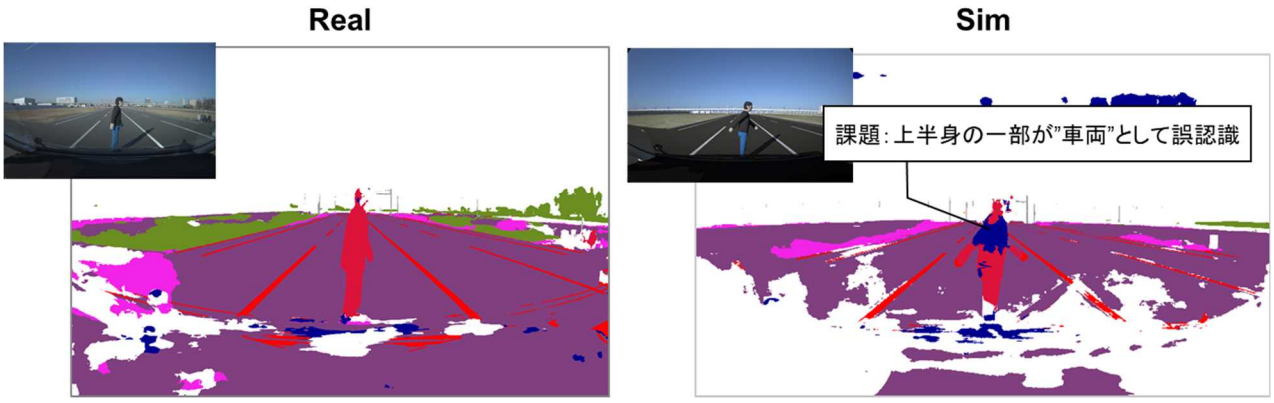


出所：学校法人幾徳学園　神奈川工科大学、AD-URBAN

Figure 189　FY2021 実施スケジュールと評価シナリオ

・モデル一致性評価（NCAP ダミー人形モデル）

AD-URBAN ではディープラーニングを活用したセマンティック・セグメンテーションの開発を行っており、セグメンテーション結果に基づくDIVP®モデル適正評価を実施した。本評価ではテストコース（JARI J-town）での NCAP ダミー人形横断シナリオを評価した。下図に実機カメラで撮影した画像と Sim 画像それぞれのセマンティック・セグメンテーション結果を示す。実機カメラで撮影した画像の場合、頭部の一部は正しく認識できていないものの、上半身および下半身が歩行者として正しく認識（赤色）されていた。一方、Sim 画像の場合、上半身の一部が車両として誤認識（青色）されていた。上半身以外、例えば頭部の一部が正しく認識できていない点や下半身を歩行者として正しく認識（赤色）されていた点については、実機カメラとほぼ同様の傾向が見られた。



出所：学校法人幾徳学園　神奈川工科大学、AD-URBAN

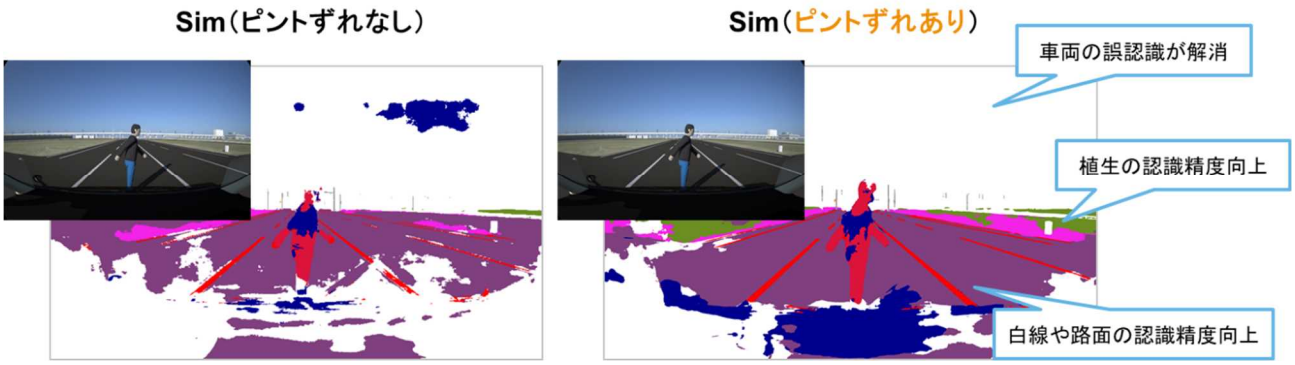
Figure 190　NCAP ダミー人形の認識結果（改善前）

Sim 画像の場合、上半身の一部が車両として誤認識（青色）されていたので、モデルの要素ごとに要因を検証した。その結果を下表に示す。モデル要素としては、光源、反射対象物、センサの 3 つに分類した。光源に関する推定要因としては太陽光の当たり方が考えられ、太陽位置を変更して検証したが、認識結果に変化は見られなかった。反射対象に関する推定要因としては鏡面反射成分、アセットの分解能、アセットの凹凸感が考えられた。これらのうち鏡面反射強度およびテクスチャを変更した時に一致性が向上した。センサに関する推定要因としてはピントのズレ具合が考えられ、ポスト処理としてぼかし処理を入れて検証したが、NCAP ダミー人形の認識結果に改善は見られなかった。ただし、下図に示すように空の車両誤認識が解消され、植生が認識されるようになり、白線や路面の認識精度も向上した。

Table 72　NCAP ダミー人形要因検証結果

モデル要素	推定要因	検証手法	検証結果	要因への関係性
光源	■ 光の当たり方	■ 太陽位置の変更	認識に変化なし	×
反射対象（NCAP 歩行者）	■ 鏡面反射成分	■ 反射強度の変更	*一致性向上*	○
	■ アセット分解能	■ 分解能の変更	一致性低下	×
	■ アセットの凹凸	■ テクスチャの変更	*一致性向上*	○
センサ	■ ピントのズレ具合	■ ぼかし処理を実施	一致性低下	×

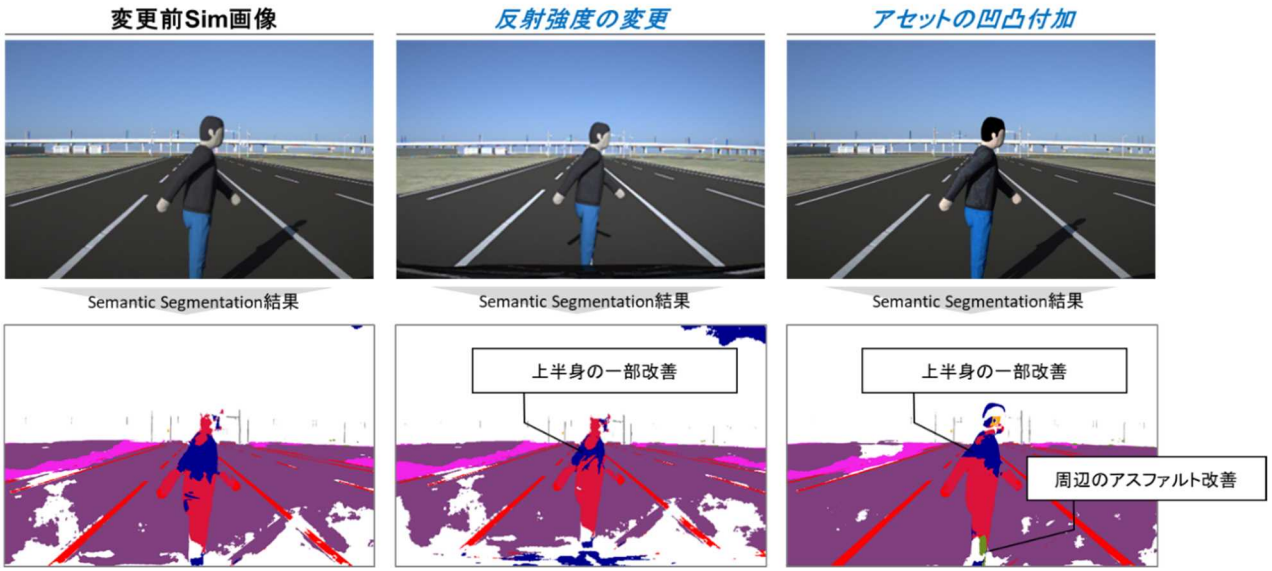
出所：学校法人幾徳学園　神奈川工科大学



出所：学校法人幾徳学園　神奈川工科大学、AD-URBAN

Figure 191　NCAP ダミー人形の認識結果（ピントズレの有無比較）

下図に鏡面反射強度およびテクスチャを変更したケースそれぞれのセマンティック・セグメンテーション結果を示す。上半身が歩行者として認識（赤色）される領域が増え、一致性が向上したがことが分かる。今後は評価指標（どこまで一致していれば良いのか）の具体化議論を進めつつ、一致性向上を図る予定である。

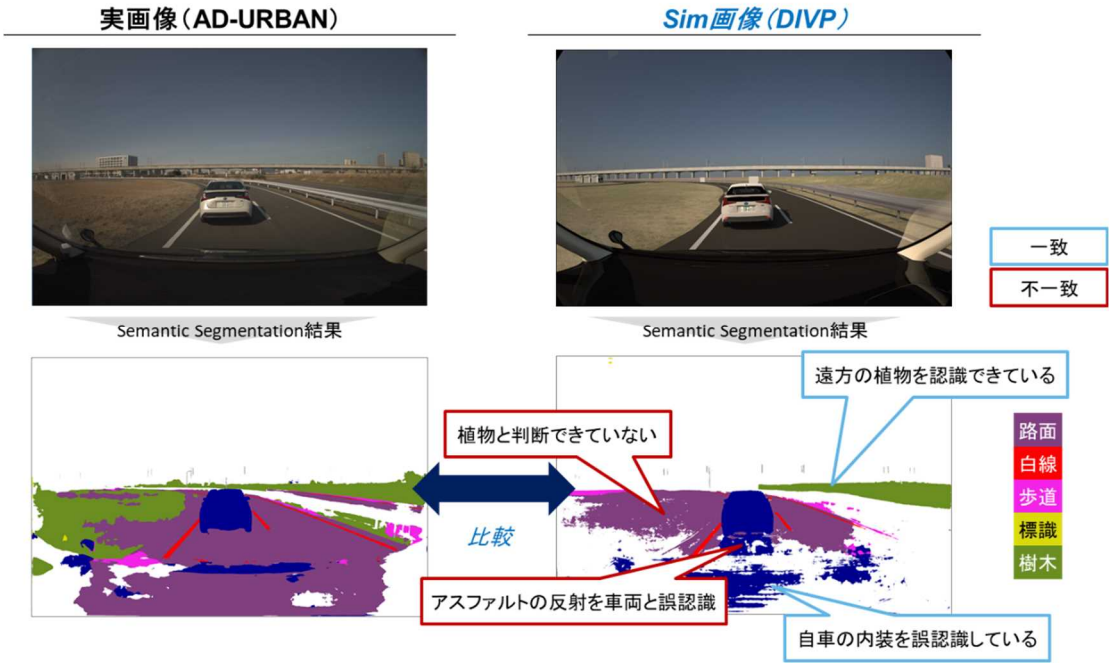


出所：学校法人幾徳学園　神奈川工科大学、AD-URBAN

Figure 192　NCAP ダミー人形の認識結果（改善後）

・モデル一致性評価（車両モデル）

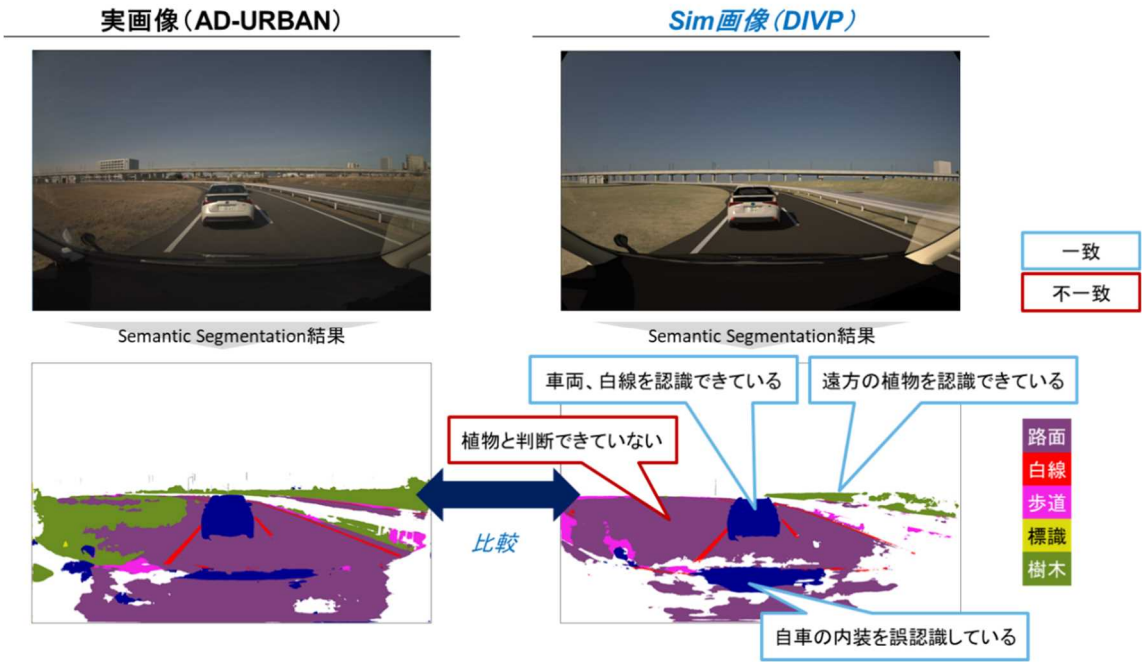
本評価ではテストコース（JARI J-town）での車両離間シナリオを評価した。下図に実機カメラで撮影した画像と Sim 画像それぞれのセマンティック・セグメンテーション結果を示す。実機カメラで撮影した画像の場合、前方の車両を正しく認識（青色）できていた。一方、Sim 画像の場合、前方の車両そのものは正しく認識（青色）できていたが、アスファルトに反射した車両も認識していた。この原因は環境モデルであるアスファルトの鏡面反射強度が実際よりも高く設定されていたためである。



出所：学校法人幾徳学園　神奈川工科大学、AD-URBAN

Figure 193　車両モデルの認識結果（改善前）

アスファルトの鏡面反射強度を見直したケースでのセマンティック・セグメンテーション結果を下図に示す。アスファルトへの映り込みがなくなったため誤認識も解消された。一方、車両以外に着目すると、遠方の植生は正しく認識（緑色）できているが、近傍ではアスファルト（紫色）と誤認識している。この傾向は前項の NCAP ダミー人形評価時にも見られ、カメラセンサのピントずれ処理を入れると改善した。カメラのピントずれのモデル化ついては今後議論予定である。

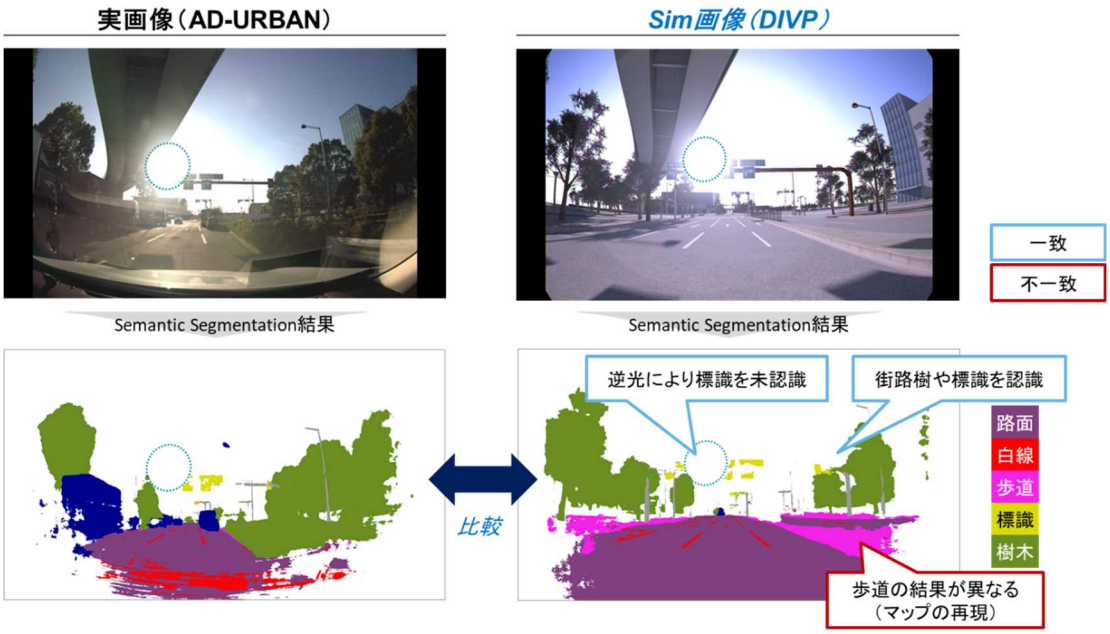


出所：学校法人幾徳学園　神奈川工科大学、AD-URBAN

Figure 194　車両モデルの認識結果（改善後）

・モデル一致性評価（太陽光モデル）

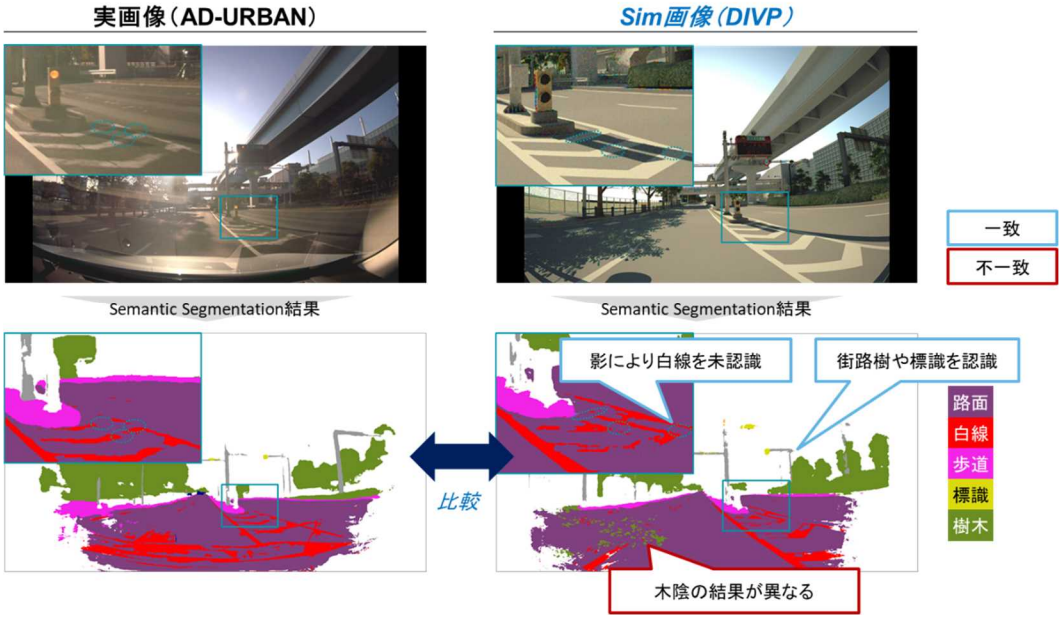
本評価ではお台場での逆光による不調シーンを評価した。下図に実機カメラで撮影した画像と Sim 画像それぞれのセマンティック・セグメンテーション結果を示す。実機カメラで撮影した画像の場合、太陽と道路標識が重なり認識できていない（青枠）。Sim 画像についても同様に、画像が飽和し標識を認識できておらず（青枠）、不調再現できていることが分かる。



出所：学校法人幾徳学園　神奈川工科大学、AD-URBAN

Figure 195　太陽光モデルの認識結果（標識未認識再現）

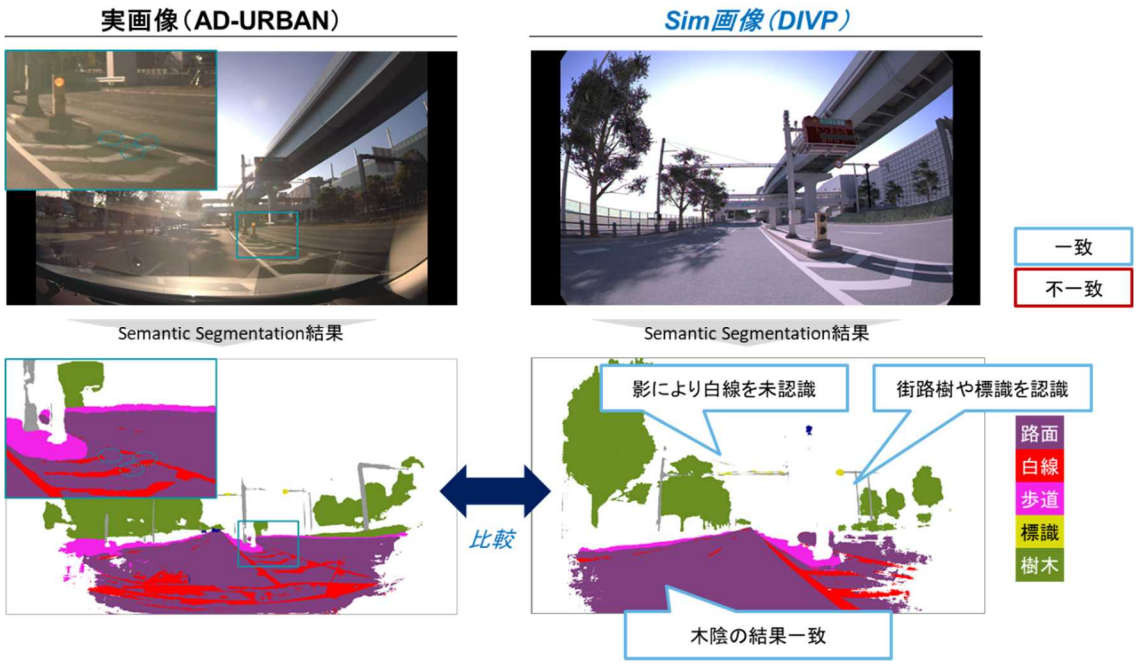
逆光による不調シーンとして、他に影による白線未認識がある。下図に実機カメラで撮影した画像と Sim 画像それぞれのセマンティック・セグメンテーション結果を示す。実機カメラで撮影した画像の場合、周辺構造物の影により白線を認識できていない（青枠）。Sim 画像についても同様に、影による白線とのコントラストが低下し白線を認識できておらず（青枠）、不調再現できていることが分かる。ただし、木陰に着目すると実画像では影のエッヂがぼやけているが、Sim 画像ではエッヂが立っており木陰を植生と誤認識している。この原因は太陽光が正しく設定されておらず、木陰に偽色が発生していたためである。



出所：学校法人幾徳学園　神奈川工科大学、AD-URBAN

Figure 196　太陽光モデルの認識結果（改善前）

太陽光の設定を修正したケースでのセマンティック・セグメンテーション結果を示す。影のエッヂがぼやけ偽色も解消されたため誤認識も解消されたことが分かる。またその他の街路樹や標識等についても正しく再現できていることを確認した。



出所：学校法人幾徳学園　神奈川工科大学、AD-URBAN

Figure 197　太陽光モデルの認識結果（改善後）

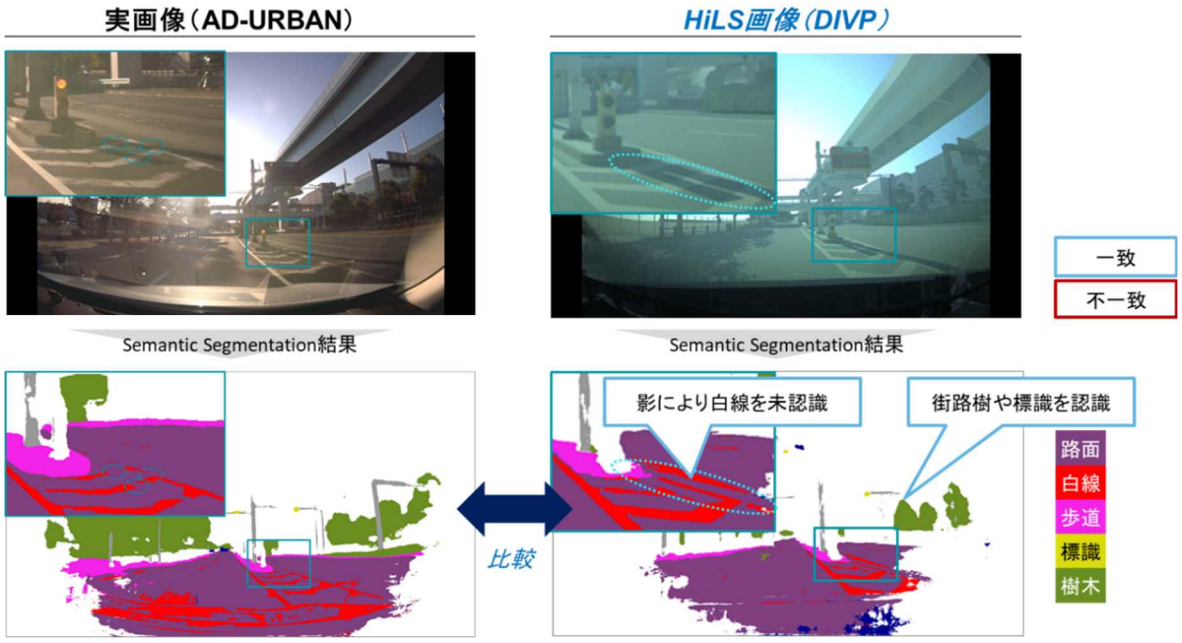
・モデル一致性評価（HiLS）

本評価では FY2020 で構築したカメラ HiLS（Hardware-in-the-loop Simulation）装置を用いて不調シーンを評価した。対象となる不調シーンは前項の周辺構造物の影により白線を未認識と同じである。FY2020 の研究成果である球面スクリーンに投影する映像の歪み補正および輝度補正処理を行い評価した。

出所：学校法人幾徳学園　神奈川工科大学

Figure 198　カメラ HiLS 装置

HiLS 環境でのセマンティック・セグメンテーション結果を示す。周辺構造物の影により白線を未認識が再現できていることが分かる。またその他の街路樹や標識等についても同様に再現できていることを確認した。以上より本 HiLS 装置を用いて影と白線のようなコントラスト起因の不調シーンを実機カメラで評価可能であることが分かった。

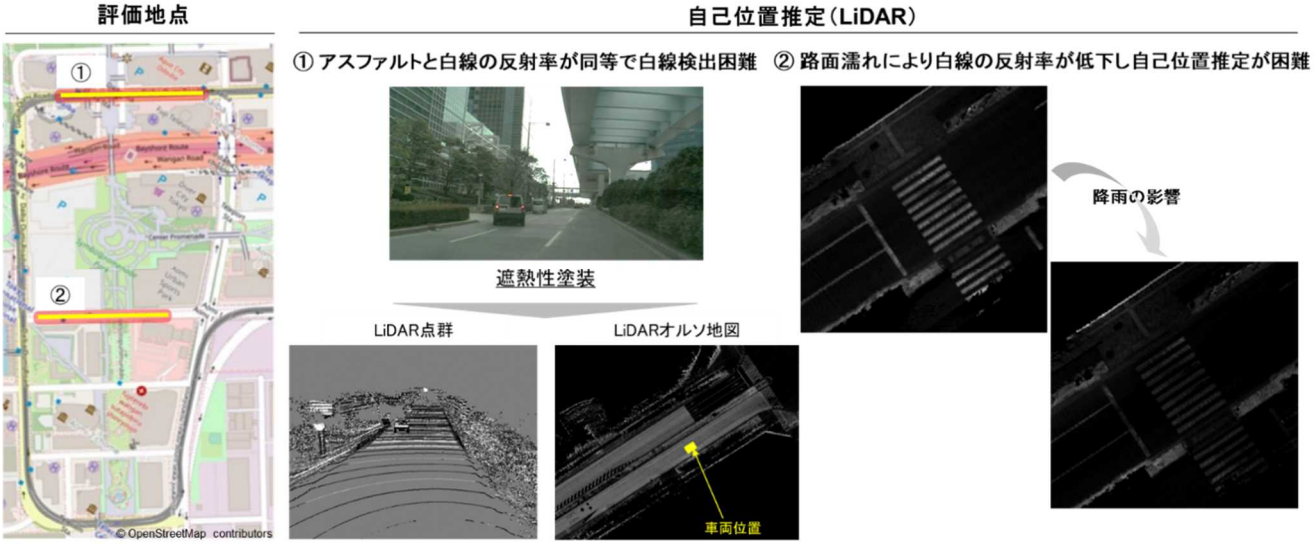


出所：学校法人幾徳学園　神奈川工科大学、AD-URBAN

Figure 199　太陽光モデルの認識結果（HiLS）

・自己位置推定評価（走行シナリオ共有）

本評価では、まずお台場を対象にシステムから実車評価の課題を提供してもらい優先的なセンサ弱点シナリオとして共有した。下図に評価対象エリアおよびセンサ弱点事象を示す。地点①では路面が遮熱性塗装されていることでアスファルト部と白線部の反射率が同等となり白線検出が困難となっている。地点②では降雨で路面が濡れることで、白線の反射率が低下し自己位置推定が困難となっている。

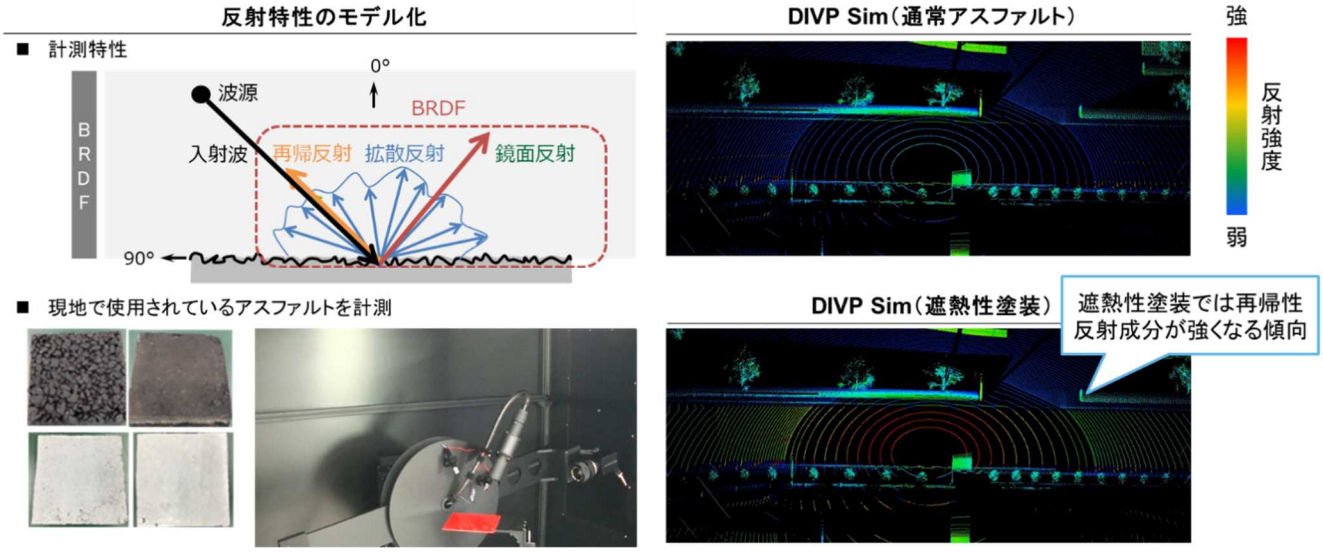


出所：学校法人幾徳学園　神奈川工科大学、AD-URBAN

Figure 200　走行シナリオ共有（自己位置推定評価）

・自己位置推定評価（遮熱性塗装）

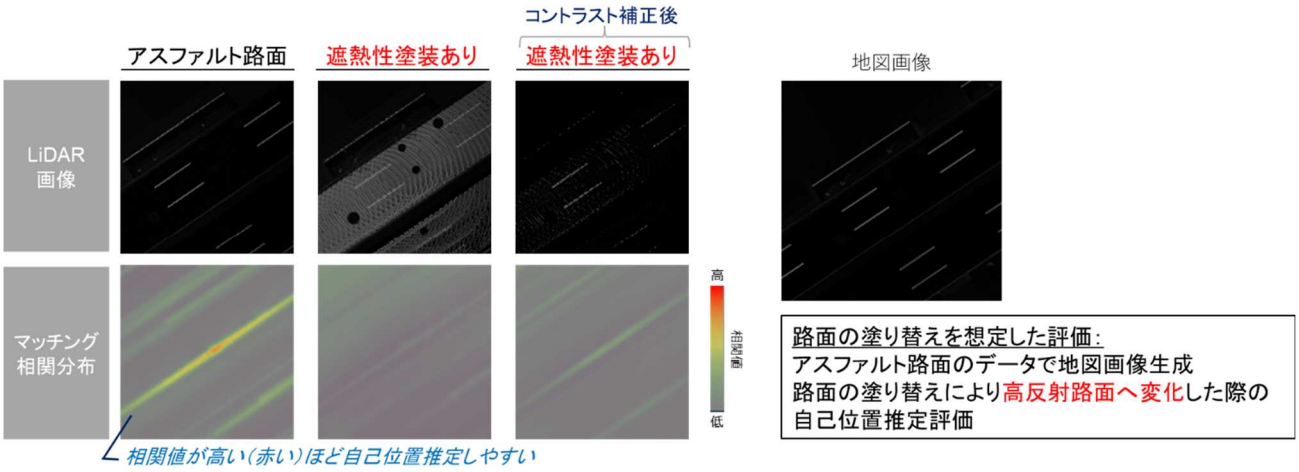
遮熱性塗装路面の反射特性を実験計測に基づきモデル化し、精緻な路面モデルを構築した。下図に実験計測とモデル化の結果を示す。遮熱性塗装では再帰性反射成分が強くなる傾向にあるため、LiDAR 出力結果を見ると反射強度が高く（赤色）なっていることが分かる。



出所：学校法人幾徳学園　神奈川工科大学、SOKEN, INC

Figure 201　遮熱性塗装路面のモデル化

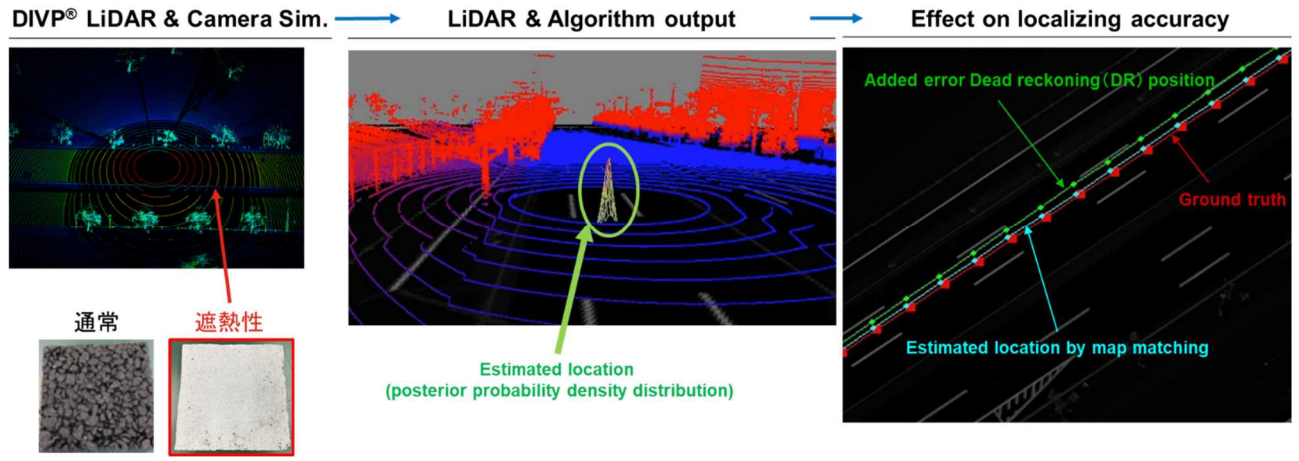
AD-URBAN の自己位置推定機能は、LiDAR データと GNSS/INS データから事前に地図画像（オルソ地図）を生成する必要があり、地図画像と LiDAR 画像を比較して自車位置を特定するシステム（マップマッチング）となっている。遮熱性塗装評価としては、路面の塗り替えを想定した評価を実施した。すなわち、通常アスファルト路面データで地図画像を生成し、その後遮熱性塗装への路面塗り替えが発生した場合の自己位置推定評価を実施した。下図に自己位置推定評価結果を示す。通常アスファルト路面では地図画像と LiDAR 画像をマップマッチングすると、相関値が高い（赤色）結果が得られた。一方、遮熱性塗装に塗り替えた場合、相関分布のピークが非常に小さく、自己位置推定が正しくできていなかった。ただし、実際の自己位置推定ではマップマッチングの前処理としてコントラスト補正を行っており、補正後のマップマッチングの結果、相関値は低下(緑色)したもののピークは検出できており、自己位置推定が正しくできていた。



出所：学校法人幾徳学園　神奈川工科大学、AD-URBAN

Figure 202　地図画像と LiDAR 画像のマップマッチング

下図にコントラスト補正を行った場合の自己位置推定結果を示す。赤線が真値、緑線がデッドレコニング誤差を付加した時の自車位置、青線がデッドレコニング誤差補正後の推定自車位置である。推定位置（青線）が真値（赤線）と概ね一致しており、正しく自己位置推定できていることが分かる。

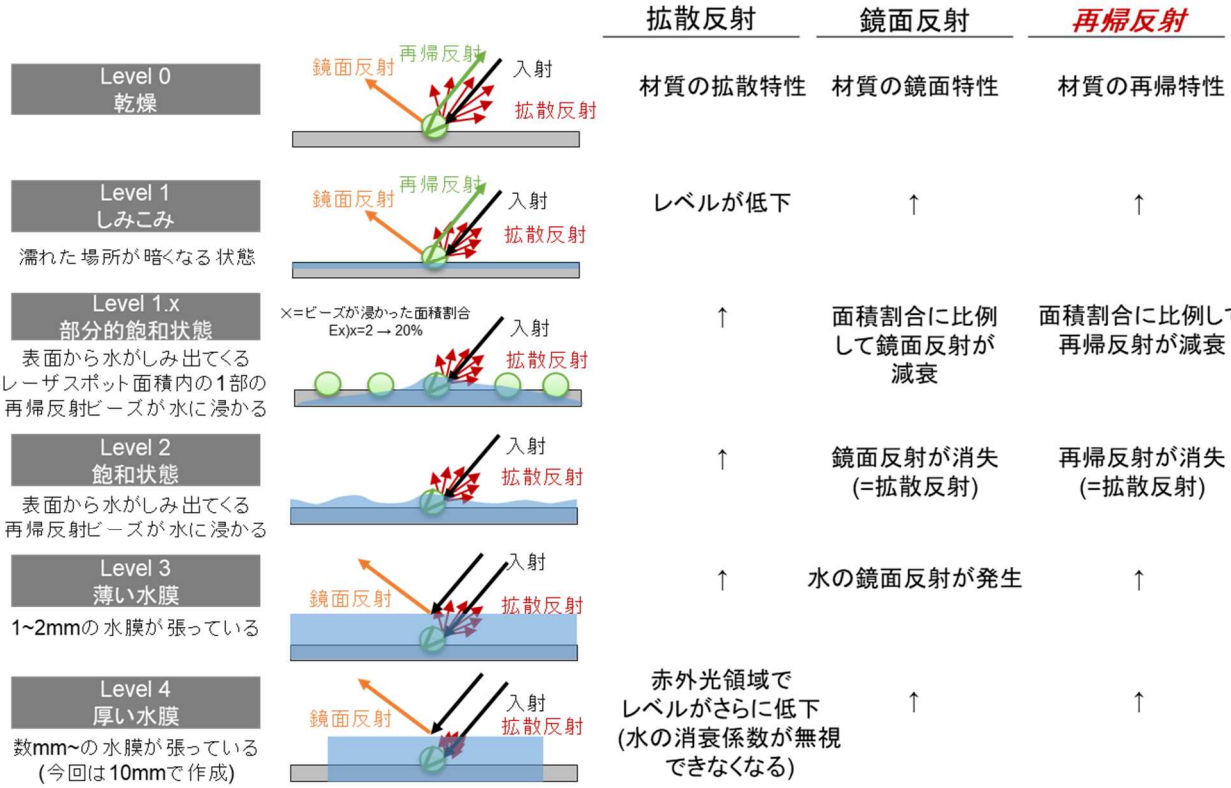


出所：学校法人幾徳学園　神奈川工科大学、AD-URBAN

Figure 203　遮熱性塗装路面の自己位置推定結果

・自己位置推定評価（遮熱性塗装＋路面濡れ）

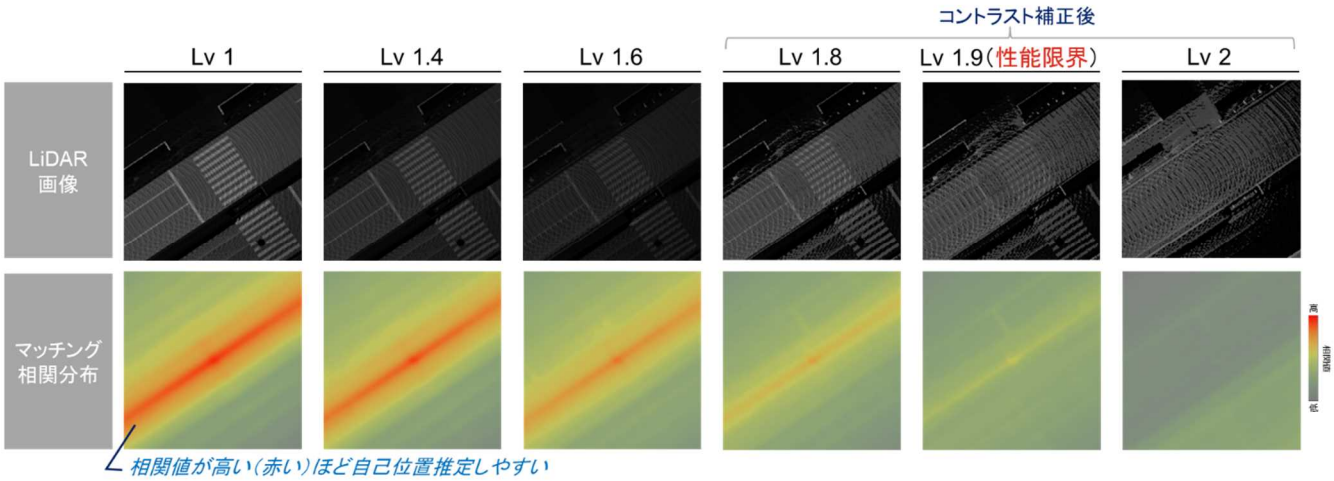
路面の濡れ度合いを反射特性の変化に応じて 5 段階に分類してモデル化した。下図に路面濡れモデルの概要を示す。Lv0 は乾燥状態、Lv1 は雨水がしみこんだ状態、Lv2 は表面から水がしみ出てくる飽和状態、Lv3 は表面に 1～2mm の薄い膜が張った状態、Lv4 は表面に数 mm の厚い膜が張った状態と定義している。自己位置推定機能の性能に対しては、LiDAR センサ原理に基づき再帰性反射成分の強弱による影響が大きいと予想される。



出所：SOKEN, INC

Figure 204　路面濡れモデル

濡れモデルの Lv が上がるにつれてマップマッチングの相関分布のピークが低下していく傾向を確認できた。その結果、遮熱性塗装路面での路面濡れ条件では Lv1 と Lv2 の間に性能限界があることが分かった。Lv1 と Lv2 の間をさらに細かく条件を振り、Lv1.x という形で評価した結果を下図に示す。濡れモデル Lv1 から Lv2 にかけてマップマッチングの相関分布のピークが低下しており、Lv1.9 まではコントラスト補正によりピーク検出できていたが、Lv2 ではコントラスト補正を掛けてもピーク検出できなかった。以上の結果から、遮熱性塗装路面での路面濡れ条件では Lv1.9 相当の路面状態が自己位置推定機能の性能限界であることが判明した。

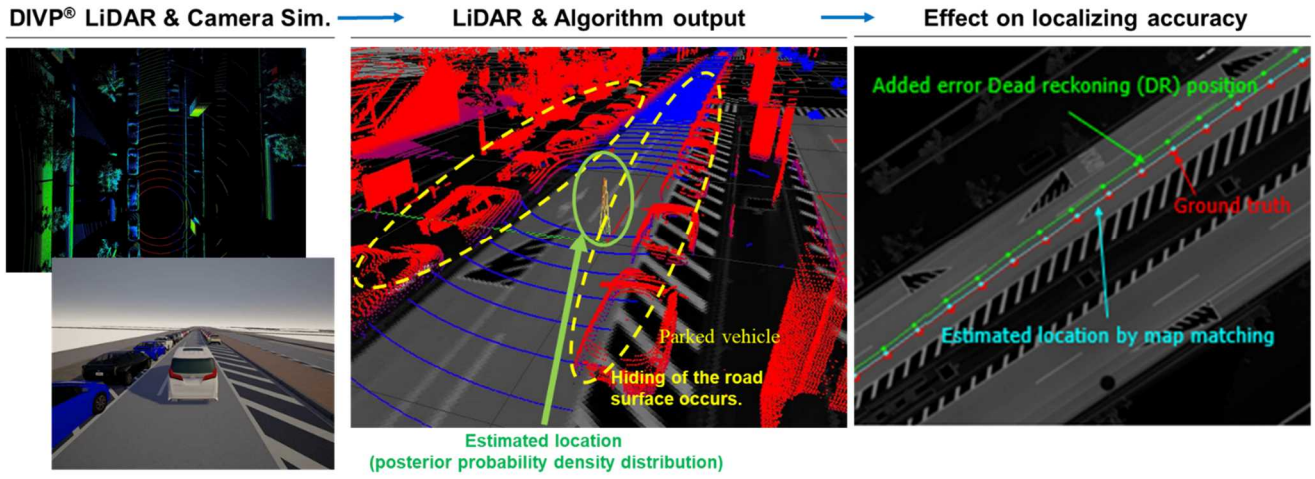


出所:学校法人幾徳学園　神奈川工科大学、AD-URBAN

Figure 205　地図画像と LiDAR 画像のマップマッチング(遮熱性塗装＋路面濡れのケース)

・自己位置推定評価(周辺車両による白線隠れ)

エッジケース条件に対するシステム制御のロバスト性、性能限界の評価事例として、周辺車両による白線隠れ発生条件での自己位置推定評価を実施した。評価条件としては、遮熱性塗装路面において現実では設定困難な悪条件(車列により白線を隠した条件)である。下図に自己位置推定結果を示す。赤線が真値、緑線がデッドレコニング誤差を付加した時の自車位置、青線がデッドレコニング誤差補正後の推定自車位置である。推定位置(青線)が真値(赤線)と概ね一致しており、正しく自己位置推定できていることが分かる。



出所:学校法人幾徳学園　神奈川工科大学、AD-URBAN

Figure 206　周辺車両による白線隠れ発生時の自己位置推定結果

以上、自己位置推定機能としては 3 ケース(遮熱性塗装への塗り替え、降雨による路面濡れ、周辺車両による白線隠れ)の評価を実施した。最初の 2 ケースは物性変化、すなわち、遮熱性塗装や路面濡れによる路面反射率の変化に伴う評価、最後の 1 ケースは交通環境変化に伴う評価となっている。これらのケースは実環境でも十分想定され得るが再現性の担保が非常に難しい。こうした点において、路面等の物理特性を計測・モデル

化した DIVP®のような Sim 活用により特定条件に絞った性能限界が探索可能となっており、アルゴリズム開発の評価基準や、センサ・アルゴリズム開発の効率化が期待できる。

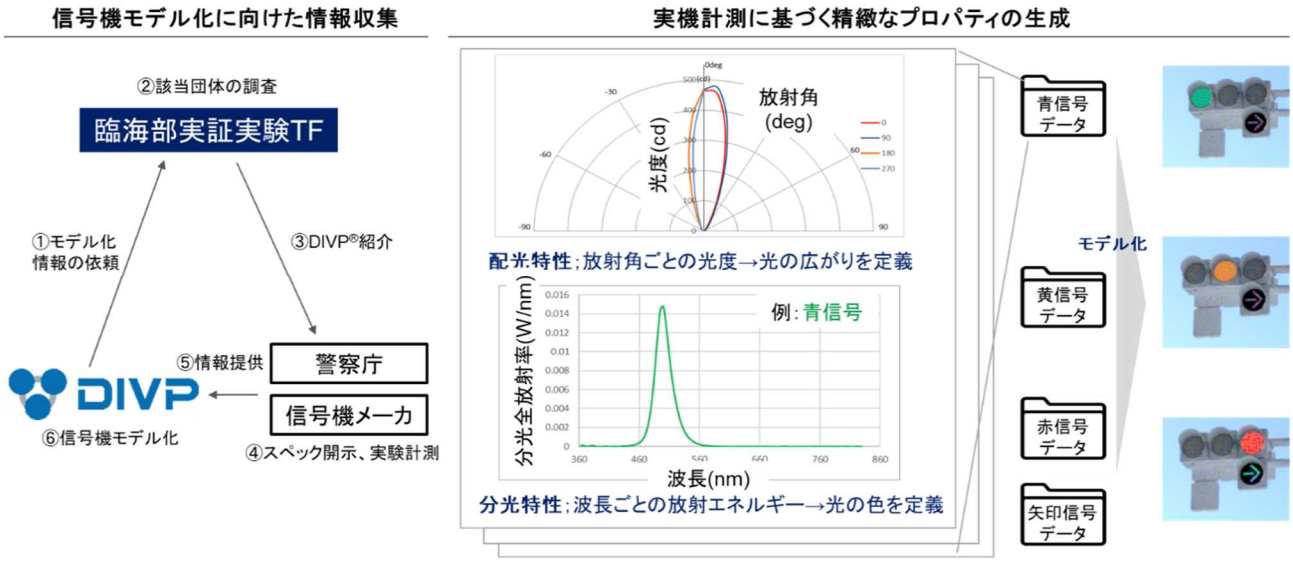
・信号機認識評価（走行シナリオ共有）

本評価では、お台場を対象にシステムから実車評価の課題を提供してもらい優先的なセンサ弱点シナリオとして共有した。下図に評価対象エリアおよびセンサ弱点事象を示す。地点①では逆光による光の飽和で信号機検出が困難となっている。地点②では降雨によるフロントガラスへの雨滴付着により信号機検出が困難となる事象確認を試みたが、AD-URBAN の実証実験ではそれほどまでの激しい降雨は観測できなかった。そのため、Sim 環境で激しい降雨を再現して、信号機検出が困難になるかという観点で評価を実施した。地点③では太陽光がビル壁面に反射することにより間接的に信号機検出が困難となっている。

出所：学校法人幾徳学園　神奈川工科大学、AD-URBAN

Figure 207　走行シナリオ共有（信号機認識評価）

信号機認識評価に向けては、配光（IES）データや分光データにもとづいた信号機モデルを実装した。これらデータは警察庁や信号機メーカーのご協力により提供いただいた。青信号、黄信号、赤信号、矢印信号の 4 種類をモデル化した。



出所：学校法人幾徳学園　神奈川工科大学、日本ユニシス（株）

Figure 208　信号機のモデル化

FY2021 では下図にあるように青海一丁目交差点を対象とした信号機モデルを実装した。

出所：学校法人幾徳学園　神奈川工科大学

Figure 209　信号機モデル（青海一丁目交差点）

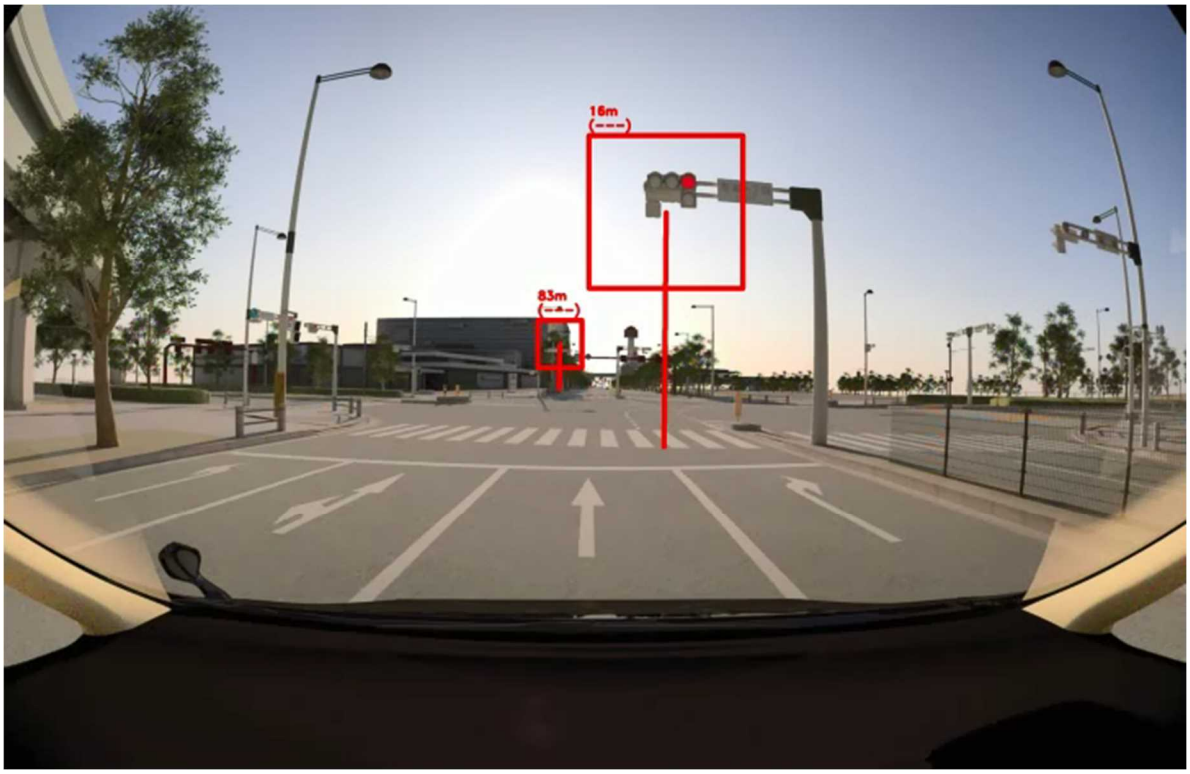
信号機モデルと天候モデルを組み合わせることで下図にあるような不調シーンを再現できた。①では太陽と信号機が重なり画像が飽和している状態を再現した。②ではフロントガラスへの雨滴付着およびワイパー払拭モーションを再現した。③ではビルの反射光と信号機が重なり画像が飽和している状態を再現した。

出所：学校法人幾徳学園　神奈川工科大学

Figure 210　不調要因のモデル化（信号機認識）

・信号機認識評価（通常条件）

認識不調評価の前段として、通常天候での認識動作検証を実施した。下図に晴天時の交差点接近シナリオにおける信号機認識結果を示す。このように信号機を正しく認識できた場合、信号機の現示パターンと同色の矩形と信号機中心位置が表示される。

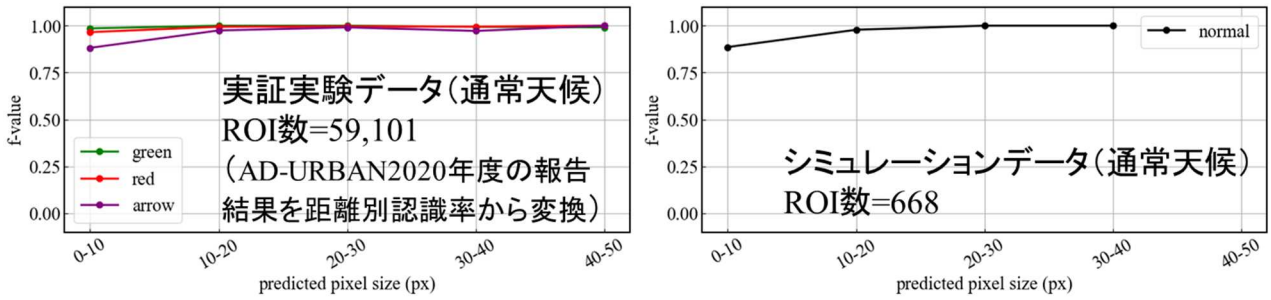


出所：学校法人幾徳学園　神奈川工科大学、AD-URBAN

Figure 211　通常条件での信号機認識

本検証では、信号機までの距離から算出した信号灯サイズを用いて認識率を検証した。下図に検証結果を示す。横軸は信号灯のピクセルサイズで、値が小さいほど信号機までの距離が遠いことを意味する。例えば、10ピクセル未満の場合、信号機まで約 100m 離れている。縦軸は信号機の認識率である。図の左は AD-URBAN が実証実験で観測したデータの信号機認識率を表し、図の右は DIVP®の Sim データの信号機認識率を表す。実証

実験データの平均認識率が 0.982 であったのに対して、DIVP®の Sim データの平均認識率は 0.989 とほぼ同等の結果が得られた。このことから DIVP®の信号機モデルが通常天候での評価において有用であることが確認できた。ただし、遠方（10 ピクセル未満）では認識率に差が見られたので、今後要因分析を実施予定である。

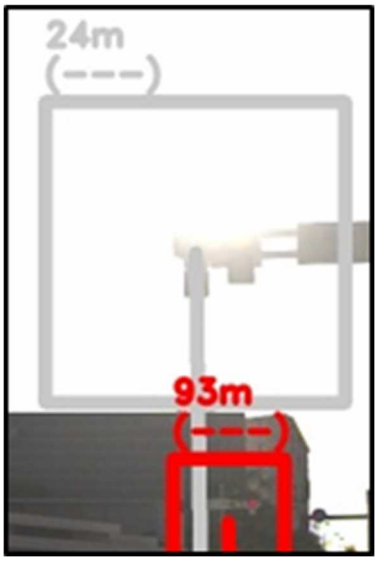


出所：学校法人幾徳学園　神奈川工科大学、AD-URBAN

Figure 212　信号機認識率（通常条件）

・信号機認識評価（逆光条件）

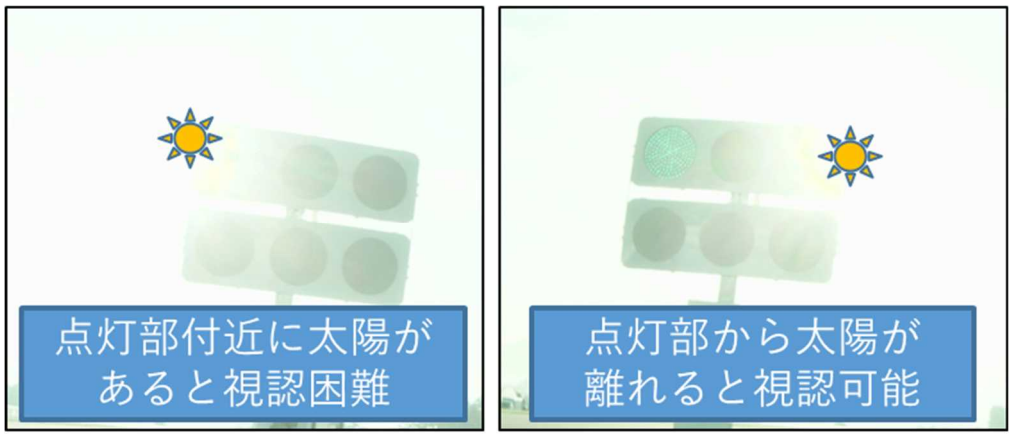
認識不調評価として、逆光条件での認識動作検証を実施した。下図に逆光時の交差点接近シナリオにおける信号機認識結果を示す。このように信号機を正しく認識できなかった場合、矩形と信号機中心位置は灰色で表示される。



出所：学校法人幾徳学園　神奈川工科大学、AD-URBAN

Figure 213　逆光条件での信号機認識

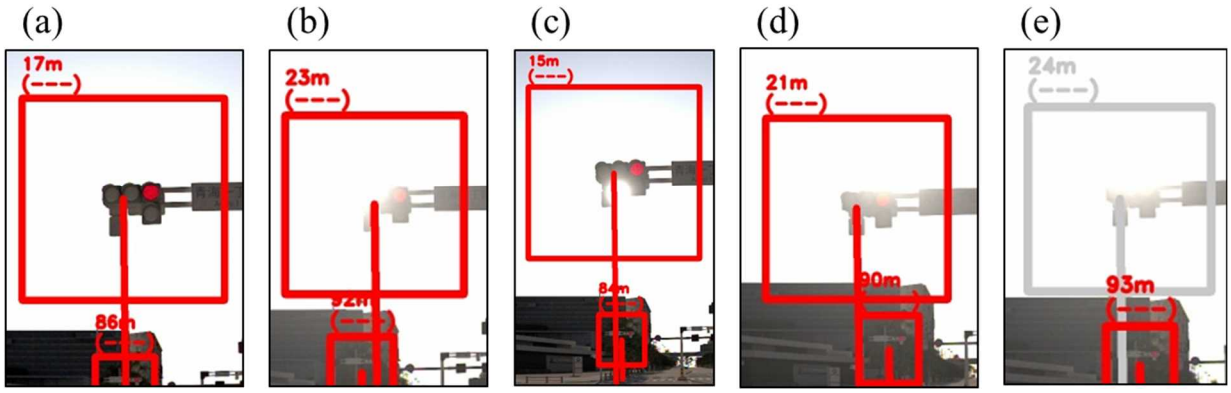
近年、高ダイナミックレンジ（High Dynamic Range：HDR）機能や LED フリッカ軽減（LED flicker mitigation：LFM）機能を搭載したカメラが誕生したことで、厳しい逆光下でも影響範囲は限定的になりつつある。下図に AD-URBAN の実証実験結果を示す。どちらも信号機付近に太陽があるが、図の左は点灯部付近にあり視認困難となっているが、図の右は点灯部から離れた位置にあり視認可能となっている。



出所：学校法人幾徳学園　神奈川工科大学、AD-URBAN

Figure 214　AD-URBAN の実証実験（逆光条件）

DIVP®の Sim で信号機に対して太陽をさまざまな位置に設定して検証した結果を下図に示す。(a)は信号機と太陽が丁度重なるシーンで、逆光の影響は見られなかった。(b)～(e)は信号機付近に太陽があるが、それぞれ点灯部までの距離が異なる。(b)～(d)は点灯部と太陽が離れており逆光の影響は見られなかった。一方、(e)は点灯部付近に太陽があり、認識が困難となっている。



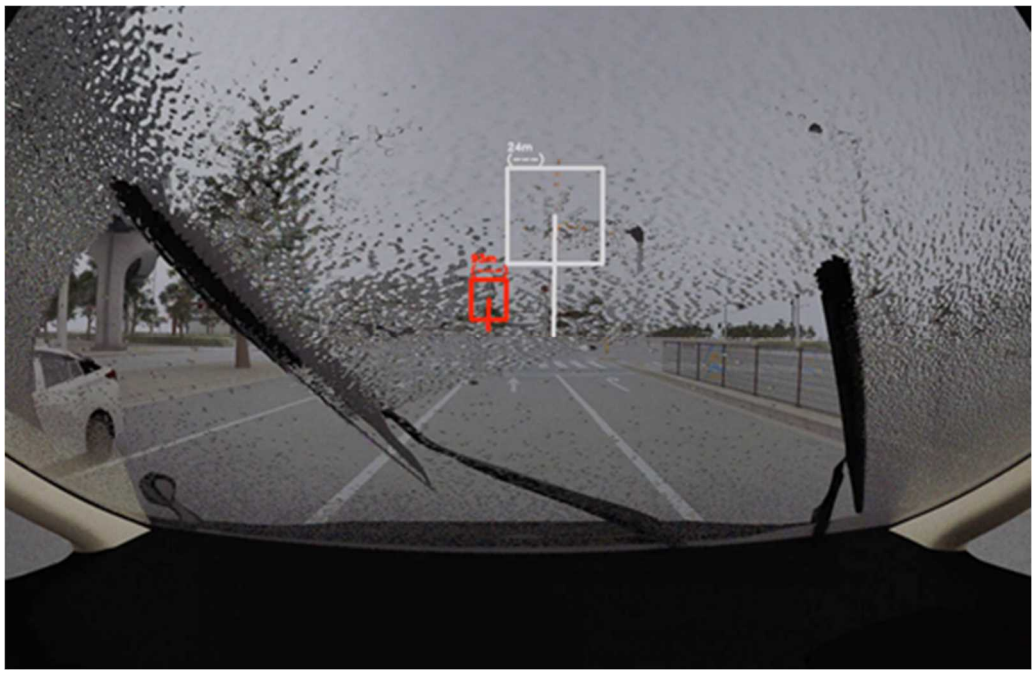
出所：学校法人幾徳学園　神奈川工科大学、AD-URBAN

Figure 215　信号機認識結果（逆光条件）

以上より点灯部付近に太陽があると認識困難になるという AD-URBAN の実証実験と同様の不調シーンが再現できたことから DIVP®の Sim は逆光評価に有用であることが確認できた。

・信号機認識評価（雨天条件）

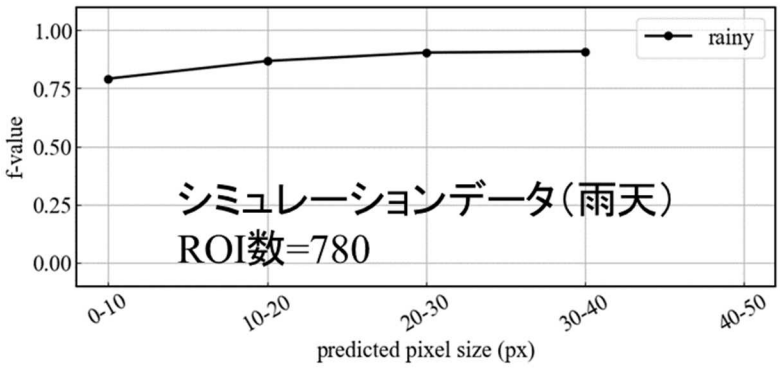
認識不調評価として、雨天条件での認識動作検証を実施した。下図に雨天時の交差点接近シナリオにおける信号機認識結果を示す。逆光時同様、信号機を正しく認識できなかった場合、矩形と信号機中心位置は灰色で表示される。



出所：学校法人幾徳学園　神奈川工科大学、AD-URBAN

Figure 216　雨天条件での信号機認識

DIVP®の Sim で激しい降雨を再現して検証した結果を下図に示す。前述と同じく横軸は信号灯のピクセルサイズ、縦軸は信号機の認識率である。AD-URBAN の実証実験では数 mm/h 程度の降雨量のデータのみ取得できていたため平均認識率が 0.984 と通常天候とほとんど差はなかった（約 0.2 ポイント）。一方、DIVP®の Sim データの平均認識率は 0.868 と通常天候に比べて約 12 ポイント低下した。また、遠方・近傍を問わず降雨量の増大により全体的な認識率の悪化を確認できた。認識率が低下した要因は大きく 2 点ある。1 点目は雨滴による遮蔽により未検出が増えたこと、2 点目は色合いの変化により誤認識が増えたことである。



出所：学校法人幾徳学園　神奈川工科大学、AD-URBAN

Figure 217　信号機認識率（雨天条件）

雨滴による認識不調は実環境でも十分想定され得るが再現性の担保が非常に難しい。こうした点において、DIVP®は国立研究開発法人防災科学技術研究所の大型降雨実験施設にて計測実験を行い、さまざまな降雨量（20, 30, 40, 50, 60, 90, 120, 150, 180, 300mm）をモデル化しているので、降雨量ごとのより詳細な評価が可能である点が有用である。

・信号機認識評価(ビル反射条件)

認識不調評価として、ビル反射条件での認識動作検証を実施した。事象そのものは逆光と同様で、太陽光により画像が飽和し、信号機認識が困難となる。ただし、ビル壁面からの反射という性質上、発生条件が非常に限定的となる。

AD-URBAN が観測した本ケースの場合、具体的には日の出～早朝時の 10 分間程度の短時間かつ、晴天時かつ、光を反射しやすいビル壁面かつ、ビル反射点と信号機、自車との相対位置かつ、反射線上に他交通参加者がいない等の条件が重なった場合にのみ発生する現象である。下図に信号機認識不調を Sim で再現した結果を示す。

出所:学校法人幾徳学園　神奈川工科大学、AD-URBAN

Figure 218　ビル反射による信号認識不調再現

以上、信号機認識機能としては 3 ケース(逆光、降雨、ビル反射)の評価を実施した。いずれのケースも信号機モデルと天候モデルを組み合わせることで不調再現することができた。こうした環境条件は時々刻々と変化するため再現性の担保が非常に難しい。特に 3 ケース目のビル反射の場合、時刻、天候、物理特性、自車位置、他の交通参加者等といった条件が全て揃った場合にのみ発生する現象である。こうした点において、天空光シミュレーションを組み込んでいる DIVP®のような Sim 活用により特定条件に絞った性能限界が探索可能となっており、アルゴリズム開発の評価基準や、センサ・アルゴリズム開発の効率化が期待できる。

・物体認識評価（走行シナリオ共有）

本評価では、まずお台場を対象にシステムから実車評価の課題を提供してもらい優先的なセンサ弱点シナリオとして共有した。下図に評価対象エリアおよびセンサ弱点事象を示す。地点①のような交差点では右折待ち車両により直進車両の検出が困難となっている。

出所：学校法人幾徳学園　神奈川工科大学、AD-URBAN

Figure 219　走行シナリオ共有（自己位置推定評価）

物体認識評価の評価観点を下表に示す。まず Step1 では、ジオメトリにもとづく評価を実施予定である。具体的には、大型車両や特殊車両などの他の交通参加者による隠れが発生するシーンを評価予定である。次に Step2 では、物理特性にもとづく評価を実施予定である。具体的には、カメラや LiDAR が苦手とする黒革ジャケットを着た夜間の歩行者横断シーンを評価予定である。

Table 73　物体認識評価の評価観点

Step	評価観点	概要
Step1	ジオメトリ	対象との位置関係にもとづく評価 評価事例：他の交通参加者や周辺構造物による隠れ発生シーン →大型車両や特殊車両による車両隠れ
Step2	物理特性	センサの物理原則にもとづく評価 評価事例：黒革ジャケットを着た夜間の歩行者横断シーン →カメラは夜間が苦手、LiDAR は黒革素材が苦手

出所：学校法人幾徳学園　神奈川工科大学、AD-URBAN

・AD-URBAN 連携の総評

FY2021 ではまず、モデル一致性評価として NCAP ダミー人形モデルや車両モデルを AD-URBAN が開発したセマンティック・セグメンテーションを用いてモデル適正評価を実施した。その結果、アスファルトへの車両の反射や木陰の偽色発生等、環境やセンサモデルからでは検証が困難な事象に対して、認識・判断モジュールからの評価やフィードバックによりモデル改良を行うことができた。

次に、DIVP®仮想環境と AD-URBAN 自動運転システムの統合環境を構築し、Open Loop 評価を実施した。具体的には LiDAR を用いた自己位置推定評価、カメラを用いた信号機認識評価、カメラと LiDAR の Fusion による物体認識評価である。

自己位置推定評価では、路面の濡れ度合いを反射特性の変化に応じて 5 段階に分類してモデル化し、さらに細かい条件を振り評価可能な、所謂パラメータスタディによって認識限界を導出できた。こうした実環境ではほぼ検証不可能な認識限界探索が、仮想環境と実システムが連動することで検証可能であるという好事例を示すことができた。

信号機認識評価では、信号機モデルと天候モデルを組み合わせることで逆光や降雨、ビル反射による不調シーンを再現できた。特に降雨は AD-URBAN の実証実験では厳しい降雨条件には遭遇できなかった。シミュレーションは厳しい降雨条件による認識率低下を再現でき、有用性を確認できた。今後は降雨量ごとのより詳細な評価を実施していくことが重要である。

物体認識評価では、前述の評価観点に基づき FY2022 でも引き続き評価実施予定である。また DIVP®の仮想環境モデルの機能拡張に伴い、より幅広い評価をしつつ、評価指標の定義、具体化を重要テーマと位置づける。

⑦ 国際連携を通じた研究成果の標準化

AD 技術に対する消費者の信任を得て社会実装を進めていくことを目指す場合、評価体系と技術は国際的な標準であるべきとの考えの元、研究成果に基づくシミュレーション評価技術の国際標準化を目指している。

2021 年度には 2020 年より本格化した日独連携の議論が進み課題認識や一部目指す成果について合意形成が為されている状況、2022 年度以降特に、日独連携（VIVID）は、独側に 2023 年度以降も継続の意思あり、国際標準（ASAM）活動含め、日本側をリードする役割として DIVP®の 2023 年度以降の継続が必要。6 月に独シンポジウム、11 月には SIP-adus を予定、VIVID 活動を PEGASUS や AD 合同 Assurance の標準に打ち込み、国レベルの合意形成に繋げる。

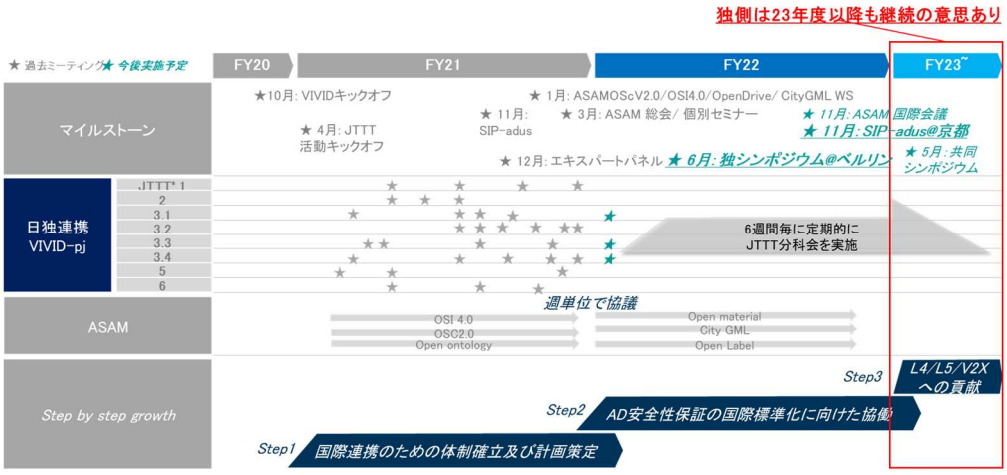


Figure 220 国際連携・標準化の Schedule

■　AD safety assurance に関する国際的な標準化動向の調査

2020 年度より継続し、AD safety assurance に関わる米欧の活動体を調査、欧では PEGASUS ファミリープロジェクト、米では世界初の AD-lv4 にかかる安全性評価規格となる UL4600 を発行した UL の他、BMW 等の業界キープレーヤを巻き込んだホワイトペーパ等の発行によりデファクトを伺う Intel/Mobileye 等について注視していく必要があることがわかった。

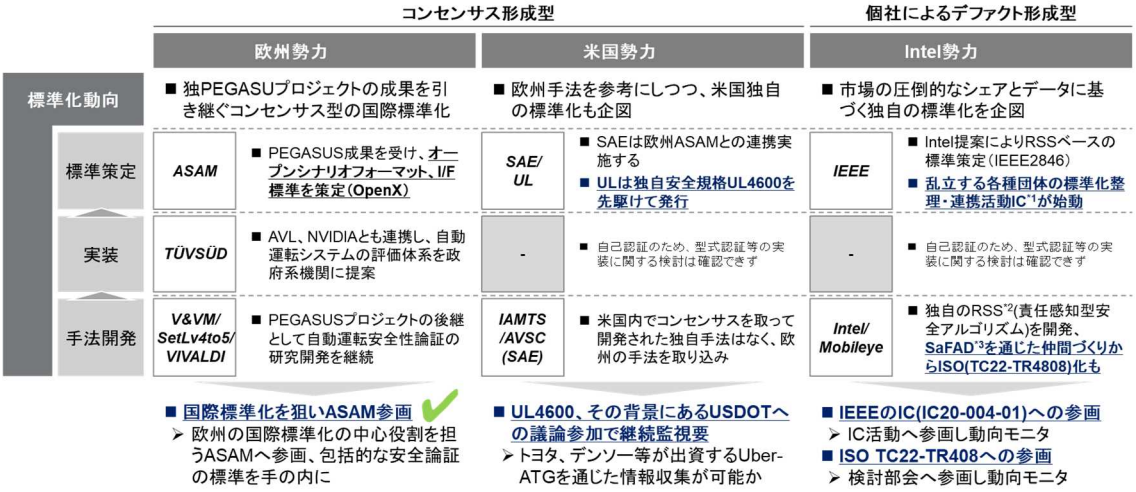


Figure 221　国際標準化に向けた打ち手の検討

■　日独連携プロジェクト活動

独にて同様の研究開発を行う VIVALDI プロジェクトとの協調研究コンソーシアム VIVID においては、「共通性」と「補完性」の考え方をベースに、対等な Give &Take 関係に基づく日独連携を通して、国際標準化をリードしていくことを目的に活動。6 週間ごとにマイルストーン mtg を通じた双方の成果の紹介を実施、I/F や評価プロセス等の個別課題を設定、検討を進めている。2021 年 11 月に開催された SIP-adus、2021 年 11 月の独 BMBF-CAO シンポジウムで分科会別に共同で活動成果を紹介。2022 年 6 月には独ベルリンにて中間成果報告会を予定している。

	Topic	DIVP®(JPN)	VIVALDI(GER)	Target (under discussion)
JTTT1 (I/F)	Comparison of simulation toolchains	Nihon Unisys, Ltd	AVL	■ Exchange information on perception/recognition model output, testbed and hardware interfaces ■ Provide OSI trace file output to JTTT 3.x activities
JTTT2 (Environmental Data)	Modelling, geometries and materials	三菱プレシジョン株式会社	KIT	■ Exchange map assets and material database
JTTT3.1 (Camera)	Reference data, test methods and metrics	神奈川工科大学 Sony Semiconductor Solutions Corporation	Hochschule Kempten	■ Exchange DIVP® ray tracing output (OSI trace file with dummy data) and study outcome on VIVALDI camera model
JTTT3.2 (LiDAR)	Reference data and model metrics	神奈川工科大学 Pioneer	Hochschule Kempten	■ Exchange DIVP® ray tracing output using simple static scenario and study outcome on VIVALDI LiDAR model
JTTT3.3 (RADAR)	Validation, performance simulation and reference data	神奈川工科大学 TTDC SOKEN u-shin	Continental	■ Comprehend differences in parameters and study outcome on VIVALDI RADAR model
JTTT3.4 (V&V Testing Framework)	Sensor testing and test metrics	神奈川工科大学 TTDC	Technische Universität ILMENAU	■ Exchange information on measurement methods, and discuss reflectivity measurements
JTTT5 (Scenario Structuring)	Modularity, criticality, sensor-specific weakness	SOLIZE	IPG	■ DIVP® proposed communalization of scenarios *1
JTTT6 (Simulation Validation)	Scenario generation process, test campaign	神奈川工科大学	Technische Universität Darmstadt	■ Both sides proposed to focus on scenario generation and comparative studies of measurement results *1

Figure 222　JTTT(Joint Topical Task Team) structure

■　独標準化団体加盟を通じた I/F 他の標準化

Simulation における事実上の標準議論が進む独 ASAM の各主イニシアティブに参加、DIVP®の先駆的なとりくみとなる、センサ評価を可能とするシミュレーションアーキテクチャと I/F を中心とした標準化議論へ参画中。

Figure 223 ASAM OpenX 現況/課題/DIVP®行動計画

■　欧 Headstart との協議への参加

Sakura と連携し欧 Headstart との議論へ参加、活動のスコープが交通流シナリオや実車を用いた評価手法等となっていることから DIVP®として議論に参加するに留まる。一方で Headstart のプロジェクト終了に伴い後継となる V4V とのコンタクトを次年度より開始する。

(3)次年度以降の計画

① プロジェクトマネジメント

引き続き月次定例化の進捗管理を枠組みに、成果の創出をはかる。

以下に例を挙げる会議にて DIVP®の報告、意見交換を積極的に行いシナリオパッケージの修正、研究開発の方向性を見定めていく。合わせて、インターフェースの標準化を考慮した国際連携を推進し、国際標準に向けた取り組みを具体化していく。

- METI 合同推進委員会
- SIP システム実用化 WG
- 安全性評価同号推進 TF
- VIVID（日独連携）

② 既存シミュレーション PF のベンチマーク評価

センサモデル、シナリオツールともに、以下の 3 つの観点で引き続きベンチマーク調査を実施する。

その評価結果は、今年度と同様にベンチマーク表としてまとめる。

・機能ベンチマーク

各シミュレータに対して、バージョンアップでの拡充機能に注目して評価を行う。

・I/F ベンチマーク

I/F の通信内容、通信方法について調査を進め、他シミュレーションとの連携方法をまとめる。

・性能ベンチマーク

DIVP®とのシミュレーション精度の比較評価を基本検証シナリオ、不調評価シナリオを用いて実施する。

③ 機能シミュレーション PF 評価

2021 年度で完了

④ 物理シミュレーション PF 評価

各社が予定しているモデル追加、アセット追加に向けて引き続き結合管理と評価を進める。以下に追加機能の例を示す。

・お台場 3D モデル（東側）

・普通車、大型車両などの交通参加者 3D モデル

・センサ不調モデル

カメラ：水の巻き上げ、霧、雪

LiDAR：水の巻き上げ、雨/霧/雪による疑点

ミリ波：豪雨による減衰、マルチチャンネル

・ミリ波認識モデル（物標追従）

⑤ 機能−物理シミュレーションの連携評価

交通シナリオやセンサ弱点シナリオを拡張し、引き続きクローズドループ環境での検証を進める。

⑥ 統合評価

今後、DIVP®の仮想環境モデルの機能拡張に伴い、不調シーンの評価を拡充予定。より幅広い評価をしつつ、評価指標の定義、具体化を次年度の重要テーマと位置づけている。

⑦ 国際連携を通じた研究成果の標準化

今後、NDA 締結後に日独間でデータやセンサモデル、環境アセットを交換予定。6 月には独にて VIVID 中間成果報告会、11 月には SIP−adus の開催を予定しており、この大きなマイルストーンに向けて VIVID や ASAM に対する提案活動を進めていく。

5. 2. 2 「B1. カメラ リファレンスモデル構築」(学校法人幾徳学園神奈川工科大学)

5. 2. 2. 1「B5. カメラ知覚モデルの構築」(学校法人幾徳学園神奈川工科大学、ソニーセミコンダクタソリューションズ株式会社)

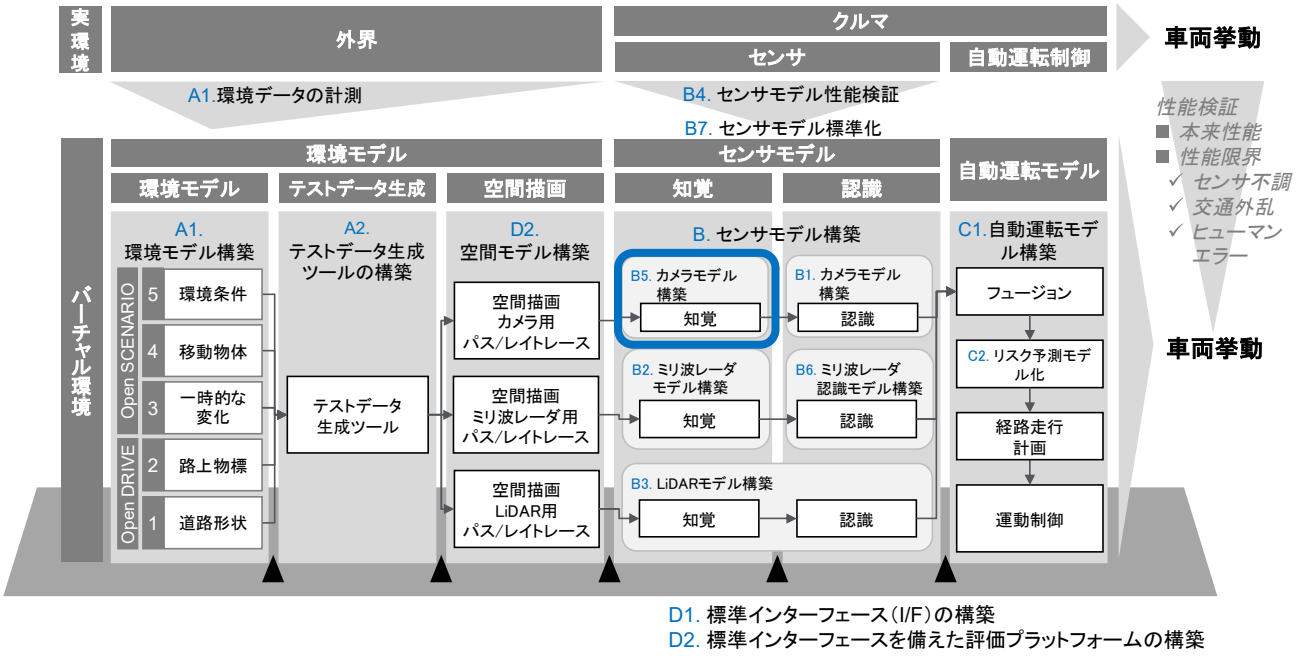


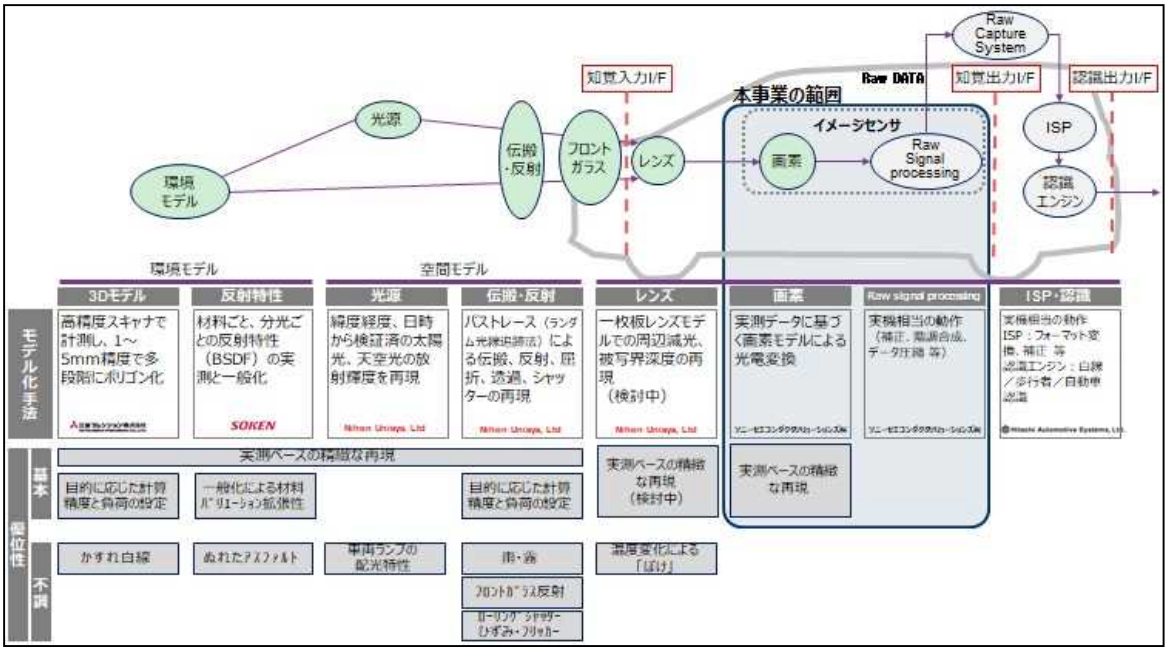
Figure 224　本研究の位置付け

■ 事業目的

カメラセンサの評価を行うことが可能な知覚モデルに対するインターフェースを提言することを目的とする。物理知覚モデルとは、実際のイメージセンサをモデル化し、実環境を CG モデリングした入力情報を光電変換、Raw Signal Processing することを意図したシミュレーションモデルである。

■ 事業概要

カメラセンサモデルの構成図および本事業の範囲を Figure 225 に示す。



出所：学校法人幾徳学園　神奈川工科大学

Figure 225 カメラセンサモデル構成図

本事業では、レンズを通して出力される環境モデルおよび空間モデルのデータを受けて、光電変換処理と前段画像信号処理を行うためのインターフェースを提案する。その際、光電変換においては、認識モデルに影響するダイナミックレンジ、色再現性、S/N 比、ブラー、LED のフリッカ抑制を考慮する。

また、知覚モデルシミュレーション結果として出力される Raw data と、実際の走行環境においてカメラ実機で撮影された Raw data との間で一致検証を行い、モデル精度の高さを追求することにより、インターフェースの妥当性を検討する。

なお、インターフェースの検討にあたっては、以下の要件に合致するイメージセンサおよび専用のセンサモデルをリファレンスとして用いるが、提案するインターフェースは、他のイメージセンサにも適用可能になるように考慮する。

No.	項目	要件
1	画素ピッチ	3.0μm
2	画素数	5.4Mpix
3	フレームレート	30fps
4	カラーフィルタ	RGGB
5	シャッタ方式	グローバルシャッタ換算 （ローリングシャッター）
6	ダイナミックレンジ	120dB
7	フリッカ抑制	90Hz 以上（11ms サイクル以下）

■ 実施計画

事業項目
2019 年度
2020 年度
2021 年度
2022 年度
第 1 四半期
第 2 四半期
第 3 四半期
第 4 四半期
① 比較検証方法の検討
② 評価環境整備
③ カメラモデル入力 IF の検討
事前検証（データ取得）
④ 事前検証結果の Raw data 生成
基本検証（データ取得）
⑤ 基本検証結果の Raw data 生成
⑥ 事前・基本検証結果の一致性検証
⑦ 2019 年度事業報告書の作成
不調評価（データ取得）
⑧ 不調評価モデルでのシミュレーション
⑨ 不調要因評価と一致検証
⑩ 拡張性評価の一致性検証
⑪ センサ不調原理の再可能性検討
⑫ 汎用カメラモデルの仕様検討
⑬ アセスメントパッケージの一致性検証
⑭ お台場コミュニティの一致性検証
⑮ 高機能モデルの基礎検証
⑯ Simulink 連携／FMU 化の検討
⑰ 最終報告書作成
⑱ プロジェクト運営会議への出席
⑲ 日独連携への貢献

(1)令和3年度の成果(まとめ)

アセスメントおよびお台場コミュニティのシナリオにて一致性検証を実施
ドイツ連携においてはカメラ分科会のリーダーを担当

研究開発の成果

Sony Semiconductor Solutions Corporation

研究成果の自己評価	**やったこと** ■ アセスメントパッケージおよびお台場コミュニティパッケージのシナリオについてカメラ知覚モデルの一致性検証の実施。 ■ ドイツ連携におけるJTTT3.1カメラ分科会のリーダーを担当し、ASAM-OSIをベースとしたシミュレーションプラットフォームにおけるI/Fのあり方に関する議論をプロモート。 **アウトカム** ■ 評価したシナリオについて一致性の程度を測定し、必要に応じて環境パートにフィードバックした。 **実施計画に対する達成度の自己評価** ■ スケジュールおよび予算において全て計画通りに実施した。 **アウトカムの優位性・競争力・意義等** ■ 精緻な走行環境を再現した環境モデルパートとの協調により、自社製イメージセンタモデルとカメラの一致性を高い精度で再現することができた。
自社Biz視点から ①DIVP®の価値・魅力 ②活用可能性	①DIVP®の価値・魅力 ■ 実機で撮影データと、それを基に作成したバーチャル環境の両方が評価に使用可能であること。 ■ 実物の反射率が反映されたアセットが使用可能であること。 ②活用可能性 ■ 自社開発のイメージセンサについて、実機との一致性を示す際に有効と考えられる。

得られた知財	■ カメラ知覚モデルの一致性検証手法およびキャリブレーション手法に関する特許を出願中。
知財の保全	■ 特許 : 1件 ■ 報告書・ノウハウ集 : ■ 手順書 : ■ ASAM標準 :
残課題・今後への期待値	■ ローリングシャッター—の再現、IR帯の拡張、ノイズを再現したカメラ知覚モデルによる各種シーンの一致検証の実施。 ■ ドイツとの連携プロジェクトを通じた、カメラI/FのASAM提案。

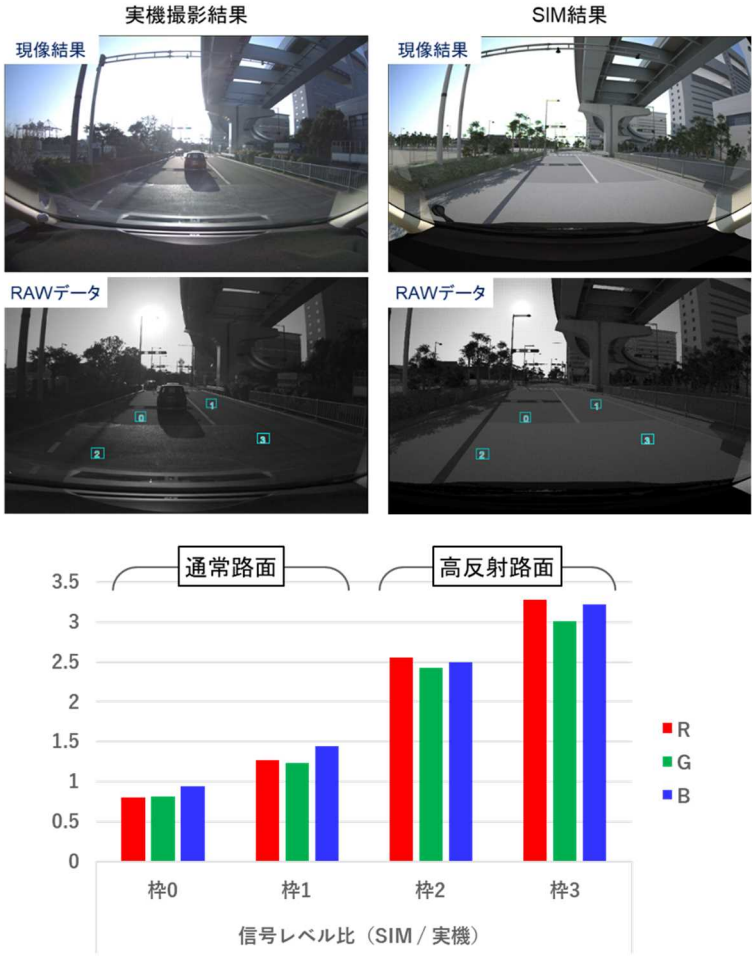
Figure 226 研究開発の成果

令和 3 年度は、新たに構築されたアセスメントパッケージおよびお台場コミュニティパッケージのシナリオについてカメラ知覚モデルの一致性検証の実施し、その結果を環境パートに対してフィードバックを行った。また、新たな取り組みとして、ドイツ連携における JTTT3.1 カメラ分科会のリーダーを担当し、ASAM OSI をベースとしたシミュレーションプラットフォームにおける I/F のあり方に関する議論をリードした。

(2)令和3年度の成果

⑩ 拡張性評価の一致性検証

拡張性評価の一致性検証として、お台場と首都高 C1 で撮影された画像と、同エリアの環境モデルに基づき実行されたシミュレーション(SIM)結果について、RAW データ上で画素信号レベルの比較を行った。お台場での検証結果の一例として、通常の路面と遮熱機能を有する高反射路面の信号レベルを比較した結果を Figure 227 に示す。通常路面の評価においては、これまでの Jtown 等での検証と同様に、実機と SIM の差異が約 40%以内に収まっており、十分な一致性が得られていることが確認できた。一方、高反射路面については、鏡面反射成分等の高反射路面に特有な特性データが設定されていないことから大きな差異が見られたので、環境モデルパートにフィードバックを行った。



出所：ソニーセミコンダクタソリューションズ（株）

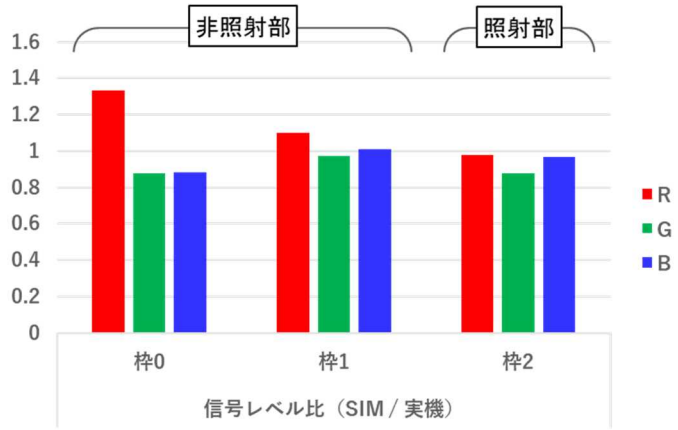
Figure 227 お台場走行シーンでの路面一致性検証結果

⑪ センサ不調原理の再現可能性に関する検討

不調原理の一致性検証として、夜間車両走行シーンにおける NCAP 歩行者ダミーの一致性検証を行った。実機撮影結果と SIM 結果の比較画像を Figure 228 に示す。今回一致性検証として、歩行者ダミーのヘッドライトが照射されている領域（下部）と照射されていない領域（上部）についてそれぞれ評価を行った。検証結果を Figure 229 に示す。照射部、非照射部共に約 40%以内の差で一致していることが確認できた。一方、Figure 228 の画像

にて確認できるように、実機と SIM で路面の明るさが異なる現象が見られた。この原因については、路面の反射率の差異に起因する可能性があり、引き続き環境モデルパートと共に調査を進める予定である。

Figure 228　夜間 NCAP 歩行者ダミー横断シーンの比較



出所：ソニーセミコンダクタソリューションズ（株）

Figure 229　NCAP 歩行者ダミーの一致性検証結果

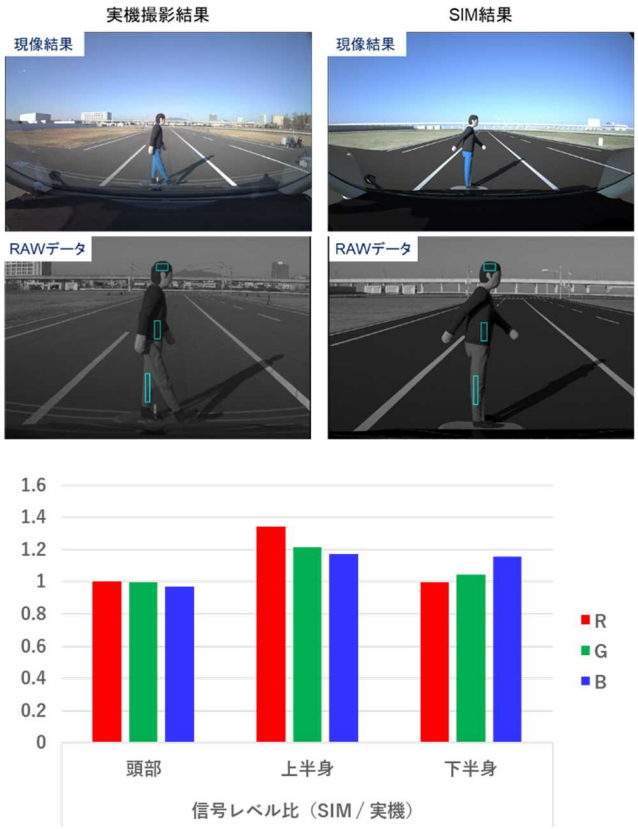
⑫ 汎用的なカメラモデル（リファレンスモデル）の仕様検討

ユーザがシミュレーション試用時に容易にカメラモデル動作の確認と理解ができるようにすることを目的とし、リファレンスモデルの仕様検討を行った。ユーザは、露光時間、デジタルゲイン、アナログゲイン等の感度調整に関わる基本パラメータとデータ出力時の圧縮カーブ設定などをユーザ側で変更できる仕様を提案した。

⑬ アセスメントパッケージの一致性評価

アセスメントパッケージの一致性検証の一環として、NCAP 歩行者横断シーンの検証を行った。Figure 230 に

シーン中のアセット評価の一例として、NCAP 歩行者ダミーの検証結果を示す。ダミーの頭部、上半身、下半身について R,G,B 信号レベルの比較を行ったところ、いずれの部位も約 40%以内の差異で信号が一致しており、この差異はこれまで評価した道路物標アセットとほぼ同等な差異であることから、十分な精度が得られていることを確認した。

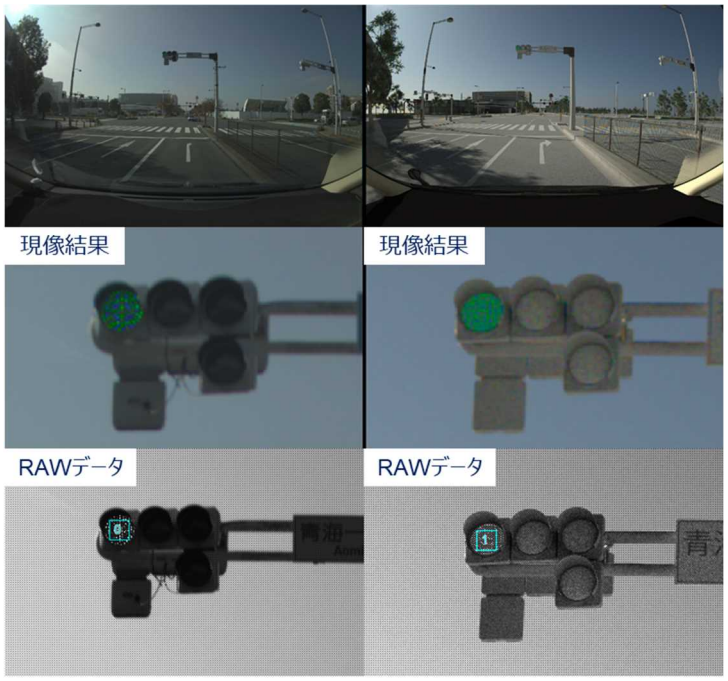


出所：ソニーセミコンダクタソリューションズ（株）

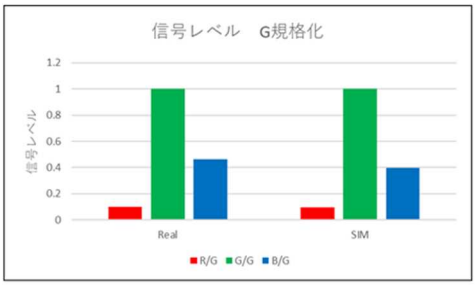
Figure 230　歩行車横断シーンでの NCAP 歩行者ダミー一致性検証結果

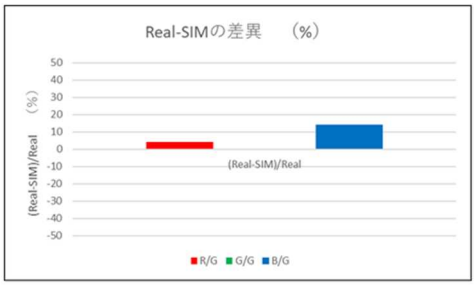
⑭ お台場コミュニティパッケージの一致性評価

お台場コミュニティパッケージの一致性検証の一環として、信号機モデルの一致性検証を行った。現状、信号機モデルに関しては、配光特性（指向性）の測定データは反映されていないため、色再現性のみの評価を行った。一例として、青信号の評価結果を Figure 231 に示す。色再現性の評価として、RAW データ上で信号機灯部の G 画素の信号レベルを基準とした R、B 画素のレベル比の差異を比較した。評価結果では、およそ 15%程度の差異で一致することを確認した。信号機灯の色再現性はカメラ認識ブロックでの検知差異に影響するが、認識ブロックに与える影響の観点からは現状十分な精度が得られた。



実機撮影結果　　SIM結果





Gで規格化した信号レベル比（SIM/実機）　　Gで規格化した信号レベルの差異

出所：ソニーセミコンダクタソリューションズ（株）

Figure 231　お台場信号機の色再現　一致性検証

⑮ 高機能モデル（ローリングシャッターの再現、IR 帯の拡張、ノイズ再現）の基礎検証

高機能版モデルに組み込む新機能（ローリングシャッターの再現、IR 帯の拡張、ノイズ再現）について機能動作確認を行った。ローリングシャッターについては、動体ブラーとローリングシャッター歪の評価を行い、定性的に画像の視認性がほぼ同等であること、また、歪量が計算値と同等であることを確認した（Figure 232）。IR 帯への拡張については、今回拡張された 790nm から 1000nm までの波長帯域の出力が得られることを確認した。ノイズモデルについては、これまでのショットノイズのみのモデルに対し、ランダムノイズ成分を新たに付加する予定であり、現在検証を進めている。

また、本検証のために、カラーチャート、グレイチャート、IR 反射板、フリッカ光源のアセット化を提案した。関係するパート担当によって作成されたアセットのうち、カラーチャートを比較した例を Figure 233 に示す。今後、カメラー致性検証の評価用ツールとして使用される予定である。

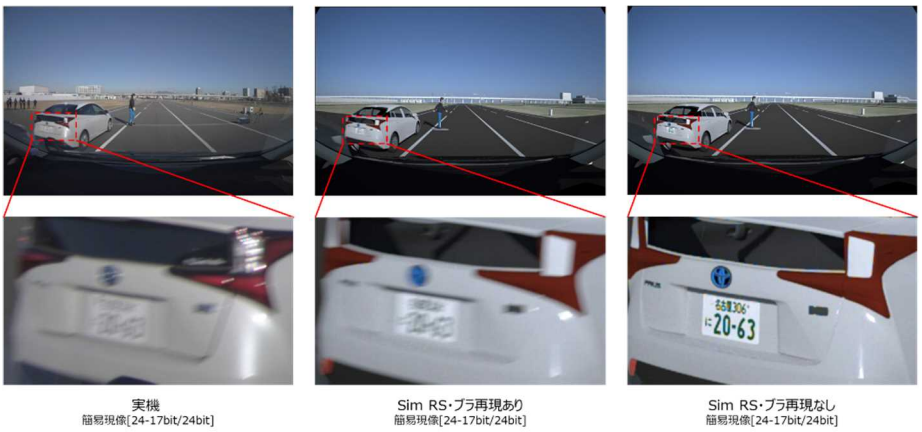


Figure 232　モーションブラの評価

出所：ソニーセミコンダクタソリューションズ（株）

Figure 233　画像評価用アセットの構築（カラーチャート）

⑯ カメラモデルの Simulink 連携／FMU 化の検討

現行カメラモデルの FMU 化については、当初本カメラ知覚モデルパートにて対応する予定であったが、作業効率の観点から環境モデルパートにて対応を行った。他方、カメラモデルの Simulink 連携については、対応しておらず、今後関係パートと対応を協議する。

⑱ プロジェクト運営会議への出席

月次例会に参加して進捗状況の報告を行うことにより、プロジェクト内で活動内容を共有した。また、カメラ TF 分科会への出席、カメラパートの関係者、PM 担当者との個別の打ち合わせを随時行い、各パートへの具体的な作業依頼、要望のヒアリングなど、実務に必要な情報交換を行った。

⑲ 日独連携への貢献

JTTT3.1 カメラ分科会のリーダーを担当し、ASAM OSI をベースとしたシミュレーションプラットフォーム I/F のあり方に関する議論や、独側へのデータ提供の活動について方向づけを行った。I/F の議論においては、DIVP® のセンサモデルと ASAM OSI 規格のコンセプトの差異を提示し、それぞれの利点について双方の意見を交換した。データ提供においては、DIVP®のシミュレーション出力を、STEP1：レンダリング後出力、STEP2：現像後出力、の 2 段階で独側に提示することを提案し、I/F 接続互換性と DIVP®結果の一致性の高さを独側で評価することで合意した。

(3)次年度以降の計画

⑬ アセスメントパッケージの一致性評価

シナリオパッケージの開発状況や評価の優先順位に応じて、順次検証を進める。

⑭ お台場コミュニティパッケージの一致性評価

シナリオパッケージの開発状況評価の優先順位に応じて、順次引き続き検証を進める。

⑮ 高機能モデル（ローリングシャッターの再現、IR 帯の拡張、ノイズ再現）の基礎検証

それぞれの機能について、順次検証を行う。

⑯ カメラモデルの Simulink 連携／FMU 化の検討

高機能版モデルにて、FMU 化対応を検討する。

⑰ 最終報告書作成

これまでの成果を最終報告書としてまとめる。

⑱ プロジェクト運営会議への出席

月例会、カメラ関連分科会に随時出席し、進捗を共有するとともに、作業連携について情報交換を行う。

⑲ 日独連携への貢献

JTTT3.1 カメラ分科会へ参加し、ASAM OSI をベースとした I/F の議論を行うと共に、独側とのデータ交換により、双方の環境の接続性、物理モデルの有用性について議論を深めていく。

5. 2. 2. 2「B1.カメラ認識モデルの結合性評価」（日立 Astemo 株式会社）

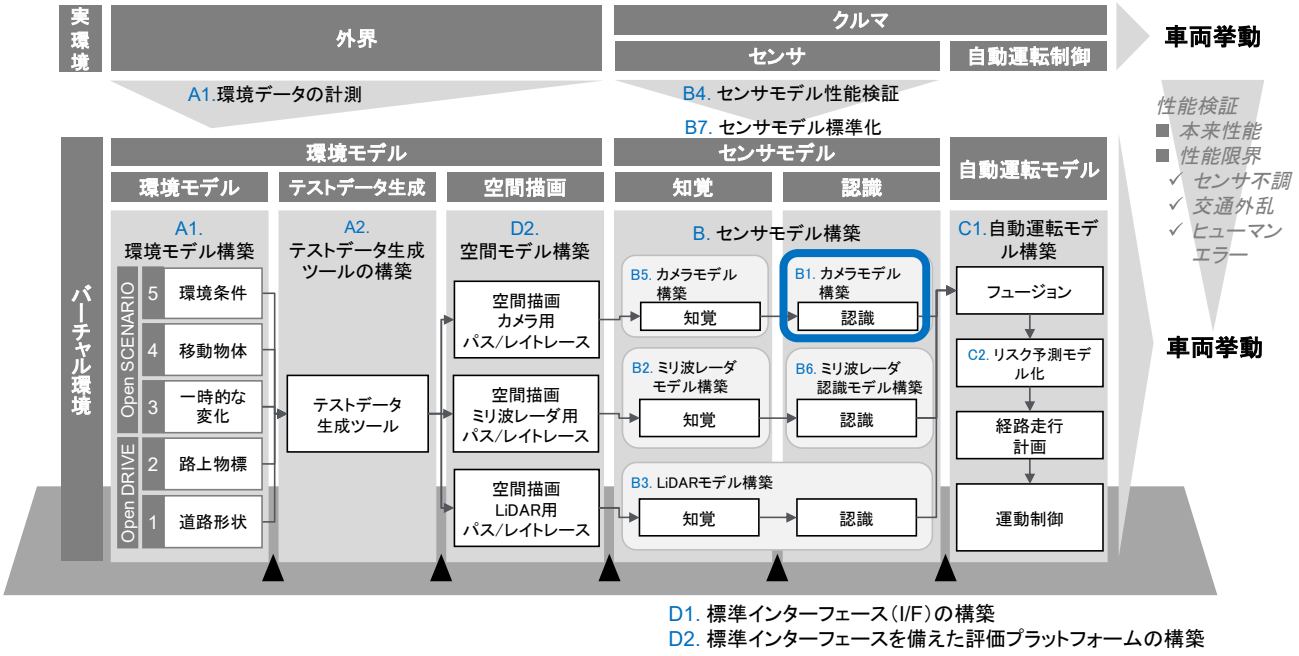


Figure 234　本研究の位置付け

■ 事業目的

カメラセンサのリファレンスとして産業界で活用可能なモデルを構築。モデルは”抽象化された機能モデル”、”詳細な物理モデル”を構築する。機能モデルとは、車両としての性能評価を目的とした実時間に近いクローズドループシミュレーションに用い、物理モデルとは、センサの精緻なモデルであり、必ずしも実時間での稼働を意図せず、個別のセンサの評価を行うことが可能な環境の構築を目的とする。

■ 事業概要

本事業では、標準化を見据えた、カメラ出力インターフェースを定義する。定義に当たっては、センサの置き換えが容易に実現可能なことを念頭に、カメラモデル評価環境の構築及び、カメラ物理モデルの実装を通して、標準となる出力インターフェースの作成を推進する。

■ 実施計画

事業項目	2018年度				2019年度				2020年度				2021年度	
	第1四半期	第2四半期	第3四半期	第4四半期	第1四半期	第2四半期	第3四半期	第4四半期	第1四半期	第2四半期	第3四半期	第4四半期	第1四半期	第2四半期
①基本設計の検討														
②カメラ出力インターフェースの検討														
③物理モデル事前評価														
④高精細 CG 要件定義書の作成														
⑤基本設計書の作成														
⑥カメラ出力インターフェース仕様書の作成														
⑦物理モデルの開発					Phase1		Phase2							
⑧基本機能評価														
⑨不調要因評価(映り込み)														
⑩カメラリファレンスモデル中間報告書作成														
⑪不調要因評価(雨)														
⑫高精細 CG ツール評価														

◆ 必要情報

2018年度:外界モデル/高精細 CG 情報、Fusion/他センサ情報

2019年度:高精細 CG データ、外界モデル、「B5. カメラ知覚モデルの構築」にて開発されたカメラモデル(光電)により生成された Raw data

2020年度:「B5. カメラ知覚モデルの構築」にて開発されたカメラモデル(光電)、不調要因を反映した高精細 CG データ

2021年度:不調要因を反映した高精細 CG データ

◆ 成果物

2018年度:基本検討書、IF 検討書、物理モデル事前評価報告、高精細 CG 要件

2019年度:カメラモデル評価基本仕様書、I/F 仕様書、物理モデル設計書等一式、カメラモデル(光電)を用いた事前評価結果

2020年度:基本機能評価仕様書等一式、不調要因評価仕様書等一式、カメラリファレンスモデル中間報告書一式

2021年度:不調要因評価仕様書等一式、高精細ツール評価報告書

(1)令和3年度の成果(まとめ)

認識不調を引き起こす不調要因の再現性をユーザ視点にて評価。
上記再現性を含む改善要望対応による、製品開発での効率向上に期待

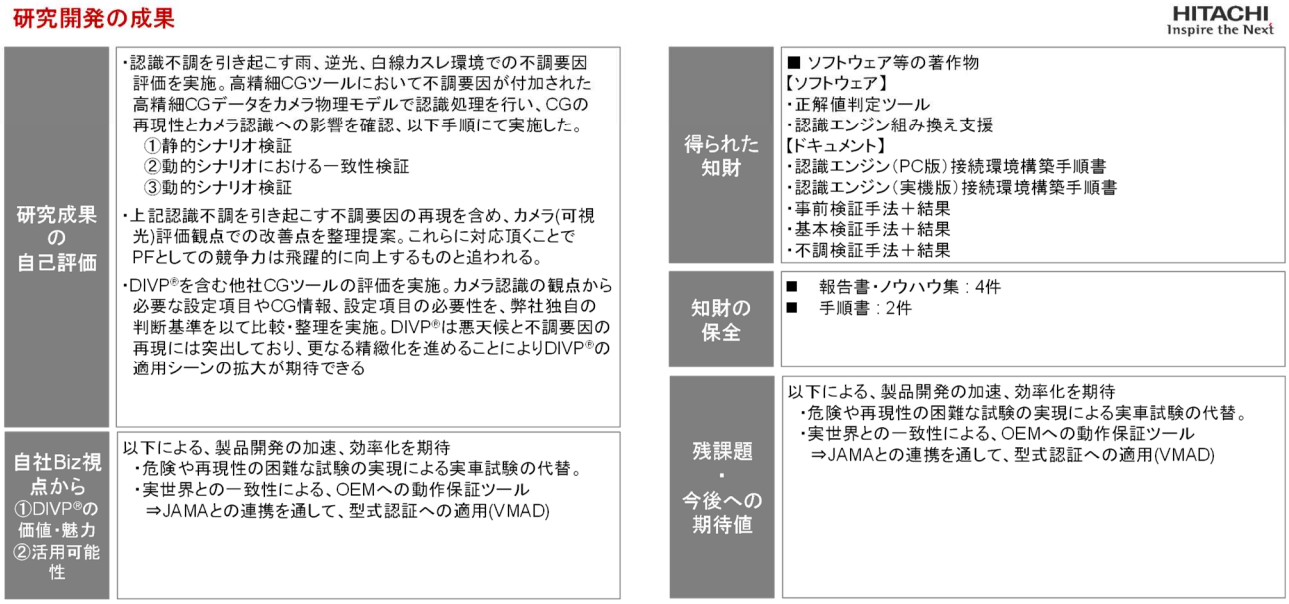


Figure 235 研究開発の成果

⑪不調要因評価(雨)

A/D パートが開発した高精細 CG ツールにおいて雨滴の不調要因が付加された高精細 CG データをカメラ物理モデルで認識処理を行い、CG 再現性とカメラ認識への影響を評価する。以下手順にて実施した。

(ア)静的シナリオ検証

(イ)動的シナリオにおける一致性検証

(ウ)動的シナリオ検証

⑫高精細 CG ツール評価

A/D パートが開発した高精細 CG ツールを評価するために、現在公表されている他の CG ツールによる高精細 CG データをカメラの認識エンジンで認識処理を行い、比較および評価した。

⑬不調要因評価(逆光)

A/D パートが開発した高精細 CG ツールにおいて逆光の不調要因が付加された高精細 CG データをカメラ物理モデルで認識処理を行い、CG 再現性とカメラ認識への影響を評価した。

⑭不調要因評価(白線カスレ)

A/D パートが開発した高精細 CG ツールにおいて白線カスレの不調要因が付加された高精細 CG データをカメラ物理モデルで認識処理を行い、CG 再現性とカメラ認識への影響を評価した。

(2)令和3年度の成果

⑪不調要因評価(雨)

本章では、不調要因である雨滴による認識不調の評価を実施する。ここでは、CG の再現性の比較を静的なシナリオである防災科研の大型降雨実験施設での実験より実施する。カメラ認識への影響については、大型降雨実験施設の試験に加えて、動的なシナリオである JARI の特異環境試験場での試験も報告する。その為、特異環境試験場の検証の前に、動的なシナリオにおける一致性検証(基本検証)を実施したので、結果を合わせて報告する。

（ア）静的シナリオ評価

本節では、防災科研の大型降雨実験施設にて実施した降雨試験で比較を実施した。降雨量 60 ㎜/h のシナリオを再現し、認識に適用した結果を用いて評価した。実車と CG の映像を確認した結果、CG 再現時点での差異が生じている為、CG 再現性とカメラ認識性の 2 段階で報告する。

(a)CG 再現性評価

カメラ認識の前に映像での比較を示す。雨滴表現について実車と CG の比較を、Figure 236 に示す。また、実車と CG の雨滴のワイパー再現を、Figure 237 に示す。

出所：日立 Astemo（株）

Figure 236 実車と CG の雨滴再現の違い(左：実車 右：CG)

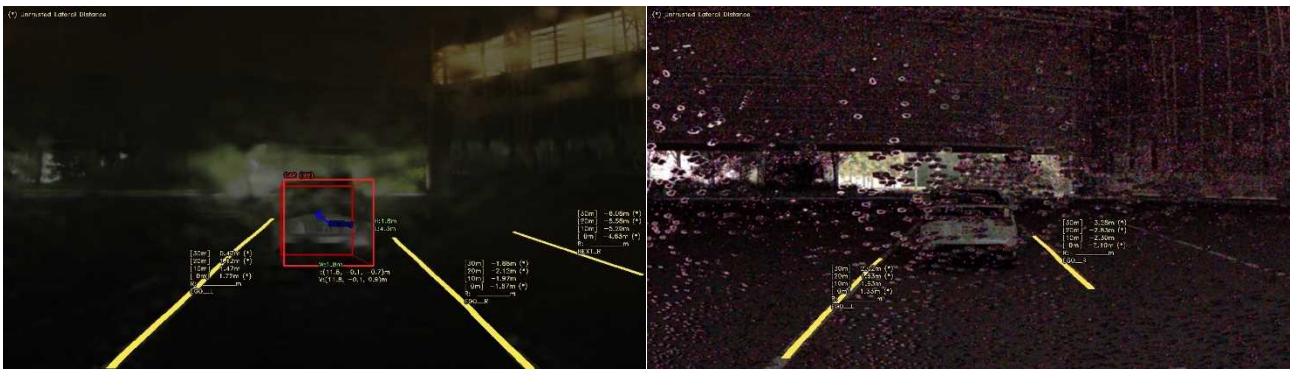
出所：日立 Astemo（株）

Figure 237 実車と CG のワイパー再現の違い(左：実車 右：CG)

Figure 236 より、実車映像では雨が垂れているのに対し、CG では雨粒の 1 つ 1 つがはっきり表示されており、CG が実車再現されていないことがわかる。Figure 237 に、フロントガラスをワイパーが払拭している映像を示している。実車、CG 共にワイパー部を枠で明記した。実車は、払拭中のワイパーがぶれるようなブラーが発生しているが、CG はワイパーが止まっているように表現されブラーが発生していない。

(b)カメラ認識性評価

次に、雨滴表現の違いによる認識性の影響を確認する。フロントガラスに雨滴が付着したことによる認識への影響を、Figure 238 に示す。また、ワイパー払拭後の時間経過による認識への影響を、Figure 239 に示す。



出所：日立 Astemo（株）

Figure 238　雨滴表現の認識への影響(左：実車　右：CG)

出所：日立 Astemo（株）

Figure 239　ワイパー払拭後時間経過による認識への影響(左：実車　右：CG)

Figure 238 より、雨滴表現の違いによるカメラ認識性が実車と CG で異なっている。実車はフロントガラスを覆うように雨が付着することで先行車の形状や白線が見える為、先行車や白線を検知、認識できている。しかし、CG では雨粒が 1 つ 1 つ付着している為、先行車は検知できず、白線の一部も覆い隠し認識できなくなっている。ただし、Figure 239 に示す時間経過後の映像では、降雨実車、CG 共に検知ができなくなる現象は同じ結果となっている。以上の結果より、カメラ認識の観点からは雨滴の再現が重要であることが明確となった。これらの表現の対応により、DIVP®の適用シーンの更なる拡大が期待できる。

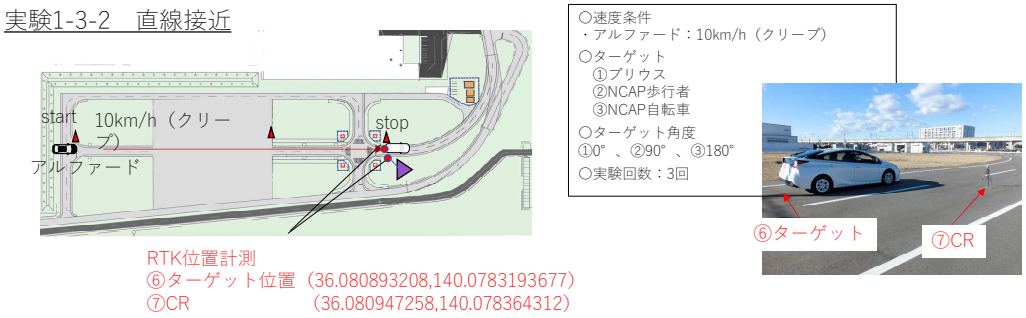
次節以降に、シナリオ動的シーン対応による検証を示す。

(イ) 動的なシナリオにおける一致性検証

本節では、動的シナリオによる認識性評価のカメラ認識性の一致性検証を実施する。以下に、対象とした評価シーンとシナリオ修正について、認識結果について示す。

(a) 評価シーン

2020 年 12 月 21 日に JARI にて試験を実施した実験 1-3-2 直線接近シナリオにて動的な評価を行う。実験 1-3-2 の詳細条件を Figure 240 に示す。



出所：日立 Astemo（株）

Figure 240　実験 1-3-2 試験パターン

(b)CG シナリオ問題

本プロジェクトでは、試験車両構築時に計測したカメラセンサの取り付け位置情報と、実車試験時に GPS データを取得している。取得した GPS データから自車と先行車のシナリオを生成し、CG 環境で再現する手法をとっていた。作成されたシナリオを用いて CG データを作成し、CG 映像と実車映像の比較を Figure 241 に示す。

出所：日立 Astemo（株）

Figure 241　シナリオ調整前

Figure 241 より、実車と CG で先行車や白線の位置がずれていることが見て取れる。このズレは GPS 測定機器の持つ精度誤差が要因と考える。一致性検証は、位置や姿勢などセンサ情報の一致に加え、画面位置の一致など画面座標の一致も検証する内容となっており、先行車や白線がズレている状態だと評価することができない。そこで、シナリオを担当している A パートにシナリオ修正を依頼した。

(c)シナリオ修正

A パートでは上記シナリオの初期の地点と最終地点をピックアップして、実車映像と CG 映像の合わせこみを実施し、2 点における調整パラメータと調整後の映像を提供頂いた。調整後の実車映像と CG 映像の比較を Figure 242 に示す。

出所：日立 Astemo（株）

Figure 242　調整後映像(左：初期フレーム　右：最終フレーム)

Figure 242 の映像より、初期フレームでは先行車が遠方に配置している為、白線をメインとした調整となっており、最終フレームは白線に加えて先行車の調整となっている。カメラ認識では、先行車と白線の認識が必要となる為、Table 74 に示す最終フレームでの調整値をシナリオ全体に適用し、認識評価を実施した。

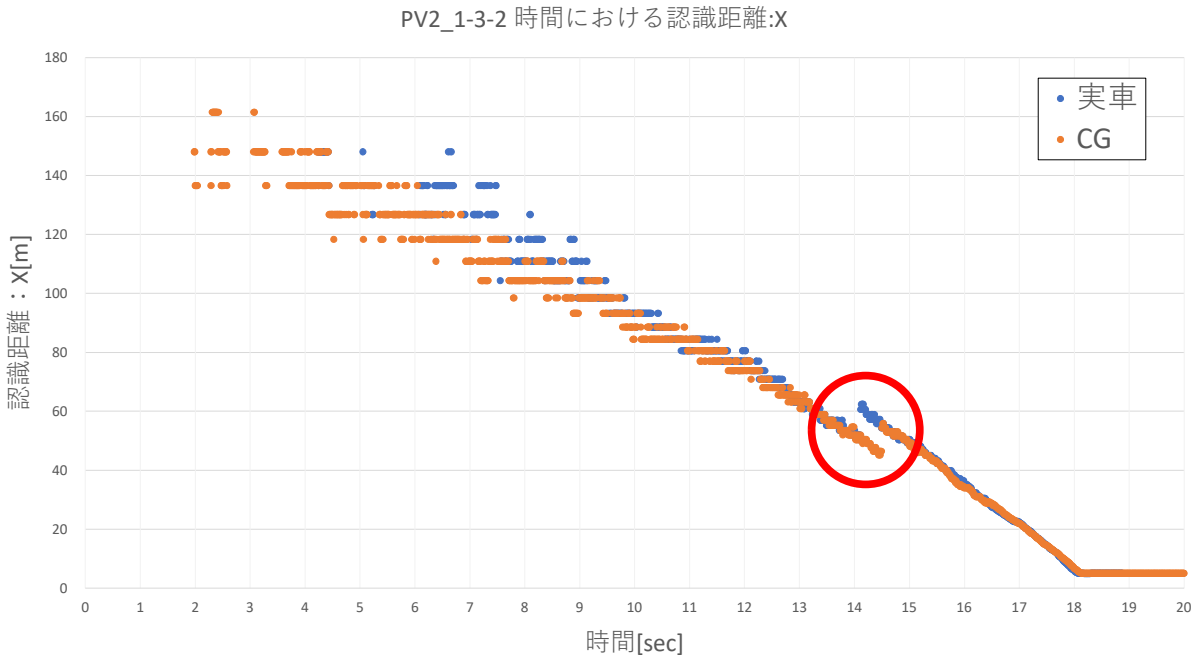
Table 74　シナリオ調整値

調整対象	x[m]	y[m]	z[m]	yaw[deg]	roll[deg]	pitch[deg]
自車	0.010	0.030	0.020	0.2	0.1	0.9
自車搭載カメラ	−0.028	0.010	0.000	2.2	−1.0	0.6
先行車	0.010	0.010	−0.010	−1.1	−1.1	−0.9

出所：日立 Astemo（株）

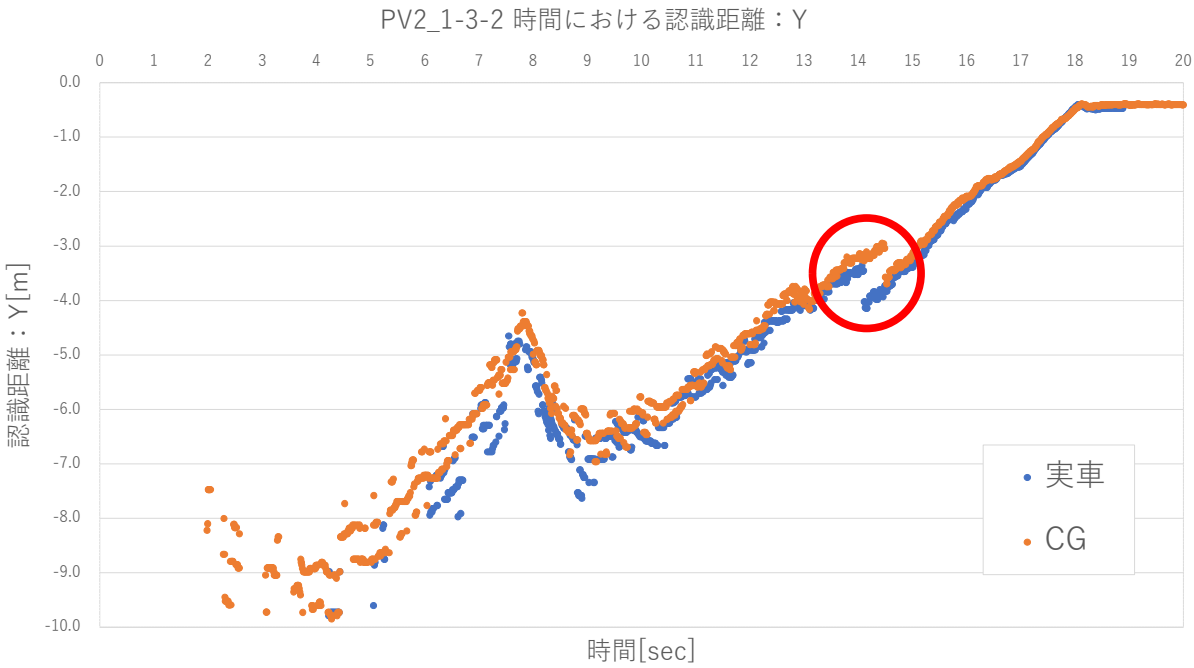
(d)認識結果

実車データと、シナリオ修正した CG データを基にカメラ認識に適用した結果を示す。認識結果の比較として、ターゲット車両までの距離を認識した距離：X の結果を Figure 243 に、ターゲット車両の横位置を認識した距離：Y を Figure 244 に示す。



出所：日立 Astemo（株）

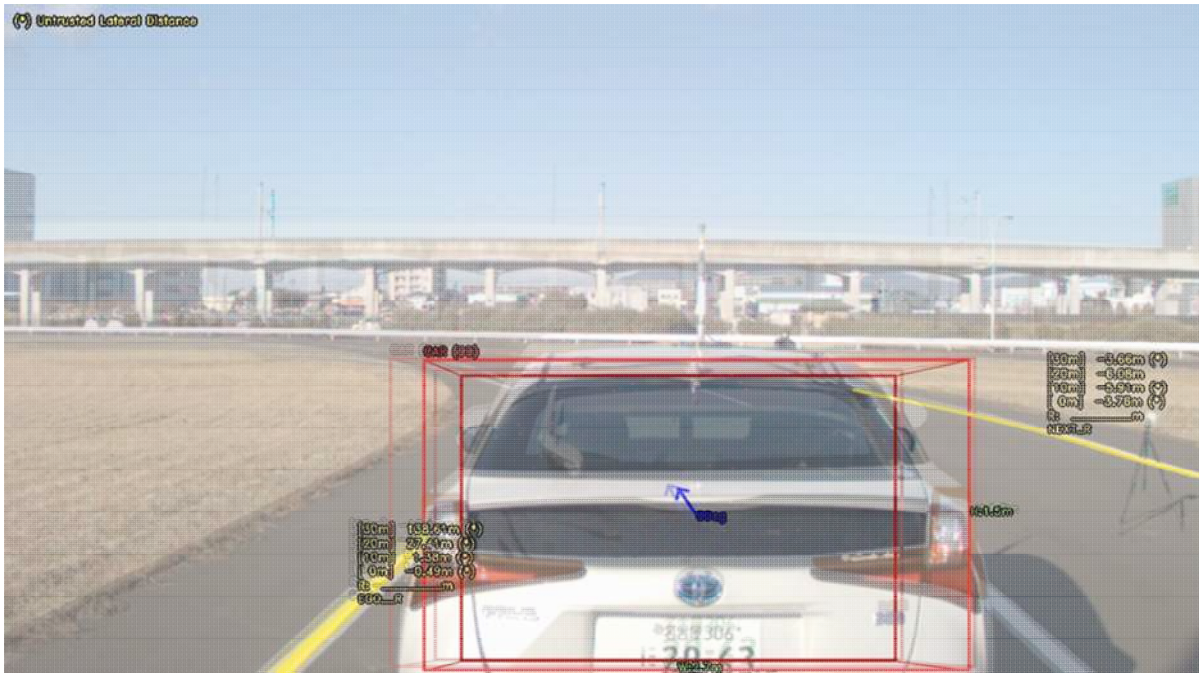
Figure 243　時間における認識距離 X



出所：日立 Astemo（株）

Figure 244　時間における認識距離 Y

前述グラフより、認識距離 X、Y ともに実車、CG 共に全体的な傾向を取っていることを確認した。しかし、グラフ中に記載した赤丸部を見るとタイミングや値が一致していないことが分かる。また、実車と CG のズレはシナリオ前半部で大きく表れていることも見て取れる。このことは、今回実施したシナリオ調整はシナリオ最終の映像のみを活用して合わせこんだものであり、シナリオ前半の合わせこみが十分でないことが想定される。そこで、シナリオ適用後の自車停止段階での実車と CG の比較結果を Figure 245 に、シナリオ先頭フレームでの実車と CG の比較結果を Figure 246 に示す。



出所：日立 Astemo（株）

Figure 245　自車停止状態フレームでの比較

出所：日立 Astemo（株）

Figure 246　シナリオ先頭フレームでの比較

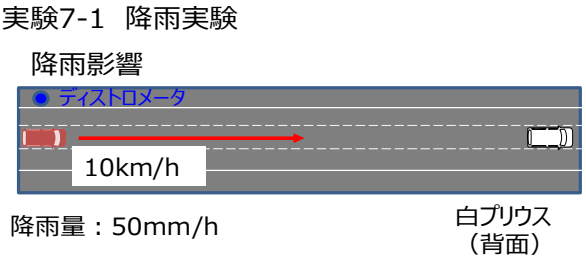
Figure 245 は、事前に調整した結果である Figure 242 よりも先行車、白線共に実車と CG でずれていることが分かる。これは、シナリオ最終での合わせこみを行ってはいるが、GPS 精度のずれは停止中も発生しており、最終地点の 1 点でのみの調整であることが要因であると想定される。また、シナリオ先頭フレームについては、最終地点のパラメータを適用している為、白線の位置、高さがずれた CG 生成となっていることが分かる。

時系列での一致性を検証する上では、ある 1 点での調整ではなく、各フレームでのシナリオ合わせこみが重要であることが明らかである。これらの対応により、DIVP®の適用シーンの更なる拡大が期待できる。

以上より、動的なシナリオ評価では現時点実車と CG での認識性の一致を取ることが難しい。その為、下記に示す動的評価では、認識不調要因を CG で再現した際の再現性と、カメラ認識に及ぼす影響とその要因の分析結果を示す。

(ウ)動的シナリオ検証

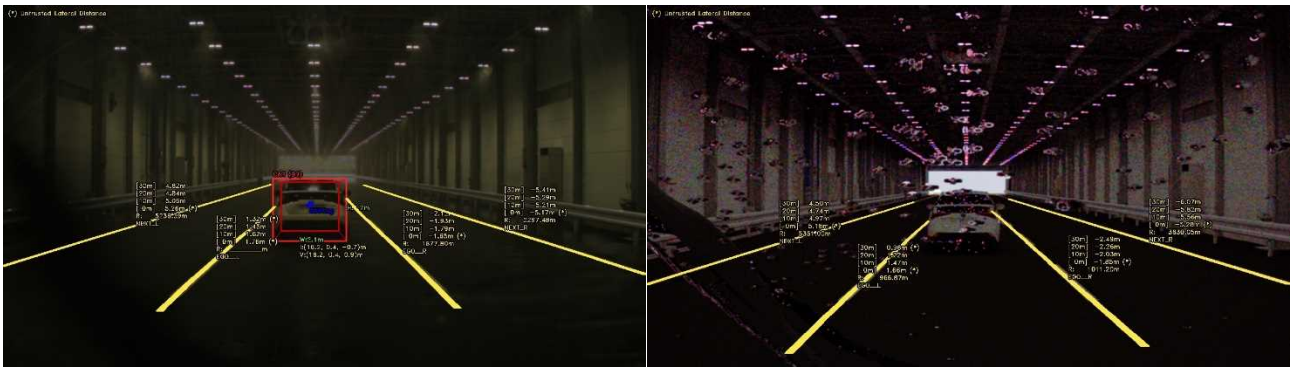
本節では、認識不調要因:雨の動的シナリオの検証として、JARI の特異環境試験場で試験を行った結果を示す。動的なシナリオ検証として、Figure 247 に示す JARI の特異環境試験場での試験を用いて評価する。



出所:日立 Astemo(株)

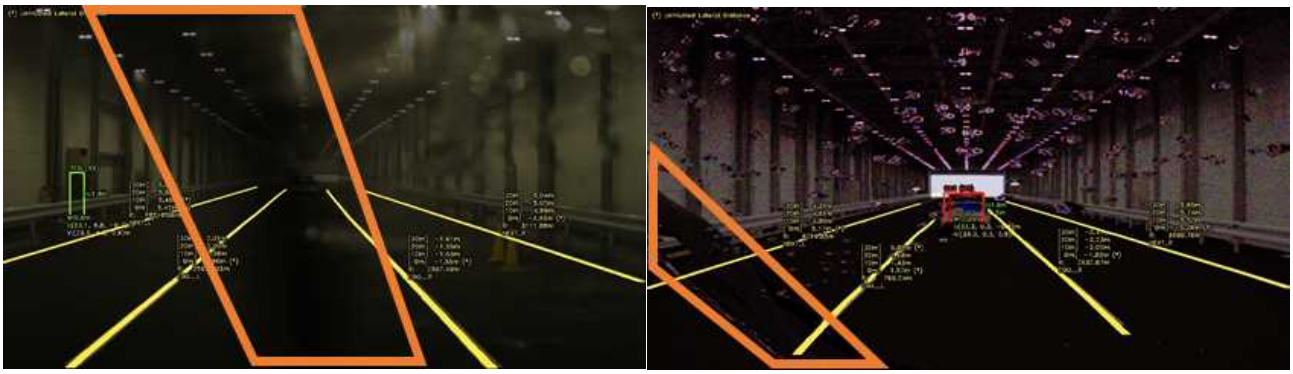
Figure 247 動的シナリオパターン

前節(ア)の静的シナリオ検証で CG 再現性の検証の確認ができたので、動的シナリオ検証はカメラ認識性の評価を実施する。雨滴による認識性の検証を Figure 248 に、ワイパーによる認識性の検証を Figure 249 に示す。



出所:日立 Astemo(株)

Figure 248 動的シナリオの雨滴による認識不調の影響(左:実車 右:CG)



出所：日立 Astemo（株）

Figure 249　動的シナリオのワイパーによる認識不調の影響(左：実車　右：CG)

前節の静的シナリオ検証していた雨滴の影響で、実車とCGでターゲットである先行車の認識に差異が生じていることは動的シナリオでも確認された。次に、Figure 249 より、ワイパー表現による認識差分が生じていることが分かった。先行車にワイパーがかぶることでターゲットが検出できなくなることがある。CGではワイパーと先行車がかぶることがなく、発生していなかった。これはワイパー挙動が実車とCGで異なっていることが問題で考えられる。以上より、カメラ認識における不調再現においては、雨滴表現とワイパー表現およびワイパーの同期の再現が重要であることが確認できた。これらの表現の対応により、DIVP®の適用シーンの更なる拡大が期待できる。

⑫高精細 CG ツール評価

本章では、高精細 CG ツールの評価を実施する。現在、高精細 CG を生成するツールが増えている。DIVP®に近似したシナリオを作成し、認識適用を実施する。

（ア）高精細 CG ツール選定

現在公開されている CG ツールとして IPG Automotive 株式会社殿の MovieNX、ANSYS Inc.殿の VSS、株式会社理経殿の CG ツール、Metamoto, Inc.殿の CG ツール、Cognata 社の CG ツール、Applied Intuition, Inc.殿のツールから 2 つを選定する。作成した DA 表を Table 75 に示す。

Table 75 高精細 CG ツール DA 表

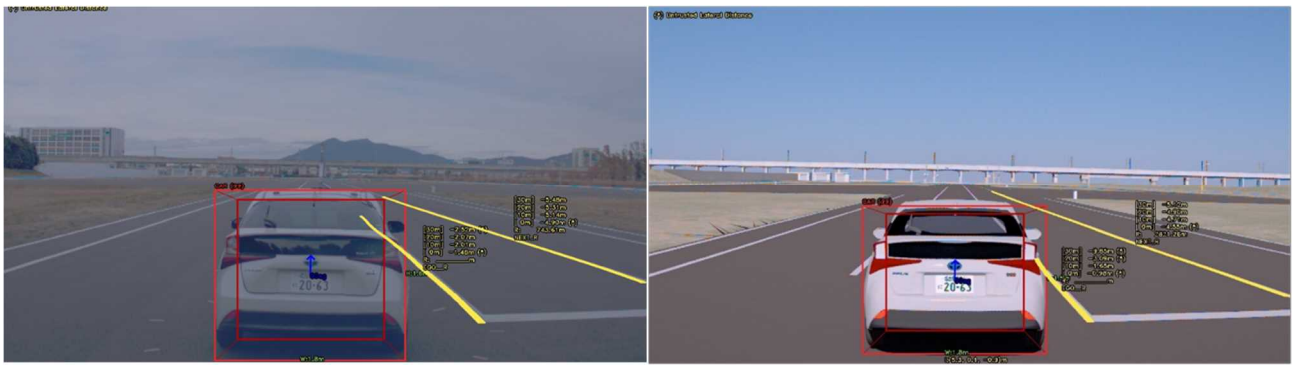
決定分析					
決定目標の明確化	決定ステートメント	DIVP®と比較する高精細 CG ツールを決定する			
候補案の作成	候補案の評価	Must による絞り込み Want による比較評価			
目標の設定	Must 評価項目	PhotoRealistic な映像であるか	環境のアセットが充実しているか	HILS との接続性があるか	導入のしやすさ
候補案 1: Movie NX	評価結果 [OK/NG]	OK	OK	OK	OK
	評価詳細	CG コアにゲームエンジンを使用 サンプル入手済	標識や信号などが主要国の環境に対応	IPG で実績あり	ライセンス保有済
候補案 2: VSS 2021R2	評価結果 [OK/NG]	OK	OK	OK	OK
	評価詳細	実車で計測したデータあり	標識や信号などが主要国の環境に対応	実績あり	ライセンス保有済
候補案 3: 理経	評価結果 [OK/NG]	OK	(NG)	OK	(OK)
	評価詳細	OEM 導入実績あり	標識や信号などが日本の環境に対応	OEM で HILS ＋VR 実績あり	ライセンス追加購入の必要あり
候補案 4: Metamoto	評価結果 [OK/NG]	(OK)	NG	(OK)	(NG)
	評価詳細	CG コアにゲームエンジンを使用 サンプル入手出来ず	少ない	X-in-the-Loop 連携記載有 VMC とパートナー	ライセンス購入の必要あり
候補案 5: Cognata	評価結果 [OK/NG]	(OK)	OK	—	(NG)
	評価詳細	CG コアにゲームエンジンを使用 サンプル入手出来ず	標識や信号などが主要国の環境に対応	HP に記載なしの為、不明	ライセンス購入の必要あり
候補案 6: Applied Intuition	評価結果 [OK/NG]	(OK)	OK	—	(NG)
	評価詳細	CG コアにゲームエンジンを使用 サンプル入手出来ず	標識や信号などが主要国の環境に対応	HP に記載なしの為、不明	ライセンス購入の必要あり

出所：日立 Astemo（株）

本章で選定した 6 候補の CG の内、Must 項目として設定した 4 項目で NG 項目が存在しない、MovieNX と VSS を選出した。以下に MovieNX と VSS を用いた CG ツール評価結果を示す。

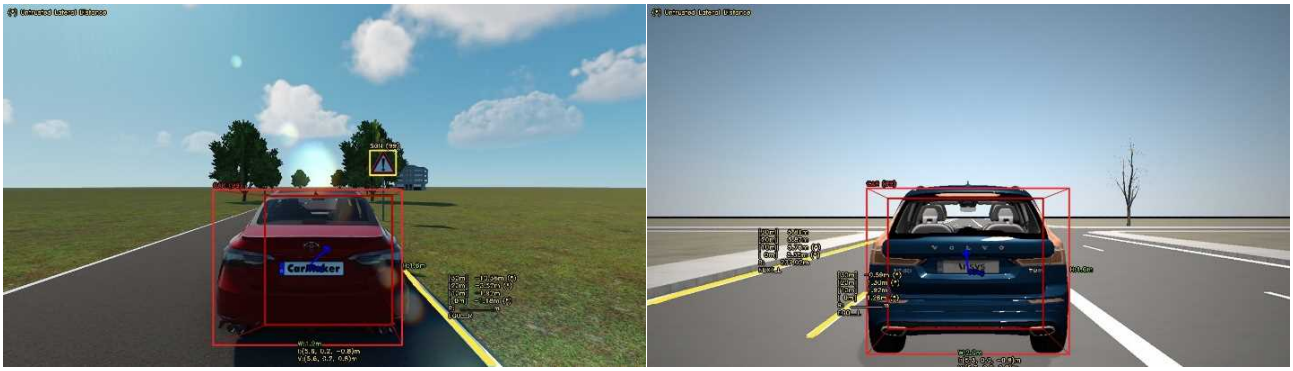
(イ)高精細 CG ツール評価

本章では、静的な評価結果である自車、先行車静止の定点シナリオを用いて DIVP®と比較を実施した。比較元である DIVP®で取得した実車映像と CG 映像それぞれの認識結果を Figure 250 に示す。各ツールで DIVP®の実車映像を模擬した CG を作成し DIVP®のカメラ認識に適用した結果を Figure 251 に示す。DIVP®では先行車としてプリウスを使用しているが、MovieNX はプリウスが存在しない為、登録されている車両の内 形状的に近いカムリを選定、VSS に関しては実車を計測して再現している XC60 を用いて CG 作成を実施した。本 CG は、先行車の位置やサイズに注力して調整した結果となっている。また、認識結果として、合わせこんだターゲットのまでの認識距離と認識した車両の横幅を Table 76 に示す。



出所：日立 Astemo（株）

Figure 250　10m 定点(左：実車　右：CG)



出所：日立 Astemo（株）

Figure 251　10m 定点(左：MovieNX　右：VSS)

Table 76　合わせこみ CG によるターゲット認識結果

認識結果	実車	DIVP®	MovieNX	VSS
ターゲットまでの距離	4.9m	5.3m	5.5m	5.3m
先行車の横幅	1.8m	1.8m	1.9m	2.0m

出所：日立 Astemo（株）

以上の結果より、MovieNX や VSS ともに DIVP®相当の先行車認識を実施していることが分かる。しかし、CG 自体を確認すると、MovieNX は実車を測定した反射率設定がボディに適用されていないことでボディの太陽光の反射に違和感がある。また、VSS は実車測定しボディに適用しているが窓ガラスの反射率は未実装であるなど課題があることが分かった。

以下に、カメラ認識の観点から必要な設定項目や CG 情報、設定項目の必要性を、弊社独自の判断基準を以て VSS,MovieNX、DIVP®の現状をまとめた結果を、Table 77 に示す。作成した表において、カメラ認識における設定の必要性が高い項目を橙色で網掛けを行っている。また、MovieNX,VSS、DIVP®を比較して評価が高い項目について、それぞれのツール部に青色に網掛けして表示している。

本分析より、DIVP®は VSS や MovieNX に比べ、アセットや道路などの汎用性には欠けるものの(No.44～No.50)、実車測定を行い天候、反射など再現に優れている(No.31～No.35)環境であることを再確認することができた。

本結果より、DIVP®は悪天候と不調要因の再現には突出しており、更なる精緻化を進めることにより DIVP®の適用シーンの拡大が期待できる。

Table 77　高精細 CG ツールの詳細分析表

項目	大項目	中項目	小項目	必要性	パラメータ	主な影響	IPG Automotive株式会社 MovieNX		ANSYS, Inc. VSS R2021R2		DIVP	
1	車両取り付け状態	位置	前後	高	前後位置	ｳｲﾝﾄﾞｼｰﾙﾄﾞ上の見え方に影響	○		○		○	[凡例] ○：対応可能/実装済み (○)：対応可能/実装済み カメラ要求には未達 △：一部対応可能/実装済み 又は、代替で対応可能 ×：対応不可/未実装 －：不明
2			上下	高	上下位置	路面推定に影響	○		○		○	
3			左右	高	左右位置	大きな影響なし	○		○		○	
4		姿勢	ヨー	高	車両に対するヨー角	横位置に影響	○		○		○	
5			ロール	高	車両に対するロール角		○		○		○	
6			ピッチ	高	車両に対するピッチ角	路面推定、距離推定に影響	○		○		○	
7	レンズ-画像センサ（CMOS等）の関係	位置	前後	中	光軸上の焦点距離に対する センサ面のズレ	ボケ（フォーカスずれ）	×	設定不可	×	設定不可	×	設定不可
8			上下	中	画像センサ上の光軸と交わる垂直位置	－	△	画面サイズ変更と 画面トリミングで 対応可能	△	画面サイズ変更と 画面トリミングで 対応可能	△	画面サイズ変更と 画面トリミングで 対応可能
9			左右	中	画像センサ上の光軸と交わる水平位置	－	△	画面サイズ変更と 画面トリミングで 対応可能	△	画面サイズ変更と 画面トリミングで 対応可能	△	画面サイズ変更と 画面トリミングで 対応可能
10		姿勢	ヨー	中	光軸とセンサ面の交わる点を通る センサ面上の垂直線中心のセンサ面回転角度	受光面の位置による フォーカスずれの違い	×	CMOS自体の 姿勢角変更不可	×	CMOS自体の 姿勢角変更不可	×	CMOS自体の 姿勢角変更不可
11			ロール	中	光軸とセンサ面の交わる点を通る センサー面と直交する軸中心のセンサ面回転角度	画像の回転	×	CMOS自体の 姿勢角変更不可	×	CMOS自体の 姿勢角変更不可	×	CMOS自体の 姿勢角変更不可
12			ピッチ	中	光軸とセンサ面の交わる点を 通るセンサ面上の水平線中心の センサ面回転角度	受光面の位置によるフォーカスずれの違い	×	CMOS自体の 姿勢角変更不可	×	CMOS自体の 姿勢角変更不可	×	CMOS自体の 姿勢角変更不可
13	レンズ特性	基本特性	射影方式	高	レンズ射影方式	－	(○)	通常と魚眼のみ	○		○	
14			焦点距離	高	焦点距離	－	×	設定不可	○		○	
15			イメージサークル径	低	イメージサークル半径	－	×	設定不可	×	設定不可	×	設定不可
16		収差	歪曲収差	高	歪係数あるいは 歪タイプとその程度(%)	周辺部空間解像度に影響	×	設定不可	○		○	
17			色収差	低		色ずれ	×	設定不可	○		×	設定不可
18			シェーディング	中	周辺減光を表す多項式の係数 あるいは歪タイプとその程度(%)	－	×	設定不可	○		○	
19	画像センサ仕様	有効画素数	水平	高	(水平)画素数	－	○		○		○	
20			垂直	高	(垂直)画素数	－	○		○		○	
21		画素ピッチ	水平	高	水平画素ピッチ	解像度に影響	×	設定不可	○		○	
22			垂直	中	垂直画素ピッチ	解像度に影響	×	設定不可	○		△	個別には 設定できない
23		ベイヤ配列	カラーフィルタ	高	ベイヤパターン指定 各カラーフィルタの波長透過特性	色再現に影響	△	ベイヤーパターン設定可 波長入力不可	○		△	IMX490限定
24		画素値精度	出力ビット数	中	ビット数	後段で利用可能な ダイナミックレンジ	○		○		×	設定不可
25		HDR圧縮	PWL パラメータ設定	中	PWL設定パラメータ	輝度特性、色再現に影響	×	設定不可	×	設定不可	△	IMX490限定
26		感度	露光感度（ゲイン）	中	PWL前の増幅率	輝度特性、色再現に影響	×	設定不可	×	設定不可	×	設定不可
27			レベルオフセット	中	PWL前のオフセット値	輝度特性、色再現に影響	×	設定不可	×	設定不可	×	設定不可
28		フレームレート	ー	高	フレーム時間	相対速度検出、認識精度に影響	○		○		○	
29		同期機能	外部同期	中	同期モード	各センサ（カメラ含む）間の センシングタイミングの違いによる影響	×	設定不可	×	設定不可	×	設定不可
30		シャッタ方式	シャッタ方式	低	グローバルシャッタ/ ローリングシャッタ選択、 シャッタ動作定義に 必要なパラメータ	ローリングシャッタ歪の影響	×	設定不可	×	設定不可	×※	設定不可
31	CG環境	周辺環境再現	天候	高	雨、雪、霧	－	×	再現不十分	×	再現不十分 フロントガラスの 付着表現なし	△	雨再現を実装
32			太陽位置	高	時間による影、逆光再現	－	△	太陽位置の調整：可 逆光表現：不可 設定可能との情報アリ	△	太陽位置の調整：可 逆光表現：不可	(○)	太陽位置の調整：可 逆光表現：可※ 光条などの適用が必要
33			反射表現	中	先行車ボディやタンクローリの映り込み 路面反射	－	△	路面反射のみ可	×	設定不可	(○)	Priusと Alphardのみ適用
34		光再現	自車	高	ヘッドライト、フォグランプ	－	△	点灯表現：可 実車等価性：なし	△	点灯表現：可 実車等価性：なし	○	
35			先行車	中	ブレーキランプ	－	△	点灯表現：可 実車等価性：なし	△	点灯表現：可 実車等価性：なし	○	
36		道路再現	直線	高		－	○		○		○	
37			カーブ路	高		－	○		○		○	
38			交差点	高		－	○		○		○	
39			合流	中		－	○		○		○	
40			分岐	中		－	○		○		○	
41			車線数変化	中		－	○		○		○	
42		道路形状再現	坂　※Pitch方向	中		－	○		○		○	
43			カント　※Roll方向	中		－	○		○		○	
44		アセット の充実度	車両	高	普通自動車、トラック 二輪車、自転車 NCAPダミー	－	(○)	PhotoRealisticとの情報 あり。ただし未検証	(○)	PhotoRealisticではない	△※	Priusと Alphardのみ適用
45			歩行者	高	大人、子供 特殊(ベビーカー、台車など) NCAPダミー	－	(○)	PhotoRealisticではない	(○)	PhotoRealisticではない	△※	JARI,お台場,C1の一部で 高精度の実装済み ※任意に自由生成が不可
46			建物	中		－	(○)	PhotoRealisticとの情報 あり。ただし未検証	(○)	PhotoRealisticではない	△※	JARI,お台場,C1の一部で 高精度の実装済み ※任意に自由生成が不可
47			道路標識	中	標識	－	(○)	PhotoRealisticではない	(○)	PhotoRealisticではない	△※	JARI,お台場,C1の一部で 高精度の実装済み ※任意に自由生成が不可
48			道路付属物	中	ガードレール	－	(○)	PhotoRealisticではない	(○)	PhotoRealisticではない	△※	JARI,お台場,C1の一部で 高精度の実装済み ※任意に自由生成が不可
49			路面パターン	中	アスファルト、補修痕など	－	(○)	PhotoRealisticではない	(○)	PhotoRealisticではない	△※	JARI,お台場,C1の一部で 高精度の実装済み ※任意に自由生成が不可
50			白線パターン	高	色、破線などのパターン	－	(○)	PhotoRealisticではない	(○)	PhotoRealisticではない	△※	JARI,お台場,C1の一部で 高精度の実装済み カスレの任意設定が不可
51		アセット拡充のしやすさ	ー	高		－	×		×	作成依頼：未対応	△※	

※DIVPで2022年度以降に拡充計画あり

出所：日立 Astemo（株）

⑬不調要因評価(逆光)

本章では、不調要因である逆光による認識不調の評価を実施する。JARI の特異環境試験場での逆光試験(投光器による)の動的シナリオを再現し、認識に適用した結果で評価する。前章で示したように動的シナリオの一致性検証が困難であるため、逆光の CG 再現性での比較評価と、カメラ認識適用時の認識結果による CG 生成の課題をあげることで評価とする。

(ア)CG 再現性評価

実車での逆光試験を CG にて再現した時の再現性の評価を行う。シナリオの開始時点の実車映像と CG 映像を Figure 252 に、シナリオの最終時点の実車映像と CG 映像を Figure 253 に示す。

出所:日立 Astemo(株)

Figure 252 シナリオ開始時の映像(左:実車 右:CG)

出所:日立 Astemo(株)

Figure 253 シナリオ終了時の映像(左:実車 右:CG)

これらの映像より、CG の逆光再現が実車と異なることが分かる。Figure 252 より、実車には光のボケが円形ではなく歪んでいるが、CG では円状の表現となっている。また、光の明るさも異なっており、実車では先行車や白線が見えないのに対して、CG では先行車や白線が明確に表示されている。また、実車には CG にはない光条が表示されているが CG には再現されていない問題もある。Figure 252 と Figure 253 の時間経過の差分を確認すると、実車は光源が近付いてくることが表現されているが、CG では大きさが変わっていないことが分かる。これは CG 映像では光源が無限遠点に配置されていることが原因と考えられる。

(イ)カメラ認識性評価

次に、前節で確認した実車と CG の表現差分がカメラに認識に与える影響を確認する。実車と CG の白線認識性の違いを Figure 254 に、光条による誤検知を Figure 255 に、先行車の認識性の違いを Figure 256 に示す。

出所：日立 Astemo（株）

Figure 254 逆光表現における白線の認識性(左：実車　右：CG)

出所：日立 Astemo（株）

Figure 255 光条による白線誤認識(左：実車　右：CG)

出所：日立 Astemo（株）

Figure 256 逆光表現による先行車の認識性(左：実車　右：CG)

上記結果より、CG 再現性の差分はカメラ認識にも大きく影響を与えることがわかる。実車では、本来の先行車や白線が検知、認識できていないことが確認でき、逆に CG では先行車や白線の認識が確認できている。また、実車でのみ発生している光条を白線と誤検知する現象も発生している。

画面が白く霞む現象や光条は、フロントガラスの汚れや油膜が影響していると考えられる。より実車に近い

CG 環境を構築するためには、これらフロントガラスの詳細表現が必須であると考えられる。これらの表現の対応により、DIVP®の適用シーンの更なる拡大が期待できる。

⑭不調要因評価(白線カスレ)

本章では、実施計画書で記載の不調要因である映り込みや雨の評価以外に実施した不調要因である白線カスレによる認識不調の評価を実施する。首都高 C1、お台場の動的シナリオを再現し、認識に適用した結果で評価する。前章で動的シナリオの一致性検証が困難であるため、白線カスレの CG 再現性での比較評価と、カメラ認識適用時の認識結果による CG 生成の課題をあげることで評価とする。

(ア)CG 再現性評価

実車で C1/お台場周辺を走行した映像を再現した CG 映像の再現性を評価する。白線カスレが再現された映像を 2 つ示す。C1 走行時に取得した実車映像と再現した CG 映像を Figure 257 に、お台場周辺の映像を Figure 258 に示す。

出所:日立 Astemo(株)

Figure 257　C1 走行時の映像比較(左:実車　右:CG)

出所:日立 Astemo(株)

Figure 258　お台場周辺走行時の映像比較(左:実車　右:CG)

これらの CG 映像を見ると、白線のカスレが生じているが実車とはかすれ具合や特徴が異なる表現となっていることが分かる。また、シナリオの白線カスレ表現に差異が生じている映像を、Figure 259、Figure 260 に示す。

出所：日立 Astemo（株）

Figure 259　C1 走行時の白線表現の違い(左：実車　右：CG)

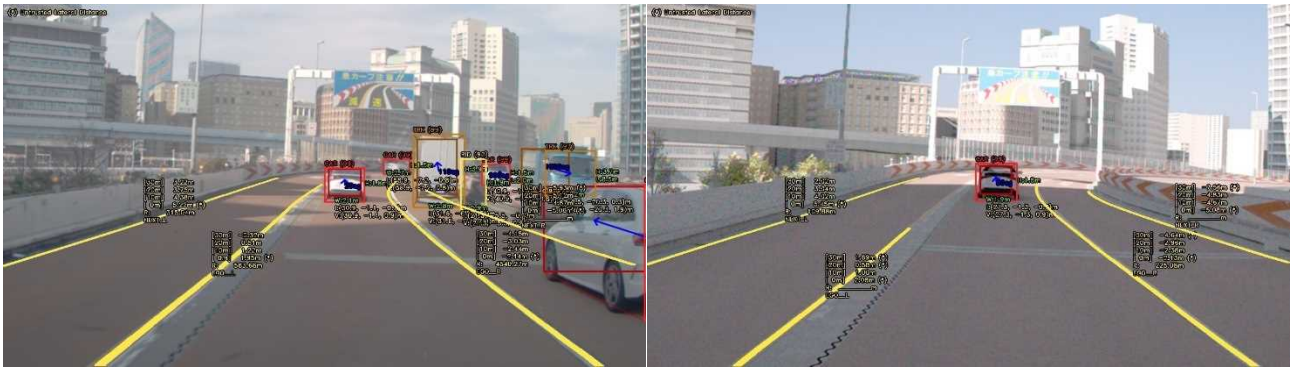
出所：日立 Astemo（株）

Figure 260　お台場周辺走行時の白線表現の違い(左：実車　右：CG)

本環境において白線カスレは A パートによる手作業(カスレ白線のテクスチャ貼り付け)で実装している為、白線カスレ表現されている個所は一部となっていた。カメラ認識の観点では連続した映像データで評価が必要であるため、シナリオ全体への白線カスレは必要となる。

(イ)カメラ認識性評価

次に、前節で確認した実車と CG の表現差分がカメラに認識に与える影響を確認する。白線かすれ実装した C1 の映像とお台場周辺の映像それぞれをカメラ認識に適用した結果を、Figure 261、Figure 262 に示す。



出所：日立 Astemo（株）

Figure 261 C1 カメラ認識性比較(左：実車　右：CG)

出所：日立 Astemo（株）

Figure 262　お台場カメラ認識性比較(左：実車　右：CG)

Figure 261 に示す C1 映像の比較映像より、自車走行レーンの左白線が本来は黄と白の二重実線となっているが、白線がカスレている。このような状態では内側の擦れた白線をカメラ認識できず外側の黄色実線を検知している現象は CG でも再現できていることを確認した。しかし、Figure 262 で自車走行レーンの左側白線をみると、実車では白線を検知しているのに対し、CG では白線検知できていないという結果となった。この違いは、前節で上げていた白線のカスレ表現の違いであることが要因であると考えられる。そこで、カメラ認識の観点からは実車と同一のカスレ表現が必要と考える。しかし、これらの実装は困難であると想定されるため、ユーザ側がカスレ具合を自由に調整するための白線カスレの調整機能が必要であると考える。これらの表現の対応により、DIVP®の適用シーンの更なる拡大が期待できる。

(3)カメラ認識部の評価まとめ

本プロジェクトを通じて、カメラ認識という観点における CG 環境構築の評価を実施してきた。本報告書で上げた、基本検証、不調要因評価における実車と CG の差異についてまとめる。また、各項目における改善要望も併せて記載した結果を Table 78 に示す。

Table 78 カメラ認識性検証結果まとめ

シーン		実車と CG の差異	改善要望
基本検証	直線接近	実車と CG でシナリオに差異があり、 動的シナリオで完全一致の認識比較ができない	シナリオの合わせこみ
		JARI の草むらの色が実車と CG で異なる。 CG では車両と草むらの色が近いため先行車の誤認識に影響	車両以外の周辺物の合わせこみ
不調要因評価	映り込み	実車では白い紙が映り込み＆先行車のリアガラスに 雲が映り込みすることで、白線と自車後方ピラーのコントラストが 低くなり、ピラーを白線の一部と誤認識していた。 CG では雲の映り込みがなく正検知	リアガラスに雲などの周辺環境の 映り込みを適用
		CG ではフロント/リアガラスの先の白線が明瞭に表現されており、 白線の誤認識が生じていた	フロントガラスやリアガラスの 反射表現を適用
	雨	特異環境試験場での雨滴の再現できない	特異環境試験場での雨滴再現
		雨粒のフロントガラスへの付着の様子が異なり、 ターゲット認識に差異が生じる	雨粒付着の再現度の向上 (特に雨滴再現の向上)
		ワイパーのブラー表現が異なり先行車認識に差異が生じる	ワイパーブラーの再現
	逆光	白飛びの範囲が異なっている。 フロントガラスの汚れや油膜の再現が必要と考える	フロントガラス汚れ表現追加 フロントガラス油膜表現追加
		逆光の光条を誤認識する現象が CG で再現できていない。	フロントガラス汚れ表現追加 フロントガラス油膜表現追加
	白線カスレ	白線のかすれ具合が実車と異なり、 白線の認識性が一致していない	白線かすれのシーン全面適用 白線かすれ調整機能対応

出所：日立 Astemo(株)

(4)次年度以降の計画

なし

5. 2. 3 「B6. ミリ波レーダ認識モデル構築」(学校法人幾徳学園神奈川工科大学、学校法人 トヨタ学園 豊田工業大学)

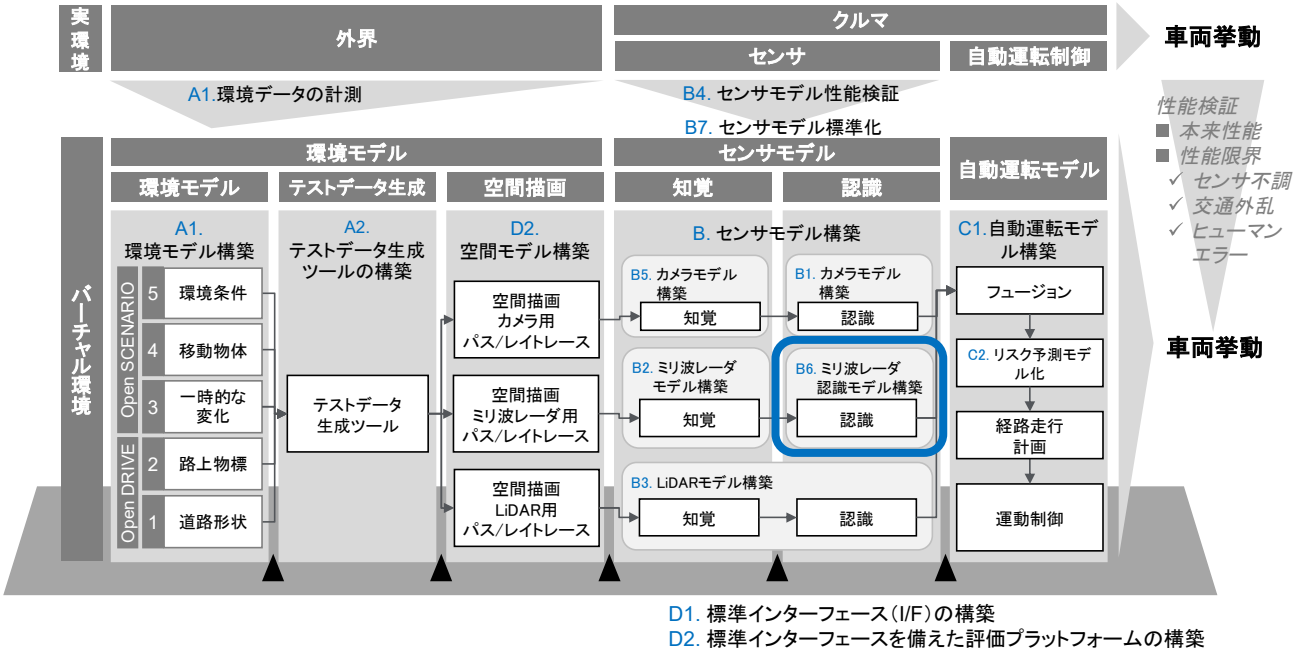


Figure 263 本研究の位置付け

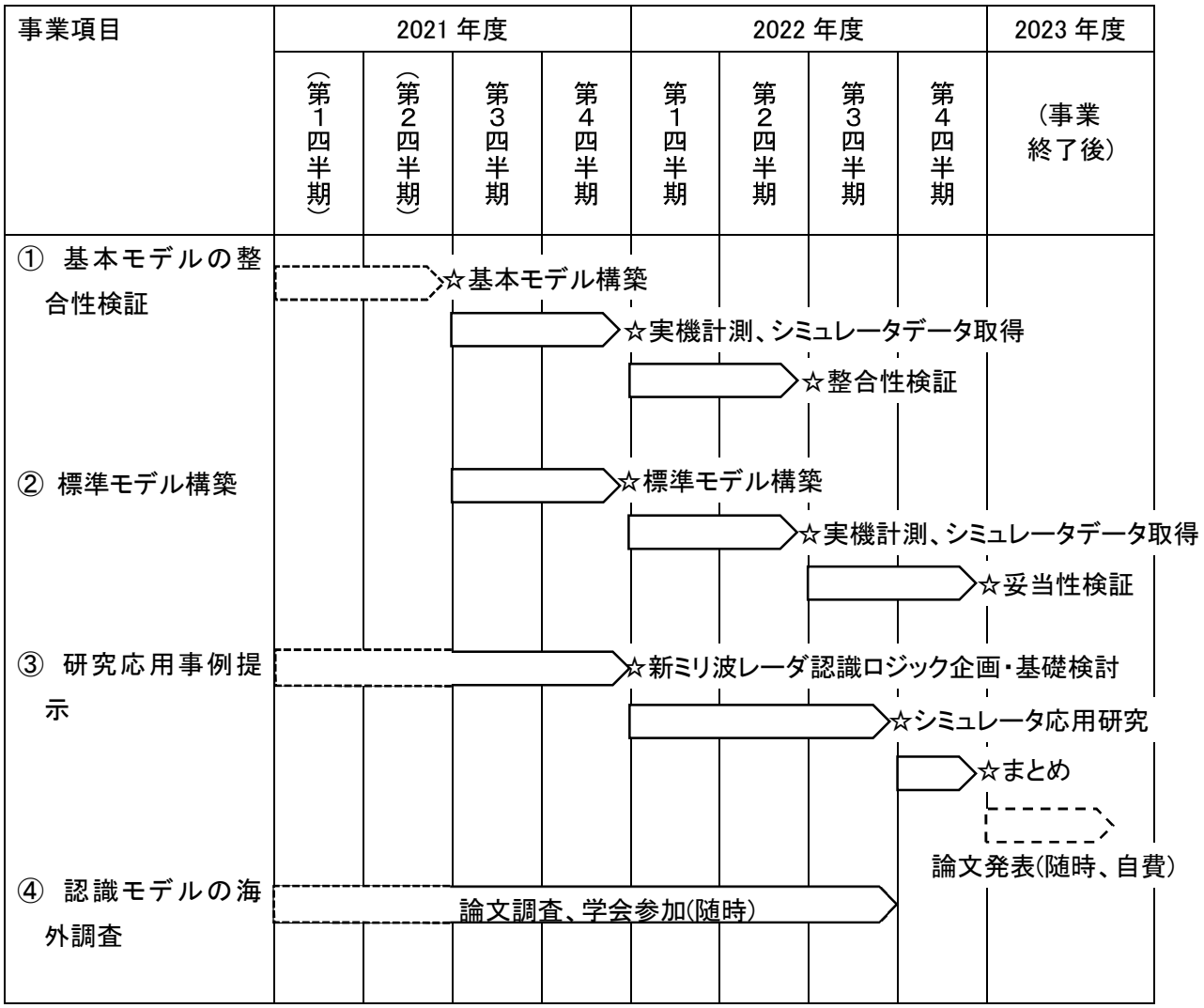
■ 事業目的

仮想空間での自動走行評価に資するミリ波レーダ認識モデルの構築および妥当性の検証を目的とする。

■ 事業概要

シミュレータの実社会での応用展開、標準化を促進するためには、シミュレータモデルの妥当性を示す必要がある。本事業では、ミリ波レーダの認識ロジックに関する標準モデルを構築し、その妥当性を検証、定量化する。また、シミュレータの普及に向けて、応用研究に有効活用した事例を提示する。

■ 実施計画


事業項目
2021 年度
2022 年度
2023 年度
（第１四半期）
（第２四半期）
第３四半期
第４四半期
第１四半期
第２四半期
第３四半期
第４四半期
（事業終了後）
① 基本モデルの整合性検証
☆基本モデル構築
☆実機計測、シミュレータデータ取得
☆整合性検証
② 標準モデル構築
☆標準モデル構築
☆実機計測、シミュレータデータ取得
☆妥当性検証
③ 研究応用事例提示
☆新ミリ波レーダ認識ロジック企画・基礎検討
☆シミュレータ応用研究
☆まとめ
論文発表(随時、自費)
④ 認識モデルの海外調査
論文調査、学会参加(随時)

(1)令和3年度の成果(まとめ)

シミュレータを活用したミリ波レーダ認識ロジックのベンチマーク評価，改良実施
深層学習用の多様な走行条件での学習・評価データセットの生成に期待

研究開発の成果

豊田工業大学 TOYOTA TECHNOLOGICAL INSTITUTE

研究成果の自己評価	■ 実施項目 ①ミリ波レーダシミュレーション環境構築、出力の検証 ②ミリ波レーダ出力からの物体検出・追跡ロジックの従来技術調査・比較評価、改良 ③実環境計測実験車の構築 ■ 実施内容・達成度 ①シミュレータ環境を構築して、出力の妥当性を評価・解析し、問題点を指摘してモデルの改良に繋げた。⇒計画通り ②・ノイズの多いレーダ反射点群をクラスタリングするアルゴリズムを調査し、最適なものを選択した。シミュレータ評価から課題を抽出して、改良手法を構築し、効果を定量評価した。 ・クラスタリングした検出物体候補に対して、追跡するアルゴリズムを調査し、最新の候補アルゴリズムをシミュレータにて定量比較評価し、最適なものを選択、適合した。 ⇒シミュレータを用いたロジック開発の活用事例を提示し、最新手法を比較解析し、最適手法を選択、改良できた。＝計画通り ③ミリ波レーダを、正解データを計測するLiDARやカメラ、GNSSと共に実験車に搭載し、計測評価環境を整えた。⇒計画通り
自社Biz視点から ①DIVP®の価値・魅力 ②活用可能性	①実車評価では難しい各種条件での計測データを大量に取得可能であることから、自動運転のための深層学習を用いた走行環境認識技術の研究開発のためには必須のツールである。 ②実施内容自体がこのシミュレータの活用事例の一つであり、今後さらに評価シナリオを増やし、また研究開発対象の機能を拡げて各種活用事例を外部に向けて発信していく。

得られた知財	①・シミュレーション環境構築マニュアル ・シミュレータ出力解析報告書 ②・クラスタリングアルゴリズム 従来技術調査報告書、シミュレータ評価報告書、 ロジック改良検討・評価報告書 ・データアソシエーション・トラッキングアルゴリズム 従来技術調査報告書、シミュレータ評価報告書 ③・計測センサ検討書、システム設計・構成検討書 ・システム取り扱い・計測マニュアル
知財の保全	■ 論文：2件発表計画(来年度予定) ※大学の立場上、知財権の取得より知財の公共化推進 ■ 報告書：55件以上(随時作成し追加中) ■ 手順書：5件
残課題・今後への期待値	■ 残課題 ・評価シナリオが限られており、多様な条件での評価まで至らず。 ・アルゴリズム改良に関して、一部構築し評価したが、幾つか創出した他のアイデアの具現化まで至らず。 ■ 今後の計画・要望 ・市街地シナリオを中心に拡充し、構築ロジックを評価・解析し、優位性を検証、提示していく。⇒要望：多様なシナリオ条件の自動生成や深層学習用公開データセットと対応した標準拡張機能の実現 ・創出アイデアの具現化を進め、シミュレータの有用性を含め各種機会で公開、論文発表していく。

Figure 264 研究開発の成果

DIVP®シミュレータにて計算したミリ波レーダ出力データの妥当性を確認し、カットアウトシナリオにて、検出対象物体の先行車とバルーンカーの検出及び追跡ロジックの構築、調整を行った。各種手法の論文調査を行い、候補アルゴリズムを抽出し、実装して評価プログラムを作成した。これらをシミュレータデータにて定量性能比較評価を行い、選択、調整したロジックが機能することを確認した。ただし、現状の単純な評価シナリオでは、ロジックによる差異が生じにくく、今後より複雑なシナリオにて評価し、改良していく。

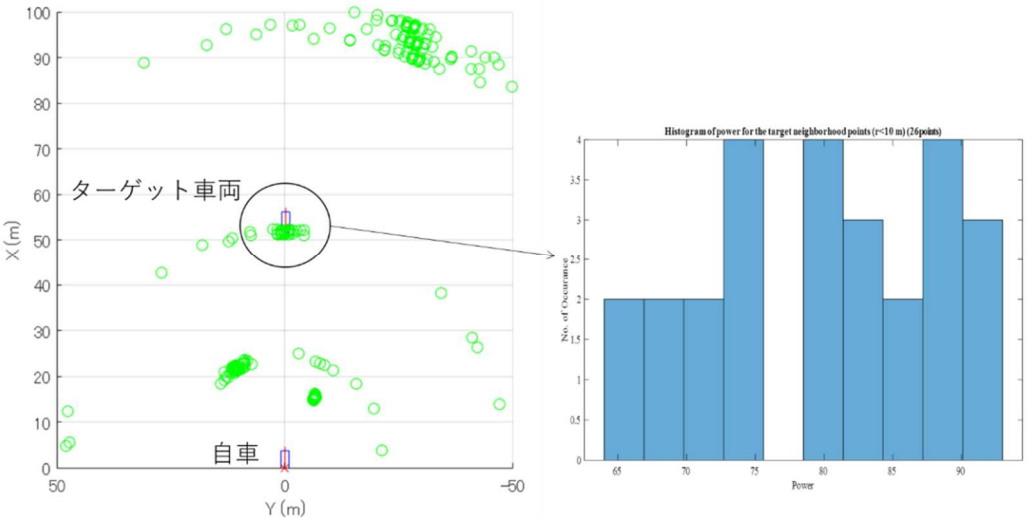
今回構築したロジックは、反射強度フィルタ、点群クラスタリング、トラッキングである。反射強度フィルタは、対象物体までの距離に応じたフィルタ閾値を設定した。点群クラスタリングは、物体までの距離に応じて DBSCAN のパラメータを可変にするロジックを構築し、一定パラメータに対してクラスタリング精度が改善された。トラッキングに関しては、従来手法でよく使われる GNN、PDA、MHT の 3 種類を抽出し、各種パラメータ調整を行い定量評価した。

実環境での独自データ計測を行うべく、実験車を構築した。ミリ波レーダを搭載し、正解値を併せて取得できるように、ミリ波レーダの計測範囲をカバーする LiDAR やカメラを設置し、計測ソフトウェアを整備した。

(2)令和3年度の成果

① ミリ波レーダ基本モデルの整合性検証

DIVP®シミュレータの旧プラットフォームの動作環境を整備し、Figure 265 に示す先行車に対する反射点群の解析を行った。この図では、ターゲット車両周辺(後端中心 10m 以内)の反射点群の反射パワー分布をヒストグラムで表している。

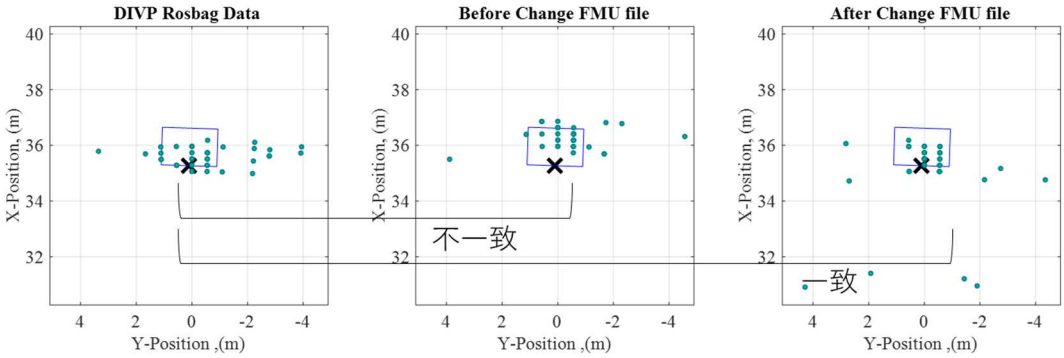


2 次元座標上のレーダ反射点群　　反射パワーのヒストグラム

出所:学校法人トヨタ学園豊田工業大学

Figure 265 先行車追従時のレーダ反射点群とその反射パワー分布

まずは単純な先行車追従のシナリオでノイズや車両からの反射強度などを各種解析し、次にカットアウトシナリオにて反射点群の現れ方を解析した。ここで、カットアウトシナリオは、先行車に近づいて 20m の車間距離で定速走行後、停車しているダミーカー(バルーンカー)に近づいて先行車が右に避け、自車が衝突回避のため停止する、というものである。対象物体の位置と反射点群の整合性を各種検証し調整した結果、妥当と判断した。詳細は省略するが、一例として修正例を以下に示す。カットアウトシナリオシミュレーションにおいて、バルーンカー後端部の反射点群の位置が当初 Figure 266 の中央図の様に開発元でのシミュレーション結果(左図)から遠方に約 1m ずれており、シミュレータ開発担当と調整を行い、FMU ファイルの変更などで右図の様に一致することを確認した。ここで、反射点群はランダム性を含んでおり、完全に一致しないため、予想反射点周りに点群が集中していることで妥当と判断した。



出所：学校法人トヨタ学園豊田工業大学

Figure 266 カットアウトシナリオでのダミーカーの反射点群の位置（対策前後）

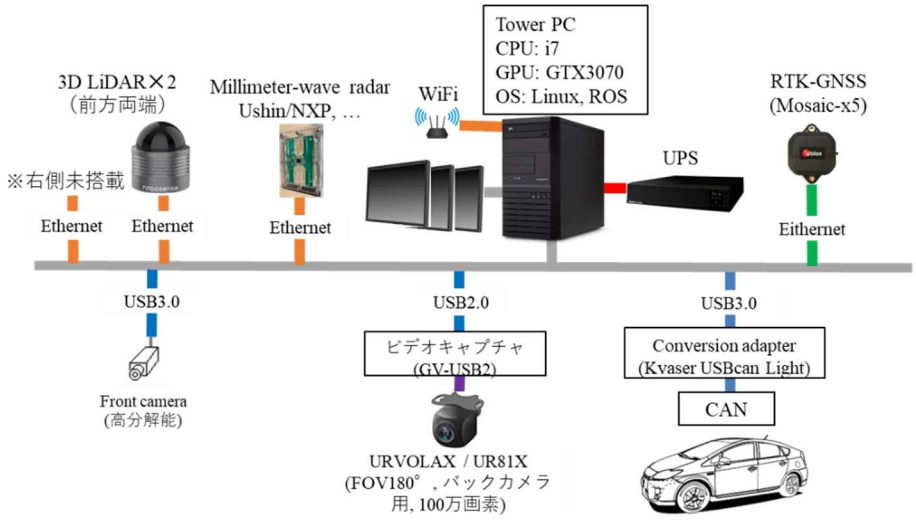
・ミリ波レーダ計測実験車の構築

ミリ波レーダの整合性検証の一環および研究応用事例提示のために、Figure 267 に示す実験車を構築した。DIVP®より提供されたミリ波レーダを左コーナーに搭載し、正面から側面まで取付角度を可変にできる機構を採用した。また、ミリ波レーダによる認識の正解値を生成するために、屋根に全方位 LiDAR、フロントウィンドウ内部に高解像度カメラ、サイドミラー下に広角カメラおよび全周囲広角 LiDAR を搭載した。

出所：学校法人トヨタ学園豊田工業大学

Figure 267 ミリ波レーダ計測実験車

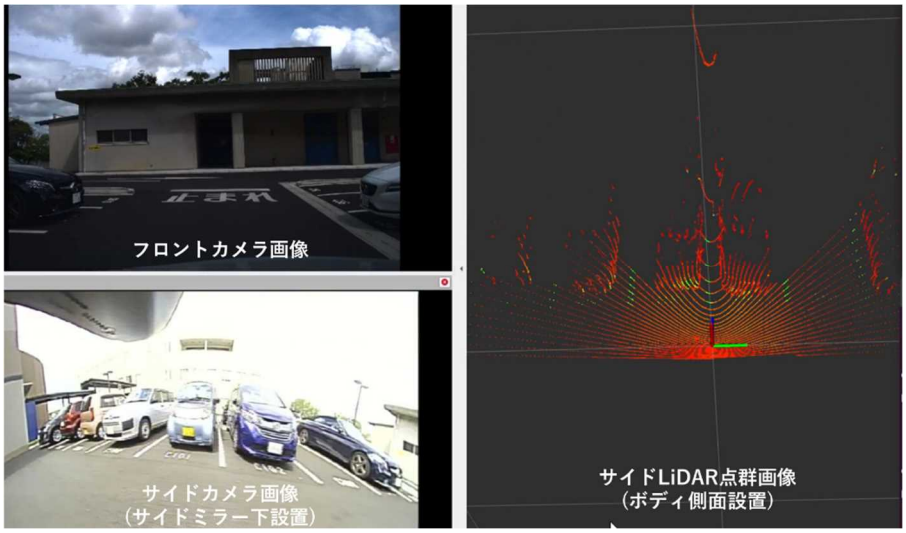
センサシステム構成図を Figure 268 に示す。これは、ROS(Robot Operating System)を搭載した PC に各種通信にてセンサ計測値を取り込み、記録できる様になっている。



出所：学校法人トヨタ学園豊田工業大学

Figure 268　ミリ波レーダ計測システム構成

Figure 269 に計測データのサンプルを示す。このサンプルでは、左側面の駐車車両に対する LiDAR の点群図とカメラ画像、正面のカメラ画像を同時に表示している。最終的には、これらに全周囲 LiDAR 点群とミリ波レーダの点群やレーダマップを同時に表示し、記録できる。



出所：学校法人トヨタ学園豊田工業大学

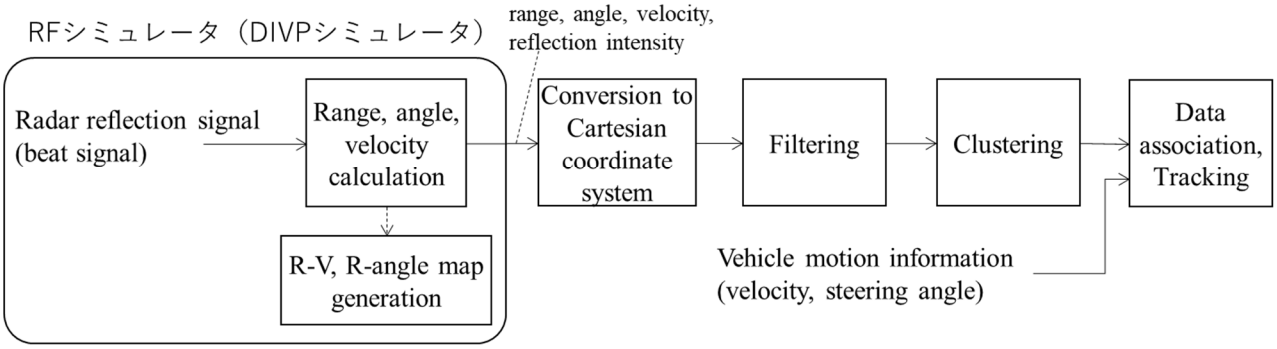
Figure 269　計測システム計測データ例

② ミリ波レーダ認識ロジックの標準モデル構築

（③ ミリ波レーダシミュレータの研究応用事例提示 を含む）

ミリ波レーダの認識ロジック全体構成を以下に示す。今後物体種別識別や自己位置推定などの機能を追加する予定であるが、今回は物体検出して追跡するロジックに関して報告する。まず、DIVP®シミュレータにより、反射信号のビート信号から距離、角度、速度、反射強度が計算されて反射点群として出力される。本ロジックは、この反射点群の情報から物体を検出して追跡する。まず、反射点群は極座標系で出力されるため、直交座標系に変換し、ノイズを減らすため反射強度の閾値を設け、低反射強度の点群を除去する。その後、点群の分布に

よりクラスタリングして物体候補を抽出する。時系列フレーム間で、同一物体と思われる物体候補を対応付け(data association)し、追跡(tracking)する。これらを順に説明する。

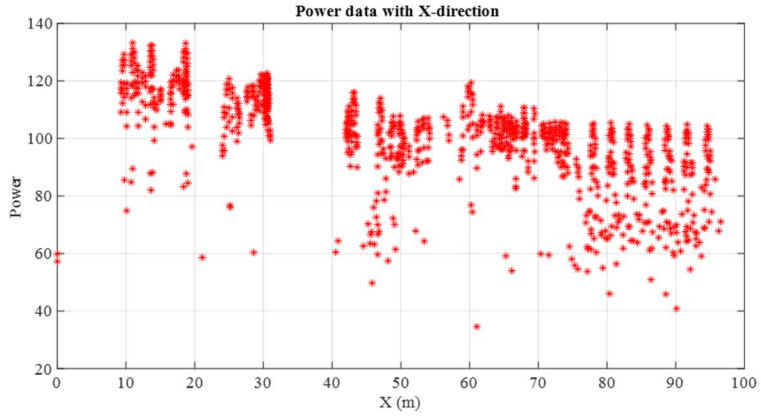


出所：学校法人トヨタ学園豊田工業大学

Figure 270　ミリ波レーダ認識処理全体構成

a） 反射強度フィルタ

ここでは、反射強度により背景ノイズを除去する。これは、検出対象物体の反射強度と背景ノイズを分離するように閾値を設定し、閾値以下の点群を背景ノイズとして除去すれば良い。しかし、Figure 271 に示す様に背景ノイズの反射強度は大きい。この図は、対象物が無い状態での背景ノイズの反射点群の距離に対する反射強度を示したものである。よって、反射強度による分離は難しいため、反射強度閾値により検出対象物体が未検出にならない様に設定した。



出所：学校法人トヨタ学園豊田工業大学

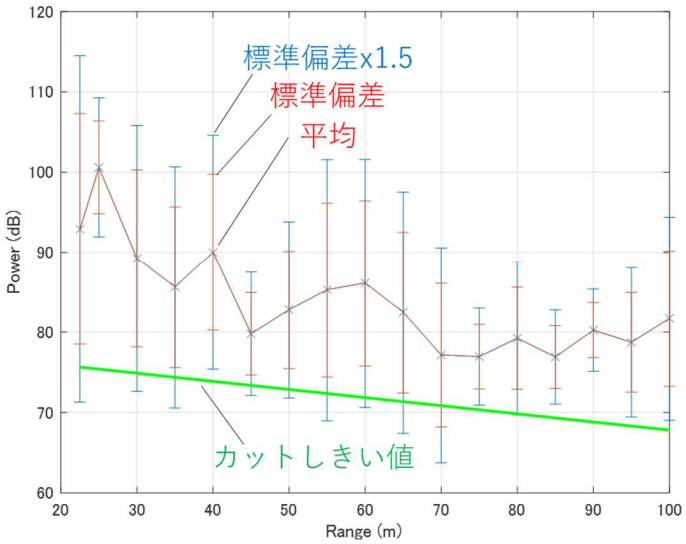
Figure 271　対象物の無い状態での距離に対する背景ノイズの反射強度

Figure 272 は、先行車の距離に対する反射点群の反射強度の分布を表したものである。横軸に先行車までの距離、縦軸は反射強度で、点群の平均、標準偏差、標準偏差の 1.5 倍を表示している。この図から距離によって強度が変わるため、試行錯誤の結果、閾値は以下の式の通り平均−標準偏差の 1.5 倍を最小自乗フィッティングした距離に関する直線とした。つまり、この閾値以下の反射点群はノイズとして削除する。ここで、レーダ反射強度は理論的にレーダ方程式に基づき距離の 4 乗に反比例する筈であり、減衰が少ない様に見えるが、ゲインコ

ントロールなどもあり明確に判断できないため、ここではこのシミュレーションデータに基づき処理を進めることとした。

$$\text{カットしきい値：}\ \mu_p - 1.5\,\sigma_p = -0.101 * range + 77.92\ (\text{bB})$$

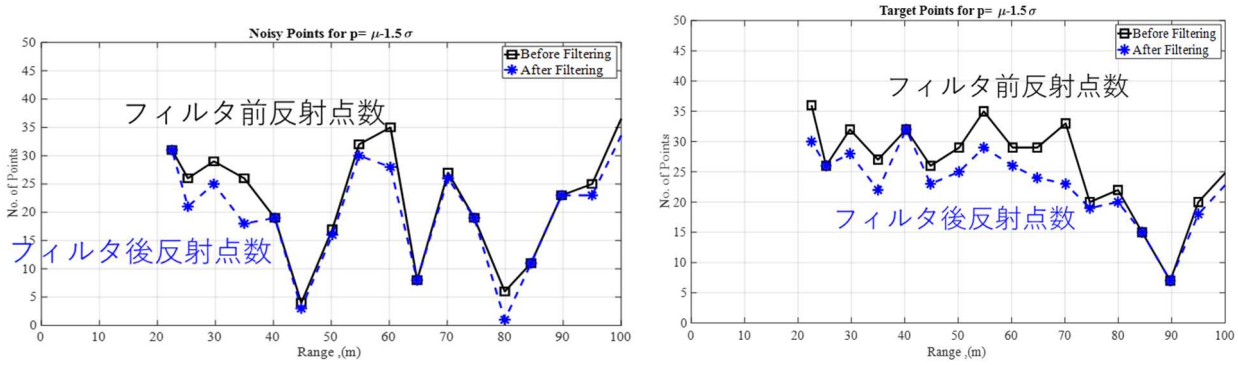
ここで、μ_pは各距離での平均反射強度、σ_pは各距離での反射強度の標準偏差、range は物体までの距離である。



出所：学校法人トヨタ学園豊田工業大学

Figure 272　先行車までの距離と反射点群の反射強度、フィルタ閾値の関係

このフィルタの効果を Figure 273 に示す。左図はノイズに対する反射強度閾値以下の点群を削除した場合の点群数の減少を示している。この図から分かる通り、大きなノイズ削減効果は見られなかった。これは、右図に示した先行車に対する反射点数の削減のバランスから設定したためで、これ以上閾値を大きくすると対象物体の点群が失われることから判断した。



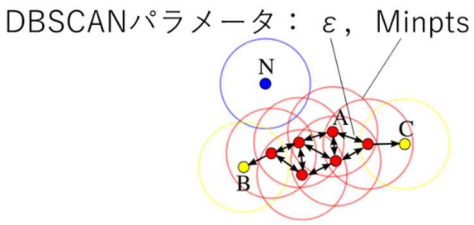
ノイズ(先行車以外)に対する反射点数　　対象物(先行車)に対する反射点数

出所：学校法人トヨタ学園豊田工業大学

Figure 273　反射強度フィルタによる点群削減効果

b) クラスタリング

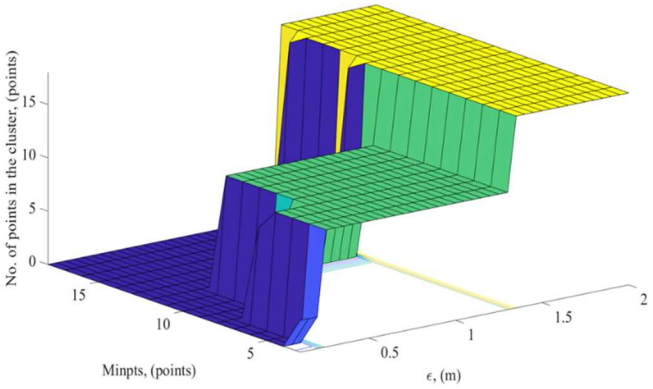
このクラスタリングは、点群の分布によりノイズを除去し検出対象物の候補を抽出するものである。最も基本的なロジックは点群の密度を用いて、密度が閾値以下の点を除去するものである。ここでは、一般的に性能が良いと言われている DBSCAN を用いた。DBSCAN は、Figure 274 に示す通り、点間の距離閾値ε以上の点数が閾値 Minpts 以上あるものをクラスタとして抽出するアルゴリズムである。よって、この 2 つのパラメータを最適化する必要がある。



出所：学校法人トヨタ学園豊田工業大学

Figure 274　DBSCAN アルゴリズムとパラメータ

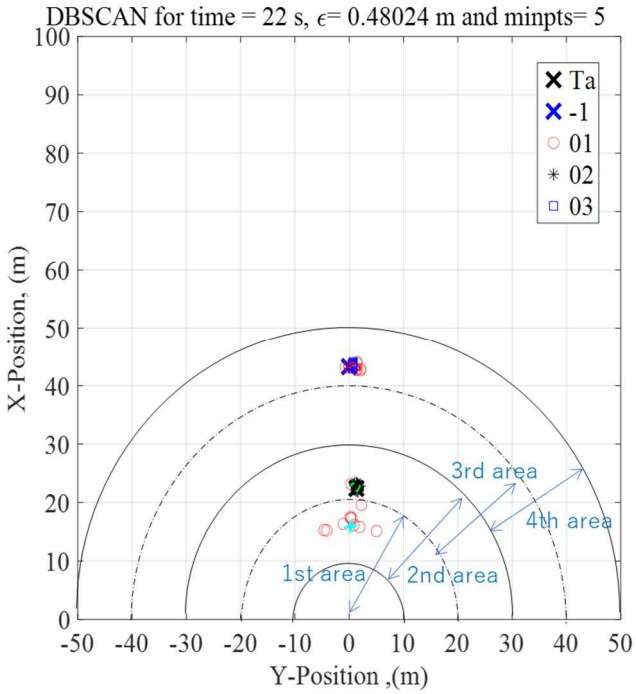
パラメータは、ノイズ点群除去と検出対象物体の点数維持のトレードオフで調整可能である。パラメータと先行車の点数の例として、 10 秒時点(距離約 100m)での 2 つのパラメータと先行車の反射点数との関係を Figure 275 に示す。縦軸が反射点数で、εが 1.35m 以上で点数の減少は見られず、Minpts が大きくなると検出できなくなる。一定閾値で調整したところ、後述するように遠方と近傍で成立するパラメータは見つからなかった。



出所：学校法人トヨタ学園豊田工業大学

Figure 275　DBSCAN パラメータと先行車の点群数(例)

そこで、物体の距離に応じてパラメータを変えるロジックを創出した。Figure 276 はその説明図である。距離を 10m 毎に分割し、各領域を重複させて、その領域毎に最適なパラメータを設定する。この例では、0-20m, 10-30m, 20-40m, …の領域に分けて、パラメータを設定し、重複部分を後から統合する。点群毎にパラメータを可変にして DBSCAN を計算する方法が本質的ではあるが、プログラムを作り直す必要があるため、今回は領域毎での設定とした。



出所：学校法人トヨタ学園豊田工業大学

Figure 276　DBSCAN 距離可変ロジック

できるだけ原理的に設計するため、最小距離εはデータ統計からではなく、Figure 277 左図に示す通りレーダの横方向の分解能により最小距離を設定した。これにより距離に関する以下の式を導いた。

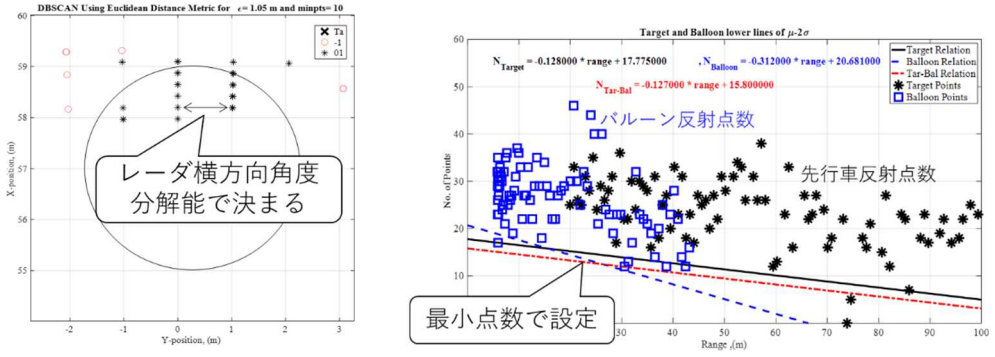
$$\varepsilon(range) = 0.027 * range + 0.03$$

ここで、range は物体までの距離、第 2 項の 0.03 は試行錯誤による定数項である。

Minpts は統計的にしか設定できないため、Figure 277 右図の距離に対する検出対象(先行車、バルーンカー)の最小反射点数から求めた。これにより、以下の式を導いた。

$$Minpts(range) = floor(-0.127 * range + 15.8)$$

ここで、*floor*()は切り捨て関数である。



最小距離εの設定方法　　Minpts の設定方法

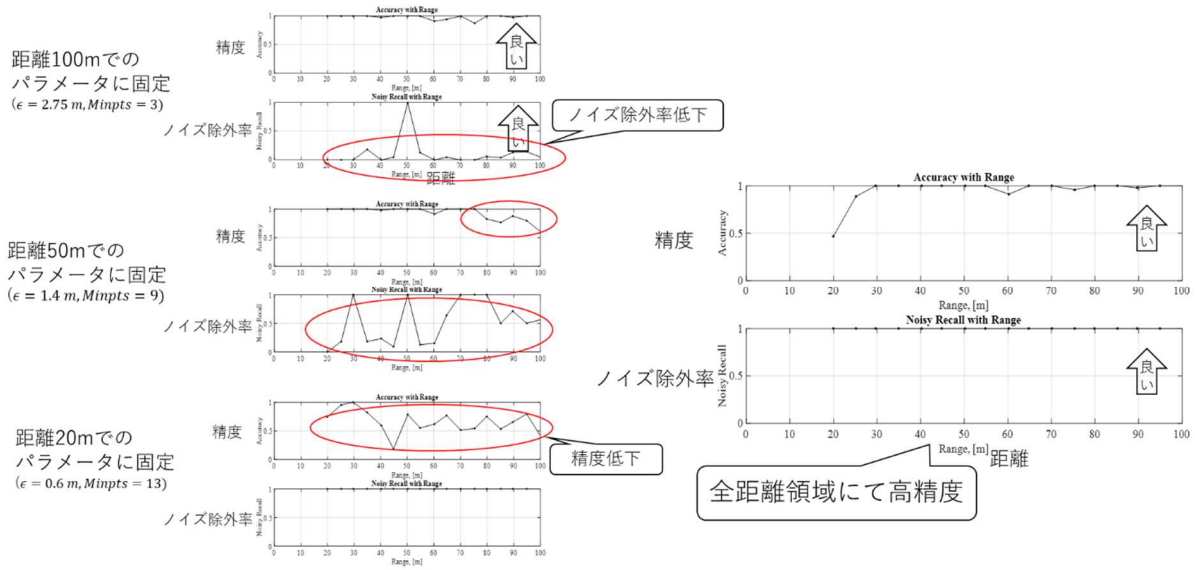
出所：学校法人トヨタ学園豊田工業大学

Figure 277　DBSCAN 距離可変パラメータ設計

この距離可変パラメータ DBSCAN ロジックを固定パラメータの場合と比較した。まず、評価は一般的な精度(正しく物体をクラスタリングできた割合)以外にノイズ除外率が必要なので、この評価関数を以下の通り設定した。

$$\text{ノイズ除外率} = 1 - \frac{\text{ノイズクラスタリング点数}}{\text{検出対象クラスタリングを除く全反射点数}}$$

この評価関数を距離毎にグラフにし、固定パラメータ(左図)と可変パラメータ(右図)での結果を並べて示したものが Figure 278 である。固定パラメータでは、距離 100, 50, 20m での最適パラメータにて評価している。固定パラメータでは、遠方にパラメータを合わせる(最小距離ε大、Minpts 小)とノイズが除外できず、近距離に合わせる(最小距離ε小、Minpts 大)と精度が低下する。それに対して、距離可変パラメータでは、全距離において精度とノイズ除外率が良好となることを確認した。

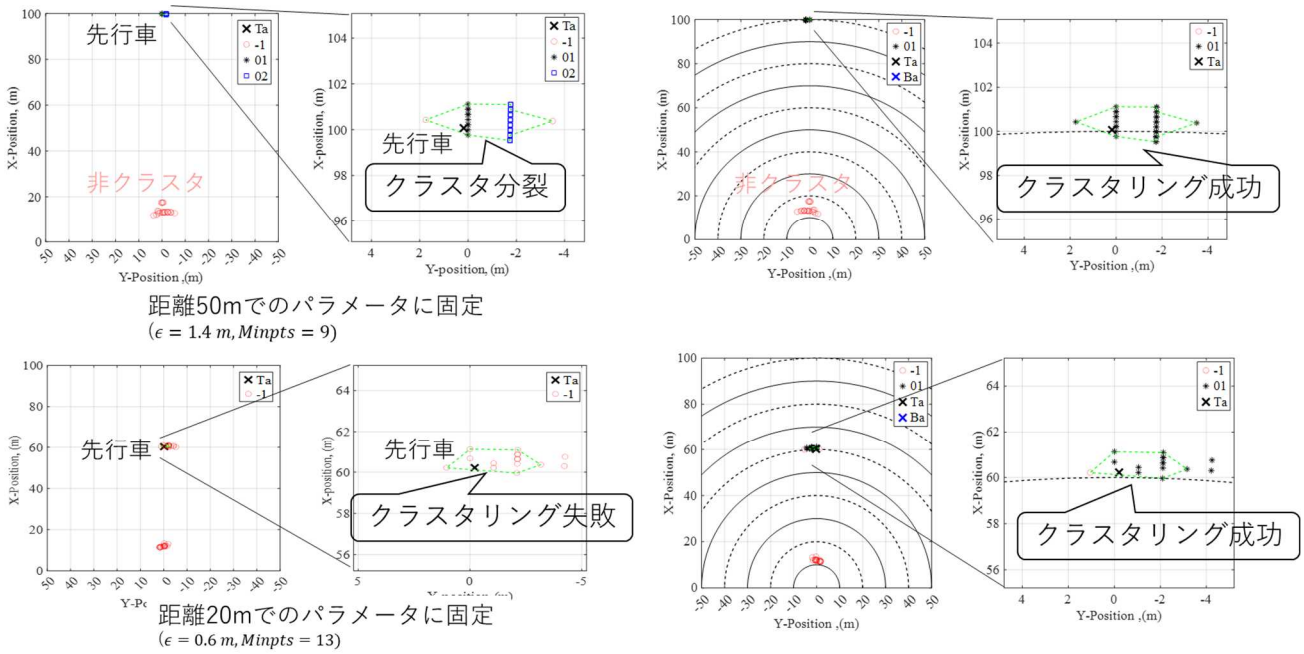


距離固定パラメータでの評価値　　距離可変パラメータでの評価値

出所:学校法人トヨタ学園豊田工業大学

Figure 278　DBSCAN 距離固定パラメータと可変パラメータの比較

この具体的な比較サンプルを Figure 279 に示す。左の図は距離 50 と 20m で最適化した固定パラメータにて評価したクラスタリング結果である。上図の 50m でのパラメータではより遠方の 100m 地点での先行車の点群が分裂している。下図の 20m でのパラメータではより遠方の 60m 地点での先行車の点群がクラスタリングできなかった。これらに対して、距離によりパラメータ可変にした場合は、同様の先行車に対して、いずれの状況でも正しくクラスタリングできている。



固定パラメータ DBSCAN の評価結果サンプル　　可変パラメータ DBSCAN の評価結果サンプル

出所：学校法人トヨタ学園豊田工業大学

Figure 279　DBSCAN 距離可変パラメータと固定パラメータのクラスタリング比較サンプル

c）データアソシエーション、追跡

クラスタリングされた点群に対して、重み付き重心を求め、検出物体候補の反射点中心位置とする。この座標を時系列データとして、同一物体に対する反射を追跡するため、連続フレーム間で対応付け(data association)を行う。この対応付け・追跡のアルゴリズムは各種提案されており、調査の結果、近年よく利用される 3 つのアルゴリズムを抽出し、比較評価を行った。以下の表にその概要と長所・短所を整理する。

Table 79　対応付け・追跡アルゴリズム比較表

アルゴリズム	概要	長所	短所
GNN (Global Nearest Neighbor)	最も近傍の存在確率の高い点を対応付け（マハラノビス距離の最小化）	・計算量が少ない ・簡単な状況では高性能	・物体が複数ある場合の最適性は保証されない
PDA (Probabilistic Data Association)	閾値内の対応確率を有する複数対応付候補を融合して選択	・GNN より計算量は多い	・ノイズが多い場合や複数物体が近傍にある場合は性能低下
MHT (Multi Hypothesis Tracking)	複数の対応関係を保持して追跡	・複数物体追跡で高性能	・計算量が多い

出所：学校法人トヨタ学園豊田工業大学

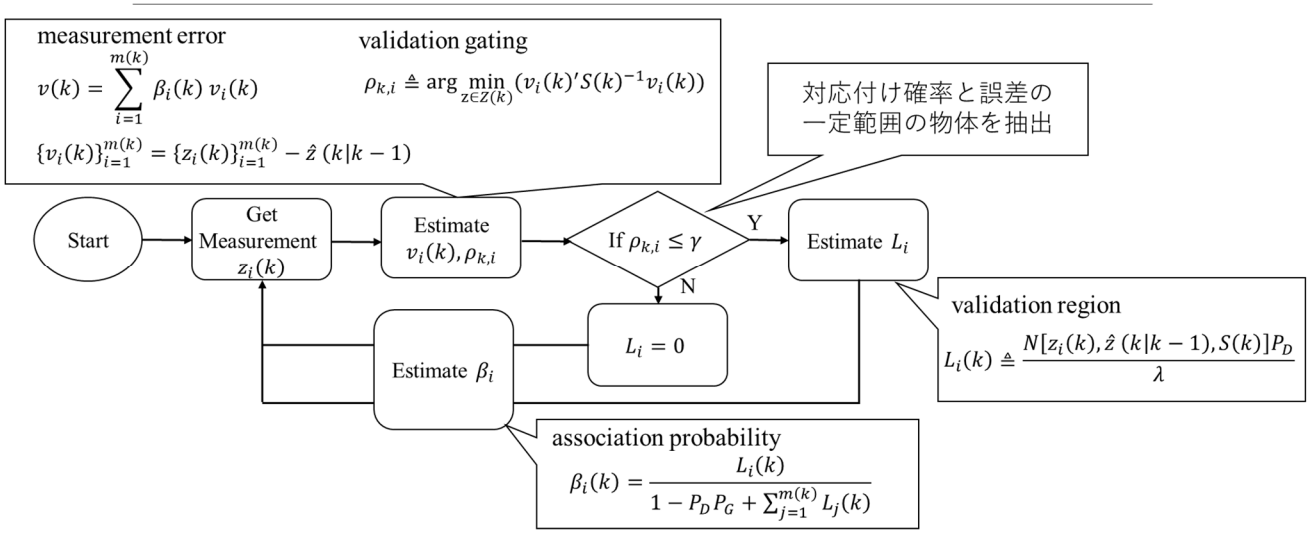
さらに、上記アルゴリズムは、過去の軌跡から現時点の位置を推測するフィルタを用いるが、そのフィルタには各種あり、それらの組み合わせも評価した。フィルタの種類を以下に整理する。

・追跡フィルタ　KF (Kalman Filter)　線形モデルの状態方程式を用いて状態予測
EKF (Extended Kalman Filter)　非線形モデルを線形化して状態予測
UKF (Unscented Kalman Filter)　サンプル点を用いて非線形モデルのまま状態予測

ここで使われる物体運動モデルは以下が考えられる。

・物体運動モデル　CV (Constant Velocity model)　物体は定速運動すると仮定したモデル
IMM (interacting Multiple Model)　物体の運動状態によりモデルを切り替える

PDA の手法概要を Figure 280 を用いて説明する。左から、計測値を入力し、これまでにトラッキングされたデータを用いたカルマンフィルタの予測値$\hat{z}$との誤差に対応付け確率βをかけて計測誤差vを求める。これより有効性の指標を求め、この一定範囲内の物体のみを抽出する。抽出された物体の対応付け確率を計算して、これを繰り返すことである程度尤もらしい対応付けができたデータを追跡する。



出所：学校法人トヨタ学園豊田工業大学

Figure 280　PDA の手法概要

ここで、予測値計算のための状態方程式は、CV(Constant velocity model)で線形 KF(Kalman filter)の場合、以下の式で計算している。

$$\hat{x}\,(k|k-1) = F(k-1)\hat{x}\,(k-1|k-1)$$

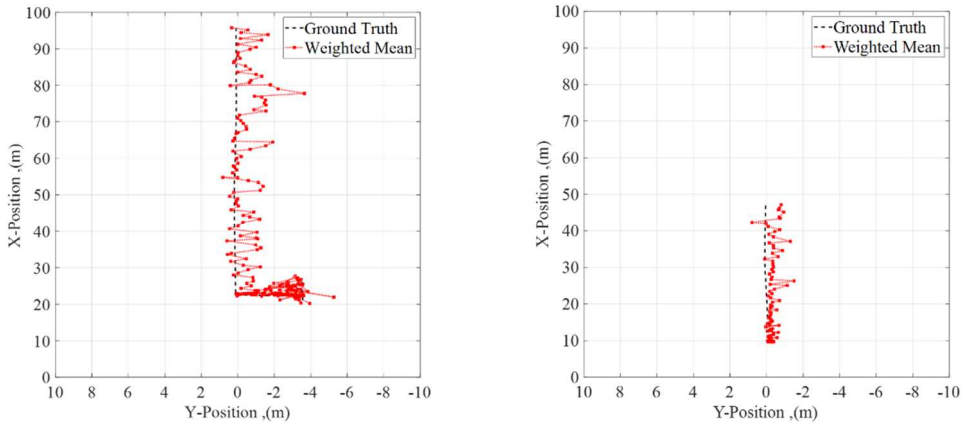
$$\hat{z}\,(k|k-1) = H(k)\hat{x}\,(k|k-1)$$

$$\hat{x} = \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \\ y \\ \dot{y} \end{bmatrix}, \hat{z} = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix},\ F = \begin{bmatrix} 1 & \Delta T & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \Delta T \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},\ H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

ここで、(x, y)は検出対象物の 2 次元座標、ΔTはサンプリング時間である。

IMM は状態量により、直進・停止など運動モデルを切り替えるものである。

これらの組み合わせにて、各種評価を行った。評価シナリオは前述のカットアウトシナリオで、クラスタリングした物体反射中心点の軌跡を Figure 281 に示す。これは自車に対する相対位置である。左図が先行車、右図がバルーンカーの軌跡である。自車が先行車との車間距離約 20m まで追い付き、一定車間距離にて定速走行後、先行車が前方に停止しているバルーンカーを右に避け、自車がバルーンカーを検出して停止する、という動きになっている。分かりやすい様に、横軸を 5 倍に拡大しているが、真値(図中点線)に対して物体反射中心点がかなり左右に変動していることが分かる。



先行車の軌跡　　バルーンカーの軌跡

出所:学校法人トヨタ学園豊田工業大学

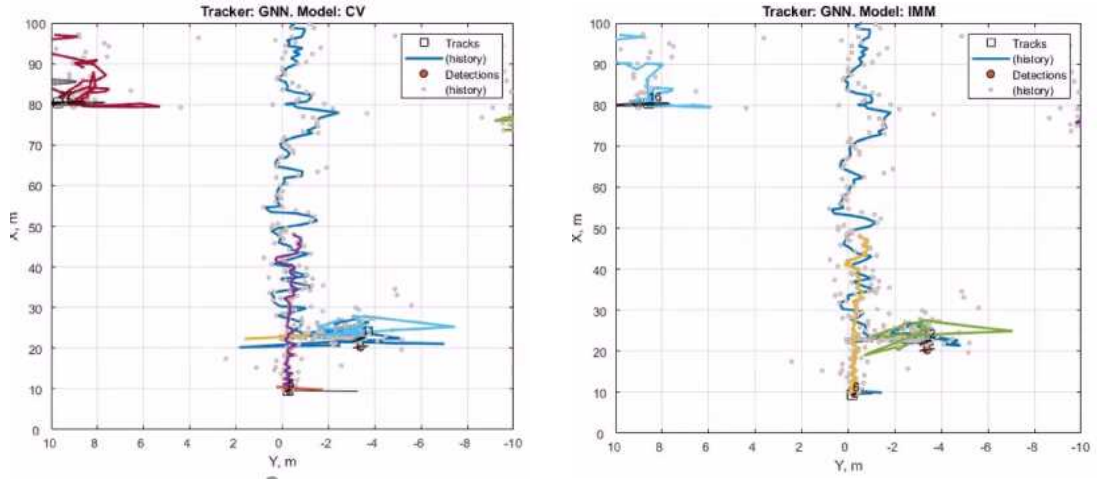
Figure 281　カットアウトシナリオにおける物体反射中心点の軌跡(自車に対する相対位置)

トラッキングアルゴリズム GNN で、物体モデルが CV と IMM の場合の追跡結果を Table 80(定量評価値)と Figure 282(追跡物体軌跡)に示す。追跡フィルタは KF である。どちらも先行車とバルーンカーを同様に追跡できている。先行車に対する追跡を一度失敗しているが、これはバルーンカーを右側に避けて最後の停止前に発生している。また、IMM において 8 フレーム追跡回数が多く、若干軌跡の変動幅が小さいが、大きな差ではない。図中左上部の軌跡はクラスタリングされたノイズを追跡したものである。

Table 80　トラッキングアルゴリズム GNN での追跡性能

物体モデル	CV		IMM	
物体	追跡不連続数	追跡長	追跡不連続数	追跡長
先行車	1	225	1	233
バルーンカー	0	87	0	87

出所:学校法人トヨタ学園豊田工業大学



物体モデル：CV　　物体モデル：IMM

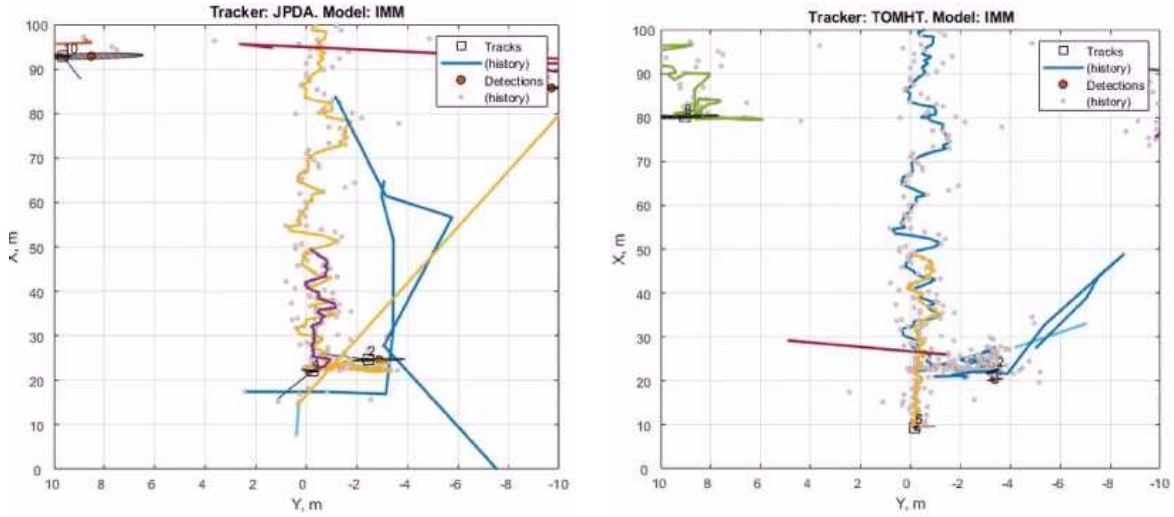
出所：学校法人トヨタ学園豊田工業大学

Figure 282　トラッキングアルゴリズム GNN での追跡結果　（追跡フィルタ：KF）

トラッキングアルゴリズム PDA および MHT の場合の追跡結果を Table 81、Figure 283 に示す。追跡フィルタは KF、物体運動モデルは IMM である。PDA ではバルーン回避後に計算が停止したため、追跡長が短くなっている。MHT では、先行車を停止する最後まで追跡している。

Table 81　PDA、MHT での追跡性能

トラッキングアルゴリズム	PDA		MHT	
物体	追跡不連続数	追跡長	追跡不連続数	追跡長
先行車	0	174	0	233
バルーンカー	0	29	0	88



トラッキングアルゴリズム：PDA　　トラッキングアルゴリズム：MHT

出所：学校法人トヨタ学園豊田工業大学

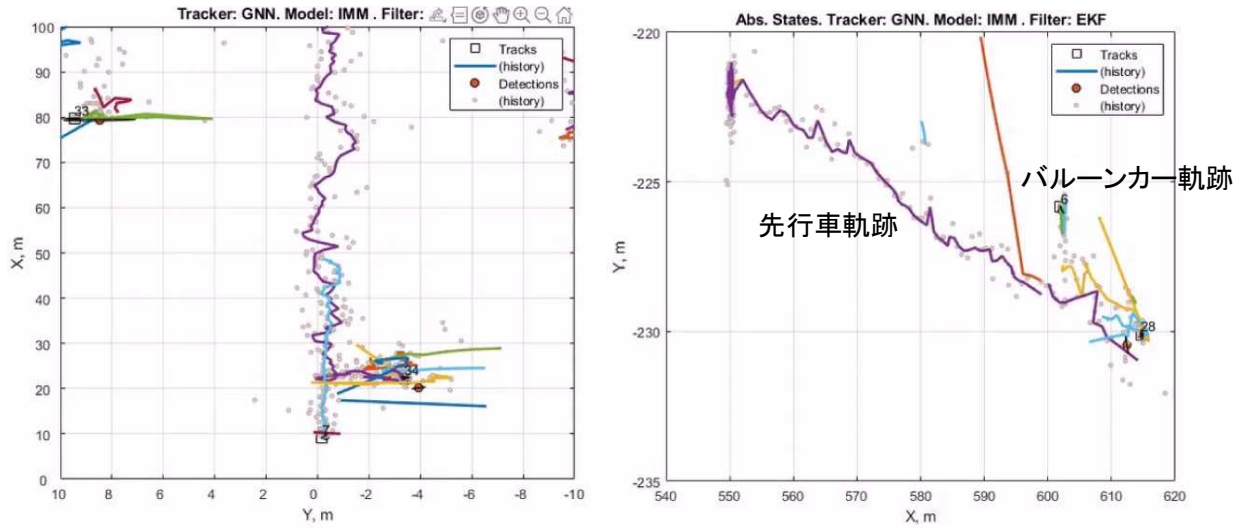
Figure 283　トラッキングアルゴリズム PDA と MHT での追跡結果（物体モデル：IMM、追跡フィルタ：KF）

追跡フィルタを EKF にした場合の結果を Table 82、Figure 284 に示す。左図が前述の通り自車からの相対座標にて計算した場合、右図は絶対座標に変換して計算した場合の結果である。EKF では、明確な理由は不明であるが、バルーンカー回避後に追跡ミスをして追跡長が短くなっている。原理的には、この車両の運動は大きな非線形性は無いため、差異は無いものと推測する。右図の絶対座標系での軌跡は、左上から先行車が右下に向かって移動し、右中央に停止しているバルーンカー手間で右に(この図では下に)旋回したことを示している。絶対座標系で試した理由は、相対座標系では先行車が回避操作時に 90° 右に急激に移動が発生し速度ベクトルが急変するが、絶対座標系では先行車の速度ベクトル変化は緩やかになり追跡しやすいためである。しかし、この結果では回避時は他と同様に追跡ミスはせず、停止直前の不安定な点群により追跡ミスをしており、効果は検証できなかった。

Table 82 EKF、相対座標/絶対座標での追跡性能

追跡フィルタ	EKF			
座標系	自車からの相対座標		絶対座標	
物体	追跡不連続数	追跡長	追跡不連続数	追跡長
先行車	0	173	1	175
バルーンカー	0	88	0	89

出所:学校法人トヨタ学園豊田工業大学



相対座標系での計算　　絶対座標系での計算

出所:学校法人トヨタ学園豊田工業大学

Figure 284 追跡フィルタ EKF での追跡結果 (追跡アルゴリズム GNN、物体モデル:IMM)

上記の各種実験結果をまとめると、計算条件で若干の差はあるが、明確な差異は見られなかった。これは、評価シナリオが単純な動きの車両 2 台のみであるため、近傍に動きの違う物体が存在する状況が少なく、対応付けが容易にできたためと推察する。現状ではその様なシナリオは用意されていなかったため、このシナリオでの評価をおこなったが、今後は、評価の差異が出やすいシナリオを選択もしくは設計して進めていく。

④ ミリ波レーダ認識モデルの海外調査

処理毎に以下の様に関連技術を抽出して調査し、その中から前述のアルゴリズムを選択し、評価、解析、改良を行った。

Table 83 ミリ波レーダ認識関連技術リスト

カテゴリ	技術	技術レベル	性能	計算コスト
Clustering	Hierarchical clustering	Conventional	Middle	Middle
	DBSCAN (Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise)	Standard	Middle	Middle
	k-means	Conventional	Low	Middle
	k-NN (Nearest Neighbor)	Conventional	Low	Middle
	GMM (Gaussian Mixture Model)	Conventional	Middle	High
	Spectral clustering	Advance	High	High
Data association	Global Nearest Neighbor	Conventional	Middle	High
	MHT (Multiple Hypothesis Tracking)	Conventional	Middle	High
	PDA (Probabilistic Data Association)	Conventional	Low	Middle
	JPDAF (Joint Probabilistic Data-Association Filter)	Standard	High	High
	MCMCDA (Markov Chain Monte Carlo Data Association)			
	PMTA (Permutation Matrix Track Association)	Advance		
	TrackNet	Advance	High	High
	DeepSort	Advance	High	High
Tracking	Kalman filter	Standard	Middle	Low
	Particle filter	Standard	Middle	Low
	IMM (Interacting Multiple Model)	Standard	Middle	Middle
	Multiple Target Tracking	Standard	Middle	Middle
	Deep tracking	Advance	High	High
Classification	LSTM	Standard	High	Middle
	CNN	Standard	High	High
Segmentation (Shape reconstruction)	CNN	Advance	High	High
	SegNet	Advance	Middle	High
	U-Net	Advance	Middle	High
Localization	SLAM	Standard	Middle	Low
	Graph SLAM	Advance	High	High

出所：学校法人トヨタ学園豊田工業大学

参照した論文の一部を以下に掲載する。

[参照論文(一部抜粋)]

1) Y. BAR-SHALOM and E. TSE, "Tracking in a Cluttered Environment With Probabilistic Data Association," Automatica, vol. 11, pp. 451-460, 1975.
2) J. Munkres, "Algorithms for the Assignment and Transportation Problems," Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics, vol. 5, no. 1, pp. 32-38, 1957.
3) R. Collins, Introduction to Data Association, Pennsylvania: The Pennsylvania State University, 2012.
4) L. Svensson, Y. Xia and K. Granström, "Multi-Object Tracking for Automotive Systems," edX , 02 07 2019. [Online]. Available: https://www.edx.org/course/multi-object-tracking-for-automotive-systems. [Accessed 25 01 2022].
5) CHALLA, R. CHAKRAVORTY and SUBHASH, "Augmented State Integrated Probabilistic Data Association Smoothing for Automatic Track Initiation in Clutter," Journal of Advances Information Fusion, vol. 1, no. 1, pp. 63-74, 2006.
6) Y. BAR-SHALOM, F. DAUM and J. HUANG, "The Probabilistic Data Association Filter," IEEE CONTROL SYSTEMS MAGAZINE, pp. 82-100, 2009.
7) B. Habtemariam, R. Tharmarasa, T. Thayaparan, M. Mallick and T. Kirubarajan, "A Multiple-Detection Joint Probabilistic Data Association Filter," in IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, vol. 7, no. 3, pp. 461-471, June 2013, doi: 10.1109/JSTSP.2013.2256772.
8) Lionel Rakai, Huansheng Song, ShiJie Sun, Wentao Zhang, Yanni Yang, "Data association in multiple object tracking: A survey of recent techniques", Expert Systems with Applications, Volume 192, April 2022

⑶次年度以降の計画

① ミリ波レーダ基本モデルの整合性検証

・評価シナリオを拡充し、各シーンでの認識性能評価を進める。評価シナリオの拡充は、シミュレータ開発側で検討されている標準シナリオを基に選定を進める。

・実験データと対応した評価シナリオに対しては、実験データとシミュレーションデータで比較評価し、差異を明確にする。

② ミリ波レーダ認識ロジックの標準モデル構築

・今年度で構築した物体検出・追跡ロジックを上記で拡充したシナリオにて評価し、改良を進める。これを標準モデルとして公開し提供していく。

③ ミリ波レーダシミュレータの研究応用事例提示

・⑥の物体検出・追跡ロジックの改良を通した研究事例の外部発表を企画する。

・物体識別や自己位置推定などの機能を実現する研究を進め、研究事例を論文発表していく。

④ ミリ波レーダ認識モデルの海外調査

・⑦を中心に引き続き論文やイベント調査を継続する。

5. 2. 4 「B7. センサモデル評価手法の標準化」(学校法人幾徳学園神奈川工科大学、トヨタテクニカルディベロップメント株式会社)

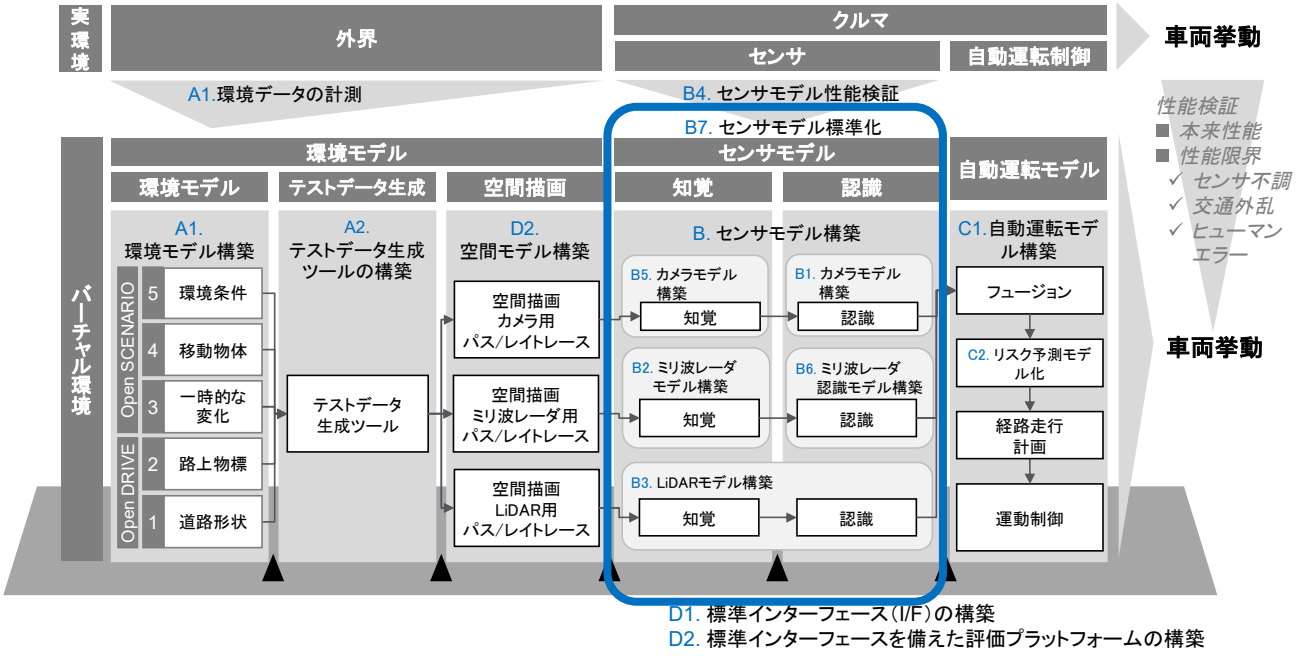


Figure 285　本研究の位置付け

■ 事業目的

今後センサモデルを追加開発していくときに、カメラ・ミリ波レーダ・LiDAR の各センサを統一された基準において検証可能とするため、B・C パートで実施したセンサモデル、自動運転モデル検証の知見を集約し、センサモデル検証手法の標準化を取り組む。

■ 事業概要

実験計測の標準化として、B4 パートで構築された計測環境を基に計測システム要件を整理し、実施した検証実験を基に実験項目、手順なども含め標準化する。合わせて標準化の有効性確認のため、構築済み計測環境の改善を行う。

検証手順の標準化として、B1, B2, B3, B4 パートで実施したカメラ、ミリ波レーダ、LiDAR の各センサモデルの一致性検証において使用された評価指標の標準化と、その自動化ツールを構築する。

■ 実施計画

事業項目	2018 年度				2019 年度				2020 年度				2021 年度				2022 年度			
	第1四半期	第2四半期	第3四半期	第4四半期	第1四半期	第2四半期	第3四半期	第4四半期	第1四半期	第2四半期	第3四半期	第4四半期	第1四半期	第2四半期	第3四半期	第4四半期	第1四半期	第2四半期	第3四半期	第4四半期
① 計測環境の標準化												計測環境改善								
② 一致性評価の標準化											評価内容整理									
														要件定義						
																プロトタイプ作成				
③ センサモデル連成															連成・検証					
④ DIVP®要求仕様検討															要求定義					

(1)令和3年度の成果(まとめ)

DIVP®で実施された計測手法の整理と体系化
JAMA、VIVID連携を介し、DIVP®手法のスタンダード化に期待

研究開発の成果

TTDC

研究成果の自己評価	■計測環境/一致性検証の標準化 ・車載センサ間の同期ズレ原因の分析と対策実施　**完了** ・計測環境/一致性検証の体系化手法、カタログ作成 ・実車計測実験参加による計測手法の現物確認 評価）DIVP®のこれまでの成果を見える化実現したことで、JAMA、VIVID等の活動との議論を後押し ■センサーモデル連成（JTTT3.3の活動） ・短期間でのVIVALDIとのデータ交換の合意形成を実現 評価）計画よりも早いタイミングでの合意形成実現 ■DIVP®要求仕様検討 ・DIVP®ユースケース調査　**完了** OEM/サプライヤの使用方法を検討し、議論材料を提供 ・DIVP®の真値出力 車両挙動に関する要求仕様作成、更新依頼　**完了**
自社Biz視点から ①DIVP®の価値・魅力 ②活用可能性	①DIVP®の価値・魅力 ・将来を見据えた安全性評価 将来課題になり得る雪道といった過酷な状況も見据え開発 ・国際規格も視野に入れた汎用性の獲得 ②DIVP®活用ノウハウ ・OEM運用時の技術サポートとしての役割

得られた知財	■計測環境/一致性検証の標準化 ・計測環境/一致性検証の体系化手法
知財の保全	■報告書・ノウハウ集　(2件) ・計測環境/一致性検証手法の一覧およびカタログ ※個別の計測ノウハウは各社の知財 ・DIVP®の想定ユースケース
残課題・今後への期待値	■計測環境/一致性検証の標準化 ・体系化した計測方法をJAMA、VIVALDIと共有 ■センサーモデル連成（JTTT3.3の活動） ・DIVP®のOSI準拠に向けた議論 ■DIVP®要求仕様検討 ・今後のDIVP®仕様に基づく活用シーンの適宜洗い出し ・上記活用シーンに基づく要求仕様の策定

Figure 286 研究開発の成果

本年度は、計測環境/一致性検証の標準化として、これまで DIVP®開発に向けた行われた実験の計測環境、一致性検証に関する情報集約と体系化を実施した。

また、DIVP®の利便性向上を目的として、センサモデル連成と DIVP®要求仕様検討を本年度 10 月より着手した。センサモデル連成においては、DIVP®のミリ波レーダモデルの IF 標準化や接続性向上を目指し、VIVALDI のミリ波レーダモデルとの接続検証の取り組みを開始した。DIVP®要求仕様検討では、OEM ユーザ、サプライヤーユーザに必要な DIVP®が機能を検討し、開発チームへのフィードバックを行った。

(2)令和3年度の成果

① 計測環境の標準化

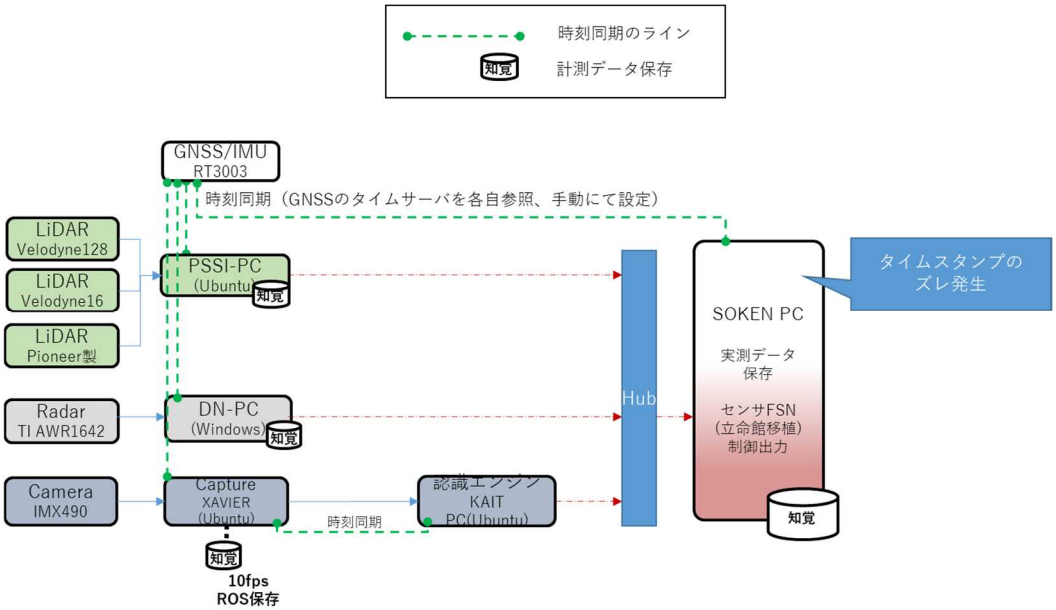
1） 計測システムの改善検討

計測システムの改善検討では、実験車両搭載の計測システムについて改善検討した。今回対応した計測システムの課題は、センサ間に発生するタイムスタンプのズレである。前年度 11 月のお台場実験では、タイムスタンプのズレが大きくなった際に暫定処置としてタイムサーバとの再同期やシステム再起動によりタイムスタンプのズレを解消していた。そこで、本年度 6 月のお台場実験にむけて、タイムスタンプのズレの状況や原因追求を行った。

計測システムとタイムスタンプのズレ

まずは計測システムの構成と時刻同期の方法とタイムスタンプのズレが確認できた箇所について調査した。Figure 287 に計測システムの接続構成を示す。計測システムは、各センサ担当設定のセンサ＋ホスト PC を搭載し、データ集約用のワークステーション（SOKEN PC）にハブを介して接続することでローカルネットワークを構築している。各 PC の時間は、システム起動後に手動操作にて GPS のタイムサーバとの同期処理を行うことで調整している。

11 月のお台場実験では、SOKEN PC でのデータ集約時に各センサ出力のタイムスタンプに 0.3s 以上の差がある場合、タイムスタンプのズレが大きいと判定していた。



出所：トヨタテクニカルディベロップメント（株）

Figure 287　計測システムの接続構成

時刻同期の調査

SOKEN PC でのタイムスタンプのズレの原因調査として下記の 2 点を検証した。

A.　　各 PC においてタイムサーバとの時刻同期ができていない

B.　　各 PC から SOKEN PC までの信号処理、通信などの遅延によりズレがある

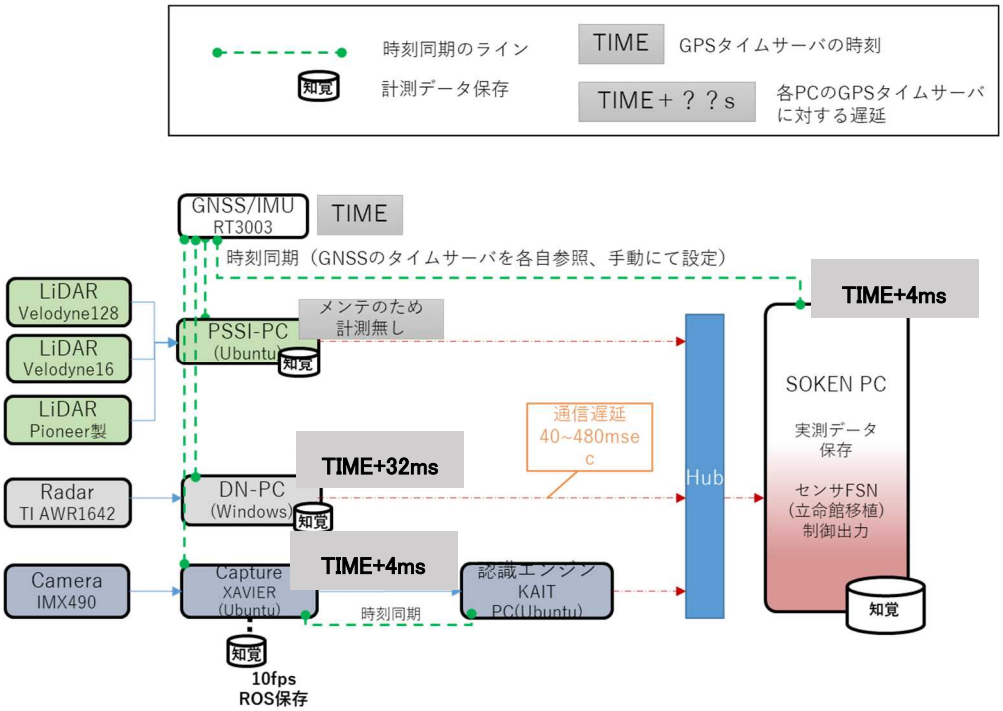
A の検証としてタイムサーバに対する各 PC の時刻遅延を調査した結果を Figure 288 に示す。

LiDAR のホスト PC は、メンテナンスのため調査ができなかったが、同様の Ubuntu 搭載 PC 相当と考えられる。前年度実験時に発生した 0.3s 以上のタイムスタンプのズレに対しては、時刻同期の遅延量は大きな影響を与えないと考えられる。

B に関しては、タイムスタンプのズレが大きいことが度々確認されていた Radar のホスト PC について調査した。SOKEN PC までの通信遅延は、Figure 288 に記載したように、40ms～480ms と通信遅延が大きい場合がある。Radar のホスト PC も SOKEN PC もリアルタイム OS ではないため、通信周期の厳密な制御が行われていない。そのため、OS 上で負荷の高い処理が行われた場合、通信遅延が発生する可能性は高い。

実験時の対策

A と B の調査より、タイムスタンプのズレについては、B の影響が大きいことが分かった。お台場での実車計測では、各センサデータとそのタイムスタンプが一致していれば問題は無い。そのため、タイムスタンプのズレへの対策は、各ホスト PC にて個別にデータ保存を行い、オフラインにてデータ収集を行うことで十分である。



出所：トヨタテクニカルディベロップメント（株）

Figure 288　計測システムの遅延調査結果

センサフュージョンに向けた計測システムの改善

本年度、次年度に関して、センサフュージョンを行う予定はないが、今回用いた計測システムにてセンサフュージョンを行うと仮定した際の改善点をまとめる。

・センサ　ホスト PC のリアルタイム化

リアルタイム対応 OS にすることで、時間管理の厳密化、ソフトウェア実行の優先度設定、通信周期の厳密化など可能である。これらの機能により、PC のマウス操作などに起因する処理の遅延が低減できる。

・各センサのデータ処理の高速化

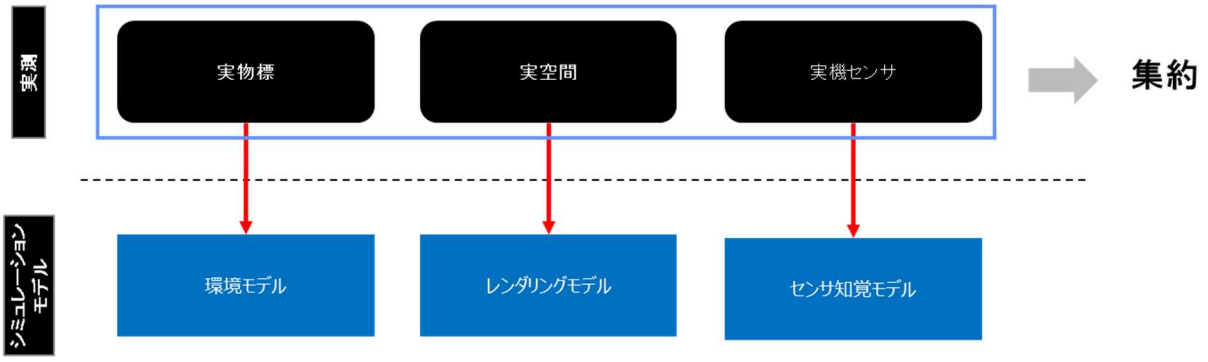
センサ処理の負荷が高い場合、リアルタイム OS であっても処理が間に合わず、通信に遅れが発生する。例えば、100msec でミリ波レーダデータを送信したい場合、少なくとも 100msec 以内にデータ処理が完了しない場合、送信するデータに欠落などが発生する。そのため、通信周期を目安にセンサのデータ処理を高速化する必要がある

・通信経路の見直し

センサのホスト PC と SOKEN PC 間は通信を行っている。通信経路にはハブが存在するため、ハブの処理性能は通信速度に影響する。今回、測定システムは高性能なハブに換装するなど対策が取られているため、改善されている。ただし、今後、計測装置が増えるなどして通信帯域が不足する場合は、通信経路を分割する必要がある。

2） モデル開発に向けた計測方法の情報集約と体系化

DIVP®開発にて実施されてきたモデル作成のための実験・計測について改めて情報集約を行い、モデル開発における計測の体系化を行った。



出所：トヨタテクニカルディベロップメント（株）

Figure 289　モデル化の実験・計測手法の集約、体系化フロー

体系化を行う目的は、次の 3 点である。
・モデル化に対する計測内容・手法の明確化と記録
・モデルと計測データとのトレーサビリティの確保
・コンソーシアムメンバー内での情報共有

体系化の具体的な成果は下記 2 点の成果物となる。
・モデル化計測一覧表
・計測カタログ

モデル化計測一覧表の作成

モデル化計測一覧表は、以下の観点で記載項目を選定した。
・モデル化するパラメータに対する計測内容・手法の明確化
・それぞれの計測の計測値、使用計測器、使用設備の明確化
・それぞれの計測の概要と計測条件の明確化
・現状における課題の明確化

上記の検討によりモデル化計測一覧の項目を Table 84 に示す。
作成した一覧表の抜粋を Table 85 に示す。一覧表については別途データとしてコンソーシアムにて情報共有している。

Table 84　モデル化計測一覧の項目設定

No.	項目名	概要
1	モデル化パラメータ	DIVP®内モデルの測定対象パラメータ
2	モデル要件（要求精度）	測定の要求精度
3	モデル化対象アセット	モデル化パラメータの適用アセット
4	実験名	実験の名目
5	実験目的	実験の目的
6	計測量	計測方法、単位
7	計測対象物	計測対象の試料やターゲット
8	関連センサ	Camera、LiDAR、Radar の対象センサ
9	環境条件	計測時の環境設定（場所や実験室）
10	測定条件	測定器の設定条件
11	計測器/計測器スペック	利用計測器、計測性能（分解能、精度等）
12	設備・治具/設備・治具仕様	試用設備・治具とその仕様
13	方法概要	計測方法の概略や注意点
14	実施者	計測実施担当者
15	データ保管場所	データの保管場所の LINK
16	課題	計測およびモデル化上の課題

出所：トヨタテクニカルディベロップメント（株）

Table 85　モデル化計測一覧表（抜粋）

モデル化パラメータ	モデル要件 （目標精度）	モデル化対象 アセット	実験名	実験目的	計測量 （単位）	計測対象物	関連センサー	環境条件	測定条件	計測器1	計測器1スペック
可視・近赤外光反射	±10%要求（PSSI様） 1nm単位測定（SSS様） ±5%以下（装置仕様）	路面、白線、車両 （白色、ガラス）	可視・近赤外反射率精密測定	可視光・近赤外領域の特性を得るための計測	BRDF	試料片	カメラ LiDAR	暗室	光源：-70°～70° 受光：-70°～70° 光源/受光角度：＞10°	モノクロメータ式分光計：GS-1290-DMS-2	帯域：360nm～1100nm 波長分解能：0.9nm 波長精度：±0.25nm
		車両 NCAPダミー人 NCAPダミー自転車	可視光簡易反射率測定	精密測定できない対象に対して簡易的に行う可視光反射特性測定	BRDF	現物	カメラ LiDAR			BYK mac i color	5angle 400nm-700nm,10nm res 0 to 600 % reflectanmce
			鏡面反射特性計測	精密測定できない対象かつ光沢をもつ対象に対して、鏡面反射特性を得るための測定	グロス値GU	現物	カメラ LiDAR			グロスメータ	
		再帰反射素材 白線	簡易再帰反射率測定	精密測定できない対象かつ再帰反射特性をもつ対象に対して、再帰反射率を得るための測定	再帰反射率 (cd/lx/m2)	現物	LiDAR			roadvista 932 retoreflectometer	入射角　-45°～45° レンジ：10000 cd/lx/m2
ミリ波散乱	なし	車両 NCAPダミー人 NCAPダミー自転車	ミリ波散乱測定	レーダー方程式（距離4乗測）：PO近似向けの、散乱体モデル作成のための計測	誘電率(F/m) 透磁率(H/m)	試料片	Radar	電波暗室		network analyzer： N5227B、N5292、 N5262B	
ミリ波反射	±3dB要求（DENSO様）	路面、車両（金属、樹脂、ガラス）、NCAPダミー人、標識	ミリ波反射率測定	フリスの法則（距離2乗測）：GO近似向け、ミリ波反射体モデル作成のための測定	BRDF	試料片	Radar	電波暗室	送信：0～75°、5°分解能 受信：0～±75°、5°分解能 アンテナ間角度：＞=45°	network analyzer： N5227B、N5292、 N5262B	
ミリ波RCS	暫定値 全方位±3dB(JAMA	車両 NCAPダミー人 NCAPダミー自転車	RCS測定	1.レーダー方程式（距離4乗測）：PO近似向け、解析時間短縮用散乱モデル作成のための計測 2.車両等の散乱モデルが割り当てられたアセットの、一致性評価のため計測	RCS (dBsm)	現物	Radar	電波暗室		network analyzer	
マップ形状	10cm	マップ	MMS計測	マップ形状を得るための測定		Jtown[多目的市街地] Jtown[特異環境試験場] お台場 首都高速C1 大型降雨実験施設	カメラ LiDAR Radar	屋外		三菱電機社製　MMS LiDAR IMU GPS カメラ	

出所：トヨタテクニカルディベロップメント（株）

計測カタログの作成

Table 85 のモデル化パラメータに対して、計測カタログの作成を行った。

一目で計測内容が伝わるという観点から、以下の情報を掲載する。

・計測条件

・計測器情報

・計測風景

・計測結果

計測カタログは、以下の 8 つを作成した。

・可視光・近赤外光反射率精密測定

・可視光・近赤外光反射率簡易測定

・ミリ波散乱・反射測定

・ミリ波 RCS 測定

・マップ形状測定

・3D モデル形状

・降雨・着滴実験

・降雪・着雪実験

以下に可視光・近赤外光反射率精密測定と 3D モデル形状に関してカタログ例を示した。

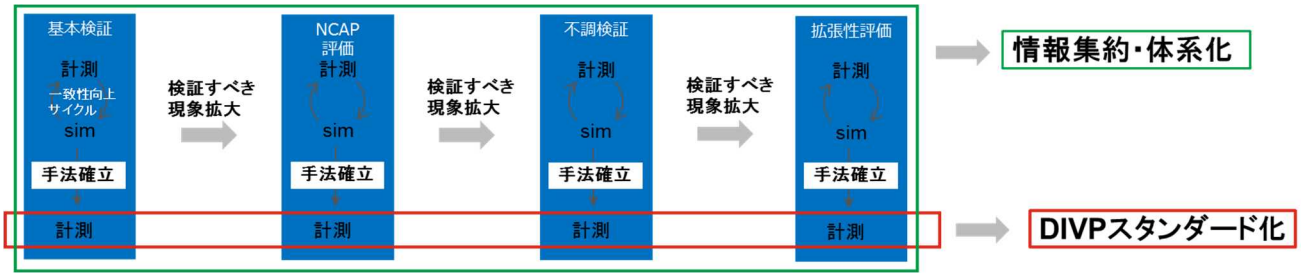
出所：トヨタテクニカルディベロップメント（株）、株式会社 SOKEN

Figure 290　計測カタログの例

② 一致性検証の標準化

一致性検証は、DIVP®によるシミュレーション結果と現実との比較検証である。今回、①計測環境の標準化と同様にこれまで実施された一致性検証のための実験・計測情報の集約を行い、体系化を試みた。

集約した情報から、基本検証や不調検証といった検証ステップにおいて、一致性検証手法として確立されたかを判断し、確立できたと判断したものを DIVP®スタンダードとする。



出所：トヨタテクニカルディベロップメント（株）

Figure 291　一致性検証のための実験・計測の集約・体系化とスタンダード化のフロー

体系化を行う目的は、以下である。

・一致性検証のための計測内容・条件の明確化と記録
・JAMA が規定するセンサ毎の不調要因と計測内容・条件の関連性の明確化
・JAMA が要求する妥当性確認と DIVP®に計測内容・条件の関連性の明確化
・コンソーシアムメンバー内での情報共有
・検証結果と計測のトレーサビリティの確保
・DIVP®の一致性検証スタンダードを決めていくための基盤
・仮想空間での自動運転安全性評価法を決めていくための基盤

モデル化計測一覧表の作成

体系化にむけて、一致性検証計測一覧表の作成を行った。一覧表は、以下の観点で記載項目を選定した。

・各計測に対するターゲットやその動作といった計測内容（シナリオ）の明確化
・JAMA 不調体系との関連の明確化
・それぞれの計測がどのセンサの検証であるのか
・計測実施場所の明確化

Table 86 に一覧表作成にむけて設定した項目を記載した。

Table 86　一致性検証計測一覧に対する項目設定

No.	項目名	概要
1	実験区分	DIVP®内の実験区分
2	実験 No.	実験区分内での番号
3	実験名	一致性検証の実験名
4	JAMA 不調現象	該当する JAMA 不調体系内の不調現象
5	不調分類	4 の項目番号
6	JAMA 要求	JAMA 妥当性確認の番号
7	センサモデル	対象のセンサ、モデル
8	目的・検証項目	検証の目的、項目
9	計測概要	計測手順などの概略
10	対象物	計測時のターゲット
11	計測環境	計測時の場所や設備
12	計測条件	計測時の設定条件（距離、角度、走行条件など）
13	一致性検証解析	一致性検証の状況
14	データ保管場所	計測データ、検証結果データの保存場所の LINK

出所：トヨタテクニカルディベロップメント（株）

Table 87 に作成した一致性検証計測一覧表の抜粋を示す。

現状、105 項目の計測情報が集まっているが、次年度の実験にて約 30 項目追加見込み。

Table 87　一致性検証計測一覧表（抜粋）

実験区分	実験No.	実験名	JAMA不調現象	不調分類	JAMA要求	センサ・モデル	目的・検証項目	計測概要	対象物	計測環境	計測条件	一致性検証解析	データ保管場所
PV	1-1	ターゲット静止_距離_向き	認識対象の形状、大きさ、姿勢などにより反射強度が低下する	M21	Radar0-7 Radar0-8	カメラ LiDAR Radar	静的検出距離検証	センサ前方に、物標を置き距離および物標の向きを変更して測定 カメラISX019	プリウス 人ダミー 自転車ダミー	Jtown	距離：5,10,25,50,100,150,200,250m 角度：正面、横向き、後ろ向き、斜め		
PV	2	プリウス静止_方位				カメラ LiDAR Radar	静的検出方位検証	センサ前方に、横方向に物標の距離の水準を変えて測定	プリウス	Jtown	正面距離：20m 横並距離：最大50m 角度：横向き		
BV	1-1	直線離間				カメラ LiDAR Radar	動的物標検出距離検証	センサ前方の車両がセンサから直進で離れていく状態を測定	プリウス	Jtown	プリウス車速：クリープ		
BV	1-2	コーナー離間				カメラ LiDAR Radar	動的物標検出方位検証	センサ前方の車両がセンサからコーナーに沿って離れていく状態を測定	プリウス	Jtown	プリウス車速：クリープ		
BV	1-3	直線接近	路面等によるマルチパスフェージング	M22	Radar2-6 Radar2-7	カメラ LiDAR Radar	動的静止物標別検出性検証	停止物標にセンサ搭載車両が接近していく状況で測定	車両 人ダミー 自転車ダミー コーナリフレクター	Jtown	自車速：クリープ 物標角度：正面、横向き、後ろ向き		
BV	2-1	横断				カメラ LiDAR Radar	動的物標別検出性検証	前方を物標が横断する状況で計測	プリウス	Jtown	前方距離：20m プリウス車速：20,30km/h		
BV	2-2	マルチパスゴースト				カメラ LiDAR Radar	マルチパス現象検証	ガードレールに沿って、先行車に追従する状態で測定	プリウス	Jtown	車間距離：30m 車速：30km/h		
BV	2-3	ミリ波反射点				カメラ LiDAR Radar	ミリ波反射点検証	センサ搭載車両を中心にターゲットが旋回する状態で測定	プリウス	Jtown	半径：30m 車速：20,30km/h		
MV	1-1	夜間歩行者横断＋対向車ライト				カメラ LiDAR Radar	センサ弱点検証	夜間条件において前方を人ダミーが横断する状況で計測 対向車はヘッドライト点灯	人ダミー	Jtown	自車速：40km/h ダミー速：5km/h		
MV	1-2	夜間歩行者横断＋対向車ライト＋茶ジャケット				カメラ LiDAR Radar	センサ弱点検証	夜間条件において前方を人ダミーが横断する状況で計測 人ダミーが茶ジャケットを着ている 対向車はヘッドライト点灯	人ダミー	Jtown	自車速：40km/h ダミー速：5km/h		
MV	1-3	夜間歩行者横断＋自車ヘッドライト＋茶ジャケット				カメラ LiDAR Radar	センサ弱点検証	夜間条件において前方を人ダミーが横断する状況で計測 人ダミーが茶ジャケットを着ている 自車はヘッドライト点灯	人ダミー	Jtown	自車速：40km/h ダミー速：5km/h		
MV	1-4	夜間歩行者横断＋街灯＋自車ヘッドライト				カメラ LiDAR Radar	センサ弱点検証	夜間条件において前方を人ダミーが横断する状況で計測 自車はヘッドライト点灯 街灯が点灯	人ダミー	Jtown	自車速：40km/h ダミー速：5km/h		
MV	1-5	夜間歩行者横断＋自車ヘッドライト				カメラ LiDAR Radar	センサ弱点検証	夜間条件において前方を人ダミーが横断する状況で計測 自車はヘッドライト点灯	人ダミー	Jtown	自車速：40km/h ダミー速：5km/h		

出所：トヨタテクニカルディベロップメント（株）

③ センサモデル連成

センサモデル連成は、DIVP®センサモデルのインターフェース標準化に向けた取り組みとして 10 月度に開始した案件であり、JTTT3.3 Radar モデルを中心に活動した。初めの取り組みとして、VIVALDI と DIVP® 間でお互いの Radar モデルの連成（異なるシステムを接続し機能するように構築する）を目指した。

まず、モデル連成の実現に向け、VIVIALDI に Radar モデル提供を打診したが、VIVALDI 側の機密のため実現困難と判明した。代替策として、Radar モデルの入出力データを活用した検証方法について VIVALDI と合意した。具体的には、共通のシナリオを決め、VIVALDI と DIVP®双方で Radar による空間伝播シミュレーションを実行する。そこで得られた空間伝播の出力結果を交換し、各自の Radar モデルにデータ入力・動作確認する。これにより、機密性の高い Radar モデル本体を出すことなく、モデル連成の検証が可能となる。

データ交換は NDA 締結後となるため、本年度はデータ交換に向けた議論や交換データの仕様確認を実施した。

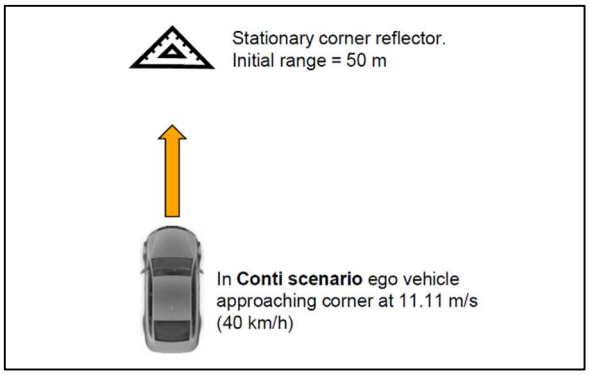
今年度の成果としては、下記の 5 項目となる

1) データ交換方針の合意
2) 共通シナリオの決定
3) VIVALDI への提供希望データリスト提示（合意完了）
4) DIVP®から VIVALDI へのデータ提供時のデータフォーマット決定（CSV）
5) VIVLADI 側データリスト（OSI extension）を入手/仕様確認実施

下記に 2) 3) 5)に関して、補足情報を記載する。

2)共通シナリオの決定

Figure 292 に、共通シナリオの内容を示す。自車正面 50 メートル離れた場所に、コーナーリフレクターを 1 つ置く。自車は、40km/h の定速でコーナーリフレクターに接近する。



出所：トヨタテクニカルディベロップメント（株）

Figure 292 共通シナリオ

3) VIVALDI への提供希望データリスト提示（合意完了）

Table 88 に、VIVALDI への提供希望データリストを示す。DIVP®側の Radar モデルが使用しているデータリストであり、VIVALDI 側から入手したいデータリストである。こちらについて、提供については、合意完了している。

Table 88　VIVALDI への提供希望データリスト

分類	データ名と英語表記
レイトレーシング結果	1）総伝搬距離[m]　ray propagation distance in total[m]
	2）反射点間相対速度総和[m/s]　sum of relative velocity between reflection points
	3）水平偏波成分の伝搬減衰量総和[比]　sum of propagation attenuation of horizontal polarization
	4）垂直偏波成分の伝搬減衰量総和[比]　sum of propagation attenuation of vertical polarization
	5）送信水平方位[deg]　DOD in azimuth angle
	6）送信垂直方位[deg]　DOD in elevation angle
	7）受信水平方位[deg]　DOA in azimuth angle
	8）受信垂直方位[deg]　DOA in elevation angle

出所：トヨタテクニカルディベロップメント（株）

5)VIVLADI 側データリストを入手/仕様確認実施

今回の取り組みにおいて OSI にてデータ共有を行うことを検討した。その際、DIVP®と VIVALDI の必要としている信号には、OSI に含まれない信号があることが判明した。そのため、VIVALDI では、OSI のバージョンアップを検討しており、OSI extension という形で検討している。DIVP®出力、VIVALDI、OSI の出力比較結果を Table 89 に示す。DIVP®と VIVALDI 間にて一致する信号は、No.2-7 である。

Radar モデルの連成検討においては、検証可能な信号は得られていると考えている。

No.8-12 については DIVP®と VIVALDI の各研究内容に依存するものであり、議論を継続していく予定である。

Table 89　DIVP®出力、OSI、VIVALDI の出力に対する比較検証結果

No.	データ	DIVP®	OSI extension by VIVALDI	OSI 3.0 RadarSensorView:: Reflection
1	信号強度	—	—	signal_strength [dB]
2	総伝搬距離	ray propagation distance in total [m]	path_length	time_of_flight [s]
3	反射点間相対速度	sum of relative velocity between reflection points [m/s]	relative_velocity	doppler_shift [Hz]
4	水平偏波成分の伝搬減衰量	sum of propagation attenuation of horizontal polarization	power in dBm(in H-pol)	—
5	垂直偏波成分の伝搬減衰量	sum of propagation attenuation of vertical polarization	power in dBm(in V-pol)	—
6	受信水平方位	DOA in azimuth angle [deg]	horizontal_angle	source_horizontal_angle [rad]
7	受信垂直方位	DOA in elevation angle [deg]	vertical_angle	source_vertical_angle [rad]
8	送信水平方位	DOD in azimuth angle [deg]	—	—
9	送信垂直方位	DOD in elevation angle [deg]	—	—
10	反射点数	非公開	number_of_interaction	—
11	反射点座標	非公開	HitPoint as Vector3D x,y,z	—
12	反射位相シフト	非公開	Phase	—

出所：トヨタテクニカルディベロップメント（株）

④ DIVP®要求仕様検討

DIVP®要求仕様検討では、DIVP®のユーザ目線による要求仕様を検討した結果を、随時 DIVP®開発担当者と共有していくことを目指す。ユーザは、DIVP®の開発ターゲットである自動運転車両、各センサ（Camera、LiDAR、Radar）のセンサメーカの技術者を対象とした。

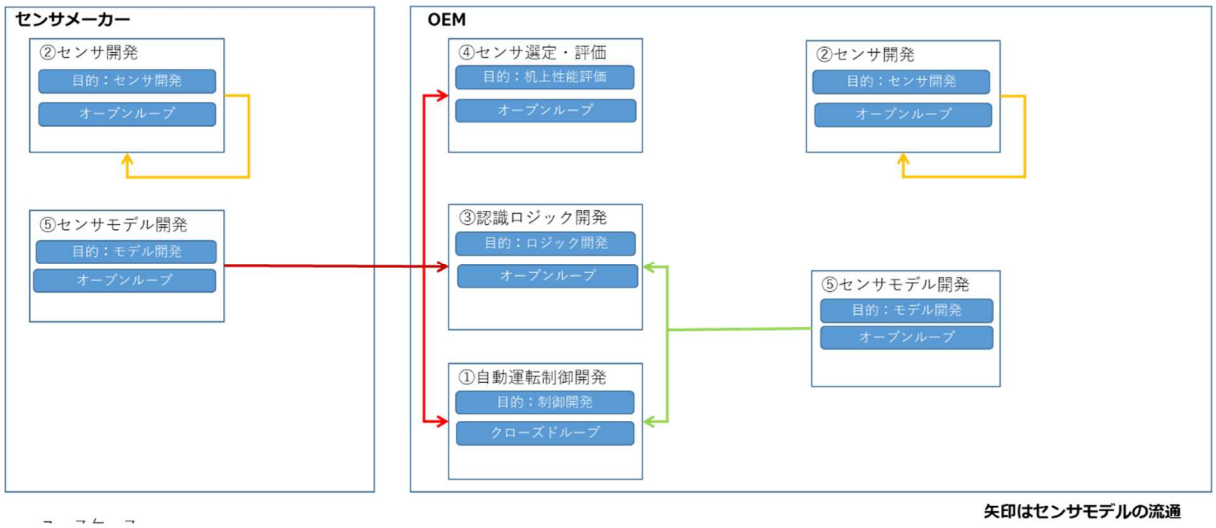
1）ユースケース検討

本項目では、DIVP®の要求仕様検討の材料として DIVP®のユースケースについて検討を行った。まず、センサシミュレータの想定ユーザとそのユースケースの検討結果を Figure 293 を用いて説明する。センサメーカ、OEM のセンサシミュレータのユースケースを①～⑤で記載した。矢印はセンサモデルの流通経路を表している。グローズドループは制御有の状態でのシミュレーションであり、オープンループは制御無の状態でのシミュレーションを表している。自動運転制御が含まれるシミュレーションはクローズドループである。オープンループは、走行軌跡や条件を入力し、それに従って走行するシミュレーションを表している。そのため、シナリオを用いて走行する場合、通常の DIVP®には自動運転制御が含まれないため、オープンループでのシミュレーションとなる。

センサメーカ、OEM での各ユースケースについて説明する。

センサメーカは、センサ本体の開発が中心であり、その開発環境としてセンサシミュレータを活用するものと考えた。さらに、そこで開発したセンサモデルは、OEM 側に提供するというルートが考えられる。OEM に提供するセンサモデルは、DIVP®にて行っている一致性検証の手法を参考に精度検証や調整を行うことを推奨する。

一方 OEM では、センサ選定・評価、認識ロジック開発、自動運転制御開発にセンサシミュレーションを使うことが考えられる。車両に搭載しているセンサのモデルをセンサメーカから入手できれば精度の高い評価が可能となる。また、OEM においてセンサ開発を行っている場合、そのセンサモデル開発において、センサシミュレータを活用するシーンも想定可能である。



出所：トヨタテクニカルディベロップメント（株）

Figure 293　センサシミュレータの想定ユーザとユースケース検討

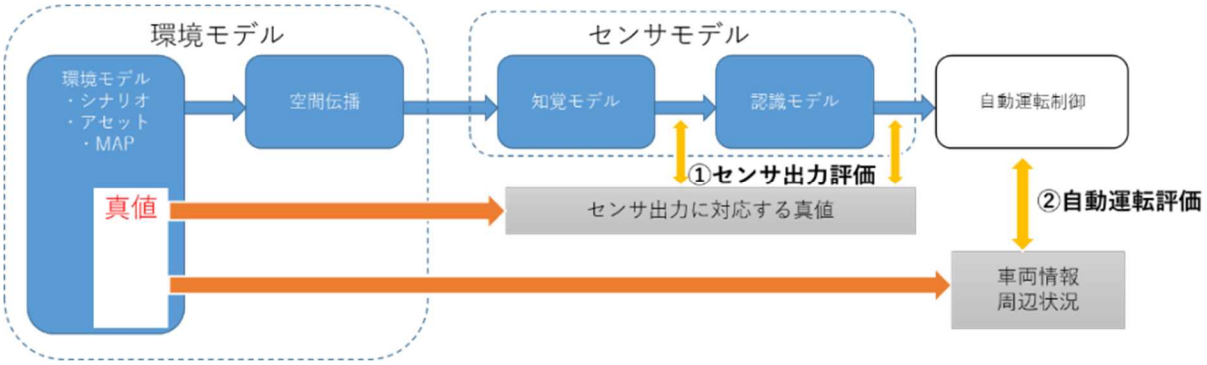
2）真値出力検討（車両挙動に関する出力）

真値出力検討（車両挙動に関する出力）では、Figure 293 に示した OEM での自動運転制御開発をターゲットとして DIVP®の真値出力について検討した結果を説明する。

真値出力とは

DIVP®における真値について説明する。Figure 294 に示すように、DIVP®には、環境モデルがあり、その中にシナリオ、アセット、MAP などが存在し、仮想空間を構築している。アセットの中には、先行車両や歩行者、標識、路面など様々な物標がある。それらの位置情報、マテリアル情報などが真値である。

真値の用途は、大きく分けて①センサ出力評価、②自動運転評価の 2 点がある。①センサ出力評価は、シミュレーション上の正しい情報である真値とセンサモデルの出力結果を比較し、センサモデルの調整や評価に用いる。②自動運転評価では、OEM における自動運転制御の開発時に車両位置や速度、周辺状況などの入手先として使用する。今回は、優先度の高い車両情報の真値出力について検討した。



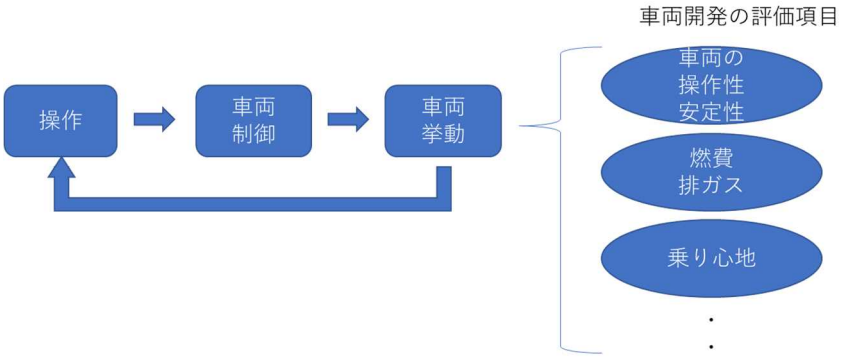
出所：トヨタテクニカルディベロップメント（株）

Figure 294　DIVP®における真値出力

DIVP®の真値出力に必要な車両情報

まず、OEM における車両開発について Figure 295 を用いて簡単に説明する。自動車は、運転者がアクセルペダル、ブレーキペダル、ステアリング操作を行い、その操作量に従い ECU と呼ばれる制御装置がエンジン、トランスミッション、ブレーキ、タイヤ等を制御する。その結果、車両が加速、減速、旋回といった挙動を示す。OEM では、これらの車両挙動を速度、加速度、車両の角度（傾き、角速度、角加速度）といった項目（以下、車両挙動の基本項目と称する）と制御状況を照らし合わせて検証する。車両開発では、操作性、安定性、燃費、排ガス、乗り心地といった開発項目に従い、計測内容をいくらか変更するが、車両挙動の基本項目は常に確認する。

自動車の制御開発の 1 つである自動運転においても同様に車両挙動の基本項目は確認が必要と考えられる。そのため、センサシミュレーションである DIVP®も車両挙動の基本項目を真値出力に加える必要がある。



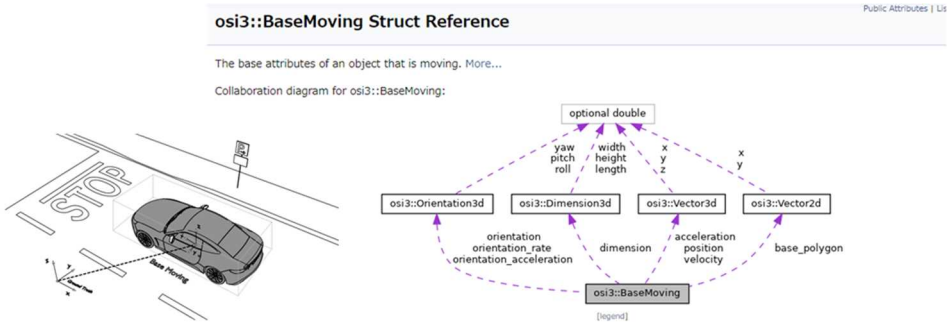
出所：トヨタテクニカルディベロップメント（株）

Figure 295　車両開発における評価項目

OSI との整合性

DIVP®のインターフェース仕様は、ASAM　OSI に準拠することを目指している。そのため、

車両挙動の基本項目が OSI と整合性が取れているかを確認した。Figure 296 に ASAM-OSI の自車両に関する信号 BaseMoving Struct Reference を示す。車両挙動の基本項目に対して、BaseMoving Struct Reference 内にある Vector3d Struct Reference と Orientation3d Struct Reference が該当する。そのため、車両挙動の基本項目は、OSI にも準拠しており、DIVP®要求仕様検討として妥当なものであると判断した。以上により、DIVP®開発担当側への出力追加の依頼を提出し、年度末リリースバージョンへの適用について検討に移行した。



osi3::Dimension3d Struct Reference	移動体の構造（サイズ）
osi3::Vector3d Struct Reference	移動体の位置、速度、加速度（X,Y,Zの3軸）
osi3::Vector2d Struct Reference	移動体の位置、速度、加速度（X,Yの2軸）
osi3::Orientation3d Struct Reference	移動体の回転（yaw, roll, pitch）の角度、角速度、角加速度

osi3::Vector3d Struct Reference

no	Parameter(unit)	Type
1	X : Position (m)、velocity(m/s)、Accelaration (m/s^2)	double
2	Y : Position (m)、velocity(m/s)、Accelaration (m/s^2)	double
3	Z : Position (m)、velocity(m/s)、Accelaration (m/s^2)	double

osi3::Orientation3d Struct Reference

no	Parameter(unit)	Type
1	Yaw ：Angle (rad)、Rate(rad/s)、Accelaration (rad/s^2)	double
2	Pitch: Angle (rad)、Rate(rad/s)、Accelaration (rad/s^2)	double
3	Roll: Angle (rad)、Rate(rad/s)、Accelaration (rad/s^2)	double

出所：ASAM OSI “https://opensimulationinterface.github.io/open-simulation-interface/structosi3_1_1BaseMoving.html”

Figure 296　ASAM OSI BaseMoving に関する信号

(3)次年度以降の計画

①計測環境/②一致性検証の標準化

計測環境の標準化、一致性検証の標準化を並行して実施する。

その際、下記の計測情報等の整理、体系化を継続する。

- ・計測データの収集保管
- ・一致性検証カタログの作成
- ・計測データや一致性検証データ等の収集保管
- ・一致性検証の DIVP®スタンダードの作成

③センサモデル連成

センサモデル連成に対しては、VIVALDI 側との空間伝播データの交換を実施し、Radar モデルの接続性を検証する。関連する活動として、OSI Extension の仕様検討に対し、情報共有し、可能であれば提案を実施していく。

④DIVP®要求仕様検討

接続性強化 TF を中心に議論となった DIVP®のツールやデータ連携について要求仕様を検討し、DIVP®の負荷価値向上を検討する。

5. 2. 5 「B2. ミリ波レーダ リファレンスモデル構築」（株式会社デンソー）

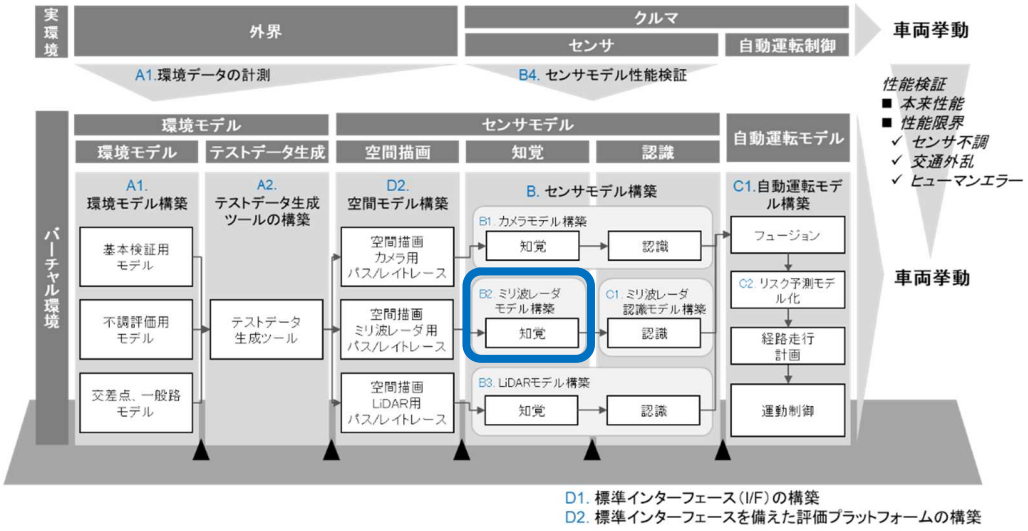


Figure 297　本研究の位置付け

ミリ波レーダモデルに必要な要件を定義し、その標準形であるリファレンスモデルを構築する。これにより、後段の認知・判断・操作まで含めた大規模な検討が仮想環境で行える可能性を高める。

■ 事業目的

ミリ波レーダモデルの要件を定義し、ミリ波レーダ仮想評価環境を開発する。これらのリファレンスモデルと比較するための実機を構築し、シミュレーション結果と実測結果を比較する。

■ 事業概要

本研究開発テーマでミリ波レーダのモデル化を進めていくにあたっては、以下の三点が主要課題であり、本事業ではこれらについての研究を実施する。

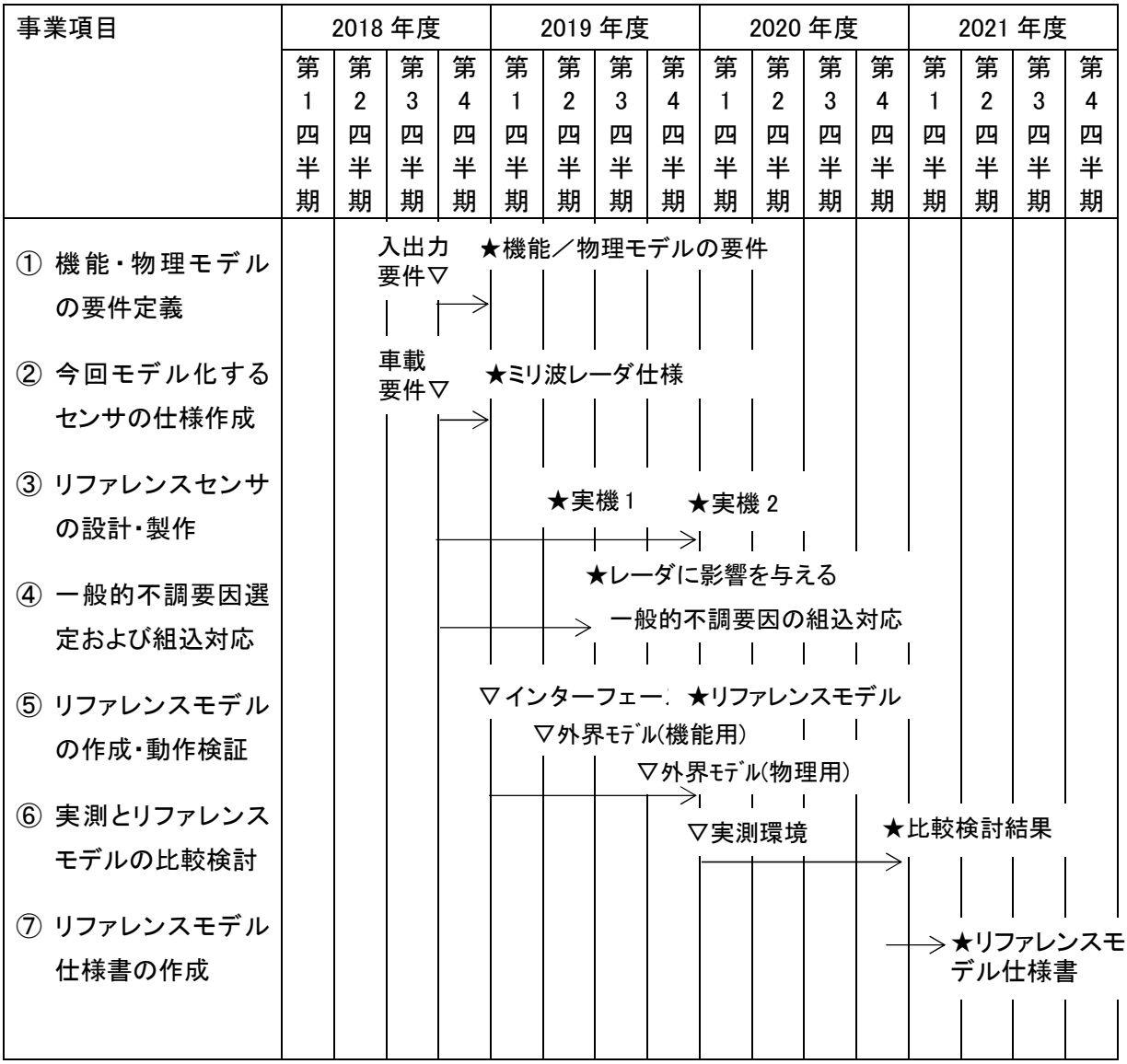
（a）外界から受け取る情報の検討

（b）使い方に応じたリファレンスモデルの抽象度の定義

（c）様々なセンサシステムを評価可能にするための I/F 標準化

■ 実施計画

▽インプット　　★アウトプット（成果物）



(1)令和3年度の成果(まとめ)

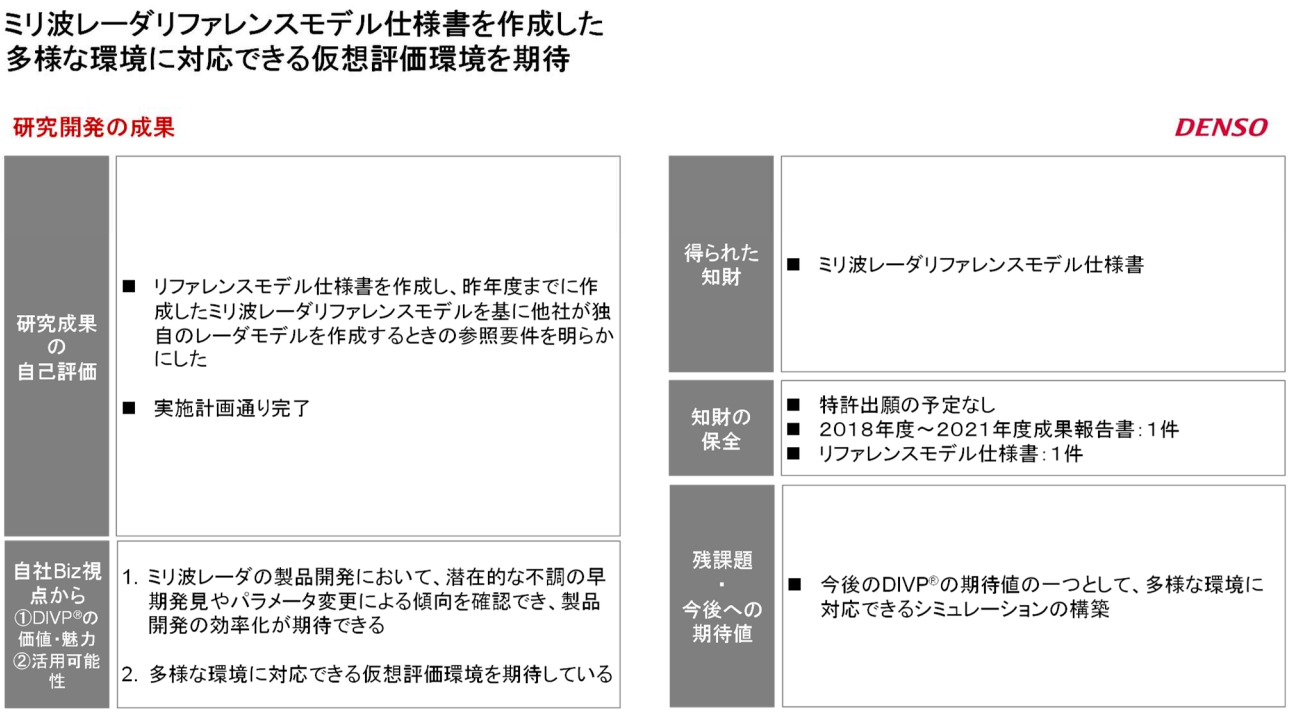
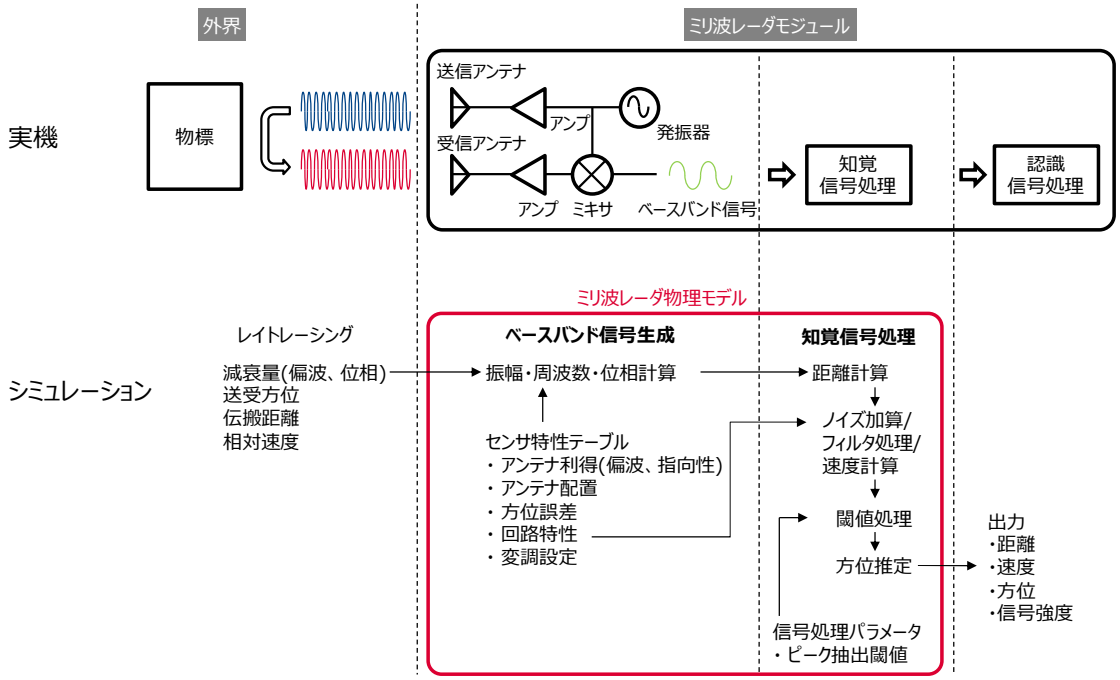


Figure 298 研究開発の成果

今年度は「⑦リファレンスモデル仕様書の作成」として、「⑤リファレンスモデルの作成・動作検証」で作成したリファレンスモデルの構造、インターフェース、具体的機能を仕様書としてまとめた。

(2)令和3年度の成果

⑦ リファレンスモデル仕様書の作成



出所：(株)デンソー

Figure 299 ミリ波レーダ物理モデル概要

上記ミリ波レーダ物理モデル概要に記載したベースバンド信号生成部、および、知覚信号処理部について入出力インターフェース(I/F)、考慮したセンサ特性または調整パラメータ、動作フローについて示す。

(1)ベースバンド信号生成部

入出力 I/F

以下に入出力 I/F を示す。

Table 90 ベースバンド信号生成 入出力 I/F

	項目
入力 I/F	レイトレーシング結果 総伝搬距離[m] 反射点間相対速度[m/s] 水平偏波成分の伝搬減衰量[比] 垂直偏波成分の伝搬減衰量[比] 送信水平方位[deg] 送信垂直方位[deg] 受信水平方位[deg] 受信垂直方位[deg]
出力 I/F	受信電波強度をデジタル値に変換したデータを 3 次元(Chirp 内, Chirp 間, 受信アンテナ)に並べたデータ(図 42 参照)

出所:(株)デンソー

考慮するセンサ特性

以下に考慮したセンサ特性一覧を示す。

Table 91 考慮したセンサ特性一覧

項目	内容
アンテナ指向性利得	電波暗室で CR(※)を計測したデータを基に、指向性利得データを作成し、テーブルとして読込み。
エンブレム・アンテナ等による方位誤差	電波暗室で CR を計測したデータを基に、方位計測し、真値(設置方位)との差分を方位誤差とする。求めた方位誤差をアンテナ配置に基づき、各受信チャネルの位相誤差として記述したテーブル。
アンテナ配置	受信アンテナ間の相対的な位置。現状は、水平配置のみ対応。
受信アンテナ数	受信アンテナ数。
変調設定	車載レーダで主流の Fast Chirp Modulation(FCM)に対応し、Chirp の傾き、Chirp の間隔、Chirp 数、サンプリング間隔、サンプリング開始時間を設定する。
信号強度調整	信号強度レベルを調整するパラメータ。電波暗室で CR を計測したデータと一致するように調整。

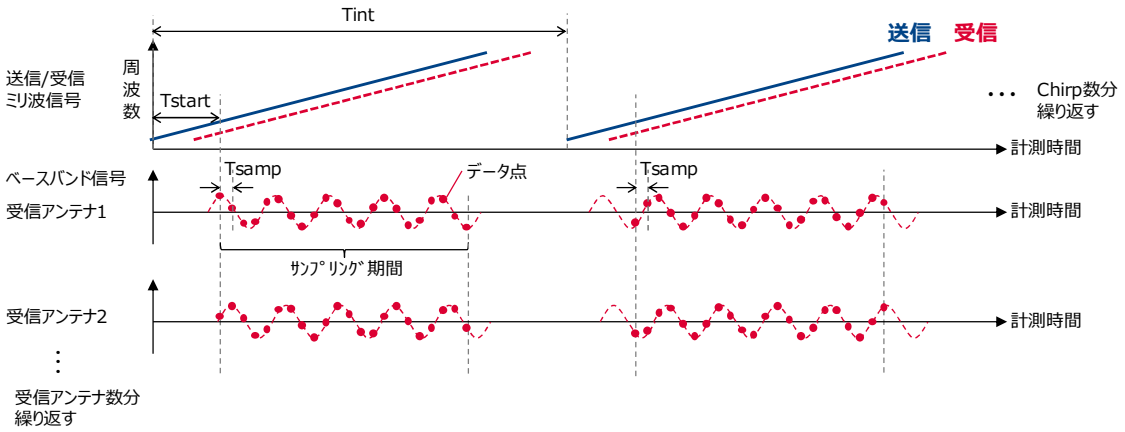
※コーナーリフレクター

出所:(株)デンソー

動作フロー

Figure 300 に、FCM の場合のベースバンド信号を示す。FCM では、直線的に周波数を変化させた Chirp 信号を複数回繰返し送信し、物標から戻ってきた受信信号をアナログ回路でダウンコンバードすることで得られるベースバンド信号を AD コンバータでサンプリングする。ここでは、レイトレーシング結果を受け、表 8 に示したセンサ特性から、ベースバンド信号の振幅、周波数、位相を求め、サンプリングしたデータ点を計算する。振幅、周波数、位相の求め方を以下に記載する。

レイ毎にデータ点を求め、全レイに対するデータ点を加算する。



出所：(株)デンソー

Figure 300 FCM におけるベースバンド信号

信号振幅の算出

Table 91 で示したセンサ特性のアンテナ指向性利得テーブルは、Figure 301 に示すように水平方位と垂直方位を軸としたテーブルとなっており、アンテナ・偏波ごとに準備する。アンテナ特性テーブルを基に、直線補間でレイトレーシング結果の水平方位、垂直方位での利得を計算する。これと、信号強度調整パラメータ、レイトレーシング結果の水平・垂直偏波成分の伝搬減衰量総和を乗算し、信号振幅とする。

水平方位[deg]

垂直方位[deg]	-90		+90
-15			
+15			

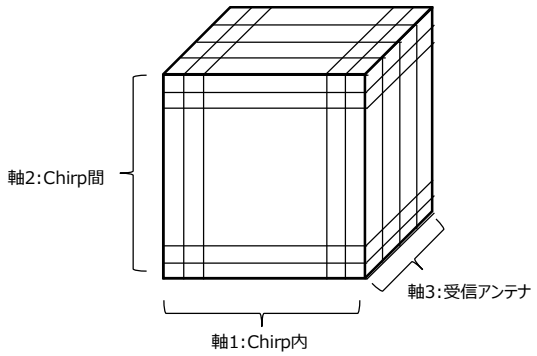
出所：(株)デンソー

Figure 301 アンテナ指向性利得テーブル

信号周波数、位相の算出

周波数は、変調設定の Chirp 傾き Dfdt で決まり、-Dfdt × 遅延時間となる。遅延時間は、レイトレーシング結果の総伝搬距離から求める。位相は、送信周波数と遅延時間の積による位相変化、ドップラー周波数による Chirp 間の位相変化、受信方位による受信アンテナ間の位相変化、および Table 91 で示したセンサ特性のエンブレム・アンテナ等による方位誤差テーブルを基に計算した受信アンテナごとの位相誤差から求める。方位誤差テーブルは、Figure 301 のアンテナ指向性利得テーブルと同様に水平方位と垂直方位を軸としたテーブルとなっており、方位誤差を受信チャネルごとの位相誤差として記述したものである。アンテナ指向性利得の計算と同様に、レイトレーシング結果の水平方位、垂直方位での位相誤差を受信アンテナごとに直線補間で計算する。Chirp 傾きと遅延時間の 2 乗の積に比例する項も存在するが、微小であるため、省略した。

このように求めたデータを、Figure 302 に示す 3 次元の配列として保存する。



出所：(株)デンソー

Figure 302 ベースバンド信号出力データ

(2)知覚信号処理

車載レーダ知覚信号処理の一般的な手法である、距離／速度算出、閾値処理、方位推定を実装する。本来、アナログ回路部のノイズとフィルタは、ベースバンド信号生成に組込むべきであるが、周波数特性を持たせる必要があるため、距離／速度算出で周波数軸に変換した後の実装とした。

Table 92.に入出力 I/F、Table 93 に調整パラメータ、Table 94 に処理概要を示す。

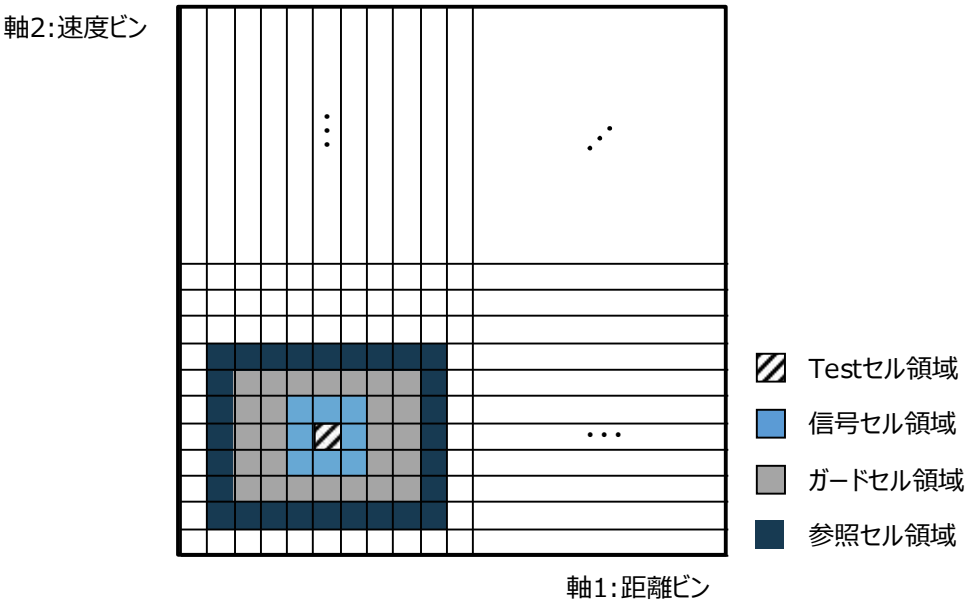
Table 92 知覚信号処理 入出力 I/F

	項目
入力 I/F	受信電波強度をデジタル値に変換したデータを 3 次元(Chirp 内,Chirp 間,受信アンテナ)に並べたデータ(図 42 参照)
出力 I/F	距離[m] 速度[m/s] 水平方位[deg] 信号強度[dB]

Table 93　調整パラメータ

	項目
回路雑音レベル調整	回路雑音レベルを調整するパラメータ。電波暗室で CR を計測したデータと一致するように調整。
アナログ回路部のフィルタ定数	TI 製 AWR1642boost は、1 次の LPF を 2 段通過した後に AD 変換する。これらの LPF の遮断周波数を設定する。
閾値処理パラメータ	閾値処理で使用するパラメータ。本リファレンスモデルでは、Cell-Averaging CFAR を使用しており、信号セル、ガードセル、参照セルの bin 数を距離・速度ごとに設定する(Figure 303 参照)。また、閾値を設定する。
受信アンテナ間強度補正	Table 91 のアンテナ指向性利得は、アンテナごとに設定するため、信号強度はアンテナごとに異なる。通常、アンテナ間の信号強度差を補正した後に方位推定をする。この補正係数である。

出所：(株)デンソー



出所：(株)デンソー

Figure 303 Cell-Averaging CFAR の概略図

Table 94　処理概要

	項目
距離算出	Figure 302 に示すデータ配列の第 1 軸に対して、FFT を実行
ノイズ加算／ フィルタ処理／ 速度算出	距離算出後の全 bin に、熱雑音に相当する正規分布から抽出した乱数を加算する。雑音強度は、Table 93 の回路雑音レベル調整パラメータに比例する。その後、データ配列の第 1 軸方向に、Table 93 に示すフィルタ特性を乗算する。最後に、データ配列の第 2 軸方向に FFT を実行し、速度を算出する。
閾値処理	速度算出後のデータ配列の 1 番目の受信アンテナに対して、閾値処理を実行し、物標のある距離 bin・速度 bin を抽出する。ここでは、Cell-Averaging CFAR を使用した。
方位推定	閾値処理で検出された距離 bin,速度 bin のピークについて、受信アンテナ間のデータに対する方位推定処理を実行する。ここでは、Digital Beam Forming を使用する。
bin の距離・速度 への換算	距離 bin,速度 bin を実際の距離,速度に換算する。の変調設定を使用する。

出所：(株)デンソー

(3)次年度以降の計画

なし

5. 2. 6 「B3-1. LiDAR リファレンスモデル構築」(パイオニアスマートセンシングイノベーションズ株式会社)

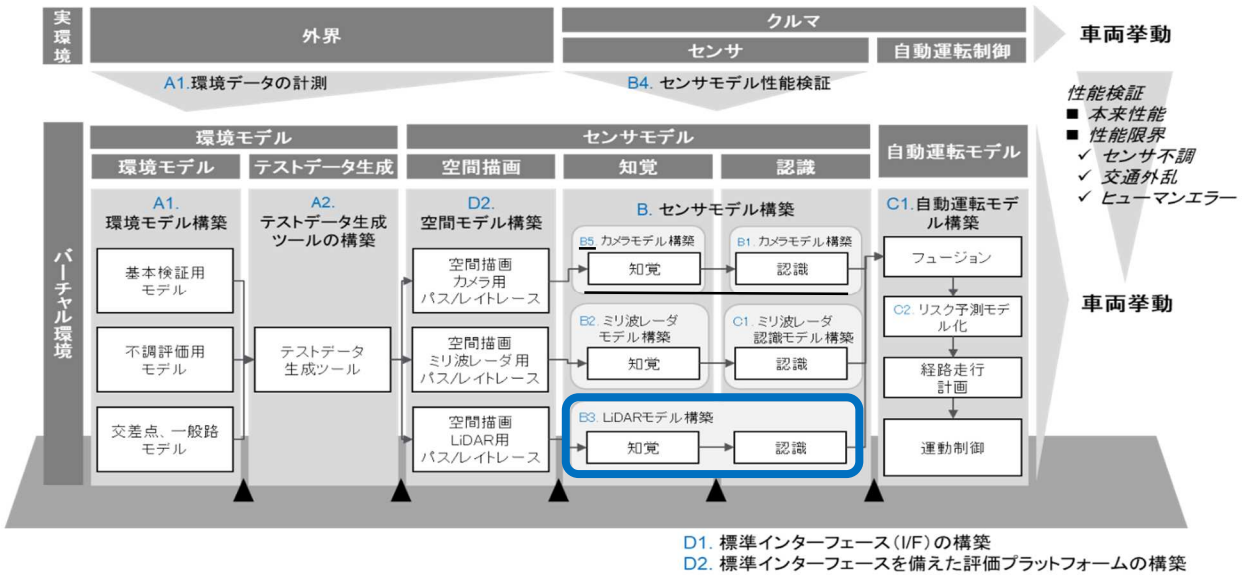


Figure 304　本研究の位置付け

当社では従来から、MEMS ミラーによる走査、Pulse TOF 方式による測距を採用している LiDAR モデルの開発と、この LiDAR モデルにより仮想 3D 環境で点群データを生成する LiDAR シミュレータの開発を行っており、環境条件や物体の反射特性等によって実際の LiDAR から出力される点群データが大きく影響を受けることは確認しているが、これらの影響を考慮した現実に近いシミュレーション環境は構築できていなかった。

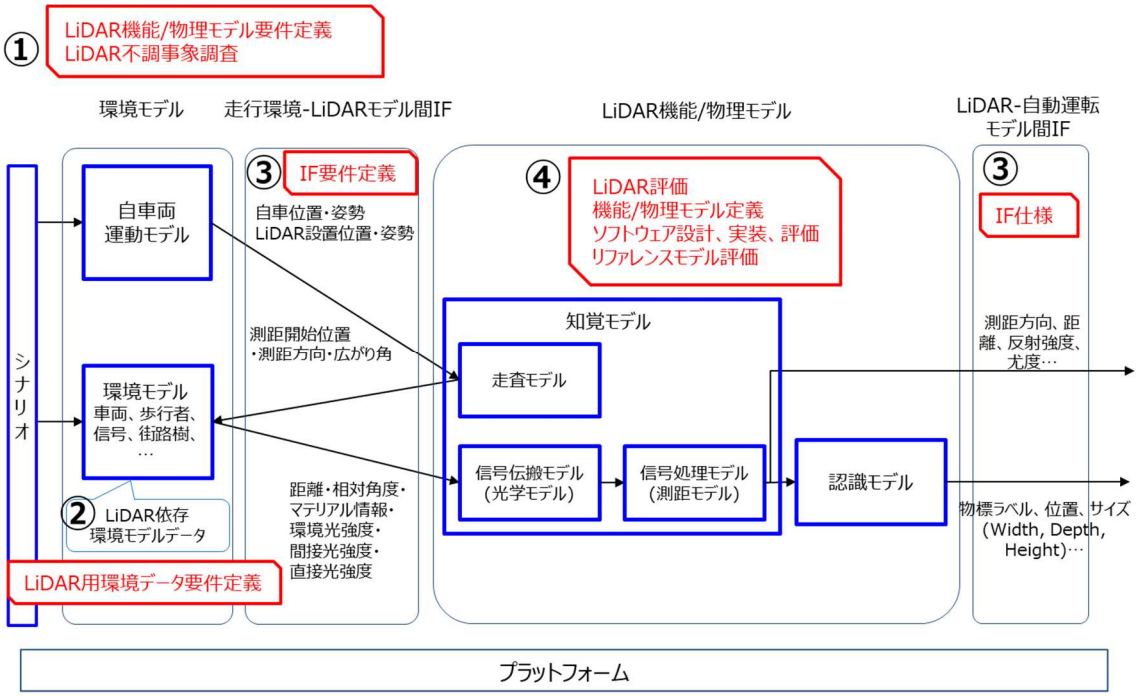
■ 事業目的

本研究開発では、LiDAR リファレンスモデル(機能/物理モデル)を構築するとともに、A パートテーマ関係者と協力し、実空間における環境特性を測定した現実に近いシミュレーション環境を構築する事での課題解決を目指す。また、LiDAR に求められる機能・役割についての明確化についても、LiDAR を利用する立場から C パートテーマを扱う大学と共同して定義していく。

LiDAR 機能モデルについては、自動運転システム全体の性能評価のためのクローズドループシミュレーションでの利用を目的とする。一方 LiDAR 物理モデルについては、シミュレーションの実時間性は求めないが、より現実に近いシミュレーションが可能とすることで、個別センサの性能評価を目的とする。

■ 事業概要

本研究開発では、LiDARリファレンスモデルを構築するため、以下 4 項目について、研究開発を行う。 次図に LiDAR リファレンスモデルを構成する研究開発要素とその関係を示す。

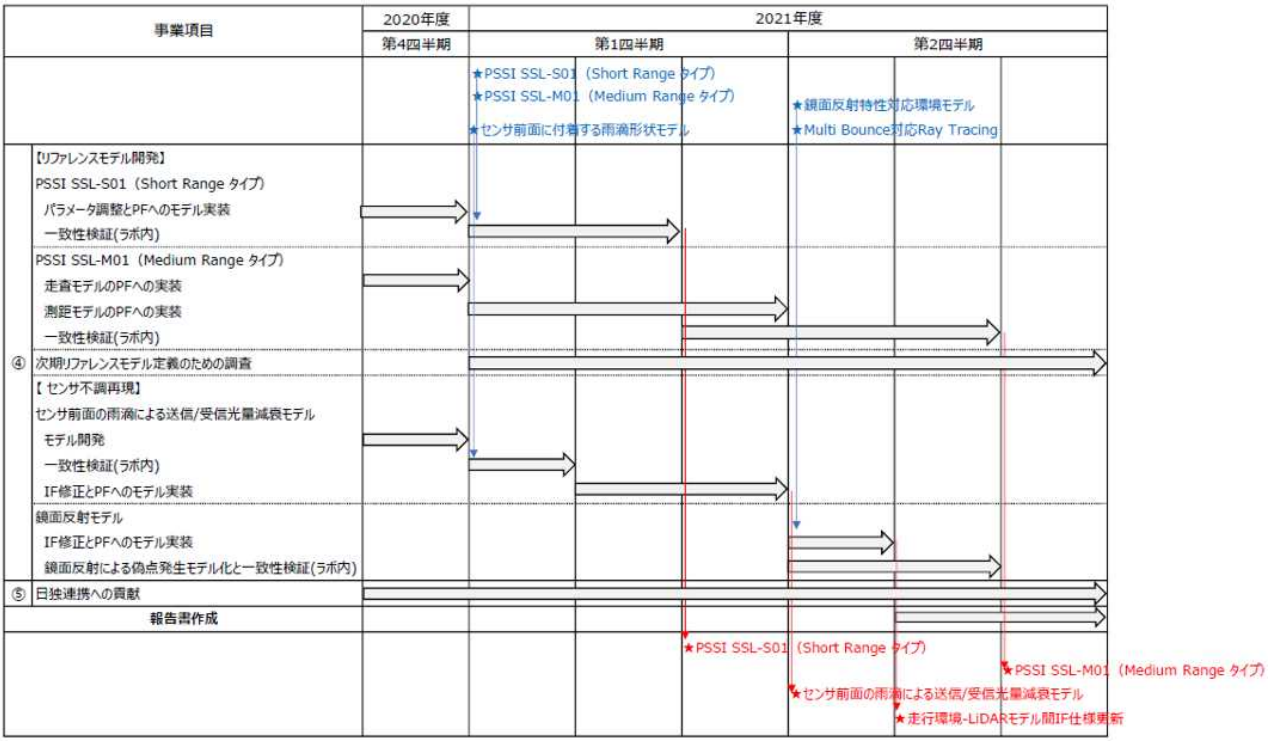


出所：パイオニアスマートセンシングイノベーションズ（株）

Figure 305. LiDAR リファレンスモデルを構成する研究開発要素とその関係

■ 実施計画

≪2021/3～2021/9≫



(1)令和3年度の成果(まとめ)

LiDAR知覚モデルの一致性検証を推進するとともに、LiDARにおける不調環境事象の評価として降雨による空間減衰のモデル化を実施した

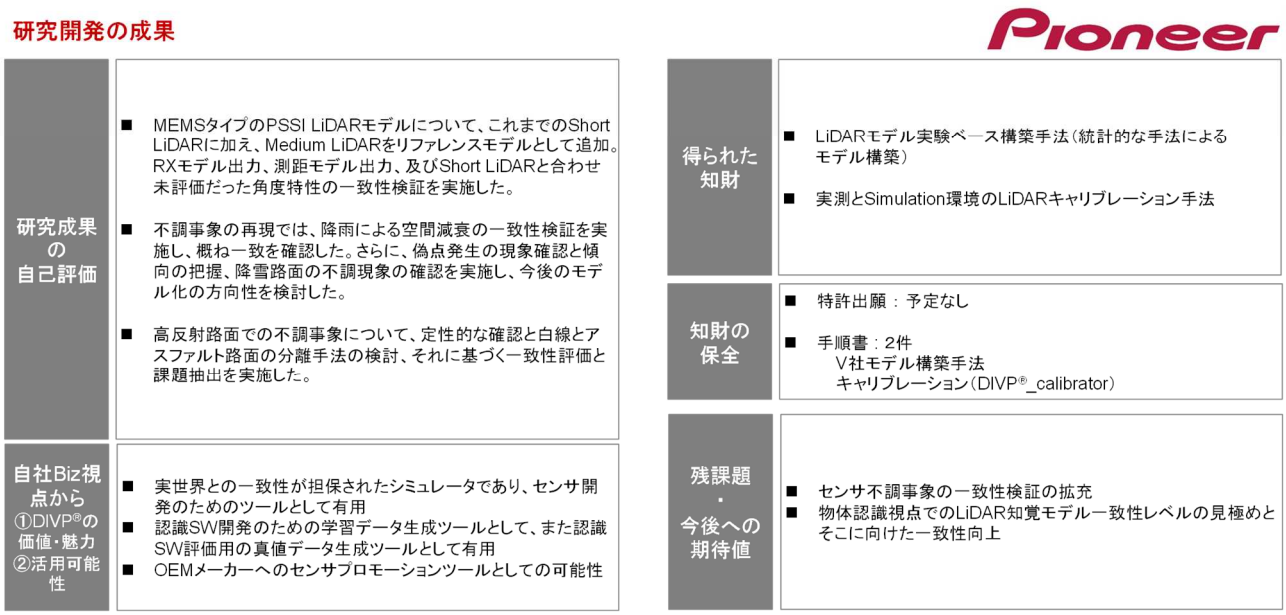


Figure 306　研究開発の成果

研究の成果を上記にまとめた。LiDAR 知覚モデルにおいて、PSSI Medium モデルをリファレンスモデルに追加し、Short モデルと合わせて今まで未評価だった角度特性の評価を実施するなど一致性検証を推進した。また LiDAR における不調環境事象の評価として、昨年度に実施した降雨による空間減衰のモデル化をベースにした降雨減衰の一致性検証、降雨偽点の現象確認と傾向の把握、降雪路面不調の現象確認、および高反射路面の現象確認と一致性検証を行った。

(2)令和3年度の成果

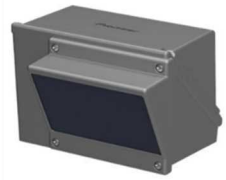
A. PSSI-LiDAR の一致性検証

令和 2 年度の年度末報告書にて PSSI-Short-LiDAR の知覚モデルの一致性検証について報告した。今期は新たに PSSI-Short-LiDAR（以下 Short_LiDAR）よりも測距距離の長い PSSI-Medium-LiDAR（以下 Medium_LiDAR）を追加し知覚モデルの一致性検証を行った。

A) 評価対象 LiDAR について

評価対象とした LiDAR である Short-LiDAR 及び Medium-LiDAR の仕様を以下に示す。

Short LiDAR



Medium LiDAR

	単位	Short LiDAR	Medium LiDAR
測距範囲	m	2～76	2～128
FOV(水平)	deg	60	30
FOV(垂直)	deg	30	15
水平角度解像度	deg	0.8	0.4
垂直角度解像度	deg	0.4	0.2
フレームレート	Hz	24	24

出所：パイオニアスマートセンシングイノベーションズ（株）

Figure 307 Short-LiDAR 及び Mideum-LiDAR 仕様

PSSI-LiDAR の一致性検証のために、LiDAR 実機測定と LiDAR 知覚モデルの一致性検証を行い、さらにアセット（反射特性モデル）と LiDAR 知覚モデルの一致性検証を行った。

＜LiDAR 知覚モデルの一致性検証＞

- Short-LiDAR 及び Medium-LiDAR の走査角度の一致性評価
- Medium-LiDAR 知覚モデルの一致性評価

＜アセット(反射特性モデル)＋LiDAR 知覚モデルの一致性検証＞

- 反射特性が指向性を有する物体の一致性評価
- 高反射物体の強度の一致性評価

B) LiDAR 知覚モデルの一致性検証

B)-1 Short-LiDAR 及び Medium-LiDAR の走査角度の一致性評価

本評価では、走査角度の一致性を評価する。LiDAR の走査角度に関して一致すべき対象は「LiDAR から出力される角度情報」と「LiDAR が照射しているレーザーの角度」である。PSSI-LiDAR 実機においては、角度情

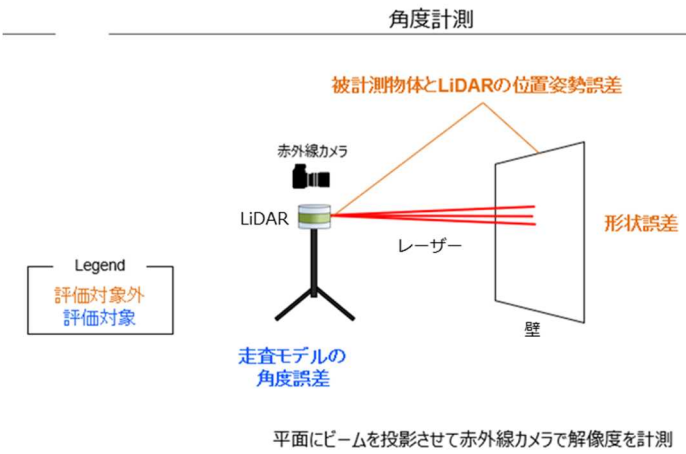
報をテーブル形式で格納している。また、シミュレーションにおいても同様のテーブル値を入力しているために、「LiDAR から出力される角度情報」は完全に一致する。そのため今回の一致性評価には含まない。シミュレーションは LiDAR から出力される角度情報と同じ角度でビームが照射されるが、実測では走査部の電気的なノイズによってビームの照射角度に微小なずれが生じることが想定される。よって本報告では「LiDAR が照射しているレーザーの角度」の一致性を評価する。

ア） 検証方法

環境に起因する誤差と位置・姿勢誤差をできるだけ排除するために、LiDAR 実機による走査角度測定は実験室内で評価を行った。

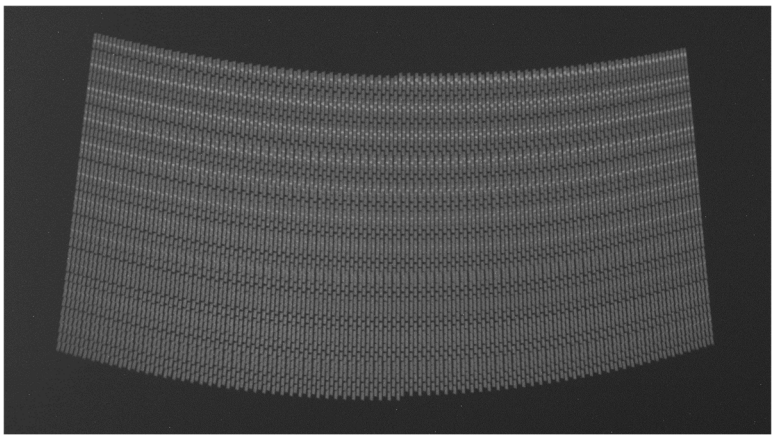
実測値の角度計測方法を Figure 308 に示す。LiDAR を平坦な壁に正対するように設置してレーザーを平坦な壁に照射する。近赤外線カメラで撮影した画像を解析して、フットプリントの重心位置を推定する。壁上の位置が既知である基準とフットプリントの重心位置との相対位置関係からレーザーの照射位置を算出する。そしてレーザーの照射位置及び LiDAR の位置から各レーザーの相対角度を算出する。

壁に照射した Medium-LiDAR のレーザーの走査軌跡を赤外線カメラにて撮影した画像を Figure 309 に示す。画像のようにフットプリントは千鳥配置になっている。



出所：パイオニアスマートセンシングイノベーションズ（株）

Figure 308　PSSI-LiDAR 走査角度一致性検証における評価環境



出所：パイオニアスマートセンシングイノベーションズ（株）

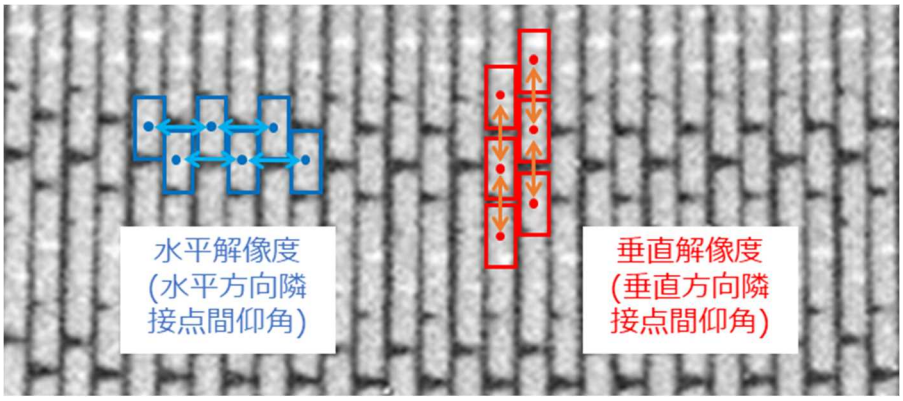
Figure 309　赤外線カメラで撮影したレーザーの走査軌跡

評価指標は垂直解像度（隣接ライン間仰角）及び水平解像度（水平方向隣接点間方位角）とする。評価指標について Table 95 及び Figure 310 に示す。垂直解像度は Figure 310 の赤枠で示すように同列のフットプリント間の角度である。水平解像度は青枠で示すように同行のフットプリント間の角度である。これらの角度の実測値とシミュレーション値の差分を評価する。

Table 95　PSSI-LiDAR 走査角度一致性評価のパラメータと評価指標

評価パラメータ	評価指標
■角度	■垂直解像度（隣接ライン間仰角）の一致性 ■水平解像度（水平方向隣接点間方位角）の一致性

出所：パイオニアスマートセンシングイノベーションズ（株）



出所：パイオニアスマートセンシングイノベーションズ（株）

Figure 310　垂直解像度と水平解像度のイメージ

イ） 検証結果

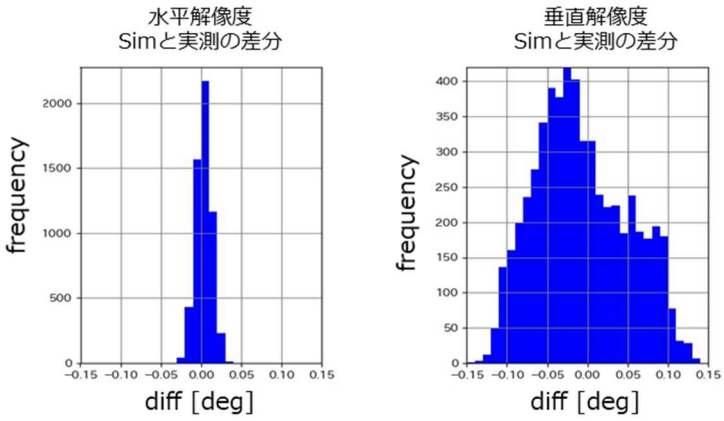
■ Short-LiDAR の検証結果

実測とシミュレーションで対応する FOV（Field Of View）内全ての垂直解像度（隣接ライン間仰角）及び水平解像度（水平方向隣接点間方位角）の差分のヒストグラム及びヒートマップをそれぞれ Figure 311、Figure 312 に示す。

水平解像度はシミュレーションと実測の差分が±0.05deg 以下となっており、ヒートマップを確認しても FOV 内に差分の偏りも見られない。よって十分な一致性が得られていると考える。

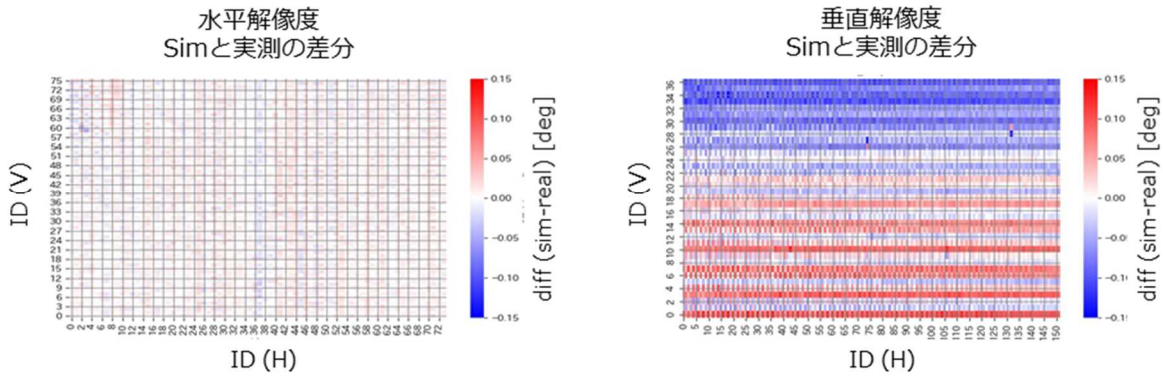
垂直解像度はシミュレーションと実測の差分が±0.15deg 以下となっており水平解像度に比べると一致性が低い結果となった。ヒートマップを見ると FOV 上部ほど実測の方がシミュレーションより垂直分解能が大きく、FOV 下部ほど実測の方がシミュレーションより垂直分解能が小さい傾向が見られた。

垂直方向の解像度の実測とシミュレーションの差分が大きい理由として、Short-LiDAR 実機は MEMS ミラーによって射出角度を走査していることが影響していると考える。PSSI-LiDAR に採用されている MEMS ミラースキャン方式は、水平方向走査は共振周波数によって決まるため安定して駆動するが、垂直方向走査は電気的に入力する、のこぎり波によって駆動するため高周波成分のノイズがのりやすい。ゆえに MEMS ミラー駆動方式の影響と考える。



出所：パイオニアスマートセンシングイノベーションズ（株）

Figure 311　垂直解像度及び水平解像度のシミュレーションと実測の差分のヒストグラム（Short-LiDAR）



出所：パイオニアスマートセンシングイノベーションズ（株）

Figure 312　垂直解像度及び水平解像度のシミュレーションと実測の差分のヒートマップ（Short-LiDAR）

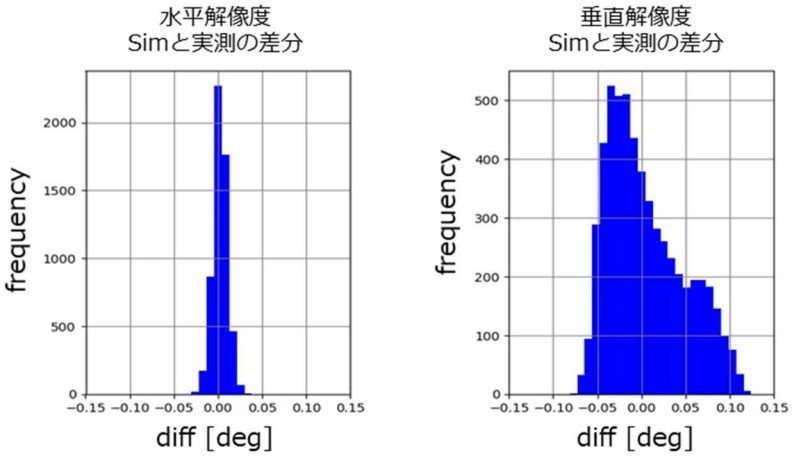
■ **Medium-LiDAR の検証結果**

実測とシミュレーションで対応する FOV 内全ての垂直解像度（隣接ライン間仰角）及び水平解像度（水平方向隣接点間方位角）の差分のヒストグラム及びヒートマップをそれぞれ Figure 313、Figure 314 に示す。

水平解像度はシミュレーションと実測の差分が±0.04deg 以下となっており、ヒートマップを確認しても FOV 内に差分の偏りも見られない。よって十分な一致性が得られていると考える。

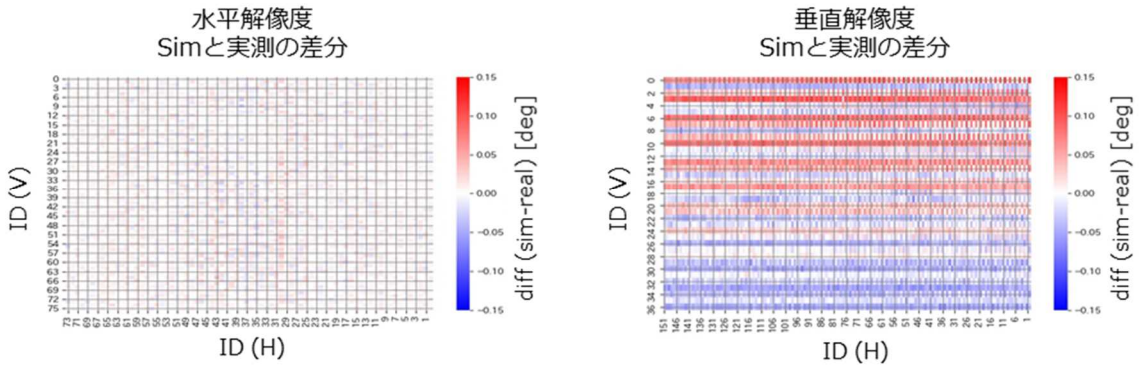
垂直解像度はシミュレーションと実測の差分が±0.13deg 以下となっており水平解像度に比べると一致性が低い結果となった。ヒートマップを見ると FOV 上部ほど実測の方がシミュレーションより垂直分解能が大きく、FOV 下部ほど実測の方がシミュレーションより垂直分解能が小さい傾向が見られた。

Short-LiDAR と同様な傾向が Medium-LiDAR においても確認されていることから、Medium-LiDAR の垂直解像度の実測とシミュレーションの差分が大きい理由も実機の MEMS ミラー駆動が影響していると考えられる。



出所：パイオニアスマートセンシングイノベーションズ（株）

Figure 313　垂直解像度及び水平解像度のシミュレーションと実測の差分のヒストグラム（Medium-LiDAR）



出所：パイオニアスマートセンシングイノベーションズ（株）

Figure 314　垂直解像度及び水平解像度のシミュレーションと実測の差分のヒートマップ（Medium-LiDAR）

B)-2　Medium-LiDAR 知覚モデルの一致性評価

ア）　検証方法

Medium-LiDAR 知覚モデルの一致性検証では、本来 LiDAR 実機から出力されない A/D Converter 後の受信波形と RX モデル出力波形の一致性を評価する。理由は環境光などの外乱光が直接的に影響を及ぼす波形の一致性を見ることで不一致の要因分析がし易いためである。波形出力を用いて LiDAR からターゲットま

での距離とその受信強度を検出する測距手法はデジタル回路で実装されているため、その入力（デジタル波形）がモデルと実機で一致していればその出力（検出された点の距離と受信強度）は必ず一致する。

上記で波形レベルでの差異を把握した上で、点群レベルの距離、強度及び測距限界の一致性を評価する。Medium-LiDAR の一致性検証における評価パラメータ、評価指標は Table 96 の通りである。

Table 96 PSSI-LiDAR 知覚モデル一致性検証の評価パラメータと評価指標

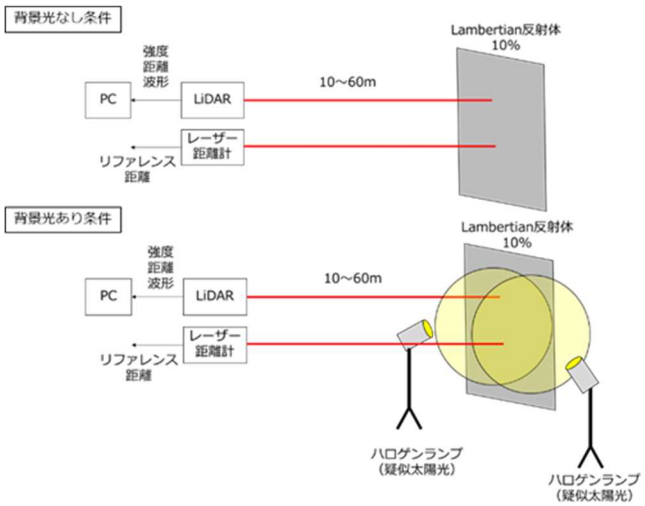
評価パラメータ	評価指標
■受信信号波形の強度分布	■形状・反射特性が既知であるターゲットの各距離における受信波形の信号の強度分布、平均、分散の一致性
■受信ノイズ波形の強度分布	■形状・反射特性が既知であるターゲットの各距離における受信波形のノイズの強度分布、平均、分散の一致性
■距離 ■強度	■形状・反射特性が既知であるターゲットの各距離における点群の測距距離及び強度の平均、分散の一致性
■遠距離測距限界	■形状、反射特性が既知であるターゲットの各距離における検出確率の一致性

出所：パイオニアスマートセンシングイノベーションズ（株）

本評価では、一致性の評価パラメータとして A/D Converter 後の受信波形、LiDAR 出力の距離、強度を用いる。環境に起因する誤差と位置・姿勢誤差をできるだけ排除するために、LiDAR 実機による測定は実験室内で評価を行った。

ターゲットは反射特性、形状が既知である Lambertian 反射特性を持つ平面を用いた。背景光あり条件を実験室内で再現するため疑似太陽光としてハロゲンランプをターゲットに一様にあたるように配置した。背景光パワーは日中の太陽光パワーを光パワーメータで測定し、その測定パワーと同等な値となるようにハロゲンランプを調整した。背景光あり・なしの評価環境を Figure 315 に示す。

検証方法は、LiDAR と Lambertian 反射体間の距離を変えて、受信波形・距離・強度を計測し、受信波形の RX モデル出力との一致性、及び距離・強度の測距モデル出力との一致性を検証した。1 分間の測定のうちターゲット中心の 1 点に対して、レーザー距離計によって測定したリファレンス距離から規定の距離の間で検出された点を評価対象として、各距離における点群の測距及び強度の精度と確度の一致性を評価した。遠距離測距限界については、ターゲット中心の 1 点に対して 1 分間の総点数とレーザー距離計によって測定したリファレンス距離から規定の距離の間で検出された点の個数の比によって算出し、その算出結果を検出確率として一致性を検証した。



出所：パイオニアスマートセンシングイノベーションズ（株）

Figure 315　PSSI-LiDAR 知覚モデルの一致性検証における評価環境

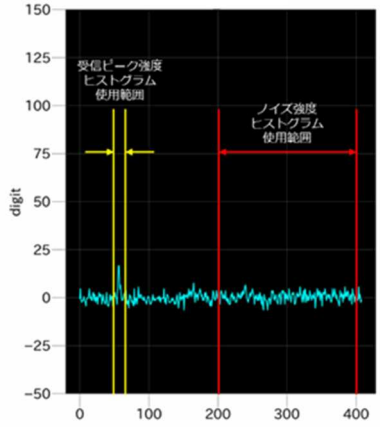
イ） 検証結果

■ RX モデル出力（波形）評価

本検証では実測波形と 2 つの RX モデルの出力波形の一致性を評価した。理由は RX モデル内の Photoelectronic Converter 部分でモデリングしている雑音モデルでは、背景光がある場合と、ない場合で異なるためである。

初めに背景光が受光素子に入ることによる影響を評価した。受光素子に入るショット雑音は、受光した光子数が少ない場合（背景光がない場合）、平均値を中心とする分布はポアソン分布になり、受光した光子数が多くなると（背景光がある場合）正規分布に近付いていく。背景光の影響評価として、受光素子に入るショット雑音モデルをポアゾン分布及び正規分布で近似する 2 つのモデルを評価した。両モデルの特徴としては、フォトン 1 つ 1 つの入力に対する影響をポアソン分布で近似するモデリングは実測により近い性質を持つ反面演算量が多いといった課題がある。一方、ショット雑音全体を正規分布で近似するモデリングは、受光素子に入るフォトンの数が多い場合、実測に近づき更に演算量も軽量であるといった特長がある。本検証では演算量の観点も考慮しつつショット雑音モデルの違いによる受信波形の影響も評価した。

RX モデルによって出力された受信波形の一例を Figure 316 に示す。実測、モデル共にノイズの強度分布はターゲットからの受信信号の影響を受けない範囲を使用した（赤の範囲）。受信信号ピークの強度分布はリファレンス距離から規定の距離の間で最大となるピークを使用した。



出所：パイオニアスマートセンシングイノベーションズ（株）

Figure 316　RX モデルから出力した受信波形（背景光なし）

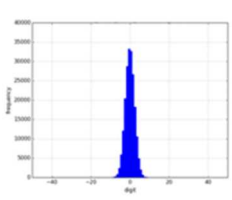
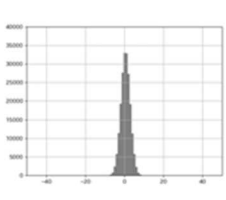
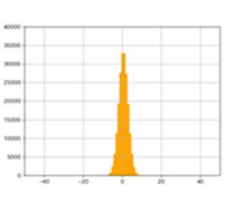
＜背景光なし＞

背景光がない条件の A/D Converter 後の受信波形の一致性については、ターゲットからの信号ピークの強度分布、ノイズの強度分布を評価し、ともに概ね一致することを確認した。また正規分布モデル、ポアソン分布モデルによる大きな差も見られなかった。

ノイズの強度分布ヒストグラムを Figure 317 に示す（n=200000、ビン幅=1digit）。ヒストグラムから実測、モデル共に 0digit をピークとして正規分布に近い強度分布となった。ノイズ強度の平均は実測、モデル共に 0digit 近傍となり誤差も僅少である。ノイズ強度の標準偏差についても実測と正規分布及びポアソン分布モデルの十分な一致性を確認した。

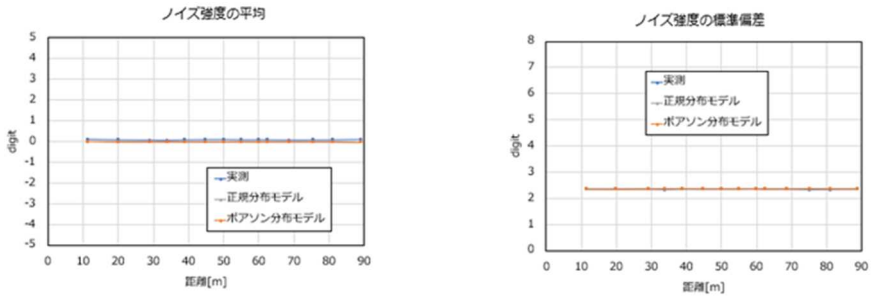
ノイズの強度分布の一致性は、遠方のターゲットの検出確率に影響を与える。理由としては、遠方のターゲットほど受光信号が小さくノイズに埋もれる確率が高くなり、ノイズの影響が無視できなくなるためである。

ターゲットまでの距離を変えた場合のノイズ強度の平均と標準偏差を Figure 318 に示す。受信光を含まないノイズ部分のみの強度の平均と標準偏差であるためターゲットの距離に関係なく一定であることが確認された。

評価対象	実測	正規分布モデル	ポアソン分布モデル
評価データ数	200000	200000	200000
ビン幅	1digit	1digit	1digit
ノイズの強度分布 ヒストグラム			

出所：パイオニアスマートセンシングイノベーションズ（株）

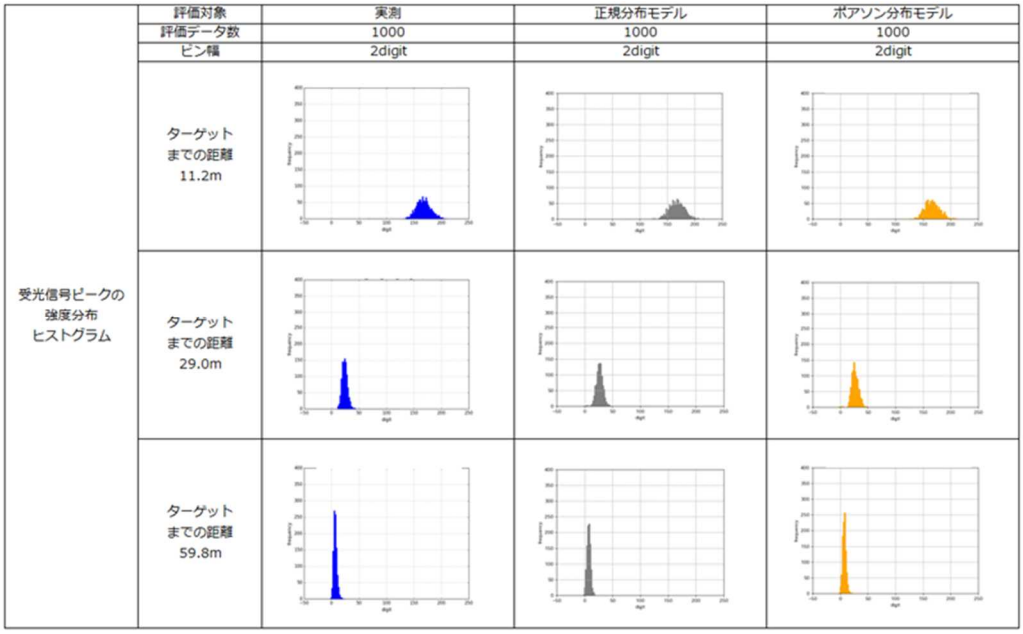
Figure 317　ノイズの強度分布ヒストグラム



出所：パイオニアスマートセンシングイノベーションズ（株）

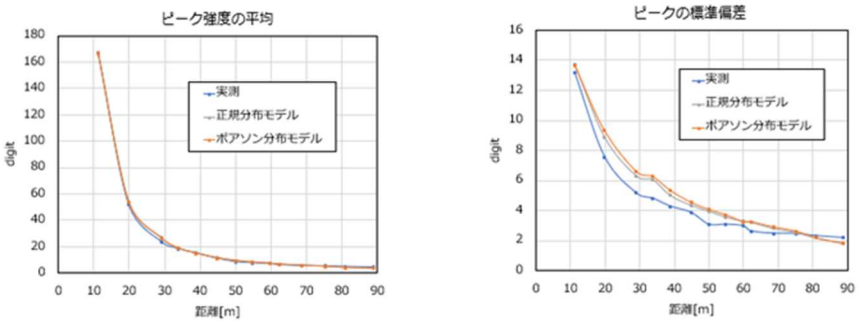
Figure 318　距離によるノイズ強度の平均と標準偏差

複数距離にて計測したピークの強度分布ヒストグラムの一部を Figure 319 に示す（n=1000、ビン幅=2 digit）。ターゲットまでの距離を変えた場合の距離による受信信号波形強度の平均と標準偏差を Figure 320 に示す。ヒストグラムから実測とモデルに顕著な差は見られなかった。ピーク強度の平均結果から十分な一致性が確認された。ピーク強度の標準偏差については近距離では両モデルに対して実測における偏差が小さい傾向があるが、最大でも 1.5 digit 程度であるため知覚モデル出力への影響は少ないと考えられる。



出所：パイオニアスマートセンシングイノベーションズ（株）

Figure 319　受信信号波形ピークの強度分布ヒストグラム
（左：実測　中央：正規分布モデル　右：ポアソン分布モデル）



出所：パイオニアスマートセンシングイノベーションズ（株）

Figure 320　距離による受信信号波形強度の平均と標準偏差

＜背景光あり＞

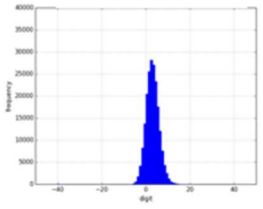
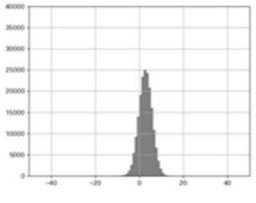
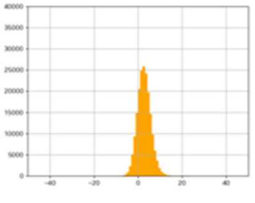
背景光あり条件における RX モデル後の受信波形の一致性については、ターゲットからの信号ピークの強度分布、ノイズの強度分布については概ね一致性が確認できた。

Figure 321 にノイズの強度分布ヒストグラムを示す（n=200000、ビン幅=1digit）。Figure 322 各測定距離におけるノイズの強度の平均、標準偏差を示す。

ノイズの強度分布ヒストグラムにおいて実測とポアソン分布モデルは、高強度側に多少分散が大きくなる傾向を確認した。正規分布モデルにおいては、高強度側への分散が小さいことを確認した。このノイズ強度の分散差は遠方で受信信号ピーク強度が小さくなった際の検出確率に影響すると考えられる。検出確率評価については後述する。

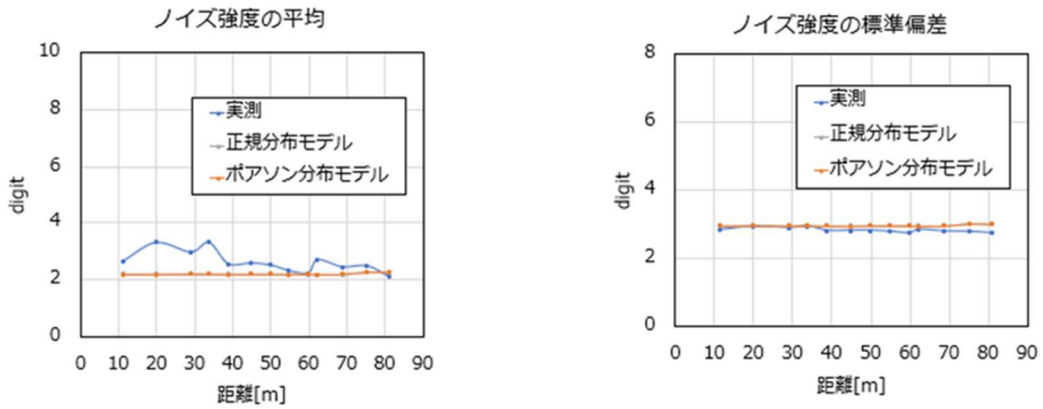
ノイズ強度の平均は実測値においてターゲットまでの距離が長くなるにつれてノイズ強度が多少小さくなる傾向を確認した。これは、今回ハロゲンランプを使ってターゲットに当たる疑似太陽光を再現したが、遠方になるにつれターゲットに対する瞬時視野角が大きくなり、ハロゲン光の当て方にムラが出てしまったことによるものだと推測する。

一方、両モデルでは常にターゲットに対して一様に太陽光が当たるためノイズ強度の平均が距離によらず一様となり傾向に差が出たものと考える。標準偏差においても同様な傾向が確認された。

評価対象	実測	正規分布モデル	ポアソン分布モデル
評価データ数	200000	200000	200000
ビン幅	1digit	1digit	1digit
ノイズの強度分布ヒストグラム			

出所：パイオニアスマートセンシングイノベーションズ（株）

Figure 321　ノイズの強度分布ヒストグラム

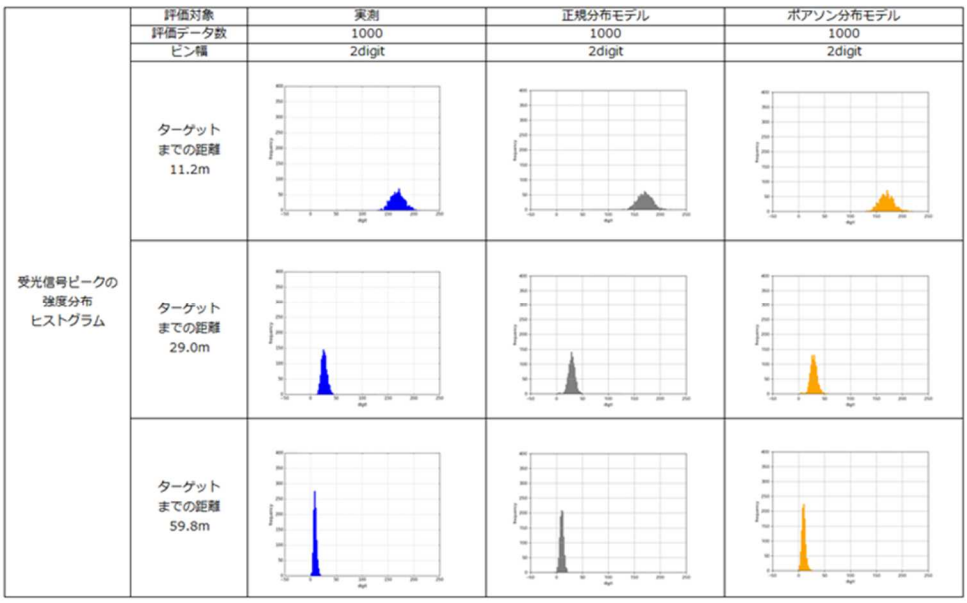


出所：パイオニアスマートセンシングイノベーションズ（株）

Figure 322　距離に対するノイズ強度の平均と標準偏差

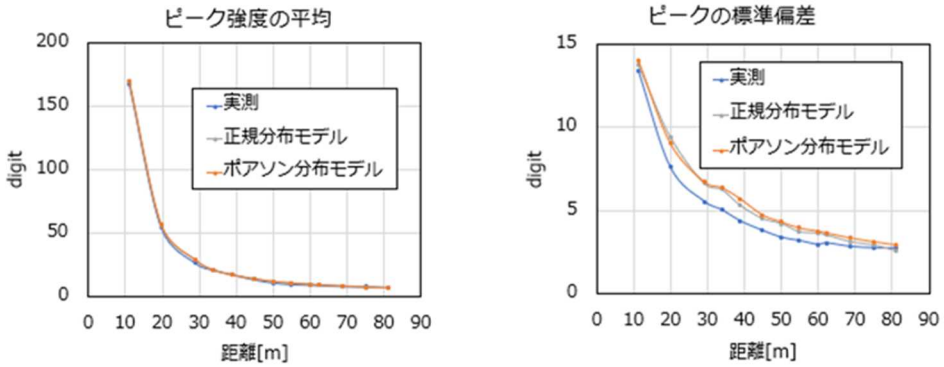
受信強度波形ピークの強度分布ヒストグラムの一部（n=1000、ビン幅=2digit）を Figure 323 に示す。各測定距離における受信信号波形ピーク強度の平均、標準偏差を Figure 324 に示す。

受信信号ピークの強度分布ヒストグラムから実測とポアソン分布モデルは高強度側に多少分散が大きくなるという同様な傾向が確認できた。正規分布モデルにおいては、高強度側への分散が小さいことが確認できた。グラフから受信信号ピーク強度の平均は一定の一致性が確認された。また、受信信号ピーク強度の標準偏差は正規分布モデル、ポアソン分布モデルともに実測よりも全距離で多少大きい結果となった。



出所：パイオニアスマートセンシングイノベーションズ（株）

Figure 323　受信信号波形ピークの強度分布ヒストグラム
（左：実測　中央：正規分布モデル　右：ポアソン分布モデル）



出所：パイオニアスマートセンシングイノベーションズ（株）

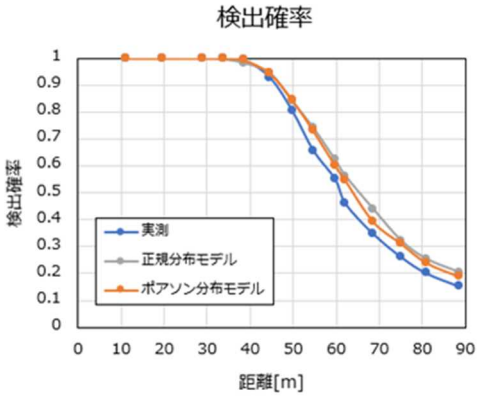
Figure 324　距離に対する受信信号波形ピーク強度の平均と標準偏差

■　測距モデル出力（点群）評価

✓　検出確率

＜背景光なし＞

背景光なし条件における検出確率グラフを Figure 325 に示す。背景光がない場合の測距限界の一致性は、検出確率 50%となる距離を 1 つの指標とすると、実測とモデルの距離の差は 1 割以下となっており十分な一致性が確認された。ショット雑音モデルの違いによる差も検出確率 50%となる距離ではどちらも実測との距離の差が 1 割以下となった。このことから背景光なしの条件下においてはシミュレーション時間短縮のため正規分布モデルを使用することによる顕著な影響がないと判断した。

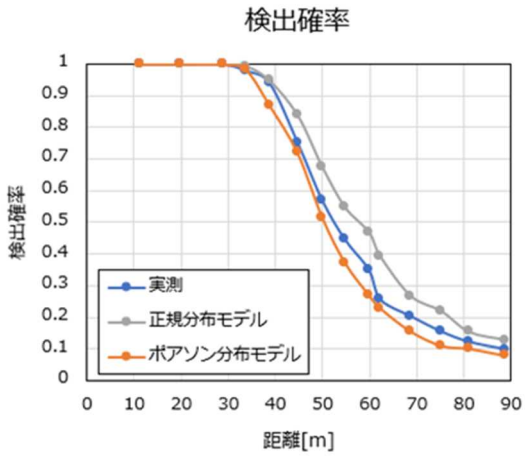


出所：パイオニアスマートセンシングイノベーションズ（株）

Figure 325　背景光なし条件における検出確率

＜背景光あり＞

背景光あり条件における検出確率グラフを Figure 326 に示す。前述の背景光あり条件における波形を用いて測距限界を評価した。ポアソン分布モデルと実測の検出確率は高い一致性を確認した。



出所：パイオニアスマートセンシングイノベーションズ（株）

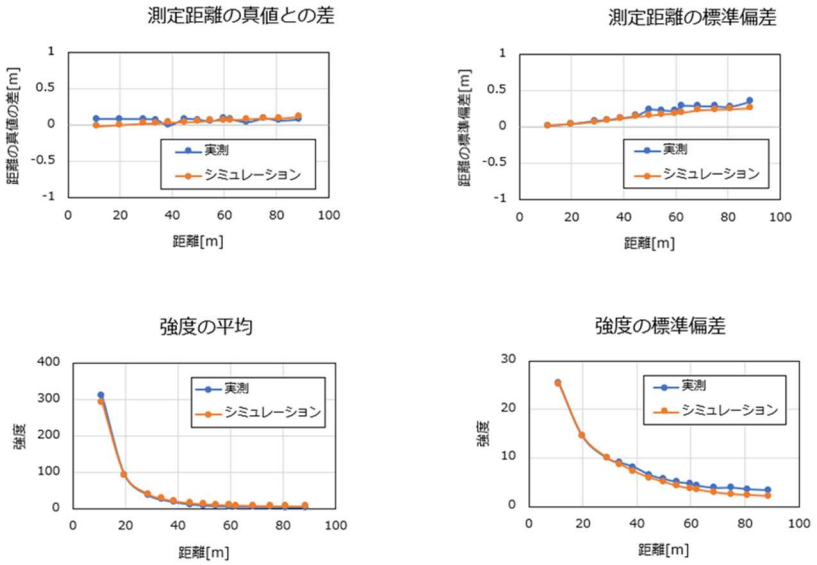
Figure 326　背景光あり条件における検出確率

✓距離・強度

＜背景光なし＞

点群レベルでの距離・強度の一致性を評価した。評価に用いたRXモデルのショット雑音は正規分布モデルを使用した。

背景光がない状況における距離・強度の精度と確度を Figure 327 に示す。測定距離の一致性は、各距離における精度、確度ともに誤差が 10 ㎝以下と僅少であることが確認された。強度の平均は全測定距離において十分な一致性を確認した。強度の標準偏差は測定距離 40m 以上でモデルが僅かに下方にオフセットしている結果となったが、十分な一致性があると考える。



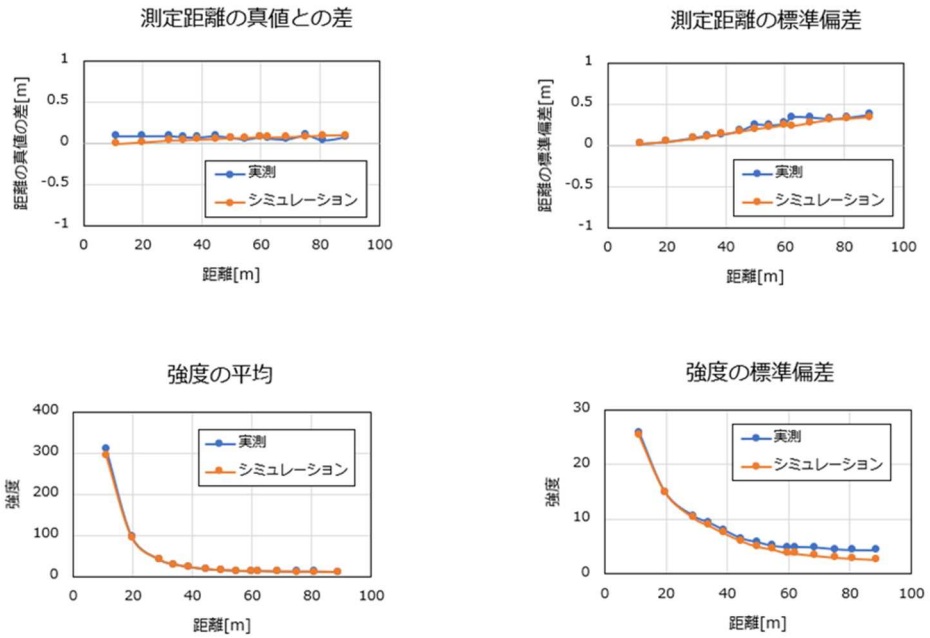
出所：パイオニアスマートセンシングイノベーションズ（株）

Figure 327　距離・強度の精度と確度

＜背景光あり＞

点群レベルでの距離・強度の一致性を評価した。評価に用いるRXモデルのショット雑音は正規分布モデルを使用した。

背景光ありの影響下における各距離での距離・強度の精度及び確度のグラフをFigure 328に示す。測定距離の一致性は、各距離における精度、確度ともに誤差が10㎝以下と僅少であることが確認された。強度の一致性についても、平均、標準偏差ともに十分な一致性があると考える。



出所：パイオニアスマートセンシングイノベーションズ（株）

Figure 328　距離・強度の精度と確度

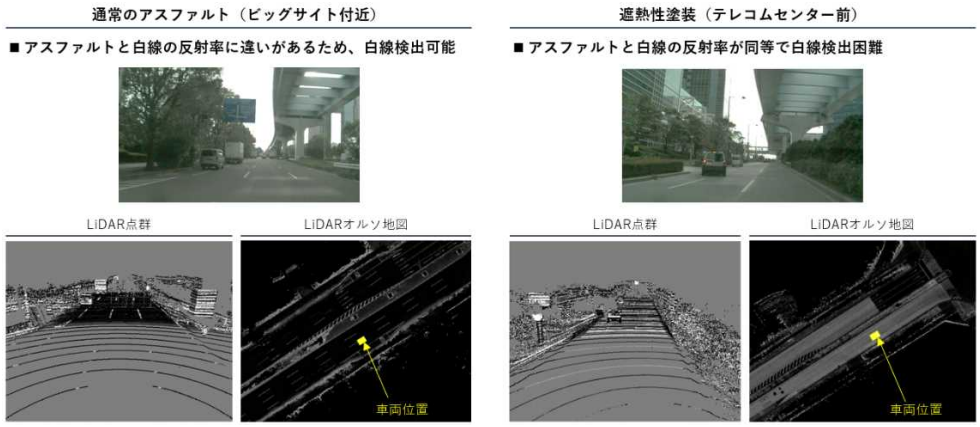
B.　LiDAR における不調環境事象の評価

A)　高反射路面の不調評価

A)-1　高反射路面の与える不調影響

DIVP®ではセンサ不調の拡張性評価を行うための素材収集を目的として 2 つの実証実験エリア（お台場、首都高速 C1）におけるデータ取得を実施した。その中で LiDAR に関わる不調の一つとして挙げられるのが遮熱性塗装を施した道路面である。通常の路面ではアスファルト部分と白線部分との反射率が異なり、LiDAR で取得した点群データの強度値を閾値処理することで路面と白線を容易に分離可能である。しかし遮熱性塗装を施した路面はアスファルト部分の反射率が高く路面と白線を分離しづらいため、白線検出が困難になる。通常アスファルト路面と遮熱性塗装路面の LiDAR 点群の例を Figure 329 に示す。

遮熱性塗装路面の不調現象のシミュレーションによる再現と、高反射路面と白線の分離に関する一致性検証について述べる。

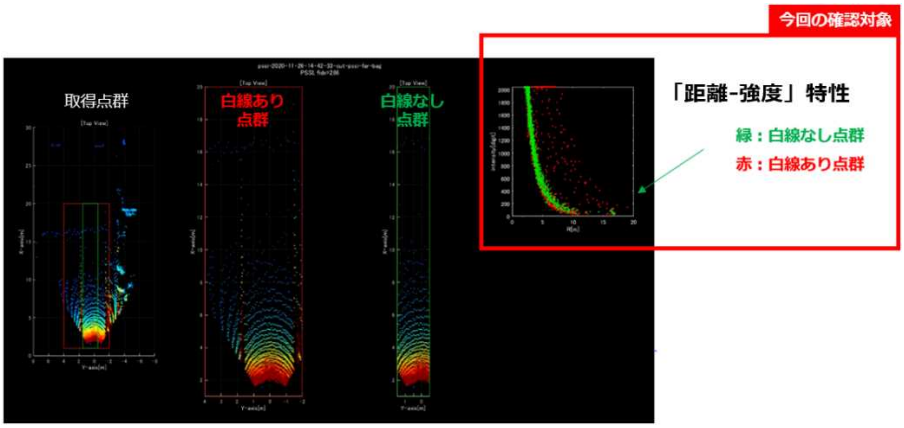


出所：金沢大学、SIP 第 2 期　自動運転（システムとサービスの拡張）
「自動運転技術（レベル 3、4）に必要な認識技術等に関する研究」計測データよりパイオニアスマートセンシングイノベーションズ（株）作成

Figure 329　通常アスファルト路面と遮熱性塗装路面

A)-2　検証で使用する LiDAR の選定

検証で使用する LiDAR の選択について述べる。候補となる LiDAR は VLS128、VLP16、および PSSI LiDAR の 3 機種である。各 LiDAR で取得した点群をオルソ視点で表示し、白線を含む路面領域、白線を含まない路面領域を手動で設定して横軸を距離、縦軸を強度とした特性を確認した（Figure 330）。距離−強度の特性図では、赤が白線を含む路面点群、緑が白線を含まない路面点群を示している。



出所：パイオニアスマートセンシングイノベーションズ（株）

Figure 330 白線を含む路面領域と含まない路面領域の設定、および距離- 強度特性

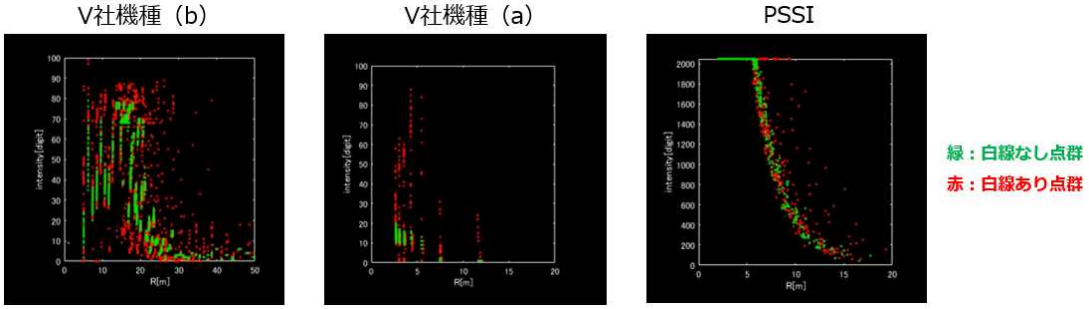
各 LiDAR の路面点群の距離- 強度特性を Figure 331 に示す。これらは各 LiDAR の 1 フレームの取得データから抽出したものである。各 LiDAR の路面点群の距離-強度特性評価から以下の結果が得られた。

・V 社機種（b）： 距離方向のポイント数は多いが、距離に対する路面の強度が大きく変動している

・V 社機種（a）： 距離方向のポイント数が少なく、また距離に対する路面の強度が変動している

・PSSI LiDAR： 距離方向のポイント数が多く、距離に対する強度の変動が少ない

これらの結果より、本検証には距離と強度の関係を捉えやすい PSSI LiDAR を選択（選定）した。

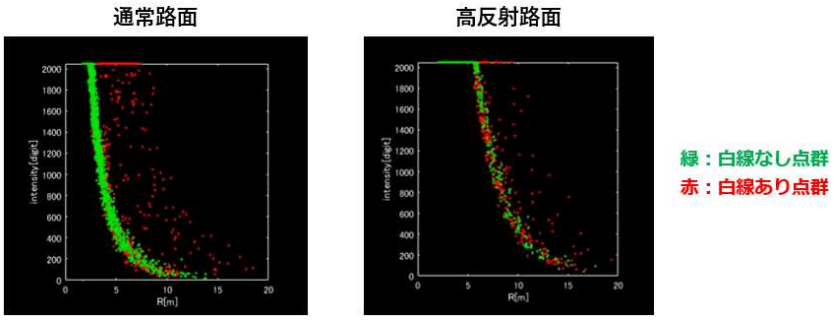


出所：パイオニアスマートセンシングイノベーションズ（株）

Figure 331 各 LiDAR の「距離-強度特性」

A)-3 通常路面/高反射路面点群の定性評価

PSSI LiDAR で取得した通常路面と高反射路面の点群データを比較した結果を Figure 332 に示す。緑が白線を含まない路面点群、赤が白線を含む路面点群である。



出所：パイオニアスマートセンシングイノベーションズ（株）

Figure 332 通常路面と高反射路面の「距離-強度特性」

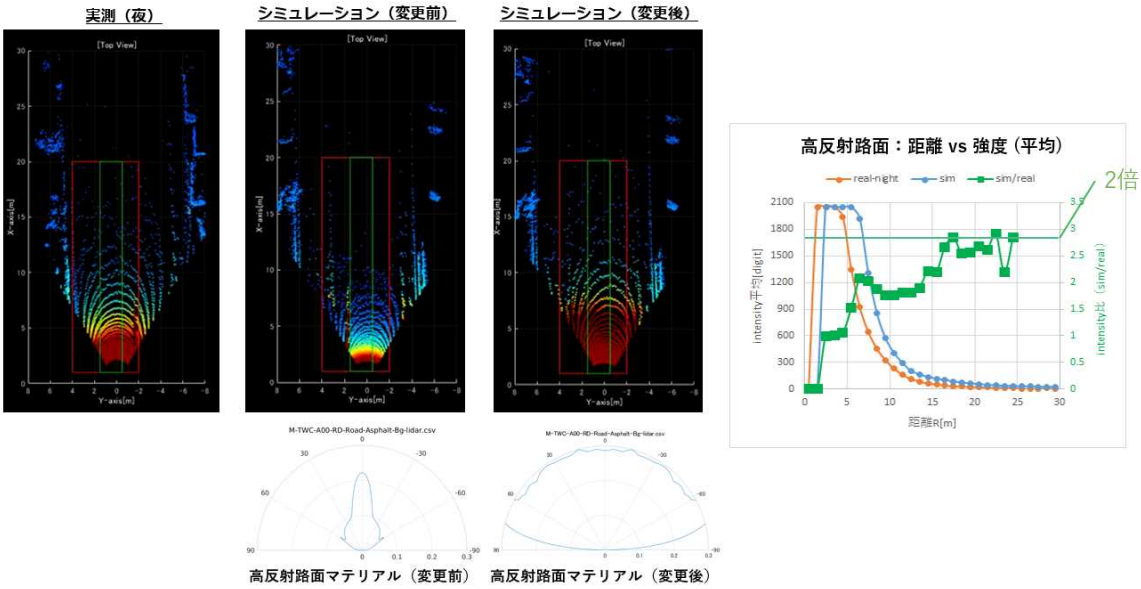
通常路面と高反射路面の白線を含まない路面点群（緑）を比較すると、高反射路面の強度は通常路面に比べてかなり高い値であることが分かった。またどちらの路面も距離ごとの強度の分散はある程度小さいことが確認できた。

白線を含む路面点群（赤）を比較すると、高反射路面の白線は通常路面の白線より強度の値が高く、またどちらの路面も距離ごとの強度の分散が大きい結果となった。

路面と白線の点群データを比較すると、通常路面、高反射路面ともに白線は路面より強度の平均が高く、分散も大きい傾向がある。後述するが、この傾向を利用して路面点群と白線点群の分離を試みる。

A)-4 実測とシミュレーションにおける強度の比較

実測との一致性を確認するため、お台場の高反射路面エリアと同じ場所で路面点群のシミュレーションデータを作成した。結果はシミュレーションにおける路面の強度が実測よりかなり低い値を示した。そのため A パートを担当する会社に反射率の高いマテリアルへの変更を依頼した。高反射路面における実測とシミュレーションの点群、変更前後のマテリアルの反射特性、距離- 強度 (平均値)の結果を Figure 333 に示す。実測とシミュレーションの強度にはまだ 2 倍程度のずれはあるが、高反射路面の強度が高くなったことでマテリアルの変更前に比べ、実測とシミュレーション結果が近くなったことを確認した。



出所：パイオニアスマートセンシングイノベーションズ（株）

Figure 333 高反射路面における実測とシミュレーションの点群、変更前後のマテリアルの反射特性、距離-強度（平均値）：右

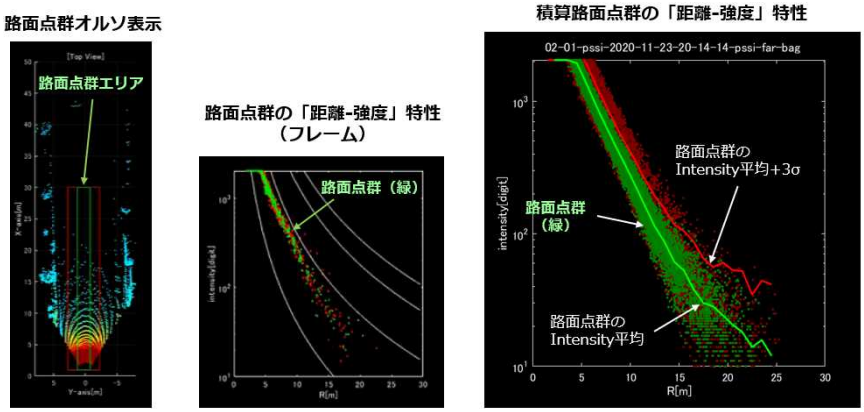
A)-5 路面点群と白線点群の分離処理

路面と白線を分離する強度閾値を決定する簡易的な手法を検討した。白線を含まない路面点群における距離ごとの強度の平均と標準偏差を用いた以下の手順で処理を行った（Figure 334）。

・点群をオルソ表示し、白線を含まない路面領域を手動で指定、各フレームでの路面点群を抽出する
・抽出したフレームごとの路面点群を積算（重畳）する
・積算した路面点群の強度の平均値、および標準偏差σから下式により分離閾値を決定する

［ 強度分離閾値 ］＝［強度平均値 ］＋ 3*σ

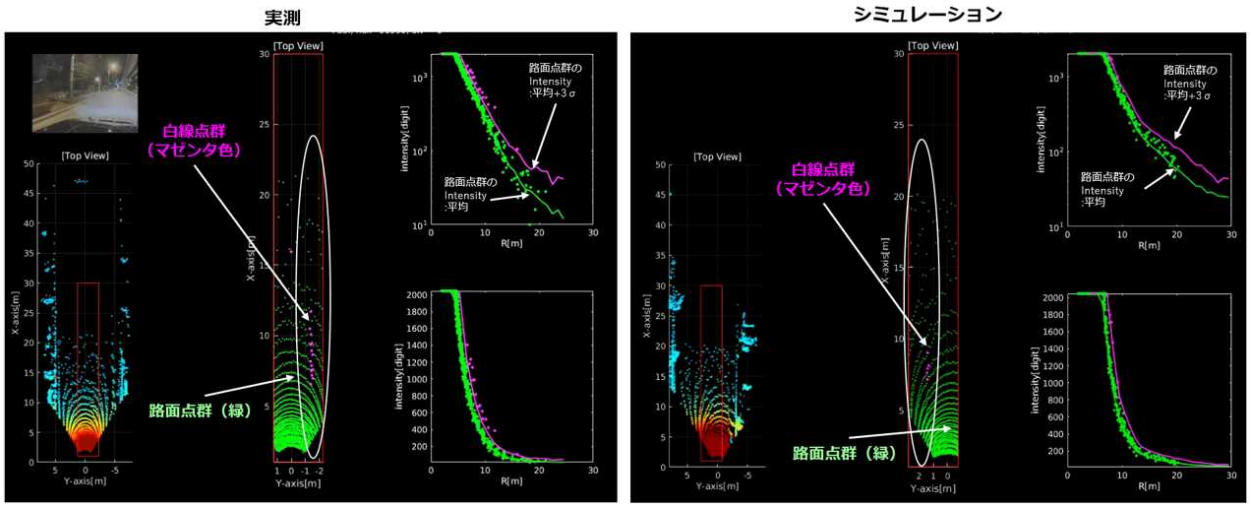
・白線を含む路面点群について分離閾値を用いて路面の点、白線の点として分離する



出所：パイオニアスマートセンシングイノベーションズ（株）

Figure 334 路面点群と白線点群の分離処理

高反射路面における路面点群と白線点群の分離結果を Figure 335 に示す。左が実測、右がシミュレーション結果である。実測及びシミュレーションともこの手法により路面と白線の点群を分離可能であることを確認した。シミュレーションの方が実測に比べて分離後の白線の点数が少ないことが確認された。この理由として、シミュレーションにおける白線点群と路面点群の強度の差が実測に比べると少ないことが想定される。



出所：パイオニアスマートセンシングイノベーションズ（株）

Figure 335 高反射路面での路面点群と白線点群の分離結果（実測：左、シミュレーション：右）

A)-6 高反射路面の一致性検証

検証の方針を以下に示す。

・高反射路面における強度の絶対値は使用しない。

・白線と路面との分離性に対して検証を行う。

・白線と路面の分離処理において、強度を利用する。

これらの方針に基づき、一致性検証の指標として以下を定義する

・強度比

LiDAR からの距離毎に白線点群の強度平均値および路面点群の強度平均値を算出

これらの強度平均値から下式で白線点群の強度比を算出

[強度比] ＝ [白線点群の強度平均値] / [路面点群の強度平均値]

・白線点数

LiDAR からの距離毎に白線点数をカウントして、1 フレーム当たりの点数を評価

一致性検証結果を Figure 336 に示す。白線の強度比については、実測に対してシミュレーションの方が 2 割程度小さい。白線点数については実測に対してシミュレーションの方が 1/10 とかなり少なくなった。これら評価結果から、一致性は確認できなかった。

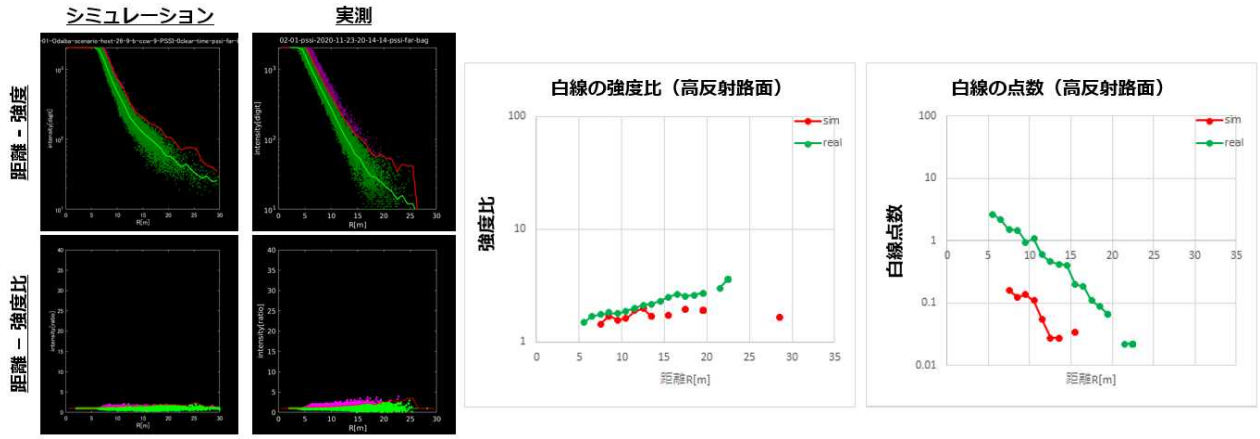
これらの評価結果となった理由を実測とシミュレーションとのデータ差及び距離-強度特性の観点で考察した。

データ差の観点において、シミュレーション環境での高反射路面および白線の反射率は現地の高反射路面素材を計測したデータではないため、実測とシミュレーションで強度の差異は発生する。反射率に差異があるため白線の強度比がシミュレーションの方が若干小さくなったと推測される。この強度差異が白線と路面の分離処理

に影響して点数が大きく変化している可能性がある。

また距離−強度特性の観点において、白線点群と路面点群の分離処理は、路面点群と白線点群の距離−強度特性が走行中に変化しないことを前提にしている。実際の走行とシミュレーション空間における走行に差がある場合（例えば路面から高さが変動するなど）、強度特性も変化する可能性があり、その変化が一致性検証に影響することが起こり得る。

高反射路面の一致性検証については、現時点で実際に使用されている路面素材の反射率データを入手できていない。よって再帰性反射材を用いた検証で代替することとする。



出所：パイオニアスマートセンシングイノベーションズ（株）

Figure 336 高反射路面の一致性検証結果（強度比、白線点数）

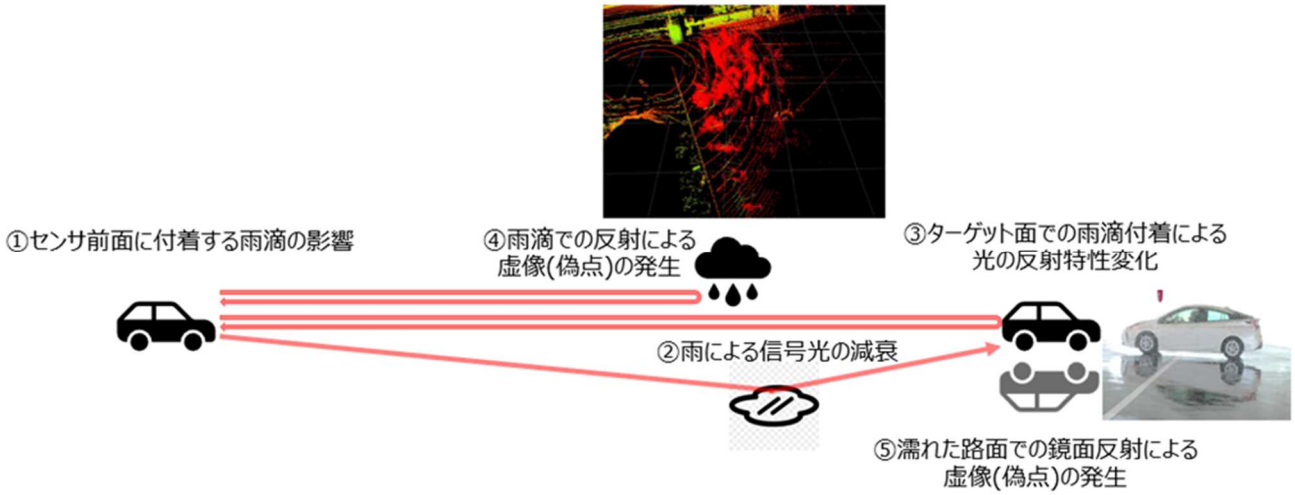
B） 雨による不調評価

B)-1 雨の LiDAR に与える影響

LiDAR における降雨による影響は以下①～⑤の 5 種類に大別されると考える（Figure 337）。

① センサ前面に付着する雨滴の影響
② 降雨による信号光の空間減衰
③ ターゲット面での雨滴付着による光の反射特性変化
④ 雨滴での反射による虚像（偽点）の発生
⑤ 濡れた路面での鏡面反射による虚像（偽点）の発生

本報告では②降雨による信号光の空間減衰の一致性検証と④雨滴での反射による虚像（偽点）の現象確認について報告する。



出所：パイオニアスマートセンシングイノベーションズ（株）

Figure 337　雨の LiDAR に与える影響

B)-2　降雨による信号光の空間減衰の一致性検証

令和 2 年度報告書にて降雨による信号光の空間減衰のモデル化について報告した。本報告では、同モデルを用いて一致性検証を行った。一致性検証として、評価環境にて取得した実測データを評価し、降雨量の違いで、実測とシミュレーションとの一致性検証を行った。

ア）評価条件・環境

一致性検証に用いる評価環境について述べる。実測は降雨条件（降水量）がコントロール可能な環境にて実施した。評価環境を Figure 338 に示す。

今回の評価環境では LiDAR 及びターゲット車両も降雨エリアの中に配置するため降雨減衰だけでなくセンサ前面の雨滴付着やターゲット面の雨滴付着による信号減衰の影響を受ける可能性がある。しかしながら現状、降雨不調評価のために取得しているデータに降雨による信号光の空間減衰のみの一致性評価を行えるものがないため、センサ前面及びターゲット面の雨滴付着による減衰の影響も含む評価環境にて検証を行った。

今回の評価環境にて降雨による空間減衰の一致性評価に適しているか実測のデータを用いて確認することとした。

出所：パイオニアスマートセンシングイノベーションズ（株）

Figure 338　降雨による信号光の空間減衰の一致性評価環境

＜降雨条件＞

・降雨量 0mm/h

・降雨量 50mm/h

・降雨量 80mm/h

＜測定条件＞

・LiDAR を搭載した計測車両とターゲット車両の白プリウスを 40m 程度離れた降雨エリア内に配置する。

・40m 程度離れた位置から計測車両が 1m/s 程度の速度でターゲット車両に近づいていく。

・実際の降雨量、粒径、粒速はディストロメータを使い計測する。

イ） 実測のデータの評価

ターゲット車両の距離による測距点数及び受光強度を評価指標として、実測の計測データ評価を行った。降水量 0mm/h、50mm/h、80mm/h のときのターゲット車両の距離による測距点数及び受光強度結果を Figure 339 に示す。

距離による測距点数は 10 フレームごとにターゲット車両を抽出した総点数を用いている。また、距離による受光強度は 10 フレームごとにターゲット車両を抽出した点群の受光強度の平均を用いている。

降雨による降雨減衰の影響を考えた時、粒径及び粒速が一定であれば降水量が増えるほど空間減衰の影響が大きくなるため、受光強度が小さくなったり測距点数が減少したりすることが想定される。しかしながら、実測評価では想定と反する結果が 2 点確認された。

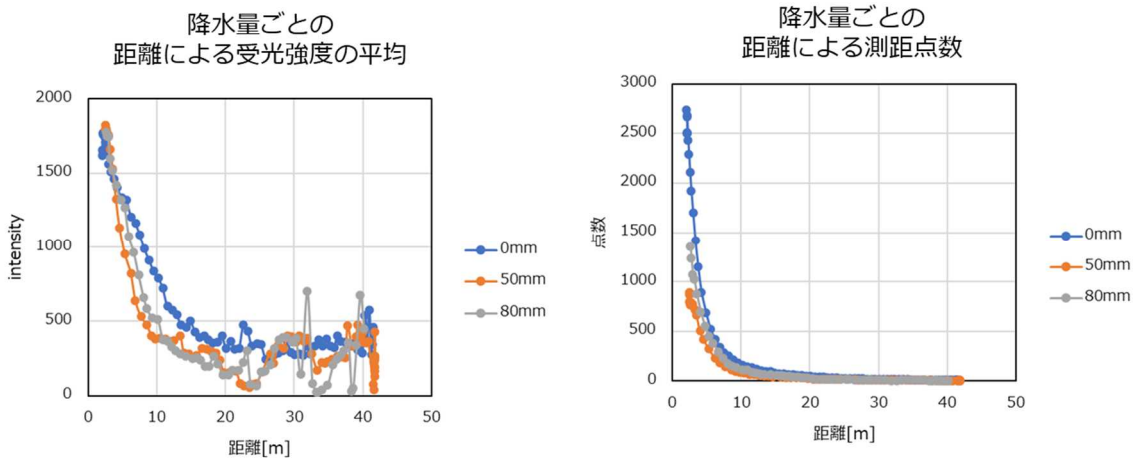
① 距離による受光強度から確認した結果

10m より近傍において降雨量 50mm の方が 80mm/h より受光強度が大きい

（10m 以降はターゲット車両リフレクターへの射出ビームの当たり方によって受光強度平均のばらつきが大きくなっているためここでは評価範囲としない。）

距離による測距点数から確認した結果

20m より近傍において降雨量 50mm/h の方が 80mm/h より測距点数が多い

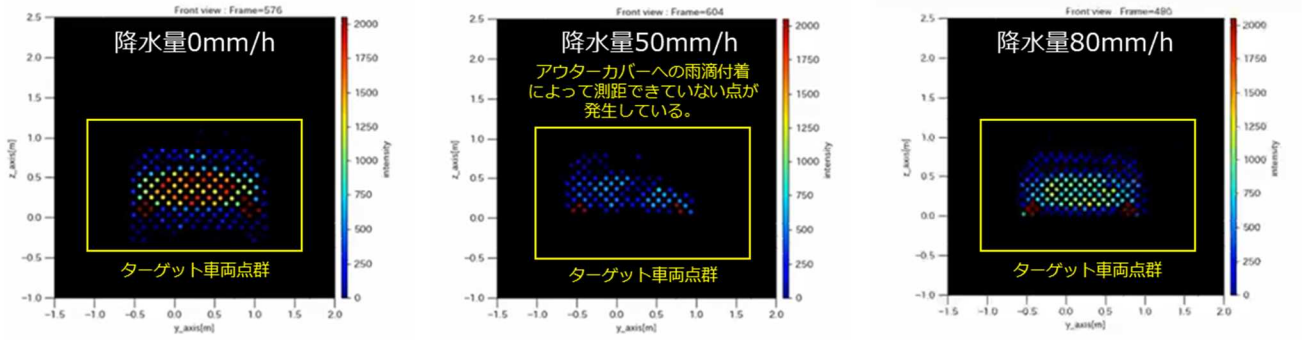


出所：パイオニアスマートセンシングイノベーションズ（株）

Figure 339 ターゲット車両の距離による受光強度平均と測距点数の結果
（降水量 0mm/h、50mm/h、80mm/h）

これら原因の考察として、ターゲット車両までの距離が 10m 付近のときの各降雨量での測距点を抽出した結果を Figure 340 に示す。画像は、LiDAR 正面のターゲット車両（背面）を表示しており、点群の色の違いは受光強度の違いを表している。

■10m付近の各降雨量の測距点



出所：パイオニアスマートセンシングイノベーションズ（株）

Figure 340　距離 10m での各降雨量（0mm/h、50mm/h、80mm/h）のターゲット車両の測距点を抽出した結果

降水量 0mm/h と比較して降水量 50mm/h、80mm/h の受信強度が低くなっているのは空間減衰の影響も表れていると考える。一方で降水量 50mm/h と 80mm/h の点群を比較すると、降水量 50mm/h の受光強度が低く、点群にも抜けが発生していることが確認できる。これはアウターカバーに雨滴が付着した部分を射出光及び受信光が通過して受信光量が減衰したことによるものと推測する。降水量 80mm/h よりも降水量 50mm/h の方がセンサ前面の雨滴付着量が多かったため空間減衰の影響だけを想定したときの受光強度と総点数に差異が生じたと考えられる。

以上の結果よりセンサ前面の雨滴付着による受光量減衰に与える影響は大きく、雨滴の付着量の多い 50mm/h のシナリオにおいて空間減衰の一致性を評価することは困難であると判断した。よってここではセンサ前面への雨滴付着の影響が比較的少ない 80mm/h のシナリオのみ評価することとする。

ウ） 一致性検証結果

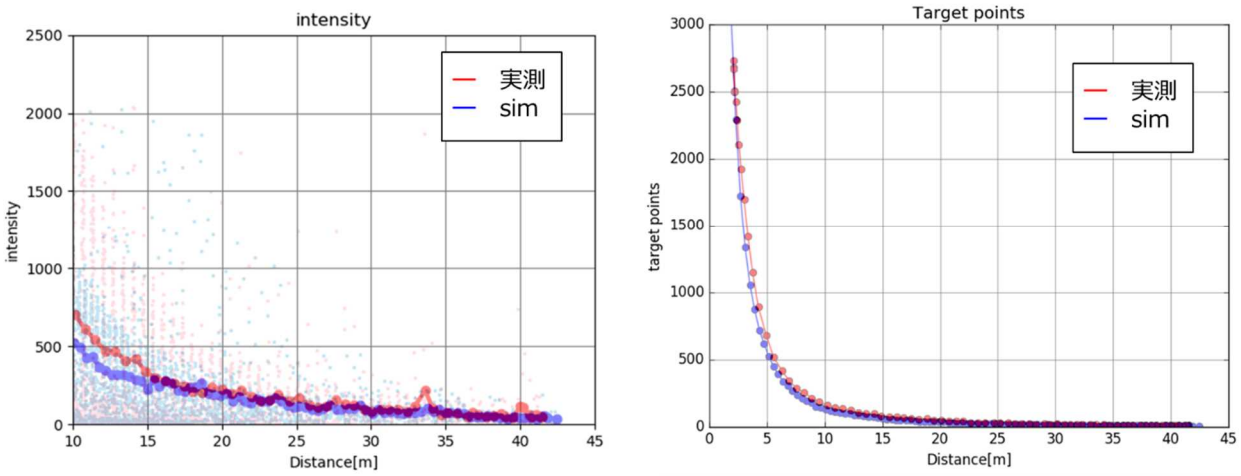
■ 降雨量 0mm/h の一致性検証

降雨量 0mm/h の時の距離によるターゲット車両の測距点数及び受光強度を評価した。

降雨量 0mm/h におけるターゲット車両の距離による測距点数と受光強度結果を Figure 341 に示す。現状のシミュレータでは高反射物体である車両のリフレクターの受光強度の一致性が低い。リフレクターの受光強度の差異に影響を受けないように受光強度の評価ではリフレクターを一致性評価の対象外とするため intensity：2047 の点は除去して評価した。また、10m より近傍になるとターゲット車両のリフレクター以外の部分も intensity：2047 となってしまうため受光強度の評価は 10m 以上の点を用いた。

測距点数は 10 フレームごとに抽出した点を用いている。測距点数は降雨量 0mm/h のとき検証距離範囲においても概ね一致することを確認した。

受光強度は、マーカーのみの点が 10 フレームごとに抽出したターゲット車両の全受光強度、実線がその平均を表している。受光強度も降雨量 0mm/h のとき検証距離範囲においてもほぼ一致していることを確認した。



出所：パイオニアスマートセンシングイノベーションズ（株）

Figure 341　降雨量 0mm/h のときの距離によるターゲット車両の測距点数及び受光強度

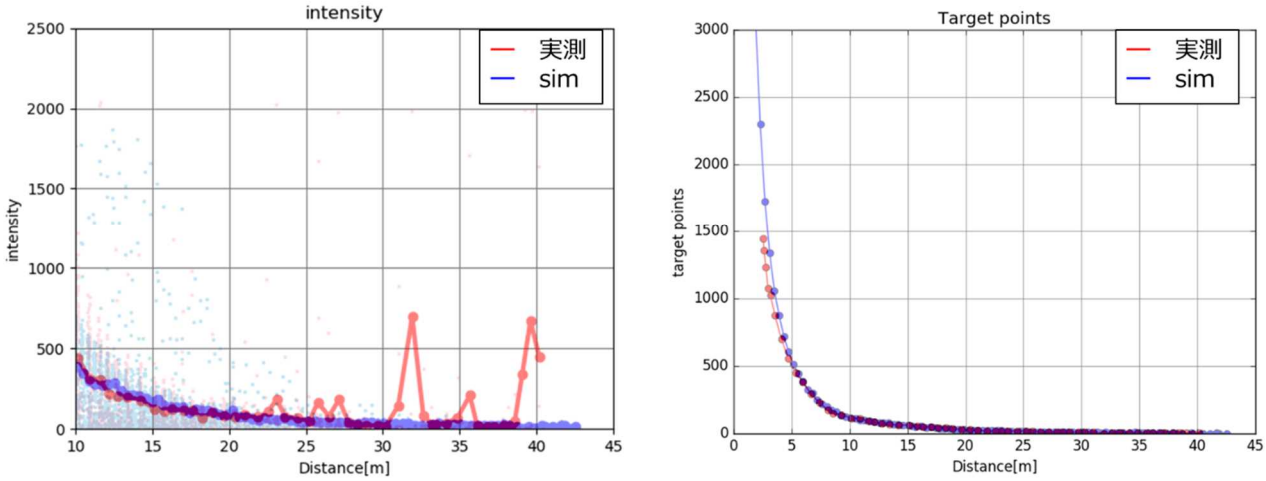
■降雨量 80mm/h の一致性検証

降雨量 0mm/h（リファレンス）の一致性を確認したため、次に降雨量 80mm/h の時の一致性を評価した。

降雨量 80mm/h におけるターゲット車両の距離による測距点数と受光強度を Figure 342 に示す。

測距点数は、降雨量 80mm/h 条件においても概ね一致することを確認した。

距離による受光強度は、30m より遠方において一致性が低い結果となった。その理由は、ターゲット車両のリフレクターの受光強度が雨による減衰で intensity2047 より低くなってしまったことによって高反射物体の強度の不一致影響が表れたものと考えられる。20m より近傍においては受光強度に高い一致性を得られていることから降雨による空間減衰モデルと本評価環境との一致性に大きな差異はないと判断する。

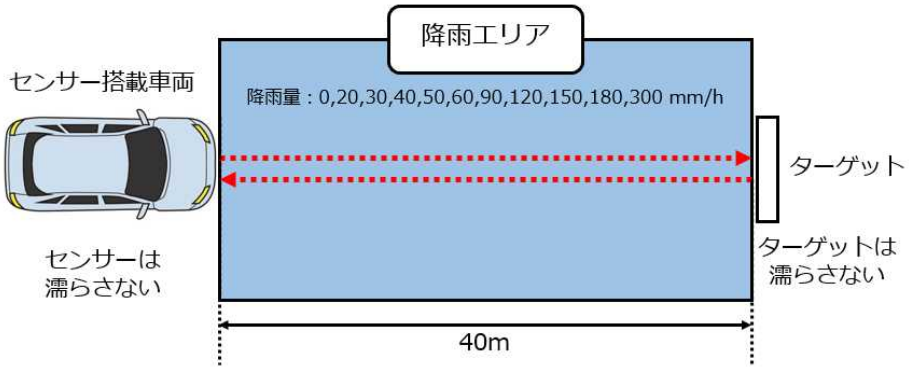


出所：パイオニアスマートセンシングイノベーションズ（株）

Figure 342　降雨量 80mm/h のときの距離によるターゲット車両の測距点数及び受光強度

B)-3 降雨による雨滴偽点の現象確認

雨滴が原因となる虚像(偽点)は、LiDAR からの射出光が雨滴にあたり雨滴表面及び雨滴内部で反射散乱した光を受光することで発生する。自動運転用途において雨滴は障害物ではないため、雨滴の検出は誤検出点である。雨滴による誤検出点が実測とシミュレーションの点群の一致性に影響しない程度に微小であれば検討の必要はない。



出所：パイオニアスマートセンシングイノベーションズ(株)

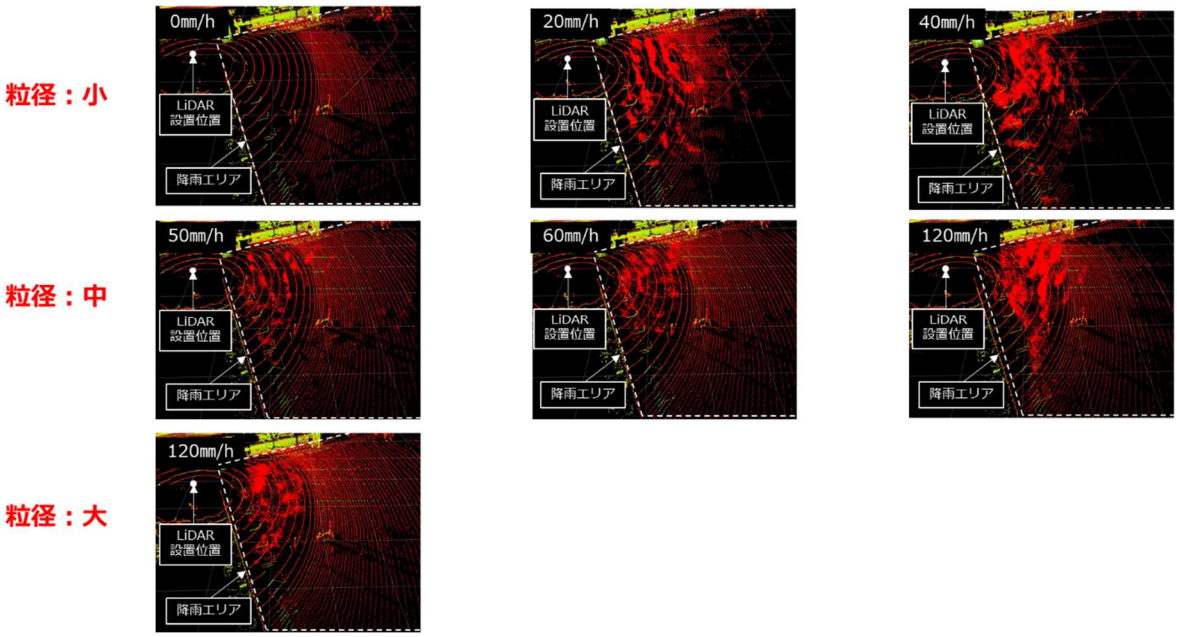
Figure 343 降雨による信号光の現象確認環境(大型降雨試験場)

＜降雨条件＞

- 降雨量 0mm/h (リファレンス)
- 降雨量 20、30、40mm/h (雨粒サイズ：小粒)
- 降雨量 50、60、90、120、150mm/h (雨粒サイズ：中粒)
- 降雨量 120、150mm/h (雨粒サイズ：大粒)
- 降雨量 180、300mm/h (雨粒サイズ：小粒＋大粒)

ここでは、降雨による空間減衰モデルの評価環境(Figure 343)と同じ環境で確認できた雨滴の反射による虚像(偽点)の現象について述べる。

V 社機種(b)における降雨ごとの雨滴の反射による虚像(偽点)現象を確認した点群を Figure 344 に示す。降雨量 0mm/h と比較して、降雨時に画像中央付近(降雨エリア内)に赤いもやのように発生している点が雨滴を検出した誤検出点である。V 社機種(b)での雨滴の検出範囲は約 7m～15m だった。また、粒径が小さく降水量が多い時ほど多く雨滴を検出する傾向を確認した。この傾向は V 社機種(b)だけでなく本報告書で示していないが PSSI-LiDAR でも同様な傾向を確認した。つまり LiDAR 機種(構成、性能)に依存するものではなく、降雨条件によって決まるパラメータでモデル化できると推定している。雨滴の反射による虚像(偽点)は誤検出点も多く、検出範囲も数 m と広い結果であった。故に雨滴の反射による虚像(偽点)は、実測とシミュレーションの点群への一致性の影響が大きいと判断した。雨滴の反射による虚像(偽点)のモデル化のため降雨と偽点の傾向を把握する。



出所：パイオニアスマートセンシングイノベーションズ（株）

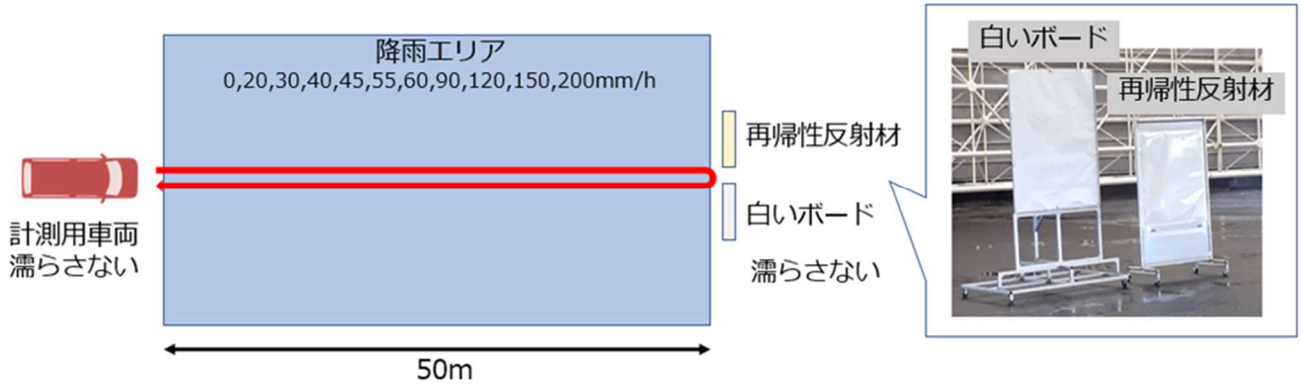
Figure 344　V 社機種(b)における降雨ごとの雨滴の反射による虚像（偽点）現象
（点群の色の違いは受光強度の大きさによる）

大型降雨試験場で取得したデータを以下3点に着目して分析し、おおよその降雨と偽点に関する傾向を把握した。

ア）偽点の発生頻度(発生率)に関する傾向
イ）偽点の発生位置(距離)に関する傾向
ウ）偽点の強度分布に関する傾向

実験内容は、50m 先にターゲットとして再帰性反射材を配置した場合、白いボードを配置した場合、ターゲット無の場合の 3 条件について、ターゲット以外の距離に発生する偽点を評価した。また、評価条件は、降水量を降雨なし～200mm/h まで段階的に変えるとともに、粒径サイズを変化させる条件とした。評価環境を Figure 345 に示す。

評価対象 LiDAR は PSSI LiDAR と V 社機種(b)である。



出所：パイオニアスマートセンシングイノベーションズ（株）

Figure 345　降雨による虚像（偽点）発生の評価環境

ア） 偽点の発生頻度(発生率)に関する傾向

Figure 346、Figure 347 は、降雨量と粒径を変化させた場合の偽点の発生率を示している。発生率 0 は偽点が全く発生しない状態であり、発生率 1 は全ての点群が偽点の状態である。

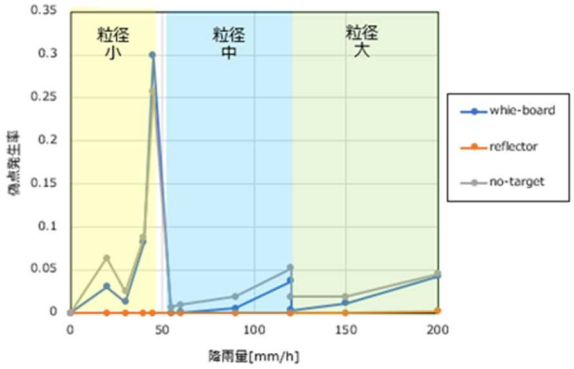
実験の結果、偽点の発生頻度(発生率)について以下の傾向を把握した。

・ターゲット有無、種類に大きく依存する（再帰性反射材の場合は偽点発生せず）

・LiDAR 機種により大きく異なる

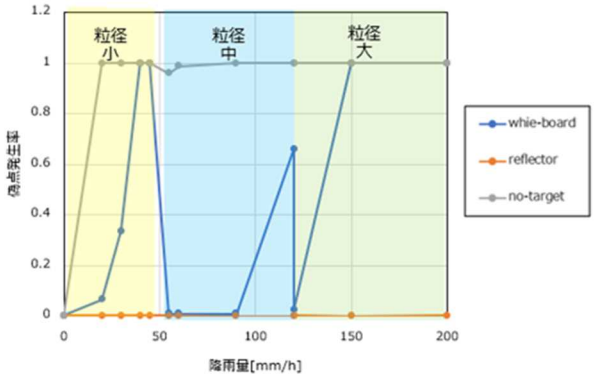
（ターゲット無、降雨量 20mm 以上では V 社　機種(b)では偽点発生率が 100%となる。）

・LiDAR 機種、ターゲット有無を問わず、降雨量が多く、粒径が小さいほど発生頻度が高い。



出所：パイオニアスマートセンシングイノベーションズ（株）

Figure 346　偽点の発生率（Short-LiDAR））



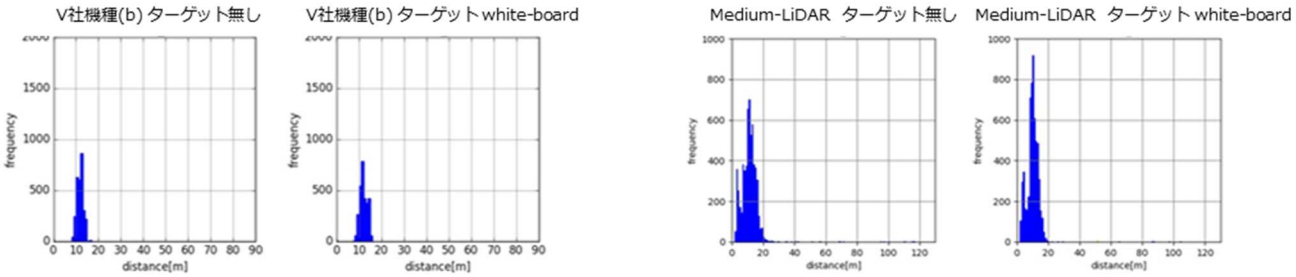
出所：パイオニアスマートセンシングイノベーションズ（株）

Figure 347　偽点の発生率（V 社機種（b））

イ） 偽点の発生位置(距離)に関する傾向

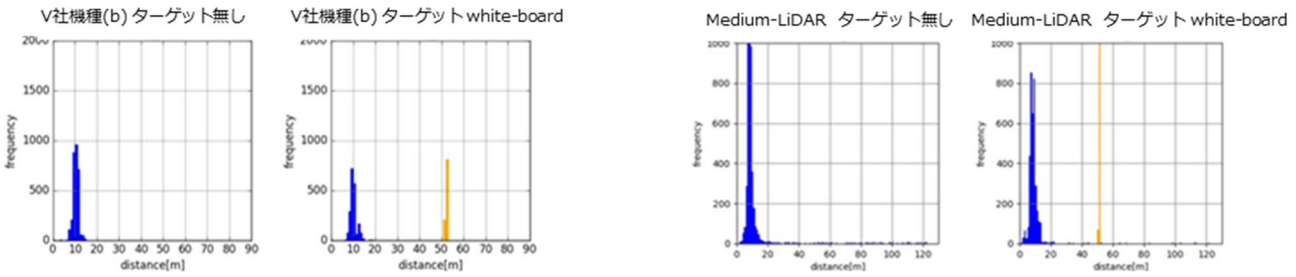
Figure 348、Figure 349 は、降雨による偽点がどの距離にどれだけ発生しているかを示す頻度分布である。青色が降雨による偽点、黄色はターゲットを検知した点群である。

降雨による偽点の発生位置は、ターゲットの有無、LiDAR 機種、降水量・粒径に依存せず、20m以内の距離に発生する事を確認した。（ただし、再帰性反射材の場合は偽点発生していない）



出所：パイオニアスマートセンシングイノベーションズ（株）

Figure 348　第 1 系統(粒径小)、降雨量 40mm での偽点距離分布



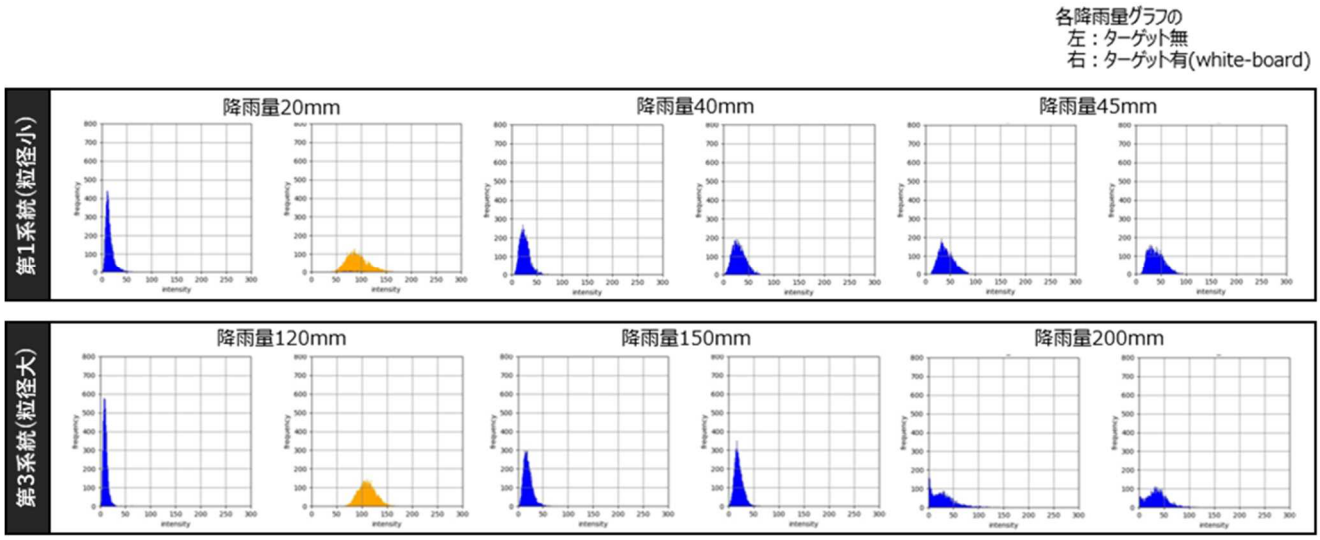
出所：パイオニアスマートセンシングイノベーションズ（株）

Figure 349　第 2 系統(粒径中)、降雨量 120mm での偽点距離分布

ウ） 偽点の強度分布に関する傾向

Medium-LiDAR での降雨量違いにおける偽点強度分布を Figure 350 に示す。粒径サイズは、第 1 系統と第 3 系統の 2 パターンであり、各粒径サイズで降雨量を 3 パターン示している。

粒径サイズに依存することなく、降雨量が多くなるほど、強度が高い方に分布が広がることを確認した。粒径小降雨量 45mmと粒径大降雨量 120mmを比較すると、45mmから 120mmと降雨量が多くなっているにもかかわらず、強度分布は左にシフトしている（強度が小さい）結果となった。この現象より粒径が大きくなるほど偽点の強度が小さいことがわかった。また、その傾向は、ターゲットの有無によって変わらない事、LiDAR 機種によって大きく変わらないことを確認した。



出所：パイオニアスマートセンシングイノベーションズ（株）

Figure 350　Medium-LiDAR での偽点強度分布

エ） 降雨と偽点に関する傾向まとめ

偽点の発生頻度（発生率）は、降雨量が多く、また粒径が小さいほど発生頻度が高いことを確認した。空間に含まれる雨滴の量(降雨量、粒径、粒速)と関係があると考える。

また、再帰性反射材がターゲットとしてある場合、偽点は発生せず、ターゲットのない場合は偽点の発生頻度が非常に高いことから、ターゲット(無し、white-board、再帰性反射材)で反射して戻る光量と雨滴で反射して戻る光量のバランスで、偽点の発生頻度が変化していると思われる。

C)　雪による不調現象確認

LiDAR における雪による影響は以下①～⑤の 5 種類に大別されると考える（Figure 351）。

①センサ前面に付着する雪の影響

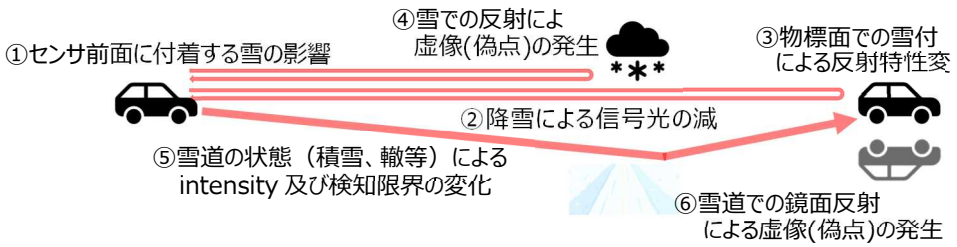
②降雪による信号光の減衰

③物標面での雪付着による反射特性変化

④雪での反射による虚像(偽点)の発生

⑤雪道の状態（積雪、轍等）による intensity 及び検知限界の変化

⑥雪道での鏡面反射による虚像(偽点)の発生



出所：パイオニアスマートセンシングイノベーションズ（株）

Figure 351　雪の LiDAR に与える影響

2021 年 2 月にエフティテクノ豊頃試験場にて雪道において LiDAR データを取得し、雪点群の intensity および検知限界及び雪による不調の有無を確認した。

C)-1　評価環境（計測条件）

計測条件を以下に記載する。

計測場所：試験路 3（平坦路）、試験路 44（ワインディング路）、試験路 7（登坂道路部分）の 3 コース（Figure 352）

- ◆ 試験路 3（平坦路）：通常路（積雪無）で離間・接近、雪道（積雪・轍）にて離間、接近で計測
- ◆ 試験路 4（ワインディング路）：雪道にて接近で計測
- ◆ 試験路 7（登坂道路部分）：雪道にてターゲット車両なしで計測

試験路3

試験路 4

試験路 7

出所：SOKEN, INC,　学校法人幾徳学園　神奈川工科大学

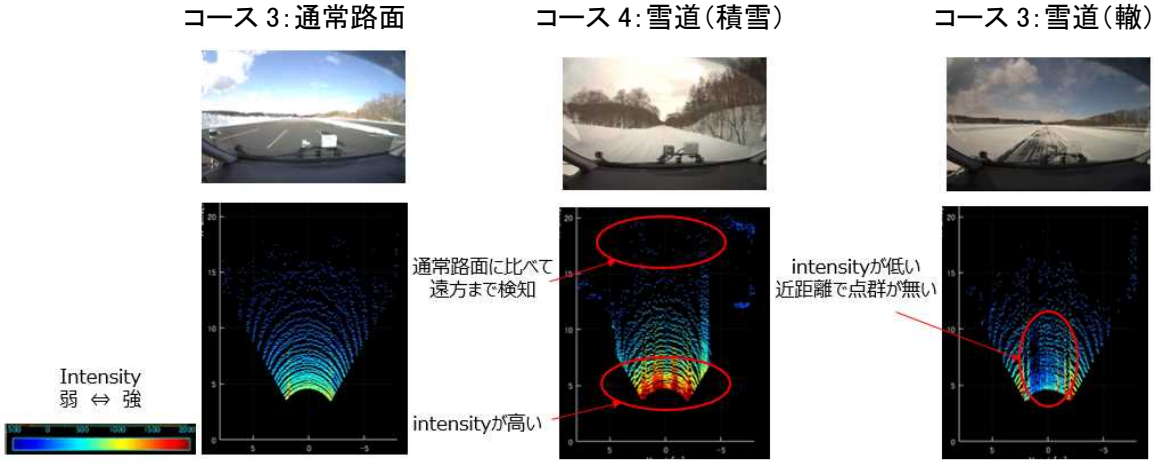
Figure 352　エフティテクノ豊頃試験場　試験路

- 計測 LiDAR および設置条件
  - ◆ PSSI-LiDAR 1st モデル short　type：車両ボンネットに設置し、全条件でデータ計測
  - ◆ V 社機種（b）：三脚に設置し、試験路 3 の離間のみで計測を実施

C)-2　路面の積雪による intensity 及び検知限界評価

通常路面（積雪無）、雪道（積雪有）、雪道（轍）における intensity 及び検知限界を比較評価した。

雪道では、通常路面に比べ、雪の intensity は高い。また通常路面に比べ若干遠方まで検知できている。一方、雪が無くなっている轍部は逆に intensity が低く、近距離で点群が検知できなくなっている。雪道では積雪有、轍など雪の状態により intensity および検知限界に大きな差異が見られることが分かった。（Figure 353）



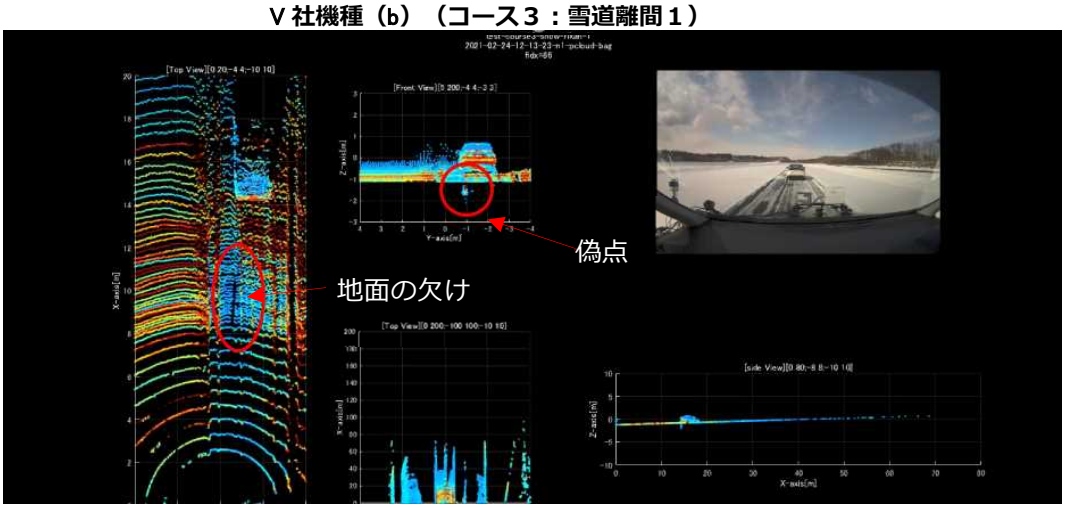
出所：パイオニアスマートセンシングイノベーションズ（株）、SOKEN, INC, 学校法人幾徳学園　神奈川工科大学

Figure 353　雪道での雪の状態による intensity 及び検知限界の差異

C)-3　路面の積雪による鏡面反射で生じる偽点

試験路 3 雪道（積雪有）での離間の計測の際、車両移動に伴い、地面点群が欠けて偽点に変わり、また更に移動すると再度地面点群が取得されるという事象が確認された（Figure 354）。

V 社機種（b）（コース３：雪道離間１）



出所：パイオニアスマートセンシングイノベーションズ（株）、SOKEN, INC, 学校法人幾徳学園　神奈川工科大学

Figure 354　雪道での鏡面反射と思われる偽点

上記事象が発生する要因としては、以下が推測される。

・LiDAR としては地面部および鏡面反射後の車両部の両方の信号を受光している。

・鏡面反射後の車両の信号の方が地面の信号に対して強度が高いため、偽点が発生している

・また、車両が移動し車両がなくなると地面部の信号の方が取得されている

以上の推測から、雪道の反射の再現のためには、マルチバウンス対応および反射体の鏡面反射成分、拡散反射成分の双方の特性をシミュレータに盛込むことが必要と考えられる。

上記の結果を参考に、2022 年 1 月再度雪点群のデータを取得しており、優先順位を決め、次年度にて解析、モデル化を進める予定。

ウ） 日独連携への貢献

JTTT3.2 LiDAR パートを担当し、キックオフミーティング前ではあるが日欧それぞれでモデル化対象としている LiDAR 機種についての情報交換を行った。

結果、日欧ともに MEMS ミラーによるスキャン方式を採用している LiDAR であり、レーザー波長も 905nm で同じであることがわかった。そのため、環境モデルの物標反射特性が共有化できる可能性があるほか、実機とモデルの一致性検証における評価指標や LiDAR 不調をモデル化するための実験等について情報共有を行い、指標に対する考え方や実施している実験内容について、日欧で大きな差異がないことを確認した。

⑶次年度以降の計画

なし

5. 2. 7 「B3-2. LiDAR リファレンスモデル構築」(学校法人畿徳学園神奈川工科大学、パイオニア株式会社)

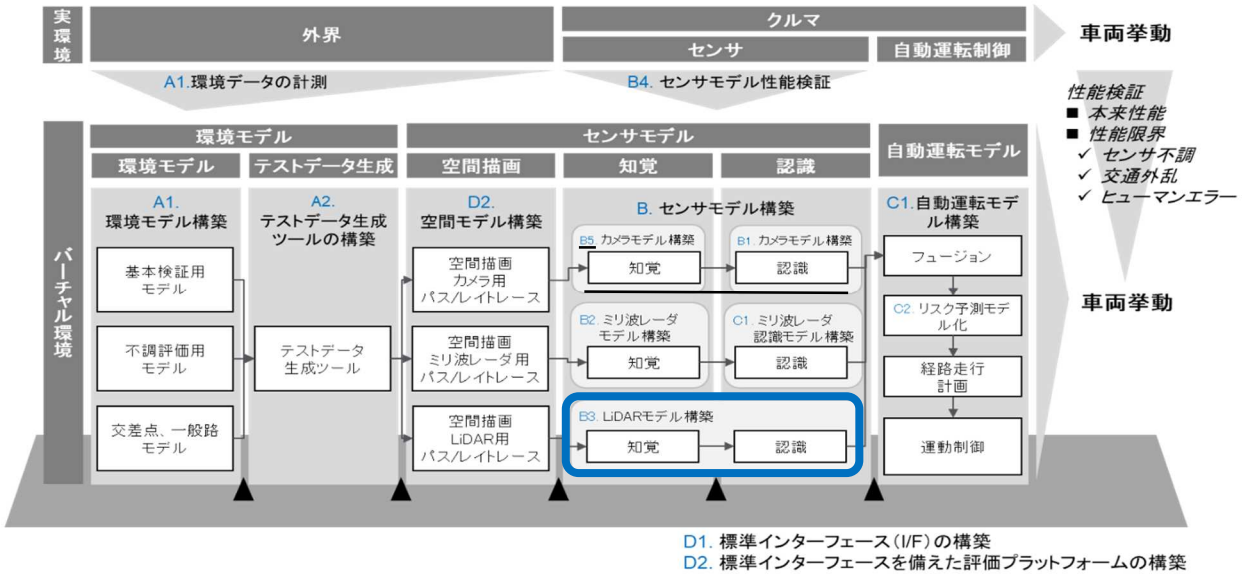


Figure 355　本研究の位置付け

当社では従来から、MEMS ミラーによる走査、Pulse TOF 方式による測距を採用している LiDAR モデルの開発と、この LiDAR モデルにより仮想 3D 環境で点群データを生成する LiDAR シミュレータの開発を行っており、環境条件や物体の反射特性等によって実際の LiDAR から出力される点群データが大きく影響を受けることは確認しているが、これらの影響を考慮した現実に近いシミュレーション環境は構築できていなかった。

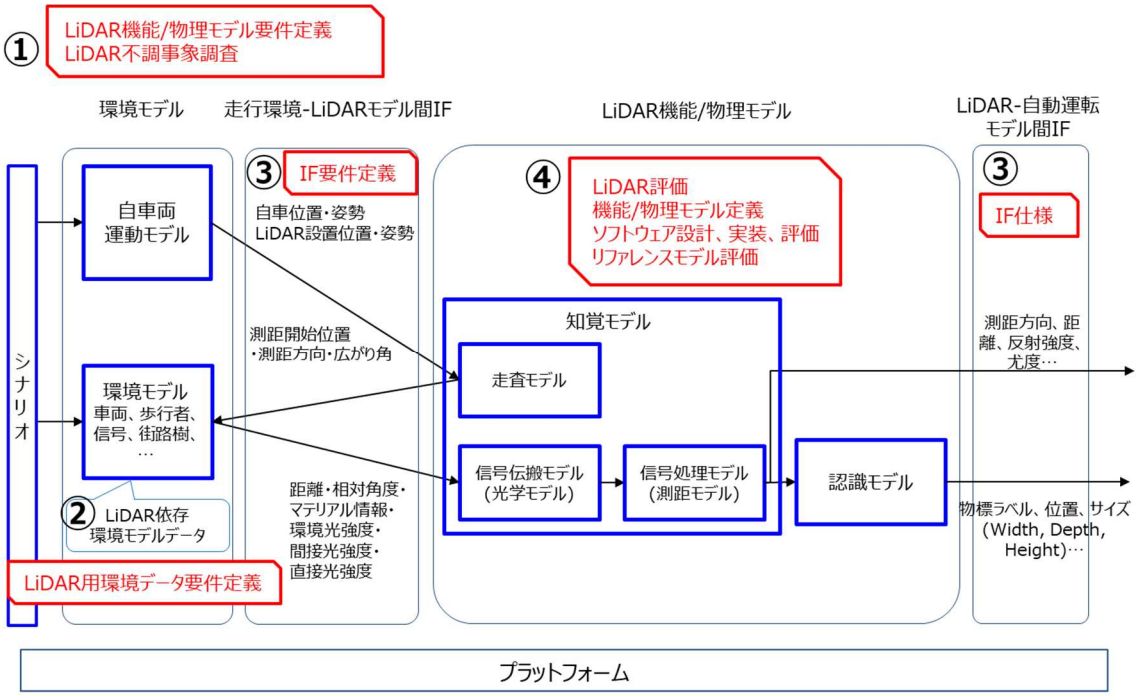
■ 事業目的

本研究開発では、LiDAR リファレンスモデル(機能/物理モデル)を構築するとともに、A パートテーマ関係者と協力し、実空間における環境特性を測定した現実に近いシミュレーション環境を構築する事での課題解決を目指す。また、LiDAR に求められる機能・役割についての明確化についても、LiDAR を利用する立場から C パートテーマを扱う大学と共同して定義していく。

LiDAR 機能モデルについては、自動運転システム全体の性能評価のためのクローズドループシミュレーションでの利用を目的とする。一方 LiDAR 物理モデルについては、シミュレーションの実時間性は求めないが、より現実に近いシミュレーションが可能とすることで、個別センサの性能評価を目的とする。

■ 事業概要

本研究開発では、LiDARリファレンスモデルを構築するため、以下 4 項目について、研究開発を行う。 次図に LiDAR リファレンスモデルを構成する研究開発要素とその関係を示す。

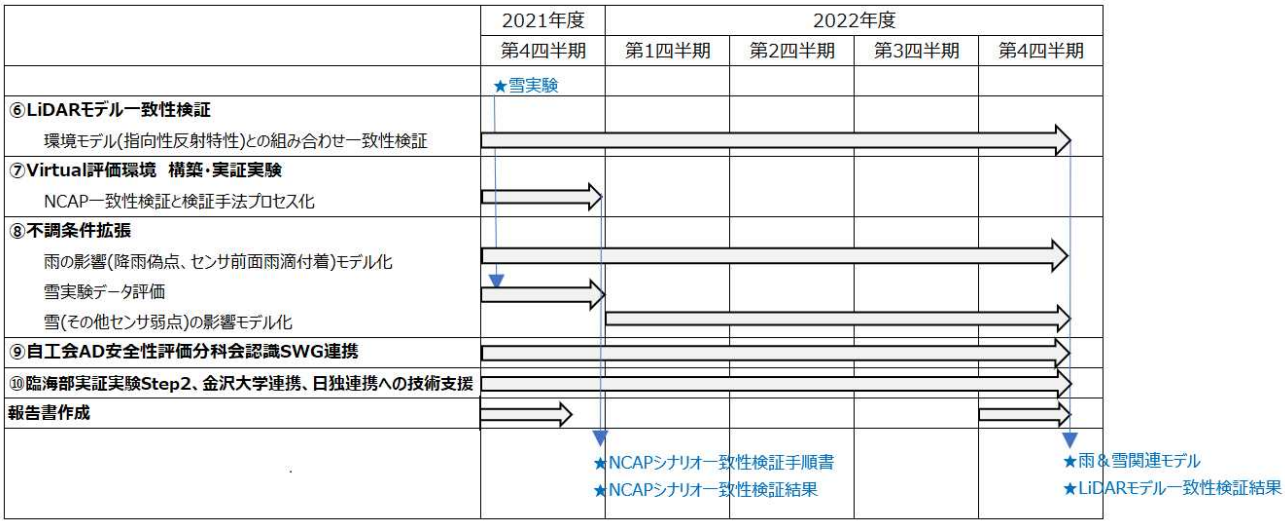


出所：パイオニア（株）

Figure 356. LiDAR リファレンスモデルを構成する研究開発要素とその関係

■ 実施計画

≪2022/1～2023/2≫



(1)令和3年度の成果(まとめ)

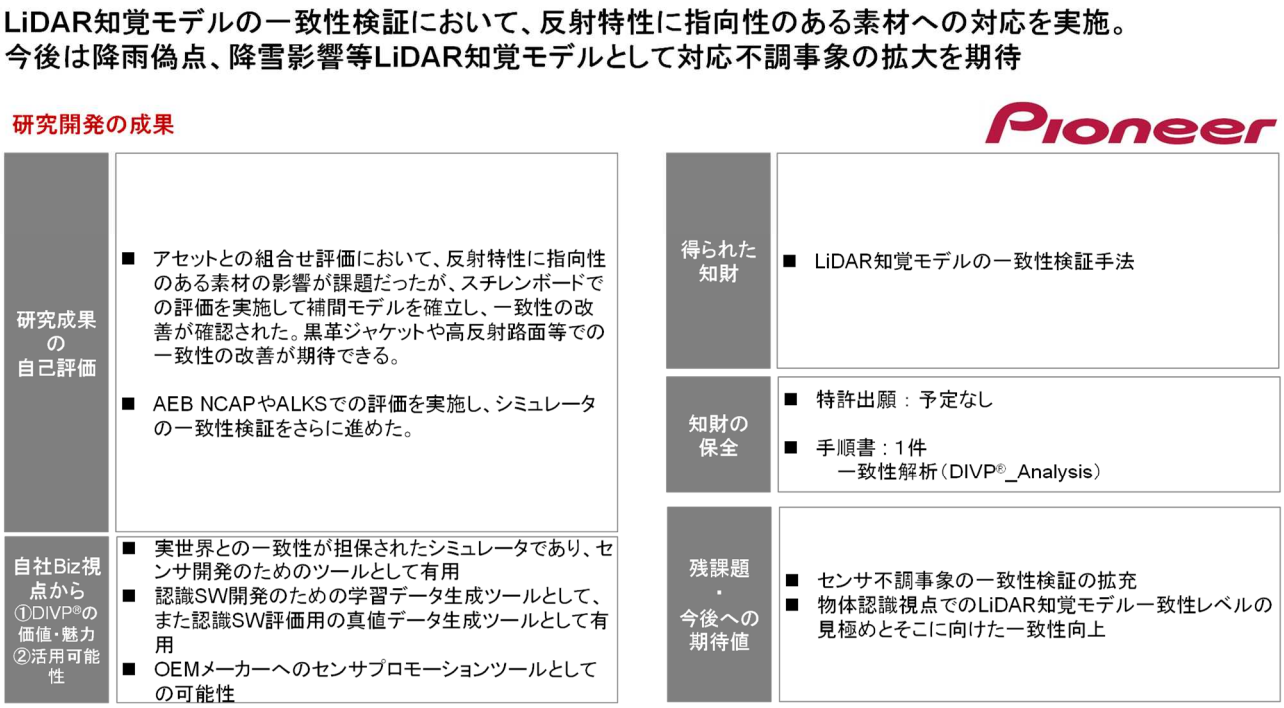


Figure 357　研究開発の成果

研究の成果を Figure 357 にまとめた。LiDAR 知覚モデルにおいて、AEB NCAP や ALKS の評価を実施し、一致性検証をさらに推進、また反射特性に指向性のある素材への対応を実施した。今後は降雨偽点のモデル化、降雪影響等対応不調事象の拡大を推進する。

(2)令和3年度の成果

1. PSSI-LiDAR の一致性検証

A) アセット(反射特性モデル)＋LiDAR 知覚モデルの一致性

A)-1 反射特性が指向性を有する物体の一致性評価

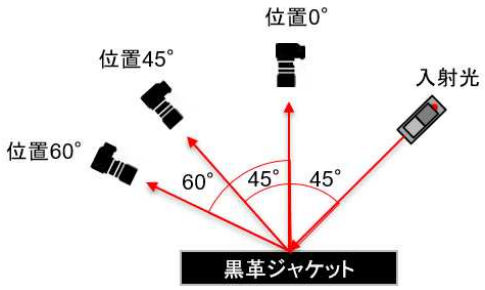
ア) 背景

令和 2 年度の年度末報告書にて NCAP ダミーに黒革ジャケットを着用させた際に、強度及び遠距離検知限界の一致性に差異が生じることが報告されている。8m先黒革ジャケット(ターゲット)を着用した NCAP ダミーの受信強度を Figure 358 に示す。実測の黒革ジャケット部には強度が高い部分が存在しているのに対しシミュレーションの黒革ジャケット部は強度が低く一定であることを確認した(パイオニアスマートセンシングイノベーションズ(株))。

出所:パイオニアスマートセンシングイノベーションズ(株)

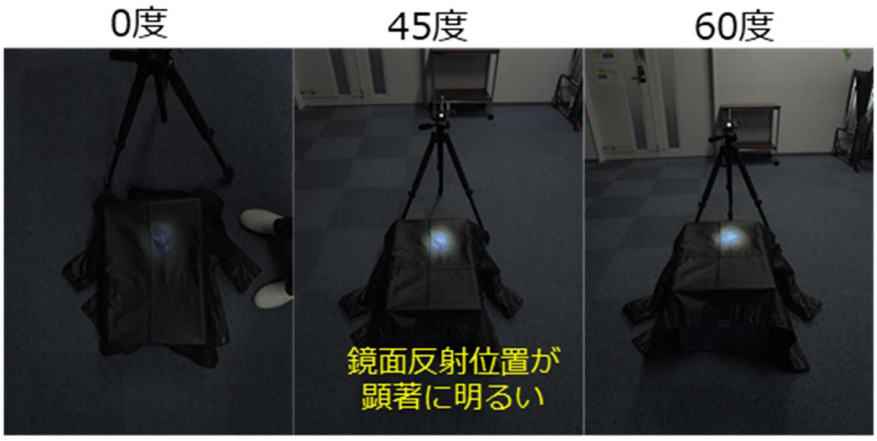
Figure 358 ターゲット点群の強度差異(ターゲットまでの距離 8m)

この強度の差異の要因の 1 つとして黒革ジャケットの鏡面反射成分の影響の可能性を考え、黒革ジャケットの鏡面反射成分を調査した。Figure 359 に示す様に黒革ジャケットおよび照明を設置し、カメラの位置を変えながら撮影を実施した。撮影結果を Figure 360 に示す。Figure 360 より光源の入射角とカメラの位置によって黒革ジャケットでの反射光の明るさが変化していること分かる。黒革ジャケットが Lambertian 拡散反射と仮定できるのであれば、カメラの位置によらず反射光の強さは一定である。しかし、カメラの位置により明るさが大きく変化している事から、黒革ジャケットに鏡面反射成分も含まれており、反射光に対して支配的な影響を与えていると推測できる。



出所:パイオニアスマートセンシングイノベーションズ(株)

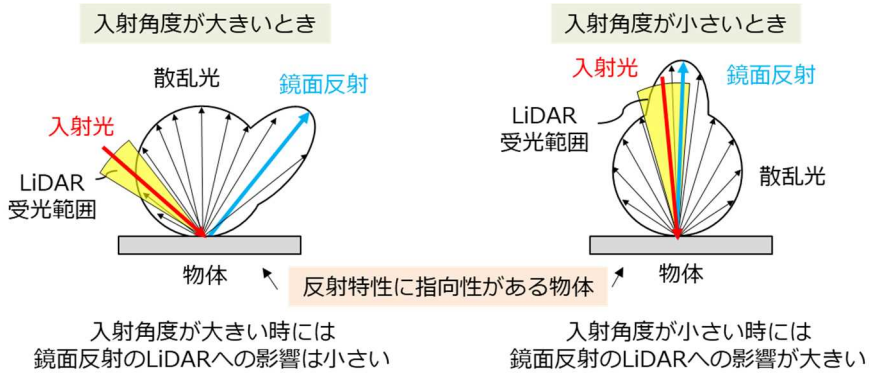
Figure 359 黒革ジャケットに対する光源の入射角とカメラの配置図



出所：パイオニアスマートセンシングイノベーションズ（株）

Figure 360　カメラ角度を変化させたときの黒革ジャケットの反射光強度の変化
（入射光は約 45 度、カメラの露出設定は一定）

黒革ジャケットのように反射特性に指向性を有する物体への入射角度の違いが LiDAR の測距に与える影響を Figure 361 に示す。反射特性に指向性を有する物体への入射角度が大きい時は LiDAR の受光範囲に鏡面反射による強い反射光が入りにくいため測距への影響は受けにくい。しかしながら反射特性に指向性を有する物体への入射角度が小さい時は LiDAR の受光範囲に鏡面反射による強い反射光が入りやすく受光量が大きく変わるため測距への影響が大きくなることが想定される。これにより、受光強度及び遠距離測距性能に差異が生じていると考える。



出所：パイオニアスマートセンシングイノベーションズ（株）

Figure 361　LiDAR の測距に与える影響

反射特性に指向性を有する物体の強度及び遠距離検知限界の一致性における差異要因として考えられるのは下記 2 つである。

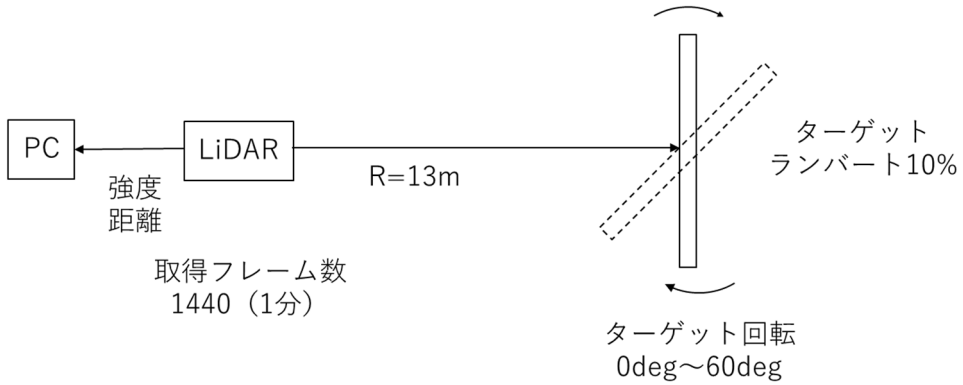
① PSSI-LiDAR 知覚モデルと実機の物体への入射角度による受光強度特性の差異

② 反射特性モデルと実際の物体の反射特性の差異

①の差異について評価を行った。

評価指標には、物体へのビームの入射角度による受光強度の平均を用いた。

評価方法を Figure 362 に示す。ターゲットには反射特性、形状が既知である Lanbertian 反射特性を持つ平面を用いた。また、シミュレーションの反射モデルには理想 Lanbertian 反射特性を入力した。LiDAR と Lambertian 反射体を正対した状態で 13m 離して設置した。Lambertian 反射体を回転させて LiDAR から射出されるレーザーの入射角度を 0 度～60 度まで 10 度ごとに変更して各角度での受光強度を計測した。評価する強度は 1 分間の測定の平均値を用いた。

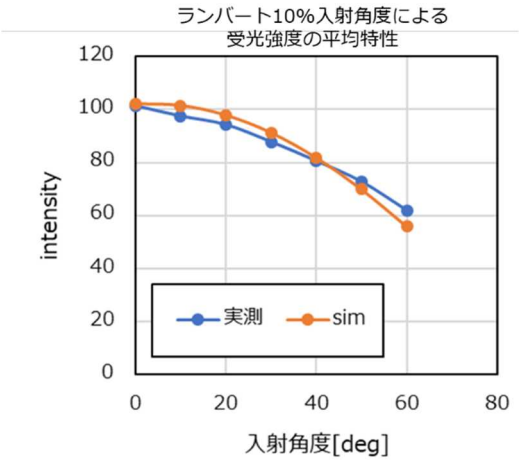


出所：パイオニアスマートセンシングイノベーションズ（株）

Figure 362　入射角度による受光強度の評価方法

Lambertian 反射体（反射率 10%）への入射角度による受光強度の特性評価結果を Figure 363 に示す。

実測とシミュレーションで角度により多少のバラつきはあるが顕著な差は見られなかった。この結果から PSSI-LiDAR 知覚モデルと実機の物体への入射角度による受光強度特性に大きな乖離はないと判断した。



出所：パイオニアスマートセンシングイノベーションズ（株）

Figure 363　Lambertian 反射体（反射率 10%）への入射角度による受光強度の平均特性

次に反射特性が指向性を有する物体の実際の反射特性と反射モデルの差異について評価した結果を示す。

イ） 検証方法

本検証では角度特性に指向性を有する物体の 1 つとして（評価のしやすさを考慮して）スチレンボードを使用した。スチレンボードは反射率の異なる 3 種類（反射率 10%、50%、90%程度）を使用した。また、実測で用いたスチレンボードと同じものを用いて反射特性モデル作成担当社にて各入射/受信角度による反射特性モデルを作成いただきシミュレーションを実行した。

評価パラメータ、評価指標を Table 97 に示す。評価パラメータは 3 種類の反射率のスチレンボードへのレーザー入射角度による受光強度と反射率 10%程度のスチレンボードの遠距離測距限界を用いた。

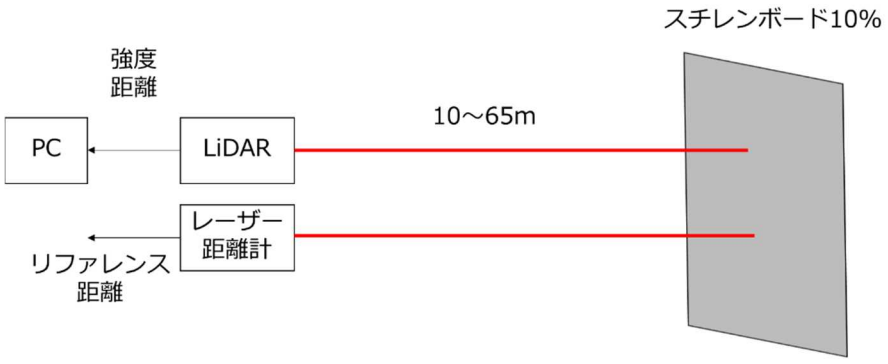
Table 97　スチレンボードの一致性検証の評価パラメータと評価指標

評価パラメータ	評価指標
■強度	■反射特性に指向性を有するスチレンボードへの入射角度による受光強度の平均の一致性
■遠距離測距限界	■反射特性に指向性を有するスチレンボードの各距離における検出確率の一致性

出所：パイオニアスマートセンシングイノベーションズ（株）

スチレンボードへのレーザーの入射角度による受光強度については Figure 362 と同様な評価方法で行った。

遠距離測距限界の評価方法は Figure 364 に示す。LiDAR とスチレンボードを正対させた状態で距離を変えて LiDAR で距離と受光強度を計測し、ターゲット中心の 1 点に対して 1 分間の総点数とレーザー距離計によって測定したリファレンス距離から±1m の間で検出された点の個数の比によって算出し、その算出結果を検出確率として一致性を検証した。



出所：パイオニアスマートセンシングイノベーションズ（株）

Figure 364　遠距離測距限界の評価方法

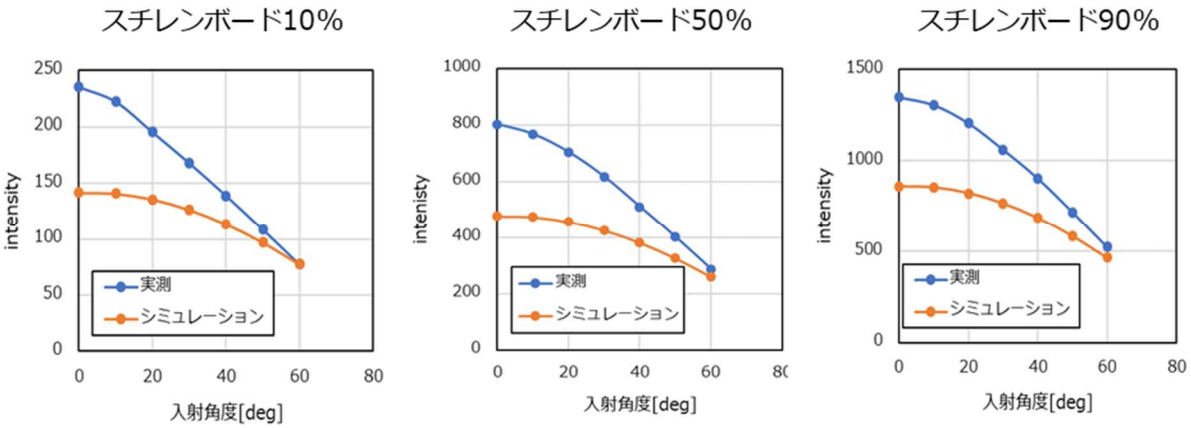
ウ） 検証結果

スチレンボード（反射率 10%、50%、90%程度）へのレーザーの入射角度による受光強度を Figure 365 に示す。また、反射率 10%程度のスチレンボードの検出確率を Figure 366 に示す。

入射角度による受光強度はどの反射率のスチレンボードにおいても実測では Lanbertian 特性ではなく指向性を持つ結果となった。しかしながらシミュレーションでは Lanbertian 反射特性を示す結果となった。また入射角度 0 度のときの受光強度はどの反射率のスチレンボードにおいても実測の方がシミュレーションより 1.7 倍程度大きい結果となった。

反射率 10%程度のスチレンボードの遠距離測距限界は入射角度 0 度のときの受光強度に大きく影響されるので受光強度と同様に実測とシミュレーションが大きく乖離する結果となった。

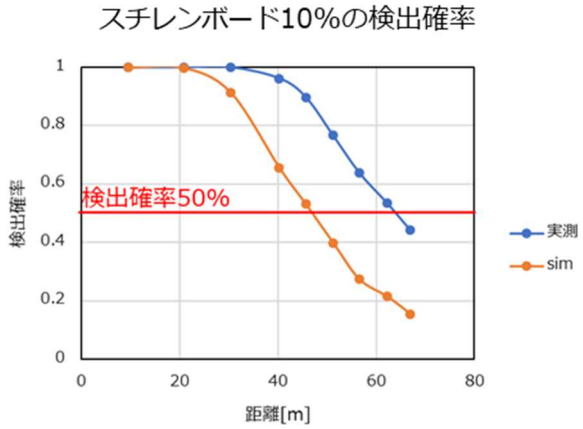
この結果から反射特性に指向性を有する反射モデルと実際の反射特性に差異があることが明らかになった。



出所：パイオニアスマートセンシングイノベーションズ（株）

Figure 365　スチレンボードへの入射角度による受光強度

（左：反射率 10%、中央：反射率 50%、右：反射率 90%）

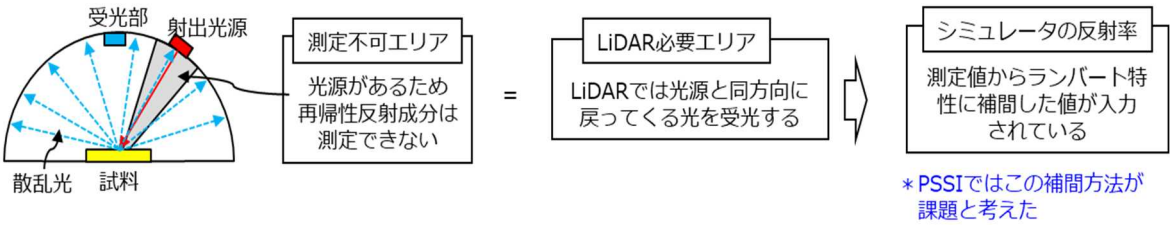


出所：　パイオニアスマートセンシングイノベーションズ（株）

Figure 366　スチレンボード 10%の検出確率

反射モデルと実際の反射特性の差異の特定のため反射特性モデル作成担当社での反射モデルの作成方法に着目した。反射特性計測方法と計測データの LiDAR への影響を Figure 367 に示す。計測は、半球状の計測装置の中央に計測対象物体を配置し、射出光源から計測対象物体に光を照射する。そして、受光部の設置角度を変えながら計測対象物体から散乱された光を受光部によって計測する。これを射出光源の角度を変えながら繰り返すことで物体の入射及び受光角度による反射特性を得ることができる。

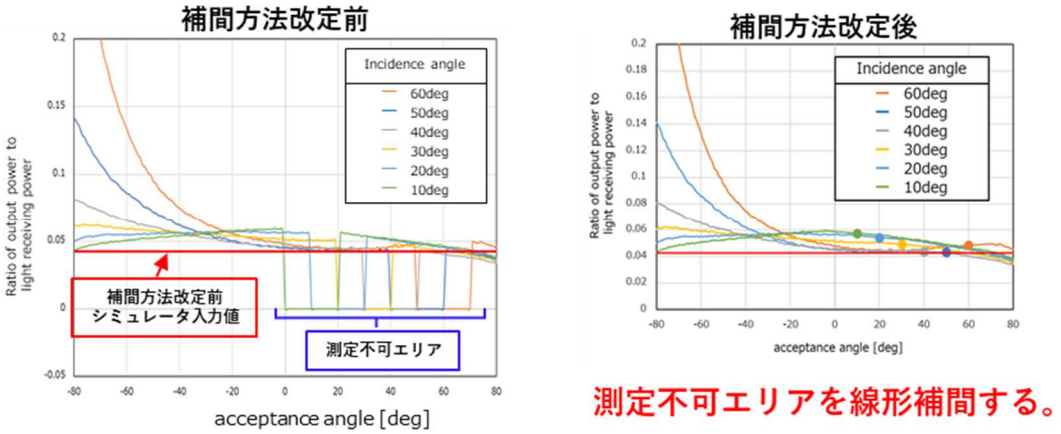
この計測装置において射出光源を設置している位置±10 度の範囲には受光部を設置することができないため測定不能領域ができる。これが LiDAR における課題となる。PSSI-LiDAR のように射出部と受光部が同軸である LiDAR は入射角度と同方向に返ってくる散乱・反射光を受光する。そのため現状の反射特性測定法では LiDAR の測距において重要となる反射特性が計測できていない状態である。反射モデルとしてはその計測不可能部分を 45 度入射の際の反射率が実測と合うように Lanbertian 反射特性で補間した値が用いられていた。そこで、新たな補間方法を検討した。



出所：パイオニア（株）

Figure 367　反射特性計測方法のイメージと計測データの LiDAR への影響

新たに検討した補間方法を Figure 368 に示す。従来の測定不能部分を入射角度 45 度の時の値を基準に Lanbertian 反射特性に補間する方法ではなく、各入射角度の測定不能区間を線形補間して光源と同方向に戻ってくる反射強度を推定する方法である。



出所：パイオニア（株）

Figure 368　反射特性計測データの補間方法の提案

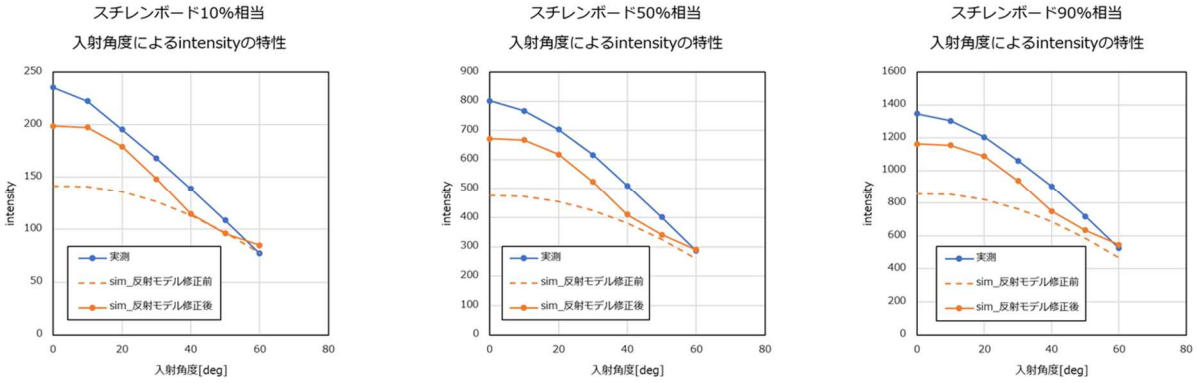
測定不能区間を線形補間して強度を推定する方法にて作成した反射モデルを用いて再度、スチレンボード（反射率 10%、50%、90%程度）へのビームの入射角度による受光強度と反射率 10%程度のスチレンボードの遠距離測距限界の一致性評価を行った。

スチレンボード（反射率 10%、50%、90%程度）へのビームの入射角度による受光強度を Figure 369 に示す。また、反射率 10%程度のスチレンボードの検出確率を Figure 370 に示す。

入射角度による受光強度は反射モデル変更前と比べると実測に近い傾向となった。ただし、全てのスチレンボードにおいて 1～2 割程度実測よりシミュレーションの受光強度が小さい結果となった。

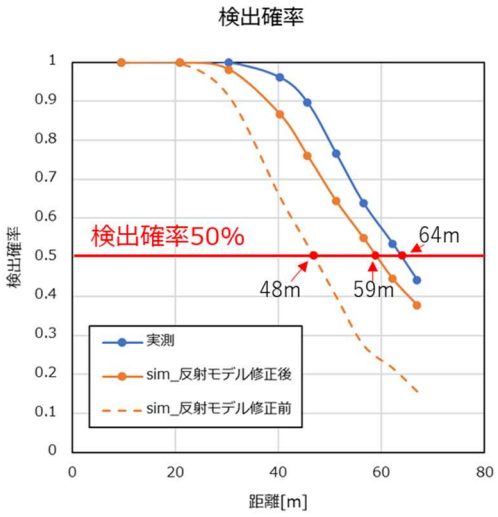
反射率 10%程度のスチレンボードの遠距離測距限界は修正前の結果と比較すると入射角度 0 度の受光強度の値が実測に近付いたことにより検出確率も実測に近付いた。検出確率 50%になる距離を 1 つの指標とすると実測と修正後の差が 1 割程度になり十分な一致性があると考える。

以上より反射特性モデルの改定がスチレンボードの受光強度及び遠距離検知限界の一致性の向上に有意性を持つことが確認できた。



出所：パイオニア（株）

Figure 369　反射特性モデルに線形補間を用いたスチレンボードへの入射角度による受光強度
（左：反射率 10%、中央：反射率 50%、右：反射率 90%）



出所：パイオニア（株）

Figure 370　反射特性モデルに線形補間を用いたスチレンボード 10%の検出確率

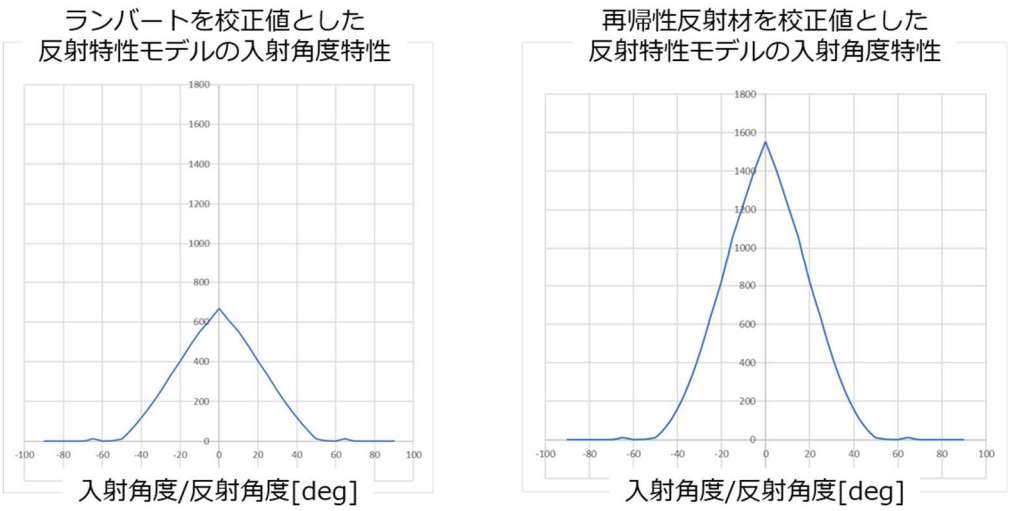
A)-2 高反射物体の強度の一致性評価

ア） 背景

近年ヒートアイランド現象の対策として路面温度の上昇につながる赤外線を高反射することで、路面温度の上昇を抑制する舗装が施工されている路面がある。その塗装がされている路面をここでは高反射路面と呼ぶこととする。高反射路面は通常の路面と比較して高い反射率を有しており、LiDAR にとって白線と路面の分離が困難になるため不調要因と考えられることから一致性検証項目として挙げられている。その検証の中で高反射路面からの受光強度の一致性に差異があることが確認されている。実測よりもシミュレーションの高反射路面の強度の方が低くなる傾向が出ている。高反射路面の一致性検証については後段の「高反射路面の不調評価」にて詳しく述べる。

高反射路面の反射特性を実際に測定することは困難であるため、高反射路面と同様に反射率の高い再帰性反射材（3M ダイヤモンドグレード DG3 シリーズ白 4090）を代替えとして用いて受光強度の一致性評価を実施した。

高反射物体の一致性評価にあたり再帰背反射材の反射特性モデルを 2 パターン用いた。それぞれ校正値が異なっており、1 つは反射率 90%程度の Lanbertian 散乱体の反射率を校正値として反射モデルを作成したもの、2 つめは本評価で使用するものとはことなる再帰性反射材（Lanbertian よりも反射率が高い）を校正値として反射モデルを作成したものである。それぞれの校正値にて作成した入射角度と同角度に戻ってくる反射特性グラフを Figure 371 に示す。Lanbertian を校正値に使用したものより再帰性反射材を校正値に使用した反射モデルの方が正対時の反射率が 2.3 倍強い結果となった。この 2 つの反射特性モデルのどちらを用いた方が実測の再帰性反射材の受光強度と一致性が高いか評価した。



出所：パイオニア（株）

Figure 371 再帰性反射材の反射特性モデルの入射角度特性

イ） 検証方法

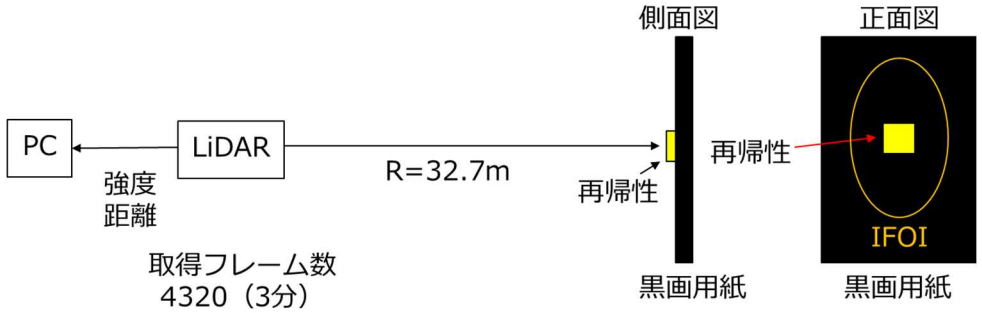
本検証では、評価パラメータとして再帰性反射材の受光強度を用いた。評価パラメータ及び評価指標を Table 98 に示す。

Table 98　高反射物体の一致性検証の評価パラメータと評価指標

評価パラメータ	評価指標
■強度	■再帰性反射材の面積の違いによる受光強度の 平均、分散の一致性

出所：パイオニア（株）

再帰性反射材の受光強度の評価方法を Figure 372 に示す。再帰性反射材は入射角度と同方向に光を反射するような構造になっているため Lanbertian 特性の物体による散乱光よりも受光量が大幅に大きくなる。大きすぎる光量が受光部に入ると飽和してしまい強度を正確に測定できない。そのため本評価では再帰性反射材サイズを変更したものをターゲットとして使用した。再帰性のサイズは 5mm、10mm、20mm、30mm、40mm、50mm、100mm 角の 7 種類を用いた。また、評価に用いる走査点は中心付近の 1 点とした。ある 1 点のフットプリント内の中心に再帰性反射材が入るように調整して設置した。評価に使用する再帰性反射材の強度は 3 分間の取得データの平均、分散とした。



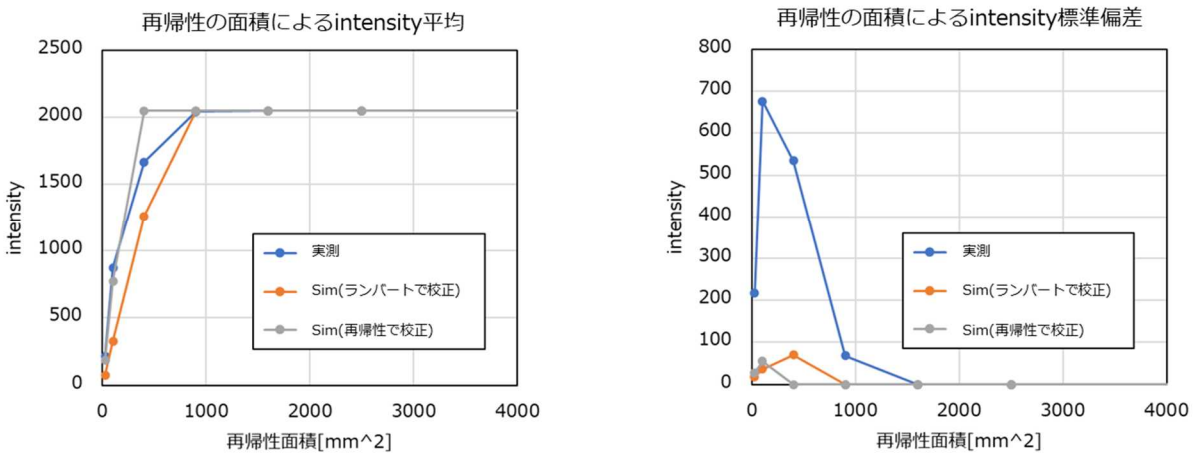
出所：パイオニア（株）

Figure 372　再帰性反射材の受光強度の評価環境

ウ） 検証結果

再帰性の面積による受光強度を Figure 373 に示す。

受光強度の平均は再帰性で校正した反射モデルを用いたシミュレーションの方が実測との一致性が高い結果となった。しかしながら受光強度の標準偏差はターゲットが小さい場合に実測の方がシミュレーションより大幅に大きな値となっており一致性は低い。

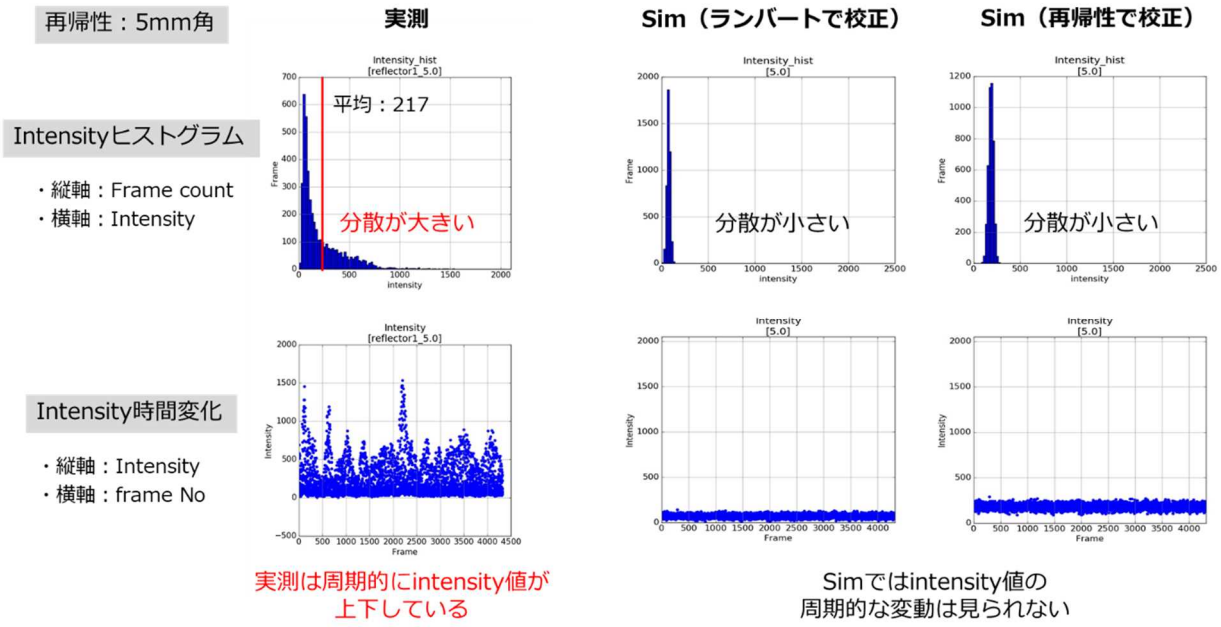


出所：パイオニア（株）

Figure 373　再帰性の面積による受光強度の平均と標準偏差

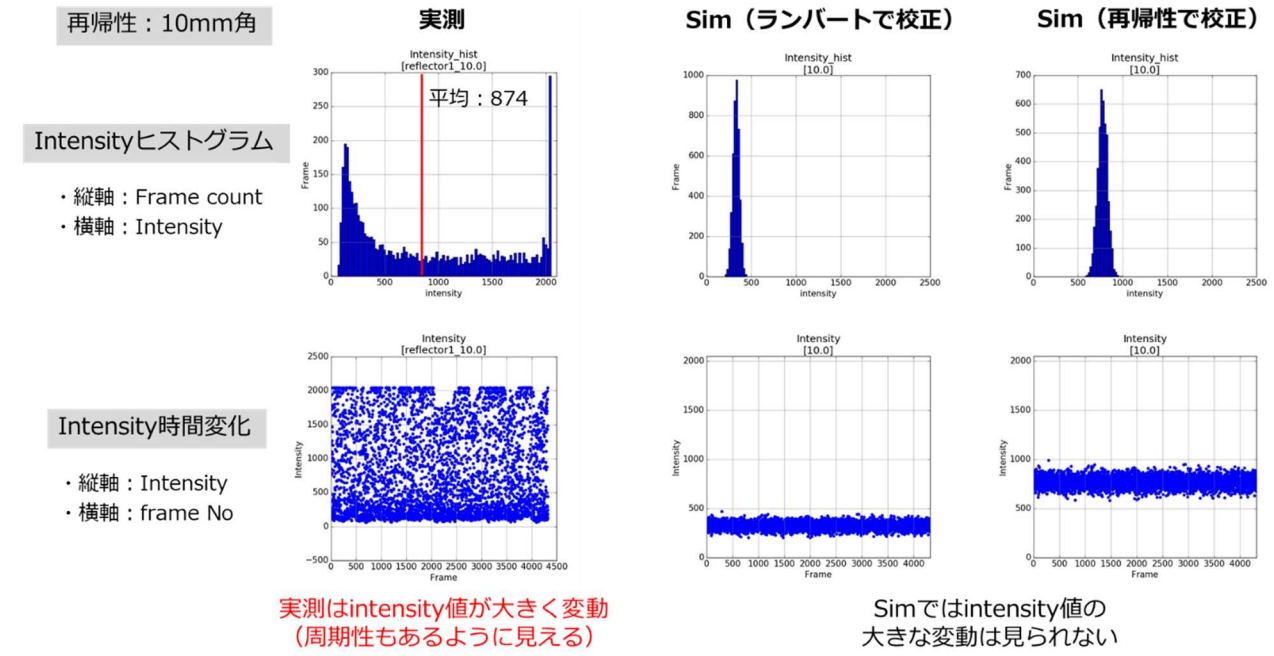
実測の標準偏差が大きくなる要因調査のため、3 分間の受光強度のヒストグラムと時間による受光強度の変化を確認した。特に受光強度の標準偏差が大きい再帰性サイズ 5mm、10mm、20mm 角の受光強度のヒストグラムと時間による受光強度の変化を Figure 374、Figure 375、Figure 376 に示す。

受光強度のヒストグラムから再帰性 5mm、10mm、20mm 角のすべてにおいて実測の受光強度が広範囲に分散していることが確認される。また、時間による受光強度の変化をみると実測の受光強度が周期的に上下していることが確認できる。特に再帰性サイズが最も小さい 5mm 角の時間による受光強度の変化に周期性が顕著に表れている。一方でシミュレーションの受光強度の分散は小さく、周期的な変化も見られなかった。



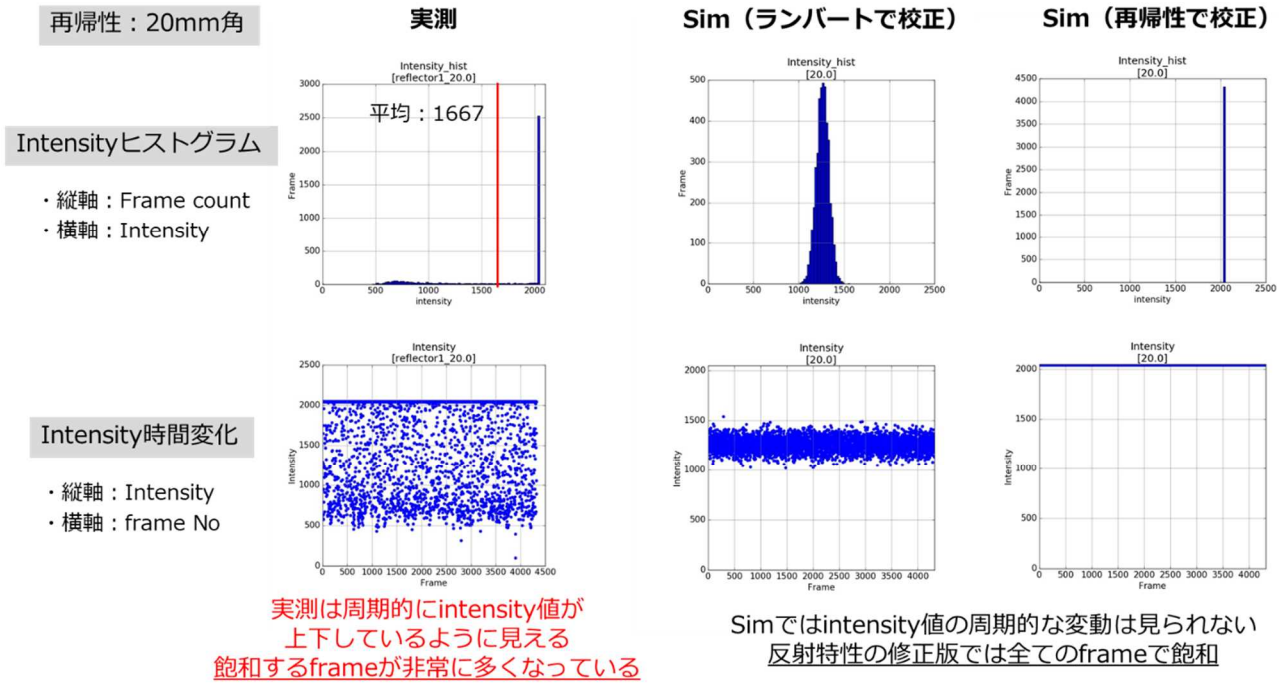
出所：パイオニア（株）

Figure 374　再帰性反射材が 5mm 角の時の受光強度ヒストグラム（上段）と受光強度の時間変化（下段）（右：実測、中央：シミュレーション（Lanbertian で校正）、右：シミュレーション（再帰性で校正））



出所：パイオニア（株）

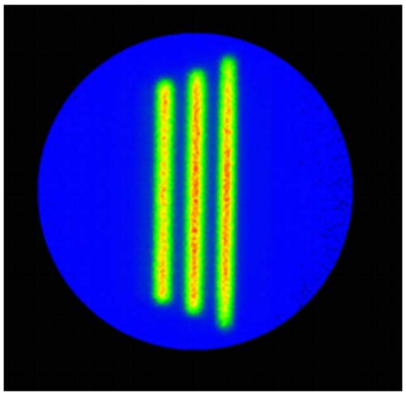
Figure 375　再帰性反射材が 10mm 角の時の受光強度ヒストグラム（上段）と受光強度の時間変化（下段）
（右：実測、中央：シミュレーション（ランバートで校正）、右：シミュレーション（再帰性で校正））



出所：パイオニア（株）

Figure 376　再帰性反射材が 20mm 角の時の受光強度ヒストグラム（上段）と受光強度の時間変化（下段）
（右：実測、中央：シミュレーション（ランバートで校正）、右：シミュレーション（再帰性で校正））

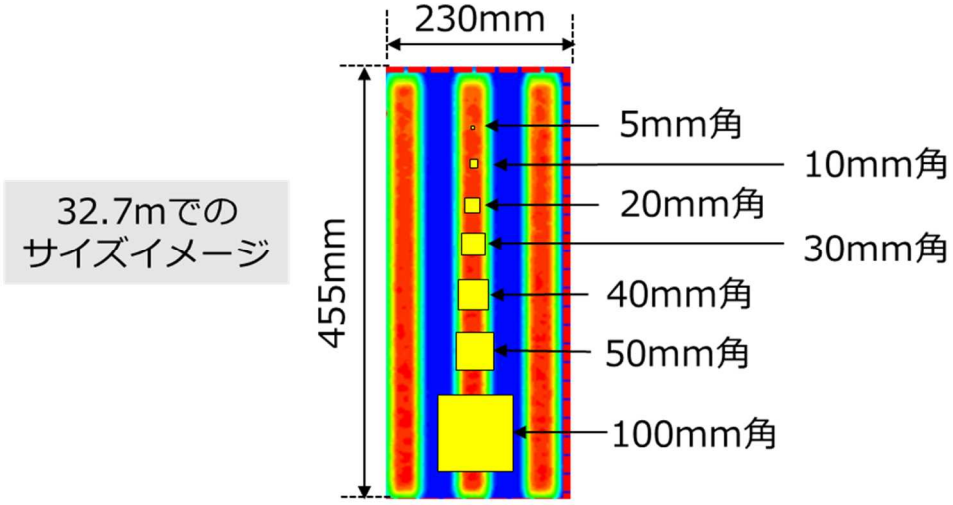
実測の受光強度の分散が大きく、周期的な変化が生じる原因を考察する。原因として PSSI-LiDAR のフットプリントが 3 スタック状であることが関係していると推測している。PSSI-LiDAR のフットプリントをビームプロファイラにて計測した結果を Figure 377 に示す。図のようにフットプリントは 3 本の縦長のビームが並ぶような形状となっており縦長のビームの中心ほどパワーが強く、端に行くほどパワーが弱くなる。3 本のビームの間はほぼパワーが 0 となっている。



出所：パイオニア（株）

Figure 377　ビームプロファイラで計測した PSSI-LiDAR のフットプリント

このようなフットプリントに対して小さなサイズの再帰性反射材を置いた時のイメージ図を Figure 378 に示す。イメージ図は今回の評価と同様に 32.7m付近のフットプリントサイズと実際の再帰性のサイズ感を再現している。



出所：パイオニア（株）

Figure 378　PSSI-LiDAR のフットプリントに実験に使用したサイズの再帰性を置いた時のイメージ

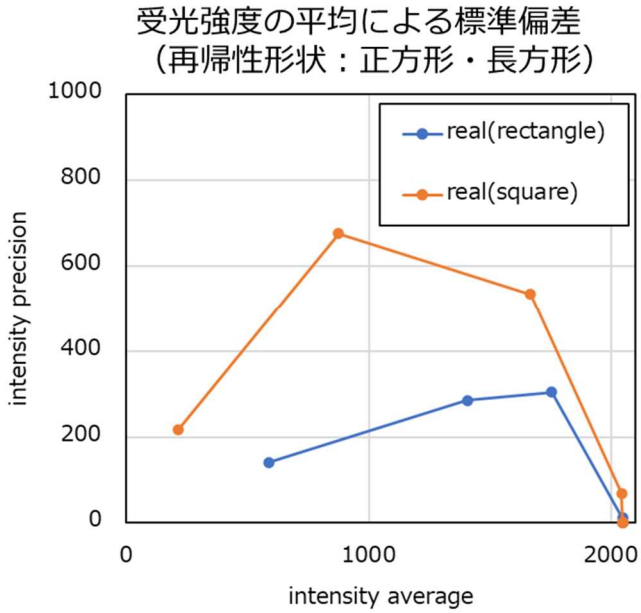
Figure 378 のようにフットプリントに対して再帰性反射材を配置していたとすると、再帰性反射材サイズが小さい場合、フットプリントの横方向の微小な揺らぎがあると再帰性反射材にあたる光の強度が変化することが予想される。PSSI-LIDAR は照射ビームを走査しているため微小な揺らぎは十分発生し得ると考える。このよ

うに微小な揺らぎによって再帰性にあたる光の強度が変化することで受光強度の分散が大きくなっていると推定している。

この推定は再帰性反射材の形状を横長（フットプリントサイズと同程度の 20 ㎝）にして同様の実験を行うことで検証可能と考える。もし上記考察が正しければ横方向の微小な揺らぎの影響が低減し実測の受光強度の揺らぎが低下するはずである。

再帰性反射材の形状を横長にし、実機にて計測した。再帰性反射材の形状の違いによる受光強度の平均に対する受光強度の標準偏差を Figure 379 に示す。再帰性反射材の形状が正方形よりも長方形の方が受光強度の標準偏差が小さいことが確認できた。この結果から前述の考察が正しいと考える。

今後、横長の再帰性反射材の実測とシミュレーションの受光強度の一致性を検証する。



出所：パイオニア（株）

Figure 379 再帰性反射材の形状の違いによる受光強度の平均に対する受光強度の標準偏差

2. Virtual 評価環境：NCAP 一致性検証

DIVP®プラットフォームの Virtual 評価環境における環境モデルと LiDAR 知覚モデルの組合せによる一致性検証として、Euro NCAP 等で定義される動的な試験プロトコルに対応するシナリオを用いて実空間で取得した点群データとシミュレーションにより生成した点群データの比較評価を実施した。これにより、実際の交通環境で頻繁に起り得る基本的なシチュエーションにおいて、実測に近いシミュレーション結果が得られているかを評価し、現時点で達成できていることの確認と課題の抽出を行った。

検証したシナリオは、A）直線接近（プリウス（白）、歩行者、自転車）、B)AEB NCAP の歩行者横断、自転車追従、車影飛び出し、C)右直衝突、D)ALKS に関連するものとして Cut-In シナリオ、そして E)Cut-Out シナリオの 5 種類である。

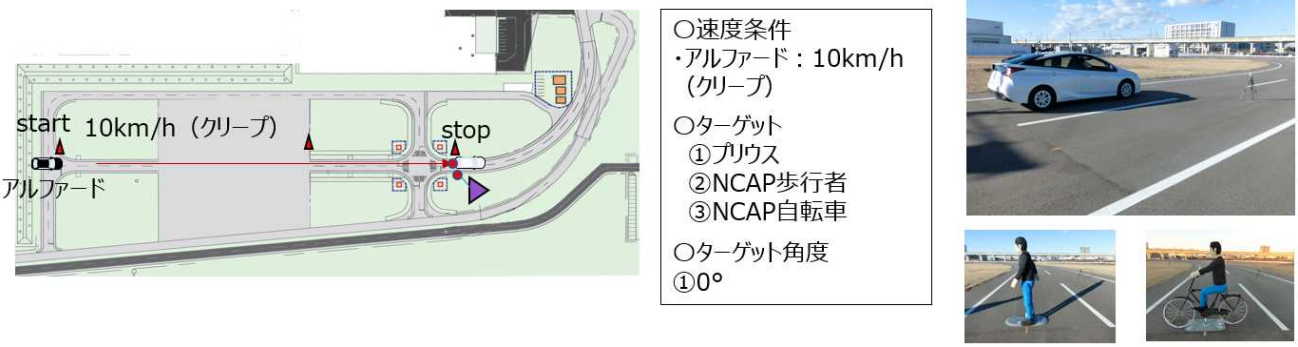
以下では、A)直進接近、B)AEB NCAP、C)右直衝突、D)ALKS Cut-In、E)Cut-Out の順で各シナリオの概要とそれに対する一致性検証の結果を示す。一致性評価の対象は、A)、B)、C)については検出されたターゲットの

位置とサイズ、D)、E)についてはターゲットの位置とした。最後に当検証によって得られた結論全体と課題をまとめて述べる。

A) 直線接近(プリウス(白)、歩行者、自転車)シナリオ

A-1) シナリオ概要

LiDAR 搭載車両が 10km/h で直進しながら、前方で静止しているターゲットに接近するシナリオである。ターゲットはプリウス(白)、NCAP ダミー歩行者、NCAP ダミー自転車の 3 種とした。直線接近シナリオの評価概要を Figure 380 に示す。LiDAR には、静止状態のこれらのターゲットの知覚が求められる。



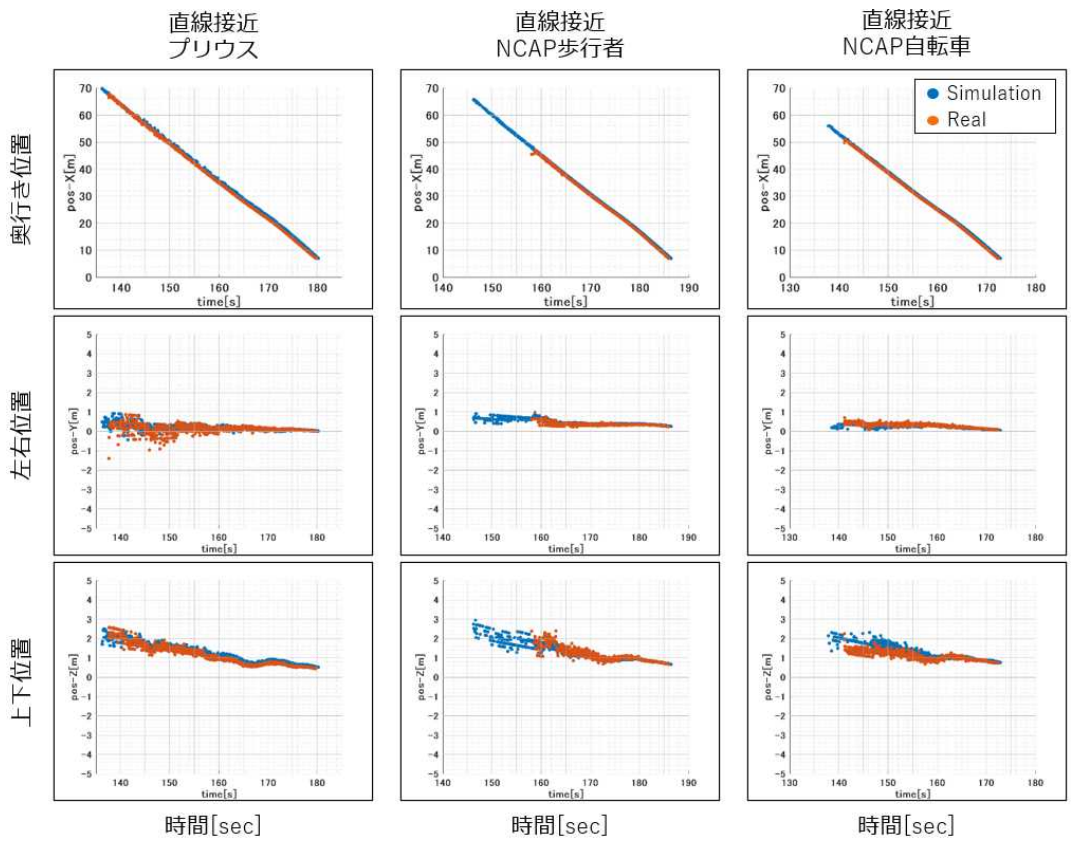
出所：SOKEN, INC, 学校法人 幾徳学園 神奈川工科大学

Figure 380 直線接近シナリオ

A-2) 一致性検証結果

[ターゲットの位置]

直線接近シナリオの各ターゲット(プリウス(白)、歩行者、自転車)に対する知覚位置の一致性検証結果を Figure 381 に示す。各ターゲットの位置は縦に並ぶ 3 つのグラフの組で示しており、左からプリウス、NCAP 歩行者、NCAP 自転車の順となっている。縦軸は上のグラフから順に奥行き位置(自車両の進行方向に対するターゲット位置。車両前方のどの程度の距離にターゲットが存在するかを示す)、左右位置(自車両の車幅方向におけるターゲット位置。本シナリオではターゲットは車両進行方向に位置しているのでこの値はゼロに近くなる)、上下位置(ターゲットの平均的な高さに対応する)を示している。すべてのグラフの横軸は経過時間である。オレンジのプロットが実測結果、青のプロットがシミュレーション結果である。



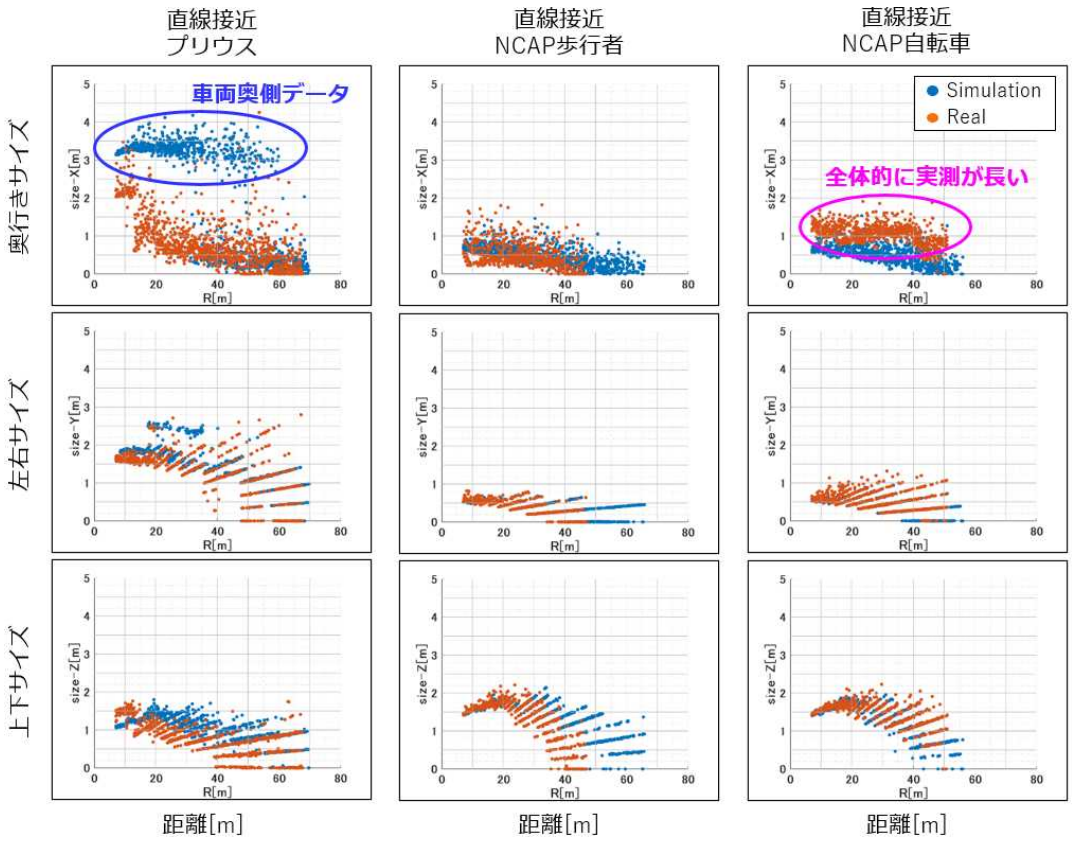
出所：パイオニア（株）

Figure 381 直線接近シナリオの各ターゲット（プリウス（白）、歩行者、自転車）に対する知覚位置の一致性検証結果

ターゲットの知覚位置に関しては、奥行き、左右、上下それぞれに対して実測とシミュレーションで高い一致性があることを確認した。各差分としては 1m 以下である。NCAP 歩行者について遠方（距離 45m 以上）での検出限界がシミュレーションと実測で差異が見られるが、この差は実測データが昼間に取得されたのに対して、シミュレーションでは背景光が無い状態で実施されたことに起因する可能性がある。背景光は LiDAR にとってノイズとして作用するため、LiDAR の検出限界の性能に影響する。ターゲットに当たる点数が少なく、また自転車のように強い反射が帰ってくる素材を含まない歩行者で差が大きくなったと推測する。

[ターゲットのサイズ]

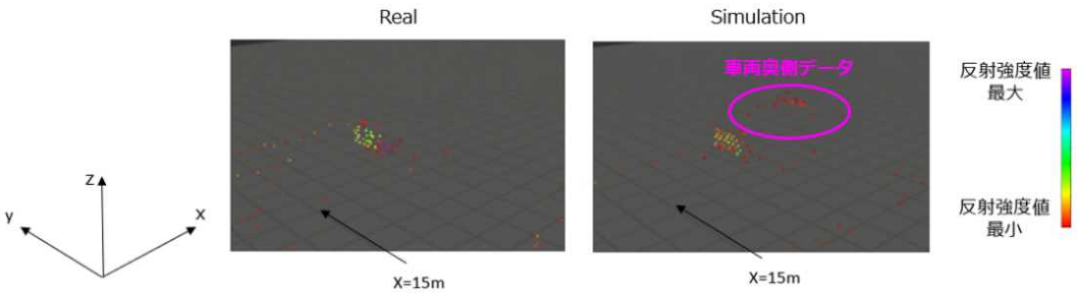
直線接近シナリオの各ターゲット（プリウス（白）、歩行者、自転車）に対する検出サイズの一致性検証結果を Figure 382 に示す。位置の結果と同様に、サイズも縦に並ぶ 3 つのグラフの組で示しており、左からプリウス、NCAP 歩行者、NCAP 自転車の順となっている。縦軸は上のグラフから順に奥行き方向のサイズ、左右方向のサイズ、上下方向のサイズを示している。すべてのグラフの横軸は距離である。オレンジのプロットが実測結果、青のプロットがシミュレーション結果である。



出所：パイオニア（株）

Figure 382 直線接近シナリオの各ターゲット（プリウス（白）、自転車、歩行者）に対する検出サイズの一致性検証結果

車両については、シミュレーションと実測とで奥行き方向のサイズに違いが見られた。シミュレーションの方が 2m から 3m ほど大きくなっている。この理由はシミュレーションで使用した車両のアセットと実測で使用された車両が異なることに起因すると考える。実測では窓の透過の無い NCAP ダミーカーが使用されたが、シミュレーションではプリウスのモデル(リア部のガラスの透過率 100%)を使用していた。そのためシミュレーションでは車両奥側部分が取得され、奥行きサイズが大きい結果になったと推測する。プリウスでの奥行きサイズの点群状態を Figure 383 に示す。



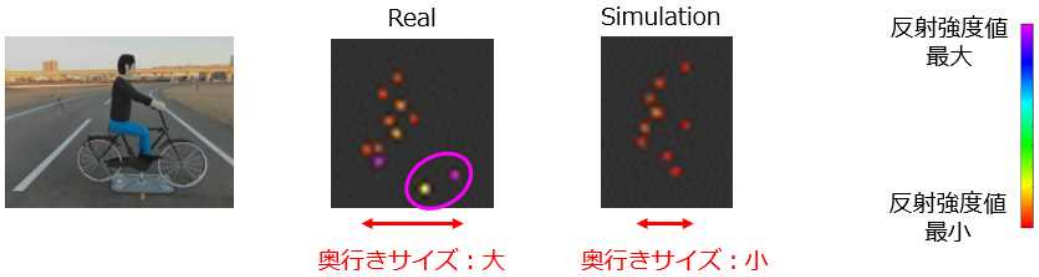
出所：パイオニア（株）

Figure 383 直線接近シナリオ（プリウス）における実測、シミュレーションの点群状態

歩行者については近距離にて実測とシミュレーションの一致を確認した。実測にて 45m を超える遠方で歩行者を検出出来ない状況が起きているが、これは前述の同様、実測は昼間に取得されたデータのため背景光によ

るノイズの影響で検出限界が下がったためと考える。

自転車については、実測の奥行きサイズが長い結果となった。この理由は、実測において自転車の前部に反射強度値が大きいデータが観測されたことに起因すると考える。その結果、シミュレーションに比べて実測の奥行方向サイズが大きくなったと推測する。自転車での奥行きサイズの点群状態を Figure 384 に示す。



出所：パイオニア（株）、SOKEN, INC, 学校法人 幾徳学園 神奈川工科大学

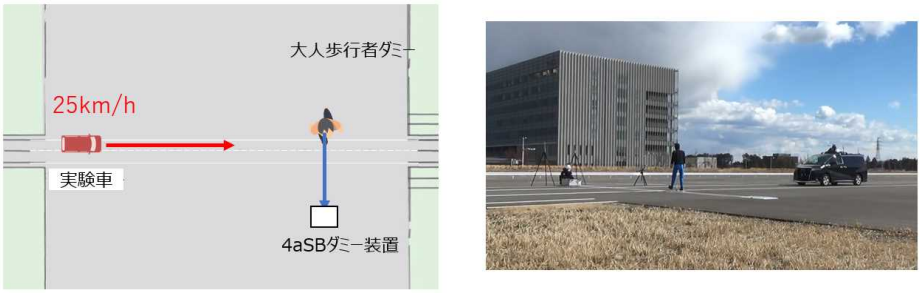
Figure 384 直線接近シナリオ（自転車）における実測、シミュレーションの点群状態

B） AEB NCAP 歩行者横断／自転車追従／車影飛び出しシナリオ

B-1） シナリオ概要

・歩行者横断シナリオ

LiDAR 搭載車両が 25km/h で直進中、前方に横断中の歩行者が存在するシナリオである。データ取得時は NCAP ダミー歩行者を使用した。歩行者横断シナリオの評価概要を Figure 385 に示す。LiDAR には前方を横切る歩行者の知覚が要求される。

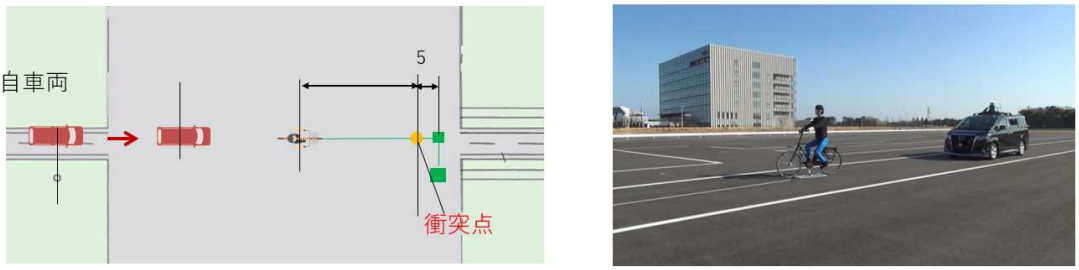


出所：SOKEN, INC, 学校法人 幾徳学園 神奈川工科大学

Figure 385 NCAP 歩行者横断シナリオ

・自転車追従シナリオ

LiDAR 搭載車両が 25km/h で直進しながら、前方を走行する自転車に接近するシナリオである。データ取得時は NCAP ダミー自転車を使用した。自転車追従シナリオの評価概要を Figure 386 に示す。LiDAR には前方を直進する自転車を知覚することが要求される。

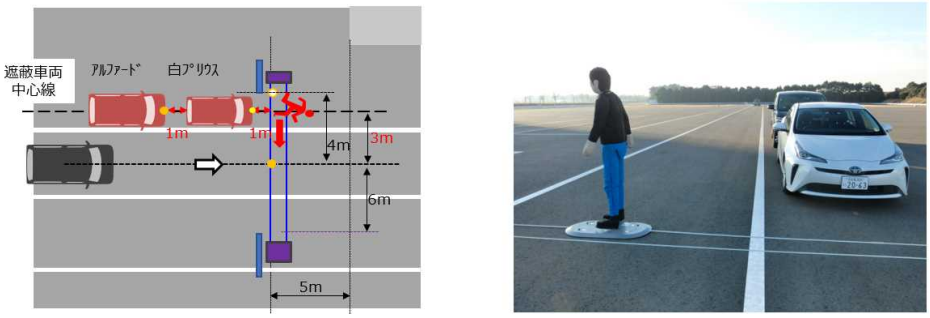


出所：SOKEN, INC, 学校法人 幾徳学園 神奈川工科大学

Figure 386 NCAP 自転車追従シナリオ

・車影飛び出しシナリオ

LiDAR 搭載車両が 25km/h で直進中、停止車両の陰から歩行者が飛び出すシナリオである。データ取得時には NCAP ダミー歩行者を使用した。車影飛び出しシナリオの評価概要を Figure 387 に示す。LiDAR には前方に停止車両の陰から飛び出す歩行者を知覚することが求められる。



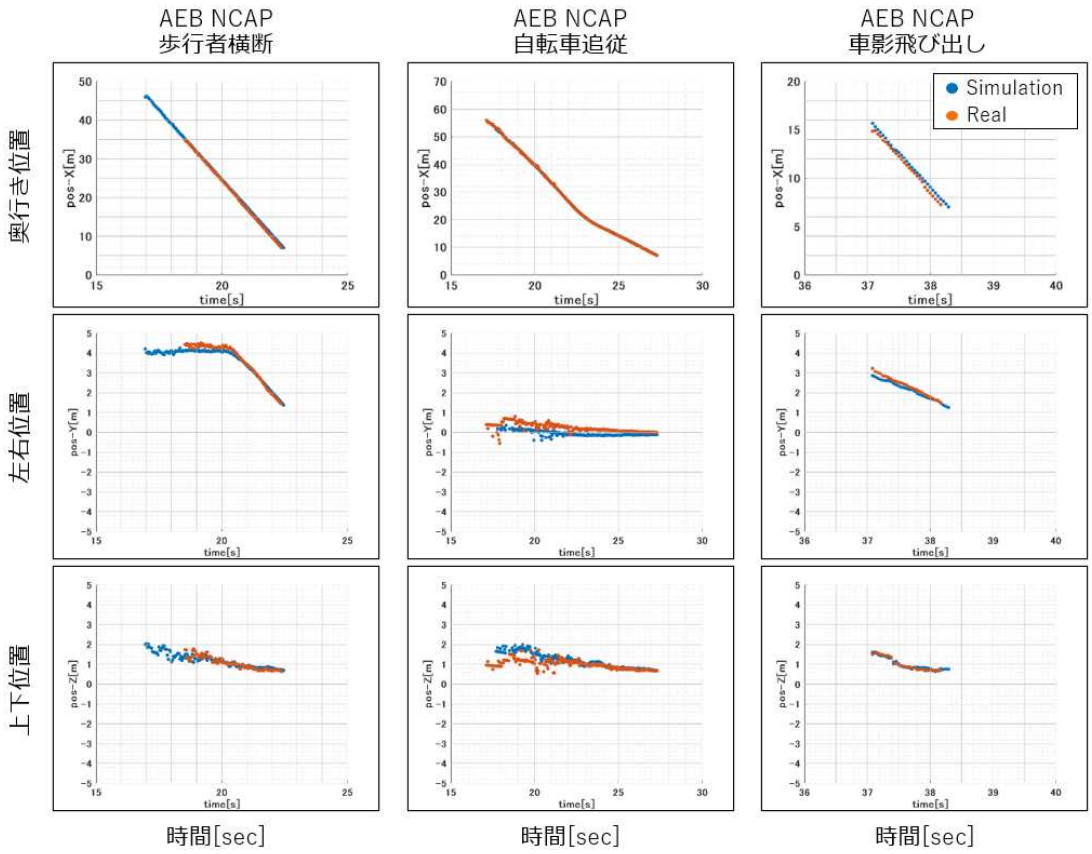
出所：SOKEN, INC, 学校法人 幾徳学園 神奈川工科大学

Figure 387 NCAP 車影飛び出しシナリオ

B-2） 一致性検証結果

[ターゲットの位置]

AEB NCAP 歩行者横断、自転車追従、車影飛び出しシナリオの各ターゲットに対する知覚位置の一致性検証結果を Figure 388 に示す。各ターゲットの位置は縦に並ぶ 3 つのグラフの組で示しており、左から歩行者横断、自転車追従、車影飛び出しの順となっている。縦軸は上のグラフから順に奥行き位置、左右位置、上下位置を示している。横軸は経過時間である。オレンジのプロットが実測結果、青のプロットがシミュレーション結果である。



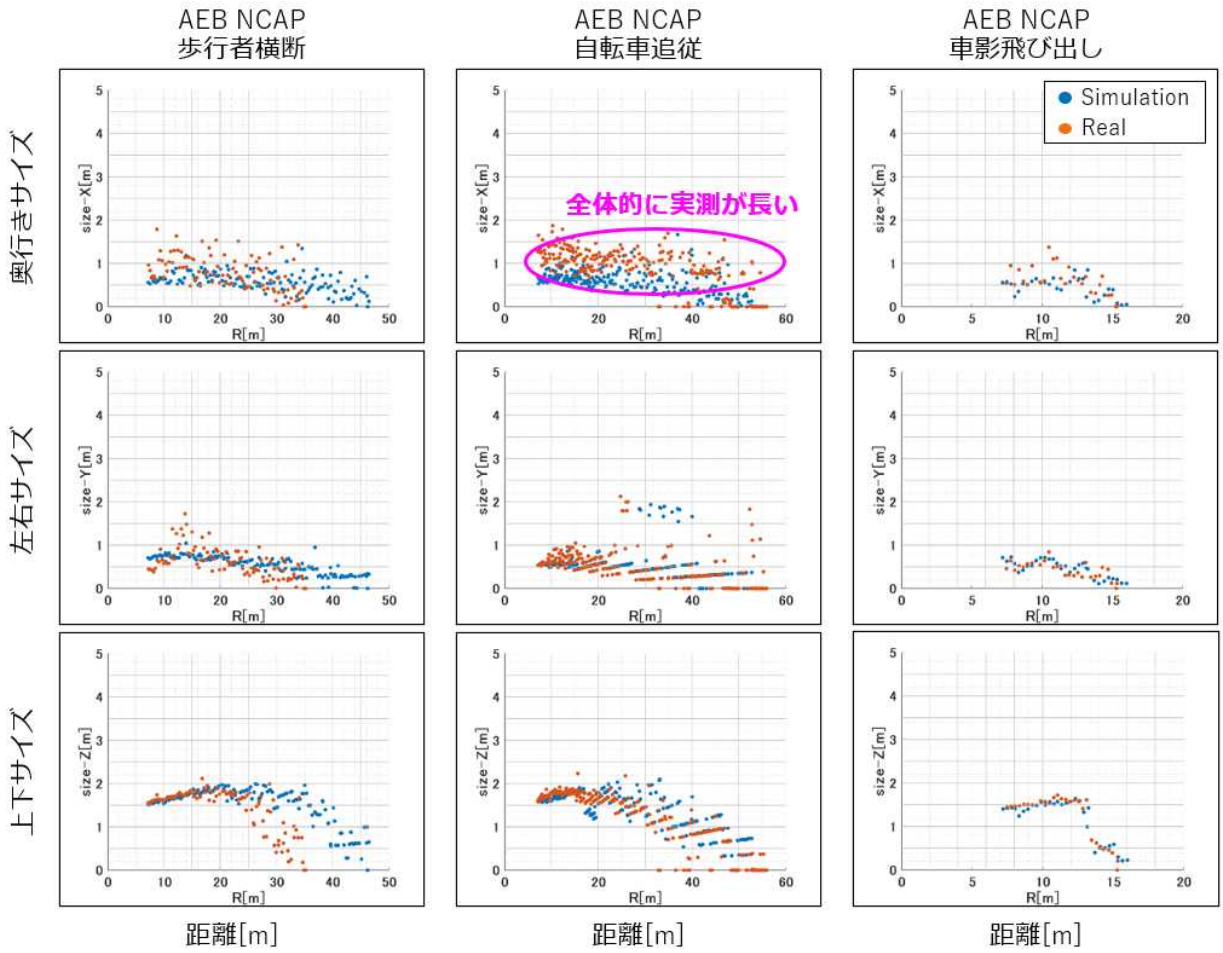
出所：パイオニア（株）

Figure 388 AEB NCAP 3 つのシナリオの各ターゲットに対する知覚位置の一致性検証結果

歩行者横断、自転車追従、車影飛び出しシナリオでのターゲット知覚位置は、奥行き、左右、上下それぞれに対して実測とシミュレーションで高い一致性があることを確認した。各差分としては 1m 以下である。なお、これらのシナリオに対しても NCAP 歩行者については直進接近シナリオと同様に遠方（距離 50m 以上）での検出限界がシミュレーションと実測で差異が見られる。原因については前記と同様、背景光の影響と考える。

[ターゲットのサイズ]

AEB NCAP 歩行者横断、自転車追従、車影飛び出しシナリオの各ターゲットに対する検出サイズの一致性検証結果を Figure 389 に示す。縦に並ぶ 3 つのグラフの組で示しており、左から歩行者横断、自転車追従、車影飛び出しの順となっている。縦軸は上のグラフから順に奥行き方向のサイズ、左右方向のサイズ、上下方向のサイズを示している。横軸は距離である。オレンジのプロットが実測結果、青のプロットがシミュレーション結果である。



出所：パイオニア（株）

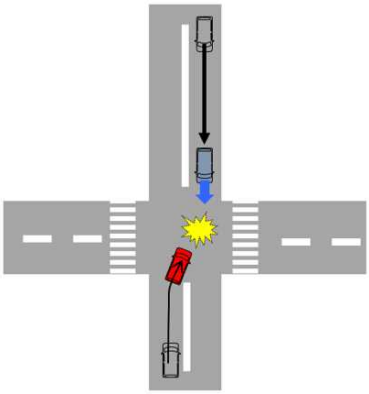
Figure 389 AEB NCAP 3 つのシナリオにおける各ターゲットのサイズ

歩行者横断については近距離にて実測とシミュレーションの一致を確認した。実測にて 35m を超える遠方で歩行者を検出出来ない状況が起きているが、これは前述の同様、実測は昼間に取得されたデータのため背景光によりノイズの影響で検出限界が下がったためと考える。自転車追従については、実測の奥行きサイズが長い結果となった。この原因は、前述の直線接近（自転車）と同様と考える。車影飛び出しは実測とシミュレーションの一致を確認した。

C） 右直衝突シナリオ

C-1） シナリオ概要

センサ搭載車両が交差点内で右折待ち状態で停止後に右折、対向車線を走行する車両との衝突を想定したシナリオである。対向車両には NCAP ダミーカーを使用した。右直衝突シナリオの評価概要を Figure 390 に示す。LiDAR には対向車両の知覚が求められる。

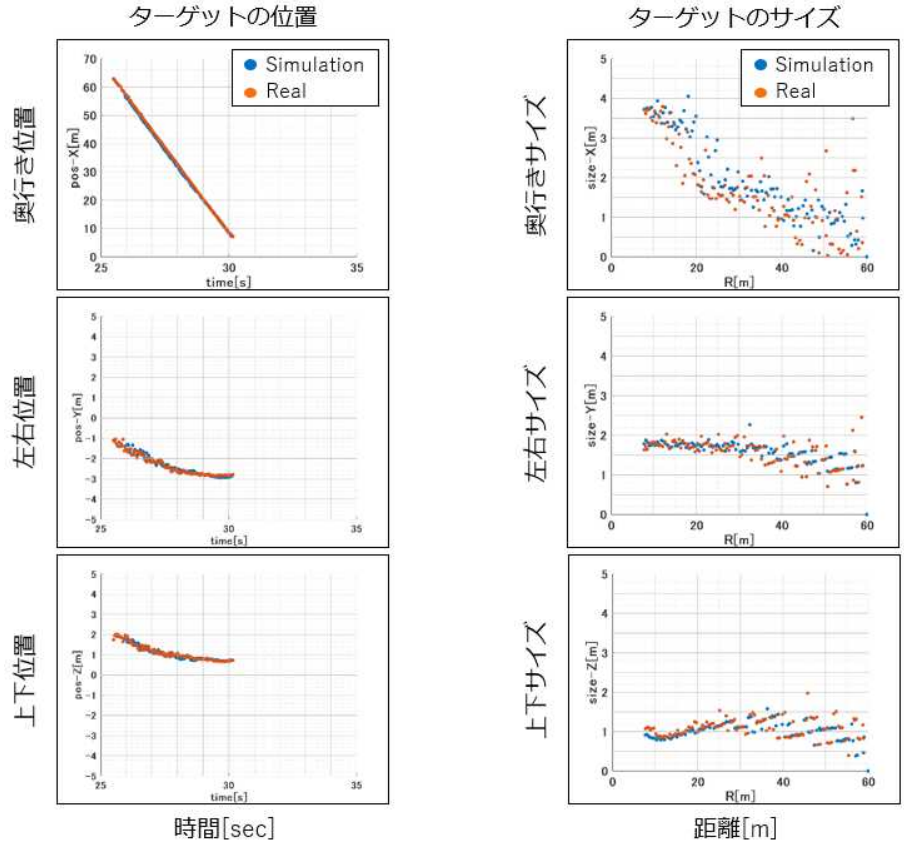


出所：SOKEN, INC, 学校法人 幾徳学園 神奈川工科大学

Figure 390 右直衝突シナリオ

C-2） 一致性検証結果

右直衝突シナリオにおけるターゲット（対向車）の知覚位置、サイズの一致性検証結果を Figure 391 に示す。縦に並ぶ 3 つのグラフの組で示しており、左側が位置、右側がサイズである。位置の結果の縦軸は上から順に奥行き位置、左右位置、上下位置、横軸は経過時間である。サイズの結果の縦軸は上から順に奥行きサイズ、左右サイズ、上下サイズ、横軸は距離である。オレンジのプロットが実測結果、青のプロットがシミュレーション結果である。なお、このシミュレーションでは対向車に NCAP ダミーカーを使用している。



出所：パイオニア（株）

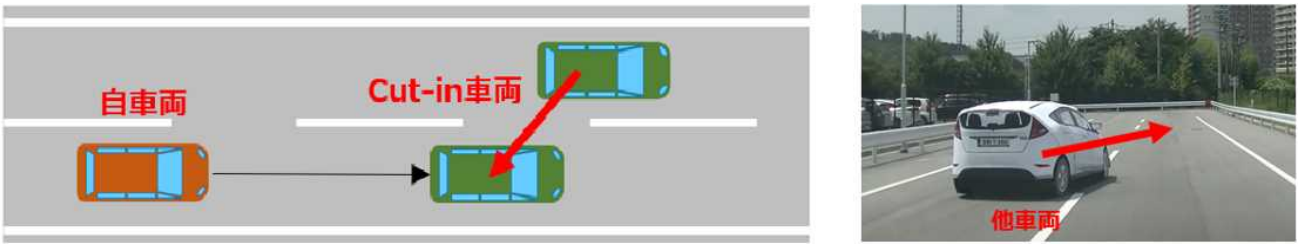
Figure 391 右直衝突シナリオにおける対向車の知覚位置とサイズの一致性検証結果

このシナリオについては、ターゲットとなる対向車の位置、サイズともに実測とシミュレーションで高い一致性を確認できた。比較的差の大きい奥行方向で、位置、サイズともに差分は 1m 以下である。

D） ALKS Cut-In シナリオ

D-1） シナリオ概要

ALKS Cut-In は、自車両の走行車線の前方に他の車両が車線変更して入り込んでくるシナリオである。ALKS Cut-In シナリオのイメージを Figure 392 に示す。



出所：SOKEN, INC, 学校法人 幾徳学園 神奈川工科大学

Figure 392 ALKS Cut-In シナリオ

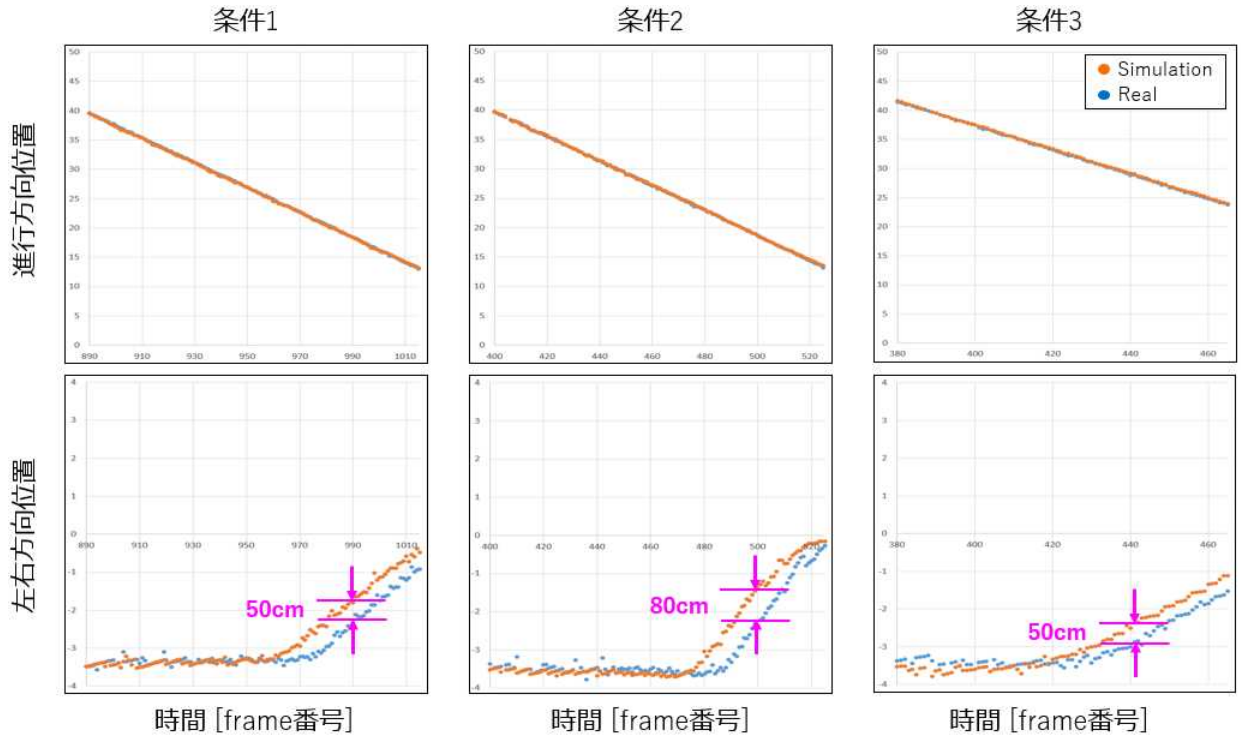
ALKS_Cut-In シナリオについては自車両の速度が異なる 2 つの実験が行われた。実験 2-1-1 は自車速度 60km/h、実験 2-1-2 は 40km/h である。それぞれの実験で他車両との距離、横方向の移動速度の条件を変えて 3 パターンのデータ取得が行われている。

- 実験 2-1-1 条件 1：自車速度 60km/h、他車との距離 12m、他車横方向移動速度 1.5m/sec
- 実験 2-1-1 条件 2：自車速度 60km/h、他車との距離 12m、他車横方向移動速度 2.3m/sec
- 実験 2-1-1 条件 3：自車速度 60km/h、他車との距離 22m、他車横方向移動速度 1.5m/sec
- 実験 2-1-2 条件 1：自車速度 40km/h、他車との距離 15m、他車横方向移動速度 0.75m/sec
- 実験 2-1-2 条件 2：自車速度 40km/h、他車との距離 15m、他車横方向移動速度 1.5m/sec
- 実験 2-1-2 条件 3：自車速度 40km/h、他車との距離 25m、他車横方向移動速度 0.75m/sec

一致性検証は上記各条件で取得されたデータを用いて実施した。各条件のデータに対して他車の進行方向、左右方向の検出位置を実測とシミュレーションとで評価する。

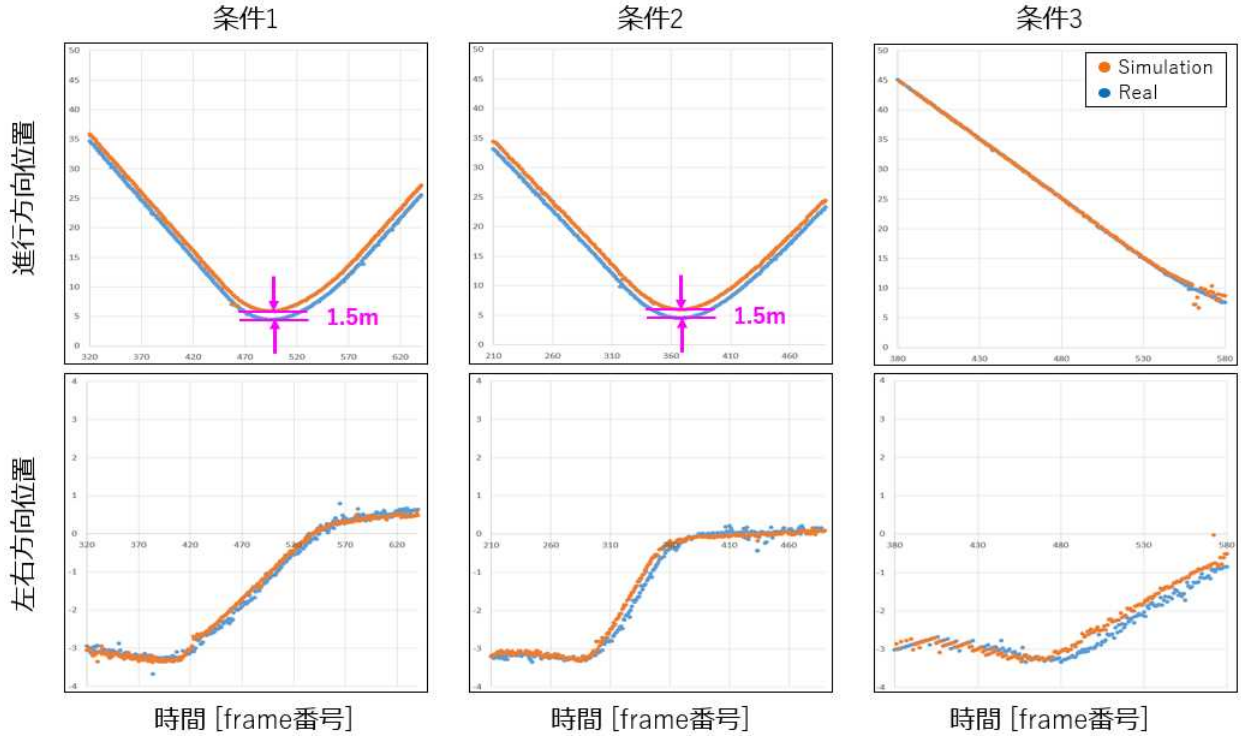
D-2） 一致性検証結果

実験 2-1-1 における他車検出位置の一致性検証結果と実験 2-1-2 における他車検出位置の一致性検証結果をそれぞれ Figure 393 と Figure 394 に示す。それぞれ縦 2 つのグラフで示しており、上が自車両に対する他車の進行方向位置、下が左右方向位置である。各条件での結果を左から 1,2,3 の順に並べた。青のプロットが実測、オレンジのプロットがシミュレーション結果である。



出所：パイオニア（株）

Figure 393 ALKS Cut-In シナリオ：実験 2-1-1 における他車検出位置の一致性検証結果



出所：パイオニア（株）

Figure 394 ALKS Cut-In シナリオ：実験 2-1-2 における他車検出位置の一致性検証結果

自車と他車との進行方向位置において、実験 2-1-1 では時間経過とともに Cut-In してきた他車と自車との距離が縮まっていること、実験 2-1-2 では他車と自車との距離が一旦縮まり（最も近づく所で 5m 程度）、その後離れていくことが分かる。左右方向の位置については当初－3m（自車両の右側 3m ほどの位置。ほぼ車線一本分に相当）であったが、Cut-In 動作により、0m 付近に移動していることが分かる。

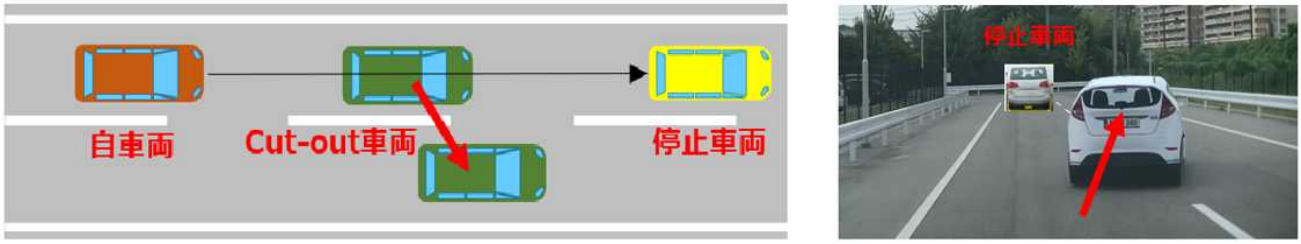
一致性に関しては、実験 2-1-1 では進行方向位置は完全に一致しているが、左右方向位置には 50cm から 70cm の差異があることを確認した。実測とシミュレーション結果の一致性検証を行う際には 2 つのデータ間の時刻合わせが必要である。左右位置の差異は時刻合わせを進行方向位置が合うように行ったため、より誇張された状態になっていることが原因の可能性がある。仮に左右方向の動きで時刻合わせを行うと、進行方向の位置がずれるトレードオフの関係になっていると考える。なお、左右方向の移動速度（左右位置のグラフの傾きに対応する）は実測とシミュレーションで一致している。

実験 2-1-2 では、2-1-1 とは逆に左右方向位置はほぼ一致性しているが、進行方向の位置に 1.5m 程度のずれがあることを確認した。進行方向位置の下に凸のカーブを見ると、実測とシミュレーションでの時刻は合っていると思われるので、この差は今回の検証で見つかった課題の一つと認識している。

E） ALKS Cut-Out シナリオ

E-1） シナリオ概要

ALKS Cut-Out は、自車両前方で同じ車線を走行中の車両が車線変更して隣の車線に入り込むと同時に、自車両の前方に停止車両が現れるというシナリオである。ALKS Cut-Out シナリオのイメージを Figure 395 に示す。



出所：SOKEN, INC, 学校法人 幾徳学園 神奈川工科大学

Figure 395 ALKS Cut-Out シナリオ

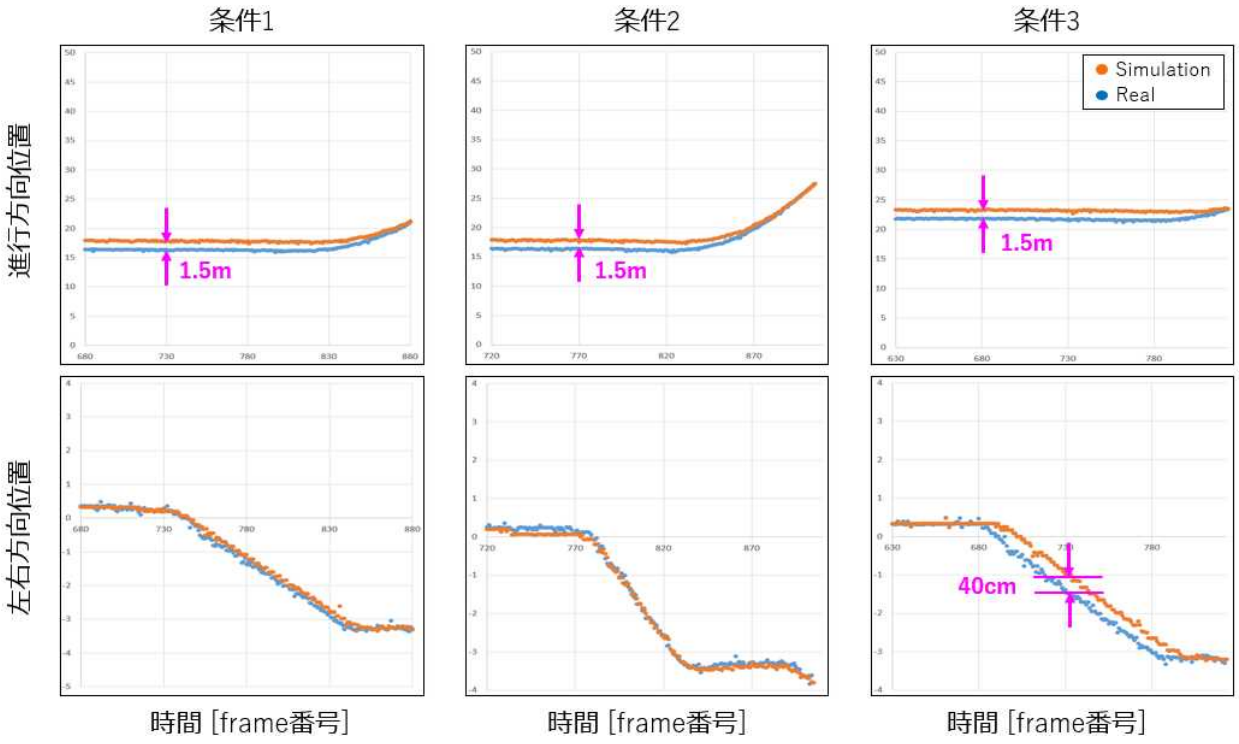
ALKS Cut-Out シナリオは実験 2-2-1 として車間距離などの条件を変えて以下の 3 パターンが行われた。

- 実験 2-2-1 条件 1：自車速度 30km/h、Cut-Out 車両との距離 16.6m、横方向移動速度 0.9m/sec
- 実験 2-2-1 条件 2：自車速度 30km/h、Cut-Out 車両との距離 16.6m、横方向移動速度 1.8m/sec
- 実験 2-2-1 条件 3：自車速度 30km/h、Cut-Out 車両との距離 22m、横方向移動速度 0.9m/sec

一致性検証は上記各条件で取得されたデータを用いて実施した。車線を外れていく Cut-Out 車両の位置と、自車の前方に現れる停止車両の位置を実測とシミュレーション結果とで評価した。

E-2） 一致性検証結果

実験 2-2-1 における Cut-Out 車両の検出位置を Figure 396 に示す。それぞれの検出位置は縦に並ぶ 2 つのグラフで示しており、上が自車両に対する Cut-Out 車両の進行方向位置、下が左右方向位置である。各条件での結果を左から 1,2,3 の順に並べた。青のプロットが実測、オレンジのプロットがシミュレーション結果である。



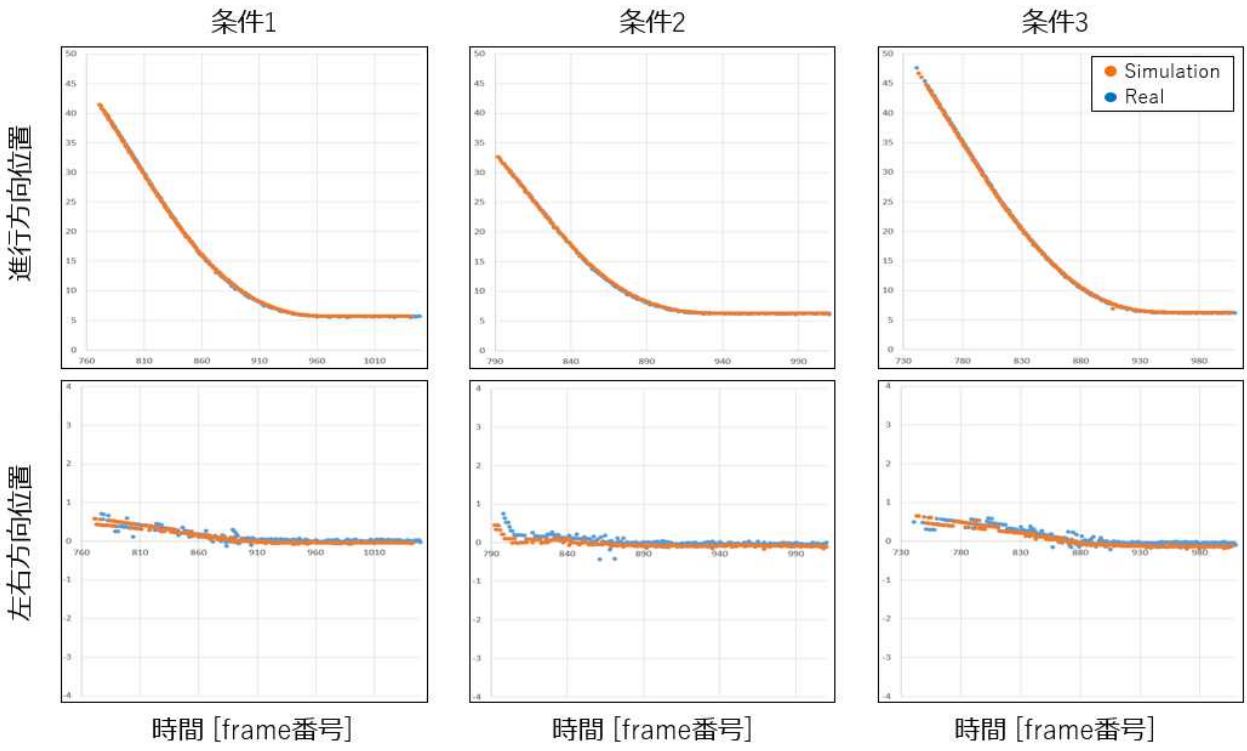
出所：パイオニア（株）

Figure 396 ALKS Cut-Out シナリオ：実験 2-2-1 における Cut-Out 車両検出位置の一致性検証結果

自車両と Cut-Out 車両との左右方向の位置を見ると、当初は 0m 付近（同一車線にいることを表す）であるが、Cut-Out 動作により、その位置が－3m から－3.5m に変化していることが分かる。これは Cut-Out 車両が右側の車線に移動したことを表している。進行方向位置を見ると、当初は 20m 前後の位置で進み（2 つの車両がほぼ等速であることを示す）、Cut-Out 車両の車線変更のアクション完了後に位置が離れることが分かる。これは停止車両が見えたことにより自車両が減速し、その結果 Cut-Out 車両の位置が離れていくことを表している。

一致性に関しては、条件 1 から 3 の全てで進行方向位置に 1.5m 程度のずれが確認できる。条件 1 と 2 については左右方向の位置が変化するタイミングが合っているので時刻合わせは問題ないと考える。よって、このずれも今回の検証で得られた課題の一つと考える。条件 3 については左右方向位置に 40cm のずれがあり（傾きは同等なので左右方向への移動速度は同じ）、時刻合わせが最適ではない可能性がある。

次に実験 2-2-1 における前方停止車両の検出位置を Figure 397 に示す。それぞれの検出位置は縦に並ぶ 2 つのグラフで示しており、上が自車両に対する前方停止車両の進行方向位置、下が左右方向位置である。各条件での試行を左から 1,2,3 の順に並べた。青のプロットが実測、オレンジのプロットがシミュレーション結果である。



出所：パイオニア（株）

Figure 397 ALKS Cut-Out シナリオ：実験 2-2-1 における前方停止車両検出位置の一致性検証結果

進行方向位置の変化から、自車両が前方の停止車両に徐々に近づき、最終的に 5m から 6m 手前で停止したことが分かる。左右方向位置は 50 ㎝から 0cm 近傍であり、同一車線内を走行したことが分かる。

一致性に関しては、条件 1 から 3 の全てで進行方向位置、左右方向位置ともに実測とシミュレーションとでほぼ完全に一致という結果となった。

F） NCAP 一致性検証の結果総括および抽出された課題

ここまで、Euro NCAP 等で定義される安全性評価試験プロトコルのシナリオを再現して取得したデータを用い、実測とシミュレーションとの一致性検証結果について報告した。直線接近、AEB NCAP、右直衝突シナリオでは、ターゲットの位置(奥行き方向、左右方向、上下方向)についての一致性を確認した。ターゲットのサイズについては、車両および自転車をターゲットとした場合の奥行き方向サイズで実測とシミュレーションに差異がある結果となったが、それぞれの点群の状態を確認することで差異の原因を推察することができた。

ALKS Cut-In、Cut-Out シナリオでは、ターゲットとなる Cut-In 車両、Cut-Out 車両がレーンを移動する挙動（レーンの移動量、移動速度）、前方停止車両の位置の一致性を確認できたが、移動する車両（Cut-In 車両、Cut-Out 車両）の進行方向位置に 1.5m 程度の差異がある結果となった。この差異が起こったケースでは、いずれも実測の方がシミュレーションより 1.5m 程度近い結果となっている。また、その差は時刻の経過とともに変化しないオフセット的なものである。今後この差異の原因を調査する予定である。

3. 日独連携への貢献

JTTT3.2 LiDAR パートにメンバーとして参加している。

11 月下旬にキックオフミーティングが行われ、日欧それぞれから

・LiDAR のモデル(独側からは FMU のモデルが紹介された)

・環境のモデリングとシミュレーションのプラットフォーム

・テスト環境(実験室レベルからプル―ビンググラウンドまで)

・一致性検証の方法、結果

・LiDAR 不調(降雨や霧など)の実験施設

などの具体的な情報が交換された。その上で日独の連携をどのように進めるかの意見交換がされ、LiDAR モデルやレイトレーシングによる空間データの交換を目指し、専門家による小グループでインターフェースの議論から開始することとなった。

2 月上旬にインターフェースを議論するミーティングが行われ、

・空間との I/F

・LiDAR モデルの出力 I/F

・評価シナリオ

などの情報交換が為された。

空間との I/F については、空間から得られる反射情報に含まれるパラメータを日独のプラットフォームで比較し、共通する部分、変換可能な部分、異なる部分を明確化した。出力 I/F は標準的な PCD 形式、JSON 形式が俎上に上がり、次回以降も継続議論となっている。評価シナリオについては、まずは標準反射体などを用いたシンプルなシナリオで進める方向となり、日独それぞれ次回のミーティングに案を持込み議論することとなった。

(3)次年度以降の計画

1. LiDAR モデル一致性検証

2021/10 月以降に取得したデータについての一致性検証について、神奈川工科大学での実施をサポートする。(2022/4～2023/2)

2. 不調条件拡張

A) 雨の影響のモデル化

空間中に存在する雨滴での信号の反射による偽点のモデル化を行う。またその他の影響についてもコンソーシアム内で優先順位を検討・共有し、その優先順位に基づきモデル化および一致性検証を行う。(2022/4～2023/2)

B) 雪の影響のモデル化

2022 年 1 月に士別テストコース、エフティテクノ豊頃試験場にて再度取得したデータを評価し、コンソーシアム内で優先順位を検討・共有し、その優先順位に基づきモデル化および一致性検証を行う。(2022/4～2023/2)

3. 日本自動車工業会(自工会)AD 安全性評価分科会認識 SWG 連携

DIVP®と自工会 AD 安全性評価分科会認識 SWG との連携において、認識 SWG に参加し、シミュレーションの妥当性検証シナリオ作成に協力するとともに、DIVP®側の考える一致性検証とのギャップが生じないように神奈川工科大学をサポートする。(2022/4～2023/2)

4. 日独連携、金沢大学連携、臨海部実証実験 Step2 への技術支援

DIVP®が実施する日独連携(VIVID)と、金沢大学連携、臨海部実証実験 Step2 において、技術的課題が発生した場合の原因分析、技術に関わる資料作成等技術支援を実施する。(2022/4～2023/2)

5. 2. 8 「B4. センサモデル構築のためのデータ取得」(株式会社 SOKEN)

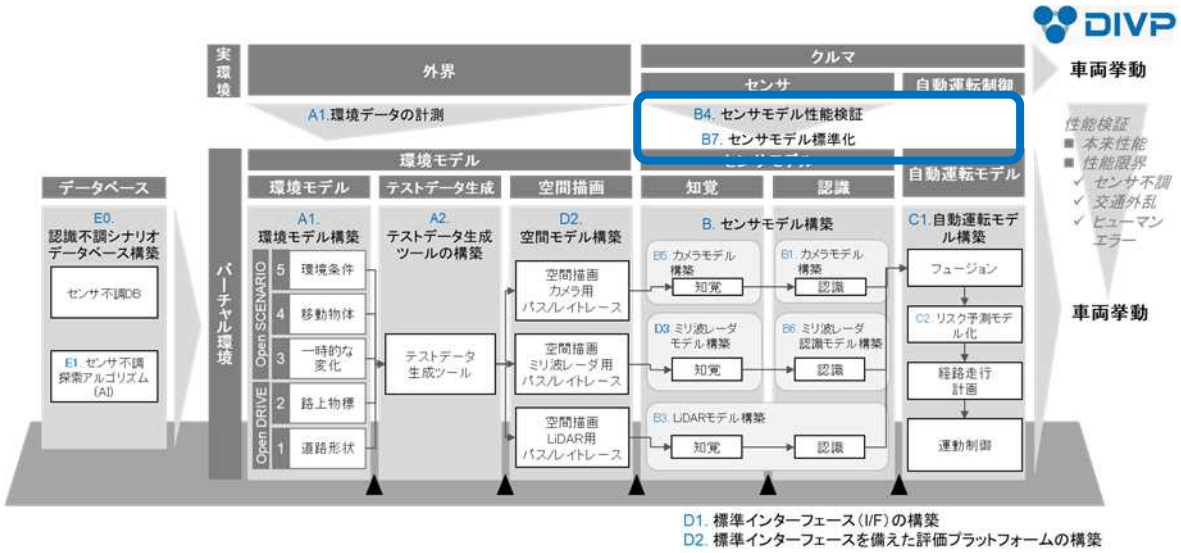


Figure 398　本研究の位置付け

本研究では、上記で構築したセンサモデルのシミュレーション精度を検証する。

■ 事業目的

各センサ(ミリ波レーダ/カメラ/LiDAR)の実データの取得環境構築、及びセンサモデルのシミュレーション結果と実測結果を比較検証することを目的とする。

■ 事業概要

各センサ(ミリ波レーダ/カメラ/LiDAR)を搭載した実験計測車両を構築する。

A パートにより定義した評価シーン・不調シナリオを再現可能な、試験環境を構築又は場所を選定し、実走してデータを取得する。実車走行した各センサ評価結果とセンサモデルのシミュレーション結果を比較検証し、A/B/D2 パートへのフィードバックを行う。また、開発シミュレータの社会実装に向けて、製品センサ評価や次世代センサ開発にシミュレータを活用し、課題の抽出及びユーザ視点での改善提案を行う。

■ 実施計画　　▽インプット　　★アウトプット（成果物）

事業項目	2018年度				2019年度				2020年度				2021年度				2022年度			
	第1四半期	第2四半期	第3四半期	第4四半期	第1四半期	第2四半期	第3四半期	第4四半期	第1四半期	第2四半期	第3四半期	第4四半期	第1四半期	第2四半期	第3四半期	第4四半期	第1四半期	第2四半期	第3四半期	第4四半期
①計測車両の要件定義			▽搭載センサ情報						フュージョン・制御対応											
						★実験車両設計														
②計測車両の構築							▽センサ現物						▽追加センサ			▽追加センサ				
										★実験車両				★		★				
③実車による実環境計測・データ検証							実測データ★				★	★	★	★	★	★	★	★	★	
④シミュレータの応用テーマ研究													基礎検討							
											課題抽出・改善案考案									
														提案まとめ		★			★	

(1)令和3年度の成果(まとめ)

センサが苦手な実環境シーン(雨、雪、かすれ白線、逆光等)での知覚、認識データを取得。
一致性検証によるシミュレーション精度向上に期待

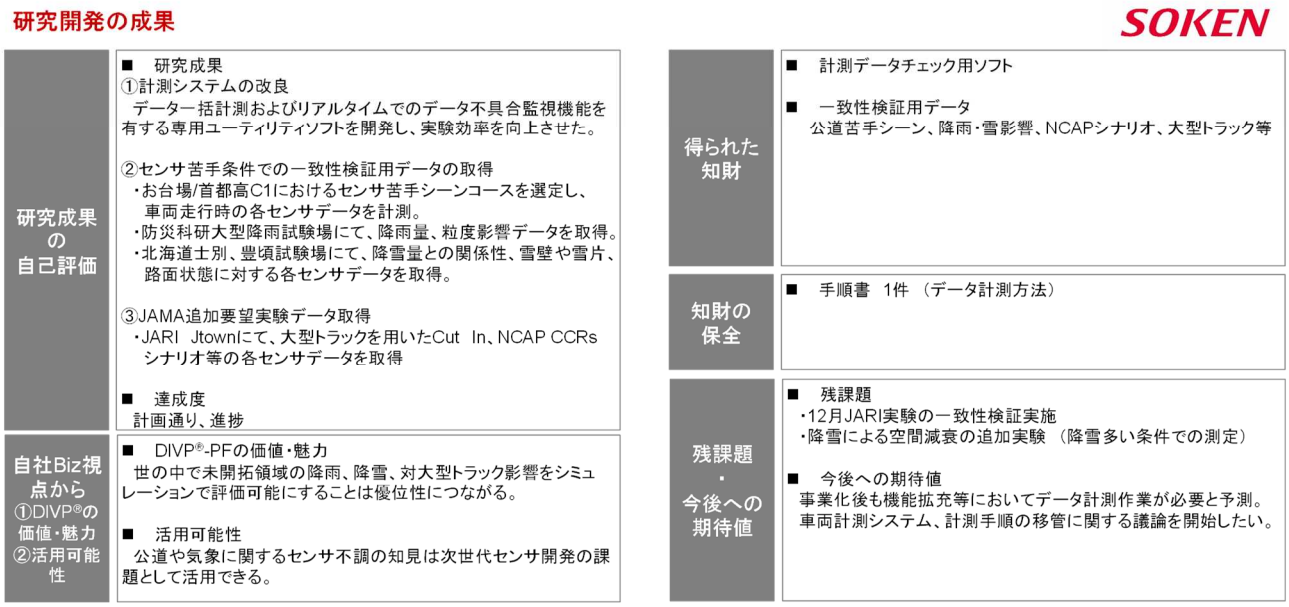


Figure 399 B4 パート 研究開発の成果

令和 2 年度は、JARI テストコースでの一致性検証用データ計測に加え、公道(東京お台場、首都高 C1)でのセンサ苦手条件の調査、防災科学技術研究所での降雨影響調査を目的とした実験を行った。

令和 3 年度は、令和 2 年度に明らかににあった実験システムの課題を解決すると共に、センサ苦手条件にフォーカスをあてた一致性検証用データ取得を行った。

実験システムの改良については、データ不具合をリアルタイムでモニターできる専用ユーティリティソフトを開発した。これまで、テストコースや公道試験において、GNSS の緯度経度情報、IMU の車体姿勢情報の不具合があり、実験終了後のシナリオ化時に発覚するため、再測定必要となるケースがあった。本ソフトによってリアルタイムにデータ不具合を確認することができ、実験やり直しを未然に防止するシステムに仕上げることができた

一致性検証用データ計測としては、お台場、首都高 C1 でのセンサ苦手シーンでの一致性検証用データ取得の他、防災科学技術研究所(茨城つくば市)の大型降雨試験場を用いた降雨実験データ、トヨタ自動車士別試験場(北海道士別市)及びエフティテクノ豊頃試験場(北海道豊頃町)にて降雪影響についての実験データを取得完了した。

(2)令和3年度の成果

① 計測車両の要件定義

これまでの実験で明らかにした課題と要件のまとめを下図に示す。 詳細について以下説明する。

Table 99　実験システムの課題と要件まとめ

出所：SOKEN, INC.

実験システムの課題	要件
公道、テストコース試験におけるIMU、GNSSデータ異常防止	車両バッテリーとは別の直流電源を使用
高架下の多い公道試験コースでのGNSS精度改善	高利得、偏波比の高い測量級アンテナを推奨　（例：利得37dBi、XPR18dB）
複数センサ、大容量通信時のデータ欠落対策	通信容量の大きいカメラ、LiDARデータを同じHUBで通信させない
計測した大容量データの移動時間短縮	SSDへのデータ直接保存方式採用
実験後測定データ異常発覚による再実験の防止	測定データをリアルタイムにモニタし、異常判定可能なソフトの使用

・公道、テストコース試験における IMU、GNSS データ異常防止

要件：車両バッテリーとは別の直流電源を使用

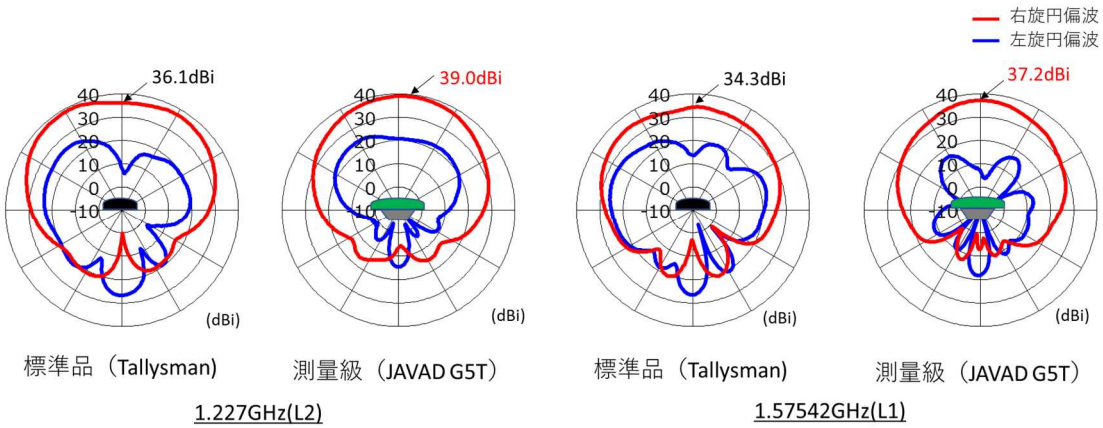
標準のシガーレットからの電源供給の場合、オープンスカイに近い条件でも緯度経度がドリフトする場合がある。原因は電源系からのシステムノイズの干渉であり、直流安定化電源等、実験車両の電源・グランドからフィルタを通して IMU 電源供給する方式に変更することで改善される。

・高架下の多い公道試験コースでの GNSS 精度改善

要件：高利得、偏波比の高い測量級アンテナを推奨　（例：利得 37dBi、XPR18dB）

RT-3000 の標準アンテナ（Tallysman）と測量級アンテナ（Javad G5T）の指向性比較結果を下図に示す。

標準品のアンテナに比べると測量級アンテナは最大利得が 3dB 程度高く、交差偏波比（XPR、右旋偏波利得と左旋偏波利得の比）も 10dB 以上高いことが分かる。



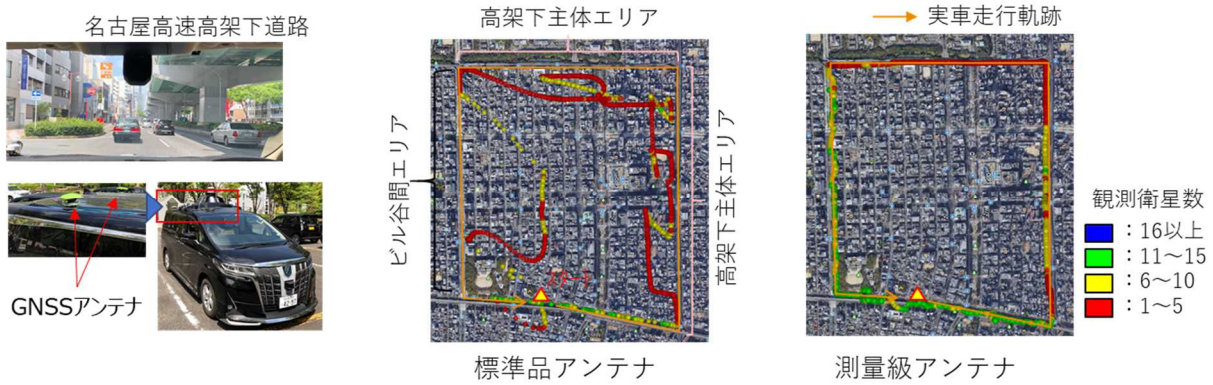
出所：SOKEN, INC.

Figure 400　GNSS 用アンテナの指向性性能比較

お台場のゆりかもめ下の衛星受信悪環境条件を想定し、同様に条件して名古屋栄周辺の名古屋高速高架下コースにて、アンテナと観測衛星数、及び緯度経度ドリフトの関係性を調査した。測定環境及び結果について下図に示す。

測量級アンテナを使用した場合、標準品アンテナの観測衛星数に比べて平均 3 個程度、観測衛星数が増加している。また、実車走行軌跡に対する緯度経度のドリフト量も少なくなることが分かった。これは高利得による S/N 向上効果と、誤差の大きい左旋偏波(ビル等での反射波)を受信しにくくなったことが理由と考えている。

(なお、本実験ではアンテナ性能の違いによる観測衛星数、位置精度に着目したため、IMU キャリブレーションは実施していない。そのため、IMU ジャイロ情報による経路補正機能が効かない状態(アンテナ性能主体)の結果となっている。)



出所:SOKEN, INC.

Figure 401　アンテナの違いによる観測衛星数、位置計測結果(名古屋市栄周辺高架下道路)

・複数センサ、大容量通信時のデータ欠落対策

要件:通信容量大のカメラ、LiDAR データのイーサネット接続は個別 HUB を用いる。

従来システム構成ではイーサネット通信時のセンサデータ間干渉により、Bag データの一部が欠落する問題が生じた。これはプロジェクト開始当初 1000base-T で十分と判断していたが、LiDAR 数増加(3 台→4 台)、カメラ知覚データの bag 保存が加わり、容量不足が生じたものと考えられる。

本問題への対応として、LAN 規格を 10Gbase-T に高速化。使用ケーブルもカテゴリ 7 に全て変更した。HUB については、これまで 1 つの HUB で全てのセンサデータを接続していたが、特にカメラ通信との分離が必要と考え、カメラ、LiDAR、ミリ波、それぞれ個別 HUB でマスターPC(デスクトップ型 HPC)に接続する構成とした。本構成にて 21 年 5 月に公道不調 DB 実験を行い、各センサデータが欠落なく計測できていることを確認した。

・大容量計測データのコピー時間削減

要件:PC 内ハードディスク保存から SSD への直接保存方式に変更

当初、JARI テストコースでの実験で比較的データ容量が少なかったこともあり、各センサ情報を専用ノート PC に保存し、実験終了後に吸い上げる方法をとっていた。しかし、公道実験では 1 測定 20 分程度(LiDAR データでは約 160GB の容量)の大容量データとなり、1 日の実験終了後のデータコピー作業に 1.5～2h 程度の時間が必要となる状況であった。

今回、データ保存方法として、特にデータ容量の大きい LiDAR、カメラ、車両情報のデータを各 PC 内ハードディスクから外付け SSD への保存に切り替えた。使用する SSD は 1TB～2TB のものを使用。SSD への直接保存には USB2.0 以上のポートを使用し、通信遅延によるデータ欠落がないことを確認した。

＜実験後測定データ異常発覚による再実験の防止＞

要件:測定データをリアルタイムにモニタし、異常判定可能なソフトの使用

令和 2 年度実験において、緯度経度のドリフトやデータ欠落等の異常が確認された。本年度は現場でデータ

異常を確認するためのソフト開発に取り組んだ。

開発ソフトの機能例として、Dashboard 機能を以下に示す。

本機能では、PC から実行されている各 ROS ノード、トピックの状態、及び GNSS、センサ類の状態を監視する。特に緯度経度と IMU 情報については突発的にデータがドリフトするケースを監視し、一つ前のメッセージと比較して閾値以上の場合、Error を明示する。(閾値については別途で設定可能)

出所:SOKEN, INC.

Figure 402 データチェックソフト 異常監視機能(Dashboard)

もう一つの機能例として、Debug 機能を以下に示す。

本機能では GNSS、Odom 情報を基に 3D マップ上の位置と各種数値の変化のグラフを表示する。また、右下段には PC 間の時間差もしくは各ノードの ping 時間(5 秒ごとに更新)が表示され、タイムスタンプ監視も行う。

MAP は JARI Jtown、お台場、首都高 C1 に対応しており、今後拡張可能。自車及びターゲットの緯度経度情報をシナリオ MAP 上に描写し、MAP 上での緯度経度ズレ、ターゲットの進行方向異常等を目視で確認できる。

出所:SOKEN, INC.

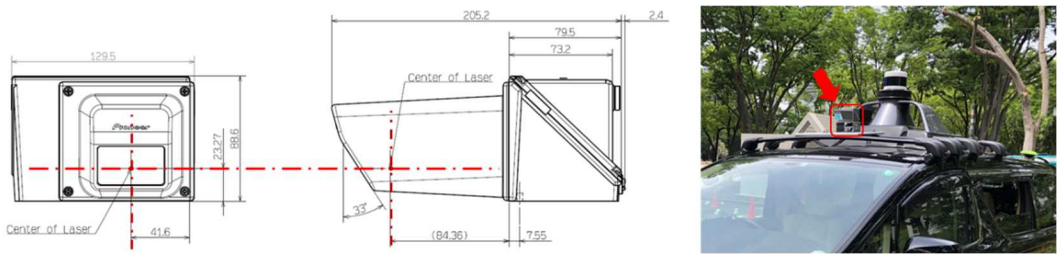
Figure 403 データチェックソフト 異常監視機能(Debug)

② 計測車両の構築

令和 3 年度では PSSI 社製ミディアムレンジ対応型 LiDAR(以下 PSSI Medium LiDAR)を新たに搭載した。

PSSI_LiDAR Medium の外観図及び搭載状態写真を下図に示す。

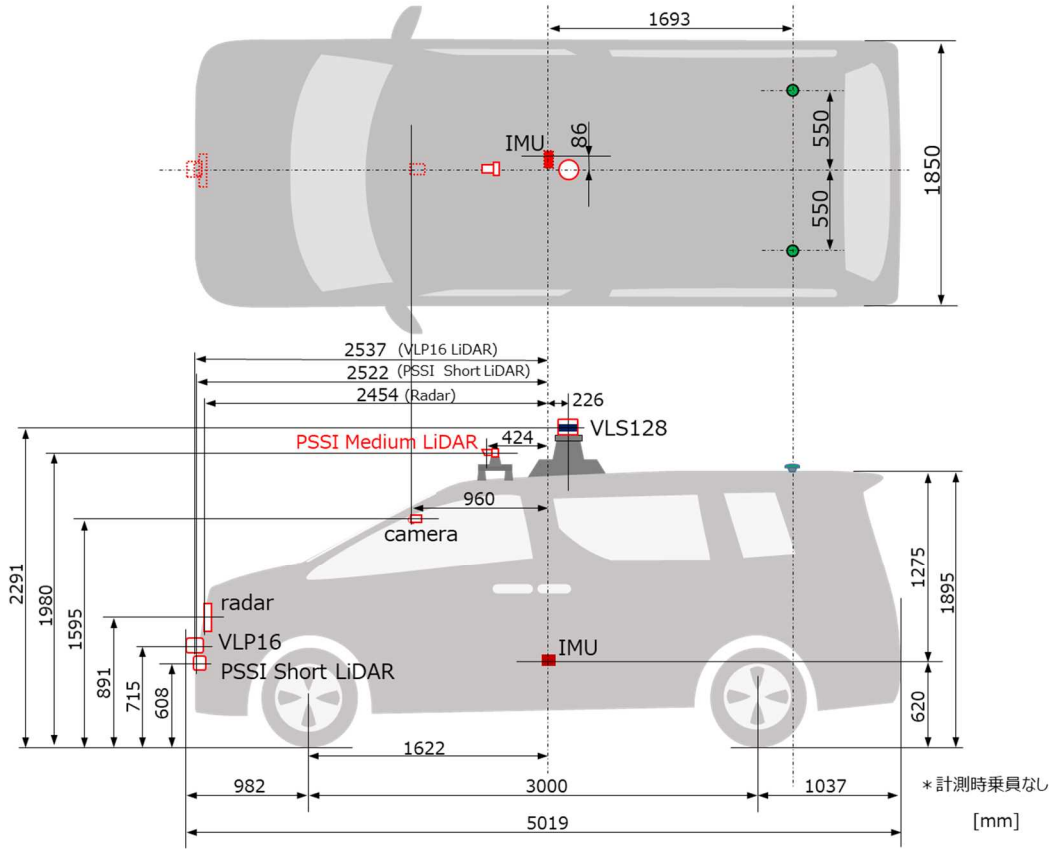
本 LiDAR は奥行が 200mm あり、フロントバンパー内ではラジエター等との干渉が起こるため、ルーフ上への搭載とした。ルーフ上においては、VLS128 の視野に入らない高さ、かつ実験車両アルファードのルーフやボンネット部が PSSI Medium LiDAR の視野に入らない位置に固定した。(角度は 2.5° 下向きに設定)



出所:パイオニア(株)、SOKEN.INC

Figure 404 PSSI Medium Range LiDAR の搭載

最新の各センサ搭載位置を下図に示す。(IMU 軸基準)



出所:パイオニア(株)、SOKEN.INC

Figure 25 実験車両へのセンサ搭載位置情報

③ 実車による実環境計測・データ検証

令和 3 年度は、公道センサ不調 DB 実験(5 月、東京お台場・首都高 C1)、降雨実験(7 月、防災科研)、JAMA 降雪実験(1 月、士別試験場、豊頃試験場)、要望追加実験(11 月、JARI Jtown)、の 4 回の実車実験を行った。

＜公道センサ不調 DB 実験、5 月＞

カメラ、LiDAR、ミリ波レーダが苦手とするシーンでのデータ計測のため、東京お台場、首都高 C1 に走行コースを設定し、データ計測を行った。苦手シーンとしては、高反射路面（LiDAR）、高架反射（ミリ波）、逆光（カメラ）の他、道路白線への樹木影映り込み（カメラ）、トンネル入り口反射（ミリ波）、雨巻き上げ（LiDAR、カメラ）等。

＜降雨実験、7 月＞

降雨によるセンサ検知性能への影響を定量化し、モデル化につなげるため、防災科学技術研究所の大型降雨試験場にて実験を実施した。ミリ波レーダ用実験では、ターゲット（コーナリフレクター）の反射受信強度において、降雪量をパラメータに空間減衰との関係性を評価した。LiDAR 実験では、レンズ表面への雨滴付着の影響を調べるため、GoPro カメラを設置し、ターゲット（ホワイトボード、再帰性反射材）の反射強度との関係性に関するデータを取得した。

＜降雪実験、1 月＞

降雨と同様に降雪によるセンサ性能への影響モデル化のための実験を北海道トヨタ自動車士別試験場、及エフティテクノ豊頃試験場にて実施した。

降雪による空間減衰特性評価、雪巻き上げ現象、公道での白線認識不調シーンの他、ミリ波レーダにとって懸念されるフロントグリルへの雪付着の影響に関する実験データも取得した。

出所：SOKEN, INC.

Figure 405　公道不調、降雨、降雪実験内容

＜JAMA 要望に対する追加実験、11 月＞

DIVP®の価値向上に向け、JAMA から要望のあった機能実装への追加実験を行った。

対大型トラック実験では、12×2.5×3.8m の大型トラックをターゲット車両として用い、隣接車線並走時のマルチパス影響、ALKS Cut IN シナリオ等の実験を行った。

NCAP についても特に CCRs（対停止車両　AEB）シナリオへの要望に対応すべく、大型トラックターゲット実験、夜間 CCRs の他、PTW、Escooter、ダミー人形に対するデータも取得した。また、車影飛び出しシナリオでは、検知が難しい子供ダミー人形に対する実験を行い、データ取得した。

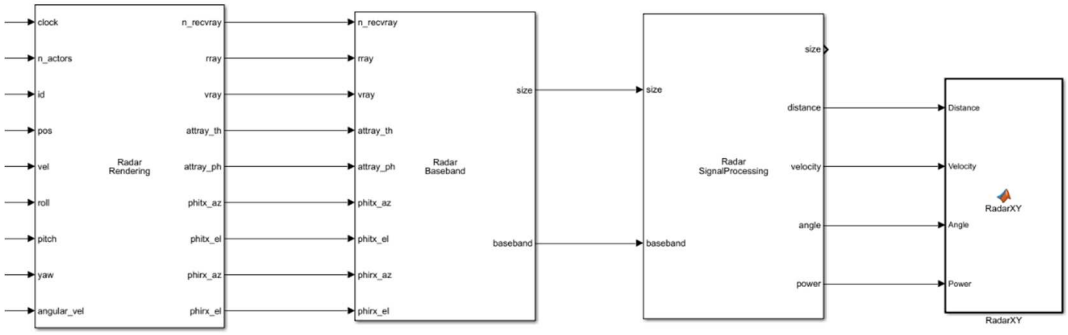
出所：SOKEN, INC.

Figure 406　対大型トラック、NCAP 追加実験内容

④ シミュレータの応用テーマ研究

下図に Simulink におけるミリ波レーダシミュレータの機能ブロックを示す。ミリ波レーダシミュレータは、シナリオからの入力を受けてレイトレースシミュレーションを実行する RadarRendering 部、レイトレース結果の入力結果からベースバンド信号を生成する RadarBaseband 部、ベースバンド信号入力から信号処理を行ってレーダの出力信号を生成する RadarSignalProcessing 部により構成される。

しかし、この構成ではレーダの中間信号である RangeVelocityMap の出力や、ピーク抽出や方位推定アルゴリズムの変更などがしにくい。

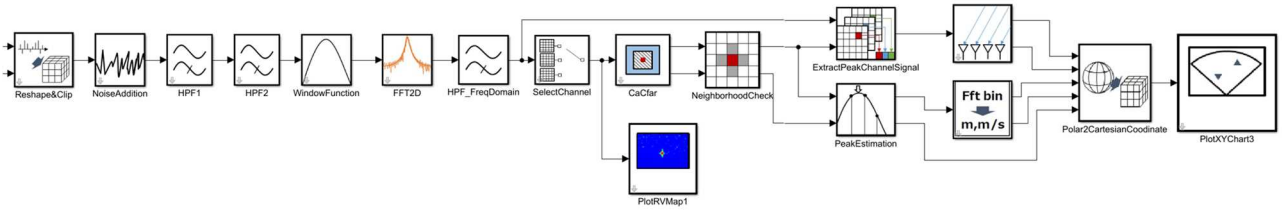


出所：SOKEN, INC.

Figure 407 ミリ波レーダモデルの Simulink 機能ブロック

そこで、下図に示すように機能毎にブロックを分割した SignalProcessing 機能ブロックを作成した。

各機能ブロックは入出力 IF を揃えてあるため、コメントスルーによって機能ブロックの ON/OFF が行いやすくしてある。ピーク抽出アルゴリズムや方位推定アルゴリズムの機能ブロックが独立しているため、ユーザが任意に該当機能だけをカスタマイズすることが比較的容易になっている。



出所：SOKEN, INC.

Figure 408 機能分割した SignalProcessing 機能ブロック

(3)次年度以降の計画

①計測車両システムの構築

・新 NXP ミリ波レーダ対応計測システム構築

TD-MIMO 対応型及び開発中の 3D イメージング対応型レーダを車載し、JARI テストコース及び公道で性能評価できるように計測システムを構築する。

・公道実験用計測システム改善

東京お台場、首都高 C1 エリアではオープンスカイ条件がほとんどなく、IMU の十分なキャリブレーション走行が困難である。令和 3 年度の改善により、データ異常が減少し、監視できる体制を整えたが、条件によっては精度が悪化するケースもあるため、原因を調査し、改善する。

② 実車による実環境計測・データ検証

・新 NXP ミリ波レーダ用テストコース実験

新 NXP ミリ波レーダの一致性検証用データ取得を目的とした実験を行う。これまでの TI レーダで実施した内容を参考に NCAP、ALKS のアセスメントもしくは複数の物標が存在する実環境相当でのデータ取得を行う。（5 月～6 月頃、JARI Jtown）

・新 NXP ミリ波レーダ用公道実験

新 NXP ミリ波レーダを対象とした公道センサ不調 DB 実験を行う。（9 月頃、東京お台場、首都高 C1）

③ 車両計測システムの新事業体への引継ぎ

SIP 終了後の新事業体での計測作業継続を見据え、車両計測システム構築方法についてドキュメント化する。必要に応じて別計測車両へのシステム構築作業を行う。

④シミュレータの応用テーマ研究

・将来レーダハードウェアに対応可能なセンサ機能ブロックの構築

現行のミリ波レーダシミュレータにおけるベースバンド信号を生成する RadarBaseband 部は、FCM(Fast Chirp Modulation)のみに対応しており、汎用性にかける。また、RF IC 内部が精緻にモデル化されているとは言えない。そこで、今年度 SignalProcessing 機能ブロックの機能分割したのと同様に、RadarBaseband 部の機能分割を検討し、将来レーダハードウェアに対応できるように汎用性を向上させる。

5. 3 「D.自動運転バリテーションプラットフォームのアーキテクチャ構築」のための研究開発

本研究開発テーマでは、機能モデル、物理モデルの安全性評価シミュレーション環境を構築するために、「D1. モジュール間 I/F の標準化」と、「D2.シミュレーションプラットフォームの研究開発」の二つを課題として取り扱う。

5. 3. 1 「D1.モジュール間 I/F の標準化」(日本ユニシス株式会社)

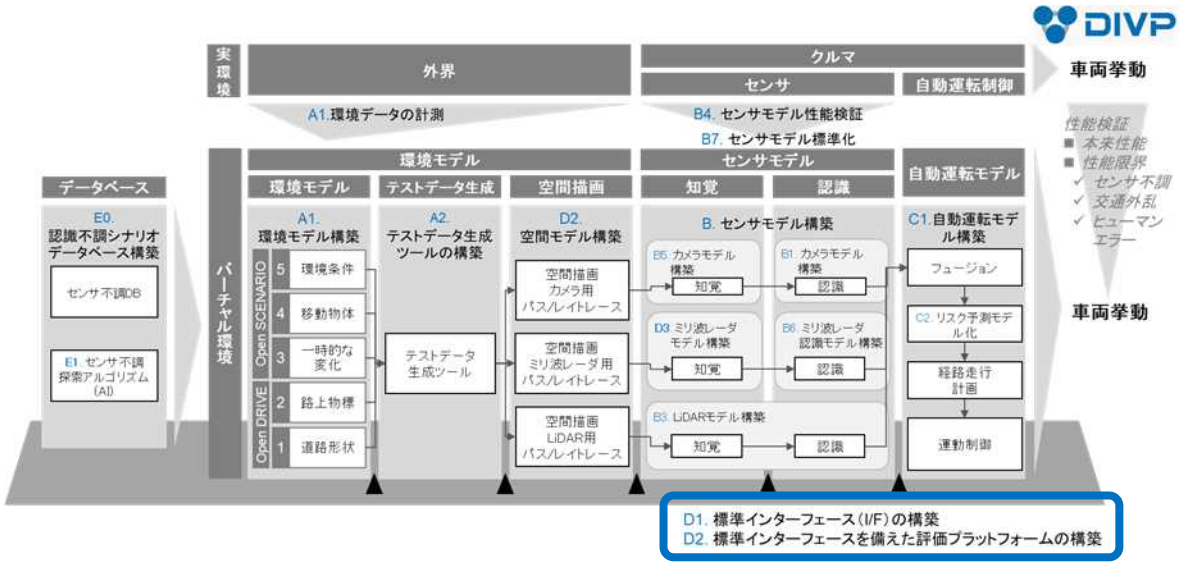


Figure 409 本研究の位置付け

本研究開発テーマでは仮想空間上でのシミュレーションを可能にするための I/F 技術を検討する。

■ 事業目的

現在の自動運転システムのためのシミュレーション環境は、自動運転システムの開発や評価(性能評価、安全性評価など)といった目的が多岐にわたるため、標準的な製品が存在していない。また、すべての機能を網羅して提供する製品も存在しないため、自動車メーカー各社では、それぞれに製品を組み合わせて、各社独自のシミュレーション環境を構築している。

また、自動運転システムを構築する際に組み合わせる各種センサや自動運転アルゴリズムなど、自動車メーカーやサプライヤの独自の技術が盛り込まれているため、センサモデルや自動運転モデルをシミュレーション環境下で動作させる際に、各モデルの秘匿性を保ちながらモジュール同士が連携して動作することが求められている。一方、テストシナリオや環境モデルなど、自動車メーカー各社の競争領域外のモデルについては、各社共通で利用可能となることが望ましい。

本事業では、シミュレーション環境や各社の製品に依存せず、かつ、必要な情報を秘匿とすることが可能な I/F 技術の検討を目的とする。

■ 事業概要

現時点(2019 年 4 月)で公開されているオープンソースシミュレーション環境の I/F の調査を実施する。神奈川工科大学での市販シミュレータのベンチマーク結果や、METI 事業での基礎調査結果なども参考にしながら、本事業で構築するシミュレーション環境を実現するため、各モジュールが提供すべき機能とモジュール間でやり

取りをするデータの内容を定義し、仕様書としてまとめる。

また、シミュレーション環境構築で得られた知見をI/F仕様に反映し、より実用的なI/F仕様となるようにする。

■ 実施計画

事業項目		2019				2020				2021			
		1Q	2Q	3Q	4Q	1Q	2Q	3Q	4Q	1Q	2Q	3Q	4Q
(ア)シミュレーションI/F技術調査	活動スケジュール		→										
	活動の成果物		★I/F調査報告書										
(イ)シミュレーションI/F要件定義	活動スケジュール			→	→								
	活動の成果物				★I/F要件定義書								
(ウ)シミュレーションI/F設計	活動スケジュール					→	→						
	活動の成果物						★I/F設計書						
(エ)シミュレーションI/Fの精緻化と標準化の検討	活動スケジュール						→	→	→	→	→		
	活動の成果物								★I/F設計書		★I/F設計書		

(1)令和3年度の成果(まとめ)

VIVID連携を通じてASAM OSIへIF提案、IFの標準化

研究開発の成果

Nihon Unisys, Ltd

研究成果の自己評価	■ ASAM OSI Working Group (Sensor Modeling) への参画、およびOSI 調査 ■ VIVID連携 DIVP®の空間描画モデル、センサモデルのIFについてVIVIDと定例ミーティング実施 ・JTTT1(Simulation IF) の推進 ・JTTT3.1(Camera) 参加 ・JTTT3.2(LiDAR) 参加
自社Biz視点から ①DIVP®の価値・魅力 ②活用可能性	■ DIVP®-PFがサポートするIFの1つとしてASAM OSIがあれば、OSIを介したIF接続性が拡張できる

得られた知財	■ DIVP®-PF カメラ空間描画の出力をOSI形式に変換
知財の保全	■ 特許 : なし
残課題・今後への期待値	■ VIVID連携を通じて接続性拡張のために備えるべきIFを整理し、標準化活動としてASAM OSIへの提案を進める ■ DIVP®-PFがサポートするIFの1つとしてASAM OSIがあれば、OSIを介したIF接続性が拡張できる

Figure 410 研究開発の成果

国際標準化の活動として、独 VIVIALD との国際協調プロジェクト VIVID の JTTT1 IF 分科会のリーダーを担当し、標準 I/F である ASAM OSI を介した PF 接続性の拡張の検討に着手した。

(2)令和3年度の成果

(エ)シミュレーション I/F の精緻化と標準化の検討

・シミュレーション I/F

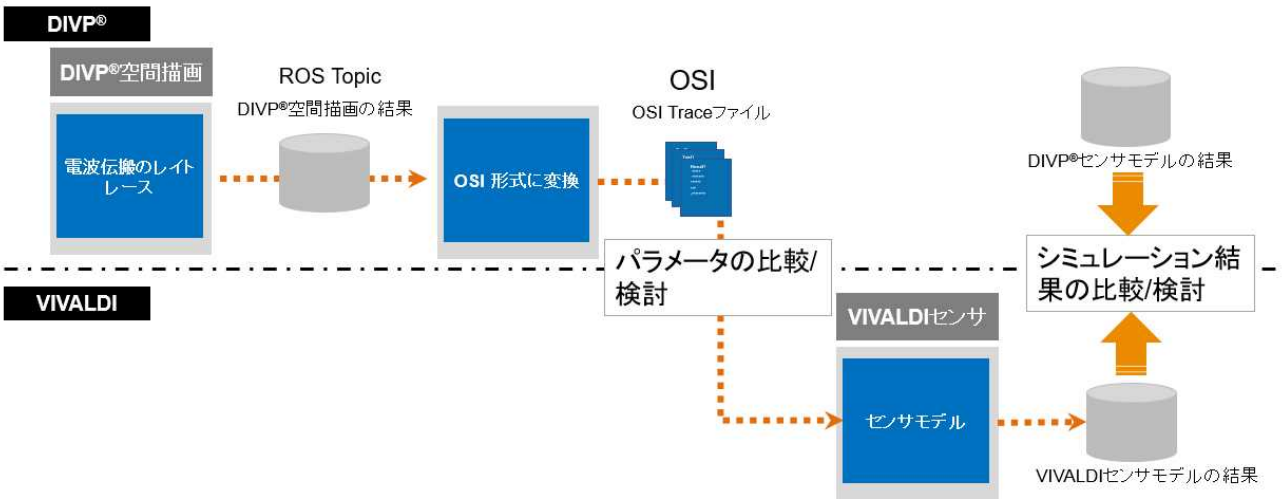
昨年度、D1 として検討を行ったシミュレーション I/F 仕様は、D2 の新 PF 開発で DIVP®のシミュレーション環境に適用された。実機での実験結果との比較評価を基にシミュレーション I/F 仕様を改良し、実利用に適した仕様に精緻化していく。

・標準化

独 VIVALDI との国際協調プロジェクト VIVID を通じて、標準 I/F である ASAM OSI を介した PF 接続性の拡張の検討に着手した。

検討の進め方として、PF 接続性の確認のため、まず DIVP®の空間描画の出力結果を OSI 形式で出力し、独 VIVALDI が持つセンサモデルに取り込むとができるか確認する。

DIVP®から独 VIVALDI へ、OSI を介した空間描画のデータ交換による PF 接続性の確認を行い、その後センサモデルの出力結果の比較、OSI に標準パラメータとして追加で必要と思われるパラメータを明らかにしていく。



出所:日本ユニシス(株)

Figure 411　DIVP® ROS と OSI の対応付け

(3)次年度以降の計画

独 VIVALDI との国際協調プロジェクト VIVID を通じて標準 I/F である ASAM OSI を介した PF 接続性の拡張の検討を進めていく。

5. 3. 2 「D2.シミュレーションプラットフォームの研究開発」（日本ユニシス株式会社）

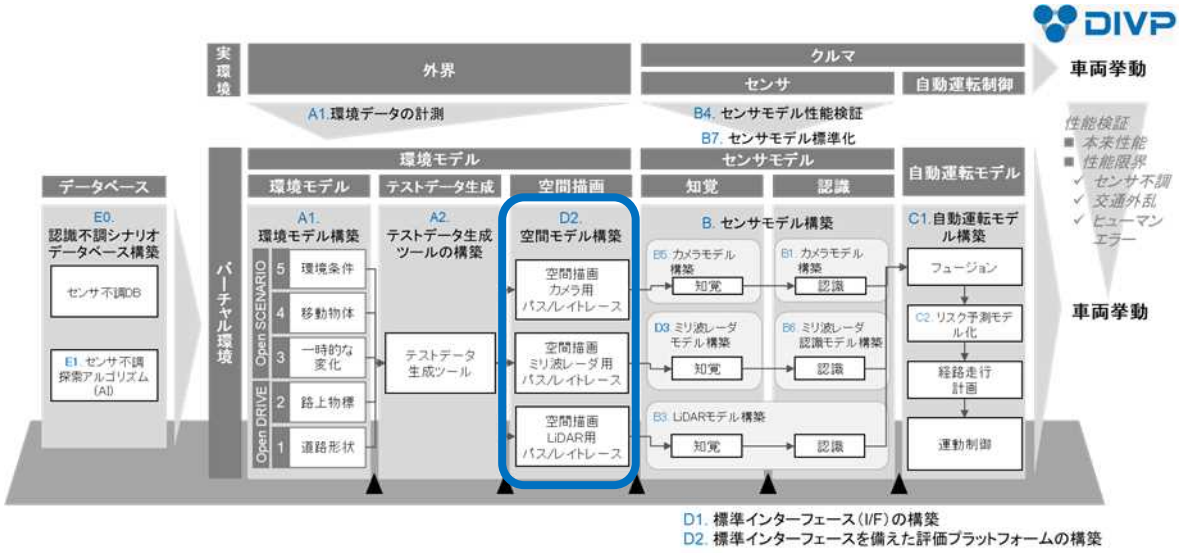


Figure 412　本研究の位置付け

本研究開発テーマでは、これら評価環境をオープンなプラットフォーム上で動作する仕組みを構築する。

■ 事業目的

センサ（カメラ、ミリ波レーダ、LiDAR）の仮想空間上での安全性評価を実施するために、センサの原理原則（物理法則）に基づいたシミュレーションプラットフォームを研究・構築し、国内関係プレーヤ間でオープンに公開することを目的とする。

■ 事業概要

① 電磁波（カメラ＝380nm～770nm の波長（可視光領域）、ミリ波レーダ=1mm～10mm の波長、LiDAR=905nm の波長)が空間内を物理的に伝搬する状況をシミュレートすることで、実物のセンサ（カメラ、ミリ波レーダ、LiDAR）への入力を仮想空間内で正確に再現する環境モデルを構築する。

② A～C の各パートで実装される自動運転シミュレーションシステムを構成する各モデルを結合し、自動運転システムの安全性を検証するためのプラットフォームを開発、その有効性を評価する。

③ 開発する PF は高性能 GPU を搭載したワークステーション PC1 台で動作する性能を目標とする。検証を通して、シミュレーションに必要となる計算機性能の見極めを行う。

想定 HW 構成

CPU: デュアルインテル Xeon Gold 6134 3.2G 24.75M キャッシュ

OS: Windows 10 Pro

メモリ: 192GB (12x16GB) 2666MHz DDR4 ECC RDIMM

GPU: デュアル NVLink NVIDIA Quadro RTX8000, 48GB

HDD: M.2 1TB PCIe NVMe Class 50 SSD

HDD: 3.5 インチ 2TB 7200 SATA HDD

■ 実施計画

事業項目		2018年度				2019年度				2020年度				2021年度				2022年度			
		第1四半期	第2四半期	第3四半期	第4四半期	第1四半期	第2四半期	第3四半期	第4四半期	第1四半期	第2四半期	第3四半期	第4四半期	第1四半期	第2四半期	第3四半期	第4四半期	第1四半期	第2四半期	第3四半期	第4四半期
①既存シミュレーションPFの調査	必要なインプット																				
	活動スケジュール			PF仮完成★																	
	活動の成果物			調査結果報告書★																	
②センサー不調モデル仕様の定義	必要なインプット					★認識不調要因一覧															
	活動スケジュール																				
	活動の成果物					不調モデル仕様★															
③機能モデルクローズドループPFの開発	必要なインプット				★IF要件定義書																
	活動スケジュール			LiDAR向けサンプル版★																	
	活動の成果物					19/2Q評価版★			最終版★												
④機能モデルシミュレーションのテスト・評価	必要なインプット						★19/20評価版														
	活動スケジュール																				
	活動の成果物					評価結果報告書★															
⑤物理モデルオープンループPFの開発	必要なインプット					★IF要件定義書															
	活動スケジュール				LiDAR向けサンプル版★																
	活動の成果物						19/3Q評価版★					最終版★									
⑥物理モデルシミュレーションのテスト・評価	必要なインプット							★19/3Q評価版													
	活動スケジュール																				
	活動の成果物							評価結果報告書★													
⑦センサ不調を考慮したPFの開発	必要なインプット							★不調モデル仕様													
	活動スケジュール							LiDAR向けサンプル版★													
	活動の成果物								2Q/1Q評価版★			最終版★									
⑧不調要因の物理シミュレーション・機能シミュレーションのテスト・評価	必要なインプット									★2Q/1Q評価版											
	活動スケジュール																				
	活動の成果物									評価結果報告書★											
⑨テストとパフォーマンス評価	必要なインプット																				
	活動スケジュール																				
	活動の成果物											最終結果報告書★									
⑩不調再現	必要なインプット																★不調モデル仕様				
	活動スケジュール																				
	活動の成果物																				
⑪真値処理実装	必要なインプット																				
	活動スケジュール																				
	活動の成果物																				
⑫夜間天空再現	必要なインプット																★夜間天空仕様				
	活動スケジュール																				
	活動の成果物																				
⑬交通モデル導入	必要なインプット													★交通モデル仕様							
	活動スケジュール																				
	活動の成果物														★21/2Q評価版						
⑭モデル秘匿化対応	必要なインプット																				
	活動スケジュール																				
	活動の成果物																				
⑮Simulink対応	必要なインプット																				
	活動スケジュール																				
	活動の成果物																				
⑯FMI対応	必要なインプット																				
	活動スケジュール																				
	活動の成果物																				
⑰シミュレータ高速化	必要なインプット													★高速化仕様							
	活動スケジュール																				
	活動の成果物														★21/2Q評価版						
⑱社会実装を考慮したPF構築	必要なインプット													★受容性検証結果							
	活動スケジュール																				
	活動の成果物														★21/2Q評価版						
⑲クラウド化（ア）Web UIの構築	必要なインプット													★Web UI仕様							
	活動スケジュール																				
	活動の成果物														★21/3Q デモ		★22/1Q 試供版		23/1Q 製品β版★		
⑲クラウド化（イ）プラットフォーム実行環境構築	必要なインプット													★PF仕様							
	活動スケジュール																				
	活動の成果物																★22/1Q 試供版		23/1Q 製品β版★		
⑲クラウド化（ウ）フィードバック整理/反映	必要なインプット														★デモ環境利		★試供版利用者からのFB				
	活動スケジュール																				
	活動の成果物																★22/1Q 試供版		23/1Q 製品β版★		
⑳Viewer強化	必要なインプット													★受容性検証結果							
	活動スケジュール																				
	活動の成果物														★21/2Q評価版						

(1)令和3年度の成果(まとめ)

MATLAB/Simulink版PFの開発、クラウド版PFの開発、臨海部実証実験サイトの公開
製品化にむけた研究/開発

研究開発の成果

Nihon Unisys, Ltd

研究成果の自己評価	■ 新PFの開発 ・Carla(UE4)に依存しないDIVP®-PFを開発し、DIVP®内へ提供 ・MPC様D3Simライブラリとの連携、SDM-Gで作成されるOpenSCENARIOベースのシナリオXML対応 ■ MATLAB/Simulink版PFの開発 ・SimulinkのToolboxとしてDIVP®-PF(空間描画、リファレンスのセンサモデル)を開発し、DIVP®内へ提供 ■ 臨海部実証実験サイトの構築/公開 ・クラウド環境にWebアプリ、インフラを構築し、臨海部実証時実験サイトとして公開 ・DIVP®-PFのシミュレーション結果をブラウザ上で閲覧できるよう体験サイトを構築/公開 ■ クラウド版PFの開発 ・新PFをクラウド上で稼働させるためのインフラ開発 ・Webアプリ(UI)の開発 DIVP®の研究、および製品化にむけた研究/開発を推進
自社Biz視点から ①DIVP®の価値・魅力 ②活用可能性	■ MATLAB/Simulink版PF デファクトスタンダードであるMATLAB/SimulinkでDIVP®-PFが提供されることで、多くのユーザが導入できるようになる ■ クラウド版PF シミュレーション実行、テストに必要なコンピューティングリソースをクラウドで提供することで、大量のテストケースを処理するシミュレーション環境を提供できる

得られた知財	■ MATLAB/Simulink Toolboxの開発 ■ クラウド上でGPUを利用したシミュレーション環境の構築
知財の保全	■ 特許:1件 ミリ波Sim向け3Dモデル作成手法:MPC様、SOKEN様、Unisys
残課題・今後への期待値	■ MPC様 SDM-G、D3Simライブラリとの連携 ■ TTDC様 パラメータ探索ツールとの連携

Figure 413 研究開発の成果

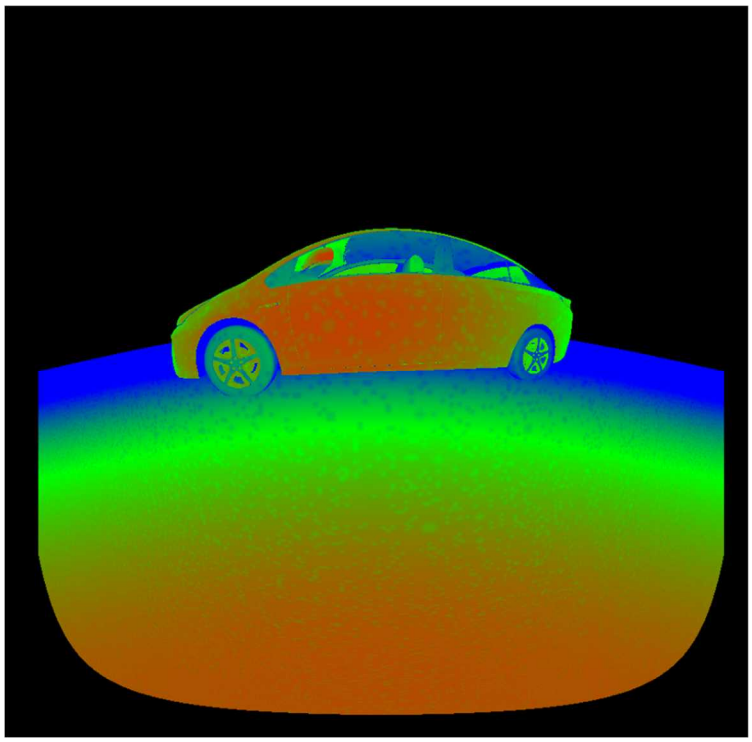
MATLAB/Simulink 対応として DIVP®プラットフォームで提供しているものと同等の機能の空間描画ブロックとセンサ知覚ブロックをツールボックスとして提供した。Carla(Unreal Engine4)に依存しない DIVP®プラットフォームを開発し、DIVP®コンソーシアム内に展開した。クラウド版の DIVP®プラットフォームの開発を行い、一部の機能については臨海部実証実験サイトに公開した。

(2)令和3年度の成果

⑩ 不調再現

LiDAR センサ面雨滴付着

LiDARのセンサ面に付着した雨滴の影響の検討を行えるようセンサ面形状をポリゴンで入力し、雨滴のテクスチャデータを出力する機能の開発を行った。



出所：日本ユニシス（株）

Figure 414 雨滴の再現を行った LiDAR シミュレーション結果例

カメラ水たまり表現の対応

水たまりに対応したポリゴン形状を設定することにより、水たまりの表現を行う機能の実装を行った。合わせて、法線マップの対応を実施し、凹凸の表現を行うことで路面等の再現度の向上を図った。

出所：日本ユニシス（株）

Figure 415 法線マップなしの水たまり再現

出所：日本ユニシス（株）

Figure 416 法線マップありの水たまり再現

TypeA 配光特性ファイルへの対応

昨年度までの研究開発で TypeC の配光特性ファイルへの対応は行っていたが、これに加えて、TypeA の配光特性ファイルへの対応を行った。TypeA の配光特性ファイルはヘッドライトのランプメーカーで用いられているフォーマットで、ランプメーカーI 社からアルファードのランプの配光特性データを入手し、プラットフォームで再現を行った。

出所：日本ユニシス（株）

Figure 417 ハイビームの配光データ適用例

出所：日本ユニシス（株）

Figure 418 ロービームの配光データ適用例

ミリ波降雨減衰の実装

下式で求めた減衰量をミリ波レーダシミュレーション結果に乗算することで、ミリ波の降雨による減衰を再現できるように対応した。

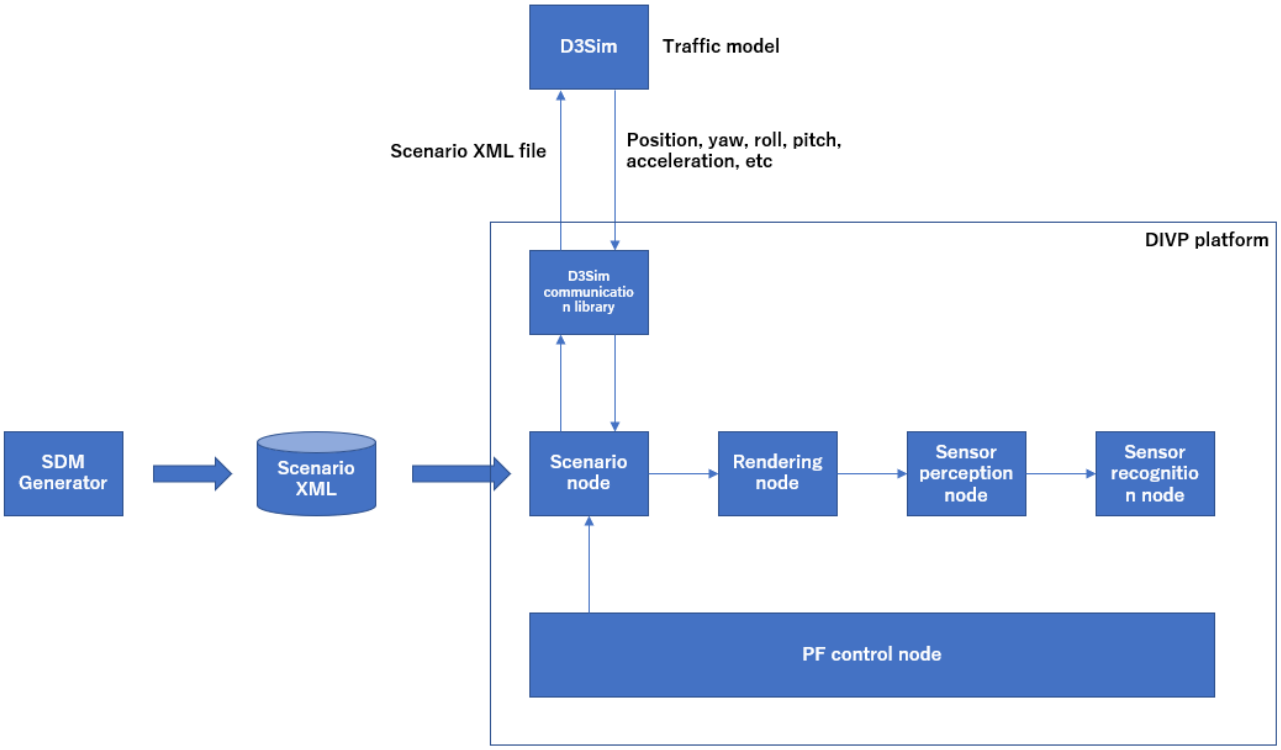
$$K_r = \underbrace{10 * log_{10}e}_{4.343} * 10^3 \int_0^{D_{max}} \delta_{extinct}(D) N^s(D) dD \qquad [dB/km]$$

出所： O.Adetan, “Analysis of Raindrop Diameters for Rainfall Attenuation in Southern Africa”, February 2016 International Journal of Electrical and Computer Engineering 6(1):82-89

Figure 419 ミリ波降雨減衰

⑬ 交通モデル導入

D3Sim 連携を行うシナリオノードを、新 PF（後述）の機能として実装した。これにより、SDM ジェネレータで作成した XML 形式のシナリオを PF で実行することが可能となった。



出所：日本ユニシス（株）

Figure 420 交通モデルとの連携

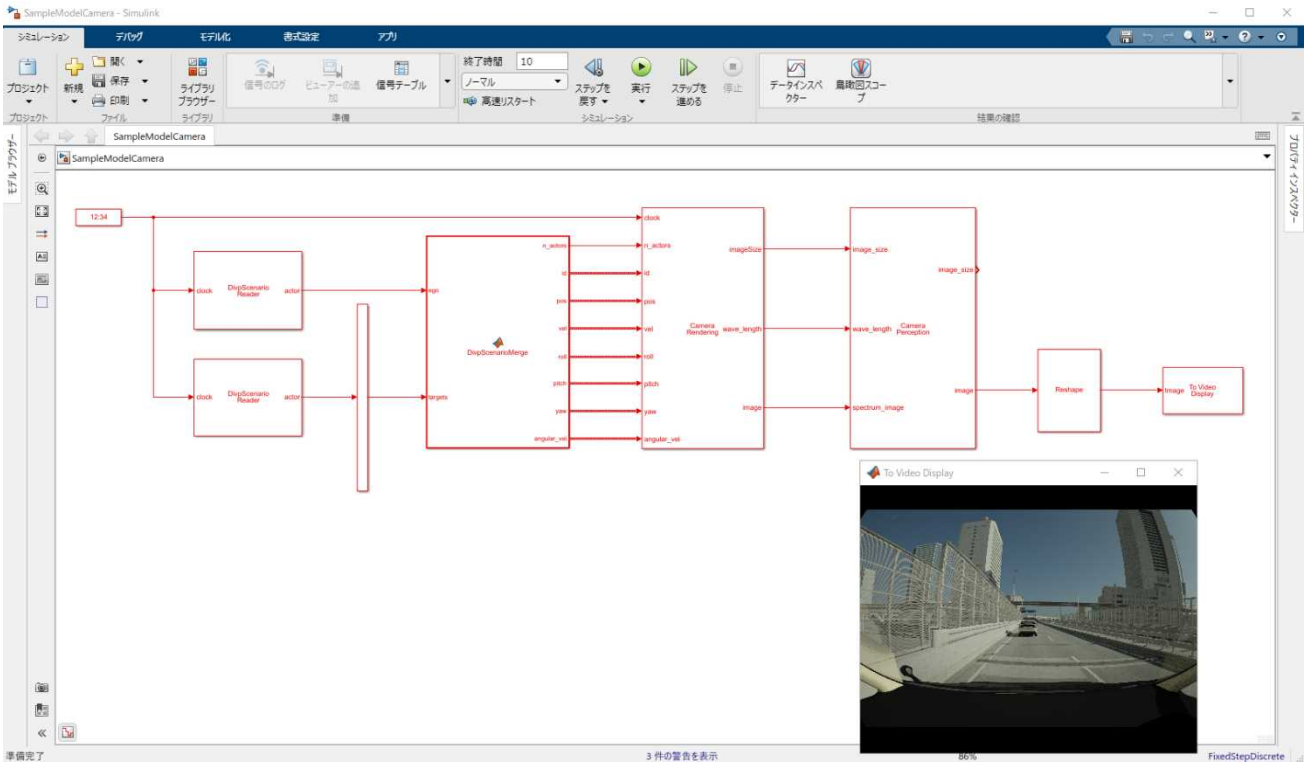
シナリオ XML を D3Sim 連携ライブラリ経由で D3Sim に渡し、交通参加者の位置、姿勢、速度、加速度等の情報を取得する。

⑭ モデル秘匿化対応

FBX 形式のデータを独自の DAT 形式に変換する機能を実装した。FBX 形式は誰でも自由に読み書きできるために、形状データの保護を行うことができなかったが、独自の形式としたことでモデルの秘匿化が可能となった。今回の実装は暫定的な実装で、次年度以降、三菱プレシジョン殿から提供される秘匿化ライブラリを用いた実装を行う予定である。

⑮ Simulink 対応

MBD のデファクトスタンダードである Simulink 用のツールボックスの開発を行った。DIVP®プラットフォームで提供しているものと同等の機能の空間描画ブロックとセンサ知覚ブロックをツールボックスの機能として提供している。

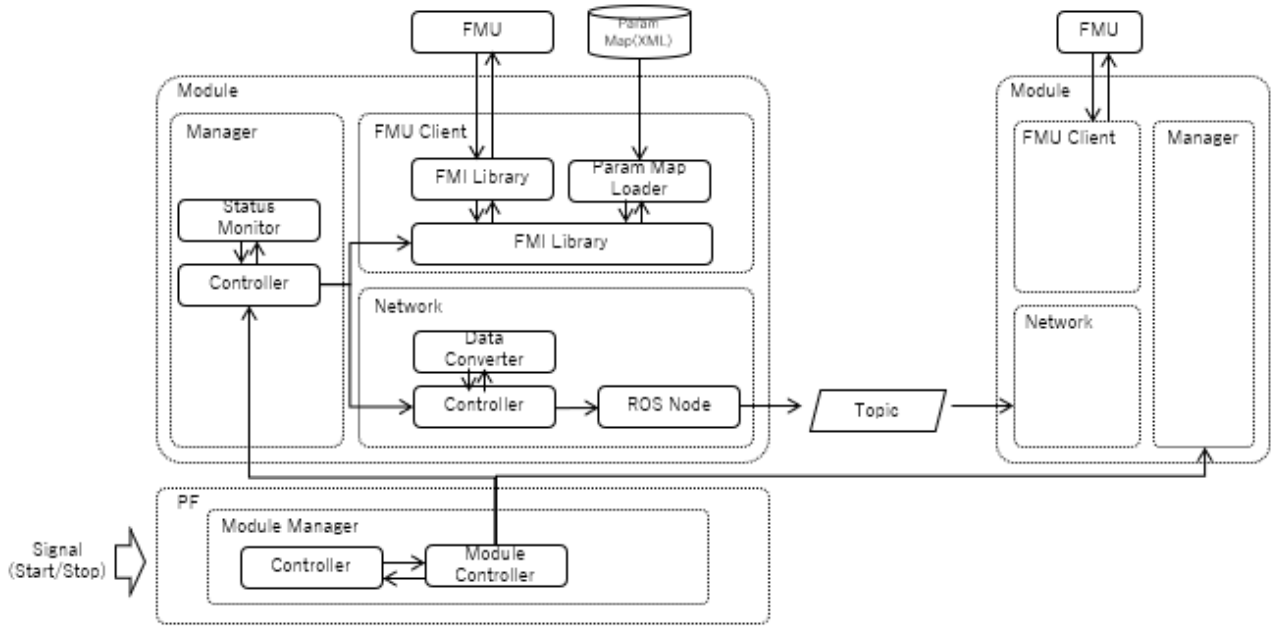


出所：日本ユニシス（株）

Figure 421 DIVP®Toolbox 提供ブロックを用いたシミュレーション実行例

⑯ FMI 対応

昨年度、D1 で検討を行ったシミュレーション I/F を備えた、新 PF の開発を行った。モジュール間の通信は、通信内容の保存を考慮して、ROS での実装を採用した。



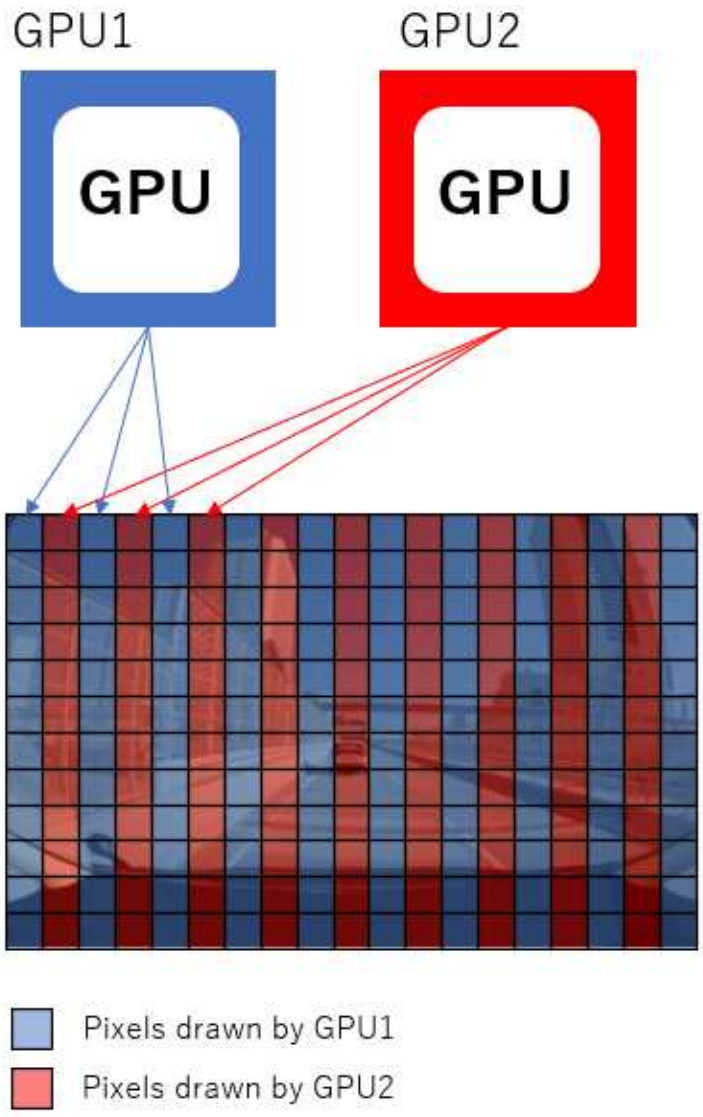
出所：日本ユニシス（株）

Figure 422 FMI2.0 に対応した新 PF アーキテクチャ図

各モジュールには FMI でモデル交換を行うことが可能となっている。現時点では FMI2.0 をサポートしているが、FMI2.0 は仕様上の制限が多いため、今後 FMI3.0 へ対応していく必要がある。FMI3.0 は 2022 年 2 月時点で仕様のベータが公開されている段階で、ツール類が揃っていないため、現時点では時期尚早である。

⑰ シミュレータ高速化

GPU を複数利用したレンダリングを行う機能の実装を行った。



出所：日本ユニシス（株）

Figure 423 GPU2 枚を用いたレンダリング

本実装の結果、1280x960 サイズの画像を 100 回サンプリングする例では、1GPU で 4 秒のケースが 2GPU では 2.1 秒でレンダリングすることが可能となり、約 1.9 倍の高速化となった。検証環境がないため確認できていないが、実装上は WS に搭載された GPU を全て利用することが可能な実装となっている。ただし、GPU 枚数が増

えるほど、オーバーヘッドが大きくなると考えられる。

⑱ 社会実装を考慮した PF 構築

D2 活動で行った Simulink 対応、クラウド化と D3 のモニター利用者評価と連携しながら 2022 年度内の社会実装にむけてシミュレーション PF の構築を行っていく予定である。

⑲ クラウド化

SaaS としてのシミュレーション環境提供に向けた実現検証を行うため、D2 パートで開発したシミュレーションプラットフォームをクラウド（Amazon Web Service）上で稼働させるための環境構築を行った。

（ア） Web UI の構築

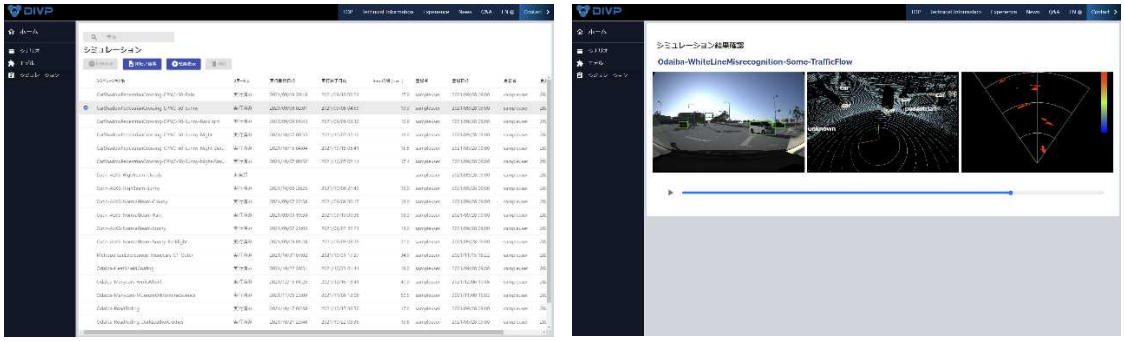
SaaS の性質上、利用者に対して Web ブラウザからシミュレーションの実行、データ/モデル登録、結果の確認等を行うための Web UI を提供する必要がある。以下の Web UI を構築し、2021 年 11 月に公開した臨海部実証実験サイト内にデモシステムとして一部の機能を実際に操作できる形で公開した。

・シナリオ管理 UI

・シミュレーション管理 UI

・結果表示 UI

・センサモデルの登録/パラメータマッピング UI



出所：日本ユニシス（株）

Figure 424 デモシステムの Web UI

（イ） プラットフォーム実行環境構築

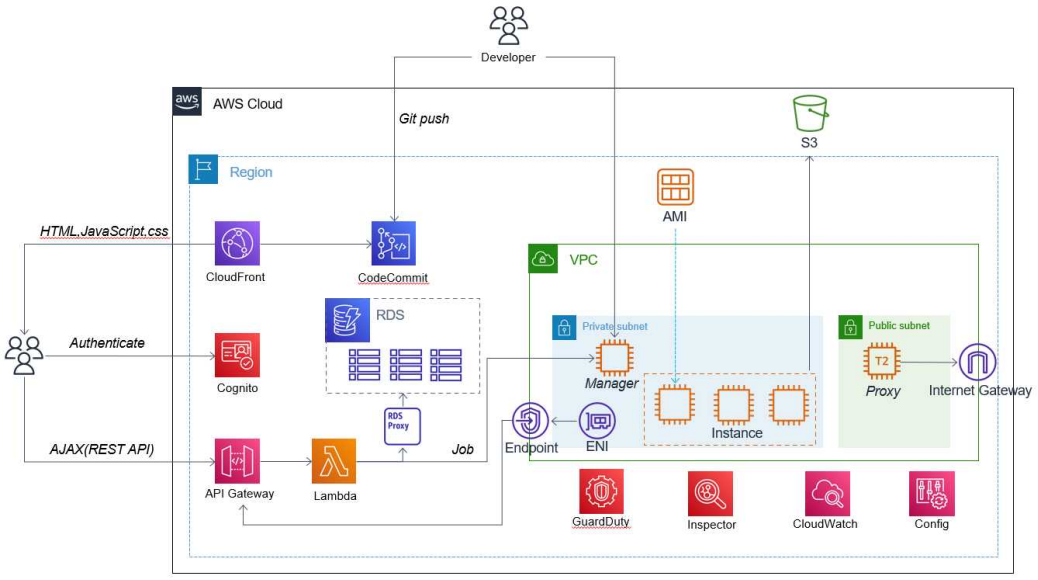
クラウド上でプラットフォームを稼働させるための実行環境を構築した。

・シミュレーションプラットフォームの VM 環境

・シミュレーションプラットフォームの制御/監視機能

・シナリオ/アセット/シミュレーション結果等のデータ管理機能

・Web UI からの指示に応答するための API とその実装



出所：日本ユニシス（株）

Figure 425 AWS 構成概要

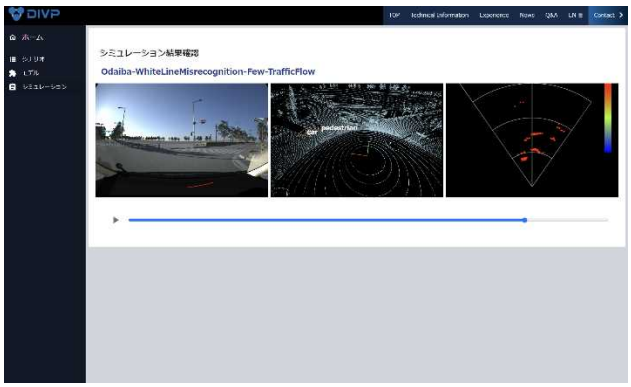
（ウ）フィードバック整理/反映

D3 の活動と連携し、臨海部実証実験に参加されたモニター利用者からのフィードバックを整理し、今後のシミュレーション PF 開発、クラウド開発に反映していく予定である。

⑳ Viewer 強化

クラウド化の対応の中で、Web ブラウザ上で DIVP®のシミュレーション結果を簡易に閲覧可能にするための Viewer を開発した。

LiDAR 点群については WebGL を用いて 3D で表示できるようにした。



出所：日本ユニシス（株）

Figure 426 Viewer

(3)次年度以降の計画

⑪ 夜間天空再現

夜間において水平照度の観測を行い、そのデータを元に天空データ（一様な分布）の再現を行うことによって、夜間の明るさを適切に再現する開発を行う。

⑫ 交通モデル導入

三菱プレシジョンから提供される交通モデルとの連携のうち、未対応となっている信号機の制御の対応を行う。

⑲ クラウド化

D3 の活動と連携し、モニター利用者からのフィードバックを整理しクラウド開発に反映していく。

5. 3. 3 「D3-1. DIVP®開発の「走行環境～電波伝搬～センサモデル」出力データのモニター企業における自動運転性能シミュレーションの有効性に関する研究」 （日本ユニシス株式会社）

■ 事業目的

DIVP®シミュレーションモデルのユーザでの有用性検証のため、国内自動車 OEM を対象にモニター企業を募り、研究成果物のプロトタイプ版を用いた有効性検証のためのモニター評価を実施し、一致性を高めた「環境～伝搬～センサモデル」出力データの OEM ユーザにおける有用性の確認ならびに今後のシミュレーションモデル改良のための OEM ユーザからのフィードバックを目的とし、事業化への足掛かりとする。

■ 事業概要

① モニター企業における有用性の確認

（ア）シミュレーションにて確認したい事象の再現性の確認

（イ）センサシミュレーション知覚出力の妥当性の確認

（ウ）既存の検証手段と比べた優位性の確認

② モニター企業からのフィードバック

（エ）シミュレーション結果の評価

- 実機検証結果とシミュレーション結果の比較評価
- 知覚モデルのパラメータを変化させた場合の認識・車両挙動等への影響度評価

（オ）他システム連携についての課題

（カ）シミュレーション実行、結果取得に関するシステム操作性についての課題

③ モニター評価実施規模

（キ）モニター企業数：4 社程度を募る

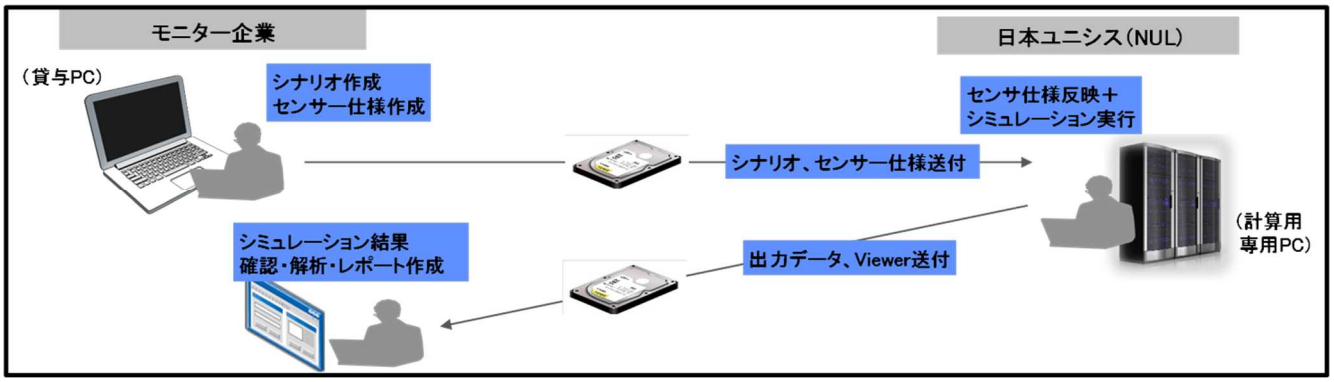
（ク）シナリオ数：3 シナリオ／モニター企業

（ケ）バリエーション数：3 バリエーション／シナリオ

（コ）上記合計 36 バリエーション程度のシミュレーションを実行

④ モニター評価方法

（サ）Figure 427 に示すように、モニター企業がシミュレーションシナリオと、センサ仕様（DIVP®コンソーシアムが指定する範囲内でのパラメータ値指定）を貸与された PC（専用環境）にて作成。作成したシナリオとセンサ仕様は日本ユニシスが受け取り、準備したシミュレーション計算用 PC でシミュレーションを実行。結果をモニター企業へと返し確認頂く。



出所：日本ユニシス(株)

Figure 427 評価検証のフロー

■ 実施計画

事業項目		2020年度							工数概算
		8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	
①モニター評価設備の調達・配備 ②モニター評価準備	必要なインプット		★シナリオ作成環境インストール手順						4.5人月
	活動スケジュール		→	→					
	活動の成果物	貸与PC、シミュレーション用PC、マニュアル★							
③モニター評価運営	必要なインプット				★ユーザ候補				4.2人月
	活動スケジュール				→	⇢			
	活動の成果物				シミュレーション実行結果★	シミュレーション実行結果★			
④モニター評価結果取り纏め	必要なインプット					★シミュレーション実行結果			4.3人月
	活動スケジュール					→	→		
	活動の成果物					ユーザ確認結果、要望★			
⑤その他	必要なインプット								2.0人月
	活動スケジュール		→	→	→	→	→		
	活動の成果物				DIVPへの定期報告				

合計 15.0人月

(1)令和3年度の成果(まとめ)
令和2年度までに事業完了。

(2)令和3年度の成果
令和2年度までに事業完了。

(3)次年度以降の計画
なし

5. 3. 4 「D3-2. DIVP®開発の「走行環境～電波伝搬～センサモデル」出力データのモニター企業における自動運転性能シミュレーションの有効性に関する研究：対象センサメーカ」（日本ユニシス株式会社）

■ 事業目的

DIVP®シミュレーションモデルのユーザでの有用性検証のため、国内自動車 OEM を対象にモニター企業を募り、研究成果物のプロトタイプ版を用いた有効性検証のためのモニター評価を実施し、一致性を高めた「環境～伝搬～センサモデル」出力データの OEM ユーザにおける有用性の確認ならびに今後のシミュレーションモデル改良のための OEM ユーザ候補からのフィードバックを 2020 年 11 月より実施（以下 OEM モニター評価と総称）。

■ 事業概要

① モニター企業における有用性の確認

（ア）シミュレーションにて確認したい事象の再現性の確認

（イ）センサシミュレーション知覚出力の妥当性の確認

（ウ）既存の検証手段と比べた優位性の確認

（エ）モニター企業のユーザである OEM および Tier1 等とのセンサ共同開発、及び対する提案活動におけるシミュレーション活用の可能性の確認

② モニター企業からのフィードバック

（オ）シミュレーション結果の評価

- 実機検証結果とシミュレーション結果の比較評価
- 知覚モデルのパラメータを変化させた場合の認識への影響度評価
- 車両挙動など OEM 視点でのユースケースにおける知覚・認識への影響度評価

（カ）他システム連携についての課題

（キ）シミュレーション実行、結果取得に関するシステム操作性についての課題

③ モニター評価実施規模

（ク）モニター企業数：4 社程度を募る

（ケ）シナリオ数：3 シナリオ／モニター企業

（コ）バリエーション数：3 バリエーション／シナリオ

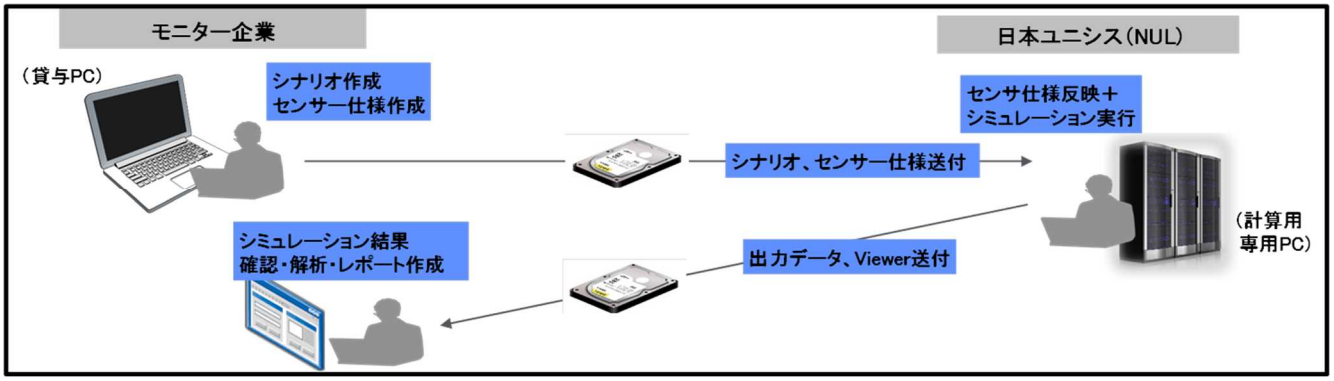
（サ）上記合計 36 バリエーション程度のシミュレーションを実行

④ モニター評価方法

- 原則（シ）に示すような OEM モニター評価での実施方法に準じる。
- 但し、の一部は DIVP®への参加企業と想定。自社センサモデルを軸に、OEM、Tier1 で想定されるケースを実施予定。また、DIVP®での研究経験から実施したい要件が出る可能性も想定する。画一的なパターンの実施のみではなく、十分協議の上で、可能な限り効率的且つ有益な対応を検討したい。

（シ）モニター企業がシミュレーションシナリオと、センサ仕様（DIVP®コンソーシアムが指定する範囲内でのパラメータ値指定）を貸与された PC（専用環境）にて作成。作成したシナリオとセンサ仕様は日本ユニシスが受け取り、準備したシミュレーション計算用 PC でシミュレーションを実行。結果をモニター企業

へと返し確認頂く。



出所：日本ユニシス（株）

Figure 428 評価検証のフロー

■ 実施計画

事業項目		2021年						
		3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月
①モニター評価設備	必要なインプット	★シナリオ作成環境インストール手順						
の調達・配備	活動スケジュール	→	→					
②モニター評価準備	活動の成果物	シミュレーション用PC、マニュアル★						
③モニター評価運営	必要なインプット			★ユーザ候補				
	活動スケジュール		→	→	→	⇢		
	活動の成果物			シミュレーション実行結果★	シミュレーション実行結果★			
④モニター評価結果取り纏め	必要なインプット				★シミュレーション実行結果			
	活動スケジュール				→	→	→	→
	活動の成果物					ユーザ確認結果、要望★		
⑤その他	必要なインプット							
	活動スケジュール	→	→	→	→	→	→	→
	活動の成果物				DIVPへの定期報告			

(1)令和3年度の成果(まとめ)

OEM/モニタ評価(20年度からの継続・対象拡大)。2社(OEM、センサーメーカ)とのモニター評価を実施。カメラシミュレーションに関する一般要件を把握できたため、事業化に向けた検討を進める。

研究開発の成果

Nihon Unisys, Ltd

研究成果の自己評価	■ やったこと ・ステレオカメラ評価への適用 実機評価は各種リソースが不足し、やり切れていないため、DIVP®シミュレーションが実機評価を代替できるかの評価。 ・DeepLearning(以後DLと略)への適用 カメラ認識DLの学習データとして使えるかの評価。 ■ アウトカム ・現状のDIVP®カメラモデルでは調整パラメータが不足しているため、評価の進め方について検討・調整を継続。 ・複雑な背景がないなどの良条件下においては実車映像から学習したDLと、DIVP®シミュレータの生成画像から学習したDLによる検出率がほぼ同等との評価。 ■ 自己評価 現実世界との高い再現性が確認できた。 一方で、各種モデルの充実が必要なことも確認できた。 ■ アウトカムの意義 今後の事業化におけるターゲティングに有用
自社Biz視点から ①DIVP®の価値・魅力 ②活用可能性	■ DIVP®の高い一致性・再現性は カメラ認識DLの学習データとして有効
得られた知財	■ ステレオカメラの評価過程において、 シミュレーションに関する以下のような一般要求を得られた。 - 左右カメラの同期 - フィルタ (Bayer以外のRCCB、RCCCなど) ■ DIVP®シミュレーションの現実世界との高い一致性について確認できた。 また、各種市販製品および開発中製品をカバーするようなモデルの充実が必要であることも確認できた。
知財の保全	■ 特許出願 : 予定なし
残課題・今後への期待値	■ 現存するセンサのモデル化だけでなく、 未知のセンサをモデル化するためのリファレンスモデルや設定パラメータの充実が課題

Figure 429 研究開発の成果

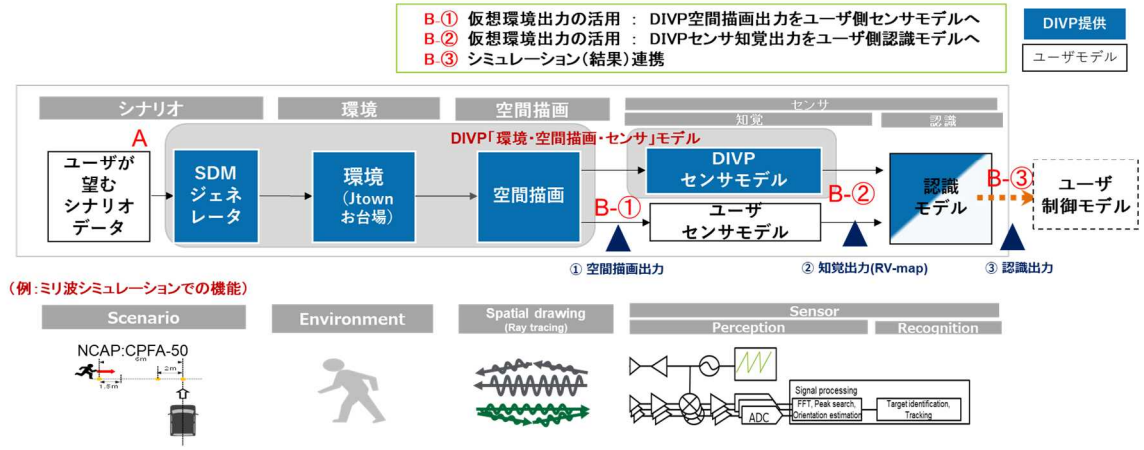
OEM/モニター評価(20 年度からの継続・対象拡大)。2 社(OEM、センサメーカ)とのモニター評価を実施。カメラシミュレーションに関する一般要件を把握できたため、事業化に向けた検討を進める。

(2)令和3年度の成果

① モニター評価実施内容

準備した仮想空間をベースにアレンジを加えたシナリオ、環境で、DIVP® シミュレーションの実行結果の出力と参加者の持つ各種モデル、システムとの接続にトライ

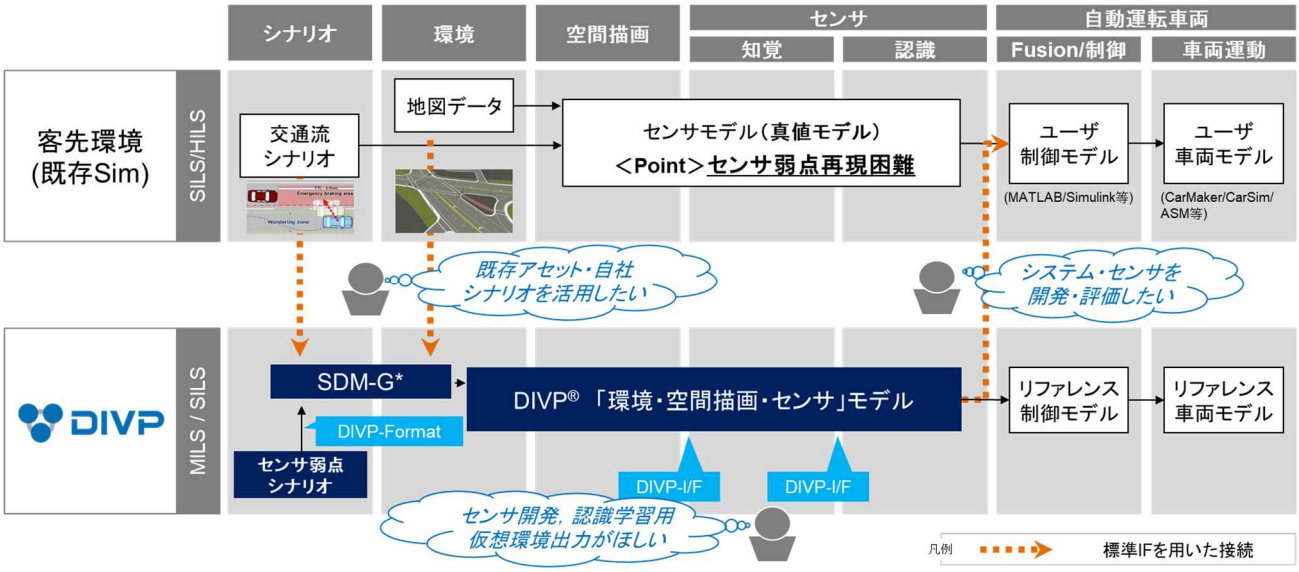
A. DIVP®プラットフォーム上に構築された仮想環境をベースにシミュレーションのシナリオ、環境を参加者のニーズに合わせ個別にアレンジが可能
B. DIVP®プラットフォームの「走行環境-電波伝搬-センサ」モデルのシミュレーションによる実行結果の様々な出力(カメラ、ミリ波、LiDAR)を参加者が持つ各種モデル、システムと接続することが可能(ファイル渡し形態)。



出所:日本ユニシス(株)

Figure 430 モニター評価の形態・接続ポイント

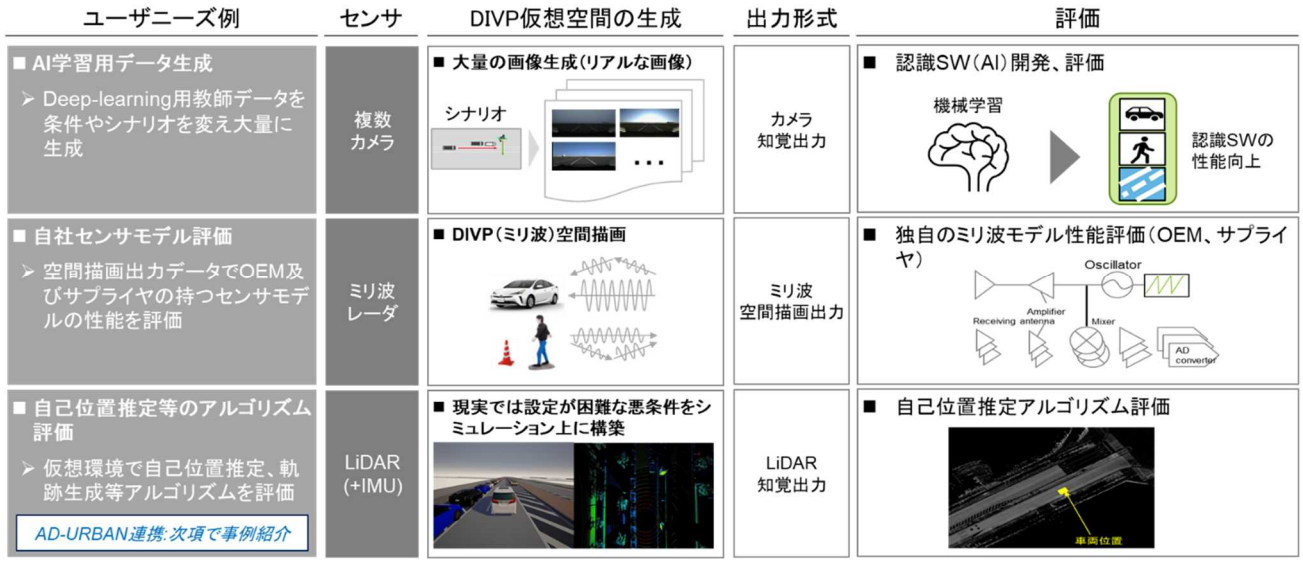
顧客導入を促進するため、複数の既存 Sim 環境との接続性確保の実施を実現することにもトライ。



出所：日本ユニシス（株）

Figure 431　客先環境との接続トライ

これまでの評価活動で、OEM、サプライヤ、大学等による DIVP®の仮想環境、空間描画出力の活用に関する各種 システム顧客ニーズを受領。DIVP®の仮想空間で各種のヴァリアブルな評価を実現。



出所：学校法人幾徳学園　神奈川工科大学，三菱プレシジョン（株），AD-URBAN

Figure 432　客先環境との接続トライ

② モニター評価の実施状況

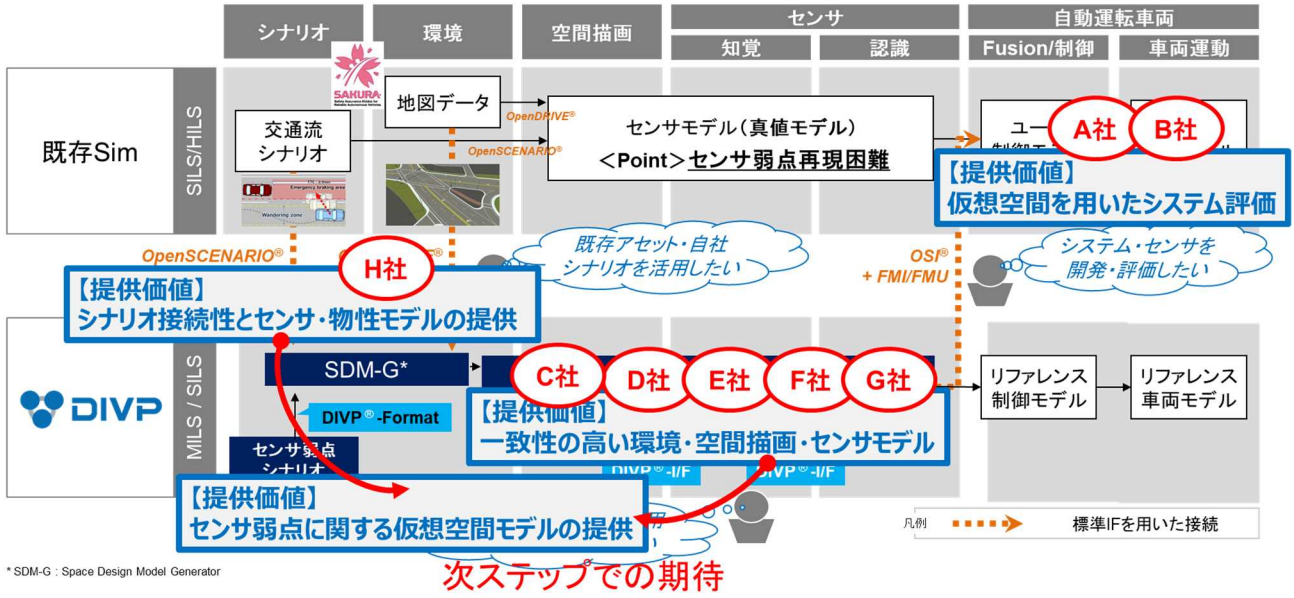
実施概況は以下の通り。

業種・会社名		センサ	目的	状況（実施内容、進捗）
OEM	A社	■ カメラ	■ DIVP知覚出力をDL教師データとしての利用可能性を検証	■ (実施内容)：実機カメラ位置に合わせシミュレーション出力画像を生成。認識アルゴリズムにかけて、実車画像との比較検証（認識率など）を開始。 ■ （進捗）：2月末に現在の出力レベル(パラメータ、位置等調整の上)での差異結果を確認。今後の物標やシナリオの追加の追加実施を検討する。
	B社	■ カメラ ■ LiDAR	■ 知覚出力において実機（データ）との比較評価を行いDIVP活用の可能性を検証	■ (実施内容)：カメラ⇒実機とDIVP（RAW）出力結果を、自社の認識アルゴリズムにおいて、類似シナリオベースで比較。 LiDAR⇒実機とDIVP出力（点群）を、類似シナリオをベースで比較。 （※カメラ、LiDARとも傾向評価） ■ （進捗）：利用するセンサパラメータ設定項目、実施シナリオの確認を開始
	C社	■ ミリ波	■ DIVPSIM環境において、自社製品実機／モデルとの比較評価を行い、DIVP活用の可能性を検証 （C＋D社）	■ （実施内容）：D社実機とDIVP（D社モデル利用）出力結果を基礎的な環境で比較。 （※ラボ環境と走行状態で、精度：受信レベル、角度、距離、速度等を確認） ■ （進捗）：D社との間で、DIVP出力内容、IF仕様の確認を開始。 C社にて基本検証シナリオを準備
サプライヤ	D社 グループ			
	E社	■ カメラ	■ ステレオカメラへの適用可能性を検証	■ （実施内容）：新PF環境をE社内に構築し、自社認識SW環境と接続する。単眼カメラにおける評価手法（DIVP成果）をステレオに応用し検証を進める。 ■ （進捗）：環境構築の準備完了
	F社	■ ミリ波 ■ カメラ	■ 国際連携の状況を共有しつつDIVP活用を検討	■ まずは国際連携での情報を共有しながら、情報収集。 （徐々に日本でも独自シナリオ等で使ってみたい意向）
センサメーカ	G社	■ カメラ ■ LiDAR	■ シミュレーションによる自社センサ評価の実現に向け、知見をUP。	■ 機密保持契約における、情報の利用目的に関し交渉中。 （SimuLINK環境でのSIM利用に関し並行して検討中）
開発ツール（ソフトウェア）	H社	■ 全般	■ （MBD開発の標準PFとも言える）SimuLINK上でDIVPと各種SWとの連携事例作成	■ (実施内容)：SimuLINK上で、DIVPの代表的不調シーンをMathWorks社の保持する認識（AI）やFUSIONのアルゴリズムと組み合わせ、具体的な活用事例を作成。 ■ （進捗）：相互が提供可能な出力例で具体的な実施内容の検討を開始

出所：日本ユニシス（株）

Figure 433　実施状況

実験の狙いとしては、最初のステップでは、自社環境への DIVP®適用のトライが中心。次のステップとして、各社ともセンサ弱点に関する多様なシナリオを、仮想空間モデルとして評価を進めたい意志が明確。



出所：日本ユニシス（株）

Figure 434　現評価と次評価への期待

③ 結果に基づくDIVP® (Sim 本体及び事業提供)の評価と課題

OEM、センサメーカの要望を把握し、4 つの軸に分けて整理した。

■機能

シミュレーションプラットフォームとしての品揃え、

および SDMGenerator、シミュレーション PF それぞれの操作性や業務効率向上に関する要望

■性能

シミュレーションの精度および速度

■接続性およびツールチェーン

業務適用にあたっての既存 SW との連携性

■その他

SDMG に関しては、シナリオ作成時の操作性とアセットの充実が、強く要望されている。シミュレーション PF のセンサモデルについては、一致性の高い精緻なモデルと自由にパラメータ設定できるモデルとの 2 方向の要望がある。

		SDMGenerator	Simulation PF	その他
機能		■ 実環境の再現のための機能充実 ・マップ:無償データからの道路生成 ・道路環境:段差、凹凸、白線カスレ ・周辺環境:周辺車両ウィンカー、信号機変化、横風 ■ シナリオパターンのための機能充実 ・定型アセット配置(交差点など) ・既存シナリオの複製、流用 ・既存モデルの複製、流用	■ 車両としての再現 ・シナリオ、各種センサの開始タイミング、出力タイミングのズレ再現 ・路面凹凸などによる車両振動、姿勢変化 ・ステレオカメラ:左右での雨滴一致 ■ 既存センサモデルの再現 ・モデルラインアップの充実or設定パラメータの充実 - カメラ:カラーフィルタ、露光時間、感度etc - LiDAR:スキャンパターン、パワー/ゲイン設定etc ■ 未知センサモデルの表現 ・設定パラメータの充実(同上)	■ 実環境の再現のためのアセット充実 ・マップ:日本各地、海外道路、駐車場 ・路側物:側壁、縁石、電柱、中央分離帯 ・他車両:二輪車、スポーツカー、特殊車両 ・人:子供、座っている人、寝ている人、高齢者 ・路面形状:凹凸、白線カスレ ■ 夜間の再現 ・ランプ類:他車ランプ、街灯、信号 ・月夜
	システムインターフェース	■ 設定情報の取込 ・経路情報(csv)取込 ・センサーモデル情報取込	■ 出力情報の充実 ・車両位置、物標位置 ・ミリ波:点群、波形情報、ピーク点情報 ・LiDAR:ピーク点情報	なし
	操作性、UI	■ 経路作成の効率化 ・他車、オブジェクトに対する相対位置による作成 ・数式による作成 ■ 精緻な設定 ・他オブジェクトに対する、垂直/平行/角度指示 ・他オブジェクトトリガ、同期などの　タイミング指示	なし	■ Viewer要望 ・真値/センサ視/認識値の比較、重ね表示 ・一時停止、コマ送り、フレーム指定 ・表示内容のON/OFF、フィルタリング

出所:日本ユニシス(株)

Figure 435　要望まとめ (機能)

DIVP®の特徴である一致性について、実環境や不調シーンへの拡張が強く要望されている。他システム連携に関する要望も多い。

	SDMGenerator	Simulation PF	その他
性能	なし	■ 実環境の再現 ・道路状況：濡れ路面、水溜まり、積雪、太陽光反射 ・気象状況：雨、霧、雪、逆光 ・ランプ：テールランプ ・センサー：他車・対向車センサーの影響、センサー汚れ・着雪 ■ 不調シーンの再現 ・歩行者蒸発 ・逆光信号機 ■ 計算速度の高速化、短縮	■ 一致性検証されたシナリオパッケージの充実 ・交差点、高速道路 ■ 一致性の考え方の明確化 ・DIVPの目指す一致性レベル、基準の明確化 ・シミュレーション適用範囲の明確化(どこまで一致したらどのような検証をバーチャルで行えるか)
接続性 および ツールチェーン	■ 他システム連携 ・OpenSenario ・他システムのマップ取込	■ 他システム連携 ・各社モデルとの結合性	■ 他システム連携 ・アセットの他システムでの利用 ・各社既存システムとの連携 (IPG Carmaker、MATLAB/Simulinkなど)
その他	■ 業務利用に必要な仕組み、機能 ・各機能のオプション化 ・フローティングライセンス対応	■ 一致性担保手法の明確化 ・実験同定によるセンサモデル構築に必要な情報の開示、明確化	■ 導入課題への対応 ・コスト ・SDMGおよびPFの試用要望 ■ DIVP活用支援 ・モデル、アセットの作成支援 ・個別車種の再現

出所：日本ユニシス（株）

Figure 436　要望まとめ（性能、その他）

(3)次年度以降の計画

各種要望に対しては、研究開発と事業化課題に分けて具体的にアクションに向けて検討して行く。継続する実証実験 STEP2 や今後のユーザ評価においても、積極的に要望の取り込みを行いたい。

		検討項目
研究開発		・実環境の再現 - 道路状況：濡れ路面、水溜まり、積雪、太陽光反射 - 気象状況：雨、霧、雪、月夜 - センサー：他車・対向車センサーの影響、センサー汚れ・着雪
		・不調シーンの再現 -歩行者蒸発、逆光信号機など
		・車両の再現 - 車両振動、姿勢変化など
事業化に向けた課題	製品	・SDMGeneratorの機能向上 - 操作性、経路やシナリオ生成のための更なる機能充実 - 実環境の再現のためのアセット充実
		・シミュレーションPFの機能向上 - 計算速度の向上 - 他システム連携IF整備 - リファレンスモデル（パラメータ設定）
	スキーム	・他ベンダ連携体制の構築 - センサモデルの充実 - シミュレーション連成パートナー
		・DIVP®シミュレータ活用支援、業務適用支援の体制構築

出所：日本ユニシス（株）

Figure 437　今後のアクションに向けた検討項目

5. 3. 5 「D3-3. DIVP®開発の「走行環境～電波伝搬～センサモデル」出力データのモニター企業における自動運転性能シミュレーションの有効性に関する研究：対象 OEM、センサメーカ」（日本ユニシス株式会社）

■ 事業目的

DIVP®シミュレーションモデルのユーザでの有用性検証のため、国内自動車 OEM、センサメーカを対象にモニター企業を募り、研究成果物のプロトタイプ版を用いて有効性検証を実施する。研究成果に基づき 2022 年度初に事業化を計画中。本検証（以下、実証試験）では、以下を目的とする。

- DIVP®の ADAS・AD シミュレーションとしての存在と性能(高い一致性)を、広く認知させる
- 想定ユーザの業務・シミュレータの使い方を把握し、今後の開発計画へフィードバックを行う

■ 事業概要

公募により広く参加者を募集し、DIVP®の有効性を訴求し、有望なパイロットユーザー候補を発掘し、具体的な導入課題を把握し、事業化時のパイロットユーザーを獲得につなげる。

① モニター企業における有用性の確認

（ア）シミュレーションで確認したい事象の再現性確認

（イ）センサシミュレーション知覚出力の妥当性の確認

（ウ）既存の検証手段と比べた優位性の確認

（エ）モニター企業である OEM、センサメーカとのセンサ共同開発、及び OEM、センサメーカに対する提案活動におけるシミュレーション活用の可能性の確認

② モニター企業からのフィードバック

（オ）シミュレーション結果の評価

- 実機検証結果とシミュレーション結果の比較評価
- OEM やセンサメーカ視点でのユースケースにおける知覚・認識への影響度評価

（カ）他システム連携についての課題

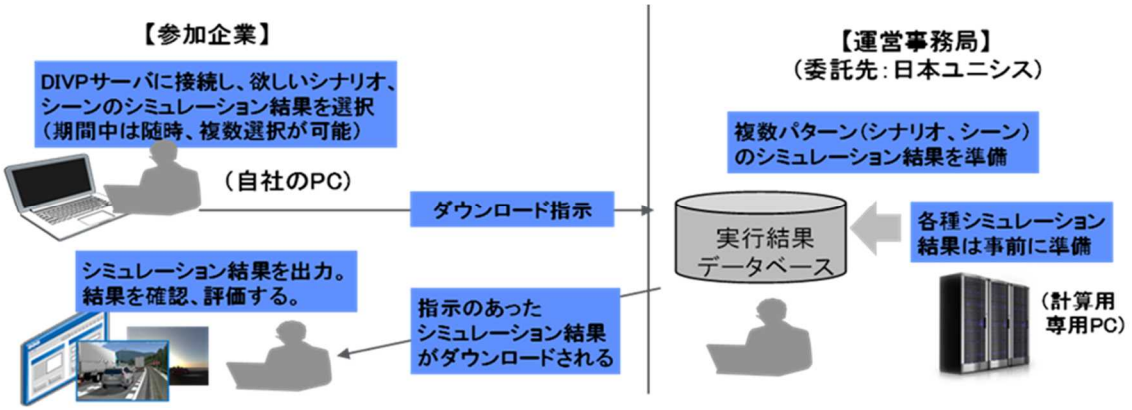
（キ）シミュレーション実行、結果取得に関するシステム操作性についての課題

③ モニター評価実施規模

（ク）モニター企業数は、20 社程度を募る

④ モニター評価方法

- 「オンライン環境シミュレーション」とし、オンライン環境でシミュレーションを疑似体験。
- DIVP®シミュレーションをパイロットユーザーのユースケースで実施、出力を自社環境に接続して評価。



出所：日本ユニシス（株）

Figure 438　STEP1「オンライン環境シミュレーション」

■ 実施計画

事業項目		2021年度					
		10月	11月	12月	1月	2月	3月
①モニター評価用設備の調達・配備	必要なインプット	★STEP1用シミュレータ					
	活動スケジュール	→					
	活動の成果物	評価環境★					
②モニター評価準備	必要なインプット	★ユーザ候補					
	活動スケジュール	→	⇢				
	活動の成果物	評価環境★					
③モニター評価運営	必要なインプット		★評価環境				
	活動スケジュール		→	→	→		
	活動の成果物			モニター評価実行結果★			
④モニター評価結果取り纏め	必要なインプット						
	活動スケジュール	→	→	→	→	→	
	活動の成果物			DIVPへの定期報告		実行結果報告書★	

(1)令和3年度の成果(まとめ)

OEM/モニタ評価、臨海部実証実験、SAKURA合同TF等を通して、DIVP®の訴求活動と要件把握を実施。判明した要件を参考に、事業化に向けた検討を進める。

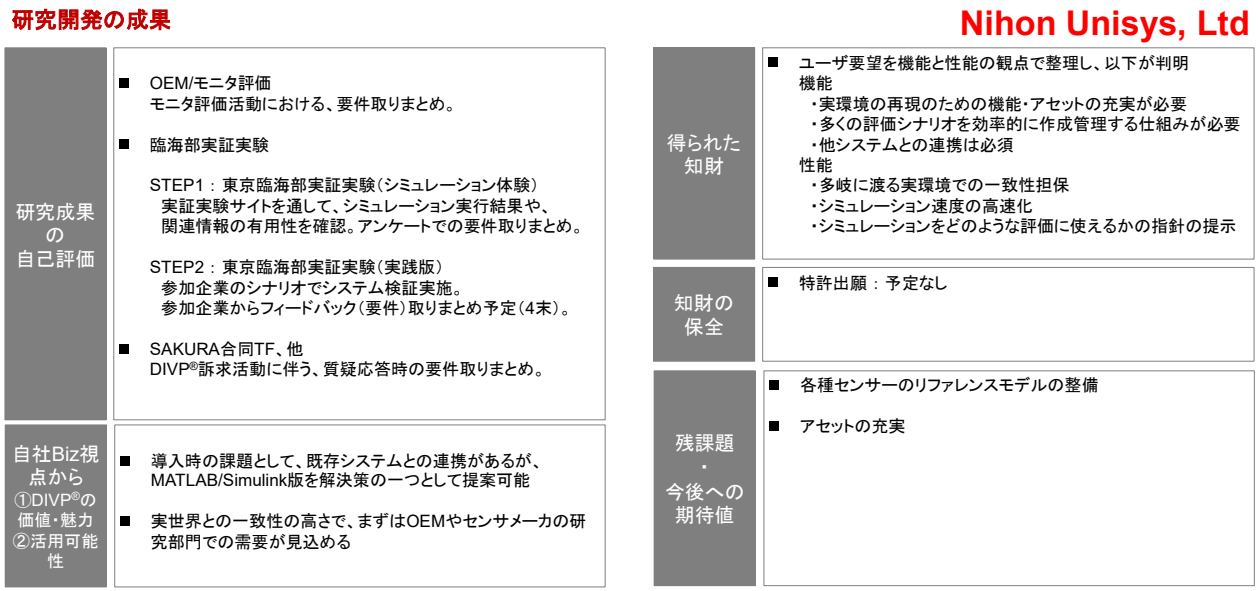


Figure 439 研究開発の成果

OEM/モニター評価、臨海部実証実験、SAKURA 合同 TF 等を通して、DIVP®の訴求活動と要件把握を実施。判明した要件を参考に、事業化に向けた検討を進める。

(2)令和3年度の成果

① モニター評価(実証実験 STEP1【シミュレーション体験】)の実施内容

STEP1【シミュレーション体験】では、シナリオパッケージに対する様々なセンサ弱点となる環境要因を組み合わせた検証を可能とすることで、効率的に自動運転システムの保証・検証を実施。

出所:日本ユニシス(株)

Figure 440　提供するシミュレーション環境　:STEP1【シミュレーション体験】

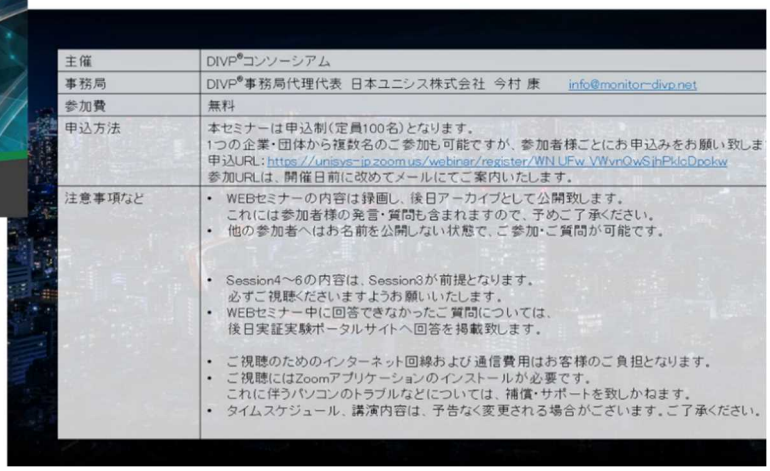
実証実験 STEP1【シミュレーション体験】では、専用ポータルサイトを開設。物理現象の再現と実測による一致性検証に裏付けられた DIVP®の高い一致性を発信し、広く参加者に認知された。

URL:https://demo.monitor-divp.net/　　ID:User01　　Pass:User01@AWS
※臨海部実証実験におけるDIVP紹介ポータルです。Technical Informationには動画等多数掲載。ぜひご覧ください。

出所:日本ユニシス(株)

Figure 441　専用ポータルサイトによる情報発信

実証実験 STEP1【シミュレーション体験】では、ウェビナーによる情報発信を実施。関係者含め 75 名の参加を得た。



主催	DIVP®コンソーシアム
事務局	DIVP®事務局代理代表 日本ユニシス株式会社 今村 康　info@monitor-divp.net
参加費	無料
申込方法	本セミナーは申込制（定員100名）となります。 1つの企業・団体から複数名のご参加も可能ですが、参加者様ごとにお申込みをお願い致しま 申込URL：https://unisys-jp.zoom.us/webinar/register/WN_UFw_VWvnQwSihPkIcDpckw 参加URLは、開催日前に改めてメールにてご案内いたします。
注意事項など	• WEBセミナーの内容は録画し、後日アーカイブとして公開致します。 これには参加者様の発言・質問も含まれますので、予めご了承ください。 • 他の参加者へはお名前を公開しない状態で、ご参加・ご質問が可能です。 • Session4～6の内容は、Session3が前提となります。 必ずご視聴くださいますようお願いいたします。 • WEBセミナー中に回答できなかったご質問については、 後日実証実験ポータルサイトへ回答を掲載致します。 • ご視聴のためのインターネット回線および通信費用はお客様のご負担となります。 • ご視聴にはZoomアプリケーションのインストールが必要です。 これに伴うパソコンのトラブルなどについては、補償・サポートを致しかねます。 • タイムスケジュール、講演内容は、予告なく変更される場合がございます。ご了承ください。

参加者　計75名
（OEM6社11名
自動車関連19社38名
IT1社1名
主催関係者17名）
その他　パネリスト9名
司会・運営3名

出所：日本ユニシス（株）

Figure 442　22 年 1 月 17 日ウェビナーの実施

② 臨海部実証実験 STEP1【シミュレーション体験】の成果

56 社、81 エントリーの申し込みを得て、専用ポータルによる情報提供を実施。

参加各社とはリレーションをキープして、DIVP®の情報発信　を継続していく予定。

【合計】56社（81エントリー）応募
・2022年1月17日にウェビナー開催。
・参加各社とはリレーションをキープして、DIVP®の情報発信　を継続していく予定。

（順不同）

OEM（13社）
トヨタ自動車
マツダ
三菱
SUBARU
ヤマハ発動機
いすゞ自動車
三菱ふそうトラック・バス
スズキ
ダイハツ工業
本田技術研究所
本田技研工業
日産自動車
Woven Core

自動車関連(サプライヤ他)（28社）
ティアフォー
金沢大学
名古屋大学
ヴァレオジャパン
キヤノン
ランスタッド
トヨタシステムズ
日本工営
トヨタ車体精工
筑波大学
デンソー
アイシン
京セラ
古河電工
古河AS
住友電気工業
日立Astemo
豊田自動織機
NXPジャパン
三菱重工機械システム
豊田自動織機ITソリューションズ
エイヴィエルジャパン
トヨタテクニカルディベロップメント
あいおいニッセイ同和自動車研究所
損害保険ジャパン
パシフィックコンサルタンツ
アイサンテクノロジー
J-QuAD DYNAMICS
Toyota Technological Institute
MathWorks Japan
コンチネンタル・オートモーティブ

IT（3社）
日本アイ・ビー・エム
新農林社
セリオ

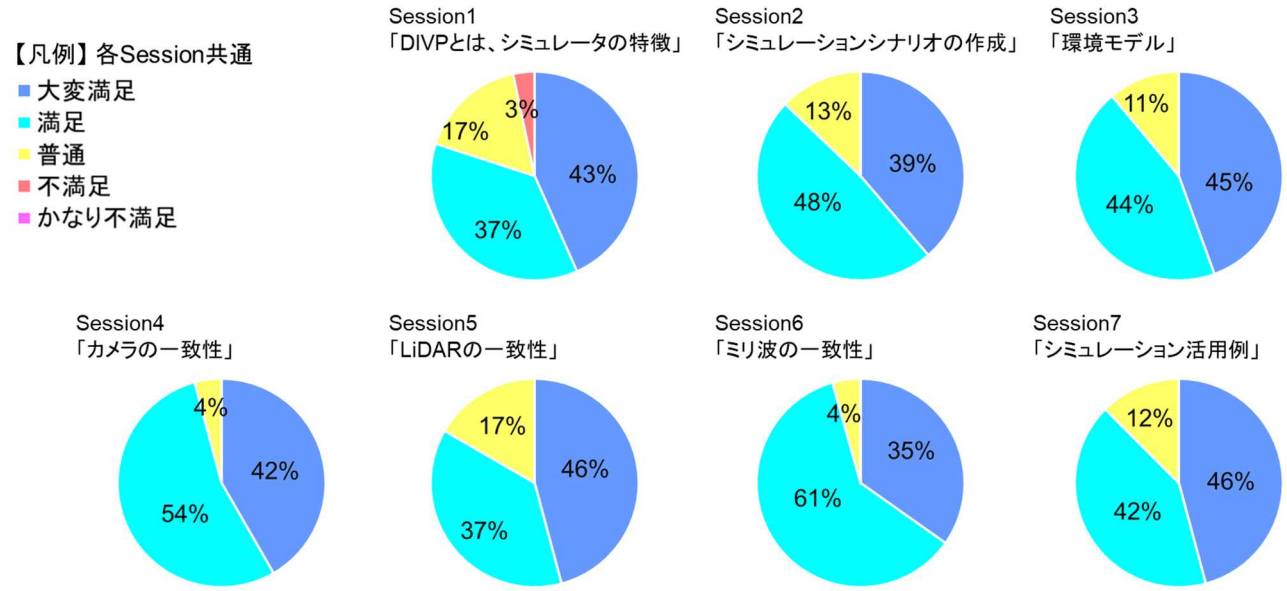
DIVP®関連　（12社）

2021/11/4～2022/2/28の期間中に1032件のアクセス
（1社あたり18アクセス）があった。

出所：日本ユニシス（株）

Figure 443　ポータルサイト申し込みおよびアクセス状況

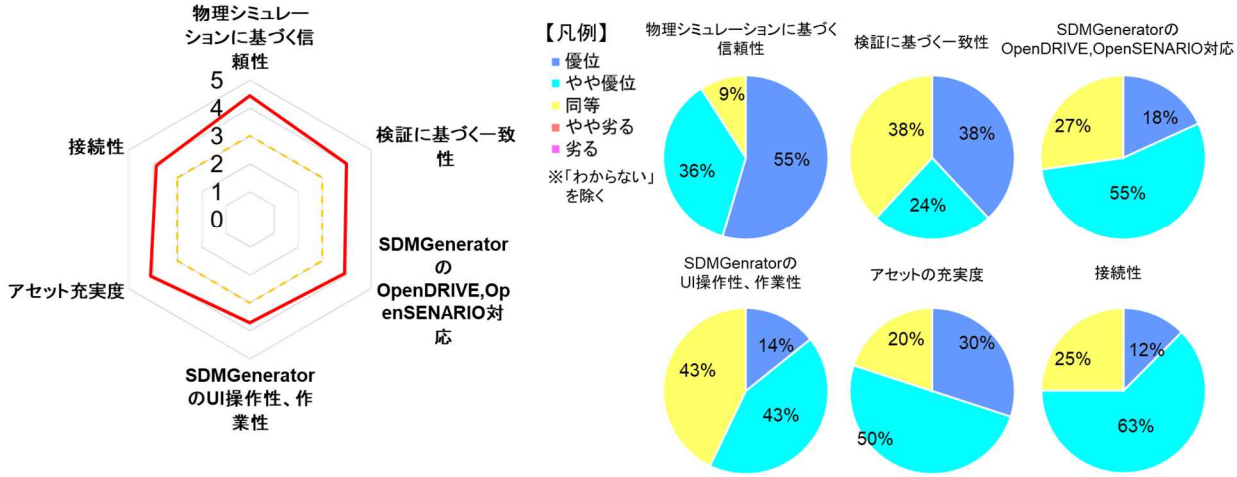
ウェビナーの参加者アンケートでは 33 名から回答を回収し、いずれの Session でも大変満足・満足との回答が 80%以上を占め、ポータルサイトによる発信を効果的に補強することができた。



出所：日本ユニシス（株）

Figure 444　ウェビナーのアンケート結果

臨海部実証実験 STEP1【シミュレーション体験】のアンケートでは 44 名(2 月末時点)から回答を回収し、DIVP®シミュレーションの信頼性、アセットの充実度などについて他のシミュレータに比べて高い評価を得た。



出所：日本ユニシス（株）

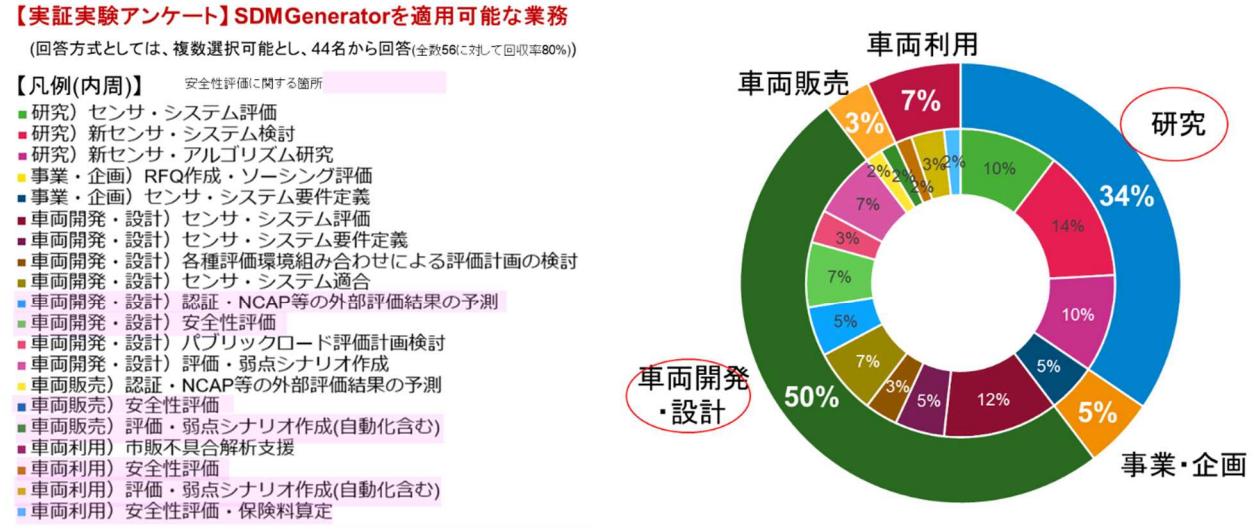
Figure 445　実証実験 STEP1【シミュレーション体験】のアンケート結果

臨海部実証実験 STEP1【シミュレーション体験】では、DIVP®シミュレータの業務適用可能性についてアンケートを実施した。

出所：日本ユニシス（株）

Figure 446　業務適用アンケート

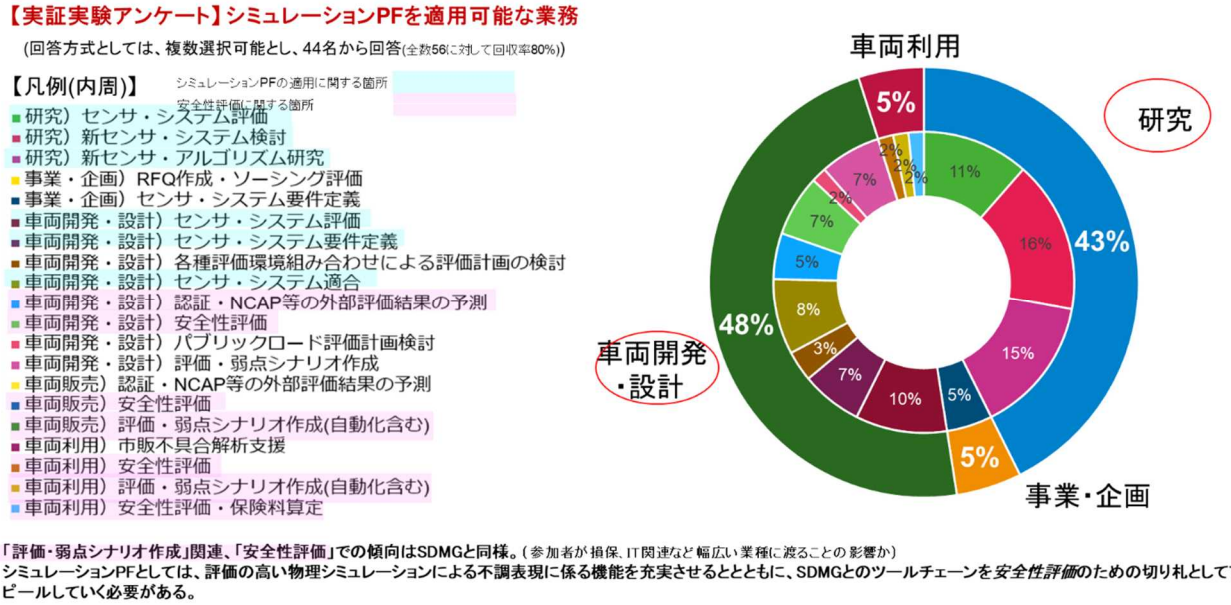
SDMGenerator には、「研究」以上に「車両開発・設計」での適用が期待されており、開発実務におけるシミュレーション　の普及の現れか。同時に、SDMG は実務を想定の上で使えるレベルであることが確認できた。



出所：日本ユニシス（株）

Figure 447 【実証実験アンケート】SDMGenerator を適用可能な業務

シミュレーション PF は、「研究」と「車両開発・設計」でほぼ同等レベルの期待感。「研究」では、新システム、アルゴリズム研究開発、「車両開発・設計」では評価から適合への一連のプロセスで適用可能との評価。



出所：日本ユニシス（株）

Figure 448 【実証実験アンケート】シミュレーション PF を適用可能な業務

アンケートにおいては、その他に、以下の様な自由意見を得た。シミュレーションを使った認証への期待感や、接続したい他シミュレータ、自社への適用イメージと言った具体的な意見を頂くことができた。

【実証実験アンケート】実証実験の運営など自由意見

- 以前の経験から、シミュレーションはモデルの精度が大切なのは言うまでもないですが、それ以上にどのように使うことができるかが重要と感じています。DIVP®についても開発・評価だけでなく認証にまで使える様になれば、自動運転の社会実装の加速に役立つと思われ、ぜひスタンダードなツールとして、より一層の発展を期待します。
- 車両モデルとして IPG CarMaker、制御モデルとして Simulink と接続してほしい。
- Carla の上位互換とうたえる作りであってほしい。接続性、センサモデル、API　など。
- 道路インフラレーダ研究のために、街路樹（ミリ波特性込み）アセットと、空間描画機能が欲しい。
- 本シミュレータは一致性検証がされ、弊社にとっても非常に有用なシミュレータになると感じております。しかしながら現状では、弊社で使われている魚眼カメラ及びソナー機能が搭載されていない為、是非センサ拡充をお願い出来ればと思います。また駐車場シーン(平面駐車場・立体駐車場・地下駐車場)等もシミュレーションシーンとして拡充頂けると活用に繋がります。
- 現時点では自動運転と呼べる車両はほぼ無い状況だが、今後自動運転車が出てきた場合に、個別車種毎の再現ができると嬉しい
- 今後 FY2022 で製品化されると共に、開発現場のユーザからの利用者目線でのフィードバックが多数寄せられることが期待されます。できれば現場作業者の声も聞きつつ、特に先行開発の分野にてどのような活用事例が検討されてゆくか、随時情報展開されることを望みます。
- 海外ツールや海外サプライヤに対抗できるよう、国内 OEM で実績を上げる必要がある。
- 提供価格を安価に

- コスト、やりたいことをスピード感持って行えるツールであること、入出力の接続性、カスタマイズ性などを気にしております。
- どのような試験シナリオ、及びマップが用意できるのか、シナリオ・マップ準備にかかる時間・費用コストはどのくらいか、相談できる場があるとありがたい。

⑶次年度以降の計画

なし

5. 3. 6 「D4. ミリ波レーダ知覚モデル構築、評価」（日本ユニシス株式会社、株式会社ユーシン）

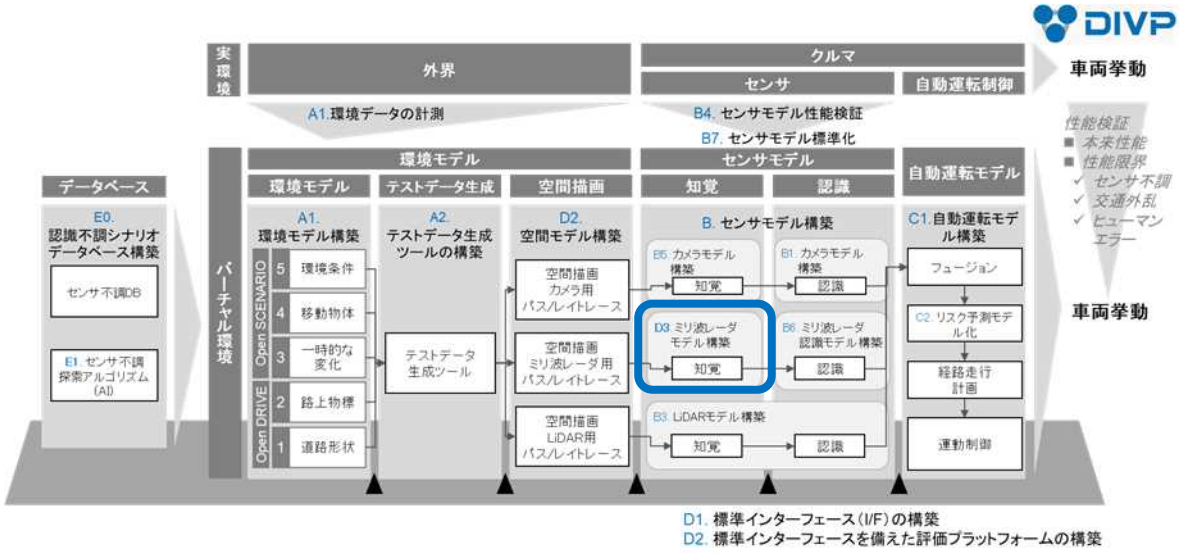


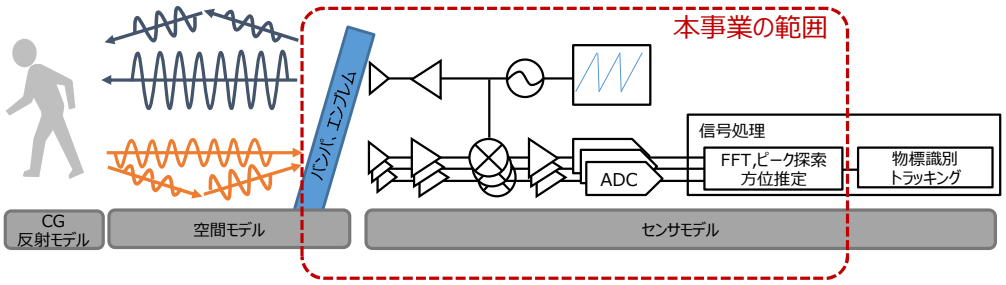
Figure 449　本研究の位置付け

■ 事業目的

本事業では、2020 年度までに構築したミリ波レーダモデル（株式会社デンソー）を基に、ミリ波レーダ界の最新技術動向に沿った機能拡張を行う。

また、機能拡張に伴う作業として、前後のパートとのインターフェース整備を行う。

■ 事業概要



出所：（株）SOKEN

Figure 450　ミリ波レーダモデルの構成図

ミリ波レーダモデルの構成図及び本事業の範囲を上図に示す。2020 年度までに基本的なミリ波レーダモデル構築は済んでいる（株式会社デンソー）。

ところでミリ波レーダは、カメラや LiDAR と比べてまだ技術が未成熟・流動的で、それ故に現在もなお基本的な改良が続いている。1～2 年毎に現れる新技術の中には一過性のブームで終わり定着できていないと思われるもの（例：送信ビームフォーミング、デジタルレーダ、他）もあるが、中には確実に定着が進んでいるものもある。本事業では、そのような定着確実な機能のうち、現有モデルに未実装の機能を拡張する。

より具体的には、以下 3 つを行う。

第 1 に、ソースコードの信号処理計算部分の拡張を行う。

第 2 に、前後のパートと連携しながら、ソースコードのインターフェースの整備も行う。

第 3 に、拡張した機能を検証できるような、新たな実験用レーダ装置を整備する。

■ 実施計画

事業項目	2020 年度				2021 年度				2022 年度			
	第1四半期	第2四半期	第3四半期	第4四半期	第1四半期	第2四半期	第3四半期	第4四半期	第1四半期	第2四半期	第3四半期	第4四半期
① ミリ波レーダモデルの拡張（TD-MIMO 方式）							→	→				
② 検証実験用レーダ装置の整備（TD-MIMO 方式）					→	→						
③ ミリ波レーダモデルの拡張（マルチチップ、3 次元レーダ）									→	→		
④ 検証実験用レーダ装置の整備（マルチチップ、3 次元レーダ）											→	→

(1)令和3年度の成果(まとめ)

方位分離性能向上のため、レーダ技術を最近のトレンド技術へアップデートした。
今年度は、市販チップがほぼ備えるMIMO機能へのアップデート等を行い、実験で検証した。

研究開発の成果

研究成果の自己評価	＜実施内容＞ ■ 前任者が残したレーダ技術を調べ、①TD-MIMO技術、②3次元信号処理、という2技術の導入によるアップデートを提案し、推進した。 ■ この推進のため新しい実験用レーダ装置(NXP社チップ)の立上げを、ファーム開発・技適取得の2面から行った。 ■ JtownでSOKEN実施の基礎実験データを解析することで、目的の方位分離性能が理論通りに向上することを確認した。 ■ 更に複雑な市街地でも車載実験を行い、①②の効果でレーダ画質が大きく向上することを実証した。 ＜実施計画＞ ■ ①②を取り入れた信号処理ソフトを開発したものの、DIVP®シミュレータ(Simlink版)への組込み作業が遅れている。3月末までにいったん完了すべく推進中。
自社Biz視点から①DIVP®の価値・魅力②活用可能性	①. 日本の自動運転先端研究の一翼を担うDIVP®に参加することで、まだまだこの分野の新参者で知名度が低い弊社としては、知名度・人脈を獲得できた。 ②. 弊社は車載レーダよりも道路側のインフラレーダに関心があるが、DIVP®開発の内部から要望を上げることで、道路インフラレーダにも流用できる世界唯一のシミュレータ環境に発展させて行く道が拓けてきた。

得られた知財	■ 弊社担当分は公知技術しか使わず進めているので、知財は発生しない予定。 ■ 参考として弊社知財（独自の高分解能アルゴリズム）もしばしば用いているが、これを積極的にDIVP®へ組込む意思はなく、もし要望されてもブラックボックス化して組込む予定なので、知財として取扱い注意は不要と認識している。
知財の保全	■ 特許：0件 ■ 報告書・ノウハウ集：1件 ■ 手順書：0件 ■ ASAM標準：0件
残課題・今後への期待値	■ 残課題は、今回アップデートした信号処理プログラムをDIVP®（Simlink版）ソースコードへ組込む作業が遅れており、3月末完了を目指して進行中であること。 ■ 今後は、車載レーダだけでなく、道路側のインフラレーダの開発へも流用できるように発展させたい。

Figure 451 研究開発の成果

2020 年度までに本事業で構築したミリ波レーダ技術のアップデートを実施した。

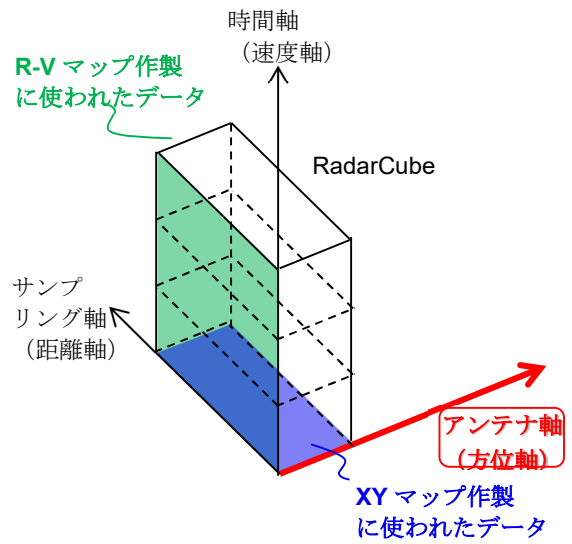
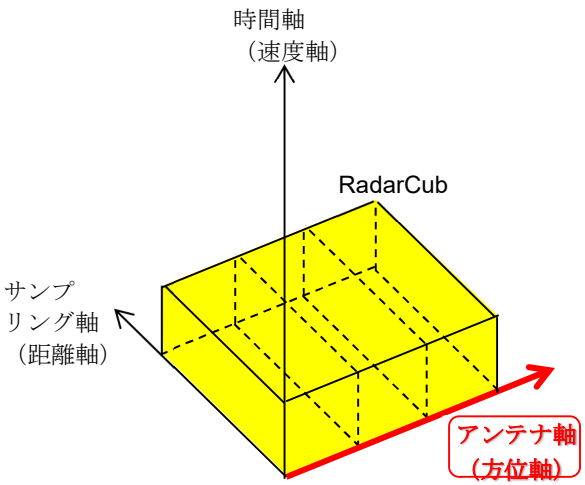
具体的には、ミリ波イメージングレーダの課題である方位分離性能向上のために、①TD-MIMO （Time Division – Multiple Input and Multiple Output）、②RadarCube に対する3次元信号処理、という2つのトレンド技術を導入した。また効果を実験にて実証した。

特に①TD-MIMO に関しては、既に市販レーダチップのほぼ全てがこの機能を備えている状況であり、DIVP® 顧客から強い要望が出ることが予想されるため、タイムリーなアップデートであったと考える。

(2)令和3年度の成果

① TD-MIMO 方式、ミリ波レーダモデルの拡張

より詳細には、下表①②③の 3 点でアップデートを行った。①はハードウェアの変更であり、②③は信号処理ソフトの改良である。

これまでの DIVP®のレーダ技術	令和3年度に行ったアップデート
	
① 測定データ（RadarCube）の体積が小さい。 ADC サンプリング周波数＝ 12.5 or 6.25 Msps ② 仮想アンテナ数＝1x4＝4 本 （非 MIMO） ③ 3 次元 RadarCube を、2 次元信号処理	● 測定データ（RadarCube）の体積を拡大した。 ADC サンプリング周波数＝ 20 Msps ● 仮想アンテナ数＝3x4＝12 本 （MIMO） ● 3 次元 RadarCube を、3 次元信号処理（ピークサーチ）

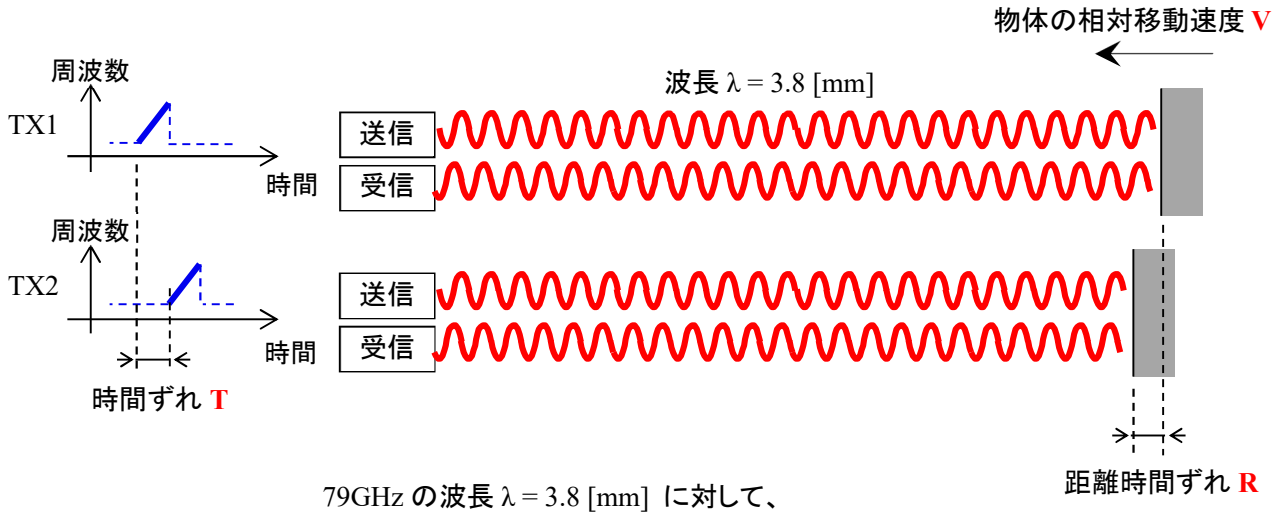
出所：(株)ユーシン

Figure 452 アップデート内容

TD-MIMO （Time Division – Multiple Input and Multiple Output） 技術は、複数のアンテナを時間差で駆動するという技術だが、移動体に対してこの技術を使うと、Figure 453 のように僅かなタイミング差によって位相の測定誤差が生じ、ゴーストが発生する問題が知られている。そのため、車載レーダに TD-MIMO を使う場合は「位相補償」と呼ばれる信号処理の追加が必要になる。この「位相補償」も含めた信号処理全体の流れは、Figure 454～Figure 457 の 4 本のビデオにて説明した。

以上のように、アップデートした信号処理 MATLAB コードは既に開発済みだが、これを Simulink 版 DIVP® シミュレータに組込む作業が遅れている。本稿執筆時点では、3 月末完了を目標に進めている。

なお、事前に懸念していたソースコードのインターフェースの整備については、日本ユニシス開発の Simlink 版 DIVP®シミュレータにおいては、SOKEN の意見を取り入れて比較的柔軟な改造が可能にできており、ユーシンにて特に取り組む必要は無くなった。



79GHz の波長 λ = 3.8 [mm] に対して、

T = 100 [μsec]

V = 20 [km/h]

とすると、

R = 7.2 [mm]

即ち、**数波長分の位相ズレ**が起きる。

出所：(株)ユーシン

Figure 453　TD-MIMO では位相補償が必要な理由

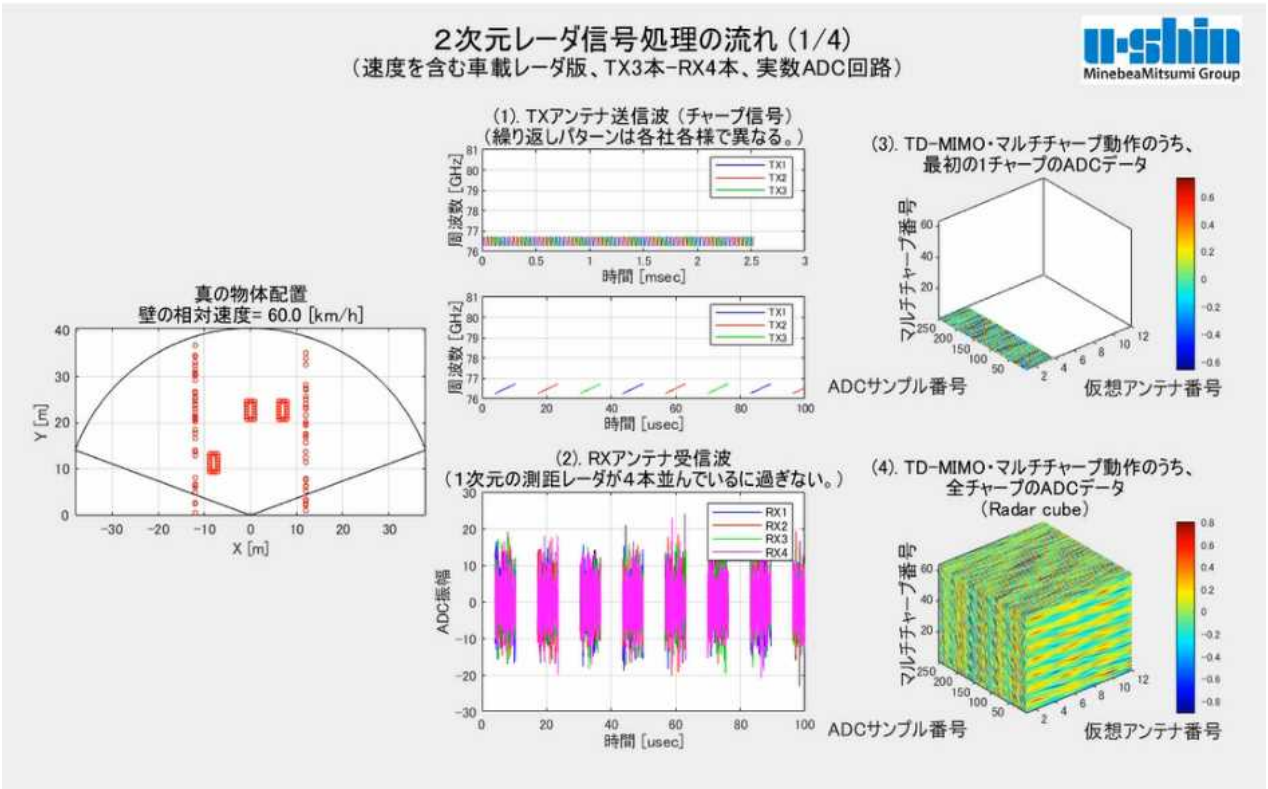


Figure 454　車載レーダの信号処理 1

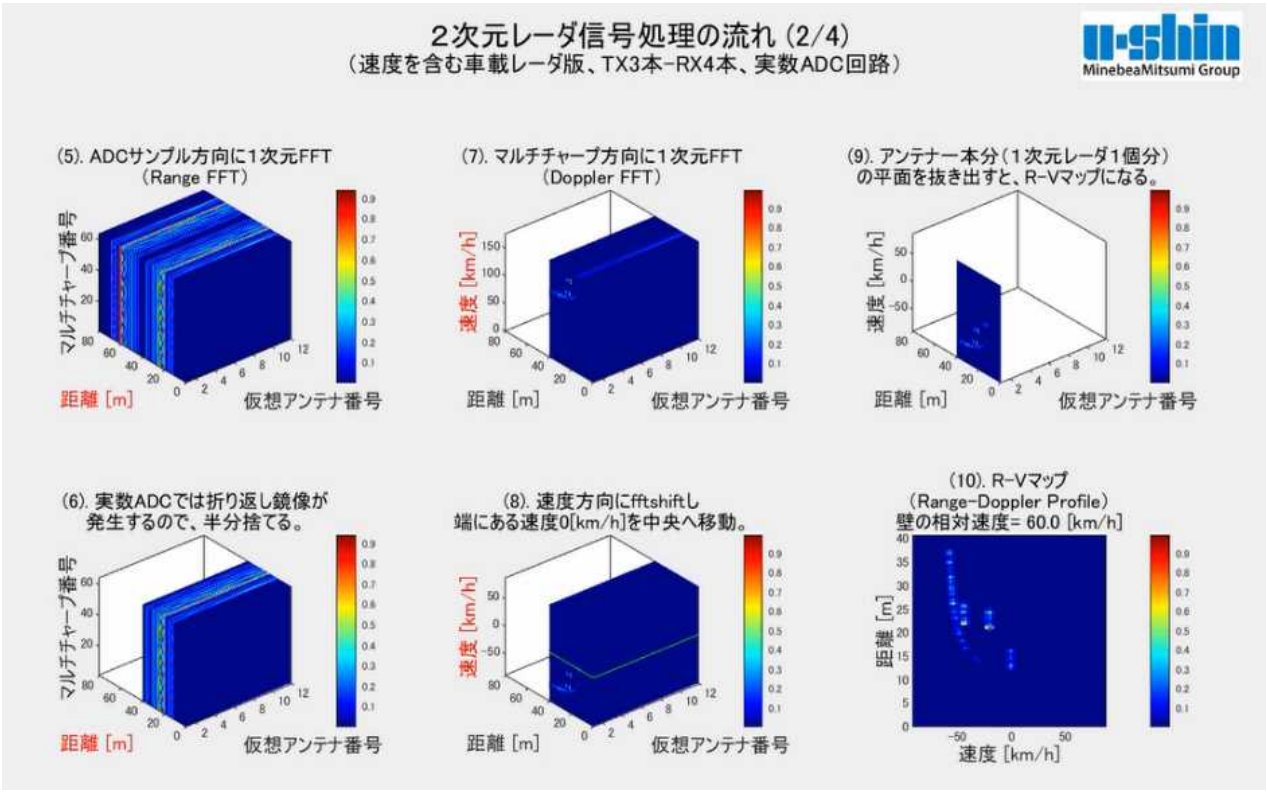


Figure 455 車載レーダの信号処理 2

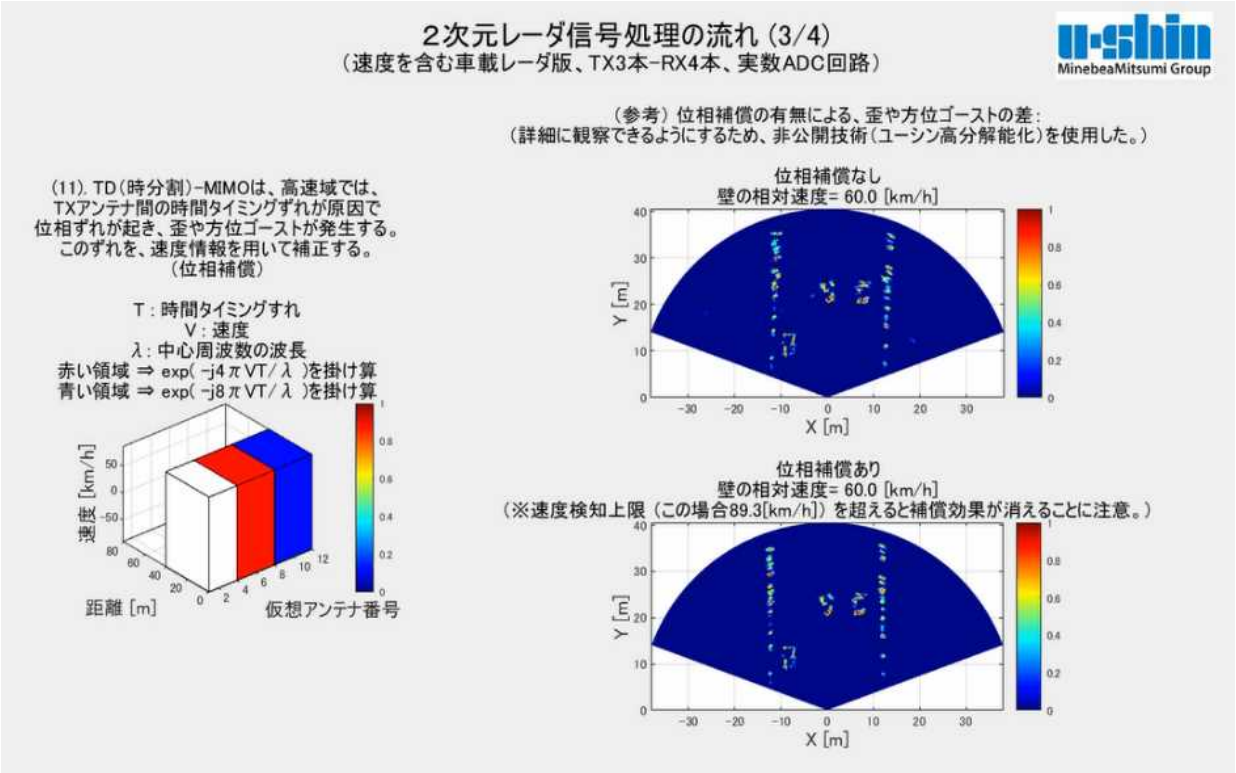
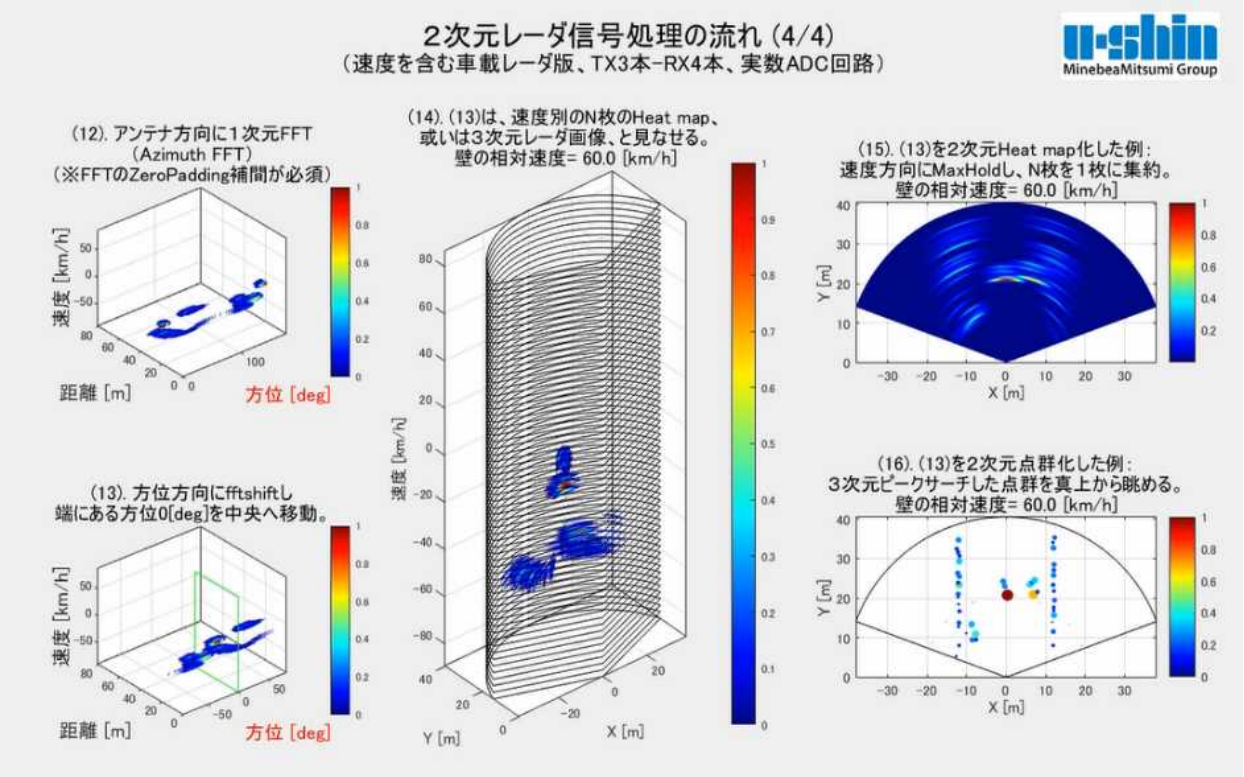


Figure 456 車載レーダの信号処理 3



出所:(株)ユーシン

Figure 457　車載レーダの信号処理 4

② TD-MIMO 方式、検証実験用レーダ装置の整備　(担当:株式会社ユーシン)

これまで DIVP®内で使われて来た実験用レーダ（TI 社 AWR1642 ボード）も、実は TD-MIMO 機能を備えており、DIVP®内でこの機能が活用されていなかっただけである。しかし下記理由から、敢えてこのボードではなく新しいボード（NXP 社 TEF810X チップ）を立ち上げた。

理由 1	TI 社チップは車載レーダではほぼ使われていず、世界シェアトップ（約 30%）の NXP 社チップを使ってみたいという声が DIVP®内であった。
理由 2	AWR1642 の仮想アンテナ本数（2TX × 4RX ＝ 8 本）は、この世代のチップの標準（3TX × 4RX ＝ 12 本）より少なく、そのため今回の焦点である方位分解能で劣る。
理由 3	「実験用装置」として見ると、TI 社レーダチップはハードウェア的な自動パイプライン処理が過剰で柔軟性に欠け使いにくく、NXP 社レーダチップの柔軟性が高く使い易い。

過去に NXP・ユーシン・エスタカヤ（旧シャープタカヤ）の 3 社で試作した NXP チップボード（コード名「Eris」）がエスタカヤの在庫に残っていたため、これを 4 台買い取り下記分担で発展させた。

防水筐体開発	エスタカヤ
DIVP®向けファームウェア開発	ユーシン
技術基準適合証明取得　(※公道実験には必須)	ユーシン

出所：(株)ユーシン

Figure 458 新レーダ装置(防水筐体入り)と技術基準適合証明書

新レーダにはマイコンボード(NXP 社 S32R274)も含まれるが、マイコン上で信号処理はせず、イーサネットで出力して PC 上で信号処理する方法を取った。イーサネットの出力パケットのキャプチャと保存は、SOKEN では Linux マシン上で受信プログラムを開発して RosBag 形式で保存する方法を取ったが、ユーシンではより簡単に WindowsPC 上でフリーウェアのパケット解析ツール(WireShark)で受信して直接 pcap 形式で保存する方法を取っている。

動作モードは、1 個の制御パラメータ(radar.config)によって、出所：(株)ユーシン
の 3 項目を自由に組み合わせられるようにした。

Table 100 動作モードの組合せ

距離モード	TD-MIMO か否か？	マルチチャープか否か？
・10m ・30m ・50m ・100m	・TD-MIMO モード （仮想アンテナ 12 本） ・非 TD-MIMO モード （仮想アンテナ 4 本）	・シングルチャープ ・マルチチャープ （64 回）

出所：(株)ユーシン

近年のミリ波レーダの大きなトレンドとして、入力データ量も出力データ量も増加の一途である。入力データ量は ADC サンプリング周波数やマルチチャープ数等で決まり、出力データ量は MIPI-CSI2 のクロック周波数やイーサネットの伝送容量等で決まる。今回の NXP チップセット （TEF810X、S32R274） は 2017 年に登場した業界第 1 世代品であり、そのデータ処理能力には限界があり、大きく 2 つの点にしわ寄せが来た。

第 1 に、Table 101 で説明する距離モードとチャープ条件の関係において、本来は距離を伸ばすほど ADC サンプリング点数を増やさなければならないのに、増やせず 256 点固定にした。この結果、遠距離モードになるほどレーダ画質が急激にノイジーになってしまった。このため、DIVP®内では遠距離モードの実験結果も報告したが、本紙では代表として 10m モードの実験結果のみを載せた。

第 2 に、Table 102 で説明するマルチチャープモードにおいて、チャープ間の時間間隔ΔT が大きくなってしまい、測定可能な速度のダイナミックレンジを±53km/h 程度しか確保できなかった。このため、本紙では対向車との相対速度が 53km/h に収まる実験結果のみ載せた。

Table 101　距離モードとチャープ条件

距離モード	サンプリング中心周波数	サンプリング帯域幅	サンプリング数
10m	78.3 GHz (ARIB STD T111)	1.6 GHz	256 点
30m	76.5 GHz (ARIB STD T48)	0.6 GHz	256 点
50m	76.5 GHz (ARIB STD T48)	0.38 GHz （※過少）	256 点 （※過少）
100m	76.5 GHz (ARIB STD T48)	0.19 GHz （※過少）	256 点 （※過少）

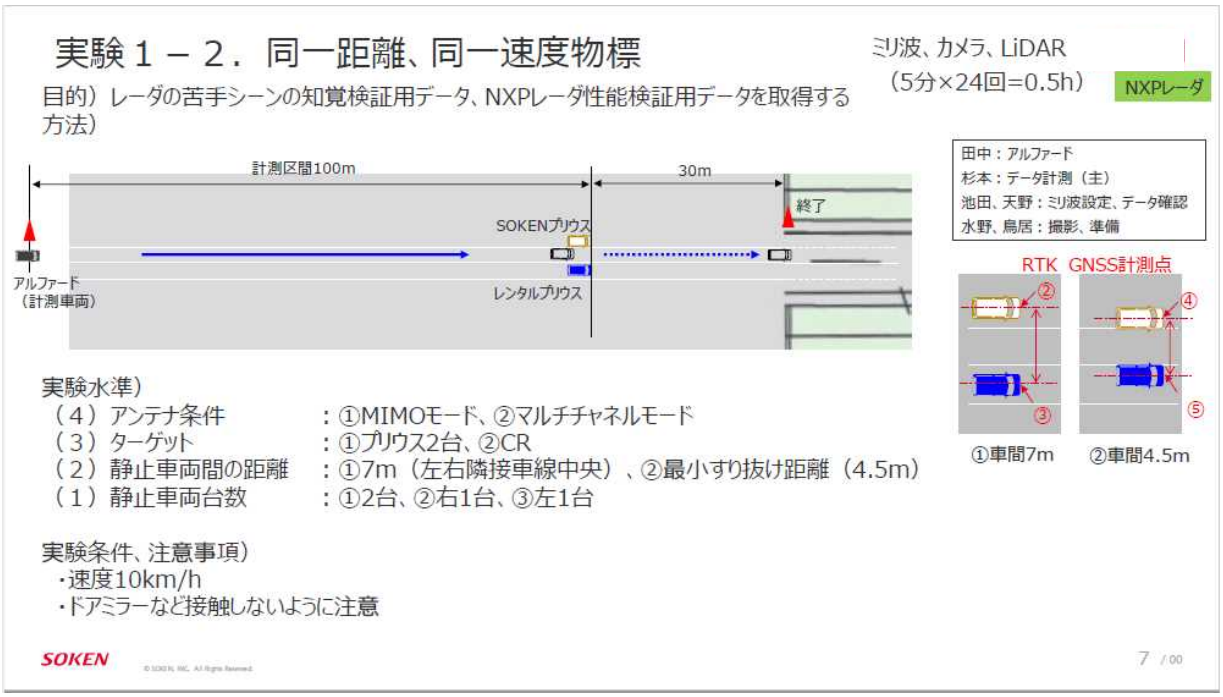
出所：(株)ユーシン

Table 102　速度の測定スペック

測定周期	55 msec
TD-MIMO の 1 周期(TX アンテナ 3 本)の所要時間	21.8 μsec
上記から決まる速度のダイナミックレンジ	±53 km/h
マルチチャープ数	64 回
上記から決まる速度分解能	1.66 km/h

出所：(株)ユーシン

新実験用レーダ、特に MIMO による方位分解能向上の効果は、まず 2021 年 11 月に JARI Jtown にて SOKEN 実施の実験 1-2 にて検証された。同一距離にある 2 個の反射体（実車プリウス）をミリ波レーダで分離できるかを調べたものだが、まずレーダ画像について定性的に Table 103 のように理論予想と実験結果が一致した。



出所：(株)SOKEN

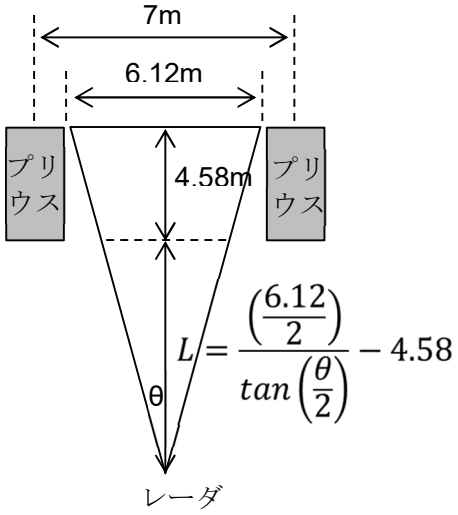
Figure 459　2021 年 11 月実施の実験 1-2 の内容

Table 103　JARI Jtown 実験 1-2 の、定性的な結果

	理論予想		実験結果
遠距離	2 個の反射体を方位分離できず、1 個の点に見える。		一致
中距離	方位分離限界外	2 個の反射体間の mm オーダの距離差によって最悪条件と最良条件の間を揺れ動くため、1 個の点に見えたり、2 個の点に分離したり、をランダムに繰り返すように見える。	一致
	方位分離限界内	安定して 2 個の点に分離して見える。	一致
近距離	点の数が 2 個以上に増えて点群になり、車の四角い輪郭まで見えてくる。		一致

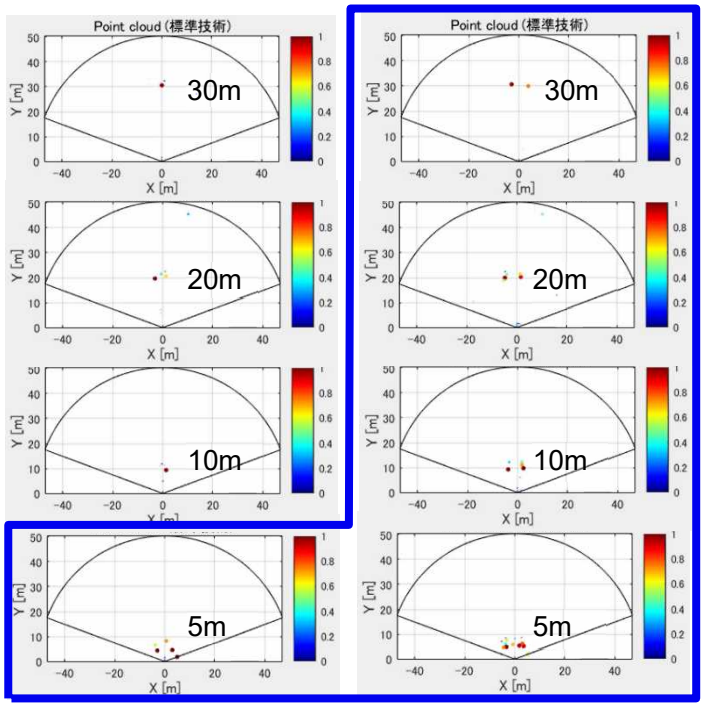
出所：(株)ユーシン

次に、方位分離性能の定量的な比較を行った。ミリ波レーダにおいて方位分離できた状態とは、簡易的定義として、2 個の反射体の間のスペース（下図 θ あるいは 6.12m）にアレーアンテナのビーム一本がすっぽり入る状態を指す。従って、安定して方位分離できる最小距離 L を簡単な計算で見積もることができる。実測結果で安定方位分離と思われる距離範囲を青枠で囲ったが、理論予想と良く一致し、これによって TD-MIMO による方位分離性能向上効果を確認できた。



	アンテナ 4 本（非 MIMO）	アンテナ 12 本（MIMO）
ビーム幅 θ	34 deg	9.2 deg
最小 L	5.4 m	33.5 m

理論から予想される距離 L

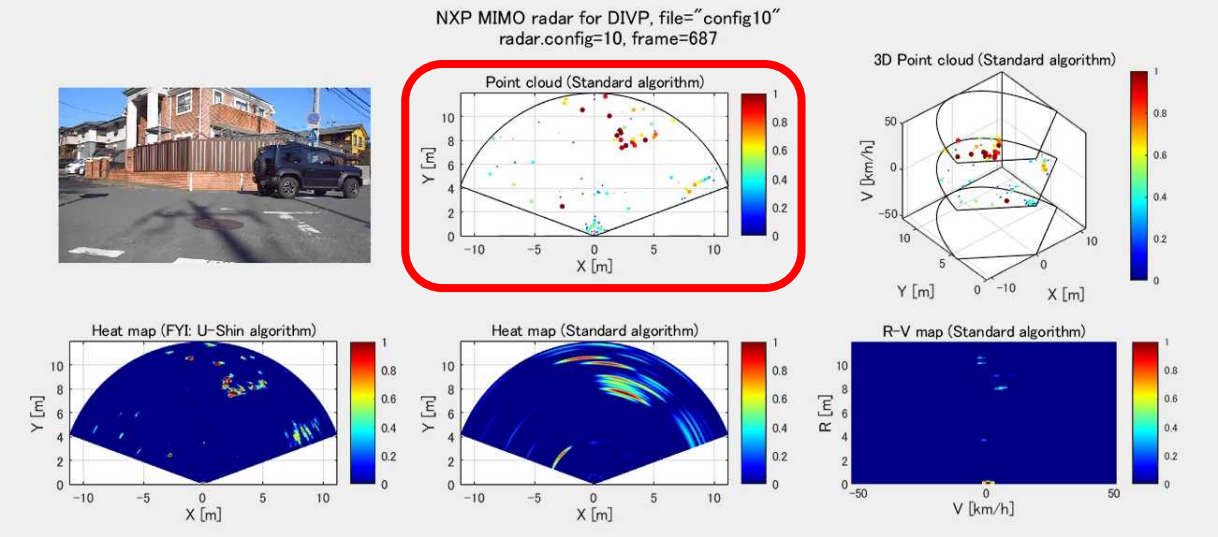


非 MIMO モード（アンテナ 4 本）　MIMO モード（アンテナ 12 本）

出所：(株)ユーシン

Figure 460　方位分離可能距離の理論予想と実験結果

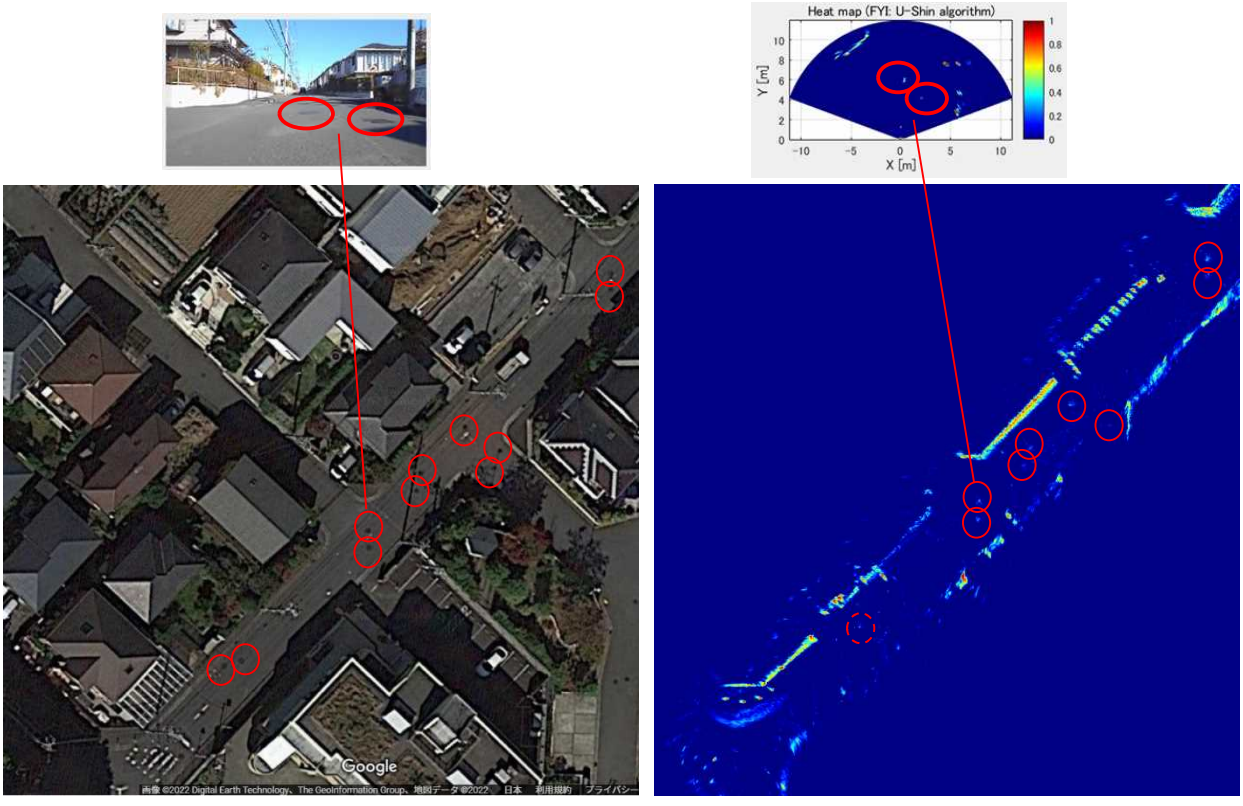
JARI Jtown での基礎実験よりも桁違いに複雑な市街地でも実験を行い、結果は Figure 461 のようなビデオの形で提出した。例えばこのシーンでは、車の輪郭や壁際のポールまで鮮明に見えており、目論見通りミリ波レーダ業界の最新レベル近くまでレーダ画像の分解能が向上したことが分かる。



出所：(株)ユーシン

Figure 461　複雑な市街地での実験結果

なお本市街地実験中に派生的に、不調メカニズムの一つとして疑われてきた現象、2 次元ミリ波レーダにマンホールが映り込む現象を確認した。



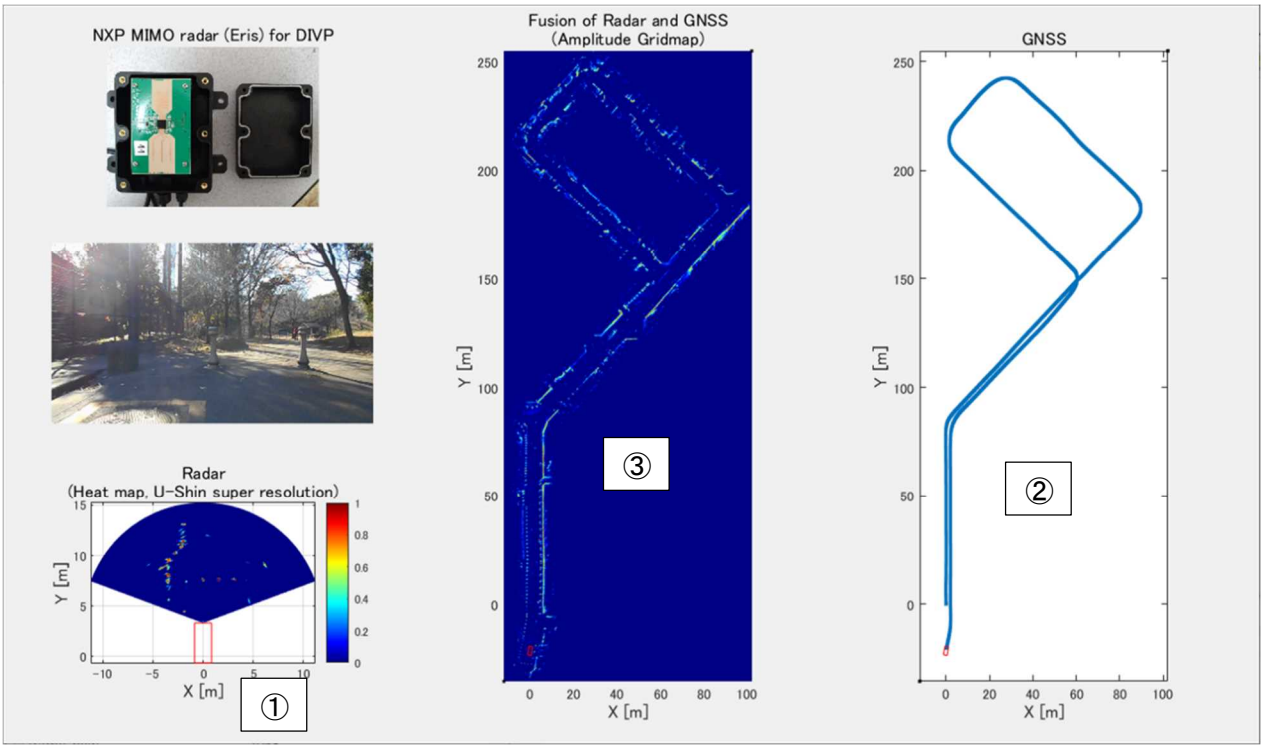
衛星写真　　レーダ画像から作成した地図

出所：ユーシン

Figure 462　レーダ画像に映り込んだマンホール

実験中の瞬間々々のレーダ画像（Figure 462 右上）のマンホールの位置に反射体がしばしば見えたのだが、正確にマンホールと同じ座標かどうかは判別困難だった。そこで、測定データを Figure 463 で説明する地図作成技術で処理したところ、レーダ画像から作成された地図（Figure 462 右下）の上の反射点が、正確に衛星写真（Figure 462 左下）の上のマンホールの位置と一致することを確認できた。

Figure394 の地図作成技術とは、cm 級 GNSS で測定した車の軌跡（図中①）を骨格（Skelton）と見なし、その上に瞬間々々のレーダ画像（図中②）を皮膚（Skin）と見なして順次被せて行くと、街レベルの巨大な地図を作成できるというものである。



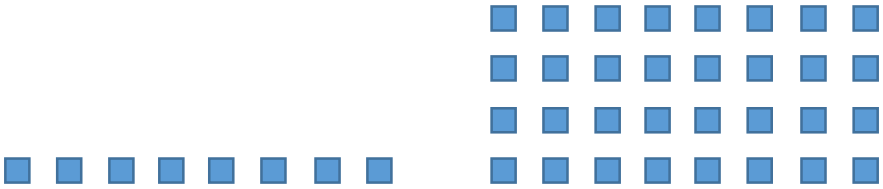
出所：ユーシン

Figure 463　ミリ波レーダと GNSS の組合せによる地図作成技術の説明

(3)次年度以降の計画

③ マルチチップ化による 3 次元レーダ、ミリ波レーダモデルの拡張 （担当：株式会社ユーシン）

ここで言う「3 次元レーダ」とは、最近では速度軸も加えて ”4D Imaging Radar” という呼称が定着してきた。今年度のミリ波レーダ業界は、この ”4D Imaging Radar” アナウンスが増えており、DIVP®としても対応が求められている。モデル面で必要な拡張は下表であり、次年度に実施予定である。

ハードウェアの違い	仮想アンテナ配置が、1 次元の線状ではなく、2 次元の面状になる。 これを表現できるように、アンテナ位置の定義ファイルの拡張が必要になる。  1 次元の線状配置　　2 次元の面状配置
信号処理の違い	Figure 457 の「Azimuth FFT」「fftshift」の後に、「Elevation FFT」「fftshift」を追加

④ マルチチップ化による 3 次元レーダ、検証実験用レーダ装置の整備 （担当：株式会社ユーシン）

上記を実現するためにはレーダチップ 1 個ではアンテナ数が足りないため、2～4 個のマルチチップ構成になる。たまたまユーシンで次年度に予定していた 3 次元レーダ試作品を少量提供する予定だったが、本報告時点でマルチチップ対応のレーダチップの入手が遅れる状況が見えてきており、計画に若干懸念が出ている。

5. 4 「E. 認識不調シナリオデータベース構築」のための研究開発

5. 4. 1 「E0. 認識不調シナリオデータベース構築」(学校法人幾徳学園神奈川工科大学)

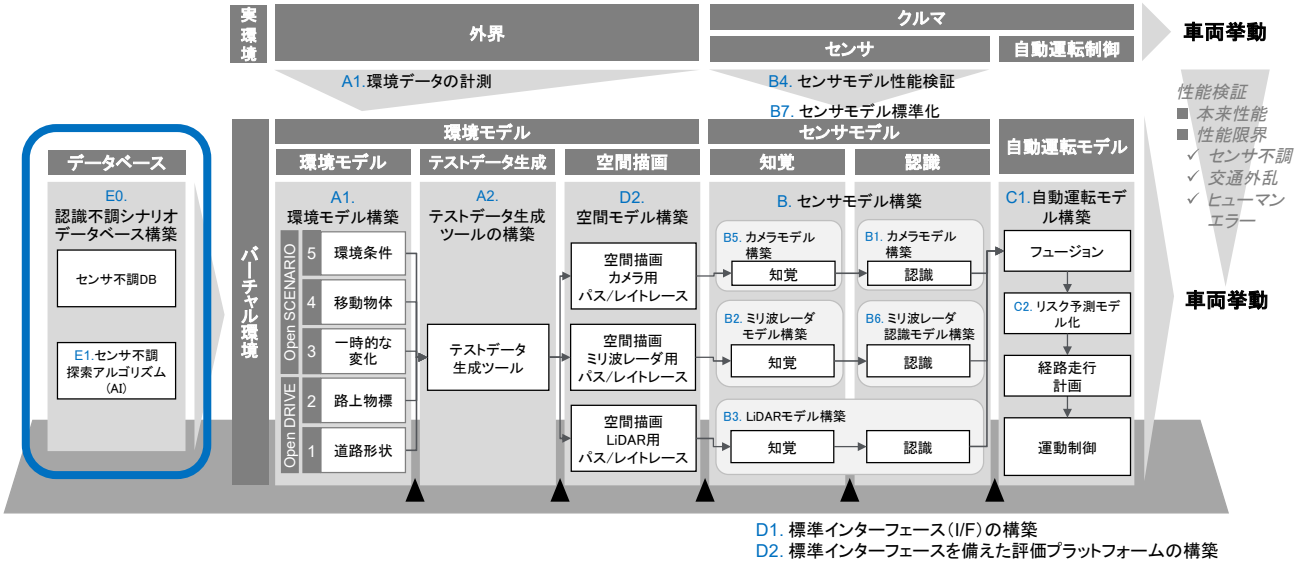


Figure 464 本研究の位置付け

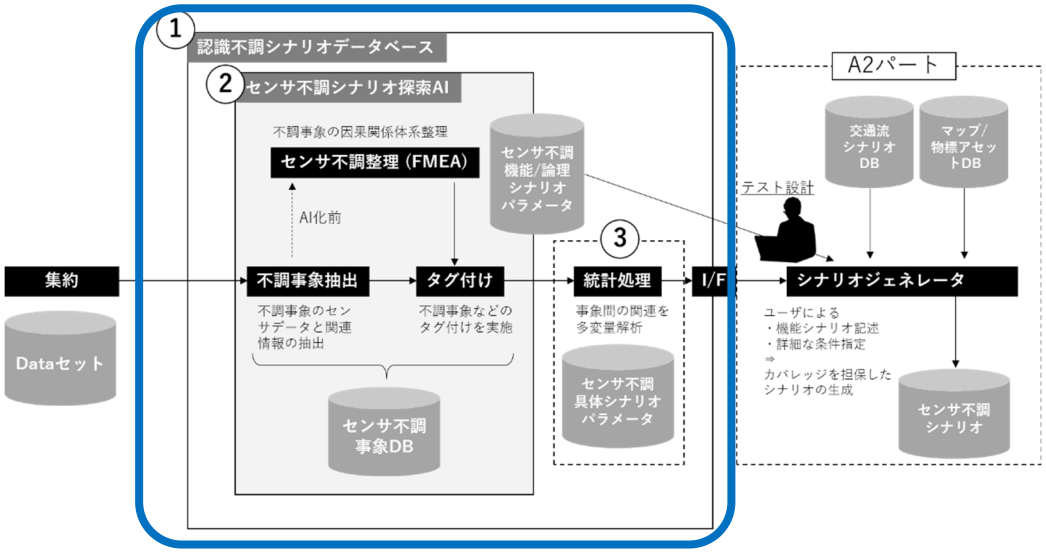
本研究では、バーチャル環境における自動運転システムの安全性を評価するための検証シナリオデータベースを構築する。

■ 事業目的

FOT、各種実験などの車両走行データ、気象情報などの公共データなどを将来にわたって蓄積していくことで、今後の交通環境の変化に追従しながら検証すべき認識不調条件が容易に得られるデータベース(以下、認識不調シナリオデータベースと称する)を構築する。

■ 事業概要

認識不調シナリオデータベース構築に関する、事業項目と機能概念図と範囲を下図に示す。



出所：学校法人幾徳学園　神奈川工科大学

Figure 465.　事業項目（①～③）の機能概念図

認識不調シナリオデータベース構築に関する事業項目の実施内容とマイルストーンを以下に示す。

出所：学校法人幾徳学園　神奈川工科大学

Figure 466.　実施内容とマイルストーン

本事業では、①B パートから得られたセンサ認識不調を含んだ実車両走行データを入力とし、A2 パートのシナリオジェネレータへ容易に認識不調条件を出力するデータベースを構築する。その中で、②各種実験で得られた Data セットから「センサ不調整理(FMEA 等)」を用いてセンサの「不調事象抽出」を行うとともにセンサ不調事象を「タグ付け」し、センサ不調事象を蓄積するデータベースの要件整理・定義を行う。③センサ不調事象が起きた事象間の関連を多変量解析手段「統計処理」などを用いてセンサ不調シナリオ具体パラメータ化検討を行う。

また、東京臨海部にて多くの走行データを取得している SIP 事業の一つ「自動運転技術（レベル 3、4）に必要な認識技術等に関する研究」と連携し、実交通環境に即した認識不調シナリオデータベース構築に努める。シナリオジェネレータとの接続 I/F については A2 パートと連携し進める。

なお、事業②については学校法人幾徳学園神奈川工科大学からトヨタテクニカルディベロップメント株式会社へ再委託を行う。

■ 実施計画

■　事業項目	2018年度		2019年度				2020年度				2021年度				2022年度			
	第3四半期	第4四半期	第1四半期	第2四半期	第3四半期	第4四半期	第1四半期	第2四半期	第3四半期	第4四半期	第1四半期	第2四半期	第3四半期	第4四半期	第1四半期	第2四半期	第3四半期	第4四半期
①認識不調シナリオデータベースの構築											要件定義		データベースの構築					
③統計処理手法を用いたセンサ不調具体シナリオ化の検討											要件定義		統計処理手法の検討			機能拡張		

(1)令和3年度の成果(まとめ)

センサデータを入力としたセンサ弱点事象の推測アルゴリズムを構築し実証確認した
センサ弱点事象の推測アルゴリズムにより製品開発の効率化が期待できる

研究開発の成果

研究成果の自己評価	■ センサデータを入力としたセンサ弱点事象の推測アルゴリズムを構築、実装した ■ 実際のセンサデータを入力としてセンサ弱点事象の推測アルゴリズムを実証確認した ■ 実験にて採取した各種センサデータを保存および活用するためのデータベースシステムおよび統計解析を行うためのインターフェースを構築した ■ センサ弱点事象の定量化方式を考案し、また、センササプライヤの経験則を統合・整理することでセンサ弱点事象の重要度を数値化し、研究優先度を決定した ■ 研究活動を実施計画通りに完了した
自社Biz視点から ①DIVP®の価値・魅力 ②活用可能性	■ ユーザは様々な条件を設定してテストシナリオを作成でき、作成したテストシナリオで発生しうるセンサの弱点事象を推測できる。 ■ テストカバレッジを担保したテストシナリオの作成が可能であり、センサの弱点事象を早期に発見できる。これにより製品開発の効率化が期待できる。

得られた知財	■ 【ソフトウェア】 ・センサ弱点事象推測エンジン ・シナリオジェネレータI/Fライブラリ ■ 【文書】 ・センサ弱点事象データベースシステム構築手順書 ・シナリオジェネレータI/F仕様書 ■ 【研究データ】 カメラ弱点事象(ハレーション)の多変量解析データ
知財の保全	■ 特許出願:1件(※1) ■ ソフトウェアソースコード:2件 ■ 仕様書:1件 ■ 手順書:1件 ■ 研究データ:1件 ※1:「センサデータを入力としたセンサ弱点事象の発生確率の推測手法」(仮)として特許出願を検討中
残課題・今後への期待値	■ Radarおよび他弱点事象への対応拡大 ■ コンソ外への試供版提供に向けた計画

Figure 467 研究開発の成果

センサデータを入力としたセンサ弱点事象の推測アルゴリズムを構築、実装し、実際のセンサデータを入力としてセンサ弱点事象の推測アルゴリズムを実証確認した。また、実験にて採取した各種センサデータを保存および活用するためのデータベースシステムおよび統計解析を行うためのインターフェースを構築し、センサ弱点事象の定量化方式を考案し、また、センササプライヤの経験則を統合・整理することでセンサ弱点事象の重要度を数値化し、研究優先度を決定した。

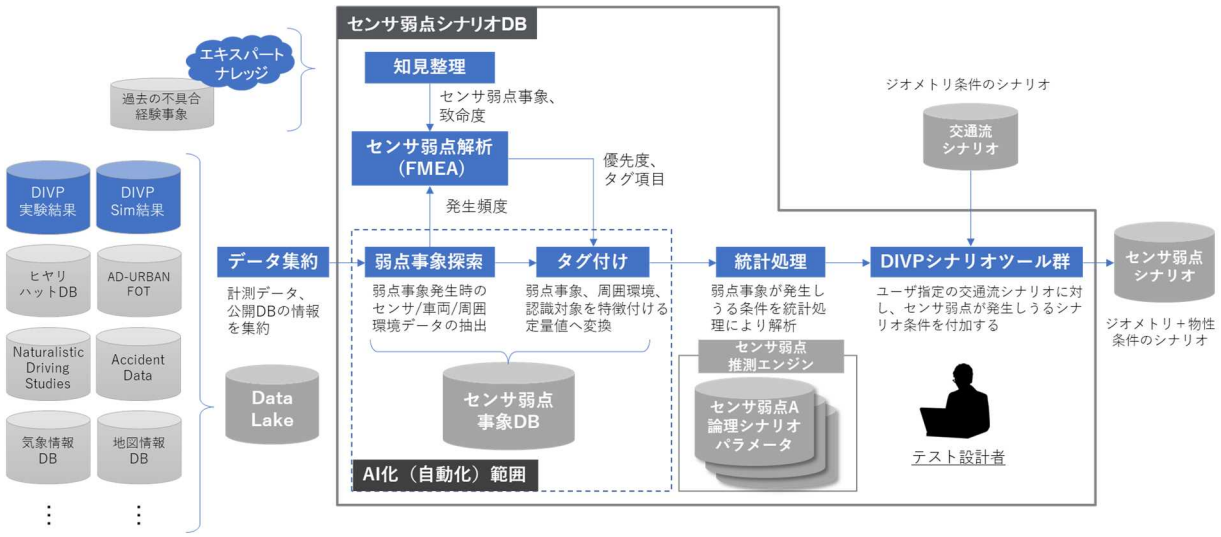
これにより、ユーザは様々な条件を設定してテストシナリオを作成でき、作成したテストシナリオで発生しうるセンサの弱点事象を推測できる。また、テストカバレッジを担保したテストシナリオの作成が可能であり、センサの弱点事象を早期に発見できる。これにより製品開発の効率化が期待できる。

(2)令和3年度の成果

① 認識不調シナリオデータベース(認識弱点シナリオデータベース)の要件定義

認識弱点シナリオデータベースとは、実走行データ(車両情報＋センサ情報)に基づいてセンサが苦手なシーン(センサ弱点シーン)を探索し、そのデータ特徴量について統計処理を行うことでセンサ弱点シナリオの発生しやすいシナリオ条件を求めるデータベースと定義した。合わせて全体構成として下図に示す構成を立案した。各機能、アウトプットについての説明を下表に示す。

センサ弱点とは、センサ認識で結果を誤る事象(認識弱点事象:未検知、誤検知、認識誤差などを含む)とセンサ知覚の出力として認識結果に悪影響を与えそうな事象(知覚弱点事象:例　太陽光による逆光)を合わせた事象を指す。



出所:学校法人幾徳学園　神奈川工科大学

Figure 468　センサ弱点シナリオデータベース構成

Table 104　機能、データの概要説明

機能名	内容	担当※
データ集約	DIVP®実走行データ、外部の実験データ DB、気象/マップ情報 DB など(Data Lake)解析に必要な情報を集約する	TTDC
弱点事象探索	Data Lake からセンサ弱点シーンを自動的に探索し、切り出す	TTDC
タグ付け	切り出したデータを特徴づける定量値(タグ情報)を算出する タグ情報:車両位置などの車両情報、天候など環境情報を含む	TTDC
統計処理	タグ情報を統計処理することにより、センサ弱点シーンが発生するタグ情報の条件を解析し、センサ弱点推測エンジンを開発する	KAIT
DIVP®シナリオツール	ユーザが指定する交通流シナリオにセンサ弱点発生条件を組み合わせた、DIVP®シミュレータで使用するシナリオデータを作成する	SOLIZE
知見整理	センサ弱点に関する自動車メーカー、センサメーカの知見を集約し、セ	SOLIZE

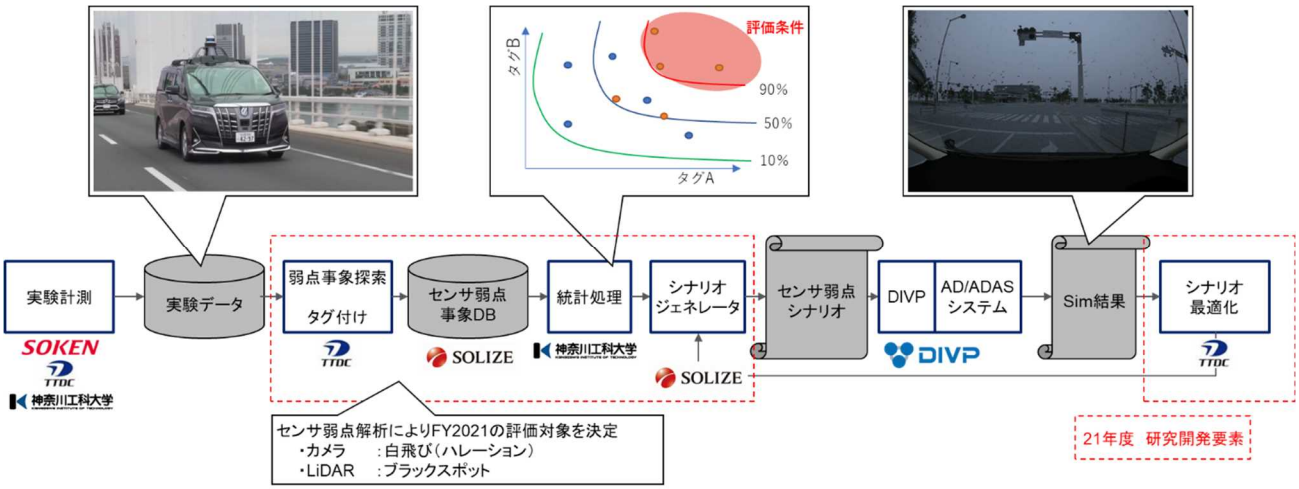
	ンサ弱点事象やシステムに与える知名度を整理する	
センサ弱点解析	知見整理結果と実走行データから算出した弱点ごとの発生頻度に基づき、弱点事象ごとの取り組み優先度を解析する	全社
センサ弱点シナリオ DB	弱点事象探査、タグ付け、統計処理、DIVP®シナリオツール、知見整理、センサ弱点解析を含めた総称	-

※KAIT：神奈川工科大学、TTDC：トヨタテクニカルディベロップメント株式会社

データ、構造体名	内容
Data Lake	DIVP®実走行データ、コンソーシアム外部の実験データ DB、気象/マップ情報 DB などデータの総称
センサ弱点事象 DB	弱点事象探索により切り出したデータとそれに対応したタグ情報をセットまとめたデータベース　タグ情報を基にデータ検索が可能
センサ弱点推測エンジン	タグ情報を説明変数、センサ弱点の発生確率を目的変数とした多項式関数モデル　弱点事象ごとに別の多項式関数モデルとして定義する
交通流シナリオ	車両ごとの位置、車速などの走行条件を示したジオメトリ条件に関するシナリオ
センサ弱点シナリオ	交通流シナリオに、認識対象物の反射特性や天気などの天候条件

出所：学校法人幾徳学園　神奈川工科大学

FY2021 では基礎技術検討としてセンサ弱点事象を数種に限定し、自動で弱点事象探索/タグ付けが可能か、統計処理によりセンサ弱点推測エンジンが導出可能かの検証を進めた。下図に示すようにセンサ弱点シナリオデータベースから導出したセンサ弱点シナリオが DIVP®シミュレータで動作し、実際にセンサ弱点事象が発生するかを検証とする。合わせて、センサ弱点事象の発生有無を解析し、ユーザが指定した評価関数に基づきシナリオパラメータの最適化を行う「シナリオ最適化」ツールも開発/動作検証を進めた。FY2021 で限定した弱点事象はセンサ弱点解析により優先度が高いと判断したカメラ「白飛び（ハレーション）」、LiDAR「ブラックスポット」の 2 種としている。



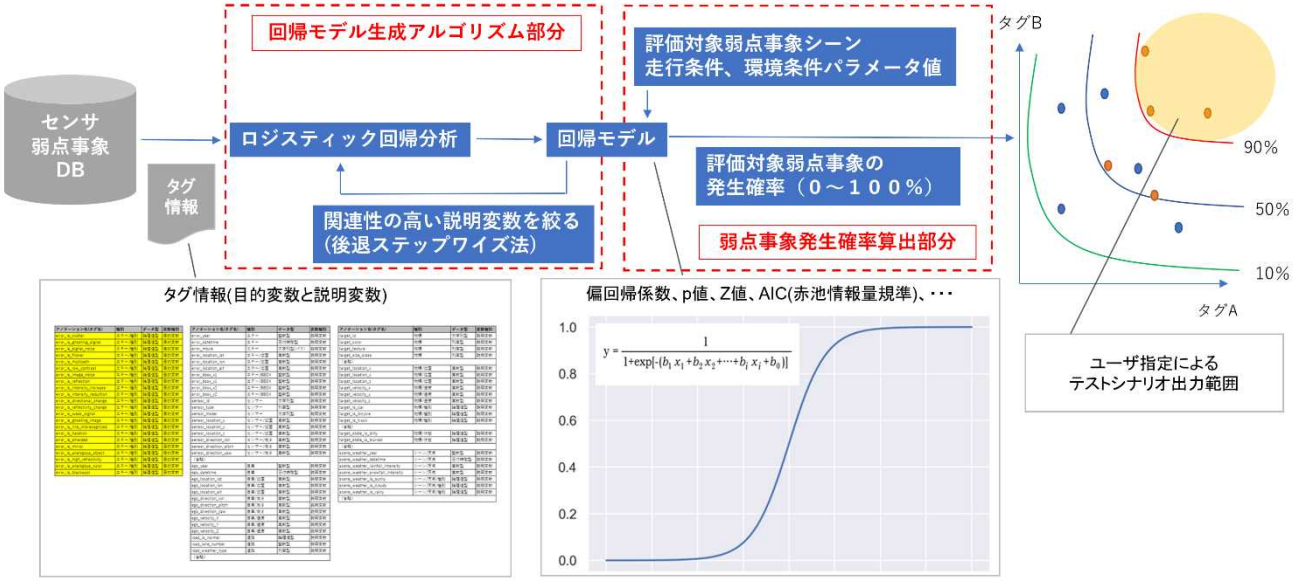
出所：学校法人幾徳学園　神奈川工科大学

Figure 469　FY2021 実施事項

③ 統計処理手法を用いたセンサ不調具体シナリオ化の検討

② −1 センサ弱点事象が発生する条件を算出するアルゴリズムの構築

センサ不調具体シナリオ化に向けて、センサデータを入力とした推測アルゴリズムを構築、実装した。推測アルゴリズムは多変量解析のロジスティック回帰分析を用いて実装した。ロジスティック回帰分析で考えるのは「特定のセンサ弱点事象の有無」を考え、特定のセンサ弱点事象の発生確率(0～100%)を推測する。



出所:学校法人幾徳学園　神奈川工科大学

Figure 470 統計処理手法の概要

ロジスティック回帰分析において特定のセンサ弱点事象の発生確率は以下の計算式で算出される。

$$y = \frac{1}{1+\exp[-(b_1 x_1 + b_2 x_2 + \cdots + b_i x_i + b_0)]}$$

Figure 471 ロジスティック回帰分析の回帰式

bi は偏回帰係数と呼ばれる数値であり、xi は説明変数と呼ばれる数値である。説明変数は具体的には特定のセンサ弱点事象発生シーンのアノテーション情報(走行状況、道路情報、天候情報等々)の離散数値データである。偏回帰係数は実際に特定のセンサ弱点事象が発生した走行実測データから最尤法を用いて求めた。

実際に特定のセンサ弱点事象が発生した走行実測データの概要を以下に示す。以下の表で「エラー/種別」のアノテーション情報データが多変量解析における目的変数であり、それ以外のアノテーション情報データが説明変数となる。

Table 105　目的変数の一覧

アノテーション名(タグ名)	アノテーション種別	データ型	変数種別
error_is_reflection	エラー/種別	論理値型	目的変数
error_is_intensity_increase	エラー/種別	論理値型	目的変数
error_is_intensity_reduction	エラー/種別	論理値型	目的変数
error_is_directional_change	エラー/種別	論理値型	目的変数
error_is_reflectivity_change	エラー/種別	論理値型	目的変数
error_is_weak_signal	エラー/種別	論理値型	目的変数
error_is_ghosting_image	エラー/種別	論理値型	目的変数
error_is_line_misrecognized	エラー/種別	論理値型	目的変数
error_is_halation	エラー/種別	論理値型	目的変数
error_is_shielded	エラー/種別	論理値型	目的変数
error_is_mirror	エラー/種別	論理値型	目的変数
error_is_analogous_object	エラー/種別	論理値型	目的変数
error_is_high_reflectivity	エラー/種別	論理値型	目的変数
error_is_analogous_color	エラー/種別	論理値型	目的変数
error_is_blackspot	エラー/種別	論理値型	目的変数
error_is_clutter	エラー/種別	論理値型	目的変数
error_is_ghosting_signal	エラー/種別	論理値型	目的変数

Table 106　説明変数(自車/道路情報関連)の一覧

アノテーション名(タグ名)	アノテーション種別	データ型	変数種別
ego_year	自車	整数型	説明変数
ego_datetime	自車	日付時間型	説明変数
ego_location_lat	自車/位置	実数型	説明変数
ego_location_lon	自車/位置	実数型	説明変数
ego_location_alt	自車/位置	実数型	説明変数
ego_direction_roll	自車/向き	実数型	説明変数
ego_direction_pitch	自車/向き	実数型	説明変数
ego_direction_yaw	自車/向き	実数型	説明変数
ego_velocity_X	自車/速度	実数型	説明変数
ego_velocity_Y	自車/速度	実数型	説明変数
ego_velocity_Z	自車/速度	実数型	説明変数
road_is_normal	道路	論理値型	説明変数
road_lane_number	道路	整数型	説明変数
road_weather_type	道路	列挙型	説明変数
(一部省略)			

Table 107　説明変数(物標関連)の一覧

アノテーション名(タグ名)	アノテーション種別	データ型	変数種別
target_id	物標	文字列型	説明変数
target_color	物標	列挙型	説明変数
target_texture	物標	列挙型	説明変数
target_size_class	物標	列挙型	説明変数
target_location_x	物標/位置	実数型	説明変数
target_location_y	物標/位置	実数型	説明変数
target_location_z	物標/位置	実数型	説明変数
target_velocity_x	物標/速度	実数型	説明変数
target_velocity_y	物標/速度	実数型	説明変数
target_velocity_z	物標/速度	実数型	説明変数
target_is_car	物標/種別	論理値型	説明変数
target_is_bicycle	物標/種別	論理値型	説明変数
target_is_truck	物標/種別	論理値型	説明変数
target_state_is_dirty	物標/状態	論理値型	説明変数
target_state_is_blurred	物標/状態	論理値型	説明変数
(一部省略)			

Table 108　説明変数(天候関連)の一覧

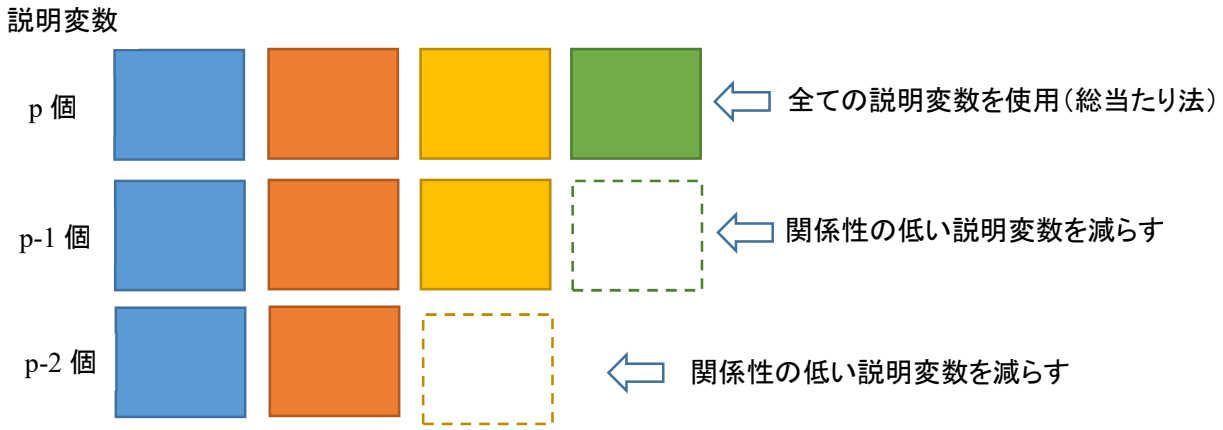
アノテーション名(タグ名)	アノテーション種別	データ型	変数種別
scene_weather_year	シーン/天気	整数型	説明変数
scene_weather_datetime	シーン/天気	日付時間型	説明変数
scene_weather_rainfall_intensity	シーン/天気	実数型	説明変数
scene_waether_snowfall_intensity	シーン/天気	実数型	説明変数
scene_weather_is_sunny	シーン/天気/種別	論理値型	説明変数
scene_weather_is_cloudy	シーン/天気/種別	論理値型	説明変数
scene_weather_is_rainy	シーン/天気/種別	論理値型	説明変数
(一部省略)			

Table 109　説明変数(エラー/センサ情報関連)の一覧

アノテーション名(タグ名)	アノテーション種別	データ型	変数種別
error_year	エラー	整数型	説明変数
error_datetime	エラー	日付時間型	説明変数
error_movie	エラー	文字列型(パス)	説明変数
error_location_lat	エラー/位置	実数型	説明変数
error_location_lon	エラー/位置	実数型	説明変数
error_location_alt	エラー/位置	実数型	説明変数
error_bbox_x1	エラー/BBOX	整数型	説明変数
error_bbox_y1	エラー/BBOX	整数型	説明変数
error_bbox_x2	エラー/BBOX	整数型	説明変数
error_bbox_y2	エラー/BBOX	整数型	説明変数
sensor_id	センサ	文字列型	説明変数
sensor_type	センサ	列挙型	説明変数
sensor_model	センサ	文字列型	説明変数
sensor_location_x	センサ/位置	実数型	説明変数
sensor_location_y	センサ/位置	実数型	説明変数
sensor_location_z	センサ/位置	実数型	説明変数
sensor_direction_roll	センサ/向き	実数型	説明変数
sensor_direction_pitch	センサ/向き	実数型	説明変数
sensor_direction_yaw	センサ/向き	実数型	説明変数
(一部省略)			

出所:学校法人幾徳学園　神奈川工科大学

多変量解析を行うにあたり、変数を選ばずに全ての説明変数を用いて多変量解析をおこない（総当たり法）、その後ステップワイズ法(後退ステップワイズ法)にて投入した説明変数の中で関係性が高い変数を選択し、関係性の低い変数は削除する。



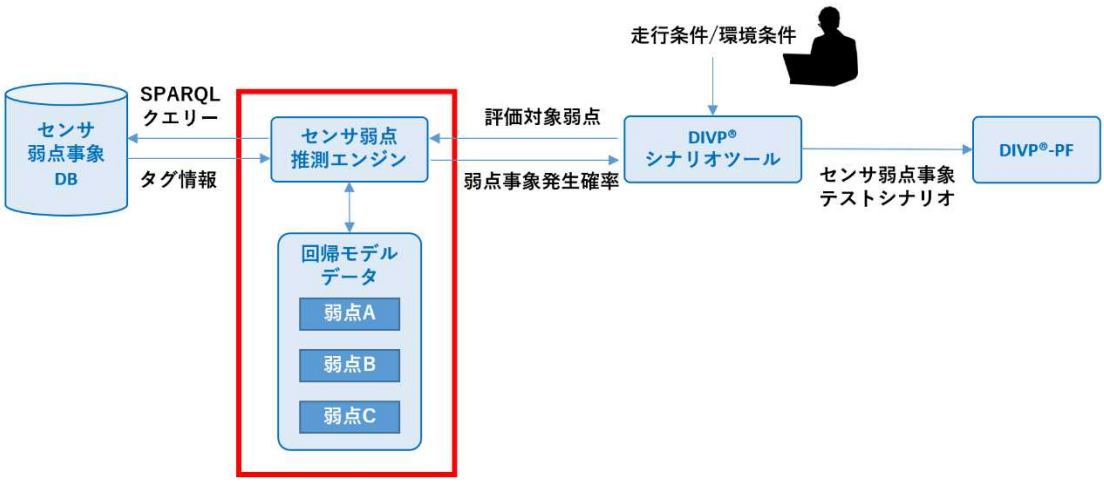
出所：学校法人幾徳学園　神奈川工科大学

Figure 472 後退ステップワイズ法の概要

ここで問題になるのは、ほぼ無数といえる特定のセンサ弱点事象発生シーンのアノテーション情報から影響を与えている要因を特定すること、および説明変数候補に対してサンプル数のバランスが悪い実測データ群から最適な説明変数の組み合わせを決定する方法である。回帰分析においては一般的に説明変数の数の 10 倍以上のサンプル数が必要とされているが、限られたサンプル数に対して多すぎる説明変数候補がある。限られたサンプル数に対して過度に多くの説明変数を投入してしまうと限られたサンプルに対してのみ適合してしまい(オーバーフィッティング)、汎用的に適用できる回帰モデルではなくなってしまうという危険性がある。また、いくつかの説明変数間で強い依存性があり、それらを説明変数として使用してしまうと生成した回帰モデルは正しく事象の推測ができないという危険性もある。センサ弱点事象が発生した走行実測データから生成した回帰モデルがどれぐらいよいモデルであるかを評価する方法はいろいろ考えられるが本研究においては AIC(赤池情報量規準)を用いた。また、説明変数の p 値およびオッズ比の評価を行う。これらの評価を繰り返すことにより精度の高い回帰モデルを生成する。

③-2 回帰モデルのデータI/F の定義

本研究で構築したセンサ弱点事象を推測するアルゴリズムおよび回帰モデルを含むシステムをセンサ弱点推測エンジンと呼称する。以下にセンサ弱点推測エンジンとその周辺モジュールのシステム概要図を示す。センサ弱点推測エンジンは走行実測データを含むセンサ弱点事象データベースから実際に発生したセンサ弱点事象のアノテーション情報（タグ情報）を取得し、DIVP®シナリオツールからの入力された走行条件および環境条件に従って、評価対象とするセンサ弱点事象の発生確率を出力する。



出所：学校法人幾徳学園　神奈川工科大学

Figure 473 センサ弱点推測エンジンとその周辺モジュールのシステム概要図

③-2-1 センサ弱点推測エンジンとセンサ弱点事象 DB のデータI/F

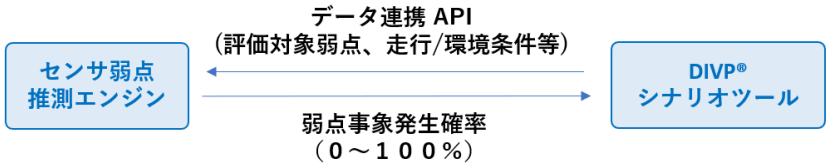
センサ弱点推測エンジンは RDF 問い合わせ言語のひとつである SPARQL クエリーによりセンサ弱点事象データベースよりデータ取得を行う。センサ弱点事象データベースはクエリーの応答としてタグ情報をセンサ弱点推測エンジンへ出力する。このタグ情報には回帰モデルを生成するにあたり必要な目的変数と説明変数の全リストが含まれる。

出所：学校法人幾徳学園　神奈川工科大学

Figure 474 センサ弱点推測エンジンとセンサ弱点事象 DB のデータI/F 概要図

③　-2-1 センサ弱点事象 DB とセンサ弱点推測エンジンのデータ I/F

センサ弱点推測エンジンと DIVP®シナリオツールとのデータ交換はセンサ弱点推測エンジンから提供するデータ連携 API(アプリケーションプログラミングインターフェース)を通じて行う。センサ弱点推測エンジンから DIVP®シナリオツールへ提供するデータ連携 API は 3 種である。以下に提供 I/F API の詳細を示す。



出所：学校法人幾徳学園　神奈川工科大学

Figure 475 センサ弱点推測エンジンと DIVP®シナリオツールのデータ I/F 概要図

Table 110 センサ弱点推測エンジン提供データ I/F 一覧

(1) 弱点事象の発生確率の問い合わせ double KAIT_SWGE_guess(const char*, double param[], int) 引数1： 弱点事象名(例：「camera halation」「camera background reflection」…) 引数2： 走行条件および環境条件パラメータ値リスト 引数3： 走行条件および環境条件パラメータ値リストの要素数 戻値： 引数 1 に指定した弱点事象シーン名の弱点事象発生確率(0.00～1.00)
(2) 走行条件および環境条件パラメータ名リストの問い合わせ int KAIT_SWGE_getParam(const char*, char param[][256], int*) 引数 1： 弱点事象名(例：「camera halation」「camera background reflection」…) 引数 2： 走行条件および環境条件パラメータ名リストの格納領域アドレス 引数 3： 走行条件および環境条件パラメータ名リスト要素数の格納領域アドレス 戻値： 正常終了時は0、異常終了時は負値が戻る
(3) 走行条件および環境条件パラメータ毎の寄与率リストの問い合わせ int KAIT_SWGE_getDetermination(const char*, double[], int*) 引数 1： 弱点事象名(例：「camera halation」「camera background reflection」…) 引数 2： 走行条件および環境条件パラメータ毎の寄与率リストの格納領域アドレス 引数 3： 走行条件および環境条件パラメータ毎の寄与率リスト要素数の格納領域アドレス 戻値： 正常終了時は 0、異常終了時は負値が戻る

出所：学校法人幾徳学園　神奈川工科大学

③-3 センサ弱点事象の定量化方式

本研究で対象とするセンサ弱点事象の優先度を決定するために、各センサ弱点事象を致命度、影響度、シミュレーション必要性の各指標を基にスコアリングし、センサ弱点事象を定量化する方式(シナリオ優先度の決定式)を考案した。なお、これは本研究「A2 評価シナリオ記述方式等の検討」においても重要な方式であり、本方式の詳細は A2 パートに記載する。

センサ弱点事象のスコア = 「弱点事象の致命度・影響度」×「弱点事象のシミュレーション必要性」

出所:学校法人幾徳学園 神奈川工科大学

Figure 476 シナリオ優先度の決定式

シナリオ優先度の決定式の「弱点事象の致命度・影響度」とは弱点事象が安全性評価にどの程度影響するかを 3 段階評価したものであり、「弱点事象のシミュレーション必要性」とは実機評価に対するシミュレーションの優位性(コスト、繰り返し評価回数等)を 3 段階評価したものである。

(3)次年度以降の計画

① 認識不調シナリオデータベースの要件定義

期間:2022 年 3 月～2023 年 3 月

内容:Radar および他弱点事象への対応拡大、コンソ外への試供版提供に向けた計画

③ 統計処理手法を用いたセンサ不調具体シナリオ化の検討

期間:2022 年 3 月～2023 年 3 月

内容:Radar および他弱点事象への対応拡大、コンソ外への試供版提供に向けた計画

5. 4. 2 「E1. センサ不調シナリオ探索（AI）の開発」（学校法人幾徳学園神奈川工科大学、トヨタテクニカルディベロップメント株式会社）

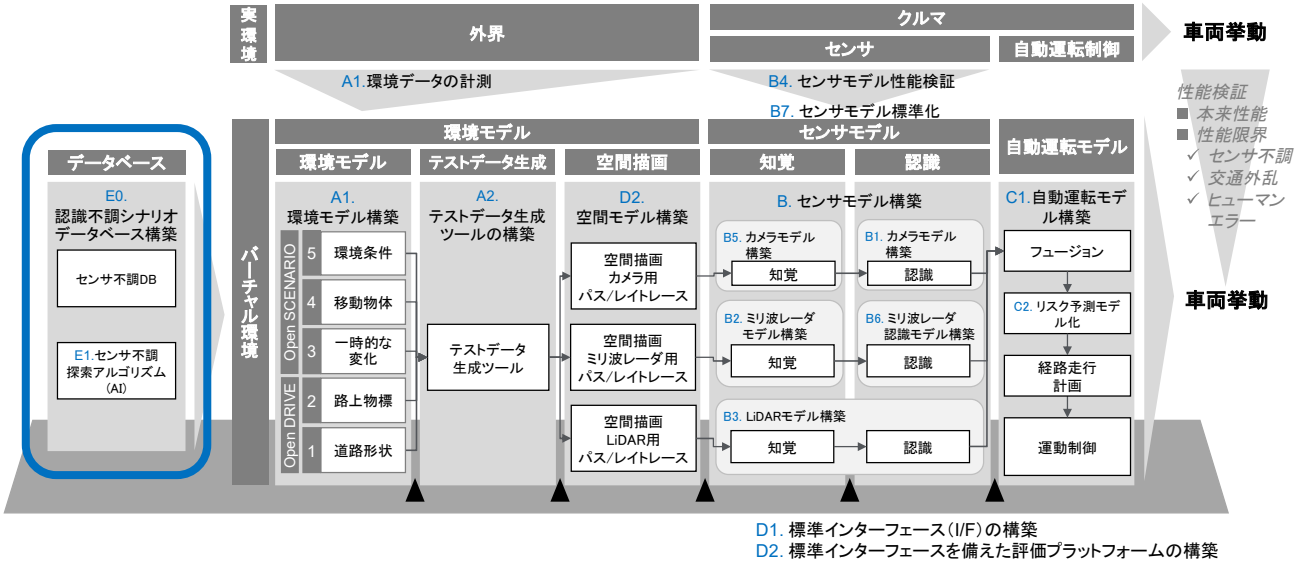


Figure 477　本研究の位置付け

本研究では、検証すべきセンサ認識不調条件のシナリオデータベース（以下、認識不調シナリオデータベース）を構築するため、センサ不調シナリオ探索（AI)を開発する。シミュレーション結果のデータ解析、その解析に基づいたシナリオ拡張のためのパラメータ探査・生成・設定手法を開発する。

Figure 478 には、年度中に追加案件となったパラメータ探索部分を加えた研究の位置づけを示す。

本研究では、検証すべきセンサ認識不調条件のシナリオデータベース（以下、認識不調シナリオデータベース）を構築するため、センサ不調シナリオ探索（AI)を開発する。シミュレーション結果のデータ解析、その解析に基づいたシナリオ拡張のためのパラメータ探査・生成・設定手法を開発する。

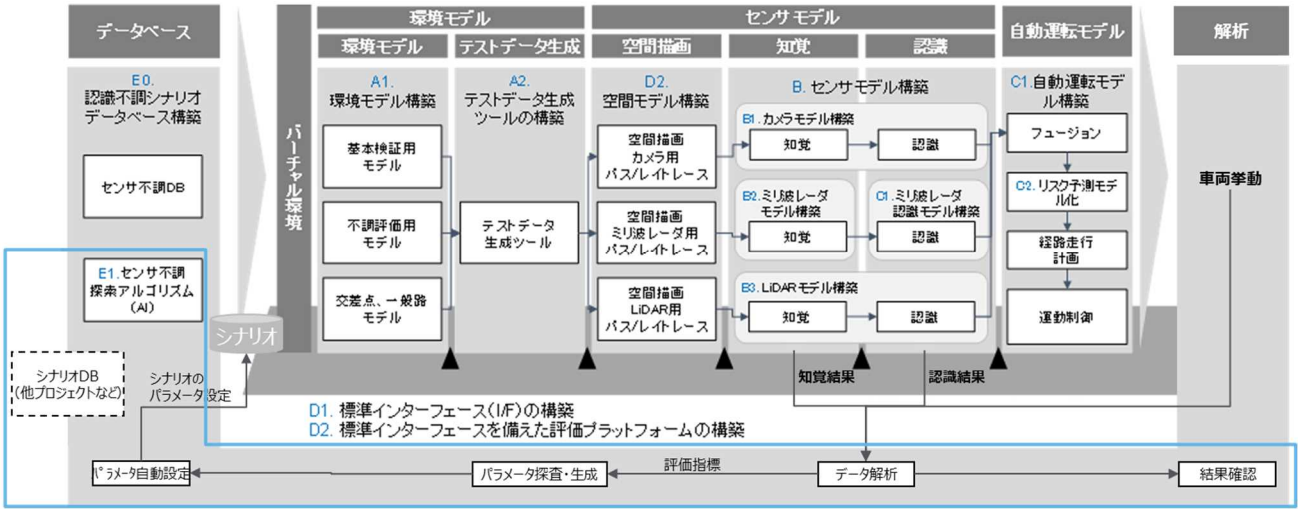


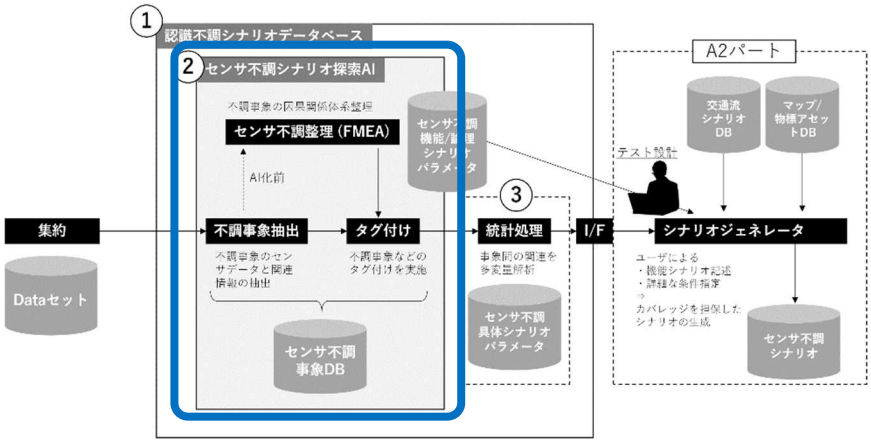
Figure 478　本研究の位置付け(パラメータ探索を追記)

■ 事業目的

センサ不調シナリオの仮想環境で自動運転システムの安全性を評価するために、センサ不調事象を探索できる機能を開発し、認識不調シナリオデータベースを構築することを目的とする。合わせて認識不調シナリオデータベースを拡張してく技術として、シミュレーション結果を解析・結果確認できる機能と、解析に基づいた評価指標よりシナリオ拡張するためのパラメータを探査・生成する機能を開発し、認識不調シナリオデータベースの構築することを目的とする。また、DIVP®活用の可能性を広げる他プロジェクトのシナリオ連携も協議する。

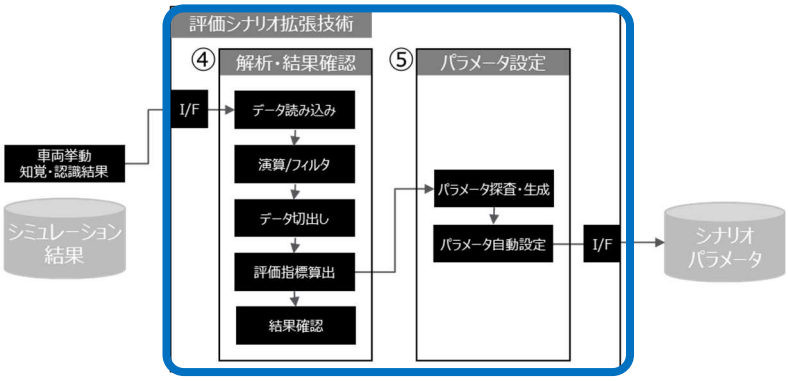
■ 事業概要

Figure 479 機能概念図の②に示す通り、FOT・各種実験で得られた Data セットから、センサ不調整理(FMEA等)の条件を用いて不調事象抽出及びタグ付けを行い、センサ不調事象を蓄積するデータベースの要件整理・定義を行う。また、①認識不調シナリオデータベース、③統計処理を担当する関係者と、認識不調シナリオデータベース構築方法を協議する。



出所：トヨタテクニカルディベロップメント（株）

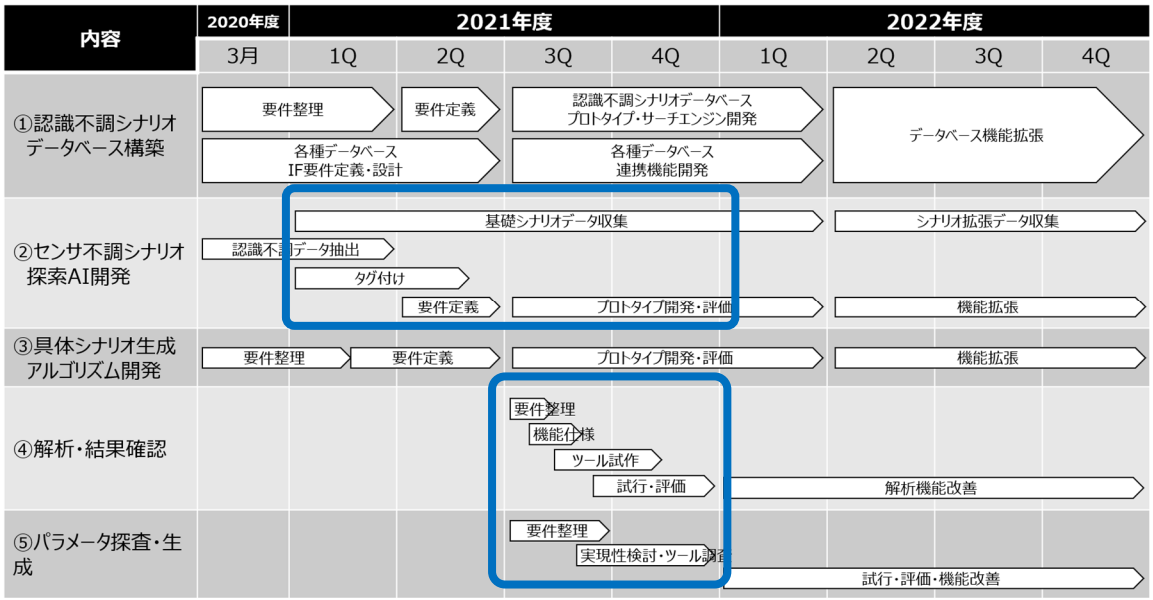
Figure 479　機能概念図



出所：トヨタテクニカルディベロップメント（株）

Figure 480　認識不調データベース拡張技術の機能概念図

認識不調シナリオデータベース構築に関する、実施内容とマイルストーンを Figure 481 に示す。



出所：トヨタテクニカルディベロップメント（株）

Figure 481　実施内容とマイルストーン

■ 実施計画

事業項目	2018 年度				2019 年度				2020 年度				2021 年度				2022 年度			
	第1四半期	第2四半期	第3四半期	第4四半期	第1四半期	第2四半期	第3四半期	第4四半期	第1四半期	第2四半期	第3四半期	第4四半期	第1四半期	第2四半期	第3四半期	第4四半期	第1四半期	第2四半期	第3四半期	第4四半期
② センサ不調シナリオ探索 AI												②－1 要件定義	実験		実験			機能拡張/検証		
															②－2 試作/検証					
④ 解析・結果確認															要件整理～ツール試作					
																試行・評価				
⑤ パラメータ探査・生成																解析改善				
															要件整理～実現性検討					
																	試行・評価改善			

(1)令和3年度の成果(まとめ)

センサ弱点シーンの自動抽出、DIVP®解析・結果確認、パラメータ探索機能の試作完了
センサ弱点DB構築、データ解析・センサ弱点パラメータ探索の効率化が期待できる

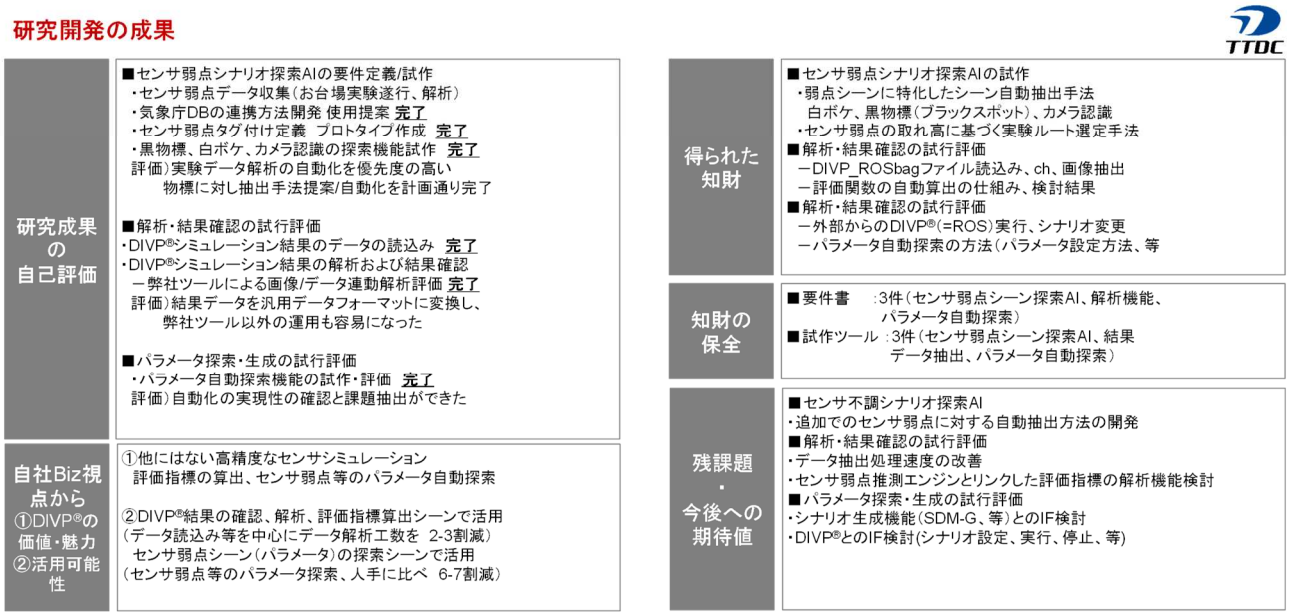


Figure 482 研究開発の成果

本年度は、センサ弱点(センサ不調から呼称を変更)DB に向けた研究開発である。年度初期の計画では、センサ弱点シナリオ探索 AI の要件定義/試作のみの対応だったが、10 月より解析・結果確認の試行評価、パラメータ探索・生成の試行評価の 2 項目が加わった。

センサ弱点シナリオ探索 AI は、センサ弱点 DB の基盤となるセンサ弱点シーンを実験データから自動抽出/タグ付けを実施するシステムである。本年度は要件定義の作成と 3 件のセンサ弱点に対する自動抽出/タグ付け機能の試作が完了し、評価を実施した。

解析・結果確認の試行評価では、DIVP®シミュレーション結果ファイル(*.robag)ファイルより解析で使用するトピックの抽出およびセンサ検知画像にセンサ認識結果を重畳させた画像ファイルを抽出し、汎用的なファイルフォーマット(*.csv、*.json、*.jpeg)で出力。自社ツールによるトピックと画像を連携させた解析機能を評価した。
パラメータ探索・生成の試作評価では、DIVP®シミュレーションのパラメータを変更させてパラメータを自動探査する仕組みを試作。センサ弱点シナリオ探査 AI が判別するセンサ弱点タグを評価関数とし、センサ弱点が発生するパラメータ条件の自動探査機能を評価した。

(2)令和3年度の成果

② センサ不調シナリオ探索 AI

- センサ不調シナリオ探索 AI の要件定義(②-1)
- センサ不調シナリオ探索 AI 試作(②-2)

を実施した。

②-1センサ不調シナリオ探索 AI の要件定義

【実施期間】

2021 年度上期

【成果】

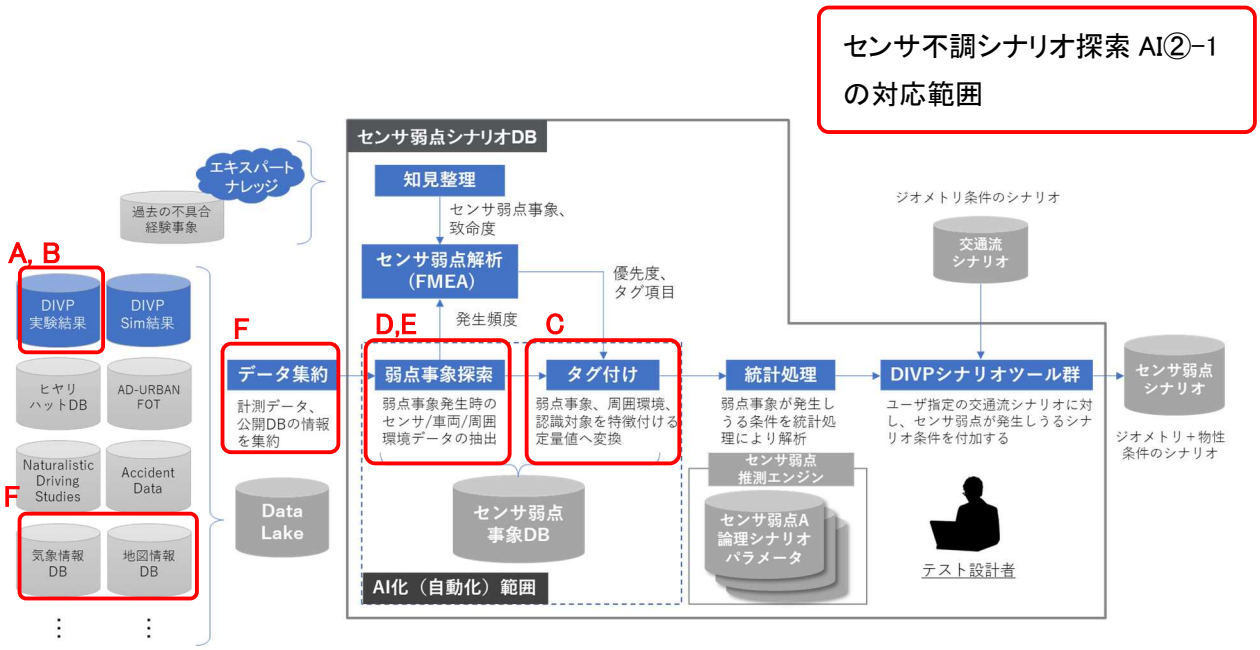
成果を Table 111 に一覧で示す。また、各項目についての解説を次ページ以降に記載する。

Table 111 成果一覧

No.	項目	成果
A	センサ弱点代表データの抽出	200 件超の事例を手動で抽出
B	実験(お台場)の計画と参加	走行コース、試験パターンとセンサ弱点取れ高の推定を担当し、実験にて 50 件弱のデータを取得
C	センサ弱点シーンのタグ検討	およそ 100 個超のタグとセンサ弱点データを定義
D	センサ弱点探索方法の調査	ハレーション、ブラックスポット、認識の 3 種類のセンサ弱点現象の探索手法を検討
E	センサ弱点探索 AI の要件定義	要件定義書を作成
F	他 DB との連携検討	2 件の他 DB 連携(地図, 気象)について調査し、サービスとサービスを利用したタグ付与の方法についてのまとめを実施

出所:トヨタテクニカルディベロップメント(株)

認識不調シナリオデータベース構築におけるセンサ不調シナリオ探索 AI の位置づけを Figure 483 に示す。本年度は、お台場実験データに基づき弱点事象探索を行い、優先度の高いタグについてタグ付けを実施した。



A～F は、Table 111　成果一覧に対応

出所：学校法人幾徳学園　神奈川工科大学、TTDC

Figure 483　センサ弱点シナリオデータベース構成

A.センサ弱点代表データの抽出

前年度に実施した公道実験で取得した 50 件弱のカメラ動画から、「天候条件、時間帯、コース」の 3 条件から実験データをサンプル抽出し、センサ弱点現象の抽出を行った。センサ弱点現象を表す画像(jpg)とセンサ弱点現象の種別、要因、説明と画像へのリンクを記載した情報ファイルの形でまとめた。

センサ弱点代表データをまとめるにあたり、Table 112 の項目を記載した。Table 113 にまとめたセンサ弱点代表データの一部のキャプチャを示す。データ共有は、コンソーシアム内にて実施済。

Table 112 センサ弱点代表データの主要な項目

項目	説明
対象	物体検出の対象
不調タグ	センサ弱点現象／要因／原理に関するタグ情報
説明	不調タグの詳細説明
抽出データ URI	センサ弱点現象(知覚)を示す画像の URI
表示時刻	センサ弱点現象が発生した時刻
認識抽出データ URI	センサ弱点現象(認識)を示す画像の URI
認識結果	認識のエラー分類

出所:トヨタテクニカルディベロップメント(株)

Table 113 センサ弱点代表データの一覧

No.	対象	不調タグ	説明	抽出データURI	bagファイル名(bag)	表示時刻	認識後抽出データURI	認識結果
1	歩行者	コントラスト不足	車の影と服の色が同化し、判別困難	2020-11-26-11-04-21_11h05m16s.jpg	2020-11-26-11-04-21	2020/11/26 11:05:16.126	2020-11-26-11-04-21_11h05m15s_rips	未検出
2	他車両	コントラスト不足	車の色とトンネル壁面の色が同化し、判別困難	2020-11-26-11-04-21_11h06m55s.jpg	2020-11-26-11-04-21	2020/11/26 11:06:55.826	2020-11-26-11-04-21_11h06m55s_rips	未検出
3	区画線	区画線のかすれ	白線がかすれており、レーンの区画線を判別困難	2020-11-26-11-04-21_11h07m29s.jpg	2020-11-26-11-04-21	2020/11/26 11:07:29.026	2020-11-26-11-04-21_11h07m29s_rips	未検出
4	区画線	区画線の消した跡	区画線の引き直しがあり、白線に類似	2020-11-26-11-04-21_11h09m16s.jpg	2020-11-26-11-04-21	2020/11/26 11:09:16.826	2020-11-26-11-04-21_4m57s_rips	誤検出
5	歩行者	コントラスト不足	街路樹と服の色が同化し、判別困難	2020-11-26-11-04-21_11h11m16s.jpg	2020-11-26-11-04-21	2020/11/26 11:11:16.026	2020-11-26-11-04-21_11h11m16s_rips	未検出
6	他車両	コントラスト不足	ガードレールとカーブを走行する白い車の色が同化し、判別困難	2020-11-26-10-49-11_10h52m36s.jpg	2020-11-26-10-49-11	2020/11/26 10:52:36.826	2020-11-26-10-49-11_10h52m36s_rips	未検出
	他車両		コントラストの変化により認識不調				2020-11-26-10-49-11_4m26s_rips	未検出
7	他車両	コントラスト不足	ガードレールとカーブを走行する白い車の色が同化し、判別困難	2020-11-26-10-49-11_10h53m42s.jpg	2020-11-26-10-49-11	2020/11/26 10:53:42.826	-	検出
8	区画線	区画線のかすれ	白線がかすれており、レーンの区画線を判別困難	2020-11-26-10-49-11_10h54m05s.jpg	2020-11-26-10-49-11	2020/11/26 10:54:05.826	2020-11-26-10-49-11_4m53s_rips	
9	他車両	FOV外	車の先頭がFOV外となり、判別困難	2020-11-26-10-49-11_10h54m06s.jpg	2020-11-26-10-49-11	2020/11/26 10:54:06.727	2020-11-26-10-49-11_4m54s_rips	低IoU
10	他車両	周辺移動物との干渉	同色のバスが先行車と一体化し、判別困難	2020-11-26-10-49-11_10h55m47s.jpg	2020-11-26-10-49-11	2020/11/26 10:55:47.326	2020-11-26-10-49-11_6m35s_rips	未検出
11	区画線	区画線のかすれ	白線がかすれており、レーンの区画線を判別困難	2020-11-26-10-49-11_10h58m18s.jpg	2020-11-26-10-49-11	2020/11/26 10:58:18.326	2020-11-26-10-49-11_9m05s_rips	未検出
12	区画線	道路修復跡	道路修復跡が路面に残っており、白線との判別困難	2020-11-26-10-49-11_10h58m22s.jpg	2020-11-26-10-49-11	2020/11/26 10:58:22.726	-	(発生なし)
13	他車両	コントラスト不足	背景とのコントラスト不足により、判別困難	2020-11-26-10-49-11_11h00m47s.jpg	2020-11-26-10-49-11	2020/11/26 10:00:47.926	2020-11-26-10-49-11_11m38s_rips	低IoU
14	区画線	道路修復跡	道路修復跡が路面に残っており、白線との判別困難	2020-11-26-11-17-46_11h17m48s.jpg	2020-11-26-11-17-46	2020/11/26 11:17:48.125	2020-11-26-11-17-46_0m17s_rips	誤検出
15	区画線	映り込み	フロントガラスに白線が映り込み、実物の白線との判別困難	2020-11-26-11-17-46_11h18m15s.jpg	2020-11-26-11-17-46	2020/11/26 11:18:15.926	-	(発生なし)
16	歩行者	鏡面反射	工事の仕切り板に歩行者が映り込み、誤認識のリスク	2020-11-26-11-17-46_11h18m14s.jpg	2020-11-26-11-17-46	2020/11/26 11:18:14.828	-	
17	区画線	区画線のかすれ	白線がかすれており、レーンの区画線を判別困難	2020-11-26-11-17-46_11h18m15s_2.jpg	2020-11-26-11-17-46	2020/11/26 11:18:15.926	-	(発生なし)
18	区画線	道路修復跡	道路修復跡が路面に残っており、白線との判別困難	2020-11-26-11-17-46_11h23m31s.jpg	2020-11-26-11-17-46	2020/11/26 11:23:31.826	2020-11-26-11-17-46_5m43s_rips	誤検出
19	歩行者	認識想定外の形状	ベビーカーにより通常の歩行者とシルエットが異なり、判別困難	2020-11-26-11-17-46_11h26m50s.jpg	2020-11-26-11-17-46	2020/11/26 11:26:50.226	2020-11-26-11-17-46_11h26m51s_rips	誤検出
20	歩行者	逆光による白飛び	逆光により白飛びが発生し、判別困難	2020-11-26-11-17-46_11h26m54s.jpg	2020-11-26-11-17-46	2020/11/26 11:26:54.226	2020-11-26-11-17-46_11h26m54s_rips	未検出
21	歩行者	コントラスト不足	橋架構の影と街路樹の色に同化し、判別困難	2020-11-26-11-17-46_11h26m54s_2.jpg	2020-11-26-11-17-46	2020/11/26 11:26:54.226	2020-11-26-11-17-46_11h26m54s_rips	未検出
22	歩行者	鏡面反射	壁の黒い車に電照歩道と歩行者が映り込み、誤認識のリスク	2020-11-26-11-17-46_11h27m09s.jpg	2020-11-26-11-17-46	2020/11/26 11:27:09.826	-	
23	歩行者	コントラスト不足	車の色と服（黒スーツ）の色が同化し、判別困難。	2020-11-26-11-17-46_11h27m31s.jpg	2020-11-26-11-17-46	2020/11/26 11:27:31.826	2020-11-26-11-17-46_11h27m31s_rips	未検出
							2020-11-26-11-17-46_11h27m31s_rips	誤検出
24	区画線	道路修復跡	道路修復跡が路面に残っており、白線との判別困難	2020-11-26-11-17-46_11h30m17s.jpg	2020-11-26-11-17-46	2020/11/26 11:30:17.826		
25	区画線	区画線のかすれ	白線がかすれており、レーンの区画線を判別困難	2020-11-26-11-52-54_11h53m00s.jpg	2020-11-26-11-52-54	2020/11/26 11:53:00.527		
26	他車両	認識想定外の形状	トレーラーが複数のコンテナを積んでおり、単一の車両として判別困難	2020-11-26-11-52-54_11h53m25s.jpg	2020-11-26-11-52-54	2020/11/26 11:53:25.827	2020-11-26-11-52-54_11h53m25s_rips	誤検出
27	区画線	区画線のかすれ	白線がかすれており、レーンの区画線を判別困難	2020-11-26-11-52-54_11h53m52s.jpg	2020-11-26-11-52-54	2020/11/26 11:53:52.826		
28	歩行者	コントラスト不足	ビルの影の色に同化し、判別困難	2020-11-26-11-52-54_11h54m21s.jpg	2020-11-26-11-52-54	2020/11/26 11:54:21.626	2020-11-26-11-52-54_11h54m21s_rips	未検出
29	歩行者	コントラスト不足	ビルの影の色に同化し、判別困難	2020-11-26-11-52-54_11h55m56s.jpg	2020-11-26-11-52-54	2020/11/26 11:55:56.726	2020-11-26-11-52-54_11h55m56s_rips	未検出

出所:トヨタテクニカルディベロップメント(株)

B.実験（お台場）の計画と参加

お台場での公道実験では、実験計画、実験時の計測データ収集等を中心に実施した。実験計画は走行コース、試験パターン、センサ弱点の取れ高を推定した。前項のセンサ弱点代表データの抽出に加え、(a)過去の試験データ整理、(b)走行シーンの属性分析を経て、(c)走行コース、試験パターン決めとセンサ弱点取れ高の推定を実施した。

(a)過去の試験データ整理

20 年度に実施したお台場公道実験で取得したデータと関連する情報についてまとめた。まとめの主要項目を Table 114、まとめた結果の抜粋を Table 115 に示す。

Table 114 まとめ項目の一覧

項目	補足
ファイル名	実験データのファイル名（拡張子含む）
実験日	yyyy/mm/dd
時間帯	日中または夜のいずれか
コース	設定済みのコース名
ルート	コースの進行方法（往路、復路、時計回り、反時計回りなど）
データ種別	ファイル拡張子
日照量	気象庁 HP の数値
降雨	同上
路面状態	実験データの画像から判断

出所：トヨタテクニカルディベロップメント（株）

Table 115 過去試験データの一覧

ファイル名	サイズ	ファイル日付	ファイル時刻	フォルダパス	実験情報				
					測定日	時間帯	コース	ルート	ファイル種別
2020-11-23-14-46-42.bag	94,252,724,745	2020/11/23	15:01	E:¥2020年11月_拡張性評価実験¥camera¥20201123¥afternoon¥A¥ouro	2020/11/23	日中	A	往路	.bag
pioneer_20201123_144617.pcap	14,442,636,068	2020/11/23	15:01	E:¥2020年11月_拡張性評価実験¥Lidar¥20201123¥A¥往路	2020/11/23	日中	A	往路	.pcap
pssi_2020-11-23-14-46-16.bag	73,924,582,260	2020/11/23	15:01	E:¥2020年11月_拡張性評価実験¥Lidar¥20201123¥A¥往路	2020/11/23	日中	A	往路	.bag
A_往路.mp4	220,872,325	2020/11/24	0:50	E:¥2020年11月_拡張性評価実験¥radar¥20201123¥A¥往路	2020/11/23	日中	A	往路	.mp4
adc_data_Raw_0.bin	1,073,740,920	2020/11/23	14:47	E:¥2020年11月_拡張性評価実験¥radar¥20201123¥A¥往路	2020/11/23	日中	A	往路	.bin
adc_data_Raw_1.bin	1,073,740,920	2020/11/23	14:48	E:¥2020年11月_拡張性評価実験¥radar¥20201123¥A¥往路	2020/11/23	日中	A	往路	.bin
adc_data_Raw_10.bin	1,073,740,920	2020/11/23	14:59	E:¥2020年11月_拡張性評価実験¥radar¥20201123¥A¥往路	2020/11/23	日中	A	往路	.bin
adc_data_Raw_11.bin	1,073,740,920	2020/11/23	15:00	E:¥2020年11月_拡張性評価実験¥radar¥20201123¥A¥往路	2020/11/23	日中	A	往路	.bin
adc_data_Raw_12.bin	1,073,740,920	2020/11/23	15:01	E:¥2020年11月_拡張性評価実験¥radar¥20201123¥A¥往路	2020/11/23	日中	A	往路	.bin
adc_data_Raw_13.bin	54,631,080	2020/11/23	15:01	E:¥2020年11月_拡張性評価実験¥radar¥20201123¥A¥往路	2020/11/23	日中	A	往路	.bin
adc_data_Raw_2.bin	1,073,740,920	2020/11/23	14:49	E:¥2020年11月_拡張性評価実験¥radar¥20201123¥A¥往路	2020/11/23	日中	A	往路	.bin
adc_data_Raw_3.bin	1,073,740,920	2020/11/23	14:50	E:¥2020年11月_拡張性評価実験¥radar¥20201123¥A¥往路	2020/11/23	日中	A	往路	.bin
adc_data_Raw_4.bin	1,073,740,920	2020/11/23	14:52	E:¥2020年11月_拡張性評価実験¥radar¥20201123¥A¥往路	2020/11/23	日中	A	往路	.bin
adc_data_Raw_5.bin	1,073,740,920	2020/11/23	14:53	E:¥2020年11月_拡張性評価実験¥radar¥20201123¥A¥往路	2020/11/23	日中	A	往路	.bin
adc_data_Raw_6.bin	1,073,740,920	2020/11/23	14:54	E:¥2020年11月_拡張性評価実験¥radar¥20201123¥A¥往路	2020/11/23	日中	A	往路	.bin
adc_data_Raw_7.bin	1,073,740,920	2020/11/23	14:55	E:¥2020年11月_拡張性評価実験¥radar¥20201123¥A¥往路	2020/11/23	日中	A	往路	.bin
adc_data_Raw_8.bin	1,073,740,920	2020/11/23	14:56	E:¥2020年11月_拡張性評価実験¥radar¥20201123¥A¥往路	2020/11/23	日中	A	往路	.bin
adc_data_Raw_9.bin	1,073,740,920	2020/11/23	14:58	E:¥2020年11月_拡張性評価実験¥radar¥20201123¥A¥往路	2020/11/23	日中	A	往路	.bin
adc_data_Raw_Log.csv	582,074	2020/11/23	15:02	E:¥2020年11月_拡張性評価実験¥radar¥20201123¥A¥往路	2020/11/23	日中	A	往路	.csv
adc_data_Raw_0.bin	1,073,740,920	2020/11/23	14:47	E:¥2020年11月_拡張性評価実験¥radar¥radar¥A¥往路	2020/11/23	日中	A	往路	.bin
soken_2020-11-23-14-46-18.bag	138,465,427,996	2020/11/23	15:01	E:¥2020年11月_拡張性評価実験¥soken¥20201123¥A¥往路	2020/11/23	日中	A	往路	.bag
状況.txt	113	2020/11/24	11:26	E:¥2020年11月_拡張性評価実験¥soken¥20201123¥A¥往路	2020/11/23	日中	A	往路	.txt
2020-11-23-14-46-42.bag	94,252,724,745	2020/11/23	15:01	E:¥2020年11月_拡張性評価実験¥soken¥20201123¥camera¥A¥ouro	2020/11/23	日中	A	往路	.bag

出所：トヨタテクニカルディベロップメント（株）

(b)走行シーンの属性分析

まず、センサ弱点代表データ中の弱点現象／要因を試験の属性別に頻度を算出した（Table 116）。次に、(a)でまとめた試験データの項目を関連付けることで、代表データのセンサ弱点現象が発生した時の状況をマトリクス化した（Table 117）。

Table 116 試験データとセンサ弱点／要因の頻度

				ミリ波			カメラ	
日付	時間帯	コース	ルート	上方構造物誤認識	マルチパス	多物標	防音壁の影	街路樹の影
2020/11/26	日中	A	往復	0	0	0	0	0
2020/11/26	夜	A	往復	0	0	0	0	0
2020/11/23	日中	A	往路	0	0	0	0	0
2020/11/23	夜	A	往路	0	0	0	0	0
2020/11/23	日中	A	復路	0	0	0	0	0
2020/11/23	夜	A	復路	0	0	0	0	0
2020/11/23	日中	B	時計	1	0	0	0	1
2020/11/23	夜	B	時計	1	0	0	0	1
2020/11/23	日中	B	反時計	0	0	0	0	0
2020/11/23	夜	B	反時計	0	0	0	0	0
2020/11/24	日中	C1	外	3	3	1	2	0
2020/11/24	夜	C1	外	3	3	1	2	0
2020/11/24	日中	C1	内	3	3	1	1	0
2020/11/24	夜	C1	内	3	3	1	1	0
				14	12	4	6	2

出所：トヨタテクニカルディベロップメント（株）

Table 117 センサ弱点／属性マトリクス

条件 / 不調	時間帯	交通量	コース／ルート	日照量	降水量	湿度	静止物標	危険度	備考
歩道橋			B／時計	-	-				
マルチパス地形			C1／内	-	-		多い		
多物標		多い		少ない					交通量の多い時間帯、コースを選択。夕方は西日が差し、夜間はライトがあるため、曇天時が理想？
影（街路樹）	日中		B／時計	多い	なし				
影（防音壁）			C1／内・外						
映り込み	日中・夜	多い		多い	なし				遮蔽物がないコースで、夜間の明かりが強いまたは日照量の多い条件で実施。過去データの占める割合大。
道路模様			C1／内						
幅広白線			C1／外						
かすれ白線			C1／内						
路上障害物			???						
影（高架橋）	日中		B／時計・反時計	多い	なし				日照量の多い時間帯で実施
逆光	日中		B／時計	多い	なし				遮蔽物がないコースで、日照量の多い時間帯で実施。特定時間に太陽に向かって走行するルート。
縁石			C1／外						

出所：トヨタテクニカルディベロップメント（株）

(c)走行コース、試験パターン決め

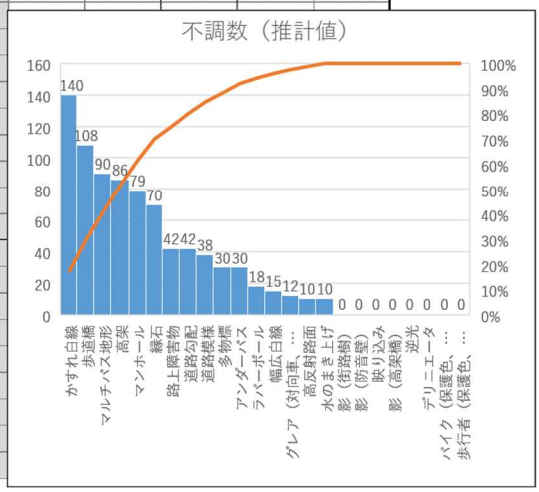
地図サービスを利用し静止物標を含めた道路上のセンサ弱点要因を調査し、センサ弱点の取れ高が期待できる、走行コースを選定した（Figure 484）。次に走行コースと日時の組み合わせとして試験パターンを選定した（Table 118）。センサ弱点として雨天でのデータ取得も目的としてあったため、現地では天候変化により適宜走行コースを変更するなど柔軟な変更も可能とした。

出所：トヨタテクニカルディベロップメント（株）

Figure 484　走行コースの例

Table 118　試験パターン＆センサ弱点推定取れ高

		月日	6月14日	6月15日	6月16日	6月17日	6月18日	6月19日	6月20日	6月21日	6月22日	6月23日	6月24日	6月25日
時間帯	開始													
午前中	8:30													
	9:00													
	9:30													
	10:00					C1（晴れでない）	C1（晴れでない）							
	10:30													
	11:00			D1（晴れでない）	D2（晴れでない）	C1（晴れでない）	C1（晴れでない）							
	11:30			D1（晴れでない）	D2（晴れでない）									
	12:00													
	12:30													
午後	13:00													
	13:30													
	14:00		D2（晴れでない）	D1（晴れでない）	C1（晴れでない）	C1（晴れでない）								
	14:30		D2（晴れでない）	D1（晴れでない）										
	15:00				C1（晴れでない）	C1（晴れでない）								
	15:30		D1（晴れでない）	E（晴れでない）										
	16:00				D2（晴れでない）	C1（晴れでない）								
	16:30		D1（晴れでない）	E（晴れでない）										
	17:00				D1（晴れでない）	C1（晴れでない）								
	17:30		D2（晴れでない）											



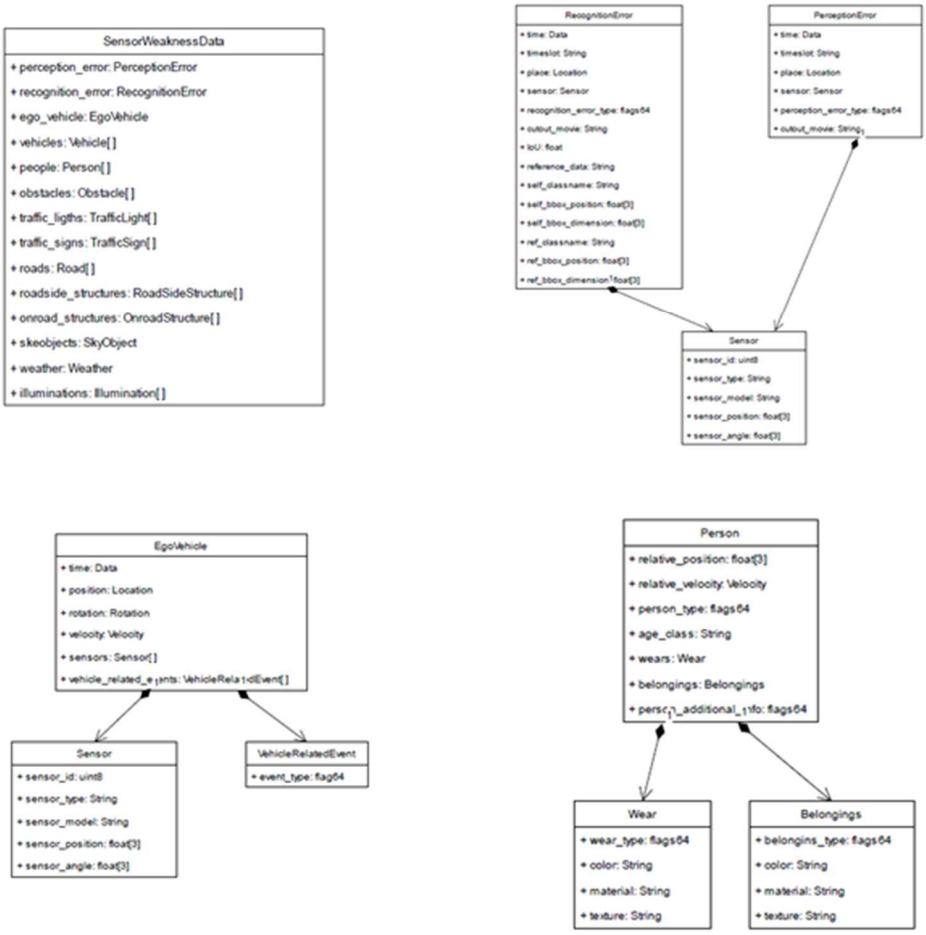
出所：トヨタテクニカルディベロップメント（株）

C.センサ弱点シーンのタグ定義

センサ弱点シナリオの情報をもとに、センサ弱点データのデータ構造、必要となるタグの種類、値を定義。具体的にはセンサ弱点に関する情報を分析してクラスモデル化し、データ定義を実施。そして後工程である統計解析、シナリオ化を想定し、共通フォーマットとして主流のjson データを定めた。

Figure 485 は中間生成物としてのクラスモデルのクラス図である。Table 119 は、センサ弱点データの定義である。

Figure 486 に、実際のセンサ弱点データ(json)のサンプルを示す。



出所：トヨタテクニカルディベロップメント（株）

Figure 485 クラスモデル

Table 119　センサ弱点データ定義

Layer-1	Layer-2	Layer-3	Layer-4	Layer-5	Data Type	説明
sensor_weakness_data[0]						センサ弱点の1データ
	perception_error					センサ弱点（知覚）
		time			Date	日時
		timeslot			String	時間帯
		place			Location	場所
		sensor				センサ
			sensor_id		uint8	
			sensor_type		flags64	センサの分類（カメラ、LiDAR、ミリ波、GPSなど）
			sensor_model		String	センサの型
			sensor_position		float[3]	センサ取付位置
			sensor_angle		float[3]	センサ取付角
		perception_error_type			flags64	センサ弱点（知覚）の種類
		cutout_movie			String	切り出し動画のパス
	recognitionError					センサ弱点（認識）
		time			Date	日時
		timeslot			String	時間帯
		place			Location	場所
		sensor				センサ
			sensor_id		uint8	
			sensor_type		flags64	センサの分類（カメラ、LiDAR、ミリ波、GPSなど）
			sensor_model		String	センサの型
			sensor_position		float[3]	センサ取付位置
			sensor_angle		float[3]	センサ取付角
		recognition_error_type			flags64	センサ弱点（認識）の種類
		cutout_movie			String	切り出し動画のパス
		IoU			float	基準データと自車の認識のIoU
		reference_data			String	基準データのパス
		self_classname			String	認識のクラス名
		self_bbox_position			float[3]	認識のBBOX位置
		self_bbox_dimension			float[3]	認識のBBOXのすき
		ref_classname			String	基準データのクラス名
		ref_bbox_position			float[3]	基準データのBBOX位置
		ref_bbox_dimension			float[3]	基準データのBBOXのすき
	ego_vehicle					自車

出所：トヨタテクニカルディベロップメント（株）


```
{
    "sensor_weakness_data": [
    {
        "perception_error": {
            "year":"2020",
            "date_time": "11/26/ 11:18:27.500000",
            "timeslot": "daytime",
            "place": [35.645875,139.7781859,13.31912422],
            "sensor": {
                "sensor_id": "1",
                "sensor_type": "camera",
                "sensor_model": "SONY IMX490",
                "sensor_position": [0.960,0,1.595],
                "sensor_angle": [0,0,0]
            },
            "error_area": [[965,0],[1930,938]],
            "error_type": ["halation"],
            "cutout_movie": "/home/divp/work/swsai_20220114/2022-01-17_10h53m52s/halation_1.mp4"
        },
        "ego_vehicle":
        {
            "year":"2020",
            "date_time":"11/26/ 11:18:27.500000",
            "position": [35.645875,139.7781859,13.31912422],
            "rotation": [0.0,0.0,240.0],
            "velocity": [0.0,0.0,0.0],
            "sensors": [
            {
                "sensor_id": 1,
                "sensor_type": "camera",
                "sensor_model": "SONY IMX490",
                "sensor_position": [0.960,0,1.595],
                "sensor_angle": [0.0,0.0,0.0]
            },
            {
                "sensor_id": 2,
                "sensor_type": "LiDAR",
                "sensor_model": "Velodyne VLS128",
                "sensor_position": [-0.226,0,2.291],
                "sensor_angle": [0.0,0.0,0.0]
            },
```


出所：トヨタテクニカルディベロップメント（株）

Figure 486　センサ弱点データ(json)

D.センサ弱点探索手法の検討

関係各社との協議の下、下記の 3 点のセンサ弱点現象を探索するための手法を優先して検討した。

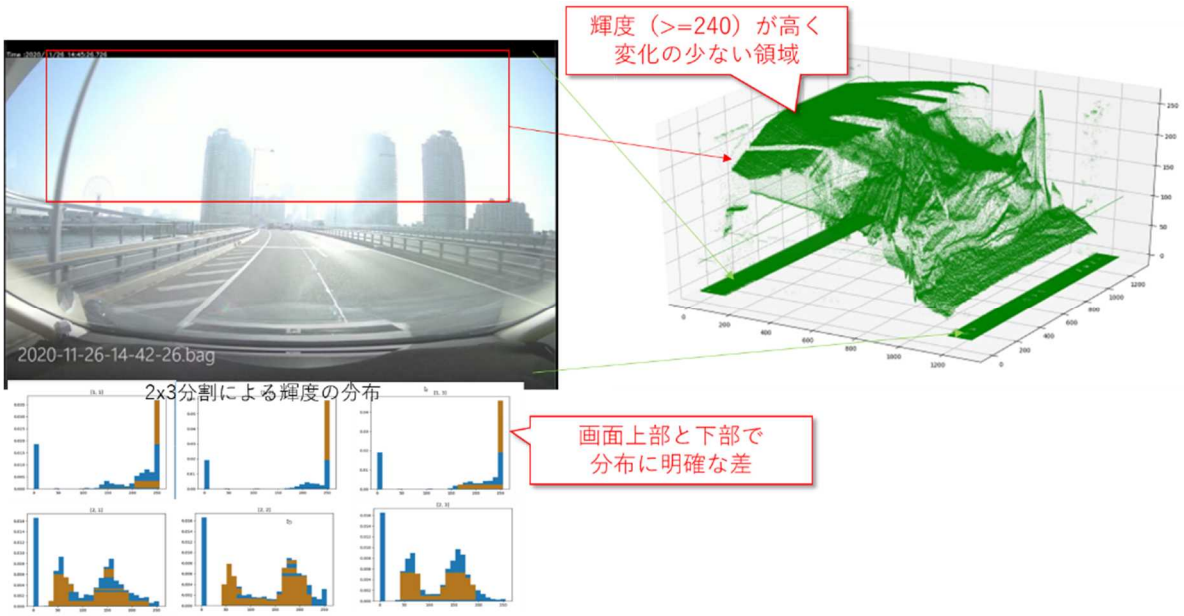
(1)ハレーション(カメラ)
(2)ブラックスポット(LiDAR)
(3)認識エラー(カメラ)

以下、各探索手法について説明する。

(1)ハレーション(カメラ)の推定

事前準備として、IMX490 の ROSBAG データを簡易現像し.mp4 形式の動画に変換した。

本ロジックは変換後の動画を入力として、画面全体を指定した数でグリッドに分割し、各グリッドの輝度平均値を算出する。輝度平均値が一定の閾値を超えているグリッドをハレーション発生個所と判断する(Figure 487)。なお、この閾値は、実際の人の目でみてハレーションが確認されたケースの輝度平均値を参考にしている。

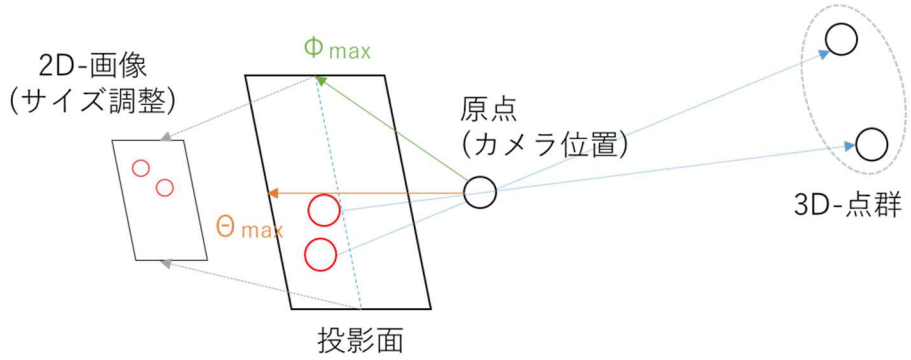


出所:トヨタテクニカルディベロップメント(株)

Figure 487 ハレーションの推定

(2)ブラックスポット(LiDAR)の推定

事前準備として、VLS128 の認識データ(ROSBAG データ)から各点の座標と反射強度を抽出し、それらを 3 次元点群ライブラリの Open3D で Voxel 化することによりダウンサンプリングする。次に下図のようにピンホールカメラモデルにより 3D-点群から 2 次元の画像(.jpg)に変換する。そして、それらの画像つなぎ合わせて mp4 形式の動画とする。



出所:トヨタテクニカルディベロップメント(株)

Figure 488　3D-点群→2D-画像変換(ピンホールカメラモデルに基づく)

本推定ロジックはこれらを入力データとして、その一部の領域をユーザが指定する分割数でグリッドに分割し、各グリッドの輝度分布を算出する。輝度が低いグリッドをブラックスポットの発生領域と判定する。なお、反射強度と動画の輝度は反対の関係となっているため、低強度:白、高強度:黒となる

上記の原理に基づき得られた 2D-画像は下図の通り。カメラ視点でその近赤外線の反射強度をグレースケール化した画像となっている。

出所:トヨタテクニカルディベロップメント(株)

Figure 489　2D-LiDAR 動画(.mp4 形式)

(3)カメラ認識弱点の推定

カメラ認識弱点では 1)実験車両の認識結果と 2)比較検証するための準正解データを入力データとして用いることにした。両データの物標に対する BBOX とクラスを比較することにより、カメラの認識弱点を推定する。Table 120 は推定する弱点の分類とその推定方法である。なお、両データでは物体検出モデルが異なるため（認識データ：Yolov5x, 準正解データ：弊社 AUDAS）、クラスの違いが存在する。しかしながら、クラスを統一しての再学習は追加工数が大きくなるため、クラスの違いを吸収するロジックを追加することで対処した。

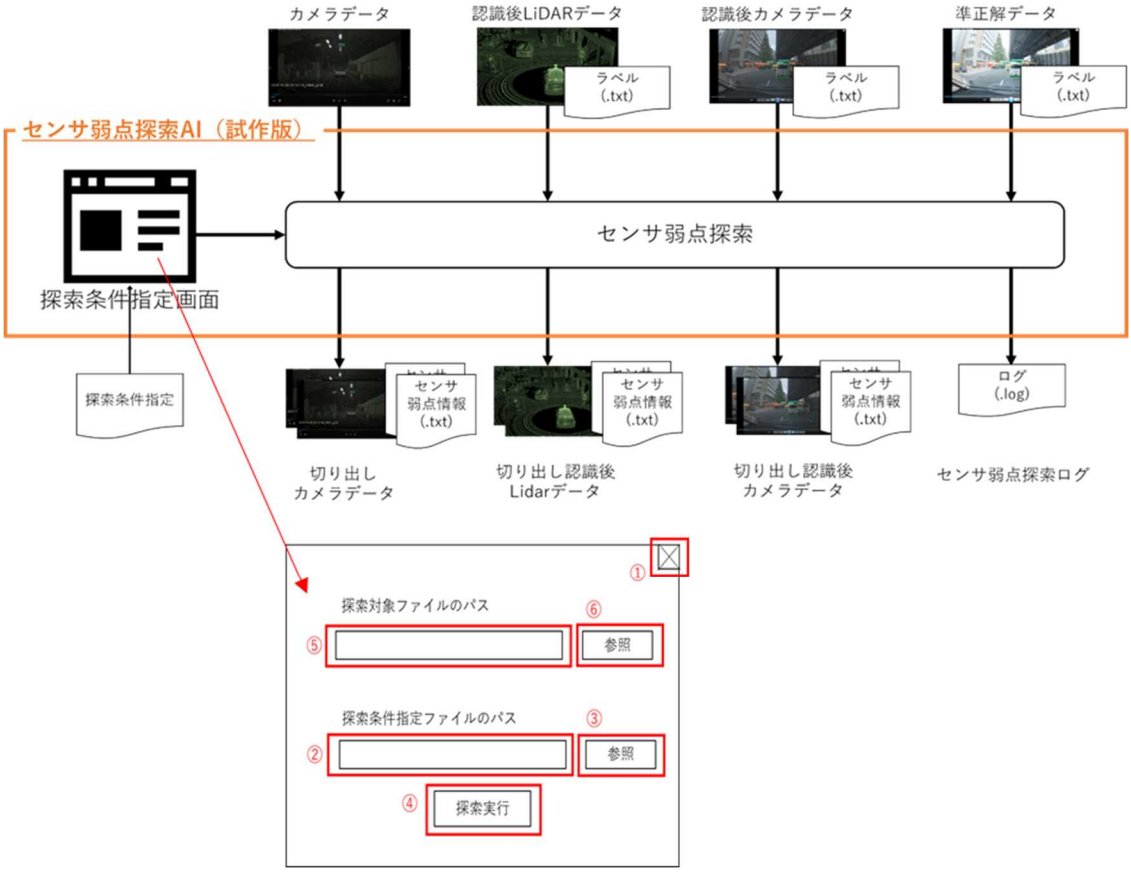
Table 120 認識エラーと推定方法

認識エラー	定義	推定方法
未検出	物標が検出されていない	準正解データの BBOX 近傍で認識データの BBOX 有無を確認し、ない場合は未検出と判断
誤検出	背景の一部が物標と認識される	認識データの BBOX 近傍で準正解データの BBOX 有無を確認し、ない場合は誤検出と判断
低 IoU	物標の BBOX の位置または寸法が正解と大きく異なる	認識データの BBOX に最も近い準正解データの BBOX をペアとし、その IoU が 0.7 未満の時に低 IoU と判断
クラス誤り	物標のクラスが間違っている	認識データの BBOX に最も近い準正解データの BBOX をペアとし、そのクラスが一致しない場合にクラス誤りと判断

出所：トヨタテクニカルディベロップメント（株）

E.センサ弱点探索 AI の要件定義

センサ弱点探索 AI の要件定義を実施し、要件定義書を作成した。詳細は（要件定義書）を参照のこと。簡単のため要件定義段階の本ツールのイメージを下図に示す。



出所：トヨタテクニカルディベロップメント（株）

Figure 490　センサ弱点探索 AI のイメージ　※要件定義書から抜粋

F.他 DB 連携の調査

センサ弱点 DB の研究項目として、異なる団体の実験 DB や気象 DB、地図 DB などを連携し活用していくデータレイクという思想がある。その取り組みの一環として、今回、地図 DB, 気象 DB のソース（オンライン、オフライン）について洗い出し、各項目のデータ取得方法を調査した。

調査の主たる項目を Table 121 に、気象 DB 調査結果の一部を Table 122 に示す。

Table 121 調査の主たる項目

項目	説明
DB 名	DB の一般名
タイプ	ウェブサイト、公開 API か、データ、GIS などサービスの分類
世界対応	世界の気象情報に対する網羅性
ライセンス	無料、有料（値段など）

出所：トヨタテクニカルディベロップメント（株）

Table 122 気象 DB 調査

気象DB名	タイプ	世界対応	ライセンス	ライセンスについての補足	注意事項
気象庁HP	HP,データ	△	無料, データは有料	HP上のデータは限られているが、有料の販売データはあらゆるデータが入手可	一部の気象統計データは全球の情報あり。json形式でHTTPリクエストを投げることで実質Webサービス的な使い方ができる。
日本気象協会	HP, 第三者API	△	無料	API利用は登録が必要	
OpenWeatherMap	第三者API	○	フリープラン有（要登録）	フリープランは60リクエスト／分, CC-BY-CA-4.0, データおよびデータベースはObDLライセンス, 一部の過去気象データは有償	過去データの取得よりも、天気予報向け
Weatherbit	第三者API	○	商用利用は有償	商用利用、および過去の気象データは有償	過去データの取得よりも、天気予報向け。トヨタなどOEMも一部参加。
DarkSky	第三者API	○	-	新規アカウント登録停止	過去データの取得向け、Appleの買収によって2022年末にサービス終了
VisualCrossing	第三者API	○	フリープラン有（個人のみ, 要登録） 営利団体（$2,000/年）	フリープランは1000件／日, 営利団体はフリープランの利用不可。$2,000/年にアップグレードすれば200万回/月に結果の取得可で、ウェブサイト等への組み込み可。	過去データの取得、天気予報双方に適する
WeatherDataAPI	第三者API	×	有償（月：32,000円～）		国内の天気予報向け

出所：トヨタテクニカルディベロップメント（株）

今回は、調査結果に基づき、気象 DB については気象庁ウェブサイトからのデータ取得を提案した。気象庁ウェブサイトからのデータ取得とタグ付与の方法を Table 123 に示す。

Table 123　タグ付与方法の一覧　※気象 DB の例

		気象庁サービス	第3者の気象サービス	Webサービス		気象系データ
カテゴリ	項目	気象庁HP	日本気象協会HP	OpenWeatherAPI	VisualCrossing	気象庁データ （業務支援センター販売データ）
通常気象	天気概要	HTTPリクエストによりデータ取得	HPまたは天気APIで取得	APIで取得	APIで取得	データから直接抽出
	降雨量	HTTPリクエストにより1時間データ取得	HPまたは天気APIで取得	APIで取得	APIで取得	データから直接抽出
	降雪量	HTTPリクエストにより1時間データ取得	HPまたは天気APIで取得	？　※恐らくAPIで取得可	APIで取得	データから直接抽出
	風向・風速	HTTPリクエストにより1時間データ取得	HPまたは天気APIで取得	APIで取得	APIで取得	データから直接抽出
	気温	HTTPリクエストにより1時間データ取得	HPまたは天気APIで取得	APIで取得	APIで取得	データから直接抽出
	気圧	- ※業務支援センター販売データを活用	HPで取得	APIで取得	APIで取得	データから直接抽出
	湿度	- ※業務支援センター販売データを活用	HPで取得	APIで取得	APIで取得	データから直接抽出
	日照時間	HTTPリクエストにより1時間データ取得	HPで取得	-	APIで取得	データから直接抽出
	雲量	- ※業務支援センター販売データを活用	HPで取得	APIで取得	APIで取得	データから直接抽出
	視程	- ※業務支援センター販売データを活用	HPで取得	-	APIで取得	データから直接抽出
	太陽放射量	- ※業務支援センター販売データを活用	-	-	APIで取得	データから直接抽出
異常気象	光化学スモッグ	- ※業務支援センター販売データを活用	-	-		データから直接抽出
	黄砂	- ※業務支援センター販売データを活用	-	-		データから直接抽出
	台風	- ※業務支援センター販売データを活用	-	-		データから直接抽出
	霧・霧	業務支援センターの販売データから取得	-	-		データから直接抽出
	雹	業務支援センターの販売データから取得	-	-		データから直接抽出

出所：トヨタテクニカルディベロップメント（株）

②-2 センサ不調シナリオ探索 AI 試作

②-1 で作成した要件定義に基づき、試作を行った結果を説明する。

【実施期間】

2021 年度下期

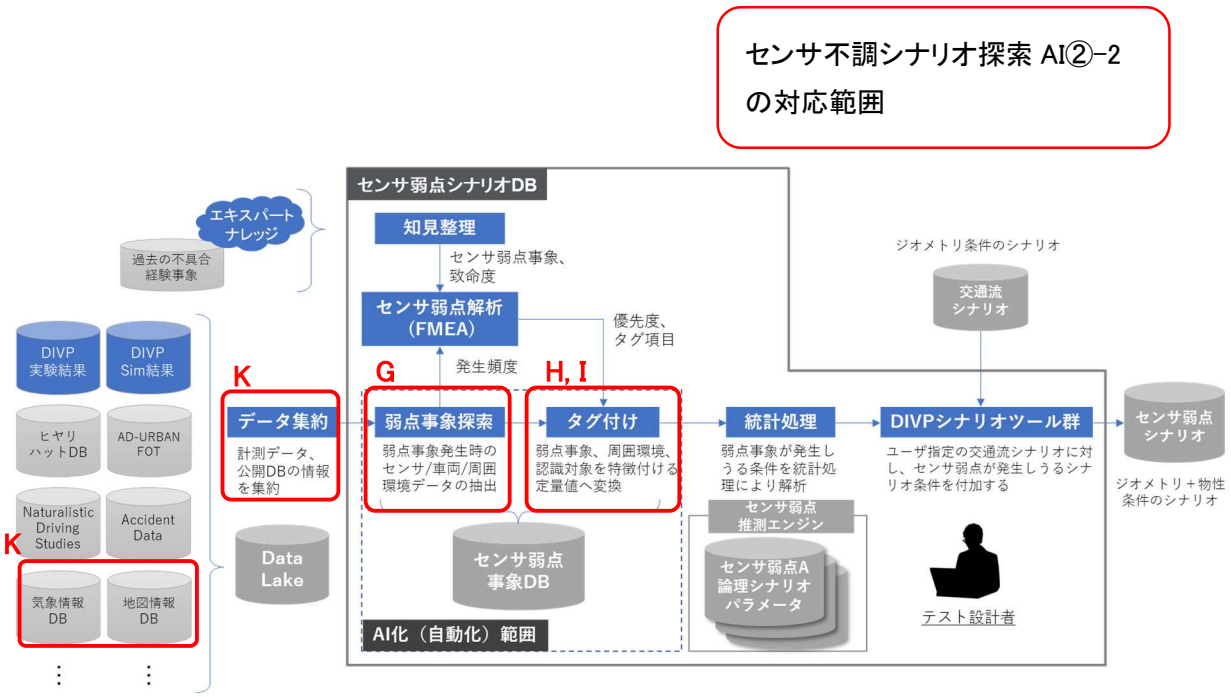
【成果】

成果は Table 124 の通りである。 Table 124 の各項目とセンサ弱点シナリオデータベース構成における位置づけを Figure 491 に示す。

Table 124 成果の一覧

No.	項目	成果
G	センサ弱点探索 AI の実装・テスト	3 点のセンサ弱点現象（ハレーション，ブラックスポット，認識弱点）が探索できるツールの実装・テストを完了
H	センサ弱点シーンへのタグ付け手法の実装	センサ弱点シーンへの、4 点の自動タグ付けロジックを実装
I	センサ弱点データの作成	半自動にて 40 件のセンサ弱点データを作成
K	他 DB との連携実装	気象 DB との連携 PG を実装

出所：トヨタテクニカルディベロップメント（株）



G～K は、Table 124 成果の一覧に対応

出所：学校法人幾徳学園 神奈川工科大学、TTDC

Figure 491 センサ弱点シナリオデータベース構成

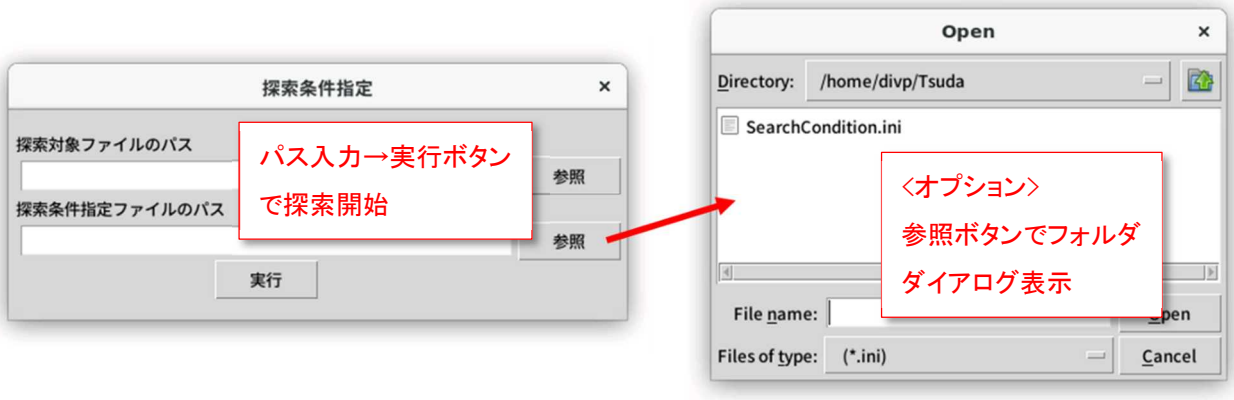
【解説】

G.センサ不調シナリオ探索 AI の実装・テスト

同ツールの(a)画面構成, (b)設定ファイル, (c)確認結果について示す。

(a)画面構成

ツールの外観を Figure 492 に示す。センサ弱点探索 AI の GUI は探索条件指定画面と補助的なダイアログから構成されている。同画面に探索対象ファイルと探索件指定ファイルのパスを設定し、実行ボタンを押すことで探索が実行される。

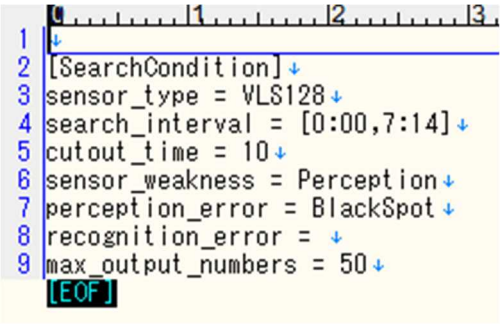


出所：トヨタテクニカルディベロップメント（株）

Figure 492 センサ弱点探索 AI の画面

(b)探索条件指定ファイル

以下は探索条件を指定するための、同ファイルのキャプチャである。



出所：トヨタテクニカルディベロップメント（株）

Figure 493　探索条件指定ファイル

探索条件指定ファイルの項目を Table 125 に示す。

Table 125　探索条件指定ファイルの内容

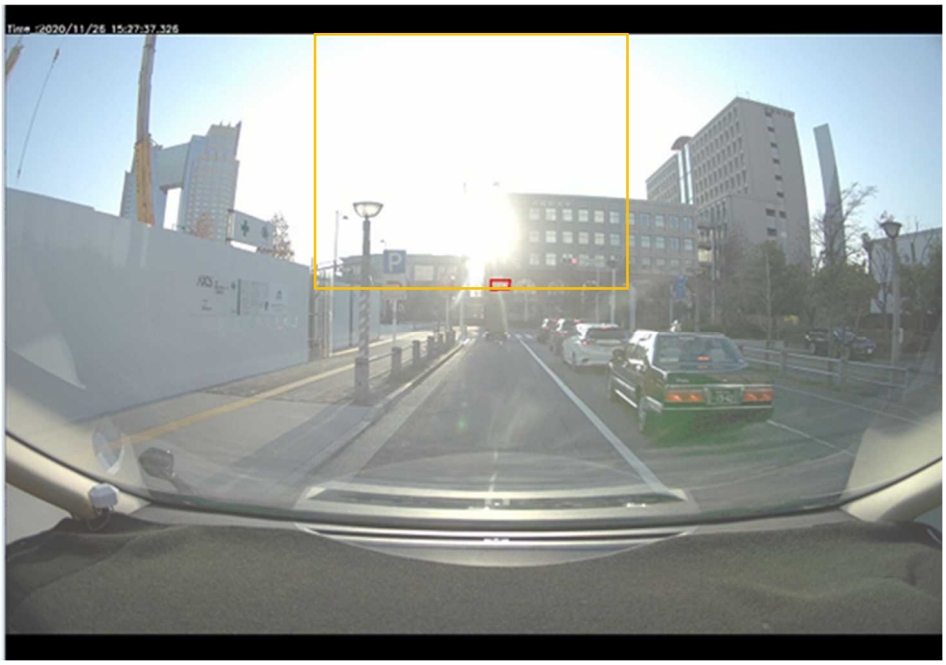
項目	内容	範囲
sensor_type	弱点探索したい対象のセンサ	カメラ, LiDAR のいずれか
search_interval	対象の動画に対する探索区間	動画の再生時間で指定
cutout_time	切り出し動画（出力ファイル）の長さ	分.秒で長さを指定
sensor_weakness	探索したいセンサ弱点の種類	知覚，認識のどちらか
perception_error	知覚弱点の種類	ハレーション，ブラックスポットのどちらか
recognition_error	認識弱点の種類	未検出、誤検出、低 IoU，クラス誤りのいずれか
max_output_numbers	出力データの最大数	1～100

出所：トヨタテクニカルディベロップメント（株）

(c)確認結果

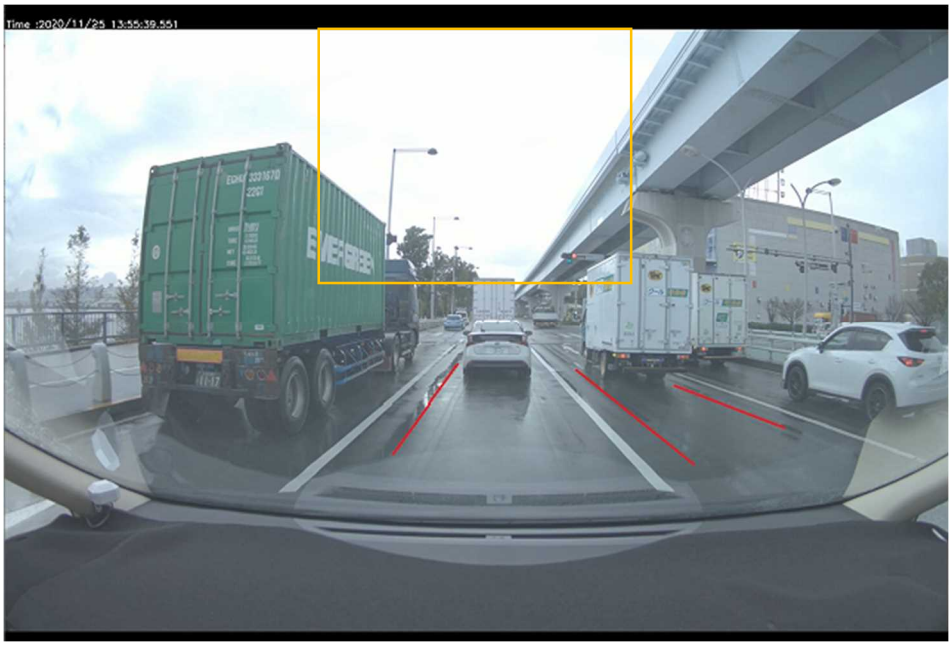
(1)ハレーション(カメラ)

Figure 494、Figure 495 に実行結果を示す。ハレーションが発生している箇所が抽出されていることが確認できた。



出所:トヨタテクニカルディベロップメント(株)

Figure 494　ハレーション(逆光)　※黄色枠が発生個所



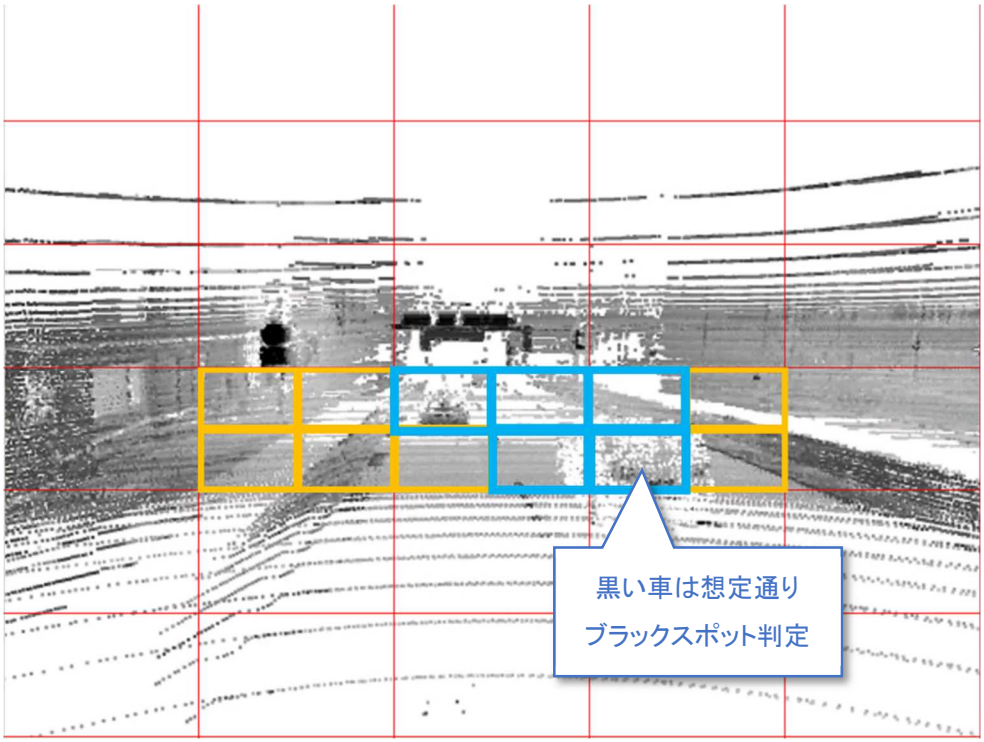
出所:トヨタテクニカルディベロップメント(株)

Figure 495　ハレーション(コントラスト低下)　※黄色枠が発生個所

(2)ブラックスポット(LiDAR:知覚)

Figure 496、Figure 497 に動作確認を行った結果を示す。画像中の黄色枠は探索対象の領域で、青色はブラックスポットが検出された領域である。なお、グレースケールの濃淡は、LiDAR の近赤外レーザーの反射強度を表しており、濃い(黒い)ほうが反射強度が強い、薄い(白い)ほうが反射強度が弱い部分となっている。そのため、白い部分は、反射が返ってきておらず、ブラックスポットと呼ばれる信号の欠落部分と言える。

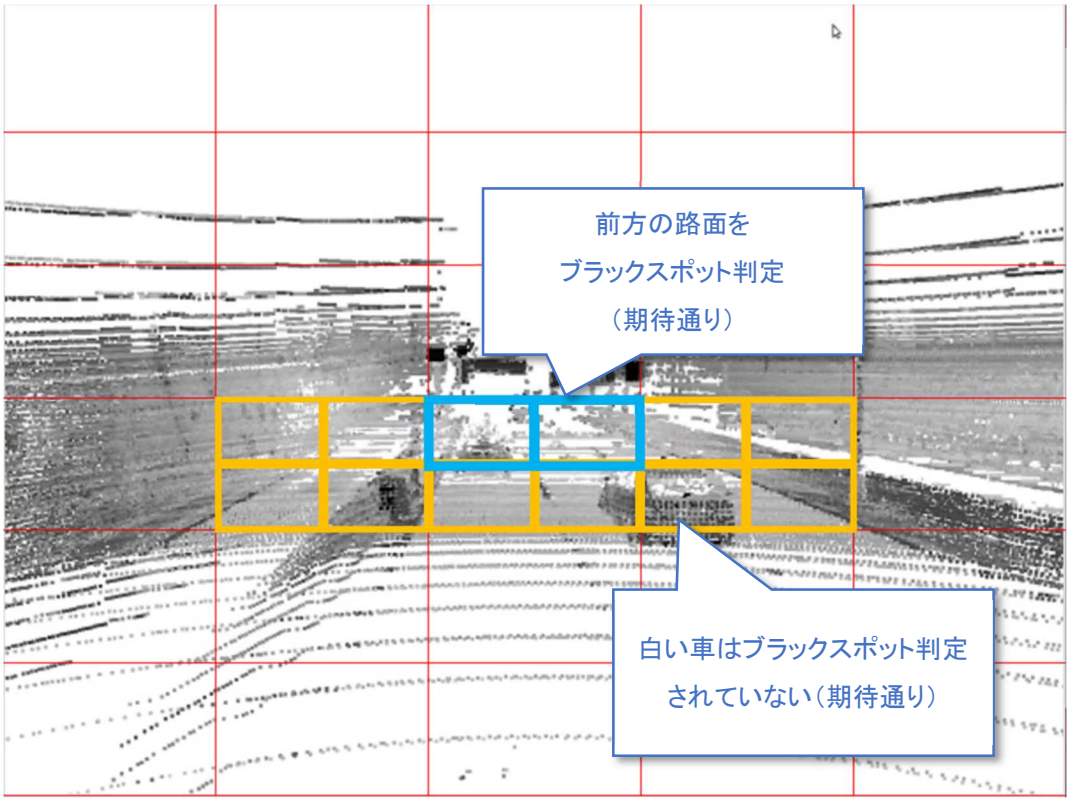
下図の右前方に黒い車(カメラデータで確認)が走行している。この時、黒い車と路面の一部でブラックスポットが発生している。この時、ツールにおいてもブラックスポットとして判定されており動作が確認できた。



出所:トヨタテクニカルディベロップメント(株)

Figure 496　確認結果 a(黒い車)

下図 Figure 497 では、右前方に白い車（カメラデータにて確認）が走行している。こちらの反射強度は白い車であるため高く想定通り、ブラックスポットとして検出されていないことが分かった。また反射強度の弱い前方路面についてもブラックスポットとして検出している。路面の反射強度が弱い原因は不明だが、ブラックスポットとしての判定は動作確認することができた。

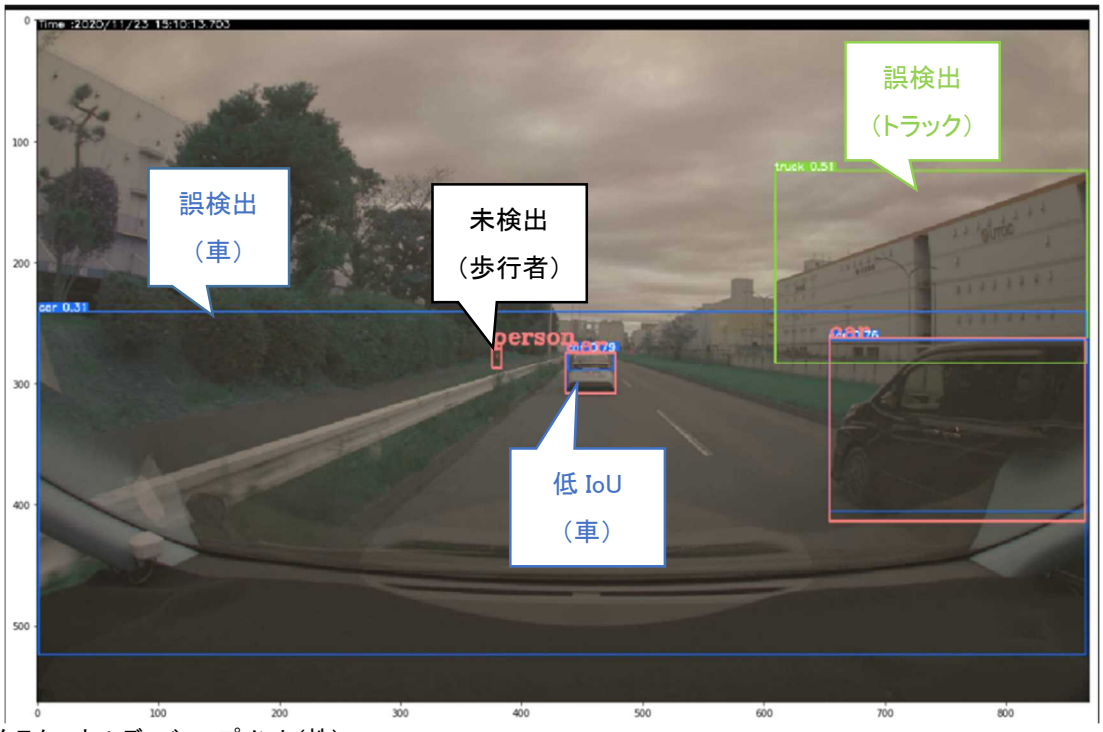


出所：トヨタテクニカルディベロップメント（株）

Figure 497 確認結果 b（白い車）

(3)カメラ認識

Figure 498 に実行結果を示す。認識弱点のうち、未検出、誤検出、低 IoU が発生しているが同弱点探索 AI により、いずれも検出されていることが確認できた。



出所：トヨタテクニカルディベロップメント（株）

Figure 498　未検出，誤検出，低 IoU　※桃：準正解データ、その他：認識データ

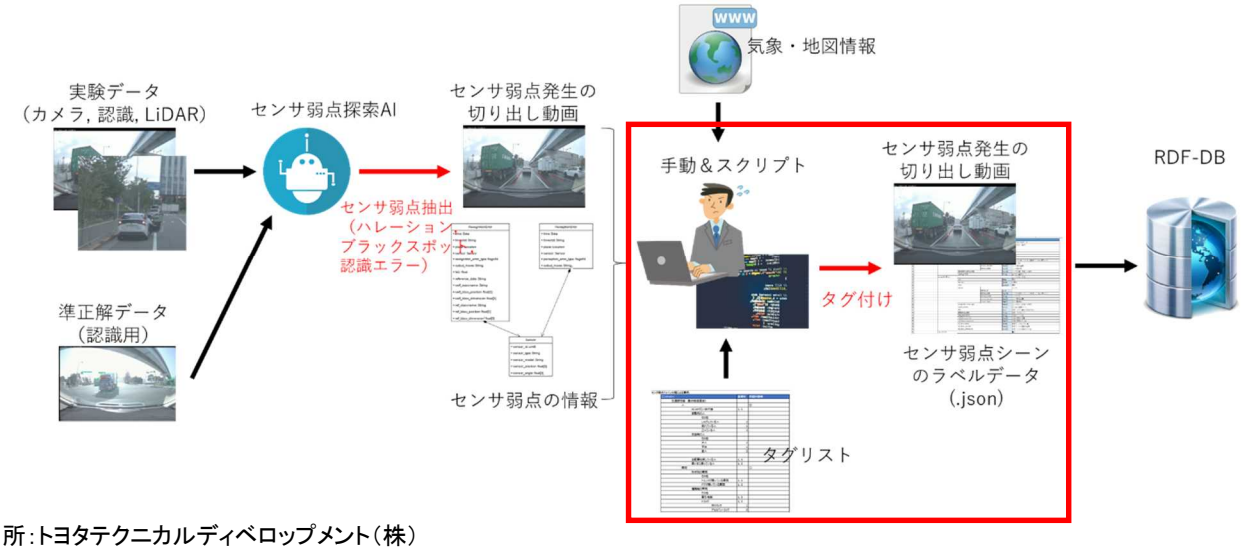
Figure 499 は右前方の黒いワゴン車をトラックと判断しているクラス誤りのケースであり、弱点探索 AI により検出されることが分かった。

出所：トヨタテクニカルディベロップメント（株）

Figure 499　クラス誤り（黒いワゴン：右レーン）　※桃：準正解データ,その他の色：認識データ

H.センサ弱点シーンへのタグ付け手法の検討

理解のためにセンサ弱点データの作成フローを示す（Figure 500）。



出所：トヨタテクニカルディベロップメント（株）

Figure 500　センサ弱点データの作成フロー

今回作成した 4 件の自動タグ付けのロジックについて、Table 126 にて示す。

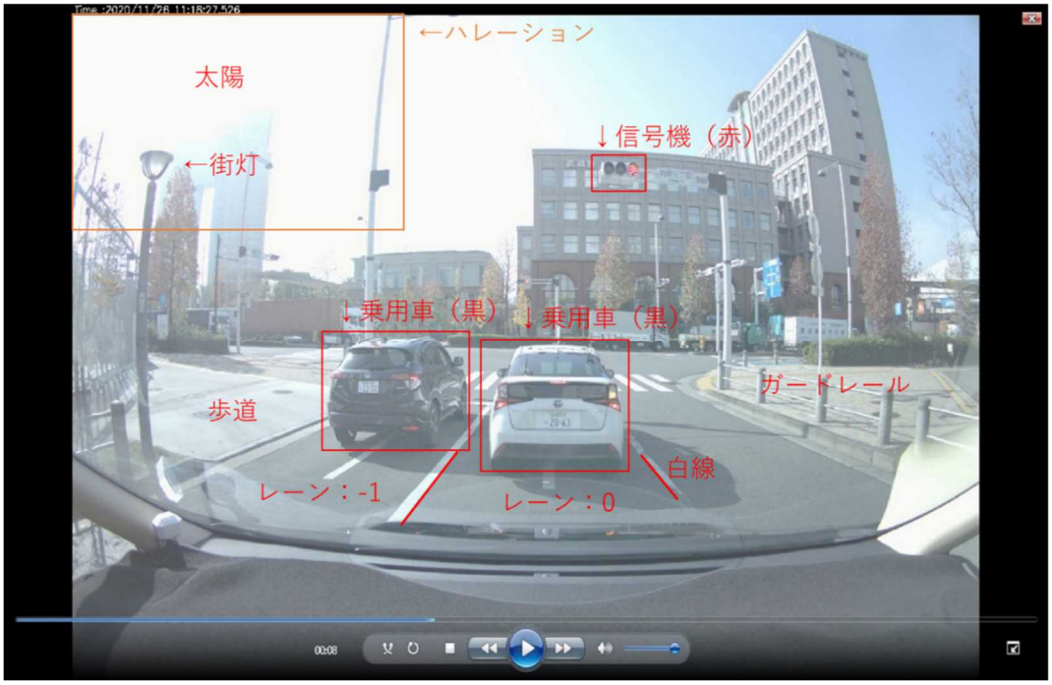
Table 126　自動化付与されるタグとそのロジック

タグ（和名）	前提	概要
自車位置・ 向き	GPS データが正しいこと	GPS データの緯度・経度・高度を付与、向きは右手系の絶対座標で付与
時間帯	ウェブアクセスが可能なこと	気象庁ウェブサイトから実験データの日付の日の出、日の入りの時刻を取得し、実験データの時刻と日の出、日の入りの時刻の関係性から、夜明け、日中、夕暮れ、夜の 4 段階で時間帯を設定
物標の色	対象が検出済み	検出された物標の BBOX 内の RGB からカラーパターンを推定
物標の相対位置	対象が検出済み、 路面の勾配がない	検出された物標の BBOX の底辺を接地面として仮定し、カメラ設置点から高度 0 の 3D 空間へ逆投影することで前後距離を推定

出所：トヨタテクニカルディベロップメント（株）

I.センサ弱点データの作成

今回は 40 件の同データを作成した。作成されたデータの例を示す。実際のタグはテキストで定義されているが、ここでは分かりやすさのため画像上に付与した情報のイメージと実データのテキスト内容を同時に示す。



出所：トヨタテクニカルディベロップメント（株）

Figure 501　センサ弱点データイメージ


```
{
    "sensor_weakness_data": [
    {
        "perception_error": {
            "year":"2020",
            "date_time": "11/26/ 11:18:27.500000",
            "timeslot": "daytime",
            "place": [35.645875,139.7781859,13.31912422],
            "sensor": {
                "sensor_id": "1",
                "sensor_type": "camera",
                "sensor_model": "SONY IMX490",
                "sensor_position": [0.960,0,1.595],
                "sensor_angle": [0,0,0]
            },
            "error_area": [[965,0],[1930,938]],
            "error_type": ["halation"],
            "cutout_movie": "/home/divp/work/swsai_20220114/2022-01-17_10h53m52s/halation_1.mp4"
        },
        "ego_vehicle":
        {
            "year":"2020",
            "date_time":"11/26/ 11:18:27.500000",
            "position": [35.645875,139.7781859,13.31912422],
            "rotation": [0.0,0.0,240.0],
            "velocity": [0.0,0.0,0.0],
            "sensors": [
            {
                "sensor_id": 1,
                "sensor_type": "camera",
                "sensor_model": "SONY IMX490",
                "sensor_position": [0.960,0,1.595],
                "sensor_angle": [0.0,0.0,0.0]
            },
            {
                "sensor_id": 2,
                "sensor_type": "LiDAR",
                "sensor_model": "Velodyne VLS128",
                "sensor_position": [-0.226,0,2.291],
                "sensor_angle": [0.0,0.0,0.0]
            },
```


出所：トヨタテクニカルディベロップメント（株）

Figure 502　センサ弱点データ(.json)

J.気象 DB 連携のロジック試作

測定データにある実験時のタイムスタンプとロケーションで気象庁 HP に要求し、その応答データを解析するロジックを作成。結果として、現状候補となっているタグのうち気象庁 HP の「天気概況」、「降水量／降雪量」を取得し、センサ弱点データに自動で付与できることが分かった。Figure 503 では降水量のデータを抽出する際の手順を説明した。

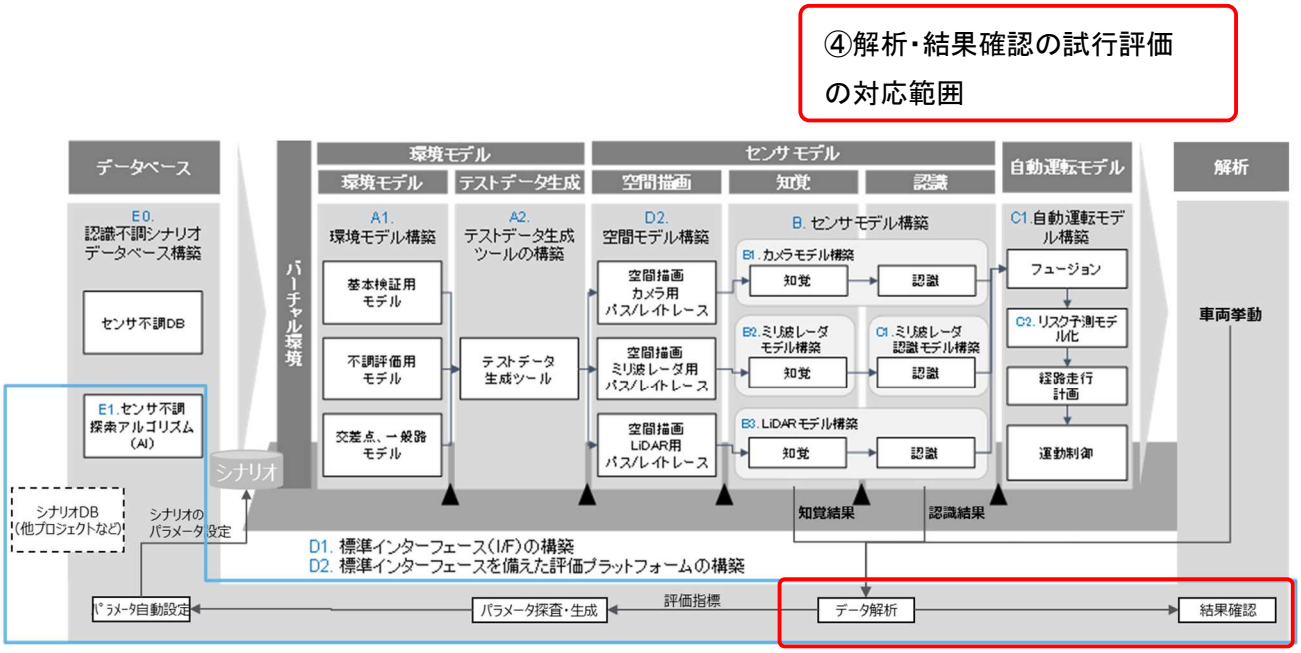
出所：トヨタテクニカルディベロップメント（株）

Figure 503　気象庁 HP からのデータ取得の流れ

④ 解析・結果確認の試行評価

本検討項目の④解析・結果確認の試行評価の位置づけを Figure 504 に示す。

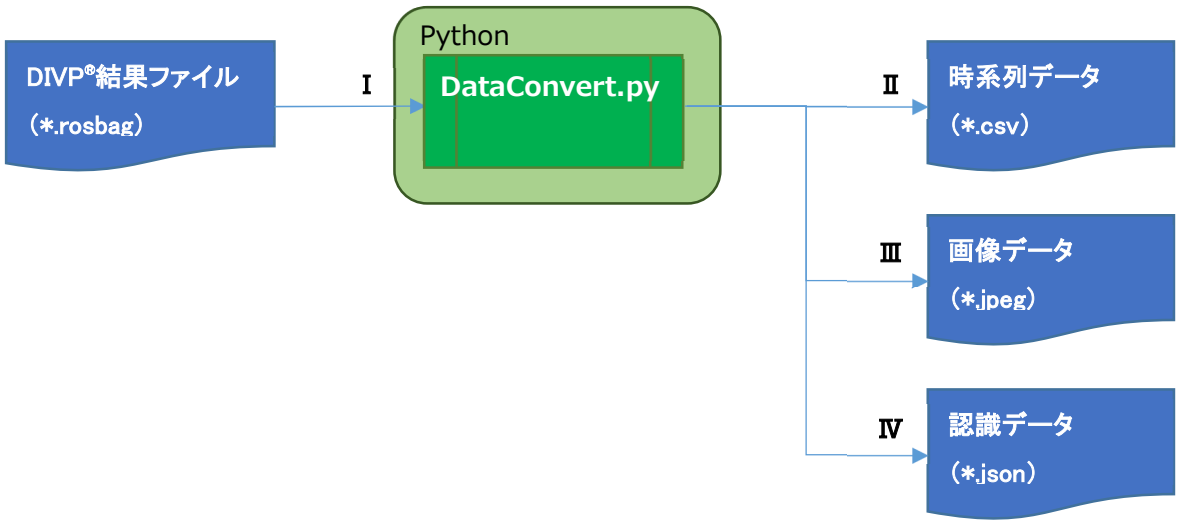
DIVP®シミュレーションは、「シナリオ」「自車両」「空間描画」「知覚」「認識」など、それぞれのモジュールが DIVP®プラットフォーム上で実行され、モジュール間の情報をシミュレーション結果として、1 つのファイル（*.rosbag）に保存される。しかし、ファイル容量が大きく、解析のたびに大容量のファイルを読込むのは時間がかかる。そこで、解析に必要となる情報のみ抽出し、一般的なファイルフォーマットへデータを変換することで、データの参照・解析をしやすくすることを目的に、必要となる要件を整理し評価用プログラムを準備した。



出所：トヨタテクニカルディベロップメント（株）

Figure 504　解析・結果確認の試行評価の位置づけ

今年度開発したシミュレーション結果ファイル変換機能を Figure 505 に示す。また、図中の I～IV について機能ごとに説明する。



出所：トヨタテクニカルディベロップメント（株）

Figure 505　シミュレーション結果ファイル変換機能

Ⅰ．rosbag ファイルの読込み

DIVP®　のモジュールごとに rosbag ファイルへ出力されるシミュレーションデータを読込む。

データを読込む対象のモジュールは以下とした。

- シナリオモジュール
- 自車モジュール
- カメラモジュール（空間描画、知覚、認識）
- ミリ波レーダモジュール（空間描画、知覚、認識）
- LiDAR モジュール（空間描画、知覚_受光、知覚_投光、認識）
- DIVP®プラットフォーム

Ⅱ. 時系列データ （シナリオ、自車、プラットフォーム） トピックの出力

DIVP® シナリオモジュール、自車モジュール、DIVP®プラットフォーム のシミュレーション時系列結果データをcsv ファイルに変換して出力(Table 127)。csv ファイルにすることで、Excel 等でデータの確認もでき、さらに出力トピック（フィールド）を選択可能とすることで、解析で使用しないデータ分の容量削減を図った。

Table 127 時系列データの csv ファイル出力

シナリオ	/divp/divp_scenario_node/ScenarioInfo	divp_msgs::ScenarioInfos actor_info	
自車	/divp/divp_ego_vehicle_node/ego_vehicle_info	divp_msgs::EgoVehicleInfo header obj_id speed head_light fog_light turn_signal brake_light other_light front_wiper rear_wiper	
	/divp/divp_ego_vehicle_node/gnss	sensor_msgs::NavSatFix header status latitude longitude altitude position_covariance COVARIANCE_TYPE_ UNKNOWN = 0 COVARIANCE_TYPE_ APPROXIMATED = 1 COVARIANCE_TYPE_ DIAGONAL_KNOWN = 2 COVARIANCE_TYPE_ KNOWN = 3 position_covariance_type	
	/divp/divp_ego_vehicle_node/imu	sensor_msgs::Imu header orientation orientation_covariance angular_velocity angular_velocity_covariance linear_acceleration linear_acceleration_covariance	
プラットフォーム	/clock	rosgraph_msgs::Clock Time	

出所：トヨタテクニカルディベロップメント（株）

Ⅲ. センサ（カメラ、ミリ波レーダ、LiDAR） 知覚および認識トピックの画像出力

DIVP® カメラモジュール、ミリ波レーダモジュール、LiDAR モジュールのシミュレーション知覚結果データを jpeg ファイルに変換して出力。カメラモジュール、ミリ波レーダ、LiDAR モジュールのシミュレーション認識結果データ（物標 BBox や白線等）については、知覚結果 jpeg 画像に重畳させた画像として出力した。

Table 128 画像データの jpeg ファイル出力

モジュール	jpeg ファイル出力トピック	出力タイプ	備考
カメラ_知覚	/divp/divp_module_node/<camera_id>/perception/image_color	sensor_msgs::Image	
カメラ_認識	/divp/divp_module_node/<camera_id>/recognition/objects	divp_msgs::CameraRecogObjects	カメラ知覚画像に重畳
	/divp/divp_module_node/<camera_id>/recognition/lanes	divp_msgs::CameraRecogLanes	カメラ知覚画像に重畳
ミリ波レーダ_知覚	/divp/divp_module_node/<mmwradar_id>/perception/output_data	divp_msgs::RadarImage	
ミリ波レーダ_認識	/divp/divp_module_node/<mmwradar_id>/recognition/output_data	divp_msgs::RadarImageFiltered	ミリ波レーダ知覚画像に重畳
LiDAR_知覚（受光）	/divp/divp_module_node/<lidar_id>/receiver/points	sensor_msgs::PointCloud2	
LiDAR_認識	/divp/divp_module_node/<lidar_id>/recognition/objects	divp_msgs::LidarRecogObjectContainer	LiDAR 知覚画像に重畳

出所：トヨタテクニカルディベロップメント（株）

Ⅳ. センサ（カメラ、ミリ波レーダ、LiDAR） 空間描画・知覚・認識トピックの出力

DIVP® カメラモジュール、ミリ波レーダモジュール、LiDAR モジュールのシミュレーション空間描画・知覚・認識結果データを json ファイルに変換して出力した（Table 129）。また、出力トピック（フィールド）を選択可能とすることで、解析で使用しないデータ分の容量削減を図った。

Table 129 空間描画・知覚・認識トピックの json ファイル出力

モジュール	jpeg ファイル出力トピック	出力タイプ	備考
カメラ_空間描画	/divp/divp_module_node/<camera_id>/rendering/output_data	divp_msgs::CameraSpectrumData	
カメラ_知覚	/divp/divp_module_node/<camera_id>/perception/image_color	sensor_msgs::Image	
カメラ_認識	/divp/divp_module_node/<camera_id>/recognition/objects	divp_msgs::CameraRecogObjects	
	/divp/divp_module_node/<camera_id>/recognition/lanes	divp_msgs::CameraRecogLanes	
ミリ波レーダ_空間描画	/divp/divp_module_node/<mmwradar_id>/rendering/output_data	divp_msgs::RadarRenderingSend	
ミリ波レーダ_知覚	/divp/divp_module_node/<mmwradar_id>/perception/output_data	divp_msgs::RadarImage	
ミリ波レーダ_認識	/divp/divp_module_node/<mmwradar_id>/recognition/output_data	divp_msgs::RadarImageFiltered	
LiDAR_空間描画	/divp/divp_module_node/<lidar_id>/rendering/output_rx_info	divp_msgs::LidarRxInfos	
	/divp/divp_module_node/<lidar_id>/rendering/output_raindrop_texture	divp_msgs::LidarRaindropTextureData	
LiDAR_知覚（受光）	/divp/divp_module_node/<lidar_id>/receiver/points	sensor_msgs::PointCloud2	
LiDAR_知覚（投光）	/divp/divp_module_node/<lidar_id>/transmitter/output_data	divp_msgs::LidarTxInfos	
LiDAR_認識	/divp/divp_module_node/<lidar_id>/recognition/objects	divp_msgs::LidarRecogObjectContainer	

出所：トヨタテクニカルディベロップメント（株）

＜評価＞

ユーザによる DIVP®シミュレーション結果確認シーンを想定し、以下の解析方法・機能を評価・確認した。

評価には弊社（トヨタテクニカルディベロップメント）の解析ツールを使用し実施した。

－ データと画像が連動したデータ解析

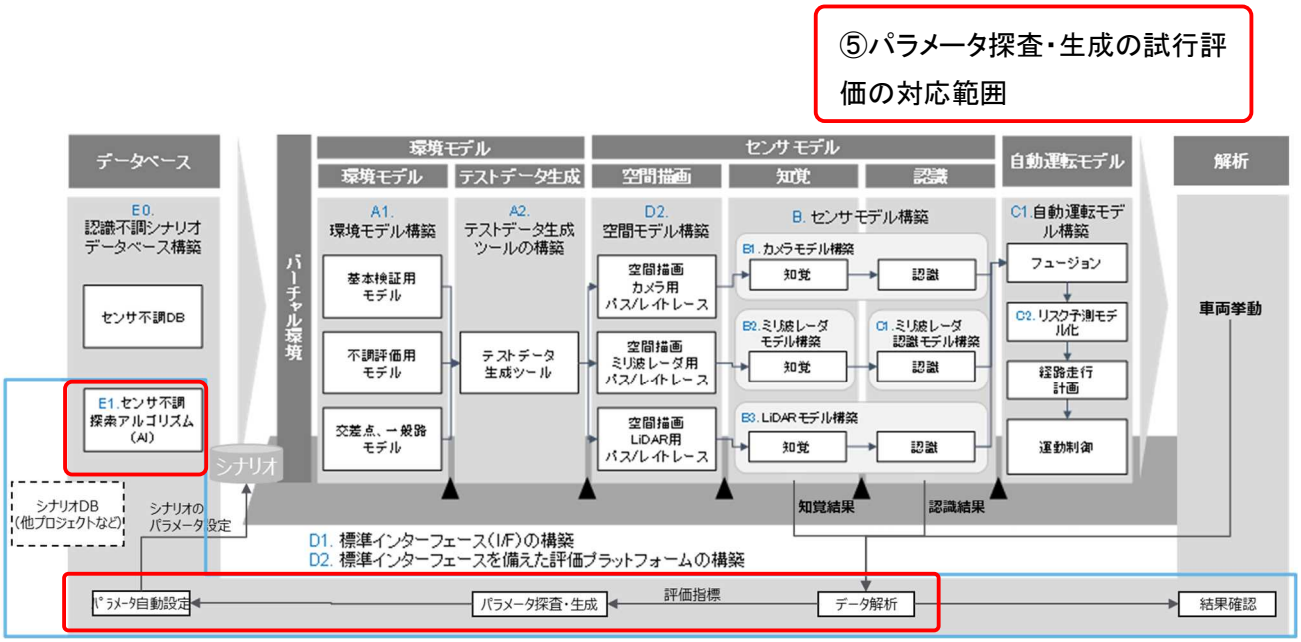
Ⅱ～Ⅳ の出力データを読込み、チャート、リスト、画像 を連動。ある認識結果の時点の時系列データ確認、ある時点の時系列データの画像確認など、1 つのビューアでデータ連動することでデータ解析が効率的に進められることが確認できた。データ解析画面を Figure 506 に示す。

出所：トヨタテクニカルディベロップメント（株）

Figure 506　データ解析画面　（トヨタテクニカルディベロップメント（株）解析ツール（OptiMeister）より）

⑤ パラメータ探査・生成の試行評価

本検討項目の⑤パラメータ探査・生成の試行評価の位置づけを Figure 507 に示す。

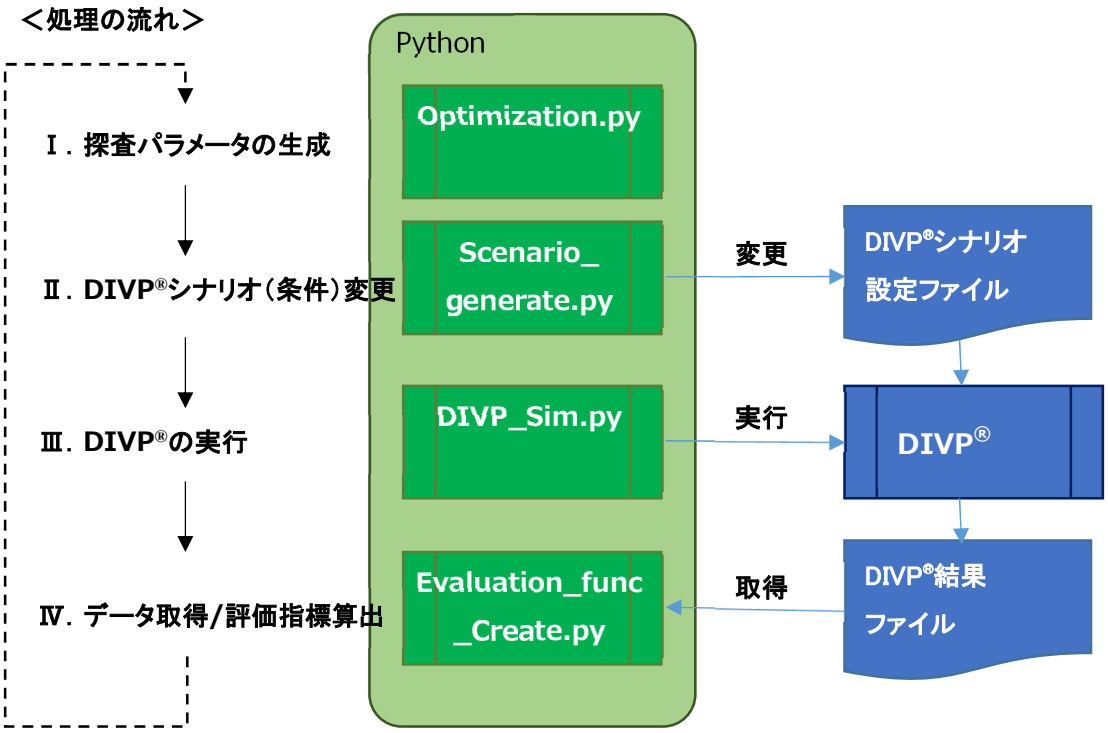


出所：トヨタテクニカルディベロップメント（株）

Figure 507　パラメータ探査・生成の試行評価の位置づけ

DIVP®シミュレーションの利用では、利用ユーザが開発しているセンサモデルを使用しシミュレーションを行うことが想定される。ユーザが DIVP®を利用してセンサ弱点となる条件を探し出すには、DIVP®の環境条件や走行シナリオ条件など、DIVP®の複数のパラメータを、複数の条件（水準）で変化させ結果を確認する必要があり、全ての条件をシミュレーションするのは現実的ではない。そこで、センサが弱点となる条件を素早く見つけるため、最適化手法を用いた方法を検討した。また、この検討においては、DIVP®シミュレーションの自動実行が必要となるため、その要件を定義し評価を実施した。

パラメータ探査・生成機能を Figure 508 に示す。また、I～IV について機能ごとに説明する。



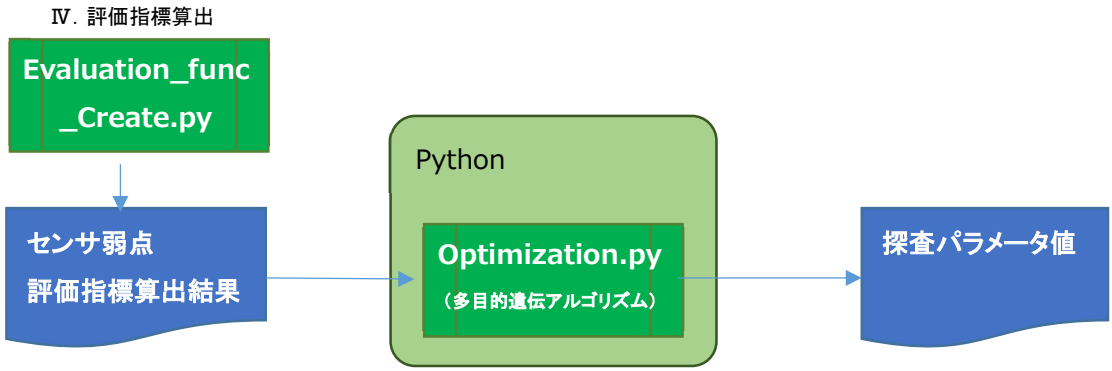
出所：トヨタテクニカルディベロップメント（株）

Figure 508　パラメータ探査・生成機能

Ⅰ. パラメータ探査（最適化）

センサ弱点となるパラメータを探査する方法として最適化手法を使用。センサ弱点を表す複数の評価指標（評価指標についてはⅣに記載）に対してパラメータを探査するため、多目的遺伝アルゴリズムを用いて探査をおこなうプログラムを準備した。DIVP®シミュレーション結果ファイルより算出した評価指標（※）をもとに、多目的遺伝アルゴリズムにより次に探査すべきパラメータ値（DIVP®シナリオ）を算出した。

※探査初回のパラメータ値（DIVP®シナリオ）はランダムで算出。



出所：トヨタテクニカルディベロップメント（株）

Figure 509　パラメータ探査（最適化）

Ⅱ. DIVP®シナリオ(条件)変更

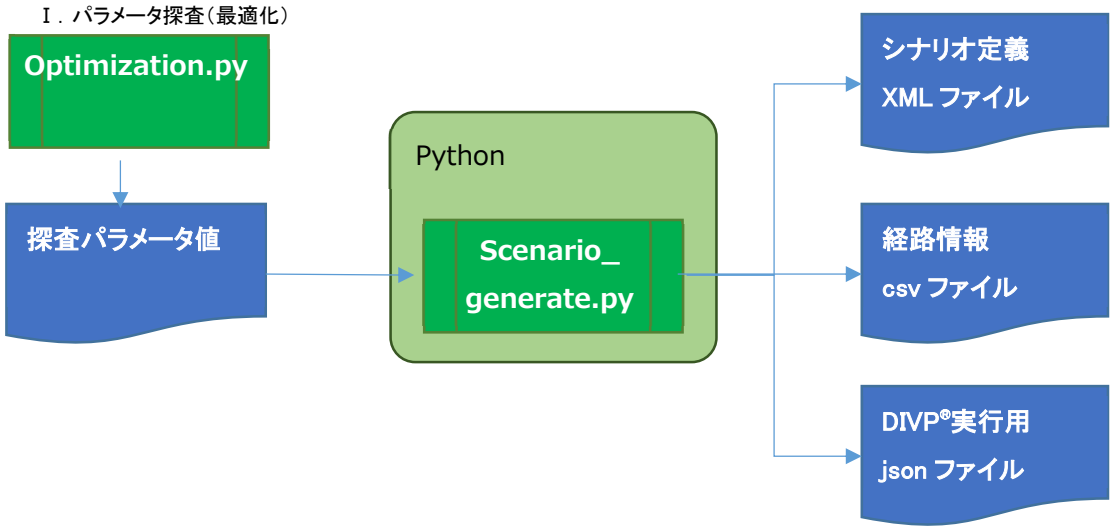
DIVP®シナリオ(条件)は SDM-G 等で作成でき、作成した設定は シナリオ定義 XML ファイル、経路情報 CSV ファイルとして出力される。シナリオ定義 XML ファイル、経路情報 CSV ファイルは、DIVP®シナリオマネージャが読込み、DIVP®実行用 json ファイルが生成される。

DIVP®シナリオ(条件)を変更するには、この シナリオ定義 XML ファイル、経路情報 CSV ファイル、DIVP®実行用 json ファイル を変更する必要がある。今回の検証では Table 130 に記載の DIVP®シナリオ(条件)を対象に、これらのファイルを変更するプログラムを準備した。なお、今回変更可能とした DIVP®シナリオ(条件)はまだ一部であり、センサ弱点を探査するために変更すべき条件(パラメータ)の洗出しおよび変更機能の追加については、引続き検討が必要となる。

Table 130 変更対象とした DIVP®シナリオ(条件)

変更パラメータ	変更対象ファイル	備考
緯度・経度	シナリオ定義 XML ファイル scenario_<センサ名>_rendering.json scenario_ego_vehicle.json	
年月日	シナリオ定義 XML ファイル scenario_<センサ名>_rendering.json	
時刻	シナリオ定義 XML ファイル scenario_<センサ名>_rendering.json	
天候	シナリオ定義 XML ファイル scenario_<センサ名>_rendering.json	
降雨量	シナリオ定義 XML ファイル scenario_<センサ名>_rendering.json	降雨量は事前に天候モデルで 作成したモデルファイルが必要
自車速度	経路情報 csv ファイル scenario.json	パラメータは最高速度を指定 速度の変化は最高速度の変化 比率で算出
他車速度	経路情報 csv ファイル scenario.json	

出所:トヨタテクニカルディベロップメント(株)

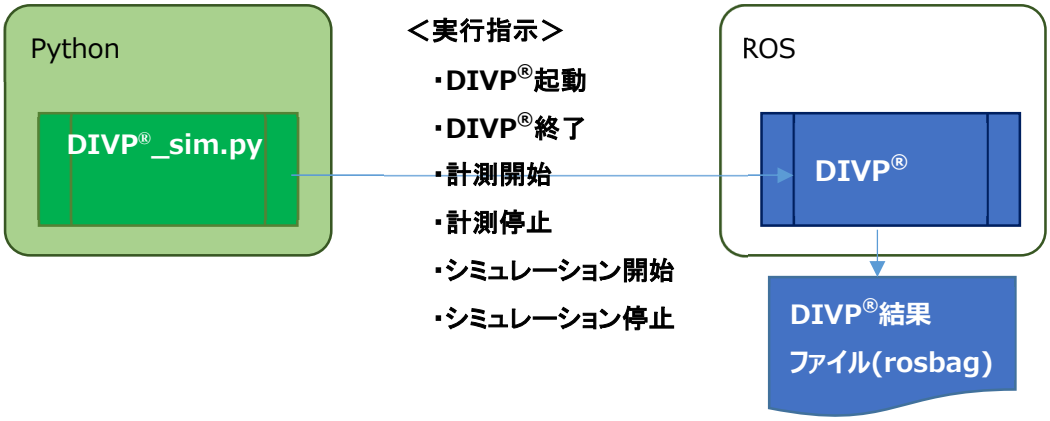


出所:トヨタテクニカルディベロップメント(株)

Figure 510 DIVP®シナリオ(条件)変更機能

Ⅲ. DIVP®の実行

パラメータ探査を自動で行うため、DIVP®を自動実行するプログラムを準備した。



出所：トヨタテクニカルディベロップメント（株）

Figure 511　DIVP®の実行機能

Ⅳ. データ取得/評価指標算出

DIVP®シミュレーション結果よりパラメータ探査を行うための評価指標を算出する。

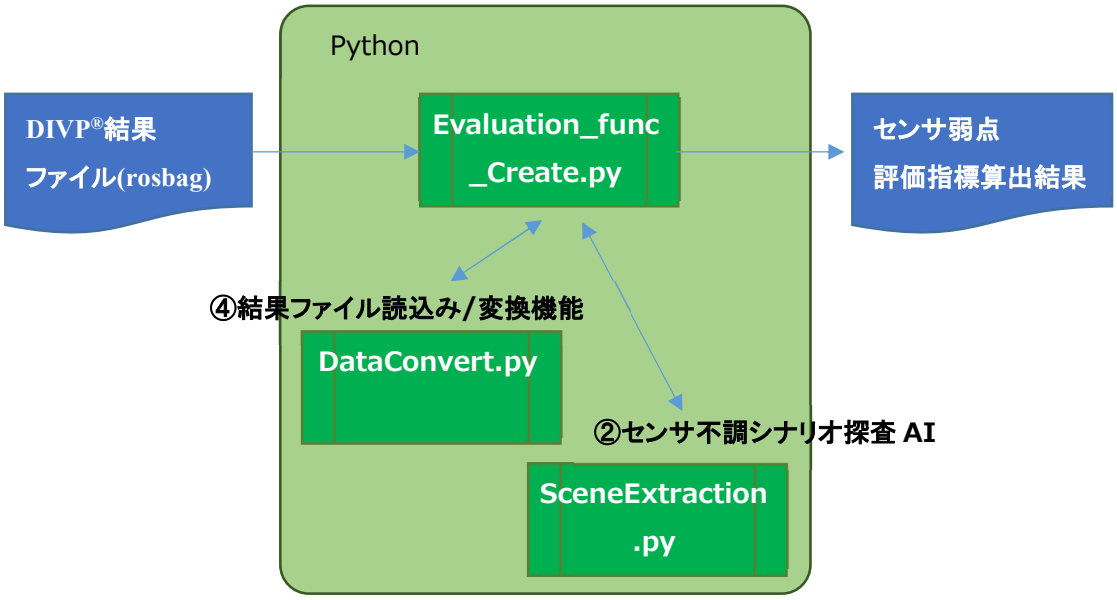
DIVP®シミュレーション結果データは 「④解析・結果確認の試行評価」 に記載した機能を流用し、評価指標算出に必要となるトピックのみファイルに出力し読込みを行った。

評価指標は「②センサ不調シナリオ探査 AI」 に記載した機能（以降、②AI）を流用した（Table 131）。②AI は実車両の走行時センサデータより、【センサ弱点原因となる現象】と【センサ認識のエラー】を判定している。②AI の入力を DIVP®シミュレーション結果とすることで、センサ弱点原因となる現象がどれほど発生していたか？またセンサ認識エラーの発生はどうだったか？ という評価指標を算出できる。DIVP®シミュレーション結果データより評価指標を算出するプログラムを準備した。

Table 131 評価指標

	評価指標	現在 ②AI が判定するもの
センサ弱点原因となる現象	クラッタ	
	ゴースト	
	ノイズ	
	フリッカ	
	マルチパス	
	低コントラスト	
	偽点	
	反射	
	映り込み	
	ハレーション	○
	遮蔽	
	鏡面	
	ブラックスポット	○
	・・・他	
センサ認識のエラー	認識未検出	○
	認識誤検出	○
	認識クラス誤り	○
	認識低 IoU	○

出所：トヨタテクニカルディベロップメント（株）



出所：トヨタテクニカルディベロップメント（株）

Figure 512　データ取得／評価指標算出機能

＜評価 A　単目的探査での機能確認＞

パラメータ探査機能の確認のため、以下に示す条件（単目的探査）にてパラメータ探査を実行した。

・DIVP®シナリオ（概要）

走行　　：自車、ターゲット車両　設定、実時間 0.5sec 分のシナリオ（経路ファイル）

センサモデル　：カメラ、ミリ波レーダ　（リファレンスモデルを使用）

・DIVP®シナリオパラメータ変更条件

天候　　：3 水準

Sunny（0）、LighitCloudy（1）、Cloudy（2）

時刻　　：11 水準

0700（0）、0800（1）、0900（2）、1000（3）、1100（4）、1200（5）、1300（6）、1400（7）、

1500（8）、1600（9）、1700（10）

・評価関数　　：カメラ認識結果 score（全フレームの平均値）

・目的関数　　：最小値を探査

・探査アルゴリズム：　遺伝アルゴリズム　5 世代（第 1 世代はランダム 3 点計画、以降は 4 点を自動生成）

単目的（評価関数 1 つ）での最適化を実施

（結果）

・Ⅰ　探査パラメータの生成

遺伝アルゴリズムにより世代ごとの探査パラメータが生成されることを確認。

・Ⅱ　DIVP®シナリオ（条件）変更

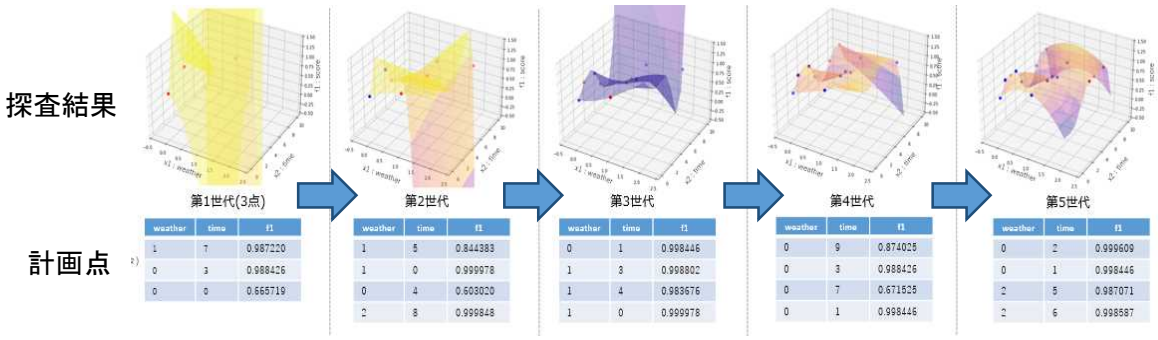
生成された探査パラメータが DIVP®シナリオファイルに反映されることを確認。

・Ⅲ DIVP®の実行

設定された DIVP®シナリオにて DIVP®を実行、シミュレーション結果ファイルが生成されることを確認。

・Ⅳ データ取得/評価指標算出

シミュレーション結果取得、評価指標の算出が行われることを確認。



weather	time	f1
1	7	0.987220
0	3	0.988426
0	0	0.665719

weather	time	f1
1	5	0.844383
1	0	0.999978
0	4	0.603020
2	8	0.999848

weather	time	f1
0	1	0.998446
1	3	0.998802
1	4	0.983676
1	0	0.999978

weather	time	f1
0	9	0.874025
0	3	0.988426
0	7	0.671525
0	1	0.998446

weather	time	f1
0	2	0.999609
0	1	0.998446
2	5	0.987071
2	6	0.998587

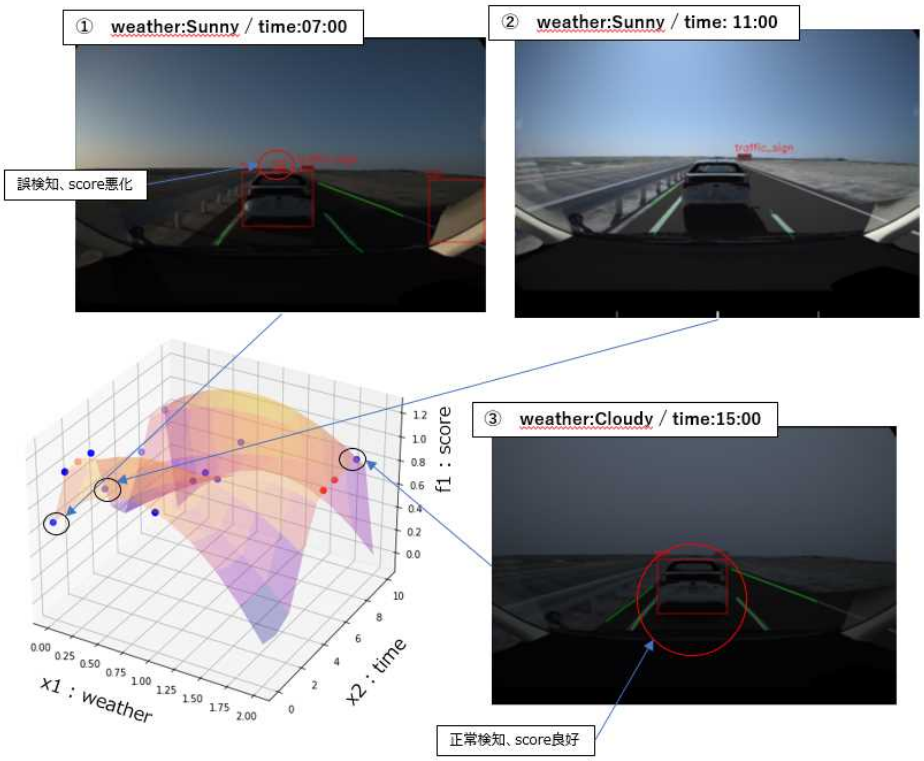
出所：トヨタテクニカルディベロップメント（株）

Figure 513　パラメータ探査機能確認結果

・パラメータ探査結果

5 世代実行後の結果より、評価関数としたカメラ認識結果 score（全フレームの平均値）が良かった条件と悪かった条件の DIVP®シミュレーションカメラ検出にカメラ認識を重ね合わせた画像を抽出。

カメラ認識結果 score が良い画像ではカメラ認識は正しくできた。カメラ認識結果 score が悪い画像では車両の認識ができていなかったり、誤検出が発生したりする等の状況が確認できた。



出所：トヨタテクニカルディベロップメント（株）

Figure 514　探査点（単目的）と DIVP®シミュレーションカメラ結果画面

＜評価 B　多目的探査での機能確認＞

評価関数を複数にした多目的最適化でのパラメータ探査の動作確認も行った。

・DIVP®シナリオ（概要）

走行　　：自車、ターゲット車両　設定、実時間 0.5sec 分のシナリオ（経路ファイル）

センサモデル　：カメラ、ミリ波レーダ　（リファレンスモデルを使用）

・DIVP®シナリオパラメータ変更条件

天候　　：3 水準

Sunny（0）、LighitCloudy（1）、Cloudy（2）

時刻　　：11 水準

0700（0）、0800（1）、0900（2）、1000（3）、1100（4）、1200（5）、1300（6）、1400（7）、

1500（8）、1600（9）、1700（10）

ターゲット車両速度　　：9 水準

20,30,40,50,60,70,80,90, ※最高車速を指定、最高車速の変化率で他走行中車速を演算

・評価関数　　：カメラ認識結果 score（全フレームの平均値）

センサ弱点シーン抽出 AI　が出力する IoU 率

・目的関数　　：最小値を探査

・探査アルゴリズム：　遺伝アルゴリズム　50 世代（第 1 世代はランダム 2 点計画、以降は 2 点を自動生成）

多目的（評価関数 2 つ）での最適化を実施

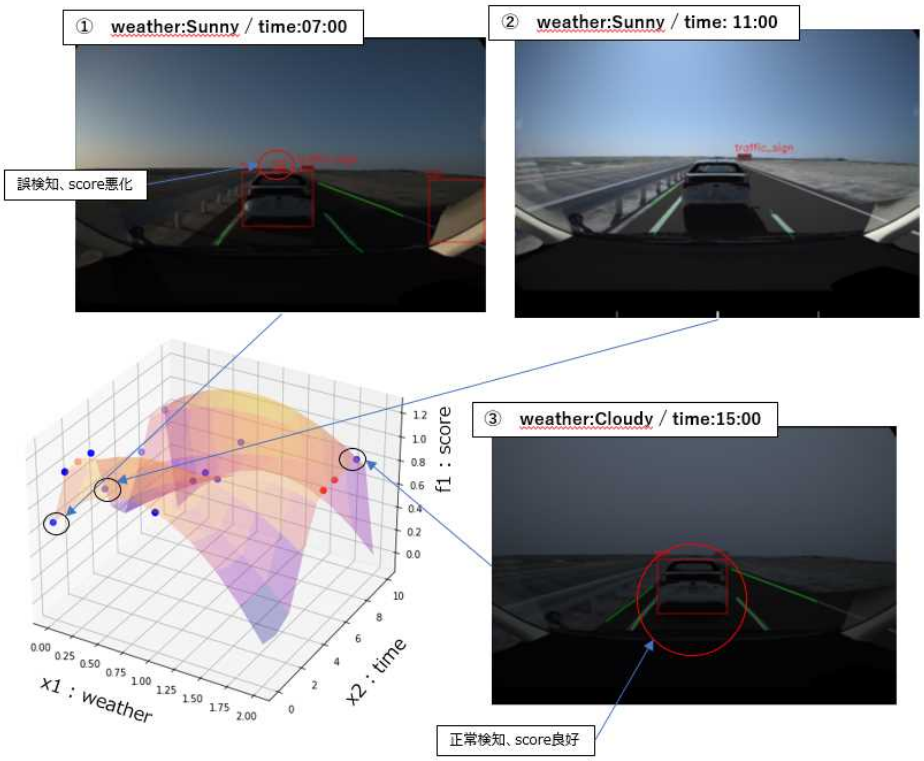
（結果）

・「Ⅰ　探査パラメータの生成」「Ⅱ　DIVP®シナリオ（条件）変更」「Ⅲ　DIVP®の実行」「Ⅳ　データ取得/評価指標算出」 いずれも正しく動作。

・パラメータ探査結果

動作検証用の時間が短いシナリオ　かつ　パラメータ条件　で実施したため、パラメータを変更させても、2 つの評価関数の結果があまり変化しなかった。また、Bbox 検出できなかった場合は、新たな評価関数（未検出）とすべきところを、IoU 率「0」として探査を行ったため、「0」が最小値となり探査されてしまった。

実際にユーザが実施する想定のシナリオにて、引続き検証・評価を行う必要はあるが、パラメータ探査機能としては正しく動作した。評価関数の結果が悪かった条件の DIVP®シミュレーション結果画像からは、車両の認識ができていなかったり、誤検出が発生したりする等の状況が確認できた。



出所：トヨタテクニカルディベロップメント（株）

Figure 515　探査点（単目的）とDIVP®シミュレーションカメラ結果画面

(3)次年度以降の計画

② センサ不調シナリオ探索 AI

－センサ弱点向け実験データの取得

－探索対象のセンサ弱点事象の拡充

－他 DB との連携（地図 DB 等）

－自動タグ付け処理の拡充

－探索 AI の連携 IF 検討・試作

③　解析・結果確認の試行評価、機能改善

－DIVP®クラウド版シミュレーション結果データの解析検討

－センサ弱点シナリオ評価指標の算出・解析検討

⑤パラメータ探査・生成の試行評価、機能改善

－センサ弱点条件を再現するために変更が必要な DIVP®パラメータの検討・定義

－シナリオ（DIVP®パラメータ）変更の外部実行検討、IF や API の定義（SDM-G、他との機能連携）

－DIVP®シミュレーション（クラウド版含む）の外部実行検討、IF や API の定義
（DIVP® Maneger、他との機能連携）

－センサ弱点指標に応じた最適なパラメータ探査（最適化）手法の検討

6. 他、令和3年度の活動成果

(1) 研究発表・講演(口頭発表も含む)

発表者	所属	タイトル	学会名 ・イベント名等	発表年月
竹田　和司	三菱プレシジョン株式会社	OpenDRIVE Concept Project and Other OpenX Projects From a Tool Vendor Perspective	ASAM Regional Meeting Japan 2021	2021.6.29
井上　秀雄	神奈川工科大学	自動運転の安全性・機能評価(2) 仮想空間での自動運転安全性評価環境の構築 －DIVP®(Driving Intelligence Validation Platform)プロジェクトの紹介－	安全工学シンポジウム 2021	2021.7.1
井上　秀雄	神奈川工科大学	高齢者の自立を支援し安全安心社会を実現する自律運転知能システム －自動運転・運転支援における安全技術の進化と評価について－	群馬大学次世代オープンイノベーション協議会	2021.7.26
村松　彰二	日立Astemo株式会社	自動運転を支える車載製品の技術開発	CASE研究会セミナー	2021.9
小山　翔太郎	神奈川工科大学	VALUATION OF APPARENT RISK BY USING HARDWARE-IN-THE-LOOP SYSTEM	FAST-zero '21	2021.9.21
井上　秀雄	神奈川工科大学	「仮想空間における自動走行評価環境整備手法の開発」、p91-p97	SIP第2期 自動運転(システムとサービスの拡張)中間成果報告書	2021.9.30(JP) 2021.12.6(EN)
秋田　時彦	豊田工業大学	スマートビークル研究センター　活動状況報告	第11回 豊田工業大学スマートビークル研究センター シンポジウム	2021.10.21
井上　秀雄	神奈川工科大学	Driving Intelligence Validation Platform for Automated Driving Safety Assurance 研究成果報告	SIP-adus Workshop 2021	2021.11.10
井上　秀雄	神奈川工科大学	仮想空間での自動走行評価環境整備手法の開発;DIVP®プロジェクト	第9回 自動運転機能安全カンファレンス 2021	2021.12.8
井上　秀雄	神奈川工科大学	仮想空間での自動走行評価環境整備手法の開発	CAEフォーラム2022 招待講演	2022.2.10
高木　俊一	神奈川工科大学	仮想空間での自動運転評価シミュレータの開発と実践教育への応用	神奈川工科大学 ITを活用した教育研究シンポジウム	2022.3.10

(2) 論文

発表者	所属	タイトル	発表誌名	ページ番号	発表年月
井上　秀雄	神奈川工科大学	自動運転車の安全性評価のためのシミュレーション技術 －DIVP®プロジェクト	学術の動向 2022年2月号, VOLUME 27, NUMBER 2,	p87-91	2022.2.1
Christian Schyr Hideo Inoue Yuji Nakaoka	AVL Deutschland GmbH Kanagawa Institute of Technology AVL Japan K.K.	Vehicle-in-the-Loop Testing - a Comparative Study for Efficient Validation of ADAS/AD Functions	ICCVE2022 Coference, IEEE, Technical Program: ADAS/AD System Development/Cybersecurity	-	2022.3.8

(3) 特許等

出願者	出願番号	国内・外国・PCT	出願日	状態	名称
ソニーセミコンダクタソリューションズ株式会社	2021－048977	JP:日本国	2021.3.23	出願継続中	情報処理方法、情報処理装置

7. その他特記事項（当該年度分についてのみ記載）

(1) 成果普及の努力（プレス発表等）

① デジタルコンテンツを活用した SIP-adus の情報発信

ウェブサイトからの情報発信を通じて SIP-adus に関する情報発信に努めた。

- 実証実験ページの定期更新

  2019 年 10 月に東京臨海部実証実験を開始して以来、実証実験の実施計画、走行計画等について、実証実験ページ（日本語）を 2021 年度も毎月更新。

- SIP café ウェブサイトとの相互リンク

  一般市民に向けた情報発信を強化すべく、SIP café ウェブサイトに SIP-adus ウェブサイトへのリンク及び Workshop 開催案内を掲載。SIP-adus ウェブサイトには、 SIP café ウェブサイトに掲載されているイベント等の案内を掲載。

- 重点テーマの情報発信

  イベントページ（英語サイト）で、国際連携の重点テーマのうち、5 テーマの情報発信ページを公開。Safety Assurance はその他テーマと比較し掲載されている情報量が多く、ページへのアクセス数についても最も多かった。

Table 132 テーマ別アクセス数（2021 年 5 月～2022 年 5 月）

テーマ	公開日	アクセス数
Safety Assurance	2021.7.30	**865**
Human Factors	2021.5.25	382
Dynamic Map	2021.3.25	353
Connected Vehicles	2021.7.13	313
Impact Assessment	2021.11.11	171

出所：（株）コングレ,SIP 第2期自動運転（システムとサービスの拡張）2021 年度成果報告書『自動運転の実現に向けた情報発信力の強化に係る調査』

② 各社プレスリリース等

種別	タイトル	事業者名	掲載日
ニュースリリース	日本ユニシス「SIP 自動運転 東京臨海部副都心地域を再現した シミュレーションモデルの使用体験」を運営	日本ユニシス株式会社	2021.8.16
ニュースリリース	日本ユニシス「SIP 自動運転 東京臨海部副都心地域を再現した シミュレーションモデルの実証実験（実践版）」を運営	日本ユニシス株式会社	2021.12.3

戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）第2期／自動運転（システムとサービスの拡張）
仮想空間での自動走行評価環境整備手法の開発
令和3年度　報告書

令和4年3月31日
委託先
学校法人幾徳学園　神奈川工科大学
三菱プレシジョン株式会社
日本ユニシス株式会社
日立 Astemo 株式会社
パイオニアスマートセンシングイノベーションズ株式会社
株式会社デンソー
株式会社 SOKEN
再委託先
ソニーセミコンダクタソリューションズ株式会社
学校法人トヨタ学園豊田工業大学
トヨタテクニカルディベロップメント株式会社
SOLIZE 株式会社
株式会社ユーシン
パイオニア株式会社