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

平成 30 年度　報告書

平成31年 3月 29日

学校法人幾徳学園　神奈川工科大学
学校法人立命館
株式会社 OTSL
三菱プレシジョン株式会社
SOLIZE Engineering 株式会社
日立オートモティブシステムズ株式会社
株式会社デンソー
株式会社 SOKEN
パイオニア株式会社
日本ユニシス株式会社

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）の委託業務として、学校法人幾徳学園　神奈川工科大学、学校法人立命館、株式会社 OTSL、三菱プレシジョン株式会社、SOLIZE Engineering 株式会社、日立オートモティブシステムズ株式会社、株式会社デンソー、株式会社 SOKEN、パイオニア株式会社、日本ユニシス株式会社が実施した「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）仮想空間での自動走行評価環境整備手法の開発」の平成 30 年度成果を取りまとめたものです。従って、本報告書の著作権は、NEDO に帰属しており、本報告書の全部又は一部の無断複製等の行為は、法律で認められたときを除き、著作権の侵害にあたるので、これらの利用行為を行うときは、NEDO の承認手続きが必要です。

目　次

1. 事業の目的 1

2. 事業の位置付け 1

3. 事業内容 2

4. 事業計画 3

4. 1 平成 30 年度の成果 4

4. 2 次年度以降の目標 4

5. 各パートごとの成果 5

5. 1 「A.走行環境モデルの構築」のための研究開発 5

5. 1. 1 「A1. 走行環境モデル定義」（株式会社 SOKEN） 5

(1) 平成 30 年度の成果と次年度以降の計画（まとめ） 6

(2) 平成 30 年度の成果 7

① 物体要件定義 7

② 実データ収集 9

5. 1. 2 「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) 11

(1) 平成 30 年度の成果と次年度以降の計画（まとめ） 15

(2) 平成 30 年度の成果 16

① 各パートとの各種 I/F 調整 16

② 標準化フォーマットの認識関連の継続調査 17

③ 実行環境の調査 18

④ 試験用環境モデル検討と検証環境の整備 19

⑤ SDM ジェネレータ（プロトタイプ）の製作 20

(3) 次年度以降の計画 21

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」のうち、センサ不調に関するテストスクリプトを生成環境の構築（SOLIZE Engineering 株式会社(三菱プレシジョン株式会社より再委託)） 24

(1) 平成 30 年度の成果と次年度以降の計画（まとめ） 25

(2) 平成 30 年度の成果 26

① センサ不調シナリオの要求分析 26

② センサ不調の記述方法の検討 26

(3) 次年度以降の計画 27

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 28

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） 29

(1) 平成 30 年度の成果と次年度以降の計画（まとめ） 30

(2) 平成 30 年度の成果 30

① プロジェクトマネジメント 30

② 既存シミュレーション PF のベンチマーク評価 31

③ シミュレーション PF 評価 32
(3) 次年度以降の計画 33
5. 2. 2「B1. カメラ モデル構築」（日立オートモティブシステムズ株式会社） 34
(1) 平成 30 年度の成果と次年度以降の計画（まとめ） 36
(2) 平成 30 年度の成果 37
① 基本設計の検討 37
② カメラ出力インターフェースの検討 42
③ 物理モデル事前評価 45
④ 高精細 CG 要件定義書の作成 48
(3) 次年度以降の計画 54
5. 2. 3「B2. ミリ波レーダモデル構築」（株式会社デンソー） 57
(1) 平成 30 年度の成果と次年度以降の計画（まとめ） 60
(2) 平成 30 年度の成果 61
① 機能・物理モデルの要件定義 61
② 今回モデル化するセンサの仕様作成 62
③ リファレンスセンサの設計・製作 64
④ 一般的不調要因選定および組込対応 65
(3) 次年度以降の計画 67
5. 2. 4「B3. LiDAR モデル構築」（パイオニア株式会社） 68
(1) 平成 30 年度の成果と次年度以降の計画（まとめ） 72
(2) 平成 30 年度の成果 73
① LiDAR モデル要件定義 73
② LiDAR モデルに関連する走行環境モデルデータ定義 79
③ 各モデル間 I/F の定義 84
(3) 次年度以降の計画 93
5. 2. 5「B4. センサモデル構築のためのデータ取得」（株式会社 SOKEN） 95
(1) 平成 30 年度の成果と次年度以降の計画（まとめ） 97
(2) 次年度以降の計画 97
5. 3「C.自動運転モデルの構築」のための研究開発 99
5. 3. 1「C1.基本走行モデル構築」のための研究開発（学校法人立命館） 99
(1) 平成 30 年度の成果と次年度以降の計画（まとめ） 101
(2) 平成 30 年度の成果 102
① 既存技術の検証と機能構造の明確化 102
② SLAM に関する機能や I/F の定義 103
(3) 次年度以降の計画 104
5. 3. 2「C2. リスク予測モデルのインテグレーション」（学校法人幾徳学園神奈川工科大学） 105
(1) 平成 30 年度の成果と次年度以降の計画（まとめ） 106
(2) 次年度以降の計画 106

5. 4 「D.自動運転張り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.....108
5. 4. 1 「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）.....108
(1) 平成 30 年度の成果と次年度以降の計画（まとめ）.....110
(2) 平成 30 年度の成果.....112
① 既存シミュレーション PF の調査.....112
② 機能モデルクローズドループ PF の開発.....114
(3) 次年度以降の計画.....119
(4) 空間モデルの処理内容.....120

1. 事業の目的

本研究では、自動運転システムの安全性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構築を行い、これにより仮想空間での自動運転システムの安全性評価の可能性向上を目指す。

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、センサー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。

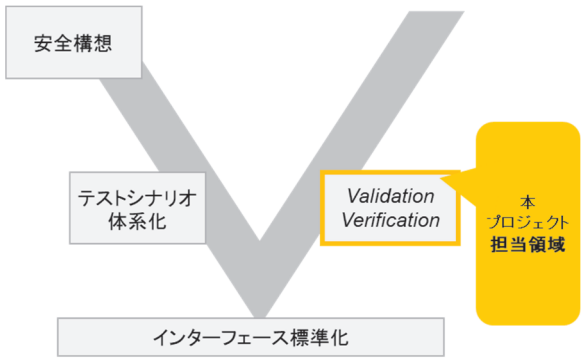


Figure 1 周辺事業との分担

	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。

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できない、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、自動車産業やツールベンダの開発力向上への貢献を目指す。

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」、これらをプラットフォームとして受け止める「評価プラットフォーム」と、4つの研究テーマを設定し、それぞれのエキスパートが参加す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。

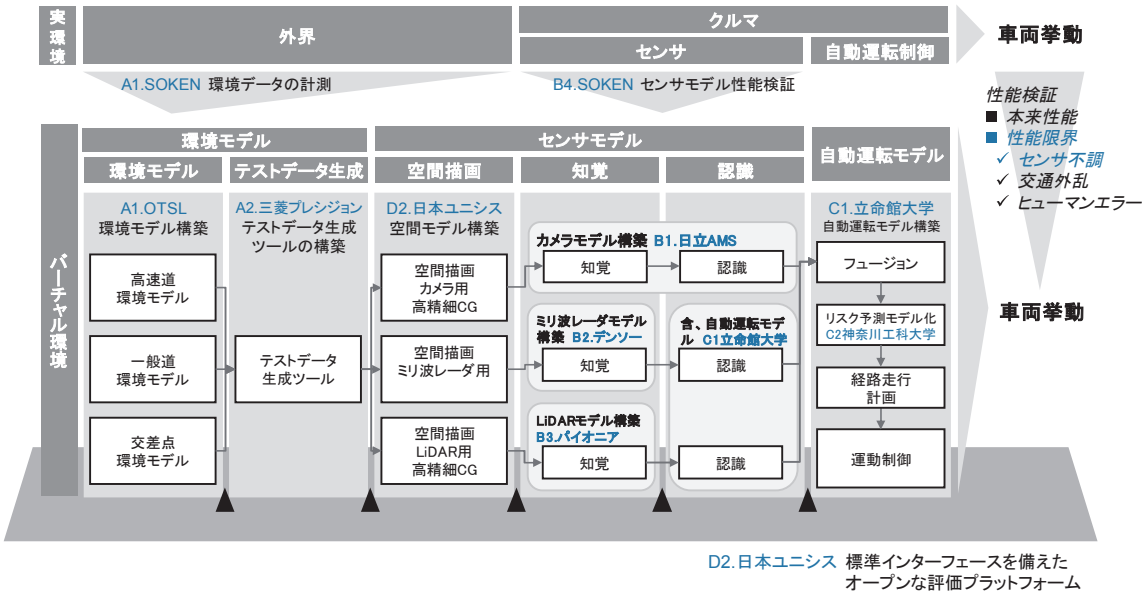


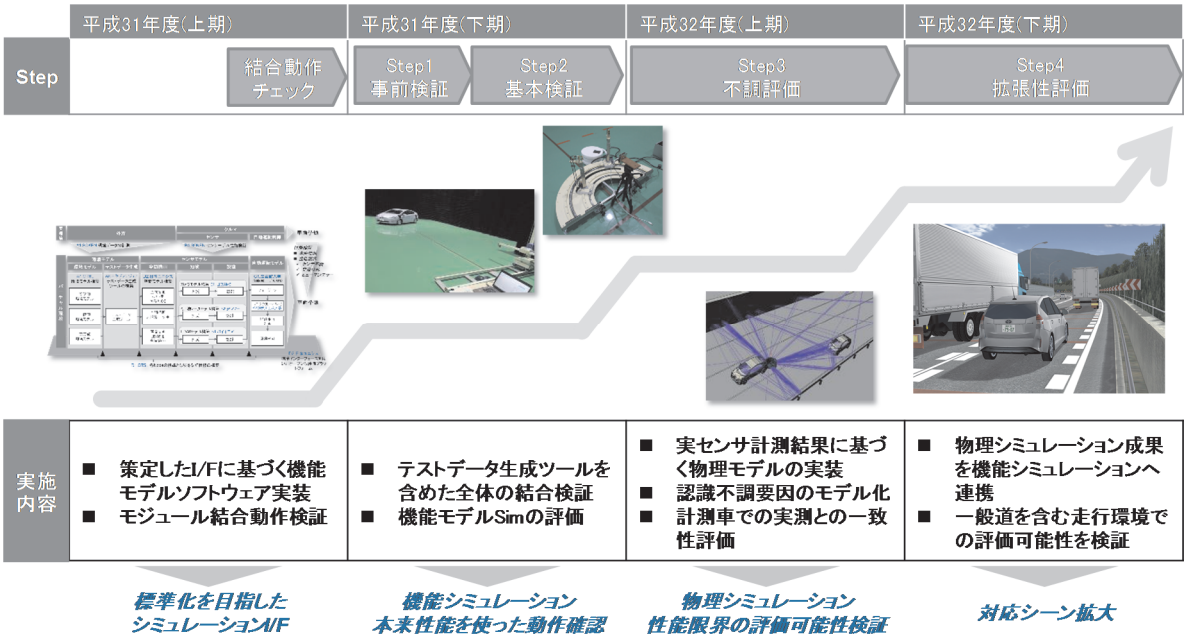
Figure 3 評価プラットフォーム構築のための研究開発課題設計

4. 事業計画

本事業は 4 段階での評価環境構築を目指す。

尚、平成 30 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　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　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　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　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 4 プロジェクト全期間の研究開発計画

4. 1　平成 30 年度の成果

研究初年度となる平成 30 年度には、以下 Figure 5 に示す三つの主要な成果が得られた。

- バーチャル評価プラットフォーム
- 各モデルの要件・インターフェースの定義
- 実環境測定系の構築

これらは、一連のシミュレーションプラットフォームを構築していくにあたっての枠組みとなるものである。

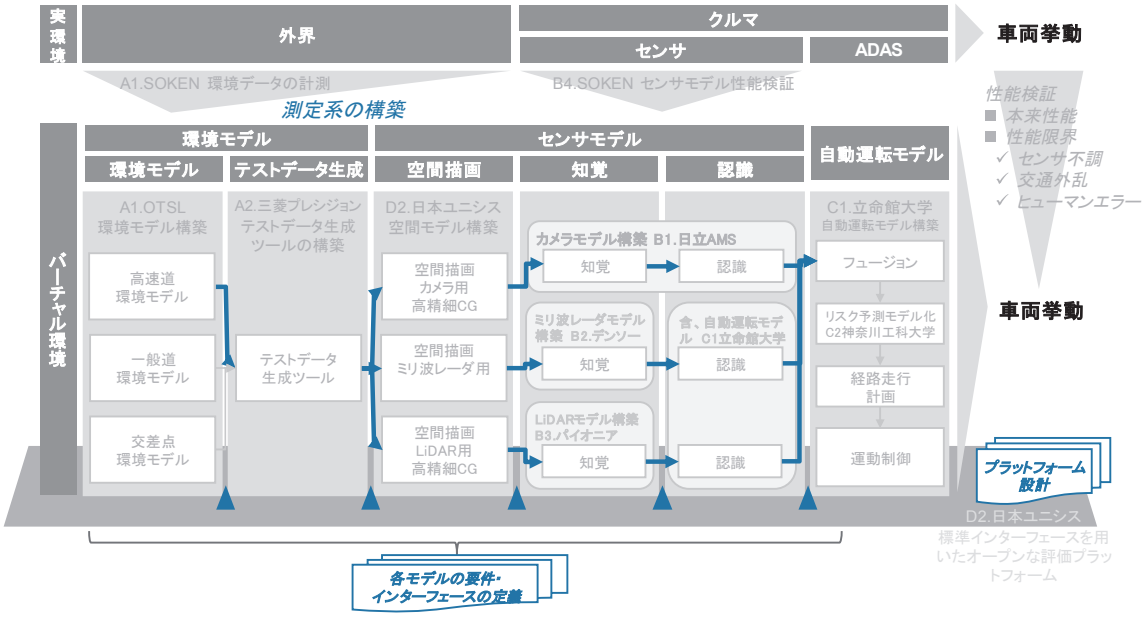


Figure 5　平成 30 年度の成果

4. 2　次年度以降の目標

平成 30 年度に得られた枠組みに基づき、各モデルの構築を行い、機能シミュレーションとしての結合・動作確認、検証を行う。

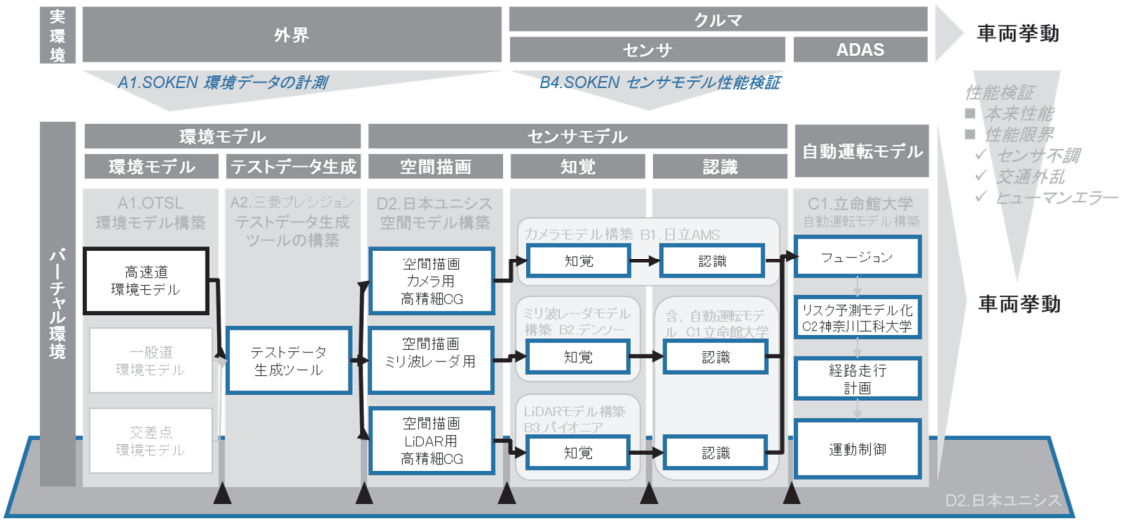


Figure 6　次年度成果の見込み

5. 各パートごとの成果

5. 1 「A.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。

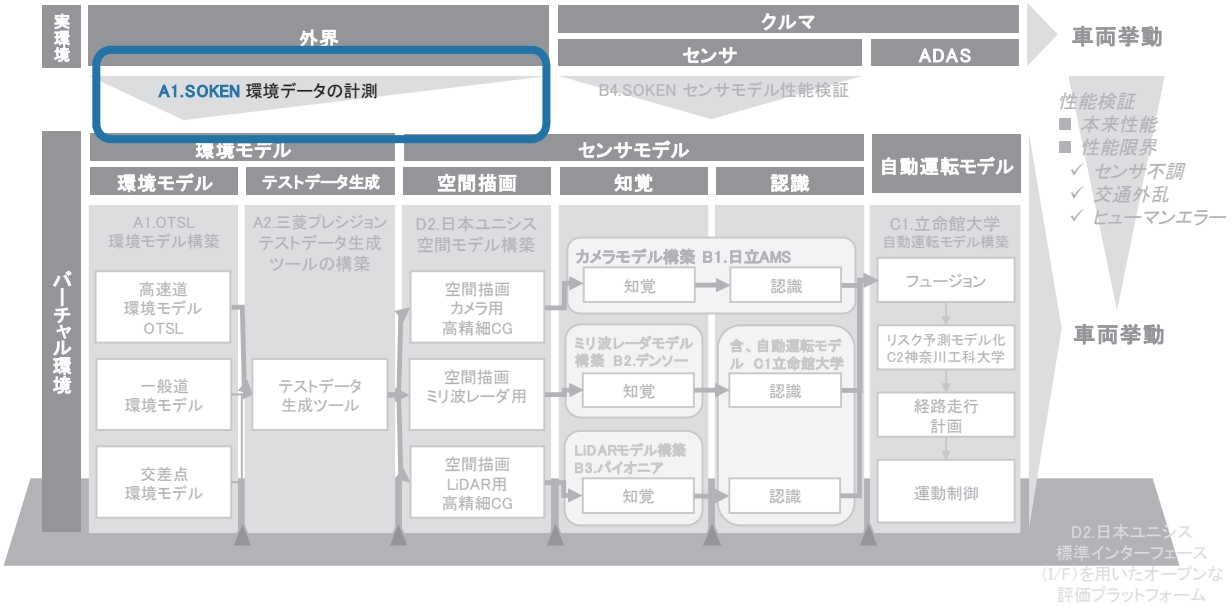


Figure 7　A1 研究の位置付け

■ 事業目的

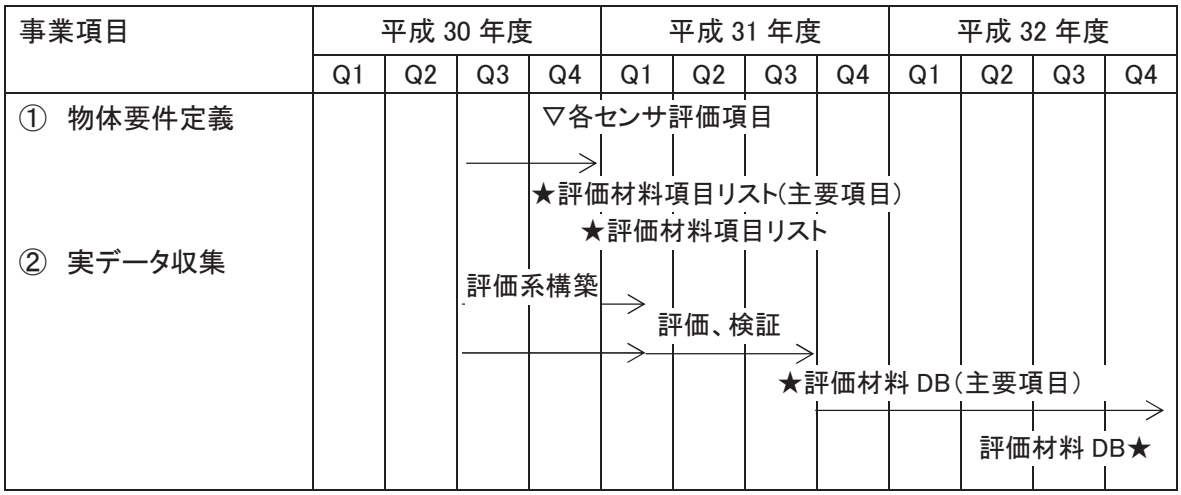
仮想環境でセンサによる知覚・認識をシミュレートし自動運転システムの安全性を評価するために、センサ物理シミュレーション評価用の物体データベースを構築し、センサシミュレーション精度を向上することを目的とする。

■ 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



(1) 平成 30 年度の成果と次年度以降の計画(まとめ)

各センサメーカと協議の上、高速道における認識対象物をリストアップし、評価材料項目リストとしてまとめた。また、センサ物理モデルのシミュレーション精度向上に必要となる計測項目を立案した。

- 双方向反射率分布関数、BRDF: Bidirectional Reflectance Distribution Function
- 双方向透過率分布関数、BTDF: Bidirectional Transmittance Distribution Function

上記計測項目をセンサシミュレーションに反映することで、センサ認識対象物の表面粗さによる反射強度の変化を再現することができるため、材質や色の違いによるセンサの認識性能への影響を再現可能となる。また、マルチパスや環境光といったセンサ不調要因をシミュレーションで扱えるようになる。

次年度は、計測系の構築を完了し、各センサ波長における反射特性の実データを収集する。また、一般道評価に向けた認識対象物のリストアップを行う。

(2) 平成 30 年度の成果

①物体要件定義

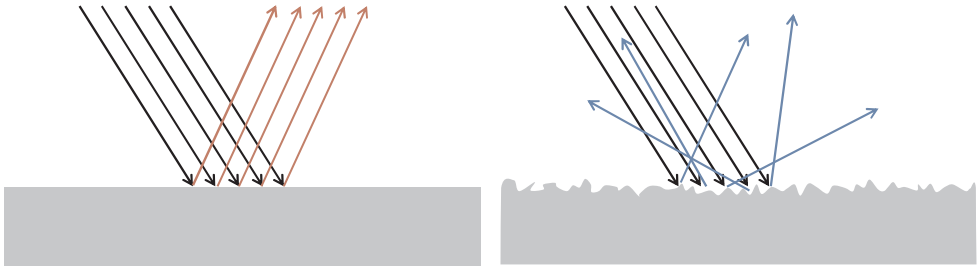
内容：センサ評価シーン（高速道/一般道等）に必要な物標及び、センサ認識不調となりうる条件（路面での拡散反射等）を考慮し、各センサメーカと協議の上、高速道における認識対象物をリストアップし、評価材料項目リストとしてまとめた。ミリ波レーダ及び LiDAR における対象物選定理由は、「B2. ミリ波レーダリファレンスモデル構築」及び「B3. LiDAR リファレンスモデル構築」にそれぞれ記載する。

Table 1 評価材料項目リスト

区分	認識対象物	備考	Lidar	Radar
路面	アスファルト		○	○
	アスファルト（赤色）		○	
	コンクリート		○	○
	白線		○	
	黄色線		○	
路側物	側壁		○	○
	ガードレール	再帰反射材面　有/無	○	○
	ロードポール		○	
	縁石		○	
	ボッツドッツ		○	
	デリニエーター		○	
	ガードワイヤー		○	
	標識			○
車両部品	ガラス		○	○
	バンパ		○	○
	タイヤ・ホイール		○	○
	ミラー		○	
	リフレクター		○	
	リア/フロントランプ		○	
	ナンバープレート		○	
	塗装	ホワイトパール、シルバー、ブルー レッド、ブラック	○	
移動体	乗用車		○	○
	オートバイ		○	○
	トラック		○	
	ダンプカー		○	
	トレーラー		○	
	車両運搬車両		○	
	タンクローリー		○	
	バス		○	

センサ（カメラ/LiDAR/ミリ波レーダ）で使用される各波長の反射、拡散、屈折、回折等の振る舞いを厳密にシミュレーションしようとする場合、マクスウェル方程式から導き出した波動方程式を解く必要がある。しかし、現存の計算機では数百波長の範囲を計算するのが限界である。一方、センサは波長の数万倍以上の検知範囲を備えており、センサの検知範囲を全て厳密解析することは現実上不可能である。このような波長に対して大規模なモデルをシミュレーションする場合、空間での波の位相干渉は生じないものとする幾何光学近似が使用される。幾何光学の一手法として、各方向に照射した光線の経路を追跡し、反射・屈折・透過の効果をフレネルの式に基いて計算を行った後、光線の振幅を足し合わせるレイトレーシング（光線追跡）法が、計算時間・精度の観点から一般的に良く使われている。本研究においても、レイトレーシング法を有力なシミュレーション手法として検討していく。

レイトレーシング法の精度を向上しようとする場合、前記反射・屈折・透過の特性を精度良くモデル化する必要がある。従来のフレネルの式は材料の屈折率（誘電率と透磁率比）は材料表面を理想鏡面として取り扱っている。そのため、材料表面が波長に対して荒い場合に様々な角度に反射・透過する現象を表現できていない。そこで、材料表面での入射波の角度に対する角度毎の反射・透過を実測し、シミュレーションモデルに反映することで、材料の表面粗さを表現し、センサシミュレーションの解析精度を向上する事とした。



(a)理想鏡面の場合　　(b)波長に対して表面が荒い場合

Figure 8 材料表面での反射現象

以上より、センサ物理シミュレーションの精度向上に必要となる計測項目を、Figure9 に示す双方向反射率分布関数（BRDF）、双方向透過率分布関数(BTDF)に決定した。

各反射特性がセンサ性能へ与える影響を下記する。

- 再帰反射

  ミリ波レーダ/LiDAR 共に、センサから送信波を送信し、物標で反射した電磁波を受信することで物標との距離を検出する。再帰反射は最も短い経路でセンサが受信することになるため、最も信号強度が強くなる可能性が高く、重要な測定項目となる。
- 鏡面反射

  直接にはセンサへ戻ってこない反射波である。ある物標で鏡面反射した波が、別の物標で反射することでセンサに到達するマルチパス現象を再現するために必要となる。
- 拡散反射

  波長に対して表面粗さが大きい物標において発生する。

  ミリ波レーダではアスファルトのような凹凸の大きい表面で発生し、路面推定等で不調要因となり得る。また、LiDAR では太陽光に代表される背景光量の再現に必要となる。
- 拡散透過

  赤外光/ミリ波レーダを透過する特性を持つ材料の場合、入射した波が屈折及び材料に吸収されて材料を透過していく。ガラス、バンパ（ミリ波のみ）等を再現するのに必要となる。

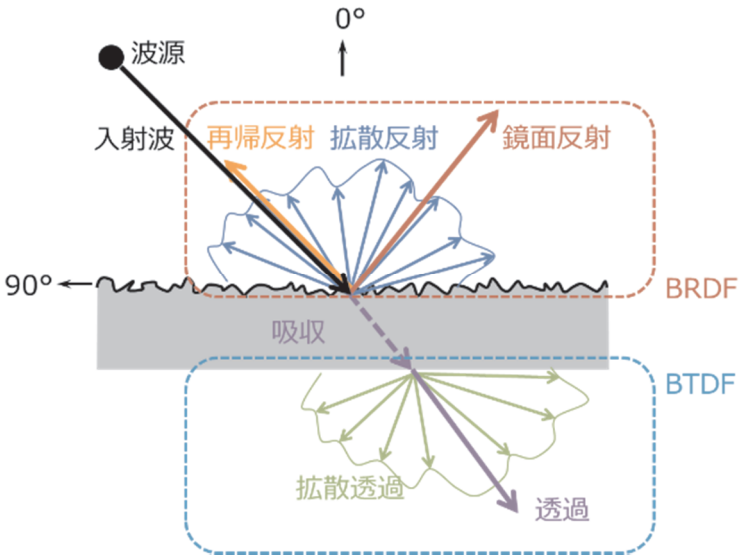


Figure9 シミュレーション精度向上に必要な特性

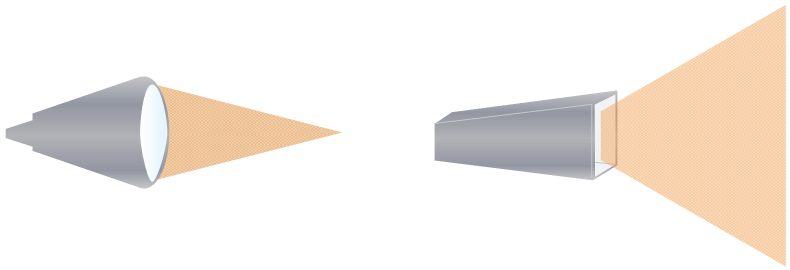
期間：2018 年 12 月から 2019 年 3 月

アウトプット：評価材料、項目リスト

②実データ収集

内容： ①で定義した評価項目を計測するための、測定条件を決定し、測定系の設計を行った。

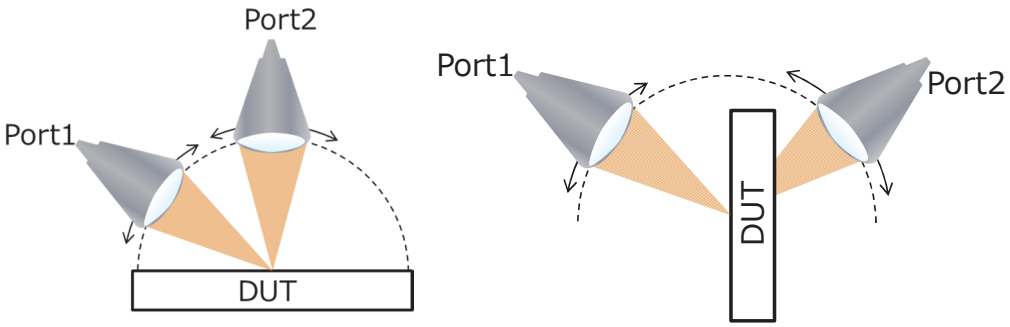
レーダ用のミリ波測定では、2ポートベクトルシグナルアナライザを用い、S パラメータの周波数特性を測定することとした。アンテナは送信/受信を兼用できるため、1ポートでの入射波/反射波比（S11）から再帰反射、1 ポートから入射して 2 ポートで受信する S21 で拡散反射及び拡散透過特性を測定する。ホーンアンテナ等の一般的なアンテナでは電波が拡散して伝搬し、被試験体（DUT:Device Under Test）へ電波が照射される面積が大きくなるため、被試験体の寸法を大きくする必要がある。また、照射された電波が平面波となる目安として、約 600mm の距離が必要となる。そこで、アンテナにはレンズアンテナを採用し、焦点距離を 280mm、焦点直径を約 3 波長(約 11mm)にすることで、測定系（アンテナ間距離と被試験体のサイズ）の小型化を図っている。



（a） レンズアンテナ　　（b） ホーンアンテナ

Figure 10 アンテナからの電波放射イメージ

また、レンズアンテナはサイドローブレベルが低いため、拡散反射測定時に 2 つのアンテナが隣接しても、アンテナ間同士の結合が少なく、精度良く反射測定が可能となるようにしている。



（a） 反射の測定系　　（b） 透過の測定系

Figure11 ミリ波の測定系イメージ

〈ミリ波レーダ測定条件〉

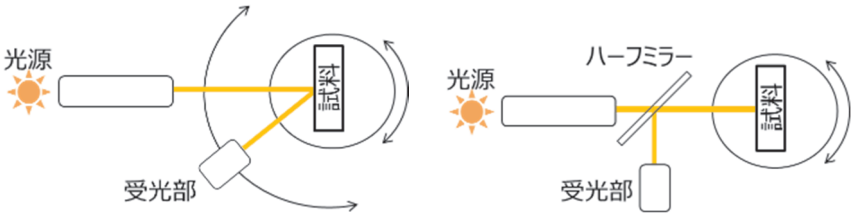
測定周波数 ： 76-81GHz 0.1GHz Step

測定角度 ： 送信アンテナ 0 度～60 度 5 度分解能

受信アンテナ 0 度～±60 度 5 度分解能

アンテナ間角度＞30 度

LiDAR 用の赤外光測定では、ミリ波と異なり送信と受信で別デバイスが必要となる。同一軸上に送信用の光源と受信用の受光部を配置した場合、光源が受光部（又は受光部が光源）の影になり再帰反射の測定ができない。そこで、ハーフミラー、スプリッタ等のデバイスで光の向きを変えて再帰反射を測定することとした。拡散反射/透過は受光部及び試料を回転させ測定角度を設定することで対応する。尚、標準白色板を基準値として測定し、試料の反射特性は標準白色板に対する相対値として評価する。



（a） 再帰反射の測定系　　(b)拡散反射/透過の測定系

Figure12 ミリ波の測定系イメージ

〈LiDAR 測定条件〉

測定波長 ： 905nm

測定角度 ： 光源 0 度～90 度 1 度分解能（暫定）*

受光 0 度～±180 度 1 度分解能（暫定）*

光源/受光間角度 ：TBD

*測定角度分解能は、線形補間が優位となる分解能を検証し、今後センサメーカと協議の上、決定する。

5. 1. 2 「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)

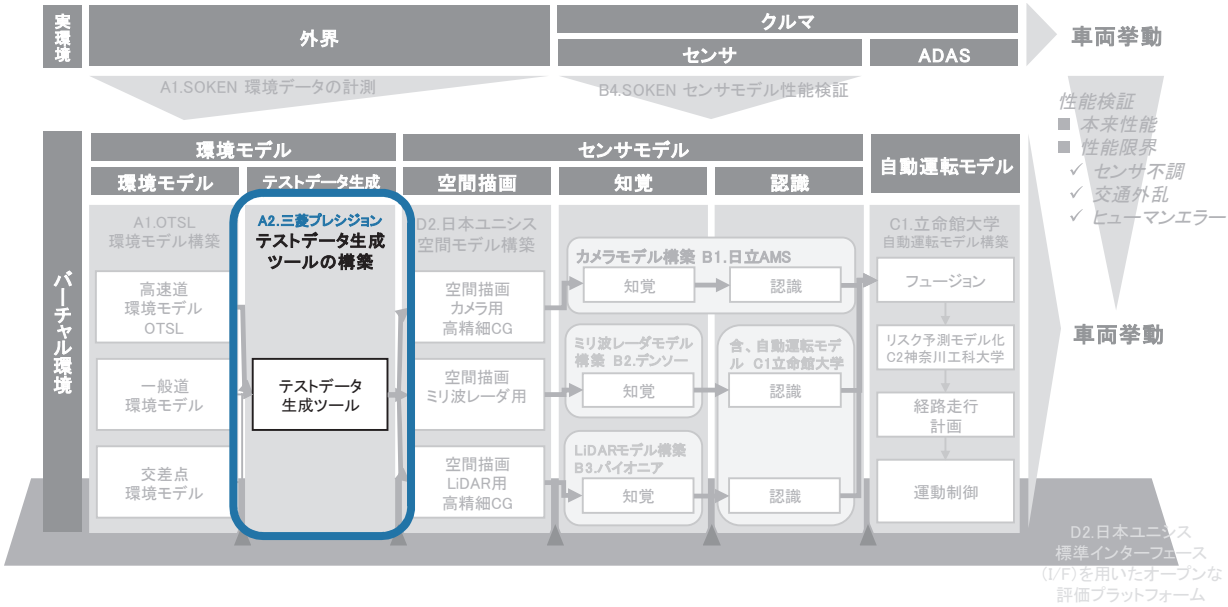


Figure 13　A2 研究の位置付け

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 14 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。

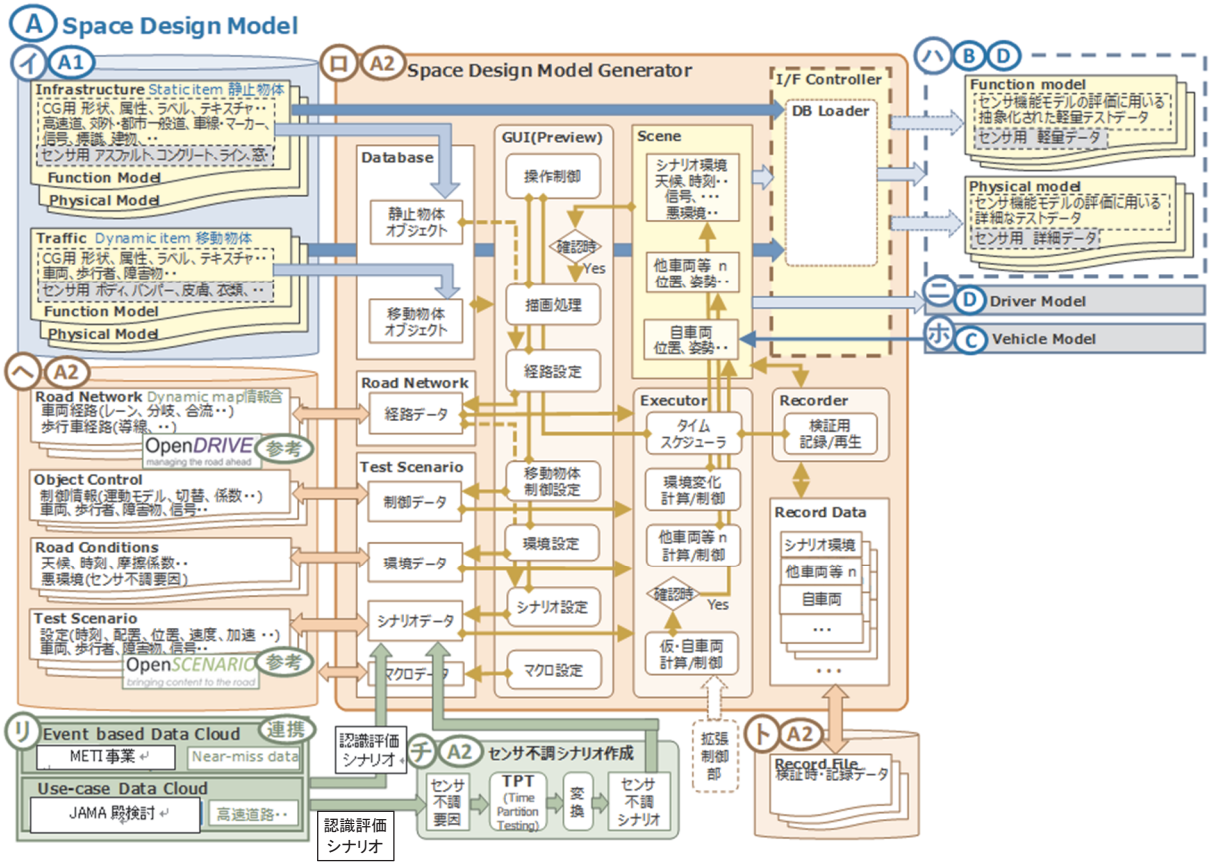


Figure 14 Space Design Model の想定ブロック図

① 標準 I/F の策定

後工程である B.、C、D パートと連携し、センサモデル評価に必要なデータを明確にし、標準の I/F を策定する。

② ツールの構築

B パート、C パート、D パートにおいて、センサ単体の評価と車両レベルでの評価が連動して行える、もしくはテスト結果を統合して評価できるよう、テストシナリオやテストデータを関連付けられるようにツールの構築を図る。

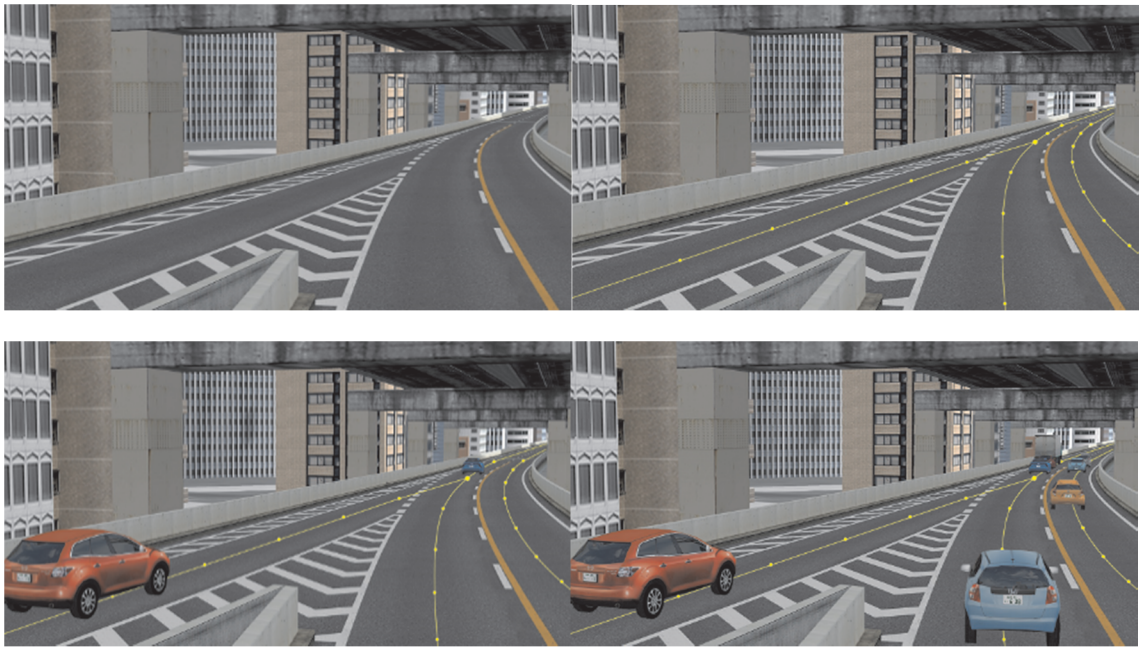


Figure 15 経路設定とシナリオ作製のイメージ

③ 安全性評価のためのテストデータ

METI 事業で検討された自動運転における安全性評価のためのテストシナリオ検討と連携を図り、仮想空間での安全性評価として有効なテストデータを作製する。

■ 実施計画

事業項目	平成30年度				平成31年度												平成32年度												工数 (h)	外注費 (￥K)
	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		
① 各パートとの各種I/F調整		26	26	26	44	44	44	44	34	44	44	44	44	46	49	49	49	49	49	49	49	49	49	49	49	49	50		1148	
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に関する調査		52	52	52	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5				261	
㋺ 海外渡航調査（ドイツASAM・・等）		64									64												64						192	
③ 実行環境の調査		30	15	15																									60	
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		5	5	5	5	5	5																						30	5000
㋺ 実行検証環境の整備			10	10																									20	
⑤ SDMジェネレータ（プロト）の製作																														
㋑ 要求分析		50	55	59																									164	
㋺ 設計					85	85	85																						255	
㋩ 単体試験用モデル作成					50	50	50	110	110	110																			480	14700
㋥ コーディング、デバッグ、試験								30	60	60	110	110	110																480	
⑥ SDMジェネレータ（プロト）の実行確認														180	180	170													530	
⑦ SDMジェネレータ（改善版）の製作																														
㋑ 要求分析																	85	85											170	
㋺ 設計																			90	90	90								270	
㋩ 単体試験用モデル作成																			105	160	160	160							585	14700
㋥ コーディング、デバッグ、試験																						180	180	180					540	
⑧ SDMジェネレータ（改善版）の実行確認																									220	220	260		700	
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						80	80	84																					244	8827
㋺ 地形モデル（アセット）作成							70	70	70	22																			232	16156
㋩ 道路ネットワーク（OpenDRIVE）設定											160	160																	320	
㋥ 認識不調シナリオ設定													50	25															75	4200
	0	557			797			863			936			689			527			1002			806			579				63583
計画工数		557												3285												2914			6756	

(1) 平成 30 年度の成果と次年度以降の計画(まとめ)

前ページの実施計画のスケジュール表に示した大項目①～⑨のうち、平成 30 年度のスケジュールに、その一部、もしくは、全部が組み込まれているのは、

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
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
⑤ SDM ジェネレータ(プロト)の製作

であるが、④以外の項目については、予定通りに実施することができた。

その④については、

㋑ 試験用環境モデル検討(部分的実装確認含む)
㋺ 実行検証環境の整備

の小項目があり、㋺については予定通り実施できたが、㋑については、実施の開始時期の遅れと、来期の他パートを含む全体計画を確認協議する中でマイルストーンとして明らかになった I/F 出力への対応時期(5月末)の影響で、再検討が必要となり、外注費を含め後ろへ実施がずれることとなった。

このマイルストーンとして明らかになった I/F 出力への対応は、次年度以降の計画にも影響があり、

⑤ SDM ジェネレータ(プロト)の製作
　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
⑥ SDM ジェネレータ(プロトタイプ)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)作成　㋥ 認識不調シナリオ設定

については、その計画を変更することが必要となった。

(2) 平成 30 年度の成果

①各パートとの各種 I/F 調整

A1 パート、B パート、C パート、D パートとの外部 I/F、A2 パートの内部 I/F、テストデータの内容と流れなどを確立するための調整作業を行う。

平成 30 年度の成果として、各パートとの各種 I/F 調整を実施した。

㋑ モデル関連の I/F （対 A1 パート、B パート、C パート、D パート）

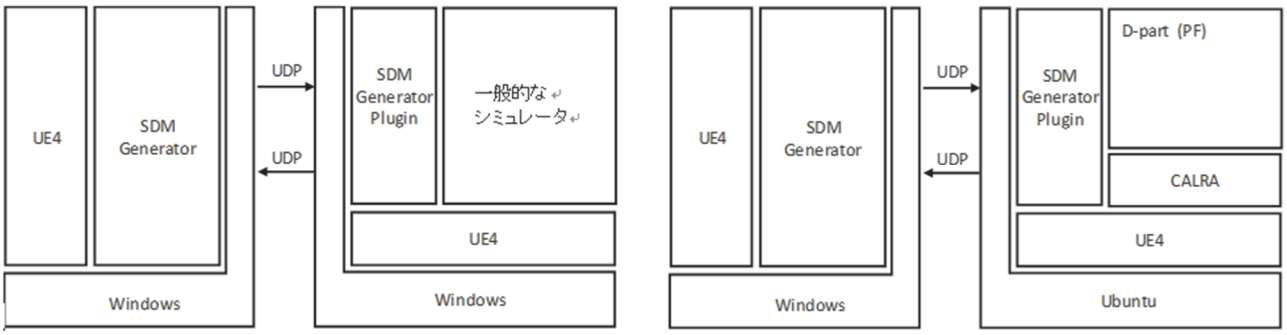
・モデル（アセット）の基本は、fbx ファイルとなり、モデル（サーフェース）のマテリアルは参照形式をとり、情報は CSV の形式などで参照されることとなる。

・マップとしては、fbx→umap の変換済みのものを後段に送る形態となる。

・C パートなどで、道路ネットワークを必要とする場合は、OpenDRIVE フォーマットの情報を出力する。

㋺ 通信関連の I/F （対 C パート、D パート）

・D パート、C パートとの情報の基本は、UDP によるパケット通信であるが、実際には、各パートとの通信は、UE4 ベースの SDM Generator プラグインモジュールの API を通じて実行される。



一般的なシミュレータとの接続　　DIVP の接続（対 PF）

Figure 16　A パートと D パートとの I/F の基本

・SDM ジェネレータの プラグインモジュールの API からは、初期化情報、シナリオにおける環境情報を送信後、時間毎の動的オブジェクト（自車両、他車両、人物等）の位置と姿勢等を送信し、自車両に関する情報については、D パート（もしくは C パート）からのフィードバック情報を受信する

・レコードプレイバック機能については、全体評価の観点から、A2 パート内の記録データに加えて、各パートからの記録データの取り込みについても検討していく。

※注意点：座標系（UE4 は左手系で cm 単位、科学技術計算は右手系で m 単位）の変換を行う

Table 2 インターフェースの定義

I/F 名称	内容	形式	詳細	関連するパート	
				入力側	出力側
モデル関連	モデル （アセット）	umap	fbx を umap 形式に変換したものを使用する。 マテリアルは参照形式とする。	A1-A2 間	A2-D 間
	マテリアル	csv	マテリアル情報は別途 CSV ファイルとして用意する。	A1-A2 間	A2-B 間 A2-D 間
	道路 ネットワーク	OpenDRIVE	C パートなどで道路ネットワークを必要とする場合は、OpenDRIVE フォーマットの情報を出力する。	-	A2-C 間
通信 I/F	通信	UDP	D パート、C パートとの情報の基本は、UDP によるパケット通信であるが、実際には、各パートとの通信は、UE4 ベースの SDM Generator プラグインモジュールの API を通じて実行する。	-	A2-C 間 A2-D 間

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、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

2 月 15 日、OpenDRIVE、OpenSCENARIO 等を管理する ASAM の日本事務局である ASAM Japan の会議に出席した。 今後、以下に示す 3 つに加えて OpenSCENARIO Concept Project が開始される。 今後、日本としてどの様にこれらのプロジェクトに参加していくかについて調査した。

(1)OpenDRIVE Transfer Project（2019 年 4 月～2019 年 9 月）

(2)OpenDRIVE Concept Project（2019 年 4 月～2020 年 8 月）

(3)OpenSCENARIO Transfer Project（2019 年 4 月～2019 年 12 月）

当社を含めた各社は、現行バージョンのマニュアル作成の意味合いの強い各 Transfer Project への参加は見送り、次バージョン制定に関わる Concept Project へ参加し、動向を探ることとした。

㋺ 海外渡航調査（ドイツの ASAM のカンファレンス等）

1 月 15 日から 4 日間、ドイツの ASAM で OpenX の Workshop に参加し、認識に関するテストシナリオの標準化について調査した。

参加各社の状況として、OpenDRIVE を採用している会社は多いが、OpenSCENARIO は未完成との認識で採用の会社はない。

現時点では、 OpenDRIVE 、OpenCRG、OpenSCENARIO に、自動運転の認識に関する機能は定まっていない。ただし、機能をフォーマットに盛り込む必要性の認識は各社にはある。

OpenDRIVE で、センサシミュレーションによる知覚、認識処理で重要な材料特性については、他規格の定義を参照する方向としてはどうか、という意見が出ている。

OpenSCENARIO で、認識に関しては、カメラの取り付け位置などの情報付加について言及があったが、細かなパラメータの定義についての議論はない。従って、現時点では、カメラ情報やその他のセンサ情報について、別途 DIVP で取り決める必要がある。

OpenSCENARIO で、可視光やセンサへ影響を及ぼす降水量、霧、風、照明、その他の環境条件を追加する動きがあり、今後、認識不調シナリオに適用の可能性はあるが、現時点では、別途 DIVP で取り決める必要がある。

DIVP で実施するプログラミングのタイミングで、認識を含めた OpenSCENARIO のフォーマット策定は間に合わないことが判明した。

これらのことから OpenSCENARIO については今後の動向がはっきりしていないため、現地で実際にシミュレーションに携わる人間に接触し最新情報を入手する必要があることがわかった。かつ、DIVP としてオリジナルのフォーマットで作成せざるをえない。

オリジナルのフォーマットに関しては、OpenSCENARIO の動向を見据えながら、シナリオ実行の実現を進める。

弊社として、情報収集のために、独自に ASAM へ入会した。OpenSCENARIO 及び OpenDRIVE の次バージョン策定のプロジェクトに参加し、情報を入手しつつ、日本側の要望を伝えていく。

③実行環境の調査

SDM ジェネレータの実行環境として、D パートの PF の実行が検討されている、UE4、CARLA などについて調査する。

㋑ UE4 の調査

SDM ジェネレータと UE4 における外部 I/F と UE4 における UI について調査する。

UE4 における一般的な外部 I/F の方式について調査した。大きく分けて 3 通りの方式がある。

Unreal C++ /ライブラリ	UE アプリケーションの動作手続きを記述することができる言語であり、標準的な C++とは異なる手続きが必要となる。Unreal C++（以下 UE C++）は、UE アプリケーション上に実装する必要がある。この UE C++、もしくは UE C++から外部のモジュールを呼び出すことで外部 I/F を実現可能である。
Blueprint	UE アプリケーションの動作手続きを記述することができるビジュアルプログラミング言語である。このビジュアルプログラミング言語、もしくはビジュアルプログラミング言語から UE C++の関数をコールすることで外部 I/F を実現可能である。
UE プラグイン	UE プラグインはモジュールを読み込み UE4 の機能を拡張する仕組みである。プログラムおよびリソースをまとめることが可能である。アプリケーションへの依存性が低く、再利用性が高い。

Blueprint や UE C++/ライブラリを用いる方法では、D パートのソースコード内に実装する必要があり、機能の独立性やプログラム保守性が低くなることが判明した。従って、独立性が高く、再利用可能な UE プラグインによる外部 I/F について調査を継続する。

また、UE4 におけるフロントエンドメニューの実装方法について調査を行った。UE4 上で、基本的な HUD やメニューを実現する方法として、Unreal Motion Graphics UI （以下、UMG）がある。UMG は、ビジュアル UI オーサリングツールであり、インゲーム中の HUD、メニューやその他のインターフェース(ボタン、チェックボックス、スライダーやプログレスバーなど)が作成可能であり調査を継続する。

㈁ CARLA の調査

D パートのベースとなる CARLA の調査を行うため実行環境を整備した。当初、OS は Windows10 上に実行環境を構築することを想定しインストールを試行したが、必要なソフトウェアのインストールや設定は行えるが、CARLA をビルドする際にエラーが発生し、実行環境の構築が完了できなかった。そこで OS を Ubuntu に変更して、再度、CARLA をインストールした。Ubuntu 上では、正常に CARLA のコンパイルが完了したので、動作確認を行っている。CARLA は、CARLA シミュレータと CARLA Python API モジュールの 2 つのモジュールから構成される。CARLA シミュレータは、シーン内のアクターやセンサのロジック、物理学、およびレンダリングを制御を行うモジュールである。そして、CARLA Python API モジュールを活用し、CARLA シミュレータの制御やデータを取得する。この CARLA シミュレータと CARLA Python API モジュール間の I/F は、ネットワーク通信にて行われるため、SDM ジェネレータと UE4 における外部 I/F の参考とする。

④試験用環境モデル検討と検証環境の整備

㈠ 試験用環境モデル検討（部分的実装確認含む）

各センサモデルの評価に使用する基本モデルによるシーン、およびシナリオデータの要求仕様、および実現方法を検討中である。

㈁ 実行検証環境の整備

MSC 社の Virtual Test Drive（以下、VTD)の購入手続きを行った。VTD は、OpenDRIVE、および OpenSCENARIO ファイル形式の開発元の製品であるため、同ファイルの実行検証環境として整備する。

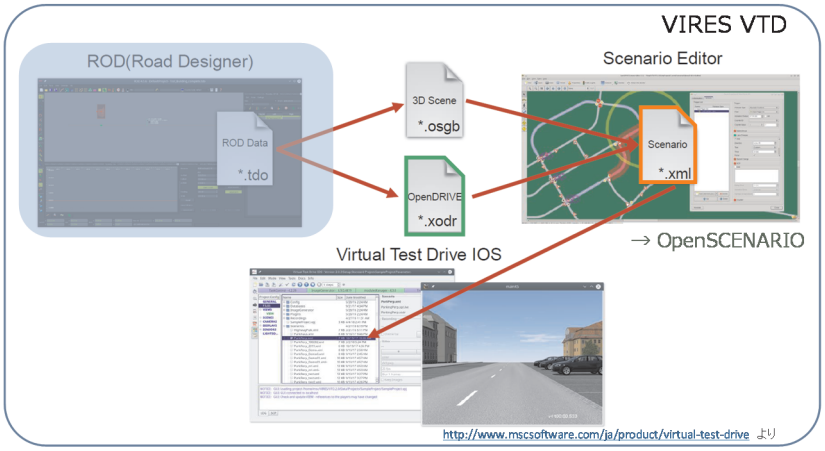


Figure 17 VTD 実行環境整備図

⑤SDM ジェネレータ（プロトタイプ）の製作

㋑ 要求分析

DIVPの全体的な方針を確認するとともに、SpaceDesignModelを構成するA1パート、各種センサのモデルを構成するBパート、プラットフォームを構成するDパートからのA2パートへのSDMジェネレータのシステムレベルの要求をまとめる。SDMジェネレータを構築する上で考慮すべき項目を抽出し要求分析としてまとめる。ただし、Bパートの各センサモデルからの要求仕様が現時点では未定であるため、内部要求仕様から作成を進める。

(3) 次年度以降の計画

① 各パートとの各種 I/F 調整(継続実施)

A1 パート、B パート、C パート、D パートとの外部 I/F、A2 パートの内部 I/F、テストデータの内容と流れなどを確立するための調整作業を行う。

平成 30 年度に引き続き、作業を実施する。

特に、外部 I/F の調整作業による明確化によって、「⑤ SDM ジェネレータ(プロトタイプ)の製作」における設計作業を推進できる。 また、その設計作業の進捗により、A2 パートの内部 I/F の確立が進み、更に、外部 I/F へ反映されることで、他パートとの I/F の調整にフィードバックされる。

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

弊社は ASAM に平成 31 年 3 月から入会した。 これにより、次のプロジェクトに参加することとする。

(1)OpenDRIVE Concept Project(2019 年 4 月～2020 年 8 月)

(2)OpenSCENARIO Concept Project(未定)

へ参加、情報を収集しつつ、日本側として、日本の標識、交通環境の取りこみ等の要望を伝えていく。

㋺ 海外渡航調査(ドイツの ASAM のカンファレンス等)

平成 30 年度に続き、上記 2 つの Project のマイルストーンにおいては、現地に赴き、実際にシミュレーションに携わる人間に接触、最新情報を入手する。

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(部分的実装確認含む)

期間:2019 年 4 月～9 月

内容:第 1 四半期では、各センサパートから提示されているミニマムシナリオについて、これを試験可能な環境モデルの構築を実施する。第 2 四半期では、SDM ジェネレータのコンセプト確認のためのプログラムおよびデータの検討・試作を実施する。

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(平成 30 年度実施済)

㋺ 設計

期間:2019 年 4 月～6 月

内容:作成した要求分析書を基に設計を行う。D パートとの I/F の仕様を定義、決定する。

㋩ 単体試験用モデル作成

期間:2019 年 4 月～9 月

内容：単体試験用モデルとして、機能確認用の簡易なモデルを作成を実施する。

㈡ コーディング、デバッグ・試験

期間：2019 年 9 月～12 月

内容：D パートと協調して動作する SDM ジェネレータ（プロトタイプ）のコーディング、デバッグ、及び試験を実施する。

⑥ SDM ジェネレータ（プロトタイプ）の実行確認

SDM ジェネレータ（プロトタイプ）に対して、テストシナリオとモデルデータを入力し、テストデータの出力実行確認を行う。

期間：2020 年 1 月～3 月

内容：SDM ジェネレータ（プロトタイプ）に対して、テストシナリオとモデルデータを入力し、テストデータの出力実行確認を行う。

⑦ SDM ジェネレータ（改善版）の製作

㈠ 要求分析

期間：2020 年 4 月～5 月

内容：前年度作成した SDM ジェネレータ（プロトタイプ）に対する改善や他パートからの要望を反映した要求分析書の作成を行う。

㈢ 設計

期間：2020 年 6 月～8 月

内容：作成した要求分析書を基に設計を行う。

㈣ 単体試験用モデル作成

期間：2020 年 6 月～9 月

内容：単体試験用モデルとして、新たに機能確認に必要なモデルを作成を行う。

㈤ コーディング、デバッグ・試験

期間：2020 年 9 月～11 月

内容：全体と協調して動作する SDM ジェネレータ（改善版）のコーディング、デバッグ、及び試験を行う。

⑧ SDM ジェネレータ（改善版）のオ実行確認

SDM ジェネレータ（改善版）に対して、テストシナリオを入力し、実行確認する。

期間：2020 年 12 月～2021 年 2 月

内容：SDM ジェネレータ（改善版）に対して、テストシナリオを入力し、実行確認する。

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

期間：2019 年 5 月～2019 年 7 月

内容：車両、バイク、自転車、歩行者、動物モデルなど作成する。

㋺ 地形モデル（アセット）作成

期間：2019 年 6 月～2019 年 9 月

内容：一般、高速道路モデルを作成する。

㋩ 道路ネットワーク（OpenDRIVE）設定

期間：2019 年 10 月～2019 年 11 月

内容：作成した地形モデルに即した道路ネットワークを作成する。

㋥ 認識不調シナリオ設定

期間：2019 年 11 月～2019 年 12 月

内容：作成したモデルに対して認識不良となるシナリオを設定する。

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」のうち、センサ不調に関するテストスクリプトを生成環境の構築（SOLIZE Engineering 株式会社(三菱プレシジョン株式会社より再委託)）

■ 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を環境を構築する。

■ 実施計画

事業項目	平成 30 年度		平成 31 年度				平成 32 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
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						→				→

(1) 平成 30 年度の成果と次年度以降の計画（まとめ）

本事業ではセンサの不調シナリオからシミュレータにて実行可能なテストシーケンスを自動で生成するための方法の構築を目指していくが、本年度はシナリオの形式的な記述方法のについて調査を行った。シナリオの形式的な記述を行うにあたり、センサ不調についてのシナリオについて、「要求（どのような要素を盛り込むべきか）」および「シナリオの記述方法（どのような構造、フォーマットで記述するべきか）」について検討するために、まずは既存の自動運転シミュレーション環境で使われている OpenSCENARIO や CARLA のシナリオ部分の調査を実施した。

OpenSCENARIO については、交通流に関わる部分は記述方式が定められているものの、不調要因を組み込むような構造になっていないと考える。また、CARLA のシナリオ部の構造については、まだ調査中であるものの、こちらも不調要因を組み込めるような形ではないことが予想される。

また、想定されるセンサ類の不調要因が、何を誘因として現象として現れるのか、についても調査する必要があるため、こちらについても検討した。まだセンサ類の不調要因が完全にリストアップされている状況ではないため、仮説の部分が多く含まれるものの、車におけるセンサの位置、車の外装の塗装、光の入り方やその他様々な環境要因、経年劣化、などさまざまな要素が想定される。既存のシナリオ形式は、これらのことを想定できるものは多くなく、今回のプロジェクトのスコープとしてどこまでを想定し、実装するのか、シナリオとしてどこまでの拡張性を想定するのか、などまだまだ定まっていない部分も多いものの、実際にシナリオのフォーマットを定めるにあたっては、検討すべき内容が数多くあることもわかった。

またできれば人間にとっても、ジェネレータにとっても扱いやすい形式であることを想定し、自然言語をある程度形式的に記述するような形で記述したものを、SDM ジェネレータが読み込むことができる形式に変換するようなことを想定している。その記述構文についても今後検討していく必要がある。

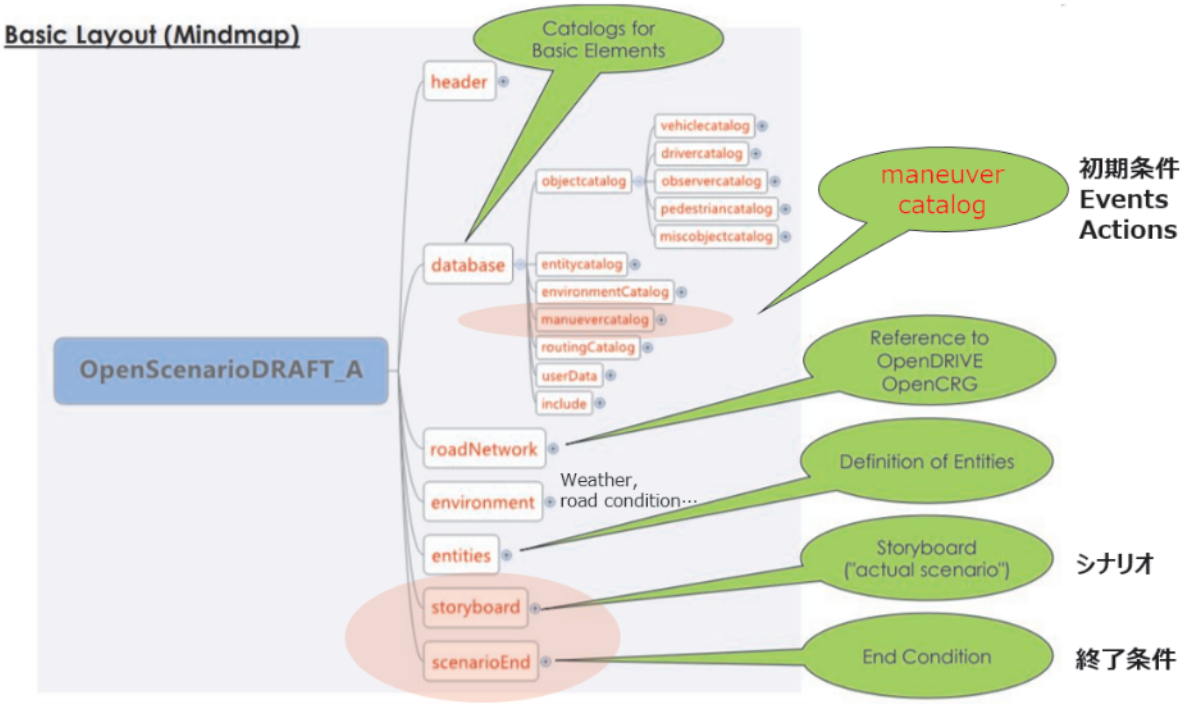
これらの想定および調査結果をもとに、引き続き、各グループおよび関係各者と調整をしながら、センサ不調シナリオの要求分析、および、センサ不調の記述方法を検討していく。

(2) 平成 30 年度の成果

①センサ不調シナリオの要求分析

今年度は、センサ不調についてのシナリオについて、「要求（どのような要素を盛り込むべきか）」および「シナリオの記述方法（どのような構造、フォーマットで記述するべきか）」について検討するために、まずは既存の自動運転シミュレーション環境で使われている OpenSCENARIO や CARLA のシナリオ部分の調査を実施した。

OpenSCENARIO については、以下のような構造をもつ形式となっている。



センサ不調については、Basic Element に対してセンサの情報を付与する必要性、ロードネットワーク以外の環境要素を考慮する必要性、ロードネットワークの中にも情報を付与する必要性など、センサ不調の要因に応じて、様々なことが考慮され、交通流とセンサ不調を組み合わせて適切に議論できるような構造であるとは考えづらい。そのため、本プロジェクトでは、センサ不調の想定範囲およびその評価内容を明確化し、新たに構造を検討する必要があると考える。

②センサ不調の記述方法の検討

想定されるセンサ類の不調要因が、何を誘因として現象として現れるのか、についても調査する必要があるため、こちらについても検討した。まだセンサ類の不調要因が完全にリストアップされている状況ではないため、仮説の部分が多く含まれるものの、車におけるセンサの位置、車の外装の塗装、光の入り方やその他様々な環境要因、経年劣化、などさまざまな要素が想定される。既存のシナリオ形式は、これらのことを想定できるものは多くなく、今回のプロジェクトのスコープとしてどこまでを想定し、実装するのか、シナリオとしてどこまでの拡張性を想定するのか、などまだまだ定まっていない部分も多いものの、実際にシナリオのフォーマットを定めるにあたっては、検討すべき内容が数多くあることもわかった。

⑶ 次年度以降の計画

① センサ不調シナリオの要求分析

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、三菱プレシジョン社、センサメーカーなどの関係者と調整ならびに要求分析を行う。

② センサ不調の記述方法の検討

センサ不調シナリオを SDM ジェネレータのテストシナリオデータとして、どのように適用するのか、その方針と適用（変換）プロセスの概要を検討しセンサ不調の事象を形式的に表現する記述方法の検討を行う。

③ 不調スクリプトの生成ツールの作成 1

検討された記述から SDM シミュレータが自動で実行できるテストスクリプトの自動生成を目指す。生成のための環境のベースとして要求文書の品質向上を行うツールである SE-SUITE とテストツールである TPT を活用する。

④ 不調スクリプトの生成ツールの作成 2

②で検討を行った記述方法さらに記述された自然言語の構文を SE-SUITE に実装するが、記述内容を形式化するためのツールの改造をツールの開発元と共同にて実施する。形式化されたテスト内容はさらにテストツールである TPT へ読み込み網羅的なテストケースの生成を行うが形式されたテストケースと TPT の I/F の構築を TPT の開発元と共同で行う。

⑤ 不調シナリオの実行

生成されたテストスクリプトを SDM ジェネレータにより実行する。

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
（学校法人幾徳学園神奈川工科大学、日立オートモティブシステムズ株式会社、株式会社デンソー、パイオニア株式会社、株式会社 SOKEN）

本研究開発テーマでは、カメラ、ミリ波レーダ、LiDAR の各センサのリファレンスとなる”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を目的とする。

さらにこれらの目的の異なるシミュレーション結果間に関連を持たせられるよう、モデル間の I/F を検討すると共に、特定のセンサによらない汎用な I/F を定義することで、「D.自動運転バリデーションプラットフォームのアーキテクチャ構築」で扱う、スケーラブルな評価プラットフォームの構築に貢献する。

本テーマにおける詳細実施テーマとその関係性を Figure 18 に示す。

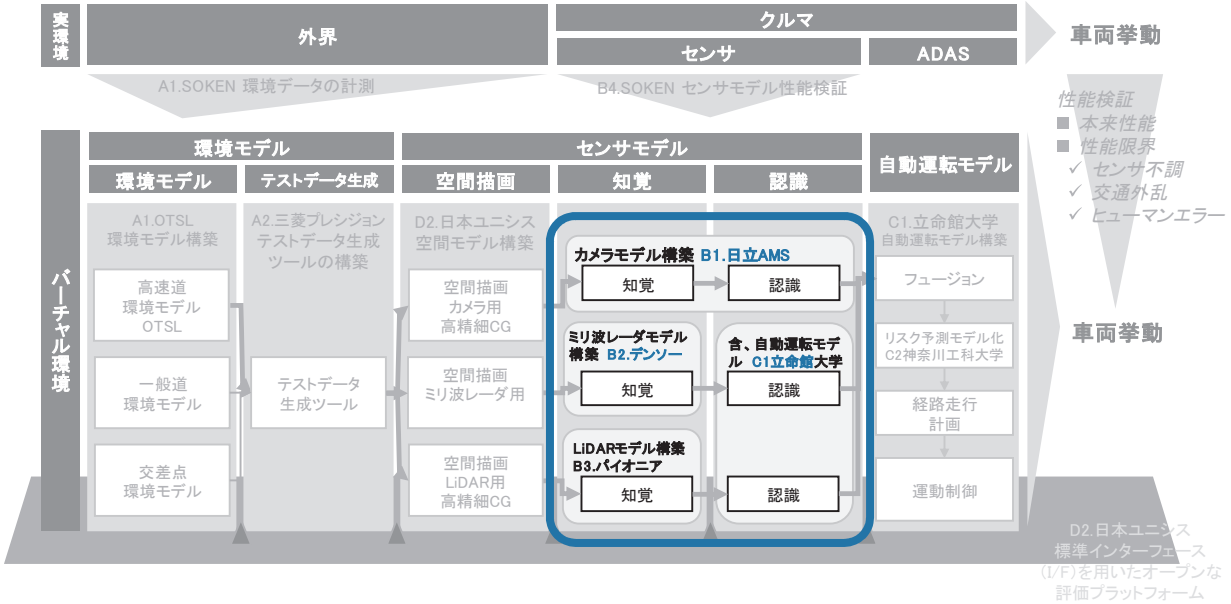


Figure 18. B パートを構成する研究開発テーマとその関係

また、本テーマでは、本事業全体のプロジェクト管理を担うとともに、A～D の各パートの構築物を結合確認や実測定結果との比較を行い、構築したシミュレーション PF の有用性を確認する。

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)

■ 事業目的

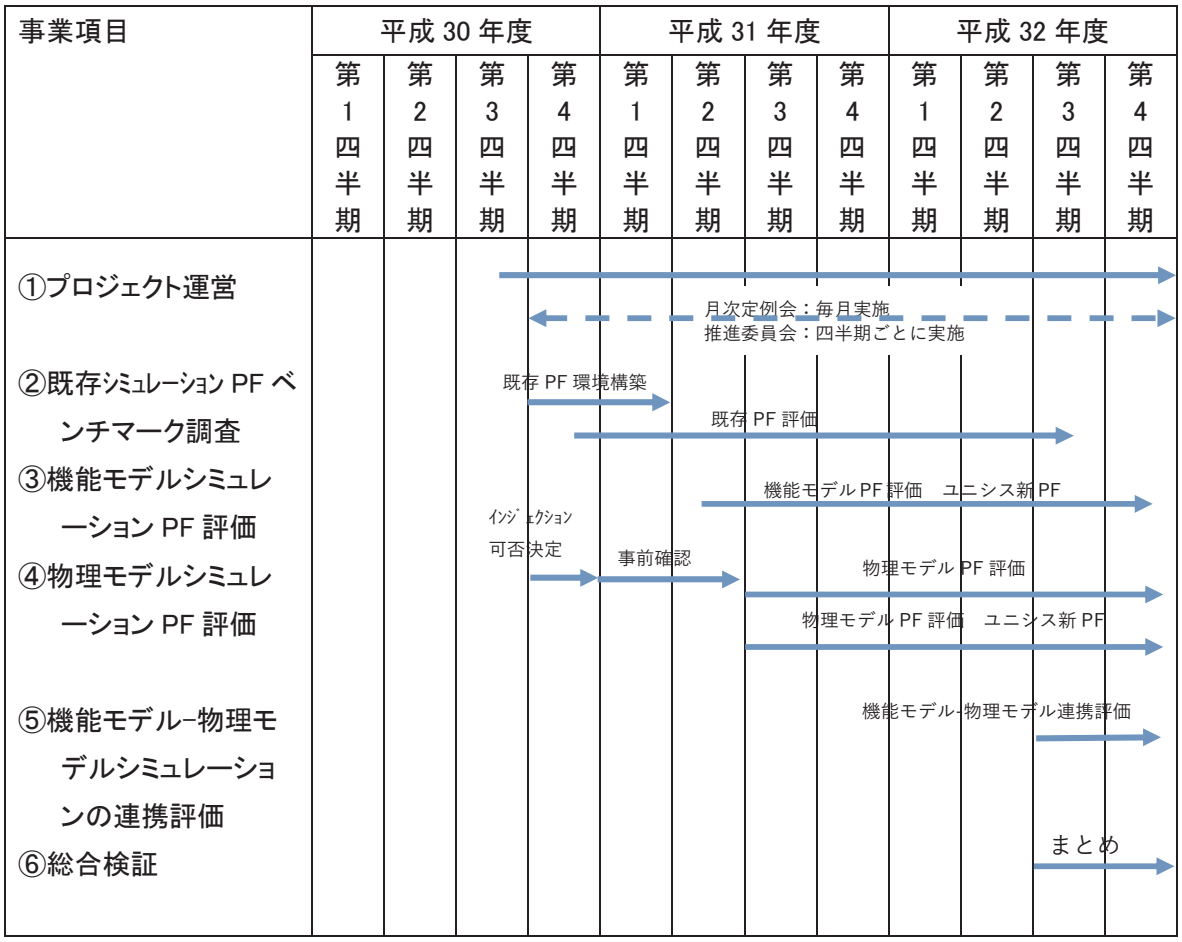
A～D パートを統括したプロジェクト全体の進捗、予算、課題、成果物の各管理を行い、より優れた活動成果を得られるようにする。また、A～D パートで構築したテストケース、モデル、ツールを結合評価し、実機測定の結果との比較等を通してシミュレーションの性能を確認する。

■ 事業概要

活動全体のマネージメントとして、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。

■ 実施計画



(1) 平成 30 年度の成果と次年度以降の計画(まとめ)

プロジェクトで実施する「自動走行評価環境の性能検証」と「不調評価」の考え方を定義し、具体的評価シーンを仮置きし、計画詳細化・具体化を推進した。また月次定例、知財運営委員会などを通して、プロジェクトが遅滞なく進捗するよう、内部マネジメントを行った。またカメラインジェクションなど、既存シミュレーションプラットフォームのベンチマーク評価を行った。

次年度以降は、具体的評価シーンを選定し、実データを計測すると同時に、プロジェクトで開発した「仮想評価環境」と計測データとの一致度を検証する。その上「認識不調」などの評価を行う。プロジェクトマネジメントも引き続き推進する。

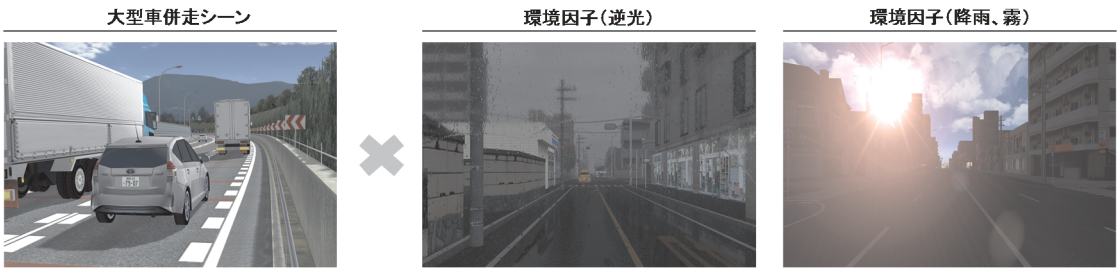
(2) 平成 30 年度の成果

①プロジェクトマネジメント

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。各団体の進捗、課題、成果物を管理し、遅滞なくプロジェクトを進行させた。

■ 計画具体化を推進するため、プロジェクトで実施する「自動走行評価環境の性能検証」と「不調評価」の考え方を定義し、具体的評価シーンを仮置きした。なお実際に対象とする評価シーンは、今後日本自動車工業会との協議を通して具体化する。

Step	名称	時期	目的	評価シーン	不調条件	実環境(候補)
1	事前検証	2019/10～	■ 静止状態での一致性検証	■ 静止物・静止状態	■ なし	JARI JTown
2	基本検証	2020/1～	■ 基本的な走行シーンでの一致性検証	■ 大型車併走等 ■ NCAP(歩行者・自転車)	■ なし	JARI JTown
3	不調評価	2020/4～	■ 認識不調条件を組み込んだ条件での一致性検証	■ 大型車併走 ■ NCAP(歩行者・自転車)	■ 雨、霧 ■ 逆光 ■ 夜間	JARI JTown
4	拡張性評価	2020/10～	■ 一般道の各種シーンでの評価可能性の確認	■ 交差点 ■ 郊外一般道	■ 雨、霧 ■ 逆光 ■ 夜間＋α	なし



出所:三菱プレシジョン参考 CG

Figure 19 検証と評価の進め方

■ 月次で全団体参加のミーティング開催し、各団体の進捗・研究結果・課題を共有の上、随時課題解決を行った。各団体の進捗は KPI を用いて見える化すると同時に、研究結果は図表を用いて共有した。

■ 知財運営委員会を設置し、必要に応じて協議事項を協議した。

■ 「DIVP 独占禁止法遵守のための誓約事項」を定め、月次ミーティング開始時に、毎回各団体持ち回りで誓約こととした。

■ ファイル共有サーバーを設置し、各団体間の情報共有を促した

また、プロジェクトに関連する各種会議体、組織との連携活動を行った。

■ SIP のシステム実用化 WG: 当プロジェクトの概要紹介を行った

■ 推進委員会: METI 事業との共同開催を検討し、当該プロジェクトとの協調・活動内容の棲み分けを図った。

■ 日本自動車工業会: 「仮想空間での自動走行評価」に関して議論を行い、「認識」部分の出力インタフェース標準化の重要性を共有した。

②既存シミュレーション PF のベンチマーク評価

機能モデルシミュレーション、および物理モデルシミュレーションについて、市販もしくは公開されているシミュレータを使用し、ベンチマーク評価を実施する。

悪天候やトンネル出口などの様々な環境条件、モデルを組み込み、各種条件下でのセンサモデル～FOV モデル等の繋がり方、また3D 点群データ出力、FOV 認識出力などのセンサ出力の内容を確認する。また、学校法人幾徳学園神奈川工科大学の保有車両に dSPACE 社製のキットを用いて VILS（Vehicle In the Loop Simulation）環境を構築し、センサによる認識を模擬した車両での挙動を確認し、センサ認識シミュレーションの有効性を検証する。（ Figure 20 #1, #2 参照）

③シミュレーション PF 評価

シミュレーション PF のベンチマーク評価を実施した。各社のシミュレータはテストデータ生成～知覚出力までを守備範囲としているものが多い。

又、各社の競争領域としての認識部のモデル提供が難しいシミュレーション環境の場合、実機とのインジェクション技術による連携が必要であることがわかる。

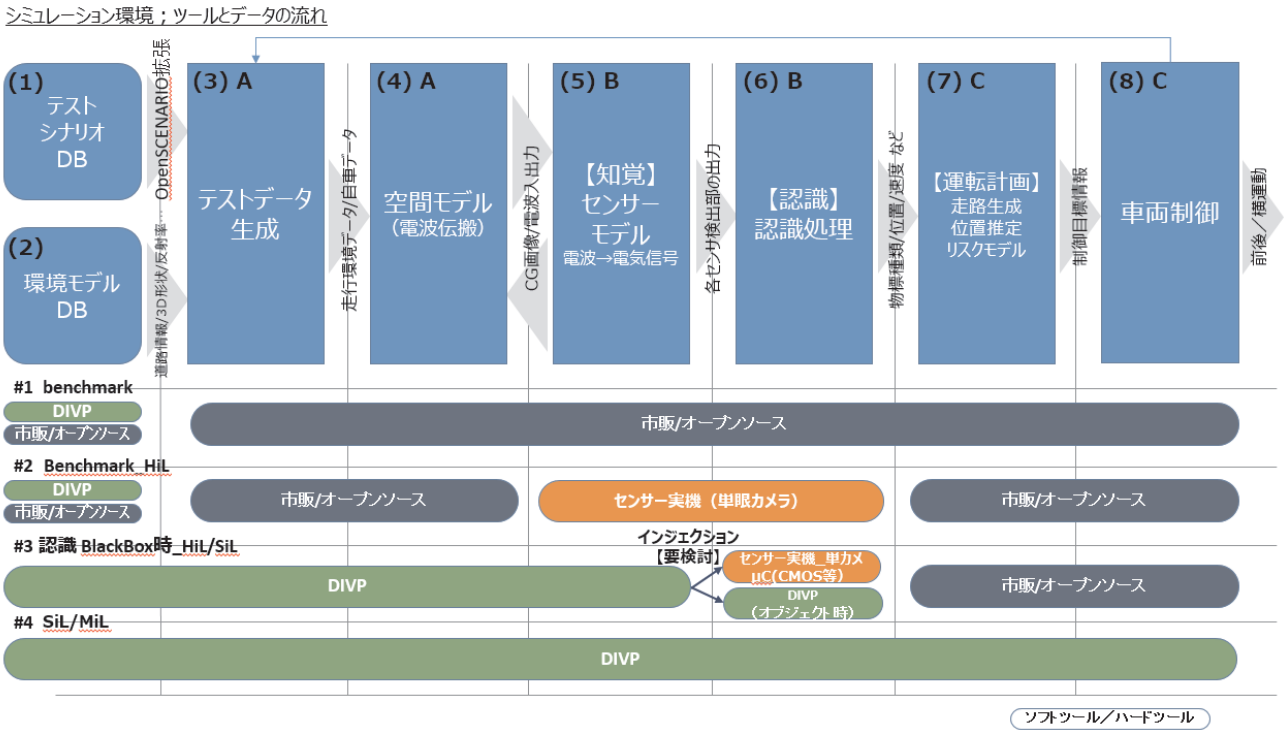


Figure 20　シミュレーション環境；ツールとデータの流れ

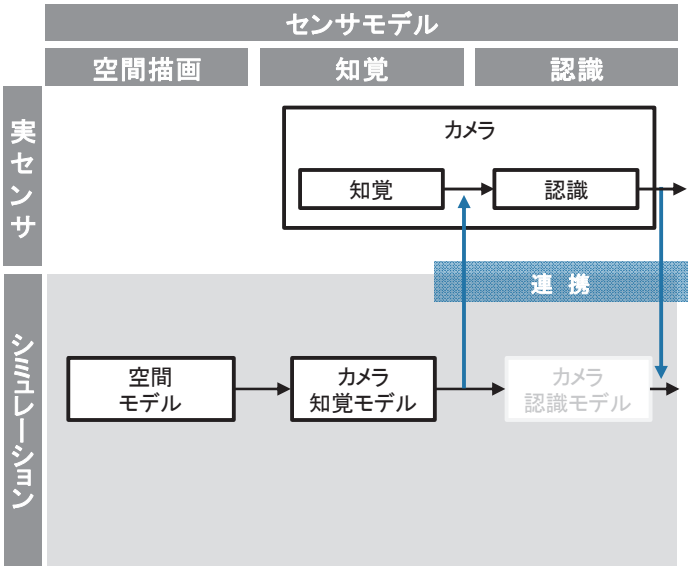


Figure 21　インジェクションを用いた HILS 構想

(3) 次年度以降の計画

① プロジェクトマネジメント

月次の進捗管理を枠組みに、成果の創出をはかる。

② 既存シミュレーション PF のベンチマーク評価

次年度以降も継続した評価を実施。

③ シミュレーション PF の評価

次年度動作の機能シミュレーションの結合・評価を実施する。

5. 2. 2 「B1. カメラ モデル構築」（日立オートモティブシステムズ株式会社）

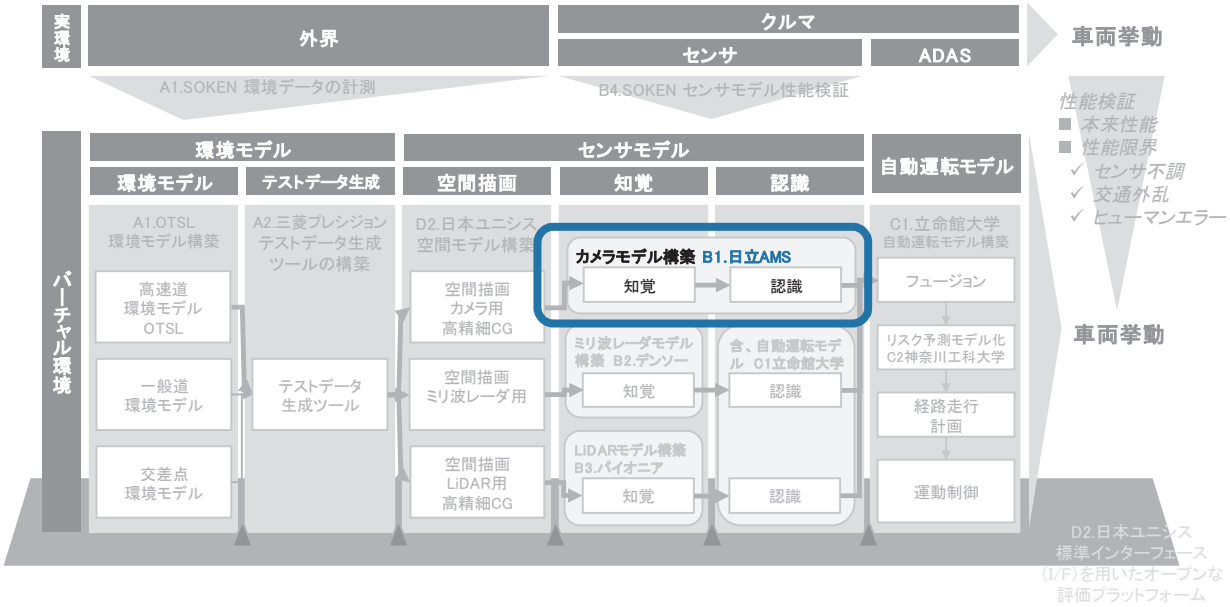


Figure 22　B1 研究の位置付け

A） 走行環境モデルと高精細CGツールと連携したカメラモデルを含む、カメラモデル評価環境の構築

B） カメラモデル(物理モデル)の開発

■ 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の構築

■ 事業概要

本事業では、標準化を見据えた、カメラ入力インターフェース及び、カメラ出力インターフェースの　定義を実施する。

カメラ入力インターフェースの定義においては、A/D パートと連携し、高精細 CG ツール及び、環境モデル(自車両運動情報)に対する要件の作成を実施する。

またカメラ出力インターフェースの定義においては、センサの置き換えが容易に実現可能なことを念頭に、標準となる出力インターフェースの作成を実施する。その際、B パートの他センサ(ミリ波レーダ、LiDAR 等)と連携し、原点座標や物標定義の整理を行い、且つ C パートのセンサフュージョン機能と連携しながら推進する。

(a) カメラモデル評価環境の構築

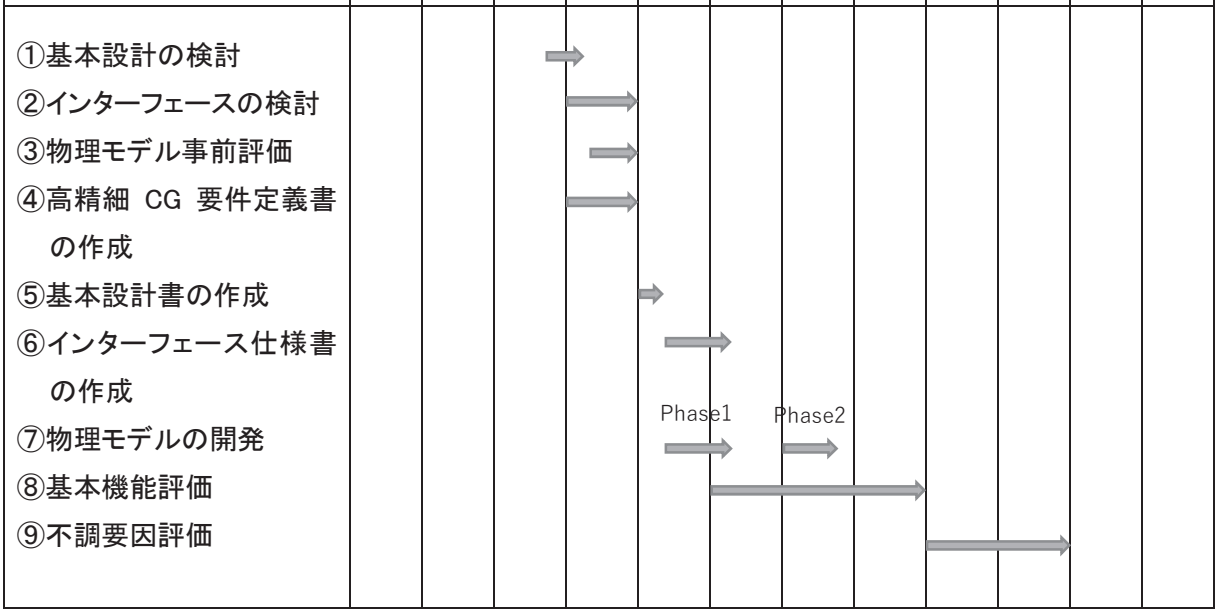
本テーマでは、図中のカメラモデル評価環境部分の開発及びカメラモデル評価を行う。

(b) カメラモデル(物理モデル)の開発

本開発では、カメラ入力インターフェース及び、カメラ出力インターフェースの明確化を行う。

■ 実施計画

事業項目	平成 30 年度				平成 31 年度				平成 32 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基本設計の検討												
②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インターフェース仕様書の作成												
⑦物理モデルの開発												
⑧基本機能評価												
⑨不調要因評価												



◆ 必要情報

平成 30 年度：外界モデル/高精細 CG 情報、Fusion/他センサ情報

平成 31 年度：高精細 CG サンプルデータ、高精細 CG コンテンツ、外界モデル

◆ 成果物

平成 30 年度：基本検討書、I/F 検討書、物理モデル事前評価報告、高精細 CG 要件

平成 31 年度：基本設計書、I/F 仕様書、物理モデル設計書等一式、基本機能評価仕様書等一式

平成 32 年度：不調要因評価仕様書等一式

(1) 平成 30 年度の成果と次年度以降の計画(まとめ)

以下、4 項目に関する、検討及び評価を実施。詳細は、(2)にて記載する。

① 基本設計の検討

高精細 CG を用いたカメラモデル評価のための全体システム構成に関し、以下の検討を実施。

・カメラ機能/物理モデルの評価システム全体構成
・高精細 CG ツールとカメラ物理モデル間のインターフェース要件
・C パート　モーションプラニングモデルに提供する認識結果の出力インターフェース
・カメラ機能/物理モデルの出力インターフェース評価
・高精細 CG 評価シナリオ概要

② カメラ出力インターフェースの検討

カメラ出力のフォーマット定義を中心に検討を実施。合わせて、カメラ機能モデルで考慮が必要な、各種の遅延等の項目を抽出した。なお、カメラからの出力は、露光制御値(画像の明るさ)、立体物(車両、歩行者)、車線(白線)を認識した結果である。

また、レーダ、LiDAR を含む関係者と協議を行いながら仕様の精査を実施し、標準化を念頭に定義を行う。

③ 物理モデル事前評価

カメラ認識エンジンとして、パソコン上と実機上で動作するもの、認識対象が露光制御値(画像の明るさ)、立体物(車両、歩行者)、車線(白線)であるもの、カメラの取付位置やスペック(画素数、画角、など)などを調整できるもの、などを要求項目として定め、複数(2,3)のカメラ認識エンジンを比較し、本プロジェクトで採用する物理モデルの選択を実施した。

④ 高精細 CG 要件定義書の作成

高精細 CG に対する以下の要件定義を実施。

(ア) 高精細 CG データ内部構成

(a)道路環境モデル
(b)自車両モデル
(c)カメラモデル(光学)
(d)カメラモデル(光電)

(イ) カメラ物理モデルへ入力される各種データのインターフェース案

(a)高精細 CG データ受渡しインターフェース要件
(b)車両挙動データ受渡しインターフェース要件

(2) 平成 30 年度の成果

①基本設計の検討

高精細 CG を用いたカメラモデル評価のための基本設計の検討を行った。

(a) カメラモデル評価環境構築の目的

自動走行に必要なカメラセンサを対象に、カメラ機能/物理モデルを定義し、産業界で活用可能なモデルを構築することである。

(b) 計画

以下の項目の計画を立案した。

(i) 高精細 CG を用いたカメラモデル評価環境の構築

(ii) カメラモデル(物理モデル)の開発

(iii) 標準化を視野に入れた、カメラモデル出力インターフェース仕様開発

(c) マイルストン

以下年度毎の開発マイルストンとして設定した。

(i) 18年度:基本設計/ｲﾝﾀｰﾌｪｰｽの事前検討、高精細CG要件定義書、物理モデル事前評価

(ii) 19年度:基本設計/ｲﾝﾀｰﾌｪｰｽ仕様書、物理モデル開発、基本機能評価

(iii)20年度:不調要因評価、カメラ部最終報告書作成

(ア) カメラ機能/物理モデルの評価システム全体構成

Figure 23 にカメラ機能/物理モデルの評価システム全体構成を示す。高精細 CG を入力として、単眼カメラ認識エンジン(市販品)を用いて認識不調シーンを評価する。また、実車走行で取得した実映像の正解値判定結果と、CG 映像による正解値判定結果を比較する。A パート高精細 CG ツールからの CG データ受渡しには、露光制御に従ってフレーム単位で高精細 CG データの受渡しを行う Online 型と、全てのフレームを一旦ファイルにして受渡す Offline 型の通信がある。また、Table 3 に、カメラモデル評価環境の機能一覧を示す。

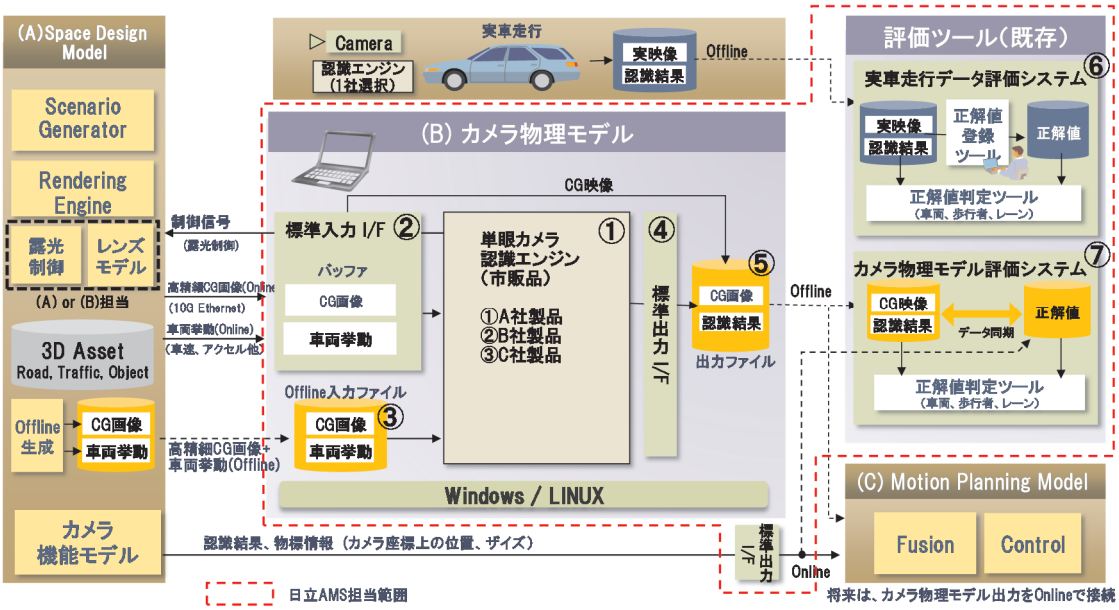


Figure 23 カメラ機能/物理モデルの評価システム全体構成

Table 3　カメラモデル評価環境の機能一覧

項番	機能	概要	備考
①	単眼カメラ 認識エンジン	高精細CGを入力として、車両や歩行者等の認識処理を行うカメラセンサ機能。市販の単眼カメラ認識エンジンを導入する。	
②	標準入力I/F	Aパート　Space Design Modelとの標準入力インターフェース機能。主に露光制御信号や、高精細CGデータ、車両挙動データの受渡し及びバッファリングを行う。	
③	Offline 入力ファイル	Aパート　Space Design Modelからファイルで受取るデータ。高精細CG及び車両挙動データが含まれる。	
④	標準出力I/F	単眼カメラ認識エンジンの標準出力インターフェース。認識立体物の位置情報などが含まれる。位置情報等の座標軸を規定する。 標準出力I/Fには、Aパート　Space Design Modelのカメラ機能モデルの出力仕様も含まれる。	
⑤	出力ファイル	単眼カメラ認識エンジンの認識結果出力データ及び、単眼カメラ認識エンジンが受け取った高精細CGが含まれる。	
⑥	実車走行データ 評価システム	実車走行で収集したカメラ実機認識結果を正解値と比較して認識性能評価を行う。正解値は、収集した実映像から人手による正解値登録ツールで作成する。	日立AMS所有の既存ツール流用
⑦	カメラ物理モデル 評価システム	高精細CGを用いて単眼カメラ認識エンジンで認識した結果と正解値を比較して認識性能を評価する。正解値は、Aパート　Space Design Modelのカメラ機能モデル(真値センサ)の出力から作成する。	日立AMS所有の既存ツール流用

カメラモデル評価環境のハードウエア構成図案(19年度版)を Figure 24 に示す。

高精細 CG を作成する「Space Design Model」用 PC 及びカメラ物理モデル用 PC は 10G Ethernet で接続され、高精細 CG の受渡しを行う。

2018年度のハードウエア構成は、簡易型の構成となるため、下記とは異なる。

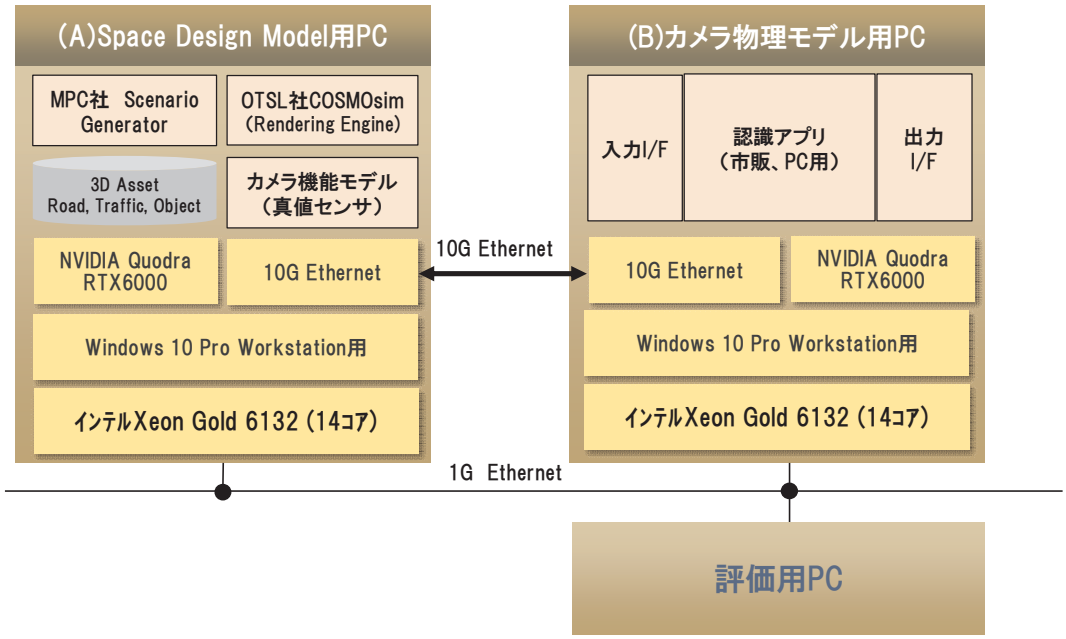


Figure 24　カメラモデル評価環境のハードウエア・ソフトウエア構成図案(19年度版)

カメラ機能モデルとカメラ物理モデルの違いを Table 4 に示す。

Table 4 カメラ機能モデルとカメラ物理モデルの違い

	カメラ機能モデル	カメラ物理モデル
立体物認識結果	CG 内の位置情報から真値を生成	CG/カメラ映像を認識処理して生成
白線認識結果	CG 内の位置情報から真値を生成	CG/カメラ映像を認識処理して生成
空間障害物による認識不調	考慮しない	認識エンジンの性能により認識処理に影響あり
		CG 品質により認識処理に影響あり
光源による認識不調	考慮しない	認識エンジンの性能により認識処理に影響あり
		CG 品質により認識処理に影響あり
認識結果出力インターフェース	本出力インターフェース仕様で定義される	本出力インターフェース仕様で定義される
認識結果のノイズ	基本は真値センサなのでノイズ無し ノイズ挿入機能で追加可能	CG/カメラ映像の認識処理でノイズ発生

（イ） 高精細 CG ツールとカメラ物理モデル間のインターフェース要件

「D.自動運転バリデーションプラットフォームのアーキテクチャ構築」（D パート）で開発される高精細 CG ツールとカメラ物理モデルのインターフェース概要を検討した。

(a) Online シミュレーションのインターフェース

CG フレーム単位に受渡しを行うインターフェース

(i) 高精細 CG ツールは、決められたフレームレート（例:30fps） で CG を生成する。但し、フレームレートは、シミュレーション時間でのフレームレートであり、実時間ではない。

(ii) 高精細 CG ツールは、CG 提供と同時に車両挙動情報（車速、加減速など）を提供する。

(iii) カメラ物理モデルは、各フレーム単位で、事前に露光制御情報を高精細 CG ツールに提供する。高精細 CG ツールは、露光制御情報に基づいて CG フレームを生成する。露光制御情報に関しては、出力インターフェース信号を参照。

(iv) カメラ物理モデルから露光制御情報が来ない場合は、高精細 CG ツールはシミュレーションを停止し、露光制御情報が来るまで待つ。

高精細CGツールとカメラ物理モデルとの通信手段は、高精細 CG データは 10G Ethernet(UDP/IP)、その他のデータ（車両挙動データ、制御信号含む）は1G Ethernet(TCP/IP)を用いて行うものとする。

(b) Offline シミュレーションのインターフェース

CG フレームを記録したファイルを受渡すインターフェース

(i) 高精細 CG ツールは、決められたフレームレート（例: シミュレーション時間で 30fps） で CG を生成する。但し、フレームレートは、シミュレーション時間でのフレームレートであり、実時間ではない。生成した CG データはファイルに記録される。

(ii) CG 提供と同時に視点固定時の車両挙動情報（車速、加減速など）をファイルに記録する。

入力インターフェース概要を以下に示す。詳細化は高精細 CG 要件定義書で行う。

Table 5　入力インターフェース概要

No	通信型	種別	送信	受信	概要
1	Online	高精細CGデータ	高精細CGツール	カメラモデル	高精細CGツールで生成された1フレーム分のCGデータ。Bayer画像で受渡しされる。タイムスタンプデータを含む
2		車両挙動データ	高精細CGツール	カメラモデル	高精細CGデータを生成した時の、自車両(仮想空間内)の挙動データ。車速、舵角、アクセル開度、ブレーキ圧、ギア位置、エンジン回転数等。タイムスタンプデータを含む
3	Offline	高精細CGデータファイル	高精細CGツール	カメラモデル	高精細CGツールで生成されたCGデータ。連続した複数のフレームで構成される。一つのフレームは一つのBMPファイルに格納される。ファイル名にタイムスタンプ情報を含む。
4		車両挙動データファイル	高精細CGツール	カメラモデル	高精細CGデータを生成した時の、自車両(仮想空間内)の挙動データ。車速、舵角、アクセル開度、ブレーキ圧、ギア位置、エンジン回転数等。高精細CGデータの各フレームに対応して、1つのファイルに格納される。タイムスタンプ情報を含む。
5		カメラ機能モデル認識結果	高精細CGツール	評価ツール	高精細CGツール内に構築されたカメラ機能モデルの認識結果。立体物(車両・歩行者)の位置情報・種別や、白線の位置情報・種別等を示す
6	Offline 実車走行データ	実車走行映像データ	実車	評価ツール	実車走行で取得したカメラ映像データ。
7		認識結果ファイル	実車	評価ツール	実車走行で、カメラ実機が認識した立体物(車両・歩行者)及び白線の位置情報・種別等を示す。複数の立体物を同時に出力する。

(ウ) C パート　モーションプラニングモデルに提供する認識結果の出力インターフェース

「C.自動運転モデルの構築」(C パート)で開発されるモーションプラニングモデルへ提供するセンサ(単眼カメラ認識エンジン)認識結果のインターフェース概要及び、高精細 CG ツールへの出力インターフェース概要を検討した。

(i) 出力情報は、露光制御値(画像の明るさ)、立体物(車両、歩行者)、車線(白線)を認識した結果となる。

(ii) 立体物、車線の認識結果は、画像上の位置、センサ座標系、車両座標系での3つの方式で定義する。

(iii) 立体物と車線は、 C パート『Motion Planning Model』で開発される FUSION で使用される。

(iv) 露光制御値は、高精細 CG ツールへの入力として提供され、CG の明るさを規定する。
要求する高精細 CG の1フレーム周期前に露光制御値が提供され、受け渡される CG に反映される。

(v) 認識結果の座標軸は、レーダ/LiDAR との共通化を検討する。

(vi) カメラ機能モデルでは、考慮が必要な各種の遅延等を定義する。

出力インターフェース概要を以下に示す。詳細化は高精細 CG 要件定義で行う。

Table 6　出力インターフェース概要

No	通信型	種別	送信	受信	概要
1	Online	露光制御	カメラモデル	高精細CGツール	高精細CGツールへの露光制御を指示する信号。露光制御には、シャッタ時間(msec)、ゲイン(dB)を含む。高精細CGツールは本信号に基づいて生成するCGデータの露光(明るさ)を決定する。
2		カメラ情報	カメラモデル	高精細CGツール	カメラモデルの情報。カラーフィルタ、画素数、画素ピッチ、シャッタ方式、フレームレート、画角(焦点距離、歪、解像度(同心円)等の情報を含む
3		認識結果	カメラモデル	Fusion	カメラモデルが認識した立体物(車両・歩行者)及び白線の位置情報・種別等を示す。複数の立体物を同時に出力する。信頼度情報も含む。
4	Offline	認識結果ファイル	カメラモデル	評価ツール	カメラモデルが認識した立体物(車両・歩行者)及び白線の位置情報・種別等を示す。複数の立体物を同時に出力する。信頼度情報も含む。
5		高精細CGデータファイル	カメラモデル	評価ツール	高精細CGツールで生成されたCGデータ。連続した複数のフレームで構成される。一つのフレームは一つのBMPファイルに格納される。ファイル名にタイムスタンプ情報を含む。

（エ）カメラ機能/物理モデルの出力インターフェース評価

（a）目的

実車走行でのカメラ実機認識性能と、同等シーンを再現した高精細 CG データを用いた認識性能を比較することで、高精細 CG による評価の有効性を確認する。

（b）評価方針

カメラ認識性能を比較することで、高精細 CG での認識性能を評価する。

（i）実車走行でのカメラ実機の認識結果と正解値の比較結果

（ii）実車と同等のシーンを再現した高精細 CG による認識結果と正解値の比較結果

但し、実車走行シーンと、高精細 CG シーンを完全に一致させることは困難なので、それぞれの認識結果を直接比較することは行わない。

（c）評価手順

（i）2019 年前半

基本シナリオ（直線路、先行車への接近・離間）で、実車と CG の認識性能比較を行う。

（ii）2019 年後半以降

基本シナリオに雨天、逆光の認識不調要因を加え、実車とCGの認識性能比較を行う。

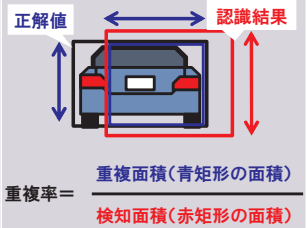
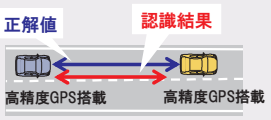
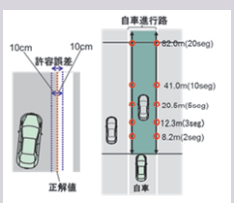
（iii）2020 年以降

各種の認識不調シナリオの評価を拡張する。

正解値判定方法を Table 7 に示す。

車両及び歩行者、レーンそれぞれ正解値判定方法が異なる。

Table 7　正解値判定方法

No	認識対象	正解値判定方法		正解値
1	車両及び歩行者	認識結果の矩形と正解値を比較し、重なり具合（重複率）を時系列に定量評価		•CG：カメラ機能モデル出力 •実車走行：映像からオペレータ登録
2		立体物の認識距離について、認識結果と正解値を時系列に比較する。		•CG：カメラ機能モデル出力 •実車走行：高精度GPS計測
3	レーン	左右レーンの5点のセグメントについて認識結果と正解値を比較し、正検知、誤検知、不検知を判定		•CG：カメラ機能モデル出力 •実車走行：映像からオペレータ登録

(オ) 高精細 CG 評価シナリオ概要

(a) 評価シナリオの目的

(i) カメラモデル評価環境において、高精細 CG データを用いて認識性能評価を行うシナリオを明確化する。

(ii) 先行車への接近・離間等の基本的なシナリオに加えて、雨天、逆光、夜間等の認識不調の原因となるシナリオも対象とする。

(b) 高精細CG評価シナリオ方針

(i) 2019 年前半 ： 単純な基本シナリオで、実車と CG の認識性能比較を行う。

(ii) 2019 年後半以降 ： 基本シナリオに雨天、逆光の認識不調要因を加え、
実車とCGの認識性能比較を行う。

(iii) 2020 年以降 ： 各種の認識不調シナリオの評価を拡張する。

Table 8 に、評価シナリオ全体概要を示す。

各シナリオの詳細は、高精細 CG 評価シナリオ仕様の定義で行う。

Table 8 評価シナリオ

No	実施時期	項目	イメージ	概要
1	2019年前半	基本シナリオ ・先行車接近		・停止中の先行車に接近（E-NCAP2018 CCRs相当） ・直線及びカーブ
2		基本シナリオ ・先行車離間		・先行車から離れる ・直線及びカーブ
3	2019年後半	中間障害物 （雨天＆ワイパ） ・先行車接近		・停止中の先行車に接近（E-NCAP2018 CCRs相当） ・雨天時にワイパーを作動。 ・ワイパーによる映像乱れで認識不調発生
4		中間障害物（雨天＆ワイパ） ・先行車離間		・同上で先行車離間
5		光源障害（逆光） ・先行車接近		・停止中の先行車に接近（E-NCAP2018 CCRs相当） ・西日に向かって走行中に、白飛びが発生し、前方を走行しているターゲット車両を見失う。
6		光源障害（逆光） ・先行車離間		・**同上**で先行車離間
7	2020年	路上障害物 ・夜間・歩行者		・夜間、黒っぽい服を来た人が歩道を横断。 （E-NCAP2018 CPAF相当 ＋ 夜間）
8		認識不調拡張 （JAMA要件と調整して決定）		夜間走行、対向車ハイビーム、段差、トンネル出口、濡れた路面、信号機、落下物、工事車線の減少 他

[CCRs: Car-to-car Rear stationary] [CPAF: Car-to-Pedestrial Adult Far side]

出展： https://pxhere.com

【備考】シナリオ選定理由

・先行車接近・離間： 高精細 CG でのカメラ認識性能を評価する基本的なパターンを選定

・雨天＆ワイパ、逆光： 光源的障害及び、空間障害物で代表的なものを選定

・夜間歩行者：認識障害として難易度の高い夜間及び歩行者を選定

②カメラ出力インターフェースの検討

カメラ機能/物理モデルのカメラ出力インターフェースの対象情報について検討し、以下 3 点の出力情報を定義した。

(a) 露光制御インターフェース

カメラ機能/物理モデルは、最適な認識性能を実現するために、高精細 CG 画像の明るさの補正が必要となる。そのため、カメラ機能/物理モデルでは、高精細 CG 生成ツールに対し、画像の明るさ補正のための露光制御情報を定義した。

(b) カメラ情報インターフェース

カメラ機能/物理モデルは、高精細 CG の生成画像に対し、モデルに基づく光学補正処理を実施する。そのため、カメラ機能/物理モデルの仕様を、カメラ情報インターフェースとして定義する。カメラ情報インターフェースは、センサ仕様、レンズ仕様、認識仕様に大別し、定義した。

(c) 認識結果インターフェース

カメラ機能/物理モデルは、入力画像に対して認識結果を出力する。カメラ機能/物理モデル間での認識結果の比較検討を行うために、認識結果を共通定義した。

(ア) 露光制御インターフェース

Table 9 にカメラ認識に関わり、認識結果に基づいた露光制御の情報を示す。

Table 9 露光制御インターフェース

分類	名称	説明	単位
露光制御	露光時間	1 ライン当たりの露光時間を出力。	μsec
	ゲイン情報	カメラ出力のゲイン値を出力。	–
信頼度	検出信頼度	物標の検出信頼度を出力。	%

(イ) カメラ情報インターフェース

Table 10 に高精細 CG 生成に関わり、必要なカメラ情報を示す。

Table 10 カメラ情報インターフェース

分類	名称	説明	単位
センサ仕様	横画素数	センサの横画素数を出力。	pixel
	縦画素数	センサの縦画素数を出力。	pixel
	画素ピッチ	センサの画素ピッチを出力。	um
	ビット幅	センサデータのビット幅を出力。	bit
	カラーフィルタ	センサのカラーフィルタを出力。	–
	シャッタ方式	センサのシャッタ方式を出力。	–
レンズ仕様	焦点距離	レンズ焦点距離を出力。	mm
	偏光フィルタ	偏光フィルタの有無を出力。	–
認識仕様	認識遅延量	撮像フレームと認識フレームの遅延量を出力。	frame
	認識最長距離	認識可能な最長距離を出力。	m
	認識最短距離	認識可能な最短距離を出力。	m
	認識最大角度(左右)	認識可能な左右最大角度を出力。	deg
	認識最大角度(上下)	認識可能な上下最大角度を出力。	deg

（ウ）認識結果インターフェース

Table 11 にカメラ認識に関わる情報、及び撮像映像より得られた立体物、車線の情報を示す。

Table 11　認識結果インターフェース　その 1

分類	名称	説明	単位
時間情報	撮像時間	カメラの撮像時間を出力	μsec
	認識時間	カメラの認識時間を出力	μsec
診断情報	HALT 情報	カメラが正常動作しているかを出力	−
露光制御	露光時間	1 ライン当たりの露光時間を出力	μsec
	ゲイン情報	カメラ出力のゲイン値を出力	−
物標情報（センサ基準）	画面座標(X,Y)	カメラ画像上の物標中心座標を出力	pixel
	世界座標(X,Y,Z)	レンズ焦点位置を基準とした物標中心・正対面中心座標を出力	m
	サイズ(X,Y,Z)	物標のサイズを出力	m
	速度(X,Y,Z)	物標の移動速度を出力	km/h
物標情報（車両規準）	世界座標(X,Y)	前輪車軸中心を基準とした物標中心・正対面中心座標を出力	m
	世界座標(Z)	接地面を基準とした物標座標を出力	m
	サイズ(X,Y,Z)	物標のサイズを出力	m
	速度(X,Y,Z)	物標の移動速度を出力	km/h
物標識別情報	車両認識数	車両対象物の認識数を出力	−
	歩行者認識数	歩行者対象物の認識数を出力	−
	その他物標認識数	その他対象物の認識数を出力	−
	車両、車種種別	認識対象の車両種別を出力	−
	車両角度	認識対象の車両とのなす角を出力	deg
	歩行者向き	歩行者の正面の方向を出力	−
	歩行者種別	認識対象の歩行者種別を出力	−
	その他種別	その他認識対象の物体種別を出力	−

Table12　認識結果インターフェース　その 2

分類	名称	説明	単位
自車線情報	自車線認識情報	白線の認識状態を出力	−
	左右車線＠10,20,30m	自車両中心位置から 10,20,30m 先の左右車線の横距離を出力	m
	左右車線の道路半径	左車線の道路半径を出力	m
	左右車線に対するヨー	左車線に対する自車両のヨー角を出力	deg
	左右車線との距離	左車線と自車両中心との間隔を出力	m
自車線種別情	左右車線種別	左車線の種別を出力	−
隣車線情報	隣車線認識情報	白線の認識状態を出力	−
	左右隣車線＠10,20,30m	自車両中心位置から 10,20,30m 先の左右車線の横距離を出力	m
	左右隣車線の道路半径	左車線の道路半径を出力	m
	左右隣車線に対するヨ	左車線に対する自車両のヨー角を出力	deg
	左右隣車線との距離	左車線と自車両中心との間隔を出力	m
隣車線種別情	左右隣車線種別	左隣車線の種別を出力	−
信頼度	物標検知信頼度	物標の検出信頼度を出力	%
	白線検知信頼度	白線の検出信頼度を出力	%

③物理モデル事前評価

(ア) カメラ認識エンジンの要求項目の設定

カメラ認識エンジンの要求項目を定めた。

(a) パソコン上と実機上で動作すること。

(b)　認識対象

(i) 立体物(車両、歩行者)

(ii) 車線(白線)　　※露光制御に対応する事。

(c)　カメラの取付位置やスペック(画素数、画角　等)を調整できること。

（イ）カメラ認識エンジンの選定

複数(2～3)のカメラ認識エンジンの比較を実施。

まずは、その中の1つを最初の評価用として選択した。(Table 12 の破線)

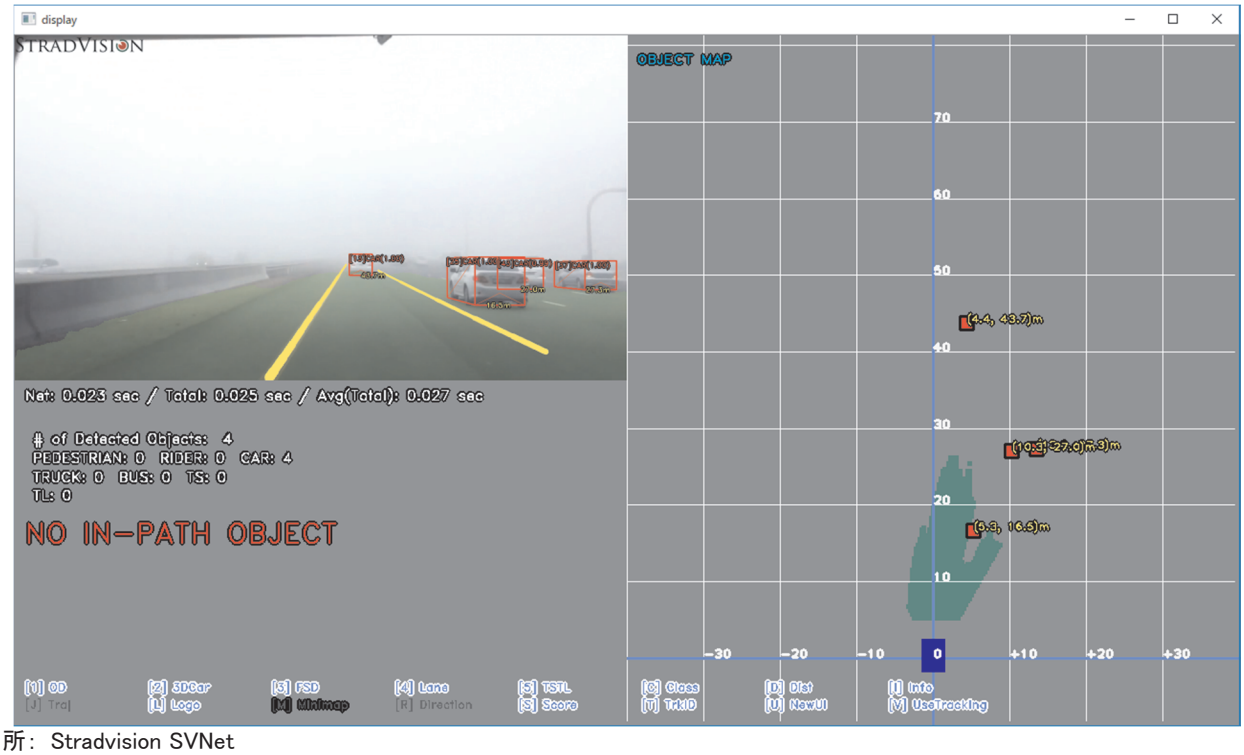
Table 12　カメラエンジンの決定分析表

決定分析				
決定目的の明確化	決定ステートメント	仮想環境におけるカメラモデル構築のため、採用する認識エンジンを決定する。		
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	白線、クルマ、人、自転車が認識可能なこと	パソコン、実機の両方で動作可能なこと	'18 年、19 年(FY)内に入手可能なこと
候補案1：ストラドビジョン	評価結果[OK/NG]	OK	OK	(OK)
	評価詳細	可能。	PC 版、評価ボード版の 2 種類がある。	Yes(PC 版)。 評価ボード版は、カメラモジュールとの調整次第。
候補案2：HELLA Aglaia	評価結果[OK/NG]	OK	(OK)	OK
	評価詳細	可能。 但し、人と自転車を区別しない。	評価ボード版はある。 PC 版は、内部評価用で提供可否を調整中。	ソフトリリース 2018 年 Q4。 (FoV＝100 度版)
候補案 3 Xilinx	評価結果[OK/NG]	OK	(OK)	NG
	評価詳細	可能。 但し、人と自転車を区別しない。	評価ボード版はある。 PC 版は内部評価用で、提供可否を調整中。	19 年末以降の提供。
候補案 4：Ambarella	評価結果[OK/NG]	(OK)	NG	NG
	評価詳細	クルマ、人、二輪車を CNN ベースで認識可能。 白線は、9/初頭に準備可能。 (CNN ではない [サンプルレベル])	評価ボード版はある。 PC 版は内部評価用で、提供出来ない。	認識結果が公表される事で辞退の意向。
候補案 5：KPIT	評価結果[OK/NG]	OK	NG	OK
	評価詳細	可能。 自転車は不明。	PC 版のみ。	白線・車両：製品化済み。 歩行者：ES 品有り ※但し、画角は 60 度

（ウ）環境構築と動作確認

候補案 1 のストラドビジョン社製の認識エンジン製品をパソコンに組み込み、動作確認を実施した。Figure 25 に、認識エンジンの動作結果を示す。

製品付属のサンプル画像ファイルを認識エンジンに入力し、認識結果を付属のビューアに表示した。



出所： Stradvision SVNet

Figure 25　パソコン版認識エンジンの動作確認結果

④高精細 CG 要件定義書の作成

(ア) 高精細 CG データ内部構成

高精細 CG 要件の全体構成を Figure 26 に示す。

高精細 CG 生成ツールへの要件として、以下の 4 つのモデルがある。

(a) 道路環境モデル、(b) 自車両モデル、(c) カメラモデル(光学)、(d) カメラモデル(光電)

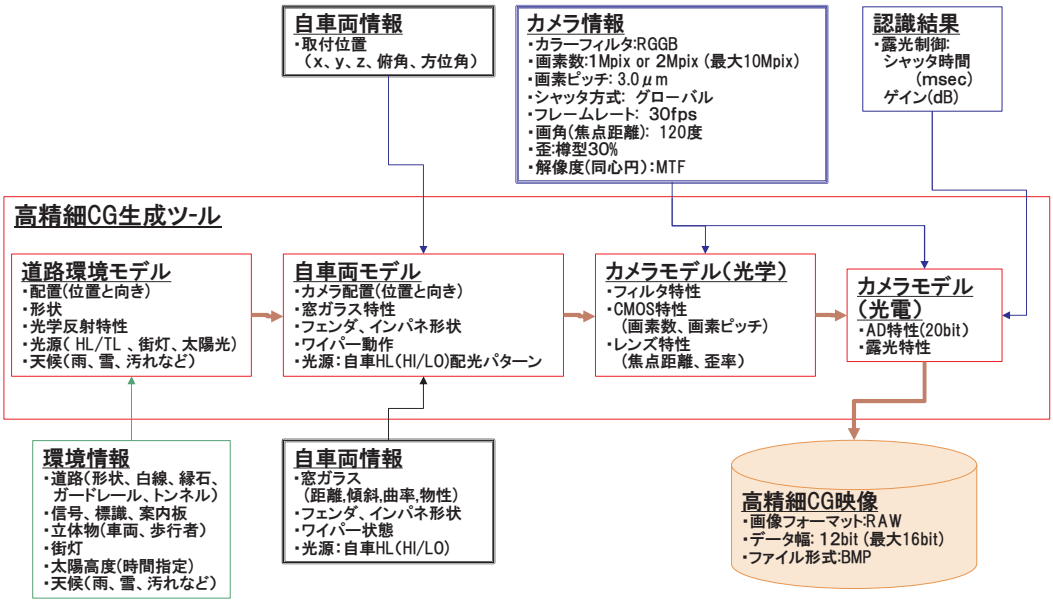


Figure 26　高精度 CG 要件の全体構成

Figure 27 に、各要素の概念図を示す。

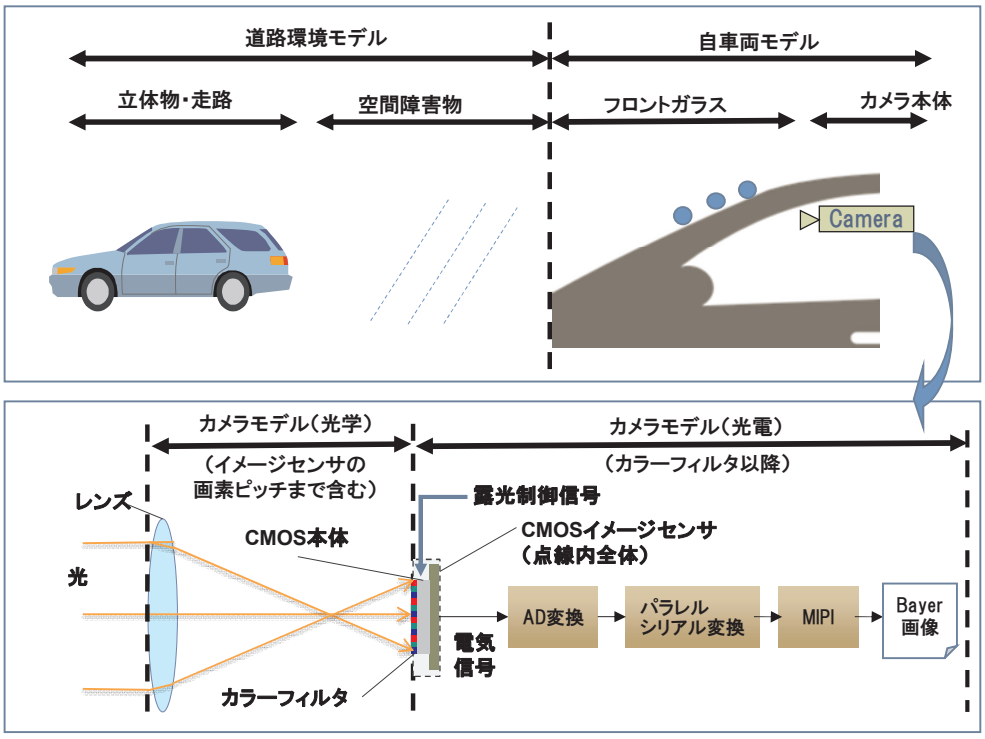


Figure 27　高精細 CG 要件定義の各要素の概念図

(a) 道路環境モデル要件

パート A 「Space Design Model」で定義される自車両周辺の環境モデル。

(i) 周辺構造物:ビル、道路舗装、マンホール、ガードレール、橋げた、街路樹等

(ii) 空間構造物:雨、雪、飛来物、逆光、夜間、対向車ヘッドライト、トンネル、街灯等

(iii) 走行路: 白線、ポッツドッツ、キャッツアイ、路肩等

(iv) 交通標識:道路標識、信号、横断歩道等

(v) 周辺立体物:車両、バイク、自転車、歩行者、動物他

(vi) 路上障害物:落下物

(b) 自車両モデル要件

パート A 「Space Design Model」で定義される自車両のモデル。

(i) カメラ表面: 付着物、窓ガラス歪み、ワイパー動作等

(ii) カメラ配置: 搭載位置、向き等

(iii) 光源: 自車ヘッドライト配光パターン (ハイ・ロー)

(iv) 車両姿勢: ピッチ、ロール方向傾き等

(c) カメラモデル(光学)要件

カメラモデル(光学)に伴う要件をまとめた。要件の構成要素は、画角(焦点距離)、画素ピッチ、歪、解像度がある。高精細 CG ツールが満たすべき要件を下記に示す。

Table 13 高精細 CG ツールが満たすべき要件

No	項目	要件	備考
1	画角(焦点距離)	120度を設定できること	WANT: 20度～190度まで設定できること
2	画素ピッチ	3.0μmを設定できること	WANT: 2.5μmまで設定できること
3	レンズ歪	樽型歪30%を設定できること	WANT: • 樽型、糸巻型、陣笠型、魚眼レンズ型等を設定できること。 • 歪度は0～30%まで設定できること
4	解像度	レンズメーカーから提供されるMTF曲線に従って設定できること	

(d) カメラモデル(光電)要件

カメラモデル(光電)に係る画像生成処理部分の全体構成を Figure 28 に示す。

(i) 入力画像はカラーフィルタ及びセンサ感度特性を反映するための画素特性演算を施す。
画素特性演算後はグレースケール(明暗だけを示す)の HDR 画像となる。

(ii) 露光時間に対応した信号レベル(ピクセル値)の増幅を行い、別途生成する擬似ノイズ画像を合成(加算)するノイズ挿入を施す。

(iii) センサ内での電気的及び信号処理センサゲインに応じて画像全体に対しセンサゲイン調整を行い多重露光の場合には複数の露光結果の合成を施す。ここまで HDR で処理を行う。

(iv) トーンマッピングを施し、カメラモデルの要求する bit 数の RAW 画像に変換する。
トーンマッピングを行う際には変換テーブルを参照した非線形変換に対応する。

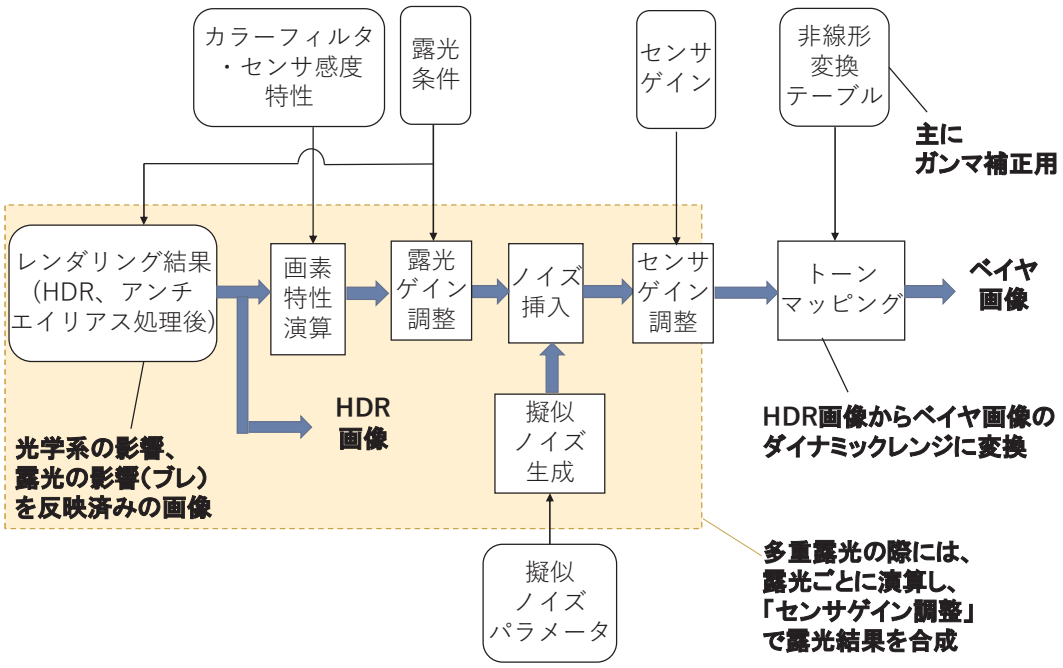


Figure 28 カメラセンサ模擬に伴う画像生成処理の全体構成

Table 14 に各要素に関する要件を示す。

Table 14 カメラモデル(光電)関連の要素と要件

No	項目	要件	備考
1	画素数	2Mピクセルを設定できること	WANT:最大10Mピクセルを設定できること(水平3648 垂直2736)
2	フレームレート	30fpsを設定できること	WANT: 1.00～1000.00fpsが設定できること
3	カラーフィルタ	RGGBが設定できること	WANT:
4	画像フォーマット	RAW (bayer画像)	WANT: HDRが設定できること
5	データ幅	12ビットが設定できること	WANT: 最大16ビットを設定できること

（イ）　カメラ物理モデルへ入力される各種データのインターフェース案

（a）高精細 CG データ受渡しインターフェース要件

CGツールとカメラ物理モデルとの通信手段を、Figure 29 に示す。

画像以外の信号はデータ量が少いことから、プロトコルとして信頼性の高い TCP/IP 通信を用いる。画像データはフレーム単位、あるいは数分の1フレーム程度に対応するデータを UDP で纏めて送信する。

画像データ受信側（カメラ物理モデル）は、その単位で受信確認応答、あるいは再送要求を TCP/IP で接続した制御系接続を用いて画像データ送信側（CGツール）へ通知するものとする。

これによって、UDP パケットのロストに対応する。

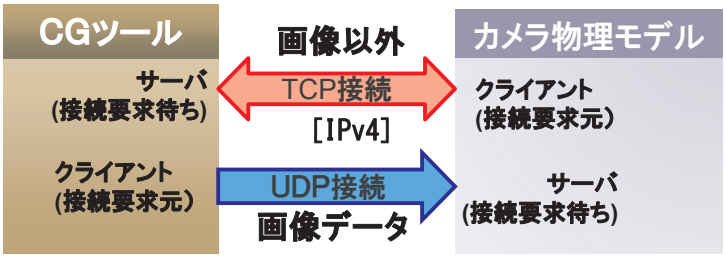


Figure 29　カメラ物理モデルとの通信手段

（i）Online シミュレーションの要件

シミュレーション実行中に、カメラ物理モデルより撮像パラメータ（露光及びセンサゲインに関するパラメータ）をフレーム単位に更新できるようにする必要がある。これらのパラメータは実機ではイメージセンサの動作の都合、ベイヤ画像へ反映されるまで若干の遅延が発生する場合がある。この動きを模擬するため、パラメータ設定からベイヤ画像への反映までの遅延を 0 フレームから 3 フレームまで指定可能であるものとする。

参考として、Figure 30 に撮像ﾊﾟﾗﾒｰﾀ遅延 0 のタイミングを示す。

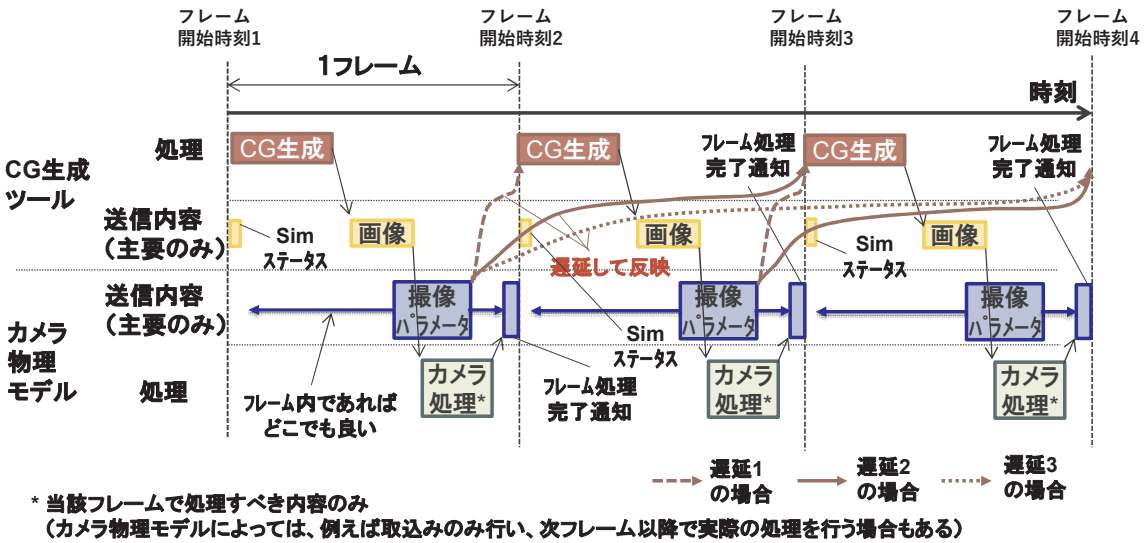


Figure 30　撮像パラメータ・CG画像出力タイミング（撮像ﾊﾟﾗﾒｰﾀ遅延 0）

(ii) Offline シミュレーションの要件

Offline シミュレーションでは、ベイヤ画像、HDR画像、車両挙動情報を出力対象とする。Offline シミュレーション時の結果出力はファイルへの書き出しにより行うものとする。ファイル出力を行う際のフォルダ構成は Figure 31 に示す構成とする。すなわち、シミュレーション実行単位でフォルダを作成して、当該フォルダの中にさらに種別（ベイヤ画像、HDR画像、車両挙動情報）のサブフォルダを作成して対応するサブフォルダ内にファイルを保存する。CG画像ファイルは1フレームを1ファイルとして保存し、ファイル形式及びフレーム番号を判別できるファイル名を用いる。

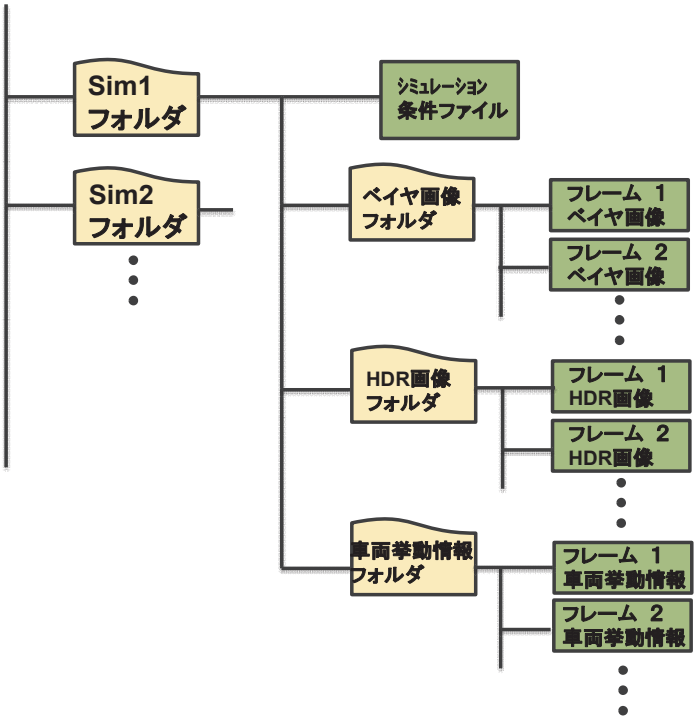


Figure 31　結果出力時のフォルダ構成

CG生成結果については簡易的に扱える BMP(非圧縮)ベースの形式、及び HDR 画像も扱え可逆圧縮にも対応する OpenEXR 形式(http://www.openexr.com/index.html 参照)に対応するものとする。ベイヤ画像ではいずれかの形式を選択して利用可能とし、HDR 画像では必ず OpenEXR 形式を用いる。

(b) 車両挙動データ受渡しインターフェース要件

高精細 CG 生成ツールとカメラ物理モデル間では、高精細 CG データと同時に、自車両の車両挙動データの受渡しが必要となる。

Table 15 に、自車両の車両挙動データの詳細を示す。

Table 15 自車両の車両挙動データ

分類	名称	説明	単位
車両規格	全幅(W)	自車両の横幅を出力します。	mm
	高さ(H)	自車両の高さを出力します。	mm
	全長(D)	自車両の奥行(長さ)を出力します。	mm
センサ取付位置	横位置(W)	前輪車軸中心からのセンサ取付位置を出力します。	mm
	縦位置(H)	接地面からのセンサ取付位置を出力します。	mm
	奥行き(D)	前輪車軸中心からのセンサ取付位置を出力します。	mm
センサ取付角度	ヨー	前面規準での横方向の取付角度を出力します。	deg
	ピッチ	前面規準での縦方向の取付角度を出力します。	deg
	ロール	前面規準での回転角度を出力します。	deg
車両運動情報	回転数	エンジン回転数を出力します。	rpm
	車速	走行速度を出力します。	km/h
	ヨーレート	回転角速度を出力します。	deg/sec
	操舵角	操舵角を出力します。	deg
	横 G センサ	横 G センサ値を出力します。	m/s^2
	前後 G センサ	前後 G センサ値を出力します。	m/s^2
	シフトレバー	シフトレバーの状態を出力します。	-
	アクセル開度	アクセル開度を出力します。	%
	M/C 液圧	マスターシリンダー液圧を出力します。	MPa
	ブレーキ SW	ブレーキ SW(ブレーキペダル)の状態を出力します。	-
	サイドブレーキ SW	サイドブレーキの状態を出力します。	-
ライト情報	ライト SW	ライトの設定情報を出力します。	-
ワイパー情報	ワイパーSW	ワイパーの設定情報を出力します。	-
ADAS 情報	ADAS SW	ACC や LKS 等 ADAS 機能のスイッチが On になっているかどうかを出力します。	-

(3) 次年度以降の計画

実施計画書に則り、以下に関する、検討及び、評価を推進する。

① 基本設計書の作成

平成 30 年度①で検討したカメラ機能/物理モデル評価のための全体システム構成及び外部とのインターフェース概要に基づいて、基本設計書としてまとめる。基本設計書には、カメラ物理モデル評価の目的、全体システム構成、開発項目、高精細 CG データによるカメラ機能/物理モデルの出力インターフェースの評価手法等が含まれる。全体システム構成としては、ソフトウエア構成図やハードウエア構成図、外部とのインターフェース概要を検討する。出力インターフェース評価手法としては、カメラ物理モデルの認識結果とカメラ機能モデルの結果の比較手法、実車走行映像の認識結果と正解値との比較手法等を明確化する。これらの項目に関して、詳細仕様を明確化し、基本設計書としてまとめる。

期間　　:2019 年 4 月
主なアウトプット　　:カメラモデル評価基本仕様書

② カメラ出力インターフェース仕様書の作成

平成 30 年度②で検討した結果をベースに、カメラからの出力の露光制御値（画像の明るさ）、立体物立体物(車両、歩行者)、車線(白線)の認識結果を物理量で定義する。データの並びについては、実装時のメモリへの割り付けを考慮しつつ、グルーピングする。

立体物、車線の認識結果は、画像上の位置、センサ座標系、車両座標系での3つの方式で定義する。合わせて、カメラ機能モデルで考慮が必要な、各種の遅延等を定義する。

また、レーダ、LiDAR を含む関係者と協議を行いながら仕様の精査を実施していく。

期間　　:2019 年 5 月～7 月
主なアウトプット　　:出力インターフェース仕様書

③ 物理モデルの開発

既存のカメラ実機における入力（画像、車両情報）、出力（露光制御値、立体物・車線の認識結果）の形態を考慮しつつ、⑥出力インターフェース仕様書および A／D パート作成の入力インターフェース仕様書に則り、カメラ物理モデルの入出力の変換ソフトを物理モデル用のパソコン上で早期に構築する。ここで関連するパート（カメラ機能モデル、高精細 CG ツール、FUSION、他センサ）とのフォーマットの共有や同期の取り方を明確にしつつ、構築を進める。

動作確認としては、A/D パートが開発した高精細 CG ツールにおいて不調要因の無い高精細 CG データをカメラ物理モデルで認識処理を行う。この認識結果と「A.走行環境モデルの構築」（A パート）から取得した認識対象物のカメラ機能モデルの出力データを比べ、カメラ物理モデルの認識原理を考慮しつつ、アンマッチの要因分析を行い、高精細 CG ツールへの修正依頼をまとめ、動作確認を繰り返していく。(Phase1 にて、

境構築の作業を実施後、基本機能の評価を行い、Phase2 にて評価からのフィードバックを実施）

期間　　:2019 年 5 月～7 月(Phase1)
　　:2019 年 9 月～11 月(Phase2)
主なアウトプット　　:物理モデル設計書等一式

④ 基本機能評価

高精細 CG データを用いて、カメラ物理モデルの認識性能を評価し報告書にまとめる。下記手順で評価を実施する。

（ア） 評価仕様書作成

評価仕様書には、評価対象となる基本シーン、正解値評価ツール（既存）の活用方法、認識性能評価の定量化手法、実走行での認識との比較手法等が含まれる。基本シーンには、先行車への追従、接近、離間などが含まれる。

（イ） 正解値判定ツールの準備

正解値判定ツールとしては、既存の正解値判定ツールを流用し、高精細 CG データの認識評価用ツール及び、実走行による実映像の認識評価用ツールを準備する。高精細 CG データの正解値判定ツールは、カメラ物理モデルの認識結果と A パートから取得した認識対象物のカメラ機能モデルの出力データを比較することにより、正解値判定するツールである。一方、実映像の正解値判定では、走行データから正解値を生成するツール（既存）を準備し、カメラ物理モデル（車載用）の認識結果と比較することで正解値判定を行う。既存のツールにデータ入力できるように、フォーマット変換処理ツールが必要になる。

（ウ） 評価の実施

A/D パートが開発した高精細 CG ツールを用いて、基本シーンの高精細 CG データを取得する。取得した高精細 CG データを認識エンジンに入力し、認識結果を生成する。本認識結果と、、「A.走行環境モデルの構築」（A パート）から取得した認識対象物のカメラ機能モデルの出力データを正解値判定ツールで比較することで、正解値判定を行う。

更に、高精細 CG データでの認識性能と、実車走行での実映像での認識性能の比較も実施する。他チームにて、実際の車両で走行映像及び認識結果を取得して頂き、正解値と比較することにより認識性能を定量化する。実映像の正解値は、人手で作成する。高精細 CG データでの認識性能と実映像での認識性能を比較する。

上記評価結果を、報告書にまとめる。

期間　　:2019 年 7 月～2020 年 3 月
主なアウトプット　　:基本機能評価仕様書等一式

⑤ 不調要因評価

「D.自動車バリデーションプラットフォームのアーキテクチャ構築」（D パート）が開発した高精細 CG ツールにおいて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う。この認識結果と「A.走行環境モデルの構築」（A パート）から取得した認識対象物のカメラ機能モデルの出力データを比べ、不一致の映像において認識原理からアンマッチの要因分析を行う。さらには実車における不調要因の収集データを考慮しつつ、アンマッチの要因分析を行い、高精細 CG ツールへの修正依頼をまとめ、動作確認を繰り返し行い、報告書にまとめる。

期間　　：2020 年 4 月～6 月
主なアウトプット　　：不調要因評価仕様書等一式

⑥ カメラリファレンスモデル最終報告書作成

仮想空間での自動走行評価環境整備手法の開発における、カメラリファレンスモデル構築に関する、設計、開発、評価の結果を精査、資料としてまとめる。

期間　　：2020 年7月～9 月
主なアウトプット　　：カメラリファレンスモデル最終報告書一式

5. 2. 3 「B2. ミリ波レーダモデル構築」(株式会社デンソー)

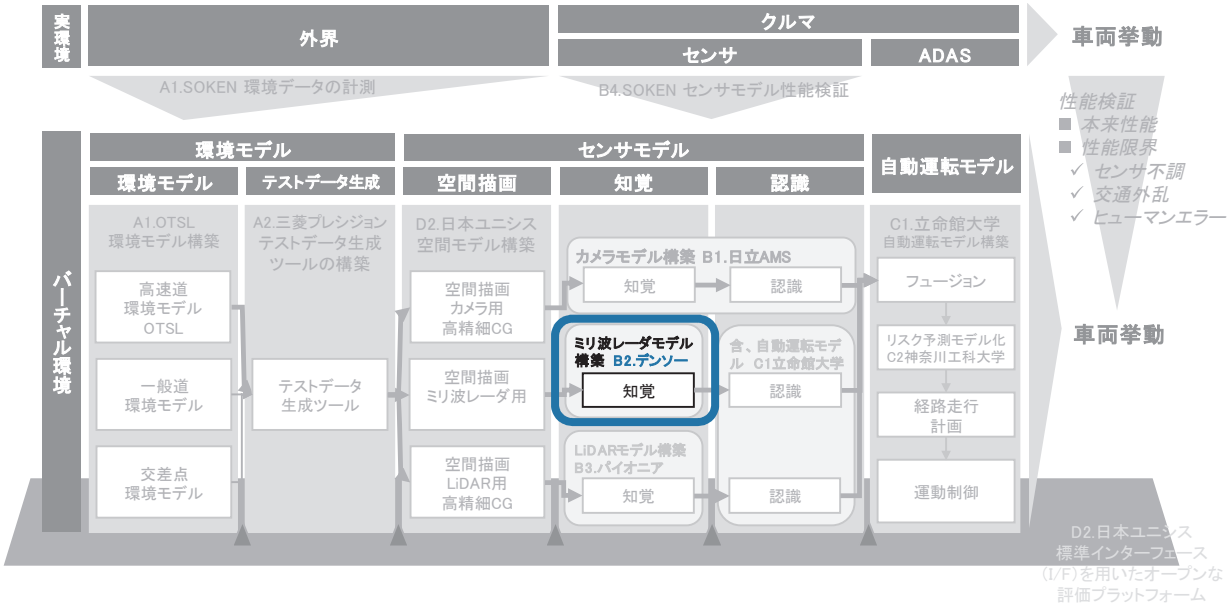


Figure 32　B2 研究の位置付け

ミリ波レーダモデルにおける機能モデル、物理モデルとして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

クローズドシミュレーションのための機能モデル、オープンシミュレーションのための物理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となる。以降ではこれらについての研究実施内容を示す。

(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

(a). 外界から受け取る情報の検討

ミリ波レーダとして外界モデルから受け取るべき情報の要件を提示する。その要件は、外界モデルからの目標物の位置情報や、データベースからの目標物ごとの特性に応じた情報や、電波伝搬情報などの「A.走行環境モデルの構築」テーマの成果物であるため、これらの詳細は、「A.走行環境モデルの構築」テーマ関係者との協

議の上決定する。

また、ミリ波レーダの誤動作や性能劣化につながる一般的な不調要因の検討を行うため、これらの条件定義や、ミリ波レーダへの影響見積りに必要な入力仕様についても併せて協議を行う。

これらのミリ波レーダへの入力情報は、適切に定める必要がある。 例えば、 Figure 33 に示すような代表的なミリ波レーダセンサにおいて、高周波回路を模擬するようなセンサモデルではシミュレーション実行時間が非現実的な長さとなるため、検知情報を導出するために必要な差周波を模擬できる要件を定める。今回のシミュレーションの目的に応じて最適な入力条件を、標準的な I/F として協議していく。

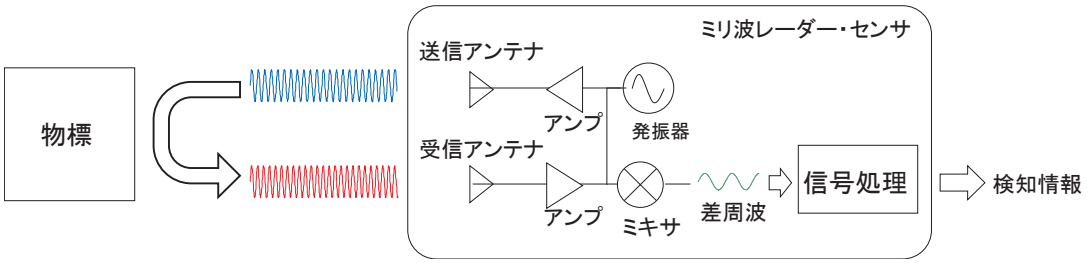
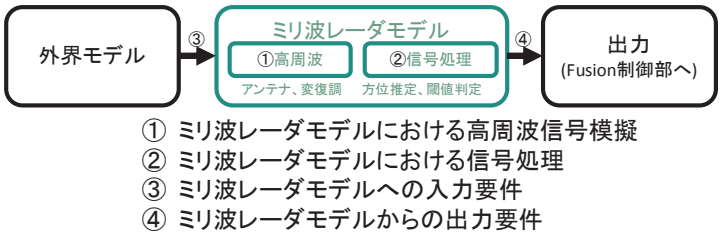


Figure 33 代表的なミリ波レーダセンサの構成

(b). 使い方に応じたリファレンスモデルの抽象度の定義

機能モデルと物理モデルと言った、目的に応じた抽象度を持つミリ波レーダモデルを用意する。 Figure 34 にミリ波レーダの入出力要件を示す。



① ミリ波レーダモデルにおける高周波信号模擬
② ミリ波レーダモデルにおける信号処理
③ ミリ波レーダモデルへの入力要件
④ ミリ波レーダモデルからの出力要件

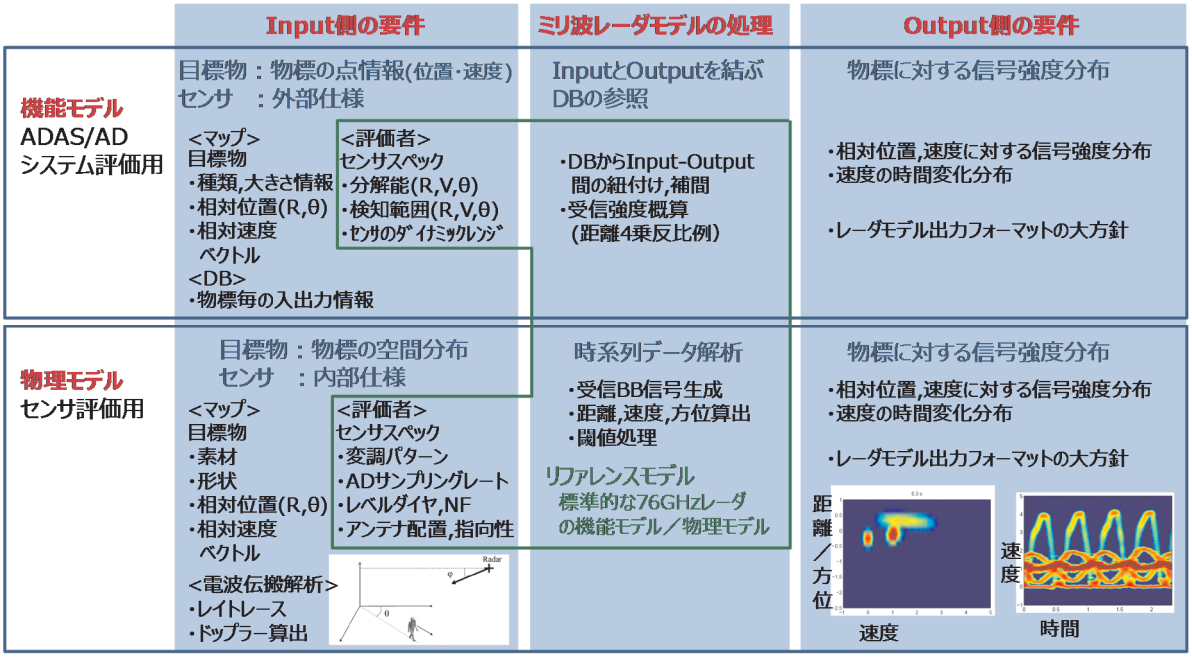


Figure 34 ミリ波レーダの入出力要件

機能モデルでは、外界モデルからの目標物の位置情報や、データベースからの目標物ごとの特性に応じた情報や、分解能などのセンサ仕様を入力情報とし、詳細な処理は行わず、目標物の位置情報に対応した信号強度分布を検知情報として出力することを想定する。

物理モデルでは、外界モデルから電波伝搬を考慮した情報や、センサの変調パターンなどを入力情報とし、高周波部と信号処理部で目標物の検知情報を算出し出力することを想定する。

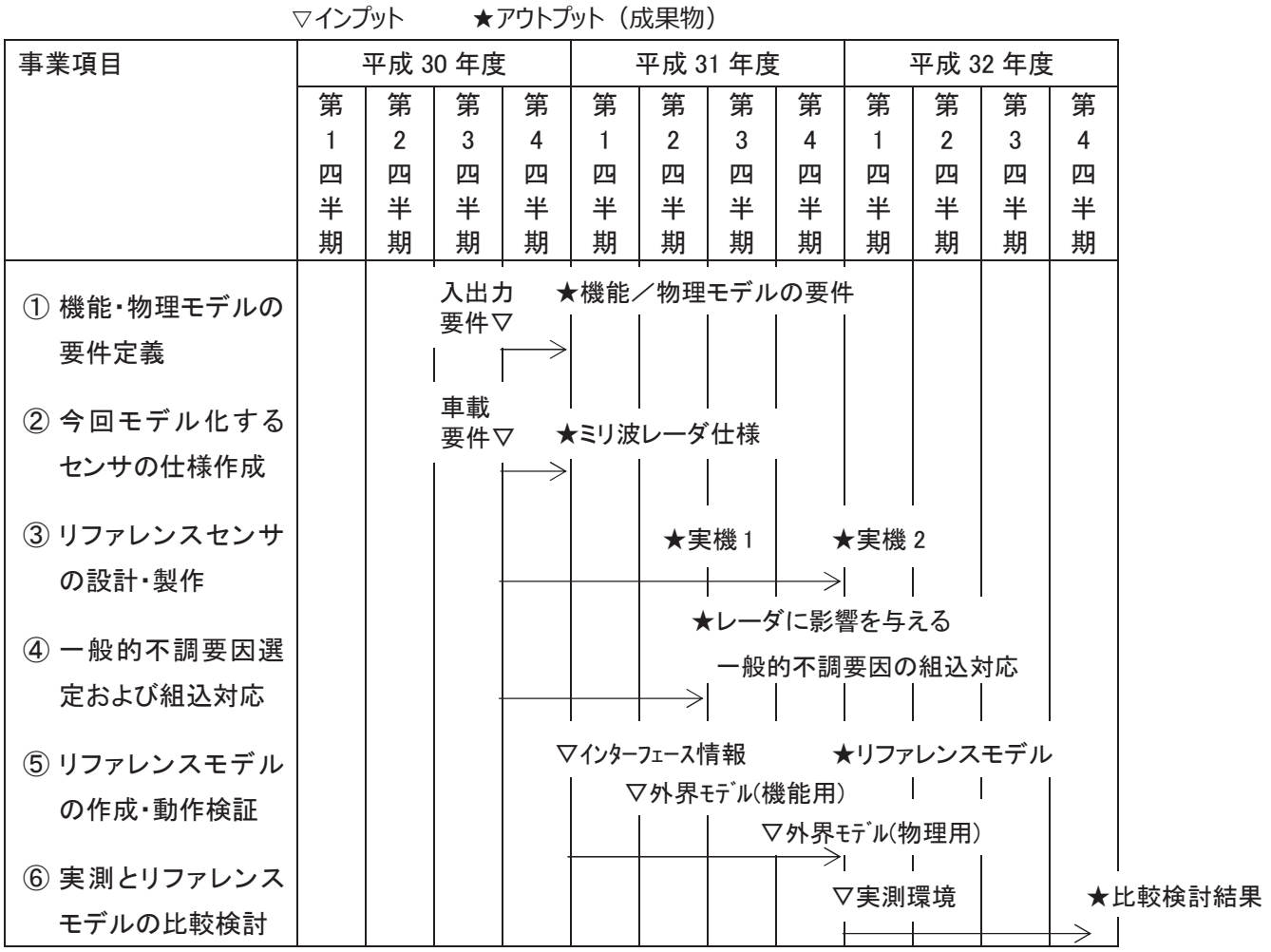
尚、不調要因を含む、目標物からの反射信号のモデリング結果を実測と比較するため、ミリ波レーダモデルの出力情報は、距離/速度/方位の信号強度分布とする。

(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

リファレンスモデルに限らず様々なミリ波レーダを仮想評価できるようセンサモデルの I/F を汎用化することを考えている。尚、その詳細は、入力となる A パート、出力先となる C パート関係者と協議の上決める。

これによりミリ波レーダモデルと認知・判断・操作アルゴリズムとの様々な組合せを検証できるようになる。

■ 実施計画



(1) 平成 30 年度の成果と次年度以降の計画(まとめ)

① 機能・物理モデルの要件定義

機能モデルの要件を以下のように定めた。

入力:相対距離、相対角度、相対速度、属性に関する物標情報をプラットフォームから受け取る

出力:相対距離、相対角度、相対距離、受信電力 (雑音電力より大きい受信強度の物標を選別)

物理モデルについては、アンテナを入力端とし、相対距離、相対角度、相対速度を出力とする。

次年度以降は、オープンプラットフォームでの動作検証をする。

② 今回モデル化するセンサの仕様作成

実機1のミリ波レーダボードとして、Texas Instruments 製 AWR1642boost を使用する。変調条件を選定し、センサの仕様を以下のように定めた。

最大検知距離:150m　　距離分解能:30cm

最大検知速度:±80km/h　速度分解能:0.3km/h　　総観測時間:23.5msec

次年度以降は、特許などの公知情報を調査するなどして、最大検知速度の改善手段を検討する。

③ リファレンスセンサの設計・製作

Texas Instruments 社製ミリ波レーダボード AWR1642BOOST とデータキャプチャボード DCA1000EVM を組合せ、Raw Data 出力を間断なく保存し、ソフトウェア上で処理して距離、速度、方位を算出できる環境を構築した。

次年度以降は、これらのボードを防水の筐体に収めて実機1とし、車載する。また、実機1より検知範囲の制約に自由度があるモジュール(実機2)を準備する。これらミリ波レーダの技適を取得し、各種評価を可能とする。

④ 一般的不調要因選定および組込対応

優先するシナリオ及び不調要因を選定した。不調要因はセンシングの課題となりやすい物を選定した。

シナリオ　:　自専道で先行車両に追従しながら別車両に追い越されるシーン

不調要因　:　案内標識やマンホールなどの上下方向の構造物、マルチパスを発生させる路側壁、空間減衰を生じる雨/雪

次年度以降は、選定結果を関係者に展開し、組み込み方法について協議する。

⑤ リファレンスモデルの作成・動作検証

次年度以降の計画として、③の実機に対応する、機能・物理モデルを作成する。①で定義したI/F 仕様に準拠したモデル仕様書を作成し、実装は外注業者に依頼する。作成したモデルを仮想評価環境に組込み、A パートで作成した外界モデルと連動させて動作を検証する。

比較時のプラットフォームは本プロジェクトで開発の DIVP を用い、D パート関係者と協議して検証する。

⑥ 実測とリファレンスモデルの比較検討

次年度以降の計画として、③で製作したミリ波レーダ実機を B4 パートに提供し、実測結果を取得する。⑤で作成したリファレンスモデルを使用した仮想評価結果を比較する。

比較時のプラットフォームは本プロジェクトで開発の DIVP を用い、D パート関係者と協議して検証する。

(2) 平成 30 年度の成果

①機能・物理モデルの要件定義

Figure 35 に機能モデルの動作を示す。入力として、相対距離、相対角度(azimuth/elevation)、相対速度、属性に関する物標情報をプラットフォームから受け取るものとする。モデル内部では 3 つの処理を行う。まず、距離減衰を求め、物標の属性を加味した受信強度を演算する。次に、雑音指数など受信回路特性から雑音電力を演算する。最後に、雑音電力より大きい受信強度となる物標に対して相対距離、相対角度、相対距離、受信電力を出力する。

Figure 36 に機能モデルに入力する物標の方位検知範囲を示す。機能モデルでの処理の前に、プラットフォームに FOV(Field of View)情報を送り、FOV 外の物標や陰になる物標は入力しないよう、プラットフォームで処理するものとする。

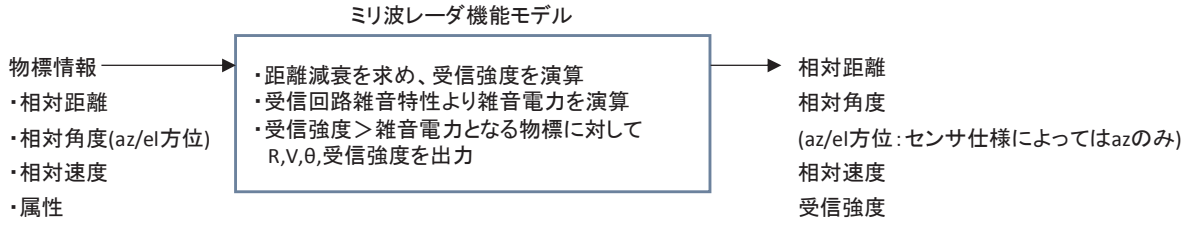


Figure 35 ミリ波レーダ機能モデルの動作

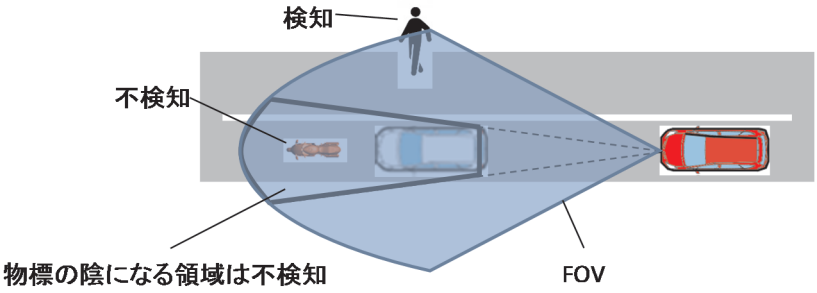


Figure 36 機能モデルの物標検知範囲

物理モデルについては、アンテナを入力端とし、相対距離、相対角度、相対速度を出力とするモデルを作成し、オープンプラットフォームでの動作検証をする予定である。

Figure 37 にオープンプラットフォームで動作検証をする物理モデルの構成とミリ波レーダ実機のブロック図を示す。物理モデルでは、まず、レイトレースの結果とミリ波レーダモデル自身に組み込まれたアンテナ/回路特性を受け、ベースバンド信号を生成する。ここで、信号をミリ波帯の信号として表現すると、演算量が膨大になるため、直接、ベースバンド信号として表現することとした。その後、距離/速度/方位算出と閾値処理を行う。このインターフェースは、②で後述する今回モデル化するセンサ実機の入出力と一致する。

様々なミリ波レーダを、仮想評価環境で評価するためには、実機と整合の取れたインターフェースの定義が必

要と考える。このような考え方も含め、インターフェースの標準化に向けて、インターフェースの設け方による仮想評価環境への影響について調査する予定である。

Figure 38 に相対速度信号を生成する際の課題を示す。近年の車載レーダ変調方式の主流である高速なチャープを繰り返す方式においては、相対速度によるドップラー周波数を検出するために、チャープ間の位相変化を検出する。そのため、物理現象をそのまま表現すると、チャープごとにレイトレースを実行する必要があり、演算量が膨大になる。それに対処するため、物標の相対速度をシステムから受け取り、ドップラー信号を生成することを検討する。1 回反射であれば、反射点との相対速度から容易に生成できるが、マルチパスに対しては複数の反射点間の相対速度から算出する方法を考案する必要がある。

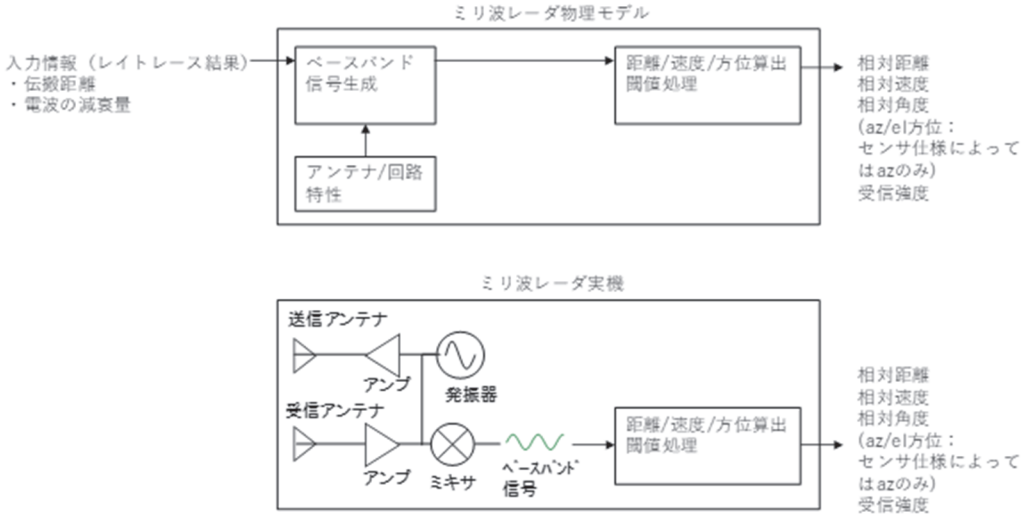


Figure 37　ミリ波レーダ物理モデルの動作

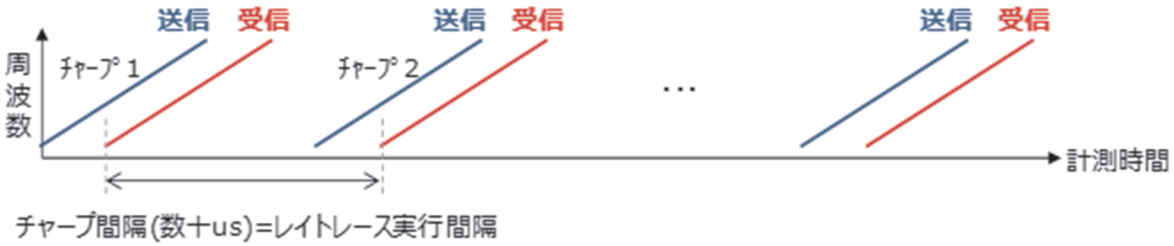


Figure 38 相対速度信号を生成する際の課題

②今回モデル化するセンサの仕様作成

本プロジェクトで取り扱うシナリオの評価が可能となるように、センサの仕様を検討・作成した。

実機1に使用する市販ミリ波レーダボード Texas Instruments 製 AWR1642boost において、このセンサが各評価シナリオに対して網羅的に適用することが可能であるかどうか、実測を用いて検証を行った。

基本的なチャープ信号を用いてセンシングを行う時、速度分解能（$\propto^{-1}$ 総観測時間）を固定すると、信号処理に使われるデータ点数が概ね一定となるため、最大検知距離は SNR により制限される。この SNR による最大検

知距離の制限は、実測結果を基に計算した。Figure 39 に AWR1642boost のレーダ動作における SNR 実測の様子を示す。

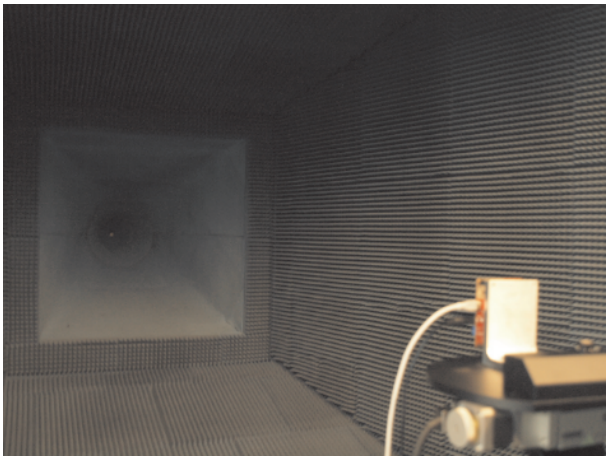


Figure 39　SNR 実測の様子(電波暗室内における実測の様子)

SNR による制限とは別に、変調条件によって最大検知距離・最大検知速度は制限される。距離分解能(∝$^{-1}$サンプリング期間の周波数変化)を固定すると、最大検知距離(∝サンプリング期間)と最大検知速度(∝総観測時間÷サンプリング期間)はトレードオフの関係としてプロットすることができる。

以上の実測結果と机上検討の結果より、Figure 40 に示す最大検知距離と最大検知速度のチューニング可能範囲を求め、センサ仕様の選定を行った。

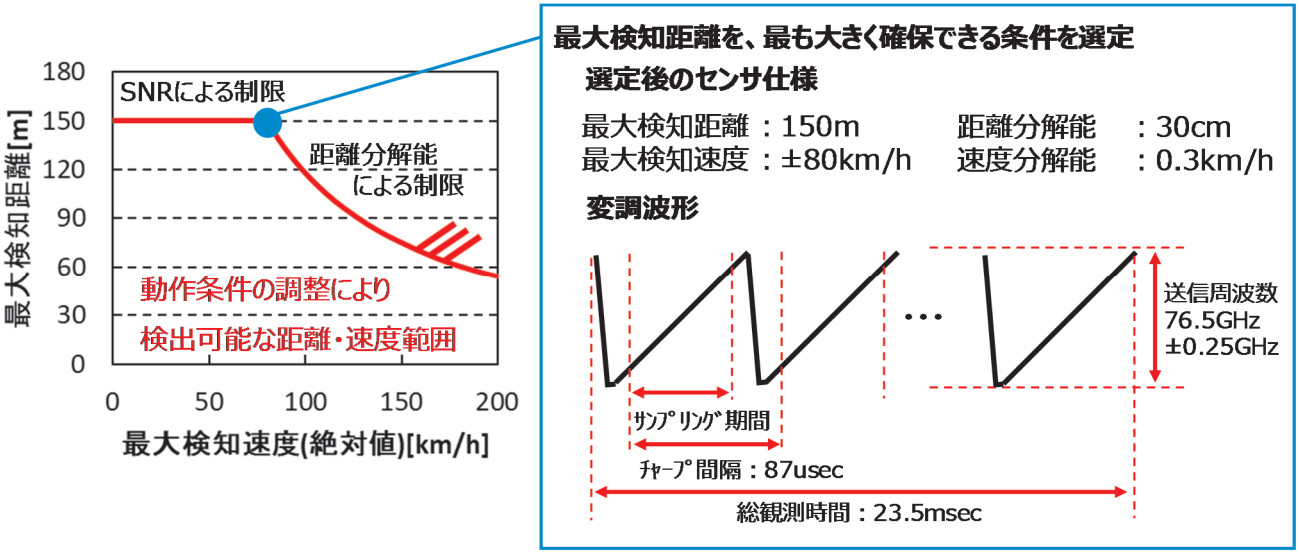


Figure 40　WR1642boost のチューニング可能範囲とセンサ仕様の選定

距離分解能と速度分解能、最大検知距離を確保すると、最大検知速度が不足するため、あらゆる評価シナリオに対して網羅的に検知することは難しいという結果を得た。基本的なチャープ信号を用いたセンシングの調整範囲で最大検知速度を増加させるためには、距離分解能を低くする必要がある。特許などの公知情報には、変調波形に他の変化を与え、別の信号処理を行うことにより、最大検知速度を増やす手段が言及されているため、使用を検討する。

③リファレンスセンサの設計・製作

ミリ波レーダボード AWR1642BOOST において、レーダ動作の信号を間断なく保存するためには、データのキャプチャー環境を用意する必要がある。

今回は、キャプチャー環境として、キャプチャーモジュール DCA1000EVM を接続した。これにより、LAN ケーブルを介して、ADC の Raw Data をバイナリファイルとしてパソコンに保存できる。Figure 41 にキャプチャ環境構築後の動作テストの様子を示す。

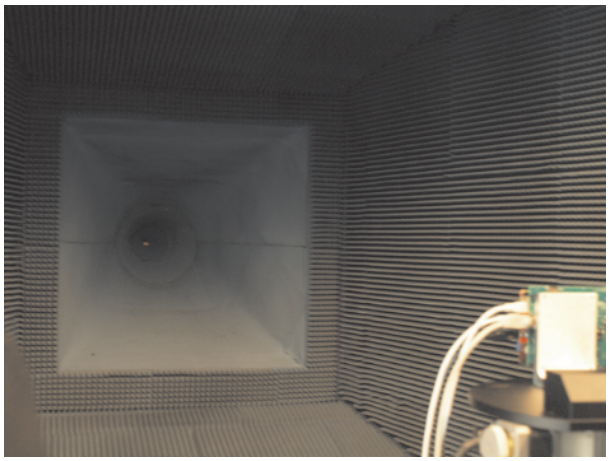


Figure 41 キャプチャ環境の構築 （電波暗室内における動作テストの様子）

Raw Data 出力のバイナリファイルをソフトウェア上で読み取り、信号処理することで、測定対象の距離、速度、方位を算出することができることを確認した。Figure 42 に距離、速度の算出結果を示す。

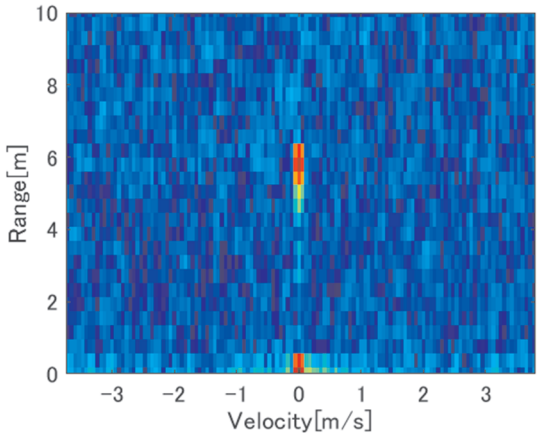


Figure 42 距離・速度の算出結果 （ターゲット位置：距離 6m、方位 10deg）

ミリ波レーダボード AWR1642BOOST とキャプチャーモジュール DCA1000EVM の組み合わせにより、問題無くキャプチャー動作ができることが確認できた。

今後はこれらのボードを防水の筐体に収めて実機1とし、車載する。また、実機1より検知範囲の制約に自由度があるモジュール(実機2)を準備する。また、これらミリ波レーダの技適（技術基準適合証明、もしくは技術基準適合認定）を取得し、各種評価を可能とする。

④一般的不調要因選定および組込対応

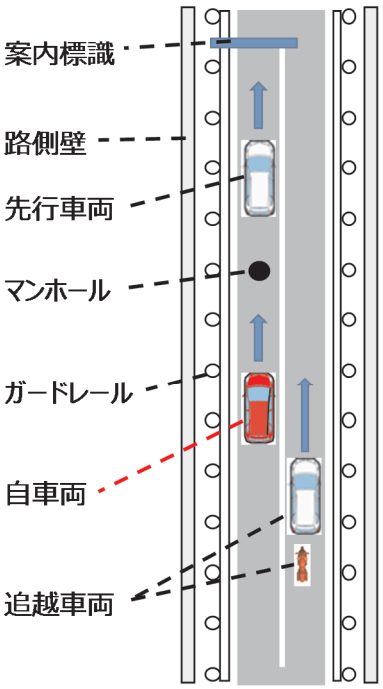
Figure 43 に優先するシナリオ及び不調要因を示す。ミリ波レーダのセンシングにおいて課題となる状況は、受信強度が低下する状況、マルチパスによりゴーストが発生する状況[1]、分解能が低いために誤認識が起こる状況[2]、ドップラー信号の検出誤りが起こる状況である[3]。これらに対して、図中に示す物標を選定した。

これらのシミュレーションを可能にするため、 Figure 44 に示す再起反射/鏡面反射/拡散反射/拡散透過特性を実測し、シミュレーションに組込む必要がある。A-part/D-part と連携し、今後、組み込みを行う。

[1] US Patent, US 6,661,370

[2] 小嶋, 小川, 遠野, 遠藤, 大村, “マツダの先進安全技術,” Motor Ring No.36 2013 自動車技術会

[3] Victor C. Chen et al., “Radar Micro-Doppler Signature,” The Institutio of Engineering and Technology



シナリオ

自専道で先行車両に追従しながら、
別車両に追い越される状況

物標

- 自車両(前方にミリ波レーダ搭載)
- 先行車両、追従車両(バイク含む)
- ガードレール
- 路面
- 路側壁
- 案内標識
- 雨,雪

評価事項

- 先行車両と追越車両からの反射
- タイヤ回転によるドップラー信号
- ガードレールのポールによる反射
- 路側壁からのマルチパス
- 案内標識からの反射
- 雨,雪による減衰量

課題となる状況	選定した不調要因
受信強度が低い対象物、または低下する状況	バイク, 雨,雪
マルチパスによりゴーストが発生する状況	路側壁
分解能が低いために誤認識が起こる状況	案内標識, マンホール
ドップラー信号の検出誤りが起こる状況	タイヤ

Figure 43 優先するシナリオ及び不調要因

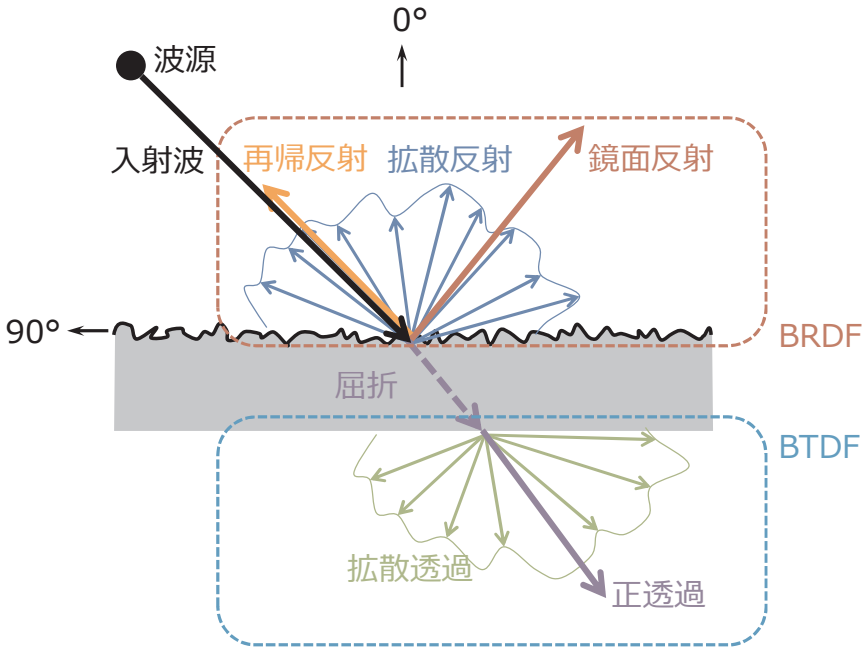


Figure 44 シミュレーション精度向上に必要な特性

⑶ 次年度以降の計画

① 機能・物理モデルの要件定義

オープンプラットフォームでの動作検証をする。

② 今回モデル化するセンサの仕様作成

特許などの公知情報を調査し、より高度な変調と信号処理を用いた最大検知速度を改善手段を検討する。

③ リファレンスセンサの設計・製作

Texas Instruments 社製ミリ波レーダボード AWR1642BOOST とデータキャプチャーモジュール DCA1000EVM を防水の筐体に収めて実機1とし、車載する。また、実機1より検知範囲の制約に自由度があるモジュール(実機2)を準備する。また、これらミリ波レーダの技適（技術基準適合証明、もしくは技術基準適合認定）を取得し、各種評価を可能とする。

④ 一般的不調要因選定および組込対応

選定した不調要因を順次、関係者に展開し、組み込み方法について協議する。

⑤ リファレンスモデルの作成・動作検証

③の実機に対応する、機能・物理モデルを作成する。①で定義した I/F 仕様に準拠したモデル仕様書を作成し、実装は外注業者に依頼する。作成したモデルを仮想評価環境に組込み、A パートで作成した外界モデルと連動させて動作を検証する。

比較時のプラットフォームは本プロジェクトで開発の DIVP を用い、D パート関係者と協議して検証する。

⑥ 実測とリファレンスモデルの比較検討 （担当：株式会社デンソー）

③で製作したミリ波レーダ実機を B4 パートに提供し、実測結果を取得する。⑤で作成したリファレンスモデルを使用した仮想評価結果を比較する。

比較時のプラットフォームは本プロジェクトで開発の DIVP を用い、D パート関係者と協議して検証する。

5. 2. 4 「B3. LiDAR モデル構築」(パイオニア株式会社)

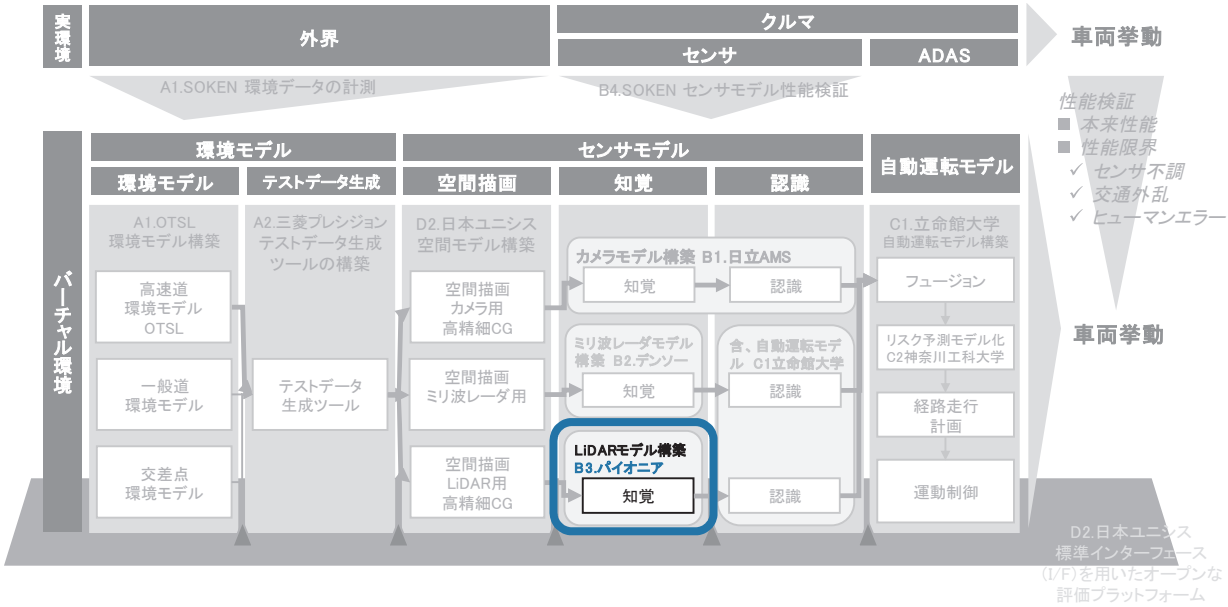


Figure 45 B3 研究の位置付け

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い。
出力例として、Figure 46 、 Figure 47 、 Figure 48 を示す。

Figure 46 は仮想空間のカメラ画像、 Figure 47 は当社 LiDAR 仕様をベースに FOV、解像度、測距レンジをシミュレートした場合に出力される点群になる。この LiDAR モデルでは、FOV、測距レンジ内に存在する物体は必ず検知できるモデルとなっている。太陽光や物体の反射率等との物理現象は再現していないため、実際の LiDAR 性能とは異なるが演算量が少なくリアルタイムでも問題なく動作するといったメリットがある。

一方、 Figure 48 は実際の LiDAR が出力する点群に近づけるため、太陽光によるノイズを加味し、信号処理の影響を考慮した点群を出力するモデルである。 Figure 47 のモデルよりも演算量は増加するが、実際の LiDAR により近い点群が出力される。

Figure 46 仮想空間でのカメラ画像[1]

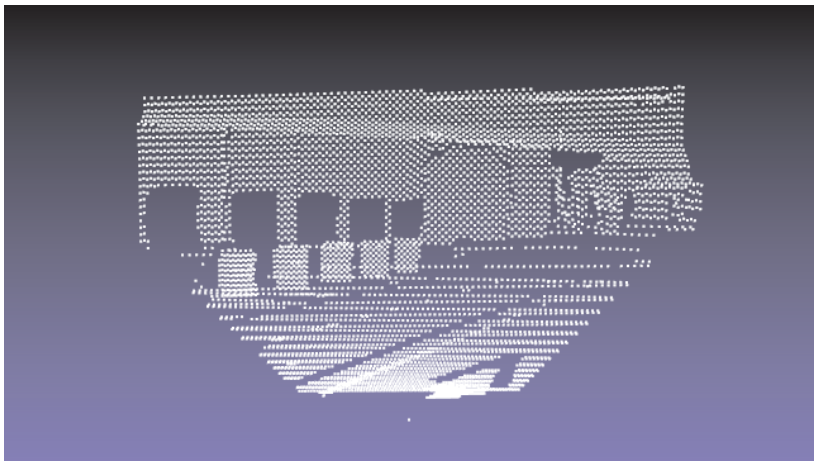


Figure 47 理想条件/環境における当社 LiDAR の出力点群シミュレーション結果

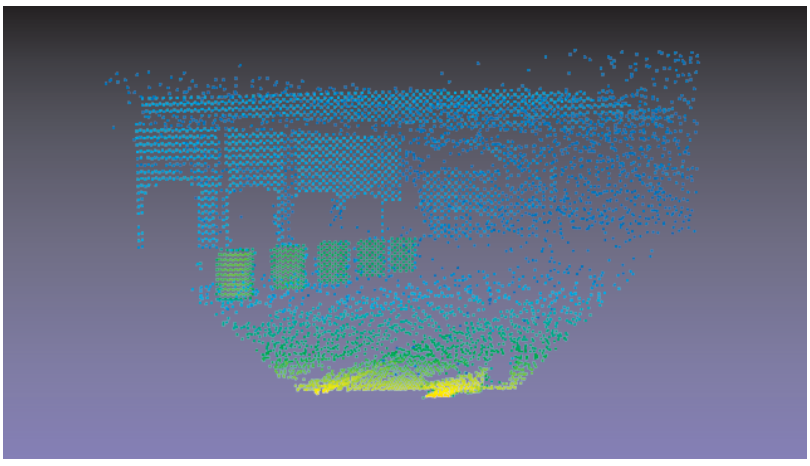


Figure 48 太陽光の影響を加味した当社 LiDAR の出力点群シミュレーション結果

■ 事業目的

[1] "Japanese Naniwa City" © ZENRIN (Licensed under CC BY 4.0)
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

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を可能とすることで、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。 Figure 49 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。

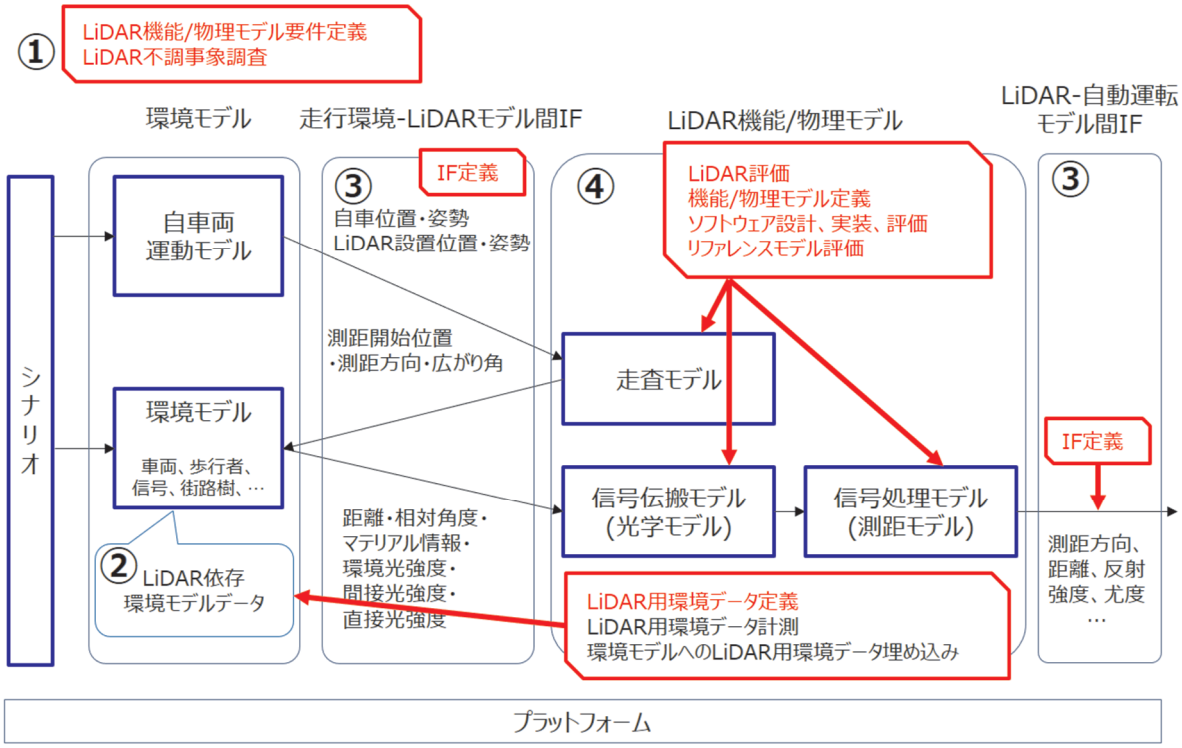


Figure 49 LiDAR リファレンスモデルを構成する研究開発要素とその関係

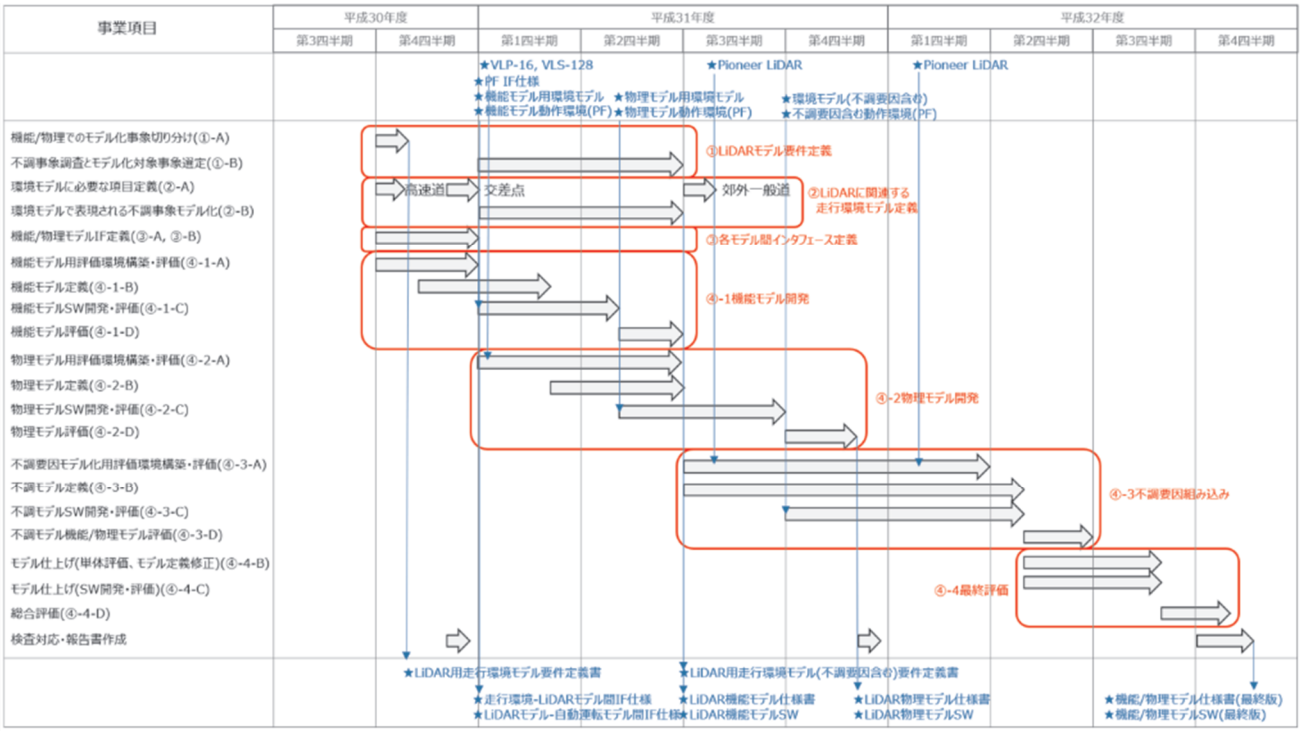
① LiDAR 機能/物理モデルにて再現(モデル化)すべき事象の選定、LiDAR 不調を引き起こす事象の調査とモデル化すべき LiDAR 不調事象の選定など、LiDAR 機能/物理モデルにてモデル化すべき事象を定義する

② 仮想空間において実際の LiDAR の特性を表現するにあたり、LiDAR 機能/物理モデルに必要とされる走行環境モデルデータを定義する。また、LiDAR の不調を引き起こす事象についても定義する。

③ 環境走行モデルと LiDAR 機能/物理モデル間の I/F と LiDAR 機能/物理モデルと自動運転モデル間の I/F を定義する。各 I/F については機能モデル、物理モデル間でできる限り共通化を目指し、走行環境モデルと自動運転モデルからはシームレスに連携できる I/F を定義する。同時に LiDAR モデルへの各 I/F を標準化することで、様々な LiDAR を評価できるようにする。

④ LiDAR の光学・物理・電気特性を考慮した LiDAR の機能/物理モデルを定義する。モデル定義については、入手可能な車両搭載用途の LiDAR の単体性能評価を実施することで、できる限り現実の LiDAR で発生する現象が再現可能なモデルの開発を目指す。またここで定義された LiDAR の機能/物理モデルをベースとして、評価プラットフォーム上で動作するリファレンスモデルを実装する。リファレンスモデルは、現実に入手可能な LiDAR との比較検証を行うことで評価する。

■ 実施計画



(1) 平成 30 年度の成果と次年度以降の計画（まとめ）

実施計画書にて本年度実施予定の項目は以下である。

① LiDAR モデル要件定義

A） LiDAR 機能/物理モデルでモデル化する事象の切り分け

② LiDAR モデルに関連する走行環境モデルデータ定義

A） LiDAR 視点で各走行シナリオ(高速道、交差点)においてモデル化すべき物標の選定と実装の優先順位付け、走行環境モデルで表現すべき項目の定義（平成 31 年度以降も継続）

③ 各モデル間 I/F の定義

A） 走行環境モデルと LiDAR 機能/物理モデル間の I/F（平成 31 年度以降も継続）

B） LiDAR 機能/物理モデルと自動運転モデル間の I/F（平成 31 年度以降も継続）

④ LiDAR モデル開発。

A） LiDAR 評価(LiDAR 評価手法検討、評価環境構築、評価）（平成 31 年度以降も継続）

B） モデル化(LiDAR 機能モデル定義)（平成 31 年度以降も継続）

本報告書では平成 31 年 2 月末時点において終了している以下項目を成果として報告する。

① LiDAR モデル要件定義

A） LiDAR 機能/物理モデルでモデル化する事象の切り分け

② LiDAR モデルに関連する走行環境モデルデータ定義

A） LiDAR 視点で各走行シナリオ(高速道)においてモデル化すべき物標の選定と実装の優先順位付け、走行環境モデルで表現すべき項目の定義

③ 各モデル間 I/F の定義

A） 走行環境モデルと LiDAR 機能モデル間の I/F 要件定義

①の LiDAR モデル要件定義については、LiDAR 機能/物理モデルでモデル化する事象切り分けを行なう。信号伝搬モデル（光学モデル）、走査モデルの物理的イメージを示しモデル化すべきパラメータを抽出し、機能モデル／物理モデル化する事象切り分けを A_{IFOV}、処理単位、物標反射特性に対し定義する。

②の LiDAR モデルに関連する走行環境モデルデータ定義については、物標として測定すべき特性および測定方法と物標の構成を明確にし高速道路物標モデルを定義する。

③の各モデル間 I/F の定義については、機能モデルにおける「A.走行環境モデル」「D.自動運転バリデーションプラットフォーム」と LiDAR モデルのインターフェースについて、LiDAR モデルを軸とした観点で詳細に述べる。

上記において平成 31 年度以降も継続と表記した項目は実施計画を変更した上で次年度以降も実施する。

(2) 平成 30 年度の成果

①LiDAR モデル要件定義

LiDAR 機能/物理モデルにて再現(モデル化)すべき事象の切り分け、LiDAR 不調を引き起こす事象の調査とモデル化すべき LiDAR 不調事象の選定など、LiDAR 機能/物理モデルにてモデル化すべき事象を定義する。

A) LiDAR 機能/物理モデルでモデル化する事象の切り分け

A)-1 モデル要件定義方針・概要

LiDAR 機能/物理モデルでモデル化する事象切り分けの目的は、5.2.1 事業概要で掲げられ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)、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)それぞれに応じた LiDAR モデルの機能要件をまとめることである。不調要因に対する機能/物理モデルは次年度以降に検討するため、今回の報告には含まない。

機能/物理モデル化事象の切り分けは以下の方針に従い検討・定義する

- レイトレーシング(RayTracing)の概念を基本とし検討する
- 機能モデルは Closed Loop シミュレーションを実現するために LiDAR 原理にもとづき
- 物理的な現象を簡略化し要件を定める。
- 物理モデルでは、Open Loop シミュレーションを前提とし、演算量が許容される範囲において実環境に近い要件を定める。
- モデル化する光波長は現在の 3D-LiDAR 製品の主流となっている 905nm とする。

以下に上記の方針に従い切り分けをおこなった結果を記す。詳細や語句の説明は A)-2 以降に記す。

Table 16 機能モデル・物理モデル化事象切り分け

	機能モデル	物理モデル
AIFOV (フットプリント)	点	面
反射面積	点(フットプリント)反射率	フットプリント領域の面積と 物標反射特性を考慮し算出
透過特性	全透過とし屈折は考慮しない	物標モデルを反映
鏡面反射	入射角がゼロのときのみ扱う	物標モデルを反映
多重反射	考慮しない	考慮する
伝搬減衰	フレーム内の全ての照射ビームが 同一の影響を受ける	各照射ビーム毎に考慮する
背景光	フレーム内は均一の影響を受ける	各フットプリント毎に考慮する

A)-2 LiDAR 測距原理（概要）

本節では LiDAR のモデル化にあたり、LiDAR の測距原理の概要を記す。これは、モデル化する要件を明確にするためである。よって、本説明では概要を記すにとどめ技術詳細までは記さない。

記載する原理概要は、LiDAR 測距方式の一つである TOF 方式概要、“Figure 49 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”内に記載されている④LiDAR 機能/物理モデル信号伝搬モデル（光学モデル）、走査モデルに関してとする。

TOF 方式概要

LiDAR のモデル化にあたり、現在の3D-LiDAR の多くの機種で使用されている TOF（Time-Of-Flight）方式 LiDAR 測距の原理を記す。

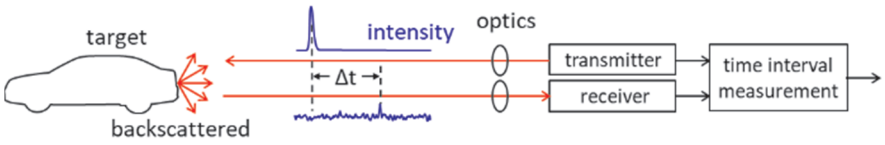


Figure 50 .TOF 方式イメージ

Target: 物標
Backscattered: 後方散乱光（反射光）
Transmitter :送信機
Receiver :受信機
Time interval measurement : 時間間隔測定（時間→距離換算）

TOF方式はその名の通り送信された光が物標（Target）で反射され戻ってくるまでの飛行時間から距離を算出する方式で光が大気中を一定の速度で伝搬するという特性を利用している。

信号伝搬モデル（光学モデル）

Figure 51 の Transmiter から Receiver までの光路が Figure 49 の④内に記載されている光学モデルとなる。

光学モデルは以下のように定義される。本モデルでは走査部は含まない。

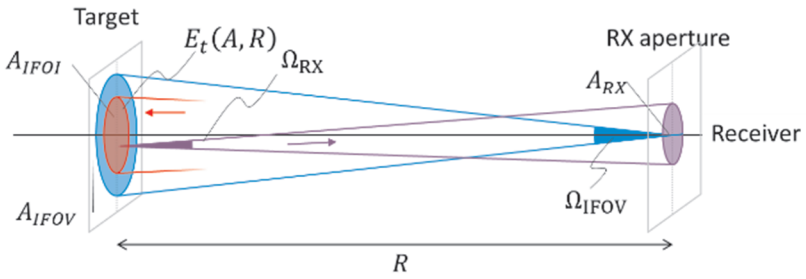


Figure 51 LiDAR 光学モデルイメージ

A_{IFOI} 送信光が照射される面積 ・フットプリント[m²]

A_{IFOV}	受信視野に入る物標の面積 ・瞬時視野[m²]
Ω_{RX}	受信レンズの受光角（立体角）[sr]
Ω_{IFOV}	受信視野角（立体角）[sr]
A_{RX}	受信開口面積 [m²]
R	物標面への距離 [m]
$E_t(A,R)$	物標面上での照度[W/m²]

上記モデルイメージ図において受信光パワーPr（R）と送信光パワーPt の関係は以下となる。

$$P_r(R) = \frac{\rho}{\pi}\int_{A_{IFOV}(R)}\int_{\Omega_{RX}(R)} E_t(A,R)\,dA\,d\Omega$$

$$= \frac{\rho}{\pi}\frac{A_{RX}}{R^2}P_t$$

ρ	物標反射率 ただし、反射特性は Rambert 反射体とする
P_t	送信光パワー

LiDAR 性能とされる検出率や、測距性能は、S/N（Signal/Noise）が高い程向上することは既知であることから、上記した光学モデルにおいて LiDAR の性能は Target 反射率 ρ、距離 R の 2 乗で除算されることから算出される光の拡散による伝搬減衰に比例することが明らかである。

一方、LiDAR が実際に使用される屋外では、上記した光学モデルに LiDAR からのは送信光のみでなく、太陽光に代表される光源から Target に照射され、その反射光（以下背景光と記す）の受光パワーPb を受信する。

この Pb は受光パワーPr（R）に対し、ノイズ成分となる。以下に太陽からの背景光を含めた光学モデルを記す。

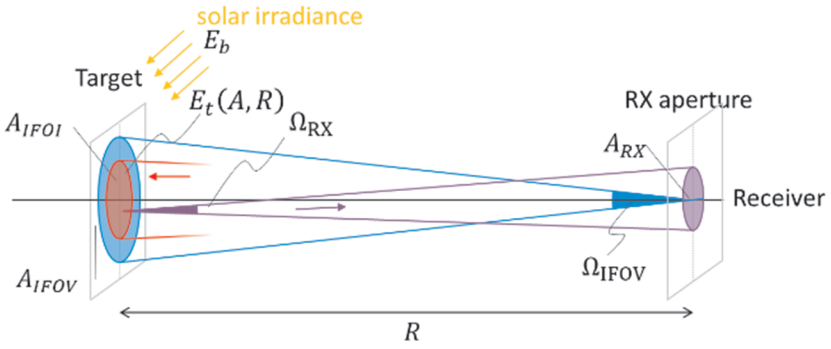


Figure 52 背景光（太陽）がある場合の LiDAR 光学モデルイメージ

背景光は以下のように算出される

$$P_b = \frac{\rho}{\pi}\int_{A_{IFOV}(R)}\int_{\Omega_{RX}(R)} E_b dA d\Omega$$
$$= \frac{\rho}{\pi}\frac{A_{RX}}{R^2}R^2\Omega_{IFOV}E_b$$
$$= \frac{\rho}{\pi}A_{RX}\Omega_{IFOV}E_b$$

E_b　　太陽からの放射照度

上記から、LiDAR のノイズとなる背景光パワーPb は放射照度 Eb、反射率 ρ、受信視野角の大きさ Ω_{FOV} に比例する。

背景光パワーPb は受信光 Pr に対するノイズとり、Pb、Pr と S/N の関係は次式のようにあらわされる

$$S/N \propto \frac{P_r^2}{P_b}$$

以上の関係から LiDAR モデルには Pb、Pr に影響する物標反射特性、伝搬減衰、背景光パワーのモデル化が必須となる。

走査モデル

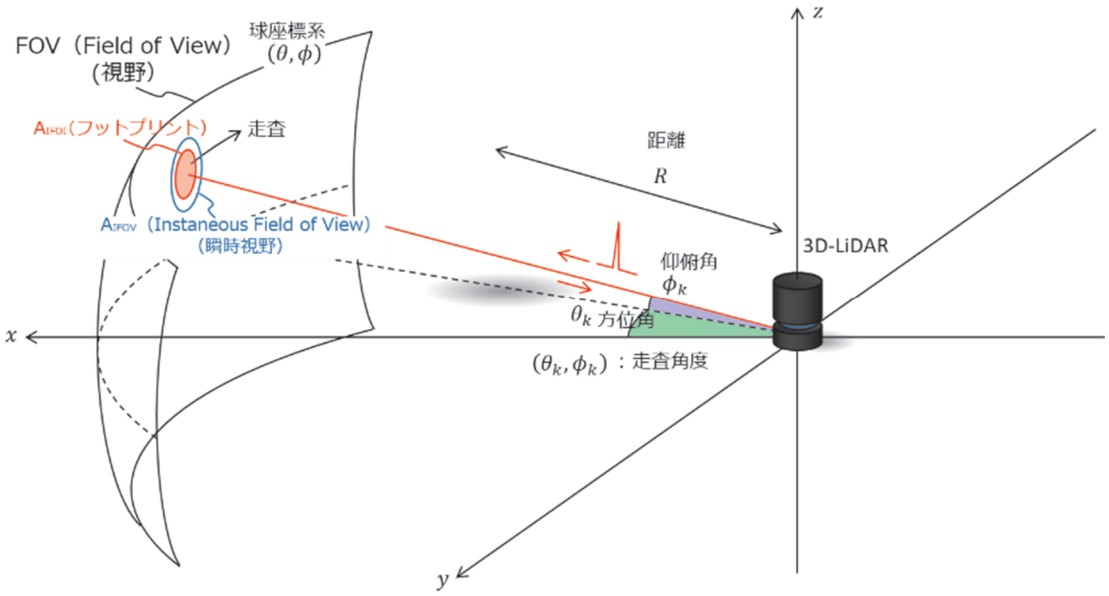


Figure 53　走査モデルイメージ

3D−LiDAR は光学モデルで記した A_{IFOV} を方位角 θ_k 仰角 ϕ_k で走査させ、視野（FOV）内にある物標を検出、測距する。

LiDAR は物標の検出位置を光が送信される走査角度（θ_k、ϕ_k）とその光受信時間差から算出される距離 R により求め出力するセンサである。

A-3） モデル要件定義

A-1)に記した要件定義検討および A-2)に記した LiDAR 原理概要からモデル要件定義の検討をおこなう。基本となる LiDAR の処理は走査角（θ_k、ϕ_k）で光送信、受信する光学モデルとなる。

物理モデル

物理モデルでは、実環境に従いシミュレーションをおこなうため上記の単位毎にシミュレーションを実施する。送信光は光学モデルに示したように立体角で広がるため、物標に当たる面を考慮しモデル化されることとなる。ただし、光の広がりは、レイトレーシングの概念を基本とするため、光線の束として扱うことを想定する。

LiDAR は A-2）で記述したように、送信光と物標で反射される光の受光時間差で求められ、検出率、測距精度は S/N に大きく関係する。

S/N に関与するパラメータは物標反射率、距離、受光立体角、および太陽に代表される他光源からの反射光量（背景光）である。よってこれらが光学モデル化するパラメータとなる。

機能モデル

機能モデルは Closed Loop シミュレーションを実現するため、以下を物理モデルから簡略化する。

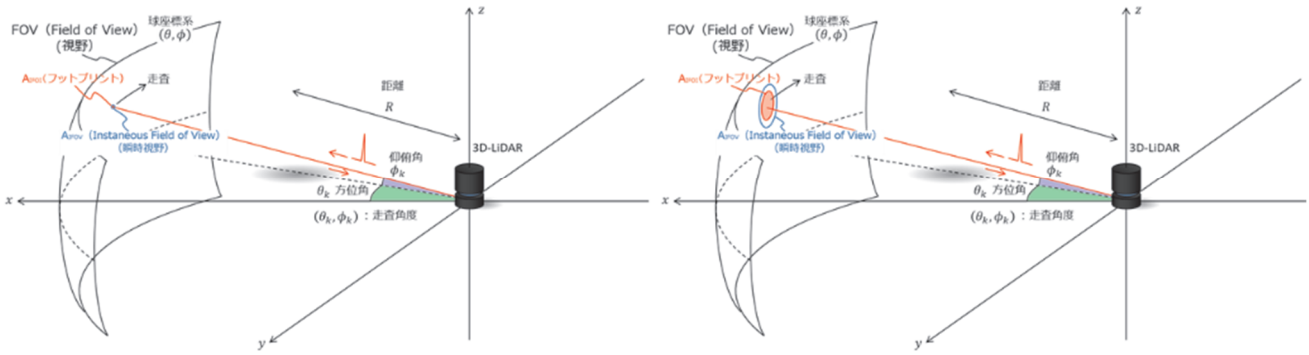
① 処理単位を光送信から受信までから視野（FOV）単位とする
② 照射面積 A_{IFOI} を点として扱う A_{IFOV} は A_{IFOI} と一致するものとして扱う。
光は線として扱い物標へは面でなく点として照射される。
空間伝搬における広がり（立体角）は考慮しない。ただし、伝搬による減衰は考慮する。
③ 反射特性を複雑化する透過特性、マルチパスは考慮しない。鏡面反射は入射角=0 のときのみ考慮する。入射角の定義は下記する。

これらを物理モデルから簡略化し機能モデルとする。

上記した物理モデル、機能モデルの差異を下記の表に記すとともに、走査モデル、物標に対する A_{IFOV} 差異を記し、さらに反射特性を補足する。

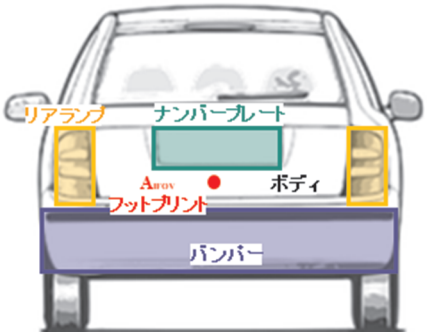
Table 17　機能モデル・物理モデル化事象切り分け

	機能モデル	物理モデル
AIFOV（フットプリント）	点	面
反射面積	点（フットプリント）反射率	フットプリント領域の面積と物標反射特性を考慮し算出
透過特性	全透過とし屈折は考慮しない	物標モデルを反映
鏡面反射	入射角がゼロのときのみ扱う	物標モデルを反映
多重反射	考慮しない	考慮する
伝搬減衰	フレーム内の全ての照射ビームが同一の影響を受ける	各照射ビーム毎に考慮する
背景光	フレーム内は均一の影響を受ける	各フットプリント毎に考慮する

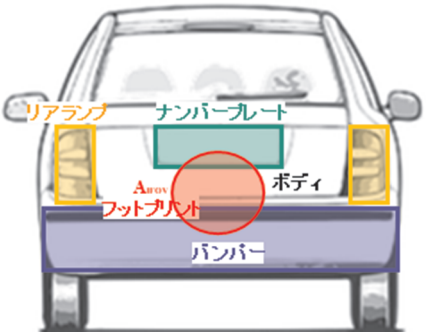


機能モデル AIFOV は点　　物理モデル　AIFOV は面

Figure 54　機能モデル/物理モデル　走査モデル再イメージ



機能モデルはフットプリント（点）の
ボディの反射率のみ考慮



物理モデルはナンバープレート、ボディ、
バンパーの反射率と AIFOI 内面積を考慮

Figure 55　機能モデル／物理モデル　物標に対する AIFOV 差異イメージ

物標反射特性

物標反射特性イメージを以下に記す

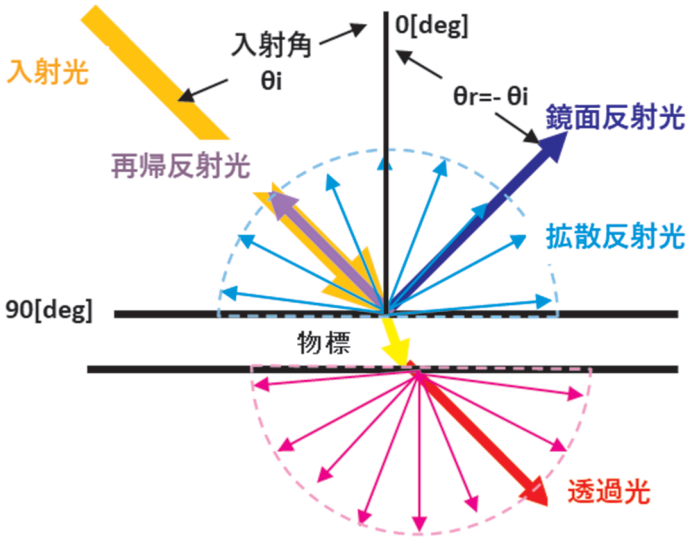


Figure 56　反射特性イメージ

再帰反射光	：	入射方向への反射
透過光	：	物標を透過する光
拡散光	：	入射角に対し無指向に反射される光
鏡面反射光	：	物標表面の入射角 θ に対し θ(=$-\theta$)で反射される光

A-4） まとめ

A-1)に記した方針に従い LiDAR 機能/物理モデルでモデル化する事象切り分けを行った。

信号伝搬モデル（光学モデル）、走査モデルの物理的イメージを示しモデル化すべきパラメータを抽出し、機能モデル／物理モデル化する事象切り分けを A_{IFOV}、処理単位、物標反射特性に対し定義した。

②LiDAR モデルに関連する走行環境モデルデータ定義

仮想空間において実際の LiDAR の特性を表現するにあたり、LiDAR 機能/物理モデルに必要とされる項目で、走行環境モデル側で表現するべき項目を定義する。

A)　LiDAR 視点で各走行シナリオ(高速道)においてモデル化すべき物標の選定と実装の優先順位付け、走行環境モデルで表現すべき項目の定義

A-1）LiDAR モデルに関する走行環境モデル定義概要

本節では以下を報告として記す。

- 測定すべき特性および測定方法

  LiDAR モデル要件定義で記した反射特性を再掲示し記す

- 物標モデル構成

  物標構成物それぞれの反射特性と A_{IFOI}、照射面との関係を記す

・ 高速道路物標選定

LiDAR 視点でモデル化する高速道路物標を選定する。

ただし、本節で報告する内容は LiDAR 視点で記述をおこなわれているため測定の難度や工数を考慮し定めたものではない。また、選定されるべき物標は C.パート自動運転モデルの構築で必要とされる物標と整合されていないことを留意していただきたい。上記は、今後他のセンサやブロックと整合を図りアップデートすることとする。

A-2） 測定すべき特性および測定方法

①LiDAR モデル要件定義で記したように、LiDAR は光送信時の走査角（θ_k、ϕ_k）と、送信光と物標からの反射光受信時間差から算出される距離 R がセンサ出力となる。

走査角（θ_k、ϕ_k）は LiDAR 内部の情報であることから物標による影響は受けないが、距離 R は物標からの反射光を受信し算出され S/N が高い方が検出率、測距精度とも向上する。

よって、物標の反射特性が重要な測定対象となる。

次に、①LiDAR モデル要件定義で掲示した Figure 56 より入射光量に対する下記の 4 つの特性を含む反射・透過特性を求める必要がある。

再帰反射率
透過光率
拡散反射率
鏡面反射率

これらは各物標を構成するパーツに対して測定する必要がある。

物標を構成するパーツに対する考えは次項で記す。

上記の特性を測定する方法として反射光を測定する BRDF（Bidirectional Reflectance Distribution Function）測定法と透過光を測定する BTDF（Bidirectional Transmittance Distribution Function）測定法を推奨するが、上記 4 特性が測定できるのであれば、測定法には拘らない。

また、BRDF 測定法、BTDF 測定法は一般的な測定法のため具体的な方法には触れない事とする。

次に、測定条件を記す。

光波長	905nm
測定入射角範囲	0 ～ 90 degree
測定角度分解能	1 degree （入射角 0 ～ 15 degree）
	線形補間が有効となる角度ステップ （入射角 0 ～ 15 degree）

※測定分解能は初期測定の目安とする。これは測定対象により、その反射特性は大きく異なるため、一義的に決めることが困難なためである。

一般的に物標は鏡面反射特性を持つことから入射角 0 ～ 15 degree において反射特性が大きく変化することが想定される。しかし無指向性反射特性を持つ場合、入射角に依存せず、ほぼ一定の反射特性を示す。

よって、BRDF 測定法や BTDF 測定法で機械的に 1degree ステップで測定することが好ましい方法と思われるが、計測時間が著しくかかるなど不都合も生じる。よって、測定時の分解能に関しては測定結果が線形補間ができる分解能とし都度調整しながらの測

定が現実的であると想定する。

A-3） 物標モデル構成

①LiDAR モデル要件定義の Figure 55 で示したように、物理モデルでは AIFOI が面となるため、その照射面が異なった素材にまたがる場合、それぞれの反射特性の影響を受けることは自明である。よって物標モデルは異なった素材ごとに測定をおこない、それらを組合わせ構成する必要がある。例として車を以下に記す。

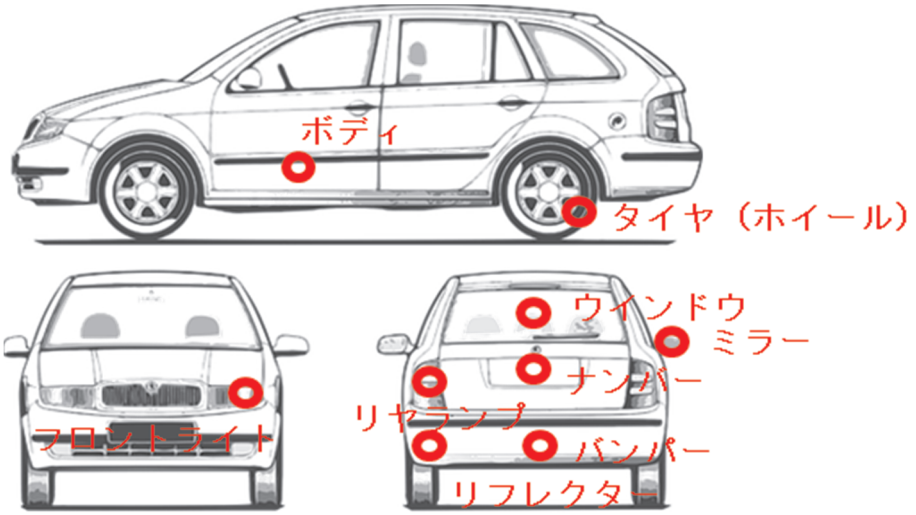


Figure 57 物標モデル構成例 （車）

上図では車を構成するパーツを列挙しそのそれぞれの素材に対する測定が必要なことを示している。例えば、車後方から見た場合、ウインドウ、ミラー、ナンバー、リヤランプ、バンパー、リフレクターなどである。物標と構成物の関係は車のみではなく、一様な素材から構成された物標を除き全ての物標に対し同様である。

次に測定すべき物標素材の条件を以下に定める

再帰反射素材　　1cm×1cm 以上の面積を持つ素材

再帰反射素材以外　2cm×2cm 以上の面積を持つ素材

上記とした理由を以下に記す。

再帰反射材は光の入射された方向に大きな反射光を返す素材である。反射光を受光し出力する LiDAR にとり検出、測距し易い素材であるといえる。よって、小さな面積ではあるが 1cm×1cm 以上の面積を持つ素材の測定、モデル化が必要と考える。

再帰性反射材以外としては、人間の肌が露出する面積を想定している。例えば手の甲の寸法に対し十分なマージンを想定している。（手幅約 75mm）これらの基準は今後実際に使用されるアプリケーション用途などにより検出する対象や精度が変わることが想定され、それに合わせ見直しが必要であると考えられる。

※ 手幅データは国立研究開発法人産業技術総合研究所人間情報研究部門デジタルヒューマン研究グループが公開している情報を参照した。

上記は LiDAR 視点にもとづき検討した内容であるため、実際には A 走行環境モデルと整合をとりアップデートする。

A-4） 高速道路物標定義

LiDAR 視点から高速道路物標を定義するために、最低限必要な物標を優先とし選定した。これらの物標に対し先に記した測定をおこなうことを提案する。

また LiDAR が検出、測距に有利な物標という視点からも選定を行なっている。

以下に選定の優先順位付けを記す

1. 高速道路で最低限必要とされる物標
2. 車（普通乗用車）
3. 道路構造物（LiDAR が検出・測距しやすい構造物）
4. 大型車両・オートバイ

上記したそれぞれの区分け内においても優先順位付けをする。また上記以外にも落下物など考えられるが不調要因に含まれるため後日検討を行う不調事象環境モデルで選定をおこなう。

以下に選定した物標を示す。

1. 高速道路で最低限必要とされる物標

高速道路で最低限必要とされる物標とその優先順位を以下に記す。

Table 18　高速道路で最低限必要とされる物

優先順位	物標	備考
1	路面（アスファルト）	都市部
1	白線	本線
1		路肩
2		分離
2		案内（文字）
2		案内（矢印）
3	黄色線	追越禁止

路面には撥水性舗装、親水性舗装など複数種類の舗装があるが、
ここでは詳細な指定はおこなわず都市部で使用されている舗装の一つを
選定すればよいと考えている。

2. 車（普通乗用車）

Table 19　車（普通乗用車）

優先順位	色	備考
1	ホワイト	
2	シルバー	
2	ブルー	
2	レッド	
※	ブラック	不調要因（検出困難）

人気の高いとされる 5 色を選択（ホワイト、シルバー、ブルー、レッド、ブラック）し、
LiDAR が最も検出・測距しやすいと思われるホワイトの優先順位1とした。
車名は問わない。

3. 道路構造物（LiDAR が検出・測距しやすい構造物）

Table 20　道路構造物（LiDAR が検出・測距しやすい構造物）

優先順位	物標	備考
1	縁石	
1	ガードレール	
1	デリニエータ	円形（ガードレール上部）
1	壁面	遮音壁など
2		再帰反射材面あり
1	分離ポスト	
2	分離コーン	
2	路面（アスファルト）	降雪地向けなど 1 で選定した以外
2	路面（コンクリート）	トンネル内
2	路面	赤色塗装
2	分離　dotts botts	
2	ガードレール	再帰反射材面あり
3	ガードワイヤー	不調要因となる可能性あり

道路構造物のうち、多く設置されているもの、または LiDAR が検出しやすいものの優先順位を高く設定した。

4. 大型車両・オートバイ

Table 21　大型車両・オートバイ

優先順位	物標	備考
1	オートバイ	
1	トラック	流通量の多い 4t をモデル化対象とする
	ダンプカー	
	トレーラー	
	車両運搬車両	
	タンクローリー	
1	バス	

鏡面特性が強い車両は不調要因とする

色は LiDAR が検出・測距に有意なホワイト系を推奨する

A-5） まとめ

LiDAR モデルに関連する走行環境モデルデータ定義の検討をおこなった。本検討では物標として測定すべき特性および測定方法と物標の構成を明確にし高速道路物標モデルを定義した。

本報告では検討すべき高速道路、交差点、一般道、不調要因の各物標選定のうち、高速道路物標選定のみの検討をおこない報告を記した。

③各モデル間 I/F の定義

LiDAR 機能モデルに関連する以下の I/F を定義する。

A） 走行環境モデルと LiDAR 機能モデル間の I/F

各 I/F については機能モデル、物理モデル間でできる限り共通化を目指し、走行環境モデルと自動運転モデルからはシームレスに連携できる I/F を定義する。同時に LiDAR モデルへの各 I/F を標準化することで、様々な LiDAR を評価できるようにする。

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。

A-1） 機能モデルにおける LiDAR モデルの役割と走行環境モデル/自動運転バリデーションプラットフォームへの期待

LiDAR モデルに要求される役割は以下であると考える。

〇LiDAR 実機のセンシングを模擬したデータが出力可能で、後段のアルゴリズム（e.g. SLAM）の動作に問題がないこと

データ:

・タイムスタンプ

・走査方向

・距離

・Intensity

〇リアルタイムで動作すること

〇多種多様な LiDAR に対応できるだけの汎用性があること

〇物理モデルとシームレスに連携できること

走行環境モデル（以下、環境モデルと呼ぶ）と自動運転バリデーションプラットフォーム（以下、プラットフォームと呼ぶ）に関係するところではレーザーがある。機能モデルで扱うレーザーの特性は、ビームの断面積が 0 の点状で、伝搬中に広がりが生じず、伝搬距離に応じて減衰し、さらに、物標と衝突時に表面で反射が生じる、単純なものとする。実際には反射したレーザーが再び物標に衝突すれば、更なる反射（多重反射）が生じるが、機能モデルでは想定しない。また、レーザーが空間内・物体内を通過する際に、屈折や散乱といった現象が生じるが、多重反射と同様に扱わないものとする。

上述の LiDAR モデルの役割を実現するために、環境モデル/プラットフォームには以下が期待される。

〇LiDAR 位置から物標までの正確な距離がわかること

〇物標に反射したレーザーの光量がわかること。または、光量を推定できるだけの十分な情報が得られること

〇他光源から LiDAR に入射する光量を得られること

他光源:

・太陽・月の直接光

・太陽の反射光

〇リアルタイム性を確保できるだけの十分に高速な応答ができること

〇LiDAR モデルに必要なシミュレーション周波数を提供できること

〇物理モデルとシームレスに連携できること

次章では、各モデルのイベントをより詳細に検討し、環境モデル/プラットフォームと LiDAR モデルのインターフェースを具体化する。

A-2）機能モデルにおけるインターフェースの要件

LiDAR モデル単体では、LiDAR 位置や物標の情報などの LiDAR シミュレーションに必要な情報が得られない。そこで、環境モデル/プラットフォームと必要な情報を通信する必要がある。これを以下に示す。

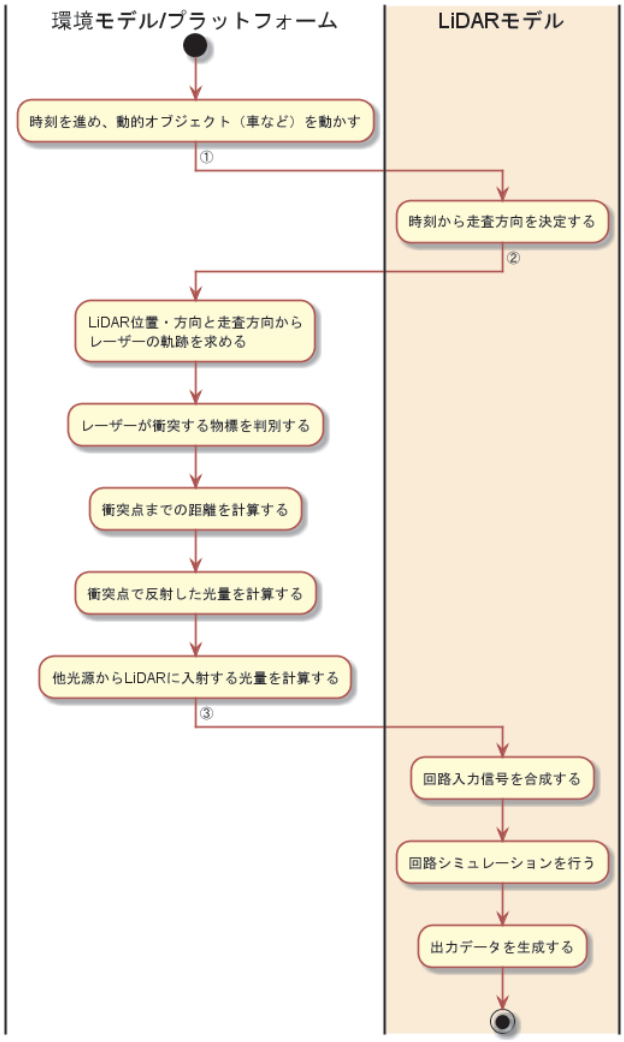


Figure 58　LiDAR モデルを軸としたイベントフロー（機能モデル）

環境モデル/プラットフォームは、まず、シミュレーションのステップを進め、時刻を更新し、車や歩行者の位置・方向を変更する。このとき、車に設置された LiDAR の位置・方向も同時に変更される。

次に、時刻を LiDAR モデルに通知する。LiDAR モデルは、LiDAR 固有のスペックに基づいて、時刻に応じた走査方向を決定し、環境モデル/プラットフォームに送出する。環境モデル/プラットフォームは、まず、自身が管理する LiDAR 位置・方向と、LiDAR モデルから与えられた走査方向を用いて、レーザーの伝搬軌跡を算出する。

次に、レーザーが衝突する物標を判別し、衝突した物標の情報から衝突点の距離・反射光量・他光源からの光量を算出し、LiDAR モデルに送出する。

これらを受けた LiDAR モデルは、LiDAR 内回路シミュレーションを行い、LiDAR の出力データを生成する。最後に、LiDAR の出力データは後段に出力され、アプリケーションで利用される。

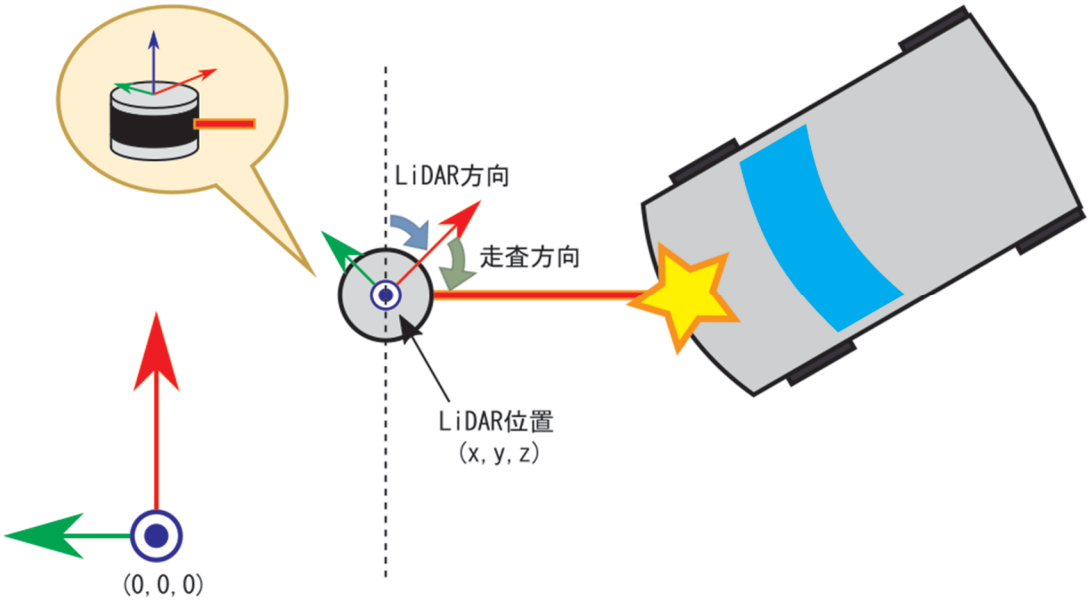


Figure 59　LiDAR 位置・LiDAR 方向・走査方向のイメージ

A-2-1）　レーザー光伝搬計算に必要なインターフェース

レーザーの挙動をシミュレーションするためには、レーザーの発射点と射出方向が必要である。これらの情報を用いることで、レーザーの伝搬軌跡を模した直線を定義でき、物標との交点をレーザーの衝突点として算出できる。

レーザーの発射点は、環境モデル/プラットフォームが管理する LiDAR 位置によって決まる。一方、レーザーの射出方向は、環境モデル/プラットフォームが管理する LiDAR 方向に、LiDAR の走査方向を加算することで得られる。LiDAR の走査方向は、LiDAR 固有のスペックに基づき、時刻をパラメータとして、LiDAR モデル内で定義される。そこで、LiDAR の走査方向を取得するために、環境モデル/プラットフォームから LiDAR モデルへ時刻を送出するためのインターフェースが必要である。Figure 58 の①はこのインターフェースを表している。

時刻を受け取った LiDAR モデルは走査方向を決定し、環境モデル/プラットフォームへ送出する。Figure 58 の②は、LiDAR モデルから環境モデル/プラットフォームへ、走査方向を送出するためのインターフェースである。環境モデル/プラットフォームは、LiDAR 方向と走査方向からレーザーの射出方向を求め、発射点と合わせてレーザーの衝突点を求める。

一般的に、シミュレータは一定の時間間隔でステップを進め、時刻を離散的に扱う。しかし、LiDAR モデル内の走査方向は、シミュレータとは独立した時間で定義され、ステップ間の時刻をうまく扱うことができない。そこで、環境モデル/プラットフォームから前ステップと後ステップの二つの時刻を送出し、LiDAR モデルはその時間に定義される複数の走査方向をまとめてひとつのリストにする。そして、環境モデル/プラットフォームに送信され、環境モデル/プラットフォームはリストの要素数だけ衝突点を算出する。

上記に対応するためには、Figure 58 の①のインターフェースは、二つの時刻を通信するためのものに拡張し、また、Figure 58 のの②のインターフェースは、走査方向リストを通信するためのものに拡張されなくてはならない。

A-2-2） 反射情報と他光源からの情報を扱うためのインターフェース

環境モデル/プラットフォームは、レーザーが衝突した物標の情報から、衝突点までの距離・反射光量・他光源からの光量を算出し、LiDAR モデルに送出する必要がある。そのためのインターフェースが、Figure 58 の③である。

衝突点までの距離は、LiDAR 位置と衝突点の座標を用いて環境モデル/プラットフォームで完結して算出可能である。また、他光源からの光量も、環境モデル/プラットフォームで参照・算出できる。

一方、反射光量は LiDAR から射出されたレーザーの光量が関係し、環境モデル/プラットフォームだけでは算出することができない。射出光量は LiDAR モデルが管理すべき要素であり、これを通信するためのインターフェースが必要であるように思われる。だが、実際には射出光量はさほど重要ではない。射出光量と反射光量の間には比例関係があり、例えば射出光量が 10 倍になれば、反射光量も 10 倍となる性質がある。これを利用すれば、射出光量をある基準値に定めて反射光量を算出し、LiDAR モデル内で実際の反射光量に換算してもよい。重要なのは光量ではなく射出光量と反射光量の比（反射率）であり、これは環境モデル/プラットフォーム内で物標情報から参照できる。

A-2-1）で述べたように、LiDAR モデルから環境モデル/プラットフォームへは、リストで複数の走査方向が送出される。レーザーの衝突点は、リストの要素と同数算出され、続けて同数分、距離・反射光量・他光源からの光量が算出される。よって、Figure 58 の③は複数走査分をまとめてリストとして、LiDAR モデルに送信することが効率的である。

A-3） 計算時間と精度の課題と対応

本章の内容は、インターフェースを定義するにあたって直接必要となるものではないが、LiDAR モデルの必要精度を確保するための環境モデル/プラットフォームに対する要件である。

本プロジェクトで対象とする LiDAR の走査周期は 10～30[Hz]程度である。例えばカメラは 24～60[Hz]で動作するので、それと比較しても大きな値ではない。しかし、LiDAR の走査速度は非常に高速であり、各走査点の時刻・位置を正確にシミュレーションするためには、10[KHz]以上のシミュレーション周波数が必要となる。しかし、このような高周波数でシミュレーションすることは、処理量の観点からリアルタイムで実現することが難しく、シミュレーション周波数は 100[Hz]以下となることが想像される。

シミュレーション周波数の違いによる LiDAR シミュレーション精度について述べる。Figure 60 は車の前方部に LiDAR を設置し、走行中にセンシングしているイメージ図である。赤い矢印は、レーザーの発射点・射出方向を示している。上段はシミュレーション周波数が十分に確保できている場合の理想的なシミュレーションであり、シミュレーション周波数が高い（≒車の位置更新が頻繁に行われる）ため、センシング毎に車の位置（レーザーの射出位置）が変わっていることがわかる。下段はシミュレーション周波数が十分でないときのシミュレーションであり、シミュレーション周波数が低い（≒車の位置更新があまり行われない）ため、複数のレーザーが同一地点から射出されていることがわかる。これは本来の射出位置とは異なるため、センシング結果も異なったものが得られる問題が生じる。

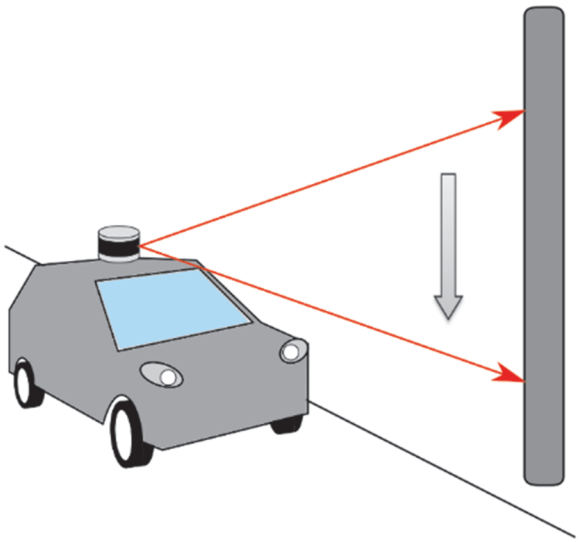
Figure 60　LiDAR が空間内を走査し、点群を生成するイメージ

（上段：理想的なシミュレーション、下段：シミュレーション周波数が十分でないとき）

シミュレーション周波数の違いによって得られる点群の違いを示す。Figure 61 は、走行車に取り付けられた LiDAR で正立する電柱をセンシングするとき、シミュレーション周波数の違いで、点群がどのように変化するかを示している。

ここでは、ラスタスキャン方式（一本のレーザーで上下左右方向を走査する）の LiDAR を想定しているが、他のスキャン方式でも同様の問題が生じる。Figure 61 (b)は理想的なシミュレーションによって得られる点群を示しており、車の移動によってレーザーの発射点が刻々と変わるため、斜立した点群となる。Figure 61 (c)はシミュレーション周波数が十分でないときに得られる点群を示している。

上述の通り同一地点からレーザーが射出されるため正立した点群が得られ、車の移動が生じたタイミングで点群に断絶が生じる。このような現象は、シミュレーション周波数が低く、車（自車・他車）が高速であるほど顕著に発生しやすく、逆にシミュレーション周波数が高く、車が低速であるほど影響が小さくなる。



（a）走行車に取り付けられた LiDAR で電柱をセンシングしているシーン

（b）理想的なシミュレーションによる点群　（c）シミュレーション周波数が十分でないときの点群

Figure 61 シミュレーション周波数の違いによって得られる点群のイメージ

（LiDAR はラスタスキャンを想定）

上述のシミュレーション周波数の不足による問題は、LiDAR 位置の補正によって改善できると考えられる。すなわち、過去の LiDAR 位置を保存しておき、現在の LiDAR 位置を用いてその間の LiDAR 位置を補間する。レーザーの衝突点を算出する前に LiDAR 位置を補間することで、より正確な発射点からレーザーの衝突点を算出でき、シミュレーション結果が理想的なものに近づくことが期待できる。これを Figure 62 に示す。

Figure 62 の上段はシミュレーション周波数が十分でないときのシミュレーション結果のイメージであり、複数のレーザーが同一地点から射出されている。それに対し、下段では LiDAR 位置を補間より補正して、疑似的にシミュレーション周波数を高くできている。

以上では、LiDAR の位置についてのみ述べたが、LiDAR の方向に関しても同様である。

Figure 62　LiDAR 位置を補間するイメージ

（上段：シミュレーション周波数が十分でないとき、下段：補間により LiDAR 位置を生成し、疑似的にシミュレーション周波数を高くしたもの。青い車は補間によって位置が生成されたことを示している）

A-4） まとめ

本報告では、機能モデルにおける環境モデル/プラットフォームと LiDAR モデルのインターフェースについて、LiDAR モデルを軸とした観点で詳細に述べた。最初に、LiDAR モデルの役割を明らかにし、それに必要な環境モデル/プラットフォームへの期待を述べた。次に、LiDAR モデルがシミュレーションを行う上で必要となるインターフェースの詳細について述べた。そして計算時間と精度の課題を示し、その対応方法について述べた。

以上で述べたことを踏まえたシーケンス図を Figure 63 に示す。これは本報告の概要として示すものであり、実装においては柔軟に対応されることが望ましい。

本報告で触れられなかったものとして、自動運転モデルとのインターフェース、不調要因の考慮、物理モデルとの共通化がある。これらは次年度以降に検討する。また、それに応じて、本報告の内容はアップデートを行う可能性がある。

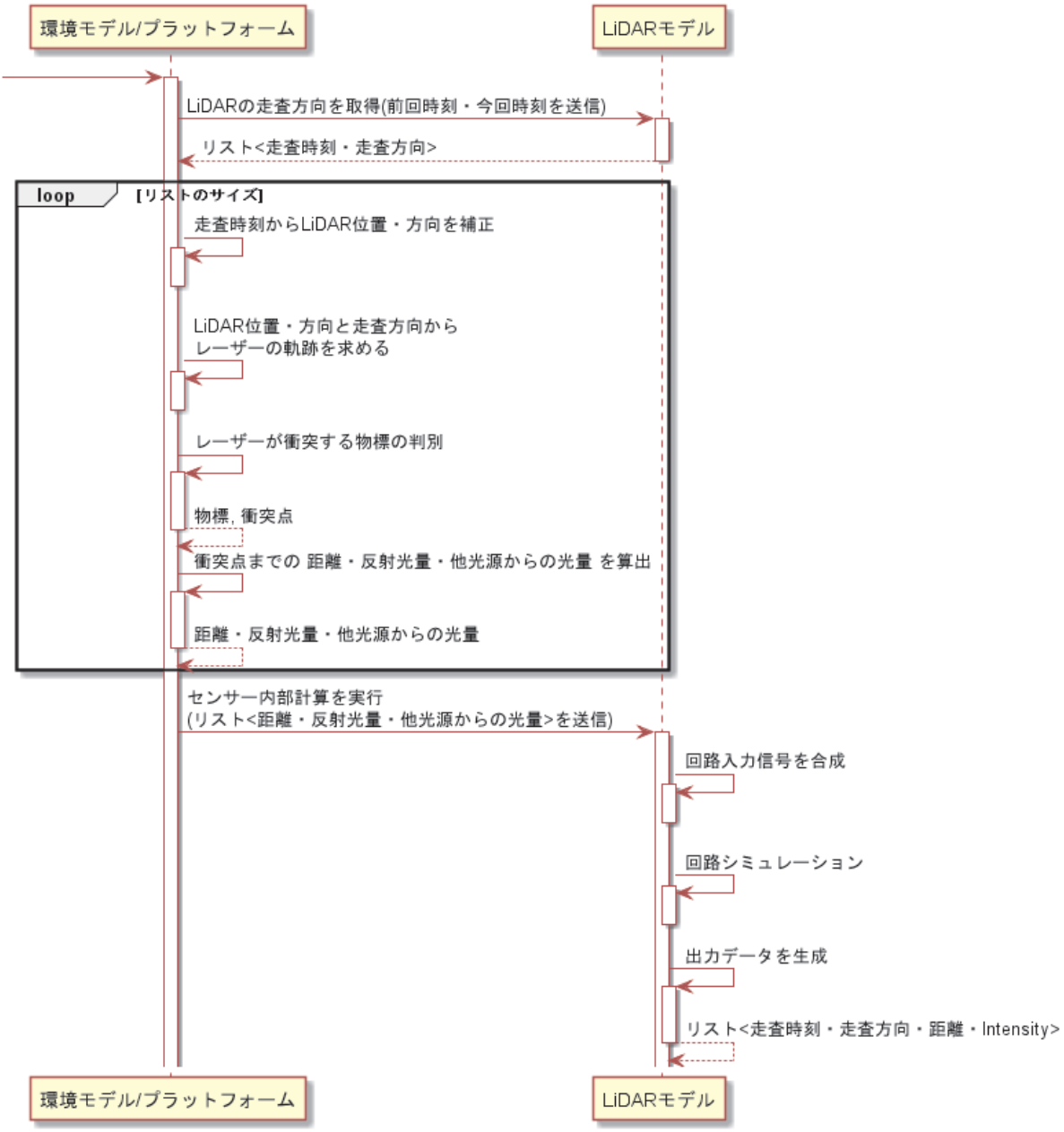


Figure 63　LiDAR モデルシーケンス図（機能モデル）

(3) 次年度以降の計画

① LiDAR モデル要件定義

LiDAR 不調を引き起こす事象の調査とモデル化すべき LiDAR 不調事象の選定など、LiDAR 機能/物理モデルにてモデル化すべき事象を定義する。

以下に具体的業務内容を列挙する。

A) LiDAR 不調を引き起こす事象の調査と、モデル化すべき LiDAR 不調事象の選定、実装の優先順位付け(2019/04～2019/09)

② LiDAR モデルに関連する走行環境モデルデータ定義

仮想空間において実際の LiDAR の特性を表現するにあたり、LiDAR 機能/物理モデルに必要とされる項目で、走行環境モデル側で表現するべき項目を定義する。

以下に具体的業務内容を列挙する。

A) LiDAR 視点で各走行シナリオ(交差点、郊外一般道)においてモデル化すべき物標の選定と実装の優先順位付け、走行環境モデルで表現すべき項目の定義(交差点 2019/03 ※次年度以降実施、

郊外一般道 2019/10)

ex. 物標の区分方法、物標に埋め込むべき情報定義

B) 走行環境モデル側で表現される、LiDAR 不調事象のモデル化(2019/04～2019/09)

③ LiDAR モデル開発

LiDAR 機能/物理モデルの定義・評価、ソフトウェア開発・評価を行う。

以下に LiDAR モデル開発に必要な開発項目を列挙する。

A) LiDAR 評価(LiDAR 評価手法検討、評価環境構築、評価)(平成 30 年度実施済)

B) モデル化(LiDAR 機能/物理モデル定義)(平成 30 年度より継続して実施)

C) ソフトウェア開発(LiDAR 機能/物理モデル・リファレンスモデルのソフトウェア開発・評価)

D) LiDAR リファレンスモデル評価

LiDAR モデルの定義にあたっては、実際の LiDAR の角度性能、測距性能を評価した上でモデル化する必要がある。A)の「LiDAR 評価(LiDAR 評価手法検討、評価環境構築、評価)」は、実際の LiDAR 性能を把握するために必要な開発である。

A)でモデル化対象 LiDAR を評価した後、その評価結果に基づき、B)で LiDAR を機能/物理モデルにモデル化する。モデル化にあたっては、A)で複数 LiDAR を評価する、Pulse ToF 方式 LiDAR の原理原則に基づきモデル化することで、特定の LiDAR のモデリングではなく、汎化された LiDAR 機能/物理モデルの定義を目指す。

C)では B)で定義した LiDAR 機能/物理モデルのソフトウェア実装/評価を行う。その後、LiDAR 機能/物理

モデルに対して、適切なパラメータを設定することで、特定実機 LiDAR のリファレンスとなるようなリファレンスモデルを開発する。最後に D)で開発した LiDAR リファレンスモデルと実機 LiDAR と比較することでモデルの評価を行う.

LiDAR モデル開発にあたっては、以下の 1～4 の順序で LiDAR 性能評価、モデル定義、ソフトウェア開発、リファレンスモデル評価の一連の流れを数サイクル回しながら、前サイクルでの評価であがった課題を次サイクルで取り込む形で開発を進める。

1. Closed Loop での評価を目的とした LiDAR 機能モデルの定義と、LiDAR 機能モデルに対応した走行環境モデル定義、LiDAR 機能モデルを内包した LiDAR リファレンスモデルソフトウェア開発・評価(2019/01～2019/09)
2. 実世界における LiDAR の特性を忠実に再現することを目指した LiDAR 物理モデル定義と、LiDAR 物理モデルに対応した走行環境モデル定義、LiDAR 物理モデルを内包した LiDAR リファレンスモデルソフトウェア開発・評価(2019/04～2020/02)
3. LiDAR 不調事象のモデル化と LiDAR 機能/物理モデルへの反映、LiDAR 不調事象モデルを含む LiDAR リファレンスモデルソフトウェア開発(2019/10～2020/09)
4. 3 の評価結果により出た課題の対応とその対応策の LiDAR 機能/物理モデル、LiDAR リファレンスモデルソフトウェアへの反映と最終評価(2020/08～2021/01)

5. 2. 5 「B4. センサモデル構築のためのデータ取得」（株式会社 SOKEN）

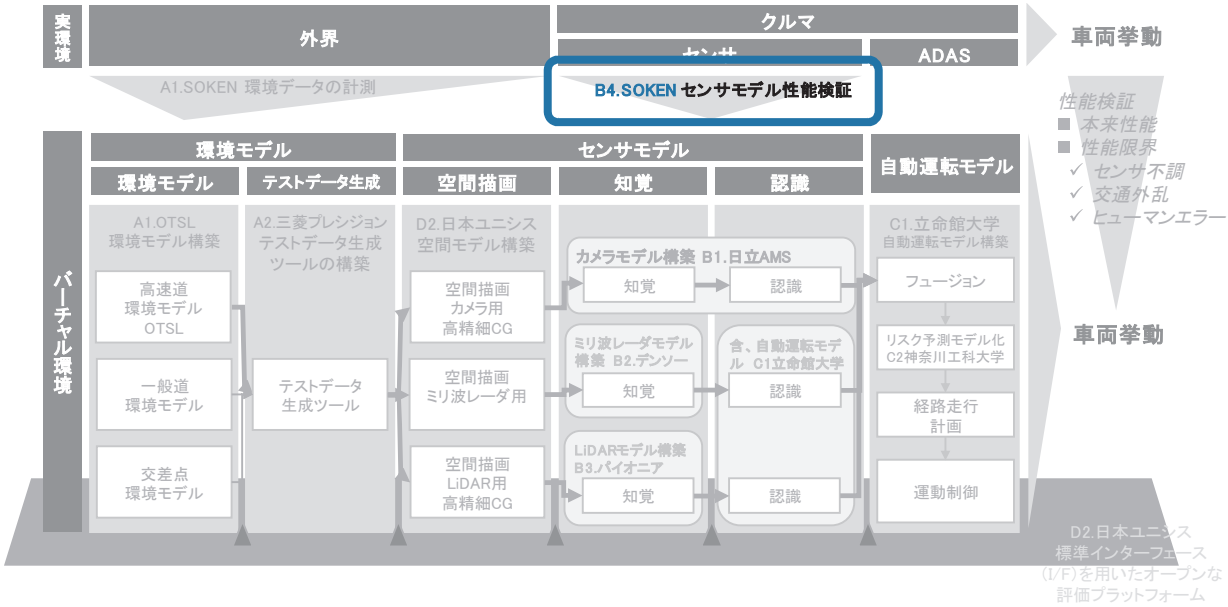


Figure 64　B4 研究の位置付け

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。

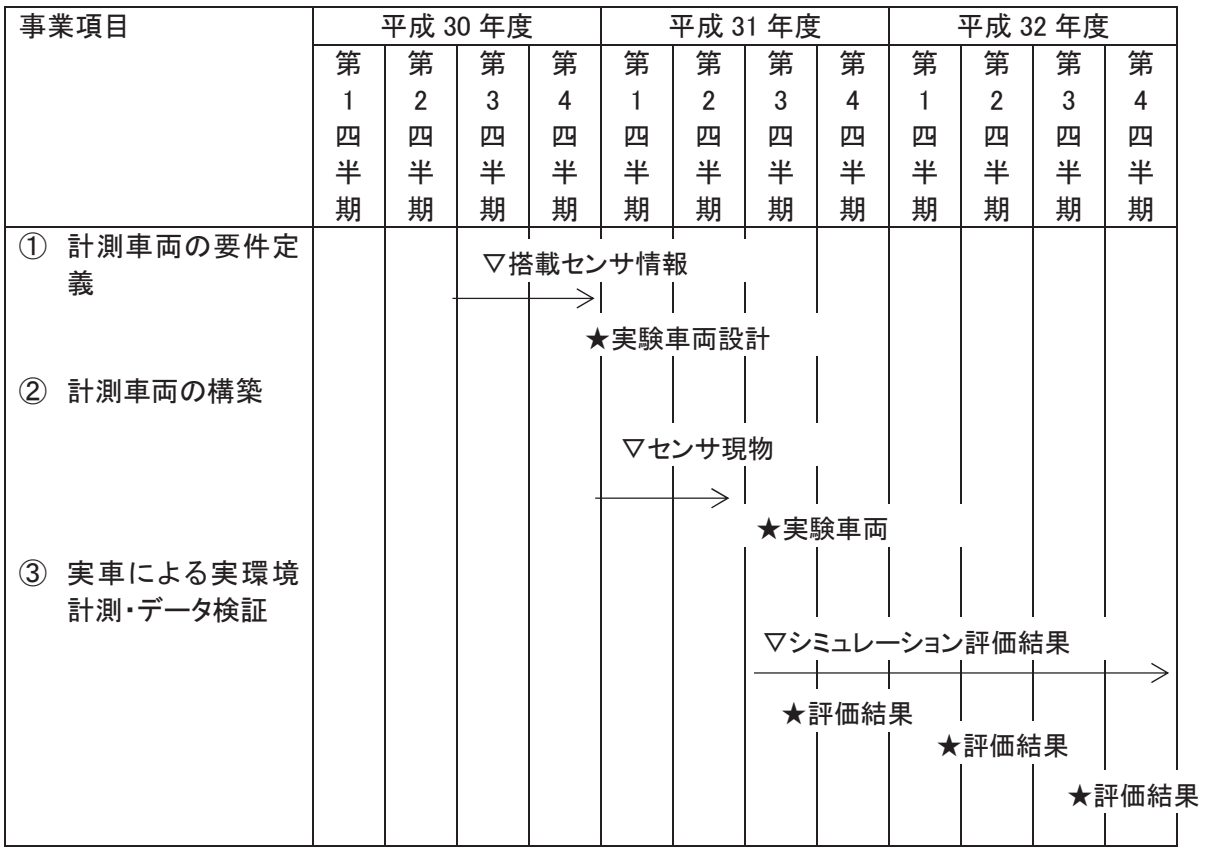
■ 事業概要

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

■ 実施計画

▽インプット　　★アウトプット（成果物）



(1) 平成 30 年度の成果と次年度以降の計画(まとめ)

センサ(カメラ/LiDAR/ミリ波レーダ)実機を搭載し、実走評価可能な計測車両の要件定義に向け、関係者と自動走行評価における仮想環境と実機の比較検証すべきポイントを協議中である。

協議結果により試験項目が大きく変わるため、車両の要件定義完了を 2 か月延長する。

(2) 次年度以降の計画

② 計測車両の構築

内容:車両にセンサ(カメラ/LiDAR/ミリ波レーダ)実機及び計測系を搭載し、走行評価を可能とする計測車両を構築する。

株式会社 SOKEN 内の車両工房(下図 Figure 65)において、車両の電源バッテリー容量拡張、車両ルーフへの高精度 GNSS(Global Navigation Satellite System)測位装置及び慣性計測装置を設置・校正、各センサの車両への取りつけ、車両荷台への計測用ロガーの固定、各センサ/GNSS/慣性計測装置からロガーへの配線処理等を、一般道路等を走行できるよう自動車検査登録を取得可能なように法規に準拠して車両改造し、自動車検査登録を行う(2019 年 9 月)。

各センサの出力結果と GNSS の出力するタイムスタンプを合わせて記録可能な、計測ソフトウェアを作成し、走行しながらデータを測定できるようにする。

期間:2019 年 4 月から 2019 年 9 月

アウトプット:実験車両

Figure 65 株式会社 SOKEN 車両工房

③ 実車による実環境計測・データ検証

内容: 実車による走行試験を実施し、走行時のセンサデータを取得、関係者と連携してセンサのシミュレーションモデルとの比較検証を行う。

A パートで決定した評価シーン/不調シナリオごとに、センサデータの実環境計測を行う。尚、評価シナリオに応じて、株式会社 SOKEN 内の評価路、JARI 等のテストコースを借用、又は公道にて走行試験を行う。

各センサのシミュレーションモデル関係者にフィードバックを行い、シミュレーション結果との比較検証を実施する（半期毎又は項目毎）。また、計測系の変更の必要性が生じた場合は、計測系の見直しを行い、計測車両への改造を行う。

期間：2020 年 4 月から 2021 年 3 月

アウトプット： センサデータの実環境計測結果

5. 3 「C.自動運転モデルの構築」のための研究開発

（学校法人立命館、学校法人幾徳学園神奈川工科大学）

5. 3. 1 「C1.基本走行モデル構築」のための研究開発（学校法人立命館）

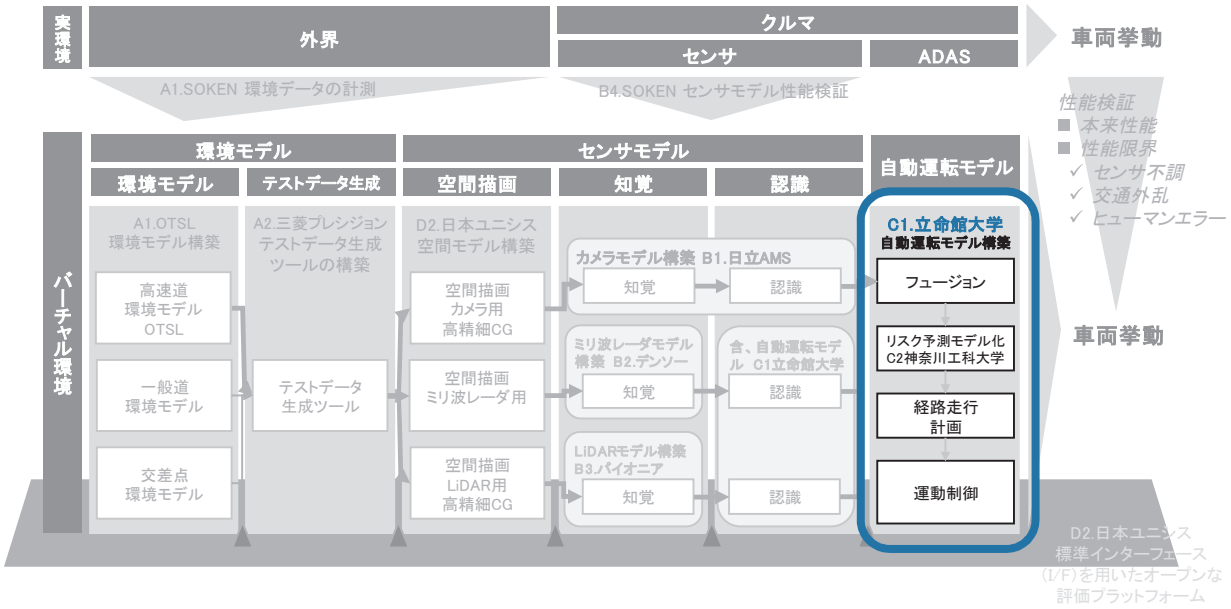


Figure 66　C1 研究の位置付け

■ 事業目的

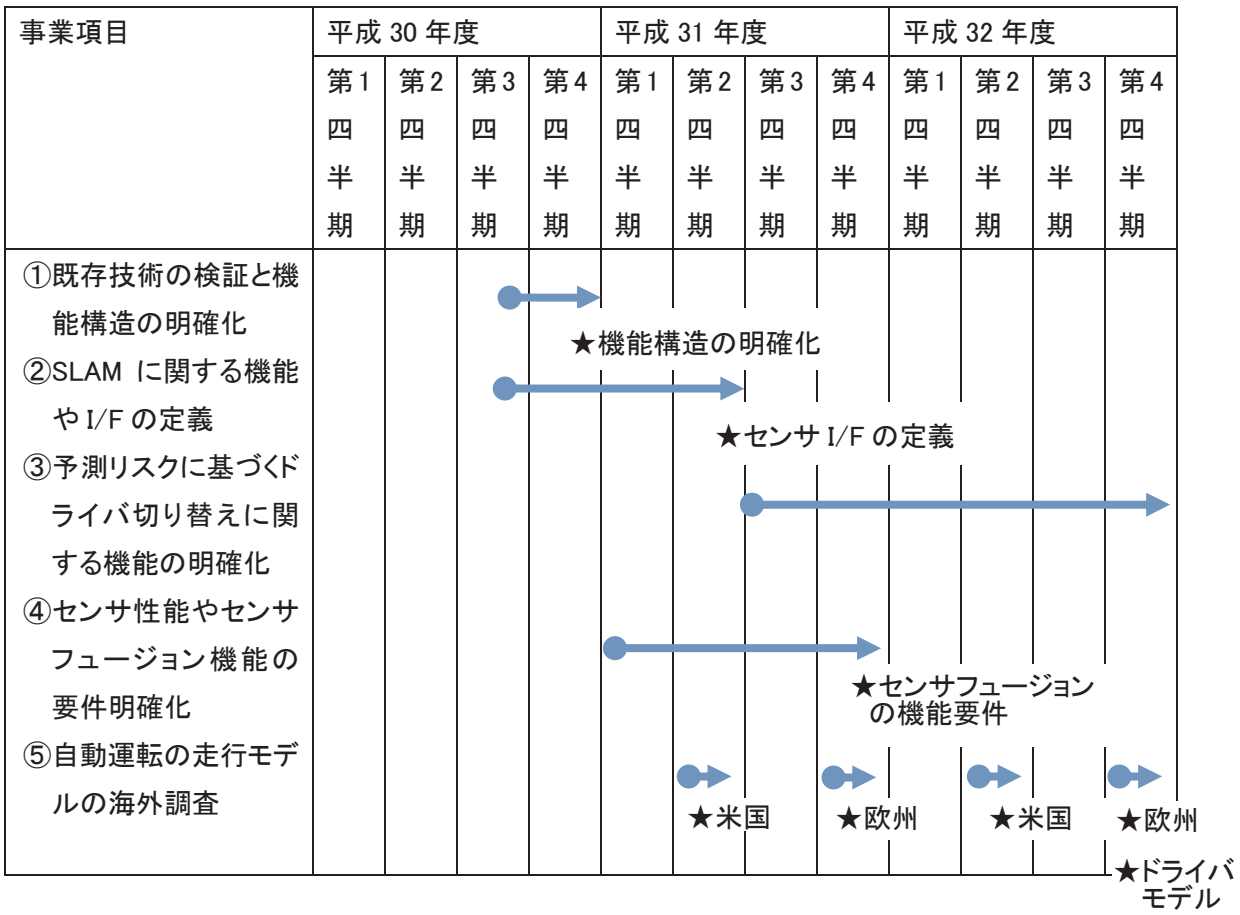
仮想空間での自動走行評価に資する基本走行モデルの構築と各種 I/F の定義を目的とする。

■ 事業概要

自動運転システムを評価するためには、自動運転が可能となるドライバモデルが必要である。そこで、種々のセンサ特性を考慮し、基本走行が可能なモデルを構築する。

またシミュレータや実車への搭載を考慮した各種センサ類との I/F を定義する。

■ 実施計画


事業項目
平成 30 年度
平成 31 年度
平成 32 年度
第 1 四半期
第 2 四半期
第 3 四半期
第 4 四半期
①既存技術の検証と機能構造の明確化
②SLAM に関する機能や I/F の定義
③予測リスクに基づくドライバ切り替えに関する機能の明確化
④センサ性能やセンサフュージョン機能の要件明確化
⑤自動運転の走行モデルの海外調査
★機能構造の明確化
★センサ I/F の定義
★センサフュージョンの機能要件
★米国
★欧州
★米国
★欧州
★ドライバモデル

(1) 平成 30 年度の成果と次年度以降の計画（まとめ）

平成 30 年度の成果として、センシング機能などの検証が可能なシミュレータを利用し、自動運転モデルに関する既存技術の検証を行った結果、限定的な状況ではあるが、通常の単車線上での自動運転や、緊急停止などを実現できることが確認された。また、この結果などから、計測・認識・センサフュージョンと従来の走行計画・車両制御に関する機能構造に対して、リスク予測に基づく走行計画を導入するための機能構造が明確化され、車両制御上の安全性に影響を与えるために、もう一段の融合要素が必要になることが明らかとなった。

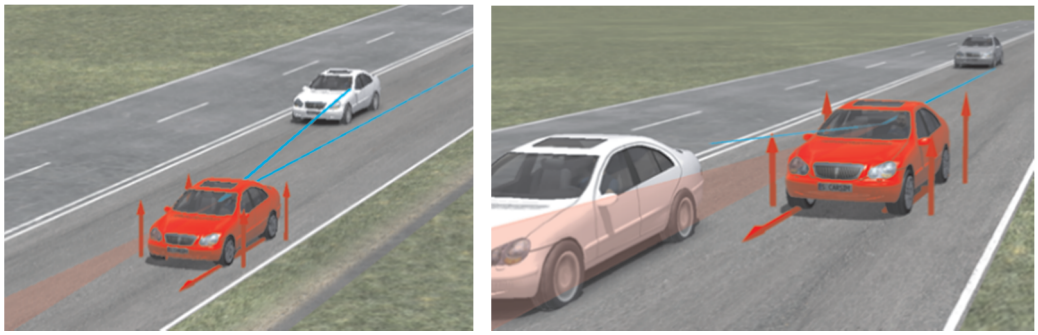
次年度以降の計画としては、様々なセンサの組み合わせやセンサ性能の違いを考慮した適切な SLAM に関する機能や I/F を定義すること、予測リスクに基づき AI ドライバとモデルベースの緊急時ドライバに切り替えを行うという構造に対する機能を明確化すること、センサ性能やセンサフュージョン機能に関する必要要件を明確化することである。また、近年急速に進むAIなどによる認識・判断による走行モデルに関する海外調査を行うとともに、連携・協力体制を整える。

(2) 平成 30 年度の成果

①既存技術の検証と機能構造の明確化

出所：立命館大学で CarMaker を用いたシミュレーション例

Figure 67 のように、センシング機能などの検証が可能なシミュレータを高速計算機を購入した上で利用し、自動運転モデルに関する Autoware や CarMake, CarSim に組み込まれているドライバモデルの走行制御性能に関する検証を行った。まだ非常に限定的な状況ではあるが、通常の単車線上での自動運転や、緊急停止などを実現できることが確認された。



出所：立命館大学で CarMaker を用いたシミュレーション例

Figure 67 機能検証のためのシミュレータ

また、この結果などから、計測・認識・センサフュージョンと従来の走行計画・車両制御に関する機能構造に対して、Figure 68 のようにリスク予測に基づく走行計画を導入するための機能構造を検討した。

リスクの種類と確率に応じて以下のように走行計画に反映することになるが、

A. 減速のみでの対応
B. 操舵回避のみでの対応
C. 減速と操舵回避での対応

特に、B、Cの対応の場合は、元々の走行計画を上書きするだけでは車両制御上の安全性に影響を与えるために、安全性を担保するもう一段の融合要素が必要になることが明らかとなった。

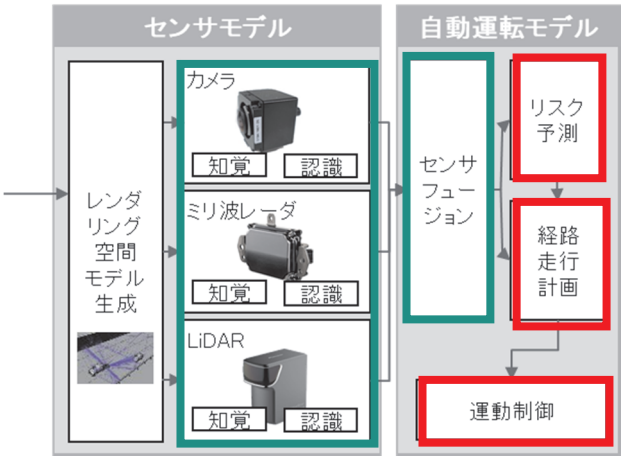


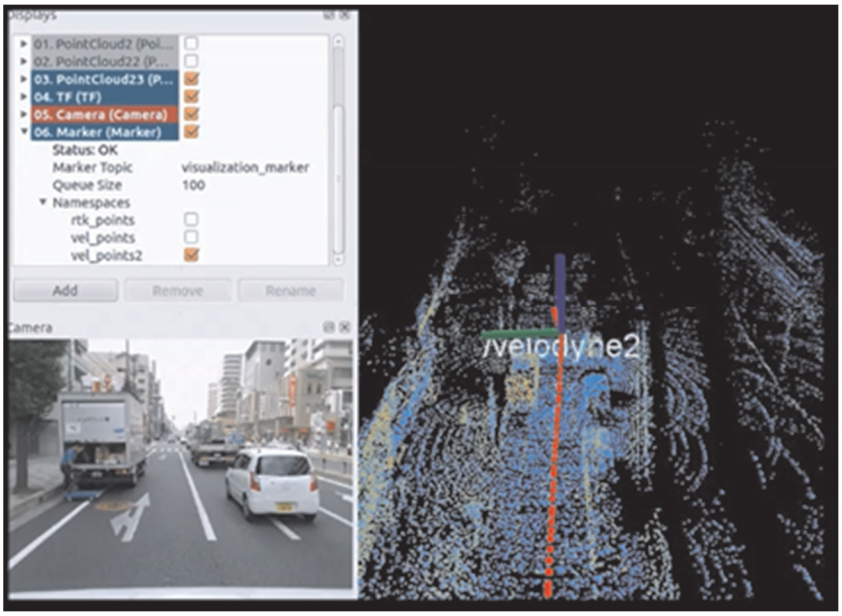
Figure 68 センサモデルと自動運転モデルの機能構造

② SLAM に関する機能や I/F の定義

自動運転車両には各種センサが車載されるが、特に SLAM（自己位置推定）には LiDAR が用いられ、Figure 69 のように SLAM が行われている。

また広義の SLAM としては、白線認識による位置推定なども含む。最近、人工知能（ディープラーニング）手法による SLAM なども提案され、またミリ波レーダの精度向上など進展が見られる。

そこで、様々なセンサの組み合わせやセンサ性能の違いを考慮した適切な SLAM に関する機能や I/F を定義するため、現在の SLAM に関する技術調査を行った。その結果、従来の LiDAR だけの SLAM に加えて、人工知能（ディープラーニング）手法による SLAM などの可能性も高いことが明らかになり、従来の LiDAR 主体の SLAM を変える、あるいは併存する可能性が示唆された。また、LiDAR も Velodyne が開発している 120 度の水平視野角を持つ低価格なものや、Waymo から 95 度の垂直視野角・360 度の水平視野角を持つ LiDAR が発売されるなど、センサ評価システムにも多様な評価が可能な機能を持つことが必要である。



出所：立命館大学で Velodyne LiDAR を用いた SLAM の例

Figure 69 SLAM（自己位置推定）

(3) 次年度以降の計画

② SLAM に関する機能や I/F の定義

前述の通り、自動運転車両には Figure 68 のような各種センサが車載されるが、特に SLAM（自己位置推定）には LiDAR が用いられ、 Figure 69 のように SLAM が行われている。また、白線認識による位置推定なども含むが、特に人工知能（ディープラーニング）手法による SLAM も考慮すべき状況である。

そこで、様々なセンサの組み合わせやセンサ性能の違いを考慮した適切な SLAM に関する機能や I/F を定義する。なお、各種センター情報の統合のために、車載プロトタイピングシステムや車載処理装置を購入して利用する。

③ 予測リスクに基づくドライバ切り替えに関する機能の明確化

レベル 3～5 の環境下では、不確定性が高くなり、条件分岐の組み合わせだけでは自動運転モデルの構築は困難になる。そこで、AI を導入することになるが、緊急性が高い状況下では、確実性の高い判断・経路生成による自動運転が求められる。

そこで Figure 70 のように、予測リスクに基づき AIドライバとモデルベースの緊急時ドライバに切り替えを行うという構造などを考え、その機能を明確化する。なお、自動運転モデル実装のために、購入する高速計算機と車載プロトタイピングシステムを用いる。

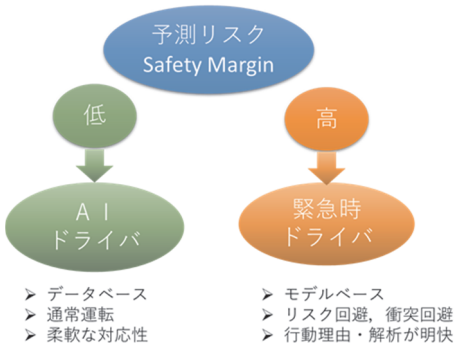


Figure 70 予測リスクに基づくドライバの切り替え

④ センサ性能やセンサフュージョン機能の要件明確化

センサの情報量・精度・頻度・環境依存度により、①判断，②経路生成，③制御が受ける影響評価を行う。例えば、交差点や駐車車両がある車線などのリスクが大きな地点を中心に、センサ性能やセンサフュージョン機能をシミュレータや実車を用いて計測し、必要要件を明確化する。

なお、センサフュージョン実装のために、購入する高速計算機と車載プロトタイピングシステム、車載処理装置を用いる。

⑤ 自動運転の走行モデルの海外調査

近年急速に進むAIなどによる認識・判断による走行モデルに関する海外調査を行うとともに、連携・協力体制を整える。

5. 3. 2 「C2. リスク予測モデルのインテグレーション」(学校法人幾徳学園神奈川工科大学)

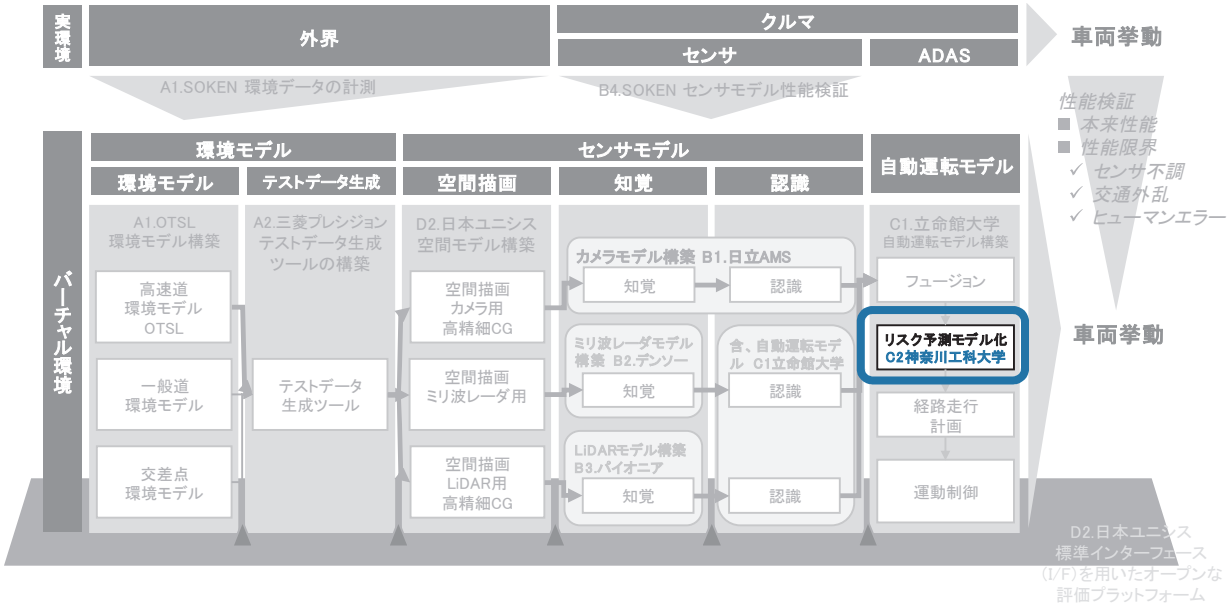


Figure 71　C2 研究の位置付け

■ 事業目的

仮想空間での車両性能評価のための「飛出しリスク予測」「自車位置推定」のセンサ認識シミュレーションプラットフォームへの組み込み

■ 事業概要

これまでの本学研究、及び、公開技術の応用で開発済の「飛出しリスク予測」「自車位置推定」を物理モデル化し、走行計画／車両制御に組み込む。これにより、センサの認識シミュレーションとセットで車両性能を確認できるようにし、車両の安全性評価に貢献することを目的とする。

■ 実施計画

事業項目	平成 30 年度				平成 31 年度				平成 32 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飛出しリスク予測のモデル化					モデル構築			モデル検証				
②自車位置推定のモデル化					モデル構築			モデル検証				
③基本走行モデルへの組込み									組込み		検証	

(1) 平成 30 年度の成果と次年度以降の計画(まとめ)

今年度の実施事項・成果の計画無し。

(2) 次年度以降の計画

⑦「飛出しリスク予測」のモデル化

歩行者や自転車などの飛出しリスク予測機能を物理モデル化し、走行計画／車両制御に組込み、仮想空間でのセンサ機能からの車両性能の安全性シミュレーション評価を可能にする。

Figure 72 に、交差点での歩行者飛出しリスク物理モデル(学校法人幾徳学園神奈川工科大学にて開発済)を示す。

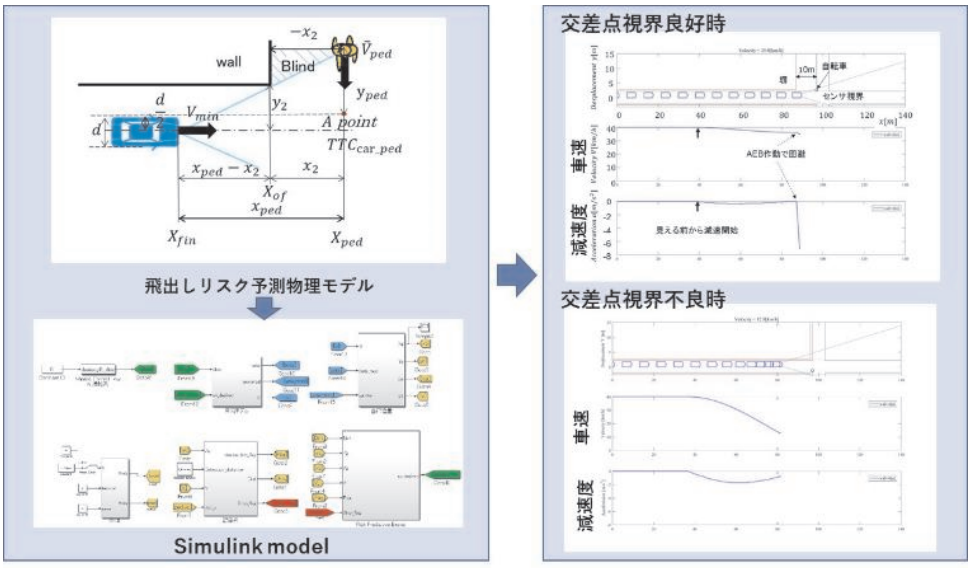


Figure 72 飛出しリスク予測物理モデルの例(KAIT_Risk predictive control+AEB 例)

⑧「自車位置推定」のモデル化

これまで本学で研究してきた「内界センサ（IMU、車輪速度）と GNSS ドップラ値による、リアルタイムな相対位置推定技術」のシミュレーションモデルを構築する。

これにより、カメラ、LiDAR、ミリ波レーダで構成される外界センサの認識不調の自車位置推定精度への影響と内界センサのフュージョンによるロバスト性へ効果、更には、それぞれのロバスト性への寄与度をシミュレーションを評価可能とする。 Figure 73 に、「リアルタイムな相対位置推定技術」（学校法人幾徳学園神奈川工科大学にて開発済）の概要を示す。

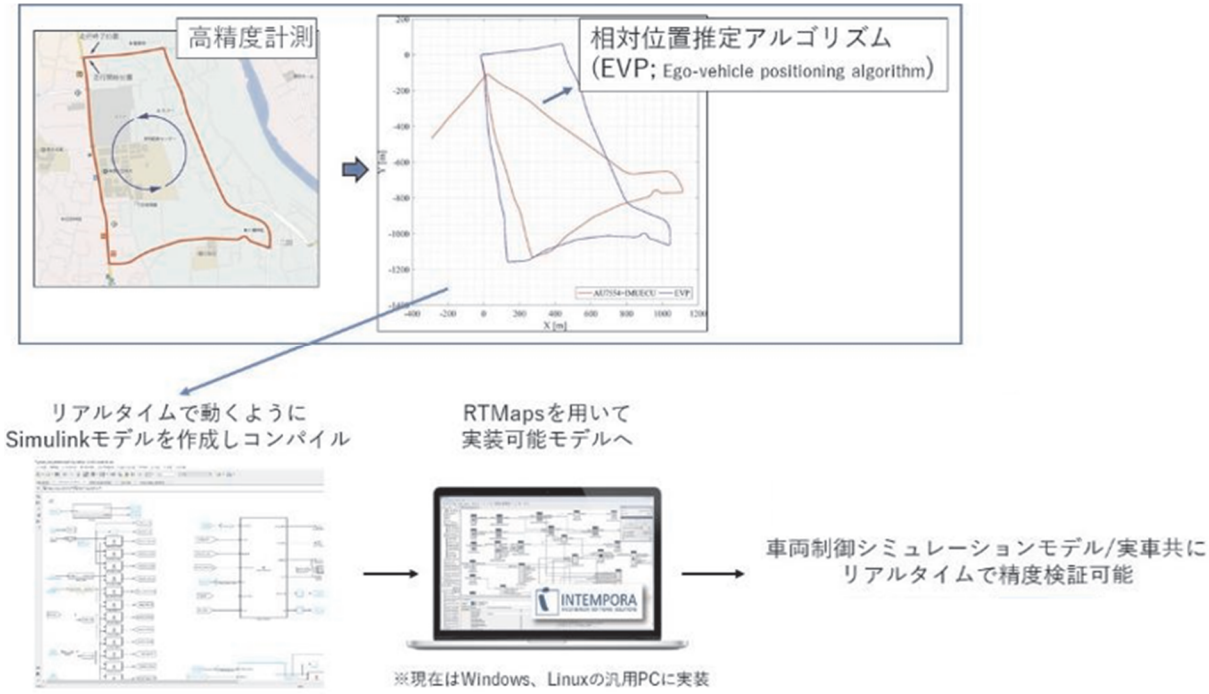


Figure 73 リアルタイムな相対位置推定の概要

⑨ ①、②モデルの基本走行モデルへの組込みを実施する。

5. 4 「D.自動運転張り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

5. 4. 1 「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）

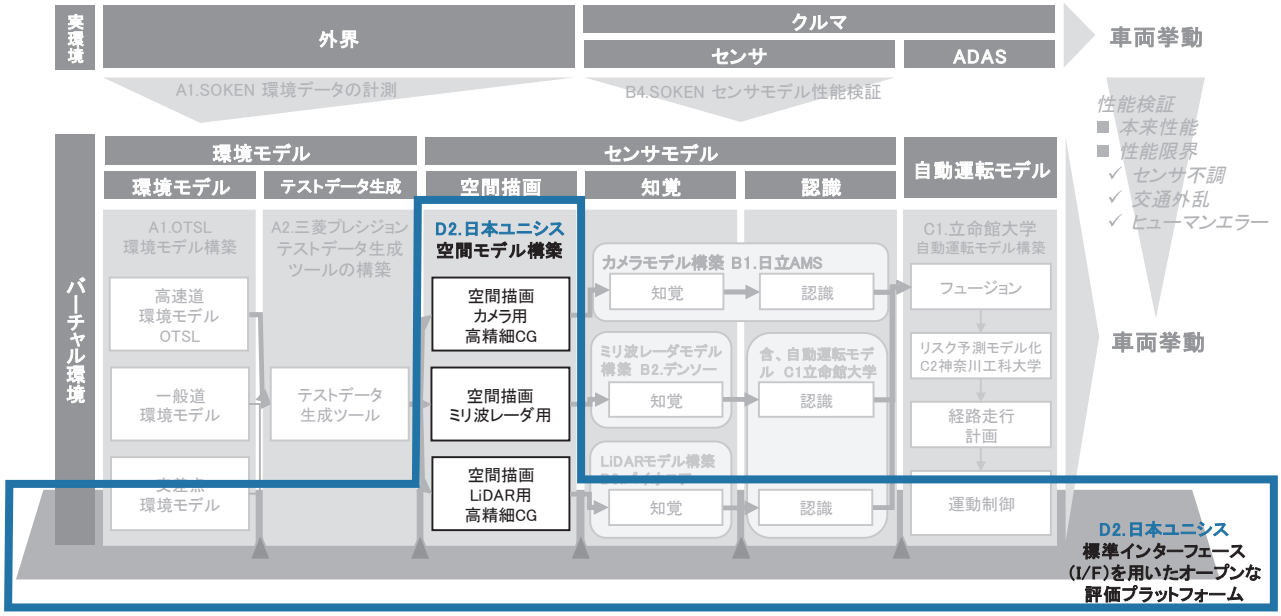


Figure 74 D2 研究の位置付け

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、国内関係プレイ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し、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			
		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仮決め★								
	活動の成果物				調査結果報告書★								
②センサ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												
	活動の成果物				LiDAR向けサンプル版★	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						★19/2Q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												
	活動の成果物				LiDAR向けサンプル版★		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												
	活動の成果物							LiDAR向けサンプル版★	20/1Q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										★20/1Q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総合評価	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★	

(1) 平成 30 年度の成果と次年度以降の計画(まとめ)

1　平成 30 年度の成果

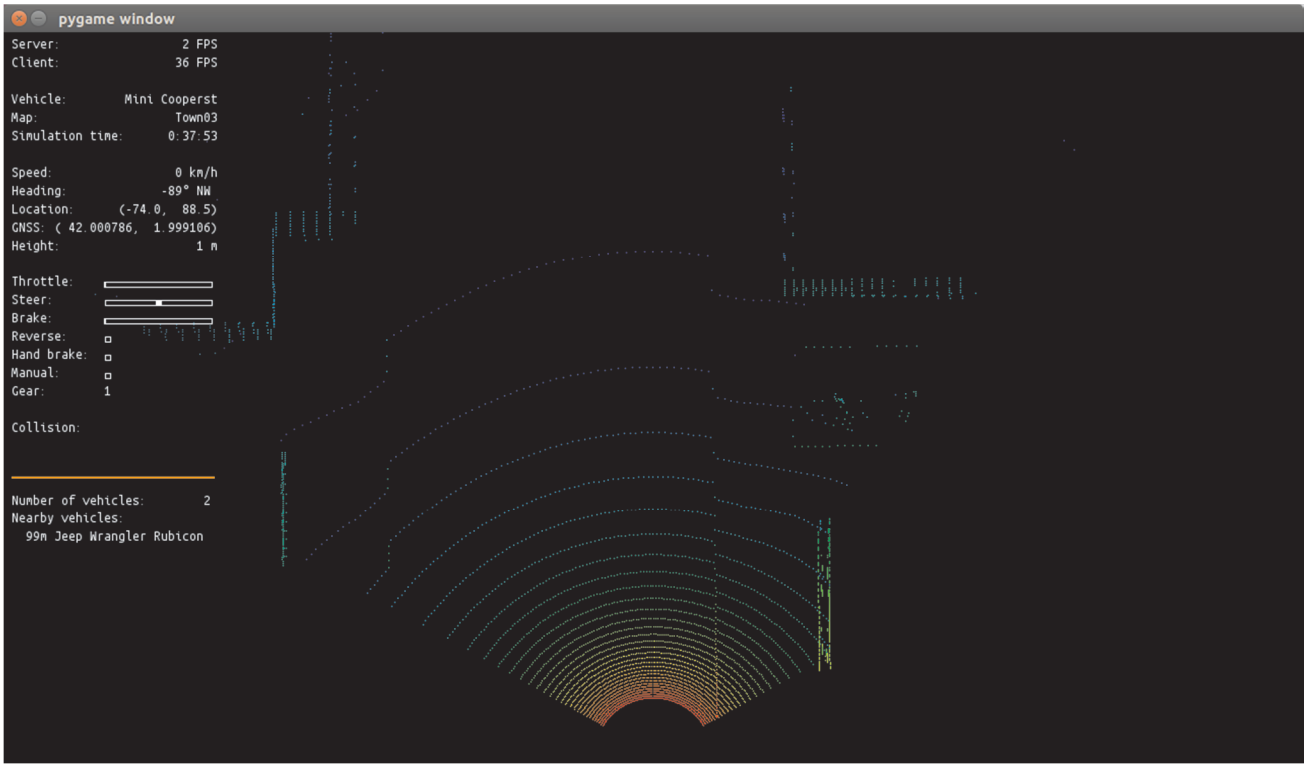
① 既存シミュレーション PF の調査(ベース PF として CARLA を採用)

既存シミュレーション PF の調査として、AirSim と CARLA の機能確認を実施し、どの PF が今後開発する PF のベース PF として相応しいかという観点で調査を実施。CARLA のほうが、より自動運転に特化した開発を行っているため、ベース PF としては CARLA を採用し、必要に応じて AirSim からも機能を流用する形が妥当と判断した。Unity と Unreal Engine 4 の比較も実施し、PF を実装していくにあたって障害となる懸念事項がないかを確認した。CARLA は Unreal Engine 4 をベースに開発されているため、今回は CARLA/Unreal Engine 4 を選択することが妥当と判断した。

② 機能モデルクローズドループ PF の開発

機能モデルクローズドループ PF の開発に辺り、機能モデル IF の策定作業を開始した。特に LiDAR 機能モデルシミュレーションの初期版を 2019 年 4 月初に提供予定であることから、LiDAR 機能モデルの IF の策定を Pioneer 社と連携を取りながら重点的に実施した。

IF の策定後、LiDAR 機能モデルシミュレーションの初期版の開発を実施しており、4 月初旬の Pioneer 社への提供に向けて、進捗は順調である。



出所 : Copyright © CARLA Team 2019

Figure 75 開発中の LiDAR シミュレーション初版の結果

出所 ：Copyright © CARLA Team 2019

Figure 76 LiDAR シミュレーション初版実行時のシーン（カメラ画像）

2 次年度以降の計画

○次年度前半の取り組み計画

実施計画書での計画の通り、2019 年度の 2Q での評価に向けて機能モデルシミュレーション機能の開発に、まずは重点的に取り組んで行く。また、機能モデルシミュレーション PF の実装をベースとして、より精度向上を狙った物理シミュレーション PF の開発を平行して行っていく。

日立オートモティブシステムズ社、DENSO 社、Pioneer 社と不調モデルの再現方法について協議を実施し、本年度後半から開発が始まるセンサ不調を考慮した PF の開発に向けての要件定義を実施していく。

(2) 平成 30 年度の成果

①既存シミュレーション PF の調査

a)評価する PF の選定

自動運転バリデーションプラットフォームの構築にあたり、本研究事業の主目的である「周辺監視センサ(カメラ、ミリ波レーダ、LiDAR、等)の原理原則に基づく仮想空間を構築し、シミュレーションモデルで評価」するという観点から、仮想空間の構築に関わる基本的な機能を1から開発するのでは、本題のセンサシミュレーションの研究に取り掛かるまでのリードタイムが大きくなってしまう。そこでソースコードが公開されている[2]ゲームエンジンをベース PF として採用することで、基本的な機能の開発に時間をかけることなく、センサシミュレーション機能部分のみを追加開発することで、原理原則に基づいた独自のシミュレータ研究が実施可能となる。

昨今、Unreal Engine や Unity をベース PF とした自動運転シミュレータがオープンソースで開発されており、これをベースに開発を行うことが効率的に研究開発を行う上で必要になると考える。現時点(2019 年 1 月)でオープンソースの自動運転シミュレータとして、AirSim(Unreal Engine 4 / Unity)、CARLA(Unreal Engine 4)、Udacity(Unity)がある[3]。この中で、Udacity はオンライン教育の教材という位置づけのため、今後の機能追加の予定が明らかにされておらず、ベース PF としての採用には向かないと判断した(逆に教育用のため IF を参考にするという観点では有用である)。そのため、AirSim と CARLA の比較評価を実施し、ベース PF として採用に適したシミュレータを選定した。

b)AirSIM と CARLA の比較

既存シミュレーション PF の調査として、AirSim と CARLA の機能確認を実施し、どの PF が今後開発する PF のベース PF として相応しいかという観点で調査を実施した。

それぞれの PF を評価するにあたり、以下の観点で評価を行った。

- 開発環境
- 走行環境モデル(A パートに関係するサポート機能)
- センサモデル(B パートに関係するサポート機能)
- 自動運転モデル(C パートに関係するサポート機能)
- 空間モデル(D2 パートに関係するサポート機能)
- 外部連携機能

[2] 原則無料でソースコードが公開されているが、商用利用の場合に売り上げに対してロイヤリティが必要となる
[3] ソースコードが公開されているゲームエンジンは Unity や Unreal Engine 以外も存在するが、自動運転シミュレータのベースとなっているものは、現時点では見つからなかった。

Table 22 オープンソース自動運転シミュレータ比較

評価指標	大分類	中分類	小分類	CARLA	AirSim	備考
開発環境	PF	Unreal Engine 4	-	4.21	4.18	
		Unity	-	×	Experimental	
	OS	Windows	-	△	○	
		Linux	-	○	○	
	ライセンス	-	-	コード：MIT License アセット：CC-BY License	MIT License	CC: クリエイティブ・コモンズ・ライセンス CC-BY: 作品を複製、頒布、展示、実演を行うにあたり、著作者の表示を要求する
走行環境モデル(Aパート)	APIs	シナリオ	-	○	×	
		天候	-	○	○	
センサモデル(Bパート)		認知（センサー）	カメラ	○	○	
			ミリ波	0.9.9予定	×	
			LiDAR(ground truth)	○	○	
自動運転モデル(Cパート)		判断	-	○	×	
		操作	-	○	×	
外部連携機能		ROSサポート	-	○	○	
		autowareサポート	-	○	×	
空間モデル(D2パート)	演算処理機能	レイキャスト	-	○	○	
走行環境モデル(Aパート)	アセット	自動車	-	○	△	AirSimのアセットはAirSim以外で利用できない形式で配布されているため△とした
		人間	-	○	△	
		ロードサイドオブジェクト	-	○	△	
		マップ	-	○	△	
開発環境	ターゲット	-	-	自動運転	ドローン、自動運転	

CARLA は自動運転に特化したシミュレータとして開発が実施されており、機能モデルシミュレーション（真値）ではあるが認知、判断、操作に関する機能が一通り実装（実装予定）されている。また、他のオープンソースプロジェクトとの連携も積極的に行われており、ROS のサポートも最近行われたため、様々なシステムと ROS を介して連携することにより、効率的にシミュレーションプラットフォームを開発できる環境となっている。AirSim は名前の通り、ドローンのシミュレータとして開発が始まり、自動運転向けの機能も開発されているシミュレータである。認知（センサ）に関する機能は十分に備わっているが、判断や操作、シナリオの機能が存在していない。ROS の連携は可能なため、他システムの連携については問題はない。また、CARLA が連携している autoware は自動運転システム用のオープンソースソフトウェアで、認知・判断・操作に関する一連の機能が提供されており、これを簡単に利用することで、開発を行わなければならない機能を最低限に抑えることができる。

アセット面では、どちらも十分なアセットが付属しているが、CARLA のアセットは CARLA 以外へ流用が可能であるのに対し、AirSim のアセットは流用できない形で配布されている。そのため、アセットについては CARLA のほうが利用しやすいと言える。

各パートで実装する予定の機能をより実現している CARLA のほうが、実装されている機能の流用、あるいは改変により、より短い期間で自動運転バリデーションプラットフォームを開発できると考えられる。したがって、今回のベース PF として、現時点では CARLA のほうが適していると言える。しかし、今後の両プラットフォームの開発をウォッチし、必要に応じてそれぞれのプラットフォームから良いところを取り入れていくべきと考えている。

c）Unity と Unreal Engine 4 の比較

CARLA を選択するのであれば、ベースのゲームエンジンは Unreal Engine 4 を選択することになるが、それぞれのゲームをエンジンを比較することで、開発を行っていく上で支障がないかを確認した。

Unreal Engine 4(以降、UE4)はブループリントと呼ばれるビジュアルスクリプティングシステムにより、開発言語の知識を必要とせずにブロックを組み合わせることできるため、開発のし易さという観点においては、UE4 が優れているといえる。一方で UE4 は 2015 年の無料化以降、急速にシェアを伸ばしつつあるが、シェアやアセットストアの充実度では Unity に分があると言える。また、参考書やインターネットの情報源数も Unity のほうが多いた

め、現状での学習のし易さという観点でも Unity に分がある。しかし、UE4 は 2015 年の無料化以降、シェアは拡大し続けており、情報源も増加傾向にあるため、開発において支障をきたす可能性は低いと言える。

したがって、Unity、UE4 のどちらを選択しても、今回の PF 開発においては差がないと言えるため、CARLA/UE4 の選択に問題はないと考えている。

Table 23 Unity と Unreal Engine 4 の比較

評価項目	Unity	Unreal Engine 4	備考
開発言語	C#, JavaScript	C++	
ブループリント	-	○	
ライセンス体系（料金）	Personal: 無料 (年間の売上が$100,000を超えない場合のみ使用可能) Plus: $25/月 Pro: $125/月	基本無料 四半期ごとに粗収入のうち$3000を超えた部分に対して5%のロイヤリティ	
参考書(amazon検索結果)	30000以上	71	
シェア	50%	25%	ただし、Unreal Engine4が増加傾向
OS	Windows, Mac, Linux	Windows, Mac, Linux	
アセットストア	○	○	
CARLA	×	○	

② 機能モデルクローズドループ PF の開発

機能モデルシミュレーション PF の開発にあたり、基本となるアーキテクチャの策定と、2019 年 4 月初旬に Pioneer 社に提供予定の LiDAR 機能モデルシミュレーション PF の IF 策定を実施した。なお、アーキテクチャと IF は PF の初版を開発するための仮決めのものであり、今後の評価・検証結果によっては変更の可能性がある。

a）機能モデルシミュレーション PF アーキテクチャ

クローズドループのアーキテクチャは、CARLA ベースのセンサモデルシミュレータからの出力を ROS 通信を介して、フュージョンノードに出力し、統合認知、判断、操作の処理を行い、操作の処理結果を ROS 通信を介して受け取って車両位置を更新する。このアーキテクチャによって、今回のプロジェクトで開発するモジュール同士が疎結合となり、それぞれの部品の再利用性が高まる。

また、DIVP で定義する IF のうち、モジュール間の入出力（通信）内容(what)が規定されれば、入出力（通信）手段(how)を ROS 通信以外の他の方法へ変更することは容易である。今後の変更にも耐えられる仕組みとしつつ、クローズドループを早期に実現するために、ROS 通信を採用することは最適であると考えられる。

センサモデルも疎結合のアーキテクチャとすることも検討したが、センサの出力とセンサ単体の認知機能間のデータはデータ量が大きい（カメラであれば 4K 画像）可能性が高く、モジュールを分けると通信負荷が大きくなるため、まずは密結合とすることにした。

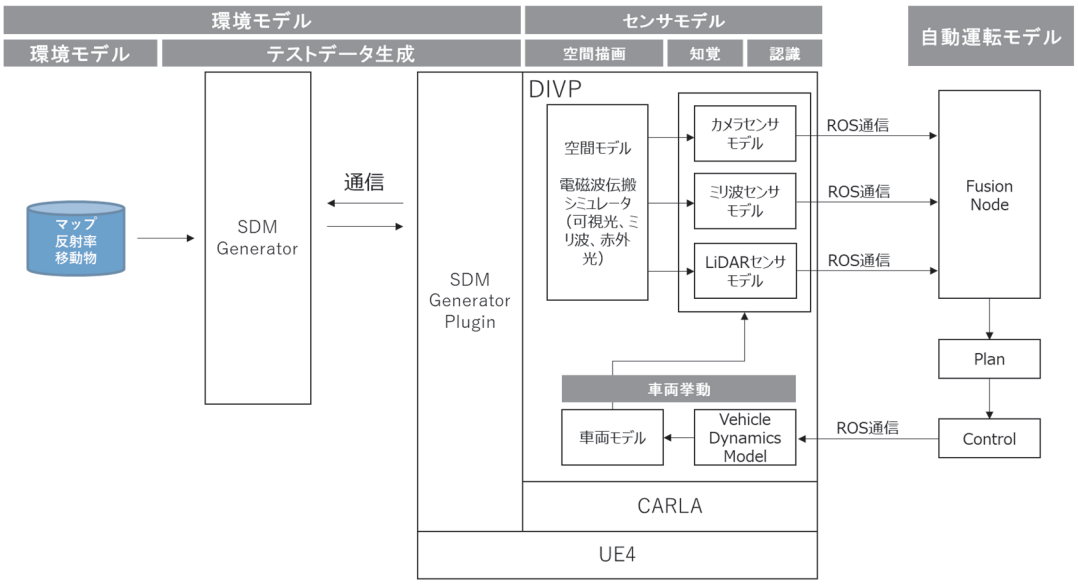


Figure 77 シミュレーション PF アーキテクチャ

今回の研究事業では、実機とシミュレーション結果の比較評価が重要な要素となっている。そのため、PF 上や周辺で実装する各 Node の出力内容(知覚結果、認識結果、制御結果、車両挙動など)を検証できるようにするため、Node ごとに中間出力を行える仕組みを検討し、実装する。

b)センサ機能モデル IF

前述の通り、2019 年 4 月初旬に Pioneer 社へ提供予定の LiDAR 機能モデルシミュレーション PF の IF 策定を重点的に実施した。他のカメラセンサ、ミリ波レーダセンサについても、同様に IF 策定作業を実施中である。

Pioneer 社と議論を重ね、LiDAR 機能モデルシミュレーションのシーケンス図を作成して処理の流れを整理しながら、各モデル間の情報のやり取りを明らかにし、IF としてまとめた。策定した IF は機能モデルシミュレーションの IF としては十分なものと考えているが、今後の物理シミュレーションや不調を考慮したシミュレーションの検討を行っていく中で、修正が必要になっていくものと考えている。

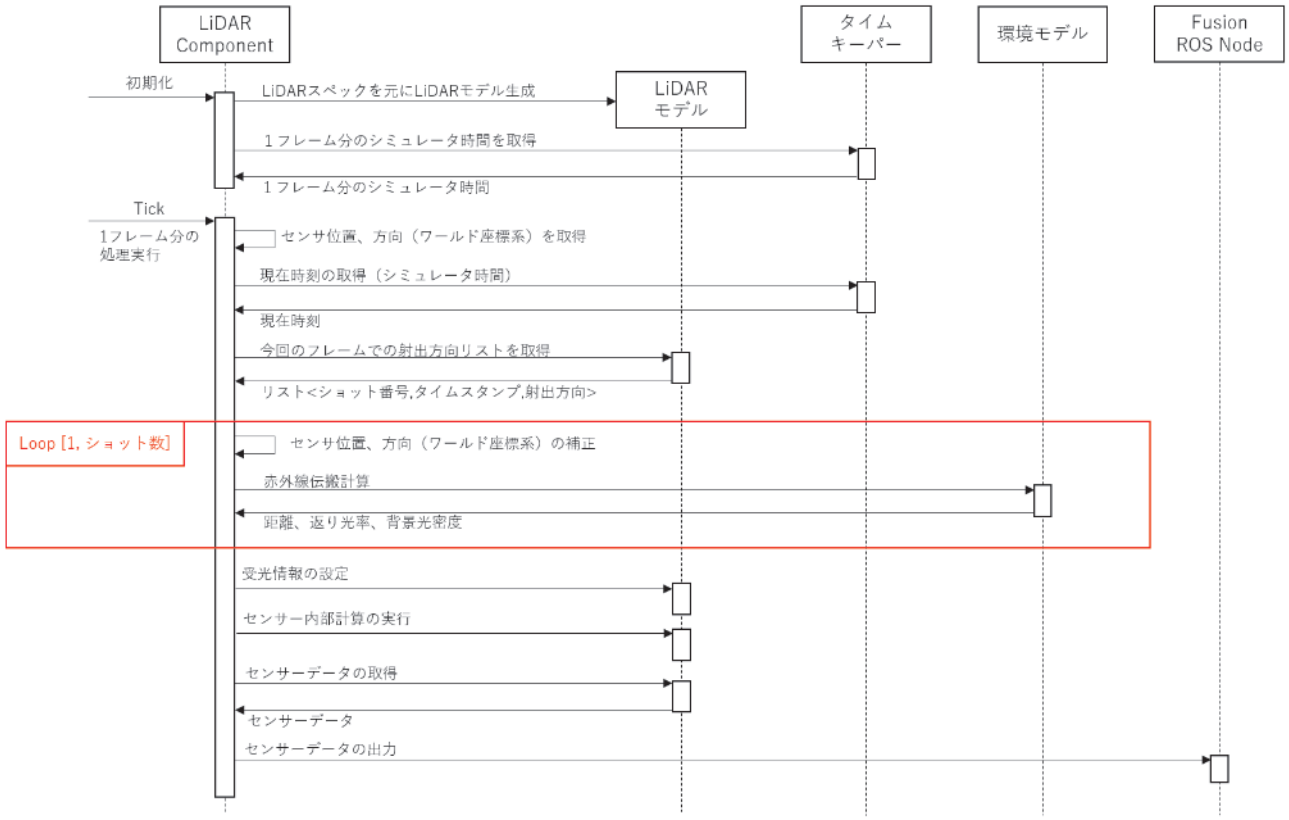


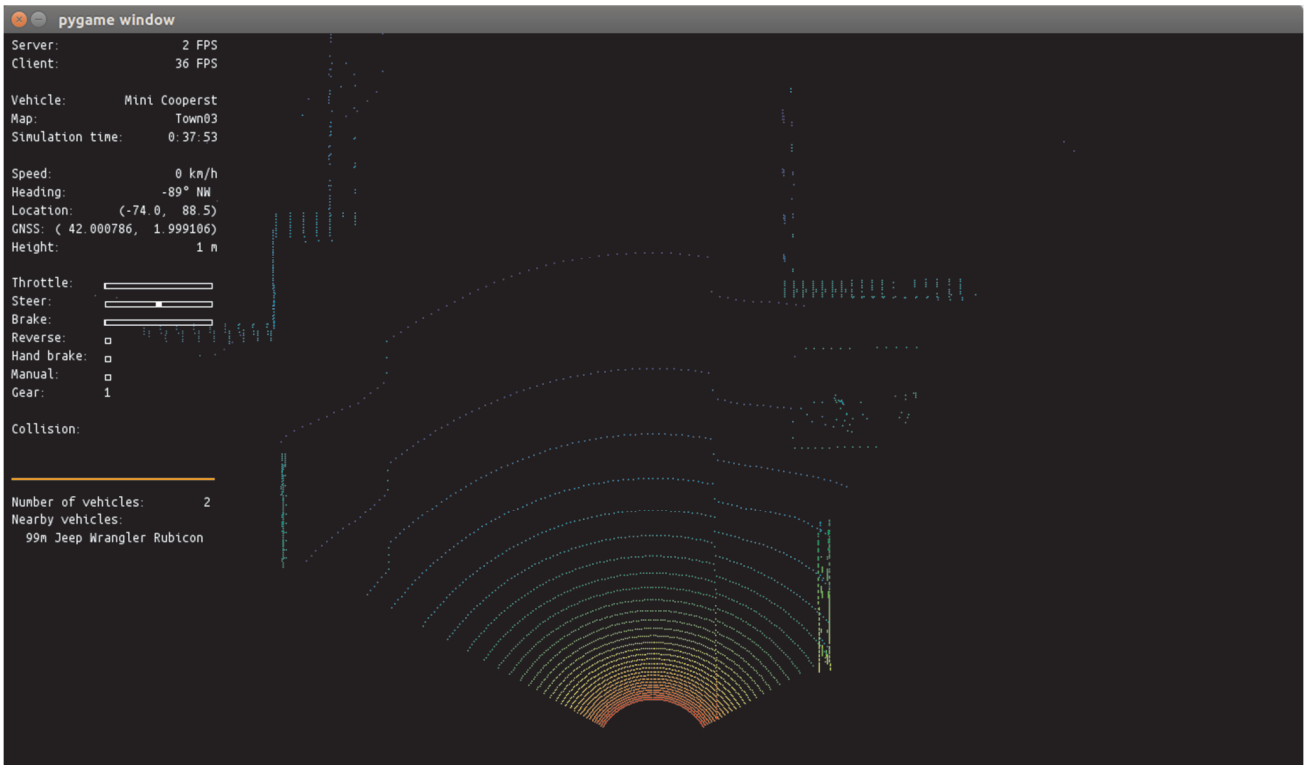
Figure 78 LiDAR シミュレーション　シーケンス図

Table 24 LiDAR シミュレーション IF 一覧

クラス名	メソッド名	入力引数	出力引数	戻り値	処理内容
Sensor Component	GetPosition	なし	位置	なし	センサ搭載位置の取得
	GetOrientation	なし	方向	なし	センサ搭載方向の取得
	AdjustPosition	現在時刻	なし	なし	センサ位置の補正
	AdjustOrientation	現在時刻	なし	なし	センサ向きの補正
	Tick	経過時間	なし	なし	センサ動作共通処理の実行
LiDAR Component	InitLiDAR	スペックファイル名	なし	なし	LiDARモデルの初期化
	OutputSensorData	点群 パワー	なし	なし	センサーデータの出力
LiDAR Model	GetShootList	現在シミュレータ時刻 １フレームあたりのシミュレータ時間	ショット番号 タイムスタンプ 射出方向	なし	射出方向リストの取得
	SetReceiveInfo	ショット番号 タイムスタンプ 射出方向 距離 返り光率 背景光密度	なし	なし	受光情報の設定
	DoSensorProc	なし	なし	なし	センサー内部計算の実行
	GetSensorData	なし	点群 パワー	なし	センサーデータの取得
Time Keeper	GetSimTimePerFrame	なし	１フレームあたりのシミュレータ時間	なし	１フレーム分のシミュレータ時間の取得
	GetCurrentTime	なし	現在シミュレータ時刻	なし	現在シミュレータ時刻の取得
Env Model	CalcInfraredPropagation	射出位置 射出方向	距離 返り光率 背景光密度	なし	赤外線伝搬計算

c）機能モデルクローズドループ PF の開発

策定したアーキテクチャとセンサモデル IF に基づき、機能モデルクローズドループ PF の初期版の開発を実施している。2019 年 4 月初旬の LiDAR 機能モデル提供に向けて、まずは LiDAR モデルの実装を実施した。

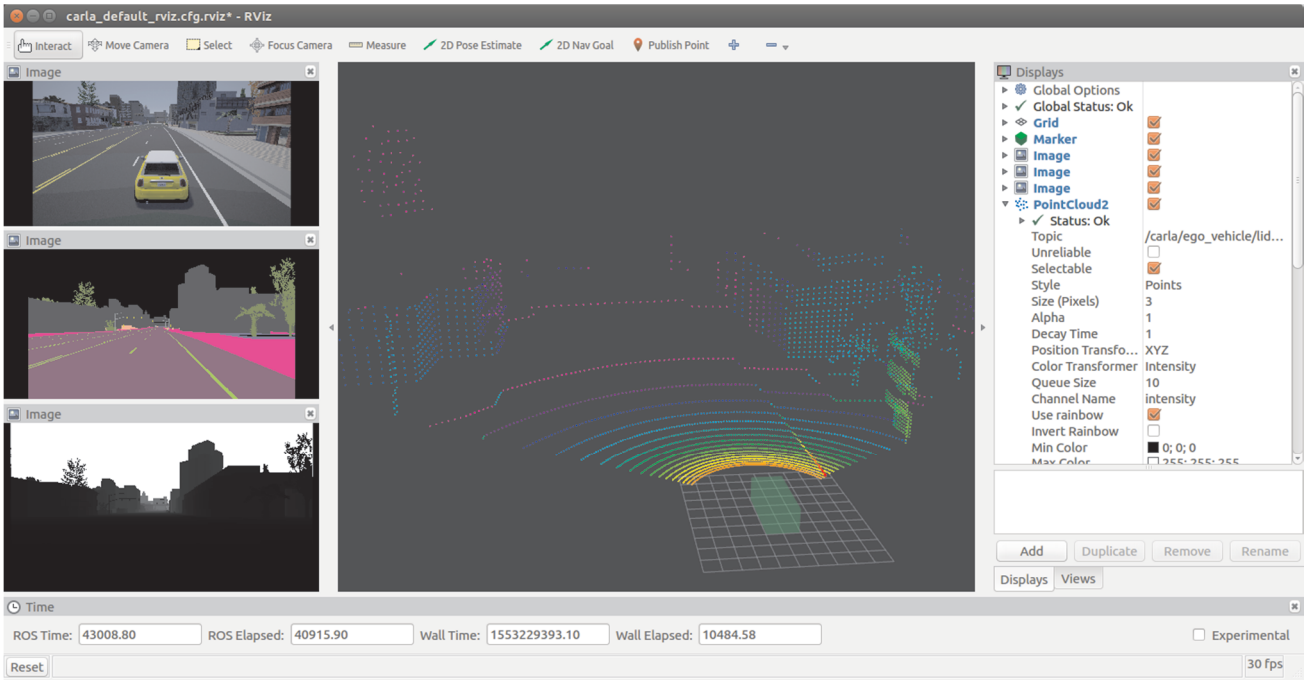


出所 ：Copyright © CARLA Team 2019

Figure 79 開発中の LiDAR シミュレーション初版の結果

出所 ：Copyright © CARLA Team 2019

Figure 80 LiDAR シミュレーション初版実行時のシーン（カメラ画像）



出所 ：Copyright © CARLA Team 2019 ／ Copyright © 2018 – Open Source Robotics Foundation, Inc.

Figure 81 ROS 出力結果を rviz(ROS 可視化ツール)で表示した結果

⑶ 次年度以降の計画

② センサ不調モデル仕様の定義

逆光、トンネル出入り口、夜間などセンサ不調につながると考えられる要因を洗い出し、その中から本事業にて取り扱う優先度の高いセンサ不調要因を選定する。その上で、シミュレーションで現象を再現するために必要となる要素についてセンサメーカー各社と協議し、不調要因毎に物理シミュレーションの仕様を明確化する。

③ 機能モデルクローズドループ PF の開発（平成 30 年度より実施）

a）A パートで作成されるシナリオ読み込み機能の開発

A パートで開発される SDM ジェネレータと連携し、テストシナリオを読み込んで、クローズドループシミュレーションを行う機能の開発を実施する。

b）B パートのセンサモデル（機能モデル）への入力データ生成機能の開発

センサモデル（機能モデル）への入力データ生成機能の開発を実施する。詳細は「5.4.2 (4) 空間モデルの処理内容」に記載する。

c）C パートのモーションプランニングモデルから自動車制動結果を受け取り、CG を再レンダリングする機能の開発

C パートとは ROS 通信を介して連携し、自動車の制動情報を受け取り、3 次元空間内の自車位置を決定する。シナリオから他車や歩行者などのアクターの位置を決定し、次時刻におけるセンサモデルへの入力を生成可能な状態に環境モデルを更新する。

d）上記の機能群の動作タイミングを制御する機能の開発

各センサモデルの動作タイミングの制御し、リアルタイムでのクローズドループシミュレーションを実行する機能の開発する。センサモデルの動作周波数はリアルタイム性を損なわない範囲となるよう調整を行う。各センサモデルの動作結果にタイムスタンプを付加した情報を、モーションプランニングモデルへと受け渡す。

④ 機能モデルシミュレーションのテスト・評価

③で開発したシミュレーション PF のテスト、及び、評価を実施する。各センサの設置位置を変更し、変更に応じて FoV が正しく変化することを確認する。また、モーションプランニングモデルに期待する入力が生成され、モーションプランニングモデルからの出力を元に、車両の位置情報が変更されることを確認する。

⑤ 物理モデルオープンループ PF の開発

B パートのセンサモデル（物理モデル）への入力データ生成機能の開発を実施する。詳細は「5.4.2 (4) 空間モデルの処理内容」に記載する。開発する PF は③のクローズドループ PF をベースに開発を行う。

⑥ 物理モデルシミュレーションのテスト・評価

⑤で開発したシミュレーション PF のテスト、及び、評価を実施する。各センサの現物での評価結果とシミュレーション結果の比較を行い、物理シミュレーションが実空間での振る舞いの再現度を評価する。

⑦ センサ不調を考慮した PF の開発

A1 パートで定義されたセンサ不調モデルの仕様に基づき、⑤のシミュレーションPFでの評価結果と、実測データの比較を行い、ギャップを分析してセンサ不調を再現するための要件を明らかにし、PFへ要件を反映する。PF へ反映する不調要因については、より必要性の高いものから優先度をつけて実装を行う。

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

⑦で実装したPFにおいて、物理シミュレーションによるセンサ不調の再現度の評価を実施する。また、機能シミュレーションで同様の条件でテストを実施した場合に、物理シミュレーション結果との差異の評価も実施する。

⑨ 総合評価

全パートの成果物をつなぎ合わせ、自動走行評価環境として正しく動作するかの評価を行う。全テストシナリオを実行し、結果の妥当性（シミュレーション精度）とテスト実行時間（シミュレーション時間）を測定する。

(4) 空間モデルの処理内容

B パートのセンサモデル（機能/物理）への入力データを生成する空間描画機能の処理は、物理法則に則った共通の仕様をベースとし、物理モデルシミュレーションは処理時間を要する代わりに詳細計算による再現性の追求、機能モデルシミュレーションは物理モデルシミュレーションの計算を省略することにより、精度は落ちる代わりにリアルタイム性を重視する設計とする。機能/物理の差異は現状では以下のように想定しているが、より良いモデルとなるよう、本活動のなかで実装と評価検証を繰り返していく。

Table 25 機能モデルシミュレーションと物理モデルシミュレーションの差異

シミュレーション種別	空間描画／知覚		
	カメラ	ミリ波レーダ	LiDAR
機能モデルシミュレーション	UE4程度の画像を知覚する簡便なモデル	マルチパス無のレイトレースに対応したモデル	フットプリントを考慮しないモデル
物理モデルシミュレーション	パストレーシングに対応したモデル	マルチパスレイトレースに対応したモデル	フットプリントを考慮するモデル

機能モデル/物理モデルで共通する概念は以下となる。

可視光（380nm～770nm の波長）、ミリ波（1mm～10mm の波長）、赤外光（905nm）のそれぞれの電磁波の挙動を、鏡面反射、拡散反射、再帰反射を含む様々な反射特性を用いてシミュレートする。ミリ波については A1 パートで測定される材料の電気的特性（誘電率）を反射波の計算に用いる。LiDAR については、材質の近赤外線

反射特性を反射波の計算に用いる。

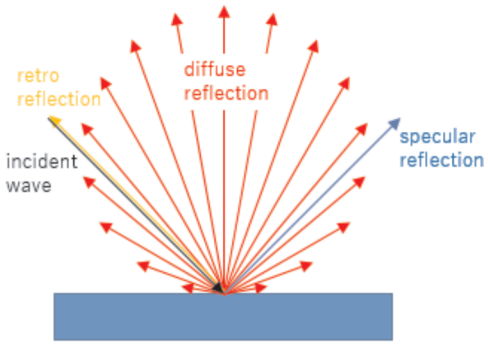
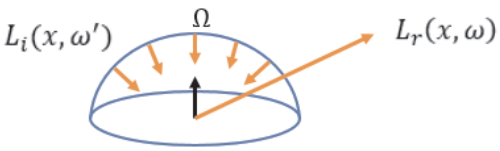


Figure113　電磁波（可視光、ミリ波、赤外光）の鏡面反射、拡散反射、再帰反射の考慮

1　カメラ

レンダリング方程式を用いて、反射波の計算を行う。

$$L_r(x,\omega) = \int_{\Omega} f_r(x,\omega,\omega')L_i(x,\omega')(\omega',n)d\omega'$$



2　ミリ波レーダ

レーダ方程式を用いて、受信電力の計算を行う。

$$P_r = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4}$$

P_r: 受信電力

P_t: 送信電力

G_t: 送信アンテナ利得

G_r: 受信アンテナ利得

λ: 波長

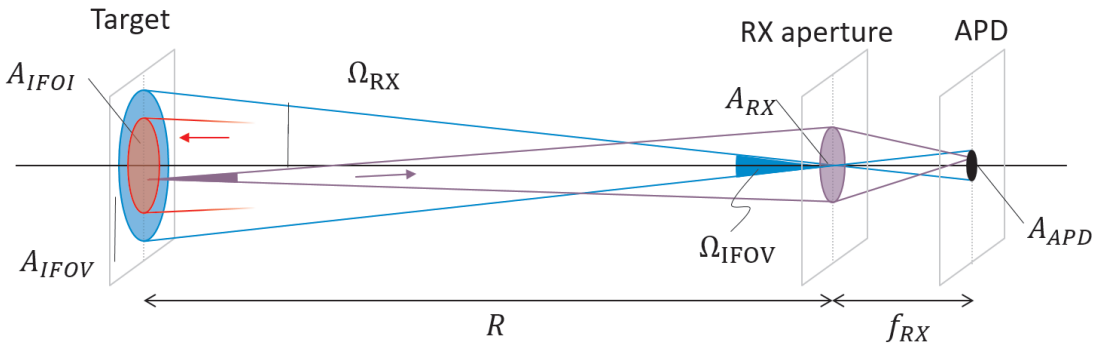
σ: RCS 値

R: 物標とレーダとの距離

3　LiDAR

パルス波と物標の交点と反射波のパワーを求める。

$$P_r = \frac{\rho}{\pi}\frac{A_{RX}}{R^2}P_t$$



A_X : area of X [m^2]
Ω_X : solid angle of X [sr]
R : range [m]
f_{RX} : focal length of RX optics [m]

以上

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

平成 30 年度　報告書

平成31年3月29日

学校法人幾徳学園　神奈川工科大学
学校法人立命館
株式会社 OTSL
三菱プレシジョン株式会社
SOLIZE Engineering 株式会社
日立オートモティブシステムズ株式会社
株式会社デンソー
株式会社 SOKEN
パイオニア株式会社
日本ユニシス株式会社