

「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)／自動運転技術  
(レベル3、4)に必要な認識技術等に関する研究」  
(AD-URBAN Project\*)

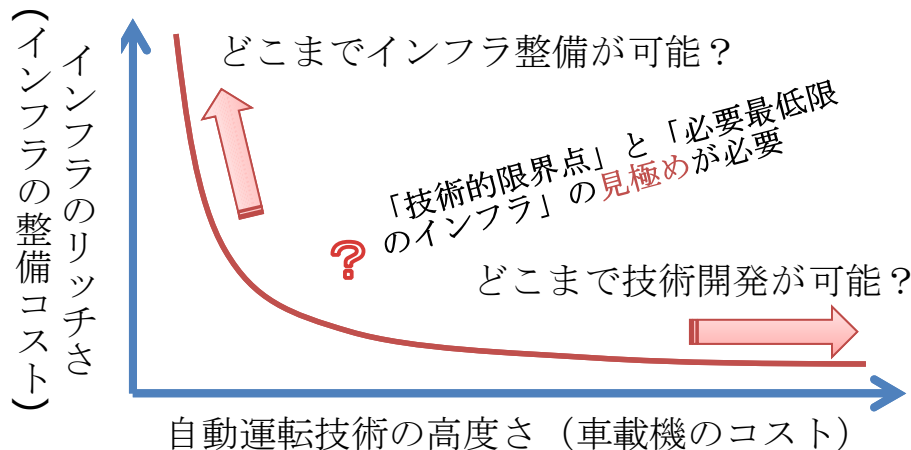
2018～2021年度分 成果報告書  
概要版

国立大学法人 金沢大学  
学校法人中部大学 中部大学  
名城大学

2023年2月

# 事業背景/目的

- 市街地でのLevel4相当の自動運転自動車
  - 車載されたAIによる高度で自律的な認知・判断機能
  - それを支援する道路設備, 通信設備等のインフラ
- 最先端の自動運転技術
  - 中立的立場のアカデミア(大学)の知見が必要
    - SIP事業内での積極的な連携



金沢大, 中部大, 名城大

大学のオープンな研究体制



成果 東京臨海部での実証実験

最低限必要なインフラと  
認知判断技術性能の見極め

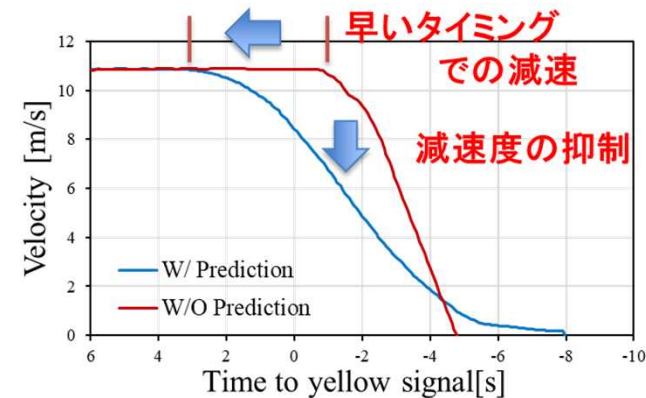
# 実証実験の実施概要

## ■ 実施目的

- 車載センサを用いた認識技術課題検証
- インフラ協調型自動運転の有効性評価
  - V2I/V2N 信号(予定)情報の有効性評価
  - V2N 緊急車両位置情報の有効性評価など
- DIVP<sup>®</sup>仮想環境の有効性評価
  - 認識の観点での一致性評価
  - 認識技術の限界性能評価
- 実証実験データ提供
  - AD-URBAN Open image dataset v1  
[https://github.com/AdmoreKanazawa/open\\_data](https://github.com/AdmoreKanazawa/open_data)

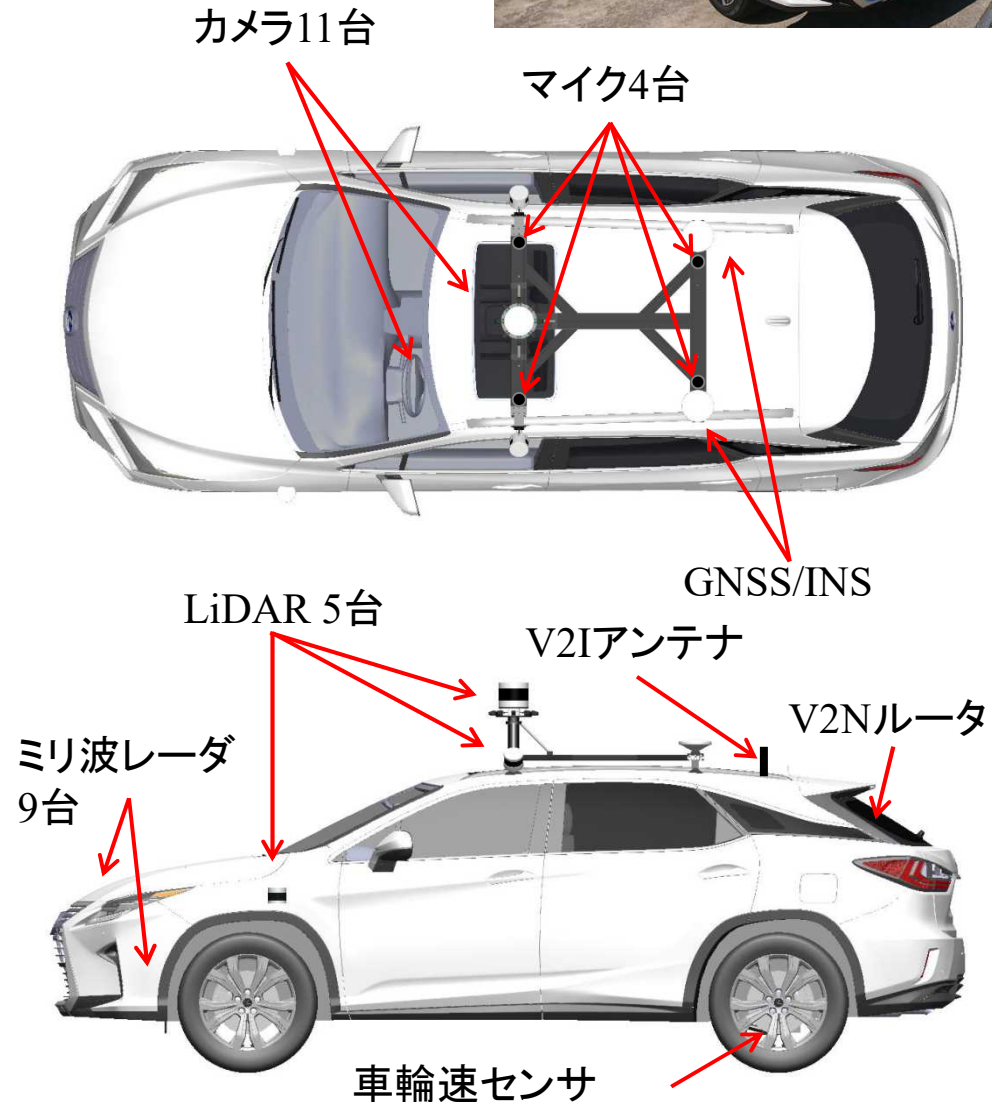
## ■ 社会受容性向上に資する取り組み

- 関係者, メディア等への試乗機会提供



# 実証実験実施状況

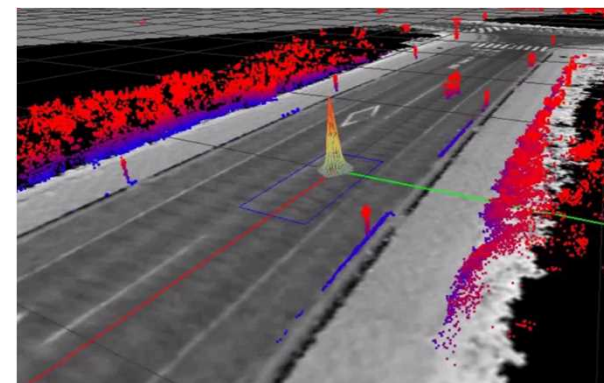
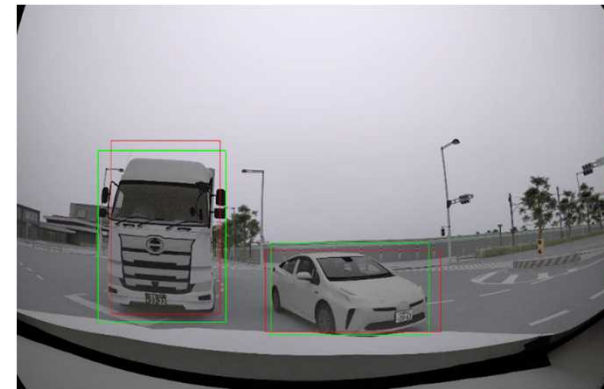
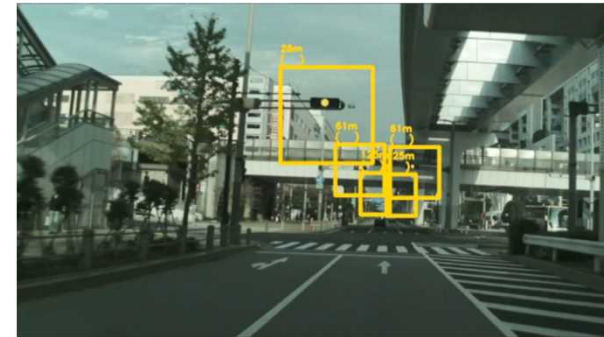
- 2台の試験車両構築
  - 東京臨海部, 石川県金沢市
- 走行実証実験期間
  - 金沢市中心部
    - 2019年7月～2023年2月
    - 自律型自動運転
  - 東京臨海部(お台場, 羽田)
    - 2019年9月～2022年12月
    - インフラ協調型自動運転  
+ 自律型自動運転
- 走行統計
  - 走行日数: 244日
  - 自動運転走行距離:  
3970.4km
    - 東京臨海部において



# 取り扱った認識技術と主な成果

認識技術の精度向上に資するハード・ソフト面のインフラについて検討

- 信号認識技術
  - 車載カメラを用いた信号認識技術
    - 信号認識率の向上に資するインフラ状況
    - V2I/V2N信号(予定)情報の有効性評価
- 緊急車両認識技術
  - 車載マイクを用いたサイレン音認識技術
    - V2N模擬緊急車両位置情報の有効性評価
- 物体認識技術
  - 車載カメラ, LiDAR等を用いた物体認識
    - 高精度デジタル地図の有効性
    - DIVP®仮想空間の有効性評価
- 自己位置推定技術
  - みちびきを活用した衛星測位技術
  - 白線を活用したマップマッチング技術
    - 自己位置推定精度向上に資するインフラ状況



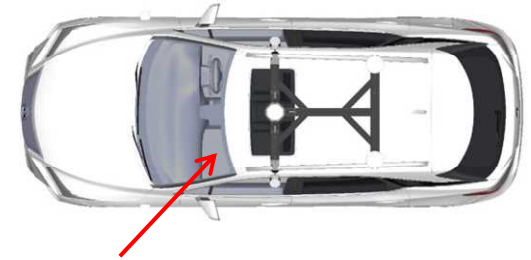
# 信号認識技術の概要

## ■ 使用したセンサ

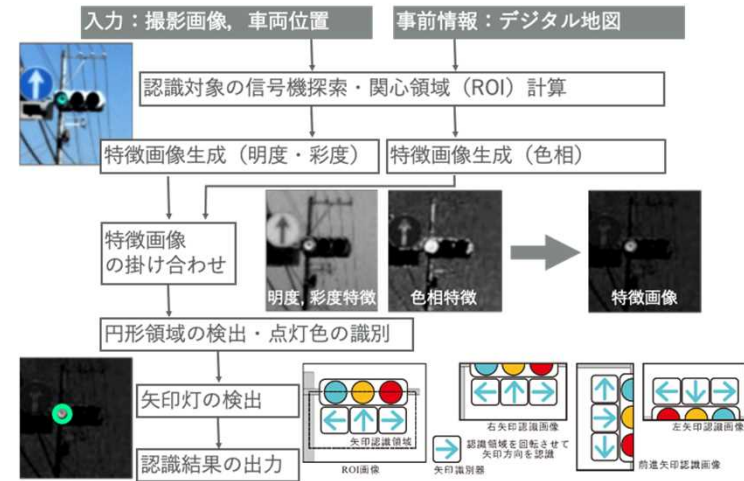
- SONY IMX390(車載用カメラ)
  - 解像度: FullHD相当
  - LFM(LED Flicker Mitigation), HDR (High Dynamic Range)機能搭載

## ■ 使用した技術の概要

- 認識領域を限定した点灯物認識
  - デジタル地図情報と高精度自己位置情報の併用
- 不鮮明な矢印灯の状態を認識
  - 機械学習技術と, 信号灯と矢印灯の相対的な位置関係を併用



信号認識用カメラ2台  
・通常カメラ(画角53deg)  
・望遠カメラ(画角27deg)



K. Yoneda, et al., "Robust Traffic Light and Arrow Detection Using Digital Map with Spatial Prior Information for Automated Driving", Sensors, 2020

# 信号認識技術の評価結果と不調要因

## ■ 性能評価結果

### ■ 評価データ(東京臨海部で撮影)

#### ■ 車載カメラ画像42603枚(全てLED式信号)

- 信号灯81,273件, 矢印灯8,555件,
- 隠蔽(車/構造物等)8,157件

### ■ 評価指標:F値

- Precision(精度), Recall(検出率)の調和平均

### ■ 評価結果:交差点単位の評価で平均認識率99.0%

平均認識率 (120m以内)	信号機 単位	交差点 単位
青信号	0.984	<b>0.997</b>
赤信号	0.977	<b>0.992</b>
矢印灯	0.908	0.982
平均値	0.956	<b>0.990</b>

## ■ 信号認識が不調となる要因

- 隠蔽, 背景同化, 夜間, 逆光(実証実験で不調を確認)
- 雨天(仮想環境で不調を確認)



隠蔽



背景同化



夜間



逆光

# 信号認識率の向上に資するインフラ

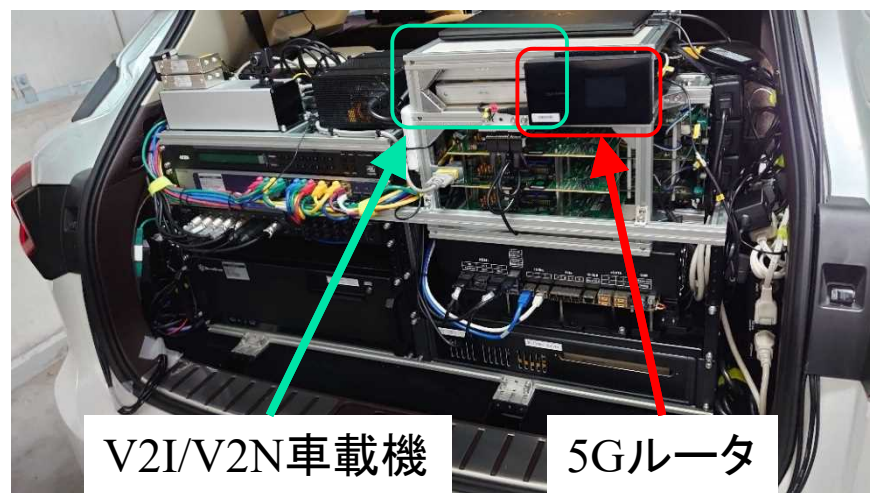
- 東京都臨海部での実証結果を踏まえた考察(LED式信号機の場合)
  - 認識不調が一時的な場合: 交差点進入判断に影響なし
    - 未検出: 交差点に複数の信号機が存在するなら他の信号機から判断可能
    - 誤検出: 瞬間的な誤検出であれば時系列処理によって影響を低減可能
  - 全ての信号機が認識できない状況が一定時間継続する場合
    - 遠方で未検出が継続する状況は確認されているが接近すると認識可能
- 東京都臨海部以外の地域における考察(ランプ式信号機の場合)
  - 順光の影響により, 交差点進入判断が不可能となる場合も存在
  - 光り方が弱く見える信号機の場合, 認識距離が短くなる場合も存在
- 実証実験から得られた信号認識率の向上に資するインフラ状況
  - 認識不調を考慮し交差点に信号機が複数設置されていることがより望ましい
  - 順光や光り方の影響等を考慮し, 特定の条件下ではランプ式からLED式へ信号機が置き換えられていることがより望ましい
  - ロバスト性確保の観点から, 無線インフラの設置された環境が望ましい





# インフラ支援型信号機の有効性評価

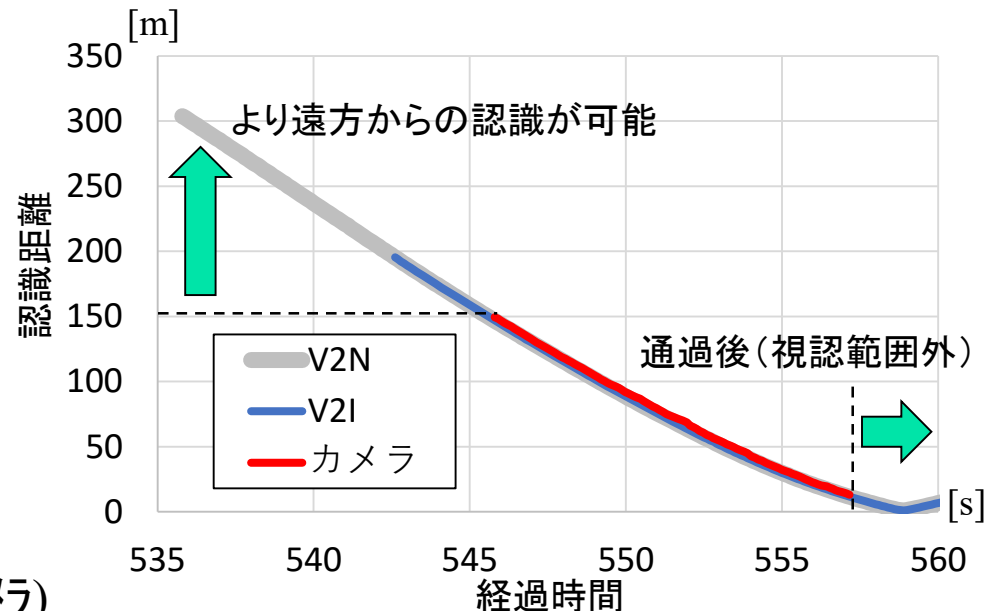
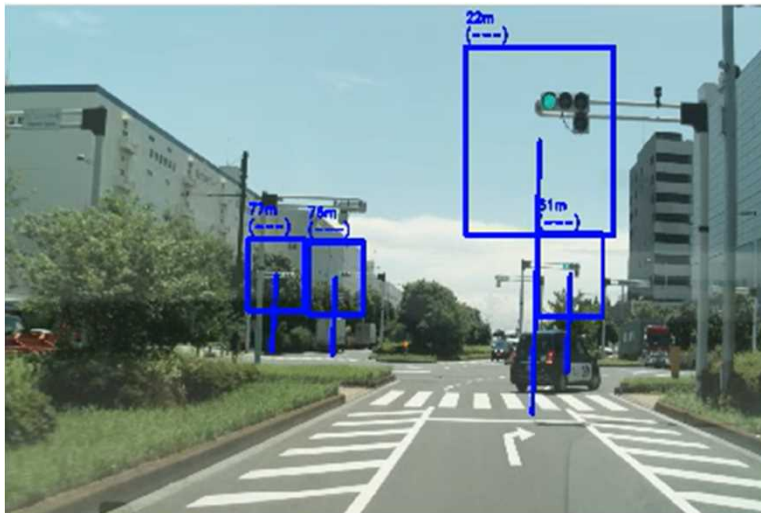
- 使用した機器（東京臨海部）
  - V2I信号情報, V2N信号予定情報受信車載機
    - 東京臨海部実証実験事務局貸与品
- 評価項目
  - カメラ/V2I/V2Nの認識距離・認識タイミングの比較
    - 試験車両にV2I/V2N車載機を同時搭載して比較評価
  - ジレンマゾーンでの減速度抑制の効果



# 各方式の信号認識距離・認識タイミングの比較

(\*)メータ車速60 km/h (実車速約55 km/h) で0.1G減速に必要な距離として試算

- 信号認識可能距離
  - V2N>V2I>カメラ(カメラでの認識可能距離は最大で150m程度)
    - 交差点通過判断には概ね120m(\*)必要と試算
    - どの方式でも交差点通過には支障のない認識距離
  - 各方式のフュージョンによるさらなるロバスト化が可能
- 信号認識タイミング
  - 人間の目で見える限り大きなずれは確認できないレベル
    - カメラによる認識結果, 無線インフラ(V2N/V2I)による切替わり通知タイミング
    - 東京臨海部, および奈良県における実証実験で確認

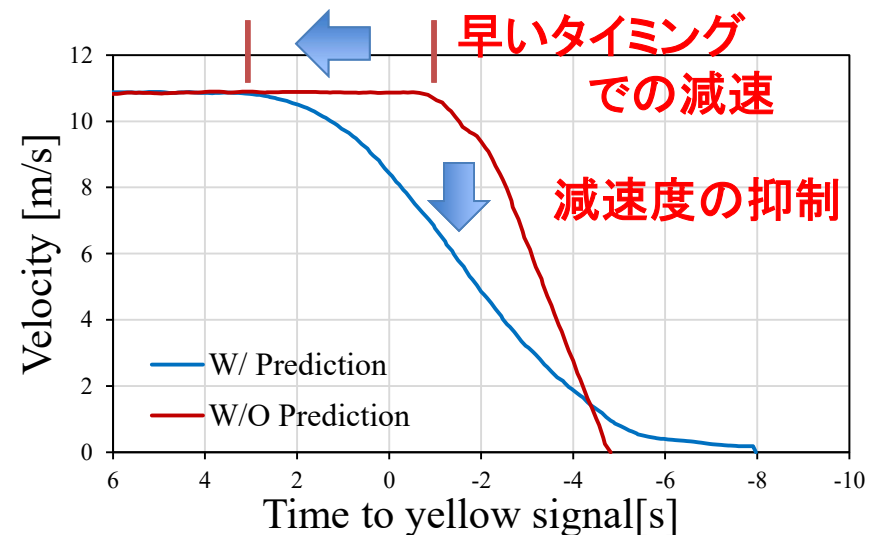


# 信号残秒数情報を活用した 信号協調走行

- インフラ支援型信号機の効果
  - 無線による信号現示情報の取得, **信号残秒数情報の活用**
- 信号残秒数情報を用いたジレンマゾーンでの事前減速
  - 公道走行試験
    - 羽田地区・お台場地区
  - 公道におけるジレンマゾーンでの減速度抑制効果を確認
    - 自律型交差点進入:  $-0.4G$   $\Rightarrow$  信号協調交差点進入:  $-0.2G$



信号残秒数取得例



# カメラ認識の課題とV2I/V2Nの有効性のまとめ

- カメラによる信号機認識の課題
  - 認識率99%以上の達成(東京臨海部)
    - 120m以内の信号機(赤・青・矢印灯)
  - 課題となるシーン
    - 隠蔽・背景同化・逆光・夜間・雨天など
- V2I/V2Nによる信号情報の有効性
  - 視界外の信号状態把握
    - 大型車による隠蔽, カーブ通過後信号等
      - カメラでは人間と同様に視認後に侵入判断
  - 多重系構成によるロバスト性向上
    - 特に信号機が1つしかない交差点内等で有効
  - ジレンマゾーンでの減速度抑制



大型車両による信号隠蔽



カーブ通過後の信号機



隠蔽



背景同化

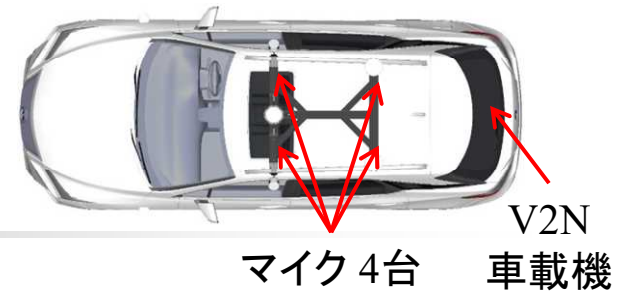


夜間



逆光

# 緊急車両情報評価 に用いた技術の概要



## ■ 評価に使用した装置

### ■ V2N車載機

- 東京臨海部実証実験事務局貸与品

### ■ UETAX um-100(防水マイク) × 4台

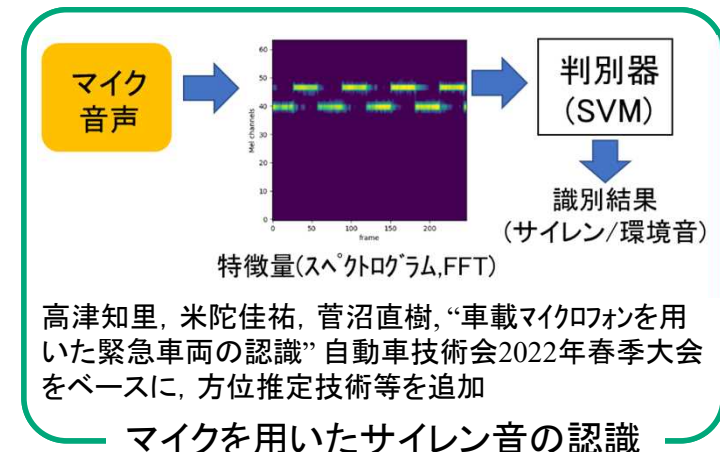
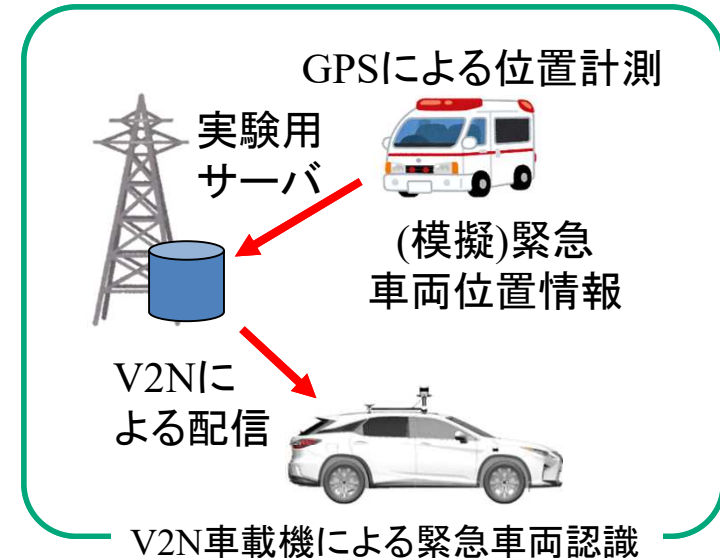
## ■ 評価した技術の概要

### ■ V2Nによる模擬緊急車両位置情報

- 模擬緊急車両の位置情報をGPSで計測
- 携帯回線により位置情報を配信

### ■ マイクを用いたサイレン音の認識

- 機械学習による認識
  - 音声データから特徴量生成
    - スペクトログラム, FFT
  - SVM: Support Vector Machine
- 位相差計算による方位推定
  - 複数マイクの使用



# 緊急車両情報の 評価結果と不調要因

- V2Nによる緊急車両位置情報
  - 評価データ
    - 東京臨海部における**模擬緊急車両位置情報**の配信結果
    - 性能評価結果
      - 概ね滑らかな走行軌跡を取得可能
      - 状況によっては20m程度のずれ発生
- マイクを用いたサイレン音の認識
  - 評価データ
    - 金沢市内, テストコースでの走行データ
  - 性能評価結果(暫定的な結果)
    - 認識率: 概ね96%程度
    - 方位角推定精度: 概ね10deg程度
  - 認識が不調となる要因
    - 雨, 風切り音等によるノイズ
    - 音の反響, 建物などによる隠れ等
      - 検知性能, 方位角の推定に影響

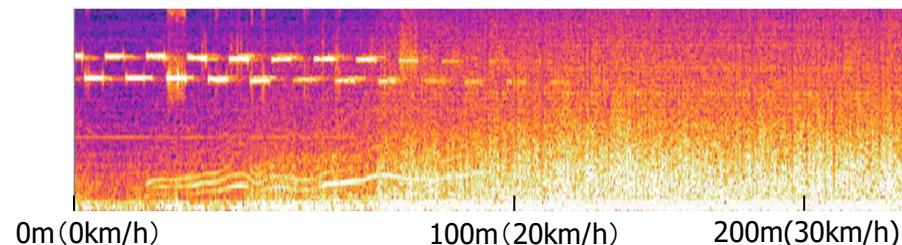


22/1/13 13時半過ぎ頃の位置情報

サイレン音の認識性能評価結果

Precision	Recall
0.966	0.960

Precision: 誤検出の少なさ, Recall: 未検出の少なさ



緊急車両が停止状態で自車が加速し近距離から遠距離に遠ざかるときの波形

# 緊急車両位置情報の有効性

## ■ 東京臨海部の実証実験を踏まえた考察

### ■ V2Nによる緊急車両位置情報

- 遠距離や隠れを伴う状況で特に有効
- 方位角精度は遠距離で高精度
- 近距離では衛星測位状況に依存
  - 細かい車両挙動の把握には課題

### ■ マイクを用いたサイレン音の認識

- 方位角推定精度は10度程度(見通しの良い状況)

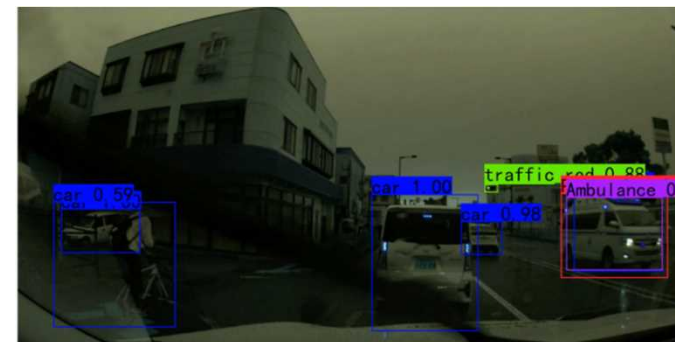
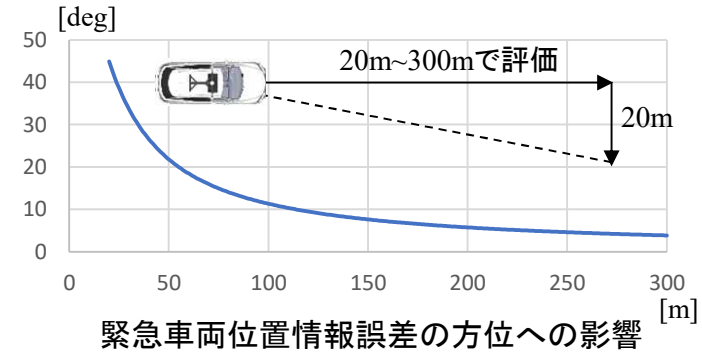
## ■ V2Nによる緊急車両位置情報の配信の有効性

### ■ 手動運転, もしくはLv3以下の自動運転システムに対して

- 最終的に, 近距離接近時にドライバーが緊急車両に対する回避行動を行うとすれば, 特に早期情報提供手段として有効に機能することが期待される

### ■ Lv4以上の自動運転システムに対して

- 緊急車両や周辺車両の走行位置に応じて自車の回避行動をとる必要があり, 近距離で細かい緊急車両の挙動の把握が重要
- サイレン音認識や画像認識などの手法との組み合わせも必要

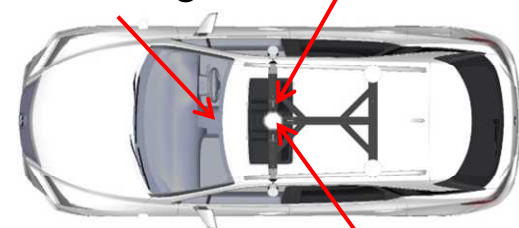


# 物体認識に用いたセンサと技術の概要

## ■ 使用したセンサ

- SONY IMX390(前方カメラ)
- Onsemi AR0231(全方位カメラ)
  - 解像度: FullHD相当
  - HDR(High Dynamic Range)機能搭載
- Velodyne VLS-128(全方位LiDAR)
  - レーザレイヤー数: 128, 最大測定距離: 300m
  - FOV: 水平360deg, 垂直40deg

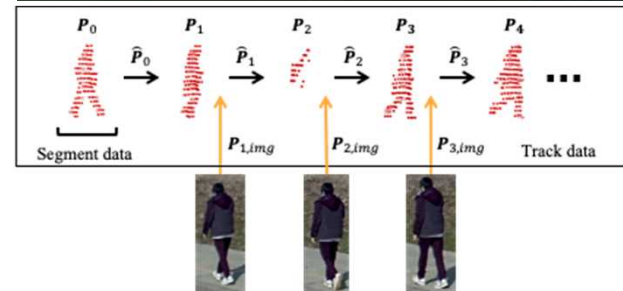
全方位カメラ(画角60deg)x8  
前方カメラ(画角53deg)



全方位LiDAR

## ■ 使用した技術の概要

- カメラによる物体認識
  - DNN\*を用いた2D矩形枠認識
    - YOLOv3, YOLOv4をベースとした独自学習済みモデル
    - デジタル地図から注目領域を設定し, 遠距離物体を認識
- LiDARによる物体認識
  - DNN\*を用いた3D矩形枠認識
    - PointPillarsをベースとした独自学習済みモデル
- センサフュージョンによる物体認識
  - LiDAR/カメラの併用により認識精度を改善





# 物体認識評価結果と不調要因

## 性能評価概要

### 評価データ

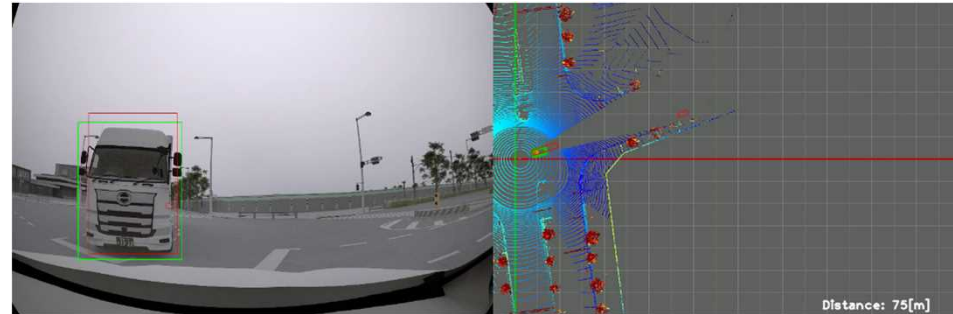
- 実証実験で取得したデータ
- 金沢大学構内のデータなど

### 物体認識性能

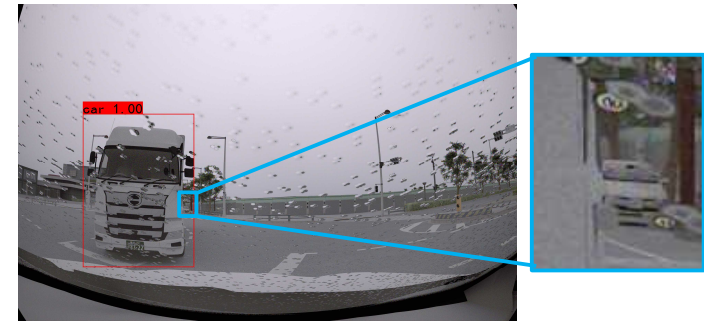
- 自動車: 200m程度まで認識可能
- 歩行者: 70m程度まで認識可能
  - LiDAR/カメラフュージョンの有効性を確認

## 認識において不調となる要因

- 隠蔽, 背景同化, 雨天(カメラ, LiDAR)
- 夜間, 逆光(カメラ)
  - 実証実験, 仮想環境で不調を確認



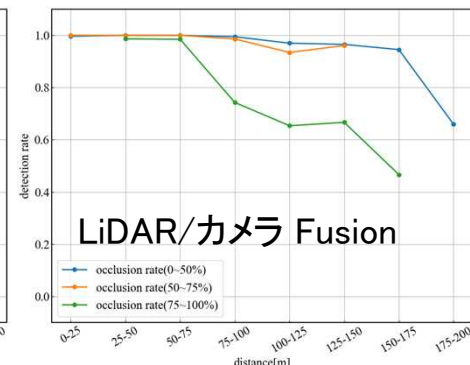
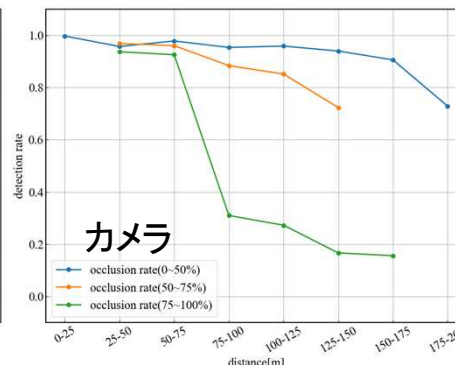
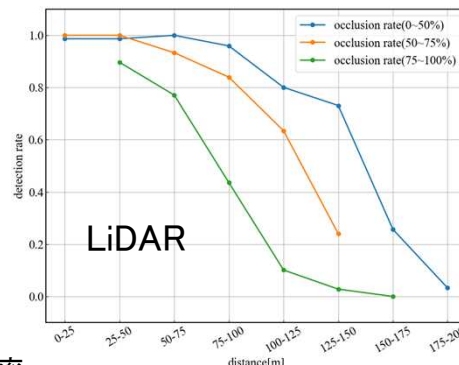
死角の影響評価 (赤枠: 正解枠, 緑枠: 認識結果)



雨天の影響

## 異なる遮蔽率における 車両検出率の変化

(フレーム毎の認識率であり, 時系列追跡により更なる能力向上も期待できる)



※遮蔽率の定義:

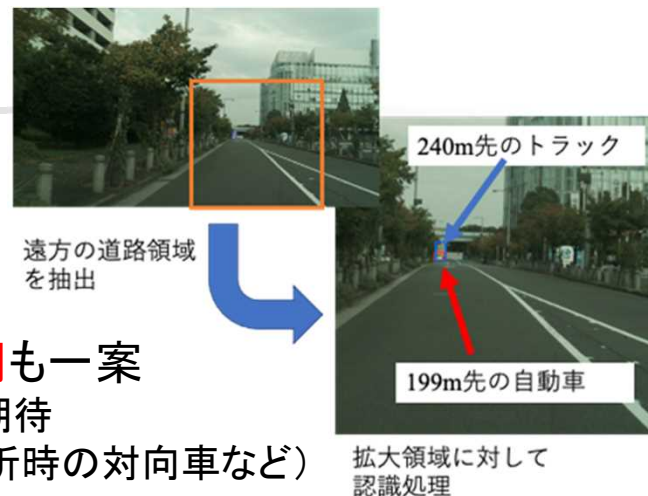
・LiDAR: 3DBoxの不可視面積率

16・カメラ: 画像矩形枠の不可視面積率

# 物体認識における仮想環境を用いた評価の有効性

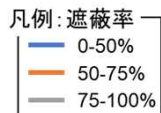
## 東京都臨海部での実証結果を踏まえた考察

- 環境要因による認識不調の発生
  - 未検出が発生して認識距離が低下 (隠蔽, 背景同化, 雨天など)
- 認識不調の改善に向けて**高精度デジタル地図の活用も一案**
  - AIモデルに注目領域を設定することで認識距離の改善が期待
  - 注目領域が劇的に変化する市街地で特に有効 (交差点右折時の対向車など)
- **各種センサの認識における限界性能の明確化が必要**
  - 実環境での評価では, コスト・効率性の面から限界が存在



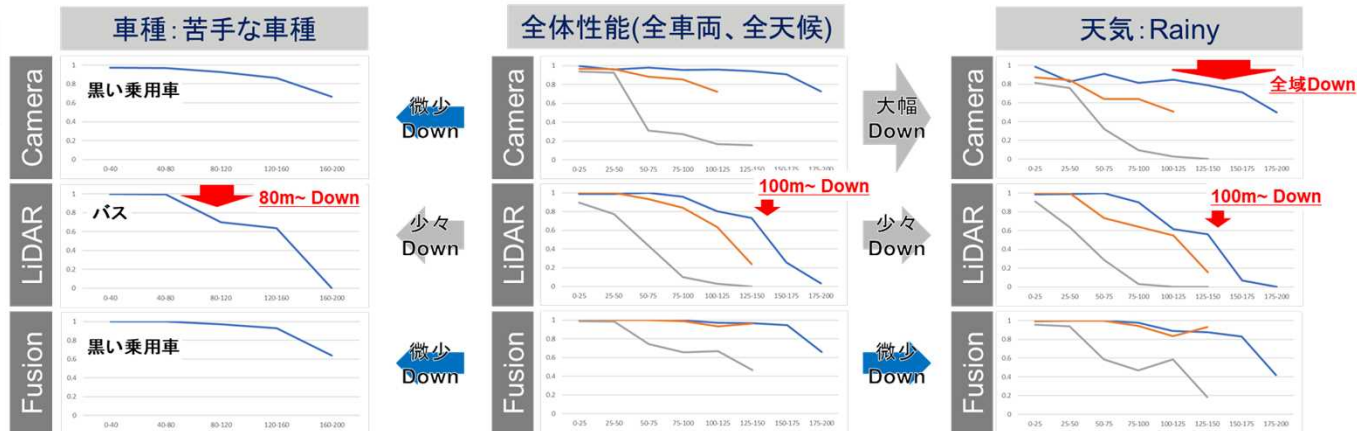
## 仮想環境を用いた評価の有効性

- 不調シーンの再現性・網羅性の観点から**仮想環境の活用が重要**
  - 限界時の認識を改善するセンサ配置の検討やモデル学習への活用にも期待
- **自動運転システムの安全性評価に向けた仮想環境の更なる有効活用が必要**



様々な苦手条件下に  
おける車両検出率の変化  
(フレーム毎の認識率であり, 時系列追跡により更なる能力向上も期待できる)

DIVP®との連携による評価結果



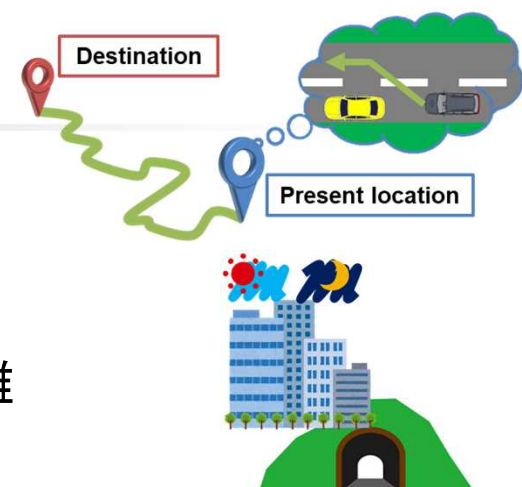
# 自己位置技術の取り組み

## ■ 自己位置推定技術の必要性

- 市街地での自動運転には高精度地図が有効
- 高精度地図活用には高精度な自己位置が必須
  - トンネル内などGNSSのみでは自己位置推定が困難
  - マップマッチングによる高精度自己位置推定
- 信頼性の向上に向けて
  - GNSS/INS\*およびマップマッチング双方の高度化が重要

## ■ 研究開発の具体的な内容

- ①「GNSS/INSの開発」
  - レーンレベル位置推定(1.5m精度)のロバスト化
    - マップマッチング技術等との併用を前提
  - RTK-GNSS(0.3m精度)の信頼度推定
    - 準天頂衛星「みちびき」の活用
    - GNSS/INS単独での自動運転が可能なレベル
- ②「マップマッチング技術の開発」
  - オルソ画像を活用したマップマッチング技術
  - 車載グレードGNSS/INSを併用した高精度自己位置・姿勢推定



# 衛星測位技術(GNSS/INS)の概要

## ■ 使用したセンサ

- Septentrio Mosaic-X5 (みちびき対応 GNSS受信機)
  - CLAS-LIBによりCLASを利用したPPP-RTKが可能
- ADIS16475 (汎用MEMS-IMU)
  - 将来的に車載可能なレベルの6軸MEMS-IMU



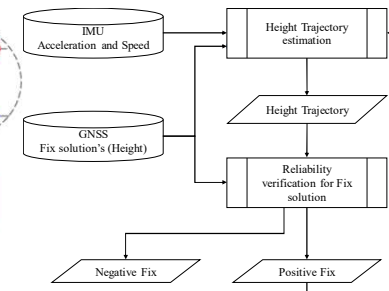
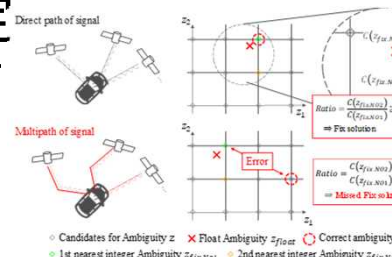
GNSS受信機  
mosaic-X5  
Septentrio



汎用MEMS-IMU  
ADIS16475  
AnalogDevises

## ■ 使用した技術の概要

- 車両運動を活用した高精度位置推定
  - GNSSドップラを活用した車両運動の高精度推定による測位の高精度化
- 車両運動の拘束を活用したRTK-GNSSの利用性向上
  - RTK-GNSSの探索初期位置の改善による高精度測位の利用性向上



Aoki Takanose, et. al., Improvement of Reliability Determination Performance of Real Time Kinematic Solutions Using Height Trajectory, Sensors, 21, 2, 2021.1

# 衛星測位技術(GNSS/INS)の評価結果と不調要因

## ■ 性能評価結果

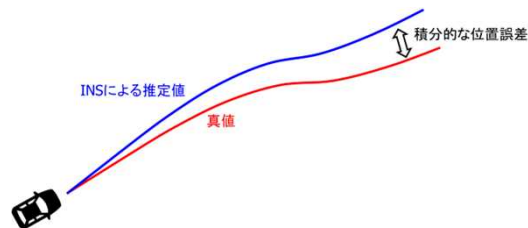
- 評価データ(東京臨海部でデータを取得)
  - ゆりかもめの高架下含む10kmの経路を設定
- 評価指標:位置精度達成割合
  - 1.5m精度の達成割合, 0.3m精度の信頼性
  - 補正情報途絶後10秒後の0.3m精度達成割合
- 評価結果:
  - 1.5m達成96% 0.3m信頼性99%, 10秒後0.3m達成89%

	達成割合/ 信頼性
1.5m精度達成割合	96%
0.3m信頼性	99%
補正情報途絶後 10秒後0.3m達成割合	89%

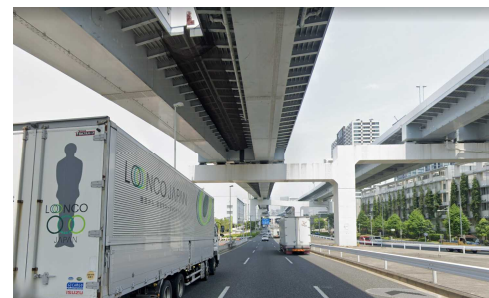
## ■ 位置精度が不調となる要因

- 建物, 構造物の影響によるGNSS信号の劣化
- INS誤差による積分的な位置誤差

補正情報途絶後のINSによる位置誤差



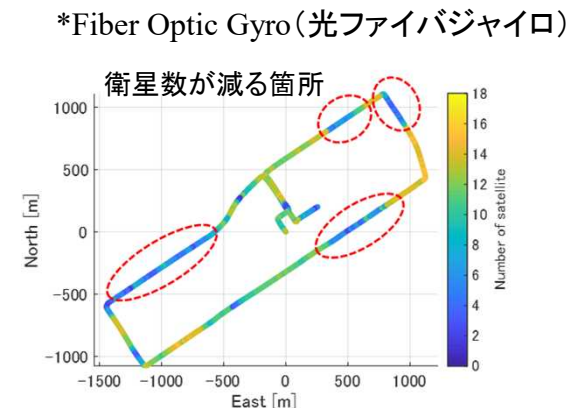
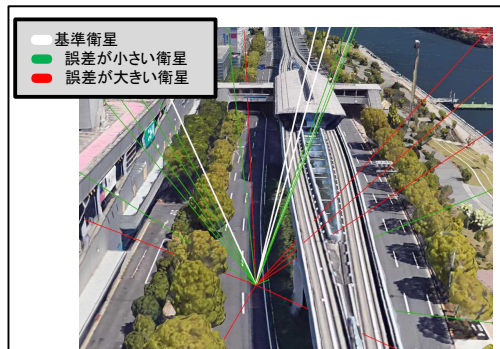
高速高架下/GNSS信号の劣化



# 衛星測位技術(GNSS/INS)を活用した 自己位置推定技術の高信頼化に向けて

- 東京都臨海部での検証結果を踏まえた考察
  - 建物、構造物の影響によるGNSS信号の劣化に関する考察
    - レーンレベル位置推定(精度1.5m): アルゴリズムの改善により概ねの対応が可能(96%)
    - GNSS/INS単独での自動運転が可能な位置精度(精度0.3m): 信頼性の判定は可能(99%)  
ただし、GNSSだけで位置推定の間違いを完全に無くすことは困難
  - INS誤差による積分的な位置誤差に関する考察
    - GNSS信号の遮蔽/補正情報の途絶により絶対位置が推定できなくなると、10秒間0.3m精度を維持することは困難.
    - 高精度なINS(FOG\*)を用いたとしても、10秒後の位置精度は汎用MEMS-IMUと同等の性能.  
ただし短い秒数(8秒)であれば、0.3mの精度を維持ができる可能性は高い
- 衛星測位技術を用いた自己位置推定の高信頼化に向けて
  - 建物/構造物によりGNSSの衛星数が減少/精度が劣化する箇所では**マップマッチング技術などの他手法との連携が特に重要**
  - **事前に測位精度が劣化する区間の把握を行うことも重要**
    - 3次元地図データの活用など

3D地図データを活用して  
衛星測位精度劣化する環境の  
事前把握を行った例



# マップマッチング技術の概要

## ■ 使用したセンサ

- GNSS/INS: Applanix POS-LV125

- MEMS-IMU搭載型GNSS/INS

- デッドレコニング(DR)に使用

- LiDAR: Velodyne LiDAR 5台

- マップマッチングに使用(オルソ画像生成)

## ■ 使用した技術の概要

- デッドレコニング(DR)

- 車速ベクトル積分による位置推定

- マップマッチング

- LiDAR反射率を活用したオルソ画像\*生成

- 道白線や横断歩道等の模様を画像として生成

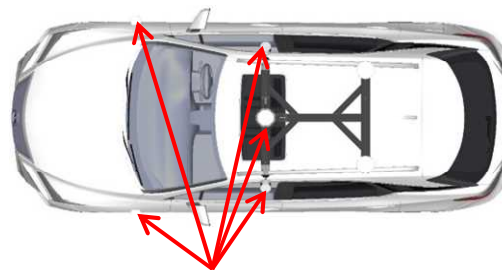
- Lambert反射モデルに基づく反射率補正

- オルソ画像のマッチングによるDR誤差補正

- デッドレコニング誤差の推定

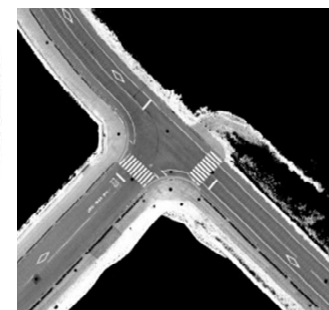
- オルソ画像地図とセンサデータとの照合

- 時系列処理による高精度・ロバスト化

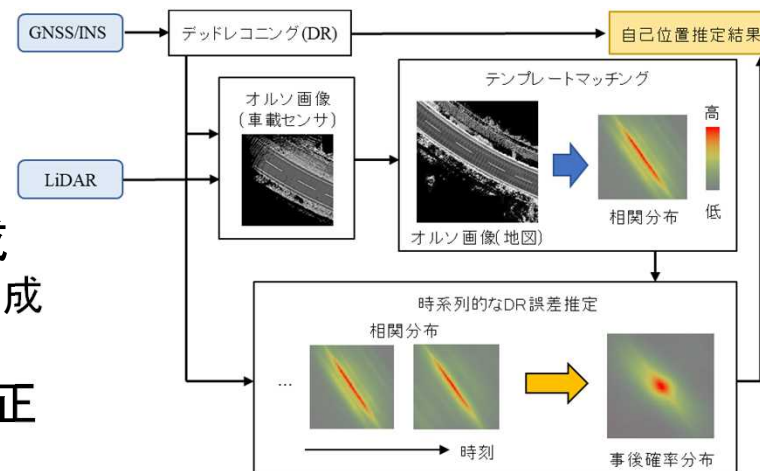


LiDAR 5台

- ・VLS-128 × 1台
- ・VLP-32c × 2台
- ・VLP-16 × 2台



オルソ画像  
(LiDARを使用)



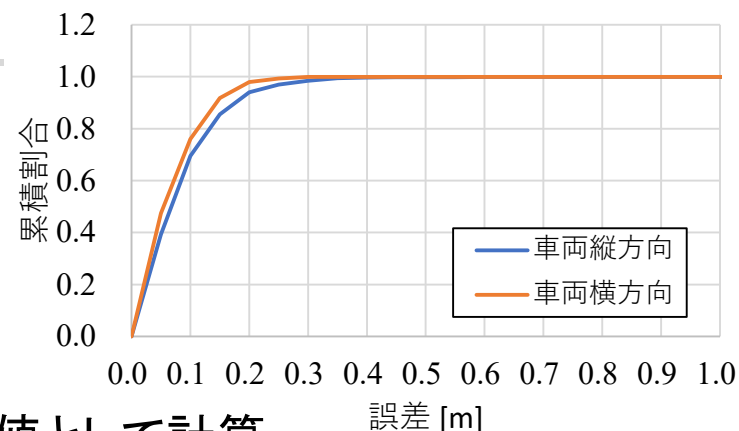
N. Suganuma, D. Yamamoto and K. Yoneda, "Localization for autonomous vehicle on urban roads", Journal of Advanced Control, Automation and Robotics, 2015.  
をベースに反射率補正モデル, Yaw角推定技術等を追加

\*道路面を上空から見た画像

# マップマッチング技術の評価結果 と不調要因

## 性能評価結果

- 評価データ(金沢市内で計測)
  - 片道約20kmの走行ルート
  - 市街地や山間部などを含む
- 評価指標: 推定位置誤差
  - GNSS/INSの後処理補正結果を真値として計算
- 評価結果:
  - 車両前後方向精度 0.097m, 車両左右方向精度 0.079m(RMS誤差)



## マップマッチングが不調となる要因

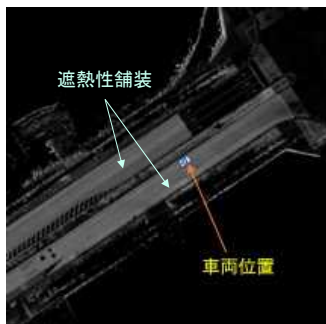
- 路面材質(遮熱性塗装路面やコンクリート路面)
- 白線のかすれ, 雨による路面の濡れ

カメラ画像



遮熱性塗装路面

LiDAR反射率 オルソ画像地図

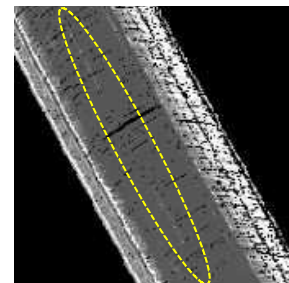


カメラ画像



濡れたコンクリート路面

LiDAR画像

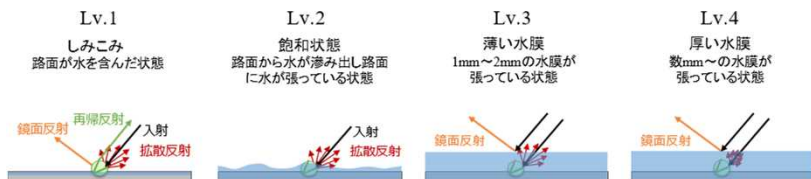


破線が薄くなって見えにくい状態

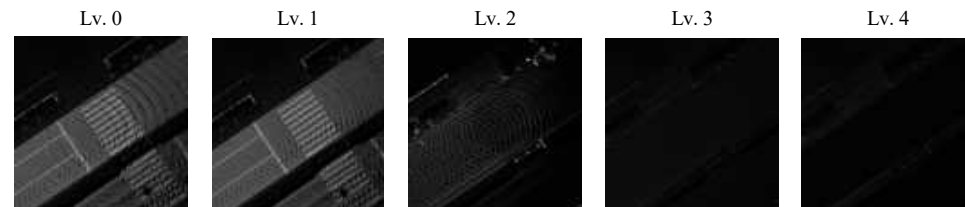


# マップマッチングによる位置推定精度向上に資するインフラの状況

- 実証結果を踏まえた考察(オルソ画像を用いたマップマッチング技術を使用)
  - GNSS/INSの測位精度が低下する場所(トンネル内や高架下など)を含め、**マップマッチング技術を用いた高精度位置推定が可能**
  - **白線のコントラストが低い場所では雨による路面の濡れが位置推定精度に影響**
    - 遮熱性塗装路やコンクリート舗装路など(仮想空間を用いた限界性能評価も実施済)
  - **白線パターンが明瞭でない区間では位置推定精度に影響**
    - 白線のかすれなど(路面かすれのレベルが認識に与える評価も実施済)
  - **ただし、位置推定精度に影響を及ぼす区間が短期間である場合、実用上問題なし**
    - 東京臨海部など、金沢市内の道路などの実証実験実施エリア
- 実証実験から得られた位置推定精度の向上に資するインフラ等の状況
  - 自己位置推定に有用なインフラ(例えば白線など)が、長距離連続的に存在しない状況を避けることが望ましい
  - 自己位置推定に有用なインフラは、他のパターンとの識別が容易である状況が望ましい(例えば、白線と舗装路のコントラストが高いことなど)
  - マップマッチングによる認識不調を考慮し、例えば他方式のマップマッチング技術やGNSS/INSとの併用などの多重化技術が望まれる。



路面の濡れレベルの定義



遮熱性塗装路における路面の濡れの影響 (仮想環境での限界性の評価)



# まとめ

- 東京臨海部実証実験
  - 2019年9月～2022年12月
  - 走行日数244日間, 自動運転走行距離3970.4km
- 認識技術の向上に資するハード・ソフト面のインフラ状況等について報告
  - 信号認識技術
  - 緊急車両認識技術, 物体認識技術
  - 自己位置推定技術
    - みちびきを活用した衛星測位技術
    - 白線を活用したマップマッチング技術
- AD-URBANでの研究開発成果の今後の活用に向けて
  - 自動運転技術の向上に資するインフラの状況等に関して, 必要に応じて引き続き関係者と情報共有を図る予定
  - 実証実験で得られたデータの提供 (AD-URBAN Open image dataset v1) に関しては, 事業終了後も継続的に提供予定
  - 自動運転技術の効率的かつ網羅的な安全性評価に向けてDIVP<sup>®</sup>, SAKURA関係者等と連携し, SIP事業終了後も継続的な議論を実施予定

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