

自動運転の安全性評価を狙いとしたシナリオ分析用 交通外乱データ収集技術 (定点カメラ観測)

— 第 1 報 : 基本フレームの構築 / 軌跡精度の予測と検証 —

Traffic Disturbance Data Collection Technology
for Scenario Analysis for the Purpose of Safety Evaluation of Automated Driving
(Fixed Point Camera Observation)

— 1st Report: Construction of a Basic Framework, Prediction and Verification of Trajectory Accuracy —

中村 英夫*1 古田 暁広*2 横山 洋児*2
Hideo NAKAMURA Akihiro FURUTA Youji YOKOYAMA

1. はじめに

周辺監視義務をシステムが有する高度な自動運転車（レベル 3 以上¹⁾）を早期に社会実装するためには、安全性を確実に担保できる評価手法が必要である。自動運転のレベル定義を Table 1 に示す。欧州では PEGASUS プロジェクト²⁾や Horizon2020³⁾ に代表される産官学が協調して自動運転システムの評価プロセスの標準化を進める動きが活発化しており、自国の道路交通事情を中心に評価プロセスの構築を推進している。したがって、日本でも国内の交通事情を鑑みた安全性評価のプロセスや手法の研究開発を進める必要がある。このような背景で、経済産業省からの委託事業である「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（2018 年度～）」^{4,5)}（SAKURA プロジェクト⁶⁾）では、まずは一般量産車の自動運転（レベル 3 以上）を対象として、国際動向を踏まえつつ、自動運転システムの安全性評価に必要なプロセスと評価手法の開発と検証を行っている。具体的には、シナリオベースの安全性評価手法を検討しており、シナリオおよび紐づく各種パラメータの妥当性を裏付ける実交通環境データの収集と分析も行っている。また、社会実装が比較的早いとされる高速道路や自動車専用道路を当面の対象としている。特に、衝突リスクに影響する複数車両の相互関係に係る交通外乱データ（車線変更や加減速など）の収集を実施している。本事業では、計測車両と定点観測の二つの方法で交通外乱データを収集しているが、本稿では定点観測による交通外乱データの収集、画像処理を使った軌跡データ抽出と精度予測 / 検証、データ収集状況を紹介する。

Table 1 自動運転レベル定義

NHTSA レベル	SAE レベル	SAE 名称	操舵 / 加速 / 減速 の実行主体	走行環境 監視	バックアップ主体 (緊急時)	システム 能力
0	0	Non-Automated 非自動化	ドライバ	ドライバ	ドライバ	制約あり
1	1	Assisted 支援	ドライバ + システム (加減速 or 操舵)	ドライバ	ドライバ	制約あり
2	2	Partial Automation 一部自動化	システム (加減速 + 操舵)	ドライバ	ドライバ	制約あり
3	3	Conditional Automation 条件付自動化	システム (加減速 + 操舵)	システム	ドライバ	制約あり
4	4	High Automation 高度自動化	システム (加減速 + 操舵)	システム	システム	制約あり
	5	Full Automation 完全自動化	システム (加減速 + 操舵)	システム	システム	制約なし (ドライバ必要なし)

*1 一般財団法人日本自動車研究所 ITS研究部

*2 パナソニック株式会社 コネクティッドソリューションズ社

2. 交通流定点観測の過去事例

近年、多くの交通研究者によって、交通流のカメラ映像収集、および、車両軌跡（車両位置の時系列データ）への変換が試みられている。Fig. 1はTRB 2007 Annual Meetingで紹介された文献⁷⁾からの引用であり、連邦道路管理局が推進したプロジェクトでの定点映像収集風景と画像処理データである。高層ビル屋上に、固定または三脚設置した複数カメラで撮影している。画像はオルソ変換（視点を真上へ移動させる座標変換）した後と思われる。どの車両の認識枠も実際とはかなりズレているが、特にトレーラのように車高が高い大型車両は、二車線に跨るほど車形が大きく変形して認識枠のズレも大きい。処理途中かもしれないが、車両軌跡（車両位置）を正確に把握することの難しさの一端が読み取れる。

なお、この文献には、参考文献として、ヘリコプター、飛行機、道路インフラなどにカメラを設置して交通流の映像データを収集して分析した他事例も多く紹介されている。



Fig. 1 ビル屋上からの定点観測風景
(TRB 2007 Annual Meeting の文献⁷⁾より)

3. 定点観測の特徴整理

定点観測による交通流データ収集の一般的な特徴（利点と課題）を Table 2 に示す。

Table 2 定点観測の特徴

項目	利点	課題
自然な交通データ	ドライバーに特別な意識をさせないデータ収集	—
場所に起因した特徴あるデータ	道路構造に起因した特徴あるデータを効率良く収集	—
道路構造の把握	道路構造の把握が容易（限定されたエリア）	—
観測エリア毎のデータ収集	観測エリアにいる複数の交通参加者の挙動データを収集	観測エリアを広げるには複数カメラと労力が必要
オクルージョン	撮影場所に大きく依存（高い場所が望ましい）	撮影場所に大きく依存（高い場所が望ましい）
撮影場所の確保	—	借用交渉に労力（隣接ビルやインフラの所有者の許可が必要）

4. 撮影スタイル

首都高速の場合は、道路が高架で隣接ビルがある場合が多く、要件（道路構造など）を満たす箇所に隣接する民間ビル屋上を借用して撮影した。都市間高速の場合は、要件を満たす箇所はもとより道路に隣接するビルはほとんど無く、道路上に掛かる橋梁や土手上にカメラを三脚設置して撮影した。（Fig. 2 参照）これらは公道であるため管轄の警察署に事前に「道路使用許可申請」を行った。

監視員が付いて約8h程度の撮影を行う場合は、複数のカメラ（4K, 60fps）を公道上で三脚設置して市販の同期保存システムで撮影した。（Fig. 3 参照）無人で1week連続で撮影する場合は、複数のネットワークカメラ（4K, 30fps）を隣接するビル屋上に工事が不要な試作治具で取付けて、クラウド経由で同期させて保存する試作システムを使って撮影した。（Fig. 4 参照）無人1week連続撮影は、ニアミデータの収集を主目的に実施した。

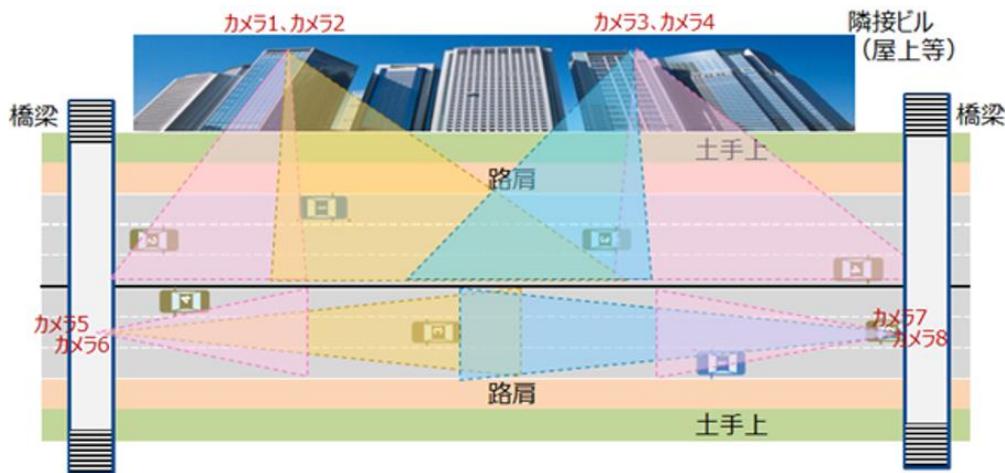


Fig. 2 カメラ設置場所イメージ (ビル屋上・橋梁上)



Fig. 3 ミラーレス一眼カメラによる同期保存システム (市販品)
(有人屋8h程度の撮影)

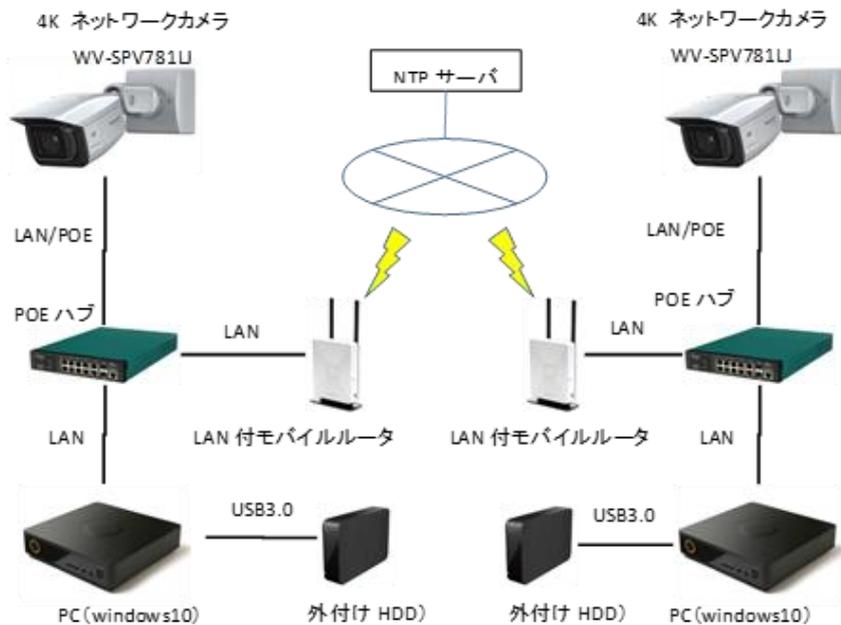


Fig. 4 ネットワークカメラによる同期保存システム（試作品）
（無人 1 week 連続の撮影）

5. 軌跡データの抽出と軌跡精度の予測/検証

実交通環境の定点カメラ観測で収集した映像データから、道路（静止構造物）に対する車両（移動体）の軌跡データ（位置の時系列データ）を画像処理で抽出する。この数値化を正確に行うことで、シナリオ分析の妥当性を担保する。

5.1 軌跡精度の目標

高速道・自専道での自動運転車を前提に、安全性評価を目的としたシナリオ分析に使う車両軌跡の目標精度を以下とした。車両前後方向は、高速走行時の制動性能から導出し、車両横方向は、車線変更時の車両挙動と対比される白線（レーンマーカ）幅を元に設定した。

車両前後方向： ± 50 cm 以内
 車両横方向： ± 10 cm 以内

5.2 交通外乱データ収集の全体流れ

定点観測による交通外乱データ（互いに関係しあう複数の車両軌跡データ）を収集する作業の主な流れを Fig. 5 に示す。

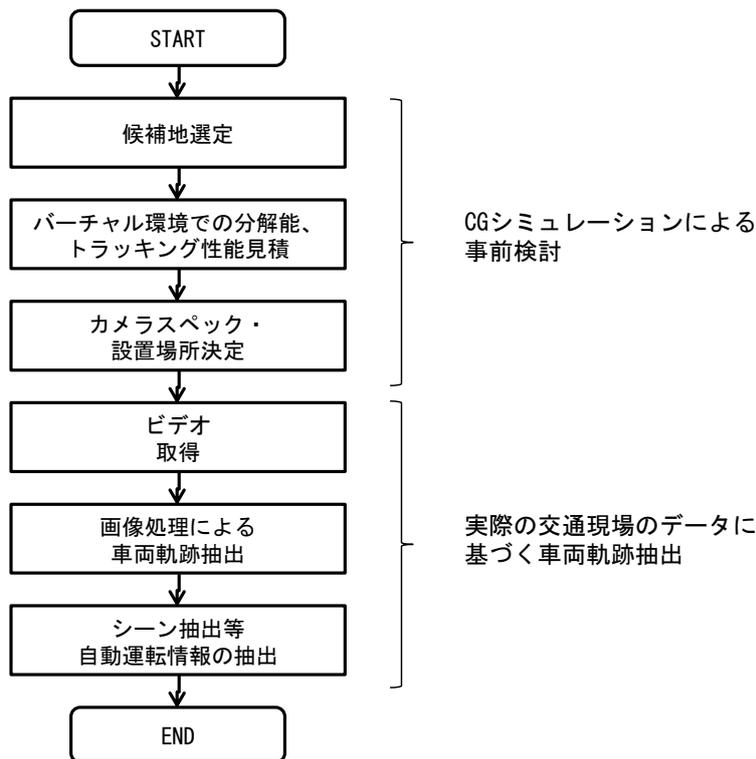


Fig. 5 交通外乱データ収集の流れ

1) 候補地選定

観測場所の選定要件整理（道路構造など）、カメラ設置場所の調査と借用交渉、道路管理会社への届け出、所轄警察への道路使用許可申請（公道で撮影する場合）を実施した。

2) バーチャル環境での事前検討

車両軌跡データの質（精度）を向上させるため、バーチャル環境でのCGシミュレーションによる軌跡精度予測を行い、撮影仕様（カメラの設置場所や画角設定など）を吟味した。定点観測はやり直しが困難なのでこの事前検討が重要である。

3) ビデオ取得（現場撮影）

上述のバーチャル環境で決めた撮影仕様に従い、複数台のカメラを設置して撮影した。さらに、観測エリアのデジタルマップ（軌跡抽出に必要な参照点情報）を作成すること、および、車両軌跡データの精度検証に使う自己位置情報（リファレンス値）を得ることを目的に、モバイルマッピングシステム（以下、「MMS」という）を搭載したリファレンス測量車両を全レーンで走行させた。

4) 画像処理による車両軌跡抽出

バーチャル環境で検討した画像処理方法を基本に、カメラ映像とデジタルマップ情報を使って、観測エリアを通過する全車両の認識（AI深層学習利用）とトラッキング（カルマンフィルタ利用）、オルソ変換（鳥瞰図への変換）、各種誤差要因への補正（車両高による影響への幾何学的な補正など）、複数カメラの軌跡結合などを行った。バーチャル事前検討には含まれない処理として、カメラレンズの歪補正（個体バラツキ対応）、カメラ振動補正（陸橋の振動が伝わることもある）なども行った。

5.3 バーチャル環境での精度予測

CGシミュレーションによる軌跡抽出と精度予測の概要を、首都高1号線本線下り（浜崎橋JCT⇒芝浦JCT）例に紹介する。JCTとJCTに挟まれた本線であり車線変更が頻繁に発生する。



Fig. 6 定点観測の撮影範囲／上が真北
 (例：首都高／浜崎橋 JCT⇒芝浦 JCT) (Google Maps 利用)

- ・シミュレーション環境：Unity
- ・3D 地図データ：ゼンリン 3D 都市モデルデータ
- ・カメラモデル：4 K (3840×2160) , 60 fps
- ・車両モデル：車両力学に従わない簡易モデル
 (等速運動, 等加速度運動, 円運動の組合せで走行シナリオを作成)



Fig. 7 カメラ設置候補ビル／概ね右が南南西
 (例：首都高／浜崎橋 JCT⇒芝浦 JCT) (ゼンリン 3D 都市モデル利用)

Fig.7 に示すように、定点観測エリア (全長約 350 m) の北側しか、撮影用にビル屋上を借用できなかったため、最南端付近の軌跡精度の悪化が危惧された。ビル 1,2 の各屋上にカメラ 2 台 (合計 4 台) を設置

した場合に得られる映像をCGで予測した。CGと実映像の比較例をFig. 8に示す。道路構造など周辺環境や走行車両とカメラ位置の関係をバーチャル環境に良く再現できていることがわかる。

バーチャル環境での車両軌跡導出と精度予測の流れをFig. 9に示す。予測された軌跡誤差をFig. 10に時系列グラフで示す。グラフ中の赤点線は、5.1節で示した軌跡精度の目標範囲を示す。道路の芝浦JCT側は、最寄りのビル2/Cam4からの距離がある程度以上遠くなると精度が急に悪化することが予想された。逆にそこを除けば概ね目標精度を満たす見込みがあると言えた。現状のバーチャル環境では、再現できていない誤差要因（レンズ歪や微弱な振動の影響など）もあるので、定量的な評価とシナリオ分析への利用可否判断は、5.4節のリアルワールド軌跡精度検証で実施した。

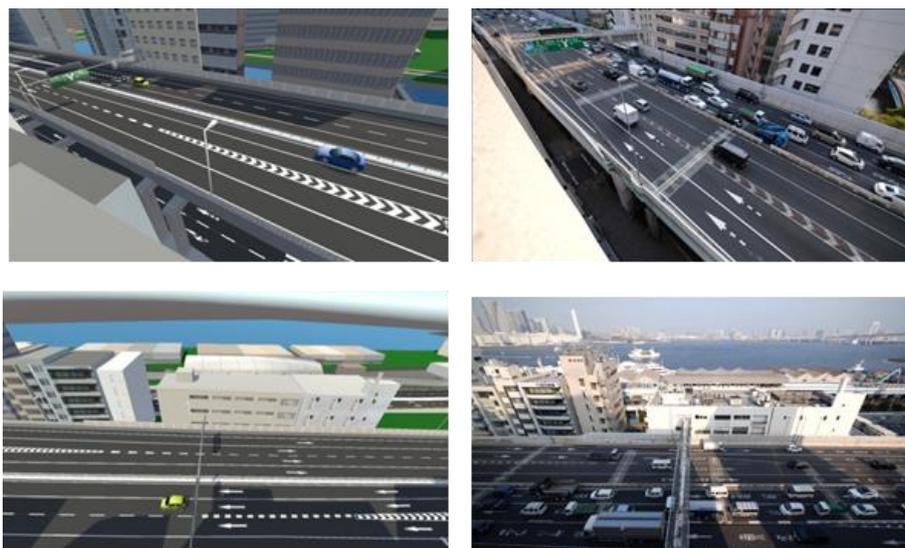


Fig. 8 CGと実映像の比較

(左：CG，右：実写，上：Cam2，下：Cam3) (ゼンリン3D都市モデル利用)

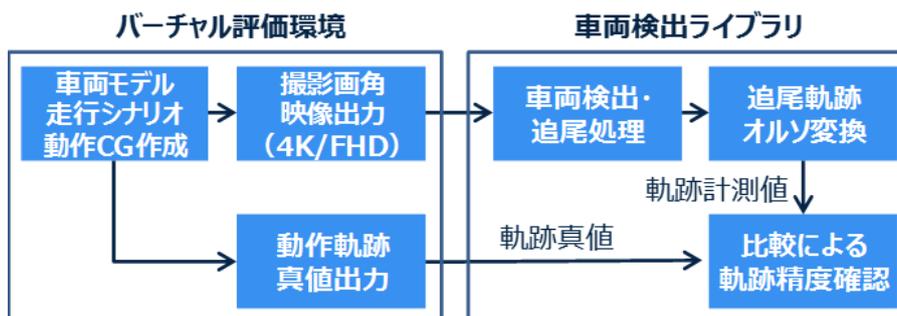


Fig. 9 バーチャル環境での軌跡精度予測の流れ

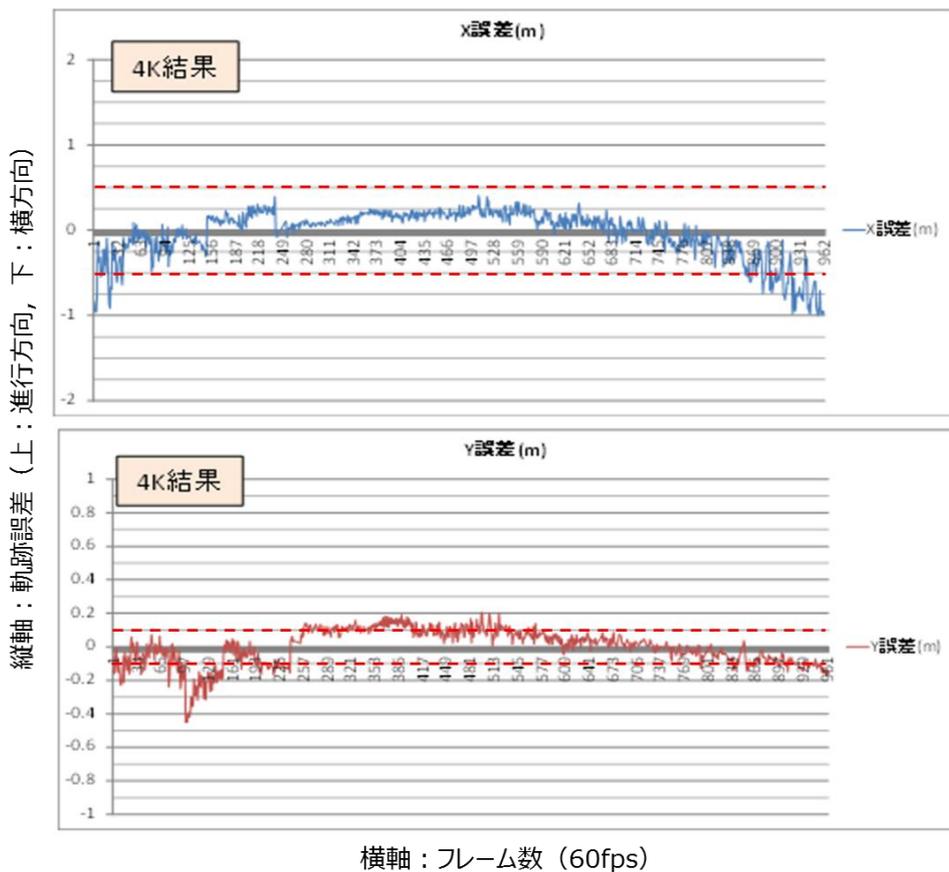


Fig. 10 車両軌跡の予測結果 (例：首都高/浜崎橋 JCT⇒芝浦 JCT)

5.4 リアルワールドでの精度検証

実交通環境での車両軌跡導出と精度検証の流れを Fig. 11 に示す。検証された軌跡誤差を Fig. 12 に時系列グラフで示す。予測結果同様に、最寄りのカメラ (ビル2/カメラ4) から 150 m 以上遠方 (観測エリアの南端付近) では急激に誤差が増加して、170 m 以上遠方では目標精度の4倍以上に至り限界を迎えた。したがって、最寄りのカメラ (ビル2/カメラ4) から 150 m 以上遠方をシナリオ分析の対象から除外すべきと判断した。2018 年度に定点観測を実施した 5 箇所において、軌跡誤差のバラツキを正規分布と見立てて、標準偏差 σ でまとめた結果を Table 3 に示す。観測場所によって、カメラ路面高やカメラから観測エリアまでの距離が異なることが軌跡精度に影響する。2 σ ≤ 目標精度、少なくとも σ ≤ 目標精度となる領域のみシナリオ分析に使用すると今回は暫定的に判断した。

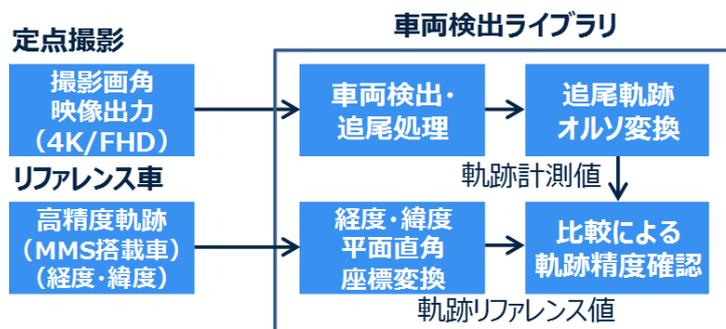


Fig. 11 リアルワールドでの軌跡精度検証の流れ

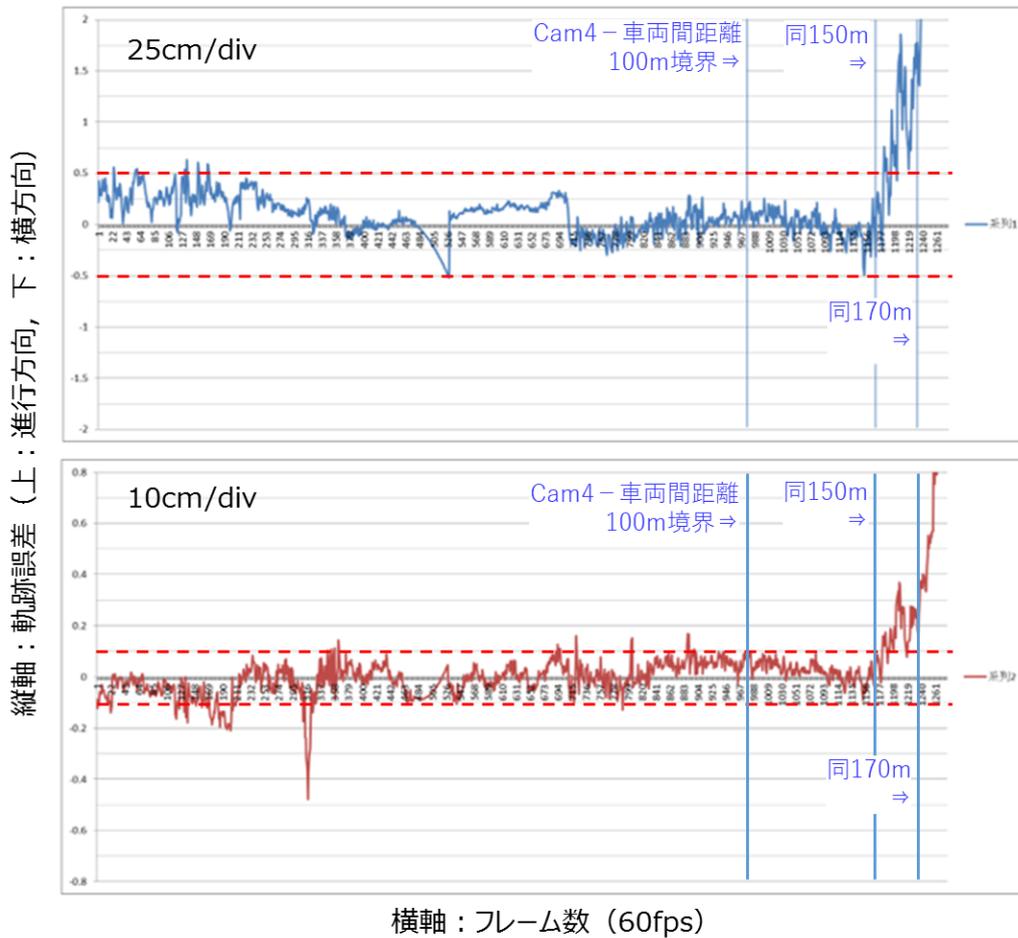


Fig. 12 車両軌跡の検証結果 (例：首都高／浜崎橋 JCT⇒芝浦 JCT)

Table 3 軌跡誤差の標準偏差 (実環境精度検証)

撮影地	標準偏差 σ [m]					
	カメラ100m以内		カメラ150m以内		精度検証全域	
	進行方向	横方向	進行方向	横方向	進行方向	横方向
①首都高/日の出	0.18	0.067	0.17	0.066	0.84	0.16
②首都高/参宮橋	0.28	0.1	0.33	0.095	0.36	0.083
③東名/八王子	0.31	0.068	0.34	0.067	0.34	0.067
④東名横浜IC/上り分岐	0.23	0.15	0.43	0.21	0.71	0.24
⑤第三京浜/港北	0.17	0.034	0.16	0.041	0.22	0.049

(進行方向：青: $2\sigma \leq 0.5m$ 、緑: $0.5m < 2\sigma \leq 1m$ 、赤: $1m < 2\sigma$)
(横方向：青: $2\sigma \leq 0.1m$ 、緑: $0.1m < 2\sigma \leq 0.2m$ 、赤: $0.2m < 2\sigma$)

6. 課題と対策

Fig. 13 に示すように、カメラから見て対象車両の手前にある周辺車両（大型トレーラなど）や道路構造物（ガントリー標識板、側壁など）で遮蔽されるオクルージョンの影響により、誤検出（検出枠のズレなど）や軌跡途絶が発生する場合があります。特に橋梁などからの撮影では、カメラの路面からの高さは 10 m

程度と低く、オクルージョンが発生し易い。認識エンジンの改善や、追加学習を行うことでそれらの影響を低減できるが完全に解消することは現状出来ない。



Fig. 13 オクルージョン

そこで、2019年度の取組みとしては、可視化ツール（カメラ座標上や地図座標上で車両軌跡を表示）や軌跡編集ツール（カメラ座標上で検出枠と車両の位置関係を確認しながら遮蔽前後の軌跡を正しく補間計算）を使ってオペレータ作業で、オクルージョンによる軌跡途絶や誤検出（検出枠の大きなズレ）を修復した。Fig. 14には、修復作業前の車両軌跡（10分間）と、修復後の車両軌跡（10分間）を示す。1本の軌跡が車両1台分に相当する。5章の軌跡精度検証の事例で使った場所と同じであり、2車線と2車線が合流して4車線になる場所である。図中の破線は白線を示す。ともに、定点観測エリアの最初から最後まで、途絶なく繋がった軌跡を表示したものである。途絶や大きなズレを生じたままの車両軌跡はシナリオ分析に使えないので、現状、この修復作業は必須である。

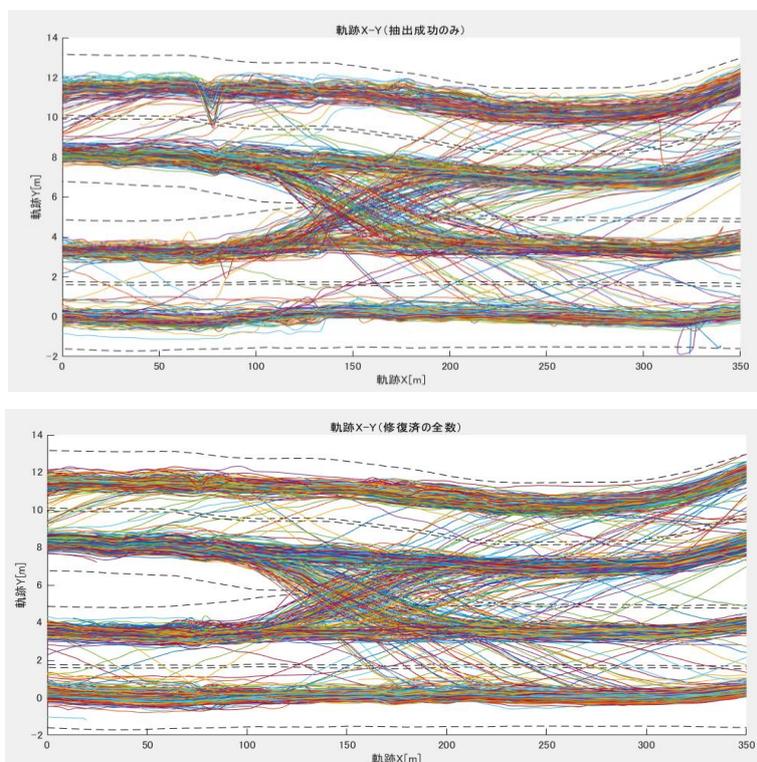


Fig. 14 途絶修復前後の軌跡比較（10分間）（例：首都高／浜崎橋 JCT⇒芝浦 JCT）
（上段：修復前 476 本，下段：修復後 737 本）

7. データプロフィール (2018~2019 年度)

2018 年度から 2019 年度に定点観測で収集した交通外乱データのプロフィールを Table 4 に示す。道路構造（本線，合流路，分岐路，ランプ路，急カーブ），交通流特徴（車線変更，渋滞，バイクすり抜けなどの多発域）を考慮して撮影場所を選定した。未分析（軌跡未抽出）の映像が多く残っており，今後のシナリオ分析状況に応じて追加分析（軌跡の追加抽出）を行うことが可能である。

Table 4 定点観測データのプロフィール (2018~2019 年度)

		撮影時間	軌跡抽出済時間	走行台数	軌跡抽出数	カメラ台数	撮影高度 (路面~カメラ)
1	首都高速1号 (浜崎橋JCT~ 芝浦JCT下り)	440分	80分	5782台	5474台	4台	24m(ℓ°ℓ1) 30m(ℓ°ℓ2)
2	首都高速4号 (参宮橋コーナー上り)	380分	40分	1326台	1254台	4台	14.4m(ℓ°ℓ)
3	東名高速 (八王子街道付近 本線下り)	380分	100分 渋滞	3211台 4673台	3089台 4510台	2台	9.6m(橋)
4	東名高速 (横浜IC上り分岐)	512分	70分	3176台 (分岐2757台)	3038台	4台	10.7m(橋) 17m(ℓ°ℓ)
5	第三京浜 (折本付近本線下り)	420分	165分	6732台	6613台	3台	12.9m(土手) 12.2m(橋)
6	首都高速5号 (東池袋下り合流)	108時間	10時間	26097台 (合流2106台)	25675台	3台(R1)	47m(NBFL°ℓ)
7	東名高速 (横浜IC上り合流)	380分	80分	3449台 (合流921台)	3335台	2台	10m
8	東名高速 (横浜IC下りランプ)	380分	80分	2311台	2076台	2台	10m

8. おわりに

自動運転の安全性評価を狙いとしたシナリオ分析用交通外乱データを効率的に収集可能な手法として，定点カメラ観測による手法を確立し，首都高や都市間高速道など主だった国内データの収集を実施した。高い軌跡精度を得るために，バーチャル環境での事前検討（撮影仕様検討，軌跡精度の予測），現場撮影（事前検討結果に基く撮影，リファレンス車走行による道路測量とリファレンス位置の取得），映像と測量情報を使った軌跡抽出（画像処理，トラッキング，座標変換，各種補正，軌跡結合）からなるプロセスと手法を確立した。

謝辞

定点観測を行うために，観測対象となる高速道や自専道に隣接するビル屋上をお貸頂いたビルオーナー様，また，本事業を委託して頂いた経済産業省様には多大なご協力を頂き感謝致します。

参考文献

- 1) National Highway Traffic Safety Administration, " Preliminary Statement of Policy Concerning Automated Vehicles"
<http://www.nhtsa.gov> (令和 2 年 12 月現在)
- 2) Research project PEGASUS Effectively Ensuring Automated Driving.
http://www.pegasus-projekt.info/files/tmpl/pdf/1st_European_CCAD_Side_Event_Folien.pdf (令和2年12月現在)

-
- 3) Horizon 2020 <https://ec.europa.eu/programmes/horizon2020/en> (令和 2 年 12 月現在)
 - 4) 平成 30 年度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) 成果報告書, 一般財団法人日本自動車研究所 (2018)
https://www.meti.go.jp/meti_lib/report/H30FY/000351.pdf
 - 5) 平成 31 年度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) 成果報告書, 一般財団法人日本自動車研究所 (2019)
https://www.meti.go.jp/meti_lib/report/2019FY/itakuichiran2019FY.pdf
 - 6) SAKURA, https://www.sakura-prj.jp/project_info/ (令和 2 年 12 月現在)
 - 7) Vijay Kovvali, Ph.D., T.E. : Video-Based Vehicle Trajectory Data Collection, Annual Meeting of the TRB (2007)