

3 自動運転の安全性の確保

(1) 東京臨海部実証実験

東京臨海部実証実験(概要)

沼田泰 (トヨタ自動車株式会社), 樋山智 (本田技研工業株式会社), 横田康秀 (日産自動車株式会社)
愛甲英史, 南方真人 (トヨタ自動車株式会社)

(概要) 東京臨海部実証実験は、政府の「未来投資戦略」における「2020年東京オリンピック・パラリンピック競技大会を見据え、最先端の自動走行技術を国内外に発信するショーケース、レガシーとすべく、羽田空港や臨海地域等において最先端の実証を行うとともに、制度整備等を行う」との方針を実行するための取り組みである。東京臨海部の3地区において、それぞれ異なる目的で路車間の通信インフラを整備し、有効性の実証と課題の抽出を行った。羽田地区では磁気マーカーの活用や正着制御を含むバスの自動運転実証、臨海副都心地区ではインフラの集中的な整備による交通信号情報提供の実証、2地区をつなぐ首都高速道路では、合流支援、ETC通過支援の実証を行った。

1 東京臨海部実証実験の狙いと推進体制

東京臨海部実証実験は、2020年に東京オリンピック・パラリンピック競技大会が開催されることを踏まえ、この機会に社会にとって有益なレガシーを残すとともに、国内外に自動運転分野での最先端の取り組みを発信していくことをねらいとして2018年に検討が開始された。

東京オリパラ大会をショーケースとして、自動運転の取り組みを進めるという動きは、2017年6月に発表された政府の「未来投資戦略」において政府方針として位置づけられ「2020年東京オリンピック・パラリンピック競技大会を見据え、最先端の自動走行技術を国内外に発信するショーケース、レガシーとすべく、羽田空港や臨海地域等において最先端の実証を行うとともに、制度整備等を行う」との方針が明記された。

上記の方針を踏まえ、2018年SIP第2期自動運転に「東京臨海部実証実験タスクフォース」が設置され、産官学の各方面のメンバーが集結することにより企画推進と実験準備を担うこととなった。

東京臨海部実証実験は、安全な道路の実現に向けた自動運転の有用性を訴求するにとどまらず、パラリンピックに象徴されるインクルーシブな社会の実現に資するべく、多様な交通参加者の「移動の自由」を具現化することもねらいとしている。具体的には、パラリンピックで来日する競技関係者が羽田空港から選手

村のある臨海副都心エリアまで介助なしで移動するシーンを想定し、実証エリアや交通モードの選定を行った。

羽田地区では、車いすでの自力乗降を目的とした正着制御やルートが一定であるという公共交通の特性を活かした磁気マーカーの活用によるバスの自動運転実証を行うこととし、臨海副都心エリアでは第1期SIP自動運転において高精度3D地図の整備を行うなど、実証環境としての実績があることから、交通信号情報の提供インフラを集中的に整備し、レベル4相当の最先端の自動運転技術のショーケースとすることとした。またこの二つのエリアをつなぐ首都高速道路では合流・ETCゲート通過支援情報の提供に関する実証を行うこととした。

これらの実証実験は各方面の支援・協力のもと実証環境の整備が進められ、国内外の多様な機関・企業(図1)の参加により2019年10月より実験が開始され、2020年度事業として、無事に完了した。



図1 実証実験参加者

2 地域のインフラ整備とインフラを活用した実証実験の概要

2.1. 臨海副都心地域

第2期SIPにて着目したのは、路車間のインフラ協調技術である。車両技術のみならず、交通インフラ全体で自動運転のレベルアップを図り、安全・円滑な交通社会の実現を目指すという考え方である。

第1期において整備された高精度地図の上に、第2期SIPにおいて信号情報を動的な情報として活用できるような仕組みを構築する、

また、今回これまでにない大規模な実証を行うことに鑑み、自動運転車両が手動運転の車両と混在する際に交通流に与える影響評価(インパクトアセスメント)を行い、今後の社会受容性向上を考える際の課題抽出を図ることもねらいの一つである。

SIPは科学技術政策の枠組みではあるが、活動の成果を来べき自動運転社会に向けた社会受容性の醸成に役立てることも大きな活動の柱となっており、広報活動や市民参加イベントの実施などを実施した。東京臨海部実証実験においては、様々な交通環境下で高度な自動運転の実現に最低限必要な情報の提供と利用に焦点を当て、車載センサでは検出困難な情報かつ、運転支援システムやドライバーにも有効な情報、という視点で産学官協調して実用化・標準化に取り組むべき技術テーマ、一般道における交通信号情報提供の実証実験に取り組む。

混在交通下での一般道走行では、自動運転制御による交差点の安全で円滑な通過には、高度な認知・判断・操作の技術が要求される。特に交通信号の灯色の認識に関しては高い精度と信頼性が要求される為、あらゆる交通環境下での認識の性能を高める為に、自動運転車両の車載センサカメラによる認識をインフラ設備からの通信(V2I)で補完することによる有効性を実交通環境下で実証する。また本情報は信号認識の二重型システムを成立させ、安全性、信頼性の向上に貢献する。

本実証実験においては、すでに警察庁・各都道府県警察により実用化されている、DSSS(Driving Safety Support Systems)に採用されているITS無線通信技術(760MHz)を利用し、自動運転システムの用途に合わせたメッセージセットやシステムの改修を行った上で、今回の実証実験エリアである臨海副都心エ

アの33箇所の交差点信号機(図2)に設置した。

また、臨海副都心一帯を精密に測量し、自動運転による走行の実現に必要なとなる道路構造や様々な地上構造物の情報をデジタルデータ化した静的情報である高精度3D地図情報もアップデートし、全ての実証実験参加者に配布した。

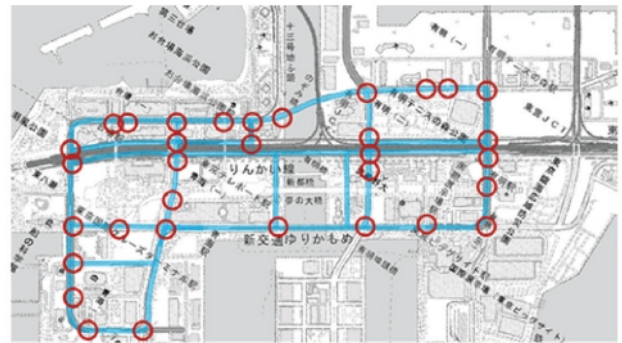


図2 交通信号情報実証実験エリア

ITS無線通信技術を使うことにより、現在の信号灯色だけでなく、次の信号灯色の遷移までの時間に関する情報も提供することが可能となり、交通流を乱さずかつ、ジレンマゾーン(通常の減速度では停止線手前で停止ができず、かつ、その速度を維持しても停止線を通過できない領域)を回避できる自動的な予備減速・停止制御の実現への有効性も実証した。また、高精度3D地図情報による信号灯具が空間上どの位置にあるかの情報と、ITS無線通信により受信した動的情報である信号情報の紐づけ活用(ダイナミックマップコンセプト)により、受信した信号情報がこれから通過しようとする交差点の信号情報であることの識別や、背景物と信号灯具の誤認識防止への有効性も実証してゆく計画であると同時に、自動運転ではない車両のドライバーへの情報提供としての有効性についても実証した。以上のような、情報の有効性を実証する一方、インフラの整備にむけた指針として、どのような環境条件、シチュエーションにおいてITS無線通信による情報配信が有効であったかも明確にした。

これらの情報はSIPが実証実験参加者に貸与する車載器にデータを保存することにより、インパクトアセスメントの分析に活用した。

2.2. 羽田空港地域

公共交通に係る自動運転システムを構築するため、図5に示す羽田空港第3ターミナル・天空橋エリア間

において、自動運転技術を活用した次世代型都市交通ART(Advanced Rapid Transit)による、インフラ協調システムの実証実験と、道路交通に対するインパクトアセスメントを実施した。



図3 走行コース

今回の実証実験では全ての人に優しく快適な、自動運転レベル4相当のARTとして、インフラ整備による①ドライバー介入不要の自動運転、②定時運行、③バス停への正着や緩やかな加減速による快適性向上の実現を目指した。そのため、上記の走行コース上に、a) 自車位置推定のための磁気マーカー、b) 他の車両との交錯を低減するためのバス専用レーン、c) バス車体と停留所間に段差・隙間無く正着可能な構造のバス停、d) バスを優先的に交差点通過させるための青信号延長機能等を持ったPTPS (Public Transportation Priority Systems)、e) ITS無線技術による信号情報配信設備をインフラ設備として設置し、実証実験参加者が準備した自動運転バスの走行により①～③に対する有効性を実証した。また、自動運行バスの走行による周囲の交通への影響を評価した。

2.3. 首都高速道路

自動運転車は複数の車載センサ(カメラ、ソナー等)を搭載し、それらから得た情報を統合的な車両制御に利用している。一方、現状の車載センサでは検出範囲にそれぞれの限界があり、高速道路(自動車専用道路・高速自動車国道)をより安全・安心かつ円滑に自動運転車を走行させることを狙いに、首都高速道路横浜羽田線の空港西入口において、国土技術政策総合研究所の協力の下、インフラ連携による支援情報配信の有効性に係る実証実験を実施した。

具体的には、国交省・各道路会社によりETC2.0で実用化されているDSRC通信(5.8GHz)を活用し、ETCゲートの円滑な通過に際して、ETCゲート選択に十分な余裕を持った走行位置でのETCゲートのオープン・クローズ情報配信(図6)、ならびに車載センサによる自律走行での本線合流が困難な環境下で、本線上のインフラセンサで本線交通流に係る検出情報を合流支線上の走行中の車両に情報配信することで、自動運転継続の可否判断、自動運転車の走路計画等について支援情報の有効性を実証した。(図7)

結果、ETCゲート通過に係る支援情報配信につい

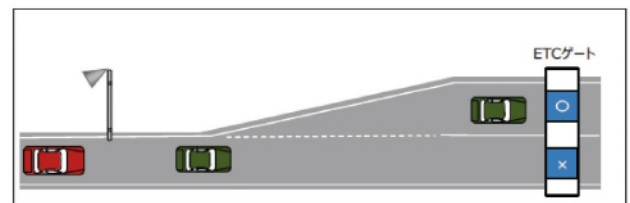


図4 ETCゲート通過に係る支援情報配信

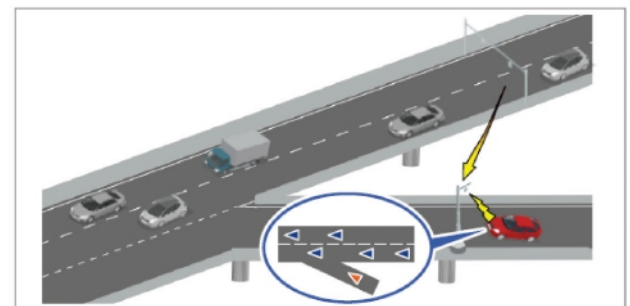


図5 本線合流に係る支援情報配信

ては、自動運転車の走路計画作成のみならず、ドライバーに対するETCゲートの円滑な選定、および安全・安心な通過の為の支援情報としても有効性を確認できた。また、本線合流に係る支援情報配信については、空港西入口の道路構造上、本線交通流の見通しが効かない中、本線交通流に係る検出情報を合流支線上の走行中の車両に情報配信し、自動運転継続の可否判断、自動運転車の走路計画作成、加減速・操舵制御について支援情報の有効性を確認できた。併せて、ドライバーに対する注意喚起としての有効性も確認できた。一方、本線上のインフラセンサで本線交通流をスポット検出し、生成した支援情報(到達計算時刻を等速走行にて仮定して算出)の為、渋滞等の発生による、本線交通流が不均一な状況下では、支援情報精度の低下が観測され、今後、多様な条件下での改善検討が期待される。

また、高速道路走行中に、車載センサによる検出範囲を超えた中広域の交通環境情報、特に静的情報である高精度3D地図情報に紐づけられた、車線レベルの各種準動的情報(渋滞、事故、故障車、落下物等)は、より安全かつ円滑な自動運転には有効とされている。しかしながら、現在提供されている情報は、VICS渋滞情報に見られるような車道レベルの情報が主流である為、SIPでは走行中の車両から収集した情報(プローブ情報)や既存の交通情報を統計化処理することによる車道レベルの各種交通環境情報生成の研究開発を並行して進めており、令和2年度の後半には広域モバイル通信等を活用した、高精度3次元地図に紐づけられた高速道路上での車線レベルの支援情報実証実験を行う計画である。

備も2018年から足掛け3年近い活動であった。その間ご支援いただいた産官学の様々な関係者の皆様にあらためて感謝申し上げたい。

3 得られた成果と課題及び今後の取組

今回の実証実験は、一言でいうならば、最先端の自動運転システムを社会実装する際に、人の手によって運転される自動車が圧倒的に多い中で、現在の交通環境や車両にどのような課題があるのかを、実際の公道上で実証するという試みであった。

詳細な評価は後述のデータ分析の章に委ねるが、概ね当初想定していた仮説が立証されたものと考えている。それは、インフラ協調による安全上のメリットは非常に大きいということであり、また一方でインフラを活用するがゆえに、導入に際しては様々な課題があるということである。代表的な課題は、今後の技術進化を織り込んだ賢いインフラ整備の在り方であり、またどのように既存の手動交通と併存するかという問題である。これらのうち、交通信号情報の提供のあり方については、今後の取り組みテーマとして取り上げられ、継続的に研究されることになっている。

最後に、本実証実験は、その仕上げとして2020年7月6日から12日予定されていた一般社団法人日本自動車工業会主催による試乗デモプログラムが当初より一体として計画されていた。まさにオリンピックイヤーに相応しい一大イベントとして国内外に発信されるはずだったが、折からの新型コロナウイルス感染症の拡大に伴い中止せざるを得なかった。タスクフォースでの活動も、それと並行する業界としての試乗デモの準

3 自動運転の安全性の確保

(1) 東京臨海部実証実験

臨海副都心地域における 実証実験データの分析

津田喜秋, 永倉亘 (三菱電機株式会社)

宮下浩一 (株式会社三菱総合研究所)

並木裕之 (エム・アール・アイリサーチアソシエイツ株式会社)

臨海副都心地域における実証実験^{(1), (2), (3)}では、実験エリア内33交差点に設置されたITS無線路側機から提供される信号情報を活用し、インフラ協調型自動運転による一般道路の信号交差点を安全かつ円滑に通行できることを、延べ29,728回の交差点通過(内、信号情報を活用した自動運転:約18%)により検証した。逆光や順光, 雨天, 前走車やカーブによる隠蔽・遮蔽, 夜間及び背景同化等車載カメラでは信号灯色を認識できない道路交通環境下においては、現在の信号灯色情報を把握・活用することで交差点での自動運転が可能であることを確認した。また、交差点通過判断に差異が生じやすいジレンマゾーンでは、信号残秒数情報を活用することで、交差点手前で急減速・急加速を生じることなく安全に停止, または、安全に通過できることを確認した。一般道路における高度な自動運転の実現に向けては、自動運転導入エリアの設定や信号情報を提供するITS無線路側機の面的整備を進めることで、路車協調による安全で円滑な自動運転の導入・拡大が可能と考えられる。

1 臨海副都心地域における実証実験

臨海副都心地域でのインフラ協調型自動運転の実現に向けて、車両による信号認識の信頼性確保とジレンマゾーンでの円滑な交通流の妨げが課題である。東京臨海部実証実験のうち臨海副都心地域における実証実験では、インフラから信号灯色情報や信号残秒数情報を路車間通信で車両に提供し、各情報の有効性確認と実用化に向けた信号情報配信の必要環境条件の抽出を目的に実験を実施した。

2 実証実験の概要

2.1. 実験エリア

臨海副都心地域の実証実験は、臨海副都心地域の33交差点を対象に信号情報提供用ITS無線路側機を設置して実施した。

2.2. 実験システム

実験車両に搭載した車載システムの構成を図2と表1にそれぞれ示す。760MHz受信機が受信するITS無線路側機が提供する信号情報, GNSS受信機が受信す



図1 ITS無線路側機の設置位置
(電子地形図25000(国土地理院)を加工)

る自車位置情報を実験用車載機 (BOX型PC) で処理し, LANまたはCANインタフェースで車両制御装置へ出力する構成である。安全管理のため動態管理システムと評価用映像データ記録機器を装着必須とし, 電子数取器は自動運転と手動運転の切替えや各種事象発生を記録するために準備した。



図2 車載側のシステム構成

表1 各機材の概要

機材名	概要
受信データ確認用PC	ログデータの収集や、実験用車載機を設定する機能
760MHz受信機	信号情報提供用ITS無線路側機が提供する信号情報を受信し出力する機能
GNSS受信機	測位衛星が提供する測位信号を受信し、機材の位置を出力する機能
実験用車載器 (BOX型PC)	信号情報提供用ITS無線受信機、高速道路実験用車載器、GNSS受信機の出力信号から、必要に応じてデータ抽出・変換処理を行いCAN出力する機能
動態管理システム	実験車両のリアルタイム走行位置や、過去の走行データを確認する機能
ドライブレコーダ	前方・後続の車両挙動を把握し、高解像度の映像や走行ログを取得する機能
電子数取器	押下ルールを設定したボタンの押下により、事象や自動運転のON/OFFタイミングを記録する機能

2.3. 走行実績

臨海副都心地域における実証実験は、2019年10月15日から2021年2月28日までの約16ヶ月間実施した。ここで、2020年4月8日から5月25日までの約2か月間は、COVID-19感染症拡大に伴い首都圏に発出された緊急事態宣言を受け、実験を中断した。実験参加者による総走行距離は約64,591km（動態管理システム集計値）、総交差点通過回数は29,728回であった。走行実績の内訳を図3に示す。信号情報を用いた協調型自動運転は全体の約18%である。また、2020年10月から11月と2021年2月にそれぞれ2週間のインパクトアセスメント集中走行期間を確保したことで比較的多くの走行データを得ることが出来た。

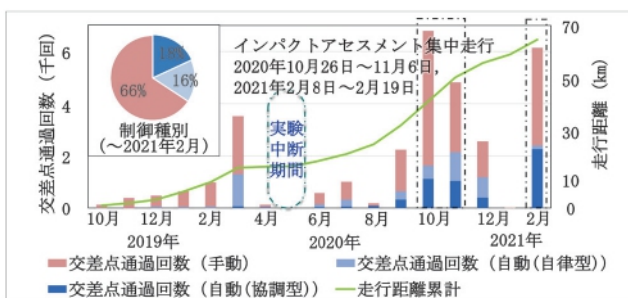


図3 臨海副都心地域における実験参加者の走行実績

3 信号灯色情報の有効性と条件

信号灯色情報の有効性と有効となる条件の抽出にあたっては、以下に示す仮説に基づき、実験エリア内全交差点通過回数に占める事象の発生回数を求めた。

- 1) 信号灯色認識阻害要因の分析
- 2) 交差点通過回数に示す1)項発生回数の分析

3.1. 信号灯色認識阻害要因の分析

実験参加者から提出された走行データの数取器が押下された事象を基に、ドライバや車載カメラが信号灯色認識を阻害する要因を求めた。これから得られた主な阻害要因は、太陽光による逆光・順光等で信号灯色認識困難、周囲大型車両による信号灯器隠蔽・遮蔽、ビル壁面への信号機輪郭同化、夜間街路灯等の光源で信号灯色認識困難、雨滴で信号灯色認識困難などが確認された。図4に主な信号灯色認識の阻害要因を示す。



図4 信号灯色認識の阻害要因

3.2. 信号灯色認識の阻害要因の発生状況

図4に示した信号灯色認識の阻害要因の発生状況毎に臨海副都心地区での発生回数と発生地点毎に整理した。

3.2.1. 全交差点・交差点別の阻害要因の発生回数

全交差点でみた場合の阻害要因の発生回数は、図5に示すように全交差点通過回数29,728回のうち、逆光が79回、順光が43回、隠蔽・遮蔽が602回、背景同化が4回、夜間が6回、雨滴が9回であった。

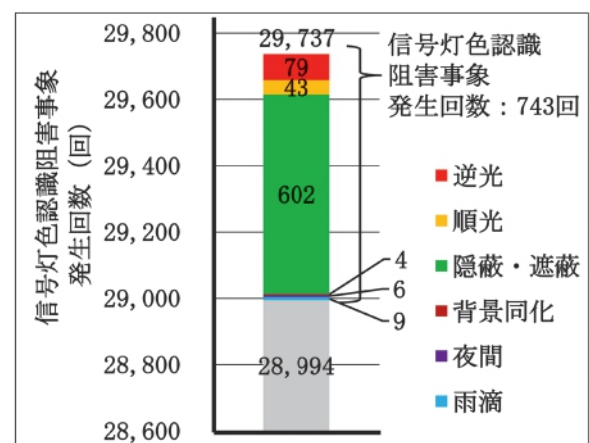


図5 東京臨海部実証実験における全交差点通過回数に占める信号灯色認識阻害事象の発生回数

ここで、隠蔽・遮蔽が他の阻害要因と比較して発生回数が多いのは、カーブでの走行を含んでいる。カー

ブ等の死角による隠蔽・遮蔽は道路構造に起因して発生するため、該当する交差点の通過回数を集計した。表2に交差点毎に発生した阻害要因数を示す。なお、阻害要因の発生回数の集計では、交差点通過時に複数の阻害要因が同時に発生した走行が9回あり、交差点通過回数よりも阻害事象発生回数は多くなっている。表2から、交差点別の阻害要因の発生回数は、特に逆光、順光、隠蔽・遮蔽において、阻害要因が発生する交差点に傾向があることも確認できる。

表2 交差点別の阻害要因の発生回数一覧

交差点名	交差点通過回数	逆光	順光	隠蔽遮蔽	背景同化	夜間	雨滴
潮風公園北	1,125	0	0	0	0	0	0
潮風公園南	1,230	0	1	0	0	0	0
船の科学館入口	1,319	3	1	1	0	0	2
東京港湾合同庁舎前	908	0	0	258	0	0	1
台場駅前第一(西側)	801	3	0	0	0	0	0
台場駅前第二(東側)	870	2	0	0	0	0	0
青海一丁目西	705	3	0	0	0	0	0
台場	1,265	1	0	0	0	0	0
お台場中央第一(北側)	723	0	1	2	0	0	0
お台場中央第二(南側)	998	1	0	1	0	0	0
テレポート駅前	1,015	0	0	2	0	0	2
テレコムセンター前	1,086	0	0	0	0	0	0
台場一丁目	840	5	2	0	0	0	0
海浜公園入口	935	7	3	0	0	0	0
有明橋西	63	0	0	1	0	0	0
レインボー入口	966	5	3	0	0	0	0
東京湾岸アンダー出口	1,040	0	3	1	0	3	0
有明テニスの森	980	3	2	1	0	0	0
有明二丁目北	329	0	0	3	0	0	0
有明二丁目南	576	2	0	3	0	0	0
有明三丁目	535	0	0	2	0	0	0
フェリーふ頭入口	1,363	4	5	6	1	0	0
有明コロシアム西	610	2	3	0	1	0	0
東京ビッグサイト正門	895	3	3	1	0	0	0
有明コロシアム北	609	5	3	0	2	0	0
有明中央橋北	673	0	1	1	0	0	0
有明中央橋南	679	0	0	1	0	0	0
青海一丁目	1,877	8	0	4	0	2	1
東京ビッグサイト前	690	0	3	3	0	0	0
東京湾岸警察署前	1,552	17	8	0	0	0	1
テレコム駅前	1,045	2	0	310	0	0	1
有明コロシアム東	642	2	1	1	0	1	0
有明駅前	784	1	0	0	0	0	1
合計	29,728	79	43	602	4	6	9

3.2.2. 阻害要因の発生頻度が高い交差点

各阻害要因の発生頻度が高い地点を、臨海副都心地域の地図上に記載したので図6に示す。阻害要因のうち、逆光と順光は、臨海副都心地域の北東から南西に

かけての大通りの交差点で確認された。また、隠蔽・遮蔽のうちカーブによる阻害は東京港湾合同庁舎前とテレコム駅前交差点で確認された。

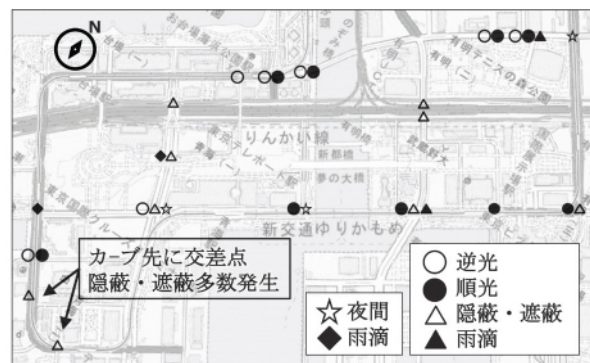


図6 阻害要因の発生頻度が高い地点 (電子地形図25000(国土地理院)を加工)

3.3. 阻害要因発生時の信号灯色情報の有効性

阻害要因発生時の信号灯色情報の有効性を評価した。

3.3.1. 逆光の場合

逆光時の主な阻害要因は、太陽光、ビル反射、対向車ライトである。逆光時の信号灯色認識への影響は、実験参加者との意見交換結果から「逆光で信号灯色の認識が一時的に困難発生、信号情報は有益」、「認識精度の低下前までの信号灯色は車載カメラで認識、走行を通じて信号灯色を継続的に認識可能」等の回答・考察を得た。これから、逆光により信号灯色が認識困難となる状況や未検出・誤検出が生じたことから、前方からの太陽光、ビル反射、夜間の対向車ライトが信号機と重なる時間帯では信号灯色情報の提供が有効であると考えられる。



図7 逆光で信号灯色認識が困難となる状況(例)

3.3.2. 順光の場合

順光時の信号灯色認識への影響は、実験参加者との意見交換結果から「車載カメラによる信号灯色の認識精度は一瞬低下」、「車載カメラの信号灯色認識精度低下発生、交差点通過判断への影響無し」等の回答・考察を得た。これから、順光により僅かであるが信号灯色が認識困難となる状況が生じたことから、後方からの太陽光が信号機と重なる時間帯では、信号灯色情報

の提供が有効であると考えられる。



図8 順光で信号灯色認識が困難となる状況(例)

3.3.3. 隠蔽・遮蔽の場合

隠蔽・遮蔽等の信号灯色認識への影響は、実験参加者との意見交換から「大型車両の隠蔽で信号灯色が青に切替わってから4秒間程度、信号認識不能、信号灯色情報を使用したことで、車載カメラで信号灯色検知前から発進準備が可能」等の回答・考察を得た。これから、信号灯色が遮蔽される交通状況やカーブ直後・クレストといった道路構造により信号機が死角となる道路構造では信号灯色情報の提供が有効であると考えられる。



図9 隠蔽・遮蔽で信号灯色認識が困難となる状況(例)

3.3.4. 背景同化の場合

背景同化時の信号灯色認識への影響について、実験参加者との意見交換から「信号灯色そのものは認識可能、ビル等の背景に信号機の輪郭が同化して信号機の認識信頼性が低下する」等の回答・考察を得た。これから、背景同化により信号機が認識困難となる状況が発生したことから信号機の背後にある建物等と信号機本体が同化する道路構造や時間帯では信号灯色情報の提供が有効であると考えられる。

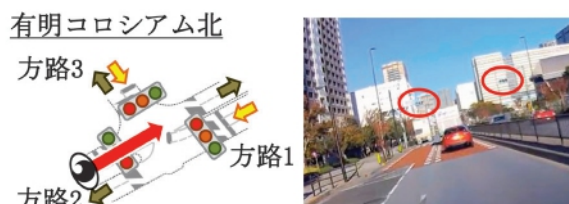


図10 背景同化で信号灯色認識が困難となる状況(例)

3.3.5. 夜間の場合

夜間の信号灯色認識への影響について、実験参加者との意見交換から「街路灯やビル等の光源がある場合、

信号灯色の認識が困難となる」等の回答・考察を得た。これから、夜間の走行で信号灯色(矢灯色等)が認識困難となる状況が生じたことから、複数光源による信号灯色認識精度が低下する夜間帯では、信号灯色情報の提供が有効であると考えられる。

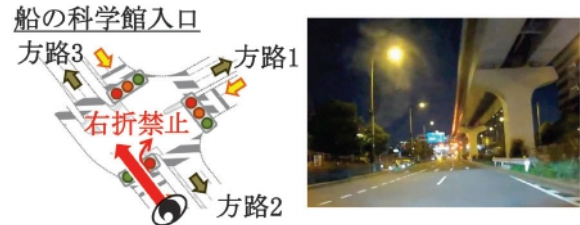


図11 夜間の走行で信号灯色認識が困難となる状況(例)

3.3.6. 雨滴の場合

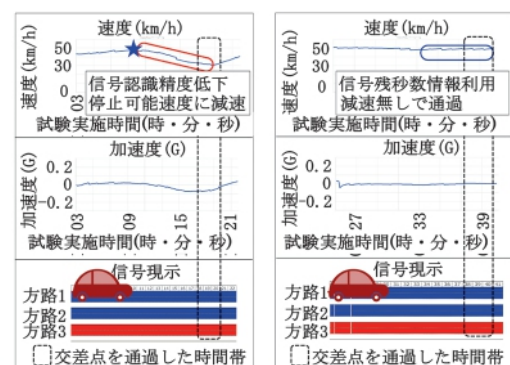
雨滴時の信号灯色認識への影響について、実験参加者との意見交換から「車載カメラ前方に雨滴がつき信号灯色認識困難となった」等の回答・考察を得た。これから、雨滴による信号灯色認識困難となる状況が生じたことから、車載カメラ前方に雨滴が付着し信号灯色の認識精度が低下する気象状況では、信号灯色情報の提供が有効であると考えられる。



図12 雨滴で信号灯色認識が困難となる状況(例)

3.4. 交差点停止時における信号灯色情報の有効性

実験参加者の走行データを基に、信号灯色情報を用いた協調型自動運転シーンの分析を行った。交差点進入時の自車両の速度と加速度の変化を図13に示す。信号灯色情報を使用することで信号認識精度低下時でも急減速せずに交差点を通過でき、信号灯色情報の有効性を確認した。



(1)インフラ情報不使用の場合 (2)インフラ情報使用の場合

図13 信号灯色情報を使用・未使用時の自動運転結果

3.5. 信号灯色情報有効性のまとめ

臨海副都心地域では、信号灯色の阻害要因を「逆光、順光、隠蔽・遮蔽、背景同化、夜間、雨滴」の6種類に分類して分析を行った。各阻害要因が信号灯色や信号機の未検出・誤検出を発生要因となることを確認した。信号灯色認識精度低下は、道路構造だけでなく交通状況、時間帯、気象にも起因し全交差点で発生し得る事象であることから、自動運転を行う区間では全ての信号交差点で信号灯色情報を提供することが望ましい。ただし、自動運転を行う区間の信号交差点のうち、特に道路構造、交通状況、時間帯の観点で、信号灯色認識精度の低下が交差点により必然的に発生する場合と交差点により稀に発生する場合があるため、前記交差点において優先的に信号灯色情報を提供するインフラを整備することが望ましい。

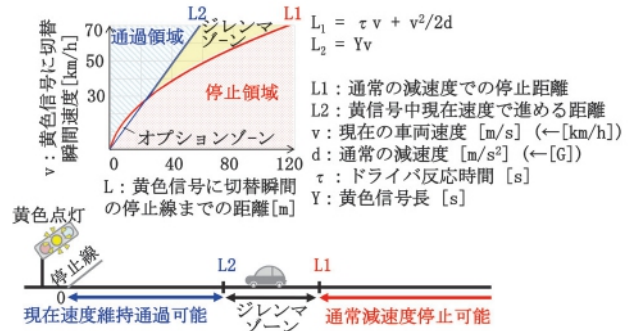


図15 ジレンマゾーンの定義⁽⁴⁾

黄残秒数3の場合		黄残秒数4の場合	
許容減速度	0.2 [G]	許容減速度	0.2 [G]
反応時間	1.0 [s]	反応時間	1.0 [s]
黄色信号長	3.0 [s]	黄色信号長	4.0 [s]

4.2. 交差点通過判断の差異の発生状況

3種類に分類したジレンマ発生要因の回数をまとめた。

4 信号残秒数情報の有効性と条件

信号残秒数情報の有効性と有効となる条件の抽出にあたっては、以下に示す仮説に基づき、実験エリア内全交差点通過回数に占める事象発生状況を求めた。

- 1) 交差点通過判断に差異が生じる要因分析
- 2) 差点通過判断の差異の発生状況

4.1. 交差点通過判断に差異が生じる要因

実験参加者から提出された走行データの数取器が押下された事象を基に、交差点通過判断に差異が生じる要因を「通過領域での停止」、「ジレンマゾーン遭遇」、「停止領域での通過」の3種類に分類したので図14に示す。停止線までの距離と速度の関係分析では、図15に示すジレンマゾーンの定義を参考にし、表3に示す通常の減速度での停止距離と黄信号中に現在速度で進める距離のパラメータを用いた。



図14 交差点通過判断に差異が生じる要因

4.2.1. 交差点別の発生回数

交差点通過判断に差異が生じた回数を、交差点別に集計した。交差点通過判断に差異が生じた割合は平均で0.51%、最大2.70%、最小が0.00%であり、割合が1.00%を超えた交差点は7つ（潮風公園北、潮風公園南、お台場中央第一（北側）、お台場中央第二（南側）、海浜公園入口、テレコム駅前、有明駅前）であった。図16と表4にそれぞれ示す

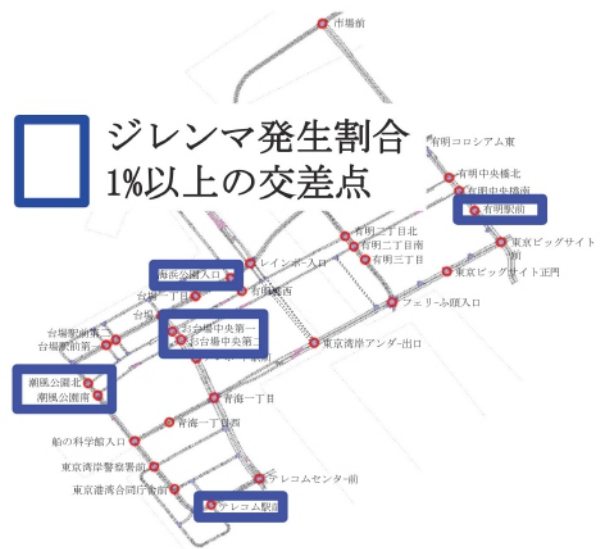


図16 通過判断差異割合が1%以上の交差点

表4 交差点別の通過判断差異発生状況

交差点名	手動	自動	通過判断差異	通過判断差異割合	
				(回数)	(%)
潮風公園北	673	287	11	11/960	1.15%
潮風公園南	797	289	24	24/1086	2.21%
船の科学館入口	873	302	4	4/1175	0.34%
東京港湾合同庁舎前	540	281	0	0/821	0%
台場駅前第一(西側)	474	254	2	2/728	0.27%
台場駅前第二(東側)	511	249	5	5/760	0.66%
青海一丁目西	547	76	5	5/623	0.8%
台場	737	394	4	4/1131	0.35%
お台場中央第一(北側)	365	322	12	12/687	1.75%
お台場中央第二(南側)	570	355	25	25/925	2.7%
テレポート駅前	575	347	1	1/922	0.11%
テレコムセンター前	622	279	0	0/901	0%
台場一丁目	570	180	2	2/750	0.27%
海浜公園入口	626	193	13	13/819	1.59%
有明橋西	55	8	0	0/63	0%
レインボー入口	630	186	1	1/816	0.12%
東京湾岸アンダー出口	740	117	0	0/857	0%
有明テニスの森	652	174	2	2/826	0.24%
有明二丁目北	226	2	0	0/228	0%
有明二丁目南	417	4	1	1/421	0.24%
有明三丁目	406	1	0	0/407	0%
フェリーふ頭入口	965	191	5	5/1156	0.43%
有明コロシアム西	441	165	0	0/606	0%
東京ビッグサイト正門	644	178	2	2/822	0.24%
有明コロシアム北	436	169	0	0/605	0%
有明中央橋北	505	164	2	2/669	0.3%
有明中央橋南	512	163	3	3/675	0.44%
青海一丁目	1,231	426	1	1/1657	0.06%
東京ビッグサイト前	493	193	0	0/686	0%
東京湾岸警察署前	1,004	401	0	0/1405	0%
テレコム駅前	672	279	15	15/951	1.58%
有明コロシアム東	476	163	0	0/639	0%
有明駅前	559	218	9	9/777	1.16%
総計	19,544	7,010	149	149/26554	0.56%

4.2.2. 交差点通過判断の差異の発生頻度が高い交差点

交差点別の交差点通過判断の差異の発生割合を、隣接信号交差点との距離、規制速度、黄残秒数、信号残秒数情報の確定・幅付の4つの視点で分析した。

(1) 隣接信号交差点との距離別の比較

隣接信号交差点との距離(単路区間)が100m未満の交差点と100m以上の交差点で、交差点通過判断の差異が生じた割合を比較したので図17に示す。100m未満の交差点で交差点通過判断の差異が1.00%(通過領域での停止が0.93%)発生したのに対し、100m以上の交差点では0.30%(通過領域での停止が0.23%)であった。隣接する交差点と短い距離で連続する場合は、手前の交差点通過後に次の交差点の通過判断を行うと対応が間に合わずジレンマゾーンへの遭遇等が発生する

可能性があり、ITS路側無線装置の信号情報到達可能距離が100m以上であることから、信号残秒数情報を利用してジレンマゾーンへの遭遇等を回避が可能である。

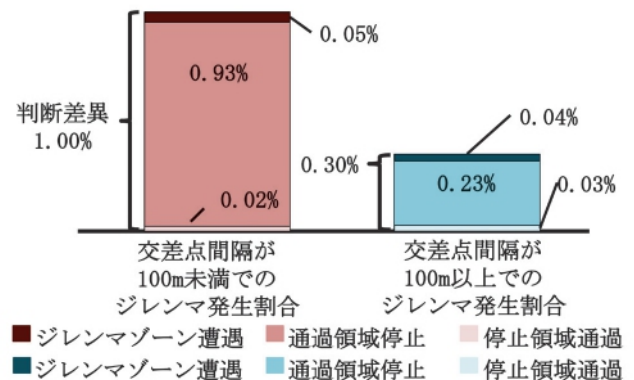


図17 隣接信号交差点距離別交差点通過判断の差異発生状況

(2) 規制速度別の比較

規制速度が時速60kmの交差点進入方路と時速50kmの交差点進入方路で、交差点通過判断の差異が生じた割合を比較したので図18に示す。規制速度が時速60kmの交差点進入方路で交差点通過判断の差異が0.54%(通過領域での停止が0.46%)発生したのに対し、規制速度が時速50kmの交差点進入方路では0.37%(通過領域での停止が0.29%)であったことから、規制速度が時速60kmの交差点進入方路で、交差点通過判断の差異の発生回数が多いことがわかった。

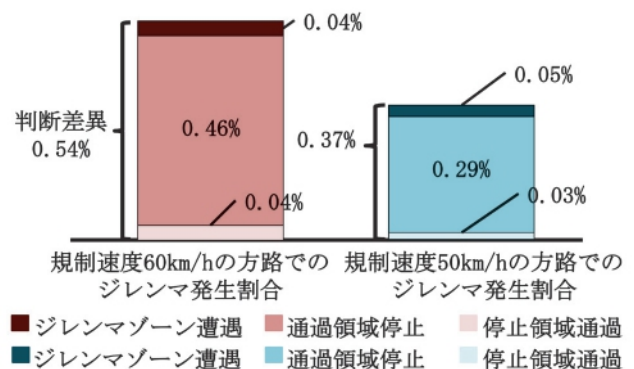


図18 規制速度別の交差点通過判断の差異の発生状況

(3) 黄残秒数別の比較

黄残秒数が3秒の交差点と黄残秒数4秒の交差点で交差点通過判断の差異が生じた割合を比較したので図19に示す。黄残秒数3秒の交差点で交差点通過判断の差異が0.42%(ジレンマゾーン遭遇が0.26%)発生したのに対し、黄残秒数4秒の交差点では0.57%(通過領域での停止が0.53%)であった。黄残秒数が3秒の場合は黄残秒数が4秒の場合に比べてジレンマゾーン遭遇の発生割合が高い傾向、また、通過領域での停止は、黄残秒数4秒の方が発生割合は高い傾向がわかった。

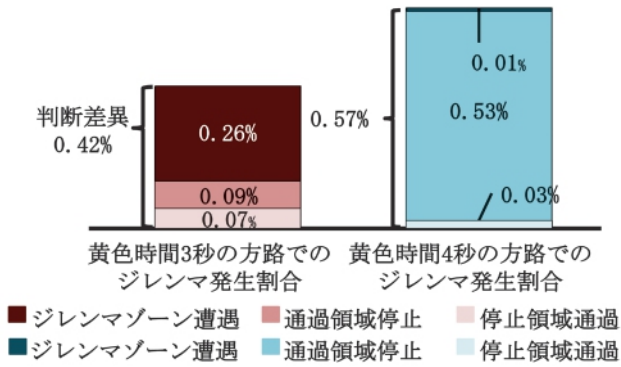


図19 黄残秒数別の交差点通過判断の差異の発生状況

(4) 信号残秒数情報の確定・幅付の比較

信号残秒数情報が確定の交差点と、幅付の交差点で、交差点通過判断の差異が生じた割合を比較したので図20に示す。確定の交差点で交差点通過判断の差異が0.03%（通過領域での停止が0.03%）発生したのに対し、幅付の交差点では0.09%（通過領域での停止が0.065%）であった。信号残秒数情報が幅付の交差点で、交差点通過判断の差異の発生回数が多いことがわかった。

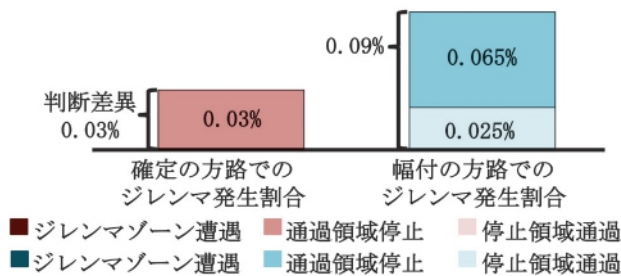


図20 信号残秒数情報の確定・幅付き別の交差点通過判断の差異の発生状況

4.3. 交差点通過判断の差異への信号残秒数情報の有効性

黄残秒数が3秒と4秒の場合で黄色信号に切り替わった時点での車両速度と停止線までの距離の分布を集計し、交差点通過判断に信号残秒数情報が有効であることを分析した。

4.3.1. 黄残秒数3秒の方路

黄残秒数3秒の方路では、信号残秒数情報を未使用の走行でジレンマゾーン遭遇、通過領域での停止、停止領域での通過がジレンマゾーン付近で複数確認できたので図21に示す。

通過領域での停止では急減速が確認されたが、信号残秒数情報の提供で緩やかな減速による停止が可能と推察される。図22に走行特性を示す。また、停止領域での通過では黄色信号を確認後、加速による交差点通過が確認されたが信号残秒数情報の提供により安全

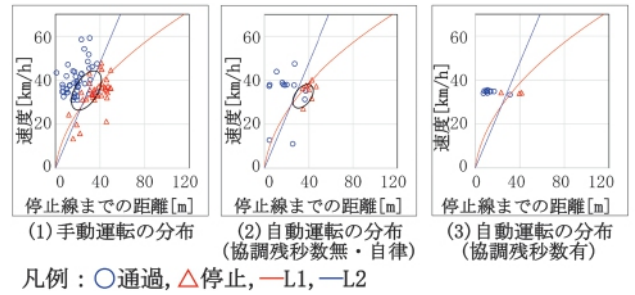


図21 黄残秒数3秒の方路での交差点通過判断結果

に停止することが可能と推察される。図23に走行状態を示す。

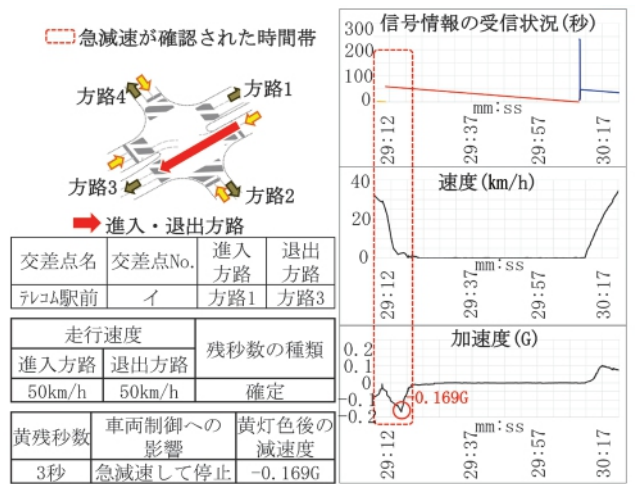


図22 通過領域での停止の走行(黄残秒数3秒の方路)

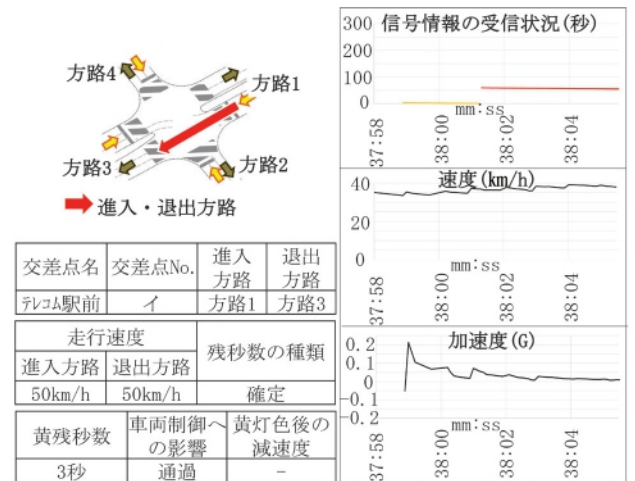


図23 停止領域での通過の走行(黄残秒数3秒の方路)

4.3.2. 黄残秒数4秒の方路

黄残秒数4秒の方路では、信号残秒数情報未使用の走行では、通過領域における通過・停止の混在が広く確認できたので図24に示す。

これから、同程度の速度と停止線までの距離の区間では、ドライバ側で通過と停止の判断が混在していることが推察される。一方、信号残秒数情報を使用したインフラ協調型の走行では、通過と停止の判断の混在

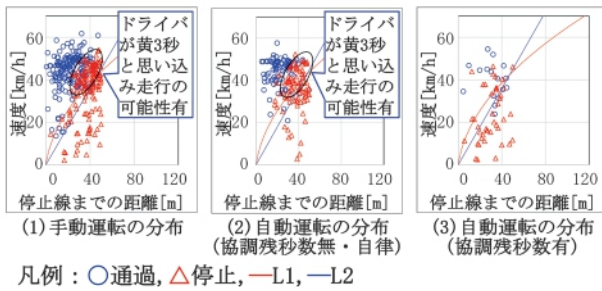


図24 黄残秒数4秒の方路での交差点通過判断結果

が減少したことから、信号残秒数情報の提供は交差点通過判断の差異の減少に有効であると考えられる。信号残秒数情報を幅付で提供している場合、黄灯色切替時の最大残秒数は20秒、最小残秒数は0秒であることから、本情報を車両制御に活用することによる、予備減速による安全な停止は困難と考えられる。図25に走行特性を示す。

また、信号残秒数情報を使用した走行では、黄色信号を受信する前に時速30km程度まで予備減速したため、ジレンマゾーンに遭遇することなく緩やかに減速して停止できたことを確認したので図26に走行特性を示す。

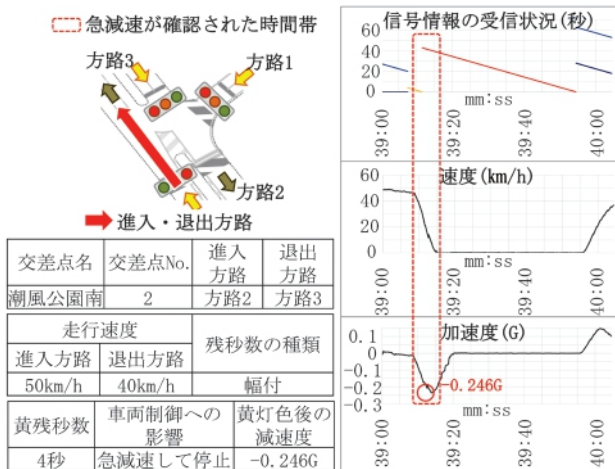


図25 通過領域での停止の走行(黄残秒数4秒の方路)

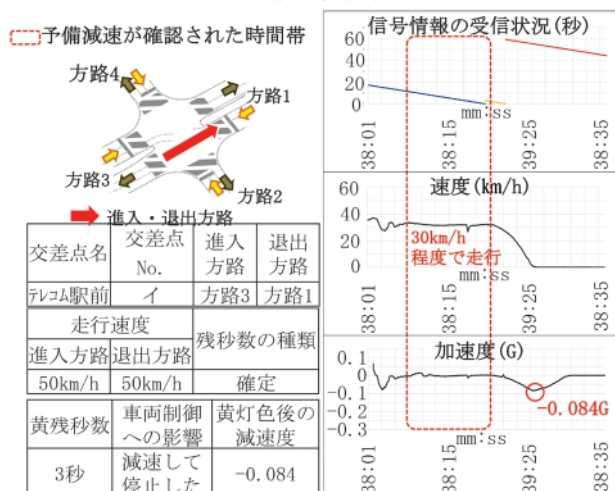


図26 予備減速を行って停止した走行(黄残秒数4秒の方路)

4.4. 信号残秒数情報の有効性のまとめ

信号残秒数情報を提供することでジレンマゾーンの回避と通過領域での適切な通過、停止領域での滑らかな停止の判断が可能になることから、自動運転を行う区間では全ての交差点で信号残秒数情報を提供することが望ましい。特に、隣接信号交差点との距離が短い交差点、規制速度が速い路線の交差点、黄色時間が短い方路を持つ交差点では、交差点通過判断の差異が生じやすく、自動運転車両に対し、信号残秒数情報を提供することが望ましい。

5 信号情報の有効性とインフラ提言

臨海副都心地域の実証実験を通して、路車協調(狭域通信インフラ活用)による信号灯色情報と信号残秒数情報が車両側に提供されることにより、自動運転車両が一般道の信号交差点を安全かつ円滑に通行できることを確認した。自動運転を行う区間では全ての信号交差点で信号灯色情報や信号残秒数情報が提供されることが望ましいが、信号情報配信の必要環境条件に関しては、警察庁が2015年12月27日に制定した信号機設置の指針⁽⁵⁾と実証実験の結果より、「カーブ等により信号機が視程に入る距離が短い道路」、「規制速度が高めに設定されている道路」、「信号間距離が近接している交差点」、「車載カメラでは信号灯色判定困難かつ、非定常的な条件下(逆光/順光, 雨天, 前走車等による遮蔽, 夜間及び背景同化等)」において信号情報を優先的に配信することが望ましいことを確認した。

信号情報優先配信交差点の考え方をまとめたので図27に示す。

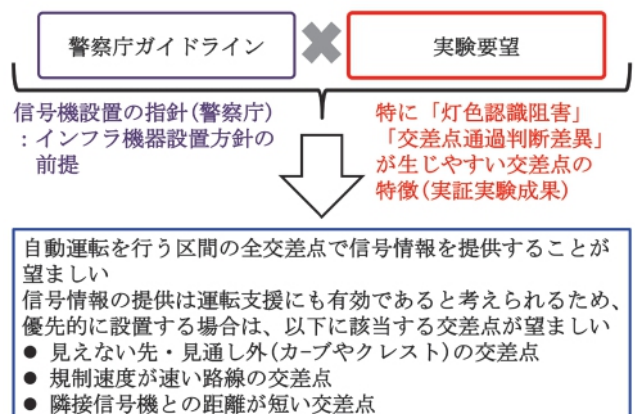


図27 信号情報優先配信交差点の考え方

6 おわりに

臨海副都心地域でのインフラ協調型自動運転の実現に向け、移動サービスを含む自動運転車の導入エリアを設定した面的なインフラ整備により、路車協調による安全で円滑な自動運転車の導入、拡大が可能であることを確認した。本実証実験では、既存サービスのITS無線路側機で配信された情報 (ISO/TS19091準拠仕様) で実験参加者と合意した一方、感応式信号機での残秒数情報のより早いタイミングでの確定要望もあったことから、影響がより顕著になるV2Nによる配信時も考慮した検討が今後必要であると考えられる。

最後に、本実証実験の実施にあたり、COVID-19の影響下、実験走行や走行データ提出に協力いただいた実験参加者の皆様に感謝する。

【参考文献】

- (1) 東京臨海部実証実験コンソーシアム「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) /東京臨海部実証実験の実施 2020年度成果報告書」(令和3年5月)
- (2) ダイナミックマップ構築検討コンソーシアム「自動走行システム向け地図データ仕様への提案 Ver1.1」
- (3) ダイナミックマップ構築検討コンソーシアム「自動走行システム向け地図データ符号化仕様への提案 (試作データ用符号化仕様) Ver1.0」
- (4) 鈴木宏典, 石倉嵩也, 生駒哲一: ジレンマゾーンにおける交差点通過または停止要因の分析と意図推定, 自動車技術会論文集, Vol.47, No4 (2016年)
- (5) 警察庁「信号機設置の指針」(平成27年12月28日)

【執筆者詳細】

- ① 津田喜秋, 三菱電機株式会社, 鎌倉製作所ITシステム部 空間情報システム課, 専任, 自動運転・ITS・路車間通信に関する研究開発, SIP第2期東京臨海部実証実験研究開発責任者
- ② 永倉亘, 三菱電機株式会社, 鎌倉製作所, 鎌倉製作所ITシステム部 空間情報システム課, 担当, 高精度測位端末・パーソナルモビリティ開発, SIP第2期東京臨海部実証実験信号情報評価解析担当
- ③ 宮下浩一, 株式会社三菱総合研究所, スマート・リージョン本部 先進モビリティグループ, 主任研究員, 自動運転・ITSに関する研究開発, 実証の支援・コンサルティング
- ④ 並木裕之, エム・アール・アイ リサーチアソシエイツ株式会社, 社会システム事業部インフラ情報チーム, 研究員, ITS・モビリティに関する調査研究・コンサルティング

3 自動運転の安全性の確保

(1) 東京臨海部実証実験

羽田空港地域における 実証実験データの分析

山田康右, 内山直浩, 祢津伸一 (パシフィックコンサルタンツ株式会社)

(概要) 羽田空港地域における実証実験では、磁気マーカー・バス専用レーン・信号情報・PTPS等の自動運転支援インフラを活用することで、自動運転技術を搭載したバスが、羽田空港周辺の公道上の周回バス路線における定時運行およびバス停への高精度な正着制御を実現できることを検証した。周回バス路線では、計322回の自動走行実験を行い、混在交通環境下で自動走行による定時運行が可能であることを確認したほか、一部走行で発生した手動介入の約8割が「路上駐車車両回避」または「左折時における対向車線の停止線への接近」に起因すること、PTPSが速達性・定時性の向上に寄与することを確認した。また、バス専用レーンが自動運転の継続性向上に貢献することを確認した一方、一般車両との錯綜事象も発生し、自動運転車の挙動特性に関する広報・啓発、バス専用レーンのルール遵守を訴求すること等の必要性も明らかになった。バス停では計416回の自動運転正着制御実験を行い、磁気マーカーの活用により標準偏差10mm未満という再現性の高い正着制御を実現できることを確認した。

1 羽田空港地域における 実証実験の目的

羽田空港地域においては、2020年6月5日から、公共交通機関であるバス・少人数輸送車等のインフラ協調型の自動運転制御による無人移動サービス等の実証実験が実施された。

羽田空港地域実験として、磁気マーカーやバス専用レーン等の自動運転支援インフラを整備し、実証実験において得られた各種データを解析することにより、インフラ協調の有効性確認、課題抽出の取りまとめを行った。羽田空港地域におけるインフラ整備箇所を図1に示す。

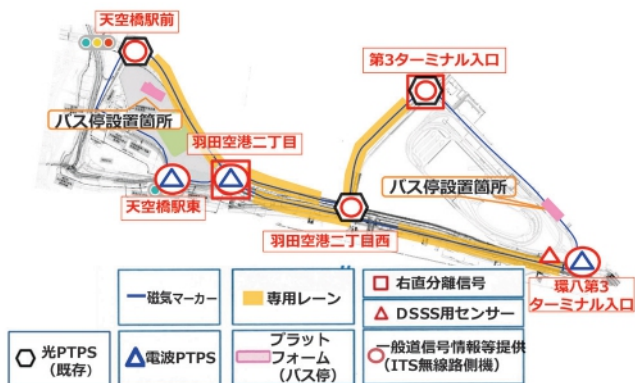


図1 羽田空港地域実験におけるインフラ整備箇所

2 調査手段と評価結果の とりまとめ方法

「車載器データ」、「交通状況観測」から、インフラ協

調による自動走行の実現性、定時性・快適性、一般交通への影響を評価し、データ解析に基づいたインフラ協調の有効性を考察した。さらに「実験参加者へのアンケート」を実施し、インフラ協調が特に有効な場面等のご意見を頂き、データ解析結果と合わせて自動運転支援インフラが満たすべき条件案を取りまとめた。

3 実験結果のまとめ・報告

3.1. 混在交通下でのドライバ介入要因の分析

3.1.1. 混在交通下における自動運転実現の確認

インフラ協調型の自動運転ARTシステムによって、公道上の混在交通下での自動走行が実現できたことを確認するため、目標周回数を設定し、自動走行による実績周回数を整理した。

(1) 解析方法

目標周回数の設定については、自動走行の実現性及び速達性・定時性・快適性を評価するため、統計的に有意な評価が可能となるサンプル数を算出し設定した。なお、実績周回数は、一時的な手動介入が発生した場合であっても、連続的・継続的な手動走行でなければ、自動走行とみなして集計した。

(2) 解析結果

実験参加者3社が実施した走行データにおける自動走行の実現状況を確認した結果、目標周回数以上の自

自動走行が実施されたことか把握できた。この結果より、インフラ協調が混在交通下での自動走行の実現のために有効であることが確認できた。

図2に目標周回数と実績周回数を示す。

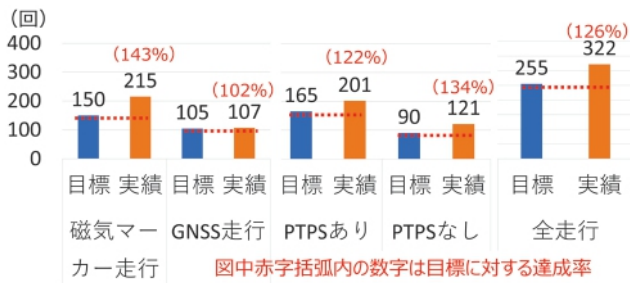


図2 目標周回数と実績周回数(3社合計,6~11月の回数)

3.1.2. 磁気マーカー走行時における手動介入発生要因の把握

本実証実験においては、多くの走行で自動走行が行われたが、いくつかの場面で手動介入が発生した。自動走行の継続可能性の確保・向上のために課題となる手動介入の発生要因を評価することで、今後の自動走行の実現に向けたインフラ整備に関する課題を整理した。

(1) 解析方法

自動走行中に手動介入が発生した場合、自動運転バスの同乗員が数取器のボタンを押下することにより、

手動介入発生時刻が記録される。手動介入発生時刻とドラレコ映像を突合し、図3に示す8種類の手動介入要因を特定した。

(2) 解析結果

手動介入要因の約8割は、「①路上駐車車両の回避」もしくは「⑦左折時における対向車線の停止線への接近」であり、次いで「③隣接レーン走行車両の接近」であった。

図4に手動介入の要因別構成率を示す。「路上駐車車両の回避」に対し走行環境改善策を、「左折時における対向車線の停止線への接近」に対し道路構造・運用の改良(停止線位置の調整等)を講じることで、自動走行の継続可能性が高まる余地が大きいと考えられる。

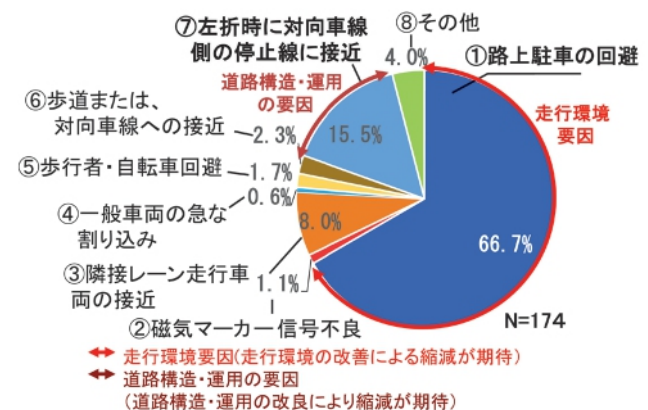


図4 手動介入の要因別構成率(磁気マーカー走行)



図3 手動介入要因の詳細

3.2. 定時運行実現に向けたインフラ協調の有効性

3.2.1. PTPSによる速達性・定時性向上効果の確認

PTPSを活用した走行、PTPSを活用しない走行のそれぞれの周回走行毎の所要時間およびその標準偏差等から、PTPSによる所要時間短縮効果および定時性向上効果を把握した。

(1) 解析方法

- GNSS車載端末機器から得られた走行中の履歴点データ(取得時刻、緯度経度)を用いて、羽田空港地域の周回走行ルートにおける周回毎の所要時間を求め、平均所要時間や標準偏差などの各種統計量を求めた。
- 履歴点データのうち、周回走行ルートにおける周回が確認できたデータのみを抽出し、所要時間を求めた。周回走行の所要時間の計測範囲は、第3ターミナルバス停範囲を抜けてから第3ターミナル入口交差点範囲を抜けるまでの時間とした。なお、評価対象走行の同質性を担保するため、

第1ゾーン南側道路で低速走行（平均10km/h以下）している周回を除外し、PTPSを活用した走行については、通過8交差点中7交差点以上のアップリンク成功が確認された走行に限定して解析を行った。

(2) 解析結果

PTPSを活用した走行により、1周あたりの平均所要時間が21秒（約4%）短縮し、所要時間の標準偏差が12秒短縮するとともに、所要時間の中央値の短縮も38秒と大きいことを把握した。

所要時間の統計量を図5、所要時間の分布を図6に示す。

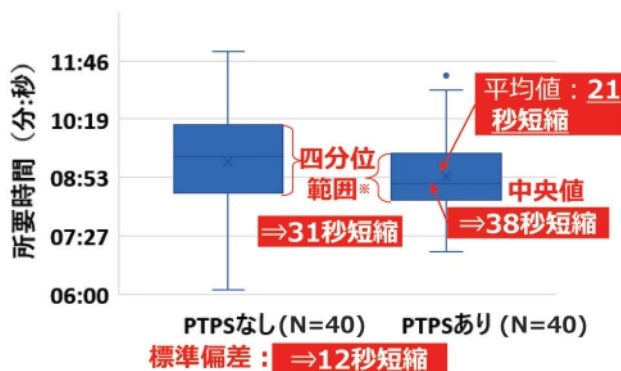


図5 PTPS活用なし/ありによる所要時間関連統計量

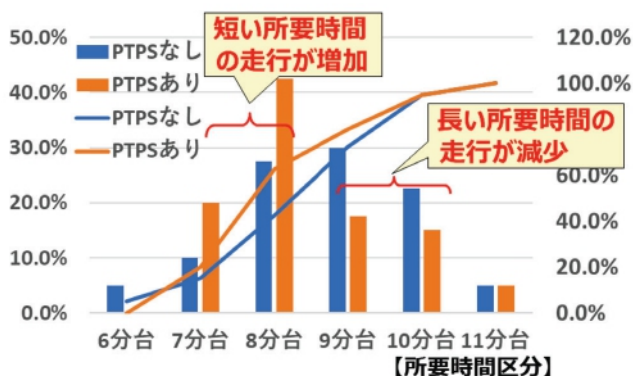


図6 所要時間分布の比較(C社の走行を対象)

3.3. 乗車・降車の快適性

3.3.1. 停止・発進時の加速度の把握

交差点やバス停での停止・発進時において、最大前後加速度の強度別の発生頻度を把握し、乗客の立席に配慮したバスの安全性・快適性を評価した。

(1) 解析方法

- ① ドラレコ映像から1周走行毎の第3ターミナルバス停における停止・発進時刻と各交差点の赤信号による停車・発進時刻を確認する。
- ② ドライブレコーダから取得した加速度データより、赤信号停車時・発進時の時刻の前後20秒間に発

生した最大加減速度を整理する。

(2) 解析結果

停止時・発進時ともに乗客に不快感を与えない範囲の加減速度（0.2G以下）での走行が約9割を占め、乗客の立席時にも問題のない緩やかな加減速であった。

なお、0.3G超の減速度が発生した場合が数回程度あったが、交差点に差し掛かる直前に黄色信号に変わった際に発生したものであった。今後、信号残秒数情報を活用した停止・発進制御が実現できれば、このような急減速を解消できる可能性がある。

図7に加減速度の強度別発生割合を示す。

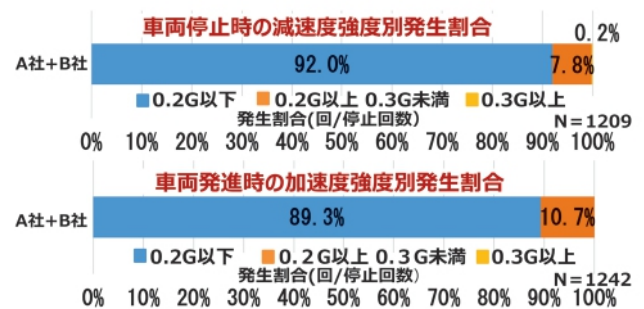


図7 加減速度の強度別発生割合 (A社+B社 磁気マーカー走行)

3.3.2. 正着制御の再現性の高さの評価

自動運転バスが自動走行によってバス停に停止した際の、バス停端からバス乗車口までの距離を計測することで、磁気マーカーによる正着制御の再現性の高さを確認した。

(1) 解析方法

正着制御時のバス停端からバス乗車口までの距離を計測した。各社における50回以上の計測値を基に標準偏差を算出することで、正着制御の再現性の高さを確認した。なお、本実証実験では実験参加者が、中扉で乗降する車椅子使用者の乗降性向上を目的とした開発を行っていることから、中扉での検証を行った。

(2) 解析結果

磁気マーカーによる正着制御では、第1ゾーン、第3ターミナルのいずれにおいても標準偏差10mm未満という再現性の高い正着制御が実現できている。

図8に第1ゾーンバス停、第3ターミナルバス停における計測値の標準偏差を示す。形状が異なる第1ゾーン、第3ターミナルのいずれのバス停においても、高い再現性で正着制御が実現できていることから、バス停での正着制御の再現性、安定性の確保において磁気マーカーが有効であると考えられる。

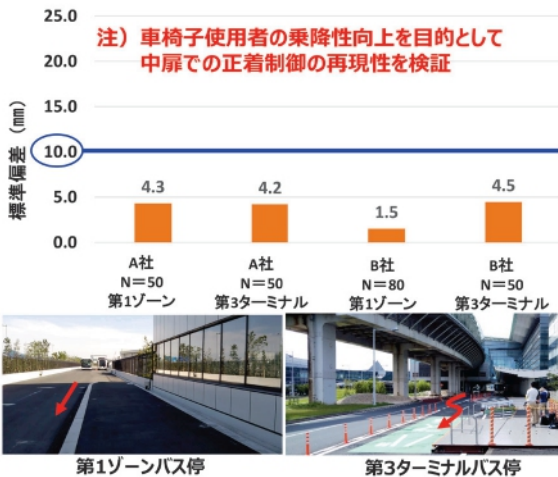


図8 第1ゾーンバス停, 第3ターミナルバス停の標準偏差 (自車位置推定:磁気マーカー)

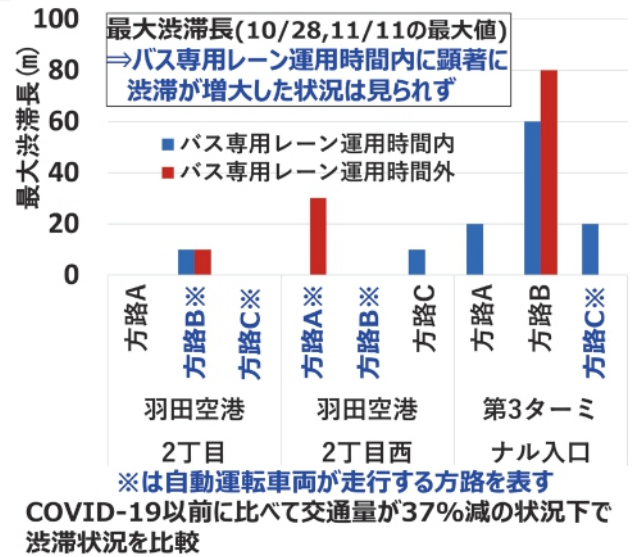


図9 交差点別・方路別の最大渋滞長

3.4. 自動運転車両の走行による交通流への影響と要因

3.4.1. バス専用レーン設置による渋滞状況の変化

バス専用レーンの設置・運用は、単路部において一般車両が利用可能な車線数の減少に伴い交通容量の低下をもたらすものの、バス専用レーンは交差点の約90~160m手前で終了しているため、交差点における交通容量への影響はないものと考えられる。一般的に、道路ネットワークの交通容量は、交差点の交通容量が支配的である場合が多いが、状況によってはバス専用レーンの設置・運用による単路部の交通容量低下の影響が顕在化する可能性もある。そこで、渋滞長の観測を通じて、実証実験のために整備されたインフラ(バス専用レーン)や自動運転バスの走行による交通影響を確認した。

(1) 解析方法

10月28日(水), 11月11日(水)に行った渋滞長調査の結果を用いて、バス専用レーン運用時間内(10時~17時), 運用時間外(7時~10時, 17時~19時)における最大渋滞長の差異を確認した。

(2) 解析結果

COVID-19以前の交通量に対し、6割程度の水準であった状況ではあるが、バス専用レーン運用時間内における渋滞長の増大は確認されなかった。実証実験時の交通状況下においては、バス専用レーン設置による渋滞への影響は顕在化しなかった。図9に交差点別・方路別の最大渋滞長を示す。

3.4.2. 自動運転バスに対する錯綜発生状況

自動運転バスは規制速度を遵守するため、一般車からすると、状況によっては低速で走行している車両と見られるケースが想定される。特にバス専用レーン運用が途切れる交差点手前では、相対的に低速な自動運転バスの前方のスペースに車線変更した上で右左折したいという一般車が、自動運転バスを超越し、急に車線変更することなどによる錯綜の発生が想定される。ここでは、バス専用レーン内を走行中の自動運転バスと一般車の錯綜を確認することで、バス専用レーンの整備による交通影響を確認した。

(1) 解析方法

図10に示す3交差点に設置した高所カメラ映像より、自動運転バスが通過する際の一般車両との錯綜を確認

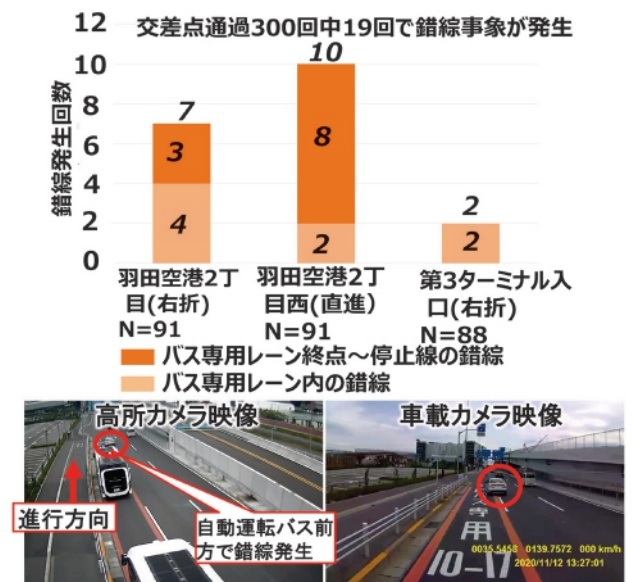


図10 交差点別の錯綜事例発生比率

した。なお、ここでの錯綜の定義は、一般車の車線変更等に伴い、当該車両と自動運転バスとの距離が接近し、いずれかの車両の挙動（速度・加速度）の変化が生じたものとした。

なお、錯綜発生箇所を「バス専用レーン内における錯綜」「バス専用レーン終点～交差点手前の停止線における錯綜」に分類し、各交差点における総発生回数を集計した。

(2) 解析結果

錯綜事象は、交差点通過回数300回中19回で発生している。バス専用レーンが途切れた後の場所だけでなく、バス専用レーン内での錯綜も発生している。

図 10に交差点別の錯綜事例発生割合を示す。バス専用レーン内においても錯綜が発生している状況であり、より安全な自動運転バスの走行環境の実現に向けて改善策を講じるべきである。そのためには、自動運転車の挙動特性に関する広報・啓発や、専用通行帯標識^{*}等での周知強化等、バス専用レーンのルール遵守の必要性を訴求することが重要である。

※実証実験時においては、バス専用レーンの起点終点に標識が設置されていた。

自動運転技術の水準の下では、バス専用レーンが自動運転の継続性向上に貢献し得るものと考えられる。一方、バス専用レーンを有効に機能させるため、自動運転車の挙動特性に関する啓発や、バス専用レーンのルール遵守の必要性の訴求が重要である。

(4) 自動運転ARTシステムによる交通流への影響

自動運転バスの混在により、交差点等における捌き交通量は若干の低下が想定されるため、今後の社会実装では、導入フィールドでの交通影響の事前確認が必要と考えられる。

【執筆者詳細】

- ① 山田 康右, パシフィックコンサルタンツ株式会社, デジタルサービス事業本部 DX事業推進部 交通システム室長
- ② 内山 直浩, パシフィックコンサルタンツ株式会社, デジタルサービス事業本部 DX事業推進部 交通システム室
- ③ 祢津 伸一, パシフィックコンサルタンツ株式会社, デジタルサービス事業本部 DX事業推進部 交通システム室

4 おわりに

羽田空港地域の実証実験結果および実験参加者に対して実施したアンケート結果を総括し、協調型インフラの有効性とインフラ整備による課題を整理した。その概要を以下に示す。

(1) 磁気マーカー

GNSSでの自車位置推定精度が低下する場所、正着制御を行うバス停において有効で、これらが優先的に整備すべき箇所といえる。また、手動介入発生要因となり得る交通環境、道路構造・運用の改善（停止線位置の調整等）の実施が望ましい。

(2) 信号情報・PTPS

1周あたりの平均所要時間が短縮したことから、PTPSによる速達性・定時性向上効果を確認した。また、大型車によって信号灯色が遮蔽される状況等、信号認識が困難な場合でもスムーズな自動走行を実現するために信号情報提供が望ましい。

(3) バス専用レーン

路上駐車により自動運転の継続困難という現在の自

3 自動運転の安全性の確保

(1) 東京臨海部実証実験

首都高速道路における 実証実験データの分析

津田喜秋, 高橋由華子 (三菱電機株式会社), 十河孝介 (株式会社三菱総合研究所),
村木由利香 (エム・アール・アイ リサーチアソシエイツ株式会社)

(概要) 首都高速道路における実証実験^{(1), (2), (3)}では, ETC2.0路側無線装置から提供されるETCゲート通過支援情報・合流支援情報が, インフラ協調型の自動運転やドライバーへの支援情報として有効であることを, 延べ365回の空港西入口通過 (内, インフラ情報を活用した自動運転: 12回, 約3%) により検証した. ETCゲート通過支援情報は, ETCゲートの開閉状況を早いタイミングで正確に把握できることを確認した. 運用状況の視認タイミングが遅れる料金所やゲート数の多い料金所で特に有効と考えられる. また, 合流支援情報は, 高速道路本線上流部に設置された路側センサの検知情報に基づき生成される情報である. 自動運転車両やドライバーが本線状況を事前把握できる点で有効である. 一方, 路側センサ通過後の本線車両速度の変化を把握不能であることから, 臨界時や渋滞時ではスムーズな合流に支障が生じることを確認した.

1 首都高速道路における実証実験

高速道路でのインフラ協調型自動運転の実現に向けて, ETCゲートの通過や本線車両速度に合わせた合流が課題である. 東京臨海部実証実験のうち首都高速道路における実証実験では, ETCゲート通過支援情報と合流支援情報をDSRC路車間通信で車両に提供し, 各情報の有効性確認と実用化に向けた課題を明確にすることを目的に実施した. ここで, ETCゲート通過支援情報は, 料金所のゲート運用状態 (ETC/混在/一般/閉鎖) を進入車両に提供する. 合流支援情報は, 本線上流部に設置されたセンサの検知結果から本線走行車両の車長・速度や合流部到達計算時刻を生成し合流車両に提供する.



図1 実験エリア (電子地形図2500 (国土地理院))

2 実証実験の概要

2.1. 実験エリア

首都高速道路での実証実験は, 首都高速道路羽田線 上り空港西入口で実施した. 空港西入口の位置を図1に示す.

2.2. 実験システム

(1) インフラシステム構成

インフラシステム構成を図2に示す. 実験車両とETCゲート通過支援情報提供路側機 (前アンテナ) 間

でDSRC路車間通信を行い実験車両が否か識別され, 実験車両時はETCゲート通過支援情報を実験車両に提供する. 実験車両進入を受信したゲート情報配信サーバは, 合流支援情報提供路側機 (後アンテナ) に実験車両進入を伝達, 後アンテナは実験車両にDSRC路車間通信を行い車両センサ処理装置からの最新の合流支援情報を提供する.

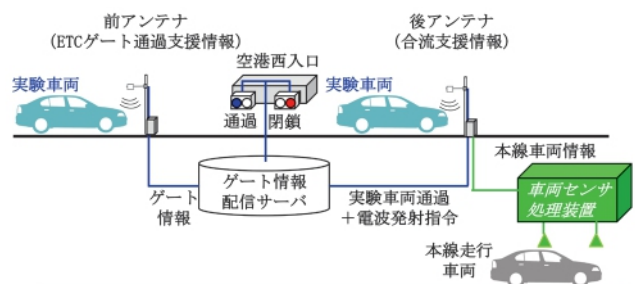


図2 インフラシステム構成

(2) 車載システム構成

実験車両に搭載した車載システム構成を図3と表1にそれぞれ示す。高速道路実験用車載器が受信するETCゲート通過支援情報と合流支援情報、GNSS受信機が受信する自車位置情報を実験用車載機 (BOX型PC) で処理し、LANまたはCANインタフェースで車両制御装置へ出力する構成である。安全管理のため動態管理システムと評価用映像データ記録機器を装着必須とし、電子数取器は自動運転と手動運転の切替えや各種事象発生を記録するため準備した。



図3 車載側のシステム構成

表1 各機材の概要

機材名	概要
受信データ確認用PC	ログデータの収集や、実験用車載機を設定する機能
高速道路実験用車載器	ゲート用・合流用路側機が提供するETCゲート通過支援情報・合流支援情報を受信・出力する機能
GNSS受信機	測位衛星が提供する測位信号を受信し、機材の位置を出力する機能
実験用車載機 (BOX型PC)	高速道路実験用車載器、GNSS受信機の出力信号から、必要に応じてデータ抽出・変換処理を行いCAN出力する機能
動態管理システム	実験車両のリアルタイム走行位置や、過去の走行データを確認する機能
ドライブレコーダ	前方・後続の車両挙動を把握し、高解像度の映像や走行ログを取得する機能
電子数取器	押下ルールを設定したボタンの押下により、事象や自動運転のON/OFFタイミングを記録する機能

2.3. 走行実績

首都高速道路における実証実験は、2020年3月16日から2021年2月28日までの約11ヶ月間実施した。ここで2020年4月8日から5月25日までの約2か月間は、COVID-19感染拡大に伴い首都圏に発出された緊急事態宣言を受け、実験を中断した。実験参加者による空港西入口の実験走行回数は合計365回であった。走行実績の内訳を図4に示す。実験走行のうちインフラ情報を車両制御に活用した協調型自動走行は12回（約3%）、インフラ情報を車両制御に活用しない自律型自動走行は5回（約1%）であり、その他の348回（約95%）は手動走行であった。

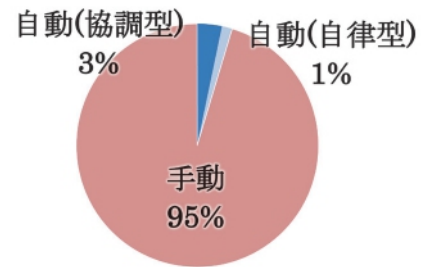


図4 実験走行実績（空港西入口）

3 ETCゲート通過支援情報

3.1. システムの操作適切性

図2と図3に示した実験システムに基づき、ETCゲート通過支援情報が適切に提供されることを確認した。空港西入口は2つのブースで構成されており、それぞれのブースで「ETC」、「混在」、「一般」、「閉鎖」の4パターンを提供する可能性があるため、延べ16通りの組合せについて、いずれも正しくETCゲート通過支援情報を受信し、BOX型PCを経由して車両制御へ情報出力することを確認した。受信したETCゲート通過支援情報のダイナミックマップビューア表示画面とドライブレコーダ画像の対応例を図5に示す。

実験期間中も、実験システム稼働中の全走行で、ETCゲート通過支援情報を正常受信・出力できていることを確認した。

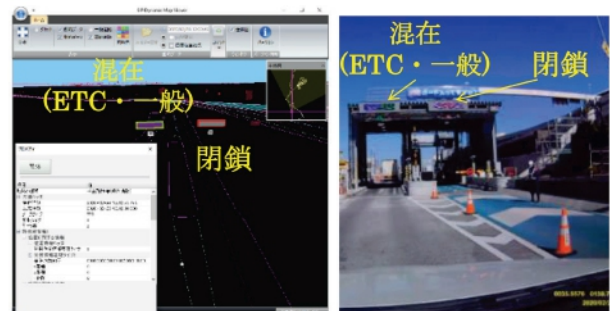


図5 ETCゲートの運用状況（ドラレコ映像）とダイナミックマップビューアでの表示

3.2. 支援情報の有効性

(1) 走行データの分析

ETCゲート通過時の車両挙動例を図6に示す。

空港西入口は、ETCゲートの手前が緩やかなカーブとなっており、ゲート手前約110mの地点で車両からETCゲートを視認可能となる。本実験では、ゲート手前約185mの地点にETCゲート通過支援情報提供用路側装置を設置し、ETCゲートを視認可能となる十分手前の位置でETCゲートの運用状況を把握でき

ることを確認した。

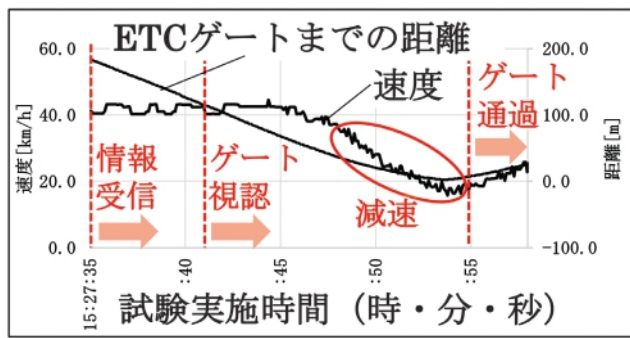


図6 ETCゲート通過時の車両挙動

(2) 評価アンケート

ETCゲート通過支援情報の提供について、実験参加者からの課題提起は無く、早期の実運用を希望する意見が多数得られた。評価アンケートで得られた主な意見を以下に示す。

- 全料金所での導入希望。特に「運用状況の視認タイミングが遅れる料金所」や「ブース数の多い料金所」で有効
- 自動運転車両の他、運転支援システムにも効果発揮大
- 突発的にゲートが閉鎖した場合の対応について検討要

等

4 合流支援情報

4.1. システムの操作適切性

図2と図3に示した実験システムに基づき、料金所通過後の後アンテナ通過時の走行形態（通常走行、左右偏り走行、2車両連続走行）によらず、合流支援情報を正しく受信し、BOX型PCを経由して車両制御へ情報出力することを確認した。受信した合流支援情報のダイナミックマップビューア表示画面とドライブレコーダ画像の対応例を図7に示す。



図7 合流時の本線状況(ドラレコ映像)とダイナミックマップビューアでの表示

4.2. 支援情報の有効性

(1) 走行データの分析

自動運転車両の本線合流では、本線車両速度と協調して、急挙動が発生することなく、本線車両の間にスムーズに合流することが望ましい。

実験車両が本線に合流する際の本線車両速度と実験車両速度の関係、合流時の急挙動(±0.15G以上)の発生有無を、インフラ協調無しの場合について図8に、また、インフラ協調有りの場合について図9にそれぞれ示す。

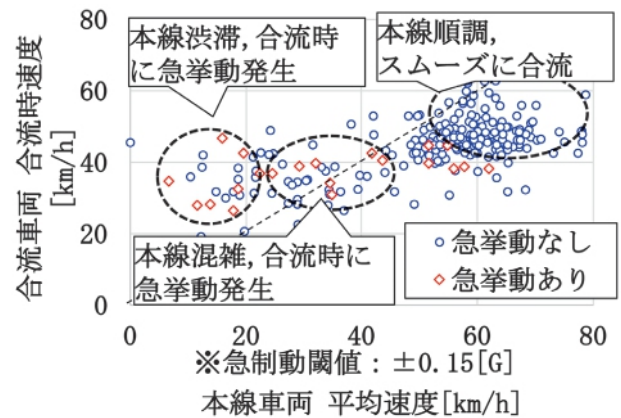


図8 本線車両平均速度と合流車両合流時速度の関係 (インフラ協調無しの場合)

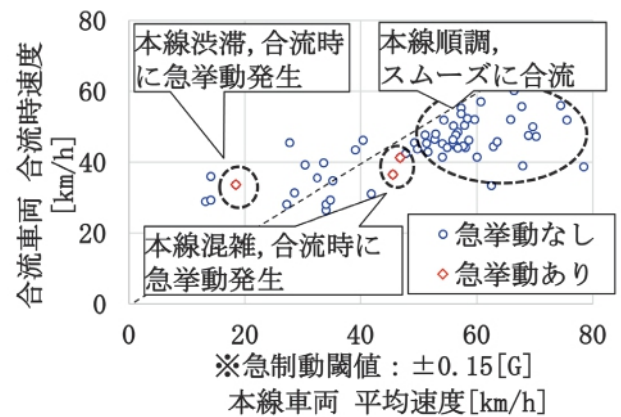


図9 本線車両平均速度と合流車両合流時速度の関係 (インフラ協調有りの場合)

ここで、インフラ協調の有無は、インフラからの合流支援情報を、車両制御に活用したか、テストドライバーに対して運転支援用の画面表示等の任意の方法で提供した走行を「インフラ協調有り」としており、これらのいずれにも該当しない走行を「インフラ協調無し」としている。

図8と図9より、インフラ協調の有無によらず、合流時の実験車両速度は、約20km/hから約60km/hの範囲に収まっている。本線順調時の実験車両速度は約40km/hから約60km/hに集中する一方、本線混雑時や渋滞時は合流時の実験車両速度に分散があることが分かる。イ

ンフラ協調無しの場合、本線車両速度が20km/h以下の渋滞状態であっても、合流時に40km/h以上まで加速し、急減速しながら本線に合流する車両も散見されたが、インフラ協調有りの場合、本線渋滞時に過度な加速を行う走行は見られなかった。このことから、合流支援情報で本線状況を事前把握することで、本線車両速度と協調した合流が可能であることを確認した。

また、急挙動の発生状況に着目すると、インフラ協調無しの場合、本線車両速度と実験車両速度に乖離があることによる急挙動発生が散見される。一方、インフラ協調有りの場合、一部走行で急挙動は発生しているが、いずれも本線車両速度と実験車両速度の乖離に起因するものではなく、本線混雑時または渋滞時で合流しようとした際に、本線車両が真横に位置したことに起因するものであった。このことから、合流支援情報により本線状況を事前に把握することで、急挙動の発生割合を抑制できることを確認した。

本線順調時にインフラ協調で本線合流した実験車両の挙動例を図10に示す。この走行では、インフラから提供された合流支援情報に基づき速度調整し、本線のギャップにスムーズに合流したと考えられる。ただし、本実験システムでは、本線上流部センサ通過後の本線車両等速運動を仮定した到達計算時刻を提供しており、センサ通過後の本線車両速度変化状況を反映することができない。このため、特に本線車両速度変化が大きくなりやすい臨界時や渋滞時において、本実験における合流支援情報に基づいて本線車両のギャップにスムーズに合流することは困難であると考えられる。

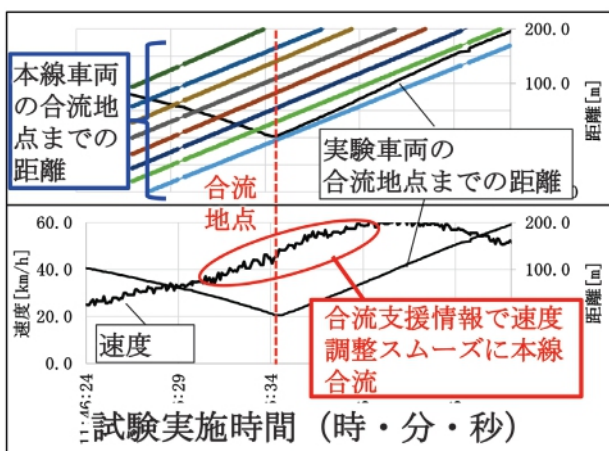


図10 本線順調時のインフラ協調本線合流実験車両挙動

(2) 本線合流シミュレーションによる解析

交通シミュレータ上で空港西入口の道路構造と本線交通状況を再現し、後アンテナと本線上流部センサ

の設置位置を変化させた場合の合流成功率を検証した。シミュレーションでは、後アンテナとセンサの設置を本実証実験位置とした場合、それぞれ合流部に近づけた場合、合流部から遠ざけた場合と本線交通状況「順調」「混雑・臨界」「渋滞」の実測データを組合せて実施した。合流成功率を図11に示す。

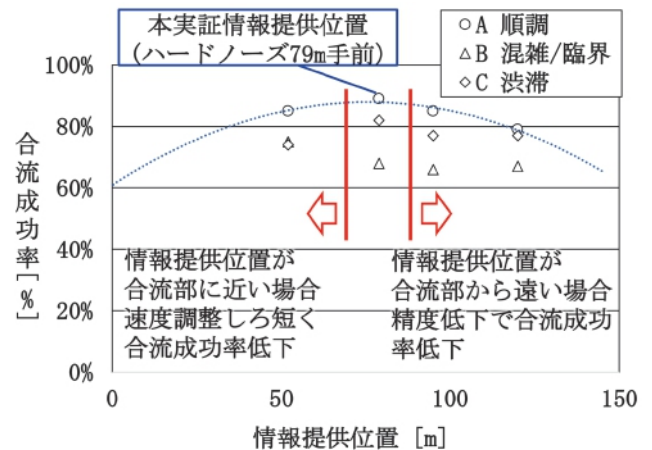


図11 本線合流シミュレーションに基づく後アンテナ・センサ位置・本線状況に応じた合流成功率

図11より、本線順調の場合には、合流支援情報の利用による合流成功率の向上が見込まれるものの、混雑時や渋滞時は到達計算時刻の精度低下に伴い合流成功率が低下することが分かる。インフラ設置位置は、本実証における設置位置の場合に最も合流成功率が高いことを確認した。設置位置を合流部に近づける場合、速度調整範囲が短くなることで合流成功率が低下し、設置位置を合流部に遠ざけた場合、到達計算時刻の精度低下に伴い合流成功率が低下すると考えられる。

(3) 評価アンケート

合流支援情報の提供について、見通しの効かない本線状況を事前に把握できることから、自動運転車両制御や運転支援システム向けに有効との意見が多数得られた。一方、本線車両のスポット検出に基づく情報提供のため、センサ通過後の本線車両速度変化を反映することができず、本線車両の隙間を狙ったスムーズな合流に向けては課題があるとの回答も複数得られた。この課題に対し、本線車両の面的なセンシングや、変化する本線状況を合流車両に対し連続通信での提供を希望する意見が多数示された。評価アンケートで得られた主な意見を以下に示す。

- 本線状況の視認が遅れる合流地点で有効
- 変化する本線状況を把握するために、本線車両の面的センシングと連続通信で合流車両に情報

提供希望

- ETCゲート通過支援情報に本線状況（交通流全体の速度・混雑度・平均車間時間）を併せて提供希望

5 おわりに

首都高速道路における実証実験を通じ、狭域通信により早いタイミングでETCゲート通過支援情報を提供することで自動運転車の経路計画立案の他、ドライバー向けの運転支援システムにも有効であることを確認した。また、見通しの効かない本線走行車両情報を狭域通信により合流車両へ提供することが、自動運転機能による合流支援、ドライバー向けの注意喚起機能等に有効であることを確認した。

一方、本実験システムで提供した合流支援情報は、本線車両のスポット検出に基づき、センサ通過後の等速運動を仮定した到達計算時刻であったため、本線センサから合流地点の間で本線車速に変化が生じる状況では、情報の精度が低下し、本線車両の間にスムーズに合流するには課題であることが判明した。インフラ協調型自動運転での本線合流実現に向けては、変化する本線車両位置情報を連続配信で提供する等の情報精度向上・改善検討が必要と考えられる。

最後に、本実証実験の実施にあたり、COVID-19の影響下、実験走行や走行データ提出に協力いただいた実験参加者の皆様に感謝する。

【参考文献】

- (1) 東京臨海部実証実験コンソーシアム「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) /東京臨海部実証実験の実施 2020年度成果報告書」(令和3年5月)
- (2) ダイナミックマップ構築検討コンソーシアム「自動走行システム向け地図データ仕様への提案 Ver1.1」
- (3) ダイナミックマップ構築検討コンソーシアム「自動走行システム向け地図データ符号化仕様への提案 (試作データ用符号化仕様 Ver1.0)」

【執筆者詳細】

- ① 津田喜秋, 三菱電機株式会社, 鎌倉製作所ITシステム部 空間情報システム課, 専任, 自動運転・ITS・路車間通信に関する研究開発, SIP第2期東京臨海部実証実験研究開発責任者

- ② 高橋由華子, 三菱電機株式会社, 鎌倉製作所, 鎌倉製作所ITシステム部 空間情報システム課, 担当, 高精度3次元地図用自動図化・自動接合ソフト開発, SIP第2期東京臨海部実証実験高速道路シミュレーション担当
- ③ 十河孝介, 株式会社三菱総合研究所, スマート・リージョン本部 先進モビリティグループ, 研究員, 自動運転・ITSに関する研究開発, 実証の支援・コンサルティング
- ④ 村木由利香, エム・アール・アイ リサーチアソシエーツ株式会社, 社会システム事業部 インフラ情報チーム, 研究員, ITS・モビリティに関する調査研究・コンサルティング

3 自動運転の安全性の確保

(1) 東京臨海部実証実験

インパクトアセスメント 実証実験データの分析

渡部康祐, 寺本英二, 田村太壱, 秋本克哉 (日本工営株式会社)

(概要) インパクトアセスメント実証実験では、多数の自動運転車両が一般道を走行する混在交通環境において、一般道への自動運転車両の混入が周辺の一般車両や歩行者に与える影響を評価した。評価にあたっては、複数交差点に設置した定点カメラの映像データ、車載カメラ映像データ、車両挙動データを組み合わせた見える化システムを構築・活用した。右左折時の捌き量は、自動運転車混入による顕著な低下は見られず、一般車両のみと比べて分散が小さくなることを確認した。一方、単路部や交差点手前等での自動運転車両の急減速挙動により、周辺車両とのヒヤリハット事象が散見された。また、横断歩道等において、自動運転によりドライバーと歩行者のアイコンタクトが不十分になることによる影響は確認されず、歩行者に対し安全な自動運転を実現できていることを確認した。周辺の一般車両や歩行者と協調した高度な自動運転実現に向けては、自動運転技術向上や自動運転車両普及に応じ、本実証実験と同様の評価を継続して実施することが望ましいと考えられる。

1 インパクトアセスメント 実証実験の概要

1.1. インパクトアセスメントとは

自動運転車両の普及・自動運転車両の実現により、安全性・快適性の向上、交通事故の減少、交通円滑化等の効果、影響が期待される。公道走行の実証実験が開始される現段階では、実証実験で得られるデータを用いて上記の効果・影響を明らかにすることが、自動運転技術の一般市民の理解促進、社会受容性の向上につながると思われる。

実交通環境下において自動運転車両が混在する場合と自動運転車両が混在しない場合の交通環境の差異を評価し、自動運転車両が周辺環境に与える影響を分析することを「インパクトアセスメント」と定義する。具体的には、実交通環境下を自動運転車両が走行する際に、自動運転車両混在による影響があると考えられるシーンを設定し、該当するシーンの事象を収集した上で、その影響評価を行うこととした。

1.2. 評価項目の設定・検討

自動運転車両の混在による、周辺車両・歩行者等に与える影響について以下の仮説を立てた。

- 自動運転車両は、安全マージンを十分に確保するため、周囲車両と異なる速度(走行速度の低下)で走行することで、交通量減少、渋滞延伸等の

影響が発生する。

- 自動走行によりドライバーと歩行者とのアイコンタクト等意思疎通が不十分になることで、歩行者の横断躊躇や他車両への注意力低下等の影響が発生する。
- 自動運転車両が交通の流れに特徴をつけ、周辺車両の挙動が変わる(割り込みや追越等の車両が増える等)。

上記の仮説を踏まえ、自動運転車両の混在/非混在時において交通流等に差異が生じうると考えられるシーンを抽出し、インパクトアセスメントの評価項目としてリストアップし、評価項目を設定した(表1, 図1)。

表1 自動運転車両が与える影響と評価項目

評価の着眼点	想定される影響	評価項目
対交通流	・交通量の減少・増加 ・滞留長・渋滞長の変化 ・追越車線の交通量増加 ・旅行速度の低下 ・右左折の捌き台数の減少	・右左折時の捌き台数の円滑性の影響 ・右折時の対向直進車との遭遇による影響
対他車両	・自動運転車両に対する割り込み・幅寄せ ・追越行動の増加	・直進時の赤信号での停止行動等の影響 ・直進時等の周辺車両の車両挙動 ・路上駐車の影響に対する評価 ・直進時の速度の乖離(追い越され)
対歩行者等	・横断躊躇 ・安全確認行動の増加 ・他車両への注意力低下	・右左折時の横断歩行者の影響 ・直進時の横断歩行者の影響 ・自転車との接触リスク

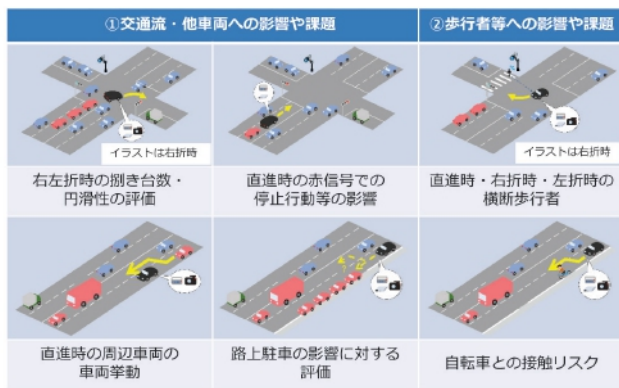


図1 設定評価項目

1.3. 実験計画

実験参加者の実験計画・ヒアリング結果を踏まえ、本実証実験における実験参加者による走行実験期間である2019年10月～2021年2月末のうち、2019年度は自動運転の開発のための準備期間、2020年度は自動運転機能の実走行による評価期間と想定した。2019年度を一般車両のみの交通流の評価のためのデータ収集を行うためのプレ評価、2020年度を自動運転車両と一般車両が混在する交通流の評価のためのデータ収集を行うための本評価と位置付けた。

さらに、実験参加者から効率的に実験データを収集するために、重点的に自動運転走行を依頼する期間を設定した。この走行期間を集中走行期間と呼び、実験参加者から自動運転の実施可能な時期をヒアリングし、2020年10月26日～11月6日の2週間、2021年2月8日～2月19日の2週間で設定した。

2 実験評価のための準備

2.1. 実験機材等の準備

2.1.1. 評価用映像データ記録機器

インパクトアセスメントでは、周辺車両や周辺環境に与える影響を評価するため、評価用映像データ記録機器（ドライブレコーダー）を車両に搭載した。高解像度の映像及び高頻度で取得した走行ログ（速度、加速度、位置情報（GNSS））を収集した。

2.1.2. 数取器

インパクトアセスメントでは、効果的かつ効率的に評価・分析を行うために、数取器を実験参加者に配布し、実験参加者が自動運転の ON/OFF 時や想定される事象の発生時に指定のボタンを押下し、数取器で時

刻を記録する運用とした。また、実験参加者が指定のボタンを押下した時刻前後の映像やログ（実験参加者のメモ含）を確認することで、事象の特定、分析・評価を行った。

2.1.3. 定点カメラ機材

表1に示した交通流の減少、滞留長・渋滞長変化及び横断躊躇等の事象を評価するためには、車両や周辺環境を俯瞰できる映像データが必要である。そこで、既存の照明柱等に固定し最大地上高10mの高さからビデオ撮影可能な定点カメラを設置した。

2.2. 定点カメラ設置交差点の設定

集中走行期間（1.3.で前述）では定点カメラを設置し、車両や周辺環境を俯瞰できるデータを取得する。実験参加者から走行ルート等をヒアリングし、図2の交差点に設置した。



図2 定点カメラ設置箇所
(赤:10・11月評価, 青:2月評価, 緑:両期間評価)

2.3. 見える化システムの構築

実証実験では、様々なインフラ設備や実験機材からデータを取得し、分析・評価を行う。取得した各種データを集約するとともに、グラフ化や地図上のプロットを行い、同時に表示・時系列で事象を再生可能なシステムとして「見える化システム」を構築した。その画面例を図3に示す。



図3 見える化システム画面例

3 評価の実施

3.1. 右左折時の捌き台数・円滑性の評価

以下、着眼点と評価方法を示す。

● 着眼点

- ① 自動運転車両の場合捌き時間に変化はあるか？
- ② 周辺車両の捌き時間に変化はあるか？

● 評価方法：定点カメラ映像から標定線通過時刻を計測しその差から捌き時間を算出（普通車を対象）

● 対象交差点：(ウ) 有明コロシム東

個車の右折捌き時間(秒)に対する箱ひげ図を以下に示す。平均値を比較すると一般車両に比べ、自動運転車両の場合 1.4 秒、その後方の一般車両の場合 0.8 秒、捌き時間は大きくなっていることが分かる。また、四分位範囲（ばらつきの程度を表す指標の一つ。「75%タイル値 - 25%タイル値」で求められる。）については変化が確認されなかった。ただし、最小値については、手動運転は自動運転に対し2秒ほど小さい値となった。あわせて自動運転車両の後続車両も近い傾向の値を示している。

自動運転は、手動運転に対して、捌き時間の平均値が大きくなる傾向が確認されていることから全体的な走行の円滑性は低下しているといえるが、四分位範囲が小さいことから個車間のばらつきが少なく安定した走行であると考えられる。自動運転車両は交通流を安定させる方向に作用することを確認した。

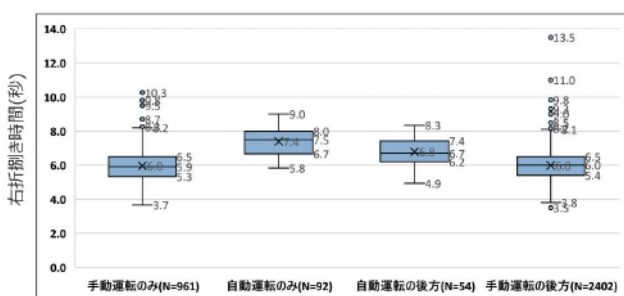


図4 右折捌き時間に対する箱ひげ図

3.2. 右折時の対向直進車との遭遇による影響評価

本評価の着眼点、評価方法を以下に示す。

● 着眼点：自動運転車両と一般車両で、ギャップアクセプタンス挙動の違いはあるか？

● 評価方法：車頭時間と車両の右折行動の有無を確認・分析

● 評価交差点：(26) 東京ビッグサイト前 右折

● 使用するデータ：定点カメラ映像データ

ギャップアクセプタンス挙動とは、対向直進車とのギャップ（車頭時間）の間に右折車両が右折するかどうか判断する挙動である。観測されたギャップ（車頭時間）のうち、右折した場合は流入ギャップ、右折しなかった場合は棄却ギャップと呼ぶ。その累積度数曲線の交点のギャップ値は、臨界ギャップと呼ばれ、ギャップアクセプタンス挙動の特性を表す一つの指標とされている。

一般車両の場合、流入ギャップサンプルを233件取得することができたが、自動運転車両の場合、評価交差点の走行サンプル数が少ない上、対向車がすべて通過した後に右折する場合は殆どで観測できた流入ギャップサンプルは1件のみだった。自動運転車両と一般車両のギャップアクセプタンス挙動の違いの分析に資するサンプル数を取得できなかった。

3.3. 直進時の赤信号での停止行動等の影響

本評価の着眼点、評価方法を以下に示す。

● 着眼点

- ① 速度分布や最大減速度に違いはあるか？
- ② 提供されるインフラ情報によって違いはあるのか？（信号灯色情報のみ、現在灯色+残秒数情報（幅付）、現在灯色+残秒数情報（確定））
- ③ 前方車両・後方車両との詰まりは発生するか？

● 評価方法：停止時の速度変化、最大減速度を抽出し分析

提供されるインフラ情報による車両挙動の違いを分析する。(6) 青海一丁目西の評価結果を図5に示す。本交差点では、信号残秒数は確定の情報を提供している。協調走行（現在灯色のみ）の場合と比較し、協調走行（現在灯色+残秒数情報）の最大減速度は小さく、確定の残秒数情報を用いて早い時点から滑らかな減速が行われていたと推察される。

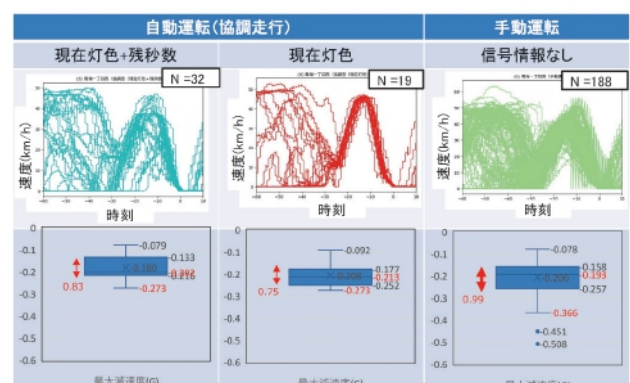


図5 (6) 青海一丁目西交差点での評価結果

また、前方車両との詰まりを評価するため、青海一丁目での評価を行ったところ、協調走行（現在灯色+残秒数情報）の最大減速度は協調走行（現在灯色のみ）や自律走行（インフラ情報なし）の場合と比較して小さく、残秒数情報を用いて早い時点から滑らかな減速が行われていたと推察された。

協調型（信号灯色+信号残秒数情報）のシーン例を図6に示す。協調型（信号灯色+信号残秒数情報）では停止線から98m手前から予備減速をしたのち車両検知による減速を行う（二段階減速）ことにより、緩やかに停止した。



図6 シーン例(直進時の赤信号での停止行動等の影響)①

次に、後方車両との詰まりを評価するため、(14)レインボー入口での評価結果を図7に示す。本交差点では幅付の信号残秒数を提供している。最大減速度は協調走行（現在灯色のみ）や手動運転の場合と比較して小さく、残秒数情報を用いて滑らかな減速が行われていたと推察される。

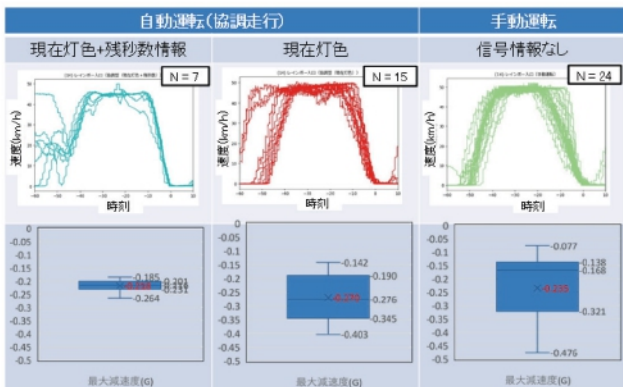


図7 (14)レインボー入口交差点での評価結果

協調型（信号灯色+信号残秒数情報）では予備減速を行い、緩やかに停止したことで後方車両との詰まりは確認されなかった。協調型（信号灯色情報）では、停止線から48m手前から信号灯色の变化の検知による減速を行っているものの、-0.24G程度のやや大き

な減速度が記録され後方車両との詰まりも発生していた(図8)。インフラ情報(特に信号残秒数情報)の有効性が確認された。



図8 シーン例(直進時の赤信号での停止行動等の影響)②

3.4. 直進時の周辺車両の挙動の影響

本評価の着眼点、評価方法を以下に示す。

- 着眼点：
 - ① 急ブレーキや割込まれが起きる頻度の変化
 - ② 急ブレーキや割込まれの原因は何か？
- 評価方法：評価用車両の急減速（前後加速度：-0.35G以下）に着目し、事象発生の原因を分析する。
- 評価交差点：すべて
- 使用するデータ：見える化システムデータ（ドライブレコーダ（加速度センサ（前後方向）、前方面像、後方面像）

集中走行期間での手動運転、自動運転それぞれの交差点通過の回数、交差点での停止回数、急減速回数を以下に示す。交差点停止回数に対しての急減速回数の割合は、手動運転では3.1%、自動運転では15.2%と、自動運転の方がヒヤリハットにつながりうる急減速の発生頻度が高くなっていったことが確認された。

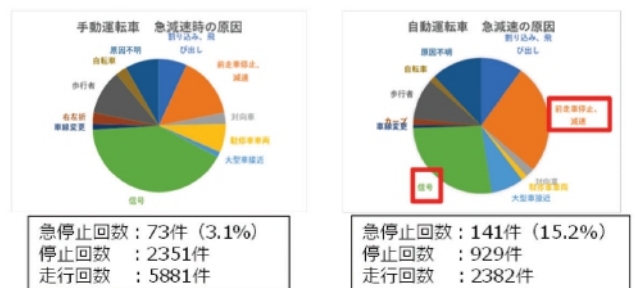


図9 急減速シーンの要因

急減速シーンの要因を分析したところ、手動運転では、信号による急減速が最も多いのに対し、自動運転では信号とほぼ同じ割合で前走車の影響を受ける場合が多いことを確認した。さらに、急減速に伴う後方車両への影響リスクが生じている。

「信号」のシーン例を以下に示す。右折待ちの列に混入する際に、信号が黄→赤になったシーンであり、通常は右折挙動を行いそうなシーンで停止挙動をとったことで後続車との詰まりが発生している。



図10 シーン例(直進時の周辺車両の挙動の影響)

上図のとおり、インフラ協調走行ではない車両(信号現示情報をカメラ等で検出する車両)の場合、赤信号や黄信号に変化した直後に、急減速を行い後続車へのヒヤリハットに繋がるケースが散見されている。インフラ協調による信号残秒数情報の提供等による支援の必要性が示唆されたと言える。

3.5. 路上駐車の影響に対する評価

評価方法を以下に示す。

- 着眼点：路上駐車に対する避走挙動の変化後の後続車両等の挙動(詰まり, 錯綜等が生じるか, ヒヤリハット等の変化はあるか?等)
- 評価方法：
 - ① 路上駐車遭遇時の車両の挙動を確認
 - ② 周辺車両挙動に与える影響を分析
 - ③ 避走行動を行ったケースに着目
- 対象交差点：(A) 青海二丁目
- 使用するデータ：見える化システムデータ

路上駐車遭遇時の右方向(避走方向)の最大横加速度(横 G)に対する箱ひげ図、後方方向の最大減速度(制動 G)に対する箱ひげ図を図11に示す。自動運転車両は、路上駐車遭遇時の右方向(避走)の最大減速度(横 G)が手動運転より小さいことを確認した。また、対向直進車と接近した際には、確実に減速しスムーズな避走が行われていた。自動運転車両は、路上駐車遭遇時の最大減速度(制動 G)は手動運転車両と同程度であり、後方車両が後続したケースは2件であることを確認した。そのうち後方車両との詰りが発生したケースは1件であった。

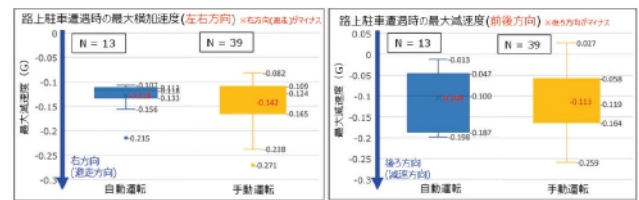


図11 路上駐車遭遇時の減速度評価

3.6. 直進時の速度の乖離(追い越され)

本評価の着眼点、評価方法を以下に示す。

- 着眼点：
 - ① 自動運転車両混在で速度に変化はあるか?
 - ② 追い越され, 割込まれは発生するのか?
- 評価方法：定点カメラ映像から標定線通過時刻を計測し, 速度を算出, ドラレコ映像を確認
- 評価交差点：(B) 有明三丁目 直進
- 使用するデータ：定点カメラ映像データ

有明三丁目(単路部)にて計測した速度に対する箱ひげ図を図12に示す。自動運転車両の平均速度(オレンジ)は50.4km/hであり制限速度を順守した走行が確認された。四分位範囲についても一般車両では13.5km/h, 自動運転車両では6.4km/hであり, 自動運転車両はばらつきの少ない安定した走行を行ったといえる。

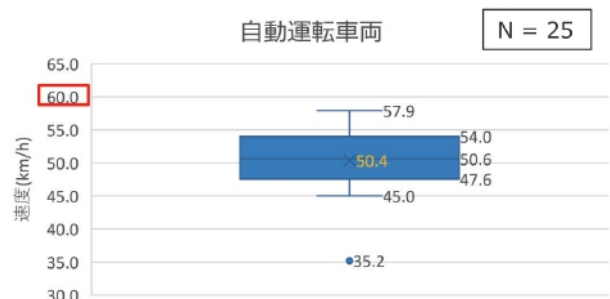


図12 (B)有明三丁目通過時の速度に対する箱ひげ図

自動運転車両の速度が一般車両の実勢速度と比べて遅いことにより, 自動運転車両のサンプル(12件, 後方車両が一般車両のサンプル数)のうち2件のサンプルで追い越されが発生していた。ただし, 追い越されが起こった際, 減速や後方車両との詰まりといった周辺車両に影響を与える事象は確認されなかった。

3.7. 右左折時の横断歩行者の影響

本評価の着眼点、評価方法を以下に示す。

- 着眼点：横断歩行者に対してどのような停止行動を行われるか?(停止位置の違いの有無, 横断歩行者と車両が遭遇した際にどちらが先に動き出したか)

- 評価方法：横断歩行者遭遇時の挙動を分析
- 評価交差点：(25) 青海一丁目
- 使用するデータ：定点カメラ映像データ

10/26～11/6 分の歩行者進行方向別に、車両遭遇時の横断歩行者の位置を図13にそれぞれ示す。ここで、車両が停止するケースを○、車両が徐行・歩行者が先行して通過するケースを△、車両が徐行・歩行者より先に通過するケースを×と示す。結果として、手動走行では14サンプル車両が先行して発進するケースが確認された。他方、自動運転車両では、先行発進するケースはゼロである。全体のサンプル数が異なることは考慮する必要はあるが、自動運転車両は手動運転車両と比較し横断歩行者との接触リスクが低い行動をとったと考えられる。

また、車両に搭載した評価用映像データ記録機器（ドライブレコーダー）から歩行者を確認したところ、歩行者は車両を確認した上で横断しており、自動運転によりアイコンタクトが不十分になる影響は確認されなかった。

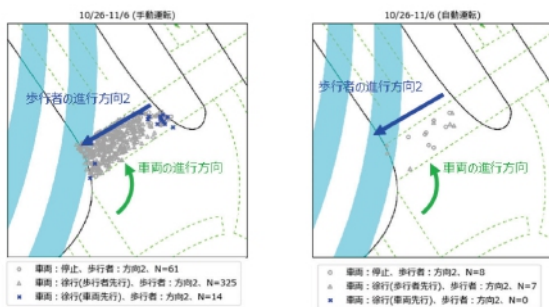


図13 車両遭遇時の横断歩行者の位置

3.8. 直進時の横断歩行者の影響

本評価の着眼点、評価方法を以下に示す。

- 着眼点：横断歩行者遭遇時に、歩行者の横断を待ってから通過するか？
- 評価方法：横断歩行者遭遇時の挙動を分析
- 評価交差点：(A) 青海二丁目
- 使用するデータ：定点カメラ映像データ、車載データ

手動運転と自動運転で、歩行者遭遇時の挙動の違いを以下に示す。手動走行では全体の3割ほどが歩行者の横断を待たずに通過したのに対し、自動運転の場合必ず歩行者の横断を待ってから通過した。自動運転車両は、横断歩行者を覚知した際には安全側の判断を行っていると考えられる。

一方、停止時の減速度を確認したところ、上記のとおり自動運転車両は横断歩行者がいる場合には、必ず

停止行動をとっているものの、図14に示すように最大減速度の平均が-0.4G程度と手動運転車両と比較して急減速をとるケースが多いことが確認された。横断歩道周辺の歩行者の存在を検知するタイミングの遅れ等が起因しているものと推察される。

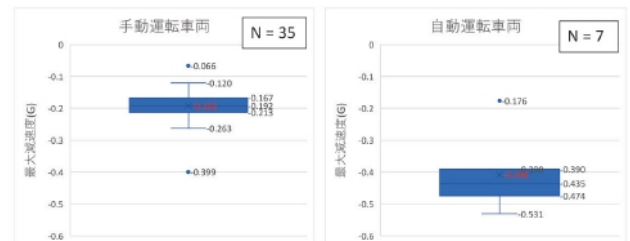


図14 (A)青海二丁目単路部における最大減速度の比較

3.9. 自転車との接触リスク

本評価の着眼点、評価方法を以下に示す。

- 着眼点：自転車に対して、自動運転車両はどのような挙動を取るのか？（急減速等）
- 評価方法：自転車に遭遇した際の挙動とその要因分析
- 使用するデータ：見える化システムデータ

集中走行期間において取得シーンを確認したところ、自動運転車両が自転車に遭遇した際、自転車は自動運転車両を覚知した後、自動運転車両を確認しても減速挙動を取ることにはなかった。

一方、自動運転車両は、自転車に対して大きな影響を与えたシーンは現時点では確認できていないが、自転車の走行挙動に影響され、急減速を行っているシーンが多く散見された。この急減速により、後方車両への影響が懸念される。



図15 シーン例(自転車との接触リスク)

4 考察と展望

上記結果より、自動運転車両が一般交通に混在した場合の影響について、以下のとおり考察した。

4.1. 交通流(円滑, 渋滞)について

事前の仮説では、自動運転車が法定速度を遵守し、安全マージンを十分に確保するため、周辺車両と異なる低速走行による交通量減少、渋滞の延伸等が発生する可能性を考えていた。しかしながら、右左折の捌き時間の計測結果からは、捌き時間の増大は1秒前後にとどまり、さらに後続車両の走行安定も見られるため、自動運転車両の混入により交通環境が安全走行側にシフトする可能性を確認できた。

4.2. 歩行者への影響について

事前の仮説では、自動走行によりドライバーと歩行者のアイコンタクトが不十分になることで、歩行者の横断躊躇や他の車両注意力低下が発生する可能性を考えていた。しかしながら、今回の実験期間中には、仮説のような事象は実際に発生しなかった。今後、自動運転の開発が進み、レベル4のドライバレスでの自動運転車が一般道路を走行可能になった場合、仮説のような事象が発生する可能性があるため、HMIの観点も加味した検証・評価を実施することが望ましい。

4.3. 安全(事故)への影響について

自動運転車両の普及に向けて必要な要素として、「協調」(インフラとの協調, 周辺車両や歩行者・自転車等の行動に対する協調)が重要であることが今回の実験で確認された。

例えば、主に交差点内(3.1(右左折時の捌き台数・円滑性の影響), 3.7(右左折時の横断歩行者の影響), 3.8(直進時の横断歩行者の影響)に対応)では比較的安全な走行(横断歩道で歩行者の横断を待つから走行, 信号を順守し一定速度で右左折を行う等)が行われており、周辺環境との「協調」がある程度実現可能であることを確認した。さらにインフラ(信号灯色, 残秒数の提供)との「協調」についても、3.3(直進時の赤信号での停止行動等の影響)の評価によりある程度実現可能なことが示唆された。

一方、単路部や交差点手前等(3.4(直進時の周辺車両の挙動の影響), 3.9(自転車との接触リスク)に対応)では急減速が起こるヒヤリハットシーンが散見され、周辺車両への影響を与える可能性が確認された。これは交差点内に比べて単路部や交差点手前での走行は、多様な周辺環境(一般車両による信号の遮蔽, 一般車両との接近等)への柔軟な対応が必要になるため

と推察される。多様な周辺環境との「協調」は今後の自動運転普及に向けた課題であることを確認した。

4.4. 総括

インパクトアセスメントは、「実交通環境」下で自動運転車両が走行する際の周辺環境に与える影響を評価した。自動運転技術の開発が進み普及していくにつれ、自動運転車両の走行割合は増えていくことが予想されるが、今回の評価時点においては、多数の一般車両の中で自動運転車両が走行する「過渡期」の段階である。この段階では、周辺環境(主に一般車両と)の「協調」が重要であり、一般車両との混在交通下で錯綜や混乱等が発生しないようにするために、「協調」に向けた仕組みづくり(例:事故責任に関する法律の整備等)が求められる。

次に、多数の自動運転車両が走行する「成熟期」を迎え、SAEレベル4やSAEレベル5等のドライバレスを達成した自動運転車両が走行する場合には、周辺環境(歩行者等)とのコミュニケーションを円滑に行えるのかどうか検証する必要がある。「成熟期」における評価も継続して実施することが望ましいと考える。

5 おわりに

自動運転車両が周辺車両や周辺環境に与える影響を評価した。自動運転車両の普及に向けて必要な要素として、「協調」(インフラとの協調, 周辺車両や歩行者・自転車等の行動に対する協調)が重要であることが今回の実験で確認された。周辺環境(主に一般車両)との「協調」は今後の課題であることを確認した。

【参考文献】

- (1) 島田 大輔, 森本 章倫, 自動運転車両が混在した一般道における交通流の円滑性・安全性評価に関する研究, 交通工学論文集, 2021, 7巻, 2号, p. A_86-A_93
- (2) 森 健二, 斎藤 威, 信号交差点における右折挙動に基づいた右折処理能力に関する研究, 土木計画学研究・講演集, 1992, NO.15(1), p.279-p.286

自動運転(レベル3,4)に必要な認識技術等に関する研究

菅沼直樹, 米陀佳祐, 柳瀬龍, 倉元昭季 (金沢大学),
山下隆義, 藤吉弘亘 (中部大学), 目黒淳一 (名城大学)

(概要) 市街地でのレベル4相当の自動運転には、車載されたAIによる高度で自律的な認知・判断機能とともに、それを支援する道路設備、通信設備等のインフラが必要となる。一方、道路設備・通信設備等のインフラを日本全国に設置するには莫大な予算が必要になるため最低限必要とされるインフラや、認知判断技術の検討が必要となる。そこで本事業では、将来の協調領域の議論のため、取得したデータおよび当該データを取得した際の技術を一定程度公開可能な大学等を主体とした自動運転車両の公道実験等を通して、自動運転システムに必須となる認知判断技術とインフラについて研究・調査を実施している。

1 まえがき

市街地でのLevel4相当の自動運転には、車載されたAIによる高度で自律的な認知・判断機能とともに、それを支援する道路設備、通信設備等のインフラが必要となる。しかし、道路設備・通信設備等のインフラを日本全国に設置するには莫大な予算が必要になるため最低限必要とされるインフラや、またそのインフラのもとで必要とされる認知判断技術を検討する必要がある。そこで本事業では、既に自動運転の公道走行実証を行っている大学や、関連する要素技術の最先端の研究を実施している大学との連携により、一般の交通参加者や他の自動運転車が混在する市街地の複雑な交通環境下におけるレベル4相当の自律型完全自動運転車の認知・判断技術を構築する。また、これによって得られる自動運転技術を通して、市街地の自動運転に必要な道路設備及び通信設備などの最低限のインフラを見極めることを目的としている。

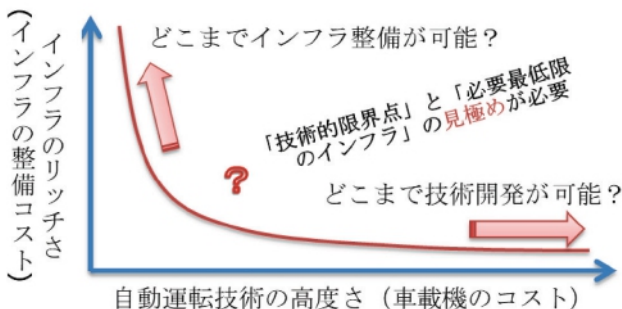


図1 インフラのリッチさと自動運転技術の高度さの関係

2 研究成果

2.1. 信号機認識技術の開発及び認識が困難な条件の検討

自動運転においてスムーズな交差点走行を行うにあたり、信号機の状態を正確に認識することが重要である。本事業では自動運転時の信号機認識における課題である「認識性能の改善」及び「通信情報の活用による交差点走行の状況判断」の実現を目的とする。車載向けなどの用途で開発されている最新のカメラを活用し、従来のパターン認識技術(①)と最新の人工知能技術(②)の側面から技術開発を行うことで信号認識の性能を最大限に高めた最先端の認識アルゴリズムを実現する。高度な信号認識アルゴリズムの開発に加えて、信号認識の本質的課題である信号機の隠れが発生する状況を考慮して、インフラ支援信号機のV2I通信によって得られる信号情報の活用方法も検討する。そして信号認識に必要なセンサスペックおよびインフラ設備などについて検討する。

(1) パターン認識による信号認識と交差点進入判断
パターン認識による信号認識では、デジタル地図を参照してカメラ画像内の信号灯及び矢印灯の点灯状態を認識し、交差点進入判断を実現する。V2I通信などのインフラによる支援が求められる状況を明確化するため、車載センサによる自律方式の認識アルゴリズムを開発する。自律方式による交差点進入判断が可能な

条件として、120m以内の信号灯及び矢印灯の認識率99%を達成可能な認識アルゴリズムを開発し、認識困難となる状況を分析する。また、インフラ支援型信号灯のV2I通信を活用した効果を検証するため、通信により得られる先読み情報を用いた交差点進入判断アルゴリズムを開発する。

上記の目的を達成するため、2018年度では多様な天候及び日照条件における信号灯の視認性への影響を調査して目標達成に必要となるカメラを選定した。次に2019年度では、デジタル地図による事前情報を活用した認識アルゴリズムを検討し、矢印灯の認識距離の改善を実現した(1)。そして、東京臨海部での実証実験にて得られる走行データに対して120m以内の青・赤・矢印信号の認識率95%を達成した。また、インフラ支援型信号灯から得られる信号情報を活用した交差点進入判断を実現するため、先読み情報を用いた急減速回避アルゴリズムを開発した。さらに2020年度では、東京臨海部での実証実験を継続実施して信号灯認識における環境要因が主となる認識への技術課題の分析及びアルゴリズム評価を実施した。その結果、逆光、順光、隠蔽、背景同化、夜間などの環境条件下では一時的に認識性能が低下する状況を確認したが、交差点接近における一時的な影響が中心のため、交差点進入判断への影響は限定的と考えられる。また認識性能の評価として、多数の信号灯の状況から交差点進入を判断する戦略を導入することで目標性能である120m以内の青・赤・矢印信号を99%以上で認識可能なことを実証した。一方、評価結果より逆光・順光時は認識への影響が大きいことも確認したため、太陽光の影響範囲の定量評価及び逆光影響領域の認識アルゴリズムを開発し、逆光時のカメラの性能限界による視認不可な状況での誤認識を抑制するための対応も補助的な対処方法として検討した。また、インフラ支援型信号灯を活用した交差点進入判断アルゴリズムを一般道で評価する検証実験を実施し、確定情報として与えられる先読み情報が得られる場合において、ジレンマゾーンにおける急減速を回避可能な点を検証した。

(2) セマンティックセグメンテーションによる信号灯認識

信号灯や信号灯の一部が隠れていたり風景に溶け込んでいたりする場合や、古いランプ式信号灯のような点灯部の輝度が十分ではない場合、従来の矩形や円形特徴を認識する手法だけで正確に信号灯の位置と色を

認識することが困難である。このような課題に対応するため、ディープラーニングを活用したセマンティックセグメンテーションにより信号灯の位置を画素単位で抽出する手法を開発した。これにより、局所的な形状の情報だけでなく、画像全体の構図を考慮することができ、また信号灯が小さくかつ部分的にしか見えていない場合でも信号灯が検知できることが期待できる。また、図2に示すように、セマンティックセグメンテーションにより捉えた信号灯領域に対して、畳み込みニューラルネットワークにより信号灯の認識を行う2段階の手法とした。

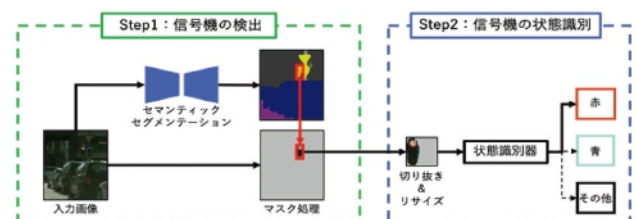


図2 信号灯認識アルゴリズムの概要

2018年度は、セマンティックセグメンテーションの有効性を確認し、2019年度は、信号灯の認識機能を開発することで、認識精度95%を達成した。2020年度は、多様な天候の画像を学習データとして利用し、さらに時系列での信号灯の認識を行うことで、図3に示すような昼間および夜間での信号灯認識を可能とし、99%の認識精度を実現した。一方で、逆光状態や点滅信号への対策が今後は必要となる。



図3 信号灯の認識結果

2.2. 遠距離の物体検知に必要なAI技術の開発

安全かつスムーズな自動運転を行うためには、車両周辺の自動車、二輪車、歩行者等を確実に検知することが重要となる。本事業では、移動体検知における課題である「遠距離の移動体の検知性能の改善」の実現を目的とする。高度な検知性能を実現するには、遠距離の移動体検知に適したスペックを有する車載カメラを活用し、最新の人工知能技術により遠距離にいる小さな物体を検知するアルゴリズムを実現することが不可欠である。このため物体検知技術の開発と必要十分な検知能力を得るためのセンサスペックを検討する(①)「遠

距離向け車載カメラの選定・検知アルゴリズム開発)」、また、LiDARやミリ波レーダによる観測情報に対しても遠方物体の認識性能を改善するアルゴリズム(②「LiDARおよびミリ波レーダに基づく遠方物体認識」)を開発する。そしてパッシブ型及びアクティブ型のセンサを活用することで遠距離の物体を正確な認識を実現する。

(1) 遠距離向け車載カメラの選定・検知アルゴリズム開発

一般的な車載カメラは視野角100度程度であり、画像サイズが1024×786ピクセルの場合、50m遠距離に存在する歩行者の高さは37ピクセル、70m遠距離に存在する歩行者の高さは27ピクセル程度と小さい。また、車載カメラは特定の距離に焦点を当てるため、その距離よりも遠方はピントがずれて物体がぼやけてしまう課題がある。これらの課題に対して、2018年度は遠距離の物体検知に適したカメラの選定を行い、データ収集を行った。2019年度は収集したデータを用いて、遠距離の物体検知に適したアルゴリズムの選定を行った。2020年度は、最新の物体検知アルゴリズムであるYOLOv4をベースとしてアルゴリズムの改良を行うことで、図4に示すような、自動車200m、歩行者70mの遠距離の物体を検出する際に生じるピントずれによるぼやけに対応し、小さな物体を正確に検知することを可能とした。



図4 遠方の物体検知結果例

(2) LiDARおよびミリ波レーダに基づく遠方物体認識

LiDARによる物体認識では、観測した物体の点群情報から得られる形状や運動状態に関する特徴量から機械学習で識別する手法が報告されており、自動車、二輪車、歩行者などの交通参加者の種別を認識可能である。しかし、LiDARの観測が疎になる遠方の物体の認識が課題となっている。そこで、ミリ波レーダやカメラなど他のセンサから得られる情報を活用したセンサフュージョンによる遠方物体の認識アルゴリズムを開発する。これによって200m以内の自動車及び70m以内の歩行者に対して90%以上の認識率達成を実現する。

2018年度では車両に搭載する3次元LiDARを用いた遠距離物体の観測可能距離の調査を実施した。そして、

2019年度では車載された3次元LiDARを用いた遠方物体の認識精度を評価した。評価にあたり3次元LiDARを搭載した試験車両を用いて金沢市内並びに東京臨海部で走行データを計測し、自動車、二輪車及び歩行者をラベル付けしたデータセットを作成した。またLiDARによる認識距離を改善するため、カメラによる認識矩形枠を用いたセンサフュージョンによる認識アルゴリズムを開発し、2019年度の目標である自動車135m及び歩行者50mを90%の認識率を達成した。このように遠方の疎な点群を補うためにカメラ画像とのフュージョンが効果的であることを検証した。さらに、2020年度では、前年度開発した認識アルゴリズムを改善して遠距離認識に特化したセンサフュージョンアルゴリズムを実現するためにデジタル地図を併用した認識アルゴリズムの開発を行った。遠方まで安定して認識を継続するためにはカメラによる認識距離の改善も必要であることが課題として挙げられている。そこで、カメラによる認識距離改善及びリアルタイム化を実現するために、デジタル地図を活用した認識領域の生成方法を検討した。デジタル地図から走行中に注目すべき道路領域を逐次抽出することで注目領域に特化して認識距離の改善を図り遠距離認識への効果を評価した。評価結果より限定した領域に対して画像矩形枠の検出距離が改善された。ここで開発したアルゴリズムをLiDARによる物体追跡アルゴリズムに統合して性能評価を実施し、2020年度の目標である200m以内の自動車及び70m以内の歩行者を90%の検出率を達成した。

2.3. 高精度自己位置技術の開発

デジタル地図を活用する市街地自動運転において、車両位置を高精度に推定する自己位置推定技術が重要となる。自己位置推定ではGNSSなどのセンサで測位した位置を初期位置として地図とLiDARなどのセンサの観測をマップマッチングすることで実現する。このとき、高精度な位置情報が測位されていることで、信頼性の高い初期位置を取得可能となるだけでなく、マッチング結果のバリデーションを行うためにも利用可能となる。本事業では、汎用的なGNSSとINSを用いつつも、自動運転システムに適用可能な位置が推定可能なGNSS/INSの技術開発を行う。また、LiDAR等のマップマッチングの技術と併用した高精度自己位置推定アルゴリズムの開発を行い、地図の鮮度に起因する実環境と地図との差異が自己位置推定へ与える影響につい

て調査する。また、道路には様々な状態の白線が存在し、自動運転システムは白線を認識して走行する場合もあるので、白線の状態が自動運転システムに与える影響について調査を行う。なお、GNSS/INSの精度が劣化する可能性が高く、また、地図にも特徴が無い場所では、上記の開発ができたとしても、“道路に設置されたインフラ”による位置推定に頼らざるを得ない場所も存在することが予想される。そのため、自動運転システムを安定して運用可能な条件に関しても検討を実施する。

(1) GNSS/INSの開発

GNSS/INSの開発では自動運転に必要な位置精度を、走行車線の判定が可能な位置推定精度1.5m、及びGNSS/INSだけでも自動運転システムの運用が可能な位置推定精度0.3mの2つに設定する。さらに、これらの目標を準天頂衛星みちびきの活用により実現することを目指す。まず、1.5mの位置精度の達成のため、汎用的なGNSSを用いつつも安定して推定可能な手法として、GNSS Dopplerの有効性を最大限活用した手法の検討を実施した。また、0.3mに対しては、その精度を達成していることを特に高さ方向に注目した車両運動を活用により判定する技術の開発を行った。

まず、2018年度に実施したマルチGNSSを利用した評価試験においては、東京都お台場で30cm@77%/1.5m@90%、新宿で30cm@57%/1.5m@92%の範囲で達成できることを確認することができた。そこで2019年度では0.3m以下の位置精度を達成している場所の判定に注力を行い、同様の評価場所で0.3m以下の位置精度の判定が99%で実現できる可能性を確認した(2)。併せて、2020年度では準天頂衛星みちびきから放送されている補正情報であるCLAS(Centimeter Level Augmentation Service)を活用し、自動運転に十分な位置精度0.3mを判定可能であるか検討を実施した。その結果、東京都お台場に設定したコースにて99%の割合で0.3mの位置精度を判定できる結果を得ることができた。一方、CLASが受信できたとしても、衛星数が減少することが想定される個所においては、測位性能の劣化が見受けられた。そのため、測位精度を担保するため、インフラを活用したマップマッチング等の補完技術により位置精度を維持するための技術が必要になることが想定される。

(2) マップマッチング技術の開発

マップマッチング技術は、高精度に自車の位置を把握するために必要不可欠である。トンネル内や高層ビ

ル街などのGPSの電波を捉えにくいような場所では継続的に高精度な位置を特定するために重要である。

2018年度は、複数方式のマップマッチングアルゴリズムの検討を目的として論文ベースでの調査を行い、開発・検討する手法の候補として①3次元点群を用いたNDTスキャンマッチング②2次元の路面パターン画像を用いたテンプレートマッチング③デジタル地図の区画線等の情報を用いた線分マッチングを選出した。また、評価のためのルートとして金沢市内における片道約20kmの経路を選定しデータ計測を行なった。2019年度においては、高精度GNSS/INSを使用し姿勢角を既知とした場合の位置推定精度0.1mを達成することを目標として、複数方式のマップマッチングアルゴリズムを実装し、推定精度の評価を行なった。2018年度に候補として選出したアルゴリズムの中から、代表的かつ自動運転での実績がある2つの方式として①NDTスキャンマッチング②テンプレートマッチングの実装を行い、目標精度の0.1mが達成可能であることを確認した。また、季節の変化による位置推定精度への影響調査として、計測した地図データから植物の変化が確認された地点でのマップマッチングへの影響を調査した。2020年度は、車載グレードのGNSS/INSを使用することを前提としたマップマッチングアルゴリズムを開発し、目標位置推定精度0.1mを達成した。車載グレードのGNSS/INSを使用する場合、安価なジャイロセンサが用いられているために、高精度GNSS/INSと比較して車両の方位角が精度良く得られない。そこで、2019年度までの東京臨海部実証において使用してきたテンプレートマッチングを利用した位置推定アルゴリズムをベースとして、位置および方位角を推定する手法を開発・実装した。Hough変換をベースとした方位角推定を組み込むことで、GNSS/INSの方位角の精度が低下するような状況においても正しく位置推定が可能となることを示した。

(3) 白線の状態が自動運転システムに与える影響の調査

「白線の剥離率」「白線の反射率」「白線と舗装の反射率コントラスト」といった白線の状態が白線認識およびマップマッチングに及ぼす影響を調査した。

まず「白線の剥離率」の、白線認識手法の一つであるセマンティックセグメンテーションへの影響を調べた。車載カメラ画像について、人手で抽出した“元々白線だったと思われる”領域を基準として、二値化処

理で抽出された「白線残存領域ではない」領域の面積比(剥離率)と、セマンティックセグメンテーションで推定された白線領域の面積比(認識率)の関係を調べた。その結果、剥離率が低い(白線が綺麗な)ほど認識率が高く、剥離率が高い(白線がかすれている)ほど認識率が低い傾向にあることがわかった(図5)。

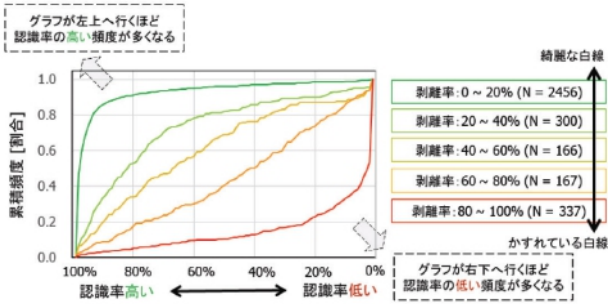


図5 剥離率ごとの認識率の累積頻度

次に「白線の反射率」や「白線と舗装の反射率コントラスト」の、マップマッチングへの影響を調べた。白線の再ペイント工事後でLiDARを用いて反射率を測定し、白線領域の把握やマップマッチング精度の評価を行った。その結果、白線と舗装の反射率コントラストが高いほど、マップマッチングの確信度が高くなる傾向にあった。また、マップマッチング用の地図と観測で白線劣化状態が類似する場合(つまり地図のメンテナンスが良好な場合)は、白線劣化状態に関わらず概ね全てのフレームで車両横方向のマップマッチング誤差が $\pm 0.375\text{m}$ 以下となった(図6②,③)。一方で、白線がマップマッチング用の地図と観測で白線の剥離状態が大きく異なる場合(つまり地図のメンテナンスが不足している場合)は、白線がマップマッチングに悪影響を及ぼす傾向にあり、誤差も $\pm 0.375\text{m}$ 以上になるフレームが多くなった(図6①,④)。

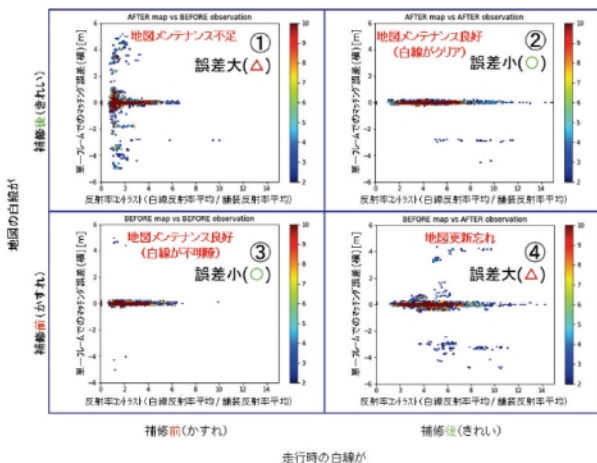


図6 反射率コントラストとマップマッチング誤差

2.4. 交通参加者の行動予測推定とそれに基づくパスプランニング技術の開発

市街地には、車、バイク、自転車、歩行者といった多種多様な移動体が多数存在している。このような移動体に衝突せず安全に走行を行うためには、移動体の将来の行動を予測し、それを考慮した自車の走行軌道(将来自車取るべき経路と速度)を計画する必要がある。そこで本研究課題では、AI技術にもとづき移動速度の低い歩行者の属性(体の向きや年代層等)を求め、その行動を予測する技術(①「人工知能(AI)に基づく歩行者の行動予測」と、時系列的な追跡によって高速で移動する車の行動を予測し、その将来軌道を考慮して軌道計画を行う技術(②「時系列追跡による車両の行動予測とパスプランニング」)について研究を行う。そしてこれらの技術を組み合わせることで、市街地の複雑な環境下においてスムーズかつ安全に走行可能な技術を構築する。そして、市街地走行におけるインフラ支援の必要性の有無やインフラに対する要望の取りまとめを行うことを目的とする。

(1) 人工知能(AI)に基づく歩行者の行動予測

歩行者が未来の時刻にどのような経路で移動するかを推定する技術である経路予測において、移動体が経路を決定する要因は、対象物体周囲の環境などの外的要因と予測対象自身が保有している内的要因に分けることができる。外的要因は、例えば歩行者と車がガードレールなどで隔てられていない場所を走行する場合、側道に車が停車していると歩行者は走行路にはみ出して歩く、というような状況である。一方、内的要因は、性別や年齢などの属性情報であり、例えば子供は周辺に注意を向けることなく、急に道路に飛び出す、というような状況である。このような状況において、パスプランニングを実現するためには、移動体の行動を予測することが重要となる。そこで、2018年度は歩行者の属性を内的要因として推定するためのデータ収集、2019年度は収集したデータを用いて歩行者属性推定手法を開発した。2020年度は、歩行者の属性を考慮した経路予測アルゴリズムを開発した。歩行者の経路予測を行う際、入力には自動車視点または俯瞰視点の2種類が考えられる。いずれの視点からの経路予測が良いかを評価した結果、俯瞰視点からの経路予測が高い精度を得ることができた。また、俯瞰視点からの経路予測において、地図情報(シーンラベル)の有無による地図の有効性の評価した。その結果、地図情報がな

い場合、建物などの障害物に衝突する経路を予測する一方、地図情報がある場合は、障害物を避けるような経路を予測することができた。これより、地図情報が経路予測においても有効であることがわかった。また、移動物体の属性による移動経路について分析した。具体的には歩道から道路への飛び出しをどの程度前から予測できるか分析した。その結果、大人や高齢者の場合は3mから5m程度道路から離れた位置でも飛び出す経路を早期に予測できた。一方、本検討で用いた経路予測手法では、子供の場合は9m以上と十分に離れた位置からでないとい飛び出す経路の予測が困難であることがわかった。経路予測手法による予測精度の違いがあるため、最新の手法による評価および地図情報のさらなる有効な活用方法を検討する必要がある。

(2) 時系列追跡による車両の行動予測とパスプランニング

市街地における自動運転では、移動物体の将来の予測軌道を求め、その軌道に衝突しない自車の走行軌道をリアルタイムに計画することが重要となる。ただし、特に多数の移動車両が存在する都市部においては、これを実現するためには様々な問題に対処する必要がある。多数の移動車両の存在により発生する一時的な隠蔽や死角、相対的に狭いスペースなどの発生時においても安定して移動物体を認識し、移動物体の将来予測軌道を考慮して、スムーズかつ安全に走行することが課題となる。そこで、移動物体の運動状態とその形状を精度よく推定し、移動物体の将来軌道を予測する技術を開発する。そして、これらの移動物体の予測軌道を考慮して市街地においてスムーズかつ安全に走行可能な軌道計画技術を構築する。こうした認識・パスプランニング技術を開発することで市街地における自動運転状態での平均走行持続可能距離を5.0km以上とするアルゴリズムを実現する。

2018年度では、評価対象となる実験エリアの選定及び死角を補助するためのセンサの設置位置などの仕様を検討した。評価エリアとして東京臨海部のエリアに加えて石川県金沢市の市街地環境を設定した。2019年度では、周辺移動物体の形状及び運動状態を同時推定可能なExtended Object Tracking (EOT)による移動物体の追跡アルゴリズム及び地図に基づく移動物体の行動予測アルゴリズムの開発に着手し、自動運転走行中の周辺状況の予測技術の改善を図った。また、2019年9月から実施している東京臨海部にお

ける実証実験において、自動運転走行のオーバーライドの傾向を評価し、目標値である平均走行持続可能距離2.5kmを達成した。

2020年度では、昨年度までに開発していたアルゴリズムをリアルタイム化して順次実証実験に導入した。この結果、自動運転走行の実証実験において、今年度の目標値である平均持続走行距離5kmを達成した。この他、評価結果に基づいてオーバーライドの発生頻度の要因を分析し、オーバーライドに影響のある道路環境の要因の分析を実施した。これにより、道路構造物や他車の存在により死角が発生する交差点での右折走行や矢印信号機の点灯時間の短い交差点での右折走行など特定の交通環境下においてオーバーライドに影響のある不調要因を調査した。

2.5. 複数自律型自動車が走行する状態での問題点の検討

将来の道路交通では、多数の自動運転自動車が混在して走行する状態となることが予想され、自動運転自動車同士が様々な交通状況において互いに遭遇する可能性が高くなる。

一般的に自動運転自動車は法令を順守して走行を行うため、その振る舞いは基本的に交通ルールに基づく運転行動となる。このため複雑な環境下において自動運転自動車が遭遇した場合、互いに身動きが取れなくなるいわゆる「デッドロック問題」を引き起こす可能性がある。したがって、将来自動運転自動車が行き交う交通環境に向けたデッドロック回避対策の検討を行うことが重要となる。このため、本研究課題では①「ロボティクス技術を活用したデッドロック回避」と、②「人工知能(AI)技術を活用したデッドロック回避」に関する個別の技術について検討を行う。そして高度なデッドロック回避策をとったとしても自律型の自動運転技術のみではデッドロックが発生してしまう状況を明らかにする。また、デッドロック回避に対してどのようなインフラ支援があるべきかについて提言を行うことを目的とする。

(1) ロボティクス技術を活用したデッドロック回避

市街地での自動運転における基本的な意思決定をシミュレーションソフト上で再現してデッドロック事象を検証するため、シミュレーション環境を構築する。開発したシミュレータを用いて複数の自動運転車が走行する環境下でデッドロックが発生しやすい状況を明

らかにする。実環境でデッドロックが発生するシーンを5件以上明らかにし、シミュレーション及び実車試験を通して開発したデッドロック回避アルゴリズムの有効性を検証する。

2018年度では、複数の自動運転自動車を構築し、デッドロック回避アルゴリズムの方式調査を実施した。2019年度では、東京臨海部での自動運転走行実験を通してデッドロックが発生しう条件を検討しシミュレーションで検証した。一般的に自動運転車両は交通ルールに厳密に従うようにプログラミングされているため、交通ルールにそぐわない他車などの存在によりデッドロックが起り得ると考えられる。このような状況やデッドロック事象を調査・分析するため、複数の自動運転車両を考慮したシミュレータを開発し、交通ルール違反・譲り合い及び物理的制約を考慮した5種類の環境でデッドロックが発生する状況を明確化した。2020年度では、これら5種類のデッドロック発生シーンを解析し、デッドロック発生後に「事後的に対処」できるか、もしくは発生前に「事前に予防」しなければいけないか、という観点で課題を分けて対処方法を検討した。前者のタイプに対しては主にロボティクス技術を、後者のタイプに対しては主に人工知能(AI)技術を用いて、デッドロック回避の検討を行なった。「事後的に対処」可能なデッドロックシーンの回避アルゴリズムの開発にあたり、デッドロック発生時には臨時的に“あえて車線を逸脱して回避する”という柔軟性を自動運転システムに与えることで、デッドロックを回避するアルゴリズムを構築した。なお、本来このようにやむを得ないとは言え、臨時的に交通ルールを遵守せず、デッドロック回避を試みるのが法律上許容されるのかについては議論が必要ではあるが、あえてここではデッドロックのアルゴリズム上の回避策の可能性について検討を実施した。また、本テーマにて検討したデッドロック回避アルゴリズムをシミュレータおよび非公道における実車試験にて有効性を確認し、走行可能なスペースが存在する特定の条件下においてはデッドロック状態を回避可能であることを確認した。

(2) 人工知能(AI)を活用したデッドロック回避

自動運転車のパスプランニング技術では、観測した情報をもとにルールまたは数式に基づく軌道を計画している。これらのパスプランニングには限界があり、突発的なルールなどに落とし込まず、デッドロックが生じるシーンが実世界には存在する。そこで、本検討

では、デッドロックが生じるようなシーンを想定し、深層強化学習によりデッドロック回避の行動を獲得できるか、検証を行う。

2019年度に東京臨海部における実証実験を通じて、デッドロックが生じるシーンを調査した。デッドロックが生じるシーンは、1)信号待ち時に対向車線に駐車車両があり、右折車が来た時に相手の走行領域を空けるようなシーン、2)片側一車線で見通しの悪い道路に路駐車両が停車しているシーン、3)走行車線に駐車車両があり、対向車を避けて走行するシーン、4)幹線道路に合流するシーン、5)商業施設等の駐車場の出入り口でのシーンである。2020年度は、これらのシーンに対するシミュレーション環境を構築し、深層強化学習によるデッドロック回避が可能か検証した。なお各シーンにおいて、適切な報酬設計を行った。シーン3、5において、相手を考慮する行動を獲得することで、デッドロック回避を行う行動の獲得を実現した。一方、シーン1、2、4では、デッドロック回避を行う行動の獲得を実現できなかった。デッドロック回避を行う行動を獲得できたシーンでは、回避行動が一意または限定されており、回避行動の獲得が容易であったと考える。デッドロック回避行動の獲得が困難であったシーンでは、回避行動の選択肢が多い、または複数台が連携して回避行動を取る必要がある複雑な条件であった。これらのシーンで回避可能なシミュレーション環境の再検討、回避行動を獲得するための報酬ルールの見直しなどが必要である。

3 実証実験

2章で述べた研究開発項目の検証のため、複数のLiDAR、ミリ波レーダ、カメラ等の周辺環境認識センサや、GNSS/INS等の自己位置推定センサ、V2X車載端末等を搭載した試験車両を構築し、公道での実証実験を実施した。

公道走行試験に先立ち、国土交通省運輸支局による構造変更検査登録等を通して、公道走行に違法性がないことを確認した。また日本自動車研究所が実施している自動運転車の公道実証実験に向けた「事前テストサービス」を活用して、第三者機関による安全性評価を実施し、試験車両及び試験車両に搭乗するドライバーの双方により安全性を担保して公道走行試験が実施可

能であること確認した。その後、2019年7月から石川県金沢市中心部において走行実証実験を開始した。また、2019年9月から東京臨海部での走行実証実験を開始した。

そして2020年度末時点で、東京臨海部において121日間の走行実証実験を実施し、自動運転状態で約2137.8kmを走破した。図7に東京臨海部において公道で自動運転を実施している様子を示す。



図7 東京臨海部で自動運転をしている様子

4 あとがき

本事業では、市街地の複雑な交通環境下におけるレベル4相当の自動運転の実現に向けて、中立的な研究機関としての大学による学術的な調査・研究によって、車載センサによる自律的な認識・判断技術がどのような状況下において困難になるのかといった調査や、その際にどのようなインフラが求められるのかについて検討を実施してきた。本事業は、2022年度まで継続的に実施する予定としており、引き続き認識・判断技術の困難な条件やインフラに関する検討を進めるとともに、将来の協調領域の議論加速に向けて実証実験で得られたデータの公開や、SIP別施策との連携によって車載センサによる自律的な認識・判断技術の安全性の検証についても検討を進める予定としている。

【参考文献】

- (1) Keisuke YONEDA, et al., Robust Traffic Light and Arrow Detection Using Digital Map with Spatial Prior Information for Automated Driving, Sensors, Vol.20, No.4, (2020).
- (2) Aoki TAKANOSE, et. al., Focus on Height Fluctuation Kinematic Positioning Reliability Judgment, ION GNSS, St. Louis, Missouri, 2020, 9

3 自動運転の安全性の確保

(2) 安全な自動運転社会の実現

安全性確保にむけた 技術開発と教育(概要)

保坂修, 古賀康之 (内閣府)

(概要) 自動運転車の実用化および普及展開にあたっては、安全性や信頼性の確保が最重要課題であり、自動運転車両の安全性評価の手法の確立が急務である。また、自動運転車と他の交通参加者とのコミュニケーションについても、間違いなく行われる必要がある。SIP自動運転では、仮想空間における安全性評価環境の構築、コネクテッドカーへのサイバー攻撃に対する持続的かつ効果的な対策、自動運転車の意図の人への適切な伝達方法、自動運転車や自動運転サービスを利用する人々への効果的な教育や啓発手法の確立と普及に取り組んでいる。

1 背景と意義

現在、自動運転の安全性評価手法の構築に向けた取組は、グローバルにも最大の関心事であり様々な取組が進んでいる。SIP自動運転でも、東京臨海部実証実験など公道での安全性評価を実施しており、これら公道での走行試験や実験場での実車試験も重要ではあるが、再現性があり、かつクリティカルな条件も創出が可能なシミュレーションによる評価も不可欠である。そこでSIP自動運転では、特にセンサー性能の評価に着目し、実環境と一致性の高いセンサーモデルの構築を目指し、安全性評価シミュレーションのプラットフォームの開発に着手した。

また、サイバーセキュリティに関しては、SIP第1期では、車両外部からのサイバー攻撃に対するサイバーセキュリティ防御レベルの評価方法の確立に取り組み、開発段階における評価法を開発した。一方で、サイバー攻撃の技術進化は続くことから、車両が市場に出た後の車両運用時に、サイバー攻撃を検出・監視する仕組みも必要である。

現在このための対策として、悪意ある第三者からの車両へのサイバー攻撃に対する侵入検知システム (IDS: Intrusion Detection System) が注目されている。そこでSIP第2期では、IDSの性能評価手法の開発に取り組んでいる。

さらに、HMI (ヒューマン・マシン・インターフェース) の課題として、自動運転車が混在交通下で他の車

両や歩行者などと遭遇する場合のコミュニケーションミスを回避するための適切な提示、教育等の方法についても研究開発を行っている。

なお、これら3つの課題については、いずれも日独連携の枠組みの下で、連携して研究開発を進めている。

2 仮想空間での 安全性評価環境の構築

現在の公道での実車による実証実験を中心とした評価方法では、必要な走行環境条件を意図的に設定することができず、自動運転車が必要な安全性を満たしているか否かの判断や、公道において起こる様々な事象を全て実車で評価することが困難であることから、特定の走行環境条件の下で自動運転車の安全性を評価できる手法の開発が急務である。加えて、現状の自動運転車の開発において膨大な時間を要する実車による安全性評価を効率化するため、センサー性能評価を中心としたシミュレーションツールの開発及びインターフェースの標準化等が必要である。

そこで、SIP自動運転では、様々な交通環境下における再現性の高い安全性評価を行うため、リアル環境における実験評価と代替可能な、実現象と一致性の高いシミュレーションモデルの開発に着手し、当該モデルに基づき、仮想空間における安全性評価環境DIVP (Driving Intelligence Validation Platform) の構築に取り組んでいる。



図1 DIVEのセンサーモデルの一致性検証

神奈川県立井上秀雄教授を研究開発責任者として2大学(神奈川県立井上秀雄教授, 立命館大学), 8企業(日立Astemo, ソニーセミコンダクタソリューションズ, デンソー, パイオニアスマートセンシングイノベーションズ, 三菱プレジジョン, 日本ユニシス, SOKEN, SOLIZE)からなるDIVEコンソーシアムを組成して, 外界を模した「環境モデル」, 実センサーの検知機能を模した「センサーモデル」, 自動運転車の運動制御を模擬するための「自動運転モデル」や評価シナリオに基づきテストデータを生成するツール等の開発を行っている。

自動運転車は, カメラ, レーダー, LiDARといったセンサーを複合的に活用しており, センサーフュージョンによる評価が不可欠であり, シミュレーションでそれを実現するためにはインターフェースの標準化が重要となる。このため, 規格については標準化団体ASAM(Association for Standardization of Automation and Measuring Systems)と連携して進めている。

一方で, 自動運転車の安全性評価手法の確立にあたっては, シナリオの定義や評価基準などの妥当性の検証が必要となる。一般社団法人日本自動車工業会(自工会)安全性評価分科会の提案により, 安全性評

価技術の実用化の加速に向け, 経済産業省と国土交通省が実施する「自動走行システムの安全性評価基盤構築に向けた研究開発プロジェクト」(SAKURA (Safety Assurance Kudos for Reliable Autonomous Vehicles) プロジェクト)とDIVEが連携し, 共同で推進する実務タスクフォースとステアリング委員会を2021年度に立ち上げて取り組んでいる。さらに, SIP自動運転では, ドイツの研究プロジェクトVIVALDIとの間での連携プロジェクト(VIVID: Virtual Validation methodology for Intelligent Driving systems)を2020年10月から開始した。本活動を通じ, 国際連携の取組を強化しつつ, ISOやASAM等において自動運転の安全性評価体系とシミュレーションインターフェースの標準化を推進していく予定である。

また今後は, DIVEのデータプラットフォームを継続的に構築・運用できるよう, 東京臨海部の臨海副都心地域の実証実験環境を再現出来るデータベースを構築し, 東京臨海部における実証実験や自動車メーカー, センサーメーカーによるモニタ評価を通じて, リアル環境との一致性検証, 接続性等を確認するなどの取組を進め, 事業化を目指していく。

なお, 知財戦略については, これまでの研究成果に基づくオープン/クローズの考え方, 競争領域/協調領域の将来変化予想の考え方を入れた構想を構築しており, 知財の戦略的な確保に向けて取り組んでいる。

3 サイバーセキュリティ

自動運転の社会実装においては, 高精度3D地図や信号情報などの交通環境情報を通信で取得する必要がある。コネクテッド技術を自動運転に活用するにあたって特に重要になるのが, 車両外部から通信システムを介して車両に対するサイバー攻撃を想定したセキュリティ対策である。既にいくつかの車両に対するサイバー攻撃手法が国際会議等で継続的に報告されており, 車両へのサイバー攻撃に対するIDSが注目されている。

そこで, コネクテッドカーに対する新たなサイバー攻撃に対して, このIDSが有効であることを踏まえ, 「新たなサイバー攻撃手法と対策技術に関する調査研究」を開始した。本施策では, IDSについて調査する

とともに、テストベッド及び実車を活用したIDS性能評価を実施し、IDS評価手法の確立、評価ガイドラインの策定に取り組んでいる。

また、コネクテッドカーに対するサイバー攻撃による脅威情報の観測、収集、分析、蓄積等の方法及び初動活動を支援する情報共有システムについての調査を実施し、当該システム全体の性能目標を検討するとともにシステム全体の基本仕様の作成を進めている。

本施策については、日本の内閣府SIP自動運転とドイツ連邦教育研究省(BMBF)との間の連携枠組みに基づき、ドイツの研究プロジェクトSecForCARsとの間の連携プロジェクト(SAVE: Securing Automated Vehicles)を2020年10月から開始し、国際連携の取組を強化し、特に、情報共有システムの検討を進めていく方針である。

今後、策定したIDS評価ガイドラインについては業界団体(一般社団法人JASPAR)に移管し、業界としてのガイドライン化を推進するとともに、コネクテッドカーの脅威情報の観測、収集、分析、蓄積等と初動活動を支援する情報共有システムについては、作成した基本仕様を業界団体(J-Auto-ISAC等を想定)への移管を目指している。

4 安全教育

SAEレベル3以上の自動運転の社会実装において、運転者が乗車していないことが想定される自動運転車とその周囲の交通参加者(歩行者、自転車及び自動車等の運転者)との間、自動運転車と運転者との間におけるヒトとクルマのコミュニケーションが課題である。本課題に関して、国際的な動向も考慮しつつ、適切な提示、教育等の方法を含むHMIについての在り方を調査し、必要な技術の開発、ガイドライン化等に向けた検討を進めている。HMIに関する協調領域として、以下三つの内容を中心に取り組んでいる。

1) SAEレベル4に相当する自動運転車を利用する移動・物流サービスを想定し、自動運転車と周囲の交通参加者(歩行者、自転車、他の車両の運転者等)との安全を確保し、お互いの意図が明確に分かるような安心できる円滑なコミュニケーション方法を導出する。

2) 走行環境条件を外れた場合や自動運転システム

の機能の低下の場合における運転引継等を適切に行うためのHMIを開発し、運転者に向けた教育方法を導出する。

3) SAEレベル3及び4相当の自動運転車や普及が進む中、SAEレベル2相当の運転支援システムに関して運転者や歩行者等が習得すべき知識とその効果的な教育方法を導出する。

本施策については、日本の内閣府SIP自動運転とドイツ連邦教育研究省(BMBF)との間の連携枠組みに基づき、ドイツの研究プロジェクトとの間での連携を2019年7月から開始し、以上に述べた三つの課題について、国際連携の取組を強化している。

仮想空間における 自動走行評価環境整備手法の開発

井上 秀雄 (学校法人幾徳学園 神奈川工科大学)

自動運転はシステムが複雑化する一方で、無数に存在する走行環境に対して高い安全性の確保が求められている。しかし、現在の自動運転車両の安全性の検証は、実環境走行下での網羅的な実績評価に依存しており、膨大なコスト（人・物・金・時間）を要する。また、自然界で起こる物理現象に対し、カメラ、レーダ、LiDAR等の外界センサは、物理的限界の検証が難しく、システムを構築する上でどこまでやれば安全性を保証できるのかといった課題がある (How safe is safe enough?)。このような背景を踏まえ、本研究プロジェクトでは、自動運転の安全性評価に必要な実現象と一致性の高い「走行環境～空間伝搬～センサ」一連のモデルを特徴に、仮想空間シミュレーションでの評価プラットフォームを構築する。これにより多くの環境条件 (シナリオ) で精緻、且つ、効率的な自動運転の安全性評価 (Safety assurance) を可能とすることを目的とする。

1 プロジェクトの背景・概要

米国運輸省道路交通安全局 (National Highway Traffic Safety Administration; NHTSA) の自動運転車の事故調査では、センサが対象物を検知できていないことや、検知した対象物を適切に認識できていないことが想定される事例が報告されている⁽¹⁾⁽²⁾。

一方、安全性評価に関し、世界各国では様々なアプローチが試行されている。その代表例として、ドイツ連邦経済エネルギー省 (BMWi) の予算で実施され、2019年に完了したPEGASUSプロジェクトやその後継となるSET Levelプロジェクトでは走行シナリオベースの評価手法が提案されている⁽³⁾⁽⁴⁾。これらの活動の中でも、自動運転車の安全性評価を行う上でセンサが対象物を知覚・認識できているかが要諦であるが、これらのプロセスを支える実現象と一致性の高いセンサモデルを備えたシミュレーション基盤は、これまで本格的な研究開発活動がなかった。そこで、SIP第2期「自動運転 (システムサービスの拡張)」では、2018年末より、各センサメーカー、ソフトウェア企業、大学等が協力してコンソーシアム形式の研究開発である Driving Intelligence Validation Platform (以下、DIVP®) プロジェクトを開始し、特に実現象と一致性の高いセンサモデルに着目した仮想空間での自動運転安全性評価シミュレーション基盤の構築を目指している (図1)。



図1 実現象と一致性の高いセンサモデルの必要性

また、本プロジェクトでは、前述の産学連携の12機関 (2021年4月現在、図2) が、それぞれの専門性を活かして繋がることで、「走行環境～空間伝搬～センサ」一連の仮想空間モデルに加え、自動運転制御モデルを含む、安全性評価プラットフォームにおける各インターフェース仕様の構築にも取り組み、グローバルな標準化への貢献も目的としている。

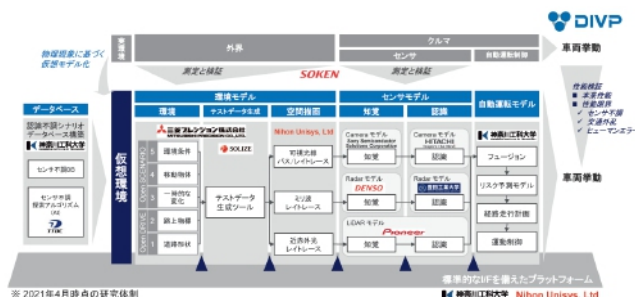


図2 DIVP® プロジェクトの構成

2 実現象と一致性の高いセンサモデルの構築

外界認識センサは、通常の車両コンポーネントモデルと異なり、走行環境モデルと自動運転制御を繋ぐ機能的役割を担っている。従来のシミュレータでは、システム制御が正しく動くかの評価に主眼が置かれ、いわゆる真値(正常機能)ベースのセンシングモデルが多い。先にも述べたように、自動運転車の安全性保証には、周辺監視センサそれぞれの長所と弱点(限界)を把握し、システム設計やセンサ、知覚認知アルゴリズムの改良を進める必要がある。しかし、真値ベースのセンサモデルでは電磁波の空間伝搬の検証結果をモデルに反映することが難しく、センサの弱点となるような環境条件をモデルに反映させることは困難である。本プロジェクトでは、ミリ波レーダの電波、カメラにおける可視光線、LiDARの近赤外光のそれぞれの反射特性(再帰、拡散、鏡面反射など)や透過特性を物理モデル化しレイトレースなどの空間伝搬モデルとして構築している。さらに、雨や霧、太陽光などの周辺照度等の周辺環境の影響で変化する物理現象の高度な実験・計測技術による物理モデル化にも取り組んでいる。これらをもとに、センサから見た空間伝搬特性を「走行環境～空間伝搬～センサ」の一連の電磁波原理に基づくモデルに反映している点が他にないユニークな点である(図3)。各モデルの具体例について以下に述べる。



図3 空間伝搬を再現するセンサモデル(カメラの例)

2.1. カメラモデル

DIVP®でのカメラモデルでは、人間に映像として見えるRGB出力ではなく、CMOS等の半導体に入力される分光特性をシミュレートしている。また、太陽光は天空モデルとして定式化されており、時刻、緯度・経度の入力により精緻な太陽光源を模擬できる。

以下に示すように物標に反射特性が定義されリアルなシミュレーション映像を実現している(図4)。

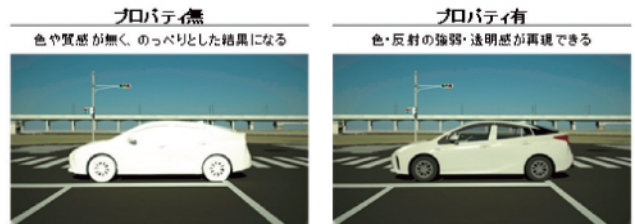


図4 物標の反射特性の有無の影響

また、トンネルの暗闇や、出口に差し掛かったときの強い太陽光のバックライトを伴う可視光の弱点シーンにおいて、HDR (High Dynamic Range) カメラモデルでは、認識に十分な視認性を確保できることがシミュレーションで検証できている(図5)。

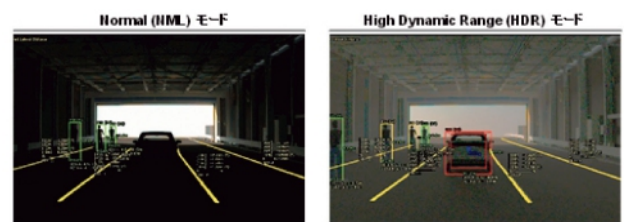


図5 HDRカメラの効果検証例

2.2. ミリ波レーダモデル

ミリ波レーダは、モデル化が最も難しいセンサである。反射物標での電波の振る舞いによって3つの反射モデルを定義し、物標によって使い分けている。散乱体モデルとして車、人等小さい物標に対してはPO (Physical Optics) 近似を使用し、反射体モデルには、Geometric Optics近似としてビル、路面など大きな物標に使用している。更に、解析時間短縮等のためには、予め物標に定義されたRCS (Radar Cross-Section) モデルの3つを複合し、シナリオ物標に対して割り付けていく(図6)。

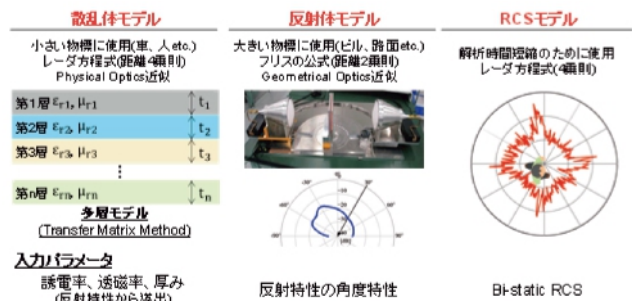


図6 精緻な反射を再現する3つのモデル(ミリ波レーダ)

ミリ波センサの弱点例として車両間をすり抜けるシーンを以下に示す(図7)。方位角の低分解能レーダでは正しい位置に知覚出力が得られていないことが再現され、また、高分解能によって改善されることが示されている。



図7 ミリ波レーダ方位角分解能の影響

2.3. LiDARモデル

LiDARが用いる近赤外光は、その指向性の特徴から比較的モデル化し易いセンサである。以下に示すLiDARモデルは360°スキャンすることにより、背景光等の環境外乱の評価が可能である(図8)。本プロジェクトではLiDARが照射する近赤外光走査のモデル化や、近赤外光の広がりによるフットプリント、太陽光等の背景光の影響等を精緻に再現することにより、LiDARにおいても実環境と一致性の高いシミュレーションを可能とした。

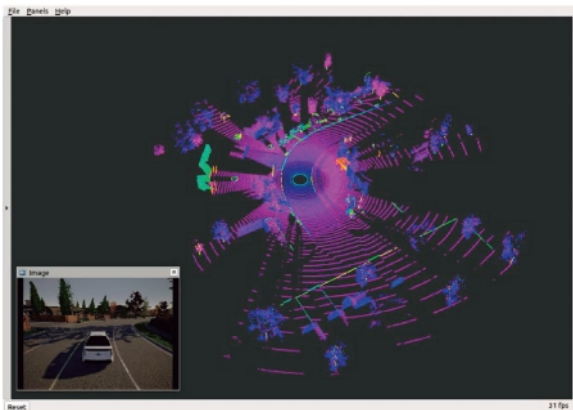


図8 LiDARモデル

2.4. センサ出力の一致性検証

本プロジェクトでは各センサモデルの入出力に対し、リアルな実験結果での定量的な検証を実施し、シミュレーションの一致性の評価を行っている(図9)。

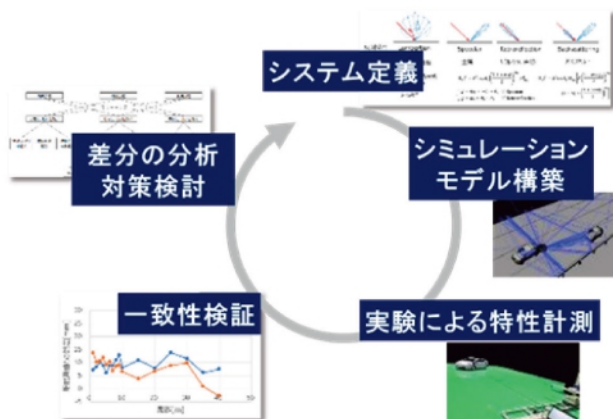


図9 LiDARモデル

これまでの結果、カメラ、LiDARについては高い一致性が得られているが、ミリ波レーダについては、単一物標に対する一致性検証は進んでいるが、トンネル壁面の反射、マルチパス要因などを複合した弱点シナリオの条件での一致性検証は、引続き改善が必要である。従来のレイトレース手法に加え物理光学近似やRCS等を併用する手法により性能向上の見通しを立てており、今後シミュレーションへの実装を進める。

3 環境モデル

欧州PEGASUSプロジェクトで定義された走行環境シナリオを示す6階層の分類や、自動運転に使われている高精度3次元地図は、自動運転制御(自己位置、交通流、ルート等々)に対し有効な走行環境情報が定義されているが、外界センサからみた反射・透過などの物理的特性が定義された環境モデルはあまり存在しない。

本プロジェクトでは①静的道路構造物、②車両、歩行者等動的物標、③太陽光源、雨・霧、天候などに対して、センサから見た、電磁波の反射・透過、減衰などの特性を定義した環境モデルを構築している点に特



図10 環境モデルの構造

徴がある(図10)。

物体表面に反射特性を付与していくために、本プロジェクトでは各物標に対する物性的な実験計測も重視し、シミュレーションモデルに反映している。この為、可視光、近赤外光、電波のそれぞれの電磁波の計測装

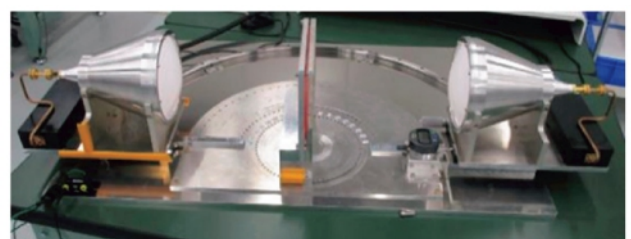


図11 ミリ波計測器

置にも工夫を凝らしている(図11)。

これらの機器を活用し各種評価環境に必要な対象物の反射特性を順次検証し、環境モデルアセットのプロパティライブラリとして拡充を進めている。現在は、NCAP等のアセスメントシナリオや、各自動運転車両の実証実験場となっているお台場地域やC1首都高速道路のリアルな環境条件でのセンサ弱点シナリオのモデル化において、優先度の高いアセットモデルのプロ

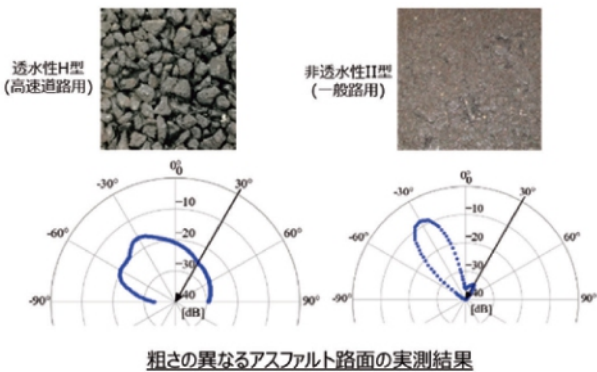


図12 計測済反射率の一例

パティの計測と検証を続けている(図12)。

4 各センサに対応した空間描画モデル

センサ検知を精緻に再現するためには各センサの物理現象を正確に再現する必要がある。例えばカメラであれば、光源から発せられた可視光線が空間を伝搬し物体表面に到達、表面を反射・透過した後に空間を伝搬してカメラのレンズに到達、レンズを通った光は光電変換を経て電気信号となり各種制御に供される。この経路において空間を伝搬する際に起こる光の拡散や減衰等の現象はカメラの入力光に重要な影響を与えることから、精緻な再現が必要である。この対象は、ミリ波レーダであればミリ波、LiDARであれば近赤外光となる。

太陽光をモデル化した天空光モデルは、時刻、物標の緯度経度の入力により実現に即した太陽光の再現



図13 天空光シミュレーション

が可能となる(図13)。

5 安全性評価への貢献

安全性評価シナリオについてはどこまで網羅すればよいかは依然として課題であるが、仮想空間上で一致性の高い条件設定ができれば評価効率も格段に向上する。そこで、本プロジェクトでは評価シナリオの構築として①NCAP等のアセスメント評価、②実際の交通環境として、お台場・C1高速の実証実験コミュニティのモデル化による評価(センサ弱点環境が狙い)の2つのマイルストーンをおき、「走行環境～空間伝搬～センサ知覚認識」の一連のモデル作成を進めている。目的に沿ったパッケージシナリオともいえるべき仮想空間単位を定め、このシナリオパッケージ単位で信頼できる安全性評価のレベルアップを積み重ねていく必要がある(図14)。

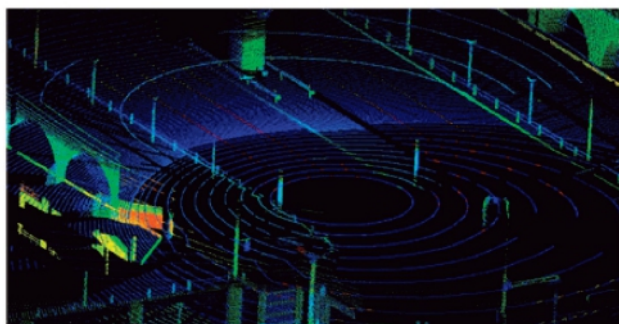


図14 DIVP® シナリオパッケージのロードマップ

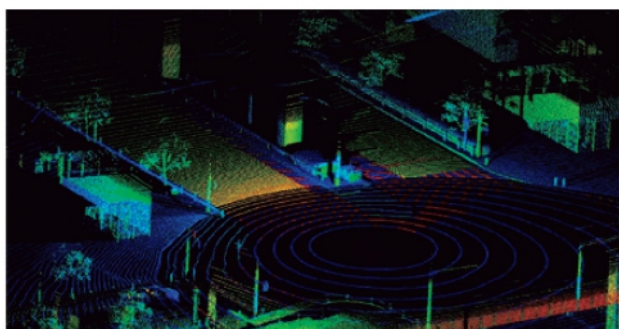
5.1. NCAP等アセスメント評価への応用

AEB (Automated Emergency Brake), LKA (Lane Keeping Assist System), ACC (Adaptive Cruise Control), ALKS (Automated Lane Keeping System)などの自動運転機能を有する先進安全システムでは、Euro-NCAP, J-NCAP等で評価プロトコルが詳細に定義されている。各国の交通事故状況によって多少差はあるが、歩行者、自転車、交差点右左折等、事故状況を反映したプロトコルや、自動運転ALKSにおけるカットイン、カットアウト等のシナリオが重要となっている。ここでは、センサの弱点が影響する環境条件はあまり多くないが、夜間の歩行者飛出しの条件など周辺光源が影響する条件下において、本シミュレーションは効果的と言える。本プロジェクトでは、各NCAPシナリオを順次モデル化している(図15)。

図20にシミュレーションで再現できた様子を示す。



通常路面(白線→検出(赤線))



遮熱塗装(白線検出できない)

図20 LiDARシミュレーション(台場駅前付近)

通常路面で反射特性が違う白線(赤線)がLiDARで検出できているが、遮熱塗装路では、反射特性が似てきて白線が検出できていない。

このように他の自動運転プロジェクトと連携できる点もSIP-adusならではの効果的な枠組みと言える。

6 国内の連携活動

6.1. OEMモニタ, センサメーカーモニタ

研究成果の産業界への貢献として、日本自動車工業会(以下、JAMA)を通じ国内OEM各社とのワークショップを開催し、研究成果についての中間レビューを2回実施し仮想空間シミュレーションへの理解を深めた(図21)。



図21 国内OEM各社とのワークショップ

更に、産業界ユーザーからの具体的なフィードバックを得るため、国内OEM及び、センサメーカー各社のモニタ評価を実施している。これらの連携活動を通じて、『一致性の高いシミュレーションの利用価値の合意形成』『ユーザー側既存シミュレーションとの接続性の向上』『業務利用を想定した適用範囲拡大の要求(アセット、シナリオモデル等の拡充)』『インターフェース標準化への期待』などが進展し、要求要件がより明確になった。この結果、他のシミュレーションとの連携(Co-sim.など)等への2021年度のDIVP®計画の拡張に繋がっている。

6.2. 安全性評価に向けたSAKURAプロジェクトとの連携

また、JAMA、経産省主導の日本自動車研究所(JARI)採択のSAKURA(<https://www.sakura-prj.go.jp/>)プロジェクトでは走行シナリオの体系化を推進しており、SIP自動運転 DIVP®プロジェクトとの連携において、日本の安全性評価体系の進展が期待されている。本件は、安全性評価基盤合同推進委員会として2021年4月より、強化された体制で開始している。

7 標準化・国際連携活動

7.1. 日独連携 VIVIDプロジェクト

ドイツのVIVALDIプロジェクトは、センサのモデル化をもとに自動運転の安全性評価に貢献しようとしており本プロジェクトの目的と合致する。この背景からVIVALDI(独)とDIVP®(日)間で日本の内閣府SIP-adusとドイツ連邦教育研究省(BMBF)との連携の枠組みに基づき、両者連携のプロジェクト「VIVID」を2020年10月より開始した。このプロジェクトを通じ、自動運転安全性評価体系とインターフェース標準化等を推進中である(図22)。

No	topic	JAMA/DIVP®	VIVALDI
1	■ Simulation I/F	Nihon Unisys, Ltd	AVL
2	■ Environmental data	株式会社デンソー	KIT
6	■ Simulation validation roadmap	JAMA	TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT
3.1	➢ Camera	Sony Semiconductor Cooperation	Hochschule Kempten
3.2	➢ LIDAR	Pioneer	Hochschule Kempten
3.3	➢ Radar	SOKEN	Continental
4	■ V&V testing framework	神奈川工科大学	TECHNISCHE UNIVERSITÄT ILMENAU
5	■ Scenario structuring	SOLIZE	IPG



図22 VIVID実施体制

7.2. 国際的標準団体ASAM(独)への参加

ASAM (Association for Standardization of Automation and Measuring Systems) では、自動運転に関し幅広い標準化活動を実施している。本プロジェクトからはOpenDRIVE/OpenSCENARIO, OSI (Open Simulation Interface) 等のWGに参加し、知覚インターフェースなどを提案している(図23)。

OpenX	Contribution
<ul style="list-style-type: none"> ■ OSI (Open Simulation Interface) 	
<ul style="list-style-type: none"> ■ OpenDRIVE / OpenSCENARIO ■ OpenX ontology 	
<ul style="list-style-type: none"> ■ OpenODD 	

図23 DIVP®メンバのASAMWGへの参加

- PEGASUS Project Office (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR), German Aerospace Center, Institute of Transportation Systems) : PEGASUS METHOD An Overview, <https://www.pegasusprojekt.de/files/tmp/Pegasus-Abschlussveranstaltung/PEGASUS-Gesamtmethode.pdf> (参照2021.6)
- 菅沼直樹(金沢大学) : (SIP) 第2期 自動運転(システムとサービスの拡張)「自動運転技術(レベル3, 4)に必要な認識技術等に関する研究」(2020)

【執筆者の詳細】
井上秀雄, 学校法人幾徳学園神奈川工科大学, 工学教育研究推進機構 先進自動車研究所, 教授/所長, 専門分野: 自動車工学, 車両運動・制御, 統合安全, 運転支援/自動運転

8 おわりに

本プロジェクトではSIP-adus事業の一環として産学官連携の研究開発を推進してきた。本プロジェクトが「走行環境～電波伝搬～センサ」の一連のモデルの新規性を活かし、他のシミュレータとも接続性を担保し、複雑化する自動運転安全性検証を効率的かつ幅広く実施するための基盤技術になれば幸いである。実環境を精緻にデジタルツイン化した仮想空間技術が、自動運転の安全性に対する消費者の受容性を向上し、自動運転の社会実装の促進に貢献できることをDIVP®メンバー同、切に願っている。

【参考文献】

- ODI RESUME : U.S. Department of Transportation, National Highway Traffic Safety Administration, 01/19/2017, <https://static.nhtsa.gov/odi/inv/2016/INCLA-PE16007-7876.pdf> (参照2021.6)
- 日経ビジネス : 技術の限界を伝える難しさ (2016), <https://business.nikkei.com/atcl/report/15/264450/071500039/> (参照2021.6)
- SET Level Project Office (Deutsches Zentrum fuer Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR), German Aerospace Center (DLR), Institute of Transportation Systems) : SET Level Project, <https://setlevel.de/en/project> (参照2021.6)

新たなサイバー攻撃手法と 対策技術に関する調査研究

奥山謙, 和栗直英, 韓欣一 (PwC コンサルティング合同会社)

(概要) 自動走行システムの基盤となる高度な地図情報や地図上にマッピングされる自動車, 人, インフラ設備等の情報は, 主に外部ネットワークから取得され, 車両制御に活用する目的で, 車両の制御系/情報系の機器に送られるが, このような状況は従来の自動車にはなかったサイバーセキュリティ問題を引き起こす要因にもなっている。また, UNECE WP29 における UNR155/R156 の合意に伴って, 法規の観点からもサイバー攻撃への対策が必要となっている。このような問題を解決するために, 本研究調査では, 出荷後における新たなサイバー攻撃への対策技術として, 侵入検知システム (IDS) に着目し, IDS 導入時における評価・テストのベースラインとなる IDS 評価ガイドラインを策定する。また, 実際にインシデントが発生した際の初動対応を支援するための仕組みづくりとして, コネクテッドカーの脅威情報の収集・蓄積方法の検討およびハニーポット等による収集実験を実施する。本研究調査は, 2022年度までの計画となっており, 本年度は, 基礎調査や検討を中心に行い, 活動成果としてまとめた。

1 本研究調査の目的と活動概要

「戦略的イノベーション創造プログラム (S I P) 第2期/自動運転(システムとサービスの拡張)/新たなサイバー攻撃手法と対策技術に関する調査研究」における研究開発計画および目的, 目標に合致する形で, 「IDS評価手法とガイドライン策定」および「コネクテッドカーの脅威情報と初動支援の調査研究」を2020年8月~2022年3月まで実施する予定となっている。

2 IDS 評価ガイドラインの策定

本テーマでは, 図1に示すとおり, 「出荷後のセキュリティ対策」に貢献することを目的とし, 各OEMにおいて, IDSを選定・検証・運用する際のベースライ

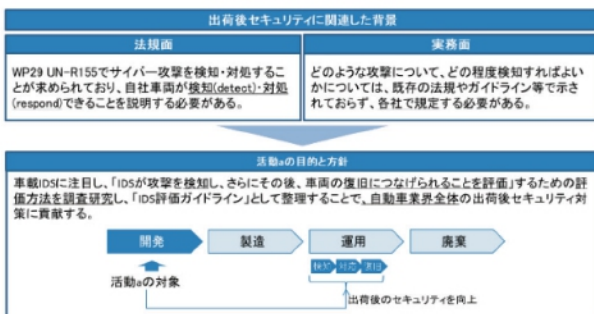


図1 「IDS 評価ガイドライン策定」の目的と方針

ンとして活用するための, 「IDS評価ガイドライン」の策定をし, 最終的に業界団体へのハンドオーバーすることを目標としている。また, 作成したガイドラインは, 車両の出荷後セキュリティ品質の底上げを目的とし, 特に車載IDS導入の検討を始めたばかりのOEMを主な想定読者としている。

2.1. IDS 評価ガイドライン策定に向けたアプローチ

IDS評価ガイドライン策定に向けて計画している活動概要について図2に示す。本章ではこれらのうち, IDS基本機能要素調査, 検討及び仕様に基づく評価観点検討について解説する。

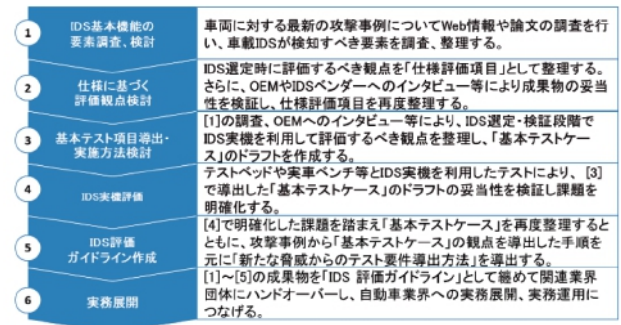


図2 IDS 評価ガイドライン策定アプローチ概要

2.2. IDS 基本機能の要素調査・検討

本活動では, 実際の攻撃事例を踏まえて, IDSが検知すべきセキュリティイベントを導出するために, 2020年に開催されたカンファレンスやWeb情報, 脆弱性情報を調査した。これらの結果からさらに車両制御

に至っているものを、車両に直接関係のある事例として、12件に絞り込みを行い、詳細に分析した(表1)。その結果、ネットワークおよびホストで発生、観測し得る事象をセキュリティイベントとしてそれぞれ抽出した(表2)

表1 事例調査・分析件

	調査件数	分析対象件数
Web情報・脆弱性情報	1329	6
論文	1062	6
合計	2391	12

2.3. 仕様に基づく評価観点検討

本活動では、2019年度に実施したアンケート内容をベースに、IDSベンダー3社、6製品について、検知アルゴリズム等の基本仕様、検知機能の種類、ロギング項目等、24項目についてアンケート調査を行うことで、評価項目(アンケート項目)から得られる情報に関して考察を行った。なお、アンケート内容については、可能な限り比較が容易になるよう、選択式となるように設計、ヒアリングを実施した

2.3.1. 考察

検知対象のセキュリティイベントについて、各社概ね共通であったことから、基本的な検知機能は各社ともにサポートしており、公称仕様における大きな違いは出にくく、この項目のみで各社の比較検討を行うことはできない。その一方で、サポートするプロトコルの種類や外部機器接続の検知機能等、一部の機能仕様について、ベンダーの独自性が出る部分もある。ロギングや通知方式などについては、各社対応済み、もしくはカスタマイズ可能であり、基本的にはOEMの要求ベースでカスタマイズする前提である。したがって、

OEMとしてIDSに要求する機能とカスタマイズ機能のギャップを知ることで、IDSの比較検討がある程度可能ではないかと考える。また検知内容の分析を行う、SOC(Security Operation Center)に関する運用面でのサービスについては、サービスメニューとして存在しているベンダーとそうでないベンダーで差が出ることから、IDSによるモニタリングや検知以降の分析や、必要に応じた対応・復旧の支援を含めて検討する際に、この項目は比較検討する上で有用と考える。

2.4. 今後の活動

本テーマは、2022年3月末までの計画となっており、今後は、これまでの調査結果から得られた示唆に基づくテスト項目の実現性や妥当性を実際にOEMおよびIDSベンダー協力のもと、実機テストという形で実験を行い、ガイドラインへのフィードバックを行う予定である。また、想定する利用者に対して有用なものとなるよう、各ステークホルダーと定期的な検討会を引き続き実施していく

3 コネクテッドカーの脅威情報と初動支援の調査研究

本テーマでは、コネクテッドカーの脅威情報の収集・蓄積手法、脅威インテリジェンスを活用した初動支援の基本仕様を策定し、2023年に業界団体への運用移管することを目標とする。脅威インテリジェンスとは、サイバー攻撃などの脅威への対応を支援するために、収集・分析・蓄積された情報のことで、一部の産業では、企業横断的にインテリジェンスを共有する活

表2 調査事例から抽出したセキュリティイベント

イベント発生箇所	イベント	セキュリティイベント例
ネットワーク	車載NW上のコンテキスト矛盾の動作	走行状態と矛盾するタイミングで基本動作には影響しない制御メッセージの送信, 走行状態と矛盾するタイミングでの有効な診断メッセージの送信
	UDSプロトコルへの攻撃	UDSプロトコルへの攻撃
	車載NWへの不正な機器の物理接続	外部機器のOBD I/Fへの接続
	車載NWへのファジング攻撃	OBD I/Fからのファジング攻撃
ホスト	不正な振る舞い	規定外のプロセスからのシステムコール・ライブラリの呼び出し
	不正な外部通信	許可されていない車外の送信元/送信先との通信
	不正なファイルシステム操作	重要なファイルの属性変更(パーミッション等)
	不正なアプリインストール	規定外のアプリのインストール
	不正なログ	不正なシステムログ, アプリケーションログ
	規定外のエラー発生頻度	単位時間あたり一定回数以上の外部公開サービスへのリクエスト処理エラー
	高負荷	CPUやメモリの高負荷状態
ファームウェアの変更	ファームウェアの変更	

動が行われている [1]。脅威インテリジェンスを共有することで、類似のサイバー攻撃による連鎖的な被害を防ぐなどの効果が期待できるが、共有されているのはIT領域の脅威インテリジェンスが中心となっている。

3.1. 研究アプローチ

脅威インテリジェンスを活用した初動支援の基本仕様を策定するために、以下のアプローチに基づいて計画を策定した。下記図 3に全体の活動アプローチ概要について示す。また本章では、基礎調査および情報収集・蓄積の手法検討に加えて、一部先行着手しているハニーポットによる情報収集実験について解説する。

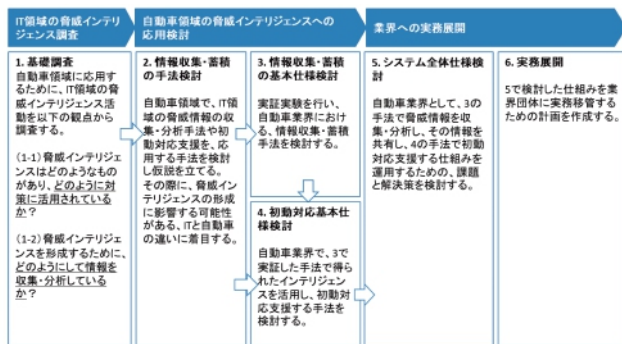


図3 調査研究アプローチ概要

3.2. 基礎調査

自動車の脅威インテリジェンスの基礎とするため、先行するIT領域の脅威インテリジェンス活動事例から、どのような脅威インテリジェンスが提供されているか、どのようにして脅威情報を収集・分析しているかを調査した。なお本活動において脅威インテリジェンスとは、脅威への対応を支援するために、収集・分析された情報を指す。

3.2.1. IT領域の脅威インテリジェンス

IT領域の脅威インテリジェンス活動は、国・業界団体、民間企業などの組織により、様々な目的をもって行われている。本研究の「初動支援」に類似する目的を持つ脅威活動に焦点を当て、提供される情報を調査した。

脅威インテリジェンスを構成する主な情報として、5つの情報を上げることができる(表3)。続いて、上記の脅威インテリジェンスがどのように活用されているか、NISTのCSF(Cyber Security Framework) [2]で定義される「特定」、「防御」、「検知」、および「対応」と「復旧」それぞれのフェーズでの活用例を整理した結果を図4に示す。

表3 脅威インテリジェンスを構成する情報例

情報	定義・概要
1 インジケータ	サイバー攻撃によって安息された具体的な事象(マルウェアハッシュやIPアドレス、URL、ドメイン情報など)
2 TTPs(戦術/Techniques、戦略/Tactics、手順/Procedures)	攻撃者の意図、ふるまいや手口を使用するリソース、攻撃対象などの観点から説明したもの。
3 セキュリティアラート	システムの脆弱性情報やエクスプロイト情報
4 インテリジェンスレポート	組織の状況認識を高めるための、脅威関連情報を記述したドキュメント
5 ツールコンフィギュレーション	1~4で得られた情報の活用を支援するためのツール設定

	特定	防御	検知	対応・復旧
①インジケータ	サイバー攻撃による観測された具体的な事象	サイバー攻撃で、利用されたIPアドレス、URL、ドメインをブラックリストに入れてブロックする。	サイバー攻撃で観測されたイベントから、セキュリティイベントを定義し検知する。	IPアドレス、ハッシュなど攻撃の痕跡を照合し、サイバー攻撃を判別し、対応・復旧を策定する。
②TTP(戦術、戦術、手順) 攻撃者の意図、ふるまいや手口、使用するリソース、攻撃対象などの観点から説明したもの	機密になりうる情報資産やシステムを特定し、サイバー攻撃を受けた場合の影響度を評価する。	攻撃シナリオを作成し、対応訓練を行う。	TTPに特有のふるまいを定義し、不審な動作を検知する。	
③セキュリティアラート 脆弱性のあるシステムや、悪用された場合の影響度を評価する。	脆弱性のあるシステムや、悪用された場合の影響度を評価する。	脆弱性のあるシステムに、修正プログラムを適用する。		
④インテリジェンスレポート 組織の状況認識を高めるための脅威関連情報を記述したドキュメント	自組織に関連する脅威を特定し、ビジネスへの影響度を評価する。			
⑤ツールコンフィギュレーション				攻撃を防御・検知・復旧するために、①~④から得られた情報から、セキュリティツールの設定を定義し、ポリシーとして配信する。

図4 CSFに基づく情報の活用例

3.2.2. IT領域の脅威情報収集方法

IT領域における脅威情報は、主に公開情報のサーベイ、インシデントレポート、対象となるネットワークやシステムの観測・実験を情報源としている。これらの代表的な収集例を表4に示す。またこれら各収集方法について、攻撃者の手口をどの程度まで補足できるかをサイバーキルチェーン [3]に従って整理した結果を図5に示す。なお、サイバーキルチェーンにおける武器化は、マルウェアやエクスプロイトキットを開発する段階を指していることから、表4で示した手法では補足できない。

表4 脅威情報の収集方法例

方法	概要	実施事例
インターネット定点観測	インターネット上の通信を定点観測することで、サイバー攻撃の大規模な傾向を把握する方法。	• NICER(NICT) • TSUBAME(IP-CERT/CC)
ハニーポット	攻撃を受けようとする意図したシステムをインターネットに公開し、攻撃者のアクセス情報を収集する方法。本物のシステムを守るために代わりに攻撃を受け、おとりとして活用される場合もある。	• MITT(NTT) • A IoT Malware Story(Kaspersky社) • コネクテッドホーム実験室(横浜国立大学)
CTF	システムを模した環境に、ホワイトハッカーに意図的に攻撃を仕掛けてもらい、情報を収集する方法。攻撃の目標(flag)を設定し、得点を争う(CTF)方式のほか、疑心的な攻撃を試す遊び場(フレイグラウンド)を提供する方法もある。	• DEFCON CTF • SECCON
バグバウンティプログラム	バグの発見者に、報奨金を与える制度を設け、実際のシステムの脆弱性情報を収集する方法。	• LINE社のBug Bounty Program • HackerOne、Sproutなどのサービス
OSINT収集	人手またはウェブクローラー、製品・サービスなどの機械的な手段で、インターネットから情報を収集する方法。事例やレポートのほか、自社の偽サイトや偽アプリ等、すでに起きている脅威が発見される場合がある。	• (多数の製品・サービスが覆蔽されている)。

【参考文献】

1. 戦略的イノベーション創造プログラム（S I P）重要インフラ等におけるサイバーセキュリティの確保 (b2)情報共有プラットフォーム技術「情報共有デザインガイド 構築編」, 株式会社日立製作所, <https://www.nedo.go.jp/content/100904081.pdf>
2. CYBERSECURITY FRAMEWORK, NIST, <https://www.nist.gov/cyberframework>
3. Cyber Kill Chain®, Lockheed Martin, <https://www.lockheedmartin.com/en-us/capabilities/cyber/cyber-kill-chain.html>

自動運転の高度化に則した HMI 及び安全教育方法に関する調査研究

佐藤稔久，長谷川国大，Wu Yanbin，木原健（産業技術総合研究所），中野公彦，楊波（東京大学），
合田美子，戸田真志，松葉龍一（熊本大学），新目真紀，半田純子（職業能力開発総合大学校）
伊藤誠，周慧萍（筑波大学）

(概要) SIP 第2期自動運転（システムとサービスの拡張）の“走行環境条件の逸脱や自動運転システムの機能低下における適切な運転引継のためのHMI等に関する研究開発”と“運転者や歩行者等が習得すべき知識とその効果的な教育方法に関する研究開発”の取り組みを概説する。前者では、自動運転から手動運転への運転交代前におけるドライバーの周辺監視状態の評価指標の検討や、HMIによるドライバーのシステム理解への効果の検討等に取り組んでいる。後者では、主な研究目的に基づき、(1)個人特性を踏まえた教育方法の提案、(2)動機づけ手法の提案、(3)部分教育を意識したモジュール化可能な完全教育教材の開発の3つの研究テーマを設定し研究を行っている。また、試作した教材を用いて、自動運転に関する一般的な知識を事前に提供することの効果についてドライビングシミュレータを用いた検証を行った。これらの成果をもとに、日独連携として自動運転と教育についてのワークショップを担当した。

1 自動運転から手動運転への 運転交代場面

自動運転を使用している際、システム機能限界などの原因のために自動運転から手動運転への運転交代が発生する可能性がある。そのため、自動運転中のドライバーの状態をシステムが検知し、ドライバーが運転交代可能かどうかをシステムが知る必要がある不可欠となる。SIP 第1期自動走行システムにおいては、ドライバーの状態の中でも、わき見（前を向いていない状態）⁽¹⁾、意識のわき見（前を向いているけど運転以外のことを考えていて運転に必要な情報に注意を向けていない状態）⁽¹⁾⁽²⁾、居眠り（覚醒度の低下）⁽¹⁾⁽³⁾を取り上げ、それぞれの状態の評価指標とその状態から運転交代時における運転パフォーマンスへの影響⁽⁴⁾について検討した。さらに、自動運転中に覚醒度を低下させないための方策⁽⁵⁾⁽⁶⁾について検討した。

第2期では、自動運転から手動運転への運転交代において、システム主導による運転交代場面とドライバー主導による運転交代場面に分類してヒューマンファクタ課題に取り組んでいる。システム主導による運転交代とは、システムから運転交代のアナウンスが提示されてからドライバーが運転交代する状況であり、ドライバー主導による運転交代とは、システムによる機能限界をドライバーが理解して、ドライバー自らが運転交代する状況である。

2 システム主導による運転交代

2.1. 取り組み課題概要

自動運転レベル3において、自動運転中にドライバーが運転以外のことを実施している中で運転交代を適切に行うためには、自動運転中の運転以外のことに集中しているドライバー状態から運転タスクに適切に注意を移行させることが必要となる。そのためには、運転交代要請 RtI (Request to Intervene) よりも手前からドライバーが周辺監視を行って、運転交代の準備をすることが有効と考えられる。ここで、ドライバーが周辺監視を行っていることをどのように評価するのが重要な課題となる。このような課題認識のもと、本テーマでは、運転交代前におけるドライバーの周辺監視が運転交代後の運転行動に及ぼす影響の評価、ドライバーの周辺監視の評価方法、周辺監視状態への移行を促すHMIなどに取り組んでいる。

2.2. 運転交代前におけるドライバーの周辺監視が運転交代後の運転行動に及ぼす影響の評価

(1) 実験方法

実験参加者30名（女性15名，男性15名，平均年齢45.7歳，20～70歳）によるドライビングシミュレータ実験を行った。自動運転にて、片側3車線の自動車

専用道の中央車線を時速約60キロで走行した。自動運転中、実験参加者はタブレットPCを使用したゲーム(テトリス)を行った。自動運転開始から数分後に運転引継ぎを発生させ、手動運転による車線変更を行った。ここで、ドライバーの運転行動、視線運動および頭部運動を計測した。実験条件は、運転引継ぎ1分前からテトリスをやめて周辺監視を行う条件とそのような周辺監視をしないで運転交代をする条件を設定した。

(2) 実験結果：運転交代後の運転パフォーマンス

運転交代後、他車と衝突せず、設定された区間内で車線変更出来た割合を算出したところ、周辺監視有りの条件の方が周辺監視無しの条件に比べてその割合が有意に高かった。以上の結果より、自動運転レベル3で運転以外のことを行っているドライバー状態から手動運転へ運転交代する際、周辺監視を行って運転交代の準備状態を作ること、より適切な運転交代を実現できる可能性が示唆された。

(3) 実験結果：ドライバーの周辺監視の評価指標

アイカメラで検知したドライバーの視認行動より、周辺監視を開始してから10秒毎の前方注視率を分析したところ、周辺監視開始後の20秒間で前方注視率が50%から60%へ増加し、周辺監視開始後30秒後に約70%となり、その後、運転交代時点まで、さらに、運転交代後も、前方注視率は70%で推移した。前方注視以外の視認行動は、サイドミラー、ルームミラー、計器などであった。この結果より、周辺監視開始後の前方注視率が、ドライバーの周辺監視状態の評価指標となり、開始直後の低い前方注視率が約70%に増加したところが、周囲の交通状況をドライバーが認識でき、周辺監視状態として安定したところと判定できる可能性が示唆された。

3 ドライバー主導による運転交代

自動運転レベル2では、自動運転中にドライバーが周辺状況やシステム状態を認識し、システムの機能限界場面ではドライバー自らが運転交代を行う必要がある。ここでは、ドライバーが適切にシステムの状態を理解できているかを評価する方法を検討するとともに、ドライバー自らの運転交代を確実に実現するためのシステム理解を促進するHMIについて検討する。

3.1. ドライバーのシステム理解状態の評価方法

自動運転中であっても手動運転時と同じドライバー状態になっていることで、ドライバーがシステムと共存できている＝ドライバーがシステムの状態を理解できていると解釈し、手動運転時と自動運転レベル2使用時のドライバー挙動の差を分析し、ドライバーによるシステム理解状態の評価方法を検討した。

ドライビングシミュレータ実験を実験参加者10名で実施し⁽⁷⁾、片側3車線の第2車線を手動運転または自動運転レベル2で走行し、走行中に周囲に注意を払うべき潜在的なリスクシーンを設定した。走行中の視線行動を非接触アイカメラで計測したところ、複数の領域で注視時間に有意差が認められ、自動運転レベル2使用時は手動運転時よりも正面および計器類への注視時間が短くなり、周囲やミラーへの注視時間が長くなる傾向がみられた。

3.2. システム理解を促進するHMI

ドライバーがシステムの未検知、誤検知を理解しやすいHMIの候補を挙げ、ドライビングシミュレータ環境に試作した。その中から、交通状況の認識結果をリアルタイムに表示するHMIを用いて、実験参加者18名で走行実験を行った⁽⁸⁾。HMI提示有りの方が、自動運転システムが車両以外の物体を認識できていない可能性があることをドライバーが分かっているアンケート結果が得られ、HMIによってシステムに対するドライバーの理解が促進する可能性が示唆された。

4 運転者や歩行者などが修得すべき知識とその効果的な教育方法に関する研究開発

4.1. 個人特性を踏まえた教育方法の提案

SIP第1期の実験結果⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾より、様々な経験をすれば、次第にドライバーがうまく対応できるようになったことが分かった。一方、急に「センサ機能喪失」のような厳しい状況に遭遇した場面では、運転への介入の遅れが見られた。また、運転引継ぎが必要な状況のうち、とくに厳しい状況と考えられる「機能失陥(故障)」の経験をしておくことが実際の場面に遭遇したときに有効であり、またその経験が長期間にわたって有効である可能性が確認された⁽¹¹⁾。

そこで、パーソナリティ特性の個人差変数の1つであるレジリエンス特性に着目し、レベル3の自動運転

から手動運転へ遷移する際の知識習得に与える影響を確認した。SIP第1期(平成30年度2月)にインターネットで実施した3240名の調査結果を、パーソナリティ特性と知識習得との関連で分析した。チラシ、クイズ、動画の3形式の教材を用い、各教材で学習した後の知識習得効果を比較した⁽¹²⁾。

傾向スコアマッチングを用いた上昇群・非上昇群の2値変数を従属変数とし、この従属変数への影響が想定される変数群を独立変数としてロジスティック回帰分析を行った。その結果、教材形式によってレジリエンス特性の吸収効果が異なり、動画教材が最もレジリエンス特性を吸収できる可能性が確認された。レジリエンス特性は、性別、年齢、学習スタイルによって差が見られたことから、今後は更なる検証を行う予定である。

また、個人特性を吸収し多くの受講者へ教育効果のある方法を検討するとともに、特性を簡易に判別できる手法も検討した。その結果、学習スタイルとキャリアレジリエンスの尺度の短縮版⁽¹³⁾を開発した。

4.2. 動機づけ手法に関する提案

安全教育の対象は、交通利用者すべてとなり、年齢層、背景、学習スタイルなど、多様で幅広い。自動運転車などに興味を持たない対象者も多い。運転者教育として、免許更新時の講習などが考えられるが、限られた時間で、学習効果を上げるための工夫が必要となる。そこで、教材に加えて、学習内容の興味関心を喚起するための方法を検討することとなった。本研究では、動機づけARCSモデルを援用し、安全教育のための動機づけ動画を2種開発した。形成的評価の結果、2種の動画では、同等レベルの動機づけが可能であることが示唆された。

また、自動運転教育への動機づけ方法を検討するために、開発した2種類の動機づけ動画を用い、2790名を対象としたweb調査より、個人特性の影響を考慮した動機づけ動画の有効性について検討した⁽¹⁴⁾。傾向スコアマッチングの結果、ナラティブ手法を活用した動機づけ動画は、ファクトベースの動画と比較し、個人のレジリエンス要因を吸収でき、レジリエンスのレベルが低い程事後得点が上昇する可能性が検証された。また、ナラティブベースの動機づけ動画の利用により、個人のレジリエンスの違いを吸収でき、さらに、個人の学習スタイルを考慮するとより有効性が高くなる可能性が示された。また、ナラティブベースの動機づけを実施

することで、性別や年代、既婚未婚、子供の有無といった個人属性の違いを吸収できる可能性が示唆された。

4.3. 部分教育を意識したモジュール化可能な完全教育教材の開発

多様な背景を持つ交通利用者が教育の対象者であることから、自身の特性や学習スタイルに合った教材で学んでもらえるように、組合せ可能な、多種の教材モジュールを開発、蓄積することを目的の一つとしている。2020年度は、4.2で説明した動機づけ動画2種の他に、一般的な自動運転に関する知識習得のためのクイズ教材と動画教材の計4モジュールを開発した。短く、マイクロラーニングが可能なモジュールとして多様な教材を開発することで、それぞれを単独で、また、学習目標、または、実際の目的に合わせて、教材を組み合わせ学習することが可能となる。今後は、教材の組合せ方法、個人に適した提示方法などを含む、個別最適化した学習方法の提案を目指し、さらに研究を進める予定である。

教材開発とともに、自己の特性をよりシンプルに測定可能にするために、キャリアレジリエンスと学習スタイル尺度の縮小版を開発した。

5 教育機会を想定した教育効果検証実験

5.1. 教育機会

本研究プロジェクトにおいては、社会実装を視野に入れて自動運転に関する教育機会を検討している。自動運転を利用する、あるいは自動運転車とインタラクティブにするために必要な知識を提供する機会としては、マスメディア、ウェブサイトなどをはじめとして各種教育の機会がありうる。いずれの機会も、利用できる時間、リソースは限られていることから、それぞれの特徴に即して適切な具体性・粒度を選択することが重要であると考えている。

特定のシステムについて、実際の利用者に対して知識・情報を伝達する機会としては、ディーラー・レンタカーの営業所や納品時の説明の機会、あるいは車載システムで知識を伝える機能などが考えられる。しかし、本プロジェクトにおけるこれまでの継続的な調査⁽¹⁵⁾によると、一般には自動運転に関する知識をほぼ全くもっていない人もいると考えられることから、個

別のシステムの説明を理解できるようにするための一般的な知識を持っている必要があると考えられる。そこで、本プロジェクトにおいて、自動運転に関する一般知識をあらかじめ伝えることの有効性を検証することに取り組むこととした。

5.2. シミュレータによる検証実験

まず、2節での教材試作前の試行として、一般知識提供の効果の検証を行うこととした(実験1)。第1期において行った知識提供に関する研究で使用したインストラクション素材をもとに、自動運転に関する一般的な知識を整理し、説明用の動画を作成し、実験参加者に視聴させた。約1か月後にドライビングシミュレータを用いて、自動運転から手動運転への引き継ぎに関する実験を行った。この実験では、一般的な知識が複数の具体的なシステムに有用であるかどうかを検証するために、低速追従時のみレベル3相当の機能を提供するタイプと、速度に制限のないレベル3相当の機能を提供するタイプの二つを対象とした(被験者間要因)。いずれのものも、自動車線変更の機能はない。

実験結果⁽¹⁶⁾の一例を図1に示す。これは、自車レーン前方に故障車が止まっており、これを回避するために車線変更が必要なシーンである。本実験における自動運転システムは車線変更の機能を有していないため、走行を継続するためにはドライバーが運転を交代せざるを得ない。図1は、故障車に対する衝突事故が発生した人数の割合を表している。図1に示すように、自動運転に関する一般的な知識を事前に提供すると、運転交代が必要な場面でシステムからRtIが提示された場合に、適切な運転交代が実行できる可能性が示唆された。

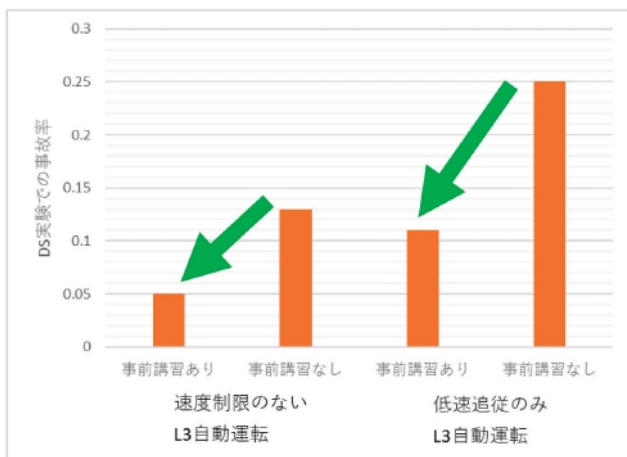


図1 実験結果の例

つづいて、2節で開発した動画教材を用いた検証実験を行った(実験2)。この実験では、実験において利用するシステムについての説明を、一般的な知識と合わせて、シミュレータ実験実施の約1か月前に行った。その結果、実験の前半で経験させる運転引継ぎシーンでは、RtIが提示されたにもかかわらず運転交代を要求されていることに気づかない実験参加者が数多く観察された。実験1では、実際に使用するシステムについての説明は実験実施当日に提供されたのに対し、実験2では実験実施1か月前に提供された点が異なる。一般的な知識の提供の有用性は実験1で確認できたものの、真に安全な利用を可能とするためには提供した知識の促進を図る必要がある。現在、この点についての検討を進めている。

【参考文献】

- (1) Yanbin Wu, et al.: Assessing the Mental States of Fallback-Ready Drivers in Automated Driving by Electrooculography, Proceedings of 2019 IEEE Intelligent Transportation Systems Conference (ITSC), pp. 4018-4023, 2019.
- (2) Toshihisa Sato, et al.: Comparison of Driver Conditions in Automated Driving Systems and Transition Behaviors in Driving Simulator versus Real Proving Ground, Proceedings of DSC 2019 Europe, pp.43-50, 2019.
- (3) Toshihisa Sato, et al.: Evaluation of Driver Drowsiness While Using Automated Driving Systems on Driving Simulator, Test Course and Public Roads, In: Krömker H. (eds) HCI in Mobility, Transport, and Automotive Systems. Driving Behavior, Urban and Smart Mobility, HCII 2020, pp. 72-85, 2020.
- (4) Damee Choi, et al.: Effects of cognitive and visual loads on driving performance after take-over request (TOR) in automated driving, Applied Ergonomics, Vol. 85, 103074, 2020.
- (5) Yanbin Wu, et al.: Effects of scheduled manual driving on drowsiness and response to take over request: A simulator study towards understanding drivers in automated driving, Accident Analysis & Prevention, Vol. 124, pp.202-209, 2019.
- (6) Yanbin Wu, et al.: Age-related differences in effects of non-driving related tasks on takeover performance in automated driving, Journal of Safety Research, Vol. 72, pp.231-238, 2020.
- (7) 井上功一朗ほか: 先進運転支援システムによるドライバメンタルモデルの変容, 第18回 ITSシンポジウム, 2020.
- (8) 井上功一朗ほか: 物体認識結果をドライバに提示することが先進運転支援システムに対するメンタルモデルに与える影響, 第29回 交通・物流部門大会 (TRANSLOG2020), 2020.
- (9) SIP第1期自動走行システム成果報告: HMI等のヒューマンファクタに関するデータ収集によるガイドライン策定

https://www.sip-adus.go.jp/rd/rddata/rd01_more/121.pdf

(参照2021.06.29)

- (10) Zhou, H., et al.: How Do Levels of Explanation on System Limitations Influence Driver Intervention to Conditional Driving Automation? in IEEE Transactions on Human-Machine Systems, Vol. 51, No. 3, pp.188-197, 2021.
- (11) Zhou, H., et al.: Long-term Effect of Experiencing System Malfunction on Driver Take-over Control in Conditional Driving Automation. Proceedings of The 2019 IEEE international Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC 2019), pp.1950-1955, 2019.
- (12) Arame, M., et al.: Effects of Learning materials about Automated Driving Level 3 Focusing on Driving Frequency: Verification by Propensity Score Matching, Proceedings of 2020 Fourth World Conference on Smart Trends in Systems, Security and Sustainability (WorldS4), pp. 454-460, 2020.
- (13) Goda Y, et al.: Development of a Short-Form Learning Style Inventory for Automated Driving Safety Education. Proceedings of IEEE International Conference on Teaching, Assessment, and Learning for Engineering (TALE) 2020, pp. 847-851, 2020.
- (14) Arame, M., et al.: Using Narrative based Video on Gaining Safety Driving: Focusing on Career Resilience and Learning Style in Automated Driving Level 3, Proceedings of Fifth International Congress on Information and Communication Technology, ICICT 2021, London, in press.
- (15) SIP第2期自動運転（システムとサービスの拡張）
平成31年／令和元年度研究開発：自動運転の高度化に則したHMI及び安全教育方法に関する調査研究
<https://www.sip-adus.go.jp/rd/rddata/rd03/211.pdf>
(参照2021.06.29)
- (16) Huiping Zhou, Makoto Itoh, Satoshi Kitazaki: Influence of Prior General Knowledge on Older Adults' Takeover Performance and Attitude Toward Using Conditionally Automated Driving Systems, Proc. HFES Annual Meeting, 2021 (to appear).

低速走行の自動運転移動・物流サービス車両と 周辺交通参加者とのコミュニケーションに関する研究

大門樹, 對間昌宏, Lee Jieun, 古谷知之 (慶應義塾大学)

(概要) 交通制約者のモビリティの確保や移動・物流サービスのドライバ不足の改善・コスト低減等の社会的課題の解決に向けて、低速走行の自動運転移動・物流サービス車両の技術開発や中山間地域等での実証実験が実施されている。低速走行の自動運転サービス車両では、従来の手動運転車の場合とは異なり、将来的には運転を常時行うドライバが乗車しないことから、歩行者や他のドライバなどの周辺交通参加者とのコミュニケーションにおいて、安全、安心、交通効率などの課題が存在する。低速走行の自動運転サービス車両と周辺交通参加者の間の安全・安心で円滑なコミュニケーションの実現を目指して、実証実験等で観測されたコミュニケーションの特徴分析、自動運転サービス車両からの意図や状態を交通参加者に伝達するためのコミュニケーション方法(車両挙動や外向けHMI等)の実験的検討を実施している。低速走行の自動運転サービス車両が備えるべきコミュニケーション方法の設計推奨、周辺交通参加者が備えるべき知識などの抽出・提案のための研究開発を進めている。

1 背景

中山間地や過疎地における交通制約者の移動手段の確保や移動・物流サービスにおけるドライバ不足を補うため、SAE (Society of Automotive Engineers) のJ3016 (2018年6月) に定義される運転自動化レベル(以下、「運転自動化レベル」) 3, 4に相当する自動運転車両を利用する移動・物流サービスの導入・活用が検討されている。初期の段階では、低速走行での運行により、歩行者やドライバなど周辺交通参加者も存在する一般の道路環境・交通状況での活用が想定されており、実証実験地域などでは、安全運行上、必要に応じて手動介入する乗務員が同乗する形態で運行されている。今後の技術的進展により、乗務員が乗車していても運転操作にほとんど関与しない運行形態や、乗務員が同乗しない運行形態など、導入地域の事情や制約などに対応した運行形態が考えられている。

低速走行の自動運転移動・物流サービス車両(以降、自動運転サービス車両)を実道に導入する場合、従来の手動運転車と比較して、歩行者やドライバなど周辺交通参加者との関わり方に異なる状況が生じうる。手動運転車であれば、乗車するドライバ自身が身振りやアイコンタクトなどを使って、周囲の車両や歩行者などの交通参加者との安全を確保したり、相手に進路を譲っていることを表明して周辺交通の円滑を図ったりしてい

ることが少なくない。このようなドライバの意図伝達は交通参加者間の安全の向上や周辺交通の円滑に寄与するコミュニケーションとして捉えることができる。このようなコミュニケーションに関して、自動運転サービス車両と周辺交通参加者を対象に、乗務員が運転操作にほとんど関与しない状況や乗務員が同乗しない状況を想定すると、従来のようなドライバ自身によるコミュニケーションを活用することは難しく、またそのようなコミュニケーションを周辺交通参加者が手掛かりとして利用しようとしても利用できない。低速走行の自動運転サービス車両の場合、減速などの車両挙動をコミュニケーションの手掛かりに利用することも難しく、従来の手動運転車と比較して、利用可能なコミュニケーション手段や媒体に制約が生じる可能性が考えられる。

以上の背景から、実道に導入される自動運転サービス車両と周辺交通参加者とのコミュニケーションを支援し、安全・安心で円滑なコミュニケーションを実現することを目的として、低速走行の自動運転サービス車両が備えるべきコミュニケーション方法の設計推奨、周辺交通参加者が備えるべき知識などの抽出・提案のための研究開発を行っている。

2 映像データに基づいた コミュニケーション分析

“中山間地域における道の駅等を拠点とした自動運

転サービス実証実験”と連携して、低速走行の自動運転移動・物流サービス車両に搭載のドライブレコーダ映像を分析した⁽¹⁾。映像データから運行中の自動運転サービス車両と周辺交通参加者が接近・関与する交通場面のうち、両者のコミュニケーションの齟齬や失敗などに起因する不安全なケースや非効率なケースを抽出してそれらの特徴を分析した。

2.1. 分析対象の実証実験地域および自動運転サービス車両

分析とした実証実験地域は、表1に示される道の駅等を中心とした7地域であり、1地域あたり20日間以上、計233日間の自動運転サービス車両の運行が対象となった。各実証実験地域で運行された自動運転サービス車両は、図1に示されるゴルフカートやバスの2車種であり、自動運転での走行は、ゴルフカートでは道路に埋設された電磁誘導線を利用して、バスではGPSと磁気マーカおよびジャイロセンサを利用して、それぞれ既定の走行軌跡上のみを走行した。自動運転中の車速は、ゴルフカートで12km/h程度以下、バスで35km/h程度以下であったが、運行上の安全対応や駐車車両等の回避のためには乗務員による手動運転介入、減速操作や操舵操作が必要となった。いずれの実証実験地域においても、自動運転サービス車両は、道の駅や支所を中心として、庁舎、郵便局、病院などの地域の主要施設への移動、農産物等の輸送などを担うルートであったが、実証実験地域によって、道路環境や交通状況などの特徴が異なるものであった。

表1 分析対象の実証実験地域⁽²⁾

実証実験地域	都道府県	導入車両
道の駅 コスモール大樹	北海道	バス
道の駅 かみこあに	秋田県	ゴルフカート
道の駅 ひたちおおた	茨城県	バス
道の駅 南アルプスむら長谷	長野県	バス
道の駅 芦北でこぼん	熊本県	ゴルフカート
みやま市役所 山川支所	福岡県	ゴルフカート
道の駅 奥永源寺溪流の里	滋賀県	ゴルフカート



(a) ゴルフカート



(b) バス

図1 低速走行の自動運転移動・物流サービス車両⁽²⁾

2.2. 観測されたコミュニケーション場面および分析

映像データを分析するにあたり、“ある交通参加者が自動運転サービス車両の存在を認識して、その交通参加者のその後の行動が何らかの影響を受けていると考えられる交通場面”をコミュニケーションと定義して広く抽出した。その結果、自動運転サービス車両と周辺交通参加者との間に、主として図2に示される3種類のコミュニケーション形態が抽出された(図中の“AV”は自動運転サービス車両を示す)。各コミュニケーション形態の特徴について次の通りである。

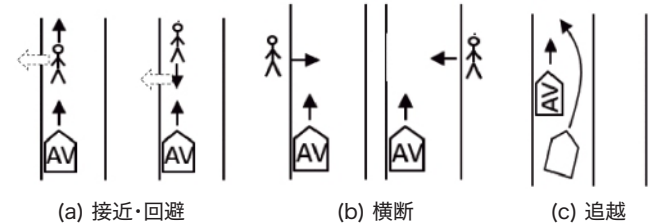


図2 交通参加者とのコミュニケーション形態の分類

(1) 接近・回避のケース

図2(a)に示されるように、自動運転サービス車両が交通参加者の進行方向の後方(あるいは前方)から接近してきたため、交通参加者が自動運転サービス車両のいずれか一方が他方の予定進路から横方向に移動して進路を譲る交通場面が該当する。このケースにおいては、次のような特徴を有する非効率なケースが観測されている。

- 自動運転サービス車両の接近に気づいた交通参加者が、自動運転サービス車両の進路上から横方向に移動して進路を譲ろうとしたが、横方向への移動が十分でない状態のため、自動運転サービス車両が進行を再開できず、乗務員が手動運転で介入して予定進路から外れて進行しているケース
- 自動運転サービス車両の接近に気づいて交通参加者が路肩に寄って回避しているが、横方向への移動が不十分のため、自動運転サービス車両の予定進路に干渉している。さらなる回避のために交通参加者が横方向への移動を何度か繰り返して、ようやく自動運転サービス車両が進路上を自動運転可能な状態となって自動運転を再開させているケース

これらの非効率なケースが生じる原因は、自動運転サービス車両の技術的な制約に依存しているが、交通参加者は、自動運転サービス車両が既定の走行軌跡上でしか自動運転で走行できないことを認識していない、

あるいはそのような知識を有していないことに起因している可能性が示唆される。

(2) 横断のケース

図2(b)に示されるように、自動運転サービス車両の予定進路と交通参加者の予定進路が交差してしまうため、その場で停止して、一方が他方に進路を譲る交通場面が該当する。交通参加者が歩行者である場合は、自動運転サービス車両が歩行者に進路を譲る交通場面がほとんどである。このケースにおいても、次のような特徴を有する非効率なケースが観測されている。

- 自動運転サービス車両は交通参加者の待機位置手前で停止して交通参加者に進路を譲っているが、交通参加者は自動運転サービス車両の停止を認識しても、すぐに横断しようとはせず、乗務員が手振りやアイコンタクトなどの合図を行った後、あるいは特定の時間経過の後、横断を開始しているケース

このような非効率なケースが生じる原因としては、自動運転サービス車両が交通参加者に進路を譲ろうとしているのか、どのような意図を表明しているのかを交通参加者自身が判断できず、乗務員からの手振りやアイコンタクトなどの実施がなければ、交通参加者が自動運転サービス車両側からの譲りや発進などの意図を適切に認識・判断することができない可能性が示唆される。

(3) 追越のケース

図2(c)に示されるように、低速走行の自動運転サービス車両の後方から他ドライバ（以降、後続ドライバ）が接近・追従した後に、その自動運転サービス車両を追い越す交通場面が該当する。このケースは比較的多く観測されており、またこのケースにおいては、次のような特徴を有する不安全なケースが観測されている。

- 低速走行の自動運転サービス車両を追い越す際に、後続ドライバが対向車線を十分に確認しない状態のまま、あるいは対向車が存在しているにもかかわらず、追い越しを開始して、追い越しのための右側部分はみ出し通行時に対向車とニアミスしているケース
- 低速走行の自動運転サービス車両の後方に複数の他ドライバが接近・追従している状況下で、1番目の後続ドライバの追い越し開始に合わせて、2番目以降の後続ドライバも追い越しを開始しているが、2番目以降の後続ドライバは対向車線を十分に確認しない状態のまま、あるいは対向車

が存在しているにもかかわらず、追い越しを開始して、追い越しのための右側部分はみ出し通行時に対向車とニアミスしているケース

これらの不安全なケースが生じる原因としては、自動運転サービス車両であることよりも、低速走行の車両の後方で追従走行を継続していることに起因していると考えられるが、低速走行での運用といった現在の自動運転サービス車両が抱える技術的な制約によって誘発される不安全なケースとして捉えることもできる。その一方で、低速走行の自動運転サービス車両が後続ドライバに進路を譲るためのコミュニケーションを方向指示器と車両挙動の組合せで実施した場合に、左折意図と譲り意図を後続ドライバに混同させてしまう可能性が示唆されている⁽¹⁾。

3 低速走行の自動運転移動・物流サービス車両のコミュニケーション方法の検討

“中山間地域における道の駅等を拠点とした自動運転サービス実証実験”でのドライブレコーダの映像データ分析の結果、低速走行の自動運転サービス車両の技術的制約と自動運転サービス車両に対する周囲交通参加者の行動の特徴に基づいて、コミュニケーションのユースケースの網羅性について配慮しつつ、特に不安全や非効率なコミュニケーションを改善・支援する必要があるユースケースとして、接近・回避ケース、横断ケース、追越ケースの3種類が抽出されている。これらのユースケースに対するコミュニケーション方法の候補として、SIP第1期の成果⁽³⁾として車両挙動（停止位置、減速挙動）、外向けHMIに加え、既に実証実験地域の一部にて設置されている路面標示や音声提示などの方法も追加して、導入時に見込まれるコミュニケーション効果の机上検討ならびに実験検討を進めている。

4 VR実験による歩行者とのコミュニケーション検討

4.1. 単路部での横断ケースを対象にした歩行者とのコミュニケーション実験

単路部における非効率な横断ケースを対象にしたコミュニケーションのユースケースを取り上げて、HMD(Head-Mounted Display)とVR(Virtual Reality)環境を利用した実験を実施して歩行者の横断判断・心理面に与える影響を分析・評価し、単路部での横断ケー

スにおける周囲交通参加者とのコミュニケーション方法の設計推奨等を検討している。

(1) 実験方法

道の駅を拠点とする周辺地域の住宅路を想定した道路環境(図3参照)を設定し、歩行者役の被験者が住宅路を横断しようとする際に自動運転サービス車両が接近してくる交通場面を体験させて、自動運転サービス車両の停止位置や減速度、外向けHMIによる意図や状態の伝達(図4参照)などの要因が歩行者の横断判断や心理面に及ぼす影響などについて検討している。



図3 道の駅を拠点とする周辺地域の住宅路のVR環境



図4 外向けHMIによる意図・状態の伝達

(2) 実験結果

自動運転サービス車両から歩行者に譲り意図を伝達するためのコミュニケーション方法として、歩行者の横断判断に影響する要因は、自動運転サービス車両の車両挙動が主であり、車両挙動のみを手掛かりに判断しづらい場合に外向けHMIの実装が早い段階での横断判断を可能にすることが確認されているが、外向けHMIの運用に関しては、歩行者の過信などの影響も考慮して総合的に判断する必要があること、バスなどの大きな車両外観を伴う自動運転サービス車両の場合は、歩行者との距離が長い場合でも横断判断時に不安感を誘発する一方で、外向けHMIの実装が不安感の低減に期待できることなどの結果が得られている。

4.2. 駐車エリアでの横断ケースを対象にした歩行者とのコミュニケーション実験

駐車エリアにおける非効率な横断ケースを対象にしたコミュニケーションのユースケースを取り上げて、HMDとVR環境を利用した実験を実施して歩行者の

横断判断・心理面に与える影響を分析・評価し、駐車エリアでの横断ケースにおける周囲交通参加者とのコミュニケーション方法の設計推奨等を検討している。

(1) 実験方法

道の駅の駐車エリアを想定した道路環境(図5参照)を設定し、歩行者役の被験者が駐車車両から降車して道の駅建物入口まで駐車エリア内を歩行して、駐車区画外の通路部を横断しようとする際に、自動運転サービス車両が接近してくる交通場面を体験させて、自動運転サービス車両の停止位置や減速度、外向けHMIによる意図や状態の伝達などコミュニケーション方法の違いが歩行者の横断判断や心理面に及ぼす影響などについて検討している。



図5 道の駅の駐車エリアのVR環境

(2) 実験結果

駐車エリアでは、単路部と比較して、交通参加者の通行区分や優先権が明確でないなどの特徴が挙げられる。そのような状況において、自動運転サービス車両から歩行者に譲り意図を伝達するためのコミュニケーション方法として、歩行者の横断判断に影響する要因は、主として自動運転車の停車位置であるが、それに加えて、車両挙動のみを手掛かりに判断しづらい場合には外向けHMIの実装が早い段階での横断判断を可能にすることなど、単路部の場合と同様な結果が確認されている。自動運転サービス車両から歩行者に譲り意図を表明するために、停止位置と外向けHMIを組合せてコミュニケーションを行う際、歩行者との距離が長い場合に、歩行者はそのコミュニケーションが誰に向けられたものなのかが判断しづらく、横断判断時の不安感などを誘発する可能性があることが示唆されている。

4.3. 単路部での接近・回避ケースを対象にした歩行者とのコミュニケーション実験

単路部における非効率な接近・回避ケースを対象にしたコミュニケーションのユースケースを取り上げて、HMDとVR環境を利用した実験を実施して歩行者の横断判断・心理面に与える影響を分析・評価し、単路

部での接近・回避ケースにおける周辺交通参加者とのコミュニケーション方法の設計推奨等を検討している。

(1) 実験方法

道の駅を拠点とする周辺地域の単路部を想定した道路環境(図6参照)を設定し、歩行者役の被験者が単路部の左側を道路に沿って歩行している際に、後方から自動運転サービス車両が接近・停止、被験者は後方に振り返って、自動運転サービス車両の状態を視認する交通場面を体験させて、外向けHMIや路面標示の実装(図7参照)などの要因が歩行者の認識や回避判断、行動、心理面に及ぼす影響などについて検討している。



図6 道の駅の周辺地域における単路部のVR環境



図7 外向けHMIの装備と路面標示の敷設

(2) 実験結果

歩行者の後方から接近する自動運転サービス車両とのコミュニケーションにおいて、“とまります”など外向けHMIによる車両自体の行動伝達のみでは、自動運転サービス車両の予定進路から回避しなければならない状況を歩行者に認識させることが難しいが、路面標示の実装により予定進路と回避の必要性の認識を容易にさせる結果が得られている。路面標示のような路側の設置が困難な場合への対応として、引き続き、音声提示の活用や外向けHMIとの組合せなどの検討を進めている。

5 DS実験による後続ドライバとのコミュニケーション検討

単路部における不安全的な追越ケースを対象にしたコミュニケーションのユースケースを取り上げて、

DS(Driving Simulator)環境を利用した実験を実施して後続ドライバの認識・追越判断・心理面に与える影響を評価し、単路部での追越ケースにおける後続ドライバとのコミュニケーション方法の設計推奨等を検討している。

(1) 実験方法

道の駅を拠点とする周辺地域の単路部を想定した道路環境を設定し、後続ドライバ役の被験者が周辺地域の道路を走行中に自動運転サービス車両の後続に追従する交通場面を体験させて、自動運転サービス車両の車両挙動や灯火器類操作、外向けHMIによる意図や状態の伝達(図8参照)などの要因が後続ドライバの認識や追越判断、心理面に及ぼす影響などについて検討している。



図8 外向けHMIによる意図・状態の伝達

(2) 実験結果

自動運転サービス車両から後続ドライバへの譲り意図を伝達する際、左ウィンカと減速挙動を利用した譲り挙動を後続ドライバが繰り返し経験すると、自動運転車の左折時合図と譲り挙動を混同したり誤解を招いたりする可能性が確認されている。また後続ドライバに対して外向けHMIを利用して譲り意図を表明すると、そのような混同や誤解を回避できる可能性が示唆されており、引き続き、検討を進めている。

【参考文献】

- (1) SIP第2期自動運転(システムとサービスの拡張)
平成31年/令和元年度研究開発:自動運転の高度化に則したHMI及び安全教育方法に関する調査研究,
<https://www.sip-adus.go.jp/rd/rddata/rd03/211.pdf>,
(参照2021.08.06)
- (2) 国土交通省道路局:中山間地域における長期の自動運転実証実験を開始~自動運転に対応した道路空間の基準等の策定に向けて~,
<https://www.mlit.go.jp/common/001259382.pdf>,
(参照 2021.03.31)
- (3) SIP第1期自動走行システム成果報告:HMI等のヒューマンファクタに関するデータ収集によるガイドライン策定
https://www.sip-adus.go.jp/rd/rddata/rd01_more/121.pdf,
(参照2021.08.06)