

## ③ 新たなサイバー攻撃手法と対策技術に関する調査研究

### Research of New Cyberattack Techniques and Countermeasure Technologies

奥山謙, 和栗直英, 韓欣一, 今川勇生 (PwCコンサルティング合同会社)  
Ken Okuyama, Naohide Waguri, Shinichi Kan, Yuki Imagawa (PwC Consulting LLC)

(概要) コネクテッドカー及び自動走行システムが発展・普及し、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が外部ネットワークを介して自動車に送信される。このような状況はサイバーセキュリティ問題を引き起こす要因となっている。また、道路運送車両の保安基準において、サイバーセキュリティ及びソフトウェアアップデートに係る協定規則であるUN-R155/R156を導入していることから、法規の観点からも自動車に対するサイバー攻撃への対策が必要となっている。このような課題を解決するために、本研究では、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した。本年度は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・蓄積方法の検討及びハニーポット等による収集実験を実施している。

キーワード：IDS (侵入検知システム), ハニーポット, 脅威情報, STIX/TAXII, S-BOM (ソフトウェア部品表)

#### 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 (SIP) 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及び目的、目標に合致する形で、「IDS評価手法とガイドライン策定」及び「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～2023年2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ンとして活用いただくための、「IDS評価ガイドライン」の策定及び業界団体へのハンドオーバーを目標とした。また、車両の出荷後セキュリティ品質の底上げを目的とし、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。

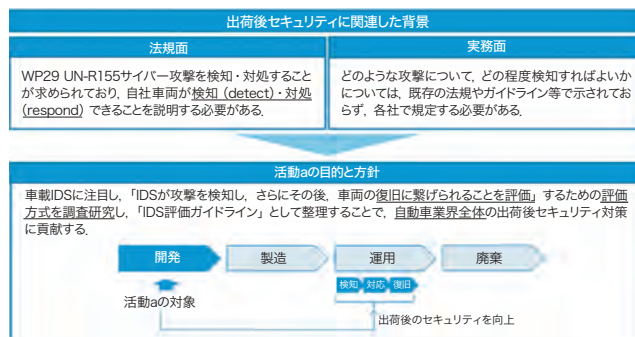


図1 「IDS評価ガイドラインの策定」の目的と方針

#### 2.1. 基本テストケースの導出

車載IDSの選定・検証段階で評価するべき観点を整理するため、過去に発表された攻撃事例を分析しセキュリティイベントを導出した。セキュリティイベントの中で、IDSが最低限検知するべきものを選別し、それ

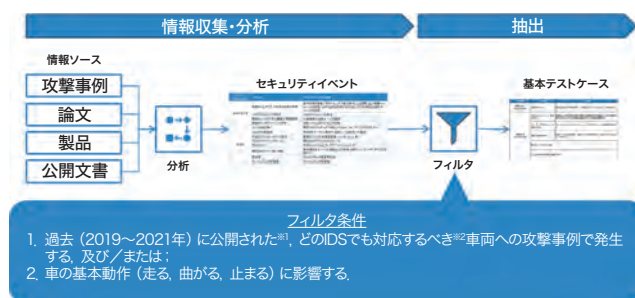


図2 基本テストケースの導出方法

らを検知できることを基本テストケースとしてまとめた。(図2)

## 2.2. 基本テストケース検証環境

基本テストケースをもとに図3に示すと通りの3種類の検証環境を検討した。本研究では準備コストを考慮し、シミュレーション環境(図4)もしくは、テストベッド環境(図5)のいずれかで行うことを前提としたテスト手順を検討した。

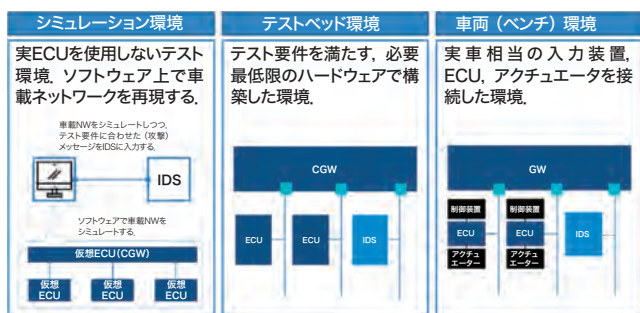


図3 IDSテスト環境の種類

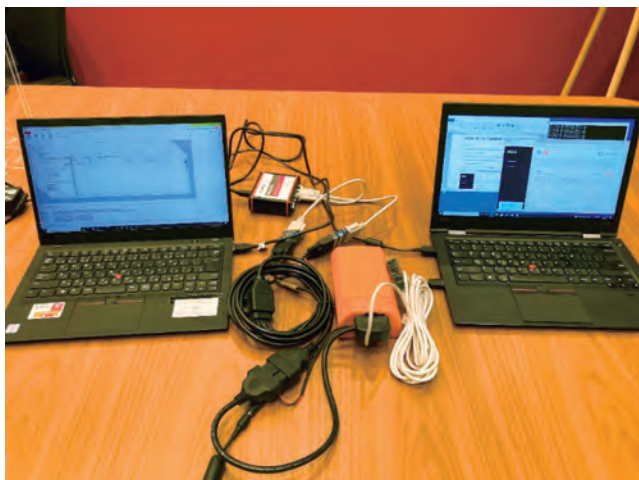


図4 シミュレーション環境



図5 テストベッド環境

## 2.3. IDS実機テストによるテストケースの検証

IDS実機テストの目的は、基本テストケースのテスト方法の妥当性(あらかじめ定めたテスト方法でテストができるか)を検証することである。

このため、OEM 1社(以下、OEM A)より、基本テストケースのテストの実施に必要な車載ネットワークの通信データとECUをご提供いただいた。さらに、イータス株式会社とArilou Information Security Technologies Ltd.に、各社のIDSをOEM Aの特定車種用に適合作業を施したIDSをご提供いただき、基本テストケースのテスト手順に従ってテストを実施し、テスト結果が期待値と一致するかを確認した。

## 2.4. 検証結果

シミュレーション環境及びテストベッド環境で、2社のIDSについて、テスト対象とした全てのテスト観点のテスト方法で示す手順を実施し、手順に誤りがないこと、期待どおりの動作を確認することができた。

## 2.5. 成果活用に向けた取組

IDS評価ガイドライン移管に向け、移管先であるJASPAR(Japan Automotive Software Platform and Architecture)と技術検討会を実施した。また、移管直前まで移管先からのフィードバックに対応し、IDS評価ガイドラインの最終化を行い、事務手続き等も含めて、2022年8月に移管完了した。

# 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年に業界団体へ運用移管することを目標としている。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動が行われている。<sup>(1)</sup>

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. 情報収集・蓄積の基本仕様検討

自動車業界の各組織が、より効率的かつプロアクティブに脅威情報を得るために、公開情報の収集以外の収集方法についてIT領域での実施事例を参考に実証実験を行った。本活動では、ハニーポット<sup>1</sup>及びプレイグラウンド (CTF<sup>2</sup>の形式の1つ) に着目し、これらの手法が自動車領域にも応用可能か検討している。

#### 3.1.1. ハニーポット実証実験

IT領域で用いられているハニーポットの自動車版を作成し、実証実験を行った。具体的には、広域スキャンで発見可能なアフターマーケット製品を調査し、該当する製品でハニーポットのプロトタイプを開発し、2021年1月下旬よりサイバー攻撃の観測実験を開始した。自動車ハニーポットの概要を図6に示す。



図6 自動車ハニーポットの概要

現状の観測結果としては、IoT製品同様にtelnetに

対してIDと弱いパスワードを送り付ける、IoTマルウェア (Mirai等) の特徴と一致するアクティビティを多数観測しており、これは、同マルウェアに感染した機器からの自動化攻撃で、当該ハニーポットを車載機器として認識したうえでの攻撃ではないものと考えられる。

ハニーポット実証実験の一環として、効率的な機器探索の方法論についても並行して検討を進めており、Web検索エンジンを用いてキーワード検索を行い、車載機器製品のWebサイトを検索するアプローチと、車載機器関連のキーワードを直接Censys<sup>3</sup>で検索するアプローチの2つを提唱した。

2021年度までのハニーポット実証実験では、車載機器の中でもアフターマーケットの製品を模したハニーポットをスコープとしていたが、2022年度はコネクテッドシステム全体を模したハニーポットによる脅威情報収集の方法論も含めて検討している。

#### 3.1.2. プレイグラウンド実験

コネクテッドシステムにおいて、車両を狙ったサイバー攻撃手法や、車両を狙った攻撃であると判断するための兆候や形跡を調査するため、プレイグラウンドを実施した。本プレイグラウンドでは、特定のフラグを用意せず、システムの攻略をゴールとして脆弱性を報告する形式のハッキングコンテストである。

プレイグラウンドでは、図7に示すような一般的な

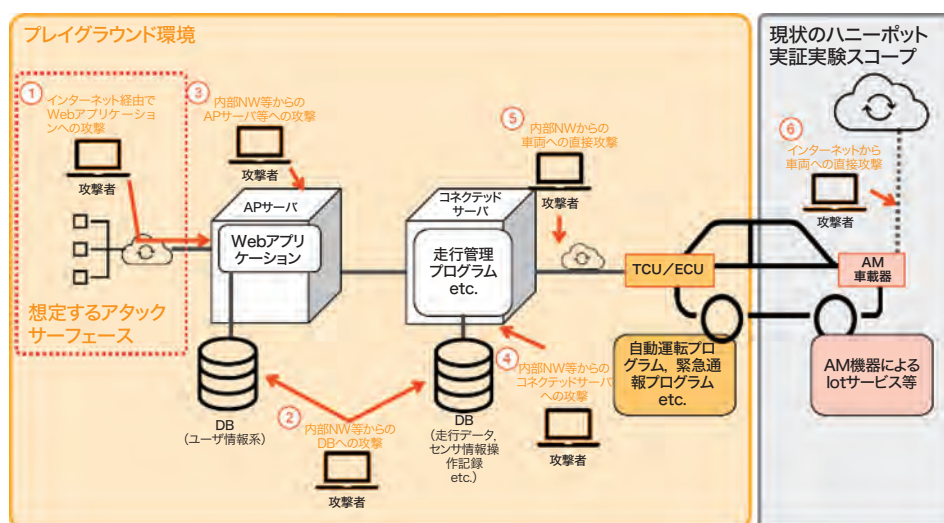


図7 プレイグラウンド環境

- 1 攻撃観測用機器。攻撃を受けることを意図したシステムをインターネット上に公開し、攻撃者のアクセス情報や攻撃手法を収集・観測する方法。
- 2 システムを模した環境に対し、ホワイトハッカーに意図的に攻撃を仕掛けてもらい、攻撃可否やその手法等の情報を収集する方法。攻撃の目標 (Flag) を設定し得点を争う方式が広く知られている。
- 3 Censys : IoT検索エンジン。インターネットに公開状態にある機器を検索することが可能。

## ③新たなサイバー攻撃手法と対策技術に関する調査研究

コネクテッドシステムを模した環境を用意した。コネクテッドシステムには様々な攻撃サーフェスが存在するが、本プレイグラウンドにおける攻撃サーフェスは、利用者向けに公開されているユーザ用のアプリケーションまたはWebポータルサイトとした。

## 3.2. 脅威情報記述・共有方法

効率的な脅威情報の収集及び共有を行うためには、取り扱う脅威情報が一定のレベルで構造化され、共有方法が定式化されている必要がある。また、図8に示すとおり、車両のコネクテッド化及び自動化に伴い、既存のWeb/IT技術と連携する場面が増えており、車両とITシステムが融合したコネクテッドシステムにおいて効率的に脅威情報を活用する仕組みとして、IT領域で最も普及しており、記載できる情報の種類が多いSTIX/TAXII<sup>4</sup>に焦点を当てて調査研究を行っている。



図8 自動車領域とIT領域の融合

## 3.3. 脅威情報の初動対応への活用

脅威情報を管理し、初動対応に活かすためには、日々発見・報告される情報が管理対象の車両またはシステムに関連するかの該否判断をすることが求められる。特に、オープンソースソフトウェア（以下、OSS）を活用している場合、大量の脆弱性情報が報告されたり、頻繁にアップデートが行われるため常に関連情報を更新しバージョンを把握する必要があると、該否判断を難しくする要因が増える。これらの課題への対応策としてソフトウェアに含まれるコンポーネントを管理するソフトウェア部品表（S-BOM）が注目されている。S-BOMは、各社内で作成し脆弱性管理に用いることもできるが、サプライチェーン全体で活用することで、より網羅的で効率的な初動対応を行うことができる。S-BOMを作成し、情報共有システム等の情報源と連携することで、自社の車両やシステムの脆弱性の有無

を把握できるだけでなく、インシデント発生時に関連する脆弱性及び初動対応に必要な情報にスムーズにアクセスできる。（図9）

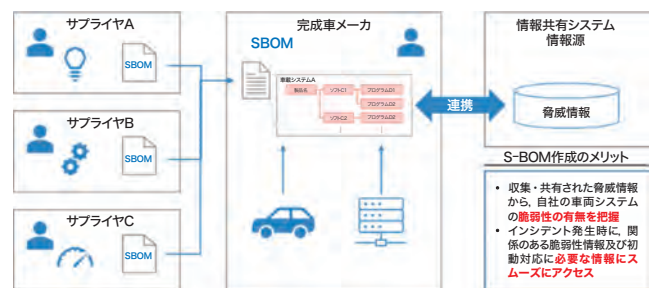


図9 初動対応のためのS-BOMの活用

## 3.4. 成果活用に向けた取組

本テーマでは、自動車領域における脅威情報を蓄積し、セキュリティインシデントの初動対応支援に活きる「情報共有システムの基本仕様書」と、ハニーポット及びプレイグラウンドの実証実験で得られたコネクテッドシステムに対する攻撃手法・技術に関する知見や各実証実験のノウハウを取りまとめた「情報収集手引き」の2点を成果物とする。成果物の移管に向け、移管先であるJ-Auto-ISAC (Japan Automotive ISAC) との技術検討会を継続的に実施し、移管について了承を得ている。

自動車領域におけるサイバー攻撃に対処していくためには、個社ごとの対策だけでなく、サプライチェーン全体にわたるセキュリティ対策が重要となる。そのために、成果物をより実務展開しやすいものとするため、成果物の移管先であるJ-Auto-ISACにおいて現場レベルで検討・調査を行っているチームと意見交換会を適宜実施した。

具体的な移管時期は2022年12月を予定しており、移管後はJ-Auto-ISACと実務展開に向けた協議を続け、追加活動に対応する予定である。

## 4 本事業の最終成果

## 4.1. IDS評価ガイドライン策定

本テーマでは、主にIDS開発の立ち上げに課題があるOEM/サプライヤーの車載IDS開発の立ち上げの加速に寄与することを目的として「IDS評価ガイドライン」を作成した。

4 STIX：脅威情報の記述のために開発された標準化言語。TAXII：脅威情報を共有するために規定された手順。

「基本テストケース」においては、OEM及びIDSベンダ2社の協力のもと、実機テストを行うことによるテストケースの手順や期待値の確認を行い、その妥当性を評価した。JASPARへの移管も完了している。

車載機器向けのIDSは、今後、新たなサイバー攻撃に対応するうえで、検知機能を提供する代表的な技術、製品となるが、自動車業界全体としてこの技術が同じレベルで検討が進んでいるわけではないことが一部OEM個社へのヒアリングを通じてわかった。本事業では、オフ・ザ・シェルフ型のネットワーク監視型IDSがCAN通信を対象プロトコルとした場合を評価対象としている。そして、IDSの主機能である検知機能を中心としたテスト、評価手法を主なコンテンツとしている。今後は、本IDS評価ガイドラインを参考にして、OEM／サプライヤが適切なIDSを導入することを期待する。

#### 4.2. 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、近年発展の著しいコネクテッドカー及び自動走行システムにおいて、セキュリティインシデントを未然に防ぎ、攻撃を受けた場合においても被害を最小限にすることを目的に、「情報共有システムの基本仕様書」及びプロアクティブな脅威情報収集について「情報収集手引き」を作成する。

本テーマの成果物は、コネクテッドカーが普及し、新たなサイバー攻撃手法が継続的に報告されている昨今の自動車業界における情報共有活動を推進し、初動対応能力の強化に寄与するものである。提案した仕様書をもとに共有システムを開発・導入し、また、手引きを参考に公開情報のみならずプロアクティブな情報収集を行うことを期待する。また、これら共有システムや情報収集の取組については継続的な運用と見直しを行うことで自動車業界により適応したものへ改善し続けることも期待する。

#### 4.3. おわりに

自動車のサイバーセキュリティの確保は、自動車の安全（セーフティ）にも影響を与えることも考えられるため、最低限満たすべきセキュリティ水準や業界共通の脅威については日本の業界全体の協調領域とする、あるいは積極的に共有することが適切であり、これに

よりコネクテッドサービスの開発や運用効率の改善を図ることも可能となり、日本企業の国際的な競争力維持にも繋がる。また、定められたセキュリティ対策や情報共有のための仕組みは、国内の業界における共有にとどめるのではなく、昨今の自動車セキュリティ開発における国際標準・標準規格に提言するなど、日本企業の強みとして活用できるよう、戦略的に標準化団体に働きかけることも重要である。

また、本事業の最終成果に関連して、今後更なる研究や注力する分野について述べる。「IDS評価ガイドライン」については、オフ・ザ・シェルフ型以外のIDSやEthernet等の別のプロトコル、また、現時点では一般化できない性能をはじめとした非機能要件のテスト、評価手法などを評価対象としたり、IPS（不正侵入防止システム）に関連するガイドラインを作成したりすることが考えられる。

「情報共有システムの基本仕様書」と「情報収集手引き」については、海外や他業界の方法論、新たな技術のキャッチアップや活用に努めるとともに、情報収集だけでなく、収集した情報の分析方法や精度や確度を高める研究も継続的に行う必要がある。また、これまで各OEM／サプライヤが独自に調査・対応してきたコネクテッドサービス（サーバやプラットフォーム等）側のセキュリティについても新たな協調領域となる可能性が考えられるため、今後の研究・注力分野になると考えられる。

以上を踏まえ、情報セキュリティ活動は、自動走行システム自体の発展に重要な役割を持つものであり、業界のセキュリティ活動の発展に寄与することを期待するものである。

#### 【参考文献】

- (1) 戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）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>, (参照 2022.05.31)

#### 【本件問合せ先】

PwC コンサルティング合同会社 テクノロジー事業部, 〒100-0004 東京都千代田区大手町1丁目2-1, 担当: 奥山謙 (080-4426-1658)

## ④自動運転の高度化に則した安全教育方法に関する調査研究

### Research of Education Methods for Advanced Automated Driving Systems

伊藤誠, 周慧萍 (筑波大学), 合田美子, 戸田真志 (熊本大学), 新目真紀, 半田純子 (職業能力開発総合大学校)  
Makoto Itoh, Huiping Zhou (University of Tsukuba), Yoshiko Goda, Masashi Toda (Kumamoto University),  
Maki Arame, Junko Handa (Polytechnic University of Japan)

(概要) SIP第2期自動運転(システムとサービスの拡張)の“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(課題C)”の取組を概説する。課題Cでは、主な研究目的に基づき、教育方法の深化に関して、(1)個人特性を踏まえた教育方法の提案、(2)動機付け手法の提案、(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きた。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。

キーワード: 教育, 訓練, 動機付け, 知識, 体験

#### 1 はじめに

自動運転システムをユーザが安全に活用するためには、システムの機能、ユーザ(ドライバ)の役割、置かれている状況等に応じて、なすべき行動をユーザが適宜適切に判断して行動に移せなければならない。車内に搭載されるヒューマンマシンインタフェース(HMI)は、このユーザの判断を支援するべきものであり、理想的には、ユーザの知識の如何によらず直感的に適切な判断ができるように支援がなされることが望まれる。しかし、ユーザの適切な判断、行為の実行を保証できる理想的なHMIは残念ながらまだ実現できていないというべきであり、もし技術的に実現可能となったとしても、コスト抑制などのために理想的なHMIの利用ができないということもありうる。

そこで、必要な知識やスキルをユーザに提供する、教育や訓練の在り方についても検討が必要であるといえる。本研究開発は、自動運転の安全な利用に関する教育についての取組である。

#### 2 個人特性を踏まえた教育方法の提案

教育を効率的に行うためには、学習スタイルなど、

教育を受ける側の特性を適切に考慮に入れることが必要である。本研究開発では、自動運転という新しいことを学ぶということを考慮にいれ、学習スタイルに加え、パーソナリティ特性の個人差変数の一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考察した。

具体的には、SIP第1期(平成30年度2月)にインターネットで実施した3,240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。<sup>(1)</sup>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。

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と検討するとともに、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を開発することができた。<sup>(2)(3)</sup>さらに、学習スタイルとキャリアレジリエンスの違いにより、より有効な教材が異なりうることを明らかにした。これらのことから、教育場面において

余裕がある場合には、学習スタイルやキャリアレジリエンスを短縮版尺度で簡易に調べ、その結果に応じてより適切な教材を提供して学習させるというアダプティブラーニングが実現可能であるという見通しを得ることができた。

### 3 動機付け手法に関する提案

安全教育の対象は、交通利用者全てとなり、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、動機付けARCSモデルを援用し、安全教育のための動機付け動画を2種（感情移入しやすいと期待されるストーリーを中心に示した「ナラティブ」、客観的事実を中心とした「ファクトベース」）開発した。形成的評価の結果、2種の動画では、同等レベルの動機付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付け方法を検討するために、開発した2種類の動機付け動画を用い、2,790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付け動画の有効性について検討した。<sup>(4)</sup>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付け動画は、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ほど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付け動画の利用により、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付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。

さらに、動機付けを高めるための集合研修の方法論についても検討した。オンラインでの研修を設計し、実施したところ、研修によって、自動運転システムに関する知識が向上し、態度変容を促進させられることを確認できた。

### 4 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。研究用として、3章で述べた動機付け動画2種、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。このように、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、教材を組み合わせる学習することが可能となる。さらに、Webベースのリモート教材として、運転交代場面を体験できる簡易ドライビングシミュレーションシステムも開発した。これらの教材については、Web調査や、5章で述べるシミュレータを用いた検証実験で効果を確認している。

また、研究用に開発したもののうち、動機付け動画、一般知識の動画教材については、実使用を想定した教材サンプルとして公表する予定である。

### 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た。自動運転を利用する、あるいは自動運転車とインタラクション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、Webサイトなどをはじめとして各種教育の機会がありうる。なお、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<sup>(5)</sup>によると、一般には自動運転に関する知識をほぼ全く持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. 一般知識についてのシミュレータによる検証実験

まず、2章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)。SIP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2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<sup>(6)</sup>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Request to Intervene (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。

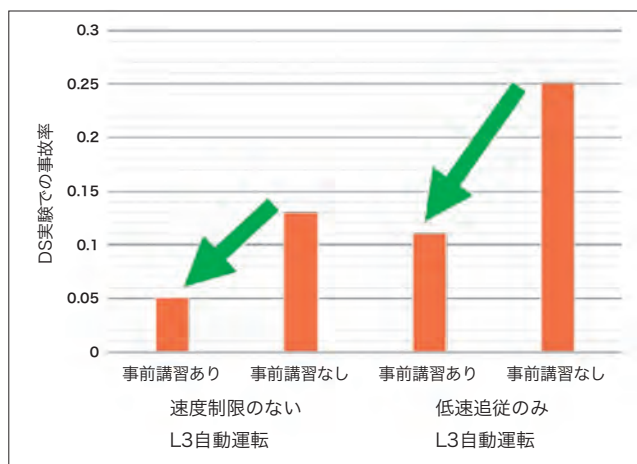


図1 実験結果の例

つづいて、4章で開発した動画教材を、実際の教育にかけられるものとして想定される時間に短くまとめ直したものをを用いて検証実験を行った(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理解の促進を図る必要がある。

そこで、理解とその定着を促進するために、必要な説明についてはしっかり時間をかけて説明するように教材を編成しなおしたところ、多くのケースで運転交代に適切に対応できることが確認された。さらに、一般的な説明の中にあえて具体的な特定のシステムを含めること、運転交代の体験を簡易にでも行うこと、の2点についても検討したところ、具体的な特定のシステムを事例として含めると、検証実験においてより良い結果が得られることが確認された。また、運転交代の体験の効果も、統計的に有意ではなかったが、より良い方向に作用する可能性が示された。

## 5.3. 実際にシステムを利用する際の教育・訓練の在り方についての検証実験

レベル3という意味では同じ自動運転であっても、速度に制限がある・ない、というように、車種やシステムによって機能やその限界、運転交代が必要な場面などは異なる。したがって、実際に特定のシステムを利用する際には、そのシステム固有の知識を知り、運転交代が必要な場面で適切に対応できるスキルを身につけなければならない。

ここで重要な論点の一つが、体験の効果がどれほどであるか、ということである。SIP第1期の実験結果<sup>(7)(8)</sup>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わかった。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。<sup>(9)</sup>

これらのことから、具体的に運転交代場面をあらかじめ経験させることは重要であると考えられる。多方、車両の売買などの際、契約の手続きなど煩雑な作業が必要な中、試乗体験に十分な時間を割くことができるとは限らない。むしろ、空いた時間に、ユーザが自由に自習できる機会を持つことが有効であろうと考えられる。そこで、4章で開発したWebベースのシステムを利用して、後日実際に自身が利用する車両と同じHMIを用い、実際に起こりうる運転交代場面を経験させることの効果について検証実験を行った。その結果、事前に運転交代場面を経験することによって実際の運転交代において早い対応行動を行えるようになるという結果がえられた。

なお、Webベースの学習では、聴講すべき動画教材の視聴を端折るケースも散見され、結果として理解が不十分と思われる事例も見られたことから、視聴を終えないと先に進めないなどの工夫が必要であることも確認された。

## 6 社会実装

一連の研究開発によって得られた成果は、本報告書としてまとめるにとどまらず、社会実装に活用されなければならない。本研究開発に関しては、教育などを企画する方に向けて、企画立案、教材開発に資する知見を整理した「解説書」としてまとめている。また、4章で述べたように、動機付け動画、一般知識の動画教材についても、サンプルとして公表するべく準備を進めているところである。ぜひ、「解説書」などをご覧いただき、参考にしていただければ幸いである。

なお、本解説書をまとめた以降も、これまでの研究開発の結果得られているデータの分析を進めており、更なる知見が得られつつあることから、機会をとらえて適宜改訂をしていければと思っている。

### 【参考文献】

- (1) 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.

- (2) 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.
- (3) Maki Arame, Junko Handa, Yoshiko Goda, Masashi Toda, Makoto Itoh and Satoshi Kitazaki: Development of a Short-Form Career Resilience Inventory for Online learning -Verification based on analysis results of online learning for automated driving-, IEEE TALE 2022 (under review)
- (4) 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.
- (5) 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)
- (6) 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.
- (7) 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](https://www.sip-adus.go.jp/rd/rddata/rd01_more/121.pdf), (参照 2021.06.29)
- (8) 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.
- (9) 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.

【本件問合せ先】.....  
筑波大学 システム情報系, 〒305-8573 茨城県つくば市天王台1-1-1,  
029-853-5502, 担当: 伊藤誠(教授, itoh.makoto.ge@u.tsukuba.ac.jp)

## ⑤ 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

### Research on Communication between Low-Speed Automated Transportation and Logistics Services Vehicles and Surrounding Traffic Participants

大門樹, 對間昌宏, Lee Jieun, 古谷知之 (学校法人慶應義塾 慶應義塾大学)

Tatsuru Daimon, Masahiro Taima, Jieun Lee, Tomoyuki Furutani (Keio University)

(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、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との間に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た。また実験的検討に基づいて抽出された外向けHMIによるコミュニケーション方法を実証実験にて検証し、コミュニケーション方法の設計推奨の効果を確認した。

キーワード：コミュニケーション、意図表明、外向けHMI（ヒューマンマシンインタフェース）、車両挙動、周辺交通参加者

### 1 はじめに

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、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いる。実証実験地域などでは、低速走行の自動運転移動・物流サービス車両（以下、自動運転サービス車両）の運行に際して、安全上、必要に応じて手動介入する乗務員が同乗しているが、今後の技術的進展により、乗務員が運転操作に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。一方、周辺交通参加者に対して安全確保や交通円滑化を図る目的で従来から行われているドライバの身振りやアイコンタクトなどのコミュニケーションは、周辺交通参加者に車両の意図や状態の理解、自身の行動判断を容易にするとともに安心感の向上をもたらしてい

る。しかしながら、乗務員が関与しない自動運転サービス車両の運行形態を想定した場合には、乗務員による積極的なコミュニケーションの実施は見込めない状況となる。これまで、自動運転サービス車両と周辺交通参加者の安全安心で円滑なコミュニケーションの支援・実現を可能とする設計推奨等の抽出・提案を目的とした研究開発<sup>(1)</sup>に取り組み、“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”<sup>(2)</sup>（以下、道の駅実証実験）との連携によるドライブレコーダ映像の分析から、自動運転サービス車両と周辺交通参加者との間に、図1に示される典型的な不安全・非効率なコミュニケーション形態を抽出した。<sup>(3)</sup>これらの典型的なケースを対象に、電磁誘導線上のみを12km/h以下で自動運転するゴルフカート（乗車定員6名）と周辺交通参加者とのコミュニケーション方法、外向けヒューマンマシンインタフェース（以下、外向けHMI）を含めた方法に焦点を当て、ヘッドマウントディスプレイを利用したバーチャルリアリティ環境での実験（VR実験）、ドライビングシミュレータを利用した実験（DS実験）、キャンパス等で実験車両を利用した構内道路実験を実施して、各ケースにおける

コミュニケーション方法を検討・提案した。さらに、道の駅実証実験との連携により、外向けHMIによるコミュニケーション方法について実証実験を実施しその効果を検証した。

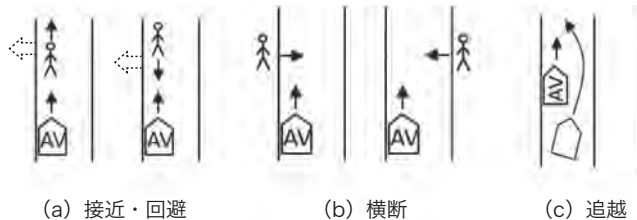


図1 交通参加者とのコミュニケーション形態の分類

## 2 接近・回避ケースを対象にしたコミュニケーション方法

接近・回避ケースでは、歩行者の背後から自動運転サービス車両が接近する場面において、車両の意図・意思や歩行者への依頼などの伝達、視覚提示や音声提示などの外向けHMIの検討を対象にしたVR実験によりコミュニケーション方法を検討した。

### 2.1. 外向けHMIの仕様

接近・回避ケースを対象に使用した外向けHMIは、図2に示されるように、車両の意図として「すすみます」、歩行者への依頼として「道をあけてください」を設定し、視覚提示以外に音声提示を新たに追加した。



図2 外向けHMIの仕様

### 2.2. 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、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という場면을体験

させた。視覚提示、音声提示の外向けHMIから車両の行動意図、歩行者への回避依頼などが伝達される際の歩行者の認識や回避行動などについて検討した。

### 2.3. 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対面後の回避行動は、図3に示されるように、外向けHMIを装備しない場合に、運行軌道上から回避しない、路肩に少し寄るなど不十分な回避となる結果が多く観測された一方で、外向けHMIからの提示により十分な回避に至る結果が多く確認された。

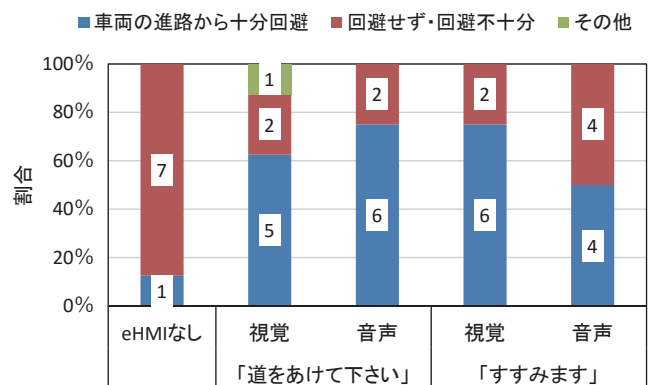


図3 初見における歩行者の回避行動

その他、自動運転サービス車両との対面後に運行軌道上から十分に回避した被験者を対象に対面から回避までに要した時間の分析では、音声提示によるどの提示でも対面から約5秒程度で回避が完了するのに対し、視覚提示では被験者によるばらつきが大きく、回避までの時間が長くなる傾向が確認された。実験終了後の内省報告では、自動運転サービス車両が電磁誘導線上から外れて自動運転できないことを被験者の多くが理解していないことが確認された。

外向けHMIを装備しない場合は、振り返って対面すると自動運転サービス車両が停止状態であるため、“何を訴えているのかわからない”といった指摘も多くあった。外向けHMIを装備した場合でも“自分が少し路肩に寄れば自動運転サービス車両が少し避けて通過するだろう”“「すすみます」だけでは回避行動を取るまでに至らない”“(「道をあけて下さい」は) 行動を強制されている、人前で注意されているように感じる”“(視覚提示は) 常に表示されているが、経験がなく、すぐに認識できない”などの回答も得られた。

以上の結果をまとめると、接近・回避ケースでは、音声提示と視覚提示の併用もしくは音声提示による外向け

HMIを利用して歩行者に回避依頼を伝達するコミュニケーション方法が推奨されるものと考えられる。

### 3 横断ケースを対象にしたコミュニケーション方法

横断ケースでは、これまで単路部や駐車エリアを対象にVR実験を通じて抽出された自動運転サービス車両の減速挙動と外向けHMIによるコミュニケーション方法について、また乗務員の乗車有無を含めて構内道路実験によりコミュニケーション方法を検討した。

#### 3.1. 実験車両、減速挙動及び外向けHMIの仕様

実験車両は、図4に示される自動運転可能なゴルフカートであり、道の駅実証実験と同様に、路面に埋設した電磁誘導線上を自動運転で走行可能な車両であった。外向けHMIとしてLEDパネルをフロントウィンドウ下方のダッシュボード上に設置し、実験車両から歩行者に伝達する内容として「お先にどうぞ」(歩行者への依頼)、「とまります」(車両の意図)、「自動運転中」(車両の制御状態)の3種類を設定した。横断ケースでの減速挙動は、図5に示されるように、12km/hで走行する実験車両の減速開始位置と停止位置に基づいて、通常減速、早期減速、早期停止の3種類を設定した。

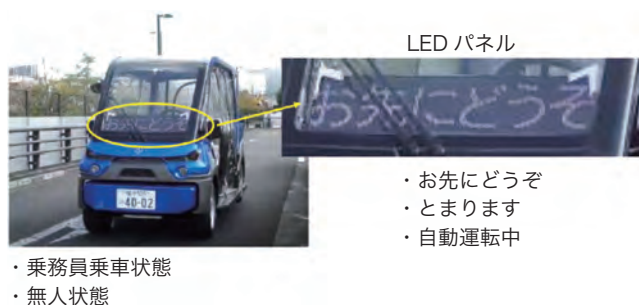


図4 実験車両と外向けHMIの仕様

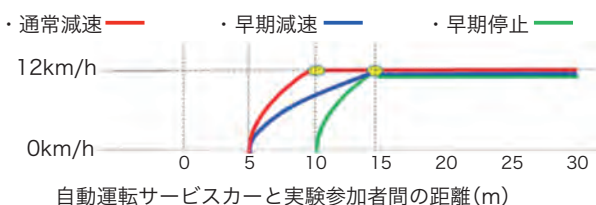


図5 減速挙動の種類

#### 3.2. 実験方法

道の駅を拠点とする周辺地域の横断歩道が少ない生活道路を想定して、比較的幅員の狭い構内道路に設定

した。路肩で横断待ちしている歩行者の道路右側、車両の上流方向から12km/hで接近する自動運転サービス車両の車両挙動や外向けHMI、乗務員の有無などの状況を被験者に観察させ、自動運転サービス車両からの譲り、横断行動などについて検討した。

#### 3.3. 実験結果

ここでは道の駅実証実験と同様な運行形態で乗務員が乗車する場合の結果を取り上げて検討する。実験車両の接近に対して横断開始を判断したタイミングの結果を図6に示す。横断開始を判断したタイミングは、外向けHMIが装備されない場合、停止して数秒後に横断開始が判断されたが、外向けHMIが装備されると、実験車両の停止とほぼ同時かそれよりも早く横断開始が判断される結果となった。特に早期減速ではより早いタイミングで横断開始の判断を行う被験者も確認され、特に「お先にどうぞ」では減速開始後、停止前に横断開始が判断される傾向も確認された。

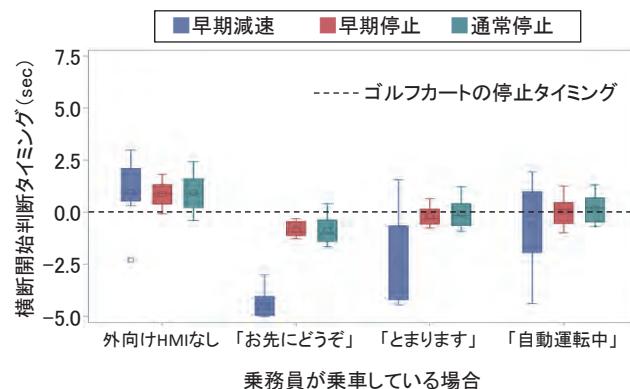


図6 乗務員が乗車する場合での横断開始判断

その他、横断開始の判断時における不安感は、外向けHMIを装備しない場合に、早期減速や早期停止では高く、逆に通常減速では低いこと、外向けHMIを装備した場合は早期停止の場合に不安感をより低減することなどが確認された。

以上の結果をまとめると、横断ケースでは、早期停止や通常停止などの減速挙動のもと、外向けHMIを利用して歩行者に停止意図や譲り意図を伝達するコミュニケーション方法が推奨されるものと考えられる。

### 4 追越ケースを対象にしたコミュニケーション方法

追越ケースでは、後続ドライバーが自動運転サービス

車両の後方から接近し追い越す場面を対象に、後続ドライバーの不安全行動を低減するコミュニケーション方法として、停止意図や譲り意図の直接的な伝達ではなく、車両の状態や種別、追越時の注意喚起などを伝達することで、後続ドライバーの認識や追越行動などに与える影響をDS実験により検討した。

#### 4.1. 道路環境及び外向けHMIの仕様

道路環境は中央線の種別に基づいて、表1に示されるように設定した。追越ケースを対象に使用した外向けHMIの仕様は、図7に示されるように、車両の状態や種別として「低速走行中／自動運転車」(1秒間隔で交互表示)、追越時の注意喚起として「追越注意」、比較として譲り意図を含めた「周囲に注意／お先にどうぞ」(1秒間隔で交互表示)の3種類を自動運転サービス車両の後部に設定した。

表1 中央線の種別に応じたコミュニケーション検討

道路環境	ゴルフカートから後続車への伝達目的	ゴルフカートの車両状態・挙動
黄色中央線	・ 追越の抑制 ・ 後続交通の円滑対応	・ 走行状態を維持 ・ 減速後に停止
白色中央線	・ 追越時の注意喚起 ・ 後続交通の円滑対応	・ 走行状態を維持 ・ 走行状態を維持

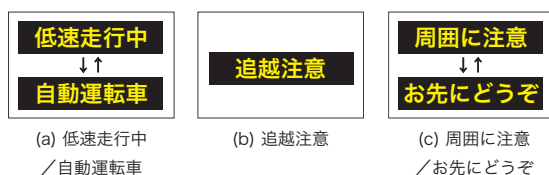


図7 外向けHMIの仕様

#### 4.2. 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、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方に接近、追従する場面を体験させて、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の有無が後続ドライバーの認識や追越行動などに及ぼす影響を検討した。DSには非接触型視線計測装置を設置し、運転中の被験者の視線を計測し、自動運転サービス車両への接近・追従から追越開始、追越終了までの視認行動を分析した。

#### 4.3. 実験結果

ここでは白色中央線を対象にした結果を取り上げて検討する。自動運転サービス車両への接近・追従から追越開始に至るまでの周囲状況への視認時間を図8に示す。周囲状況への視認時間は、外向けHMIが装備

されない場合には5秒前後であったが、外向けHMIにより「追越注意」を提示した場合には8秒前後、「低速走行中／自動運転車」を提示した場合は約5秒程度であった。一方、「周囲に注意／お先にどうぞ」を提示した場合にはそれらと比較して視認時間が短くなる結果であった。

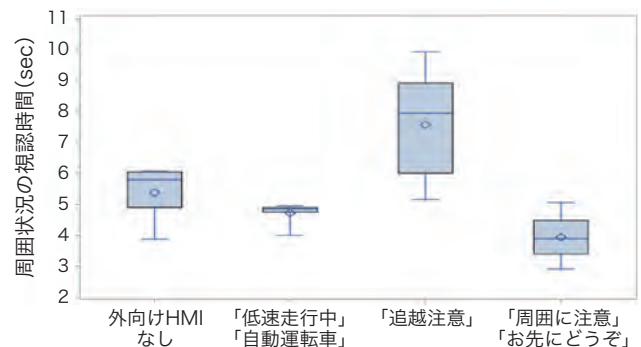


図8 追従から追越開始までの周囲状況への視認時間

その他、自動運転サービス車両からの譲りの認識は、外向けHMIを装備されない場合は低いが、外向けHMIにより「周囲に注意／お先にどうぞ」を提示した場合は最も高く、直接的な譲りを表明していないが、「低速走行中／自動運転車」「追越注意」のいずれも外向けHMIが装備されない場合よりも高められる結果となった。自動運転サービス車両に追従してから追越開始までの心理的ないらつき感は、外向けHMIを実施していない場合と比較して、外向けHMIを実装した場合にいらつき感を低減する効果が確認された。

以上の結果をまとめると、追越ケースでは、外向けHMIを装備して後続ドライバーに、追越時の注意喚起、次いで車両の状態や種別などを伝達するコミュニケーション方法が推奨されるものと考えられる。

## 5 外向けHMIによるコミュニケーション方法の実証実験

VR実験やDS実験、構内道路実験に通じて抽出された自動運転サービス車両と周辺交通参加者のコミュニケーション方法のうち、横断ケースと追越ケースを対象に、道の駅実証実験と連携して実交通環境での検証を実施した。

### 5.1. 実験車両及び外向けHMIの仕様

構内道路実験で使用した自動運転ゴルフカートの実験車両の後方荷台に、図9に示されるLEDパネルを

⑤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

設置して後方用外向けHMIとした。前方用、後方用の外向けHMIの点灯・消灯は乗務員の手動操作により制御され、前方用外向けHMIには横断ケース「お先にどうぞ」「とまります」を、後方用外向けHMIには追越ケース「低速走行中／自動運転車(交互表示)」「追越注意」を、それぞれ設定した。前方用外向けHMIは減速開始とほぼ同時に提示、後方用外向けHMIは常時提示する設定とした。また周囲交通参加者の様子や行動を計測するためのドライブレコーダやカメラが複数設置された。これらの外向けHMI並びに提示メッセージは基準緩和認定を申請・承認後に各実証実験地域にて運用した。



外向けHMI(前方) 外向けHMI(後方)  
図9 実証実験で使用する実験車両及び外向けHMI

5.2. 実証実験地域及び道路交通状況の特徴

国土交通省道路局及び道路新産業開発機構，地方自治体，地域運行業者の協力のもと，道の駅 赤来高原（島根県飯石郡飯南町，以下，赤来高原）及びみやま市山川地区（福岡県みやま市，以下，みやま市）にて実証実験を実施した。赤来高原の運行ルートは生活道路が多く車両交通量も少ない。みやま市の運行ルートは一般国道を含み，大型車を含めた車両交通量が多く，自動運転サービス車両との速度差が大きい。いずれの実証実験地域も起終点や運行ルート上に駐車場が存在しており，駐車場内では歩行者が自動運転ゴルフカートの進路上を横断する場面に遭遇可能な状況であった。

5.3. 実験方法

各実証実験地域にて，地域自治体や運行管理者の指導のもと，日中の時間帯を対象に実験車両を10日間運行した。安全運行の観点から，関係者の指導に基づいて，後続車両の接近に気づいたらその後続車両が安全に追い越せるよう実験車両を減速させ，左に寄って停止する運行に配慮した。運行中は実験車両に装備したドライブレコーダやカメラにて周囲の交通参加者の様子や行動を映像データとして記録した。外向けHMIの提示メッセージの種類は，表示しない場合を

含めて観測数や運行状態に応じて選択した。

5.4. 実験結果

コミュニケーションの該当事例が抽出漏れとならないよう実験車両からある距離の範囲内に存在した交通参加者を全て記録・抽出したため，赤来高原では歩行者33件，自動車（四輪車，大型車）114件，みやま市では歩行者13件，自動車525件が抽出された。これらの観測事例から歩行者が実験車両を視認して横断している事例を横断ケースの対象に，追越ケースについては記録数が多いことからランダムに抽出して分析した。

横断ケースについて，本稿では赤来高原での観測を対象に分析した。実験車両と歩行者との遭遇場面において，歩行者が実験車両を視認もしくは実験車両の停止から横断に至る行動を開始するまでに要した時間を抽出した。その結果を図10に示す。観測数は十分ではないが，外向けHMIによる提示がない場合，横断への行動開始タイミングが5秒以上遅れる事象があり，一方，外向けHMIによる提示がある場合は2秒以内に判断して横断への行動開始に至る結果となった。

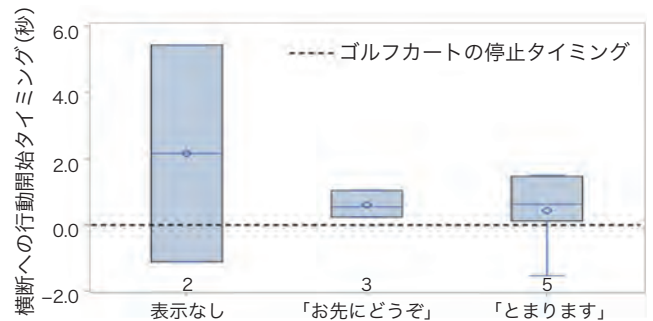


図10 赤来高原における横断への行動開始タイミング

追越ケースについて，本稿ではみやま市を対象に分析した。実験車両の後方から後続車が接近し追い越す場面において，後続車が追越開始する直前の後続車の走行状態を対向車の有無に基づいて分析した。その結

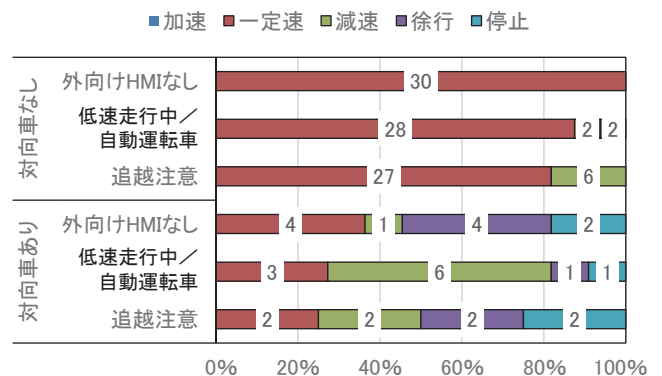


図11 みやま市における後続車の追越開始直前の走行状態

果を図11に示す。みやま市の運行ルートのひとつが一般国道であり、周囲車両の実勢速度は高く、実験車両の12km/h以下との速度差が大きい状態であるが、対向車が存在しない場合、観測数は少ないものの、外向けHMIによる提示により追越前に後続車の減速や徐行などが観測され、追越前の減速や徐行を促せる可能性を示唆する結果となった。

一方、外向けHMIにより提示した場合であっても、道路環境や後続車へ譲る際の実験車両の停止タイミングや停止位置に起因すると考えられる対向車と後続車の干渉が少数観測され、潜在的な他の交通参加者同士の干渉を考慮したコミュニケーション方法の詳細検討も必要である。

【本件問合せ先】.....  
慶應義塾大学 理工学部，〒223-8522 神奈川県横浜市港北区日吉3-14-1，045-566-1441，担当：大門樹

## 6 まとめ

本稿では、低速走行の自動運転サービス車両と周辺交通参加者との間に安全安心で円滑なコミュニケーションの実現を目指し、各ケースを対象にしたコミュニケーション方法、外向けHMIの設計推奨等を含め、各種実験を通じた効果検証について報告した。実証実験においては、VR実験やDS実験、構内道路実験では抽出が困難となる、実際の道路環境や交通状況に依存した不安全・非効率なコミュニケーション事例も観測されているが、実証実験期間の制約などのため、分析に十分な観測数には至っておらず、引き続き、実証実験等を通じたコミュニケーション場面の観測及びコミュニケーション方法による効果検証が必要である。

### 【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）令和2年度研究開発：自動運転の高度化に即した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/rd04/206.pdf>，（参照 2022.08.05）
- (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 2022.08.05）
- (3) 大門樹ほか：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，SIP第2期「自動運転（システムとサービスの拡張）」中間成果報告書（2018～2020），pp.108-112，2021。

## ⑥自動運転の高度化に則したHMIに関する調査研究

### Research of HMI for Advanced Automated Driving Systems

佐藤稔久, 長谷川国大, Wu Yanbin, 木原健 (国立研究開発法人産業技術総合研究所), 中野公彦, 楊波 (東京大学)  
Toshihisa Sato, Kunihiro Hasegawa, Yanbin Wu, Ken Kihara (National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)), Kimihiko Nakano, Yang Yo (The University of Tokyo)

(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ぎのためのHMI等に関する研究開発(課題B)”の取組を概説する。課題B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の周辺監視状態の評価指標の検討や、HMIによるドライバのシステム理解への効果の検討等に取り組んだ。ドライビングシミュレータ実験を行い、レベル3自動運転からのシステム主導による運転交代場面において、運転準備となるドライバの周辺認識の定量的評価方法を検討し、本実験結果より、ドライバ周辺認識の評価指標や適切な周辺認識に必要となる時間等を明らかにした。レベル2自動運転からのドライバ主導による運転交代場面では、レベル2使用中のドライバの注意状態を評価するには視線計測が有効であること、また、ドライバが適切にシステムの機能限界を理解でき、機能限界に至る前に適切に応答ができるようにするHMI要件を明らかにした。

キーワード: ヒューマンファクタ, 運転交代, 評価方法, HMI (ヒューマンマシンインタフェース), ドライビングシミュレータ

#### 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、システム機能限界やシステム作動領域(ODD: Operational Design Domain)の境界に達した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。ここでは、自動運転システムがドライバへ運転交代のアナウンスを提示するシステム主導による運転交代と、自動運転システム使用中にドライバ自らの判断で運転を交代するドライバ主導による運転交代に分類して、ヒューマンファクタ課題に取り組んだ。

システム主導による運転交代においては、自動運転システムがレベル2の場合、自動運転中にドライバはシステム作動状況や周囲の状況を監視している必要があるが、常に適切な監視状態を保っているとは限らないため、自動運転中のドライバの状態をシステムが検出し、ドライバが運転交代可能かどうかをシステムが知る必要不可欠となる。SIP自動運転第1期においては、ドライバの状態の中でも、わき見(前を向いていない状態)<sup>(1)(2)</sup>、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)<sup>(1)(3)</sup>、居眠り(覚醒度の低下)<sup>(1)(4)(5)</sup>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<sup>(6)</sup>について検討した。これらの知見をもとに、ドライバの眼球運動から運転交代後のパフォーマンスを予測する手法<sup>(7)</sup>も検討した。さらに、自動運転中のドライバの状態推定や運転パフォーマンスへの影響分析に加えて、自動運転中に覚醒度を低下させないための方策<sup>(8)(9)</sup>についても検討した。

第2期でのシステム主導による運転交代の取組は、自動運転システムのレベル3使用中を対象とした。自動運転レベル3において、自動運転中にドライバが運転以外のこと(NDRA: Non-Driving Related Activities)を実施しているなかで運転交代を適切に行うために、運転タスクの準備ができている＝ドライバが周囲の状況を認識できている状態を定量的に評価するための方法を検討した。

また、ドライバ主導による運転交代については、ドライバが自動運転レベル2のシステム機能限界を適切に理解し、適切な応答ができる状態を評価する方法を



検討した。さらに、ドライバが適切にシステムの機能限界を理解でき、適切な応答ができるようにするHMIの要件について実験的に検討した。

## 2 システム主導による運転交代

### 2.1. 取組課題概要

自動運転レベル3において、自動運転中にドライバが運転以外のことを実施しているなか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、運転タスクを手動で行う前に、自車両の速度や周囲の他車の動き、道路環境の状態等、ドライバが周囲の状況を認識するという運転交代の準備をすることが有効と考えられる。ここで、ドライバが周囲の状況認識を適切に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、以下の課題に取り組んだ。(図1)

- ・運転交代前のドライバの周辺認識の評価方法
- ・適切な周辺認識に必要な時間
- ・ドライバ周辺認識の評価方法の妥当性検討(周辺認識の標準的な評価方法との比較)
- ・適切な周辺認識を促すHMI要件

### 2.2. 実験シナリオ

上記4つの課題それぞれについて、ドライビングシミュレータ実験により検討した。全ての実験で、道路交通シナリオは共通であり、以下のとおりであった。

- 自動運転にて、片側3車線の自動車専用道の中央車

線を約60km/h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交代を発生させ、設定された区間で手動運転による車線変更を行った。
- 自動運転中のドライバの視線運動及び頭部運動を計測した。また、手動運転へ切り替え後の運転行動を計測し、車線変更の成功率等を算出した。

### 2.3. 運転交代前のドライバの周辺認識の評価方法の検討

#### (1) 実験条件

30名のドライバが参加した本実験では、運転交代1分前に運転交代の予告をする条件、運転交代1分前からテトリスをやめて周辺認識を行う条件、事前にそのような予告や周辺認識をしないで運転交代をする条件等を設定した。

#### (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、設定された区間で車線変更できた割合を算出したところ、運転交代前に周辺認識をした条件の方が周辺認識をしなかった条件に比べてその割合が有意に高かった。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状態から手動運転へ運転交代する際、周囲の状況を認識するという運転交代の準備状態を作ることによって、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：ドライバの周辺認識の評価指標

アイカメラで検知したドライバの視認行動より、周辺認識を開始してから前方への注視率を分析したところ、周辺認識開始後の20秒間で前方注視率は増加する傾向にあり、周辺認識開始から30秒後から運転交

### 自動運転レベル3から手動運転への遷移

- 計画的な運転交代 -

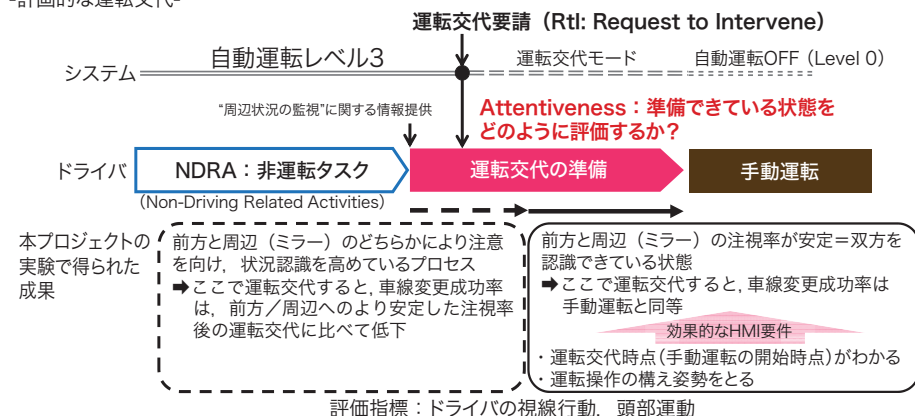


図1 システム主導による運転交代の取組と成果

代時点までより高い値で安定する傾向を示した。さらに、運転交代後も、その前方注視率の値は維持された。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、周辺認識開始後の前方注視率が、ドライバ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増加し、その後安定して推移しているところが、周囲の交通状況をドライバが認識することのできている状態と判定できる可能性が示唆された。

#### 2.4. 適切な周辺認識に必要な時間の検討

##### (1) 実験条件

運転交代前にドライバが周辺認識を行う時間を実験条件とし、5秒、10秒、20秒、55秒の4条件と、0秒（ゲームをしている状態から運転交代を行う）条件、加えて、自動運転ではなく手動運転で行う条件を設定した。実験参加者は30名であった。

##### (2) 実験結果

周辺認識を求めた4条件で前方及びミラーへの注視率を算出し、周辺認識からの変化を比較した。その結果、周辺認識開始からの変化はどの条件でも同じであり、開始から20秒までは前方注視率は増加し、その後、安定する傾向を示した。すなわち、5秒、10秒、20秒条件では、そのような安定する推移は見られなかった。また、運転交代後の運転パフォーマンスの結果から、55秒条件の車線変更成功率が、0秒、5秒、10秒、20秒条件に比べて高く、手動運転条件と同じくらいの成功率であることが示された。

この結果より、前方注視率の安定した推移の見られた後の運転交代では高いパフォーマンスを示しており、2.3.の結果を支持していると考えられる。

#### 2.5. ドライバ周辺認識の評価方法の妥当性検討(周辺認識の標準的な評価方法との比較)

##### (1) 実験条件

運転交代前にドライバが周辺認識を行う時間を55秒とし、発話思考法を用いて、その間に考えていることの発話を求めた。ドライバ20名の参加によるDS実験では、「右側車線の車の流れは自車より速い」などの周辺の状況認識に関する発話を得た。

##### (2) 実験結果

得られた発話より、前方の状況に関する発話と周辺の状況に関する発話を集計した。ドライバの周辺認識の開始からの前方／周辺に関する発話数と、同じ時間

での前方／ミラーへの注視率の変化を比較したところ、前方／周辺に関する発話数と前方／ミラーへの注視率はほぼ同じ変化を示した。

この結果より、発話数の変化が大きい区間では注視率の変化も大きく、逆に、注視率の変化が安定している区間では、発話数の変化も安定していることが示された。その状況をどれくらい認識しているのかが発話数に表れていると想定すると、注視率の変化がその状況の認識度合いに対応している可能性が示唆される。

#### 2.6. 適切な周辺認識を促すHMI要件

##### (1) 実験条件

運転交代前にドライバに周辺認識を求める際、周辺認識を促すHMI要件を検討するため、「〇〇秒後に運転交代」と運転交代タイミングを明示する条件、運転交代タイミングの明示に加えてカウントダウンを行う条件、周辺認識中にハンドルを持って運転の態勢もとる条件、周辺認識をしない場合に警報を提示する条件等を設定し、運転交代後の運転パフォーマンスへの効果を比較した。1条件あたり20名で合計120名のドライバが実験に参加した。

##### (2) 実験結果

車線変更完了までの時間や衝突率を比較したところ、運転交代タイミングの明示に加えてカウントダウンを行う条件と周辺認識中にハンドルを持って運転の態勢もとる条件の結果が、他の条件に比べて良いことが示された。一方、周辺認識をしない場合に警報を提示する条件は、運転パフォーマンスを向上させる効果は見られなかった。

この結果より、運転交代時点がわかることと、運転操作の構え姿勢をとることが、運転交代後の運転パフォーマンスの向上に効果的であることが示唆される。

## 3 ドライバ主導による運転交代

レベル2運転支援では、自動運転中にドライバ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自らが運転交代を行う必要がある。ここでは、ドライバ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について検討した。

### 3.1. ドライバのシステム理解状態の評価方法

手動運転時と同じドライバ状態になっていることを、ドライバがシステムと共存できている、すなわちシステムの状態を理解できている状態と解釈し、手動運転時とレベル2運転支援時のドライバ挙動の差を分析し、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<sup>(10)</sup>、片側3車線の第2車線を手動運転またはレベル2運転支援で走行し、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、レベル2運転支援時は手動運転時よりも正面及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で動作させた。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。<sup>(11)(12)</sup>HMI提示ありの方が、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が理解し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の理解が促進する可能性が示唆された。

### 3.3. 信号交差点における車車間事故防止を実現するためのHMI

本実験では、レベル2運転支援による走行中の適切な運転介入による信号交差点付近の車車間事故の防止を実現するためのHMIの要件の調査を目的とした。危険な場所を明示することを目的として、地図情報をもとにした静的環境情報を提示するもの(静的HMI)と、レベル2運転支援の仕組みの確認を目的として、車載センサ情報をもとにした物体認識情報を提示するもの(センサHMI)、2種類のHMIを提案し、ドライビングシミュレータを用いた実験により有効性評価を行った。本研究で提案するHMIは、各提示情報をドライビングシミュレータのダッシュボードに固定されたヘッドアップディスプレイに表示するものである。

実験で用いた道路環境は日本の国道を模擬しており、片側2車線、交差点付近では右折レーンが加わり3車

線となっていた。直進シナリオでは、自車は60km/hで第2車線を直進する先行車両をレベル2運転支援システムにより追従した。運転支援システム動作時は、ドライバは加減速やステアリング操作といった動的運転タスクを行う必要は一切なかった。リスクシーンでは、信号交差点において対向車線の右折レーンに他車両が現れ、自車の交差点進入時に他車両が突然右折を開始し、ドライバ自らの運転介入をしなければ進入車両と衝突する状況であった。レベル2運転支援システムから運転介入を行う要請は一切行われず、ドライバは自ら危険事象や異変を検知し、ドライバ主導で回避を行う必要があった。実験条件は、静的HMIの有無とセンサHMIの有無を組み合わせた4条件であった。実験データを分析した結果、静的HMIとセンサHMIを併用することにより、最も車間に余裕を持った運転介入が行われ、HMIなしに対して走行に対する安心感を有意に高めることが示された。<sup>(13)(14)</sup>

右折シナリオでは、自車はレベル2走行による信号交差点を右折する。リスクシーンでは、右折中に対向車線からすり抜けたバイクが自車の前を走行し、ドライバ自らの運転介入をしなければバイクと衝突する状況であった。バイクすり抜け時の運転介入時間と運転介入時の衝突余裕時間を分析したところ、静的HMIとセンサHMIを併用することにより、運転介入時間が短くなる傾向にあり、衝突余裕時間が増加する傾向にあった。

### 3.4. 信号交差点における交通信号変化時の事故防止を実現するためのHMI

信号認識による制御を行うことを前提としていないレベル2運転支援の時、アダプティブクルーズコントロールで追従制御を行っている時に信号交差点接近の際に信号が黄色になると、ドライバ主導の運転介入を行って車を停止させることが求められる。本実験では、レベル2運転支援時において、信号灯色が交差点進入直前で変化する時、安全な信号交差点の通行を支援するためのHMI要件の調査を目的とした。

地図情報に基づく静的環境情報を提示する静的HMI及び静的環境情報に加えてインフラ情報に基づく動的環境情報を提示する動的HMIを提案した。動的HMIでは、自車が信号交差点に到達する際の前方信号の灯色を予測するなど、交通信号の先読み情報を提示した。各提示情報をドライビングシミュレータの

## ⑥自動運転の高度化に則したHMIに関する調査研究

ダッシュボードに固定されたヘッドアップディスプレイに表示し、表示時に音で通知を行った。ドライビングシミュレータ実験を用いて、その有効性の評価を行った。

実験で用いた道路環境は日本の国道を模擬しており、片側2車線、交差点付近では右折レーンが加わり3車線となっていた。直進シナリオでは、自車は60km/hで第2車線を直進する先行車両をレベル2運転支援システムにより追従した。リスクシーンの発生する信号交差点に自車両及び先行車両が接近する時に信号が黄信号に変わる。先行車両は停止することなく信号交差点を通過するが、自車は運転支援による走行を継続した場合、停止線付近で赤信号となる。HMIなし、静的HMI、動的HMIの条件において、リスク発生後の対応を分析した。動的HMIを使用した場合に、緩やかな減速及び余裕を持った停止が行われることが示された。

これは交通信号先読み情報により、減速する準備を行うことができ、余裕を持った停止ができたからだと考えられる。<sup>(15)(16)</sup>

左折シナリオでは、自車はレベル2走行によって信号交差点を左折する。リスクシーンでは、自車及び先行車両が交差点に接近する時に信号が黄信号に変わる状況であった。先行車両は停止することなく信号交差点を通過するが、自車が交差点進入前に信号が赤に変わって、ドライバ自らの運転介入をしなければ信号無視になる。停止線での停止状況及び信号変化後の運転介入時間を分析したところ、動的HMIを使ったことにより停止線前で停車できる回数が増加したことがわかった。また、運転介入までの時間も短くなる傾向にあった。

## 【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.: Evaluation of Driver Visual Distraction in Automated Driving Systems in Driving Simulator, Test Course, and Public Roads Experiments, Proceedings of 7th International Conference on Driver Distraction and Inattention (Book of Abstracts, DDI 2021), pp. 58-60, 2021.
- (3) 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.
- (4) 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. Lecture Notes in Computer Science, Vol 12213. pp.72-85, Springer, 2020.
- (5) Yanbin Wu, et al.: The Relationship Between Drowsiness Level and Takeover Performance in Automated Driving, In: Krömker, H. (eds) HCI in Mobility, Transport, and Automotive Systems. Driving Behavior, Urban and Smart Mobility. HCII 2020. Lecture Notes in Computer Science, Vol 12213. pp. 125-142, Springer, 2020.
- (6) 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.
- (7) Yanbin Wu, et al.: Eye movements predict driver reaction time to takeover request in automated driving: A real-vehicle study, Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour, Vol. 81, pp. 355-363, 2021.
- (8) 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.
- (9) 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.
- (10)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。
- (11)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。
- (12)Bo Yang, et al.: Influences on Drivers' Understandings of Systems by Presenting Image Recognition Results, IEEE Intelligent Vehicles Symposium Workshops, 2021.
- (13)齊藤拓海ほか：信号交差点における一般道レベル2運転支援時の適切な運転引継ぎを支援するHMI要件，第19回 ITSシンポジウム，2021。
- (14)Bo Yang, et al.: Influences of Different Traffic Information on Driver Behaviors While Interacting with Oncoming Traffic in Level 2 Automated Driving, International Journal of Human-Computer Interaction, pp.1-9, 2022.
- (15)齊藤拓海ほか：一般道レベル2運転支援時の適切な運転引継ぎを支援するHMI要件，第30回 交通・物流部門大会 (TRANSLOG)，2021。
- (16)楊波ほか：レベル2運転時の安全な信号交差点通過のHMI要件の調査，第58回日本交通科学学会学術講演会，2022。

## 【本件問合せ先】

国立研究開発法人産業技術総合研究所 ヒューマンモビリティ研究センター，〒305-8566 茨城県つくば市東1-1-1 つくば中央第6，担当：佐藤稔久