# ARI esearch ournal

特集:「自動運転 ~システムの安全性・受容性の評価~」



# JARI Research Journal 2023 年度 特集号

### 特集:「自動運転 ~システムの安全性・受容性の評価~」

# 目次

	目次	1
	JARI Research Journal 掲載区分	2
特集「自動運車	伝 ~システムの安全性・受容性の評価~」	
【巻頭言】	特集「自動運転 ~システムの安全性・受容性の評価~」にあたって	3
【研究速報】	高橋 理和 (自動走行研究部 担当理事) 条件付自動運転による車線変更:高速道路での追い越し事例 * ······ <u>【記事へ】</u>	4
	* 英文原稿 ムスリム フサム 他 (自動走行研究部)	
【 技術資料 】	自動運転車の安全性評価に活用可能な車両位置計測手法の構築【記事~】	23
	山口 直紀 他 (自動走行研究部)	
【調査資料】	レベル3自動運転車の緊急操作中における ドライバの操舵介入抑制と主観的受容性に関する調査資料 ········ <u>[記事へ]</u>	31
【研究活動紹介】	栗山 あずさ 他 (自動走行研究部) マルチエージェント交通流シミュレーションを用いた 自動運転技術の高度化に資する仮想評価環境【記事へ】	41
	北島創他(自動走行研究部)	• •
【研究活動紹介】	ドライバの感情状態が及ぼす自動運転引継ぎパフォーマンスへの影響 [記事へ]	50
	李 柱衡 他 (自動走行研究部)	
【研究活動紹介】	自動運転の周辺車両への振る舞いと信頼	60
	安部 原也 他 (自動走行研究部)	
【研究活動紹介】	計測車両を用いた自動運転の安全性評価に関する 実交通流データ収集技術の現状と今後の課題 <u>[記事へ]</u>	70
	平山 泰司 他 (自動走行研究部)	
【研究活動紹介】	ISO 26262 共同研究エンジン WG 活動 パワートレーン領域での ISO 26262 規格解釈と実運用課題について ・・・・・・・・ 【記事へ】	80
	福田 和良 (新モビリティ研究部)	
【解説】	自動運転の安全性評価に関する国際標準の解説 —ISO 34502 における日本提案の概要— <u>【記事へ】</u>	84
	中村 弘毅(自動走行研究部)	
【解説】	レベル4 自動運転移動サービスの社会実装に向けた 「安全設計・評価ガイドブック」の紹介 <u>【記事へ】</u> 平岡 敏洋 他 (新モビリティ研究部)	90
【トピックス】		97
	中谷 有 (城里テストセンター)	

## JARI Research Journal 掲載区分

掲 載 区 分	記 載 概 要
<b>研究速報</b> Research Report	背景,目的,方法,結果,考察といった一般的な研究論文の体裁を持った記事。
<b>技術資料</b> Technical Report	一般的な研究論文の体裁ではないものの,新たな知見または価値あるデータを 報告する記事。
<b>調査資料</b> Survey Report	他機関より得られた資料、データを元に、新たな知見を報告する記事。
解 説 Review	特定の分野やテーマに関して、「現状の最新動向」や「研究・開発状況」などをまとめ、要約・説明する記事。
<b>研究活動紹介</b> Research Activity	JARI の研究活動を紹介・報告する記事。
トピックス* Topics	JARI の研究活動以外の「活動」等についての記事。または上記の分類外の記事。 *トピックス=「話題」「出来事」

### 特集「自動運転

なってくると思われます.

## ~システムの安全性・受容性の評価~」 にあたって



### 業務執行理事 高橋 理和

自動車産業は今,『100年に1度の変革期』にあると言われる中, CASE (Connected, Autonomous, Shared, Electric)やカーボンニュートラルへの対応をめぐり競争が繰り広げられています。中でも、自動運転については、交通事故削減/渋滞の緩和/運転手不足への対応/運転からの解放などの効果が期待されており、EV との親和性も高いことから次世代モビリティでの実現を目指し、世界中で自動運転への取り組みが加速しています。

自動運転技術の実現のためには、さまざまな技術的、法的、倫理的、および社会的課題が存在します。 日本国内における自動運転技術の推進と普及に向けては、経済産業省と国土交通省が連携するなど、政府、自動車メーカー、テクノロジー企業、研究機関などが参画して自動運転技術の研究、開発、実用化に向けた積極的な取り組みが行われており、早期実現に向けて限られたリソースの中で、より効率よく研究開発を推進することが求められることから、更なる協調領域の拡大や産官学の連携がますます重要と

一方、日本国内の法規制の面においても、2020年4月の自動運転レベル3解禁に続き、2023年4月に施行された道路交通法における特定自動運行に係る許可制度により、車内および遠隔地に運転者がいない状態において自動運行装置を備えた自動運転車両が公道を自動走行することが可能になるなど、自動運転の実現に向けた法整備が推進されています。

自動運転技術の発展に向けた国際協力においても、日本は他国との連携を通じて、技術の標準化や共通 規格の整備に貢献するなど積極的に取り組んでいます。自動運転による安全で自由なモビリティ社会を 効率的に実現するためには、自動運転システムの安全性能に対する評価を、国際的に統一された指標で 実施することが重要となります。例えば、自動運転システムの安全性リスクを最小化するための枠組みとなる ISO 21448(SOTIF: Safety of the Intended Functionality)の安全性評価手法の一つとして、経済産業省が実施している SAKURA(Safety Assurance KU-dos for Reliable Autonomous Vehicles)プロジェクトの活動成果が活用された「シナリオに基づく安全性評価フレームワーク(ISO 34502)」が 2022 年 11 月に発行されたことは、その活動成果の一つです。ただし現状の ISO34502 は、自動車専用道のみが対象となっており、一般道まで評価の対象を拡大するためには、更なる研究が必要です。

自動運転システム開発プロセスの企画・設計・評価の各フェーズで、安全性の評価及び検証する際の共通基盤として ISO 34502 を活用することにより、安全性および開発効率の向上が図れると共に、自動運転システムが満たすべき安全性の要件を明確化することで、社会受容性の向上も期待できます。

一般財団法人日本自動車研究所(JARI)は、研究事業戦略での目指す姿として『2050 年カーボンニュートラル/事故死者ゼロ/自由で便利な移動と物流』を掲げて研究・試験に取り組んでおり、この3項目すべてに関連する自動運転に関しては、システムの安全性評価に重点を置き、SAKURA プロジェクトやRoAD to the L4 など様々なプロジェクトに参画しています。今回の特集号では、自動運転に関連する内容をまとめています。SAKURA プロジェクト含め、JARI が参画している自動運転システムの安全性・受容性評価に関する研究速報 /研究活動紹介/解説などを掲載しております。皆様のお役に立てれば幸いです。

### 条件付自動運転による車線変更:高速道路での追い越し事例\*

Changing Lanes with Conditional Driving Automation: The Case of Overtaking Slower Traffic on Highways

ムスリム フサム\*1

安部 原也\*1

内田 信行\*1

梁 祖翹\*2

伊藤 誠\*3

Husam MUSLIM

Genya ABE

Nobuyuki UCHIDA

Chokiu EUNG

Makoto ITOH

(2024.02)

### **Abstract**

This study investigates the impact of different designs of Automated Driving Systems (ADSs) on driver behavior, trust, and acceptance when approaching a traffic jam in conditionally automated vehicles. A driving simulation experiment was conducted to compare four ADS designs. While ADS-1 (baseline) can only decelerate to continue automated driving behind the traffic jam, ADS-2 can also guide the driver to avoid slow traffic. ADS-3 can overtake the traffic jam automatically if the driver approves the maneuver by pushing a "decision button". In contrast, ADS-4 can autonomously overtake the traffic jam without driver approval unless the driver aborts the maneuver by pushing a "decision button" within 6 seconds. In all designs, driver takeover of the vehicle was optional. Results indicate that drivers preferred ADS-1 and ADS-2 more than ADS-3 and ADS-4 because they did not have to make a critical lane-change decision. However, the drivers trusted and accepted ADS-3 more than ADS-4, because they were able to confirm safety on the adjacent lane before letting ADS-3 proceed with the overtaking maneuver. These observations indicate that automated driving systems can be more accepted by the user when designed following the concept of human-centered automation.

KEYWORDS: Cooperative human-machine interface, levels of automation, human-centered design, trust

#### 1. Introduction

Automated driving has been primarily introduced for reasons of safety and also for driver workload reduction, congestion relief, and power consumption <sup>1, 2)</sup>. For example, these systems relieve a driver from tedious control tasks by employing lane-keeping assistance and adaptive cruise control to regulate lateral and longitudinal vehicle motions <sup>3-5)</sup>. In addition, these contribute to road safety by employing active safety systems such as autonomous emergency braking and steering systems to prevent drivers from colliding with vehicles, pedestrians, and other obstacles <sup>6-8)</sup>.

Although Automated Driving Systems (ADSs) have the potential to advance vehicle mobility and save lives, they still have limitations and imperfections and may fail when they are most needed <sup>9)</sup>. On the one hand, inappropriate human trust in these systems can affect drivers' behavior toward the system, affecting their capability to detect inadequate system performances <sup>10)</sup>. On the other hand, the excessive use of ADS may yield unintended negative consequences, such as skills and morale degradation and loss of situation awareness <sup>11-13)</sup>. It may also cause automation-induced complacency when human operators become overly satisfied with their capabilities and thereby create preventable hazards <sup>14)</sup>. In addition, drivers assisted by an ADS are more likely to be engaged in non-driving

University of Tsukuba

\*3 筑波大学 博士(工学) University of Tsukuba Dr.Eng

JARI Research Journal

- 4 *-*

<sup>\* 2023</sup>年7月27日受理

<sup>\*1</sup> 一般財団法人日本自動車研究所 自動走行研究部 博士(工学)
Japan Automobile Research Institute Autonomous Driving Research Division Dr.Eng

<sup>\*2</sup> 筑波大学

related activities, which would impair their capability to respond to critical situations <sup>15)</sup>. Furthermore, drivers are likely to become overly dependent on ADSs, which may not continuously function as intended <sup>16)</sup>.

The introduction of partial driving automation systems in certain commercial vehicles enables drivers to occasionally experience hands- and feet-free automated driving in limited operational design domains such as highways <sup>17)</sup>. However, the drivers must monitor the traffic environment and supervise the system status <sup>18)</sup>. One challenge is the maintenance of drivers' engagement and vigilance, both of which can be performed effectively only when an adequate level of driver workload exists <sup>4, 19, 20)</sup>. Another challenge is to train the driver to supervise the system because the supervision of automated vehicles is a more demanding task as it requires a higher level of human skills when compared to that of manual driving <sup>2, 21)</sup>.

However, conditional driving automation systems that can control a vehicle for an extended time without driver engagement and intervention require less supervision than partial driving systems <sup>22)</sup>. Therefore, drivers of conditional driving automation may be out of the control and monitoring loop. As a result, it is more difficult to gain control over the vehicle when required than it is with partial driving automation <sup>23)</sup>. For example, while a driver is reading a book or using a smartphone, the system may encounter a situation that it is not designed to manage. Hence, it would request the driver to resume manual control within a short time (e.g., within 10 s) <sup>24)</sup>. In critical situations, a major challenge is to appropriately transform the driver from an out-of-the-loop state to an in-the-loop state to resume driving their vehicle safely <sup>25)</sup>.

To address the abovementioned challenges, we propose a cooperative human-machine interface (HMI) design to support drivers' decision-making and control for the safe and practical use of partial and conditional driving automation. Cooperative HMI can enable humans to share decision-making and action implementations via automation to simultaneously achieve a function or task <sup>26)</sup>. The sharing of decision-making and control between the user and the system may improve the human's comprehension of the automated process and thereby facilitate them in developing an appropriate level of trust toward the system. Following the concepts of human-centered systems design <sup>27, 28)</sup>, we designed an HMI, in which the human can be more involved in automated processes to improve the driver's attention and comprehension of the traffic situation and to reduce the requirement for control transition during non-critical automated driving conditions. Specifically, we focused on partial and conditional driving automation, in which the interaction between the driver and system is a primary concern, and the driver must be able to regain full or partial control of the vehicle when necessary or when requested by the system.

A human-centered system may support human perception and decision-making but may not implement an automatic action without human directives. According to the ten levels of automation (LOA) proposed by <sup>26)</sup>, a human-center system design can be implemented under LOA-6 or less, as shown in Fig. 1. In this study, we combined the concept of human-center automation and LOA to design a cooperative HMI for partial and automated driving systems. We proposed an ADS that issues a request to engage (RTE) in response to non-critical changes in the driving environment. The proposed RTE may suggest an appropriate action to be carried out by the driver (LOA-4), execute that suggestion if the driver approves (LOA-5), or allow the driver a restricted time to veto before automatic execution (LOA-6). It differs from a request to intervene (RTI), which is typically issued during hazardous conditions, such as the attainment of an operational or functional limitation by the system or imminent collision situations <sup>29)</sup>. An RTE does not necessarily imply that the human driver must resume manual control. It is a communication between the system and the driver to maintain an appropriate level of driver engagement and responsibility by monitoring the driving environment and approving or disapproving the system's decisions. For example, on the one hand, the safety of the driver and other road users can be higher when an ADS detects and performs tactical tasks (e.g., lane changing and passing) under human directives compared to when the maneuver is performed by the system without human monitoring. On the other hand, driver resumption of vehicle control can also be improved when the system guides the driver toward a safer next course of action. These can address issues related to human disengagement, overreliance, and out-of-the-loop performance associated with the use of partial and conditional ADSs.

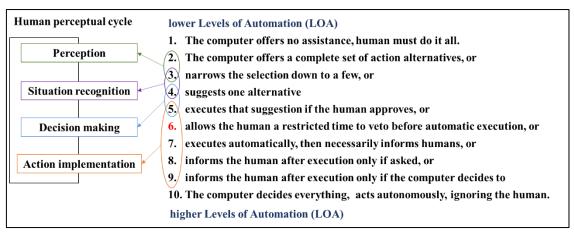


Fig. 1 Human perceptual cycle and levels of automation. LOA-6 represents the borderline between human-center system design in which the human has the final authority over the system and automation-center system design in which the automation has the final authority over the system.

The proposed designs of conditional driving automation with cooperative HMI were examined using a driving simulator experiment in which the drivers were exposed to smooth and congested traffic during automated driving on a two-lane highway. Four designs were compared. When the ADS detects traffic congestion on its main lane while the adjacent lane is available: ADS-1 continues automated driving behind the traffic jam without providing an RTE; ADS-2 issues an RTE to encourage the driver to resume manual control and overtake the congestion; ADS-3 issues an RTE to request the driver's permission to overtake the congestion automatically; ADS-4 issues and RTE to overtake the congestion automatically unless the driver disapproves it within a restricted time. The hypothesis is that driver engagement and attention depend on the extent to which the driver is required to interact with the system during automated driving. Furthermore, it is hypothesized that drivers' acceptance of an H may decrease when they are required to be more involved in the automated process. It is likely that an increase in driver involvement in the automated process may enhance driver comprehension and driving performance while reducing the driver's acceptance of and trust in the system. The study outcomes can provide a basis for accelerating the implementation of automated driving in the real world.

#### 2. Method

### 2. 1 Participants and Apparatus

This study conducted a driving simulation experiment with forty human participants (20 males and 20 females) aged between 22 and 69 years old. This experiment was designed and conducted according to the Code of Ethics and Conduct published by the Japanese Psychological Association (<a href="https://psych.or.jp/">https://psych.or.jp/</a>) and under the approval of the Ethical Committee of the Faculty of Engineering, Information, and Systems of the University of Tsukuba, Japan.

The experiment was carried out on a motion-based driving simulator, as shown in Fig. 2. The simulator comprised a cockpit with an adjustable driver chair, a steering wheel, brake and gas pedals, and an automatic transmission system. The driver's front field-of-view was projected onto a  $120^{\circ}$  curved screen ( $85 \times 30$  in). Two small screens ( $5 \times 4$  in each) were provided to display the side fields-of-view, and a central screen ( $5 \times 2.3$  in) was provided to display the rear field-of-view. The simulator was connected to an external computer, in which the experimental scenarios and ADS were designed. The drivers can activate and deactivate the system by shifting the gear stick between D for manual driving and D3 for automated driving modes (see D/D3 ADS activation in Fig. 2). The automated driving mode can also be deactivated by the direct intervention of drivers using the steering wheel or gas/brake pedals.

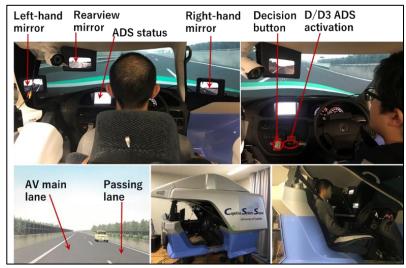


Fig. 2 Driving simulator at the Laboratory for Cognitive Systems Science, University of Tsukuba.

The top-left picture illustrates the driver's scene (side and rearview mirrors, HMI display, and driver monitoring).

The top right picture depicts the simulator's interior components (steering wheel, automatic transmission, and dashboard).

The bottom left picture visualizes the main driving lane of the automated vehicle (AV) and the passing lane. The bottom middle picture represents the driving simulator cockpit.

The bottom right picture shows the participant sitting hands- and feet-free inside the cockpit during automated driving.

### 2. 2 Experimental Scenarios

The training and testing experimental scenarios were implemented on a straight two-lane highway with a light and smooth traffic in the passing lane. Only daylight, a dry road, and clear weather conditions were simulated. Each testing scenario was divided into four sequential scenes, as illustrated in Fig. 3. In Scene-1 (~1 min), the participants were required to start driving the vehicle manually and attain the speed limit of 60 km/h. Scene-2 (~5 min) began when the participants activated the ADS and practiced conditional automated driving at a speed of 60 km/h with a smooth traffic flow on both lanes. During Scene-3 (~3 min), the vehicle approached slow traffic (20 km/h) while under automated driving such that the system decelerated the vehicle to synchronize with the congested traffic speed. However, the right-hand lane was available with cars passing at 60 km/h and 10 s time headway between them. In

this part of the driving course, the drivers could freely decide to keep or change lanes manually or automatically based on their perception of the situation and ADS design and capabilities. Finally, in Scene-4 (~1 min), the participants were asked to resume control and stop the vehicle.

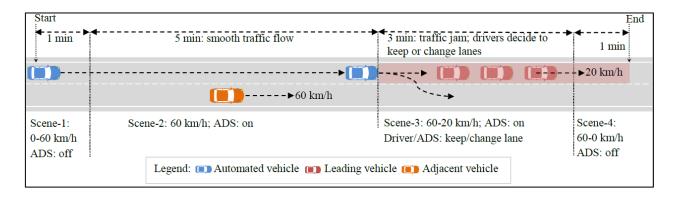


Fig. 3 Test scenario. Scene-1: driver must drive the vehicle manually and attain 60 km/h speed. Scene-2: driver switches to automated driving mode. Scene-3: ADS decreases vehicle speed from 60 to 20 km/h in response to slow traffic ahead (traffic congestion on the AV's main lane), whereas traffic flows smoothly on the adjacent lane. Based on the ADS design and capabilities, the drivers can decide whether to resume manual control and change/keep lanes or let the system decide the next course of the vehicle (keep or change lanes). Scene-4: drivers have to resume manual control and stop the vehicle.

### 2. 3 HMI Design

For the purpose of this experiment and based on the experimental scenarios, four main system states were used, as shown in Table 1. While HMI-1 was displayed when the automated driving mode was deactivated and the driver managed the entire driving task manually, HMI-2 was displayed when the automated driving mode was activated and the system performed the entire driving task during smooth traffic conditions. However, HMI-3 was displayed when the automated driving mode was turned on during traffic congestion to draw the driver's attention toward changes in the surrounding traffic. HMI-4 represents the RTE issued by the system to the driver during abnormal but non-critical traffic conditions (e.g., traffic congestion) while the automated driving mode was turned on in the presence of a better driving course. An LCD screen  $(7 \times 4 \text{ in})$  installed in the dashboard to the left of the driver was used as a visual HMI to display the system status. An acoustic alert accompanied the variations in visual HMI messages to inform the drivers regarding the changes in the HMI and system states.

Table 1 HMI display of automated driving system states.						
HMI	ADS status	Driving tasks	Display			
1	Deactivated	Driver performs entire driving task manually.	Auto Pilot Off			
2	Activated at a speed range 40-60 km/h	ADS performs the entire driving task automatically.	Auto Pilot On			
3	Activated during the traffic jam (< 20 km/h)	ADS performs the entire driving task, including speed synchronization with congested traffic.	低速域 Auto Pilot On			
4	Activated with driver's engagement required	ADS requests driver's engagement to avoid traffic congestion. However, driver's intervention is optional.	加入要請 20 km/h Auto Pilot On			

### 2. 4 ADS Design

The proposed ADS is a low-speed automated lane-keeping assistance system (i.e., a highway traffic jam pilot) that masters lateral and longitudinal vehicle motions for an extended period without driver intervention <sup>17, 30, 31)</sup>. Based on LOAs and the concept of human-center systems design, four algorithms are proposed herein to manage Scene-3. These algorithms involve a method to inform the driver regarding traffic congestion and necessary lane-change maneuvers, as detailed in Table 2. Although all the systems are equivalent to conditional driving automation systems, these differ in terms of the capability to detect and perform lane-change maneuvers, as follows:

Table 2. Algorithm of ADS and driver behaviors during Scene-3.

ADS	Level of automation	ADS Algorithm
1	LOA-3	if slower traffic is detected:
		synchronize speed, and display HMI-3
		if the driver resumes manual control:
		deactivate the ADS, and display HMI-1
		else if the driver does not respond:
		maintain the speed according to traffic congestion, and continue automated driving
2	LOA-4	if slower traffic is detected:
		synchronize speed, and display HMI-3 for 4 s
		if the driver resumes manual control within 4 s:
		deactivate the ADS, and display HMI-1
		else if the driver does not respond:
		display HMI-4 (RTE) for 6 s
		if the driver resumes manual control within 6 s:
		deactivate the ADS, and display HMI-1
		else if the driver does not respond within 6 s:
		maintain the speed according to traffic congestion, continue automated driving, and display HMI-3
3	LOA-5	if slower traffic is detected:
		synchronize speed, and display HMI-3 for 4 s
		if the driver resumes manual control within 4 s:
		deactivate the ADS and display HMI-1
		else if the driver does not respond within 4 s:
		display HMI-4 (RTE) for 6 s
		if the driver presses the "approve" button within 6 s:
		change lanes automatically, accelerate, and display HMI-2
		else if the driver resumes manual control within 6 s:
		deactivate the ADS, and display HMI-1
		else if the driver does not respond within 6 s:
		maintain the speed according to traffic congestion, continue automated driving, and display HMI-3
4	LOA-6	if slower traffic is detected:
		synchronize speed, and display HMI-3 for 4 s
		if the driver resumes manual control within 4 s:
		deactivate the ADS, and display HMI-1
		else if the driver does not respond within 4 s:
		display HMI-4 (RTE) for 6 s
		if the driver presses the "disapprove" button within 6 s:
		maintain the speed according to traffic congestion, continue automated driving, and display HMI-3
		else if the driver resumes manual control within 6 s:
		deactivate the ADS, and display HMI-1
		else if the driver does not respond within 6 s:
		change lanes automatically, accelerate, and display HMI-2

1) ADS-1: The RTE is implemented under LOA-3, in which the automation supports human perception and situation recognition. The capability of ADS-1 in overtaking traffic congestion is limited. Therefore, the system continues automated driving at a slow speed on the same lane. The system displays HMI-3 to attract the driver's attention toward the traffic congestion. Based on their observation and perception of the situation, the drivers must

decide whether to override the system and change lanes manually to circumvent the traffic congestion or continue with automated driving on the slower lane.

- 2) ADS-2: The RTE is implemented under LOA-4, in which the automation supports human decision-making. First, ADS-2 informs the driver regarding the situation (i.e., HMI-3). Subsequently, the system issues an RTE (HMI-4) that is designed under LOA-4, in which the automation recommends an alternative to support human decision-making. The RTE advises the driver to resume control and manually shift toward a faster lane. The drivers can disregard the RTE or resume manual driving to bypass the traffic congestion. If the driver disregards the RTE for more than 6 s, the system status is returned to HMI-3, and automated driving is continued on the slow lane.
- 3) ADS-3: The RTE is implemented under LOA-5, in which the automation supports human decision-making and action under the human directive. After informing the driver regarding the traffic congestion (HMI-3), ADS-3 issues an RTE (HMI-4) that is designed under LOA-5, in which the automation recommends an alternative option and executes it when the driver approves it. The RTE recommends a lane-change maneuver to circumvent congested traffic and requests the driver's permission to perform the task automatically. If the driver approves the automatic lane-change maneuver by pushing the decision button shown in Fig. 2, the system automatically bypasses the traffic congestion and continues automated driving on the faster lane. If the driver disregards the RTE for more than 6 s, the system status is returned to HMI-3, and automated driving is continued on the slow lane.
- 4) ADS-4: The RTE is implemented under LOA-6, in which the automation gives the human a limited time to react or object before executing necessary actions automatically. When ADS-4 detects traffic congestion, the system issues HMI-3 to inform the driver regarding the congested traffic. It then issues an RTE (HMI-4) that is designed under LOA-6, in which automation provides the human a limited time to disapprove the automatic actions. The RTE informs the driver that an automatic lane-change maneuver would begin in 6 s. If the driver pushes the decision button (approve/disapprove button in Fig. 2), the system status is returned to HMI-3, and automated driving is continued on the slower lane. Otherwise, the system automatically bypasses the traffic congestion and continues automated driving on the faster lane.

### 2. 5 Tasks and Procedure

First, all the participants were briefed regarding the purpose of the study, experiment design, and ethical rights. Upon obtaining their consent for participation in the experiment, the participants were instructed to complete a short demographic survey. The critical instructions were to maintain safe driving performance and pay attention to the HMI display. Each participant was explained in detail using PowerPoint slides regarding the operation of the driving system. Then, they performed two familiarization and training drives (5 min each): 1) manual drive and 2) automated drive under light and smooth traffic conditions.

The testing phase comprised four drives (9–10 min each). In each test drive, the participant was presented with one of the four ADS designs such that each design was tested once during the testing phase. The participants were explained about the operation of each system design before they started driving with the system. The sequence in which the ADS designs were experienced was counterbalanced among the participants using the Latin-square method. The participants were allowed a short break (10 min) between test drives, including the brief for the subsequent trial. Finally, they completed post-experiment questionnaires regarding their trust, understanding, acceptance, and controllability with regard to each ADS design. For each participant, the entire experiment was completed within two hours in one day. The entire experiment was completed in two weeks period.

### 2. 6 Experimental Design and Data Analysis

This experiment followed a within-subject design such that each driver was presented with the four ADS designs as an independent variable. For all analyses, the statistical significance was set to  $\alpha = 0.05$  and was determined by

applying the Chi-square test, repeated measures univariate analyses of variance (ANOVA), post-hoc, and t-test using IBM SPSS Statistics. Sphericity violations, normality, and homogeneity of all dependent variables were checked to ensure the applicability of the selected test <sup>32)</sup>. All dependent variables were extracted from scene-3, as illustrated in Fig. 4.

To understand how drivers reacted and used the different ADS designs, we provided descriptive statistics of driver reactions (e.g., resumed manual control, responded to the RTE, pushed the decision button, and lane-keep or change) under each system. Further, we used the time headway (TH) between the subject and adjacent vehicles as a safety indicator to assess the possibility of drivers' involvement in dangerous lane-change maneuvers. TH was calculated as the difference between the time (in seconds) when the front of the subject vehicle arrives at a point on the highway and the time the front of the adjacent vehicle arrives at the same point, as indicated in Fig. 4.

Steering wheel and pedal indicators were used to determine the lane change response time and maximum steering wheel angle as dependent variables to evaluate the lateral and longitudinal driving behaviors during the automated and manual driving modes. The lane-change response time was calculated as the time in which the HMI status changed from HMI-2 to HMI-3. That is, it is the time between the instant when the slow traffic ahead is detected and the instant when the vehicle starts steering away toward the adjacent lane, as shown in Fig. 4. It was measured to evaluate the driver's perception of the situation with or without an RTE (i.e., HMI-4) and to assess the effect of cooperative ADS design on driving behavior and preference during optional lane-change situations. The maximum steering wheel angle was determined as the maximum steering wheel input by the driver or the system during lane-changing maneuvers between the point where the vehicle steers away to circumvent traffic congestion and the point where the vehicle is driving forward in the passing lane, as shown in Fig. 4. The aim was to compare the vehicle lateral control performance between the case wherein the driver resumed manual driving and changed lanes and that wherein the ADS changed lanes autonomously.

For all the systems, the drivers' engagement was measured based on their attention and response to the HMI and surrounding traffic changes 13) and the manner in which the control was transferred from the system to the driver. The driver off-road glance was determined to evaluate the drivers' attention and engagement level as well as RTE effectiveness. The significant effect of ADS design was investigated using one-way repeated measures, and the results were further compared between systems using Tukey's HSD. The acceleration pedal and throttle control percentages were evaluated and compared using the t-test to investigate the longitudinal driving behavior and energy-saving efficiency.

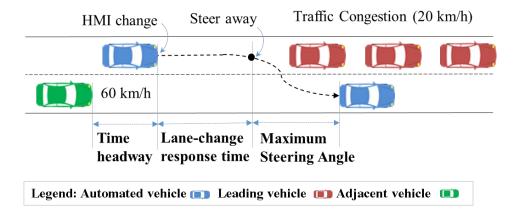


Fig. 4 Scene-3: the driver had to decide the next driving course based on each system design. Dependent variables were used to express time intervals for which the time headway, lane-change response time, and maximum steering angle.

#### 3. Results

### 3. 1 Driver Reaction, Lane-change Safety, and System Usage

Table 3 presents descriptive statistics of driver reaction to changes in traffic conditions and HMI during automated driving and the mean and standard deviation of the total system activation time for each ADS design. Although ADS-1 did not request driver intervention when approaching traffic jam, 36 participants (90%) decided to take over the vehicle control, and four participants (10%) did not perform any action and let the system drives their vehicle slowly behind the traffic jam. Out of the 36 participants who resumed manual driving, 34 participants changed lanes to bypass the traffic jam, while two participants continued slow driving in the same lane. In ADS-2, 37 participants responded to the system's recommendation to take over the control and change lanes, while only three participants did not perform any action. For ADS-3 driving condition, 36 participants (90%) pushed the decision button to let the system changes lanes and bypasses traffic jam automatically. However, two participants decided to take over the vehicle and change lanes manually, and two participants did not respond to the system request and continued the slow automated driving. For ADS-4 driving condition, 15 participants (37.5%) pushed the decision button to disapprove the automatic lane change by the system.

In contrast, 25 participants (62.5%) did not push the button and let the system proceed with the lane change to bypass the traffic jam. Under this condition, of the 15 participants who disapproved the automatic lane change, three participants decided to continue with the slow automated driving behind the traffic jam, and 12 participants overtook the vehicle control right after pushing the button. Out of those 12 participants, nine drivers changed lanes automatically, and three drivers continued manual driving behind the traffic jam.

When the automatic lane change is not available, a Chi-square comparison of the number of manual lane changes between ADS-1 and ADS-2 conditions indicates no significant effect of using the RTE under the ADS-2 condition ( $\chi^2$  (1) = 10.1, p = 0.61). However, when the automatic lane change is available, a comparison of the numbers of manual and automatic lane changes under ADS-3 ( $\chi^2$  (1) = 41.1, p < 0.001) and ADS-4 ( $\chi^2$  (1) = 29.4, p < 0.01) conditions highlights the effectiveness of using RTE. While all 34 participants who resumed the manual control and changed lanes under ADS-1 pushed the decision button to request the automatic lane change under ADS-2, only 25 of them let ADS-4 to perform the automatic lane change. It is noteworthy that the participants who did not push the decision button under ADS-4 have pushed the decision button under ADS-3, allowing both systems to proceed with the automatic lane change. It is also interesting to know that the six lane-keep cases under ADS-1 and ADS-4 were committed by the same participants, while the three and two lane-keep cases under ADS-2 and ADS-3, respectively, were committed by different participants.

Table 3 Comparisons of how drivers responded to HMI and traffic changes, the accumulative time of automated driving, and the percentage of ADS usage.

ADS	Driver reaction in scene-3					Time h	Time headway (s) Automated driving time			i)
	manual deci	Push decision	Lane change (N)		Lane					ADS
			Manual	Automatic	keep	M	SD	M	SD	usage
		button								
1	36/40	NA	34/40	NA	6/40	1.12	0.56	308.21	38.15	77 <b>%</b>
2	37/40	NA	37/40	NA	3/40	0.83	0.80	278.12	20.74	67.5%
3	2/40	36/40	2/40	36/40	2/40	0.47	0.63	380.60	35.91	91%
4	12/40	15/40	9/40	25/40	6/40	0.55	0.39	353.90	37.89	81.5%

N: number; M: mean; SD: standard deviation

The lane-change maneuver safety was assessed using the time headway (TH) indicator, as shown in Table 3. Although the largest TH mean value was under ADS-1 condition (1.12 s), which is consistent with what was found

in previous studies <sup>33)</sup>, it is significantly shorter than the recommended 3 s TH value <sup>34)</sup>. The TH values under other conditions were lower than 1 s, which can be critical and may result in a lane-change crash or near-crash given the variability in driver alertness, skills, and capabilities. However, there was no crash recorded in this experiment.

To compare the system usage among the ADS types, the automated driving time was calculated as the cumulative time of ADS operation, during which the system completely controlled the vehicle, as presented in Table 3. A one-way repeated measures ANOVA revealed a significant effect of the ADS type on the automated driving time (F(3, 156) = 72.83, p < 0.01). These results provide preliminary information on the implications of system and HMI designs for the manner in which end users would use the system. Post-hoc tests with Tukey's HSD indicated significant differences in automated driving time between systems (p < 0.001). The highest mean level was recorded under ADS-3 (M = 380.60), wherein the system performed lane change maneuvers under human approval. The smallest mean level was recorded for ADS-2 (M = 278.12).

The ADS usage was calculated as the mean percentage of the automated driving time periods and the frequency of using the system functionalities. In general, a significant difference is observed between the various system settings. This difference indicates the effect of using RTE and the extent to which the driver is engaged in decision-making and action implementation during automated driving. Although the use of RTE increased the system usage compared with ADS-1, the different ADS capabilities resulted in more differences among ADS-2, ADS-3, and ADS-4. Furthermore, although both ADS-3 and ADS-4 can perform automatic lane change maneuvers, the difference in HMI design strategies between the two systems affected the drivers' response to the RTE. Therefore, it can be concluded that even for systems with similar capabilities (e.g., ADS-3 and ADS-4), the manner in which a human manages different system settings based on the information conveyed to them can vary. This, in turn, can cause differences in automation usage and efficacy.

### 3. 2 Lane-change Response Time and

Fig. 5 compares the lane-change response time between the four system designs. One-way repeated measures ANOVA revealed the significant effect of the ADS type on the response time (F(3, 128) = 11.35, p < 0.001). Multiple comparisons using Tukey's HSD indicated that the lane-change response time under ADS-1 and ADS-4 was significantly longer than that under ADS-2 and ADS-3 (p < 0.001). Although there was no significant difference between ADS-1 and ADS-4, the results of standard deviation highlight the wide variations among the drivers in terms of perception of lane-change situations under ADS-1 (SD = 8.362) compared with the system's perception of the same situations under ADS-4 (SD = 1.170). The results showed that the drivers responded more actively and promptly under ADS-2 and ADS-3 compared with ADS-1. Given that the response times of ADS-2 and ADS-3 were comparable and differed from that of ADS-4, the RTE methods of ADS-2 and ADS-3 reduced the response time more compared with that of ADS-4.

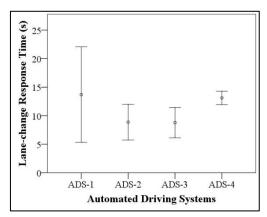


Fig. 5 Lane change response time to avoid traffic disturbance during Scene-3. The mean and standard deviation (error bar) were calculated from data of 132 lane-change maneuvers (there are 34 and 37 manual lane changes for ADS-1 and ADS-2, respectively; and 36 and 25 automatic lane changes for ADS-3 and ADS-4, respectively).

### 3. 3 Maximum Steering Wheel Angle

Fig. 6 compares the mean and standard deviation of the maximum steering wheel angle among the four ADS designs. A one-way repeated measures ANOVA revealed significant effects of the ADS design (F(3, 128) = 9.73, p < 0.01). The largest and smallest mean level of steering-wheel angle were recorded under ADS-1 (M = 0.562) and ADS-3 (M = 0.393), respectively. Multiple comparisons with Tukey's HSD indicated that the maximum steering angles under ADS-1 and ADS-2 were significantly larger than those under ADS-3 and ADS-4 (p < 0.01). However, there were no significant differences between ADS-1 and ADS-2 (p = 0.977) and between ADS-3 and ADS-4 (p = 0.890). Although these results highlight the differences between manual lane-change maneuvers (i.e., ADS-1 and ADS-2) and automatic lane-change maneuvers (i.e., ADS-3 and ADS-4), the steering behavior was relatively smooth and stable under all driving conditions. A reason for this was that the situations encountered by the drivers were not critical, and they could decide and act without haste. Another reason was that the drivers were not compelled to resume manual control.

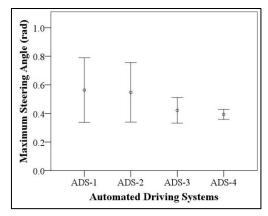


Fig. 6 Maximum steering angle during lane-change maneuvers with each ADS design.

### 3. 4 Off-road Glance

The driver's face behavior was recorded using a video camera and processed using eye-tracking software to extract the driver's eye movement. The off-road glance was calculated as the proportion of time spent by the driver gazing away from the roadway in front as well as the side and rearview mirrors during the automated driving mode. Off-road glances exceeding 3 s were considered accumulatively during each drive <sup>35, 36)</sup>. The objective was to assess the driver's attention to the road and surrounding traffic during the automated driving mode.

Fig. 7 presents the percentage of off-road glances for each ADS design. According to a one-way repeated measures ANOVA, the system design was observed to have a significant effect on the drivers' attention and glancing behavior (F (3, 156) = 55.25, p < 0.001). Multiple comparisons with Tukey's HSD revealed significant differences between systems (p < 0.001), except between ADS-3 and ADS-4. The off-road glance under ADS-2 was significantly larger than those under ADS-3 and ADS-4, although the RTE was available in the three systems. These differences can be attributed to the HMI designs and system capabilities in performing lane-change maneuvers, which also affected the driver reaction and the total time of automated driving, as presented in Table 3. Such explanation may also be supported by the comparable off-road glance results under ADS-3 and ADS-4, both of which can perform lane-change maneuvers automatically. Meanwhile, the significant difference in off-road glance values between ADS-1 and AD-2 indicates that the use of RTE is effective in improving the driver's attention.

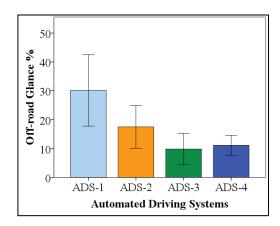


Fig. 7 Proportion of drivers' off-road glances for each ADS design during the entire drive. Error bars denote standard deviations.

Further analysis of drivers' eye-glance locations revealed that all of the participants who initiated manual lane changes checked the right mirror for at least 2 s before steering toward the adjacent lane. However, 11 participants pressed the decision button without checking the mirror under ADS-3, and six participants failed to check their right mirror prior to initiating automatic lane change by ADS-4. These results suggest that, although the drivers' off-road glances were decreased during ADS-3 and ADS-4, some drivers failed to scan the adjacent lane prior to changing lanes by the system. More specifically, some drivers were focusing on the front window and not on the adjacent lane when the system initiated the lane-change maneuver.

### 3. 5 Energy Consumption

The acceleration pedal position was determined as the percentage of the maximum acceleration pedal input by the driver while resuming manual control after the vehicle speed was reduced to 20 km/h during Scene-3. It was compared with the throttle control percentage value, which was calculated as the percentage of the maximum acceleration input by the system to overtake the traffic jam during Scene-3 automatically. The acceleration pedal position and throttle control percentage represent the energy consumption by the human driver and ADS, respectively, when they attempted to circumvent the congestion and recover the vehicle's initial speed (from 20 to 60 km/h). One objective was to compare the manual and automated longitudinal vehicle motion control when traffic disturbances were encountered. Another objective was to compare manual and automated driving in terms of energy consumption and thereby assess the potential environmental impact of introducing automated driving technology.

Fig. 8 shows a comparison of the cumulative percentage of energy consumption between manual and automated driving. A total of 89 manual lane-change maneuvers were compared with 61 automatic lane-change maneuvers. A dependent samples t-test indicated that the acceleration pedal position was significantly larger than the throttle control percentage (t = 7.91, df = 148, p < 0.001). Automated driving resulted in better energy consumption compared with manual driving for an identical task under similar circumstances. These results indicate that the extension of ADS capabilities would not only increase system usage but also conserve energy.

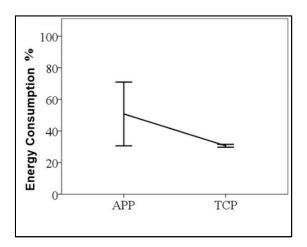


Fig. 8 Comparison of energy consumption between manual lane-change maneuvers (N = 89) and automated lane-change maneuvers (N = 61) for all the systems. Error bars denote standard deviations. APP: Acceleration Pedal Position as pressed by the driver during manual control. TCP: Throttle Control Percentage as controlled by the system during the automated driving mode.

### 3. 6 Subjective Assessment

The subjective driving experiences of the participants under each ADS design were accumulated and analyzed, as shown in Fig. 9. The drivers were asked to answer five questions regarding their perceptions of understanding, trust, acceptance, controllability, and attention to a 10 cm line by assigning a score between 0 (not at all) and 10 (absolutely). After completing all driving trials and before administrating the questionnaires, we have provided a comprehensive explanation of the four systems to remind the participants one more time about the characteristics of each system. According to two-way repeated-measures ANOVA, the ADS design affected the drivers' responses to all the questions except for that on drivers' attention (understanding: F(3, 159) = 2.74, P(0.05); trust: P(3, 159) = 6.18, P(0.01); acceptance: P(3, 159) = 5.22, P(0.01); controllability: P(3, 159) = 2.69, P(0.05); attention: P(3, 159) = 0.11, P(0.95). In general, drivers preferred ADS-1 over other systems. However, ADS-2 presented patterns similar to those of ADS-1, whereas ADS-4 received the lowest ratings. The results of conducting multiple comparisons with Tukey's HSD between systems are as follows:

- 1) Understanding (To what extent do you think you could understand the system?): The comparisons did not reveal significant differences between systems. However, the participants could understand ADS-1 and ADS-2 slightly more easily than ADS-3 and ADS-4.
- 2) Trust (To what extent do you think the system is trustworthy?): The comparisons revealed significant differences between ADS-1 and ADS-4 (p < 0.05) and between ADS-2 and ADS-4 (p < 0.01). Although the participants' rating of all the systems exceeded the mid-value of the scale, ADS-4 was rated lower than the other systems. When the participants were questioned about the reason, they reported that it was difficult to trust a system that provided a very short time period (i.e., 6 s) to decide whether they should cancel its action in the presence of other vehicles passing at a higher speed in the adjacent lane.

- 3) Acceptance (To what extent do you think you prefer to use the system in the real world?): The drivers rated ADS-1 and ADS-2 significantly higher than ADS-3 and ADS-4 (p < 0.05). Meanwhile, no significant differences were observed between ADS-1 and ADS-2 and between ADS-3 and ADS-4.
- 4) Controllability (To what extent do you think you were in control of the vehicle during system activation?): Although the analysis did not reveal a significant difference in drivers' ratings among the four ADS designs, the drivers rated ADS-4 lower than the other systems, which were rated almost equally.
- 5) Attention (To what extent do you think you can focus on traffic during a lane change?): The drivers' rating of their attention to the roadway and surrounding traffic during the operation of the ADS did not differ among the four systems. In general, the participants perceived that they could focus on the roadway adequately during automated driving. However, the off-road glance results presented in Fig. 7 reveal a different outcome, indicating that the drivers were not completely aware of their behavior during automated driving. This observation affects the implementation demands of ADSs, which still require partial or complete attention of the driver on the road to ensure safety. For example, drivers may rely excessively on partial driving automation systems and engage in non-driving related tasks, which would result in higher trust in the system. In contrast, they may unnecessarily interrupt the operation of conditional or high driving automation systems, thereby affecting system usage and causing system disuse <sup>37)</sup>.

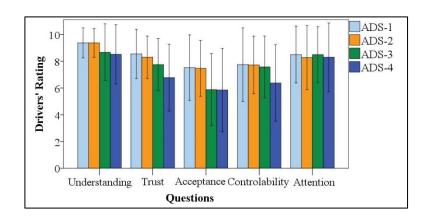


Fig. 9 Subjective assessment of each ADS corresponding to five post-driving-experiment questions. Error bars denote standard deviations.

### 4. Discussions

ADSs are designed to safely control motor vehicles for an extended period without human monitoring and intervention. However, the capabilities of these systems in managing various traffic conditions are still limited, which necessitates occasional human monitoring and intervention to achieve adequate system performances. This study set out to design human-centered HMI to support drivers' attention to the road and comprehension of the automated process to reduce the requirement for human intervention during conditional automated driving. The human-centered HMI strategies were proposed to maintain sufficient driver engagement during automated driving for a better driver—ADS interaction without affecting system effectiveness and acceptance. Herein, humans can share certain decisions and control with ADSs to regulate the vehicle without requiring control transition. A driving simulation experiment investigated the impact of the proposed cooperative HMIs on drivers' interaction with ADSs.

The study observations indicated that sharing decision-making and control between human drivers and ADS resulted in significant improvements in driver engagement and attention to the surrounding traffic during automated driving. Although the drivers preferred the baseline system (ADS-1), the objective assessment showed that the best vehicle lateral control and driver reaction time results were achieved with ADS-3. In this system, the RTE (HMI-4) provided better system capabilities for performing tactical tasks under the human directive. The results of lane-change

response time under ADS-2 (wherein the RTE supported only driver's decision-making) were comparable to that under ADS-3 and better than those under ADS-1 and ADS-4. However, drivers' off-road glances indicated that the drivers were more attentive under ADS-3 and ADS-4 than under ADS-1 and ADS-2. These observations highlighted the importance of informing drivers regarding traffic disturbances and the method to address such situations.

Another important observation was that the best level of driver engagement, longest automated driving time, and least control transition was achieved under ADS-3, indicating the effectiveness of using the RTE. The results of system usage supported this, wherein the percentage of ADS-3 usage was higher than those for the other systems. These observations revealed the effects of the HMI strategy and control algorithm (see Table 2) on the drivers' behavior toward the system. For example, ADS-3 and ADS-4 were similar in their capability to perform automatic lane-change maneuvers but different in terms of the control algorithm. This similarity and difference resulted in significant statistical differences between the two systems in terms of control input and system usage (see Table 3).

One unanticipated finding was that the time headway between the subject vehicle and vehicles in the passing lane was critical under the ADS-3 and ADS-4 conditions. The time headway under the ADS-2 condition was less critical compared to ADS-3 and ADS-4 but lower than the recommended value (i.e., 3 s). Although the time to change lanes was the largest under the ADS-1 condition, the drivers maintained safer time headway during the lateral maneuver. In real-world driving, critical time headway can significantly affect the behavior of other road users, resulting in incidents <sup>38)</sup>. These experimental findings suggest that human-centered system designs, while they can improve the interaction between the driver and ADS, can also reduce safety and introduce discomfort to other users who will interact with ADS.

The results of manual and automated driving performance of lane-change tasks show that the ADS performed better than the human driver. However, the results of the steering wheel behavior were not significantly different between ADS-1 and ADS-2 and between ADS-3 and ADS-4. These results are attributed to two factors. One factor is that the traffic congestion scenario is not a time- or safety-critical condition. The second factor is related to the road geometry, i.e., all the scenarios were evaluated on straight road sections with curvatures less than 0.0002 1/m to reduce the number of variables that are likely to affect vehicle behavior and control.

It is noteworthy that the energy consumption during automatic overtaking was more stable and significantly less than that during manual overtaking under similar traffic conditions. Although preliminary, these results indicate that automated driving may reduce energy consumption, benefit the environment and human health, and contribute toward addressing particular challenges in achieving carbon-neutral goals. Such results can also be used to highlight the effect of ADSs on reducing non-exhaust emissions released from the engine and tire frictions during the vehicle acceleration, deceleration, and steering maneuvers <sup>39)</sup>.

Subjectively, the overall evaluation showed that the drivers' ratings of all the systems were above-average for all the questions. The results indicated that the drivers understood, preferred, and trusted ADS-1 and ADS-2 (both of which were incapable of automatic lane changing) more than ADS-3 and ADS-4. However, the driver's evaluation of ASD-3 was marginally higher than that of ADS-4 for all the questions. In this regard, the drivers reported that the control algorithm of ADS-3 was more reasonable and convenient to understand compared with that of ADS-4. With ADS-3, the drivers could perceive the traffic situation and select the most appropriate time to push the button to start the automatic lane-change maneuver. In contrast, with ADS-4, the drivers had a limited time (6 s) to perceive the traffic situation and decide whether to allow the system to proceed with lane changing. This indication was supported by the drivers' response to the controllability question, wherein the drivers rated ADS-1, ADS-2, and ADS-3 relatively closely and marginally higher than ADS-4. From the human-centered designs perspective, these results were not very encouraging. For example, the main goal of proposing ADS-3 was to enhance the driver's understanding of the automated process. However, drivers' comprehension of the baseline, in which the system provided less communication with the driver, was better than other conditions.

Although the observations of the current study were obtained under non-time-critical or complex traffic conditions, these may be effective for safety-critical and take-over situations during automated driving. The sharing of decision-making and control between human drivers and systems during non-critical automated driving can improve the time required to take over and the smoothness of control transition, both of which are essential for safe control transition during critical situations. Furthermore, it should be noted that all scenarios were implemented during the daylight under clear weather and good roadway conditions with light traffic in the passing lane. These factors can significantly affect driver response and appreciation of the ADS design. More specifically, drivers' interaction with and acceptance of ADS-3 and ADS-4 can be improved if they were tested in bad weather and road conditions. Therefore, this combination of findings has important implications for developing cooperative HMIs for automated vehicles, but there are still many unanswered questions about the effectiveness of these HMIs under different driving conditions. Additional experimental, observational, and field studies considering various environmental and traffic conditions will be needed to develop a robust model of driver interaction with cooperative systems.

The differences between ADS designs and drivers' preferences can be influenced by certain limitations of the current study. One limitation is related to the experimental design; wherein each participant encountered four system settings intensively in a day. Although the sequence in which the system settings were experienced was counterbalanced using the Latin-square method, learning effects can influence the driver behavior during the subsequent drives. Although drivers' behavioral adaptation to the RTE messages and different system settings was rapid for all the participants, the inclusion of drivers with prior experience in automated driving, as indicated in the demographic survey, may limit the comparability between systems. Another limitation is related to the time of test scenarios and situation criticality. Although four subjects had fallen asleep during the automated driving time, which affected their perception and reaction time during traffic disturbance, an extension of the time of automated driving may result in more unusual driving behaviors. Furthermore, the introduction of drivers to certain critical situations, such as extreme weather conditions, which have been excluded in this study, may broaden our understanding of the effectiveness of using the RTE in real-world driving.

### Conclusions

This study used the levels of automation compatible with the concept of human-centered systems design to propose four HMI designs for conditionally automated vehicles during lane change situations. Results of this driving simulation experiment indicate that the support to drivers' decision-making and control significantly reduced the perception-response time to variations in the system status and traffic disturbance. This, in turn, resulted in significant improvements in the driver's performance of the subsequent action under cooperative systems compared with the baseline condition (ADS-1). The results of lateral and longitudinal control indicated that the best driving performance was achieved by ADS-3, with no significant differences were observed with ADS-4 because the automatic lane changing feature was also available. However, it was identified that the ADS with higher levels of automation (ADS-3 and ADS-4) while maintaining drivers in the monitoring loop, increased the usage of the system, and reduced the requirement for control transition, can affect the overall safety and result in a dangerous condition for other road users. These findings are consistent with a part of the first hypothesis, indicating that cooperative HMIs can improve driver interaction with the system, but violate the part stating that using RTE can result in safety benefits for other road users who will interact with automated vehicles.

The subjective evaluation revealed that the drivers preferred and trusted less intrusive systems (ADS-1 and ADS-2) over higher-capability systems (ADS-3 and ADS-4) that required more driver engagement during automated driving. Although it was expected that the increase in driver involvement in automated driving could enhance drivers' understanding of the system, the results indicated that drivers' understanding of ADS-3 and AD-4 decreased compared to ADS-1 and ADS-2 in which the drivers were involved in the automated driving into a lesser extent.

These findings are also not fully consistent with the second hypothesis of this study, indicating that increasing driver's engagement in automated driving while reducing the driver's acceptance of and trust in the system, can also improve driver's comprehension of the system. Therefore, efforts must be continued to balance system capabilities and user preference while focusing on the potential implications on user behavior and acceptance.

The outcomes of this study contribute to the rapidly expanding field of automobile automation by providing a deeper insight into the significant role of cooperative HMI in improving driver—automated vehicle interaction and as a potentially reasonable approach for introducing safe automated driving. However, it is difficult to predict the manner in which drivers would adapt to ADSs with different capabilities in terms of long-term use. In particular, it is unclear how drivers' understanding of the automated process and attention to surrounding traffic variations during hands-, feet-, and eyes-free automated driving can be maintained effectively while they engage in non-driving-related tasks. Cooperative HMIs that enable drivers to be more involved in the automated process may improve drivers' capabilities during abrupt or unpredictable control transitions or when the system cannot manage the situation encountered. Hence, this is a critical area necessitating further investigations.

#### References

- 1) D. J. Fagnant and K. Kockelman: Preparing a nation for autonomous vehicles: opportunities, barriers and policy recommendations, Transportation Research Part A: Policy and Practice, vol. 77, p. 167-181 (2015), doi:10.1016/j.tra.2015.04.003
- 2) J. Stapel et al.: Automated driving reduces perceived workload, but monitoring causes higher cognitive load than manual driving, Transportation research part F: traffic psychology and behaviour, vol. 60, p. 590-605 (2019), doi:10.1016/j.trf.2018.11.006
- 3) I. J. Reagan et al.: Driver acceptance of adaptive cruise control and active lane keeping in five production vehicles, in Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting, vol. 61, no. 1: SAGE Publications Sage CA: Los Angeles, CA, p. 1949-1953 (2017), doi.10.1177/1541931213601966
- 4) J. C. De Winter et al.: Effects of adaptive cruise control and highly automated driving on workload and situation awareness: A review of the empirical evidence, Transportation research part F: traffic psychology and behaviour, vol. 27, p. 196-217 (2014), doi.10.1016/j.trf.2014.06.016
- 5) A. Spiliopoulou et al.: Adaptive cruise control operation for improved motorway traffic flow, Transportation research record, vol. 2672, no. 22, p. 24-35 (2018), doi:10.1177/0361198118796020
- 6) N. Euro: Test Protocol-AEB VRU Systems, ed: Version (2015), <a href="https://cdn.euroncap.com/media/58226/euro-ncap-aeb-vru-test-protocol-v303.pdf">https://cdn.euroncap.com/media/58226/euro-ncap-aeb-vru-test-protocol-v303.pdf</a>, (accessed \_2023-07-27)
- 7) M. Schratter et al.: Pedestrian Collision Avoidance System for Autonomous Vehicles, SAE Intl. J CAV, vol. 2, no. 4, p. 279-293 (2019), doi.10.4271/12-02-04-0021.
- 8) K. D. Kusano and H. C. Gabler: Safety benefits of forward collision warning, brake assist, and autonomous braking systems in rearend collisions, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, vol. 13, no. 4, p. 1546-1555 (2012), doi.10.1109/TITS.2012.2191542
- T. Hancke: Ironies of Automation 4.0, IFAC-PapersOnLine, vol. 53, no. 2, p. 17463-17468 (2020), doi.10.1016/j.ifacol.2020.12.2122
- 10) W. Payre et al.: Fully automated driving: Impact of trust and practice on manual control recovery, Human factors, vol. 58, no. 2, p. 229-241 (2016), doi:10.1177/0018720815612319
- 11) Z. Lu et al.: Human factors of transitions in automated driving: A general framework and literature survey, Transportation research part F: traffic psychology and behaviour, vol. 43, p. 183-198 (2016), <a href="doi:10.1016/j.trf.2016.10.007">doi:10.1016/j.trf.2016.10.007</a>
- 12) C.-Y. Chan: Advancements, prospects, and impacts of automated driving systems, International journal of transportation science and technology, vol. 6, no. 3, p. 208-216 (2017), <a href="doi:10.1016/j.ijtst.2017.07.008">doi:10.1016/j.ijtst.2017.07.008</a>
- 13) A.-K. Kraft et al.: The impact of an in-vehicle display on glance distribution in partially automated driving in an on-road experiment, Transportation research part F: traffic psychology and behaviour, vol. 52, p. 40-50 (2018), <a href="doi:10.1016/j.trf.2017.11.012">doi:10.1016/j.trf.2017.11.012</a>
- 14) R. Parasuraman et al.: Performance consequences of automation-induced'complacency', The International Journal of Aviation Psychology, vol. 3, no. 1, p. 1-23 (1993), <a href="https://doi.org/10.1207/s15327108ijap0301\_1">doi.10.1207/s15327108ijap0301\_1</a>
- 15) R. Happee et al.: Take-over performance in evasive manoeuvres, Accident Analysis & Prevention, vol. 106, p. 211-222 (2017), doi:10.1016/j.aap.2017.04.017
- 16) T. Inagaki and M. Itoh: Human's overtrust in and overreliance on Advanced Driver Assistance Systems: a theoretical framework, International journal of vehicular technology, vol. 2013 (2013), <a href="doi:10.1155/2013/951762">doi:10.1155/2013/951762</a>

- 17) SAE: Taxonomy and definitions for terms related to on-road motor vehicle automated driving systems, J3016\_202104, ed: SAE International (2018), <a href="https://www.sae.org/standards/content/j3016">https://www.sae.org/standards/content/j3016</a> 202104/, (accessed 2023-07-27)
- 18) H. Zhou et al.: Effect of instructing system limitations on the intervening behavior of drivers in partial driving automation, Cognition, Technology & Work, vol. 22, no. 2, p. 321-334 (2020), <a href="doi:10.1007/s10111-019-00568-1">doi:10.1007/s10111-019-00568-1</a>
- 19) V. A. Banks et al.: Is partially automated driving a bad idea? Observations from an on-road study, Applied ergonomics, vol. 68, p. 138-145 (2018), doi.10.1016/j.apergo.2017.11.010
- 20) P. A. Hancock et al.: On the philosophical foundations of the distracted driver and driving distraction, Driver distraction: Theory, effects, and mitigation, p. 11-30 (2009), <a href="doi:10.1201/9781420007497.pt2">doi:10.1201/9781420007497.pt2</a>
- 21) N. Strand et al.: Semi-automated versus highly automated driving in critical situations caused by automation failures, Transportation research part F: traffic psychology and behaviour, vol. 27, p. 218-228 (2014), <a href="doi:10.1016/j.trf.2014.04.005">doi:10.1016/j.trf.2014.04.005</a>
- 22) SAE: Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles, J3016\_201806, ed: SAE International (2018), https://www.sae.org/standards/content/j3016\_201806/, (accessed\_2023-07-27)
- 23) T. Inagaki and T. B. Sheridan, A critique of the SAE conditional driving automation definition, and analyses of options for improvement, Cognition, technology & work, vol. 21, no. 4, p. 569-578 (2019), <a href="https://link.springer.com/article/10.1007/s10111-018-0471-5">https://link.springer.com/article/10.1007/s10111-018-0471-5</a>, (accessed 2023-07-27)
- 24) C. Gold et al.: "Take over!" How long does it take to get the driver back into the loop?, in Proceedings of the human factors and ergonomics society annual meeting, vol. 57, no. 1: Sage Publications Sage CA: Los Angeles, CA, p. 1938-1942 (2013), doi.10.1177/1541931213571433
- 25) N. Merat et al.: The "out-of-the-loop" concept in automated driving: Proposed definition, measures and implications, Cognition, Technology & Work, vol. 21, no. 1, p. 87-98 (2019), <a href="https://link.springer.com/article/10.1007/s10111-018-0525-8">https://link.springer.com/article/10.1007/s10111-018-0525-8</a>, (accessed\_2023-07-27)
- 26) T. B. Sheridan: Telerobotics, automation, and human supervisory control. MIT press (1992), ISBN: 0262193167
- 27) C. E. Billings: Aviation automation: The search for a human-centered approach, CRC Press (2018), doi.10.1201/9781315137995
- 28) T. B. Sheridan: Human centered automation: oxymoron or common sense?, in 1995 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics. Intelligent Systems for the 21st Century, vol. 1: IEEE, p. 823-828 (1995), <a href="https://doi.org/10.1109/ICSMC.1995.537867">doi.10.1109/ICSMC.1995.537867</a>
- 29) K. Zeeb et al.: Is take-over time all that matters? The impact of visual-cognitive load on driver take-over quality after conditionally automated driving, Accident Analysis & Prevention, vol. 92, p. 230-239 (2016), <a href="doi:10.1016/j.aap.2016.04.002">doi:10.1016/j.aap.2016.04.002</a>
- 30) T. M. Gasser and D. Westhoff, BASt-study: Definitions of automation and legal issues in Germany, in Proceedings of the 2012 road vehicle automation workshop, Automation Workshop, chrome (2012), <a href="https://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/conferences/2012/Automation/presentations/Gasser.pdf">https://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/conferences/2012/Automation/presentations/Gasser.pdf</a>, (accessed\_2023-07-27)
- 31) NHTSA: Automated Driving Systems 2.0: A Vision for Safety, ed (2017),

  <a href="https://www.nhtsa.gov/sites/nhtsa.gov/files/documents/13069a-ads2.0\_090617\_v9a\_tag.pdf?xid=PS\_smithsonian">https://www.nhtsa.gov/sites/nhtsa.gov/files/documents/13069a-ads2.0\_090617\_v9a\_tag.pdf?xid=PS\_smithsonian</a>, (accessed\_2023-07-27)
- 32) A. Field et al.: Discovering statistics using R. Sage publications (2012), <a href="https://www.discoveringstatistics.com/books/discovering-statistics-using-r/">https://www.discoveringstatistics.com/books/discovering-statistics-using-r/</a>, (accessed\_2023-07-27)
- 33) A. Zlocki et al.: Logical Scenarios Parameterization for Automated Vehicle Safety Assessment: Comparison of Deceleration and Cut-in Scenarios from Japanese and German Highways, IEEE Access (2022), <a href="https://ieeexplore.ieee.org/document/9721289">https://ieeexplore.ieee.org/document/9721289</a>, (accessed\_2023-07-27)
- 34) T. Ayres et al.: Preferred time-headway of highway drivers, in ITSC 2001. 2001 IEEE Intelligent Transportation Systems. Proceedings (Cat. No. 01TH8585, IEEE, p. 826-82 9 (2001), https://ieeexplore.ieee.org/document/948767, (accessed 2023-07-27)
- 35) T. A. Dingus et al.: The 100-car naturalistic driving study, Phase II-results of the 100-car field experiment, United States. Department of Transportation. National Highway Traffic Safety (2006), <a href="https://www.nhtsa.gov/sites/nhtsa.gov/files/100carmain.pdf">https://www.nhtsa.gov/sites/nhtsa.gov/sites/nhtsa.gov/files/100carmain.pdf</a>, (accessed 2023-07-27)
- 36) J. W. Senders, Driver distraction and inattention: A queuing theory approach, Driver distraction and inattention. Advances in research and countermeasures. Farnham, UK: Ashgate (2013), <a href="https://www.researchgate.net/publication/287743876">https://www.researchgate.net/publication/287743876</a> Driver distraction and inattention A queuing theory approach, (accessed 2023-07-27)
- 37) M. Vakilian et al.: Use, disuse, and misuse of automated refactorings, in 2012 34th International Conference on Software Engineering (ICSE), IEEE, p. 233-243 (2012), <a href="https://ieeexplore.ieee.org/document/6227190">https://ieeexplore.ieee.org/document/6227190</a>, (accessed 2023-07-27)
- 38) B. Lewis-Evans et al.: That's close enough—A threshold effect of time headway on the experience of risk, task difficulty, effort, and comfort, Accident Analysis & Prevention, vol. 42, no. 6, p. 1926-1933 (2010), doi:10.1016/j.aap.2010.05.014
- 39) V. R. Timmers and P. A. Achten, Non-exhaust PM emissions from electric vehicles, Atmospheric environment, vol. 134, p. 10-17 (2016), doi.10.1016/j.atmosenv.2016.03.017

### 自動運転車の安全性評価に活用可能な 車両位置計測手法の構築<sup>\*</sup>

Development of a vehicle position measurement method that can be used to evaluate the safety of automated vehicles

山口 直紀\*1

菊地 一範\*1

Naoki YAMAGUCHI

Kazunori KIKUCHI

昨今の「高度な自動運転を用いた移動・物流サービスの実現・普及」に向けた政府主導の取り 組みを受け、サービスを目的とした自動運転車の実用化が加速しており、公道環境下での試験需 要が高まりつつある。しかし、現状の RTK 補正での高精度の車両位置計測は車両やアンテナが 見える位置になければ計測ができず、見通しの悪い環境においては計測が困難である。そこで、 RTK 補正信号を用い、高精度で見通しの悪い公道においても車両位置計測が実施できるシステムを構築した。

KEY WORDS: 評価技術, 計測技術, 自動運転

### 1. はじめに

自動運転車の社会実装のためには、自動運転機能の安全性を評価することが不可欠である。その手法の 1つに「データ分類型シナリオベースアプローチ」が挙げられる。このアプローチは、実際の交通場面で 得られる交通流の観測データや事故等の発生状況データを "シナリオ" という形で体系的なカテゴリに 分類し、そのシナリオごとにデータベース(DB)として蓄積して、評価に利用する方法である。近年、各国のプロジェクトで DB 構築が進められており、日本では経済産業省の SAKURA(Safety Assurance KUdos for Reliable Autonomous vehicles)  $^{1,2)}$  事業において、国内における実際の交通場面での車両挙動が データとして取得され、DB が整いつつある。シナリオに関しては、2020 年に一般社団法人日本自動車工業会(Japan Automobile Manufacturers Association: JAMA)から発行された「自動運転の安全性評価フレームワーク Ver1.0」において自動車専用道に特化したシナリオが提案され、さらに 2022 年の Ver3.0 への改定では一般道のシナリオも追加された  $^{3}$ .

自動運転車の安全性評価に際して、DB に蓄積された様々な交通場面の全てを実車試験で論証することは現実的ではなく、シミュレーションを用いることが効率的とされている。ただし、安全性論証に用いられるシミュレーションは、少なくとも実車の安全性を過大評価するものであってはならない。その点に関して、車両に係る国際基準等においても、使用するシミュレーションの妥当性を示すための最低限の実車試験が求められており、より精度が高く汎用的な実車計測技術の進展が望まれている。他方、昨今の「高度な自動運転を用いた移動・物流サービスの実現・普及」4)に向けた政府主導の取り組みを受け、サービスを目的とした自動運転車の実用化が加速している。これらの自動運転車は、走行するエリアや環境が限られる場合がほとんどであり、安全性の論証を求められるシナリオも限定される。ゆえに、シミュレーションを構築するよりも実車試験での安全性評価が効率的なケースも多く、当該自動運転車が走行する実際の公道環境下での試験需要も高まりつつある。

JARI Research Journal (2024.02)

-23-

<sup>\* 2023</sup>年11月10日受理

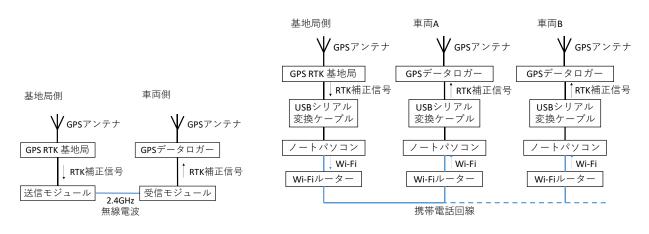
<sup>\*1</sup> 一般財団法人日本自動車研究所 自動走行研究部

ADAS (Advanced Driving Assistant System) の性能評価など、テストコースで実施する試験においては、車両の位置計測に GPS (Global Positioning System) の精度を高めるための補正信号を用いる装置が使用されている。ただしこの補正信号の送信は、専用の無線機によって行うため、見通しの良い環境でしか使用できない。自動運転車の社会実装に向けた安全性評価では、実際に当該車両が走行する公道環境下で車両位置を計測することが有効であるが、公道環境下では建造物や地形などで見通しが悪い場面も多く、既存の計測装置を使用できるケースが限られる。そこで、GPS の補正信号を携帯電話回線で送信するシステムを構築し、多様な公道環境下で自動運転車の安全性評価に活用できるようにした。本報では、その計測精度を検証した結果を報告する。

### 2. 補正信号の送信方法

車両位置を計測する一般的な GPS データロガーでは、位置の測位精度を高めるために RTK 方式の補正を行うが、この補正に必要な RTK 信号の送受信は、GPS RTK 基地局と呼ばれる機器の専用無線機を使用する.これに対して、携帯電話回線の機能を有する専用機器を用いて補正を行う市販装置もあるが、携帯電話回線のキャリアを変更することが容易にはできないため、試験実施エリアでの通信状態が悪い場合に対応できない.そこで今回、専用の機器を使用せず、汎用の製品のみで比較的簡便に補正信号を送信できるようなシステムを構築した.

通常のシステムと今回構築した携帯電話回線を用いたシステムの構成を、それぞれ図1に示す.



a) 通常のシステム

b) 構築した携帯電話回線を用いるシステム 図1 RTK補正信号の送信方法

構築したシステムでは、基地局側(送信側)のノートパソコンの USB ポートから取り込んだ RTK 補正信号を、携帯電話回線を介して車両側(受信側)ノートパソコンに送信し、RTK 補正信号をそのノートパソコンからデータロガーに出力するようにした。基地局側のノートパソコンは、簡易のサーバーとしても機能しているため、1 つの基地局から複数の受信側ノートパソコンに対して同時に補正信号を送信することも可能であることから、複数の車両の位置を同時に計測することも可能となる。基地局側の Wi-Fi ルーターは専用のものを使用するが、車両側の Wi-Fi ルーターは自由に選択することができる。したがってその場所で最も受信が安定する携帯電話回線のキャリアを選択できる。なお、基地局側のルーターは有線形式で構成することも可能であるが、今回は基地局を様々な場所で運用することを想定し、携帯電話回線を使用する Wi-Fi ルーターとした。

### 3. 計測精度の検証

### 3.1 検証方法

今回構築したシステムと通常のシステムとでは、計測精度に差が生じるのかを検証するため、図 1 に示した 2 つのシステムを 1 台の実験車両に同時に装備し、一般財団法人日本自動車研究所(JARI)の城里テストセンター(STC)内に 9 つある試験路のうち外周路を使用して位置計測を行った。

図2に実験車両に車載した GPS データロガーを示す.システムごとにそれぞれの GPS データロガーを 計装した.また,補正信号の GPS RTK 基地局も,図3に示す様に通常システム用と携帯電話回線を利用したシステム用とでそれぞれ設置した.なお,いずれの機器も精度校正されている同じ製品を用いた.



図2 実験車両に計装したGPSデータロガー

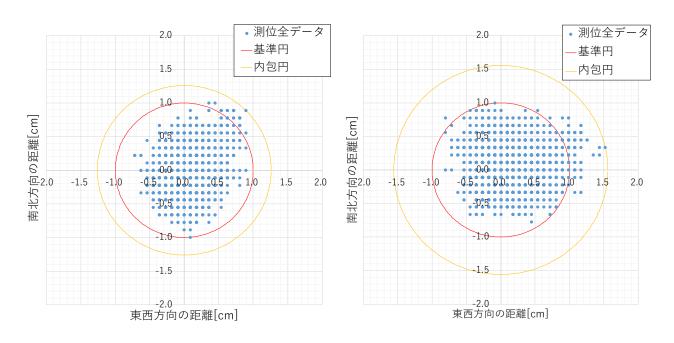


図3 設置したGPS RTK基地局

### 3.2 静的精度

まず車両を停車させた状態で、構築したシステムが、通常システム構成での GPS データロガーの公称精度(半径 1 cm の円の中に 95%以上のデータが含まれる) $^{51.6}$ と同等であるのかを検証した。計測結果を図 4 に示す、なお、計測時間は連続 1 分間とした。

図 4 に示す各円の中心は、記録したデータの中で最も多く計測された位置を表している.赤色の円は データロガーの公称精度である半径  $1\,\mathrm{cm}$  の円を示し、黄色の円は測位した全てのデータを内包する円を 表す.通常のシステムでは、全データのうち 99.6%のデータが赤色の基準円の中に収まる.一方で、携帯 電話回線を用いる今回のシステムでは、全データのうち赤色の基準円の中に収まるのは 98.3%であり、また内包円の半径が  $0.3\,\mathrm{cm}$  大きい.ただし、構築したシステムでも、GPS データロガーの公称精度である「半径  $1\,\mathrm{cm}$  以下に 95%以上のデータが含まれている」という公称精度を十分に満足していることを確認 した.



a) 通常のシステムでの位置計測結果 b) 携帯電話回線を用いるシステムでの位置計測結果 図4 静止状態での精度検証の結果

### 3.3 動的精度

次に走行時の計測精度を検証した.外周路の直線区間において、実験車両を80 km/hで200 m(約9秒間)走行させて取得した、位置データの分析結果を図5に示す.走行中は時々刻々と位置が変わるため、静止状態の様に公称精度を求めることができない.そのため、それぞれのシステムでの計測値を比較することとした.図中の各プロットは、各時刻において、通常のシステムにより計測された位置を円の中心とした場合に対して、携帯電話回線で補正したシステムで計測された位置のずれ量を示している.すなわち、通常システム構成で計測された位置を正と仮定した場合の計測値の誤差と考えることができる.

赤色の円はデータロガー公称精度である半径 1 cm の円,灰色円は倍の半径 2 cm の円を表している. それぞれシステムの計測データが公称精度 $\pm 1$  cm で計測されることから,同時刻に記録された座標の誤差は最大で $\pm 2$  cm 許容できると考えられる.

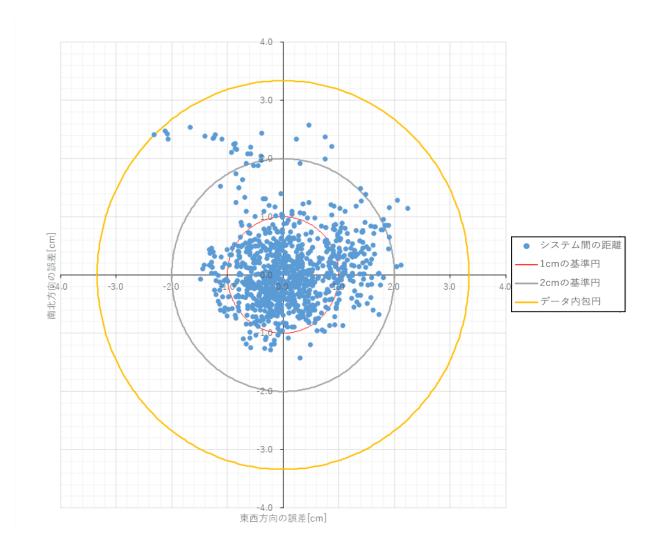


図5 走行中の精度検証の結果

### 4. 車両挙動計測の試行

実車による公道環境下での安全性評価を想定し、一例として、見通しの悪い曲路を走行する車両の車線内位置(ふらつき)の計測を試行した.

### 4.1 計測方法

2章で構築した携帯電話回線を用いて補正を行うシステムを実験車両に計装し, STC 内の試験路 (外周路) にて、走行中の車両位置を計測した. 外周路に設定した走行区間を図 6 に示す.

曲路区間は800 m 以上あり、通常のシステムではGPS RTK 基地局から全区間を見通すことができないため、設定した曲路区間の計測が困難である。図中に黄色い点で示した、直線区間の2点および曲路区間(曲率半径:425 m)の3点の白線(車線区分線)中央の位置をあらかじめ測定し、これらの点を基準として直線区間と曲路区間の各座標を計算で求め、データ分析用の地図データを作成した。

実験車両は LKA(Lane Keeping Assistant)および ACC(Adaptive Cruise Control)を装備しており、実験では、ACC の速度設定を 60 km/h もしくは 100 km/h にして、LKA を作動させた状態でハンドルには手を添えるだけで車両を走行させた.

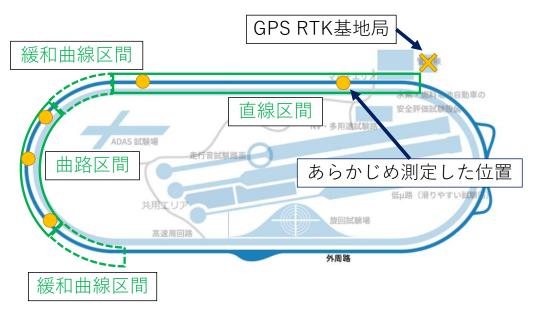


図6 外周路に設定した走行区間とリファレンスポイント

### 4.2 計測結果

直線区間での計測結果を図7に示す.

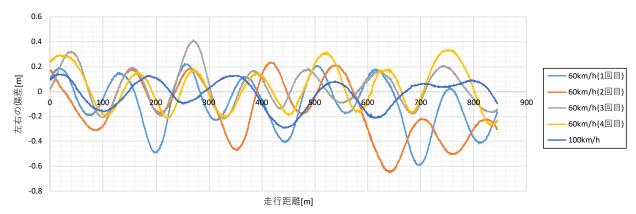


図7 直線区間走行時のふらつき

図の縦軸は、走行している車線中央と車両中心とのズレの大きさを示し、左方向を正として示している。左右方向の偏差の値から、車線中央から±0.6 m 程度の範囲でふらつきながら走行していることがうかがえる。

次に曲路区間での計測結果を図8に示す.

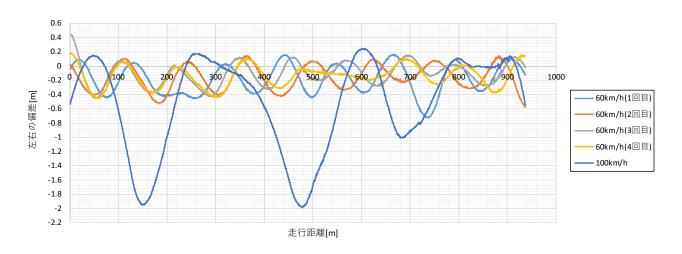


図8 曲路区間走行時のふらつき

いずれの速度の結果も、グラフの中心がマイナス(右方向)へオフセットしている。 $60 \, \mathrm{km/h}$  の結果では、車線中央からおおよそ  $0.1 \, \mathrm{m}$  右方で車線内を走行しているが、 $100 \, \mathrm{km/h}$  の場合には、車線中央から最大で  $2 \, \mathrm{m}$  程度右方まで移動して車線逸脱しており、 $1.1 \, \mathrm{LKA}$  の機能だけでは  $1.1 \, \mathrm{R425}$   $1.1 \, \mathrm{LKA}$  の機能だけでは  $1.1 \, \mathrm{R425}$   $1.1 \, \mathrm{LKA}$  のおーブを追従できていないことが計測したデータからわかる。

#### 5. まとめ

今回構築した携帯電話回線を使用して RTK 補正信号を送受信するシステムでは,通常の専用無線機を使用するシステムと同等の精度を満足する位置計測が可能であることを確認した.また,通常の専用無線機を使用するシステムでは位置計測ができない見通しの悪い曲路区間において,RTK 精度での計測を行うことも実績として得られた.この計測手法が,多様な公道環境下での実車試験において活用されることを期待したい.

### 参考文献

- 1) 経済産業省: 令和4年度無人自動運転等のCASE対応に向けた実証・支援事業(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)
  - https://www.meti.go.jp/meti\_lib/report/2022FY/000450.pdf, (参照 2023-11-10)
- 2) 経済産業省: 令和3年度無人自動運転等の先進MaaS実装加速化推進事業(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)
  - https://www.meti.go.jp/meti lib/report/2021FY/000334.pdf, (参照 2023-11-10)
- 3) 一般社団法人 日本自動車工業会自動運転部会 AD 安全性評価分科会: 自動運転の安全性評価フレームワークVer 3.0 https://www.jama.or.jp/operation/safety/automated driving/pdf/framework ver 3 0.pdf, (参照 2023-11-10)
- 4) 自動走行ビジネス検討会事務局: 自動走行の実現及び普及に向けた取組報告と方針version7.0 <a href="https://www.meti.go.jp/policy/mono\_info\_service/mono/automobile/jido\_soko/pdf/20230428\_houkokusyo.pdf">https://www.meti.go.jp/policy/mono\_info\_service/mono/automobile/jido\_soko/pdf/20230428\_houkokusyo.pdf</a>, (参照 2023-11-10)
- 5) VBOX JAPAN 株式会社: VBOX3i, 3iSL, 3iSLR ユーザーマニュアル (V3, V4 モデル) https://www.vboxjapan.co.jp/VBOX/support/Manual/RLVB3i 3iSL 3iSLR V3V4 Manual japanese.pdf, (参照 2023-11-10)
- 6) VBOX JAPAN 株式会社: 仮想基準点方式ネットワーク型 RTK 測位 http://www.vboxjapan.co.jp/ADAS/ADAS Jenoba/Jenoba data.pdf, (参照 2023-11-10)

## レベル3自動運転車の緊急操作中における ドライバの操舵介入抑制と主観的受容性に関する調査資料\*

Subjective Acceptability of Canceling a Driver Steering Intervention during Emergency Manoeuvre in Level 3 Automated Vehicles

栗山 あずさ\*1 本間 <u>売平</u>\*2 小高 賢二\*3 Azusa KURIYAMA Ryohei HOMMA Kenji KODAKA

### **Abstract**

The regulation on Automated Lane Keeping Systems (UN R157) requires that in case of an event in which the vehicle is at imminent collision risk, the system is to perform an Emergency Manoeuvre (EM) for the purpose of avoiding or mitigating a collision. In this study, a DS (Driving Simulator) experiment was conducted to investigate the subjective evaluation when the override by the driver's steering during EM braking control was cancelled. Forty-two people participated in the experiment. Experimental conditions were with and without adjacent vehicles when EM was activated. Regarding the degree of satisfaction with the system, including the cancellation of override, under the condition "with" an adjacent vehicle, 4 out of 8 (50.0%) responded from "slightly satisfied" to "satisfied", and under the condition "without" an adjacent vehicle, 7 out of 10 people (70.0%) responded from "dissatisfied" to "very dissatisfied". Various opinions were obtained on the suppression of driver intervention, and these are presented below.

KEY WORDS: 自動運転,緊急回避操作(EM),操作介入抑制,受容性,主観評価

### 1. はじめに

近年,自動車分野において,運転の自動化に関する議論が日米欧を中心に活発に進められている.運転の自動化については、システムとドライバの役割をもとに、レベル分けがなされている. SAE (Society of Automotive Engineers)の自動化レベルの定義<sup>1)</sup>によると、自動化レベル3では、運転に関連する対象物・事象の検知及び応答(Object and Event Detection and Response: OEDR)を含む、すべての動的運転タスク(Dynamic Driving Task: DDT)をシステムが担うものの、システムの作動継続が困難な場合には、介入の要求(Request to Intervene: RtI)が提示され、ドライバの対応が求められる.

自動運転に関する法整備については、2020 年 6 月に国連の自動車基準調和世界フォーラム(WP29)において、高速道路における「自動車線維持装置(Automated Lane Keeping Systems: ALKS)に関する規則」(UN R157) $^{2)}$  が成立し、自動化レベル 3 の市場化が可能となった。成立した当初、当該法規の適用範囲は高速道路内、60 km/h 以下、かつ同一車線内での車線維持機能であったが、2022 年 6 月の WP29 において、上限速度を 130 km/h 以下に引き上げること及び車線変更機能を追加することが合意された  $^{3)}$ .

<sup>\* 2023</sup>年8月23日受理

<sup>\*1</sup> 一般財団法人日本自動車研究所 自動走行研究部

<sup>\*2</sup> 一般財団法人日本自動車研究所 自動走行研究部 博士 (人間科学)

<sup>\*3</sup> 一般社団法人日本自動車工業会

UN R157 では、車両が 5 m/s² 未満の制動では回避できない差し迫った衝突リスクにさらされている状況において、システムにはその衝突を回避または緩和する目的で緊急操作(Emergency Manoeuvre: EM)することが求められている  $^{3}$ )。 さらに、同規則には、EM 中の場合、差し迫った衝突リスクが無くなるまで、システム解除を遅らせてもよいことや、EM 中に関わらず、ドライバの操作による差し迫った衝突リスクを検出した場合、ドライバの操作による影響を低減または抑制してよいとの記載がある  $^{3}$ ).

EM 中のドライバの運転行動については、制動による緊急操作(以下、EM 制動)中に、ドライバが操舵による操作介入(オーバーライド)を行った結果、隣接した車線を走行する車両に衝突するケースや、システムによる制動が解除され、より高い速度で障害物に衝突するケースが報告されている 4). このようなドライバの操作介入による影響への対策の一つとして、EM 中のドライバによる操作介入の影響をキャンセルする方法が考えられる. しかしながら、そのような制御をした場合には、ドライバの意図した操作が実行(車両挙動に反映)されないことになるため、受容性を損ねる可能性がある. 特に、操舵による操作介入(以下、操舵介入)の抑制は、意図した横方向挙動が生じず、ドライバの意図との乖離がより大きい可能性がある. そこで、本研究では EM 制動中を対象に、ドライバの操舵介入を抑制した時の主観評価を DS 実験により調査した. なお、本実験は、補足調査の位置づけとして、他の目的による実験 5) の後に実施したものである.

### 2. 方法

### 2.1 実験計画および実験参加者

本実験では、自動運転の EM 制動中における、ドライバの操舵介入を抑制した際の印象や受容性を調査するため、EM 制動中の交通状況が異なる 2 条件(詳細は 2.6 参照)を設定した. 実験は 1 名の参加者が 1 つの条件に参加する参加者間計画にて実施した.

実験参加者は日常的に運転をしている 21 歳から 60 歳までの一般財団法人日本自動車研究所(JARI)の職員 42 名であった. 実験の参加にあたっては,事前に書面と口頭にて,実験内容や手順,注意事項などを説明した上で,任意に参加同意書への署名を求めた. なお,本実験は,JARI の実験倫理委員会による承認(21-005)を得た上で実施した.

### 2.2 実験装置

走行環境および自動運転システムの模擬には, JARI 所有の全方位視野ドライビングシミュレータ (DS) を用いた. 当該装置は,全方位スクリーンにより,運転視界を 360 度再現することが可能であり, 6 軸動揺装置機構により,車両運動に応じて生じる加減速度を模擬することが可能である.

### 2.3 走行環境

直線およびS字カーブによって構成される, 2 車線の高速道路を模擬した実験コースを設定した. 走行車線および追越車線の幅員は3.5 m, 路肩の幅員は3 m であった. 制限速度は100 km/h とした. 自車は走行車線を走行し、自車線の前方には先行車が100 km/h で走行した. 自車は自動運転システム (詳細は2.4参照) により、先行車に追従して走行した. 追越車線では、他車両が相対速度10 km/h で走行車線の車両を追い越すように走行した.

### 2.4 自動運転システム

### (1) 定常走行

本実験では SAE の自動化レベル 3 相当の自動運転を模擬した. ドライバがブレーキおよびアクセルペダルから足を離した状態で、ステアリングホイールの「自動運転レバー」を操作することで、自動運転システムが起動した. 自動運転中は、 $100\,\mathrm{km/h}$  を目標に自動的に速度を制御し、先行車が存在する場合には、先行車との車間時間が  $2\,\mathrm{秒}$ となるように、自動で速度を制御した. 直線および S 字カ

ーブともに、車両中心が車線中央を走行するよう自動で操舵を制御し、操舵制御中には操舵角に応じてステアリングホイールが回転した。車線変更が必要な際には、自動で方向指示器を提示し車線変更した。自動運転システムの解除(システムオフ)は、ドライバによるアクセルペダル、ブレーキペダル、ステアリングホイールのいずれかの操作量が解除閾値を超えることで可能であった。各操作による自動運転システムの解除閾値は、アクセルペダルが最大ストローク量の10%、ブレーキペダルが最大ストローク量の5%、ステアリング軸トルクが左右5Nmとした。これらの解除閾値を超える操作量が検出された時点で、自動運転システムによる制御を瞬時にすべて解除した。

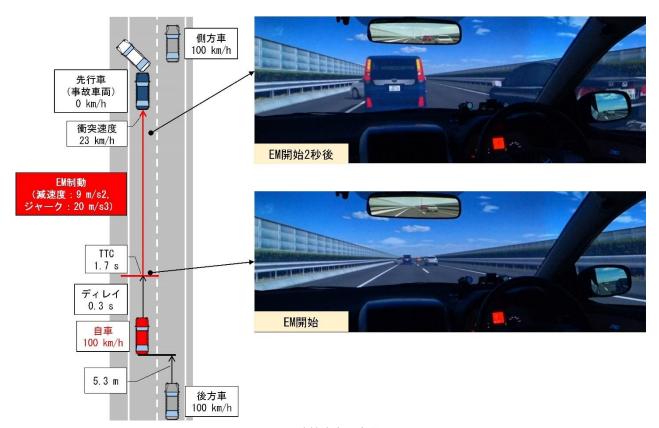
### (2) 実験におけるEMの仕様

UN R157 に従い,EM は「車両が 5 m/s² 未満の制動では回避できない差し迫った衝突リスクにさらされている状況において,その衝突を回避または緩和する目的」 $^{3)}$  で作動するものとした.本実験で模擬した EM は,制動により衝突の回避または被害軽減を目指すものであり,システムの最大性能を想定し,対象物を検知してから制動を開始までに要する時間(検知時間)は 0.3 秒,減速度は 9 m/s² 、ジャーク(加速度の微分)は 20 m/s³ とした.

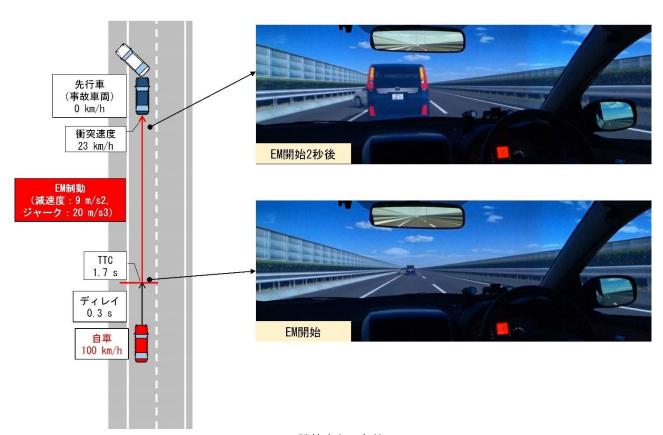
本実験では、EM 中のドライバによる操舵介入を抑制した際の受容性を調査するため、EM 制動中ドライバによる操舵介入がなされた場合には、その入力を抑制し、EM 制動制御を継続する仕様とした. 具体的には、EM 制動中に操舵介入をした場合には、軸トルク最大 15 Nm の反力でステアリングが中央に戻るよう設定した.

### 2.5 EM場面

本実験の EM 場面は、走行開始から約2分後、ドライバが前方を向いているタイミングで実験者の操作により発生させた. 具体的には、自車が高速道路の直線部を速度100 km/h、車間時間2秒で先行車に追従して走行している最中に、先行車が事故車両に衝突して停車(瞬時に速度0 km/h)する状況を発生させた(図1). 先行車停車から0.3秒後、衝突余裕時間(Time to collision: TTC)1.7秒の地点からEM制動が作動し、約3秒後に23 km/hで先行車に衝突した. EM 作動時におけるドライバの周囲への監視状態を統制するため、前方を向いている状態でEM 場面を発生させた. EM 中における追い越し車線の交通状況は、実験条件(詳細は2.6参照)により異なった.



### a) 隣接車あり条件



b) 隣接車なし条件

図 1 各条件のEM作動場面のイメージ

- 34 -

#### 2.6 実験条件

操舵介入を抑制する理由とその時の交通状況が一致しているか否かが主観評価へ及ぼす影響を調べるため、EM 中の隣接車両の有無を実験条件とし、隣接車あり条件/隣接車なし条件とした。隣接車あり条件では、自車の右後方 5.3 m の位置に 100 km/h で走行する隣接車両を設定し、さらにその前方および後方に車間時間 1 秒で走行する車両を複数台設定した。したがって、ドライバによる右方向への操舵介入に対する抑制がない場合には、隣接車両に衝突する状況であった。隣接車なし条件では、EM 中に追越車線を走行する車両はなく、ドライバによる右方向への操舵介入が抑制されなければ、先行車との衝突を回避できる状況であった。本実験では、両条件ともに操舵介入を抑制したため、前述の通り EM 作動から約3 秒後に 23 km/h で先行車に衝突した。各条件への参加者の割付は表 1 の通りであった。

<b>条件</b>	性別		年齢[歳]		運転日数/週 [日]		年間走行距離 [km]	
*#	男性	女性	平均值	SD	平均值	SD	平均値	SD
隣接車あり(n=21)	19	2	39. 4	12. 5	6. 6	0. 7	10, 800	6, 700
隣接車なし(n=21)	16	5	41.0	11. 5	6. 1	1.4	10, 800	7, 400

表 1 各条件における実験参加者内訳

# 2.7 HMI (Human Machine Interface) デザイン

自動運転システムの作動状況(自動運転/EM/RtI(練習走行のみ実施))は,視覚表示および聴覚表示によりドライバに提示した.視覚表示はメータクラスタ内中央の約 $4\,\mathrm{cm}$ 四方の領域に表示した.各作動状況における視聴覚表示の詳細は,表 $2\,\mathrm{onill}$ りであった.EM開始時には,聴覚表示とともに赤地に黒文字の「!」(表 $2\,\mathrm{onill}$ 原動中」欄参照)が提示された.

		自動運転システム				
	自動運転 システム作動中	EM作動中  警報音条件 作動告知音条件		Rt I (練習走行のみ)	オフ (手動運転中)	
視覚表示	自動運転中		!	運転して下さい		
聴覚表示	・0.5 kHzの純音 ・1.0秒間提示 ・「ポン」	・2.0 kHz+1.5倍の 複合音 ・0.2秒周期 ・duty比70% ・1.0秒間提示 ・「ビビビ」 ・暗騒音 (約70 db(A)) +約20 db(A)	・1.0 kHzの純音 ・0.2秒周期 ・duty比50% ・0.4秒間提示 ・「ピピ」 ・暗騒音 (約70 db(A)) +約10 db(A)	・0.5 kHzの純音 ・0.25秒周期 ・duty比50% ・1.0秒間提示 ・「ピピピ」	・なし	
システム状態	自動運転システム が、周囲の安全確 認や、すべての操 作を行っている状態		生し, <b>自動運転が衝</b> <b>緊急操作を行ってい</b>	自動運転が継続できなくなるため、 ドライバの運転を 求めている状態	自動運転システム が作動していない 状態	

表 2 各自車状態におけるHMI

#### 2.8 実験手順

実験は下記の手順にて実施した.なお、本調査資料のデータは、手順4にて取得したものである.

#### 1. 教示(20分程度)

- ・ 実験説明および参加同意確認
- ・ 実験説明は、説明シートを用いて下記のように実施

# 自動運転中の走行方法:

- 「自動運転中は、システムが周囲の状況を確認して、ハンドル、アクセル、ブレーキの制御を行いますので、周囲の安全確認や運転操作を行う必要はありません.」
- 「自動運転中は、ハンドル、アクセル、ブレーキから手足を離して、リラックス(ただし、居眠りは NG)していてください.」
- 「自動運転をやめたい(手動運転を行いたい)ときには、ドライバがハンドル、アクセル、ブレーキのいずれかの操作を行うことで、自動運転システムがオフになり、いつでも通常の手動運転に切り替わります。」

# 各自動運転状態の意味とドライバに求める対応:

- 自動運転システム作動中:「自動運転システムが周囲の安全確認や,すべての操作を行っている 状態ですので,ドライバの操作は不要です.」
- RtI: 「自動運転が継続できなくなるため、ドライバの運転を求めている状態です. 必ず対応が必要ですが,必要な操作内容は周囲の状況に応じて異なりますので、ドライバが判断してください.」
- EM 作動中:「急な衝突リスクが発生し、自動運転が衝突を回避するための緊急操作を行っている 状態です. 衝突を回避できるか否かは、状況(周囲の車の動きなど)によって異なります. 操作 を行うか否かや、操作を行う場合の操作内容はドライバが判断してください. 」

なお、EM 作動中の操作介入の目安として、自動運転の緊急操作で衝突を回避できると思った場合には、操作を行わなくてよいが、衝突を回避できそうにないと思った場合には、操作を行ってよい旨を口頭で教示した.

運転に関するアンケート

#### 2. 練習走行(15分程度): 手動運転および自動運転の練習

- ・手動運転での定速走行, 車線変更
- ・自動運転起動の練習、自動運転での定常走行、車線変更、加減速の体験
- ・手動運転への運転引き継ぎ(RtI)の体験
- 3. EM操舵中のドライバ行動調査および主観評価聴取(15分程度)
- 4. EM制動中のドライバの操舵介入抑制に対する主観評価聴取(10分程度)

#### 2.9 主観評価内容

EM 制動中に操舵介入を行った参加者に対し、アンケートシートを用いて主観評価を聴取した.

## EM制動中のドライバによる操舵介入を抑制した際の満足度とその理由

EM 制動中の操舵介入を抑制した際の満足度を調べるため、図 201~7 のうち最も当てはまるものを回答するよう求めた。また、満足/不満の理由について、自由回答を求めた。

緊急場面の発生後、あなたの運転操作によって、衝突被害が 大きくなることや、周囲の車と衝突することを防ぐため、 自動運転システムは、あなたの操作を受け付けませんでした

#### そのような自動運転システム(=今、体験した自動運転システム) に対する、あなたの満足度とその理由を教えてください。

1	2	3	4	5	6	7
非常に不満	不満	やや不満	どちらでもない	やや満足	満足	非常に満足

図 2 満足度に関する質問および選択肢

# EM制動中のドライバによる操舵介入を抑制した際の許容度

EM 制動中の操舵介入を抑制した際の許容度を調べるため、図 3 の 1~3 のうち最も当てはまるものを回答するよう求めた. 本実験では、ドライバの操舵介入を抑制した結果、衝突速度は低減されるものの、結果的に停止車両に衝突する場面であった. そこで、衝突の有無による許容度の違いを把握するため、衝突を回避できた場合を想定してもらい、同じ質問への回答も求めた.

緊急場面の発生後、あなたの運転操作によって、衝突被害が 大きくなることや、周囲の車と衝突することを防ぐため、 自動運転システムは、あなたの操作を受け付けませんでした

そのような自動運転システム (=今、体験した自動運転システム) に対する、あなたの考えに最も近いものを、下記のうち1つ選んでください。

- 1. 上記の理由があったとしても、ドライバーの操作を受け付けないことは許容できない
- 2. 上記の理由があるのならば、 ドライバーの操作を受け付けないことを許容できる
- 3. 上記の理由がなくても、 ドライバーの操作を受け付けないことを許容できる

#### 図 3 許容度に関する質問および選択肢

# ドライバの操作介入を抑制することに対する心配点

上記に加え,「ドライバーの操作が受け付けられないことによる,最も心配な場面(心配なこと)を教えてください」との質問を行い,自由回答を求めた.

#### 3. 結果

各条件21名のうち、操舵介入を行ったのは、隣接車あり条件で8名(38.1%)、隣接車なし条件で10名(47.6%)であった。これらの参加者を対象に主観評価を聴取した。

# 3.1 EM制動中のドライバによる操舵介入を抑制した際の満足度

隣接車あり条件では、8名中4名(50.0%)が、「やや満足~満足」と回答したが、隣接車なし条件では、満足側の回答は、「やや満足」の1名(10.0%)であり、「やや不満~非常に不満」との回答が10名中7名(70.0%)に上った(図4).不満の理由として、「衝突した」・「右車線に回避したかった」との回答が複数見られた.満足の理由として、条件に関わらず「右車線での二次被害を起こさずに済む」との回答が見られた.

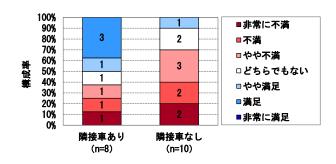
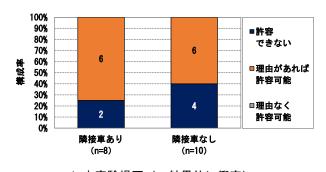
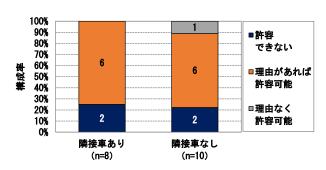


図4 EM 制動時のドライバの操舵介入抑制に対する満足度

# 3.2 EM制動中のドライバによる操舵介入を抑制した際の許容度

隣接車あり条件では、8 名中 6 名(75.0%)が、ドライバの操舵介入を抑制する理由がある場合には許容可能(=図中の「理由があれば許容可能」)としたが、隣接車なし条件では、その割合は 10 名中 6 名(60.0%)であり、わずかではあるが、隣接車あり条件の方が、許容できる割合が高かった(図 5a). 結果的に衝突を回避できたと想定した場合には、隣接車なし条件においても、「理由があれば許容可能」とする割合が高くなった(図 5b).





a) 本実験場面(=結果的に衝突)

b) 結果的に衝突を回避することを想定した場合

図 5 EM制動時のドライバの操舵介入抑制に対する許容度

#### 3.3 ドライバの操舵介入抑制に対する心配点

参加者の自由回答から得た,EM 制動中の操舵介入を受け付けないことに対する心配点をまとめた(表3).システムの技術や精神面への影響に関する心配が複数得られた.具体的には,急な割り込みなどの事象が発生した場合には,人間の介入が必要ではないかとの意見が得られた.また,現在の技術レベルでは,システムの性能が完璧ではないため,介入を抑制されるのが不安との意見も得られた.一方で,これらの回答者からは,技術レベルの向上によっては,介入の抑制を許容できるとの回答も得られた.精神面への影響については,自分の操作が受け付けられず,システムの操作により自分や他者が死亡してしまうことに対する心配が挙げられた.その他の意見として,緊急場面以外で介入が抑制されることは危険といった意見が得られた.また,隣接車両に衝突した方が,先行車への衝突と比べて被害が小さいのであれば,介入を抑制しなくても良いのではないかといった意見もあり,中には,どちらに衝突した方が,事故の被害(死者が発生するか否か)が小さくなるかを判断してくれると良いといった意見もあった.

#### 表 3 ドライバの操作介入を抑制することに対する心配点

#### システムの技術レベルに関する心配点

- システムが間違った判断をしないのか心配.
- 自動運転が認識していない何かがあって事故になるのが心配. そういった時に備えて介入できた方が良いのでは?と思った.
- 今の技術レベルでは自動運転に完全な信頼をよせていないから、急な割込みととかに対応できるか心配。とっさに自分の操作が必要では?というところで人間の方が良いと思う。
- 今の技術レベルで操作が受け付けられないことに対しては不安に思う.
- システムが完璧でないから心配。

#### 精神面への影響に関する心配点

- 自分の操作が受け付けられずに事故になると、精神的にきつそう. しばらく自動運転に乗れなくなると思う.
- 自分が死ぬかもしれないと考えると、自分の意志で最後の一瞬を決められない(システムの操作にゆだねる)ことが心残りになりそう。
- 自分の責任で自分が死ぬのは良いが、操作が受け付けられず、車の責任で相手が死ぬのは嫌

# 緊急場面以外での介入抑制に対する心配点

- 緊急を要する場面でないのに受け付けられないのは逆に危ないかなと思う
- 緊急場面ではなく、ドライバが確実に回避できると思っているのに、システム側にお任せになるのはちょっと違うと思う.

#### その他の心配点

- 操作が受け付けられずに事故になった場合、どこに責任の所在があるか懸念. 自分か車か.
- 自分で操作をしたい人にとっては、キャンセルによって思ったように車が動かずにパニックにならないか心配.
- 誤作動した場合が心配. 止まろうとしているのに止まれないとか.

# その他の意見

- 死者が出ないなら、事故が大きくなっても介入した結果の方が良いかもしれない. 今の実験 場面だと、前の車にぶつかって死者が出るか、右によけてけが人が多いが死者は出ないかだ と、右によけれた方が良いかもしれない. 右後ろの車もよけてくれるかもしれない.
- 自分が所有する車なので、自分中心に考えると、助かるように制御してほしい.
- 実験場面 (隣接車両なし) で、右の車とぶつからないのに受け付けないのは許容できない。 右に車がいても、よけられるのに受け付けられないのは許容できない。
- ドライバの操作を受け付けた場合と受け付けない場合で、被害がどちらが少なくて済むか、 システムが判断してくれたらいい。
- 事前にディーラーやメーカーのHPなどで、操作を受け付けないことの詳細説明があった上で、納得できる状況で抑制されたのであれば大丈夫.

#### 4. まとめ

本実験では、自動化レベル 3 相当の自動運転システムによる EM 制動中を対象に、ドライバの操舵介入を抑制した際の主観的な受容性や心配点を調査した。その結果、ドライバの操舵介入を抑制した理由と交通状況が一致している場合(隣接車への衝突を防ぐため、操舵介入を抑制)には、許容できるとの回答が複数見られたものの、抑制した理由と状況が一致していない場合(隣接車がないにも関わらず、操舵介入を抑制)には、許容できる割合は低かった。また、ドライバの介入が受け付けられないことに対する心配は多岐に渡ることが分かった。本実験で得られたコメントも踏まえると、システムの性能の向上により、ドライバの操作を許容または抑制した場合の衝突リスクを交通状況に応じてシステムが予測し、介入可否を判断することで、より受容性が高まることが示唆された。一方で、緊急場面でのドライバの操作介入が衝突リスクを高める。 ことも考慮すると、EM の目的やドライバの操作介入を抑制することの意図を周知するなど、操作抑制に対する社会的な受容性の醸成を図ることも重要であると考えられる。

#### 参考文献

- 1) SAE J3016 2018: (R) Taxonomy and Definitions for Terms Related to On Road Motor Vehicle Automated Driving Systems, SAE International (2018), <a href="https://www.sae.org/standards/content/j3016\_201806/">https://www.sae.org/standards/content/j3016\_201806/</a>, (参照 2023-08-23)
- 2) Uniform provisions concerning the approval of vehicles with regard to Automated Lane Keeping Systems, https://unece.org/sites/default/files/2021-03/R157e.pdf, (参照 2023-08-23)
- 3) E/ECE/TRANS/505/Rev.3/Add.156/Amend.4, Uniform provisions concerning the approval of vehicles with regard to Automated Lane Keeping Systems (2021) <a href="https://unece.org/sites/default/files/2023-03/R157am4e%20%281%29.pdf">https://unece.org/sites/default/files/2023-03/R157am4e%20%281%29.pdf</a>, (参照 2023-08-23)
- 4) 本間亮平ほか: レベル3自動運転車の緊急回避制御中におけるドライバの介入行動, 自動車技術会論文集, Vol. 53, No. 3, p. 669-674 (2022), doi.10.11351/jsaeronbun.53.669
- 5) 本間亮平ほか: レベル3自動運転車の緊急回避制御中におけるドライバの介入行動 (第2報), 自動車技術会論文集, Vol. 54, No. 1, p. 88-93 (2023), doi.10.11351/jsaeronbun.54.88

# マルチエージェント交通流シミュレーションを用いた 自動運転技術の高度化に資する仮想評価環境\*

Virtual Test Platform Utilizing a Multi-agent Traffic Simulation to Develop a Sophisticated Automated Driving System

<u>北島 創\*1</u> 内田 信行\*1 菅沼 直樹\*2
Sou KITAJIMA Nobuyuki UCHIDA Naoki SUGANUMA

奥野 唯\*<sup>3</sup> 田島 淳\*<sup>4</sup>
Tadashi OKUNO Jun TAJIMA

#### **Abstract**

This paper presents an effective testing methodology aimed at enhancing the development of a more advanced Automated Driving System (ADS). This is achieved through the generation of both intricate and challenging scenarios using a virtual test platform. Given the challenges associated with identifying and accumulating these scenarios via field operational tests, the a virtual test platform is expected to be a valuable approach for enhancing the performance of ADS. However, thea virtual test platform must provide appropriate scenarios in accordance with the current performance capabilities of the respective ADS. To address this, the current research has realized a virtual test platform by integrating a multi-agent traffic simulation with ADS. This integration incorporates functionalities that enable ADS to effectively navigate complex and perplexing scenario. The results of this study reveal that these functionalities not only facilitate the extraction of rare scenarios but also to reinforce significant diversification required to develop sophisticated ADS.

KEY WORDS: マルチエージェント交通流シミュレーション, 自動運転, 認識/判断性能評価

#### 1. はじめに

国内外で研究・開発中の自動走行システムには多様な社会課題の解決が期待されるが  $^{1}$ )、その実用化には安全性が担保されていることが前提となる。自動走行システムの安全性評価手法は国際的な議論が継続しており、国際連合と国土交通省は、自動走行システムが具備すべき安全性を「運行設計領域内において、合理的に予見可能で防止可能な人身事故を起こさないこと」と定めている  $^{2}$ 0.30。これに基づき、日本自動車工業会は自動走行システムの動的運転タスクに関わる網羅的な走行場面(シナリオ)の体系・合理的予見可能性・防止可能性を定義する手法を提唱している  $^{4}$ 0.この考え方は、国際標準(ISO34502)として発行された  $^{5}$ 16よか,UN-R157(Automated Lane Keeping System)の評価シナリオ導出に適用された  $^{6}$ 0.さらに、米国の複数都市で無人移動サービスを展開中の Waymo も ISO34502 を参照して自社の安全性評価結果を公表している  $^{7}$ 0.

<sup>\* 2023</sup>年10月13日受理

<sup>\*1</sup> 一般財団法人日本自動車研究所 自動走行研究部 博士(工学)

<sup>\*2</sup> 金沢大学 博士(工学)

<sup>\*3</sup> OS企画

<sup>\*4</sup> 三咲デザイン 博士(工学)

このように安全性評価手法の一手法として走行場面(シナリオ)に基づいた考え方が提案されているが、現時点の適用対象は高速自動車国道・自動車専用道路であり、今後は自転車や歩行者が混在する一般道に適用していく必要がある。しかし、一般道は自動車専用道に比べて道路環境や交通参加者の相互作用が複雑・多様であり、同様の手法で網羅的なシナリオと評価範囲を定義するには大きな困難が伴う。さらに、ISO21448(SOTIF: Safety Of The Intended Functionality)では、意図した機能の安全性は「既知で危険なシナリオ」と「未知で危険なシナリオ」におけるリスク低減によって達成することを推奨している®、このうち、既知で危険なシナリオは前述したシナリオに基づいた考え方が有効であるが、未知で危険なシナリオに有効な考え方は現時点では確立されていない。

人間の想像力には限界があるため、未知で危険なシナリオを事前に想定し、既知シナリオとして追加していくためには、数理モデルに基づく演繹的な推論による発見的アプローチが有効であると考えられる。その一案としてマルチエージェント交通流シミュレーションの活用が挙げられる。筆者らは、現実的な交通流に運転支援/自動走行が混在した場合の効果を定量的に予測することを目指して当該シミュレーションの開発を進めり、代表的な都市の結果から全国規模の効果を推計する方法論を示した100.

このシミュレーションには、(1)ドライバや歩行者などの交通参加者がそれぞれ行為者 (エージェント) として独自に行動、(2)エージェント同士の相互作用を模擬、(3)複数のエージェントや死角が関する交通状況の創発が可能という特長がある。これらの特長は、既述したように、確度の高い効果予測において有用であったが 9)、10)、このシミュレーションの新たな活用手法として、危険シナリオの効率的な発見にも有用であると考えられる。今後、自動走行システムにとっての危険なシナリオが効率的に発見され、より高い技術を用いて当該シナリオに対する安全性の確保が図られるとすると、結果として、本シミュレーションが自動走行システムの高度化に資するツールとして発展することが期待できる。新たな活用手法の考査にあたっては、特に、実路走行による収集が難しい希少な危険事象をいかにして効率的に収集・検証できるかを指向して取組むことが重要である。

本研究では、未知で危険なシナリオをいかにして効率的に発見するかという課題と当該シナリオにおいて、自動走行システムは難しい対応を迫られる可能性があるため、リスク低減が必ずしも容易でないという課題を解決する新たなアプローチを目指し、自動走行システムの認識・判断技術の高度化に資する安全性評価手法を提案した上で、マルチエージェント交通流シミュレーションに現在開発中の自動走行システムを接続した環境下における提案手法の妥当性を検証する.

# 2. 自動運転技術の高度化に資する評価環境の構築

#### 2.1 評価環境のコンセプト

自動走行システムの実路実証実験を長距離・長時間継続したとしても希少な危険事象を収集・検証することは難しい.この課題を解決するため、運転支援/自動走行の事故低減効果予測用に開発されたマルチエージェント交通流シミュレーション(JA-Re:sim)の機能を拡張することで、危険事象の効率的な収集とその事象への対応能力の検証を行う.

JA-Re:sim の事象を創発する特長を活かして未知の危険を自動生成し、シナリオの網羅性を高めることを基本的なコンセプトに据えている。ただし、未知のものであればいかなるシナリオでも良いということではなく、現実的なエージェント行動とそれらの相互作用が連鎖した結果として得られたシナリオであることが求められる。シミュレーション中の特定の1台が危険事象に遭遇する頻度は小さいため、より効率的に自動走行システムが危険場面を体験できる加速化手法が必要である。つまり、自動走行システムを JA-Re:sim の一つのエージェントとして置き換える(これを接続という)だけでは評価環境の高度化にはならないことに留意すべきである。

したがって,図1に示すようにJA-Re:simと自動走行システムを接続する環境 (i) を基軸としつつ,エージェント行動モデルの充実を含めたシミュレーションの継続的な発展 (ii),システム安全性検証を加速するテスト技法の開発・実装 (iii) (iv) を総合的に進めることが重要である. (ii) (iii) (iv) が相互に連携で

きれば、評価対象である自動走行システムの現状の熟練度を予め診断し、その結果に基づいて適度な難 易度に調節した評価環境が用意できる.これにより、システム開発フェーズに対応した検証手段が実現 され、結果として希少な危険事象の効率的な収集・検証が可能になる.

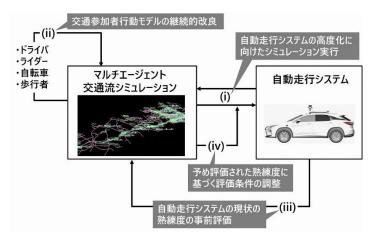


図1 自動走行システムの高度化を実現する仮想評価環境のコンセプト

# 2.2 自動走行技術の向上に資する仮想評価環境の構築

# (1) 仮想評価環境

図 2 は、JA-Re:sim と自動走行システムを接続した仮想評価環境を示している。中継ソフトウェアを介することにより、JA-Re:sim のなかの特定のドライバエージェントを自動走行システムに置き換える。このとき、JA-Re:sim からは自動走行システムの周辺環境の時々刻々の情報を送信し、自動走行システムからはその情報に基づいて認識・判断された制御指令値(アクセル・ブレーキ・ステアリング)が送信される。

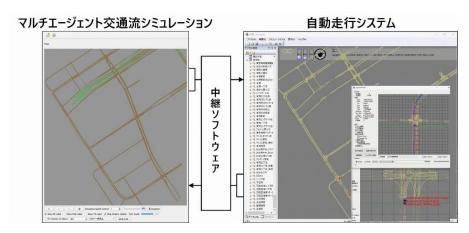


図 2 マルチエージェント交通流シミュレーションと自動走行システムの接続

# (2) マルチエージェント交通流シミュレーション

JA-Re:sim は、内閣府 SIP 事業の研究成果 <sup>11)</sup> をベースに開発されたマルチエージェント交通シミュレーションである。ドライバ・歩行者などの交通参加者エージェント行動による現実的な交通流とエラー・不安全行動の模擬による交通事故の再現を行い、運転支援・自動走行の普及効果を予測する。図 3 は、実装された交通参加者エージェントの一例として追従走行時のドライバ行動モデルを示している <sup>9)</sup>. なお、JA-Re:sim の機能・特性は、自動車技術会の交通事故シミュレーション検定検討委員会のマニュアル <sup>12)</sup> に沿って検証を行い、マニュアルの要求に沿って事故件数の多い 7 つの基本検証シナリオが実行可能であること、現実的な交通流・交差点の信号制御状況が再現できることを確認している。

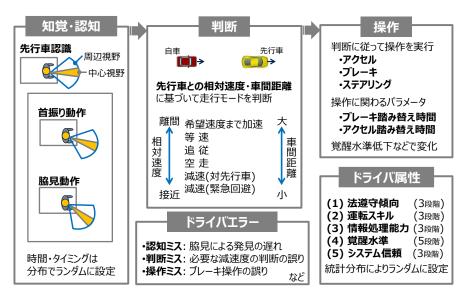


図 3 ドライバエージェントの行動モデル(追従走行時)

# (3) 自動走行システム

本研究では、金沢大学が開発した自動走行システムを一例として、自動走行システムの安全性評価を実施した。金沢大学では 1998 年から市街地における自律的な自動運転を目指した研究開発を実施しており、2015 年からは国内の大学では初となる公道走行実証実験も開始している <sup>13)</sup>. また、内閣府SIP 事業第 2 期においては、AD-URBAN(Automated Driving system Under Real City environment Based on Academic researcher's Neutral knowledge)プロジェクトに参画し、東京臨海部などの実環境下で安定的な自動走行が実現可能であることを実証している <sup>14)</sup>(図 4).



図 4 評価対象の自動走行システムによる公道走行実証実験の様子

# 3. 仮想評価環境を用いた安全性評価テスト技法の研究

# 3.1 自動走行システムの安全性評価観点

自動走行システムの安全性評価にあたっては、変化や外乱を吸収して正常な機能や平静を保つ能力を高めるレジリエンス工学の概念を取り入れる <sup>15)</sup>. 図 5 は、システムのパフォーマンスの時系列的な変化を示す模式図を示している。自動走行システムは運転支援システムと異なり、平常時から遭遇する多様な外乱に対して弾力性・復元性のあることが求められる。安全学においては、以下の3つの要件を満たす場合にレジリエントが優れたシステムとみなすことができる。

- ・要件1:システムは変化に対応することで動作を継続
- 要件2:継続困難な場合は、非常時対応により動作を継続
- ・要件3:非常事態が解消したら適宜正常時に復帰

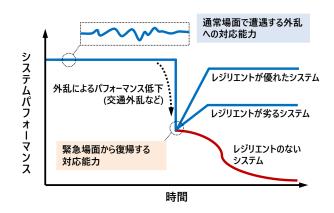


図 5 システムパフォーマンスの時系列的な変化に関する概念図

本研究の狙いに照らし合わせると、要件1は自らは危険に近づかない(自ら危険事象を作り出さない)ことであり、要件2と3は危険状況に巻き込まれたときに、事故に至らないようにその状況に対処することである。したがって、要件1のテストには、交通流における特定のエージェントを自動走行システムに置き換える方式(通常場面を体験させる)が有効と考えられ、要件2・3のテストには、登場する全エージェントが遭遇した危険場面を抽出し、事後的に自動走行システムに置き換える方式(危険場面を体験させる)が有効と考えられる。

#### 3.2 二種類の安全性評価テスト技法を用いた検証の試行

# (1) 方式 1:特定のエージェントを置換する方式

JA-Re:sim に登場するエージェントのうち、ある特定のエージェントを自動走行システムに置き換えるテスト技法である。このとき、他交通参加者のエージェントのエラー・不安全行動の発生確率を高めることによって危険な状況に遭遇する頻度を加速化することもできる。ただし、この方式では評価対象となる自動走行システムの基本走行ロジックの完成度が高くなるほど、高度な認識・判断を迫られるシナリオに遭遇する頻度が低くなることが想定される。

# (2) 方式 2:抽出した場面のエージェントを事後的に置換する方式

全エージェントが遭遇した危険場面を事後的に置き換えるために図6のようなテスト技法を用意した.機能1 (再シミュレーション用情報出力機能)は、シミュレーション中の任意の時刻において、その時刻の前後の場面を再現するための情報を出力する.なお、情報を出力する対象は、衝突、ニアミス、急制動/急操舵などの観点で柔軟に用意できる.つぎに、機能2 (再シミュレーション実行機能)によって、機能1が出力した情報を読み込み、特定のエージェントを自動走行システムに置き換えて連続的にシミュレーションを実行する.このとき、再開時に自動走行システムがいずれのエージェントにも置き換えられる仕組みを備えている.ここで、再シミュレーション機能とは、各エージェントの位置や速度などのログデータを「再生」するものではなく、再開時を初期状態としてシミュレーションを実行するものである.したがって、置き換えた車両の挙動に応じて他交通参加者の挙動も改めて計算されるため、再現した場面が相互作用に基づいて変化する.

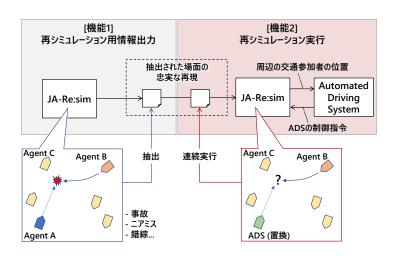


図 6 再シミュレーション用情報出力機能と再シミュレーション実行機能

# 3.3 構築した仮想評価環境を用いた検証が可能にすること

#### (1) 複雑かつ動的な死角の影響を考慮した自動走行ロジックの検証

JA-Re:sim と自動走行システムの接続によって、仮想評価環境において自動走行システムが単独・複数の他者(車両・歩行者など)との多様な相互作用に対応できるかを検証できる。とりわけ、図7に示す Check Visibitily 関数によって、建物が形成する静的な死角と周辺車両などが形成する動的な死角の影響を考慮できる。この関数が自車の周辺車両の認識の可能/不可能な状態を連続的に判別し、公道で遭遇する継続的に認識できない状態と一時的に認識できない状態が混在する実践的な検証環境を実現する。自動走行システムには、この検証環境内で、事故を起こさず、かつ、円滑に走行できる基本走行ロジックを備えていることが第一に求められる。図7は具体的な事例を示している。V274を自動走行システムとした場合、直近の先行車である V39 は認識可能と判別するが、V184と V264 は V39 の遮蔽によって認識不能と判別するうえに V54 も建物の遮蔽により認識不能と判別される。ここで、V39 が車線変更した場合は位置関係が変わるために V264 が認識できるようになるなど、死角に影響しうる周辺車両との複雑な位置関係の変化を連続的に扱うことができる。現状のシナリオベースの安全性評価の方法論では1対1のシナリオに死角の影響を個別に付加するアプローチを採用している 4) が、本研究は現実的な交通流において発生しうる死角の影響を包括的に扱うことができるアプローチを提供する。

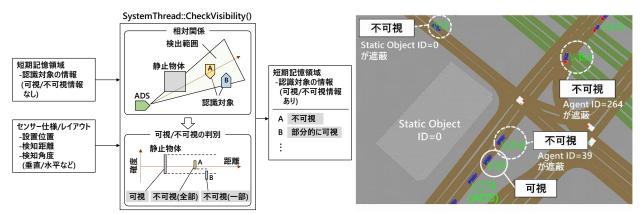


図 7 静的・動的な物体との位置関係から計算した死角情報に基づく遮蔽度の判別

# (2)(a) 方式 1:特定のエージェントを置換した場合の検証

方式1によって検証を行ったところ,自動走行システムの振る舞いが主因となって事故・ニアミスを引き起こす場面は発生しなかった.このことは,交通流シミュレーションに接続した検証に意義がないことを示す結果ではない.むしろ,本研究で評価対象とした自動走行システムは,各地で公道実証実験に臨めるような安全性の高い基本走行ロジックを有しており,平常時に遭遇しやすい外乱に対して頑健であると解釈できる.すなわち,安全に走行するための基本を備えているといえる.一方,これから公道走行に臨む段階のシステムの場合は,本方式の検証が基本走行ロジックの性能確認と向上のために有効な手段となりえる.なお,現状のJA-Re:simでは,二輪車や自転車の振る舞いや不安全行動・エラーに関するロジックの実装は決して十分ではなく,より現実度の高い検証環境に向けて,各エージェントの行動モデルの開発・高度化を図る必要がある.

# (2) (b) 方式 2:抽出した場面のエージェントを事後的に置換した場合の検証

つぎに、方式2によって検証した結果について述べる。方式2では、エージェント同士の交通流シミュレーションの実行を通して事故やニアミスなどの危険な場面を抽出し、再シミュレーション実行のためのログデータを記録する。図8は、信号交差点において青信号に従って進入した車両と赤信号で停止中の車列の間を信号の見落としにより進入した車両が衝突した事例である。このように、現実のドライバのような脇見や見落としなどの過失や不安全行動が要因となって発生する危険場面を抽出できる。方式2では、図8の衝突事例の双方の当事者を事後的に自動走行システムに置換できる。危険場面に陥った状況において自車の被害軽減や衝突回避を図る性能の向上が期待され、とりわけ第2当事者の立場をシステムに置換した検証が有効である。図9は、前述した事例の第2当事者をシステムに置換した場合のシミュレーション結果である。システムは右から接近する信号無視の車両を検知してエージェントよりも早期に減速したことで衝突を回避した。危険場面に対応したか否かに着目するだけではなく、自動走行システムのロジックがいかに機能したかを詳細に解析する必要がある。図9は、シミュレーション実行中のシステムの認識・判断・制御ロジックの動作状況である。このとき、システムは青信号で発進した先行車に追従して発進したが、右から接近する車両検出と進路予測に基づく減速によって信号無視に対して適切に対応した過程が分かる。

ただし、現状は抽出された場面を忠実に再現した状況での検証にとどまっており、システムの対応能力の充分性を示すことは難しい。例えば、自車速度・他車速度が高い、先行車が存在しない、車列の位置が自車に近い状況においても同様に回避できたかは現時点では保証されない。したがって、抽出した場面を忠実に再現するテスト技法にバリエーションを拡張できるようにする点が課題である。

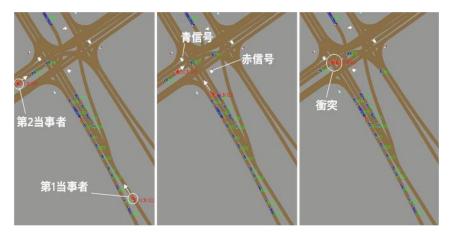


図.8 抽出した危険場面

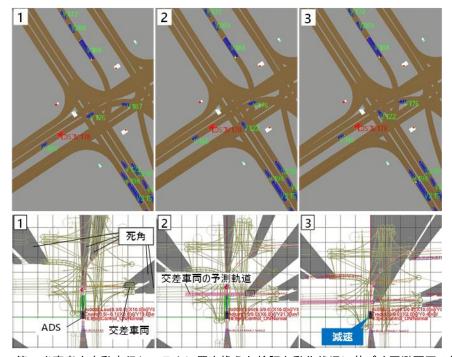


図 9 第2当事者を自動走行システムに置き換えた検証と動作状況に基づく回避要因の解析

# 4. おわりに

本研究では、自動走行システムの高度化に資する安全性評価テスト技法として、マルチエージェント交通流シミュレーションと自動走行システムを接続した評価環境を構築し、エージェントを二通りの方式で自動走行システムに置き換える方法を提案した上でそれぞれの妥当性を検証し、以下の1)および2)に示すことが分かった.

- 1) 特定のエージェントを置き換える方式は、自動走行システムの基本走行ロジックの検証に有効であるが、基本性能が高いシステムであるほど問題となる場面に遭遇することが減少する側面がある.
- 2) 全エージェントが遭遇した危険場面の当事者を事後的に自動走行システムに置き換える方式は,自動 走行システムにとって難しい対応を迫られた状況の効率的な発見を可能にする点で技術の高度化に 有効である. ただし,現状は忠実な再現にとどまっているため,対応能力の充分性を示すことに課題 がある.

今後の課題は、事後的に置き換える方式をさらに効果的にするため、自動走行システムにとって"嫌らしい"バリエーションを付加する機能をマルチエージェント交通流シミュレーションに実装し、自動走行システムと接続した検証に組み込み、その有効性を示すことである。

ここで、"嫌らしい状況"とは、 自動走行システムが回避挙動をとっても、衝突可能性のある他の交通参加者がシステムの回避挙動に同調するように変化したり、衝突する可能性のある他の交通参加者と自動走行システムとの間に第三者の車両が割り込むことで対象を検出できなくなったりする状況が考えられる.

#### 参考文献

- 1) 自動走行ビジネス検討会: 自動走行の実現及び普及に向けた取組報告と方針 version 7.0, p. 16-28 (2023), <a href="https://www.meti.go.jp/policy/mono\_info\_service/mono/automobile/jido\_soko/pdf/20230428\_houkokusyo.pdf">https://www.meti.go.jp/policy/mono\_info\_service/mono/automobile/jido\_soko/pdf/20230428\_houkokusyo.pdf</a>, (参照 2023-10-13)
- 2) UN ECE/WP29: Framework Document on Automated/ Autonomous Vehicles, p. 2 (2020), <a href="https://unece.org/fileadmin/DAM/trans/doc/2020/wp29grva/FDAV\_Brochure.pdf">https://unece.org/fileadmin/DAM/trans/doc/2020/wp29grva/FDAV\_Brochure.pdf</a>, (参照 2023-10-13)
- 3) 国土交通省自動車局:自動運転車の安全技術ガイドライン, p. 3-9 (2018), https://www.mlit.go.jp/common/001253665.pdf, (参照 2023-10-13)
- 4) 日本自動車工業会:自動運転の安全性評価フレームワーク(Ver 3.0), p. 3-19 (2022), https://www.jama.or.jp/operation/safety/automated driving/pdf/framework ver 3 0.pdf, (参照 2023-10-13)
- 5) ISO34502: Test Scenarios for Automated Driving Systems- Scenario Based Safety Evaluation Framework, p. 8-25 (2022), https://www.iso.org/standard/78951.html, (参照 2023-10-13)
- 6) UN ECE: Uniform provisions concerning the approval of vehicles with regard to Automated Lane Keeping Systems, p. 42-58 (2021) <a href="https://unece.org/sites/default/files/2021-03/R157e.pdf">https://unece.org/sites/default/files/2021-03/R157e.pdf</a>, (参照 2023-10-13)
- 7) K. D. Kusano et al.: Collision Avoidance Testing of the Waymo Automated Driving System, ArXiv, abs/2212.08148, p. 1-25 (2022), doi:10.48550/arXiv.2212.08148
- 8) ISO21448: Safety of the Intended Functionality, p. 15 (2022), <a href="https://www.iso.org/standard/70939.html">https://www.iso.org/standard/70939.html</a>, (参照 2023-10-13)
- 9) S. Kitajima et al.: Multi-agent Traffic Simulations to Estimate the Impact of Automated Technologies on Safety, Traffic Injury Prevention, Vol. 20, No. S1, p. S58-S64S (2019), doi:10.1080/15389588.2019.1625335
- 10) S. Kitajima et al.: A Nationwide Impact Assessment of Automated Driving Systems on Traffic Safety Using Multiagent Traffic Simulations, Intelligent Transportation Systems, Vol. 3, p. 302-312 (2022), <a href="https://doi.org/10.1109/0JITS.2022.3165769">doi:10.1109/0JITS.2022.3165769</a>
- 11) 日本自動車研究所: 平成28年度戦略的イノベーション創造プログラム (自動走行システム): 交通事故低減詳細効果見 積もりのためのシミュレーション技術の開発及び実証報告書, p. 9-123 (2016)
  - https://dl.ndl.go.jp/view/prepareDownload?itemId=info%3Andljp%2Fpid%2F11274080&contentNo=1, (参照 2023-10-13)
- 12) 自動車技術会: 交通事故予測シミュレーションシステム検証マニュアル, p. 18-96 (2013), <a href="https://www.netdenjd.com/articles/-/96895">https://www.netdenjd.com/articles/-/96895</a>, (参照 2023-10-13)
- 13) 菅沼 直樹ほか: 高齢過疎地域における自動運転自動車の市街地公道実証実験概要, 自動車技術会学術講演会予稿集(春), No. 14-15S, p. 390-394 (2015), ISSN: 2189-4558
- 14) 菅沼 直樹ほか: 自動運転(レベル3, 4)に必要な認識技術等に関する研究, 内閣府 SIP第2期自動運転(システムとサービスの拡張)最終成果報告書, p. 120-128 (2023), <a href="https://www.sip-adus.go.jp/rd/rd\_page04.php">https://www.sip-adus.go.jp/rd/rd\_page04.php</a>, (参照 2023-10-13)
- 15) E. ホルナゲル著: Safety-Ⅲの実践-レジリエンスポテンシャルを強化する-, 海文堂, p. 27-88 (2015), ISBN-13: 978-4303729868

# ドライバの感情状態が及ぼす自動運転引継ぎ パフォーマンスへの影響\*

**Emotional Changes Effect on Take-Over Performance** 

<u>李 柱衡</u>\*1 <u>中村 弘毅</u>\*1 <u>北島 創</u>\*

Joohyeong LEE Hiroki NAKAMURA Sou KITAJIMA

#### **Abstract**

A driver's emotional state is an important factor of safe driving. Many studies have been carried out to understand the relationship between human driving performance and emotional state. Meanwhile, Level 3 automated driving systems have only recently become practical. While safety is expected to improve year by year, the system suddenly requesting that the driver takes-over can be dangerous. Moreover, emotional states can affect the take-over situation. In this study, we introduce a study to investigate take-over performance according to the human emotional state.

KEY WORDS: 自動運転,感情状態,運転引継ぎ,運転パフォーマンス,ドライビングシミュレータ

#### 1. はじめに

ドライバの感情状態は運転に影響を与える要因であると考えられる。特に,運転中の快・不快は危険な状況に対する回避能力に大きく関係があり,運転中の安全性の評価のために重要な要因である  $^{1)}$ . ここで,快・不快の感情とは,Fig. 1 で示しているようにラッセルの感情モデルで定義された二つの軸の一つの軸であり,もう一つの軸は覚醒レベルである  $^{2)}$ . 快・不快の感情は,ポジティブ・ネガティブな感情で定義し,覚醒レベルは眠気や興奮に関する指標として定義される.

それとは別に、実用化に向けて開発中の ADS(Automated Driving Systems)は、交通安全を向上させるとともに、ドライバは運転のストレスから解放されることが期待されている。自動運転のレベルは SAE(Society of Automotive Engineers)が 5 段階のレベルにで分けている。レベルは 0 の手動運転からレベル 5 の完全自動運転まで定義され、レベル 3 からは部分的に自動運転となり、運転の主体がドライバから自動運転車両に代わる。レベル 3 の ADS が作動している車両に乗車しているドライバは周囲の監視や制御から解放されるが、車両から RtI(Request to Intervene)が発せられた場合、ドライバは周りの状況を把握し、安全に制御を引き継ぐ必要がある。RtI が発生する理由は多くあるが、レベル 3 の自動運転車両は部分的な自動運転システムであるため、システムの運行設計領域(ODD: Operational Design Domain)が決められている。そのため、その領域を離脱した場合は、ドライバに手動運転を要請する RtI が発生する。また、システムやセンサーが故障や検知範囲外になることによる不作動・誤作動、車両に予想外の周辺環境が現れた時には、突発的な RtI が発生する可能性もある。

レベル3のADS作動中のドライバは、OTT (Over-The-Top) サービスを利用し、映画、ドラマ、電子書籍、ゲームなどのコンテンツに時間を費やすことができるようになる。これらのサービスは運転中のドライバの感情状態に大きく影響する可能性が高い。突発的なRtIに対しても、ドライバは適切かつ安全に運転を引き継がなければならないが、感情状態によっては悪い影響が生じる可能性も考えられる。し

<sup>\* 20223</sup>年9月8日受理

<sup>\*1</sup> 一般財団法人日本自動車研究所 自動走行研究部 博士(工学)

たがって、より安全なレベル3の ADS の普及のためには、様々な感情状態における運転引継ぎパフォーマンスを評価することが重要であると考えられる.

RtI 状況における感情状態と運転引継ぎパフォーマンスに関しては様々な研究が存在されている <sup>3)</sup>. しかし,周辺車両が混雑している比較的複雑な RtI 状況において,感情状態が運転引継ぎパフォーマンスに与える影響に関する研究事例は少ない. 実交通環境では,周辺車両が多い状況で RtI が発生した場合のドライバーが RtI に対して適切な反応を行わない場合に、事故のリスクが高まる可能性がある.

本稿では、感情状態と自動車運転パフォーマンスの関係を調査するためのドライビングシミュレータを用いた実験について紹介する。ドライビングシミュレータを用いた実験では、実験中の実験参加者にポジティブまたはネガティブな音源を聞かせて感情を誘導し、その時の運転引継ぎ行動に及ぼす影響を調査した。また、RtI は自車両の前方にある停車車両と右後方の追い越し中の車両に囲まれた状態で発生するように設定設計し、自車両と周辺車両の相対的なパラメータを用いて運転引継ぎパフォーマンスを測定定量化した。

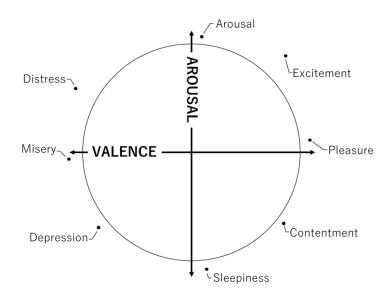


Fig. 1 Russell's circumplex model of emotion 2)

# 2. ドライビングシミュレータを用いた実験の紹介

突発的な RtI での感情状態による運転引継ぎ行動の調査のためには、幅広い感情状態の誘導が必要である. 感情状態は、一定の条件ですべての実験参加者の感情状態を制御することは難しく、制御したい感情状態のみ誘導することは不可能である. これは、人間の感情は「喜び」、「幸せ」、「怖い」などで独立している状態ではなく、様々な感情が複合的に連携しているためである<sup>2)</sup>. ただし、実験による検証では検討対象とする変数を制御する要因以外の要因を統制しないと、得られた結果がどのような要因の影響を受けたかが把握できなくなる.

また、実験で検討制御する要因が連続的に表現できる要因であれば幅広く制御する必要がある. 例えば、今回誘導したい感情状態である「快・不快」の感情が実験参加者に誘導されたとしても、「快」や「不快」の特定の部分のみの調査にとどまる場合、それは感情の限定された範囲での行動の調査に過ぎない. さらに、快・不快を幅広く調査するためには、実験参加者の最も快の感情や最も不快の感情まで誘導しなければならないが、複数の実験参加者に対して調査する場合は個人差により誘導の程度が異なる可能性が高い. したがって、ターゲットとしたい感情に集中して、幅広く誘導することは非常に難易度が高いと考えられる.

## 2.1 感情状態の誘導方法

人間の感情状態を誘導し、検証実験をするために、これまでに様々な心理学者たちが感情状態を誘導するツールを作成している。感情状態を誘導する方法は大きく分けると視覚情報による誘導方法である IAPS(International Affective Picture System) $^{4}$ )、と聴覚情報による誘導方法である IADS(International Affective Digitized Sound System) $^{5}$ )が最も汎用的である。こちらのツールはそれぞれメリット・デメリットがある。例えば、視覚情報による誘導方法は、その効果が強いが $^{6}$ 0,複数のタスクを同時に行う実験では、その効果を継続させることが難しいと考えられる。一方、聴覚情報による誘導方法は効果が比較的に弱いが $^{6}$ 0,複数のタスクを実施しながら誘導することができるメリットがある。

本稿では、自動運転とはいえ、実験参加者はRtIが発生した場合には運転引継ぎを行わなければならないため、聴覚情報を使用して快・不快の感情を誘導した。快側の感情を誘導するために、リズムが速いポジティブな音源を複数選定し、不快側の感情を誘導するために、乳幼児の泣き声の音源を使用した $^{70}$ . ただし、ここで誘導を企図しても、実験参加者は感情が誘導されていないことも予想される、もしくは個人の特性により逆の方向に誘導される可能性もある。したがって、本稿では、結果的に誘導された感情状態を調査し、結果的に誘導された感情状態を基準として運転引継ぎ行動を分析した。

#### 2.2 感情状態の評価

感情状態の評価は、生理指標の測定結果とアンケートの二つの手法を用いて行った. 前述の感情状態の 誘導方法の検証及び感情状態ごとの運転行動を調査するためには、感情状態の定量化が必要である. そ れぞれの評価手法は、下記で示す.

#### 2.2.1 生理指標

感情状態を定量的に評価するために,実験中の心電図(ECG: Electrocardiogram)信号を調査した.ECG 信号は眠気や人の感情を評価する時に多く使用されている.ECG の分析では,様々な方法があるが,眠気や感情状態の変化を調査するために,心拍変動(HRV: Heart Rate Variability)の分析が多く使用されている.心拍変動は時間当たりの心拍の変化量を,超低周波(VLF: Very Low Frequency),低周波(LF: Low Frequency),高周波(HF: High Frequency)で分け,周波数特性から定量的に分析する方法である.本稿では,LF と HF のバランスである LF/HF 指標を用いて分析を行った.LF/HF は,人が不快の感情や高いストレス感じる状況である場合に増加することが知られている  $^{8.9}$ )。そのため,Fig. 2 に示しているように,心電図の  $^{r}$  波の間隔( $^{r}$  r interval)から FFT(Fast Fourier Transform)を行い,周波数特性を定量化した.

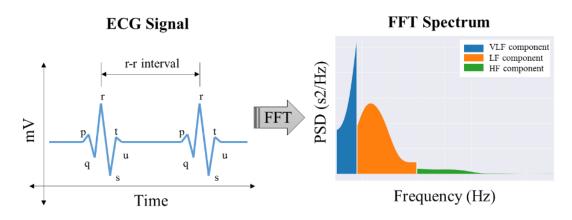


Fig. 2 ECG signals pre-process for analysis

#### 2.2.2 アンケート

感情状態の主観評価は,5 段階スケールの形容詞のアンケートを使用して評価を行った.アンケートは感情を表す17 個の形容詞を5 段階スケールで構成されている.アンケートは走行開始前には実験参加者の現在の感情について回答してもらい,走行終了後にはRtI が発生する前の感情について回答してもらった.

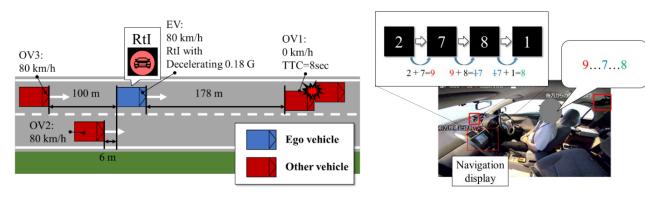
## 2.3 実験参加者のタスク

#### 2.3.1 メインタスク

実験参加者のメインタスクは、レベル 3 の ADS を使用して運転し、RtI が発生した場合にシステムを引き継ぐことである. Fig. 3a は、実験でRtI が発生した時に実験参加者が遭遇する状況を示す. このシナリオでは、自車の前方で発生した事故によって停止した車両があることと同時に、後方の車両と隣接する車線の車両がともに自車に接近する比較的複雑な状況を再現している.

#### 2.3.2 サブタスク

実験参加者は、複数の実験からの順序効果を最小限に抑え、また、レベル 3 の ADS での運転行動を再現するために、Fig. 3b のように NDRT(Non-Driving Related Task)を実行した。NDRT は、ナビゲーション画面に 1 桁の数字がランダムに表示されるように設計され、実験参加者に対しては、直前に表示された数字と新たに表示された数字を加算し、一桁目を口頭で答えるように指示し、その後は、加算した数字の一桁目と新たに提示された数字を加算するように教示した。



a) Main task for evaluating take-over performance

b) Sub-task for simulating Level 3 ADS

Fig. 3 Tasks

# 2.4 ドライビングシミュレータ装置

本実験は、一般財団法人日本自動車研究所(JARI)の全方位視野ドライビングシミュレータ(DS)を用いて実施を行った。Fig. 4 は、本稿で使用されたシミュレータのイメージを示している。ドライビングシミュレータは球体状のスクリーンが  $360^\circ$  に渡って設置され、周囲の交通状況を表示することができる。また、シミュレータキャビンにターンテーブルとそれにつながっているアクチュエータで現実的な運転を再現することができる。

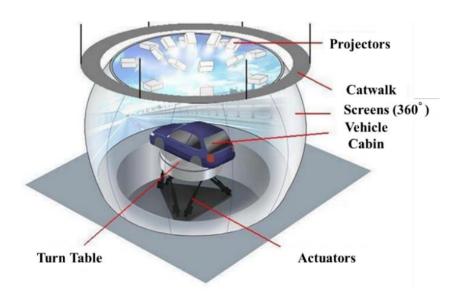


Fig. 4 Driving simulator

#### 2.5 実験結果と考察

#### 2.5.1 ドライバの感情状態の評価

Fig. 5 は実験前と実験中の実験参加者の感情状態変化を示す. 図のマーカ (赤, 青) は実験で用意された実験条件(音源)を、マーカのラベルは実験参加者番号、誘導条件、実験前後を示している. 実験前のドライバの感情状態は実験条件による刺激がなかったため、全体的に幅広く散布していることが確認できる. ただし、覚醒度の幅は広く、快・不快の軸はやや快の方向に集中している傾向が確認された. 実験中のドライバの感情状態のコントロールは不快に対する変化については全体的に高まる方向へ変化しているが、快に対する変化は見られにくかったについてはあまり効果的ではなかった. また、快の条件でも不快と感じた実験参加者が2名で、快の条件でも感情状態の変化があまりなかった実験参加者が2名いた. これらの結果から、ドライバ(もしくは人間)は本研究で設定した不快な刺激(赤ちゃんの泣き声)には敏感に反応する一方で、快という感情に誘導することは個人的な嗜好の差もあるために非常に難しいと考えられる. ただし、2章で述べたように、今回の実験では音源による条件の分類ではなく、最終的に誘導された感情状態ごとに運転行動を比較することを目的としている. 今回のターゲット感情は快・不快の感情であるため、感情刺激後の快・不快の範囲が173%広がったことが確認されたことで、感情状態の誘導は成功しているといえる. 次にさらに、アンケートの結果から得られた感情状態と、ECG 信号を比較して、アンケートの結果が真の値に近いかどうかを検証した.

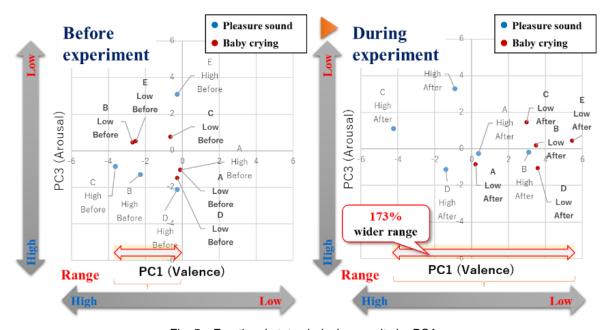


Fig. 5 Emotional status inducing results by PCA

Fig. 6 は主成分 PC1 と PC3 の観測変数 (アンケートの形容詞項目) の寄与度を示している. この図から各成分がどのような意味を持っているか, その得点の方向性などを把握できる. ここで, PC1 が快・不快の感情を示していて, 負の値が快側, 正の値が不快側の感情を示していることが分かる. また, PC3 が覚醒度を示していて, 負の値のほど覚醒・興奮を, 正の値のほど眠い感情を示していることが分かる.

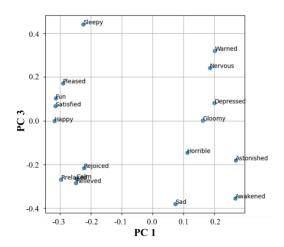


Fig. 6 Contribution of observed variables to principal components PC1 and PC3

Fig. 7 は,LF/HF 指数と PC1 (快・不快) の散布図を示している.LF/HF の分析区間は,感情状態を誘発するために再生された音源の開始から,RtI が発生する前までの間とした.その結果,アンケートの PC1 が増加(不快側)するにつれて LF/HF も増加(不快・ストレス側)することが確認され,アンケートの結果とドライバの LF/HF とアンケートで測定される感情状態が一致していることから,アンケート内容が信用できると考えられる.

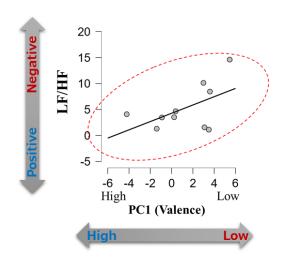


Fig. 7 Scatter plot of PC1 (Valence) and ECG (LF/HF) signal

# 2.5.2 感情状態における運転引継ぎパフォーマンス

ドライバの運転引継ぎパフォーマンスの良否に及ぼす感情状態の影響を調査するために、RtI が発生した状況を理解する必要がある。今回の実験でのRtI は、自車の前方で衝突が発生し、そのために前方の車 (OV1) が停止したために発生している。そのため、ドライバはこの場面を安全に対応するために、隣接車線に車線変更を行うか、車両を停止することが求められる。しかし、大型トラック (OV3) が自車両に後方から接近し、隣接車線から接近する車両 (OV2) が自車より速い速度で接近している。したがって、この状況では、ドライバは車両の前後の状況を確認し、次の二つの行動のいずれかをとらなければならない。

- 1. 徐々に減速して車両を停止する
- 2. 隣接する車両に接近し減速して車線変更する

そのため, 運転引継ぎパフォーマンスを評価するために, 運転引継ぎまでの時間, 減速度, 横方向加速度, 他の車両との TTC (衝突までの時間) を Fig. 8,9 のように分析・評価した.

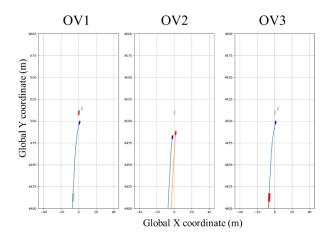


Fig. 8 Closest position between ego vehicle and other vehicles

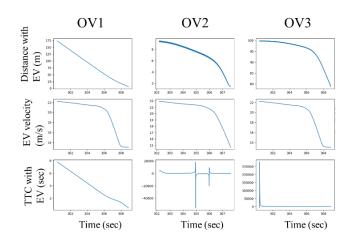


Fig. 9 Evaluation parameters of each other vehicle

Fig. 10 に示されるように、快・不快の変化による運転引継ぎパフォーマンスを調査した. これらの指標のうち、運転引継ぎまでの時間、最大減速度、および前方の車との TTC は、ドライバの快・不快による差は確認されなかったいない. これらの指標は、ドライバの前方にある車両との衝突を回避するために重要であり、感情状態の変化が発生しても前方の状況に対して大きく影響することはなかったと考えられる. 一方、ドライバの快・不快の感情によって後方の車両との TTC や横の車線から接近する車両との TTC、車線変更する時の横加速度は傾向が変化することが確認された. これらの結果から、快の感情を感じているドライバは衝突を回避するための運転引継ぎパフォーマンスが不快の感情に比べて上がる一方で、不快の感情を感じているドライバは周囲環境に対する状況認識がややおろそかになっているという結果が示された.

感情状態(快・不快)影響は、すぐに回避行動を取らないと衝突してしまう高い水準のリスク(前方車両との衝突)に対して影響があるほど大きくないことが考えられる。ただし、不快の感情が高いほど、追い越し車両があるのにも関わらず急な車線変更行動をとっている、さらに、追い越し車両との距離も近くなることから、周辺環境への認識の遅れへの影響もしくは、攻撃的な運転行動に影響がある可能性が考えられる。このような運転行動の変化は、前方車両との衝突回避のために、接近している隣の車線の車両事故につながる可能性がある。

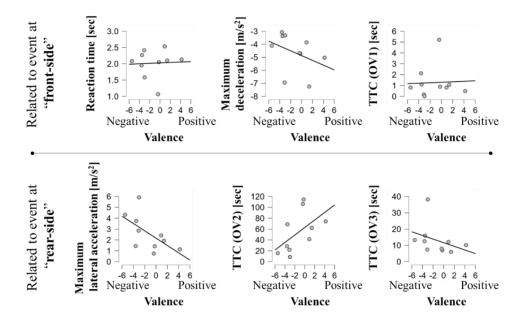


Fig. 10 Take-over behaviors related to an event at the front-side and rear-side

#### 3. まとめ

本稿では、自動運転を利用中のドライバの感情状態と運転引継ぎパフォーマンスの関係に着目し、特に快・不快の感情からの影響を調査する研究を紹介した. 具体的には、本稿ではドライビングシミュレータ 実験を行い、快・不快に影響する音源を用いて実験参加者の感情状態を誘導した状態で運転引継ぎパフォーマンスの測定・分析を行った.

以下は、本稿で得られたまとめである.

- 1) ドライバの快・不快の感情により、運転引継ぎパフォーマンスが異なることが確認された。
- 2) 不快の感情は、運転引継ぎパフォーマンスを低下させることにつながり、快の感情の時は、不快の 感情の時より高いパフォーマンスにつながる可能性がある結果が得られた.
- 3) 不快の感情は、運転引継ぎ時にドライバの周辺状況の確認をおろそかにすることでややリスクのある運転行動を引き起こす可能性がある.

今後は実験で得られた結果の信頼性と妥当性向上のために、追加実験を行う予定である。また、人間の感情は一つの軸(快・不快)に分割して議論することはできないため、今後の研究では 2 次元及び 3 次元の感情モデルを考慮した実験の実施や結果の分析を実施していく予定である。

#### 参考文献

- 1) Cai, H., and Lin, Y.: Modeling of operators' emotion and task performance in a virtual driving environment, International Journal of Human-Computer Studies, Vol. 69, No. 9, p. 571-586 (2011), doi.10.1016/j.ijhcs.2011.05.003
- 2) Russell, J. A.: A circumplex model of affect, Journal of personality and social psychology, Vol. 39, No. 6, p. 1161-1178 (1980), doi.10.1037/h0077714
- 3) Du, N.et al.: Examining the effects of emotional valence and arousal on takeover performance in conditionally automated driving, Transportation research part C: emerging technologies, Vol. 112, p. 78-87 (2020), doi:10.1016/j.trc.2020.01.006
- 4) Lang, P. J. et al..: International affective picture system (IAPS): Technical manual and affective ratings, NIMH Center for the Study of Emotion and Attention, Vol. 1, No. 3, p. 39-58 (1997)
  <a href="https://www2.unifesp.br/dpsicobio/adap/instructions.pdf">https://www2.unifesp.br/dpsicobio/adap/instructions.pdf</a>, (参照 2023-09-08)
- 5) Bradley, M. M., and Lang, P. J.: International affective digitized sounds (IADS): Stimuli, instruction manual and affective ratings (Tech. Rep. No. B-2). Gainesville, FL: The Center for Research in Psychophysiology, University of Florida (1999)
- 6) Baumgartner, T., Esslen, M., and Jäncke, L.: From emotion perception to emotion experience: Emotions evoked by pictures and classical music, International journal of psychophysiology, Vol. 60, No. 1, p. 34-43 (2006), doi.10.1016/j.ijpsycho.2005.04.007
- 7) Partala, T., and Surakka, V.: Pupil size variation as an indication of affective processing, International journal of human-computer studies, Vol. 59, No. 1-2, p. 185-198 (2003), <a href="doi:10.1016/S1071-5819(03)00017-X">doi:10.1016/S1071-5819(03)00017-X</a>
- 8) Kop, W. J. et al..: Autonomic nervous system reactivity to positive and negative mood induction: The role of acute psychological responses and frontal electrocortical activity, Biological psychology, Vol. 86, No. 3, p. 230-238 (2011), doi:10.1016/j.biopsycho.2010.12.003
- 9) Hauschildt, M. et al..: Heart rate variability in response to affective scenes in posttraumatic stress disorder, Biological psychology, Vol. 88, No. 2-3, pp. 215-222 (2011), <a href="https://doi.org/10.1016/j.biopsycho.2011.08.004">doi.10.1016/j.biopsycho.2011.08.004</a>

# 自動運転の周辺車両への振る舞いと信頼\*

Effects of the system behavior of automated driving on driver trust in automated driving systems

安部 原也\*1佐藤 健治\*2伊 藤 誠\*3Genya ABEKenji SATOMakoto ITOH

本研究では、運転シミュレータ上に自動運転の周辺を走行する車両が蛇行する場面等を設定し、自動運転の当該車両への振る舞い方による自動運転に対するドライバの信頼への影響を高齢ドライバと非高齢ドライバとで比較した。その結果、高齢ドライバと比較して非高齢ドライバは、自動運転の振る舞い方の違いによる信頼の低下度合が大きいことがわかった。また。蛇行する車両に遭遇した際に運転交代を要請する(RtI)条件下において、高齢ドライバと比較して非高齢ドライバはより迅速に運転交代する可能性があることがわかった。

KEY WORDS: 自動運転, 自動運転の振る舞い, 信頼, 運転引き継ぎ, 高齢・非高齢

#### 1. はじめに

近年、日米欧を中心に、自動車の自動運転に関する技術開発が活発に進められている。実際、自車の速度が 50 km/h 以下であるような限定された走行場面において、ドライバに代わって機械による自動での走行が実現されている<sup>1)</sup>. ここでの自動運転では、ドライバは自動車の運転に必要なペダルおよびハンドルの操作に加えて、周辺の交通状況の常時監視からも解放されることになる。そのことによって、ドライバにとっては、渋滞中に自身による手動での運転に対する負担の軽減が期待される。一方で、今後、自動運転をさらに市場に普及させるための課題の一つとして、ある限定された状況であれ、ドライバが実際に機械に運転操作を任せることができるか否かが重要な因子であると考えられる。

航空機やプラント制御において,人が自動化されたシステムを使用するか否かを判断する上で,人の自動化システムに対する信頼(trust)が重要なファクターであるとされている<sup>2)-4)</sup>.人は,自動化システムを信頼できる時にシステムを使用し,信頼できない時には使用しない可能性がある<sup>5)</sup>.

本研究では、ある交通状況を対象として、自動運転の周辺車両への振る舞い方の違いによるドライバの自動運転に対する trust への影響について考える. ここでは、具体例として、自動運転の直前を走行する 先行車や自動運転の隣接車線上を走行する車両が蛇行する場合を取り上げる. 自車の周辺を走行する車両が蛇行するなどの不安全な挙動を示した場合、ドライバ自身による運転であっても、当該車との事故を回避するためにどのように振る舞うかは、ドライバによって異なる可能性がある. したがって、自動運転の振る舞い方によっては、システムに対する trust が低下する可能性があり、実際にどのような差異が生じるかを調べることが重要である. 本研究では、このような走行場面における自動運転の振る舞い方として、3つのケースを想定する. すなわち、自動運転が速度等を調整することによって蛇行する車両との距離を広げる、蛇行する車両の存在によらず自動運転の走行方法を変えない、さらには、自動運転システムとしてドライバに運転の交代を要請する (RtI: Request to Intervene) ケースを想定する.

機械に対する trust は 4 つの次元をもつ概念であるとされている <sup>9</sup>. すなわち,基礎:自然界の法則や 社会の秩序に合していること,能力:終始一貫して,安定的で望ましい行動や性能が期待できること,方 法:システムの行動を規定するアルゴリズムやルールが理解できること,目的:システムの意図・動機が

<sup>\* 2023</sup>年11月13日受理

<sup>\*1</sup> 一般財団法人日本自動車研究所 自動走行研究部 Ph.D

<sup>\*2</sup> 一般財団法人日本自動車研究所 自動走行研究部

<sup>\*3</sup> 筑波大学 博士(工学)

**<sup>-</sup>** 60 **-**

納得できることである。特に、自動運転の振る舞い方は、これら4つの次元の内の目的の次元に作用する可能性がある。つまり、自動運転による周辺車両への振る舞いの意図がドライバにとって納得できるか否かによって、trustの程度に影響が生じる可能性がある。また、自動運転の振る舞い方に納得できない場合には、ドライバは自動運転そのものを負担に感じる可能性がある。例えば、自車周辺の車両が蛇行しているような場面に遭遇した際に、当該車両との事故を避けるために、自車との距離を広げたいと考えるドライバにとって、自動運転が何も対応しようとせずに走行し続けた場合には、自動運転に対して精神的な負担を感じるとともに自動運転に対する trust の低下を誘発する可能性がある。

自動運転に対する trust の変動の仕方はドライバ属性によっても異なる可能性がある. 例えば, 高齢ドライバは, 若年ドライバと比較して高度な自動運転の使用に対して積極的である <sup>7)</sup> とされており, 高齢ドライバと若年ドライバとでは, 自動運転に対する trust の程度にも差異が生じる可能性がある. このことから, ある交通状況に対する自動運転の振る舞い方の違いによる trust への影響を考える際には, ドライバ属性の一つとして, 年齢の違いに着目することの必要性が示唆される. ここでは, ドライバ属性の違いの一つとして高齢ドライバと非高齢ドライバとの比較を行う.

本研究では、自動運転の周辺を走行車両が蛇行する場面を運転シミュレータ上に設定し、高齢ドライバと非高齢ドライバを対象とした、自動運転の他車への振る舞い方の違いによるドライバの自動運転に対する負担と trust への影響を明らかにする. また、自動運転の振る舞い方の一つとして、ドライバに対して RtI を呈示した場面を対象として、高齢ドライバと非高齢ドライバ間での運転行動の違いと trust との関係を明らかにする. なお、本研究における運転シミュレータによる実験は、実験内容および安全性について事前に一般財団法人日本自動車研究所(JARI)の定める倫理審査委員会にて審議し、承認(承認番号: 19-026)を得ている.

#### 2. 方法

## 2.1 実験参加者

本実験には、普通免許を有する非高齢ドライバ 16名(男性 8名、女性 8名、年齢域 21 歳 -49 歳、平均 =34.6 歳)、65 歳以上の高齢ドライバ 16名(男性 8名、女性 8名、年齢域 65 歳 -75 歳、平均 =69.4 歳)、合計 32名が参加した。個々のドライバについて、実験者による書面での実験内容の説明をあらかじめ行った上で本実験への参加に対する同意書を得た。

#### 2.2 実験装置

本実験では、JARI で所有する 6 自由度の動揺装置および回転テーブルを有する運転シミュレータ(普通乗用車相当)を使用した.本シミュレータには、水平方向の画角 360 度、垂直方向の画角 65 度のスクリーンが装備されている.実験に際しては、高性能画像生成装置により作成した片側 2 車線の高速道路の直線コースを使用した.片側 2 車線の道路における一車線あたりの車線の幅員は 3.7 m とした.

# 2.3 本実験における自動運転の方法

本実験における自動運転は、車両のハンドルに設置されたスイッチを操作する(レバースイッチを手前側に引く)ことによって始動する設定とした。ドライバによるレバーの操作が実行された時点で、聴覚によるビープ音(ピーピーピー)1秒間とともに、メータパネル内に図1に示す情報を呈示した。自動運転始動後、自動運転車は速度0 km/h から速度40 km/h まで加速し、その後は周囲の交通状況に応じてハンドルおよびブレーキ・アクセルペダルを自動で調整して走行する。自動運転中、ドライバはハンドルおよびアクセル・ブレーキペダルから手と足を離した状態で走行するように教示した。また、自動運転中、ドライバには自動運転の状態や周辺の交通状況を常時監視する必要がないことを教示した。ただし、実験条件によっては、ドライバに対してRtIが発生する可能性があることを伝えた上で、その場合には運転を交代するように教示した。



図1 自動運転中にドライバに呈示される情報

ドライバに対して運転交代を要請する際には、ビープ音ともにメータパネル内に「自動運転解除」の表示を点滅させることによってドライバに運転交代の必要性を伝えた. 「自動運転解除」が点滅状態になった後、ドライバが (1) ハンドルトルクが  $5\,Nm$  以上となる操作を実行する,(2) ブレーキペダル移動量が  $5\,\%$ 以上(初期移動量  $0\,\%$ )となる操作を実行する,(3) アクセル開度が  $5\,\%$ 以上(初期開度  $0\,\%$ )となる操作を実行する,の中から  $1\,\%$  つ以上の条件が満たされた時点で,自動運転は解除され,ドライバ自身による手動運転の状態に移行する設定とした. 手動運転時において,メータパネルには特定の表示を呈示しないようにした. なお,「自動運転解除」表示の点滅開始後, $10\,\%$ 以上ドライバによる上記条件を満たす運転操作の介入がなかった場合には「自動運転解除」の点滅を終了した上で実際に自動運転が解除される設定とした.

# 2.4 走行場面と自動運転の振る舞い

本実験では、主としてドライバの自動運転に対する trust および RtI 時における運転行動を調べるために、2つの走行場面に対してそれぞれ3種類の自動運転の振る舞いの仕方を設定した。ここで対象とした走行場面は、自動運転が周辺の他車に対する配慮の仕方の違いに着目している。以下では、個々の走行場面と自動運転の振る舞い方について述べる。

# (1) 先行車蛇行場面

ここでは、実験開始後、渋滞中(渋滞の車群の速度 40 km/h、周辺他車との車間時間(車間距離を車群の速度で除した値)1.5 秒)の場面において、自動運転が左側車線の中央を速度 40 km/h、先行車との車間時間 1.5 秒の条件下で走行中、自動運転の直前を走行する先行車が速度 40 km/h を維持した状態で蛇行をしながら走行する場面に遭遇する(図 2). なおここでの蛇行の仕方として、車両の重心位置が振幅 2 m、周期 10 秒を有する正弦波にそって繰り返し横移動する設定した. 本実験では、当該場面における自動運転の振る舞い方として以下 3 つのシナリオを設定した.

- ① 距離延長:このシナリオでは、先行車が蛇行を開始した時点から 10 秒後に自動運転が蛇行する 車両との事故のリスクを軽減することを目的として、自車を 1.0 m/s²の減速度で減速させること によって当該車との車間時間を 3.0 秒に広げた上で、その後、1.0 m/s²の加速度で加速させること によって再度 40 km/h において走行する設定とした.
- ② 現状維持: このシナリオでは、先行車が蛇行をしながら走行しているにも関わらず、自動運転の速度および当該車との車間時間をそれぞれ 40 km/h および 1.5 秒に維持し続ける設定とした.
- ③ RtI: このシナリオでは、先行車が蛇行を開始した時点から 10 秒後に自動運転がドライバに対して RtI を呈示する設定とした.

なお、本シナリオにおける自動運転の速度の調整開始タイミング、加減速度の値、他車との車間時間および RtI の呈示タイミングについて、実験者による予備実験を通じて、自動運転および周辺他車の挙動として、おおむね違和感のない範囲であることを確認した上で設定した.



図2 先行車蛇行場面

# (2) 前側方車の蛇行場面

ここでは、走行開始後、自動運転が渋滞中(渋滞の車群の速度 40 km/h、周辺他車との車間時間 1.5 秒)の左側車線の中央を速度 40 km/h、先行車との車間時間 1.5 秒の条件下で走行中に、同じく渋滞中の右側車線上を走行する 1 台の普通乗用車(前側方車)が 40 km/h の速度を維持した状態で蛇行をしながら走行する場面に遭遇する(図 3). なおここでの蛇行の仕方として、車両の重心位置が振幅 1.5 m、周期 10 秒を有する正弦波にそって繰り返し横移動する設定とした。本実験では、当該場面における自動運転の振る舞い方として以下 3 つのシナリオを設定した.

- ① **距離延長**:このシナリオでは、前側方車が蛇行を開始した時点から 10 秒後に自動運転が蛇行する車両との事故のリスクを軽減することを目的として、速度 40 km/h を維持したまま重心位置を進行方向に対して左方向に 0.8 m オフセットする設定とした。結果として、この方法により自動運転と前側方車との横距離が延長されることになる。
- ② 現状維持:このシナリオでは、前側方車が蛇行をしながら走行しているにも関わらず、自動運転は横移動することなく前側方車が蛇行する以前と同様な走行を継続した.
- ③ RtI: このシナリオでは、前側方車が蛇行を開始した時点から 10 秒後に自動運転がドライバに対して RtI を呈示する設定とした.

なお、本シナリオにおける自動運転の速度の調整開始タイミング、他車との距離の取り方、RtI の呈示タイミングについて、実験者による予備実験を通じて、自動運転および周辺他車の挙動として、概ね違和感のない範囲であることを確認した上で設定した.



図3 前側方車の蛇行場面

-63-

#### 2.5 実験計画

本実験では、ドライバ1人につき、2種類の走行場面に対してそれぞれ3種類の自動運転の振る舞い方によって区別される6つの実験条件を1回ずつ試行した(一回の試行における走行時間は概ね5分程度). 実験条件の試行順序については、ドライバ間で順序による影響を相殺する手続きを取った. ただし、同一場面上における3つの自動運転の振る舞い方を必ず連続して試行することとした.

#### 2.6 評価指標

本実験では、以下の指標を用いてドライバの自動運転に対する trust、精神的な負担および自動から手動への運転交代場面におけるドライバの運転行動を分析した.

#### (1) 自動運転に対するドライバの主観評価

① 自動運転に対するドライバの主観的な trust: 1回の試行が終了した直後に、ドライバの自動運転に対する主観的な trust について、11段階のスケーリングを持つ質問紙を用いて評価した.

質問:あなたはこの自動運転をどの程度信頼できますか?

- 0:全く信頼できない、5:どちらでもない、10:完全に信頼できる
- 自動化されたシステムに対する総合的な trust の程度について,本指標と同様な質問紙を用いて評点化することにより,主観的に評価できることが知られている <sup>6,8)-10)</sup>.
- ② 自動運転に対するドライバの主観的な精神的負担:1回の試行が終了した直後に、ドライバの自動運転に対する主観的な不満、ストレスに起因した精神的な負担の程度について、12 cm の視覚的なアナログスケーリング(図4)を持つ質問紙を用いて評価した<sup>11)</sup>.これまでに、視覚的な評点化の方法によって、例えば、人がある課題を行った際の精神的負担の程度が適切に評価できることが知られている<sup>12),13)</sup>.本研究においても、本指標を用いることによって、ドライバの自動運転に対する精神的な負担と trust との関係を調べる.

質問:自動運転中,あなたはどのくらい不安,落胆,いらいら,ストレス,不快感に起因する負担 を覚えましたか?



図4 自動運転に対する精神的負担の主観評価

# (2) 自動から手動への運転交代場面における運転行動評価

ハンドル反応時間:自動運転から手動運転への運転交代場面を対象として,運転交代に対する反応 としてハンドル,ブレーキあるいはアクセルの中から,最も迅速な行動として発現する可能性のある 指標として,本研究では,ハンドル操作に着目し,RtIが呈示された時点からドライバがハンドルを握 るまでに要した時間について,ハンドル反応時間として計測した.なお,本指標は実験走行中の映像 データをもとに計測を行った.

#### 2.7 実験手順

本実験では、ドライバ1人につき約60分程度の時間を要した。まず始めに、運転シミュレータでの手動運転による走行に慣れるための練習を5分程度行った。その後、自動運転による走行による練習を5分程度実施した。ここでは、ハンドルおよびペダルから手および足を離した状態で走行できることを自車以外の車両を出現させることなく経験させる。また、自動運転の練習走行において、全ドライバに対して自動運転からRtIが呈示された際の自動から手動への運転交代場面を1回試行した。

# 3. 実験結果および考察

# 3.1 ドライバの自動運転に対するtrust

図 5 は、自動運転に対するドライバの主観的な trust の値について、走行場面、自動運転の振る舞い方および年齢(高齢ドライバと非高齢ドライバ)の違いごとに示したものである. なお、非高齢女性ドライバ1名の先行車の蛇行場面における RtI 条件について、RtI を呈示する以前に手動運転に移行していたことから、当該条件のデータについて、分析の対象から除くこととした.

高齢ドライバと比較して、非高齢ドライバは、自動運転の振る舞い方による trust への影響が異なっており、特に、走行場面によらず、自動運転の現状維持条件下において、高齢ドライバと比較して非高齢ドライバの trust がより低下している。また、自動運転の振る舞い方による trust への影響は、走行場面によって異なっている。具体的には、他車が蛇行する場面において自動運転システムが当該車との距離を延長する振る舞いをした場合であっても、特に非高齢者の場合に、先行車蛇行場面と比較して、前側方車蛇行場面における trust の低下が大きい。

実際に、trust の値について、自動運転の振る舞い方、走行場面および年齢を要因とする分散分析の結果、年齢と自動運転の振る舞い方の交互作用が有意であった( $F_{(2,58)}$ =8.28, p < 0.01). 多重比較の結果、自動運転の振る舞い方の現状維持条件下における、非高齢ドライバと高齢ドライバ間での trust の値に有意差が見られた(p < 0.01). また、走行場面と自動運転の振る舞い方の交互作用が有意であった( $F_{(2,58)}$ =3.91, p < 0.05). 多重比較の結果、自動運転の振る舞い方の距離延長条件において、走行場面間の違いが有意であった(p < 0.01).

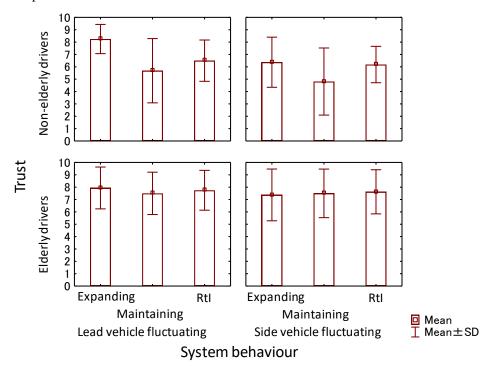


図5 自動運転の振る舞い方によるtrustへの影響

# 3.2 ドライバの自動運転に対するtrustと自動運転に対する精神的負担との関係

図 6 および図 7 は、それぞれ非高齢ドライバおよび高齢ドライバについて、自動運転に対する主観的な trust と精神的負担との関係を走行場面別に散布図として示したものである.ここでの散布図では、ある精神的負担と trust の値としてプロットさた点に複数のデータが存在した場合には、頻度別に区別して示した。

これらの図から, 非高齢ドライバについて, 先行車蛇行場面および前側方車蛇行場面において, それぞれ-0.76 および-0.81 の負の相関が見られ, 高齢ドライバについては, 同様に, -0.67 および-0.84 の負の相関が見られた. このことから, 自動運転に対する精神的負担が高いと trust が低い関係があるといえる.

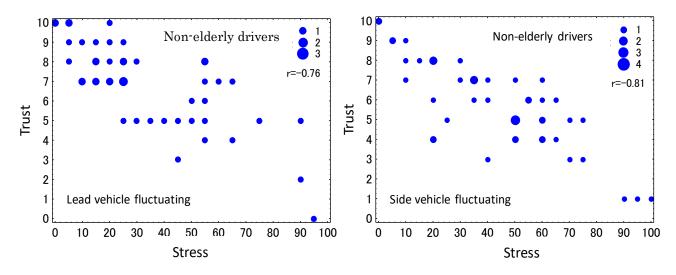


図6 非高齢ドライバのtrustと精神的負担との関係

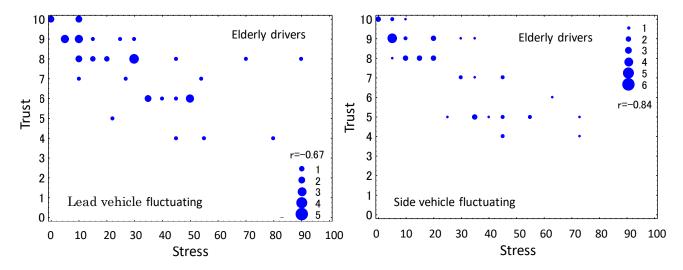


図7 高齢ドライバのtrustと精神的負担との関係

#### 3.3 RtI条件下におけるハンドル反応時間

図8は、自動運転の振る舞い方として、RtIを呈示する条件を対象として、先行車蛇行場面および前側方車蛇行場面におけるRtI呈示後のハンドル反応時間をドライバの年齢ごとに示したものである.

この図から,走行場面の違いに依らず,非高齢ドライバと比較して,高齢ドライバのハンドル反応時間が長くなっている.ハンドル反応時間について,年齢と走行場面を要因とする分散分析の結果,年齢の主効果が有意であった( $F_{(1.59)}$ = 6.73, p < 0.05).

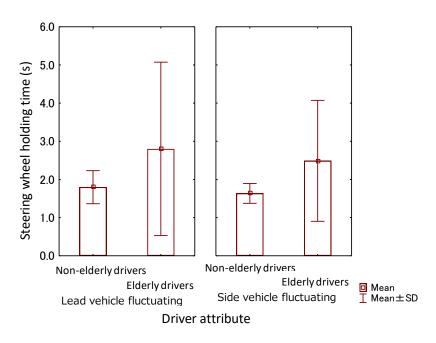


図8 走行場面および年齢によるハンドル反応時間への影響

#### 4. 総合的な考察

本研究では、自動運転の直前を走行する車両が蛇行する場面および自動運転の隣接する車線上の前側方を走行する車両が蛇行する場面を対象として、当該車に対する自動運転の振る舞い方によるドライバの自動運転に対する主観的な trust および精神的負担への影響について、ドライバの属性の違いの一つとしてドライバの年齢による比較検討を行った.

自動運転が蛇行する他車に遭遇した際の自動運転の振る舞い方による trust への影響を見ると,高齢ドライバと非高齢ドライバとで差異が生じていることが分かった.具体的には,高齢ドライバと比較して非高齢ドライバは,他車が蛇行した状況において,自動運転の振る舞いが蛇行する以前と同じ走行方法であった場合に,自動運転に対する trust が大きく低下することがわかった.他車の動きに応じて自動運転がどのように振る舞うかは、システムの設計によるものの、その振る舞い方の違いによって trust に影響が生じる可能性があることに留意すべきである.特に、非高齢ドライバは高齢ドライバよりも振る舞い方の違いによる影響が顕著であることにも留意したい.

また、走行場面の違いによって、自動運転の振る舞い方が同様であっても、trust への影響が異なっていた。自動運転の周辺車両が蛇行する場面に対して、自動運転が当該車に対して距離を広げる振る舞いをした場合であっても、先行車蛇行場面と比較して前側方車蛇行場面において、trust が比較的低下していることがわかった。この結果について、前側方車が蛇行している場面に対して、本実験で設定したような、自動運転が当該車との横距離を長く広げることでは、自動運転に対する trust の確保にはつながらない可能性がある。そこで、例えば、自動運転の前側方を走行する車両の動き方によっては、自動運転とし

ては、当該車との横距離だけでなく、進行方向距離を長く空けるなどの振る舞いをすることによって、自動運転に対する trust の低下を抑制できる可能性がある.

自動運転に対する精神的負担が高いと、自動運転に対する trust が低い可能性があることがわかった.これらの結果から、ある走行場面に対する自動運転の振る舞い方をデザインする上で、ドライバに対して精神的負担を掛けないような方法を検討することが、自動運転に対する trust の確保に必要であると推察される.特に、非高齢ドライバについて、高齢ドライバと比較して、自動運転の振る舞い方の違いによる精神的負担や trust への影響が大きく、ある交通状況に対する自動運転の振る舞い方の違いに対してより敏感である可能性があるため、システムのデザインに対してより慎重な配慮が必要であると考えられる.

自動運転中に他車が蛇行する場面に際して自動運転がドライバに対して RtI を呈示する条件下では, 高齢ドライバと比較して非高齢ドライバは, より迅速な運転行動を示す可能性があることがわかった. この結果は, 自動運転中の周辺車両の挙動の変化に起因した自動運転から運転交代の要請に対して, 非高齢ドライバは, 高齢ドライバと比較して, 自らで運転しようとする意識が高い可能性を示唆している. 言い換えれば, 非高齢ドライバは, 自動運転の周辺で蛇行する車両が存在した場合に, 何らかの対応が必要であると感じている可能性があり, このことは, 蛇行する車両に対して現状を維持した場合に, 高齢ドライバと比較して, 非高齢ドライバの自動運転に対する trust がより低下したことと矛盾しない.

#### 5. 結論

本実験において得られた知見は以下の通りである.

- ・ 自動運転中に先行車が蛇行する場面や前側方車が蛇行する場面に遭遇した際,高齢ドライバと比較して非高齢ドライバは,自動運転の振る舞い方の違いによる自動運転に対する trust への影響が大きい.
- ・ 自動運転に対する精神的負担が大きいと自動運転に対する trust が低い関係が見られる.
- ・ 自動運転中に先行車が蛇行する場面や前側方車が蛇行する場面に遭遇した際に,自動運転が RtI を 呈示する条件下において,高齢ドライバと比較して非高齢ドライバはより迅速な運転行動を示す.

本研究では、高速道路上で自動運転の周辺の他車が蛇行する場面を対象として、高齢ドライバと非高齢ドライバとで、自動運転の蛇行する車両への振る舞い方による自動運転に対する trust への影響の違いを調べた.一方で、自動運転に対する経験や知識の違いによってもドライバの運転行動に異なる影響があることから <sup>14</sup>、同様に trust へも異なる影響を与える可能性があると考えられる. そこで、自動運転の使用の経験を通じて自動運転の振る舞い方への慣れや自動運転に対する知識の有無によって、今回得られた結論にどのような影響が生じるかについて、さらに検討が必要であると考えられる.

#### 謝辞

本研究は、日本学術振興会科学研究費補助金基盤研究(A) JP26242029 の援助を受けた. 記して謝意を表する.

# 参考文献

- 1) 国土交通省: 世界初! 自動運転車 (レベル3) の型式指定を行いました (2020), https://www.mlit.go.jp/report/press/jidosha08 hh 003888.html (参照 2023-11-13)
- 2) Satchell, P.: Innovation and Automation; Ashgate (1998), ISBN: 978-1840143157
- 3) Muir, B.M.: Trust between Humans and Machines, and The Design of Decision Aids; International Journal of Man-Machine studies, 27, p. 527 539 (1987), doi: 10.1016/S0020-7373(87)80013-5
- 4) Zuboff, S.: In the Age of the Smart Machine: The Future of Work and Power; New York Basic Books (1988), ISBN: 978-0465032129
- 5) Muir, B.M., Moray, N: Trust in automation: Part II. Experimental Studies of Trust and Human Intervention on a Process Control Simulation; Ergonomics, Vol. 39, No. 3, p. 429 460 (1996), doi: 10.1080/00140139608964474
- 6) Lee, J.D., Moray, N.: Trust, Control Strategies and Allocation of Function in Human-Machine Systems; Ergonomics, Vol. 35, No. 10, p. 1243 1270 (1992), doi: 10.1080/00140139208967392

- 7) Hartwich, F., et al.: The First Impression Counts A Combined Driving Simulator and Test Track Study on the Development of Trust and Acceptance of Highly Automated Driving; Transportation Research Part-F, Vol. 65, p. 522 535 (2019), doi: 10.1016/j.trf.2018.05.012
- 8) Abe, G., Richardson, J.: Alarm timing, trust and driver expection for forward collision wanring sysytems; Applied Ergonomics, Vol. 37, Issue 5, p. 577 586 (2006), doi: 10.1016/J.APERGO.2005.11.001
- 9) Abe, G., et al.: Driver Trust in Automated Driving Systems: The Case of Overtaking and Passing; IEEE Transactions on Human-Machine Systems, Vol. 48, Issue: 1, p. 85-94 (2018), doi: 10.1109/THMS.2017.2781619
- 10) 安部原也 他:探索的な分析にもとづく自動運転の走行方法による信頼への影響に関する研究, 交通科学, Vol. 53, No. 1p.12 22 (2022), doi: 10.34398/kokaken.53.1\_12
- 11) 三宅晋司, 神代雅晴: メンタルワークロードの主観的評価法-NASA-TLXとSWATの紹介および簡便法の提案-, 人間工学, Vol. 29, No. 6 p. 399 408 (1993), doi: 10.5100/jje.29.399
- 12) De Waard, D.: The Measurement of Drivers' Mental Workload; PhD thesis, University of Groningen, Groningen, The Netherlands (1996), <a href="https://pure.rug.nl/ws/portalfiles/portal/13410300/09\_thesis.pdf">https://pure.rug.nl/ws/portalfiles/portal/13410300/09\_thesis.pdf</a>, (参照 2023-11-13)
- 13) Widyanti, A., et al.: Adaptation of the Rating Scale Mental Effort (RSME) for Use in Indonesia, International Journal of Industrial Ergonomics, Vol. 43, p. 70 76 (2013), doi: 10.1016/j.ergon.2012.11.003
- 14) Zhou, H.P., et al.: Effect of Instructing System Limitations on the Intervening Behavior of Drivers in Partial Driving Automation; Cognition, Technology & Work, Vol. 22, issue 2, p. 321 334 (2020), doi: 10.1109/ivs.2007.4290281

# 計測車両を用いた自動運転の安全性評価に関する 実交通流データ収集技術の現状と今後の課題\*

Current Status and Future Prospects of Real Traffic Flow Data Collection Technology for the Safety
Assessment of Automatic Driving Using Measurement Vehicles

平山 泰司\*1大谷 健登\*2榎田 修一\*3松原 宏樹\*4Taiji HIRAYAMAKento OHTANIShuichi ENOKIDAHiroki MATSUBARA

都市を中心に世界の人口が増加する中,自動車のさらなる普及拡大が想定され,交通事故の削減,渋滞の緩和や環境負荷の低減等がより必要となる.今後既存の取組だけでは抜本的な解決が困難と予想されるため,新たな取組である自動運転への期待は高く,関連する市場の拡大も見込まれる.本研究では,計測車両を用いた自動運転の安全性評価に関する実交通流データの収集技術の現状として,収集方法,データ分析方法を紹介するとともに,今後の展望について述べる.

KEY WORDS: 安全,交通流,計測技術,センサ技術,情報処理

#### 1. はじめに

都市を中心に世界の人口が増加する中、自動車のさらなる普及拡大が想定され、交通事故の削減、渋滞 の緩和や環境負荷の低減等がより必要となる. 今後既存の取り組みだけでは抜本的な解決が困難と予想 されるため、新たな取り組みである自動運転への期待は高く、関連する市場の拡大も見込まれる、自動運 転は、運転者による運転を前提とした従来の安全に対する考え方に加え、自動走行システムが車両の操 作を行うことに対応した新たな安全性評価手法を策定する必要がある。また、国際商品である自動車を 海外でも販売していくためには、その考え方を諸外国とも協調し、国際標準化を進めていく必要がある. このような背景を踏まえて国内では、経済産業省からの委託事業である「自動走行システムの安全性評 ずは一般量産車の自動運転(レベル3以上)を対象として、国際動向を踏まえつつ、シナリオベースアプ ローチ の と呼ばれる他車の割り込みや急制動などのシーンを時系列的に再現して評価する手法による自 動運転システムの安全性評価に必要なプロセスと評価手法の開発と検証を行っている、特に、自動運転 車と周辺交通参加者の衝突リスクを伴うクリティカルな交通外乱シナリオ(自車(以下,自動運転車を示 す)に対する周辺車両のカットイン、カットアウト、減速など)を対象に開発と検証を行った(図1). 国連 WP29(自動車基準調和世界フォーラム)の「セーフティビジョン」や国土交通省の「自動運転車の 安全技術ガイドライン」<sup>7)</sup> では「自動運転車は,設定された運行設計領域(ODD)の範囲内において,自 動運転システムが引き起こす人身事故であって合理的に予見される防止可能な事故が生じないこと」と 定めている. そこで, 本事業では, 交通外乱シナリオおよびそれにひもづく各種パラメータの妥当性を裏 付けるために、計測車両や定点観測 8,9) による実交通流データ (カメラ映像や LiDAR 点群データなどの 計測生データ)の収集,交通外乱データ(計測生データから導出される交通参加者の軌跡データ)の抽出, 交通外乱シナリオの抽出,交通外乱シナリオにひもづく各種パラメータの統計分析を行うことにより「合

<sup>\* 2023</sup>年11月8日受理

<sup>\*1</sup> 一般財団法人日本自動車研究所 自動走行研究部

<sup>\*2</sup> 株式会社 Human Dataware Lab.

<sup>\*3</sup> 国立大学法人九州工業大学 博士(情報工学)

<sup>\*4</sup> パイオニア株式会社

理的に予見される範囲」を明確にすることを試みた.計測車両によるデータ収集は、同車両に搭載した計測機器によりデータ収集を行うため、さまざまな箇所で実施することができる.一方で定点観測によるデータ収集は、一定範囲で走行するカメラに映ったすべての車両の軌跡を取得できるため、場所に起因した特徴を有するデータを効率よく収集できる.このように、目的に応じて適切なデータ収集方法を用いてデータを蓄積することが重要である.

本稿では、社会実装が比較的早いと想定される高速自動車国道や自動車専用道における計測車両を用いた実交通流データの収集方法、データ分析方法の概要について紹介するとともに、今後の課題について述べる.

: Ego	: Side : Follow	:Lead1 :Lead2	Surrounding Traffic Participants' Position and Behavior			
	Road geometry	Ego-vehicle behavior	Cut in	Cut out	Acceleration	Deceleration (Stop)
Road Geometry and Ego-vehicle behavior	Main roadway	Lane keep	No.1	No.2	No.3	No.4
		Lane change	No.5	No.6	No.7	No.8
	Marge .	Lane keep	No.9	No.10	No.11	No.12
		Lane change	No.13	No.14	No.15	No.16
	Branch	Lane keep	No.17	No.18 W	No.19	No. 20
		Lane change	No.21	No.22	No.23	No.24

図1 自動車専用道における一般車両の交通外乱シナリオ (出典:一般社団法人日本自動車工業会 自動運転の安全性評価フレームワーク Ver3.0 10))

## 2. 計測車両を用いた自動運転の安全性評価に関する実交通流データ収集技術

自動運転の安全性評価には、自車と周辺車両の相互動作などを記述したシナリオの分析が必要となる. SAKURA プロジェクトでは、実交通流データをシナリオ分析(合理的に予見可能な範囲の分析)に使用できるデータにするために、計測車両や定点観測により取得した実交通流データから自車および周辺車両の軌跡情報を算出し、そこからシーンを抽出し、シナリオを作成するという一連の処理を検討した(図2). 本稿では図 2 の赤枠に示す計測車両による実交通流データ収集、データ分析方法について述べる.

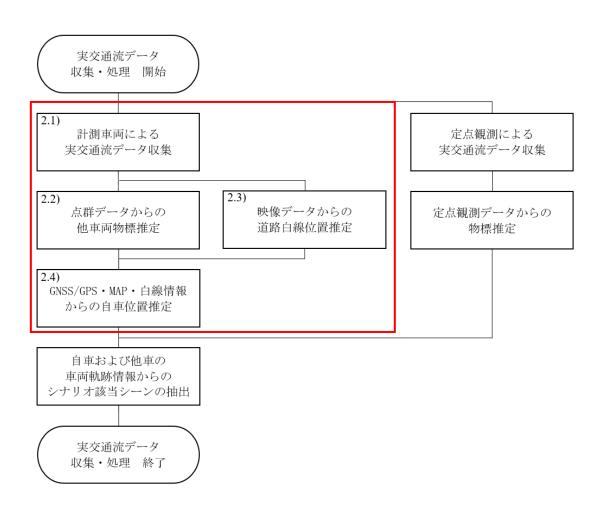


図 2 交通外乱シナリオ作成までのプロセス

#### 2.1 計測車両による実交通流データ収集

国内の自動車専用道における自動運転の安全性評価に向けたシナリオを作成するためには、さまざまな交通状況下で自車を取り巻く周辺車両の振る舞いのデータを統計的に分析する必要がある。そのために、計測車両および周辺車両の実交通流データを収集する手法について検討した内容を述べる。

#### 2.1.1 計測車両の構成と特徴

#### (1) 搭載センサ

自車と周辺車両の相互作用などを記述したシナリオを分析可能とするために、表 1 に示した用途を 目的とした各センサを搭載した. センサは、周辺車両の自然な交通流を収集できるように、図 3 に示 した構成で可能な限り周りから目立たないように配置した. また、周辺車両を高精度に認識するため、 高精度測量機(光波測量器)で各センサの取り付け位置・角度を計測し、適切な位置に設置した.

センサ種類	用途	周波数	解像度,性能
LiDAR	周辺物体検知	10 Hz	水平方向: 360°
			垂直方向: +15°~-15°
			測定距離: ~100 m
カメラ	検知物確認	30 Hz	解像度: 1,280×800
GNSS/IMU	自己位置推定用	10 Hz	計測対象により異なる

表 1 データ収集に使用したセンサ

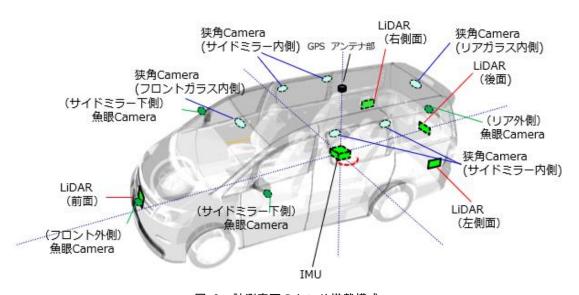


図 3 計測車両のセンサ搭載構成

## (2) データ収集システム

自動運転に必要な機能がパッケージングされているオープンソース自動運転プラットフォームである Autoware<sup>11)</sup> を中核としたデータ収集システムを搭載した。また、LiDAR、カメラ、GNSS といったような各種センサのドライバソフトも含まれており、対応しているセンサであればソフトウェアをインストールするだけで各種センサデータの取得が可能である。また、オープンソースソフトウェアであるため、新たなセンサデータの処理の仕組みや、認識アルゴリズムについても、容易に新規機能の追加が可能であり、さまざまな車両構成、センサ構成に応じてカスタマイズすることが可能な点で拡張性が高いデータ収集システムである。

#### 2.1.2 走行経路

シナリオベースの安全性評価に必要なデータを収集するために、低速および高速走行時のデータ収集が可能かつ高精度な位置推定を可能にする高精度地図が利用可能な走行経路を選定した。低速走行時のシナリオ分析に必要なデータを効率良く収集するため、渋滞が多く発生する首都高速道路の箱崎ジャンクションを中心に走行経路を選定した。また、高速走行時のシナリオ分析に必要なデータを効率良く収集するため、都心から近く交通流が多く見込める東名高速、新東名高速道を走行経路として選定した。

#### 2.1.3 収集したデータの保管

収集したデータは年間 1 ペタバイト (10 の 15 乗バイト) 以上になり大容量保管を実現しつつ,可能な限り維持費を安価に抑えるため,保管媒体は磁気テープを利用した.磁気テープは長期間のデータ保存に向いた信頼性の高いメディアである LTO テープを使用し,収集したデータは走行した単位で保管した.

#### 2.2 点群データからの他車両物標推定

自動運転システムの安全性を評価するためのシナリオを分析するためには,自車を中心とした 360° に存在する周辺車両の挙動情報が必要となる. そこで,計測車両に搭載した LiDAR センサにて取得した 3次元点群データから周辺車両の挙動を分析するために検討した処理について述べる.

## 2.2.1 点群の統合

計測車両には前後左右に4台のLiDARを搭載しており、各LiDARで取得した点群データを統合することで計測車両を中心とした360°の全周囲の点群へと変換した.点群データの結合は、外部トリガなどを利用した時刻同期ではなく、LiDARごとに異なる点群データ取得タイミングで付与される時刻情報を利用した.

## 2.2.2 物体検出

統合した点群データは物体検出器に送られ、自車周辺に存在する物標情報を推定する.物体検出器には PointPillars<sup>12)</sup> と呼ばれる深層学習ベースの物体検出モデルを利用している(図 4). PointPillars では、3 次元の点群情報から高さ方向の情報を圧縮し、Pillar と呼ばれる単位をもとに高さ情報を暗に含むような2 次元データとして処理を行うことで、データ量・計算量を軽減し処理速度の高速化を実現した.

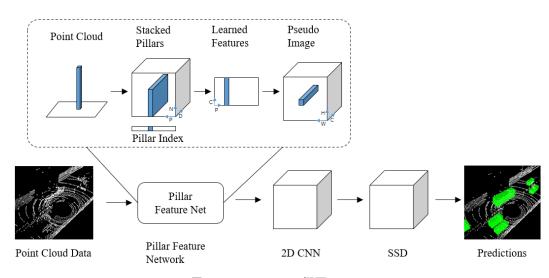


図 4 PointPillarsの概要

#### 2.2.3 結果補正

物体検出処理だけでは、データ中に含まれるノイズや遮蔽などの影響を受け誤検知や検出漏れが生じるため、時系列的なデータのつながりを考慮した結果の補正処理を後処理として実施し、精度を向上した。この処理における物標追跡・サイズ統一・補間・平滑化・物標種類の推定などを通して最終的な周辺車両の物標認識結果が得られる(図 5)。緑色の矩形が認識された周辺車両の自車からの相対位置を表し、位置以外に、大きさ、車両 ID、種別、相対速度などが推定されていることがわかった。

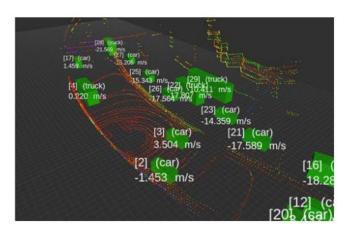


図 5 周辺車両物標化の例

## 2.3 映像データからの道路白線位置推定

計測車両により収集した実交通流データからシナリオを分析するにあたり、自車と白線など車線を示す標示(レーンマーク)との相対位置も分析に有効な情報となる。そこで、実交通流データのうち、カメラ画像から自車が走行する車線のレーンマークを取得するため、画像認識技術をベースとしたデータの分析について検討した処理について述べる。

#### 2.3.1 レーンマーク検出

前方カメラ画像からレーンマーク領域の検出には、CondLaneNet<sup>13)</sup> という手法を用いた. CondLaneNet は深層学習を用いた車線検出フレームワークであり、分岐線などの複雑な形の車線に対しても高精度にレーンマークを検出することが可能である. 検出した複数のレーンマークから計測車両が走行する自車線を取得した結果を図 6 に示す.

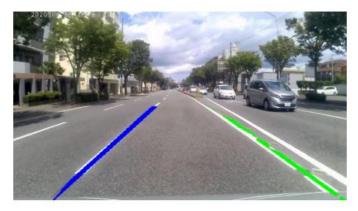


図 6 自車線レーンマーク領域推定における出力結果 (自車が走行する車線における左レーンマークが青色の線、右レーンマークが緑色の線)

#### 2.3.2 左右レーンマークに対する自車の位置推定

計測車両の車線内の位置を算出するため、左右カメラを基準とした座標系で計測車両とレーンマークとの相対的な関係を算出した後、計測車両上に設定した原点(計測車両原点)を基準とした座標系に変換する. 算出した計測車両のレーンマークに対する位置には、スパイクノイズが含まれているので、検出結果に対しフィルタリング処理をし、スパイクノイズの影響を低減する. フィルタリング処理には、状態空間モデルにおいて状態を逐次的に推定するアルゴリズムであるカルマンフィルタを用いた.

以上の処理により得られた計測車両原点を基準とした座標系の原点から左右レーンマークまでの距離 (図 7中の*l*) を車線内の位置として計測した.

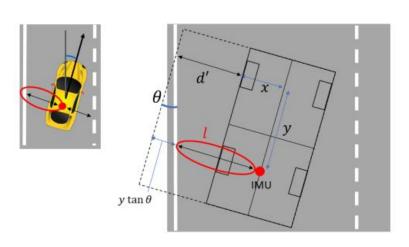


図 7 位置算出の模式図

## 2.4 GNSS/GPS・MAP・白線情報および物標情報からの車両軌跡推定

自動運転の安全性評価用のシナリオを生成するためには、計測車両にて収集した実交通流データ、他車両物標推定結果、道路白線位置推定結果、自動運転や先進運転支援システム向けに整備されたセンチメートル(cm)級の精度を持つ高精度地図、カーナビゲーションで用いる地図(ナビ地図)と自車位置推定技術(ローカライゼーション技術)を組み合わせて、図 8 に示した自車および周辺車両の軌跡推定および高精度化を行う必要がある。また、カーブ区間などの道路曲率が大きい箇所ではシナリオ分割が上手くできない課題があり、シナリオ分割を可能とするためには道路形状を考慮した自車および周辺車両の軌跡データが必要となる。これらに対応するために検討した処理について述べる。



図 8 自車と周辺車両の情報

#### 2.4.1 位置と道路情報を含むデータの生成処理

自車の位置情報を取得する GNSS/GPS および IMU ユニットからの出力データとナビ地図データを関連付け、タイムスタンプごとに自車位置と自車が走行している道路情報(都市高速、一般道路などの走行している道路の種別など)を関連づけたデータを生成した.

## 2.4.2 各データの統合処理

LiDAR, カメラ, GNSS/GPS から分析したデータのタイムスタンプをあわせて統合するため, GNSS/GPS からの出力データのタイムスタンプを基準に自車位置と道路情報を含むデータ, 他車両物標推定結果, 道路白線位置推定結果のタイムスタンプの整合を行った.

## 2.4.3 車両軌跡データの高精度化

タイムスタンプを整合した各データおよび高精度地図、ナビ地図を入力情報として高精度自車位置推定処理を実施し、高精度な自車位置および進行方位を出力した。高精度自車位置推定は複数の位置推定アルゴリズムから成り、位置推定アルゴリズムごとに入力情報と位置の推定精度が異なるため、入力情報に適した位置推定アルゴリズム(高精度地図とカメラ画像から推定した自車からレーンマークまでの距離を用いて自車位置を補正するアルゴリズムなど)を適用した。

次に、高精度化した自車位置・進行方位と他車両物標推定結果に含まれる周辺車両までの相対距離を用いて高精度な周辺車両の位置を算出した。そして、高精度自車進行方向を軸とした周辺車両相対進行方向を用いて高精度周辺車両進行方位を算出した。

## 2.4.4 座標系の変換(道路座標軸化)

自車と周辺車両との位置関係は、自車に搭載した LiDAR によって高精度に計測されているものの、図 9a (変更前) の赤矢印で示すように直線的な位置関係しか表現されない. そのため、道路がカーブしている場合、自車と周辺車両との位置関係は、LiDAR で取得した点群データからの他車両物標推定結果をそのまま使用することはできず、道路形状に沿った位置関係に補正を実現した(図 9 b:変更後).

そこで, 道路座標軸化として自車と周辺車両との距離算出は, 道路形状に沿った道路中心線に x 座標を置き, 自車の積算移動距離を算出することによって補正を実現した.

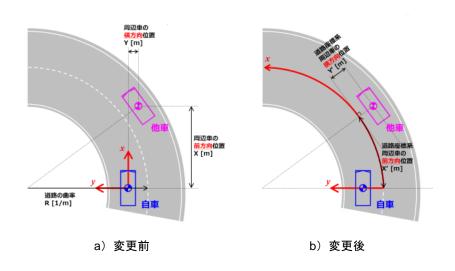


図9 カーブ区間に対応するための道路座標軸化

#### 2.4.5 車両軌跡推定の精度検証と結果

一般財団法人日本自動車研究所(JARI)がつくばに所有する自動運転評価拠点(Jtown)の多目的市街地エリアで、本稿で記載した計測車両によりデータを収集し、高精度自車位置推定の精度検証を実施した。データ収集は、各センサの計測に適した環境下で実施した。精度検証は GNSS/GPS と地上に設置した基準局からの位置情報データを組み合わせることで高精度な測位を実現する Real Time Kinematic 測位で取得した位置を基準とし、これに対して高精度自車位置推定した結果がどの程度ずれているかを標準偏差として求めることにより実施した。精度検証の正確性を向上するために、取得した各データについて計測上想定されるオフセットを補正したデータを用いて計算した結果、高精度自車位置推定した自車位置の標準偏差は前後方向 5.95 cm、左右方向 5.45 cm であった。自動車専用道を対象とした軌跡データの目標精度範囲は、車両前後方向: ±50 cm、車両横方向: ±10 cm であり、本検証内容で性能評価した結果が目標精度範囲内となることを確認できた。

## 3. まとめと今後の課題

本研究では、自動運転の安全性評価用のシナリオを分析する交通流データを効率的に収集可能な手法として、計測車両による実交通流データの収集方法、データ分析方法を確立し、国内の自動車専用道にてデータ収集分析を実施した。データ収集分析した車両軌跡データは、道路座標系に変換することでカーブ区間でもシナリオ分析できるようになった。また、自車が走行している車線との相対位置がわかるようになり、精度検証の結果からも車両軌跡データの高精度化を確認できた。

今後の展望として自動運転車の機能は進化していくものであり、機能進化に合わせた安全性評価の実施が求められる。さらに、自動運転車の普及に伴って交通環境が変化する可能性もあり、そのような変化をタイムリーかつ継続的に反映できるシナリオ更新の仕組みを検討する必要がある。継続的なシナリオ更新のためには、実交通流データの継続的な更新が重要となるが、限られた機関・プレーヤーの収集では限界があるため、本稿で紹介した取組とは別目的で収集されたデータであっても、有効に活用できる仕組みを整備していくことが有用と考えられる。一方で、既存データであればいかなるものでも良いわけではなく、品質要件を満たさないデータ(誤った情報やデータなど)を分析対象とした場合には分析結果の合理性・信頼性が損なわれる可能性が有り、その合理性・信頼性を担保するためにもデータの品質検査・保証の仕組みが必要である。

これらの課題を解決するためには、既存の取り組みでデータを計測しているステークホルダーと連携し、それらのデータを活用してシナリオを更新できる体制を構築していく必要があると考えられる.

#### 参考文献

- 1) 一般財団法人日本自動車研究所: 平成30年度 高度な自動走行システムの社会実装に向けた研究開発・実証事業(自動走行システムの安全性評価技術構築に向けた研究開発プロジェクト) 成果報告書 (2018) https://www.meti.go.jp/meti\_lib/report/H30FY/000351.pdf, (参照 2023-11-08)
- 2) 一般財団法人日本自動車研究所: 平成31年度 高度な自動走行システムの社会実装に向けた研究開発・実証事業 (自動走行システムの安全性評価技術構築に向けた研究開発プロジェクト) 成果報告書 (2019) <a href="https://www.meti.go.jp/meti-lib/report/2019FY/000329.pdf">https://www.meti.go.jp/meti-lib/report/2019FY/000329.pdf</a>, (参照 2023-11-08)
- 3) 一般財団法人日本自動車研究所: 令和2年度 高度な自動走行・MaaS等の社会実装に向けた研究開発・実証事業(自動走行システムの安全性評価技術構築に向けた研究開発プロジェクト) 成果報告書 (2020) <a href="https://www.meti.go.jp/meti\_lib/report/2020FY/000631.pdf">https://www.meti.go.jp/meti\_lib/report/2020FY/000631.pdf</a>, (参照 2023-11-08)
- 4) 一般財団法人日本自動車研究所: 令和3年度 無人自動運転等の先進 MaaS 実装加速化推進事業(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) 成果報告書 (2021)
   https://www.meti.go.jp/meti lib/report/2021FY/000334.pdf, (参照 2023-11-08)
- 5) SAKURAプロジェクト, <a href="https://www.sakura-prj.go.jp/">https://www.sakura-prj.go.jp/</a>, (参照 2023-11-08)
- 6) H.Weber, et al. :. A framework for definition of logical scenarios for safety assurance of automated driving, Traffic injury prevention 20 (sup1), p. S65-S70 (2019), doi: 10.1080/15389588.2019.1630827
- 7) 国土交通省自動車局: 自動運転車の安全技術ガイドライン, <a href="https://www.mlit.go.jp/common/001253665.pdf">https://www.mlit.go.jp/common/001253665.pdf</a>, (参照 2023-10-31)
- 8) 中村英夫 ほか:自動運転の安全性評価を狙いとしたシナリオ分析用交通外乱データ収集技術(定点カメラ観測), 第1報:基本フレームの構築/軌跡精度の予測と検証-, JARI Research Journal, JRJ20210101 (2021) <a href="https://img.jari.or.jp/v=1641526927/files/user/pdf/JRJ20210101\_q.pdf">https://img.jari.or.jp/v=1641526927/files/user/pdf/JRJ20210101\_q.pdf</a>, (参照 2023-11-08)
- 9) 中村英夫 ほか:自動運転の安全性評価を狙いとしたシナリオ分析用交通外乱データ収集技術(定点カメラ観測), -第2報:一般道交差点を想定した様々な形態の定点観測基礎検討-, JARI Research Journal, JRJ20221101 (2022) https://img.jari.or.jp/v=1667950644/files/user/pdf/JRJ/JRJ 20221101 protection.pdf, (参照 2023-11-08)
- 10) 自動運転の安全性評価フレームワークVer3.0 https://www.jama.or.jp/operation/safety/automated\_driving/pdf/framework\_ver\_3\_0.pdf, (参照 2023-11-08)
- 11) S. Kato, S. Tokunaga, et al.: Autoware on Board: Enabling Autonomous Vehicles with Embedded Systems, In Proceedings of the 9th ACM/IEEE International Conference on Cyber-Physical Systems (ICCPS2018), p. 287-296 (2018), doi: 10.1109/ICCPS.2018.00035
- 12) Lang, Alex H., et al.: Pointpillars: Fast encoders for object detection from point clouds, Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (2019), doi: 10.1109/CVPR.2019.01298
- 13) Lizhe Liu, et al.: CondLaneNet: a Top-to-down Lane Detection Framework Based on Conditional Convolution, Computer Vision and Pattern Recognition (2021), <a href="https://doi.org/10.1109/ICCV48922.2021.00375">doi:10.1109/ICCV48922.2021.00375</a>

## ISO 26262 共同研究エンジン WG 活動\*

―パワートレーン領域での ISO 26262 規格解釈と実運用課題について―

Activities of the ISO 26262 Joint Research Engine WG Activities

—ISO 26262 standard interpretation and practical issues in the powertrain area—

## 福田 和良\*1

Kazuyoshi FUKUDA

自動車向け機能安全規格 ISO 26262 を OEM, サプライヤ各社の活動に適用する際の課題への対応を議論し、共通理解を得るために共同研究エンジン WG 活動を実施した. 本稿では 2011 年度~2022 年度の活動事例について、パワートレーンシステムや HEV システム等 複数の ECU で構成される複合システムを事例に行った規格解釈について紹介する.

KEY WORDS:機能安全,電子制御,複合システム,アイテム定義,安全要求,フォールトレラント

#### 1. 背景

本 WG は国内の車両メーカ(以降 OEM と記す)と部品メーカ(以降サプライヤと記す)で構成される。本 WG は一般的なエンジン制御システムを題材に OEM とサプライヤの協調領域について,実運用課題への対応を議論し,規格解釈を実施,共通理解を得るために,機能安全要求(FSR: Functional Safety Requirement),技術安全要求(TSR: Technical Safety Requirement)導出の考え方,テスト手法,および他システムからの安全要求に基づく機能安全設計の適用事例について検討を進めてきた.

## 2. 活動事例の紹介

高度運転支援システム(ADAS: Advanced Driver Assistance Systems)や、自動運転システム(ADS: Automated Driving Systems)の開発が進む中、複雑化、分散化が進む車載電気/電子(以降、E/E と記す)システムにおいて ISO 26262 の活動対象となるアイテム定義(開発対象システムの仕様や依存関係を定義すること)や、安全要求の配置、安全機構に関する規格解釈や実運用課題を検討するため、パワートレーンシステム、HEV システム等複数の ECU で構成される複合システムを事例に規格解釈を実施した.

本稿では、「将来の E/E アーキテクチャに対応した安全機構の考察(セントラル型アーキテクチャを事例とした安全機構の検討)」、「フォールトトレランス(一つ又は複数の指定されたフォールトの存在下で指定した機能を提供する能力(ISO 26262-1:2018 より引用))なシステムへの機能安全に関する解釈」および「複雑化するシステムにおけるアイテム定義の考察」を事例に議論の概要を紹介する.

## 2.1 将来のE/Eアーキテクチャに対応した安全機構の考察

近年、ADAS や HEV システムの様に車載電子制御システムが大規模複雑化しており、複数のシステムが連携して構成される複合システムが増加している。複合システムでは、車載 ECU 数が増加し、車における電子制御機能(ソフトウェア(SW)/ハードウェア(HW))が増大している。現在、車載 E/E アーキテクチャは、主に、エンジン、ブレーキ、ステアリングなどの個別で機能を実現するようなドメイン型

JARI Research Journal (2024.02)

**-** 80 **-**

<sup>\* 2024</sup>年1月19日受理

<sup>\*1</sup> 一般財団法人日本自動車研究所 新モビリティ研究部

である.しかし、将来的には、処理を一つの ECU に東ねるセントラル型が導入され、車の前後、左右をセントラ ECU とつなげるような配置トポロジに依存するゾーンアーキテクチャに変わっていくと考えられている.このように車載 E/E アーキテクチャが変化して、ドメイン間の相互関係が複雑化するなか、E/E アーキテクチャに関するアイテム定義~機能安全コンセプト導出(FSC: Functional Safety Concept)などの機能安全 (FuSa: Functional Safety) 活動が、単一システムでアイテムを定義できた従来通りの考え方、解釈のままでよいかについて、事例を元にフィージビリティスタディを実施した.

図1のセントラルアーキテクチャの事例を用いて検討した結果,従来のドメイン型 E/E アーキテクチャと同じように,機能を一つの ECU に集約したセントラル型アーキテクチャでも機能安全への対応が可能であることがわかった.ただし,故障時に安全を実現するための設計思想(機能継続か機能縮退か機能停止か),機能のリアルタイム性,故障対処時の時間的な制約(例えばフォールトトレラント時間間隔)などが異なる複数の機能をセントラル型として一つにまとめることで,機能安全設計の難易度がかえって上がる場合もあり、セントラル型を検討する場合には、分散型での開発以上に、複数機能間のインタラクション、制約事項を、より深く考慮する必要があることが課題として上げられた.

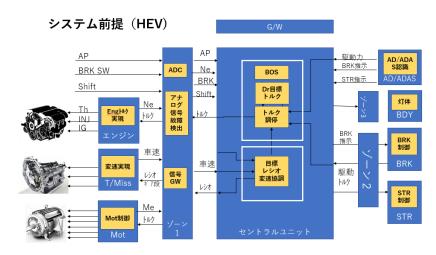


図1 セントラルアーキテクチャの一例

## 2.2 フォールトトレランスなシステムへの機能安全に関する解釈

ステアバイワイヤにおける車速制限に関するエンジンへの自動車用安全度水準(ASIL: Automotive Safety Integrity Level)付与について事例を元に検討した。冗長構成のステアバイワイヤシステムで,冗長の一方で故障が発生した場合に,故障していないもう一方で機能を継続するために車速を制限して制御可能性を上げ,ASIL 対応能力を確保する事例が,ISO 26262-Part.10 の Clause12 に示されている。完全冗長なシステムの場合,チャンネル A(またはチャンネル B)の故障ではハザードには至らない。さらに単独故障時の処置として車速制限を実施する場合,要求 ASIL は何になるのか検討することが必要となった。このような場合の機能安全対応について検討するため,冗長で構成されるシステムにおける ASIL 付与の考え方について事例を元に規格解釈を実施した。

図 2 のステアバイワイヤシステムの事例を用いて検討した結果,完全冗長なシステムの場合,初期は単独システムで検討を開始し、ASILDを付与する(システムに ASILDを割り振る,の意). ISO 26262-Part.10 では速度制限機能(例えばエンジン制御機能)に ASILDを割り振る例の記載がある. 一方,冗長構成の一つに故障が発生し、残された一つで機能継続する場合はレイテント状態(故障が潜在化した状態)となるので、レイテント対策(例えば警告ランプによる通知)を実施すれば、速度制限機能に安全要求を割り振らないという考え方も適用できることが判った.また、デコンポジションの手法を用いて ASIL

を下げる場合は、独立性の要件の検討などについて、さらに深掘りが必要であることが課題として上げられた.

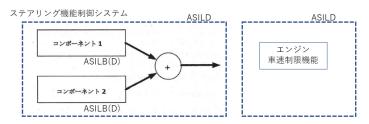


図2 ステアバイワイヤにおける冗長システムの一例

図 2 のように、完全冗長なシステムの場合、チャンネル A (またはチャンネル B) の故障ではハザードには至らない。このような場合、一例として次の①~④の 4 点を考慮して、機能安全対応を検討する必要がある。

- ① 完全冗長なシステムをアイテムとした場合、単独故障は QM か ASIL 付与か
- ② 完全冗長なシステムをアイテムとした場合、単独故障はレイテントフォールトか
- ③ その場合、レイテントフォールト対応の ASIL は何になるのか
- ④ 単独故障時の処置として車速制限を実施する場合,この要求 ASIL は何になるのか

## 2.3 複雑化するシステムにおけるアイテム定義の考察

2020 年度および 2021 年度「複数システム連携におけるアイテム境界部の安全設計方策の検討」,「複数システム連携における安全機構の規格解釈と設計注意点の検討」を実施したアイテム定義と ASIL 検証に関して,2022 年度,更に考察し,複雑化するシステムにおけるアイテム定義(グランドアイテム(仮称)(以下,単に「グランドアイテム」と記す))について事例を元に規格解釈を実施した.

図3に複雑化するシステムにおけるアイテム定義の検討例を示す.アイテム定義について,全体を1つのアイテムとする考え方と個々をアイテムとする考え方の中間的な考え方として,全体を1つのアイテムとしつつ,全体を構成する個々アイテムも定義するグランドアイテムという考え方を検討した.グランドアイテムという考え方により,個々のアイテム定義では考慮が十分しにくい通信系や従属故障の機能安全対応について網羅でき,かつグランドアイテム開発者は,全体として個々のアイテム間の相互作用にも配慮するので,個々のアイテム開発者は自アイテムの機能安全活動に注力できる.

#### システム前提: 充電機能付きハイブリッドシステム(PHV)

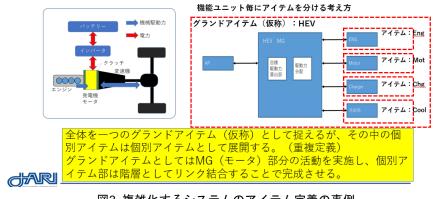


図3 複雑化するシステムのアイテム定義の事例

#### 3. まとめ

ISO 26262 リリース時点から、規格の解釈および実開発への適用について事例ベースで議論し、協調領域に関する気付きを得ることができた。活動を通じて得られた知見を各社に持ち帰り開発に活かし、各社内での機能安全規格の解釈に関する相談ごとの解決にも役立てることができた。結果、トレーン制御システムに関する機能安全設計の state-of-the-art (最先端) について共有することができ、関係者の技術レベルのさらなる向上に貢献できたと考える。

#### 4. 今後の課題

ISO 26262 発行当初と比べ、車載 E/E システムは、より高機能複雑化しており、かつ、意図した機能の安全性(SOTIF: Safety Of The Intended Functionality)規格(ISO 21448)、サイバーセキュリティ(CS)規格(ISO/SAE 21434)の発行など、車載 E/E システムに係わる新たな規格が発行されている。SOTIF やCS の国際規格の内容も踏まえた ISO 26262 の規格解釈について、今後、制御システムの大規模化、複雑化や電動化に伴う規格解釈上の課題について、より深い議論が必要となる場合もあると思われる。

### 5. 最後に

本 WG 活動, ISO 26262 を適用する上での実運用課題について事例を元に議論し、規格解釈を通して得られた知見を各社開発の現場で有効活用されることを期待するものである.

## 6. 注意事項

本稿では、さまざまな前提条件を仮定して、検討した事例(案)をまとめている。実際の開発に適用する場合には、システム開発における諸事情を勘案する必要がある。

そのため、本書を利用して検討される成果物、あるいは設計されるシステムで発生するいかなる問題に対して JARI はその責任を負わない。また、本書に示す事例は、あくまでも1つの検討事例であり、参考資料扱いとする。事例は、具体的な製品をイメージしたものではあるが、仮想的な製品であり、実際の製品とは無関係である。事例は技術的な正しさを保証するものではなく、書き方を規定するものでもない。

#### 謝辞

2011 年~2022 年まで、パワートレーン領域への ISO 26262 適用に伴う実運用課題について、本 WG に参加いただいた皆様に感謝いたします.

## 自動運転の安全性評価に関する国際標準の解説\*

— ISO 34502 における日本提案の概要 —

Review of the International Standardization for the Safety Assurance of Automated Driving Systems

— Proposal of Japanese Experts in for ISO34502 —

中村 弘毅\*1

Hiroki NAKAMURA

#### Abstract

国連 WP29 によると、「自動運転車は運行設計領域において合理的に予見される防止可能な人身事故を生じさせないこと」が安全目標となる。この要件を具体化するため ISO 34502 ではシナリオに基づいた安全性評価の枠組を定義している。そこで本報では ISO 34502 の概要を解説し、各プロセスに対して日本自動車工業会および SAKURA プロジェクトから提案された手法を紹介する。また、関連する国際標準化の動向として ISO/TC22/SC33/WG9 の活動進捗を報告する。

KEY WORDS: 自動運転,安全性評価,国際標準化

#### 1. はじめに

自動運転あるいは運転支援技術は、事故の削減や渋滞の緩和といった直接的な効果にとどまらず、人口減少・高齢化社会の移動手段確保、人手不足対策、さらにはカーボンニュートラルへの貢献など、社会課題を解決する技術として期待されている¹). 米国 SAE(Society of Automotive Engineers)による定義に従うと、運転自動化レベルは5段階で定義され²)、運転自動化レベル1~2を運転支援、運転自動化レベル3以上を自動運転と分類している. 運転支援、もしくは自動運転システムを社会実装するためには、社会的に受容される安全性を満たしていることが前提となるが、運転支援と自動運転の境目となるレベル2と3の間では、監視責任の所在がドライバからシステムに移行する点に大きな差異がある. 運転支援ではドライバに監視責任があるため、遭遇しうる場面での安全性をドライバが担うことを暗黙の了解として、運転支援によって向上する安全性を付加的に評価できる. しかし、自動運転ではシステムが監視責任を担うため、人間ドライバが対処していたすべての場面をシステムが対処する必要がある. すなわち遭遇しうる場面を網羅的に評価する必要があるため、安全性評価手法そのものを新たに確立することが求められる. ただし、安全性を走行試験によって示すと、100億km以上の試験が必要という試算もあり³)、新しい車両が開発されるごとにこのような試験を実施することは現実的ではない.

これに対して、自動運転車が遭遇しうる場面を体系的にまとめる手法として、シナリオベースアプローチと呼ばれるものが提案されている。この手法は、実際に計測されたデータ、専門家知識などによって自動運転車が遭遇しうる場面を体系的に整理し、シナリオのリストとしてまとめる手法を指す。 走行試験と比較して効率良く安全性評価を進めることが期待できるため、各国でシナリオベースアプローチの安全性評価に関する研究が進められている。

<sup>\* 2024</sup>年1月25日受理

<sup>\*1</sup> 一般財団法人日本自動車研究所 自動走行研究部 博士(工学)

このような状況から、自動運転の安全性評価シナリオを標準化する目的で ISO/TC22/SC33/WG9(自動車/ビークルダイナミクス、シャーシコンポーネント、運転自動化システムのテスト/自動運転システムのテストシナリオ)が 2018 年に設立され、シナリオに基づく安全性評価手法の国際標準化が始まった。テーマごとに ISO 34501~34505 までが提案されたが、この中で ISO 34502 はシナリオベースの安全性評価の枠組みをまとめることを目的とし、2022 年 10 月に第 1 版が発行された 4). この ISO 34502 は日本がリーダーとなって国際標準化が進められ、日本自動車工業会(JAMA)および SAKURA プロジェクト 5)の提案が多く採用されている.

そこで、本報では ISO 34502 の概略をまとめ、同標準における JAMA および SAKURA プロジェクトの提案(以下、日本提案) する手法を解説する. また、関連する ISO/TC22/SC33/WG9 の活動内容とその進捗について紹介する.

## 2. ISO 34502および日本の専門家が提案する手法の概要

#### 2.1 ISO 34502の概要

ISO 34502 で定義される安全性評価のフローを Fig. 1 に示す. このフローは安全性評価の対象となる範囲を明確にし、その中でどのような手順(図中の各ブロック)を考慮すれば「合理的に予見可能かつ防止可能な事故を起こさないこと」という国連 WP29 の定める安全目標 <sup>6</sup>を論理的に説明できるのかを示すためのもので、日本提案を基に合意された.

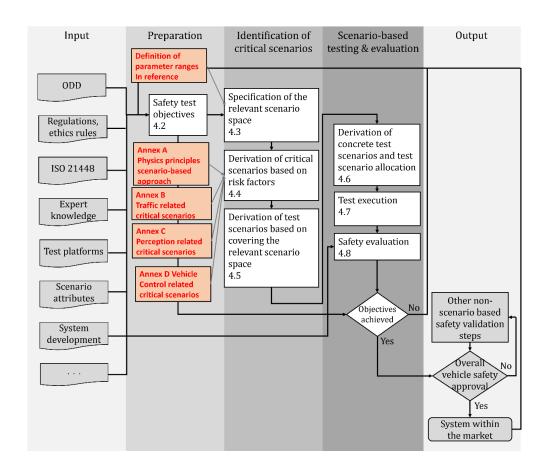


Fig. 1 Safety assurance flow defined by ISO 345024) and corresponding Japanese experts' proposal (in red)

このフローでは、はじめに、ODD(運行設計領域)、規制・倫理規則、ISO 21448(SOTIF:意図した機能の安全性)、専門家知識、試験用プラットフォーム、シナリオ属性、システム開発仕様など前提となる要件が設定される(Input).次に、安全性評価試験の目的が設定される(Preparation).その目的に従い、網羅すべき安全性評価の対象となる範囲が定義される。その範囲内でリスク指標に従ってクリティカルなシナリオのパラメータ空間(logical scenarios)が定義される(Identification of critical scenarios).さらに、連続的なパラメータ空間から具体的な試験シナリオ(concrete scenarios)が選定され、試験を実施し、安全性評価を行い、目的が達成できているかを評価する(scenario based testing and evaluation).最後に、シナリオベース以外の妥当性検証プロセスと合わせて車両全体の安全性認証を行い、市場に出せるかを評価する(Output).

また、図中に示した赤枠のブロックは日本が提案するシナリオの定義方法であり、次節以降で詳述する.

## 2.2 JAMAおよびSAKURAプロジェクトが提案するシナリオの定義方法

JAMA 自動運転部会 AD 安全性評価分科会は、自動運転の安全性の論証体系・評価手法に関するベストプラクティスをまとめたフレームワークを継続的に更新している <sup>n</sup>. このフレームワークでは、Fig. 2 に示すように物理原則に基づく安全性評価シナリオの定義を提案している. 運転における認知(認識)・判断・操作(制御)のタスクに対してそれぞれ独立したシナリオ(認識外乱シナリオ,交通外乱シナリオ,車両外乱シナリオ)を定義し、それらの組み合わせによって自動運転車が遭遇するシナリオを網羅的に再現することが可能となる.

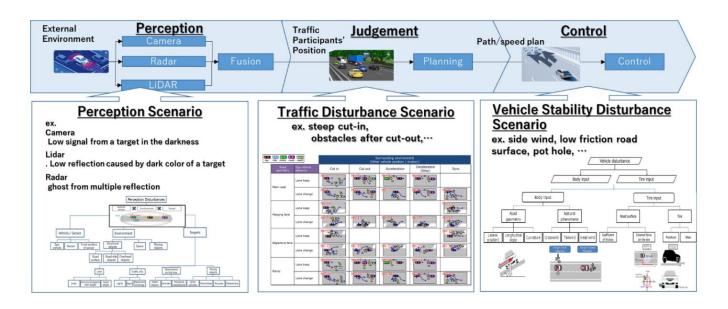


Fig. 2 Scenario structure defined by the JAMA Automated Driving Safety Evaluation Framework Ver. 3.0 7)

認識外乱シナリオは主にセンサ外乱,死角,通信の接続性の3種類がある。安全性評価フレームワークで提案された内容はISO 34502 にも記載され、Annex C にまとめられている。センサ原理に基づき、センサが認識不良を起こす主な要因のリストが記載されている。また、通信の接続性に関しては、センサ、環境、送受信対象という要因ごとの外乱がまとめられている。さらに、死角は、道路形状、静的遮蔽物、移動体による遮蔽の3種類に大別し、シナリオが定義されている。

車両外乱シナリオは車体に直接作用する外乱と、タイヤ路面間に作用する外乱に分類して ISO 34502Annex D にまとめられている。車体に直接作用する外乱には、道路勾配によって作用する重力や曲線走行時の遠心力、風などの空力によるものが含まれる。一方、タイヤ路面間に作用する外乱はタイヤの状態と路面要因に分類され、さらに路面要因は摩擦に関係する項目と、継ぎ目などの段差により直接外力が働く項目に分けられている。

交通外乱シナリオは、はじめに、自動運転車(自車)と交錯する交通参加者を定義し、自車と交通参加者のそれぞれの挙動、交錯が発生する場所(道路線形)との組み合わせを考慮することで、定性的な交錯パターンである Functional Scenario が定義される。自動車専用道(高速道路)の場合、自車の挙動は車線維持・車線変更、他車の挙動は加速・減速・カットイン・カットアウト、道路線形は本線・合流・分岐でまとめられるため、Fig. 3 に示す 24 のシナリオが定義される。各シナリオに対して定量化するパラメータとその範囲を定めることで、ISO34502 で定義される Logical Scenario が同定される。

: Ego	: Side : Follow	:Lead1 :Lead2	Surrounding Traffic Participants' Position and Behavior			
	Road geometry	Ego-vehicle behavior	Cut in	Cut out	Acceleration	Deceleration (Stop)
Road Geometry and Ego-vehicle behavior	Main roadway	Lane keep	No.1	No.2 - dx - Gx	No.3 dx	No.4 ← -dx - → Gx
		Lane change	No.5	No.65 dx. \$3 my	No.7	Gx
	Marge	Lane keep	No State of the st	No.10	No.11	No.12 <sub>dx</sub>
		Lane change	No de	No 14 Sx	No. 1.5	No.1634
	Branch	Lane keep	No. 57	No.18	No.19	No.20
		Lane change	No.21	No.22	No.23	No.24

Fig. 3 Functional scenario catalogue on highways defined by the JAMA framework 7)

#### 3. ISO/TC22/SC33/WG9の活動概要

Scenario attributes and categorization

Scenario evaluation and test case generation

本章では、ISO 34502 と関連する ISO/TC22/SC33/WG9 (以下、WG9) の活動内容とその進捗を紹介する。WG9 ではシナリオベースでの自動運転の安全性評価を行うために Table 1 にまとめた 5 つの項目の IS (国際規格) 化を進めている(2024 年 1 月現在).

ISO Publication Topic **Progress** Leader Number date (Sub) 34501 Terms and definition IS published '22 Oct. China 34502 Scenario based safety evaluation framework IS published '22 Nov. Japan (Germany) 34503 IS published UK Taxonomy for operational design domain '23 Aug.

Under publication

CD

'24 Jan.

'25 Sep.

(Japan)

Netherlands (Germany)

Germany (China)

Table 1 Main work items of ISO/TC22/SC33/WG9 (ISO 3450X)

ISO34501 は用語の定義をまとめたもので、ISO3450X はこの 34501 で定義された用語を前提として記述される. ISO34502 は前述のとおり安全性評価の枠組みを定義している. ISO34503 は ODD を定義するための分類方法がまとめられている. ISO34504 は、シナリオの属性と分類をするための手法がまとめられている. ISO 34505 は、WG9 で議論が進められており、ISO 34502 で定義された評価すべきシナリオ (パラメータ空間) から、試験条件を選定するための手法がまとめられる見込みである. これらを活用することで、自動運転の安全性評価を効率よく進められることが期待される. なお、2024 年 1 月現在、ISO 34501 ~34503 は発行済、34504 は発行準備段階、34505 は CD 投票前の審議段階である.

## 4. まとめ

34504

34505

自動運転車の安全性評価に関する取組み状況として、国際標準化の動向、特に ISO 34502 の概略と、日本の専門家が提案する手法について解説した。なお、ISO 34502 の第 1 版は自動車専用道路(自専道)に重点を置いたフレームワークであり、今後はより複雑な一般道路(一般道)評価へ拡張することが求められる。そのためには、一般道で想定されるシナリオ体系(自転車・歩行者を含む)を定義することに加え、自専道よりもはるかに複雑になるシナリオ体系に対応する合理的に予見可能で防止可能な範囲の特定手法の開発などが課題である。JAMA フレームワークの最新バージョンでは、一般道における対車両シナリオの体系をまとめ、58 シナリオを定義している。

また、これらの課題解決に向けては従来の基軸であった欧州との連携を継続しつつ、北米との連携を強化していくことが重要である。特に、自動運転タクシーの社会実装など、先行している事例を参考にし、一般道特有の課題にも対処しながら国際標準化活動を進める必要があるが、日本が引き続き議論を主導できるように調査・研究を進めていく予定である。

#### 謝辞

本稿は、経済産業省「無人自動運転等の CASE 対応に向けた実証・支援事業(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)」の成果の一部をまとめたものであり、関係各位に対して謝意を表す。

## 参考文献

- 1) 自動走行ビジネス検討会: 自動走行ビジネス検討会報告書version 6.0, p. 4 7 (2022), https://www.mlit.go.jp/jidosha/content/001480321.pdf, (参照 2024-1-25)
- 2) SAE International: Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles (J3016\_202104), .30-32 (2021), <a href="https://www.sae.org/standards/content/j3016">https://www.sae.org/standards/content/j3016</a> 202104/, (参照 2024-1-25)
- 3) Kalra, N. et al.: Driving to Safety: How Many Miles of Driving Would It Take to Demonstrate Autonomous Vehicle Reliability? Santa Monica, CA: RAND Corporation (2016), <a href="https://www.rand.org/pubs/research\_reports/RR1478.html">https://www.rand.org/pubs/research\_reports/RR1478.html</a>, (参照 2024-1-25)
- 4) ISO 34502:2022 Road vehicles Test scenarios for automated driving systems Scenario based safety evaluation framework -, (2022), <a href="https://www.iso.org/standard/78951.html">https://www.iso.org/standard/78951.html</a>, (参照 2024-1-25)
- 5) SAKURA Project, https://www.sakura-prj.go.jp/, (参照 2024-1-25)
- 6) UNECE: Revised Framework document on automated/autonomous vehicles, ECE/TRANS/WP.29/2019/34/Rev.2, in 180th Session of World Forum for Harmonization of Vehicle Regulations (WP.29), (2019)
  <a href="https://unece.org/DAM/trans/doc/2020/wp29/ECE-TRANS-WP29-2019-34-Rev2e.pdf">https://unece.org/DAM/trans/doc/2020/wp29/ECE-TRANS-WP29-2019-34-Rev2e.pdf</a>, (参照 2024-1-25)
- 7) 日本自動車工業会: 自動運転の安全性評価フレームワーク(Ver 3.0), p. 2 34 (2022), https://www.jama.or.jp/operation/safety/automated driving/pdf/framework ver 3 0.pdf, (参照 2024-1-25)

# レベル 4 自動運転移動サービスの社会実装に向けた 「安全設計・評価ガイドブック」の紹介\*

Introduction of the "Safety Design and Evaluation Guidebook" for social implementation of level Level 4 automated driving mobile services

平岡 敏洋\*1

赤津 慎二\*2

谷川 浩\*3

Toshihiro HIRAOKA

Shinji AKATSU

Hiroshi TANIGAWA

#### **Abstract**

The Safety Design and Evaluation Guidebook systematically summarizes a series of implementation items, implementation methods, essential points, and implementation examples to create designs for ensuring the safety required for automated driving mobile services reliably and efficiently. The Guidebook aims to be used as a "reference and guide" for automated driving service providers and automated driving vehicle developers with limited knowledge and experience in safety design. This manuscript introduces an overview of the first edition of the Guidebook, the table of contents, and a part of Chapters 1, 3, 4, and 5.

KEY WORDS: Guidebook, Safety design, Automated driving, Functional safety, SOTIF

## 1. はじめに

安全設計・評価ガイドブック <sup>1)</sup> は、自動運転移動サービスに必要な安全性の確保に向けた設計を確実かつ効率的に行うための、一連の実施項目、実施方法、注意点、実施事例などを体系的にまとめたものである。本ガイドブックは、安全設計の知見や経験が少ない自動運転移動サービス事業者や自動運転車両開発者などにとって、「参考書・手引書」として有効活用されることを目指して作成された。

本稿では、最初に、安全設計・評価ガイドブックの母体事業たる「自動運転レベル 4 等先進モビリティサービス研究開発・社会実装プロジェクト (RoAD to the L4: Project on Research, Development, Demonstration and Deployment (RDD&D) of Automated Driving toward the Level 4 and its Enhanced Mobility Services)」 2) を概説する. つづいて、安全設計・評価ガイドブックの概要として、位置づけ・経緯・狙いなどについて説明し、2023 年 8 月に第 1 版を発行するまでの取組みを紹介する. さらに、本ガイドブック第 1 版の目次・章構成を示した後に、一部内容について説明する.

#### 2. RoAD to the L4事業

RoAD to the L4 事業(RTL4 事業)は、一般財団法人日本自動車研究所(JARI)が経済産業省および国土交通省からの委託にて実施する事業で、正式名称は「自動運転レベル 4 等先進モビリティサービス研究開発・社会実装プロジェクト」という。CASE<sup>3)</sup>、カーボンニュートラルといった自動車産業を取り巻く大きな動きを踏まえて、持続可能なモビリティ社会を目指し、自動運転レベル 4 等のモビリティサービスを実現・普及させることで、環境負荷の低減や移動課題の解決などの各種社会問題の解決を図るものである。その結果として、我が国の経済的価値の向上に貢献することが期待されている。

RTL4 事業の目標は以下に示す四つである.

- \*1 一般財団法人日本自動車研究所 新モビリティ研究部 博士 (情報学)
- \*2 一般財団法人日本自動車研究所 新モビリティ研究部 博士 (システムズ・マネジメント)
- \*3 一般財団法人日本自動車研究所 新モビリティ研究部

- 90 -

<sup>\* 2023</sup>年12月26日受理

#### (1) 無人自動運転サービスの実現および普及

- ・ 2022 年度目途に限定エリア・車両での遠隔監視のみ (レベル 4) での自動運転サービスを実現
- ・ 2025年度までに多様なエリア、多様な車両に拡大し、50カ所程度に展開他

## (2) IoTやAIなどを活用した新しいモビリティサービス (MaaS (Mobility as a Service)) の普及

・ 地域の社会課題の解決や地域活性化に向けて、全国各地で、IoT や AI を活用した新しいモビリ ティサービスを社会実装

## (3) 人材の確保・育成

・ ハードウェアやソフトウェアを取り扱う技術者,地域課題と技術をマッチングする者など,多 岐にわたる分野の人材を確保・育成

## (4) 社会受容性の醸成

・ ユーザ視点のわかりやすい情報発信やリアルな体験機会の提供、民事上の責任の整理を通じて 自動運転等への正確な理解・関心等を高め、人々の行動変容を促す

2023 年度の RTL4 プロジェクトの実施体制を図 1 に示す. 図上部に示す「自動走行ビジネス検討会」は 2015 年 2 月に、経済産業省製造産業局長と国土交通省自動車局長の主催で、OEM、サプライヤー、有識者を参集して設置された組織である. この自動走行ビジネス検討会によって 2021 年度に発足したのがRTL4 プロジェクトであり、図下部がその組織体系となっている. プロジェクト全体を統括管理するコーディネート機関である産総研コンソーシアムがあり、国立研究開発法人産業技術総合研究所(産総研)の横山利夫氏がプロジェクトコーディネータを務めている. 下部組織として、プロジェクト推進委員会、人の移動に関するタスクフォース、スマートモビリティチャレンジ推進協議会・アドバイザリーボード、物流 MaaS 推進委員会があり、さらに、 プロジェクト推進委員会下部にテーマ 2 からテーマ 4 の具体的な自動運転移動サービス社会実装プロジェクトが存在する. 図 1 には存在していないが、テーマ 1 の成果として、遠隔監視によるレベル 4 自動運転移動サービスの運行が福井県永平寺町で 2023 年 5 月から開始されている.

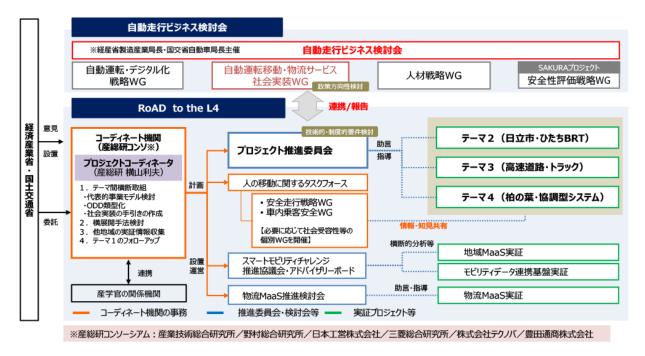


図1 2023年度のRTL4プロジェクトの実施体制(RTL4のWebサイト<sup>2)</sup>より)

#### 3. ガイドブックの位置づけ・経緯・狙い

#### 3.1 位置づけ

安全設計・評価ガイドブックは、一般財団法人日本自動車研究所(JARI)と産総研によって作成された原稿をベースにしたうえで、上述した人の移動に関するタスクフォースに含まれる二つのワーキンググループ「安全走行戦略 WG」と「車内乗客安全 WG」で議論し、合意された内容を反映したものとなっている。これは、国土交通省が 2018 年 9 月に発行した「自動運転車の安全技術ガイドライン」 も をよりわかりやすく、具体的に解説することを狙いとして企画されたものであり、国交省のガイドラインを教科書とするならば、本ガイドブックは参考書という位置づけになる。

本ガイドブックの教科書たる「自動運転車の安全技術ガイドライン」の概要について説明する.このガイドラインの対象車両は自動運転レベル3とレベル4を有する乗用車,トラック,バスである.自動運転車の導入初期段階において車両が満たすべき安全要件が記されており,読者に対して,適切に安全性を考慮した自動運転車の開発・実用化を促すものである.ガイドラインでは自動運転車が満たすべき基本的な考え方を示しているが,本文中に「今後,具体的な要件の検討を行うとともに」という記載があり,この部分を第三者的に狙ったものが安全設計・評価ガイドブックに相当する.自動運転車の安全技術ガイドラインは全4章,9ページ構成で,第4章の「自動運転車の安全性に関する要件」が全10節からなる.安全設計・評価ガイドブックはガイドラインの構成に準じた構成とするが,ガイドブック単体で読みやすくなるように考慮して,章構成を変更した.

ここで自動運転移動サービスの検討から社会実装までの流れについて考える. レベル 4 自動運転移動サービスが社会実装に至るまでには、レベル 4 自動運転移動サービス導入検討プロセスと各種法規制許認可プロセスを経る必要がある. RTL4 事業で現在作成中の「人の移動に関する AD MaaS 社会実装の手引き」はこのすべてを網羅する予定であり、その中の安全設計に関する部分を詳しく解説したものが安全設計・評価ガイドブックに位置づけられる.

#### 3.2 想定読者

安全設計・評価ガイドブックが想定している読者は、レベル 4 自動運転移動サービスの社会実装に関わる事業者や関係者である。その中でも、安全設計の知見や経験が少ないと思われるスタートアップ企業、とくに自動運転車両のシステム設計に携わる方々に是非とも読んで欲しいと考えている。

## 3.3 狙い

安全設計・評価ガイドブックは、上述の想定読者が、レベル4自動運転移動サービスに必要な安全性の確保に向けた設計を確実かつ効率的に行うことを支援するために作成されたものである。すなわち、ガイドブックを参考にして自動運転車両・サービスのシステム設計を行うことで、公道でのサービス運行に関する許認可の対応が円滑になることを狙いとしている。ただし、ガイドブックを参考にするだけでなく、自動運転移動サービス事業者および自動運転車両開発者自身で、個別状況に応じた安全性の確保に係る精査が必要である点には留意しなければならない。

安全設計・評価ガイドブックが対象とするのはレベル 4 自動運転移動サービスのためのシステムであり、主として自動運転車両である.ガイドブックの核となるのは「安全走行戦略の基本的な考え方」であり、これは自動運転移動サービスで安全を確保するための設計を行ううえで最も重要となる.この考え方の本質を理解してもらうことが本ガイドブックの読者に期待することである.

#### 3.4 これまでの経緯

安全設計・評価ガイドブック作成に関するこれまでの取組みについて説明する. 2021 年度に作成を開始し、2021 年度末に非公開のドラフト版を作成した. ドラフト版の章構成は「自動運転車の安全技術ガイドライン」の章構成に合わせていた. 2022 年度には安全走行戦略 WG と車内乗客安全 WG が立ち上が

った. それぞれの WG で議論して合意に至った内容を反映したうえで、ガイドブック単体で独立した資料として読みやすくなるような章構成に再編し、年度末に RTL4 事業のウェブサイトで第 0 版を発行した. ただし、この時点で関係組織の合意が得られた内容として、目次と第 1 章から第 3 章までの 16 ページだけの公開となった. そして、2023 年 8 月末に、全 14 章・121 ページからなる第 1 版を公開した.

## 4. ガイドブックの目次と主たる章の紹介

安全設計・評価ガイドブック第1版<sup>1)</sup>の目次を図2に示す. 紙面の都合上,安全設計・評価ガイドブックの主たる章である第1章と第3~5章の概要のみを以下本章で紹介する.

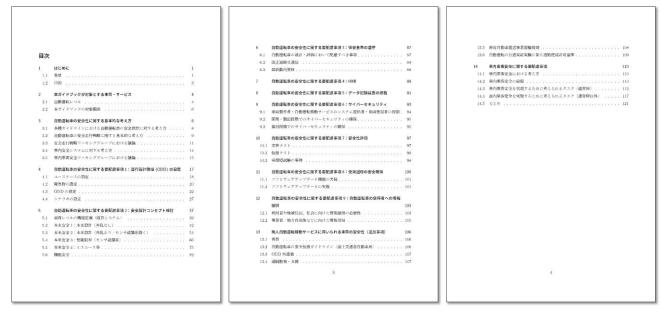


図2 安全設計・評価ガイドブック (第1版) 1) の目次

## 4.1 第1章「はじめに」

第1章にはガイドブックの背景と目的が記載されている。その中でも一番重要な点は、「自動運転車の運行設計領域 (ODD: Operational Design Domain) において、自動運転システムが引き起こす人身事故であって、合理的に予見可能で防止可能な事故が生じないこと」が「自動運転車が達成すべき安全目標」であるということに他ならない。ただし、この『合理的に予見可能で防止可能な事故』というところを論理的かつ定量的に定義することは容易ではなく、今後の議論が必須である点には注意されたい。この安全目標を達成するためには、

- ・危険が予想されるケースを洗い出し、
- ・傷害度や発生頻度なども考慮してリスクの大きさを定義し、
- ・安全目標に対して今日できるレベルまでリスクを低減するための安全方策を定義・実装し、
- ・必要に応じてテストコース走行や実証実験等を通じて確認する

必要があると書かれている. なお、それぞれのプロセスは個別の章にて詳細を述べているので本文を参照されたい.

## 4.2 第3章「自動運転車の安全性に関する基本的な考え方」

つづいて,第3章の「自動運転車の安全性に関する基本的な考え方」について説明する.レベル4自動 運転車が行う安全走行の基本的な考え方としては,「自動運転車両が道路交通法等の関係法令を遵守す

る」ことと「車両の走行機能が正常に動作する」ことが前提条件であり、そのうえで「防衛運転(いわゆる、かもしれない運転)に徹する」ことに尽きる.これは有能で注意深い人間ドライバ(C&C driver: Competent and Careful human driver)の運転行動に相当するといえよう.

さらに、「合理的に予見可能で防止可能」という言葉の定義に関する課題として、現実世界に実在する 法令違反状態の他の交通参加者にどのように対応するかという課題がある。このことを議論するうえで、 代表的なシナリオとして、歩行者脇通過、無信号交差点の直進、信号交差点の右折という三つの事例について第3章で説明しており、本節以下において概説する。

## 4.2.1 歩行者脇通過

一つ目のシナリオである「歩行者脇通過」における自動運転車両の安全走行戦略について説明する. 基本的な安全走行戦略は以下の 2 点である.

- [1] 歩車分離の状況や歩行者の状態から、歩行者が走行路に飛び出してくるシナリオを想定する.
- [2] 歩行者との衝突リスクを許容可能なレベルに低減できる速度で歩行者に接近し、通過する.

この戦略に基づいて、車両の走行速度は、歩行者と車両間の前後距離ならびに横方向距離、さらには車両の制動能力などに基づいて決定される.

想定される潜在的な危険性としては、歩行者がある速度で真横に飛び出してくるようなケースなどが考えられる。歩行者が急に飛び出してくると想定した場合に自動運転車両と接触または衝突が避けられないような危険ゾーンに歩行者がいる状況では、自動運転車両は徐行ないしは停止することで衝突リスクを許容可能なレベルまで低減することができる。また、この危険ゾーンに歩行者が長時間存在し続ける場合には、自動運転車両単体では衝突リスクを許容可能なレベルまで低減することができないとして、自動運行を終了するという方策を取ることが考えられる。なお、上述した歩行者の飛出し速度の値などは関係者の協議によって定義することが重要である。

## 4.2.2 無信号交差点における直進

二つ目のシナリオである「無信号交差点における直進」について考える.この場合の基本的な安全走行 戦略は以下の2点である.

- [1] 交差車両の位置,速度,自車両が交差点を通過するために必要な時間から,交差車両が交差点に到達する前に自動運転車両が交差点を通過可能かについて判断する.
- [2] 交差点進入後,自動運転車両は速やかに通過する.

このシナリオにおいて、安全走行戦略に影響を与える走行環境要因の一つとして、交差道路側を走行する車両の走行速度をどのように想定するのかということがある。たとえば、現地調査による測定データの 85 パーセンタイル速度などで定義する実勢速度を用いたらよいかなどを検討しなければならない。また、自動運転車両が走行する道路が優先側なのか、それとも非優先側なのかといったことや、見通しの良し悪しも考慮に入れる必要がある。

#### 4.2.3 信号交差点の右折

三つ目のシナリオである「信号交差点の右折」について考える。この場合の基本的な安全走行戦略としては、信号灯色、対向車線走行車両や先行車両の位置、速度、横断歩行者等の状況、右折先のスペースなどに基づいて、交差点進入、一時停止、右折開始の可否判断を行うことになる。この走行戦略を端的にまとめると、

- [1] 信号が青である(現在時刻).
- [2] 走行経路上に障害物がない(現在時刻).

[3] 他の優先的な交通参加者(対向直進車・左折車や歩行者など)の通行を妨げない(現在時刻~数秒 先の先読みを含む).

これら三つの条件全てが満たされる必要があることになる.このシナリオにおける安全走行戦略に影響を与える走行環境要因としては、対向直進車の速度予測や、対向右折待ち車両や先行車両が作る死角をどのように考慮するかなどが挙げられる.

## 4.3 第4章「自動運転車の安全性に関する要配慮事項1:運行設計領域(ODD)の設定」

つづいて、安全設計・評価ガイドブックの第4章「自動運転車の安全性に関する要配慮事項1:運行設計領域 (ODD) の設定」の内容について概説する。第4章では、自動運転システムの安全設計を行うための必須の準備として、以下に示す三つのプロセスがあることが述べられている。

- [1] ユースケースの設定
- [2] ODD の設定
- [3] シナリオの設定交差点進入後、自動運転車両は速やかに通過する.

ユースケース設定プロセスでは、自動運転車による移動サービス事業において、想定する基本的な使われ方について、自動運転車や周辺交通参加者の振舞い、道路構造、天候などの観点から整理を行う. ユースケースの例としては、専用道と歩道の並走、専用道と歩道の交差、停留所での旅客乗降、横臥者との衝突回避のための停車・再発進などが示されている.

つづく ODD 設定プロセスでは,自動運転システムが機能する特定条件を運行設計領域 (ODD) として, 走行環境と運行環境の組合せで設定する.

最後のシナリオ設定プロセスでは、上記の1と2で設定したユースケースとODDに基づいて、安全設計・評価用のシナリオを抽出する。シナリオ例としては、急な曲線路での車線追従走行、下り坂での減速・一時停止、一般公道と自動運転車専用道の交差路における横断、歩道歩行者の転倒または飛出しなど、多数の具体的な事例が記載されており、読者に対してわかりやすい解説となっている。

## 4.4 第5章「自動運転車の安全性に関する要配慮事項2:安全設計コンセプト検討」

つぎに、安全設計・評価ガイドブックの第5章「自動運転車の安全性に関する要配慮事項2:安全設計コンセプト検討」について概説する。この章では、第4章で設定したODDとシナリオに基づいて、自動運転車の安全性を確保するためにはどのようにするのか?という方針を決定する考え方・手順として、SOTIFと機能安全という二つについて説明している。

SOTIF とは、Safety Of The Intended Functionality(意図した機能の安全性)の略であり、システムの本来機能の不十分性に対する安全設計を行う手順について国際規格 ISO 21448 で定められている。具体的には、外乱なし、交通外乱あり、車両外乱あり、認識外乱あり(性能限界)、ミスユース(誤操作・誤使用)ごとにシナリオを分類して安全設計を実施する。

また,ハードウェア故障やソフトウェアのバグなどの機能失陥に対する安全設計を行うのが機能安全であり,国際規格 ISO 26262 で定められている.

本ガイドブックの 5.1 節において,ガイドブック第 5 章で扱う安全設計の対象として車両レベルの機能 定義を行っている. 具体的には、機能レベルアーキテクチャ (機能ブロック全体図)を明確にしている. つづいて,本来機能の不十分性に対する安全設計 (5.2 節:外乱なし,5.3 節:交通外乱/車両外乱,5.4 節:性能限界 (認識外乱),5.5 節:ミスユース等)と故障やバグに対する機能安全設計 (5.6 節:故障やバグへの対処)に分けて説明している.

なお, 5.2 節~5.5 節に記載する本来安全と 5.6 節の機能安全では,以下の手順に沿って安全設計(車両レベル/抽象的レベル)を行う.

Step 1: ハザード分析

Step 2: リスクアセスメント

Step 3: 安全目標設定

Step 4: 安全方策検討

Step 5: 機能レベル検証

これらの手順の詳細については、ガイドブック本文を参照されたい.

#### 5. おわりに

本稿では2023年8月に発行した安全設計・評価ガイドブック第1版について概説した. 今後,安全走行戦略 WG や車内乗客安全 WG での議論内容を反映し,図表などの追加や表現の加筆修正を行い、第2版を2023年度内に発行予定である. さらに,第2版に留まらず,第3版以降も引き続き編集・発行していく予定である.

本ガイドブックは、安全設計の知見や経験が少ない自動運転移動サービス事業者や自動運転車両開発者などにとって「参考書・手引書」として有効活用されることを期待しており、本稿を読んで少しでも興味を持った場合には、参考文献に記載された URL からダウンロードしていただき一読されたい.

## 参考文献

1) 安全設計・評価ガイドブック第1版 (2022),

https://www.road-to-the-l4.go.jp/activity/guideline/pdf/20230811 Guidebook Ver1.pdf, (参照 2023-12-26)

- 2) RoAD to the L4とは, <a href="https://www.road-to-the-l4.go.jp/about/">https://www.road-to-the-l4.go.jp/about/</a> (参照 2023-12-26)
- 3) 須山温人: 次世代交通を支える自動運転モビリティサービスの紹介, 計測と制御, Vol.58, No.3, pp.193-195 (2018)
- 4) 国土交通省自動車局: 自動運転車の安全技術ガイドライン (2018), https://www.mlit.go.jp/common/001253665.pdf (参照 2023-12-26)

## STC 報告(3): 第2回 ADAS テクノフェア開催報告\*

## 中谷 有\*1

Tamotsu NAKATANI

#### **Abstract**

城里テストセンター (STC) では ADAS (先進運転支援システム) 試験研究ニーズの高まりを受け、2015年に第2総合試験路を新設、2018年に外周路を改修、2022年には国内初の ADAS 試験場を新設した。 あわせて ADAS 試験実施体制についても所内外機関と連携し拡充を図ってきた。 ADAS 試験研究に対する当研究所の取組みを紹介するために 2022年7月に引き続き、2023年11月に第2回 ADAS テクノフェアを開催した。概要について報告する。

KEY WORDS: テストコース, ADAS, 業界プラットフォーム

#### 1. 城里テストセンターについて

一般財団法人日本自動車研究所(JARI)は茨城県のつくばと城里の 2 拠点においてそれぞれテストコースを運営している。図 1 に示すようにつくばには自動運転評価拠点(Jtown)<sup>1)</sup>,城里には<u>城里テストセンター(STC)</u>がある。STC の前身は通称「谷田部のテストコース」であり,つくばから城里へ移転した際に「城里テストセンター」と改名し 2005 年から運営を開始している。STC では試験研究による利用に加えて試乗会や撮影など様々な利用が可能である。また,STC 利用者用としてホテルやレストランを完備しており, 2016 年からは 24 時間・365 日・利用が可能な体制とした。







a) Jtown (赤線) \* 模擬市街路周回部 周長: 1.8 km /JARI研究棟(黄色) (つくば)

b) STC(城里) \* 高速周回路 周長: 5.5 km

図1 JARIのテストコース(2拠点)

## 2. ADAS試験研究動向への対応

近年の STC 利用の大きな変化点は、電動化(主に EV)と ADAS(先進運転支援システム)普及にともなった試験利用増加の 2 点である。電動化に対応するために STC ではこれまで急速充電器を毎年増設してきたが電源インフラ容量面で対応しきれなくなってきており、今後の電源インフラ増強のために 2024年に調査・仕様の検討を行う予定である。

<sup>\* 2024</sup>年1月15日受理

<sup>\*1</sup> 一般財団法人日本自動車研究所 城里テストセンタニ 97 -

一方、ADAS に対応するために 2015 年に第 2 総合試験路を新設、2018 年に外周路に分岐・合流路を追加、2022 年に ADAS 試験場 2) の新設など様々な設備導入を行ってきた。これらの走路増設にあわせて整備工場や車庫等の付帯設備も拡充した。特に試験機材メーカーが長期専有可能な試験車両準備棟も複数増築した。また、今後の V2X 試験研究のために通信環境の改善も図った。表 1 に ADAS 試験研究動向に対応するために導入した主な設備についてまとめる。

	女 「 人口人口以来明元到門に別心:	がるためた等人したエな政権	<del>1</del>
年度	走路	建屋	通信環境
2023		試験車両準備棟 5, 6	
2022	ADAS 試験場(長さ 500 m×幅 300 mの扇型)		KDDI 5G
2021		試験車両準備棟4	NTTドコモ 5G
2020		試験車両準備棟3	
2019			
2018	外周路に分岐・合流路を追加(3か所)		
2017			KDDI LTEエリア拡大
2016			NTT ドコモ LTE
2015	第2総合試験路(長さ520 m×最大幅40 m)		ソフトバンク LTE

表 1 ADAS試験研究動向に対応するために導入した主な設備<sup>3)</sup>

各走路では様々な ADAS 試験研究が行われており、特に白線認識を必要とする LKAS (車線維持支援制御装置)や、対象物検知を行う AEBS (衝突被害軽減ブレーキ装置)等の走行試験利用が増加している. 夜間には AHB (オートハイビーム) 試験利用もされている.

特に AEBS 試験実施のためには、図 2 に示すような専用試験機材が必要となる. 各国 AEBS に関連する試験法に対応する専用試験機材については、世界的に見ると試験機材メーカー3 社が提供している. STC では、全利用者の利便性を損なわないためには、これら全試験機材を利用できることが望ましい. このため、2023 年には、これら試験機材メーカー3 社による STC 内長期専有建屋が完備され、全試験機材の貸出および STC 現地での不具合対策を迅速に行える体制を構築することができた.







図2 AEBS専用試験機材\*の例 \*写真は試験機材メーカーより提供

## 3. ADASテクノフェア概要

2022 年 7 月に ADAS 試験場の運用開始のタイミングにあわせて第 1 回 ADAS テクノフェアを開催した。2023 年 11 月には上述した ADAS 試験実施体制と新たな試験機材の紹介のために第 2 回 ADAS テクノフェアを開催した。表 2 に第 1 回と第 2 回の ADAS テクノフェアの違いを示す。

表2 第1回と第2回のADASテクノフェアの実施概要

	第1回	第 2 回
開催日程	2022年7月1日 (1日間)	2023年11月1-2日(2日間)
参加者予定数(実績)	400 名(414 名)	400 名(491 名)
デモ試験走路	ADAS 試験場	ADAS 試験場,第2総合試験路,総合試験路
セミナー会場	管理棟大会議室	整備工場 D
出展ブース	ADAS 試験場に 17 社	管理棟前駐車場に14社
—————————————————————————————————————		の送迎バス,自家用車
全テストコース見学	50 名限定	希望者全員
その他	JSAE 見学会を同時開催	参加者同士の技術交流会を設定

第2回 ADAS テクノフェアでは試験機材メーカー3 社によるデモ試験を実施した. 今後試験法として導入が予定されている追従・横断・交差点等の試験シナリオを対象として,日本電計株式会社,株式会社ヒューマネティクス・イノベーティブ・ソリューションズ・ジャパン,エア・ブラウン株式会社が各社で取り扱っている専用試験機材を用いてデモ試験を実施した. ADAS のうち特に AEBS 試験が頻繁に実施されている ADAS 試験場,第2総合試験路,総合試験路の3つの走路をデモ試験会場とした.

各デモ試験会場へのシャトルバス発着の拠点となる管理棟前駐車場には 14 社の ADAS 試験関連会社 のブースが出展された. セミナーでは JARI 以外に ASEAN (東南アジア諸国連合) NCAP 動向紹介として MIROS (Malaysian Institute of Road Safety Research) が話題提供を行った. 図 3 に開催当日の ADAS テクノフェアの様子を示す. 第 1 回は OEM による参加が多かったが今回の第 2 回ではセンサーメーカーの参加が多く見られた. 参加者の多くは 3 社の専用試験機材の違いを比較するとともに新たな試験シナリオについて理解を深めていた. また,台湾やインドなど海外からの来場もあった.



a) デモ試験(ADAS試験場)



b) 出展ブース(管理棟前駐車場)



c) セミナー (整備工場D)



d) 技術交流会 (整備工場D)

図3 第2回ADASテクノフェアの様子

JARI Research Journal (2024.02)

**-** 99 **-**

#### 4. おわりに

STC では近年の ADAS 試験研究ニーズに応えていくために、上述したように様々な取組みを行ってきた. 設備導入にあたっては、OEM、センサーメーカー、ベンダーなどの利用者だけでなく OEM テストコース管理部署 4) とも対話を行うとともに、試験法動向を参考にした. STC 自前での設備導入にこだわらずに試験機材メーカーや通信キャリア等と連携することで幅広く設備を準備してきた.

第2回 ADAS テクノフェアでは利用者、JARI、試験機材メーカー、テストコース管理者、関連会社それぞれが互いに対話する機会ともなり、ADAS 試験研究推進に有益な場になったと考える。今後も引き続き ADAS 試験を通して発生してきた課題を JARI は様々な機関とも協力・解決し、験研究の業界共通プラットフォームとして STC および Jtown を常に更新し利用者に提供し続けていく。

#### 謝辞

第2回 ADAS テクノフェア開催にあたり、参加者の皆様には城里までご足労いただきまして感謝申し上げます。またブース出展社の皆様には引続き当城里テストセンターの事業活動にご理解・ご協力のほどよろしくお願いいたします。

#### 参考文献

- 1) 北島 創:自動運転評価拠点 (Jtown) を完成,自動車技術, Vol.73, No.6 (2019) https://tech.jsae.or.jp/paperinfo/ja/content/jk201906.05/, (参照 2024-01-15)
- 2) 櫻本充広:「ADAS試験場新設工事」竣工に向けて, JRJ20220603 (2022) https://www.jari.or.jp/research-database/detail/?slug=46361, (参照 2024-01-15)
- 3) 櫻本充広: STC報告(2): 城里テストセンター テストコース改修 その1 —全体計画—, JRJ20231103 (2023) <a href="https://www.jari.or.jp/research-database/detail/?slug=46756">https://www.jari.or.jp/research-database/detail/?slug=46756</a>, (参照 2024-01-15)
- 4) 中谷 有: STC報告(1): 国内OEMテストコース管理部署交流会の活動状況について, JRJ20231102 (2023) https://www.jari.or.jp/research-database/detail/?slug=46755, (参照 2024-01-15)

## 【編集後記】

編集委員会の役割の一つに、提出された初稿の確認があります。それぞれの原稿には執筆者の熱い思いが詰まっています。原稿を読む際には執筆者と読者の両方の気持ちに寄り添うことを心掛けています。「みかんも甘い」とあれば、みかんのほかにも甘いものがあることになり、文章中にそれらしきものを探します。見つからなければ、比較対象の「いちごは甘い」ことが、その分野の専門家の間では常識なので書かれていないのかもしれないと思いを巡らせます。編集委員会では、執筆者の方々と同様、文章の隅々に気を配り、編集作業を行っています。

本特集号では、自動運転技術の発展に資する研究とともに、安全性の観点から自動運転に対する利用者の反応等に関する研究や調査事例をご紹介しました。自動運転という言葉の響きから、とかく先進的な技術が注目されがちですが、日本自動車研究所では、先進的な技術に関する研究や調査とともに、そのような技術を使用して人々の暮らしを豊かにすることを目指した研究や調査を行っています。所員の一人として、自動車に限らず、道具や技術を使う人々が、よりしあわせに暮らせる世界を追求する研究所でありたいと思っています。

(I.M)

## JARI Research Journal 2023 年度 特集号

特集:「自動運転 ~システムの安全性・受容性の評価~」

発行日: 2024年2月9日 [所報編集委員会]

発行所: 一般財団法人日本自動車研究所 委員長 赤井 泉明

URL: https://www.jari.or.jp/ 委員 淺田 崇之 安藤 慧佑 石井 充

面田 雄一 前田清隆

[編集事務担当] 一般財団法人日本自動車研究所

企画・管理部 小針 弘之

E-mail: jrj@jari.or.jp

○ 本誌の記事内容に関するお問い合わせ、ご意見は、E-mail にてjrj@jari.or.jp までお送りください。

○ 本誌に掲載されたすべての記事内容は、一般財団法人日本自動車研究所の許可なく転載・複写することはできません。

○ 転載・複写を希望される方は編集事務担当までご連絡ください。

JARI Research Journal (2024.02)

-101 -

