

自動走行車両の進行方向提示と搭乗者の安心感の関係性調査

坂村 祐希^{1,a)} 富田 瑛智² 宍戸 英彦³ 水浪 田鶴⁴ 井上 和哉⁴
亀田 能成³ 原田 悦子⁴ 北原 格^{3,b)}

受付日 2021年4月7日, 採録日 2021年10月8日

概要: 自動走行車両搭乗者の安心感向上に向けたバーチャルリアリティ (VR) システムの開発と評価について述べる. 全方位カメラによって撮影した走行風景の映像を正距円筒映像に変換し, バーチャル空間に配置した球体 CG モデルの内側 (球体投影面) にマッピングすることにより, VR 搭乗システムを実現する. 提示映像に車両の進行方向や速度を示す CG オブジェクトを重畳することで, 搭乗者の安心感の向上を試みる. 提案手法のパイロットシステムを用いて, VR 提示と搭乗者の安心感との関係を調査する実験を実施し, VR 提示が搭乗者の安心感を向上させることを確認する.

キーワード: バーチャルリアリティ, 安心感, 自動走行車両, 全方位画像, ヘッドマウントディスプレイ

An Investigation of the Relationships between Displaying Direction of Travel of an Autonomous Vehicle and Passengers' Sense of Comfort

YUKI SAKAMURA^{1,a)} AKITOSHI TOMITA² HIDEHIKO SHISHIDO³ TAZU MIZUNAMI⁴ KAZUYA INOUE⁴
YOSHINARI KAMEDA³ ETSUKO T. HARADA⁴ ITARU KITAHARA^{3,b)}

Received: April 7, 2021, Accepted: October 8, 2021

Abstract: This paper introduces our attempt to improve sense of comfort of a passenger on board an autonomous vehicle by using a virtual reality (VR). An omnidirectional image captured in the passenger seat of a moving vehicle is converted into an equirectangular image. A virtual environment, specifically a spherical computer graphics (CG) model placed in a virtual space, is constructed in a computer, and the equirectangular image is mapped on to it. We attempt to change passenger's impression by superimposing a CG object depicting the vehicle's direction generated using vehicle information recorded along with the image recording. Using pilot system of proposed method, we conducted experiments to investigate a relationship between the VR display and the sense of comfort of a passenger, and confirmed that the VR display improves the sense of comfort of a passenger.

Keywords: virtual reality, sense of comfort, autonomous vehicle, omnidirectional image, head mounted display

¹ 筑波大学グローバル教育院エンパワーメント情報学プログラム
Ph.D. Program in Empowerment Informatics, University of
Tsukuba, Tsukuba, Ibaraki 305-8577, Japan

² 大阪大学人間科学研究科
Graduate School of Human Sciences, University of Osaka,
Suita, Osaka 565-0871, Japan

³ 筑波大学計算科学研究センター
Center for Computational Sciences, University of Tsukuba,
Tsukuba, Ibaraki 305-8577, Japan

⁴ 筑波大学人間系
Faculty of Human Sciences, University of Tsukuba,
Tsukuba, Ibaraki 305-8577, Japan

a) sakamura.yuki@image.iit.tsukuba.ac.jp

b) kitahara@ccs.tsukuba.ac.jp

1. はじめに

COVID-19 の感染拡大を受け, 世界中で抑え込みを目的とした取り組みが行われている. 英国政府の移動制限に関する措置と COVID-19 による死亡者の関係性を調査した研究 [1] では, 移動制限措置が死亡者数減少に直接的な影響を及ぼすことが示された. 米国では, 人の移動制限率と COVID-19 拡大率を州ごとに計算した結果, 両者に相関があることが示されている [2]. このように, 人の移動と COVID-19 感染拡大の間に深い関わりがあることは周知の

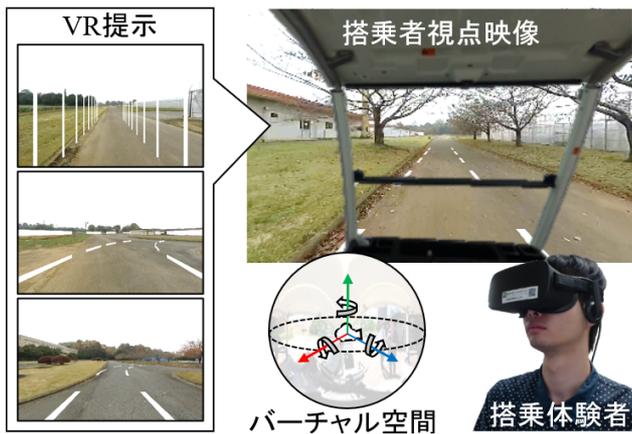


図 1 VR 提示による搭乗時の安心感向上を目的とした自動走行車両搭乗体験システム

Fig. 1 VR boarding system of an autonomous vehicle for improvement of passengers' sense of comfort.

事実である。

このような背景から、移動の必要がある場合には、大人数型交通機関ではなく自家用車などのパーソナルモビリティを選択するケースが増えている。この傾向は、COVID-19 が収束した後のニューノーマル社会でも継続することが予想される。しかし、操作技能をとまなわない高齢者や子どもが現状のパーソナルモビリティで不自由なく移動することは困難であり、万人が利用可能な移動手段の実現が望まれている。自動走行型パーソナルモビリティ（自動走行車両）は、上記課題の有力な候補の 1 つであるが、不安感が利用促進に影響を与えている。車両の自動走行システムに関するアンケート [3] では、自動走行車両の利用意向について、「疲れているときなどは、利用したい」が約 37% と最も多く、次いで「自動走行システムのことをよく知らないので、分からない」が約 27%、「運転操作をシステムに任せるのは不安なので、あまり利用したくない」が約 23% となっている。この結果から、自動走行車両には大きな需要があるものの、不安感が利用促進に影響を与えていることが示唆される。

本稿では、映像メディアを用いて自動走行車両の搭乗者が受け取る視覚情報とその安心感に与える影響に関する調査・検討の取り組みについて述べる。図 1 に示すように、搭乗車両の進行方向を表現する CG (Computer Graphics) オブジェクトを VR (Virtual Reality) 提示することで、搭乗時の安心感向上を可能とする自動走行車両搭乗体験システムを提案する。VR 提示が搭乗者の安心感に与える影響を評価する実験を通じて、提案システムの実用性を検証する。本研究の貢献は、安心感を計測可能な、進行方向の VR 提示システムである。

2. 関連研究

2.1 自動走行技術開発と搭乗者の驚き

センシングや認識技術の発展により、完全自動走行（米国自動車技術者協会の自動走行レベル [4] のレベル 3 以上）が現実となりつつある。一方で、自動走行車両と従来型自動車では搭乗形態が大きく異なるため、搭乗者が不安を感じる懸念される。たとえば、経路計画法では、計測された環境に合わせて最適な経路が計算されるが、それらの多くは搭乗者の安心感や快適性などの要素は考慮していない [5]。自動走行車両を広く普及させるためには、車両本体や操作技術の安全性だけでなく、安心感など搭乗者の心理的なケアも重要であろう。

自動走行車両では、加速、躍度、速度、車間距離など、様々な要素が搭乗者の安心感に影響を及ぼすとされている [6]。特に、搭乗者が期待する運転と、実際の運転との相違は、安心感にとって非常に重要な要素である [7]。そのため、人間の運転を模倣した自動運転システムも開発されている [8]。しかし、理想状態は搭乗者自身の運転経験に基づいて形成されるため、たとえ自動走行車両が安全であっても、それが搭乗者の理想とする運転と異なる場合、安心感が損なわれる。このことから、人間の運転を完全に模倣した自動走行車両が実現された場合でも、自動走行システムが搭乗者の予想と異なる動作をした場合、安心感が低下する。

自動化システムの予期しない動作に、人間のオペレータが驚かされる現象はオートメーションサプライズ [9] と呼ばれ、自動化システムの主要な考察課題の 1 つとされている [10]。オートメーションサプライズは、人間のオペレータの予想と実際のシステムの動作が異なる場合に発生する。レベル 3 の自動走行車両では、ドライバーは運転交代要請に対応するためにシステムを監視する必要があり、予期しない動作が発生した場合、オートメーションサプライズが発生する。一方で、運転タスクをとまなわない搭乗者でもシステムの予期しない動作に驚く可能性がある。自動走行バスの利用意向や移動体験について調査した研究 [11] では、搭乗前は約 76%、搭乗後は約 88% の実験参加者が、自動走行バスが安全であると見なしたが、ある参加者は、割込みなどの他の車両の動作に自動走行バスがすぐに対処できなかったため不安を感じたと述べた。また、自動走行シャトルの搭乗に関する印象を調査した研究 [12] では、30 人の実験参加者中 17 人が、実際の自動走行システムよりも高度なシステムを期待していた。これらの例のように、運転タスクをとまなわない搭乗者であっても、システムの性能の過信によって自動走行システムの予期しない動作に驚くことが示唆されている。オートメーションサプライズは機械の予期しない動作に起因するため、機械の構造や性能を十分に理解し、動作を予測可能となることによって解決可能で

ある [9]. 将来起こりうるリスクを搭乗者に認知させ、発生する状態の理解を促進できれば、安心感や自己効力感 [13] の向上が期待できる [7]. 運転タスクをともなわない搭乗者の驚きも、自動走行車両の動作を予測可能にすることによって解決可能であると仮説を立て、自動走行車両の情報提示を行う。

自動走行システムによる驚きが生じる状況は、安全性の観点から実車両での再現が困難な場合が多く、バーチャル空間での体験が求められる。また、搭乗体験システムの導入により、多様な搭乗者ごとに異なる驚きへの対応が可能となる。

2.2 搭乗体験実験と体験シミュレータ

萩原らは、レベル3の自動走行システムが緊急停止する際のドライバの行動評価実験を実施している [14]. ただし、この実験では、レベル2の自動走行車両に該当する ACC (Adaptive Cruise Control) と LKA (Lane Keep Assist) のみを備えた車両を利用している。実験環境を簡略化することでドライバの運転タスクを排除し、疑似的にレベル3相当の自動走行を実現している。また、実車両を用いた搭乗実験では、走行速度などが様々に変化し、かつ、それらが再現性を有する環境下での検証実験の実施が求められるため、実車両を用いる場合には、実験に要する時間や作業コストが高くなる。

上述した問題の解決を目的として、バーチャル車両搭乗シミュレータに関する研究が活発に行われている。Iowa 大学で開発されているドライビングシミュレータ [15] では、大規模なモーション装置を用いて走行中の加速度提示に成功している。走行による加速度の再現は、実車環境に近づけるために重要な要素であるといわれているが、一方で、実際の走行と同程度の提示を行うためには大規模なモーション装置が必要となる [16].

そのような実装上の課題解消を目的として、モーション装置を用いないドライビングシミュレータに関する研究 [17] が行われている。この研究では、没入感の高い視覚情報を提示可能な KCave を用いてシミュレータと実車環境における比較を行い、加速度を再現しなくても、モーション装置を用いるのと遜色のない情報提示が可能であることを示している。このようなシミュレータでは、実車環境により近い状況の再現が求められており、近年急速に普及している全方位映像を用いたシミュレータに関する研究も多く行われている [18], [19], [20]. また、車載カメラで撮影した実車映像を用いて提示映像のリアリティ向上を目的とした研究も行われている [21]. 本研究では、これらの取り組みによる知見を活用し、車載映像と HMD (Head Mounted Display) 提示による没入感の高い搭乗体験シミュレータを構築する。

2.3 車両搭乗者への情報提示

緊急性の高い情報を提示する場合、視覚情報提示では、提示箇所を搭乗者が注視していないと情報を見落とす可能性が高いため、聴覚刺激が優先的に利用される。一方で、状況認識や安心感向上のように、緊急性は低いが主体的な観察が求められる情報提示では、視覚刺激を用いた提示が適切であると考えられる。たとえば、自車両の死角支援と車輪の軌跡を予測した研究 [22] では、車外センサを用いて計測された走行映像と推定された車輪の軌跡を、プロジェクタを用いてダッシュボード上に投影することで、ドライバの心的不安を軽減する試みがなされている。

車両搭乗者への視覚情報提示方式として、HUD (Head-Up Display) もしくは WSD (Windshield Display) を用いた研究が行われている。東井らの速度制御システム [23] では、バーチャルパターンと呼ばれる視覚誘導自己運動を誘発させる CG オブジェクトを WSD 上に提示している。制限速度に対する超過速度の大きさに応じてバーチャルパターンの移動速度を変化させることにより、ドライバの体感速度を操作し、速度抑制を促す。しかし、WSD 提示では、バーチャルパターンの提示可能な範囲が限定されるという問題点が存在する。

これらの研究ではドライバを対象とした情報提示を行っている。本研究では、運転責任のない搭乗者にも同様の視覚情報の提示で不安感を低減できるという仮説に基づき、視覚情報提示を行う。全方位型 VR 提示を実現することで、様々な走行状況下において様々な箇所への視覚情報提示を可能とする。

2.4 搭乗者の安心感の計測

生理指標を用いて客観的に搭乗者の安心感を評価するアプローチとして、Zheng らは [24], 手の発汗と咬筋電によってトラックドライバが感じるストレスを評価しているが、実験参加者は 10 人の健常男性であり、多様な属性 (性別・年齢) のドライバを評価対象とした場合、結果に差異が生じる可能性が指摘されている。

多様な属性の実験参加者を対象とした場合には、生理指標の正確な計測が困難となるため、主観評価を用いるのが一般的である。たとえば、市街地を走行する自動走行車両の搭乗者と周辺歩行者の観点から、各々の不安感を評価した研究 [25] では、周辺車両や歩行者回避の不安感を、アンケート調査によって評価している。また、自動走行車両の搭乗者の不安感を評価した研究 [26] でも、アンケート調査によって搭乗者の不安感を評価している。しかし、アンケートによる調査では、実験全体を通しての安心感評価は可能であるが、自動運転のように連続的に変化する状況において、搭乗者の安心感を計測するという目的には適していない。本研究では、レバー装置を用いた連続的な主観評価システムを構築し、自動走行車両が搭乗者に与える安心

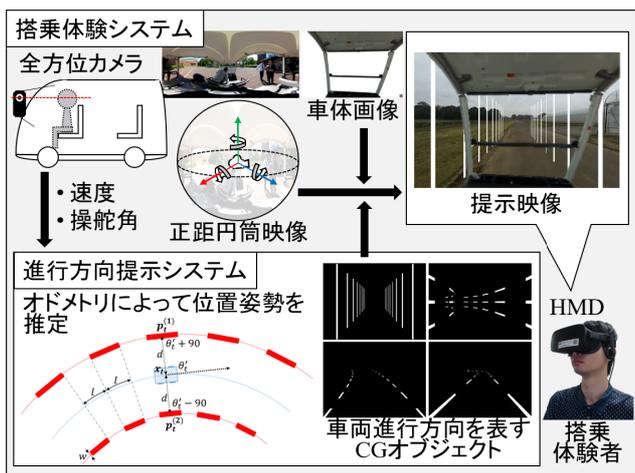


図 2 自動走行車両の疑似搭乗システム

Fig. 2 A virtual boarding system of an autonomous vehicle.

感や不安感に関する評価実験を実施する。

3. VR 自動走行車両搭乗体験システム

3.1 自動走行車両の疑似搭乗体験システム

図 2 に示す、自動走行車両の疑似搭乗システムについて述べる。車両の搭乗者視点位置に設置した全方位カメラを用いて走行中風景を撮影する。撮影した全方位映像を正距円筒映像に変換し、バーチャル空間内に配置された球体 CG モデルの内部（球体投影面）にマッピングする。球体投影面の中心に配置されたバーチャルカメラの姿勢と、搭乗体験者が装着した HMD の視線方向を一致させることで、自動走行車両の疑似搭乗 VR システムが実現される。

3.2 車両の進行方向の VR 提示

搭乗者の安心感を向上させる VR 提示として、車両の進行方向情報の可視化に焦点を当てシステム構築を進める。走行映像撮影と同時に記録した車両の速度・操舵角などの情報に基づき、車両の進行方向を示す CG オブジェクトを生成する。全方位映像に CG オブジェクトを重畳した例を図 3 に示す。左上が CG オブジェクトを重畳しない元の映像であり、左下、右上、右下が異なる形状の CG オブジェクトを重畳した例である。車両の進行方向や制御タイミングを搭乗体験者に視覚刺激として提示することにより、不安感を軽減し、搭乗者の安心感向上を試みる。

CG オブジェクトの描画処理について説明する。車両の操舵角情報 ω_t は、ハンドルに取り付けたエンコーダによって一定時間で計測される。車両の初期回転角度を 0、移動領域が平面とすると、時刻 t における車両の角度 θ_t は、以下の式 (1) で表される。

$$\theta_t = \int \omega_t dt \quad (1)$$

車両速度 v_t は、速度センサによって一定時間で計測される。時刻 t における車両の速度ベクトル \mathbf{v}_t は、以下の式

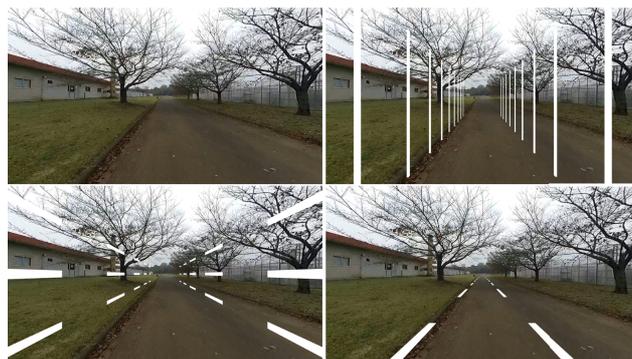


図 3 提示する CG オブジェクトの例
Fig. 3 Examples of a CG object for VR display.

(2) で表される。

$$\mathbf{v}_t = \begin{bmatrix} v_t \cos \theta_t \\ v_t \sin \theta_t \end{bmatrix} \quad (2)$$

車両の発車位置を原点とすると、時刻 t における車両の位置 \mathbf{x}_t は、以下の式 (3) で表される。

$$\mathbf{x}_t = \int \mathbf{v}_t dt = \begin{bmatrix} \int v_t \cos \theta_t dt \\ \int v_t \sin \theta_t dt \end{bmatrix} \quad (3)$$

式 (3) より得られた車両の位置と姿勢から、提示する CG オブジェクトの物理特性を考慮しつつ描画することにより、VR 提示を実現する。

4. 実証実験

提案手法を用いて、車両の進行方向情報提示が、搭乗者の安心感にどのような影響を与えるのかについて主観評価実験を実施した。車両の制御タイミングを搭乗者に伝えることで、不安感を解決し、安心感を向上させるという仮説に基づいて、VR 提示の有効性の検証を実施した。その際、VR 提示が有効に機能する条件を調査するために、走行ルートや車両速度が異なる複数の走行環境を用意して実験を行った。

搭乗者が期待する車両の制御タイミングが異なるときに生じる驚きは、自動走行車両で発生する主要な不安感の 1 つである。特に、カーブ時においては、搭乗者の期待とハンドルが切られるタイミングが異なる場合、搭乗者は強く不安を感じる。たとえば、ACC を備えた自動走行車両が、カーブ付近で別の車両に追従し、適切な車両速度を維持できずにドライバーが驚くことが示唆されている [10]。

4.1 全方位映像の撮影と加工

一般道路から隔離され、安全が十分に確保された筑波大学構内において撮影実験を実施した。全方位映像はハコスコ社の Insta360 ONE（解像度：3,840 画素 × 1,920 画素、フレームレート：30 fps）を用いて撮影した。全方位カメラ

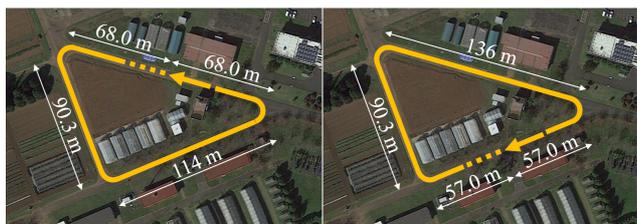


図 4 実証実験の走行ルート
Fig. 4 Driving routes in experiments.

は車両前方の搭乗者目線位置に設置した。実験には、図 3 に示すような白線のない道路を利用した。

走行条件を変えて実験参加者に複数回、映像提示を行う場合、搭乗者が走行環境、特に、どのタイミングで車両が曲がり始めるかを学習し、不安感が発生しない可能性がある。そのため、全試行で同一ルートを用いることによる急速な環境情報の学習に基づく弊害を考慮するため、また、できる限り類似の走行環境でのルートを準備するため、図 4 に示すように、3つのカーブ区間を含む、反時計回りと時計回りの2通りの走行ルートを用意した。双方の走行ルートは、同一のルートとした（反時計回りでは左側、時計回りでは右側を走行した）。図中の破線は、停車から目標速度までの加速区間、矢印は停車までの減速区間を表している。実線の区間は一定速度で走行した。

異なる車両速度において、進行方向提示が搭乗者の安心感に与える影響を調査するために、低速走行（15 km/h）と高速走行（45 km/h）の映像を生成した。具体的には 5 km/h と 15 km/h で撮影した映像を 3 倍速で搭乗体験者に提示することで、15 km/h と 45 km/h の映像を生成した。この処理によって、高速走行時と低速走行時の加速度変化を同程度にした。使用した電動カートは、設定した目標速度に向けて加速度を制御する車両である（最高速度は 29 km/h）。加速制御中は目標速度を 5 km/h、または、15 km/h に設定し、減速制御中は目標速度を 0 km/h に設定することで、低速走行時と高速走行時で加速度変化を一定にした。すべての映像のスタート、ゴール位置は同一とした。5 km/h ではスタートから 3.47 m 先で 5 km/h に到達し、ゴールから 3.47 m 手前で減速を開始した。15 km/h ではスタートから 10.7 m 先で 15 km/h に到達し、ゴールから 10.7 m 手前で減速を開始した。映像撮影と同時に、進行方向を示す CG オブジェクトを生成するために必要な車両の速度・操舵角情報を記録した。

4.2 VR コンテンツの生成と提示

3.2 節で述べた手順に従い、図 5 や図 3 右下に示す車両の両側に沿う線を CG オブジェクトとして生成、重畳した。複数のバーチャルパターン [23] を提示するプロトタイプシステムを用いて、白線と縦棒（図 3 右下と右上）に対する認知的評価を実施した。その結果、縦棒提示は実験参加者

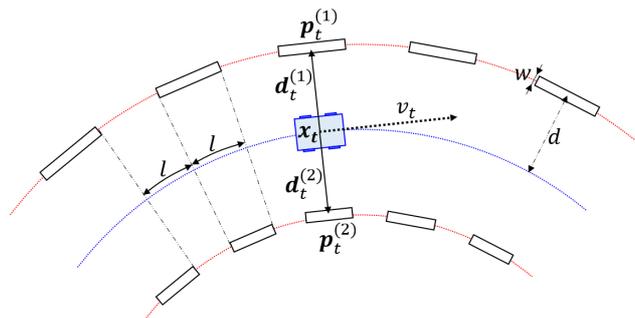


図 5 車両と CG オブジェクトの相対位置
Fig. 5 A relative position between a vehicle and a CG object.

の主観的な速度に及ぼす影響が大きい、つまり、ベクションを誘発しやすいことが報告されている [23] ため、一般的な不安感の計測に着目するために、本研究では白線提示を利用した。図 5 に示すように、車両座標系の水平方向に d 離れた位置を CG オブジェクトの描画位置とする。実際の道路で利用されている車道中央線の規格に基づいて、白線の長さ、および、前後の白線間の距離を l 、白線の幅を w として、CG オブジェクトを配置する。このとき、時刻 t における CG オブジェクトの位置 $p_t^{(1)}$ 、 $p_t^{(2)}$ は、以下の式 (4) で表される。この場合の CG オブジェクトは図 3 右下に示すような見え方となる。

$$\begin{aligned} p_t^{(1)} &= x_t + d_t^{(1)} \\ &= \begin{bmatrix} \int v_t \cos \theta_t dt - d \sin \theta_t \\ \int v_t \sin \theta_t dt + d \cos \theta_t \end{bmatrix} \\ p_t^{(2)} &= x_t + d_t^{(2)} \\ &= \begin{bmatrix} \int v_t \cos \theta_t dt + d \sin \theta_t \\ \int v_t \sin \theta_t dt - d \cos \theta_t \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4)$$

4.3 安心感の入力装置

車両走行の経過にともなって変化する搭乗体験者の安心感を連続かつ継続的に計測が可能な手段として、図 6 に示すレバー装置（サンプリングレート：25 Hz）を採用した [27]。搭乗者は、レバーの中心からの位置によって安心感を定量的に回答（入力）した。レバーに力を加えなければ中心に戻る機構になっており、復元力の大きさによって、実験参加者がレバーの位置を自覚できるように設計されている。感性的評価を主観的な連続値として計測する方法としては VAS（Visual Analog Scale）が一般的であるが、本実験では視覚刺激に対する評価を行うため、視覚以外の感覚を用いた回答手段が必要であること、また、動的な自動走行の状況に応じた定量的かつ自覚的に回答可能な手段が必要であることから、レバー装置を採用した。

4.4 進行方向提示が搭乗車の安心感に与える影響に関する主観評価実験

本主観評価実験では、以下の 4 要因について各々の水準を切り替えながら評価実験を実施し、各要因と安心感の関



図 6 安心感入力装置

Fig. 6 An input device for sense of comfort.

係を調査した。

- A: 「車両速度 (2 水準: 15 km/h, 45 km/h)」
- B: 「走行ルート (2 水準: 時計回り, 反時計回り)」
- C: 「提示方式 (2 水準: HMD, スクリーン)」
- D: 「VR 提示 (2 水準: あり, なし)」

これらの要因を組み合わせた 16 (= 2 × 2 × 2 × 2) 種類の映像について、安心感に関する評価実験を実施した。実験は、健全な 20 名の大学生 (男性 10 名, 女性 10 名, 平均 20.95 歳, 標準偏差: 0.74 歳) の実験参加者を対象に行った。7 名は運転経験があり, 13 名は運転経験がなかった。

実験参加者の負担を軽減するため, 16 種類の映像のうち 8 種類の映像を提示した。提示する映像の順番を表 1 に示す。表中の a~d は各要因 A~D の片方の水準を表しており, a~b はもう片方の水準を表している。1 試行ごとに VR 提示の有無を切り替え, 2 試行ごとに提示方法を切り替え, 4 試行ごとに車両速度と走行ルートを切り替えた。ある車両速度に対して, 時計回りか反時計回りかを割り当てることで, 提示映像を削減した。a~d (a~b) に割り当てる水準を網羅的に設定することで, 8 種類の映像を提示する 16 パターンの映像提示パターンを生成した。各パターンには最大で男女 1 名ずつを無作為に割り当てた。これは, 各性別の実験参加者全員が異なる順番で映像を観察した (カウンターバランスをとった) ことを意味する。

スクリーンでの提示の場合, 映像中には車体が映っていないため, また, 実際の搭乗にできる限り近づけるため, 実験参加者は, 静止した電動カートに搭乗して映像を観察した。実際の自動走行サービスでは, 従来の運転席や助手席にあたる席にはスタッフが搭乗する機会が多いため, 実

表 1 映像提示の順番

Table 1 Order of displaying of videos.

	1	2	3	4	5	6	7	8
車両速度	a				a			
走行ルート	b				b			
提示方法	c		c		c		c	
VR 提示	d	d	d	d	d	d	d	d

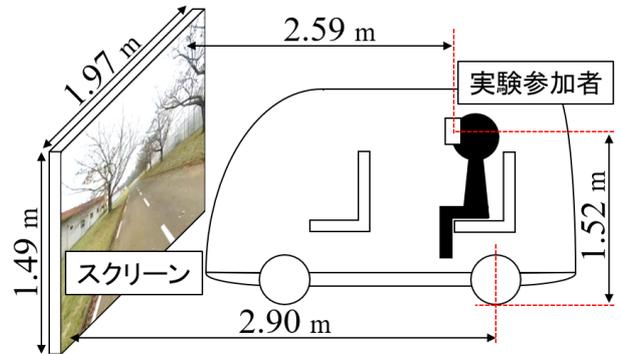


図 7 実験参加者, 電動カート, スクリーンの位置関係

Fig. 7 A positional relationship among a subject, an electric cart and a large screen.

際の搭乗シーンを想定して, 実験参加者は後部座席に搭乗した。本実験の実験参加者と電動カート, 大型スクリーンの位置関係を図 7 に示す。

4.3 節で述べたレバー装置を, 実験参加者の利き手側に設置し, 安心感を計測した。入力値は 0 から 1,023 までの値をとり, 値が小さいほど安心感が高く, 値が大きいくほど安心感が低いことを示す。実験に先立ち, 実験参加者には「公共の乗り物として安心できると感じたときにはレバーを押してください」と教示し, レバー入力の練習を実施した。中心に戻る力の大きさに応じて, 実験参加者がレバーの位置を感覚的に確認可能となるように設計されている。

4.5 安心感の時間変化の結果と考察

16 パターンの映像について, 各実験参加者の評価値を平均した結果のグラフを図 8 に示す。左 4 つのグラフが時計回り, 右 4 つのグラフが反時計回りの走行の結果を示しており, 上 4 つのグラフが HMD での提示, 下 4 つのグラフがスクリーンでの提示の結果を示しており, 1 列目と 3 列目のグラフが 15 km/h の走行, 2 列目と 4 列目のグラフが 45 km/h の走行の結果を示している。グラフ中の実線が VR 提示ありでの走行, 点線が VR 提示なしでの走行の結果を示している。各グラフの横軸は経過時間を示しており, 車両速度が 45 km/h の映像の場合, 15 km/h の映像と比べて再生時間は 3 分の 1 となっている。また, グラフ中の網掛け部分は, コース中でのカーブ区間 (ハンドルが 1 度以上切られていた区間) を表している。縦軸は各実験参加者の評価値の平均を示している。45 km/h の走行では, 15 km/h に比べて全体的に安心感が低下した。さら

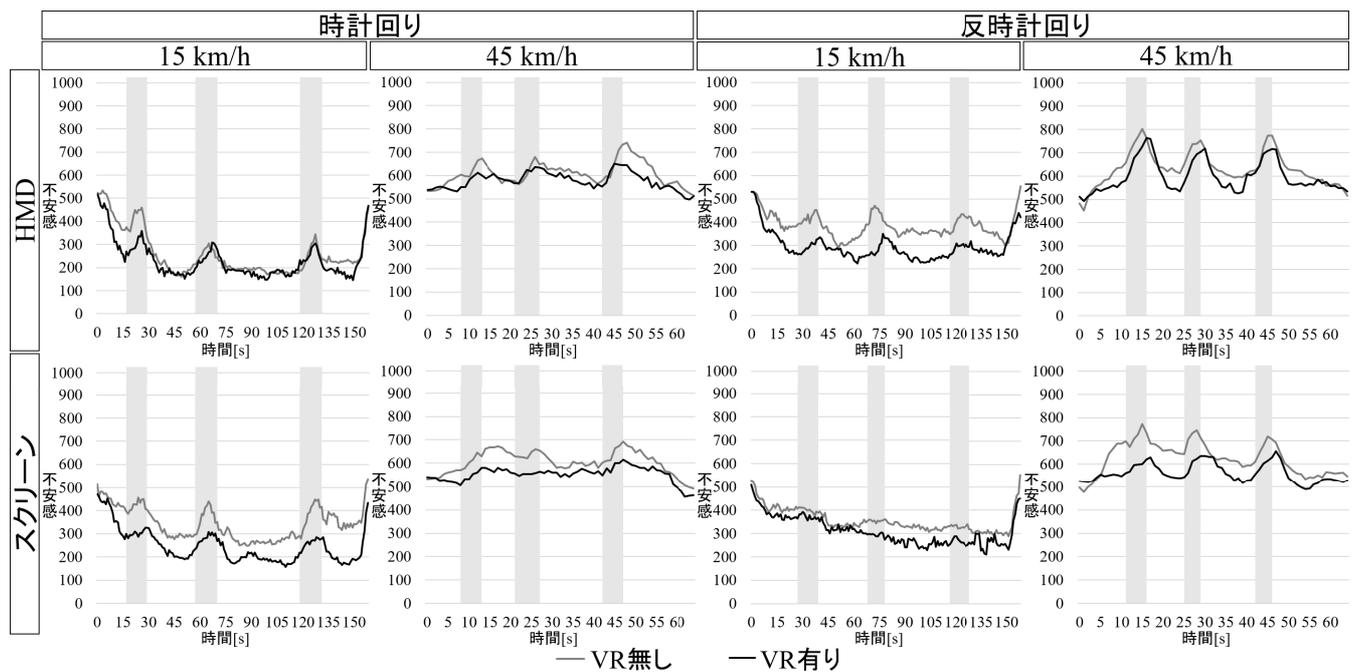


図 8 各パラメータの組合せによる安心感評価値の時間変化
 Fig. 8 Subjects' sense of comfort for each parameters based on time change.

に、全走行を通して、VR 提示ありの走行では、なしの走行 15 km/h の走行に比べて全体的な安心感が低下した。また、全走行を通して、カーブ区間では、直線区間に比べて安心感が低下した。

まず、運転責任のない搭乗者に対して、従来の情報提示による効果があるかを分析するために、運転経験の有無による実験参加間の不安感の差を分析した。各水準における全参加者の全評価値を、それぞれ平均したものを分析対象とした。その結果、運転経験の主効果は得られなかった ($F(1, 16) = 0.1292, p = .724, \eta_p^2 = 0.008$)。この結果は、運転経験の有無によらず、同様に不安 (安心) を感じること示している。したがって、運転責任のない搭乗者に対しても、従来の情報提示による効果が有効であることを示唆している。

4.6 VR 提示と各要因の関係性の結果と考察

次に、車両速度 (参加者内)、走行ルート (参加者内)、提示方法 (参加者間)、VR 提示 (参加者内)、走行区間 (参加者内) の分散分析を行った。運転経験の主効果が得られなかったため、運転経験の要因を除いて分析を行った。本実験では車両の制御タイミングを搭乗者に伝えることで、不安感を解決可能であるという仮説を検証することを目的としているため、5 要因の分散分析 (混合要因) ではなく、各要因の比較に基づく分析を実施した。

実験実施前には、実験参加者に安心感の説明とレバー操作を教示しているものの、安心感の評価値には各参加者間でばらつきが存在する。そこで、同一条件下における各水

準の比較を実現するために、車両速度、走行ルート、VR 提示、走行区間は、参加者間ではなく、参加者内で検定を実施した。各水準における全参加者の全評価値を、それぞれ平均したものを分析対象とした。つまり本実験では、20 名分の対応のあるデータとして分析を実施した。

提示方法に関しては、対応のない参加者間データとし、各参加者の全評価値を、各水準でそれぞれ平均したものを分析対象とした。

4.6.1 VR 提示と走行区間の主効果と交互作用

まず、VR 提示の有効性を示すために、VR 提示がある条件とない条件での評価値の主効果を確認した。その結果、図 9 に示すように、VR 提示の有無の主効果が得られた ($F(1, 18) = 8.545, p = .009, \eta_p^2 = 0.322$)。平均値は、VR 提示なしでは 479.2 (SE = 30.81)、VR 提示ありでは 427.8 (SE = 36.79) であった。この結果より、車両の進行方向の提示によって、搭乗体験者の安心感の向上が可能であることが明らかになった。

次に、VR 提示がカーブ時の不安感を軽減したことを確認した。VR 提示がカーブ時の不安感を解決可能であるという仮説に基づき、VR 提示と走行区間の交互作用を確認した。それに先立って、まず、カーブ時に不安感が発生していることを確認するために、走行区間の主効果を確認した。その結果、図 10 に示すように、区間の主効果が得られた ($F(1, 18) = 21.77, p < .001, \eta_p^2 = 0.547$)。平均値は、直線区間では 435.0 (SE = 32.24)、カーブ区間では 471.9 (SE = 33.76) であった。この結果より、一般的な走行シーンにおいては、直線区間よりもカーブ区間の方が、実験参

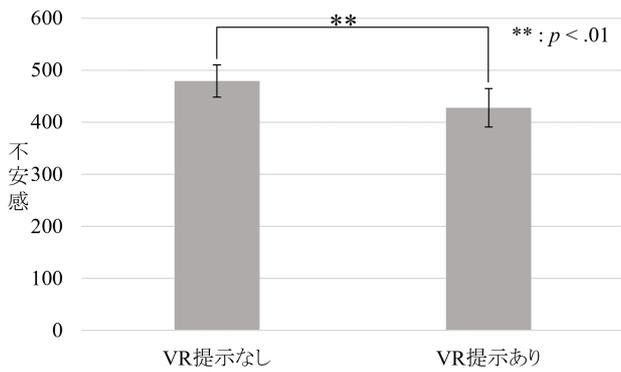


図 9 VR 提示による安心感評価値
Fig. 9 Sense of comfort on VR display.

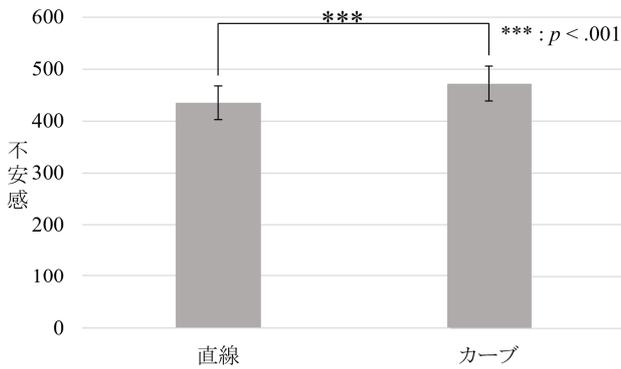


図 10 区間による安心感評価値
Fig. 10 Sense of comfort on driving section.

加者の安心感が低下することが明らかになった。この結果より、カーブ時に不安感が発生し、搭乗者の安心感が低下したことが示唆される。

次に、VR 提示と走行区間の分散分析を行った。その結果、図 11 に示すように、VR 提示と区間について 1 次の交互作用が得られた ($F(1, 18) = 6.565, p = .020, \eta_p^2 = 0.267$)。平均値は、左から 456.8 (SE = 31.03), 413.3 (SE = 35.21), 501.6 (SE = 31.11), 442.3 (SE = 38.82) であった。Bonferroni 法による多重比較の結果、直線区間では VR 提示の有無による差が得られ ($F(1, 18) = 7.607, p = .013, \eta_p^2 = 0.297$)、カーブ区間でも VR 提示の有無による差が得られた ($F(1, 18) = 9.046, p = .008, \eta_p^2 = 0.334$)。平均値の差は、直線区間では 43.5、カーブ区間では 59.3 であり、カーブ区間の方が VR 提示の有無による差がより大きいことが明らかになった。VR 提示によって、カーブ時の不安感を軽減し、安心感が向上したことが示唆される。また、VR 提示ありでは直線区間とカーブ区間の差が得られ ($F(1, 18) = 10.53, p = .004, \eta_p^2 = 0.369$)、VR 提示なしでも直線区間とカーブ区間の差が得られた ($F(1, 18) = 31.12, p < .001, \eta_p^2 = 0.634$)。平均値の差は、VR 提示ありでは 29.0、VR 提示なしでは 44.8 であり、VR 提示を行う方が、直線とカーブ区間の安心感の差が小さいことが明らかになった。VR 提示を行わない場合と比較し

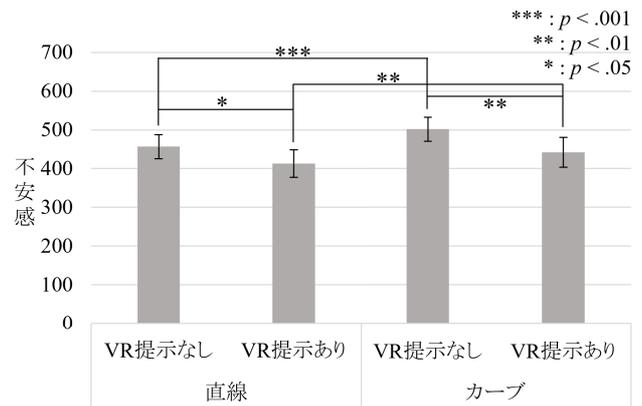


図 11 VR 提示と区間による安心感評価値
Fig. 11 Sense of comfort on VR display and driving section.

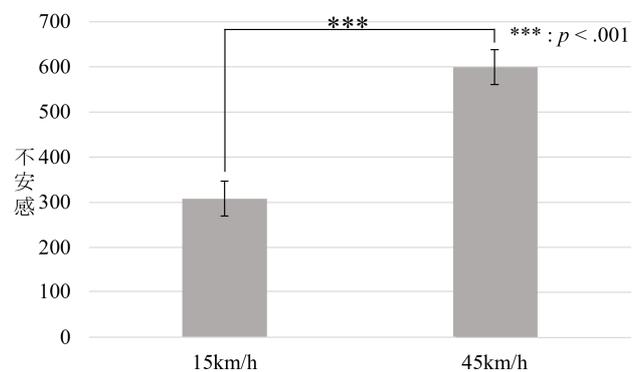


図 12 車両速度による安心感評価値
Fig. 12 Sense of comfort on vehicle speed.

て、VR 提示を行った場合、カーブ区間の安心感が向上され、直線区間での走行で感じる安心に近づいたことが示唆される。

4.6.2 車両速度と提示方法の主効果

次に、VR 提示がカーブ時の不安感を軽減するという仮説に基づいて、どのような状況で VR 提示が、より有効であるかを確認した。そのために、まず、各要因の水準間に差があるかを確認した。

まず、図 12 に示すように、車両速度の主効果が得られた ($F(1, 18) = 51.16, p < .001, \eta_p^2 = 0.740$)。平均値は、15 km/h では 308.1 (SE = 38.50)、45 km/h では 598.9 (SE = 38.63) であった。この結果より、車両速度が速いほど、実験参加者の安心感が低下することが明らかになった。

提示方法については有意な差が得られなかった ($F(1, 18) = 0.214, p = .649, \eta_p^2 = 0.012$)。これは、HMD の場合、実験参加者は周囲の映像を全天球で閲覧可能であるが、本実験では、「全天球で観察可能であるか」という要素が、実験参加者の安心感に与える影響が小さかったため差が生じなかった可能性が高い。歩行者や他車両との距離に起因する安心感の計測など、実験参加者が映像中から安心を受ける要因を認識するような実験の場合、HMD とスクリーンで差が生じる可能性が高い。一方で、図 13 に示

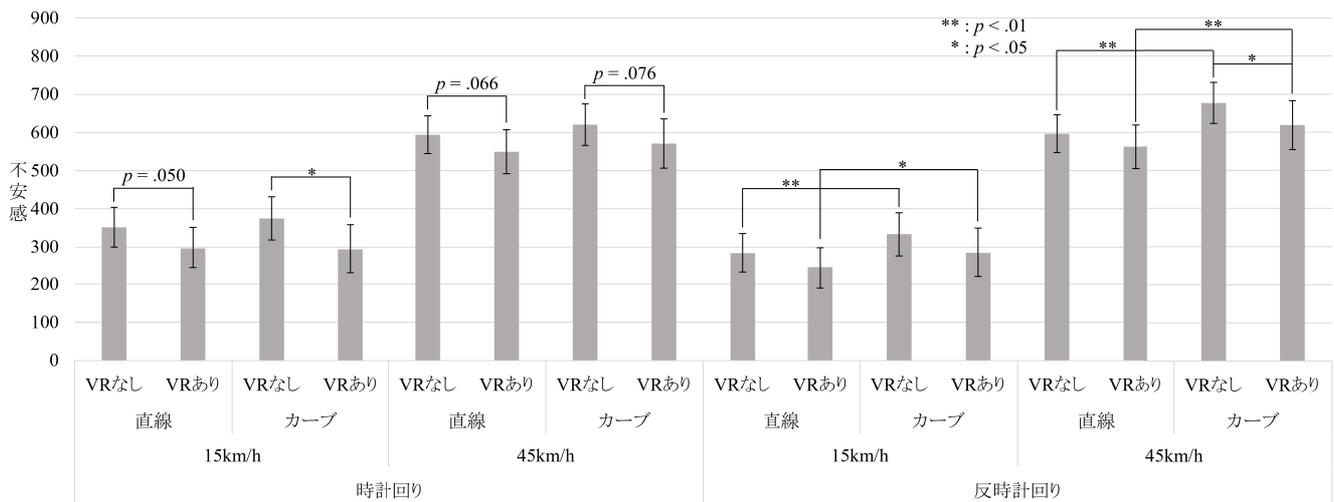


図 14 VR 提示, 区間, 車両速度, 走行ルートによる安心感評価値
 Fig. 14 Sense of comfort on displaying VR or not, each section, each vehicle speeds and each driving routes.

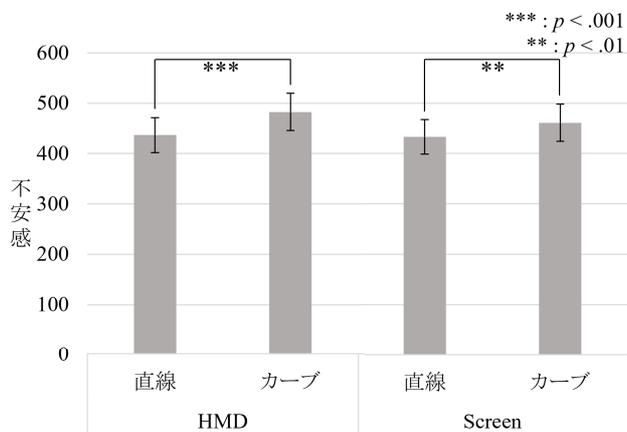


図 13 提示方法と区間による安心感評価値
 Fig. 13 Sense of comfort on displaying methods and driving section.

すように, 提示方法と区間には交互作用の傾向が得られた ($F(1, 18) = 3.55, p = .076, \eta_p^2 = 0.165$). Bonferroni 法による多重比較の結果, HMD での提示の方が, 直線区間とカーブ区間の差がより大きくなった. これは, HMD での提示では, 実験参加者がカーブ (特に鋭角カーブ) 区間において先の道路環境を確認でき, スクリーンでの提示では実験参加者の意思で確認できないため生じた可能性が高い. これらの結果から, 実験参加者が映像を自由に観察可能かどうかが重要となる実験では, 提示方法によって差が生じることが予想される.

4.6.3 VR 提示, 車両速度, 走行区間, 走行ルートの交互作用

提示方法については有意な差が得られなかったため, VR 提示, 車両速度, 走行区間, 走行ルートの交互作用を確認した. その結果, VR 提示, 車両速度, 走行区間, 走行ルートの 3 次の交互作用が得られた ($F(1, 18) = 5.396,$

$p = .032, \eta_p^2 = 0.231$). VR 提示がカーブ時の不安感を軽減するという仮説に基づいて, 走行ルートと車両速度の各水準について, VR 提示と走行区間の 2 要因の分散分析を実施した. Bonferroni 法による多重比較の結果を図 14 に示す. まず, 時計回り走行では, 車両速度が遅いほど, より VR 提示によって安心感が向上した. 車両速度が速い場合, 車両がカーブ区間に差しかかり, CG オブジェクトが道路に沿って曲がりをはじめてから車両が実際に動作するまでの時間が短く, 実験参加者が十分な時間をもって車両の動作を察知できなかった可能性が高い. 逆に, 遅い車両速度では, 十分な時間をもって車両の動作を察知可能なため, 安心感が向上したことが示唆される. また, 反時計回り走行では, 車両速度が速いほどカーブ区間での安心感が低下した. これは, 実験参加者が高速でのカーブ進入は危険性が高いと判断した結果であることが示唆される. 走行ルートによって結果に差が生じたのは, 走行の内回りと外回りによる差や, 視界に移る景色の微小な差, 日差しの差の可能性が高い. これは, 搭乗者の感じる安心感が微小な環境の変化にも影響を受けることを示唆している.

5. おわりに

本稿では, VR 提示によって搭乗時の安心感向上を実現する自動走行車両搭乗体験システムを提案した. 撮影された全方位映像を正距円筒映像に変換し, 球体投影面にマッピングすることでバーチャル空間を生成し, 車両の速度と操舵角情報に基づいて合成した CG オブジェクトを VR 提示することにより, 搭乗者の車両挙動の理解を助け, オートメーションサプライズの軽減を試みた. 提案手法のパイロットシステムを用いて, VR 提示が搭乗者の安心感に及ぼす影響を調査した結果, 進行方向情報の VR 提示により, 実験参加者の安心感が向上することを確認した. また, VR

提示によってカーブ時に発生する不安感を軽減し、安心感が向上することを確認した。本システムは、車線変更や合流時などの状況への応用の可能性を有する。本研究の実験は、筑波大学倫理委員会の承諾を受けて実施された（承認番号：筑 29-199）。本研究の一部は、科研費 19H00806 および 17H01772 の助成を受けて行われた。

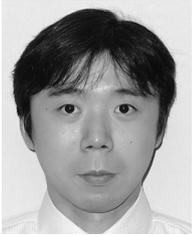
参考文献

- [1] Hadjidemetriou, G.M., Sasidharan, M., Kouyialis, G. and Parlikad, A.K.: The impact of government measures and human mobility trend on COVID-19 related deaths in the UK, *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, Vol.6, p.100167 (2020).
- [2] Badr, H.S., Du, H., Marshall, M., Dong, E., Squire, M.M. and Gardner, L.M.: Association between mobility patterns and COVID-19 transmission in the USA: a mathematical modelling study, *Lancet Infect Dis*, Vol.20, No.11, pp.1247–1254 (2020).
- [3] 警察庁：自動走行の制度的課題等に関する調査研究報告書, 2016.4.13, 入手先 (<https://www.npa.go.jp/koutsuu/kikaku/jidosoko/kentoiinkai/report/honbun.pdf>) (参照 2021-07-19).
- [4] SAE International: Taxonomy and definitions for terms related to on-road motor vehicle automated driving systems, *Surface Vehicle Information Report J3016* (2014).
- [5] Elbanhawi, M., Simic, M. and Jazar, R.: In the passenger seat: Investigating ride comfort measures in autonomous cars, *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, Vol.7, No.3, pp.4–17 (2015).
- [6] Bellem, H., Schöenberg, T., Krems, J.F. and Schrauf, M.: Objective metrics of comfort: Developing a driving style for highly automated vehicles, *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, Vol.41, Part A, pp.45–54 (2016).
- [7] 松浦隆信, 佐藤啓太：臨床心理学に基づく自動車運転における不安の類型化と対策, 自動車技術会論文集, Vol.48, No.1, pp.141–146 (2017).
- [8] Lefèvre, S., Carvalho, A. and Borrelli, F.: A Learning-Based framework for velocity control in autonomous driving, *IEEE Trans. Automation Science and Engineering*, Vol.13, Issue 1, pp.32–42 (2016).
- [9] Sarter, N.B., Woods, D.D. and Billings, C.E.: Automation surprises, *Handbook of Human Factors and Ergonomics*, Vol.2, pp.1926–1943 (1997).
- [10] Inagaki T.: Design of human-machine interactions in light of domain-dependence of human-centered automation Cognition, *Technology and Work*, Vol.8, No.3, pp.161–167 (2006).
- [11] Mouratidis, K. and Serrano, V.C.: Autonomous buses: Intentions to use, passenger experiences, and suggestions for improvement, *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, Vol.76, pp.321–335 (2021).
- [12] Nordhoff, S., de Winter, J., Payre, W., van Arem, B. and Happee, R.: What impressions do users have after a ride in an automated shuttle? An interview study, *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behavior*, Vol.63, pp.252–269 (2019).
- [13] Bandura, A.: Self-efficacy: Toward a unifying theory of behavioral change, *Advances in Behavior Research and Therapy*, Vol.1, No.4, pp.139–161 (1978).
- [14] 萩原 亨, 清水一喜：低速走行時における自動運転から運転操作に戻るリクエストに対するドライバ応答に関する研究, 自動車技術会論文集, Vol.49, No.4, pp.832–838 (2016).
- [15] Kuhl, J., Evans, D., Papelis, Y., Romano, R. and Watson, G.: The Iowa Driving Simulator: An Immersive Research Environment, *IEEE Computer*, Vol.28, No.7, pp.35–41 (1995).
- [16] 米川 隆, 阿賀正己, 村野隆彦, 里見洋平：安全・ITS：現実感のあるドライビングシミュレータの開発, 自動車技術, Vol.64, No.10, pp.78–84 (2010).
- [17] 立山義祐, 山田純嗣, 野寄純平, 山本敬一, 桑田佳奈, 北村憲康, 西村秀和, 小木哲朗：没入ドライビングシミュレータでの狭路運転行動観察, 日本機械学会第 21 回設計工学・システム部門講演, pp.529–532 (2011).
- [18] Tang, A., Fakourfar, O., Neustaedter, C. and Bateman, S.: Collaboration in 360 Videochat: Challenges and Opportunities, Technical Report, University of Calgary, pp.1327–1339 (2017).
- [19] Hakulinen, J., Keskinen, T., Mäkelä, V., Saarinen, S. and Turunen, M.: Omnidirectional video in museums-authentic immersive and entertaining, *International Conference on Advances in Computer Entertainment*, pp.567–587 (2017).
- [20] Heshmat, Y., Jones, B., Xiong, X., Neustaedter, C., Tang, A., Riecke, B.E. and Yang, L.: Geocaching with a beam: Shared outdoor activities through a telepresence robot with 360 degree viewing, *Proc. 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, p.359 (2018).
- [21] Neale, W.T., Marr, J. and Hessel, D.: Nighttime Video-graphic Projection Mapping to Generate Photo-Realistic Simulation Environments, SAE Technical Paper, 18 pages (2016).
- [22] 笹井翔太, 亀田能成, 大田友一, 神原誠之, 萩田紀博, 北原格：自動走行車両搭乗者のストレス軽減を目的とした死角領域と車両制御情報の可視化, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.22, No.2, pp.189–198 (2017).
- [23] 東井隼斗, 北原格, 亀田能成, 大田友一：ドライバの体感速度変化を促すバーチャルパターン, 電子情報通信学会論文誌 D, Vol.J99-D, No.1, pp.45–55 (2016).
- [24] Zheng, R., Yamabe, S., Nakano, K. and Suda, Y.: Biosignal Analysis to Assess Mental Stress in Automatic Driving of Trucks: Palmar Perspiration and Masseter Electromyography, *Sensors*, Vol.15, No.3, pp.5136–5150 (2015).
- [25] 城戸恵美子, 新垣紀子, 青山征彦, 朴信映, 河原健太：市街地における運転者・歩行者の不安感を考慮した自動運転の検討, 認知科学, Vol.25, No.3, pp.293–309 (2018).
- [26] 嶋田 淳, 河原健太, 城戸恵美子, 朴信映, 吉武良治：自動運転車両における運転者の不安感評価, ヒューマンインタフェース学会論文誌, Vol.19, No.4, pp.333–342 (2017).
- [27] Tomita, A., Harada, E.T., Ando, S., Miyashiro, K., Ohmori, M. and Yano, H.: On-time Measurement of Subjective Anxiety of a Passenger in an Autonomous Vehicle: Gradually Changing Sounds Decreases Anxiety of Passenger, *Engineering Psychology and Cognitive Ergonomics: Performance, Emotion and Situation Awareness*, pp.209–219 (2017).



坂村 祐希

2018年筑波大学大学院システム情報工学研究科修了。同年筑波大学グローバル教育院エンパワーメント情報学プログラム編入。修士(工学)。



富田 瑛智

2013年大阪大学大学院人間科学研究科修了, 同年大阪大学大学院人間科学研究科研究員, 2014年筑波大学人間系研究員, 2015年筑波大学システム情報系助教(グローバル教育院エンパワーメント情報学プログラム助教), 2017年大阪大学大学院人間科学研究科助教を経て, 2021年より関西国際大学心理学部講師。認知心理学, 知覚心理学, 選好形成と飽きの研究に従事。博士(人間科学)



桑戸 英彦 (正会員)

2016年筑波大学大学院システム情報工学研究科修了。同年(独)国立スポーツ科学センター契約研究員を経て, 2017年より筑波大学計算科学研究センター助教。2018年英国サリー大学客員研究員を兼務。コンピュータビジョン, 多視点映像解析の研究に従事。博士(工学)。



水浪 田鶴

2001年大阪大学大学院人間科学研究科修了。(国研)産業術総合研究所人間所法インタラクション研究部門テクニカルスタッフ。知覚心理学・認知心理学に基づいた人間の行動研究(主にコミュニケーション)に従事。博士(人間科学)。



井上 和哉

2012年筑波大学大学院博士後期課程修了, 博士(心理学)。筑波大学人間系准教授を経て, 2019年より首都大学東京(現, 東京都立大学)人文社会学部准教授。専門は認知心理学・感情心理学。



亀田 能成 (正会員)

1996年京都大学大学院博士後期課程認定退学。京都大学助手, 2001~2002年米国MIT客員研究員(併任), 筑波大学講師を経て, 2016年より筑波大学計算科学研究センター教授。京都大学博士(工学)。知的画像処理, マルチメディア処理, 複合現実感技術等の研究, およびそのスポーツ応用や福祉応用の研究に従事。本会のほか, 電子情報通信学会, 日本バーチャルリアリティ学会, 画像電子学会, IEEE等各会員。



原田 悦子

1986年筑波大学大学院心理学研究科修了。同年日本アイ・ビー・エム東京基礎研究所研究員(認知工学)。1989年法政大学社会学部, 2010年より筑波大学人間系教授。認知心理学・認知科学, 認知工学, 認知的加齢研究に従事。筑波大学CUAR みんなラボ(みんなの使いやすさラボ)を主催。教育学博士。



北原 格 (正会員)

1996年筑波大学大学院理工学研究科修了。同年シャープ(株)入社。2000年筑波大学先端学際領域研究センター助手, 2003年(株)国際電気通信基礎技術研究所(ATR)研究員, 2005年筑波大学大学院システム情報工学研究科講師, 2008年同准教授を経て, 2019年より同大学計算科学研究センター教授。自由視点映像, 複合現実感の研究に従事。博士(工学)。本会シニア会員。