

拡張現実を用いた自動走行車両搭乗者の安心感の向上

坂村 祐希^{†1} 富田 瑛智^{†2†4} 穴戸 英彦^{†3} 水浪 田鶴^{†4}
井上 和哉^{†1} 亀田 能成^{†3} 原田 悦子^{†4} 北原 格^{†3}

概要: 自動走行車両の疑似的な搭乗体験を可能とする映像提示システムを用いて、AR 提示が安心感に与える影響について調査する。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の映像を撮影し、その映像から計算機内部で車両搭乗シーンを再現する。具体的には、撮影した全方位映像を球体 CG モデルの内部（球体投影面）に貼り付け、バーチャル空間に配置する。頭部に装着した提示装置（HMD）で球体 CG モデルを中心から球体投影面を観察することにより、搭乗を疑似体験させる。HMD に内蔵された加速度センサで計測した搭乗体験者の首振りに合わせて、バーチャルカメラの姿勢を制御することで全方位の見え方を再現する。提示する映像の再生倍率を変化させることによりバーチャル空間を走行する車両の速度を操作する。映像撮影と同時に計測した車両情報に基づいて CG（バーチャルパターン）を生成し、その AR 提示が安心感に与える影響を主観評価実験によって調査する。

キーワード: 自動走行車両, 安心感, 拡張現実, 全方位映像

Improvement passenger comfort of an autonomous vehicle using augmented reality

YUKI SAKAMURA^{†1} AKITOSHI TOMITA^{†2†4} HIDEHIKO SHISHIDO^{†3}
TAZU MIZUNAMI^{†4} KAZUYA INOUE^{†4} YOSHINARI KAMEDA^{†3}
ETSUKO T HARADA^{†4} ITARU KITAHARA^{†3}

Abstract: This paper introduces our trial to investigate relationship between augmented reality display and sense of comfort of a passenger of an autonomous vehicle using an omnidirectional video display system. An omnidirectional camera is located at passenger seat of a moving vehicle and captures omnidirectional scenes from the vehicle. A virtual environment is reconstructed in a computer, specifically, a spherical CG model placed in the virtual space and a panorama video generated from the omnidirectional video is mapped on it. A virtual camera that captures an observer's view is set at the center of the CG-sphere. The orientation of the virtual camera is set with referring the orientation of the observer's view, which is acquired by an inertia sensor of head-mounted-display (HMD) so that the observer can look around the omnidirectional scene. We operate the vehicle speed in the virtual space by changing the video-replay-speed in our developed system. We conduct on some experiments to investigate the relationship between augmented reality display and the sense of security by superimposing the virtual pattern generated based on the vehicle information recorded at the time of shooting the video on the display video.

Keywords: Autonomous Vehicle, Augmented Reality, Sense of Comfort, Omni Directional Image

1. はじめに

自動走行車両の研究開発が活発に行われている[1][2]. 道路を走行する一般的な自動車以外にも、ショッピングモールや空港内の移動手段としての利用が進む小型モビリティにも自動走行車両の導入計画が進んでいる[3]. この場合、搭乗者や走行環境が限定的な自動車と比べ、より多様な搭乗者や走行環境を対象としたモビリティシステムを構築する必要がある。

多様な搭乗者に親しまれるモビリティを開発する必要がある一方で、利用者には自動走行車両に対する漠然とした不安が存在することから、自動走行車両を広く普及させるためには、搭乗者に対する安全だけでなく、安心への配慮が指摘されている[1][4]. 自動走行に関する活発な研究開発

により、安全性は高まりつつある[5]が、搭乗者の安心感については十分に議論されているとはいえない状況である[6].

自動走行車両の搭乗実験は、搭乗者の自動走行システムに対する印象を評価する手段として有効である。しかし、現実空間における搭乗実験を実施するためには多大な時間や費用、および煩雑な手続きが必要となる。バーチャル空間に構築した自動走行車両の走行環境を用いた疑似搭乗体験が可能となれば、実世界での実験に比べ安価[7]、かつ、実際の道路では実現困難な状況（例えば、法定速度以上で走行する車両への搭乗）での実験を安全に実施可能となる[8][9].

自動走行車両搭乗者の安心感に影響を与える要因は、速度・加速度、車間距離など、一般的な走行車両と共通する部分も多いが、自動走行車両固有の要因も存在する。自動車を手動運転する場合、ドライバは運転操作を介して乗り心地を判定している。例えば、減速時のブレーキ制御によって発生する加速度の大きさによって安心・不安を感じる事が報告されている[10]. 手動運転の場合、ステアリングやアクセル・ブレーキ操作などの入力に対し、車両の挙

^{†1} 筑波大学大学院 システム情報工学研究科
Graduate School of Systems and Information Engineering, University of Tsukuba

^{†2} 大阪大学 人間科学研究科
Graduate School of Human Sciences, University of Osaka

^{†3} 筑波大学 計算科学研究センター
Center for Computational Sciences, University of Tsukuba

^{†4} 筑波大学 人間系
Faculty of Human Sciences, University of Tsukuba

動がどのように変化したかという出力に基づいた評価が可能であるが、運転操作（入力）の必要がない高レベル[11]な自動運転では、入力操作に基づいた車両の挙動予測が困難である。その結果、搭乗者が予測していなかった挙動をシステムがとった場合にオートメーションサプライズ（Automation Surprise）が発生し、搭乗者の安心感に影響を及ぼす可能性がある。オートメーションサプライズは、人間が予測していた挙動と、システムの挙動が異なることが原因であるため、搭乗者がシステムの構造や性能、動作状況を十分に理解することで解決可能である。そのためには、周囲状況の認識結果に基づいて行われる自動走行システムの“意図”を、搭乗者に適切に伝える必要がある。

本研究では、図 1 に示すような自動走行車両の疑似搭乗体験システムを構築し、搭乗体験者の安心感と走行環境に関する調査を行う。また、構築した疑似搭乗体験システム上に拡張現実（Augmented Reality：AR）を導入し、AR 提示で自動走行システムの構造や性能、動作状況を適切に提示することにより、オートメーションサプライズを軽減し、搭乗者の安心感を向上させる疑似搭乗体験システムを提案する。AR が搭乗者の安心感に与える影響に関する主観評価実験を実施し、提案システムの有効性を検討する。

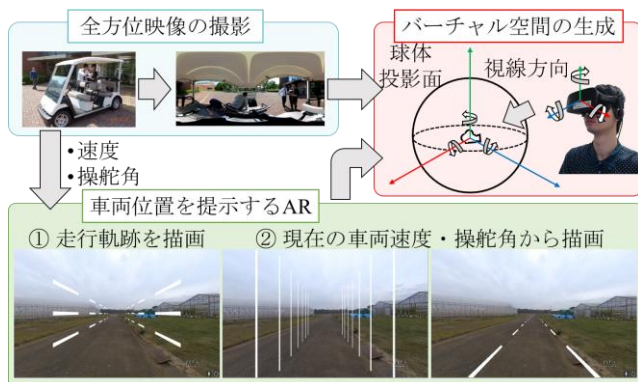


図 1 自動走行車両の疑似搭乗体験システム

Figure 1 A virtual on-board system of an autonomous vehicle.

2. 関連研究

ドライビングシミュレータでは、実車に近い環境を再現するために、VR（Virtual Reality）を導入した自動車の疑似搭乗体験システム[12][13]や、HMD（Head Mounted Display）を用いたドライビングシミュレータに関する研究[14]が行われている。VR では、リアリティを認識するための要因の一つに写實的リアリティ（没入感）があり[15]、高品質な映像提示が重要である。そのため、CG モデルだけでなく、車載映像を用いてバーチャル環境を再現する Image Based Rendering（IBR）に関する研究も行われている[16]。本研究でも、車載映像と HMD によって没入感の高いシミュレータを構築する。

車両搭乗者に情報を提示する方法として、ヘッドアップ

ディスプレイ（Head-Up Display：HUD）を用いる研究[17]や、ウィンドシールドディスプレイ（Windshield Display：WSD）に情報を提示する研究[18]が行われている。これらの提示方式では、提示箇所を搭乗者が注視していない場合、情報を見落とす可能性があるため、搭乗者に重要な情報を確実に伝達するために、聴覚刺激を用いた情報提示も検討されている。視覚効果（色、輝度、大きさ、点滅の周期）と聴覚効果（音圧、周波数、断続パターン）を変化させながら、各刺激が搭乗者に与える印象を調査した研究[19]では、各物理特性によって搭乗者に与える印象に差が生じることを示している。このことから、搭乗者の主観に効果的に訴えるためには、情報提示する方法と物理特性が重要であることが分かる。

ドライバは運転中に利用する情報の多くを視覚によって得ているため、自動車の搭乗者を対象とした視覚情報を用いた AR 技術に関する研究が多く存在する。笹井ら[20]は、ダッシュボードの透明化による死角支援と車輪の軌跡予測方式を提案している。東井ら[18]は、WSD に CG モデルを重ねることによる速度制御システムを提案している。人間が知覚する速度は深部感覚だけでなく、皮膚感覚・内臓感覚・特殊感覚によって得られた情報を統合することで認知している。それらの中でも視覚情報の重要性は高いとされており、視覚情報に伴って移動感覚が引き起こされる現象を視覚誘導自己運動（vection）という。この現象を誘発させるデザイン（バーチャルパターン）を WSD に重ねし、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漸次的に変化させることにより、ドライバの体感速度を変化させ、速度抑制を促す。この研究では、バーチャルパターンの形状と流れる速度がドライバの体感速度に影響を与えることが示されている。しかし、バーチャルパターンを提示できる場所が WSD のみであるため視野角が狭いという問題点が存在する。本研究では、これらの自動車における AR 提示技術を発展させ、搭乗体験者の安心感向上を可能とする AR 提示システムの実現を試みる。

主観的な尺度の安心感を評価するためには、搭乗者という人的要因を考慮したシステムの開発や評価を行う必要がある。搭乗者の安心感を評価する方法として、生理指標を用いることで客観的な評価を行うアプローチも考えられる[21]が、年齢、性別、体格などの様々な個人特性を有する搭乗体験者に対して正確な生理指標データを認識することは困難であるため、本研究では主観評価に基づいたシステムを構築し、評価実験を実施する。

3. 自動走行車両の疑似搭乗体験システム

3.1 走行車両の周辺風景の撮影

自動走行車両の搭乗者の視点が存在する位置に全方位カメラを設置する。撮影した全方位映像は、撮影カメラの内

部パラメータに基づいて正距円筒映像に変換する．正距円筒方式は緯線と経線が直角かつ等間隔に交差する投影方式である．画像中の座標が，そのままピッチ・ヨー角に該当するため，描画処理が簡単であり，映像観察者の視線方向に応じて提示映像が変化する全方位映像提示システムとの親和性が高い．

多くの魚眼レンズでは等距離射影方式を採用しているが，立体射影方式や等立体角射影方式を採用している魚眼レンズも存在する．射影方式によって正距円筒方式への変換処理が異なるため，射影方式を公開していないレンズについては，各レンズメーカーが提供している変換アルゴリズムを用いて，撮影された全方位映像から正距円筒図法への変換を行う．

3.2 パーチャル空間の構築と搭乗者視点映像の生成

パーチャル空間の原点を中心とする球体 CG モデルを配置し，前節で生成した正距円筒映像を球体 CG モデルの内側（球体投影面）にマッピングすることで全方位の見え方を再現する．パーチャルカメラをパーチャル空間の原点に配置し，視野内の球体投影面をレンダリングすることで，提示映像を生成（撮影）する．加速度センサなどを用いて計測した搭乗者の視線の向きにパーチャルカメラを向けることにより，搭乗者の見え方を再現する．

正距円筒映像からカメラ映像への変換処理について説明する．図 2 左に示すように，球体投影面の中心に配置されたパーチャルカメラによって，提示映像を撮影する．撮影された提示映像は，歪みのない直線投影（rectilinear）方式となる．図 2 右に示すように，青色で示される直線投影映像（点 P ）は，球体投影面の中心に配置されたパーチャルカメラ（点 O ）から映像への光線と，球体投影面の内側にマッピングされた赤色の正距円筒映像との交点（点 Q ）における画素に対応付けることで生成される．

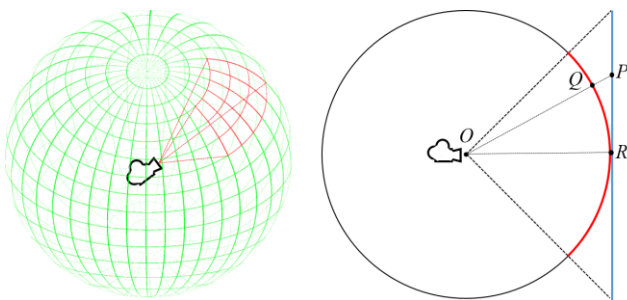


図 2 正距円筒映像から直線投影映像への変換

Figure 2 Mapping equirectangular projection to rectilinear projection.

球の半径を 1，正距円筒方式の座標を $Q(\phi, \lambda)$ ，中心緯度経度を $R(\phi', \lambda')$ とすると，直線投影方式の座標 $P(x, y)$ は以下の式(1)で表される．

$$\begin{aligned} x &= \frac{\cos(\phi) \sin(\lambda - \lambda')}{\cos(c)} \\ y &= \frac{\sin(\phi) \cos(\phi') - \sin(\phi') \cos(\phi) \cos(\lambda - \lambda')}{\cos(c)} \\ \cos(c) &= \sin(\phi) \sin(\phi') + \cos(\phi) \cos(\phi') \cos(\lambda - \lambda') \end{aligned} \quad (1)$$

また，直線投影映像から正距円筒映像への逆変換は以下の式(2)で表される．直線投影映像の各画素について，対応する正距円筒映像の画素を式(2)の逆変換によって求めることで，搭乗者視点映像を生成する．

$$\begin{aligned} \phi &= \sin^{-1} \left(\cos(c) \sin(\phi') + \frac{y \sin(c) \cos(\phi')}{\rho} \right) \\ \lambda &= \lambda' + \tan^{-1} \left(\frac{x \sin(c)}{\rho \cos(\phi') \cos(c) - y \sin(\phi') \sin(c)} \right) \\ \rho &= \sqrt{x^2 + y^2}, c = \tan^{-1}(\rho) \end{aligned} \quad (2)$$

3.3 映像の再生倍率制御による車両速度の操作

提示映像は，車両を一定速度で走行させながら撮影する．映像を提示する際に，再生倍率を変化させることにより，車両の走行速度をパーチャル的に制御する．車両速度 v_r と，映像の再生倍率 k ，およびパーチャル空間での車両速度 v_{vr} の関係は式(3)で表される． k を 1 より大きくすれば車両が撮影時よりも高速で走行している見え方を再現でき，逆に k の値を 1 より小さくすれば低速で走行している見え方の再現が可能となる．

$$v_{vr} = v_r \times k \quad (3)$$

3.4 AR による搭乗体験者の印象操作

走行車両の周辺風景を撮影する際に記録した速度や操舵角などの車両情報を利用して CG オブジェクト（パーチャルパターン）を生成する．対象車両の走行状態に応じてパーチャルパターンの流れる速度や位置姿勢を変化させながら提示することで，搭乗体験者の印象操作を試みる．パーチャルパターンの流れる速度を，パーチャル空間での車両速度に対して相対的に遅くすることにより，車両速度に対する搭乗体験者の安心感向上が期待される．また，車両の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で，オートメーションサプライズの軽減を図る．

パーチャルパターンの描画処理について説明する．車両の操舵角情報 θ_i 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，センサの分解能を r_θ [Hz]，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(4)で表すことができる．

$$\theta'_t = \sum_{i=0}^t \frac{\theta_i}{r_\theta} \quad (4)$$

車両速度 v_t は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(5)で表すことができる。

$$\mathbf{v}_t = \begin{bmatrix} v_t \cos \theta'_t \\ v_t \sin \theta'_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_t \cos \sum_{i=0}^t \frac{\theta_i}{r_\theta} \\ v_t \sin \sum_{i=0}^t \frac{\theta_i}{r_\theta} \end{bmatrix} \quad (5)$$

車両の発車位置を原点，センサの分解能を $r_v[\text{Hz}]$ とすると，時刻 t における車両の位置 $\mathbf{x}_t$ は以下の式(6)で表すことができる。

$$\mathbf{x}_t = \sum_{i=0}^t \frac{\mathbf{v}_i}{r_v} = \begin{bmatrix} \sum_{i=0}^t \left(\frac{v_i}{r_v} \cos \sum_{j=0}^i \frac{\theta_j}{r_\theta} \right) \\ \sum_{i=0}^t \left(\frac{v_i}{r_v} \sin \sum_{j=0}^i \frac{\theta_j}{r_\theta} \right) \end{bmatrix} \quad (6)$$

時刻 t における車両位置とバーチャルパターンの位置関係を図 3 に示す。図中の青色の線が車両の走行軌跡を示している。バーチャルパターンは，走行軌跡から等距離にある左右の赤色の線上に生成する。車両位置とバーチャルパターン間の距離を d とすると，時刻 t におけるバーチャルパターンの位置 $\mathbf{p}_t^{(1)}$ ， $\mathbf{p}_t^{(2)}$ は以下の式(7)で表される。

式(7)より得られたバーチャルパターンの位置から，提示するバーチャルパターンの物理特性を考慮し，描画することで AR 提示を実現する。例えば，次章の図 4 に示すような白線の場合，距離 l 毎に，幅 w の白線の CG モデルを配置する。

バーチャルパターンの描画方法として，現在時刻の速度と操舵角度から予測された車両の進行方向を描画する方式と，撮影時の車両走行軌跡を描画する方式の二通りを実装する。

$$\mathbf{p}_t^{(1)} = \mathbf{x}_t + \begin{bmatrix} d \cos(\theta'_t + 90) \\ d \sin(\theta'_t + 90) \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} \sum_{i=0}^t \left(\frac{v_i}{r_v} \cos \sum_{j=0}^i \frac{\theta_j}{r_\theta} \right) - d \sin \sum_{i=0}^t \frac{\theta_i}{r_\theta} \\ \sum_{i=0}^t \left(\frac{v_i}{r_v} \sin \sum_{j=0}^i \frac{\theta_j}{r_\theta} \right) + d \cos \sum_{i=0}^t \frac{\theta_i}{r_\theta} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{p}_t^{(2)} = \mathbf{x}_t + \begin{bmatrix} d \cos(\theta'_t - 90) \\ d \sin(\theta'_t - 90) \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$= \begin{bmatrix} \sum_{i=0}^t \left(\frac{v_i}{r_v} \cos \sum_{j=0}^i \frac{\theta_j}{r_\theta} \right) + d \sin \sum_{i=0}^t \frac{\theta_i}{r_\theta} \\ \sum_{i=0}^t \left(\frac{v_i}{r_v} \sin \sum_{j=0}^i \frac{\theta_j}{r_\theta} \right) - d \cos \sum_{i=0}^t \frac{\theta_i}{r_\theta} \end{bmatrix}$$

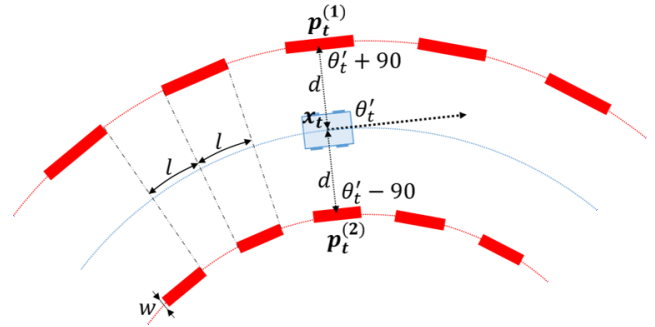


図 3 車両位置とバーチャルパターンの位置関係

Figure 3 Relative position between vehicle and virtual pattern.

3.4.1 予測された車両進行方向を描画する方式

前者は，現在の車両情報のみを用いるため，センシングと描画をリアルタイムで行うことができ，一般的な運転環境での利用が可能である。生成したバーチャルパターンの例を図 4 に示す。時刻 t における車両角度と速度の状態で行進し続けた場合の車両軌跡を描画するため，バーチャルパターンが実際の車両軌跡上から逸脱して描画される場合があり，特にカーブ時で顕著となる。バーチャルパターンが道路から外れた箇所（路側帯など）に描画されると，搭乗体験者が不安を感じることが懸念されるため，バーチャルパターンを描画する距離は，搭乗体験者が不安を感じにくい長さに留めることが好ましい。

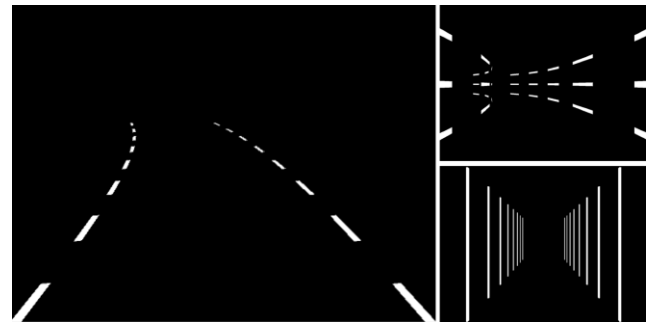


図 4 現在の速度と操舵角から推測された進行方向を描画するバーチャルパターンの例

Figure 4 Examples of a pattern of a vehicle's direction of movement predicted from its current speed and steering angle.

3.4.2 撮影時の車両走行軌跡を描画する方式

後者は，車両の走行ルートが求まっていることが条件であるため，シミュレータやナビゲーションでの利用が考えられる。この方式では，全範囲におけるバーチャルパターンの位置を求めて，プログラム開始時に描画する。生成したバーチャルパターンの例を図 5 左，俯瞰した様子を図 5 右に示す。現在時刻の速度と操舵角度から予測された車両進行方向を描画する方式とは異なり，実際の車両軌跡に基づいて描画を行うため，センシングなどによる誤差が無ければバーチャルパターンの描画が道路から逸脱することは

なく、バーチャルパターンを描画距離を任意に設定できる。全範囲でバーチャルパターンを描画した場合、搭乗体験者は発車から停車までの車両動作の視認が可能となる。図中の赤色の丸が発車位置、緑色の丸が停車位置を表している。

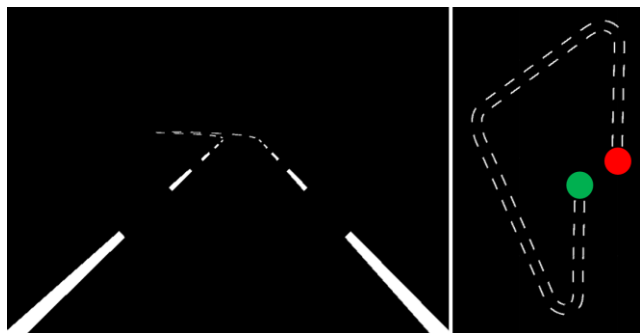


図 5 撮影時の走行軌跡を描画するバーチャルパターンの例 (左) と走行軌跡の俯瞰図 (右)

Figure 5 An example of a generated virtual pattern (left) and an overhead view on which the trajectory of the vehicle is depicted (right).

4. 安心感と AR の関係性の調査

4.1 全方位映像の撮影

筑波大学構内において撮影を実施する。3.3 節で述べたように、映像の再生倍率を制御することでバーチャル空間での車両の速度を操作するため、定速区間では撮影時の自動走行車両は一定速度 (5km/h, 15km/h) で走行させる。3.4 節で述べたように、バーチャルパターンを生成・制御するために必要な車両の速度や操舵角情報を、映像撮影時に記録する。

走行ルートの違いにより搭乗者の安心感に差異が生じることを考慮し、図 6 に示すような、時計回りと反時計回りの二通りの走行ルートを用意する。図 6 中の緑色の矢印が時計回り、赤色の矢印が反時計回りの走行ルートを表している。

映像の再生倍率を変化させる際、他車両や歩行者などの移動物体が写っていると、その動きが不自然となり、実空

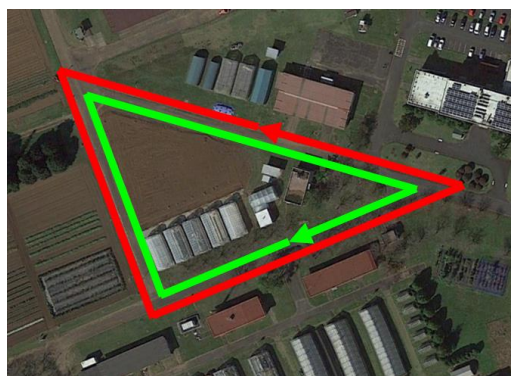


図 6 実験で用いた走行ルート

Figure 6 Driving routes used in experiments.

間とバーチャル空間の不一致による違和感が安心感に影響を及ぼす可能性がある。撮影で使用した走行ルートは通常の道路と隔離された領域ではないため、一般車両や歩行者が映像に映り込む可能性がある。そのため、それらが少ない日時、時間帯で撮影を行う。

本撮影では自動走行車両の代わりに有人走行する電動式カートにカメラを取り付けて走行映像を撮影する。全方位カメラは車両の最前方の搭乗者目線位置に設置する。実際の自動走行車両の走行映像を撮影することが望ましいが、自動走行車両による搭乗実験は安全性を十分に確保することが困難であり、また、自動走行車両の準備に多大なコストが必要となる。そのため、本撮影では有人走行する電動式カートに全方位カメラを設置して走行映像を撮影する。

全方位映像はハコスコ社の Insta360 one (解像度: 3840 × 1920 画素, フレームレート: 30fps) を用いて撮影した。

4.2 提示映像の生成と提示

撮影された映像を正距円筒映像に変換する。全方位映像の撮影に用いられる Insta360 one は、画角が 180 度以上の魚眼レンズを 2 台組み合わせたものであり、映像データは、二つの魚眼映像を一枚の映像としたものである。これらの魚眼映像を正距円筒映像に変換し、共通領域を用いて二つの映像を統合することによって、全方位が観察可能な 1 枚の正距円筒映像を得る。

実験では手動運転の電動カートを用いているが、実際の自動走行車両を 45km/h で安全に走行させることは困難である。そのため、映像の再生倍率を $k=3$ に操作すること、15km/h で撮影された映像から 45km/h の自動走行車両の走行映像を生成する。同様に、5km/h で撮影された映像から 15km/h の走行映像を生成する。

4.1 節で全方位映像を撮影する際に得られた車両の速度と操舵角情報に基づいてバーチャルパターンを生成する。本実験では、撮影時の車両走行軌跡を描画する方式によって AR 提示を行った。3.4 節で述べたように、速度と操舵角から回転半径を計算して車両軌跡を求め、その軌跡上にバーチャルパターンを生成することで、事前に車両の進行方向を示すことで安心感の向上を目指す。提示するバーチャルパターンは、図 5 左に示すような、実世界で用いられている白線に基づいて生成した。また、描画距離は現在の車両位置から 12.5m 先までとした。

搭乗者視点映像の提示には Oculus Rift CV1 (提示解像度: 2160 画素 × 1200 画素, リフレッシュレート: 90Hz) を用いる。バーチャル環境の構築と映像提示処理は、実車両への搭乗可能なラップトップ PC (Eurocom, P870DM-G) と、VR 統合開発環境の Unity を用いる。

4.3 搭乗者の安心感に影響を与える AR 提示

自動走行車両で生じるオートメーションサブライズの一

つとして、自動走行システムが旋回時に車両を制御するタイミングが理解できないために発生するものがある。以下の図 7 に例を示す。図中左から自動走行車両が走行し、前方に右方へのカーブがあると仮定する。このとき、自動走行システムが車両の制御を始めるよりも手前で車両が制御されると搭乗者が予測している場合、実際に車両が制御されるまで、搭乗者は自動走行システムが本当に車両を正しく制御できるか理解できず、安心感が低下する可能性がある。

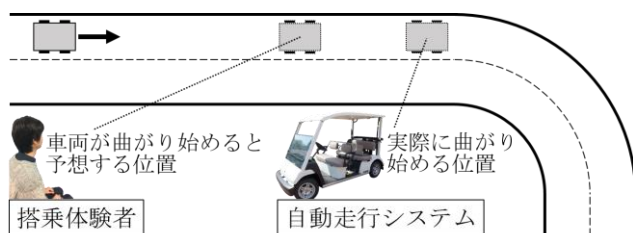


図 7 オートメーションサプライズの例
Figure 7 An example of automation surprise.

本システムでは、自動走行システムが旋回時に車両の制御を始めるタイミングを視覚提示することによって、車両旋回時に生じるオートメーションサプライズを軽減し、搭乗体験者の安心感向上を目指す。

本実験では、危険を事前に察知できるという状態を「安心」として定義し、危険を事前に察知できない状態を「危険」として定義した。また、実験参加者がどのように危険を知覚するかは各実験参加者の主観的な尺度を用いて計測を行った。

搭乗体験者の安心感が、走行の経過に伴って変化する様相を計測するため、連続値で、かつ、継続的に計測可能な方法として、図 8 に示すようなレバー装置を用いる[22]。このような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、本研究では HMD や大型スクリーンからの視覚刺激に対する計測を行うため、視覚以外の感覚を用いた測定方法が必要であり、また、走行車両という動的な環境での主観的な安心感の変化を計測する必要があるため、状況に応じて主観的な安心感を定量的、自然的、自覚的に表現可能な方法としてレバーを利用した。



図 8 安心感入力装置
Figure 8 An input device for subjective sense of comfort.

4.4 評価実験の流れ

本実験では「バーチャル空間の車両速度 (15km/h, 45km/h)」、「走行ルート (時計回り, 反時計回り)」、「AR 提示の有無」、「提示方式 (HMD, スクリーン)」を切り替えながら評価実験を実施することで、各パラメータと搭乗者の安心感の関係を調査する。本実験における、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 9 に示す。

バーチャル空間の車両速度 (15km/h, 45km/h)、走行ルート (時計回り, 反時計回り)、AR 提示の有無、映像提示方法 (HMD, 大型スクリーン) を組み合わせた計 16 本の映像について、搭乗体験者の安心感に関する評価実験を実施する。各実験参加者に対しては、16 本の映像から 8 本の映像を選択し、学習効果が生じない順序で映像を提示する。ただし、選択する映像は各パラメータ (速度, 提示方法, AR 提示の有無, 走行ルート) の出現回数が等しくなるように調整する。

安心感は実験参加者の利き手側に設置したレバーを用いて計測する。実験を開始する前に「公共の乗り物として『不安』を感じたときにはレバーを引いてください。不安とは、危険が予測されず、緊張やストレスを感じることを考えてください。逆に、『安心』できると感じたときにはレバーを押してみてください。安心とは、危険が予測され、リラックスできて開放感があることを考えてください」として実験参加者に教示を行った。

4.5 結果と考察

構築した実験システムを用いて 20 名の実験参加者を対象に評価実験を行った。一人当たりの所要時間は 30 分程度であった。

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以下の図 10 に示す。横軸は経過時間を示しており、バーチャル空間での車両速度が 45km/h の映像の場合、15km/h と比較して映像の再生時間は三分の一となっている。また、グラフ中の網掛け部分は、コース

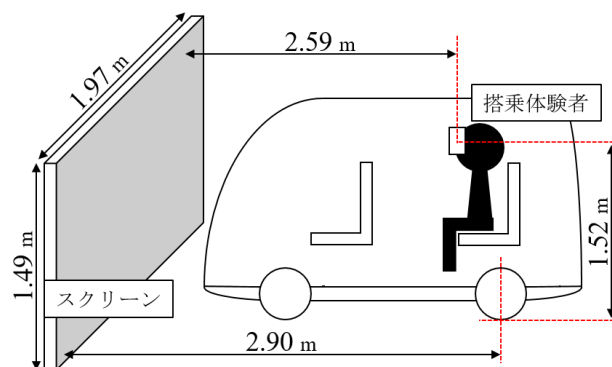


図 9 実験参加者と電動カート、スクリーンの位置関係
Figure 9 A positional relationship between a subject, an electric cart and a large screen.

中でのカーブ部分を表している。縦軸は実験参加者の不安感の高さを示しており、値が大きいほど実験参加者の不安感が高い（安心感が低い）ことを示している。

車両速度（15km/h と 45km/h）について、各速度間に有意な差が見られた（高速走行の方がより不安感が高い）。自動走行車両の搭乗体験が可能であるシミュレータでは、実験参加者の安心感はバーチャル空間での車両速度に依存することが示されている。この結果からも、車載映像の速度を制御することで実験参加者の安心感の操作が可能であることが分かる。

道路形状（直線区間とカーブ区間）について、各区間の安心感について有意な差が見られた（カーブ区間の方がより不安感が高い）。また、道路形状と提示方法（HMD とスクリーン）について交互作用の傾向が見られた。VR を用いたシステムでは、バーチャル空間と実世界での感覚不一致による VR 酔いが問題となる。カーブ区間では搭乗者に加速度が加えられるはずであるが、シミュレータでは加速

度は再現されない。そのため、HMD の方が、実験参加者の主観的な不安感が増大したと考えられる。

AR 提示の有無について、AR 提示を行う場合と行わない場合について、有意な差が見られた。AR 提示を行うことで車両の進行方向を理解できるため、実験参加者の安心感が向上したと考えられる。また、AR 提示の有無と道路形状について相互作用の傾向が見られた。バーチャルパターンを提示する場合、直線部分よりカーブ部分の方が、より車両の進行方向を提示可能なため、実験参加者の安心感が高くなったと考えられる。また、AR 提示と道路形状、車両速度について相互作用の傾向が見られた。車両速度が遅いほど、より AR 提示によって安心感を向上させることが可能となった。バーチャルパターンの流れる速度は車両速度に比例する。そのため、バーチャルパターンが変化してから車両が動作するまでの時間が短く、実験参加者が危険を察知できなかったため、不安感が増大したと考えられる。また、車両速度が速いほど、カーブ区間での不安感が高く



図 10 各パラメータによる搭乗体験者の不安感の大きさと時間変位

Figure 10 Sense of discomfort of subjects for each combination of parameters on the basis of time change.

なった。車両速度が速いほど、搭乗者に加えられる加速度は大きくなるはずであるが、シミュレータでは加速度は再現されない。そのため、車両速度が速いほど、実世界と比較して実験参加者が感じる加速度の差異は大きくなり、実験参加者の主観的な不安感が増大したと考えられる。

5. おわりに

本研究では、自動走行車両搭乗の追体験を目的とした映像提示システムについて述べた。走行車両の前方に全方位カメラを設置し、走行の様子を撮影した。撮影した映像を用いて計算機内部でバーチャル環境の生成を行った。具体的には、撮影した全方位映像を正距円筒映像に変換し、バーチャル空間に配置した球体投影面に貼り付けた。搭乗体験者視点映像を撮影するバーチャルカメラを球体投影面に配置することにより、直線投影映像を生成し、HMDを用いて提示を行った。搭乗体験者の視点位置・視線方向とバーチャルカメラの位置・姿勢を一致させることにより、自動走行車両の疑似搭乗体験を実現した。提示システム上で映像の再生倍率を変化させることによりバーチャル空間での車両速度を操作した。映像撮影時に記録した車両情報をもとに生成したバーチャルパターンを提示映像に重畳し、それが安心感に与える影響について主観評価実験を実施した。その結果、車両進行方向の情報をAR提示することによって、搭乗体験者の安心感が向上することが確認された。また、AR提示と道路形状について、カーブ区間の方が、よりAR提示によって安心感を向上させることが可能となった。さらに、AR提示と車両速度について、車両速度が速いほど、よりAR提示によって安心感を向上させることが可能となった。

本研究の一部は、JSPS 科研費 17H01772 による。バーチャルパターンに関する研究は東井隼斗氏（株デンソー）によるものである。電動カート走行実験は、筑波大学システム情報系矢野博明教授、大森舞人氏の協力により実施した。

参考文献

- [1] Emilio Frazzoli, Munther A. Dahleh, and Eric Feron. Real-Time Motion Planning for Agile Autonomous Vehicles. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, Vol.25, No.1, p.116–129, 2002
- [2] Makoto Kudo, Shinji Kakegawa, Takeshi Shima, Akira Kuriyama, Yoshitaka Uchida, and Shigenori Hayase. Advances in Vehicle Periphery Sensing Techniques Aimed at Realizing Autonomous Driving. *Driving Forward with Future Vehicles*, Vol.67 No.1, 2018
- [3] Alexandros Nikitas, Ioannis Kougias, Elena Alyavina, and Eric Tchouamou Njoya. How Can Autonomous and Connected Vehicles, Electromobility, BRT, Hyperloop, Shared Use Mobility and Mobility-As-A-Service Shape Transport Futures for the Context of Smart Cities? *Urban Science*, 1 (4), ISSN 2413-8851, 2017
- [4] Atsushi Shimada, Kenta Kawahara, Emiko Kido, Shinyoung Park, and Ryoji Yoshitake. Psychological evaluation experiment of driver in self-driving car, *The 2nd Asian Conference on Ergonomics and Design*, Vol.53, No.2, p.S532–S535, 2017
- [5] Keisuke Suzuki, Takafumi Asao, Jun-ichiro Hayashi, and Yoshiki Miichi. Safety Evaluation of Advanced Driver Assistance Systems as Human-machine Systems. *International Journal of Automotive Engineering*, p.163–170, 2016–2017
- [6] Mohamed Elbanhaw, Milan Simic, and Reza Jazar. In the Passenger Seat: Investigating Ride Comfort Measures in Autonomous Cars. *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, Vol.7, Issue 3, p.4–17, 2015
- [7] Salvador Bayarri, Marcos Fernandez, and Mariano Perez. Virtual Reality for Driving Simulation. *Magazine Communications of the ACM*, Vol.39, Issue 5, p.72–76, 1996
- [8] David Hallvig, Anna Anund, Carina Fors, Göran Kecklund, Johan G. Karlsson, Mattias Wahde, and Torbjörn Åkerstedt. Sleepy driving on the real road and in the simulator - A comparison. *Accident Analysis & Prevention*, Vol.50, p.44–50, 2013
- [9] Arne Helland, Gunnar D. Jenssen, Lone-Eirin Lervåg, Andreas Austgulen Westin, Terje Moen, Kristian Sakshaug, Stian Lydersen, Jørg Mørland, and Lars Slørdal. Comparison of driving simulator performance with real driving after alcohol intake: A randomised, single blind, placebo-controlled, cross-over trial. *Accident Analysis and Prevention*, Vol.53, p.9–16, 2013
- [10] 田中裕章, 竹森大祐, 宮地智弘, 入部百合絵, 小栗宏次: 自動車の制動時の安心感に関する研究; *Denso technical review* 21, p. 30-36, 2016
- [11] SAE: Taxonomy and definitions for terms related to on-road motor vehicle automated driving systems, *Surface Vehicle Information Report J3016*, 2014
- [12] H. S. Kang, M. K. Abdul Jalil, and Musa Mailah. A PC-based Driving Simulator Using Virtual Reality Technology. *ACM SIGGRAPH international conference on Virtual Reality continuum and its applications in industry*, p.273–277, 2004
- [13] Andras Kemeny, From Driving Simulation to Virtual Reality. *Virtual Reality International Conference Article*, No.32, 2014
- [14] Baris Aykent, Frederic Merienne and Andras Kemeny. Effect of VR Device – HMD and Screen Display – on the sickness for Driving Simulation, *Driving Simulation Conference*, pp.235-236, 2015
- [15] David Zeltzer. *Autonomy, Interaction and Presence*, Presence, Vol.1, No1, 1992
- [16] 高橋拓二, 川崎洋, 池内克史, 坂内正夫. 全方位画像を用いた広域環境の自由視点レンダリング, *情報処理学会論文誌: コンピュータビジョンとイメージメディア*, Vol.42, No.SIG13, pp.99-109, 2001
- [17] 辻孝之, 長岡伸治, 橋本英樹. 夜間の歩行者認知支援システムの開発. *自動車技術会論文集*, Vol.37, No.1, p.185-190, 2006
- [18] 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, p.45-55, 2016
- [19] 宇野宏. 視聴覚表示の物理特性を利用した主観的印象の伝達に関する研究. *自動車技術会論文集*, Vol.31, No.4, p.73-78, 2000
- [20] Shota Sasai, Itaru Kitahara, Yoshinari Kameda, Yuichi Ohta, Masayuki Kanbara, Yoichi Morales, Norimichi Ukita, Norihiro Hagita, Tetsushi Ikeda, and Kazuhiko Shinozawa. MR Visualization of Wheel Trajectories of Driving Vehicle by Seeing-Through Dashboard. *IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality Workshops*, p.40–46, 2015
- [21] Rencheng Zheng, Shigeyuki Yamabe, Kimihiko Nakano, and Yoshihiro Suda. Biosignal Analysis to Assess Mental Stress in Automatic Driving of Trucks: Palmar Perspiration and Masseter Electromyography. *Sensors*, Vol.15, No.3, p.5136–5150, 2015
- [22] Akitoshi Tomita, Etsuko T. Harada, Satoshi Ando, Kozue Miyashiro, Maito Ohmori, Hiroaki Yano. 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