



# バーチャルハンドを用いた自動運転車における行為主体感の生起

Inducing the Sense of Agency in a Self-driving Car with Autonomously Moving Virtual Hands

近藤駿介<sup>1)</sup>, 鳴海拓志<sup>1)</sup>, 谷川智洋<sup>1)</sup>, 廣瀬通孝<sup>1)</sup>

Shunsuke KONDO, Takuji NARUMI, Tomohiro TANIKAWA, and Michitaka HIROSE

1) 東京大学大学院 情報理工学系研究科 (〒 113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1,  
{kondo,narumi,tani,hirose}@cyber.t.u-tokyo.ac.jp)

**概要:** 高度自動運転車において, ドライバにはサブタスクが認められるが, その間も監視等は積極的に  
行うことが望ましい. 本研究では行為主体感 (自分が運転しているかのような感覚) を生起させ, ドライ  
バの周辺監視など運転に関わる行動を誘発することを検討した. 具体的な手法として, 実際には手を離  
しているドライバーに対して, ハンドルを握るバーチャルハンドを視覚的に提示する手法を提案し, VR  
シミュレータによって行為主体感の変化やドライバーの行動の変化を検証した.

**キーワード:** 行為主体感, 身体所有感, 自動運転

## 1. はじめに

レベル 3 の自動運転システムにおいて, ドライバはシ  
ステムの動作中, スマートフォンの操作など運転以外の行動  
(サブタスク) を行うことが認められる. 一方, システムは  
安全に自動走行できないと判断した場合, ドライバに対し  
て操作の交代を要求する. ドライバがサブタスクに集中し  
ている場合, この要求に対するパフォーマンスは著しく悪  
化することが知られており [1], 課題となっている.

解決策のひとつとして, 自動運転システムの信頼度を定  
義し, それをドライバーに常時提示することで, 介入要求が  
発生する前からドライバーに注意を促す手法が提案されてい  
る [2, 3]. 介入が不要な場面においても, ドライバがシステ  
ムや交通状況に注意を向けることが, いざ介入が必要とな  
った時の対応に対して効果的であると言える.

本研究では, 自動運転システムの運転への注意を促す要  
素として, 行為主体感に着目した. ドライバに対し, 自動  
運転中においても「自分が運転している」という感覚を生  
起させる. これにより, ドライバが自発的に運転動作に関  
わり, 周辺監視を行う, 自分であればどのように操作するか  
イメージするなどの行動が誘発されると考えられる. この  
ような注意, 操作に対する準備がなされることで, 実際  
に介入が必要となった場合のパフォーマンスの向上を目指す.

本研究では自動運転中に行為主体感を生起させる手法と  
して, バーチャルハンドを利用した. 検証実験ではバーチャ  
ル空間内のシミュレータ上で実装したが, 実際の環境にお  
いても, MR デバイスなどを用いることで実現が可能であ  
る. 自動運転中, 実際にはハンドルから手を離しているド  
ライバのアバタから, ハンドルを握るバーチャルハンドを  
伸ばし, ハンドルと連動して動かす (図 1). これにより,  
ドライバーは自身の身体から伸びた手がハンドル操作を行う

様子を見ることで, あたかも自分が運転しているかよう  
な感覚を得る.

本研究ではバーチャルハンドを提示することにより, 自  
動運転中でもドライバーに行為主体感が生起するか, またそ  
れにより自動運転中の介入行動に影響するかの 2 点につ  
いて検証した.

## 2. 関連研究

### 2.1 自動運転システムへの操作介入

ドライバーが自動運転システムからの介入要求に対して適  
切に対応するため, 多感覚の刺激を用いる [4] などの要求手  
法の改善は多く提案されてきた. しかし介入のパフォーマ  
ンスをさらに高めるためには, 要求そのものだけでなく, そ  
れ以前からドライバーに介入に対して準備させておくことが  
重要である. Heiden らは, 定常的なパルス音を提示し, シ  
ステムの自信度に応じて音の間隔を変化させるシステムを  
提案した [2]. ドライバは音の間隔が短くなったとき, シス  
テムが不安定になっていることを認識し, 介入要求に対し  
て準備することができる. Helldin らは自信度をゲージを用  
いて視覚的に表現した [3]. 検証実験ではドライバーの周囲監  
視の頻度が向上することも確認された.

また, Flemisch らは, 人とシステムが入力装置を共有  
し, 互いに力を出し合って操作するシステムである, Haptic  
Shared Control を完全自動運転と比較した [5]. 自動運転シ  
ステムがカーブを曲がらずに直進してしまう場面において,  
完全自動運転ではほとんどの被験者が気づかずにカーブを  
逸脱してしまったのに対し, Haptic Shared Control では  
全ての被験者がシステムに任せきりにならず, カーブを曲  
がることができた.

自動運転システムの動作中も, ドライバが何らかのかた  
ちで運転動作に対して関わり続けていることが重要である



図 1: 作成したシミュレータ: 現実では手を離しているドライバーに対し, VR 空間内ではハンドルを握るバーチャルハンドが提示される

といえる。

## 2.2 行為主体感の生起

本研究では, ドライバに対して監視などの積極的な関わりを促すため, 行為主体感に着目した。行為主体感とは, 「ある行為を行っているのは自分自身である」という感覚であり, 自動車においては, 「運転を行っているのは自分自身である」という感覚に相当する。

行為主体感は, ある行為を行ったとき, その行為の結果の予測と, 実際の結果が合致すると生起するとされている [6]。しかしながら, 本研究の対象である自動運転車においては, ドライバは運転行動を全く行わないため, このように生起させることは難しい。このように, 人とそのアバタの行動が同期していない場合の行為主体感については, Banakouらが実験を行った [7]。Banakouらは, 実験参加者の没入したアバタが自律的に発話する様子をバーチャル空間内に設置した鏡を通して見せた。この時, 参加者は全く言葉を発していないにも関わらず, 主体感(自分が声を発したと感じたか)について高く評価した。この結果について Banakouらは, 発話以外のアバタの動作(頭の動きなど)が同期しており, アバタに対して身体所有感が生起されていたことによると考察している。ここで, 身体所有感とは「ある物体が自分の身体である」という感覚である。本研究におけるバーチャルハンドについても, あらかじめ身体所有感を生起させておくことで, 自律的に動いた場合でも一定の行為主体感を生起させることが可能と考えられる。

## 3. 運転シミュレータでのバーチャルハンドの提示

検証実験にあたり, バーチャル空間内での運転シミュレータを作成した。装置はヘッドセット (HTC Vive), ステアリングコントローラ, アクセル・ブレーキペダル (Logicool Driving Force GT), ハンドトラッキング装置 (Leap Motion) から構成される。シミュレータはプログラムによる自動運転とドライバーによる手動運転のいずれかの操作方法で動作する。手動から自動への切り替えは外部の実験者などが操作することによって行われ, 自動から手動への切り替えはドライバーがハンドルやペダルなどの入力装置に何らかの入力を行うことで行われる。

ドライバーのアバタは常に運転席に座った状態であり, 頭部と腕のみがドライバーの実際の動きと連動する。腕につい

ては, アバタの手(バーチャルハンド)と Leap Motion により認識した実際の手の位置が一致するように計算される。運転が自動に切り替わると, 手のトラッキングは行われなくなり, バーチャルハンドは実際の手の位置に関わらずハンドルに固定される。ハンドルは自動運転の操作に応じて回転するため, バーチャルハンドもそれに連動して動き, 結果としてドライバーからは自身のアバタが運転を行っているように見える。

## 4. 検証実験

### 4.1 実験目的

自動運転中にバーチャルハンドが自律的に動く様子を見ることで, 「自分が運転している」という行為主体感が生起されるか, 検証する。さらにバーチャルハンドの提示がドライバーの介入行動にどう影響するか, 調査する。

### 4.2 実験概要

実験は3つの試行に分けて行った。それぞれの試行でバーチャルハンドの提示方法のみが異なり, 提示あり条件では自動運転中, ハンドルにバーチャルハンドが固定される。提示なし条件ではバーチャルハンドが常にドライバーの実際の手と同期する。各試行は以下の通りとした。

- 試行 1: 提示なしまたは提示ありで約 5km 自動運転を行う。
- 試行 2: 試行 1 と異なる条件で約 5km 自動運転を行う。
- 試行 3: 試行 1 と同じ条件で約 10km 自動運転を行う。途中で介入の必要な場面が現れる。実験参加者は自動運転中, 動画鑑賞のサブタスクを行う。

実験参加者はそれぞれの試行の前に, 自分の手を動かしてバーチャルハンドとの同期を確認した。また約 1km の手動運転を行った。これは先行研究 [7] を踏まえ, バーチャルハンドを含むアバタ全体に対して身体所有感を生起させるためである。

試行 3 では, 介入が必要な場面として, 自動運転システムが車線規制区間を直進しようとする場面, カーブを逸脱していく場面の 2 つを用意した。本来レベル 3 の自動運転システムではドライバーに対して警告音などによる介入要求が発せられるが, ドライバが行為主体感を感じて能動的に運転動作に関わっているかを調べるため, 本実験では警告音などを鳴らさなかった。さらに, 試行 3 ではサブタスクとして, スピーチ動画の鑑賞を課した。試行 3 の介入場面への対応は実験参加者の学習による影響が高いと考え, もう一方の条件での同様の試行は行わなかった。

実験参加者は普通自動車運転免許を有する男女 24 名であった。実験参加者を無作為に 12 人ずつ 2 つのグループに分け, グループ 1 では提示なしで試行 1 を行い, グループ 2 では提示あり条件で試行 1 を行った。

### 4.3 評価

評価は各試行後に行ったアンケート, 試行 3 では介入行動をとった時間により行った。アンケートは主体感に関する

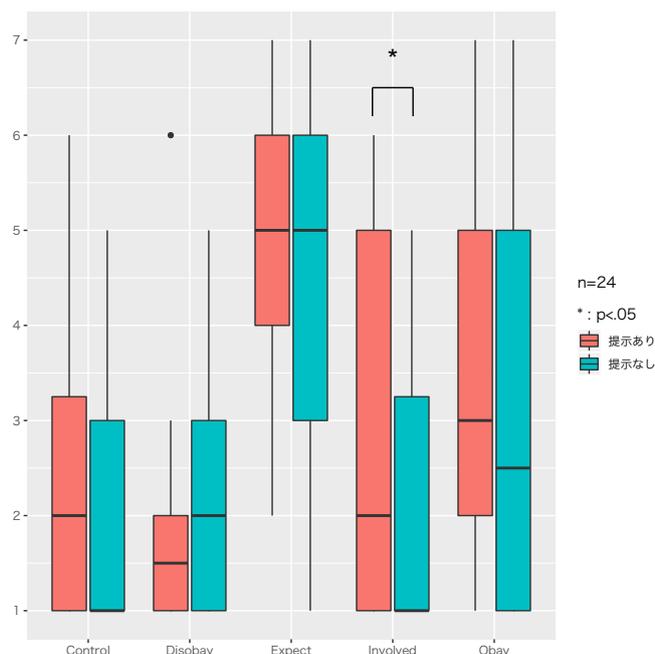


図 2: アンケート結果

もので、ラバーハンドについて行われた研究 [8] を参考に、以下の項目を設定した。実験参加者は各項目について 1~7 の 7 段階リッカート尺度で評価した。ただし、提示なし条件との比較を行うため、質問項目は「手」についてではなく、「車の動作」に対して行った。2 つ目のみ主体感に対しネガティブな項目である。

1. 自分が運転しているかのように感じた。(Control)
2. 車が自分の意図に反した動作をした。(Disobay)
3. 車は自分の思い通りに動作していた。(Expect)
4. 自分が運転に関わっているかのように感じた。(Involved)
5. 車が自分の意思に従って動いているかのように感じた。(Obay)

また、試行 3 での行動指標として、実験参加者が介入を行った時間から、介入がなかった場合に表示板や他車両との衝突が起こる時間までの秒数 (Time To Collision, TTC) を算出した。この値が大きいほど早く介入したことになる。加えて試行 3 の終了後に 2 つの介入場面それぞれについて、実験参加者のとった行動について以下の 5 項目からの選択式アンケートを行った。

- 気が付いた時には手遅れだった。
- 気が付いたがどうすれば良いのかわからなかった。
- 気が付き、自動運転が (避ける、曲がる) か様子を見た。
- 気が付き、自動運転が (避ける、曲がる) か様子を見ずに介入した。
- その他 (自由記述)

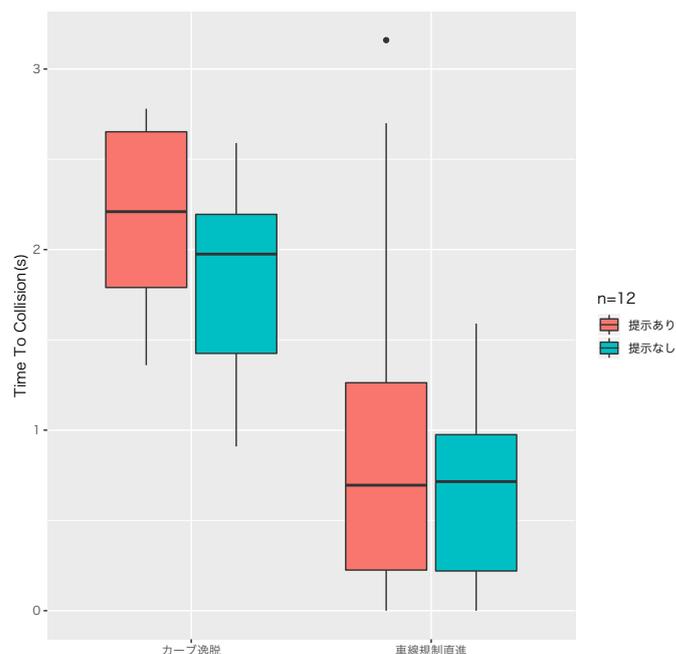


図 3: 介入行動の早さ

#### 4.4 実験結果

図 2 にアンケートの結果を示す。Wilcoxon の符号順位検定の結果、「自分が運転しているかのように感じた」かについてのみ有意差が得られ ( $p < .05$ )、提示あり条件が高かった。その他の項目については中央値の変化は仮説通りとなったものの、有意差はみられなかった。

試行 3 における TTC の値を図 3 に示す。カーブ逸脱の場面で中央値に差が見られ、提示あり条件の参加者の方が介入が早い傾向が見られたものの、有意差はみられなかった。介入行動に関するアンケートでは、車線規制区間直進の場面において、各グループ 12 人のうち、「自動運転車が避けるかどうか様子を見た」を選んだ参加者が提示あり条件では 4 人、提示なし条件では 1 人であった。

#### 4.5 考察

アンケートの結果から、バーチャルハンドの提示により、自動運転中においても「運転に関わっている」感覚が生起されることがわかった。自動運転中においてもドライバがシステムに任せきりにならず、監視などを行って積極的にシステムと関わることで、走行はより安全なものとなると考えられる。

一方その他の項目では有意差は認められず、運転動作そのものに対しての行為主体感が生起されなかった。実験において、はじめ参加者とそのアバタの動きは同期しているが、その後完全に同期しない時間が長時間続く。アバタの自律運動に対する行為主体感の研究も少ないため、短時間であれば生起されるかなど、今後詳細に検証していく必要がある。今回、身体所有感の生起には実際の手の動きとの同期のみ行ったが、他にもラバーハンド錯覚 [9] に代表されるように、触覚刺激を加えることも有効であることが知ら

れている。そのような工夫により自動運転中の行為主体感が向上するか、検討したい。

試行3では介入行動について比較した。カーブ逸脱場面ではバーチャルハンドの提示により介入が早くなる傾向が見られたが、参加者間の比較であるためサンプル数が少なく、さらなる検証が必要である。車線規制区間直進場面ではほとんど差が見られなかった。その後のアンケートにおいて、バーチャルハンド提示条件の参加者のうち4人が自動運転車が避けるか様子を見てから介入を行っていた。バーチャルハンドが提示されていることで、より自動運転の動きに注意が向き、このような行動をとった可能性がある。各介入場面での行動は個人差が大きいため、「介入を行ったか」だけでなく、視線や皮膚電位などを測ることで、各場面に對する詳細な反応を評価できると考えられる。

## 5. まとめと今後の展望

本研究では、自動運転車においてドライバーに対して行為主体感を生起させるため、バーチャルハンドの提示を提案した。検証実験の結果、バーチャルハンドの提示によって「運転に関わっている」というドライバーの知覚に一定の効果があることが示されたが、運転動作そのものに対する行為主体感の生起は認められなかった。身体所有感の生起方法や行為主体感の持続時間について今後検討する。短い時間で行為主体感の生起が確認された場合、定期的に実際の手とバーチャルハンドが同期することなどによって長時間の運転に対しても適用可能であると考えられる。

介入行動については、各場面で実験参加者ごとに対応が分かれ、コントローラによる入力のみでは評価が難しいことがわかった。衝突の危険が迫っているとわかった時の緊張を皮膚電位で測るなど、実際の行動以外での定量的評価を検討する。

## 謝辞

本研究においてご協力いただきました、トヨタ自動車、先進安全開発部の小野様、不破本様に深く感謝いたします。

## 参考文献

- [1] Christian Gold, Daniel Damböck, Lutz Lorenz, and Klaus Bengler. “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, pp. 1938–1942. SAGE Publications Sage CA: Los Angeles, CA, 2013.
- [2] Remo van der Heiden, Shamsi T Iqbal, and Christian P Janssen. Priming drivers before handover in semi-autonomous cars. In *Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 392–404. ACM, 2017.
- [3] Tove Helldin, Göran Falkman, Maria Riveiro, and Staffan Davidsson. Presenting system uncertainty in automotive uis for supporting trust calibration in autonomous driving. In *Proceedings of the 5th international conference on automotive user interfaces and interactive vehicular applications*, pp. 210–217. ACM, 2013.
- [4] Ioannis Politis, Stephen A Brewster, and Frank Pollick. Evaluating multimodal driver displays under varying situational urgency. In *Proceedings of the 32nd annual ACM conference on Human factors in computing systems*, pp. 4067–4076. ACM, 2014.
- [5] Frank Flemisch, Johann Kelsch, Christian Löper, Anna Schieben, Julian Schindler, and Matthias Heesen. Cooperative control and active interfaces for vehicle assistance and automation.
- [6] Sarah-Jayne Blakemore and Chris Frith. Self-awareness and action. *Current opinion in neurobiology*, Vol. 13, No. 2, pp. 219–224, 2003.
- [7] Domna Banakou and Mel Slater. Embodiment in a virtual body that speaks produces agency over the speaking but does not necessarily influence subsequent real speaking. *Scientific reports*, Vol. 7, No. 1, p. 14227, 2017.
- [8] Adam Tapal, Ela Oren, Reuven Dar, and Baruch Eitam. The sense of agency scale: A measure of consciously perceived control over one’s mind, body, and the immediate environment. *Frontiers in psychology*, Vol. 8, p. 1552, 2017.
- [9] Matthew Botvinick and Jonathan Cohen. Rubber hands ‘feel’ touch that eyes see. *Nature*, Vol. 391, No. 6669, p. 756, 1998.