

Pairdriver[®]自動運転のためのハプティクスを活用した
ステアリング協調制御フレームワーク*¹

Haptics-based Collaborative Steering Control Framework for Automated Driving

仲出知弘 T. NAKADE ロバート・フックス R. FUCHS
ハネス・ブローラー H. BLEULER ユルグ・シフマン J. SCHIFFMANN

Over-reliance on automation in transportation systems is known to be the cause of new types of accidents. JTEKT proposes a driver-oriented automation strategy to achieve collaborative steering that relies on three functionalities: interaction, arbitration, and inclusion. This article is a short version of a paper published last January in the journal Communications Engineering which is part of the Nature Portfolio.

Key Words: physical human-machine interaction, collaborative shared control, electric power steering, Advanced Driver Assistance System (ADAS), Automated Driving (AD)

1. はじめに

自動運転システムは、ロボットが人間の運転者の操作を代替することを目的に開発されてきた。過去数十年の開発における課題は、周辺環境を認識するためのセンサー開発と、それらを用いて車両を車線に沿って追従させ、車線からの逸脱を防止する制御機能を実装することであった。その中で、安全性の確保や、改定が繰り返される法規制に対応するために、運転者モニタリングシステム（把持／手放し、頭部／視線カメラなど）や自動運転システムと運転者の操舵権限の切り替えが検討されるようになった。このように、車両を自律型ロボットのように機能させるための開発が先行し、その後、運転者との相互作用が重要視されるようになった。車両の横方向の制御に関しては、多くの市販車で手動運転と自動運転を分離して切り替えるオーバーライド戦略が用いられている。オーバーライドするために必要なトルクのしきい値は、各 OEM の設計思想に基づいて設定される。設定

されるしきい値の大きさは異なるが、最終的に自動化が運転者の代わりに機能する“オーバーライド戦略”は、一緒に操舵することを意味する“運転支援”とは異なる印象を運転者に与える²⁾。結果として、レベル2に相当する ADAS 機能は、運転者の操作への関与を意味するエンゲージメントを損なうことなく運転負荷を軽減するという目的を達成できていない。操舵権限の切り替えによる不連続な操作は、運転者の誤操作や運転操作への関与と低下要因の一つになっている。

2. ヒューマンインザループ

“ヒューマンインザループ”という概念は、人間とロボットの相互作用において、法的説明責任を定義する安全メカニズムとして航空業界で提唱されたものである。“ヒューマンインザループ”とは、自動運転システム使用中の運転者が一定の状況認識能力を保持しており、結果的に自動運転システムに失陥が生じた際に適切に対応できることをさす比喩表現である。しかし、この概念は、運転者の操作が自動運転システムの追従経路にどのような影響を与えるかを連想させるものではなく、自動車業界においては自動運転と手動運転を明確に分離するオーバーライド戦略と解釈される。

* 1 本論文は、Nature Portfolio 運営のオンラインオープンアクセスジャーナル『Communications Engineering』に掲載された論文原稿¹⁾を基に作成した。

* 2 Pairdriver[®] は、株式会社ジェイテクトの商標です。

3. ループからチームへ

今日の市販車において、運転者モニタリングシステムは運転操作に対する運転者の注意力を維持することを目的に標準装備品になりつつある。しかし、万が一それらが故障した際の適切な安全動作は保証されていない。皮肉なことに自走運転レベルがあがり、人間がシステムに過度に依存する状況では新たな事故のリスクが生じる。オーバーライド戦略とは異なり、“チームング”は“二人は一人より優れている”という思想に基づく別のアプローチである。これは、自律とは分離や孤立ではなく、一貫したつながりや相互作用関係にあることを強調したものである³⁾。そこで、本報では、安全性と直感的な操作性の向上を目的に開発したハプティックシェアードコントロールについて紹介する。このコンセプトはよく乗馬に例えられる。騎手は手綱を通して自身が“どこに行きたいか”といった意思を馬に伝える。一方、馬は騎手の意図をくみ取りながら、自分で周辺環境を把握し、危険な場合には騎手から独立して自律的に安全の確保に努める。すなわち、ステアリングシステムは乗馬における手綱の役割を果たし、自動化システムと運転者は自律性を保ったうえで相互作用を持たせる必要がある。つまり、両者はお互いに見守り合うことができる親密で気の置けない友人のような関係性を築くことが理想的である。

4. 戦術・操作レベルにおけるステアリング制御

本報で提案の制御は“騎手と馬”の関係性を再現することで、運転者と自動運転システムによるシェアードコントロールを強化する。人間とロボットの物理的な相互

作用に関する先行研究結果を活用することで、“一体感のある運転者と自動運転システム”の開発を目指している。その実現手段として、図1に示すマルチレベルハプティックシェアードコントロール Pairdriver[®]*2を提案する。シェアードコントロールは人間同士のコラボレーションから着想を得ている。たとえば、人間同士が二人で協力して机を運ぶ共同作業を行う場合には、まず物理的な相互作用力を通して、リーダー・フォロワーなどの役割分担を行ったり、進むべき方向を交渉したりしながら、それぞれの意図を伝達する。これをロボット制御として実装し役割分担を実現するために、以下に示す4種類の相互作用タイプを使い分けることを提唱する。

- ・ Cooperation：二つのエージェントが共通の目標に対してタスクを実行し、目標を達成するためお互いが必要とされる関係。“Cooperation”の一部として定義される“Education”は一定のエンゲージメントを確保して新しい能力を獲得する際に重要になる。
- ・ Co-activity：相互作用する二つのエージェントが、お互いの動作を認識しないまま共通のタスクが成功する際に偶発的に起こる。
- ・ Collaboration：固定された役割分担を持たない関係。自身の操作を考慮しながらも相手の動作を尊重するように適応しながら機能する。
- ・ Competition：自身の操作を考慮しながら、相手の操作に拮抗するように仲裁を行う点で“Collaboration”とは対照的な関係として機能する。

人間の感覚運動制御(操舵目標と制御インピーダンス)を推定し、それに応じてロボットを適応させることで、選択された相互作用タイプを実現する。ハプティクスによるコミュニケーションが確立されると、各エージェン

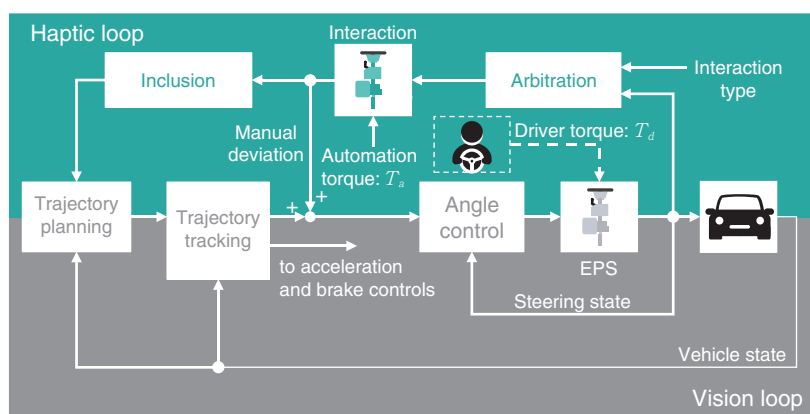


図1 提案制御概略図
Schematic structure of proposed control

トはそれに応じて動作を調整する。自動運転システムにおいては、道路形状や交通状況、運転者の状態に基づいて総合的に相互作用のタイプを決定する必要がある。相互作用の結果、生じる偏差が十分に大きい場合には、運転者の意図を自動運転システムが追従する目標軌跡に同化し、ルートを再計算することで一貫性のあるユーザーエクスペリエンスの提供が可能になる。

5. 相互作用, 仲裁戦略, 包括戦略

提案の制御コンセプトを実現するため、三つの機能を実装した。運転者はこれらの機能により、操舵トルクを入力することで、目標軌跡から横方向に車両を逸脱させることが可能になる。さらに、次の時点では、生成された一時的な逸脱を目標軌跡生成の演算アルゴリズムに組み込むことで、自動運転システムに対してトルク入力が必要としない恒久的な手動操舵介入を行うことが可能になる。

- ・ 相互作用 (図 1 : Interaction) : アドミッタンス制御⁴⁾を用いることで、運転者と自動運転システム間での操舵タスクの共有を可能にする。自動運転システムの停止や追従性の悪化がなく、運転者の手動操舵介入により車両を自動運転システムの目標軌跡から逸脱させることを可能にする。
- ・ 仲裁戦略 (図 1 : Arbitration) : 車両の横方向の制御を共有する際の運転者 - 自動運転システムの役割を決定する。具体的には、相互作用のタイプに基づいて自動運転システムの制御変数が設計される。たとえば、運転者と自動運転システムがともに車線の中央に車両を追従させるように機能する場合、相互作用のタイプは“Collaboration”に設定される。運転者が車両の車線維持に対して責任を負う一方で、自動運転システムが車線逸脱の防止のために機能する場合で、さらに、車両が車線境界に近づき過ぎた場合には、相互作用タイプは“Competition”が選択される。これらの例から、相互作用のタイプは、機能している ADAS や車両の位置、交通状況、システムが認識した運転者の状況などさまざまな要素を総合的に判断して動的に変化させる必要がある。
- ・ 包括戦略 : 運転者の介入に応じて自動運転システムの目標軌跡を適応させる機能である。自動運転システムにより計算された計画軌跡に対して、手動介入により生じた車両横位置の目標軌跡からの逸脱が十分に大

きい場合、自動運転システムは、運転者の手動操舵介入に応じて次の時点における目標軌跡を再計算することで、運転者による補正操舵の意図を受け入れる。

これら三つの機能を用いることで、マルチレベルハプティックシェアードコントロールが構成される。相互作用と仲裁戦略は ADAS の操舵反力トルクを生成するために運用レベルに配置され、包括戦略はより上位の軌跡を計画する戦術レベルで実施される。これにより運転者主導の経路の変更が可能となる。さらに、この変更された軌跡を追従するように最終的に車速を調整することで、ステアリング以外のすべての車両のアクチュエーター（アクセル、ブレーキ）においても一貫した適応が可能になる。主としてカメラやセンサーで認識した視覚情報により機能する自動運転車両は、触覚情報を介して運転者の操舵意図を取り込むことで安全性の観点で強化される。運転者は自動運転システムに取って代わられることも排除されることもなく、むしろ信頼関係の構築に貢献することが可能になる。提案する制御フレームワークの利点を以下にまとめる。

- ・ 運転者が運転タスクに関与する可能性のあるすべての自動化レベル 0 - 4 に対応が可能なこと。
- ・ ADAS 機能を一つの制御基盤に体系化でき、さらにシェアードコントロール（オーバーライドフリー）に基づく連続的な運転支援機能を提供できること。
- ・ 車両運動と運転者の操舵意図の両方を考慮した多目的な要求を満たす ADAS 制御が可能なこと。

6. 実車検証

本章では、提案する制御フレームワークを試験車両 (図 2 参照) に実装した結果を示す。試験車両はクルーズコントロールと高精度 GNSS (Global Navigation Satellite System) からの自車位置のフィードバックにより、あらかじめ設定された軌跡 (基準軌跡) を時速 60km で追従する。走行シナリオは 3 車線の 1.5km の直進コースでのダブルレーンチェンジとした。自動運転システムが追従する基準軌跡は中央車線の中心に設定され、スタンレー軌跡追従制御⁵⁾を用いてこの基準軌道を追従するように制御した。運転者は自由に操舵介入を行うことができ、基準軌跡から車両位置を逸脱させることが可能である。

提案するマルチレベルハプティックシェアードコントロールの実車評価結果を図 3, 図 4 に示す。評価では仲

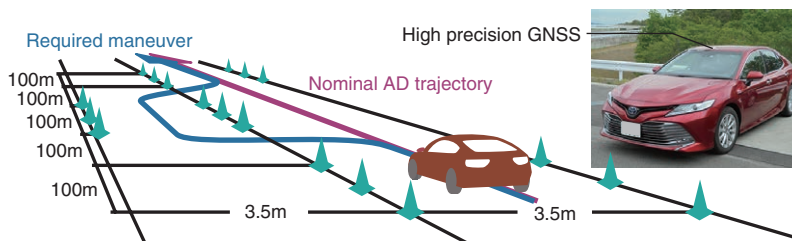


図2 実車試験概要
Overview of prototype vehicle test

裁ルールにしたがって設定された相互作用タイプのもとで自動運転システムの制御量が決定される。まず，“Collaboration”モード（図3参照）では、運転者と自動運転システムの制御量が相互補完的に付与されるため、観測される操舵トルクのピークは相対的に低くなる。また、運転者の操作介入により誘発された横方向の位置偏差は、包括戦略を介して軌跡計画に伝播される。その結果、自動運転システムが生成する運転者への反カトルクが減退する。さらに、車両は運転者が手放しでも新たな目標軌跡である左右の車線中央に沿って走行する。“Competition”モード（図4参照）では自動運転システムが生成する反カトルクは運転者の操舵介入に比例して大きくなる。運転者は車両を基準軌跡から逸脱させるために十分なトルクを入力することがない。その結果、反カトルクはステアリングアクチュエーターの最大容量に達する。本モードでは、手動操舵介入による軌跡が更新されることがなく、車両は基準の軌跡を追従することが確認できる。

運転者に伝達されるハプティクス情報は2段階で生成される。第1段階では、操舵介入時に設定した相互作用タイプに応じた操舵反力を感じる。操舵介入により生

じる車両の横方向の偏差が十分に大きい場合には、操作量に応じて目標軌跡が更新されるように包括戦略が動作する。第2段階では、包括戦略の動作結果として相互作用トルクはあるところで飽和するので、運転者は自動化システムが操舵介入を受け入れたことを操舵反力として感じることができる。このように段階に基づいてハプティクス情報を掲示することで、運転者は自動運転システムの意図を直感的に感じることができる。

7. 定量評価

本章では、提案するマルチレベルハプティックシェアードコントロールの有効性を検証するため、複数の個人を対象とした評価結果を示す。平均年齢35歳（29～44歳）の5名の参加者が、図2に示す試験車両を用いた運転評価に参加した。参加者は全員運転経験者であり、年間の平均走行距離は5,800kmであった。参加者は四つの異なる制御モード（表1参照）をランダムに運転し、図2に示すダブルレーンチェンジを行った。すべての被験者は各制御モードを2回ずつ運転し、その平均値を用いて評価を行った。

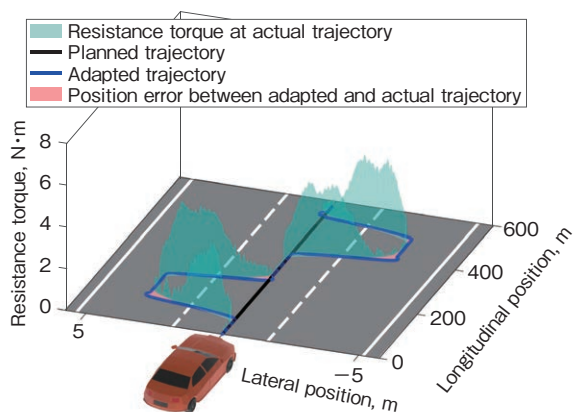


図3 “Collaboration”モード試験結果
Experimental result of Collaboration mode

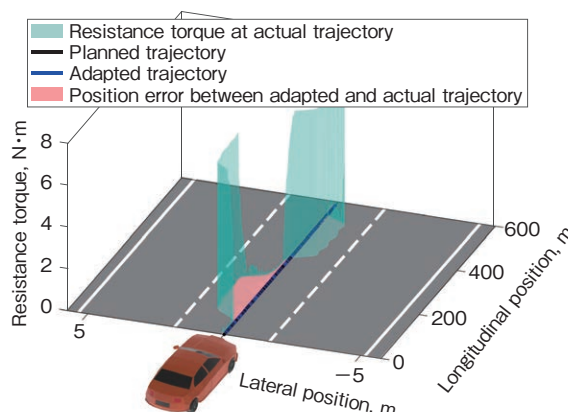


図4 “Competition”モード試験結果
Experimental result of Competition mode

表1 定量評価試験モード
Control modes for quantitative study

Mode no.	仲裁戦略	包括戦略
1	Co-activity	Inactive
2	Collaboration	Inactive
3	Co-activity	Active
4	Collaboration	Active

協調操舵度合を定量的に表すためにドライバーエフォート (DrE) とステアリングエントロピー (StE) の二つの指標を提案する。DrE はダブルレーンチェンジシナリオ中に運転者が入力したトルクの時間積分値、StE は操舵角度の滑らかさを表す指標であり、操縦性の評価に一般的に利用されるものである¹⁾。DrE と StE がともに低い制御モードは運転者の負担が少なく、よりスムーズに操作できる制御モードといえる。制御モード間の統計的な有意差は、一元配置分散分析 (ANOVA) を用いて分析し、特定の制御モード間の比較は対応あり検定を用いて実施した。

各制御モードに対して得られた結果を図5に示す。図5(a)はANOVAの結果よりモード1, 2, 3, 4の順に、DrEが有意に減少していることがわかる ($p < 0.001$)。特にモード1, 2とモード3, 4では、DrEの値が大きく異なる。これは包括戦略の動作によって、車線変更時に継続的な介入トルクが不要になるように、自動運転システムの目標軌道が運転者の意図に沿うように適応された結果である。

さらに、図5(b)では、包括戦略の有無に関係なく、仲裁戦略により、StEの平均値が低下している。すなわち、よりスムーズな操作が行われたことを示している。図5(b)に示すStEは、図5(a)のDrEに比べて、参加者間のばらつきが大きく、この傾向は特にモード1, 2で顕著であることが分かる。また、参加者1, 2をグル

ープ1、それ以外の参加者をグループ2として、二つのグループに分類できる。グループ1の参加者はグループ2の参加者に比べて、StEが小さく、DrEが大きい(図5(c), (d)参照)。これらの傾向からグループ1の参加者は滑らかな操作を実現するためにより多くの労力を費やし、グループ2の参加者は操作の滑らかさを犠牲にして少ないトルク入力で操舵していると推察される。このような運転者の行動のばらつきから、モード1, 2に比べてモード3, 4は幅広い運転者にとって受容率の高い制御である可能性がある。これら二つの評価基準 (DrE, StE) を総合的に分析した結果、仲裁戦略と包括戦略を有する本提案フレームワークは、幅広い運転者にとって少ない労力でスムーズな操作を促すことが示唆された。

8. おわりに

本報では、運転者中心の自動運転を実現するための協調操舵制御の概念を示した。提案制御では、あらかじめ設定された相互作用のタイプに基づいて、運転者は自動化システムからの操舵反力を受ける。また、運転者の操舵意図は自動運転システムの軌跡計画に反映できる。運転者の操舵介入は自動運転制御の操作レベルと戦略レベルの両方に影響するため、運転者は直感的なハプティクスコミュニケーションを通してシステムの意図を理解できる。提案制御フレームワークを個々のADAS機能に適用することで、部分的な自動運転システムでは運転者に操作への関与を促し、より高いレベルの自動運転システムでは、広範囲の運転状況において自律性の確保と運転者の操舵意図の反映を両立するシステムを提供できるようになる可能性がある。

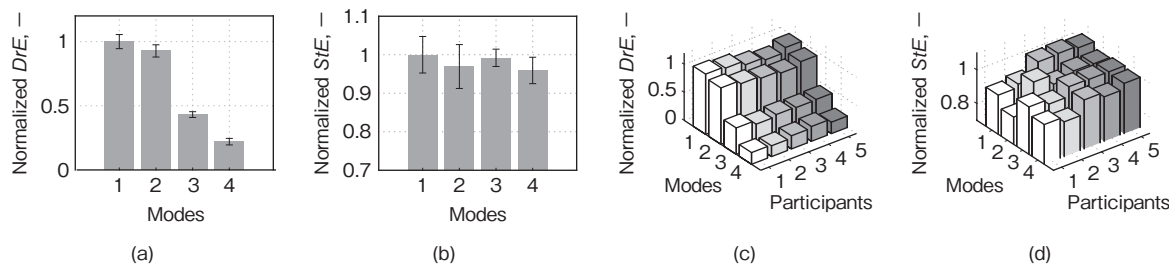


図5 被験者試験結果
Result of individual driver assessment

参考文献

- 1) T. Nakade, R. Fuchs, H. Bleuler, J. Schiffmann: Haptics based multi-level collaborative steering control for automated driving, Commun Eng 2, 2 (2023). <https://doi.org/10.1038/s44172-022-00051-2>
- 2) R. Fuchs, Y. Sakai, T. Tamura: Preventing driver misuse with proactive ADAS, 27th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles, Yokohama, Japan (2023).
- 3) M. I. Ganesh: The ironies of autonomy, Humanit Soc Sci Commun 7, 157 (2020). <https://doi.org/10.1057/s41599-020-00646-0>
- 4) N. Shoji, M. Yoshida, J. Linnhoff, R. Fuchs: Sharing steering control for safe HMI in automated vehicles, ATZ electronics worldwide, Volume 14, (2019).
- 5) S. Dominguez, A. Ali, G. Garcia, P. Martinet: Comparison of lateral controllers for autonomous vehicle: experimental results, In 2016 IEEE 19th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), 1418-1423 (2016).

筆者



仲出知弘^{*}
T. NAKADE



ロバート・フックス^{*}
R. FUCHS



ハネス・プロイラー^{**}
H. BLEULER



ユルグ・シフマン^{***}
J. SCHIFFMANN

^{*} 研究開発本部 システム創生研究部

^{**} スイス連邦工科大学ローザンヌ校 (EPFL)
ロボットシステム研究室

^{***} スイス連邦工科大学ローザンヌ校 (EPFL)
応用機械設計研究室 (LAMD)