

[研究助成 (A)]

データ駆動型運転知能と触覚的シェアードコントロールの
融合に基づく人と機械の協調Human-machine collaboration based on the integration of
data-driven driving intelligence and haptic shared control

2211013



研究代表者

筑波大学 システム情報系

助 教

齊 藤 裕 一

[研究の目的]

モビリティの主な手段は、1900年頃、馬車から自動車に移ったが、現時点において継承されていないものが主に2つある。(1) 人の指示がなくとも馬は崖から飛び降りない馬の安全本能と知能と、また(2) 乗り手と馬の双方の意志または環境の文脈を理解し合うなど、双方がインタラクティブに対応する能力である。現在、運転の知能は著しく進歩しつつあるが、双方が対話・インタラクティブに対応する能力は損なわれたままである。本研究の目的は、ニアミス大規模データベースを活用した危険予測知識の獲得を通じて、走行環境の文脈特徴から予測される潜在危険度を推定する学習(AI)モデルの基盤(サーバー空間の運転知能)を確立し、それをフィジカル空間で文脈センシング可能な運転支援系に内蔵し(危険度を触覚・視覚情報に変換し)、データ駆動型運転知能(AI)と触

覚的シェアードコントロールの融合に基づく人と機械の協調を実現することである(図1参照)。

[研究の内容、成果]

本課題の実施事項は、つぎの通りである。

(I) 危険度推定に基づく目標車両速度・軌跡生成手法の構築

16万件超のニアミス事象を含むドライブレコーダDBと機械学習を駆使して、状況特徴づける情報に応じて推奨速度と危険速度を算出できるドライバモデルを構築した。本課題では、歩行者／自転車の飛び出し等、人間ドライバ(あるいは機械システム)にとって危険回避が困難である場面として死角を含む無信号交差点通過、また駐車・停止車両追い越し場面のニアミス事象をDBから抽出した。つぎに、その潜在危険(ハザードが顕在化していない)の下での安全マージンの指標を定量化することによって、(i) ドライバにとって受け入れ可能な結果と(ii) そうでない結果に分類することに成功している。受け入れ可能な結果であったデータのみを学習することで、直面している状況のもとでの推奨速度を算出でき(図2参照)、受け入れ不可能な結果であったデータのみを学習することで、危険速度を算出できる。

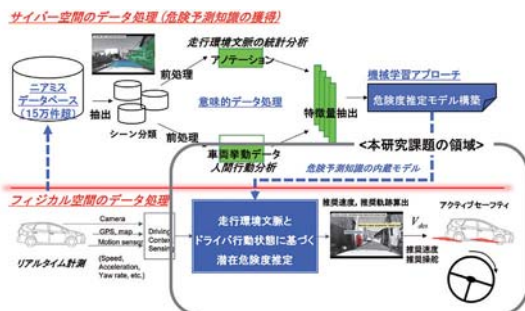


図1 本研究課題の全体像

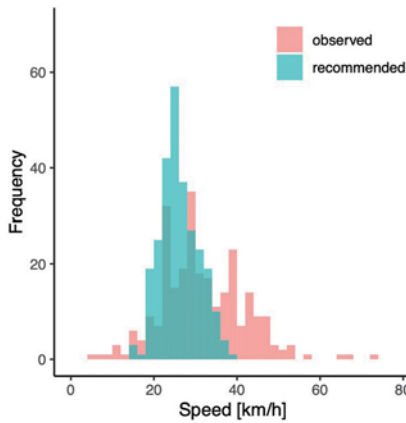


図2 推奨速度と実速度の比較

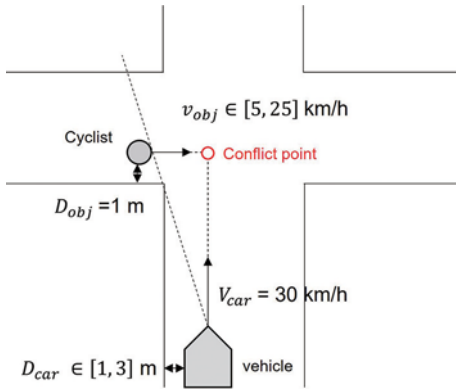


図3 想定シナリオの記述

つぎに、死角を含む無信号交差点を対象に、ドライバーではなく、歩行者／自転車の行動に視点を移した。横断してくる対象が自動車への衝突を回避するうえでの安全マージン（研究代表者が独自に提案しているセーフティクッションタイムを使用）を新規に算出することで、交差点での自車の走行横位置によってどの程度の予防安全性が向上するかについての検討を実施した。

本課題では、図3で示されるように、自車速度 30 km/h のもとで道路の左端から $D_{car} \in [1, 3]$ の側方間隔を確保しながら交差点に接近するなかで、交差点左の死角から自転車が速度 $V_{obj} \in [5, 15]$ で横断することを仮定した。 D_{car} と V_{obj} は、パラメータであり、そのシナリオ空間のもとでの自転車が自動車への衝突を回避するうえでの安全マージン（式1参照）を Matlab を用いてシミュレーションした。

$$SCT_{obj} = TTC_{obj} + \frac{V_{obj}}{2a} \quad (1)$$

SCT_{obj} は、「自転車が自動車への衝突を回避するうえでの時間余裕」を意味し、 TTC_{obj} は、「自転車がはじめて車両を認識できる時刻において、自転車と衝突予測地点（conflict point）の間の残り距離を自転車の速度（定速を仮定）で除した値」であり、これは衝突可能性を時間（衝突余裕時間）で表現したものである。右辺の第二項は、「自転車が制動を開始してから速度ゼロに達するまでの制動時間」を意味する。ここで、 a は約 -4 m/s^2 を仮定する。したがって、セーフティクッションタイム（ SCT_{obj} ）は、衝突余裕時間（ TTC_{obj} ）から制動時間を差し引いた時間を意味し、ニアミスの時間的切迫度を表現したものである。セーフティクッションタイム（ SCT_{obj} ）の算出結果は、図4に示される。自車速度 30 km/h のもとで道路の左端から $D_{car} = 1 \text{ m}$ の側方間隔を維持したと想定し、多様な飛び出し速度（ $V_{obj} \in [5, 25]$ ）を考慮するとき、セーフティクッションタイムのヒストグラム（分布）を得ることができる。横軸は、 SCT_{obj} を意味し、縦軸は、その件数（度数）を意味し、また 0.7 s の位置に破線で補助線を引いている。人の単純反応時間は、一般に 0.7 s ほどであることから、その時間余裕を下回っているイベントは、もはや自転車にとって衝突回避が困難であることを反映している。数値計算の結果、96.5% のイベントにおいて、自転車に許された時間余裕が 0.7 s を下回っている。また

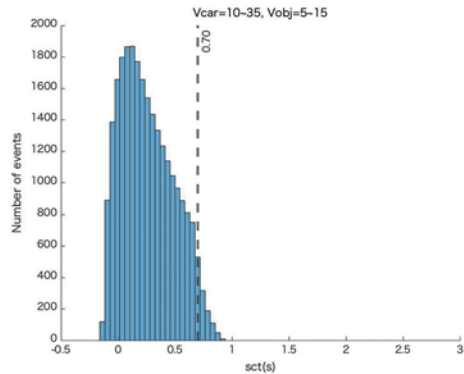


図4 セーフティクッションの分布

表1 側方間隔の確保が自転車の時間余裕に与える効果

Ratio [%]	D_{car} [m]		
	1	2	3
	96.5	60.0	29.9

た、走行車両が道路の左端から $D_{car}=1$ m の側方間隔を確保した場合に加えて、2 m また 3 m の側方間隔を確保した場合の自転車の時間余裕を同様に計算した結果は、表1に示される。道路の左端から $D_{car}=2$ m の側方間隔を確保する場合、60% のイベントのもとで自転車に許された時間余裕が 0.7 s を下回っている。また $D_{car}=3$ m の側方間隔を確保する場合、29.9% のイベントのもとで自転車に許された時間余裕が 0.7 s を下回っていることがわかる。このように、走行車両が防衛的に横方向の側方間隔を確保することで、自転車の時間余裕を十分に確保できる。本研究課題では、自転車の時間余裕をセイフティクッションタイムで表現し、車両の側方間隔（目標車両軌跡）が自転車の時間余裕に与える効果を明らかにした。

(2) 知識ベースの人の意思決定を支援するシェアードコントロール技術の開発

状況に応じて、どの程度の側方間隔（ D_{car} ）を確保すればよいか。飛び出す対象は、車両、自転車、歩行者が存在し、自転車や歩行者の行動に関するルールベース予測は困難である。本課題では、16 万件超のニアミス事象を含むドライブレコーダ DB に収録されるすべての自転車飛び出し場面を抽出し、自転車の安全マージンの指標（ SCT_{obj} ）を定量化することによって、(i) ドライバにとって受け入れ可能な結果と、(ii) そうでない結果に分類し、推奨走行軌跡（ D_{car} ）を生成する機械学習モデルを新規に構築した。具体的には、その状況の特徴づける情報の集合を走行環境文脈と定義し、文脈情報と速度データを説明変数と定め、走行軌跡（ D_{car} ）を目的変数とした重回帰モデル（線形モデル）を構築した。モデル構築のためのデータと検証のためのデータに分割し、一個抜き交

差検証を行った結果、モデルの説明度を表現する決定係数は、0.26 であった。この値は、決して高いものではないが、ヒヤリハットデータで駆動するシステムにおいて推奨走行軌跡（ D_{car} ）を生成できるポテンシャルを確認できたことが成果の一つである。

本研究課題では、構築したデータ駆動運転知能システム（機械学習モデル）を使用し、ドライバを推奨走行軌跡に触覚的に誘導する触覚的シェアードコントロールを開発した。触覚的フィードバックの創り込みが可能な操作端末を備えたシミュレータの整備計画において、Forum 8 社製の VR 環境（UC-win/road ソフトウェア）に車両運動シミュレーション（CarMaker）を連携させる Matlab/Simulink 開発環境を整備した。なお、この整備、直接経費のすべての予算を備品・設備費外注費に計上した。Matlab/Simulink 開発環境の概要図は、図5に示され、また整備したドライビングシミュレータの外観は、図6に示される。本研究

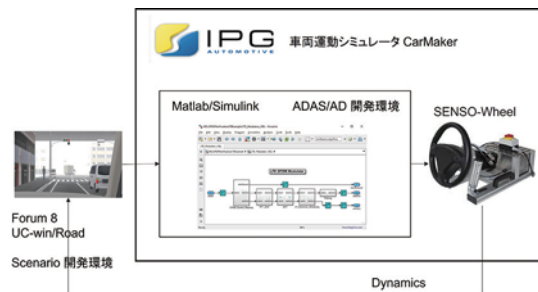


図5 開発環境の整備



図6 シミュレータの整備・構築

課題では、人と機械の両者が制御権限を共有しながら、トルク制御に基づいて車両を推奨走行軌跡に誘導できることを確認している。

(3) リスクの回避と受容を両立できる支援インタフェースの開発

運転経験の浅いドライバは、スキルまたはルールベースの意思決定は容易に可能であるが、知識ベースの意思決定は容易でない。過去に人が経験した知識の学習から獲得するデータ駆動型運転知能は、知識ベースの人の意思決定を支援する。「その知識情報は、如何にしてドライバに伝達すればよいか」という問いに対して、操作レベルでの協調の実現を図るシェアードコントロールのみでは、十分に課題解決に至らない可能性が残る。そこで、本研究課題では、データベース／機械学習から得た知識情報を可視化するインタフェースの設計を行った。機械学習の結果は、過去の経験から「確からしい」情報を推論するものであり、推論（ハザード、安全マージン、リスク）の結果を如何に可視化し、伝達の媒体は何を採用すればよいかについて検討した。

本研究課題において、つぎの情報可視化手法を構築した。

1. データ駆動に基づく推奨速度の提示
2. データ駆動に基づく推奨走行軌跡の提示
3. データ駆動に基づく危険速度の提示

1と2は、ドライバの安全マージンを増加させることを狙うものであり、3は、過去のデータに基づき危険速度を提示することで、通常からの逸脱を防止することを狙ったものである。これらは、整備した Forum8 社製ドライビングシミュレータの HUD（ヘッドアップディスプレイ）の機能を利用して、聴覚的アラートと視覚情報を組み合わせたシステムを新規に開発した。

つぎに、経験の浅い運転者は、ハザードの予測が難しいこと、Task demands（タスクの要求度）を過小に見積もること、Capability（運

転に要する能力、処理速度、応答時間等）を過大に見積もることから不適切なリスク認知の形成と安全マージンの確保に失敗しうる。死角を含む無信号交差点において、ハザードの予測とそれに応じた安全マージンの確保は期待されるが、ハザード予測、Capability と Task demands、また速度決定に関する定量的な検討は十分でない。本研究課題では、構築した情報可視化手法の有効性評価に向けて、まずハザード予測と運転者の主観的な安全マージンの度合いを測るテストを構築し、ドライビングシミュレータの行動データと参照することで、それらのスキルが速度決定に与える影響を調査した。要点としては、つぎの通りである。

- a) ハザード予測のスキルを測るテストの開発
- b) 主観的な安全マージンを測るテストの開発
- c) ドライビングシミュレータ実験の実施

ハザード予測のスキルを測るテストの開発において、ヒヤリハットデータベース（HHDB）の映像を模擬した CG 映像を作成し、ハザード予測テストを新規に開発した。ハザード予測テストは、ある交通シーンの運転者視点の映像をニアミス事象が発生する直前で黒い画面に切り替え、その後、「次にどこで何が起こるか」という予測を回答させる手法である。黒い画面に切り替える方式は、状況認識を評価する SAGAT（Situation Awareness Global Assessment Technique）と同様である。

主観的な安全マージンを測るテストの開発において、Fuller et al. (2000) の研究を参考に、主観的な安全マージンの度合いを測るテストを独自に構築した。このテストは、異なる一定速度（10-40 km/h, 5 km/h 刻み）の下でのある交通シーンの運転者視点の映像を用いて、交差点を通過する直前でその映像を停止させ、そのときの運転タスクの難易度を 1-10 のスケールで回答してもらう手法である。シーンは、HHDB に収録されたヒヤリハット場面であり、駐車車両の存在によって死角を含む無信号交差点への接近であった。

経験豊富な運転者（免許取得後 10 年以上、年平均走行距離 10,000 km 以上、事故歴が 2 回未満、40 歳以下）の 16 名（男性 6 名、女性 10 名）と運転経験が浅い運転者（免許取得後 1 年以内、総合走行距離 3,000 km 以内）の 13 名（男性 8 名、女性 5 名）を募集し、構築したテスト手法の検証と整備したドライビングシミュレータを用いて実験参加者の運転行動データを収集した。なお、本実験は、ハザード予測テストと主観的な安全マージンの度合を測るテストを同日に行い、それらの 2 週間後以降にシミュレータ実験を行った。成果報告書では、得られた結果の一部を掲載したい。

ハザード予測テストにおいて、経験豊富な運転者の方が経験の浅い運転者より有意に点数が高く、既往研究の調査（e.g., Crundall, 2016）と同様の結果を得ている。

図 7 は、運転タスクの難易度の回答結果である。オレンジ色が運転経験の浅い参加者、また青色が運転経験が豊富な参加者を意味し、各々の走行速度のもとでの見通しの悪い交差点通過時におけるタスクの難易度を示している。運転タスクの難易度とは、見積もった Task demand と capability の間の差を意味し、そのことは主観的な安全マージンの度合いを反映したものである。主観的な安全マージンを測るテストの開発は、Fuller et al. (2000) の研究を参考にしたものであるが、ヒヤリハットデータベース（HHDB）の映像を模擬した CG 映像においても、同様に計測できることを確認している。

ドライビングシミュレータ実験の結果におい

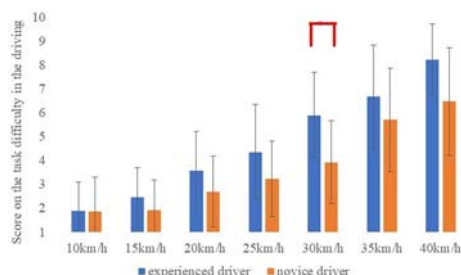


図 7 運転タスクの難易度

て、経験豊富な運転者は、経験の浅い運転者より客観的な安全マージンを大きく確保する傾向（走行速度を下げる）にあった。主観的な安全マージン（タスクの難しさ）を測るテストの結果においも、運転経験の浅い運転者は、豊富なものと比較して、主観的な難しさを低く回答する傾向であり、このことは、運転経験の浅い運転者は、主に、Task demands を低く見積もる傾向にあることを示唆した結果である。本研究課題では、運転者のハザード予測とリスク認知のスキルが無信号交差点通過時の速度決定に与える影響を明らかにし、この成果は、自動車技術会関東支部学術研究講演会（2022. 3. 15）でベストペーパー賞を受賞している。

[今後の研究の方向、課題]

- 本研究では、横断してくる対象が自動車への衝突を回避するうえでの安全マージンを算出することで、自車走行横位置が安全性向上へ与える効果を示した。これに加えて、データ駆動で推奨走行軌跡を生成する手法を構築し、横方向の安全マージンを確保するシェアードコントロールを新規に開発した。今後、経験の浅い参加者を募集し、その有効性のさらなる検証を推進していく。
- 本研究では、情報可視化手法を新規に開発した。データ駆動に基づく推奨速度、危険速度等の情報可視化であり、整備したシミュレータに実装した。今後、a) と同様に、多くの参加者パネルを収集していき、統計的にその効果を評価していく。

[成果の発表、論文等]

- Yuichi Saito, Fumio Sugaya, Shintaro Inoue, Pongsathorn Raksincharensak, Hideo Inoue, A Context-Aware Driver Model for Determining Recommended Speed in Blind Intersection Situations, Accident Analysis and Prevention, Vol. 163, 106447, 2021.
- Yuichi Saito, Fumio Sugaya, Shintaro Inoue,

- Pongsathorn Raksincharoensak, Hideo Inoue, Context-Sensitive Driver Model for Determining Recommended Speed in Intersection Driving Scenarios, Proceedings of the 6th International Symposium on Future Active Safety Technology towards Zero-Traffic Accident, 20219046, 6 pages, 2021.
3. Yuichi Saito, Hussam Muslim, Makoto Itoh, Design of Haptic Protection with an Adaptive Level of Authority Based on Risk Indicators under Hands-on Partial Driving Automation, Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, pp.1613-1618, October 17-20, 2021.
4. 高地鳳真, 齊藤裕一, 伊藤誠, 内田信行, 運転者のハザード予測とリスク認知のスキルが無信号交差点通過時の速度決定に与える影響, 自動車技術会関東支部学術研究講演会, 6 pages, Online, 2022.