

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 8 日現在

機関番号：12605

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2017

課題番号：16K18049

研究課題名(和文) 潜在リスク環境での状況認識強化と予見的安全制御のためのシェアードコントロール

研究課題名(英文) Shared control system for attaining situation awareness and active safety control in latent risk environments

研究代表者

齊藤 裕一 (Saito, Yuichi)

東京農工大学・工学(系)研究科(研究院)・特任助教

研究者番号：90770470

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、自動車運転時における潜在リスクの予測フェーズを限りある人の能力を補完する運転支援機構に導入し、潜在リスク予測に基づいて人と機械が制御権限を共有しながら安全制御を効果的に継続できるシェアードコントロールを構築した。ヒヤリハットデータ分析を通じて、死角からの歩行者飛び出し事象の数理モデルの構築、ならびに潜在リスク予測技術の開発を行った。またワンペダル走行モードと触覚的フォースフィードバック機能を兼備するアクティブペダルの構築を通じて、危険予測運転を含む前後方向タスクにおける人と機械のインタラクションの機会を創出するだけでなく、継続的に人の能力を補完するシェアードコントロールを開発した。

研究成果の概要(英文)：This study focused on the design of a shared control for inducing risk-predictive driving under a potentially hazardous situation for a pedestrian who crosses a road from the driver's blind spots. The aim was to develop a system that would continuously cooperate with the driver in leading the normative speed. The calculation method of the normative speed was developed based on construction of worst-case scenario through near-miss incident analysis. The methodologies of shared control to combine the algorithm of the haptic feedback loop with the functionality of the one-pedal driving mode interface were also developed.

研究分野：知能機械学・機械システム

キーワード：ヒューマンマシンシステム 潜在リスク 予防安全

1. 研究開始当初の背景

人と機械の両者が自動車運転における制御権限を共有して特定の操作を実行するシェアードコントロールは、ステアリング、またはアクセルペダルを通じて、(1) 人が連続的なフィードバックを受けること、(2) 人が制御ループ内に常に留まることから、人と機械の意図の対立、オートメーション・サブライズ等、人と高度技術のミスマッチの解決を図る手段として期待される。人と機械が制御権限を共有する形態は、能力伸展、抑止、負担軽減、タスク分割の4つに大別できる。既存のシェアードコントロールでは、(1) 人の行為に機械が力を添える操舵回避：能力伸展、(2) 不適切な人の行為を機械が抑止する操舵プロテクション：抑止、(3) 人の操舵の一部を補う車線維持：負担軽減が実現している。しかし、平穏時と緊急時の支援が個別に検討されるにとどまり、一連の運転行動にて常に相互が「人(または機械)がいま何をしているのか」を認識しながら制御実行を継続することを実現できていない。その背後には、「機械が人を知る、人が機械を知る技術の難しさ」があるとともに、「平時と緊急時の支援の円滑な接続がいかんして可能であるか」という課題が解決されていない。

2. 研究の目的

本研究では、自動車運転時における潜在リスクの予測フェーズを「限りある人の能力を補完する運転支援構造」に導入し、潜在リスク予測に基づいて「人と機械が制御権限を共有しながら安全制御を効果的に継続できるシェアードコントロール」の開発を目的とする。人と機械の能力には限界があることから、相互が (i) リスクが上昇しないように保つ、(ii) 潜在的にリスクが生じた際に早期に元のレベルに戻す、また (iii) 緊急時に機械が自律的な安全制御を図ることで、潜在リスクをマネジメント可能とする安全制御と状況認識強化の基盤技術構築を目指す。

3. 研究の方法

本研究では、次の項目に分けてそれぞれ研究を推進した。

(1) 潜在リスクシナリオの解析

東京農工大学が保有するヒヤリハットデータベースを使用し、潜在リスクシナリオ場面でのドライバ行動を解析した。ヒヤリハットデータは、事故・ニアミスが生じた時刻から測って過去 10 秒間の走行環境文脈(アノテーション)、また運転行動データを有する。本研究では、潜在リスクを含むシナリオ(歩行者、自転車、駐車車両、ブライントコーナー等)のうち、駐車車両、またブライントコーナーの背後の死角から歩行者が急横断するイベントの約 5300 件のデータを抽出した。また、走行環境文脈から予測される潜在的危険度と運転行動の評価、すなわち運転文脈と人と意図・行動の間のミスマッチの予測(危

険度推定)を行う機械学習モデルを構築した。さらに、機械学習アプローチに基づく危険度推定の結果を通じて適正速度を算出する規範ドライバモデルを提案した。

(2) 潜在リスク予測技術の開発

本研究では、「仮想歩行者が飛び出した」と仮定のもと、既存の衝突回避ブレーキが作動したとしても衝突が避けられない、すなわち仮想歩行者との衝突速度を「潜在リスク」として定義することによって、潜在リスクに物理的な意味を持たせた衝突速度フィールドを構築した。仮想環境上で、人・自転車の飛び出し、急な進路変更、横断等の「予想されるリスク」を定量的に評価可能なことを検証した。また、潜在リスク(仮想歩行者との衝突速度)を 3 次元空間に可視化する手法を提案した。

(3) 状況適応的機能配分支援の設計・評価

本研究では、ドライビングシミュレータ上に、仮想歩行者が飛び出したとしても衝突回避可能である速度へ追従を行うためのペダル反力提示系(アクティブペダル)を構築した。また、駐車車両背後の死角から「歩行者が飛び出すかもしれない場面」を対象に、潜在リスク予測ドライバモデルに基づくブレーキ制御支援システムを構築した。しかしながら、潜在リスク場面は、あくまで「歩行者が急に飛び出すかもしれない」等、現実にリスクが顕在化するか否かは不確実である。ゆえに、(i) 機械の判断で早期に安全制御を実行することは許容されるのか、または (ii) 人はその機械の決定を受け入れられるのかは明確ではない。本研究では、これらの間に回答するために、ドライビングシミュレータを用いて検証した。

(4) シェアードコントロールの設計・評価

状況適応的機能配分は、(1) 緊急時に機能再配分を行うクリティカルイベントロジックと、(2) モニタリングに基づき機能再配分を行う測定ベースロジックに大別できる。しかし、潜在リスクシナリオは街中の至る所に存在し、機械が積極的に表に顔を出す場合、機能再配分の機会が増えることから、人が状況適応的機能配分に対応できない可能性がある。結果として、機能再配分の機会増加は、「自動化システムのわかりづらさ」をもたらし、システムに対する人のアダプテーションに期待しなければならない可能性がある。

本研究では、常に制御ループ内に人を留めることを目的とした「アクティブペダルを用いた触覚的シェアードコントロール」を構築した。具体的には、(1) 加速・定常・減速の自動車運転の前後方向タスクで要求されるペダルストローク開度を3つの領域に分割した「ワンペダル走行モード」を新規に提案し、(2) アクセルペダル反力による「ハプティックフィードバックループ」をワンペダル

走行モードに結合することによって、「危険予測運転」を含む前後方向タスクにおける人間と知能機械の間にインタラクションの機会を創出するシェアードコントロール（触覚を通じて常に制御ループ内に人を留める支援方策）を開発した。さらに、(3)アクティブペダルの反力支援の強さを潜在リスクの度合いに応じて動的に変更する stiffness feedback の支援方策、また人間機械系を具体化するだけでなく、(4)ドライビングシミュレータ環境に、提案システムを実装することで、認知工学的にシステムの有効性を検証した。

4. 研究成果

(1) 潜在リスクシナリオの解析

本研究では、データベースから抽出した「死角が関与した対歩行者ヒヤリハットデータ」を用いて、走行環境文脈と運転行動状態に基づく危険度推定モデルを構築した。具体的には、つぎの成果を得た。

- ドライバと歩行者の両者の間で形成されるニアミス事象に対する客観的なヒヤリハットレベル（時間的切迫度）は、セーフティクッションタイム（SCT）として定量的に定義され、ニアミス事象の観測データを用いて、時間的に切迫するその要因を考察した。
- ニアミス事象が生じる数秒前のドライバ行動に関わるリスク指標は、Long-term Hazard Potential (LHP) として定量化された。
- 走行環境文脈、すなわちアノテーションの質的データに関わるリスク指標の定量化を試みるうえで、SCT のヒヤリハットレベルとその頻度との関係に着目し、過去の運転履歴に基づき走行環境文脈によるリスク値の定量化がなされた。
- SCT を教師データとし、またドライバ行動と走行環境文脈の評価に基づくリスク指標を特徴量とし、機械学習を通じて、「歩行者の飛び出しが生じた際の時間的切迫度 SCT」を予測する危険度推定モデル（線形回帰モデル）を得た（図1）。

この研究成果については、現在論文発表を準備中である。

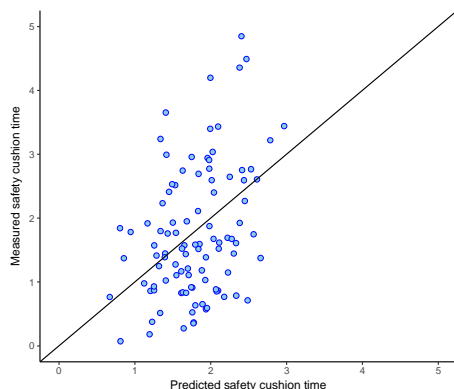


図1 時間的切迫度の実測と予測の比較。

(2) 潜在リスク予測技術の開発

本研究では、無信号交差点での飛び出し歩行者との衝突事故を再現するシミュレーションモデルを開発した。具体的には、想定する無信号交差点の環境モデル、歩行者の飛び出しモデル、リスク予測ブレーキ制御支援システムのモデルを記述し（図2）、衝突速度を「潜在リスク」として定義することで、潜在リスクに物理的な意味（被害度）を持たせた衝突速度フィールドを算出・構築した（図3）。一連の研究の結果、(1)運転指導員が実施する危険予測運転を実行すること（走行速度を下げることで予防安全性を向上させることを衝突速度フィールドによって可視化し、(2)規範速度と事故件数の間の関係から、事故発生件数低減の効果を定量的に示し、さらに(3)無信号交差点通過に要する時間と最低速度のトレードオフの関係を確認した[文献8]。

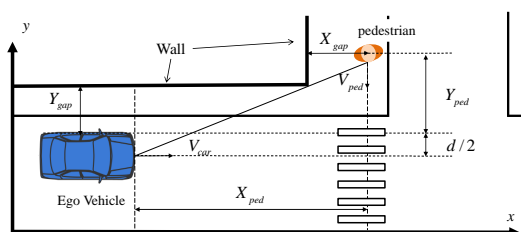


図2 死角を含む交差点テストシナリオ。

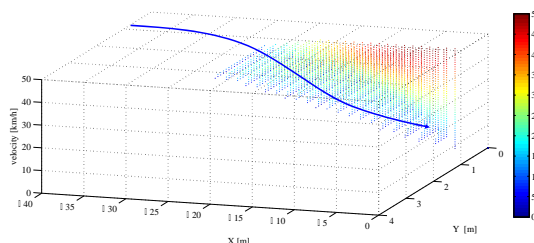


図3 衝突速度フィールドの可視化。X-Y 座標系を示す。カラーマップは、衝突速度を意味し、X-Y 座標空間上において、運転指導員は、潜在的なリスクを示す衝突速度フィールドを避ける車両運動軌跡を確保する傾向にあることを確認した。このことは、運転指導員による「歩行者飛び出し」に対する先読み運転行動の結果として捉えることができる。

(3) 状況適応的機能配分支援の設計・評価

本研究では、潜在リスクの状況に応じて規範速度に減速させる介入制御を実行する運転支援システムを開発した。人と機械のインタラクションにおける特性は、以下である。

- 潜在リスク場面へ接近しているなかで速度が規範速度を超えると、運転支援システムは、「機械の決定」に基づき、ブレーキ介入制御を実行する。
- 先読みブレーキ制御中において、ドライバは、ブレーキペダルを踏み増すことによって減速サイドへのオーバーライドを実行することは可能であるが、加速サイドへのオーバーライドは不可である。
- 先読みブレーキ制御を実行するとき、そ

の介入の数秒前に、HUD とアクセルペダル反力を通じて情報共有がなされる。これをもって、ドライバは、先読みブレーキの実行を事前に知ることが可能である。

ドライビングシミュレータを使用した実験を実施した結果（対象シーンは、死角を含む駐車車両脇通過シナリオである）、つぎの成果を得た[文献 1,2,6,7,9]。図 4 は、横軸に駐車車両回避時の側方間隔、縦軸に最低速度とする計測データをプロットし、黒色の線は、側方間隔に応じた理論的な目標（規範）速度を意味する。この結果から、ドライバの側方間隔に応じた減速制御が可能であることが確認できる。また、ドライバ受容性のパネル評価（有用度、満足度）を実施した結果、多くの参加者が好意的な意見を示し、これらの一連の結果を通じて、潜在リスクを含むシーンにおいて機械の決定・介入を受け入れられる可能性を得た。

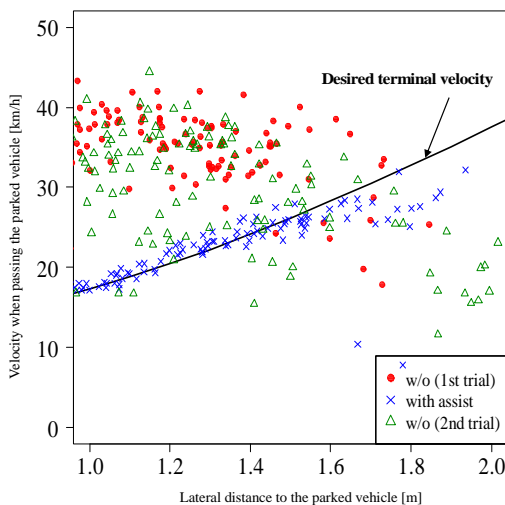


図 4 側方間隔と最低速度の関係。

(4) シェアードコントロールの設計・評価

本研究では、ワンペダル走行モードにおけるアクセルペダル反力を用いたハプティックシェアードコントロールを提案した。また、若年者を対象としたドライビングシミュレータ実験から、死角での潜在リスク予測運転能力の向上効果を得た。ドライビングシミュレータ実験から明らかにされたことは、次の通りである[文献 3,4,5]。

- 加速・定常・減速の前後方向タスクで要求されるペダルストローク開度を3つの領域に分割した「ワンペダル走行モード」と、アクセルペダル反力による「ハプティックフィードバックループ」を結合することによって、「危険予測運転（防衛的な減速行動）」を含む前後方向タスクにおいて人間と知能機械の間にインタラクションの機会を創出し、ドライバによるペダル踏み変え操作を要求せずに「危険予測運転（防衛的な減速行動）」へ誘導できることを確認した（図 5）。

- 本実験では、「実験参加者が、提案支援システムの使用によって、規範ドライバモデルが算出した規範速度（26.3km/h）に導かれるならば、参加者は、追加した支援反力を認識し、また実速度と規範速度の差分 V が減少するにしたがって支援反力が低減することを認識できるためということになる」という作業仮説を立てたが、作業仮説は、得られた実験データから概ね支持された。

本研究は、drive-by-wire を通じて、「ワンペダル操作」を実現するワンペダル走行モードを簡易に模擬したものに過ぎず、ワンペダルの操作性や有効性を議論の中心にいたものではないが、現実の EV（電気自動車）に本研究で開発したハプティックシェアードコントロールとアクティブペダルを実装することによって、同様の効果が得られると考え、これらの一連の成果から、多様なシーンへ適用できる可能性を得た。

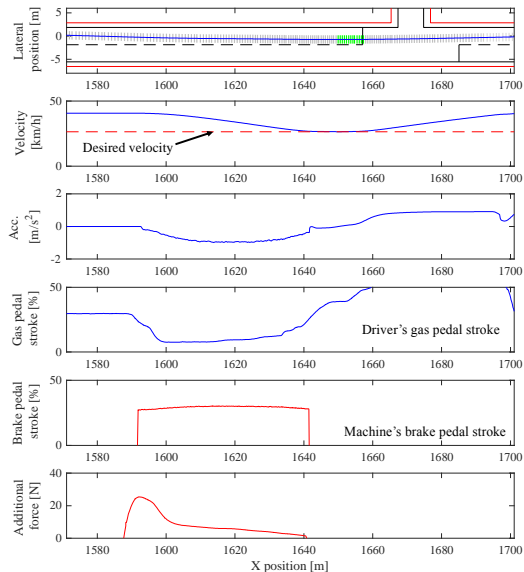


図 5 死角を含む交差点通過シーンでの速度誘導の効果（上から、車両位置、速度、加速度、アクセルペダル開度、ブレーキペダル開度、追加の支援反力を示す。速度データにおける赤の破線は、規範速度を意味する）。アクティブペダル反力を通じて、速度が規範速度に誘導されていることを確認できる。

5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕(計 2 件)

- [1] 齊藤裕一, 三本喬之, ラクシンチャランサクボンサトーン, 潜在リスク予測ドライバモデルに基づくブレーキ制御支援システムの設計と有効性評価, 自動車技術会論文集, Vol. 47, pp. 1417-1423, 2016. 査読あり. DOI: <https://doi.org/10.11351/jsaeronbun.47.1417>
- [2] Yuichi Saito, Pongsathorn

Raksincharoensak, Shared Control in Risk Predictive Braking Maneuver for Preventing Collisions with Pedestrians, IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, Vol. 1, No. 4, 314-324, 2016. 査読あり. DOI: 10.1109/TIV.2017.2700210

[学会発表](計 7 件)

- [3] Yuichi Saito, Pongsathorn Raksincharoensak, Risk Predictive Haptic Guidance: Driver Assistance with One-Pedal Speed Control Interface, IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, 2017. 査読あり.
- [4] Yuichi Saito, Keisuke Shimono, Shintaro Inoue, Hideo Inoue, Pongsathorn Raksincharoensak, Enhancing Risk Predictive Driving Performance of Elderly Drivers via Adaptive Shared Control Interface, 4th International Symposium on Future Active Safety Technology towards Zero-Traffic Accident, Nara, 2017. 査読あり.
- [5] 齊藤裕一, ポンサトーン・ラクシンチャランサク, ワンペダル走行モードにおけるアクセルペダル反力のハプティックシェアードコントロール: 死角での潜在リスク予測能力の向上効果, 2017年度秋季大会学術講演会, 2017年度秋季大会学術講演会前刷集, No. 115-17, pp. 76-82, 大阪, 2017年10月. 査読なし.
- [6] Yuichi Saito, Pongsathorn Raksincharoensak, A Shared Control in Risk Predictive Braking Manoeuvre for Preventing Collision with Pedestrian, IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, Budapest, 2016. 査読あり.
- [7] Yuichi Saito, Takayuki, Mitsumoto, Pongsathorn Raksincharoensak, Effectiveness of a Risk Predictive Shared Steering Control Based on Potential Risk Prediction of Collision with Vulnerable Road Users, 13th IFAC Symposium on Analysis, Design, and Evaluation of Human-Machine Systems HMS 2016, IFAC-Papers OnLine, Vol. 49, No. 19, 84-89, Kyoto, 2016. 査読あり.
- [8] 黒田聡, 齊藤裕一, ポンサトーン・ラクシンチャランサク, 潜在リスク予測ドライバモデルに基づくブレーキ制御支援 無信号交差点における歩行者事故低減効果の分析, SICE 計測自動制御学会 システム・情報部門学術講演会 2016, 滋賀, 2016年12月. 査読なし.

[9] 齊藤裕一, ポンサトーン・ラクシンチャランサク, ハプティックシェアードコントロールによる潜在リスク予測運転能力の向上, SICE 計測自動制御学会 システム・情報部門学術講演会 2016, 滋賀, 2016年12月. 査読なし.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

齊藤 裕一 (SAITO, Yuichi)

東京農工大学・大学院工学研究院・特任助教

研究者番号: 90770470

(2) 研究協力者

那住 正樹 (NAZUMI, Masaki)

東京農工大学・産学官連携研究員