

リスク予測運転知能モデルに基づく 協調型運転支援システム

Shared Control in Advanced Driver Assistance Systems Based on
Risk Predictive Driving Intelligence Model

ポンサトーン

ラクシンチャランサク

Pongsathorn RAKSINCHAROENSAK

本研究では、人間と協調する自動運転の基盤技術として、センシングによって得られた走行環境・道路文脈を理解し、経験知識から合理的に潜在リスクを予測・先読みし、取るべき規範運転を決定し、安全な走行を実現する自律運転知能システムの開発を目的とする。自律運転知能では熟練ドライバーの特性に基づく車両の前後方向・横方向の運動制御の設計法を導入し、衝突リスクが高まった際に早い段階で各種操作系の操作力の制御介入を実行し、安全運転を支援する。触覚的な協調制御 (Haptic Shared Control) による制御介入インタフェースを用いて、オーバーライドを可能とし、人間と機械が常時協調して安全で快適な運転を実現する。

This research aims to develop an “Autonomous Driving Intelligence System” to prevent risk of accidents and enhance driving safety while keeping human drivers in the control loop. The proposed system focuses on two key technologies: Risk-predictive driving intelligence model and Shared control between the driver and the assistance system. The first key technology is to embed an experienced driver model for recovering degraded performances of recognition, decision-making and operation of drivers. In the driver assistance system design, the experienced driver model contains knowledge-based “risk-prediction mechanism” to avoid accidents in risky driving situations which the system is activated in early stage to assist safe driving when the collision risk becomes imminent. The second key point is “Shared control” using haptic interface of steering and pedal to realize good cooperative characteristics between the driver and the system by optimizing the assistance level while minimizing the interference with human driver operation.

はじめに

日本の交通事故死者数の減少幅は縮小傾向にあり、高齢者の割合が高い水準で推移している。また、致死率についても2年連続で上昇に転じ死者数が減りにくい状況となっており、交通事故情勢は厳しい状況にある。このため、運転の快適性を向上させる自動走行技術だけではなく、事故削減に貢献できる自動運転技術を開発すべきである。人間による自動車の運転は、「認知」、「判断」、「操作」の3段階であると言われている。これを自動運転自動車に当てはめると、「環境認識・理解部(センシング)」、「状況判断部」、「運動制御部」の大きな3つの構成になる。長時間運転の快適性を目的としている自動運転は、リスクの低い単純な走行場面において1950年代から開発されてきた。しかし、事故ゼロを目指す自動運転技術として、リスクの高い複雑な走行場面において安全を確保するための高度運転支援の設計論は未

だに確立されていないように思われる。

危険度が顕在化する前の状況において、熟練ドライバーの上手な危険予測運転特性を組み込んだ高度運転支援という概念で高齢者の運転を積極的に支援する操舵制御、ブレーキ制御システムを開発してきた^[1, 2]。熟練ドライバーの危険予測運転を数式モデルで合理的に記述するため、車両周辺に存在する静止物体、移動物体、見えない障害物に対する衝突危険度をリスクポテンシャル関数で表現し、複雑な市街地走行環境において安全運転支援システムを設計し、実車とシミュレータでその有効性と事故回避性能への向上効果を検証した^[3]。

しかしながら、上記のように危険度が顕在化する前に作動する運転支援システムは、事故回避性能が向上する一方、ドライバーによっては支援レベルが強すぎて操作意図と干渉

する場合があります、すべてのドライバーに受け入れられるシステムとは言えない^[4, 5]。この受容性問題の解決には、ドライバーとシステムが調和しやすい操作反力制御方式を導入し、さらには、ドライバー個人の運転履歴からその人の特性を把握し、個人の運転特性に適合した個別適合支援を行うことが有効であろう^[6]。

上記の背景を踏まえて、本研究では、事故削減のための自動運転技術開発において、完全自動運転ではなく協調制御型運転支援システムの基盤構築を確立することを目的とする。各種操作系において、熟練ドライバーのリスク予測モデルに基づく操作反力提示による協調制御(Risk Predictive Haptic Shared Control)の新しいコンセプトを導入し、個人の運転特性に合わせた安全運転支援システム設計法を提案する。

自律運転知能システム

本研究が目指している高度運転支援システムの基盤技術の柱としては、Figure 1に示すように、従来の予防安全技術に加えて、高精度の道路環境計測・自己位置推定技術、自律運転知能技術、運転操作系HMI (Human Machine Interface) 技術である。これらの技術を有機的に統合し、自律運転知能システムを開発する。このシステムの活用としては、地方の高齢者のための安全運転支援システムを備える車を研究目標とし、実現可能性のハードルの高い完全

自動運転ではなく、ドライバーが主で機械支援が従のシステムを狙っている。

熟練ドライバーモデルの構築

本研究では、熟練ドライバーの運転行動をモデル化するため、通常走行時から緊急時までの走行領域に対応できる運転知能のモデルを構築した。衝突リスクを巧みに予測したドライバーの行動を表現するため、(1)基本走行、(2)潜在リスク予測、(3)緊急回避の3つの制御構造を構築した。基本走行ドライバーモデルは、目標コースに沿って走行するための前方注視点モデル、目標速度や前車追従走行モデルに加えて、センサから直接見えている障害物に対して最適な経路を決定する制御系である。潜在リスク予測ドライバーは、リアルワールドでの走行経験から学習される潜在リスクとそれに対して最適な経路を更新する制御系で、本プロジェクトの中核技術である。緊急回避モデルは、事故直前に作動する緊急自動ブレーキや自動操舵回避制御系である。

本研究で開発している自律運転知能の運動制御システムでは、Figure 2に示すように、道路環境のリスクポテンシャル関数に基づき目標経路を計画し、加減速・操舵を制御する構造になっている。ここでは、典型的な市街地走行シーンとして、駐車車両の側を通過する時の、経路計画および運動制御系の設計手法を概説する。

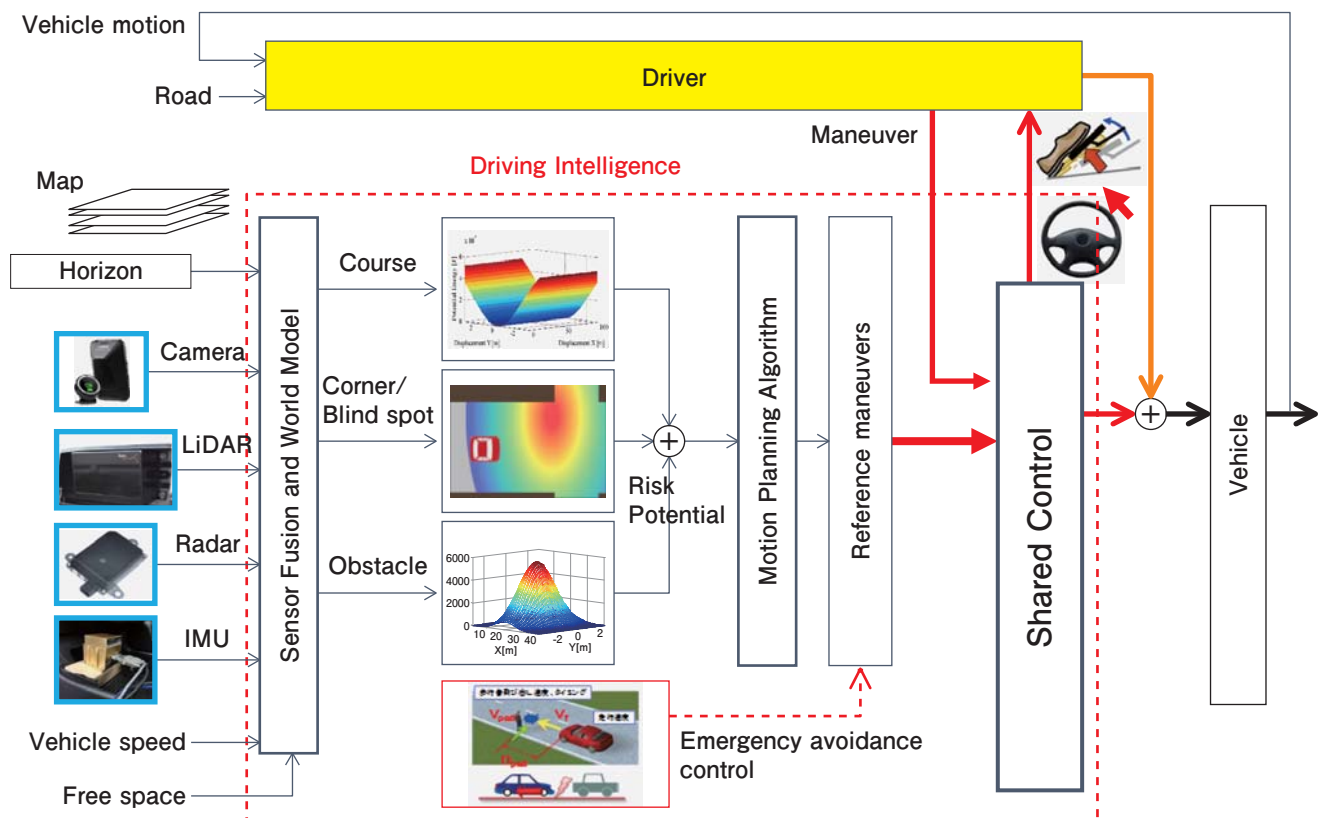


Figure 1 Driver Model Structure of Autonomous Driving Intelligence System

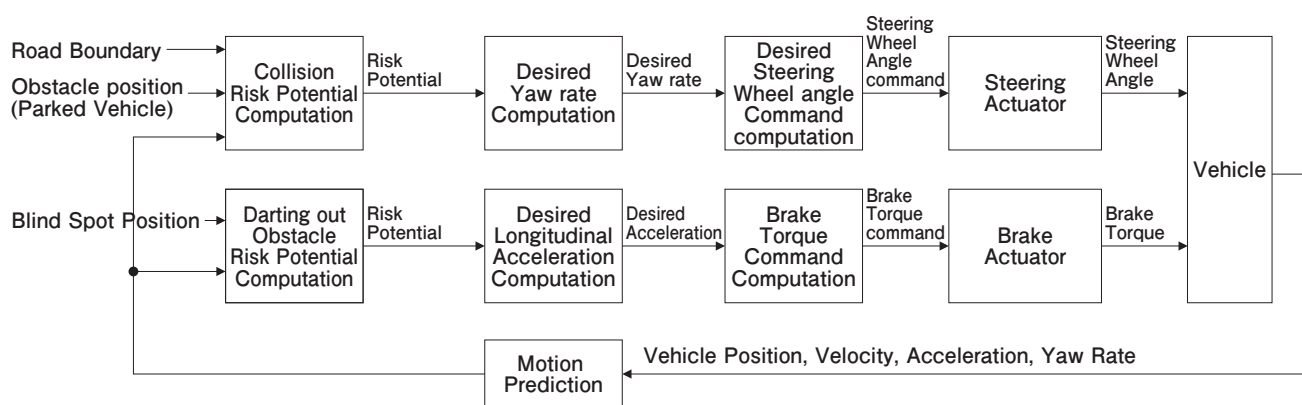


Figure 2 Conceptual diagram of motion planning and control system

横方向の運動計画と制御： 経路生成ドライバモデル

道路境界と静止障害物の斥力ポテンシャルの形状を合わせたポテンシャル関数をFigure 3aに示す。自律運転知能システムの運動計画の概念をFigure 3bに示す。

サンプリングタイムごとに複数の予測経路を算出し、リスクポテンシャルと車両運動量を考慮した評価関数が最小となる予測経路を選択することで、車両の安全性と運動のなめらかさを確保しながら、衝突リスクを回避する運動計画を行う。具体的には、Figure 3bに示すように将来車両が発生すべきヨーレート^{*1}を複数の目標ヨーレートの候補値から選択する手法で、車両が描く軌跡上のリスクポテンシャルの合計値と車両運動の滑らかさを考慮した評価関数を最小化するヨーレートを求める計算処理を行っている。さらに、車両の逆ダイナミクスを解き、算出した目標ヨーレートを目標操舵角に変換することによって車両横方向の運動を制御する。

*1：ヨーレート (yaw rate)：旋回方向への回転角の変化速度

前後方向の運動計画と制御： 潜在リスク予測ドライバモデル

日常の市街地道路において、停車中のバスを追い越そうとする際に、バスの陰から歩行者が突然飛び出してくる危険が潜んでいる。このような場面において、既存の緊急自動ブレーキシステムでは、センサの検出性能や作動領域が限定され、歩行者を認識できず、事故を回避できない可能性がある。一方、運転経験を積んだ熟練ドライバは、歩行者の飛び出しを予測し、あらかじめ速度を落とすなど、危険予測により事故発生リスクを回避している。このことから予防安全技術の効果をさらに高めるには、熟練ドライバの危険予測知識、いわゆる「運転知能」を支援システムに組み込むことが重要である。

具体的な速度計画手法は、横方向の経路生成手法と同様の計算過程を行う。遮蔽物による死角からの歩行者あるいは自転車の飛び出しを予測し、センサから直接見えない交通参加者との衝突リスクポテンシャルを設定し、複数の数秒先の車両軌跡の候補から、その軌跡上のリスクポテンシャルの合計と重み付けした車両の減速度の総和が最も低い減速度を時々刻々探索する計算処理を行い、得られた減速度を目標減速度とする。算出した目標減速度を車輪のブレー

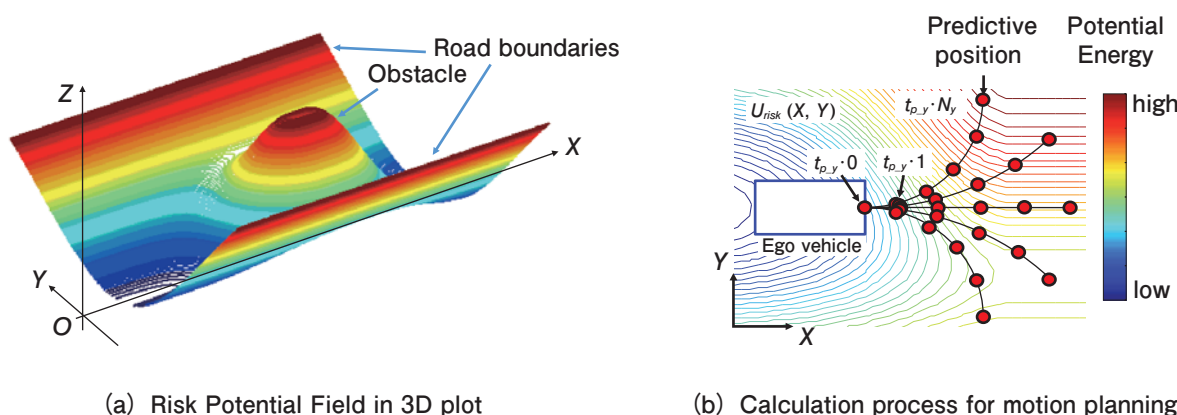


Figure 3 Visualization of risk potential field from the road boundary and the obstacle

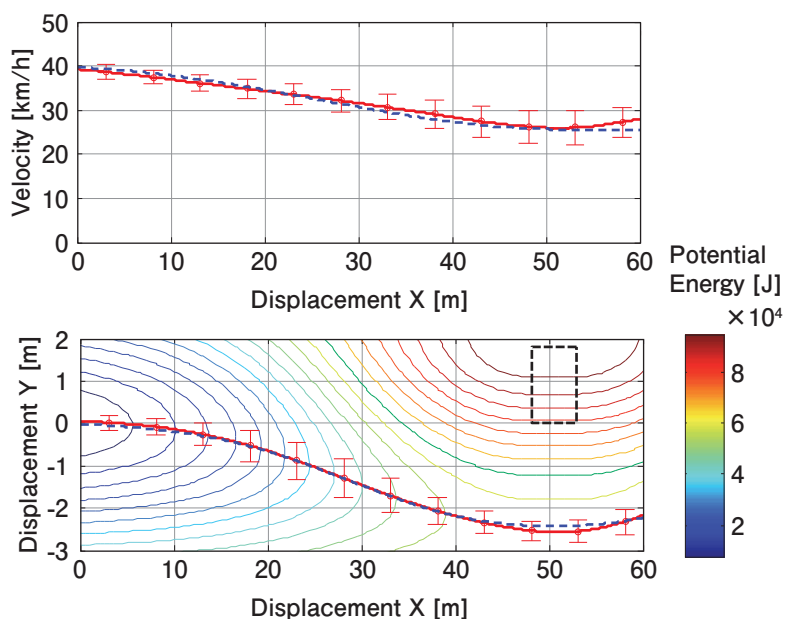


Figure 4 Comparison of vehicle behavior by risk potential calculation with driving data by expert drivers

キトルクに変換することによって車両前後方向の運動を制御する。

経路計画アルゴリズムの妥当性の検証

駐車車両回避シーンにおける運動計画アルゴリズムの妥当性を検証するため、本アルゴリズムによる計算結果を熟練ドライバーによる走行データと比較する。熟練ドライバーは自動車教習所の運転指導員2名と自動車メーカーで長年運転に

関する安全教育を受けているドライバー2名であり、駐車車両を回避するタスクを走行してもらった。

熟練ドライバーモデルによるシミュレーション結果と熟練ドライバーの車両速度と車両軌跡のグラフをFigure 4に示す。車両軌跡のグラフの背景には道路境界と駐車車両のリスクポテンシャル場の等高線図が描いてある。車両軌跡のグラフをみると、経路計画アルゴリズムにより、車両がリスクポテンシャルの低い場所を通っていることが確認できる。Figure 3の3次元リスクマップでは谷にあたる場所になる。熟練ドライバーのグラフには進行方向5 m刻みに標準偏差を示す。速度と軌跡ともに熟練ドライバーの実走行データとはほぼ一致しており、誤差が標準偏差以内であることから、提案した運動制御モデルは熟練ドライバーの運転行動を精度よく再現しているといえる。本制御アルゴリズムの有効性を検証するため、Figure 5に示す実験車両を使って走行実験を行っている。

人間機械協調を実現するハプティック・シェアード・コントロール

ハプティック・シェアード・コントロール(Haptic Shared Control)は、ステアリングホイールまたはアクセルペダル

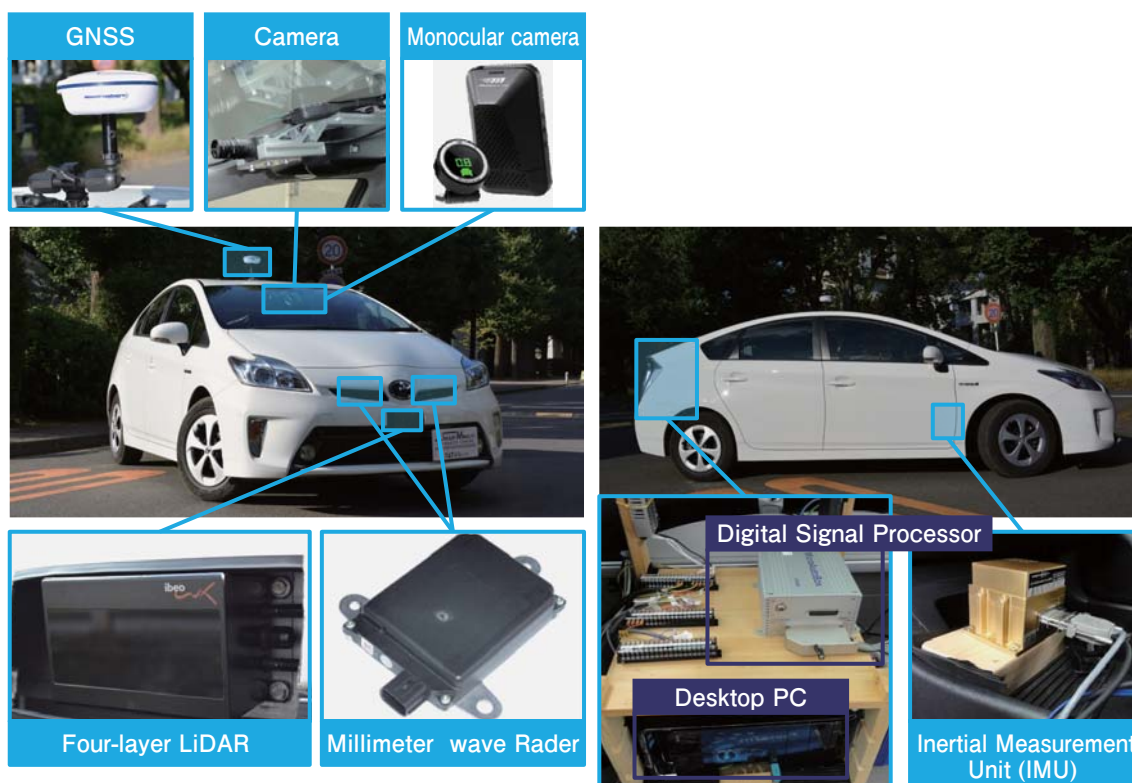


Figure 5 Experimental vehicle equipped with autonomous driving intelligence system

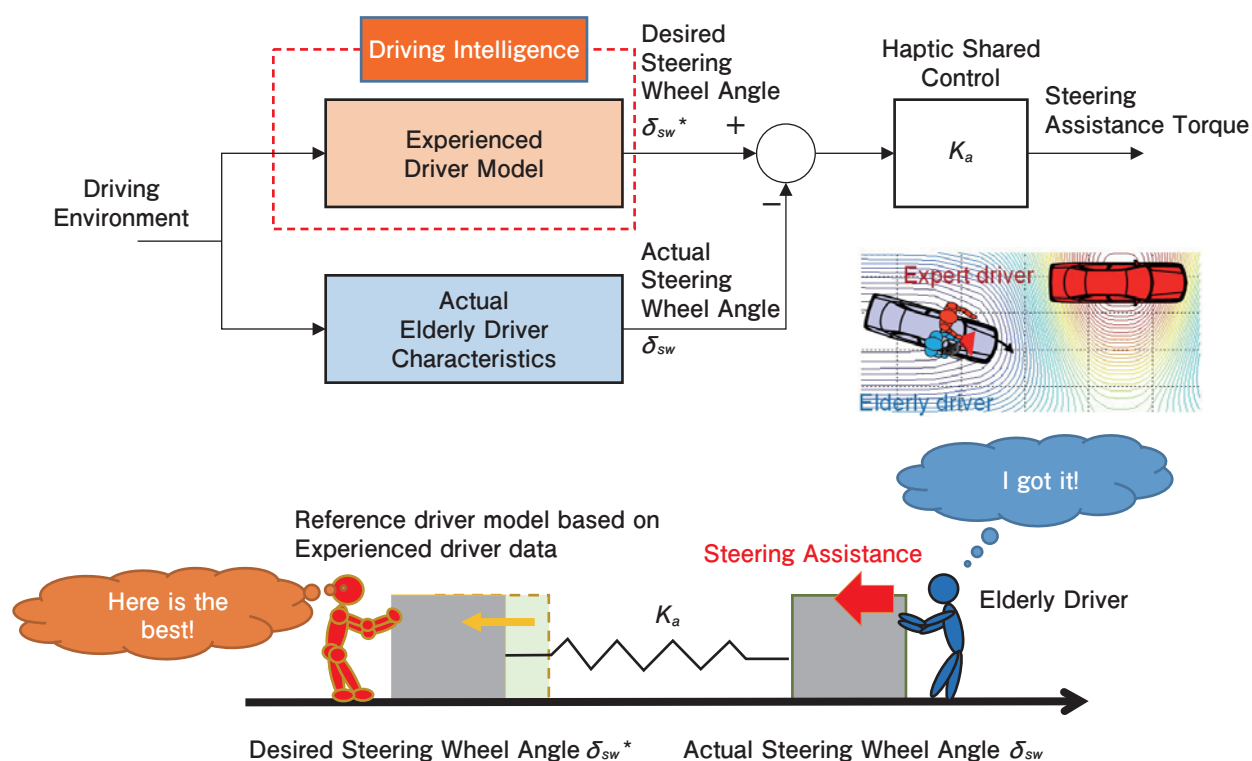


Figure 6 Concept of driver assistance system using haptic shared control

に能動的な反力発生機構を施し、潜在リスクが存在するような運転シーンにおいて、前節で記述したようにシステムが数秒先の潜在リスクを正しく読み、それに応じた規範操作行動を適切にドライバに教示することができる。また、ドライバが主体的にそれを適切に運転操作に反映することができれば、人間機械の閉ループ系でより安全でかつ滑らかな運転が確実に実現される。Figure 6に示すように、自律運転知能で決定した目標操舵角と実際の舵角との差に比例した操舵支援トルクを触覚的に加えることで、安全な軌道へ誘導する方式を提案した^[7]。この制御方式の特徴は、操舵系の支援制御パラメータはドライバの状態・個人特性等に合わせて変更可能にする点である。その結果、ドライバ受容性の高い協調型運転支援システムが実現可能になる。ドライビングシミュレータを用いて経路追従タスクにおける高齢ドライバへの支援効果を検討した結果、操舵支援トルクによって高齢ドライバの運転は規範ドライバに近づくことが確認できた^[7]。

また、通常走行領域から次第にリスクが顕在化している状況に直面する際に、自律運転知能システムがドライバを支援し早い段階でリスクを下げて安全を確保する必要がある。潜在リスク予測が必要な駐車車両回避シーンを題材に、その駐車車両を安定的に回避し、かつ側方間隔を正しく取るように誘導し、速度制御タスクにおいても安全な速度を誘導する減速支援を設計し、そのシステムの効果をドライビングシミュレータで検証している。

おわりに

高度運転支援技術による衝突事故回避機能として、潜在リスクを先読みする自律運転知能システムの開発について解説した。特に、熟練ドライバが現在の道路状況から、「なんとなくここが危ない!」と感じて速度を落とすような知的行動を表現するモデルが必要である。そこで、道路空間上の境界や障害物等に対するリスクポテンシャルを定式化し、リスク最小化問題に帰着することで運動計画および運動制御系を提案した。また、衝突リスクの低い規範運転に誘導するため、シェアード・コントロール(Shared Control)の概念を使ってドライバ主権の高度運転支援システムの設計手法を示した。

今後は、実車実験とドライビングシミュレータを用いた機能検証、人間とシステムとの相互作用、ドライバの受容性評価等を行う。さらには、高度運転支援システムの進化には、様々なシーンにおける運転知能に関わるリアルワールドデータの蓄積が必要不可欠である。筆者らが収集した実路ヒヤリハットデータベースを活用し、危険予測知識をデータベース化し自動車に組み込むことで、自動車の知能化に貢献していきたい。

自動車は馬の代わりに生まれた20世紀の機械である。現在、走行性能(動力性能)、すなわち、馬力の面では十分に馬を超えているが、知能の面に関しては未だに、馬以下かもし

れない。もしクルマが自ら周りをセンシングしながらシーンに応じて取るべき行動を適切に判断できれば、馬に近づけることができる。さらに、運転中のドライバの状態を見て各種操作インタフェースを通じてドライバとのコミュニケーションを取りながら、適切にスピードを調整しながら最適経路を決めてくれれば、究極の人馬一体の姿になるであろう。物理法則に基づく計測・制御とビッグデータを活用した情報基盤技術の融合により、馬の知能を超える新たなモビリティのイノベーションが今後期待される。

謝辞

本研究は、科学技術振興機構(JST)の戦略的イノベーション創出推進プログラム(S-イノベ)の研究開発テーマ「高齢社会を豊かにする科学・技術・システムの創成」において、研究課題「高齢者の自立を支援し安全安心社会を実現する自律運転知能システム」(平成22年度～平成31年度)の一環として行われ、筆者が所属する東京農工大学の支援および科学技術振興機構(JST)の経済的支援のもとで実現できたものです。研究を遂行する上で、永井正夫教授(日本自動車研究所長、東京農工大学名誉教授)、井上秀雄教授(神奈川工科大学)には多くのご指導、ご助言をいただきました。また、本プロジェクトの実務を担当する美尾昌宏様、井上慎太郎様(トヨタ自動車)をはじめ、豊田中央研究所、東京大学鎌田研究室、東京農工大学の当研究室所属メンバーの皆様の多大なご協力に厚く御礼申し上げます。また、関連の研究論文にご協力頂きました共著者の先生方と学生達に深く感謝致します。

参考文献

- [1] 井上秀雄, 永井正夫, 鎌田実, ポンサトーン・ラクシンチャラーンサク, 大桑政幸, 高齢者の自立を支援し安全安心社会を実現する自律運転知能システム, 自動車技術会学術講演会前刷集, 22-20145375, pp.1-4, 2014.
- [2] Masao Nagai, Hideo Inoue, Research into ADAS with Autonomous Driving Intelligence for Future Innovation, Proceedings of Chassis Tech plus 2014, pp.779-793, Munich, Germany, 2014.
- [3] Pongsathorn Raksincharoensak, Takahiro Hasegawa and Masao Nagai, Motion Planning and Control of Autonomous Driving Intelligence System Based on Risk Potential Optimization Framework, International Journal of Automotive Engineering, Vol. 7, No.1, pp.53-60, 2016.
- [4] 永井正夫, 下光喜代崇, 吉田秀久, 毛利宏, 操舵トルク支援制御と人間との操舵協調性—運転シミュレータによる横風応答の検討—, 自動車技術会論文集, Vol.34, No.1, pp.157-162, 2003.
- [5] 岩野孝, ポンサトーン・ラクシンチャラーンサク, 山崎彬人, 毛利宏, 永井正夫, ステアバイワイヤを用いた自律運転知能システムの人間機械協調特性に関する研究, 自動車技術会論文集, Vol. 46, No.2, pp.503-508, 2015.
- [6] Pongsathorn Raksincharoensak, Wathanyoo Khaisongkram, Masao Nagai, Masamichi Shimosaka, Taketoshi Mori, and Tomomasa Sato, Integrated Driver Modelling Considering State Transition Features for Individual Adaptation of Driver Assistance Systems, Vehicle System Dynamics, Vol. 48, Supplement 1, pp.55-71, 2010.
- [7] 井上慎太郎, 小澤拓巳, 平野豊, 井上秀雄, ポンサトーン・ラクシンチャラーンサク, DYCと操舵支援による人間機械協調型運転支援システムに関する研究—経路追従走行における高齢ドライバへの支援効果—, 自動車技術会論文集, Vol.47, No.3, pp.737-743, 2016.



ポンサトーン ラクシンチャラーンサク

Pongsathorn RAKSINCHAROENSAK

東京農工大学大学院 工学研究院
先端機械システム部門
准教授
博士(工学)