



安全安心な走行を実現する 自律運転知能システムの運動 計画と制御

応
般

ポンサトーン・ラクシンチャランサク (東京農工大学)

安全運転を確保する自動運転

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体系的な設計論はいまだに確立されていないように思われる。

本稿では、安全走行に必要な不可欠な危険予測運転特性に基づく自律運転知能システムの運動制御系設計について紹介する。その中核技術は、走行空間上のリスクポテンシャル関数を用いた制御系の理論的設計法である。自動車の運動制御では、そ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。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ときの、経路計画および運動制御系の設計手法を紹介する。

自律運転知能システム

筆者らは、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」（2010年度～2019年度）を実施している¹⁾。本稿では、このプロジェクトの一部の研究開発状況について紹介する。

本プロジェクト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、従来の予防安全技術に加えて、高精度の道路環境センシング技術、デジタル地図、自律運転知能技術、運転操作系HMI（ヒューマンマシンインタフェース）最適化技術などが挙げられる。

これらの技術を有機的に統合し、信頼性と有効性が高い自律運転知能による制御介入型運転支援システムを開発する。このシステムの活用としては、地方の高齢者に向けた安全自動車の提供を当面の目標とする。技術開発を継続的に進め、動作範囲の拡張やさらなる高機能化を実現していくことを目指す。実現可能性のハードルの高い完全自動運転ではなく、運転者が主で機械支援が従のシステムを狙うことで、運転者や社会の受容性は十分検討する必要はあるものの、実現可能性は十分に高いと考えている。

制御系設計の構造

自律運転知能システムに内蔵されているドライバーモデルについて述べる。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。その概略図を図-1に示す。衝突危険度を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つのドライバーモデルで制御構造を構築

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モデルは、リアルワールドでの走行データ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。緊急回避ドライバーモデルは、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。このように事故が発生し得る時間から3段階に分けて遡って、1秒以内は機械が優位の緊急回避機能、1～10秒は潜在リスク領域の協調運転 (Shared Control)、10秒以上は基本走行機能として設計されていることが本研究のドライバーモデルの特徴である。

障害物回避のための自律運転知能システムの概要図を図-2に示す。障害物回避アルゴリズムの設計は、ポテンシャルフィールド法がよく用いられており^{2), 3)}、走行位置におけるポテンシャルの勾配を移動体に作用する力として計算している。経路計画に関しては、道路境界と見えている障害物のリスクポテンシャルを定義し、数秒先の将来の車両軌跡上において最もリスクポテンシャルの総和の低い目標ヨーレイト (車両回転角速度) を決定する演算を行う。車両の逆モデルを解き、算出した目標ヨーレイ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。速度計画に関しても、経路計画と同様の計算過程を行う。遮蔽物による死角からの飛び出しを考慮した見えない障害物のリスクポテンシャルを設定し、数秒先の将来の車両軌跡上において最もリスクポテンシャルの総和の低い目標減速度を決定す

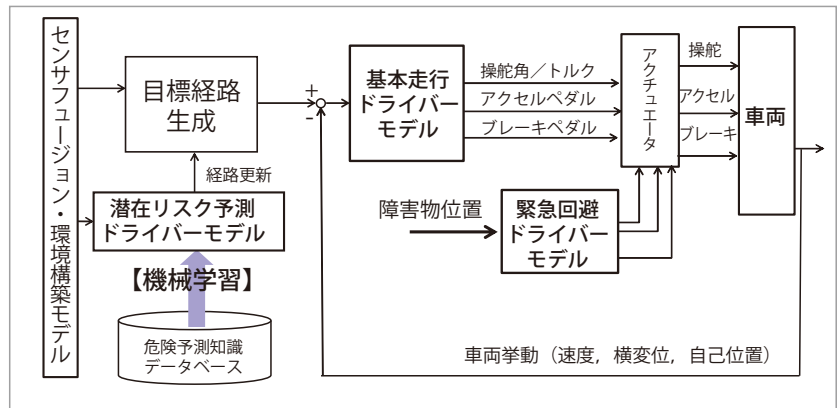


図-1 自律運転知能システムのドライバーモデルの構造

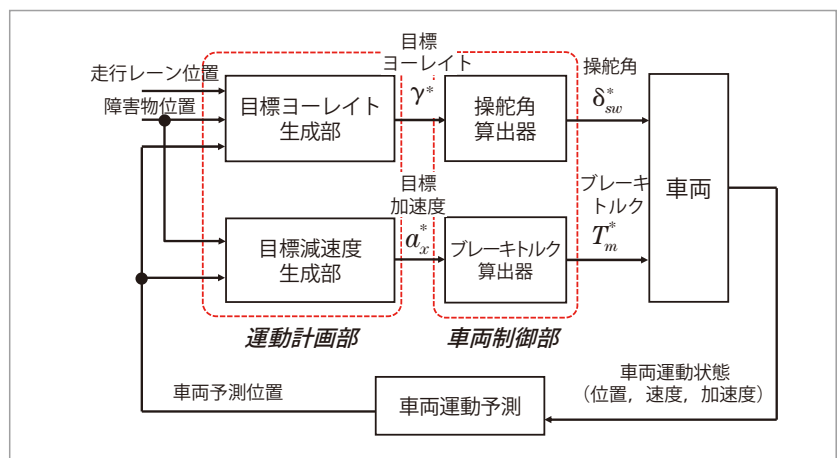


図-2 自律運転知能システムの構造

る。算出した目標減速度を車両の制動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。

基本走行制御

本章では、基本走行制御として、車両横方向の運動制御について述べる。直線単路に静止障害物がある場面において、自車の横方向の運動計画に影響を及ぼす要素は道路境界、静止障害物の2要素と考える。道路境界と静止障害物の斥力ポテンシャルの形状をそれぞれ図-3と図-4に示す。

次に、上記のリスクポテンシャルに基づき、横方向の運動を制御する方法について述べる。リスクポテンシャルを用いる場合、その勾配による制御が一般的である²⁾。しかし、車両挙動の不安定化やローカルミニマムポイントから抜け出せないといった問題が発生する可能性がある。本稿では、サンプリン

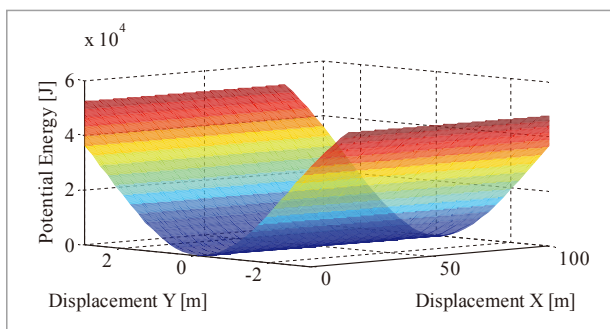


図-3 道路境界のポテンシャル場

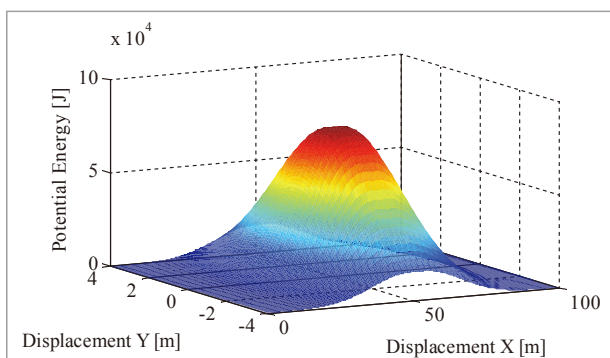


図-4 静止障害物のポテンシャル場

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滑らかさを確保しながら上記の問題を回避する。具体的には、図-5に示すように将来車両が発生すべきヨーレイトを複数の目標ヨーレイ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イトを求める計算処理を行っている。

潜在リスク予測

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、図-6に示すよう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

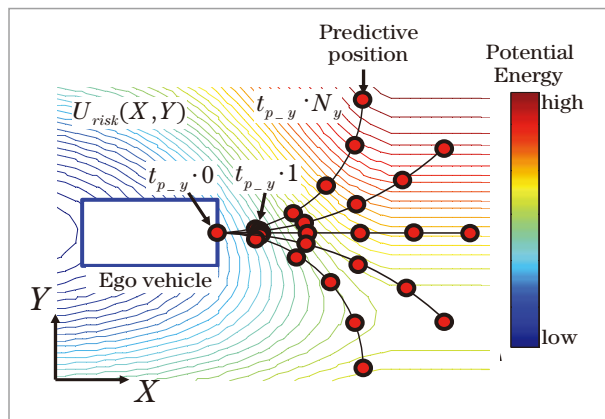


図-5 リスクポテンシャル最適化の概念

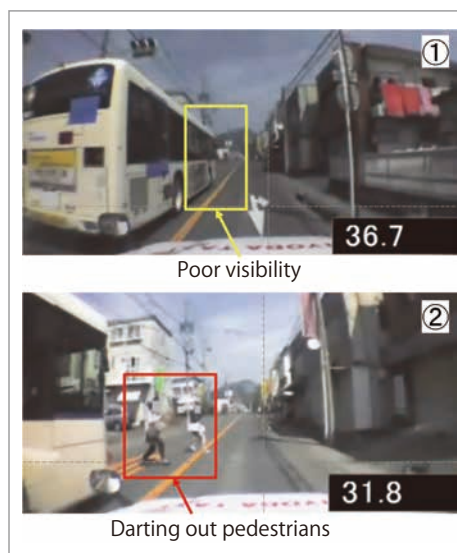


図-6 駐車車両の陰から飛び出してきた歩行者

一は、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⁴⁾。このことから予防安全技術の効果をさらに高めるには、熟練ドライバーの危険予測知識、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。

停車車両などの遮蔽物による死角が存在するような場面では、規範的なドライバーは死角からの歩行者の飛び出しを予測し、あらかじめ速度を落とすことで衝突のリスクを低減している。図-7に示すような死角に存在するかもしれない仮想歩行者のリスクポテンシャルを設定することで最適な減速度を求める計算処理を行っている。

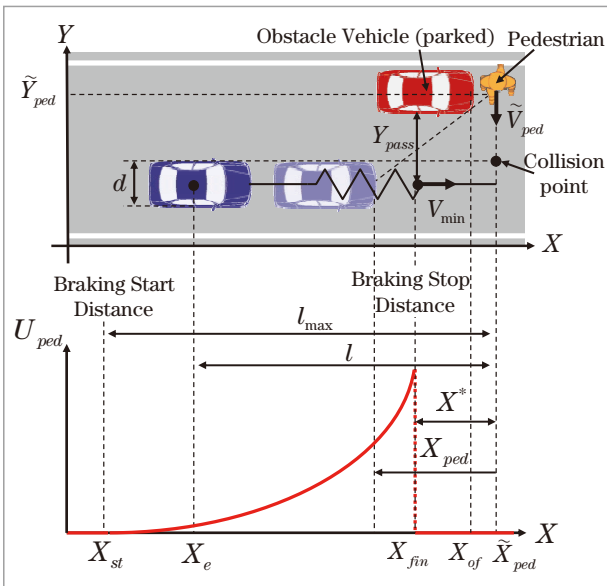


図-7 仮想歩行者に対するリスクポテンシャル

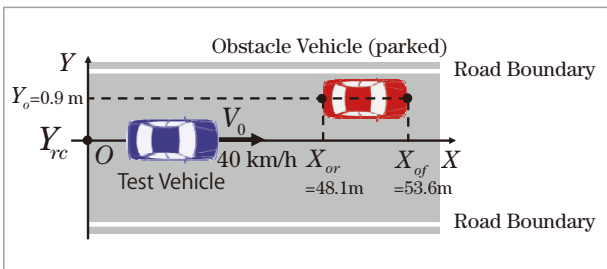


図-8 駐車車両回避シーンの条件

走行シミュレーション

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、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名である。実車実験では、時速40km/hの定常状態をつくり、自分の判断で駐車車両を回避するタスクを各ドライバーに7回ずつ走行してもらった。駐車車両の位置は図-8のように設定した。なお、本実験の実施については、各実験参加者に口頭で実験の目的・方法・安全性に関する事柄を伝え、書面にてインフォームドコンセントを得て実験を行った。得られた4人の熟練ドライバーの運転実験データとその平均値を図-9に示す。図-9に示された平均値

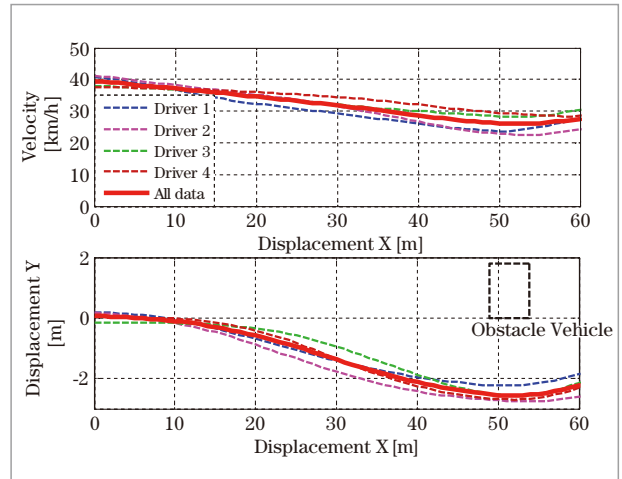


図-9 駐車車両回避時の熟練ドライバーのデータ

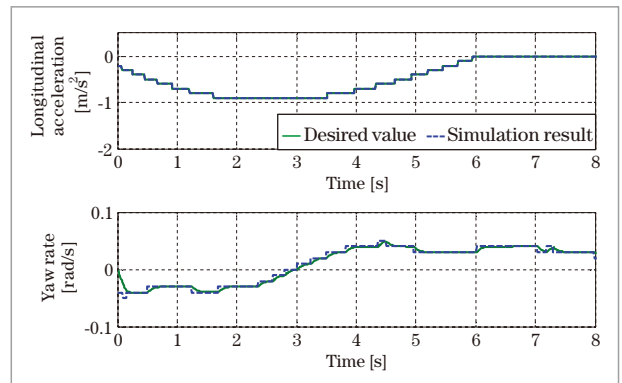


図-10 駐車車両回避時の目標運動の計算結果

(All data) は、提案したドライバーモデルの評価用データとして扱う。

経路計画アルゴリズムによって計算された目標ヨーレート、目標減速度およびリスクポテンシャル理論によって求めたヨーレート、前後加速度の時系列データを図-10に示す。図-10より、ヨーレートと前後加速度とともに、計算値がほぼ目標値に一致していることが確認できる。また、リスクポテンシャル理論の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図-11に示す。熟練ドライバーのグラフには進行方向5m刻みに標準偏差を示す。両者の軌跡はほぼ重なっており、速度と軌跡ともに熟練ドライバーの実走行データの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。

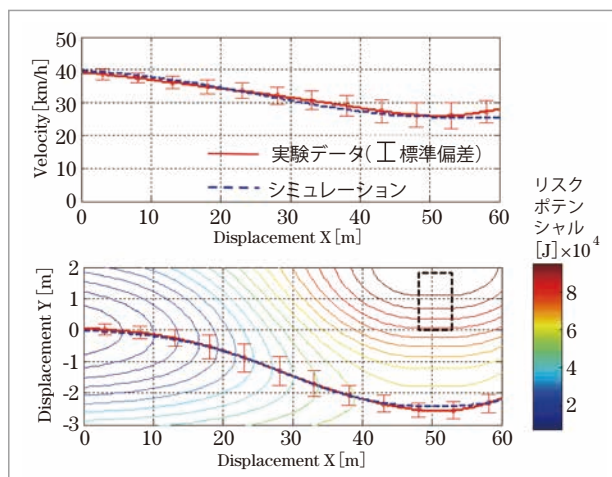


図-11 駐車車両回避時の車両挙動

今後の展望

本研究では、自動運転技術による衝突事故回避機能として、潜在的な危険を先読みする高度運転支援システムの開発を目的とする。横方向、前後方向それぞれについて独立に設定したリスクポテンシャル最適化問題に帰着することで運動計画および運動制御系の設計手法とそのシミュレーション結果について紹介した。ドライバー入力に対して機械側の制御量との調整を行える構成とすることで、いわゆる「シェアード・コントロール (Shared Control) によるドライバー主権の制御システム」を実現することが本プロジェクトの目指す運転支援の姿である。

今後は、実車実験による有効性の検証とドライビングシミュレータを用いた人間とシステムとの相互作用や運転者の受容性評価を行う。さらには、高度運転支援システムの進化には、さまざまなシーンにおける運転知能にかかわるリアルワールドデータの蓄積が必要不可欠である。筆者らが収集している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。

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) 能登紀泰, 奥田裕之, 田崎勇一, 鈴木達也: 個人適合型ポテンシャル法に基づく障害物回避アシスト制御, 自動車技術会秋季大会学術講演会前刷集, No.138-11, pp.11-14 (2011).
- 3) 金子哲也, 杉山 哲, 栗谷川幸代: 車両周辺環境の変化に対応した危険感ポテンシャルと車両運動性能を考慮した自律走行のための制御目標生成, 自動車技術会論文集 Vol.44, No.2, pp.759-764 (2013).
- 4) Borowsky, A., Oron-Gilad, T. and Parmet, Y.: The Role of Driving Experience in Hazard Perception and Categorization: A Traffic-Scene Paradigm, World Academy of Science, Engineering and Technology, No.66, pp.305-309 (2010).
(2016年1月29日受付)

ポンサトーン・ラクシンチャラーンサク pong@cc.tuat.ac.jp

2005年東京農工大学大学院博士(工学)学位取得, 2004年より東京農工大学特任助手, 2005年より同大助手, 2006年より同特任助教授(テニュアトラック), 2011年より同准教授(テニュア), 現在に至る。研究内容は自動車の運動力学と制御, 予防安全と運転支援, 自動運転, ドライバーモデル, ヒューマンインタフェース等。自動車技術会, 日本機械学会, 計測自動制御学会の正会員。