

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 2 日現在

機関番号：12605

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560251

研究課題名(和文) 走行環境リスクポテンシャル予測に基づく知能化自動車の衝突自動回避制御系の基盤構築

研究課題名(英文) Autonomous collision avoidance control system design based on driving environment risk potential prediction

研究代表者

ポンサトーン ラクシンチャラーン (Raksincharoensak, Pongsathorn)

東京農工大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：30397012

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、道路環境リスクポテンシャル予測モデルを内蔵した高度運転支援システムの構築を目的とし、障害物回避時における運動計画部と運動制御系を設計した。横方向運動制御では障害物への衝突と道路逸脱の危険度、前後運動制御では障害物の死角からの歩行者の飛び出しをリスクポテンシャルとして定量的に記述している。横運動と前後運動各々のリスクポテンシャルを中間変数として扱い、最適化問題に帰着することで運動計画アルゴリズムを提案した。実際の熟練ドライバの走行データと比較し、構築した運動計画手法は熟練ドライバの運転行動を模擬可能であることが確認できた。

研究成果の概要(英文)：This paper proposes a motion planning and a braking/steering control for autonomous vehicles based on the combination of the optimal control theory and the potential field. This paper focuses on a parked car overtaking scenario as one of typical scenarios which the concept of risk potential can be applied. In the lateral motion control, the performance index in terms of the artificial risk potentials of road boundaries and an obstacle is optimized with respect to a number of candidate lateral accelerations. The artificial potential field is defined based on experienced driver characteristics analysis. In the longitudinal motion control, the performance index in terms of the artificial risk potential of the occluded pedestrian is optimized with respect to a number of candidate decelerations. The desired vehicle motion is calculated by optimizing the defined performance index and the results fit well with the data of the experienced drivers who drive defensively in urban roadway.

研究分野：機械力学・制御工学

 キーワード：交通機械制御 予防安全 自動運転 自動車の運動力学 運転支援 最適制御 ポテンシャルフィールド
 障害物回避

1. 研究開始当初の背景

近年における日本の交通事故の状況は、交通事故死者数は平成 21 年になり 5,000 名以下で減少傾向にあるものの、交通事故件数は年間 100 万件程度とさらに増加傾向を示している。特に、近年の自動車社会ではドライバーの高齢化が進んでおり、70 歳以上の高齢者の運転免許保有者数は年々増加しており、自動車を運転して活発に外出する高齢者も少なくない。こうした中で、高齢化に伴う身体機能の劣化により、自動車運転が負担になっている高齢者も多く、交通事故が懸念される。一方、交通事故削減を目指す高度道路交通システム (ITS) の従来技術は、健常者を対象にした研究が多く、認知能力が低下し、判断が遅れがちな高齢者を対象とする運転支援の体系的な設計アプローチはほとんど見られない。しかし、高齢運転者による交通事故は、交差点付近で多く発生しており、特に極低速での加害、被害事故が増している。これらは、認知・判断レベルが主原因となっており、事故防止のための新しい考え方に基づく車両制御が必要である。また、従来の自動運転または運転支援システムは、センサの検出性能と作動領域が限定されているため、実世界で発生している衝突事故を防げない課題が生じる。

2. 研究の目的

本研究課題では、申請者の研究機関で所有している交通ヒヤリハットデータベースからの運転知識と、熟練運転者の行動データベースを分析し、高い事故回避性能を持ちつつ低コストで実用性の高い安全運転支援システムを構築することを目的とする。具体的には、以下の課題を明らかにすることを目的とする。

- (1) 熟練運転者による規範運転行動モデルの構築 : 「常時記録ドライブレコーダ」を装備した実験車を製作し、危険個所を

含む市街地内の実路を走行し、熟練運転者の一種として運転指導員によるハンドル・ペダル操作量、車両周辺情報および視覚動作を運転行動データベースとして構築し、各シーンにおける運転行動シーケンスを体系化しモデルを構築する。

- (2) 道路環境のリスク予測 : 従来のように直接センサで監視できる顕在的危険のみではなく、ロケーションというコンテキストも含めて、駐車車両の陰、見通しの悪い交差点、横断歩道などの潜在的危険も考慮し、数秒先の道路環境リスク予測手法を確立する。
- (3) 高齢運転者の運転限界予測 : 高齢者を被験者として、実路を模擬したシミュレータ実験を行う。加齢に伴う運転特性の衰えが、正常時や異常時の運転行動の変化にどのように現れるかを見出す運転限界予測手法を検討し、リアルタイム運転状態推定アルゴリズムを開発する。
- (4) 危険自動回避システムの開発 : 熟練運転者の規範モデルと現在の運転行動とを比較し、危険性の高い場合には、アクティブにブレーキおよび操舵で操作介入し、事故を回避する。

これらの技術課題を明らかにすることにより、熟練運転者の高度な認知・判断・操作といった運転知能を安全運転支援システムに組み込み、事故回避性能を向上させ、新たな運転支援システムの設計基盤を構築する。

3. 研究の方法

- (1) 規範運転モデルの構築 : 危険個所を含む市街地内の実路を一定期間走行することにより、GPS によるデジタルマップ上での行動パターン、およびハンドル・ペダル操作の個人の運転行動パターンを計測するシステムを作成し、熟練運転者の走行データベースを構築する。

(2) 走行環境リスク予測手法の開発

車載カメラ、レーザレーダからのセンサフュージョンにより、対向車、自転車、歩行者の運動を予測し、数秒先の自車との相対位置を推定し、走行空間上の衝突リスクポテンシャルを演算するポテンシャルフィールドアルゴリズムを開発する。

(3) 衝突自動回避システムの開発

車両周辺の移動物体に対する衝突リスクが存在する場合、衝突リスクポテンシャルを時々刻々演算し、規範モデルに基づきリスクに対する規範車両応答を決定し、規範値と現在の行動との差異を最小化する衝突自動回避システムを設計し、シミュレーションおよび実車実験によりその有効性を検証する。

4. 研究成果

(1) 制御系設計の構造

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1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良く用いられており、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。横方向運動制御では、道路境界と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を決定する演算を行う。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。前後方向運動制御においても、横運動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仮想歩行者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。

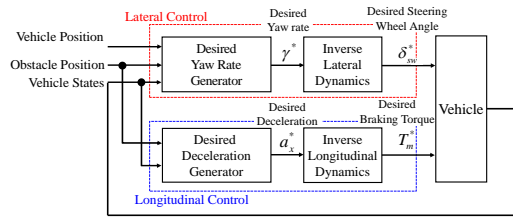


図1 自律運転知能システムの構造

(2) 横運動計画

本節では、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。

道路境界の斥力ポテンシャルについて説明する。道路境界の斥力ポテンシャルを式(1)で定義する。

$$U_r(X, Y) = w_r \left[1 - \exp \left\{ - \frac{(Y - Y_{rc})^2}{2\sigma_r^2} \right\} \right] \quad (1)$$

ただし、 w_r 、 σ_r はそれぞれ道路境界の斥力ポテンシャルの重み、分散を示し、 Y_{rc} は道路中心の位置を表す。道路境界の斥力ポテンシャルの形状を図2に示す。

静止障害物の斥力ポテンシャルについて説明する。障害物の斥力ポテンシャルを式(2)で定義する。

$$U_o(X, Y) = \begin{cases} w_o \exp \left\{ - \frac{(X - X_{or})^2}{\sigma_{ox}^2} - \frac{(Y - Y_o)^2}{\sigma_{oy}^2} \right\} & (X \leq X_{or}) \\ w_o \exp \left\{ - \frac{(Y - Y_o)^2}{\sigma_{oy}^2} \right\} & (X_{or} < X < X_{of}) \\ w_o \exp \left\{ - \frac{(X - X_{of})^2}{\sigma_{ox}^2} - \frac{(Y - Y_o)^2}{\sigma_{oy}^2} \right\} & (X \geq X_{of}) \end{cases} \quad (2)$$

ただし、 w_o は障害物の斥力ポテンシャルの重み、 σ_{ox} 、 σ_{oy} はそれぞれX方向分散、Y方向分散を示す。また、 X_{or} は障害物後端のX座標、 X_{of} は障害物前端のX座標、 Y_o は障害物重心点のY座標を表す。障害物の斥力ポテンシャルの形状を図3に示す。

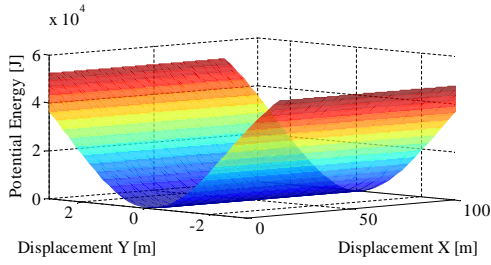


図2 道路境界のリスクポテンシャル

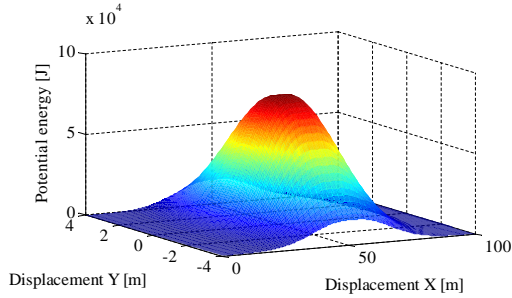


図3 障害物のリスクポテンシャル

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⁽³⁾。しかし、その場合、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。そこで、本稿では、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入力値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、以上の問題を回避する。

最初に、横方向運動予測のためのサンプリング周期 Δt_{p-y} と予測ホライズン N_y を定義し、目標ヨーレイトの候補の最大値 $\gamma_{p, \max}$ 、最小値 $\gamma_{p, \min}$ を決定する。次に、目標ヨーレイトの算出方法について述べる。式(1)、(2)の重ね合わせによる合計のリスクポテンシャル U_{risk} と予測ヨーレイト γ_p に基づく評価関数を最小化することで目標ヨーレイト γ^* を逐次算出する。

$$\gamma^*(t) = \min_{\gamma_p} \sum_{k_y=0}^{N_y} \left(U_{risk}(X_{p-y}(k_y), Y_{p-y}(k_y)) + r_y \gamma_p^2 \right) \quad (3)$$

subject to

$$X_{p-y}(k_y) = X_e(t) + \int_t^{t+k_y \cdot \Delta t_{p-y}} (V(t) + a_x(t)t) \cos(\psi(t) + \gamma_p t) dt \quad (4)$$

$$Y_{p-y}(k_y) = Y_e(t) + \int_t^{t+k_y \cdot \Delta t_{p-y}} (V(t) + a_x(t)t) \sin(\psi(t) + \gamma_p t) dt \quad (5)$$

ただし、式(3)中の r_y はヨーレイト入力に対する重み係数を示す。式(4)、(5)中の X_{p-y} 、 Y_{p-y} は予測位置の X 、 Y 座標を示す。 X_e 、 Y_e はそれぞれ自車の X 、 Y 座標、 V は自車速度、 a_x は自車前後加速度、 ψ は自車ヨー角を示す。予測位置は重心点での横滑り角が微小であると仮定することで算出される。図4に示すように、あるヨーレイト候補値の範囲内で評価関数を最小化するヨーレイトは、毎サンプリングタイムごとに算出される。

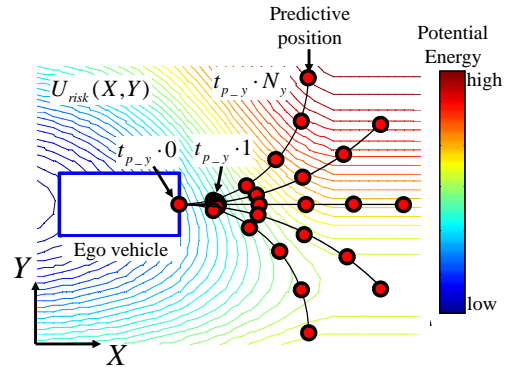


図4 リスクポテンシャル最適化の概念図

(3) 前後運動計画

本節では、車両前後方向の運動制御について述べる。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。そこで本研究では、仮想歩行者のリスクポテンシャルを設定することで死角からの飛び出しを考慮する。仮想歩行者の斥力ポテンシャル U_{ped} を式(6)で定義する。

$$U_{ped} = \frac{1}{2} k_{ped} \cdot (X_{st} - X_e(t))^2 \quad (X_{st} < X(t) < X_{fin}) \quad (6)$$

ただし、 k_{ped} は仮想歩行者の斥力ポテンシャルのばね定数を示し、 X_{st} 、 X_{fin} はそれぞれ斥力を受ける最小 X 座標と最大 X 座標であり、減速開始位置と減速終了位置を示す。図 5 に仮想歩行者の斥力ポテンシャルの形状を示す。

次に、目標減速度の算出方法について述べる。前後方向運動予測のためのサンプリング周期 Δt_{p-x} と予測ホライズン N_x を定義し、目標減速度の候補の最大値 $a_{p-x, \max}$ と最小値 $a_{p-x, \min}$ (ここでは減速側のみ考えるため、0 とする) を決定する。

仮想歩行者のリスクポテンシャル U_{ped} と予測減速度 a_{p-x} に基づく評価関数を最小化することで予測減速度 a_x^* を算出する。

$$a_x^*(t) = \min_{a_{p-x}} \sum_{k_x=0}^{N_x} (U_{ped}(X_{p-x}(k_x)) + r_x a_{p-x}^2) \quad (7)$$

subject to

$$X_{p-x}(k_x) = X_e(t) + V(t) \cdot k_x \cdot \Delta t_{p-x} + \frac{1}{2} a_{p-x} \cdot (k_x \cdot t_{p-x})^2 \quad (8)$$

ただし、式(7)中の r_x は減速度入力に対する重み係数を示す。式(8)の X_{p-x} は予測位置の X 座標を示し、横方向運動制御における予測位置とは独立に算出される。

(4) 運動計画の妥当性検証

実験では停車車両の位置を図 6 のように設定し、得られた実験データを図 7 に示す。また、シミュレーションと熟練ドライバの車両速度と車両軌跡のグラフを図 8 に示す。熟練ドライバのグラフには 10 m 刻みに標準偏差を示している。シミュレーションのデータは車両速度、車両軌跡ともに熟練ドライバの標準偏差以内であり、よく一致していることが確認できる。このことから提案したシステムは熟練ドライバの運転行動を模擬可能であることが確認できる。

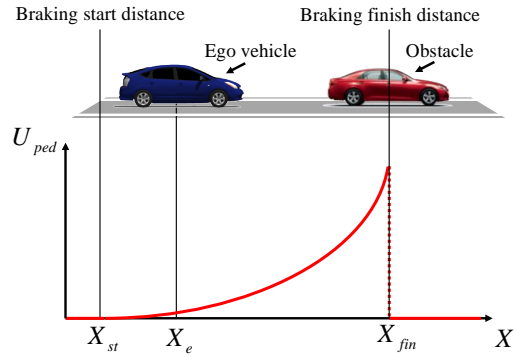


図 5 前後方向のリスクポテンシャル

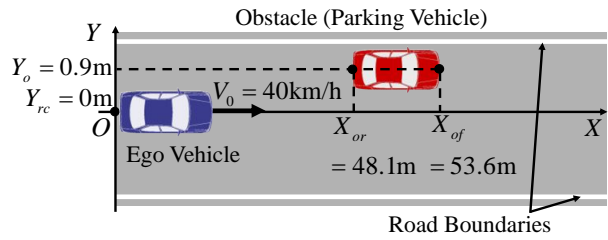


図 6 駐車車両回避シミュレーション条件

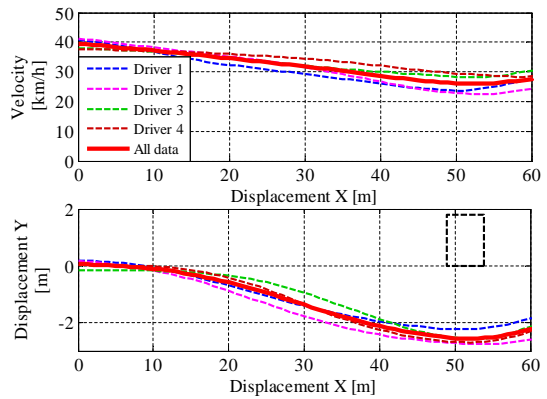


図 7 駐車車両回避の熟練ドライバのデータ

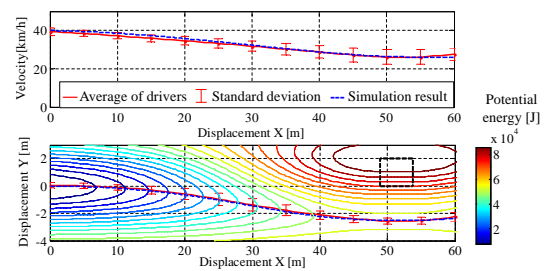


図 8 熟練ドライバの走行データとの比較

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 3 件)

Ryosuke Matsumi、Pongsathorn Raksincharoensak and Masao Nagai、
Study on Autonomous Intelligent Drive

System based on Potential Field with Hazard Anticipation、Journal of Robotics and Mechatronics、Vol.27、No.1、2015、pp.5-11.

長谷川隆裕、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、リスクポテンシャルを考慮した最適制御理論による自律運転知能システムに関する研究、自動車技術会論文集、Vol.46、No.2、2015、pp.497-502.

Ryosuke Matsumi、Pongsathorn Raksincharoensak and Masao Nagai、Development of Autonomous Intelligent Driving System to Enhance Safe and Secured Traffic Society for Elderly Drivers、Journal of Robotics and Mechatronics、Vol.25、No.6、2013、pp.966-972.

〔学会発表〕(計 5 件)

Ryosuke Matsumi、Pongsathorn Raksincharoensak and Masao Nagai、Autonomous Driving Intelligence Systems for Collision Avoidance Based on Expertised Anticipatory Driving Behaviour、Proceedings of FISITA World Automotive Congress、F2014-IVC-045、pp.1-12 (2014)、Maastricht、the Netherlands、2014.6.2-6.

Takahiro Hasegawa、Pongsathorn Raksincharoensak and Masao Nagai、Risk-Potential Based Motion Planning and Control of Proactive Driving Intelligence System for Enhancing Active Safety、Proceedings of 12th International symposium on advanced vehicle control (AVEC '14)、No.20149224、pp.132-137、Tokyo University of Agriculture and

Technology、Tokyo、Japan、2014、2014.9.22-26.

長谷川隆裕、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、リスクポテンシャルを考慮した最適制御理論による自律運転知能システムに関する研究、自動車技術会秋季大会学術講演会前刷集、No.244-20145871、仙台区国際センター、2014、2014.10.22-24
長谷川隆裕、ポンサトーン・ラクシンチャラーンサク、永井正夫、潜在リスク予測ドライバモデルを用いた自律運転知能システムの運動制御～駐車車両回避時の経路生成～、自動車技術会学術講演会前刷集、24-20145076、pp.1-4、パシフィコ横浜、2014.5.21-23.

長谷川隆裕、ポンサトーン・ラクシンチャラーンサク、永井正夫、リスクポテンシャルに基づく障害物回避のための自律型ブレーキと操舵制御手法に関する研究、自動車技術会学術講演会前刷集、No.18-13、pp.1-4、パシフィコ横浜、2013.5.20-22.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.tuat.ac.jp/~pong>

6. 研究組織

(1)研究代表者

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・准教授
研究者番号：30397012

(2)研究分担者 なし

(3)連携研究者 なし