

令和元年5月27日現在

機関番号：32660

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06162

研究課題名(和文) 自動車の市街地自動運転実現のための危険予測自動運転技術

研究課題名(英文) Hazard-Anticipative Driving Method for Automated Driving in Urban Area

研究代表者

林 隆三 (Hayashi, Ryuzo)

東京理科大学・工学部機械工学科・准教授

研究者番号：80505868

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、狭隘な市街地での自動運転において難しい課題の一つであるとされている、歩行者追い越し時の急横断事故に着目し、安全かつ円滑に歩行者の追い越しを行うことができる自動運転手法の検討を行った。ロボティクス分野において用いられるポテンシャルフィールド法を応用し、道路境界や歩行者から斥力が働いているかのように車両を振舞わせることで歩行者を避けながら安全に追い越すことを可能にする。ポテンシャルフィールド法においては、そのパラメータ設定が重要となるが、本研究では、遺伝的アルゴリズムを用いてパラメータの最適化を行う手法を提案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

これまでポテンシャルフィールド法では、潜在的な危険に対していかに安全を確実に担保するかが課題であったが、本研究ではこの問題を解決する手法ができた。考え方自体は他の広範な自動運転の安全性問題に応用可能であることから、広く波及することが期待される。

本研究の成果は、まだまだ実用化は難しいとされる市街地自動運転の実現を一步近づけるものであり、物流における人手不足や免許返納後の高齢者の移動問題に対して寄与するものである。

研究成果の概要(英文)：This study focuses on accidents when a vehicle overtake a pedestrian. It is an important problem to be solved to realize automated driving in urban areas. This study proposes an automated driving method which can overtake a pedestrian in a small street safely and smoothly. Potential field method, which is used in robotics, is utilized. It make a vehicle behave as if repulsive forces are applied to the vehicle, so that the vehicle evasively overtake the pedestrian. In the potential field method, it is important how to determine the values of parameters. In this study, the parameters are determined by using genetic algorithm to optimize the potential field.

研究分野：機械力学・制御

キーワード：交通機械制御 自動車 予防安全 自動運転

### 1. 研究開始当初の背景

現在、米国 GM 社、日産自動車、トヨタ自動車などが続々と自動運転車の発売を発表しており、自動運転技術はすでに実用化段階に入っている。しかしこれは、高速道路など一部の限定された道路上でのことであり、市街地、特に歩行者や自転車が混在する生活道路での自動運転実現は当分先のことで考えられている。この理由は、現状の自動運転による緊急自動ブレーキ技術では歩行者や自転車の不安全行動（物陰からの飛び出しなど）に対応しきれず、対歩行者・自転車の安全が保障できないためである。

生活道路での運転、例えば図1のような狭路での歩行者追い越し時において、人間のドライバーは歩行者等の飛び出しを潜在的なリスクとして考慮し、仮に歩行者が飛び出してきた場合でも歩行者の手前で停止できるようにあらかじめ十分に減速を行うことで、事故を防止している。これが危険予測運転（いわゆる“かもしれない運転”）である。このような熟練ドライバーのような危険予測行動を自動運転システムに組み込むことで、歩行者等の不安全行動に対する交通事故を極限まで減少させることができ、生活道路での自動運転実現に向けて自動運転技術を大きく進歩させることができる。

しかしながら、危険予測運転は、教習所等においても「十分減速せよ」と教えられるのみであり、減速量の定量的な指針は存在せず、これについて論じられることすらほとんどなかった。

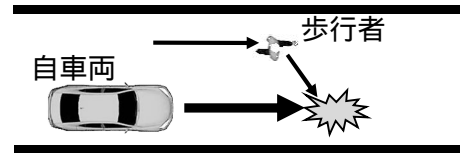


図1 狭路での歩行者の急横断

### 2. 研究の目的

上述のような背景の中、研究代表者らの過去の研究において、図1のような狭路での歩行者追い越し時に、歩行者が急横断を始めた場合でも事故を防止できる安全を保障できる速度が理論的に求められている。図2が実際に求められた狭路での歩行者追い越し時の最高安全速度であり、これは、歩行者がいつどのような角度で横断を開始したとしてもドライバーがブレーキを行うことで事故が防止できる自車速度の上限（理論的安全速度）を求めたものである。また、図3はこの安全速度を緩やかな加減速により順守するように構築した規範的運転行動モデルであり、理論的に求めた危険予測運転が、実際の熟練ドライバーの運転行動とよく一致することも確認されている。

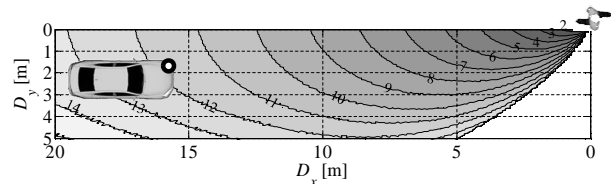


図2 歩行者の急横断に備えた理論的安全速度

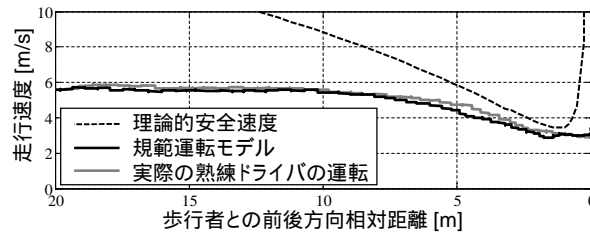


図3 歩行者追い越し時の規範運転モデル

ただし、図3の規範運転モデルは、ドライバーは操舵を行わず加減速のみを制御するものとした場合のものであり、生活道路での自動運転技術としては、操舵によって歩行者との距離を広く取ることでより早くスムーズに追い越すことができ、交通の円滑化に寄与できると考えられる。そこで、本研究では、狭路での歩行者の追い越しにおける規範運転モデルを拡張し、安全かつ円滑に歩行者を追い越すことが可能な車両制御手法の検討を行う。

### 3. 研究の方法

本研究では、操舵と制駆動の同時制御が可能な車両制御手法として、ポテンシャルフィールド法に着目し、数値シミュレーションにより有効性の検討を行う。

ポテンシャルフィールド法とは、ロボティクス分野において用いられる障害物回避手法の一種である。障害物に仮想的なポテンシャル(力場)を設定することにより、障害物が発生する力場があたかも自車に力を与えたかのように自車を振舞わせることで、自然な障害物回避を実現するというものである。本研究では、図4に示すように歩行者と道路境界に仮想的な斥力場を設定し、その斥力場から発生する仮想斥力によって動かされるように、時々刻々、車両の運動を制御する。

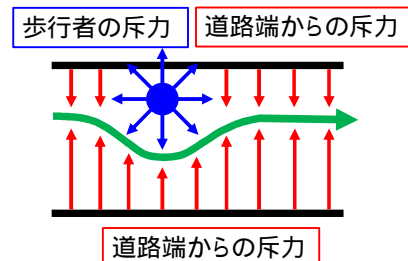


図4 ポテンシャルフィールドの概念図

提案する危険予測自動運転車両制御システムのブロック線図を図5に示す。まず、歩行者位置  $X_p, Y_p$  および車両初期位置  $Y_0$ 、目標速度  $V_0$  と自車位置  $X, Y$ 、自車速度  $V$  の差、具体的には、 $X_p - X, Y_p - Y, Y_0 - Y, V_0 - V$  の4つの差を入力とし、後述のポテンシャル関数と散逸関数により目標前後加速度  $a_x^*$  と目標横加速度  $a_y^*$  を算出する。目標横加速度  $a_y^*$  は、定常円旋回時の車両の運動特性<sup>(8)</sup>を利用して目標実舵角  $\delta^*$  に変換し、これら目標前後加速度  $a_x^*$  と目標実舵角  $\delta^*$  を制御対

象の車両系に入力する．入力に応じて，次のステップの自車位置，姿勢，速度が決定され，これをフィードバックする．

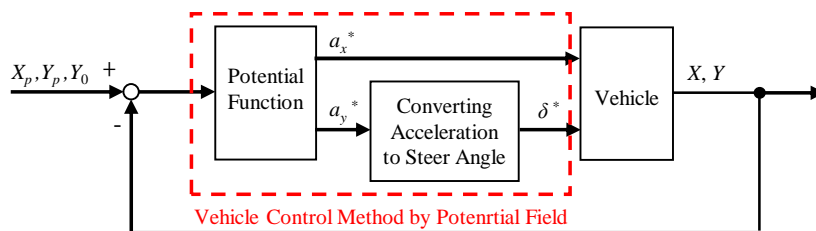


図5 車両制御のブロック線図

ポテンシャルフィールドは以下のように設定する．前方の歩行者が存在していない場合において自車が直線単路を走るためのポテンシャル（基本走行ポテンシャル） $U_b$ と歩行者からの斥力ポテンシャル  $U_p$ ，および車両を目的地方向へ導く引力ポテンシャル  $U_a$ の3種類により，図6に示すようなポテンシャルフィールドを形成する．

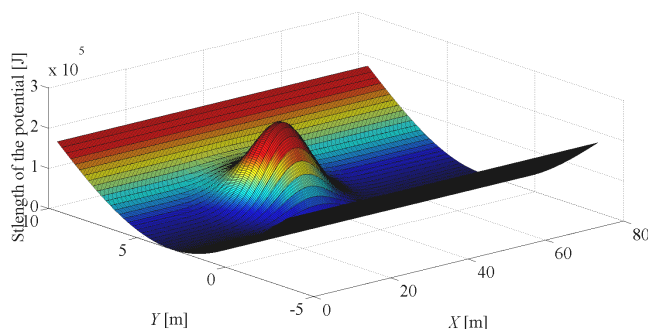


図6 ポテンシャルフィールド

基本走行ポテンシャル  $U_b$  は，式(1)から(4)に示すように，レーンを表すポテンシャルと左右の道路境界からの斥力ポテンシャルの和とする．

$$U_b = U_w + U_{wl} + U_{wr} \quad (1)$$

$$U_w = w_w \left[ 1 - \exp \left\{ -\frac{(Y - Y_0)^2}{2\sigma_w^2} \right\} \right] \quad (2)$$

$$U_{wl} = w_{wl} \frac{1}{Y} \quad (3)$$

$$U_{wr} = -w_{wr} \frac{1}{Y - W_r} \quad (4)$$

ここで， $Y$  は左側の道路境界からの自車両の変位である． $Y_0$  は左側の道路境界を基準とした走行レーンの位置であり，道路幅を  $W_r$  として  $Y_0 = W_r/4$  である．また， $\sigma_w$  は走行レーンポテンシャルの広がりを表すパラメータであり， $w_w$ ， $w_{wl}$ ， $w_{wr}$  はそれぞれレーン，左側道路境界，右側道路境界からの斥力の強さを表すパラメータである．

歩行者ポテンシャルは式(5)に示すように，歩行者の位置を頂上とする山形のポテンシャルとして表す．

$$U_p = \frac{w_p}{\left( \frac{X - X_p}{\sigma_{pX}} \right)^2 + \left( \frac{Y - Y_p}{\sigma_{pY}} \right)^2} \quad (5)$$

ここで， $X$  は自車両の道路長手方向の変位であり， $X_p$ ， $Y_p$  は歩行者の位置である．また， $\sigma_{pX}$ ， $\sigma_{pY}$  はポテンシャルの広がりを表すパラメータ， $w_p$  は歩行者からの斥力の強さを表すパラメータである．

引力ポテンシャルは式(6)のように設定する．

$$U_a = -w_a X \quad (6)$$

ここで， $w_a$  は引力の強さを表すパラメータである．

車両の挙動はこれらのポテンシャルのパラメータの値により大きく影響を受けるため、パラメータの値の最適化が必要となる。本研究では遺伝的アルゴリズムを用いてパラメータの値の最適化を行った。各パラメータの範囲を表 1 に示すように設定し、評価関数を式(7)のように、3 つの指標  $E_s$ 、 $E_i$ 、 $E_o$  の線形和として表すものとした。

表 1 パラメータの値の範囲

Symbol	$w_p$	$\sigma_{pX}$	$\sigma_{pY}$	$w_w$	$\sigma_w^2$	$w_{wrl}$
Range	$10^5 \sim 10^6$	1~20	0.1~2.0	$10^5 \sim 10^6$	1~20	100~2000

$$E = k_s E_s + k_i E_i + k_o E_o \quad (7)$$

$E_s$  は安全性指標であり、先行研究にて提案された最高安全速度指標を満たすものは 0、満たさない場合は 1 とする。

$E_i$  は追い越し不可能件数であり、同世代内での追い越し不可能件数が最大のものに対する比とする。つまり、 $E_i$  は 0~1 の値を取り、小さいほど優良であるといえる。

$E_o$  は追い越し時間であり、前条件のシミュレーションにおける追い越しに必要な時間の平均値を、同世代内の追い越し時間の最大値で除したものとす。つまり、 $E_o$  もまた 0~1 の値を取り、小さいほど優良である。

$k_s$ 、 $k_i$ 、 $k_o$  は各指標に対する重みを表すが、本研究では安全性を最優先とし、次に追い越し可能件数、最後に追い越し時間を優先とすることから、 $k_s=10000$ 、 $k_i=1000$ 、 $k_o=1$  とした。

評価に用いるシミュレーション条件は、歩行者速度  $V_p$ 、道幅  $W_r$ 、歩行者 Y 位置  $Y_p$  の各環境条件を表 2 に示すように様々に変化させ、全 87 通りの組み合わせにより行う。

表 3 シミュレーション条件

条件	式	範囲	刻み	単位
歩行者速度	$V_p$	0.0~2.0	1.0	m/s
道路幅	$W_r$	4.0~9.0	0.5	m
歩行者 Y 位置	$Y_p$	$0.5 \sim W_r/4$	0.5	m

以上の条件で、各パラメータのポテンシャルに対して全 87 通りのシミュレーションを行い、結果の評価によって適応度の高いものを選択して新たな母集団を形成する。その新たな母集団に対して交差や突然変異といった操作を行い、その結果新たに生まれた個体に対して再び適応度を評価する。以上の操作を繰り返すことにより、適応度の高い個体を最適なパラメータセットとして選定する。

#### 4. 研究成果

前述の方法によりパラメータの最適化を行ったところ、40 世代で計算は収束し、表 4 に示す値がポテンシャルフィールドのパラメータとして選定された。

表 4 決定されたパラメータの値

Symbol	$w_p$	$\sigma_{pX}$	$\sigma_{pY}$	$w_w$	$\sigma_w^2$	$w_{wrl}$
Value	400000	8	0.9	400000	18	2000

本パラメータセットを用い、歩行者追い越しの車両走行シミュレーションにより妥当性の検証を行った。図 7 および 8 にその例を示す。

図 7 は先行研究により提案されている自動減速システムとの比較である。自動減速システムでは操舵を行わずに追い越そうとすることから、歩行者との横方向距離が短いため最高安全速度  $V_{ss}$  が低く、そのため、大幅に速度を低下させる必要がある。これに対し、提案する手法では操舵により歩行者との横方向距離を取ることにより、最高安全速度が高く維持されるため、高い速度のまま安全に追い越すことができている。追い越しに費やした時間は、自動減速システムが 19.8 秒であったのに対し、提案する手法では 18.0 秒である。

図 8 は、遺伝的アルゴリズムによる最適化を行わず、人間が試行錯誤によりポテンシャルフィールドのパラメータを決定した場合との比較である。試行錯誤により決定したポテンシャルフィールドでは、図 8(b)に示すように、歩行者からの斥力が強すぎるにより、歩行者を追い越せない事象が発生したが、遺伝的アルゴリズムを用いた場合はそのような事例の数は大幅に減少することが確認された。

以上のように、遺伝的アルゴリズムを用いてポテンシャルフィールドのパラメータを決定することにより、安全を担保しつつ円滑に歩行者の追い越しを行うことができる自動運転手法が

実現できることが示された。

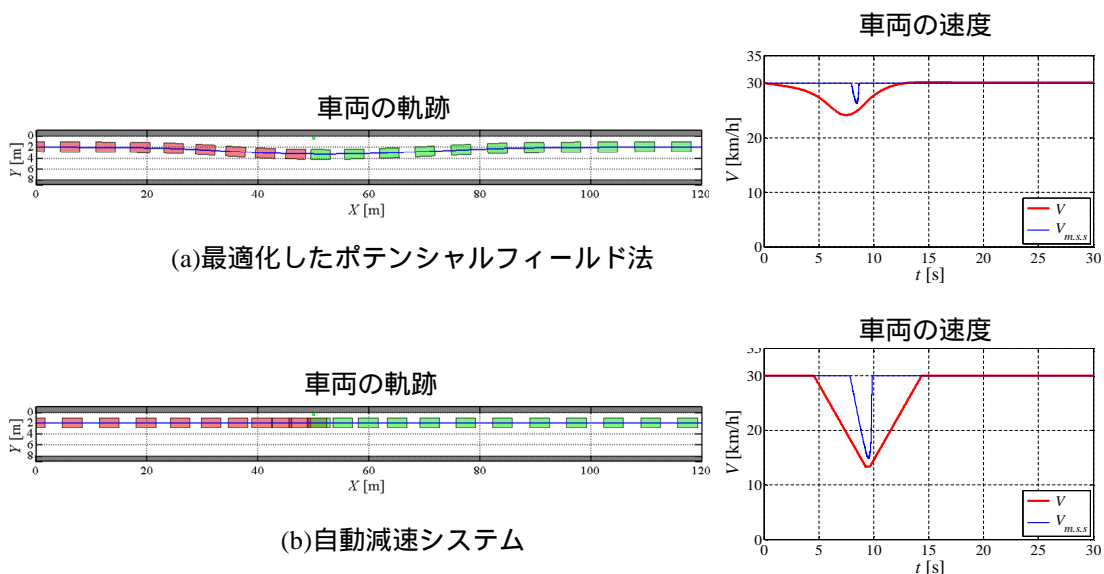


図7 自動減速システムとの比較

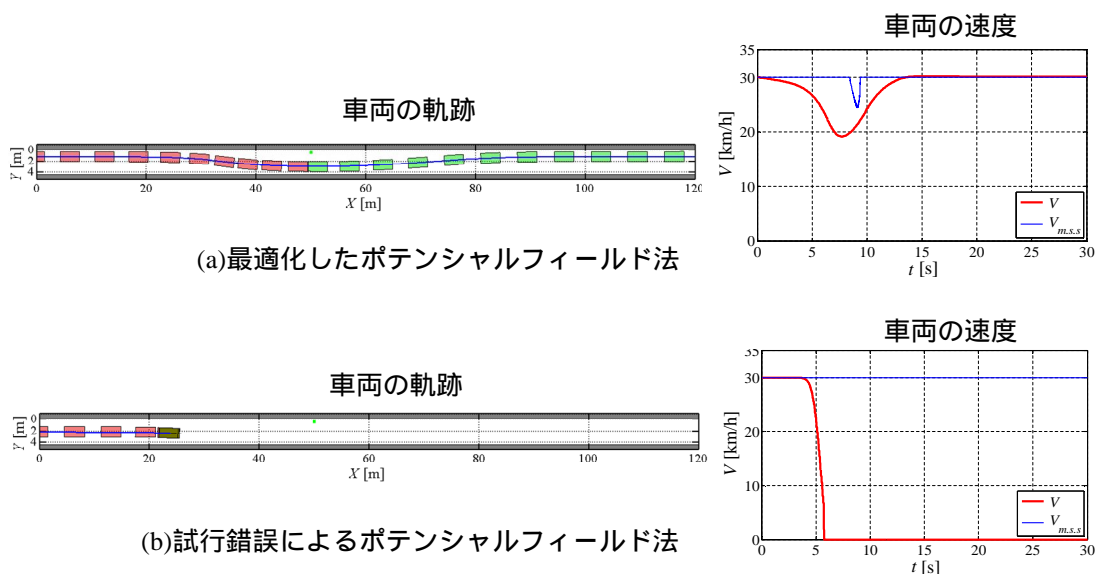


図8 試行錯誤による最適化との比較

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕

なし

〔学会発表〕(計4件)

車路遥、望月立行、林隆三、目標軌道更新機能を備えた前方障害物自動回避システムの評価実験、日本機械学会第27回交通・物流部門大会、2018年

島田仁、林隆三、広瀬拓真、狭路での歩行者追越場面におけるポテンシャルフィールド法を用いた車両制御手法に関する研究、第26回交通・物流部門大会、2017年

岩田秀樹、林隆三、Study on Deceleration Control for the Autonomous Frontal Obstacle Avoidance System using Evasive Steering、Fourth International Symposium on Future Active Safety Technology Toward zero traffic accidents、2017年

荻原瑛彦、林隆三、ヒヤリハットデータによる歩行者の飛び出し行動の分析とモデル化、第25回交通・物流部門大会、2016年

〔図書〕

なし

〔産業財産権〕

なし

〔その他〕

なし

## 6．研究組織

(1)研究分担者

なし

(2)研究協力者

なし

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。