

指導教員印

2025年度卒業論文

加速度推定機能を組み込んだポテンシャル 法による動的障害物回避手法の構築

Dynamic Obstacle Avoidance Using a Potential Field Method

Incorporating Acceleration Estimation

2025年11月13日

東京都市大学 情報工学部
情報科学科
自動制御研究室

大屋 英稔 教授
星 義克 講師
2221103 矢口 雄大

概要

近年、自動走行ロボットの研究が盛んに行われている。特に物流業界では自動配達ロボットの実用化に向けた開発や法律の改正が進められており、トラック運転手の長時間労働是正や物流分野の人手不足の緩和が期待される。

自動配達ロボットの社会実装には未知環境における安全な経路生成が不可欠である。大局的経路計画やニューラルネットワークを用いた方法があるが、大局的経路計画では曲がり角付近で障害物に接近しすぎる問題がある。また、ニューラルネットワークは学習に多くのデータと時間を要する。そのため、これらの手法は未知環境下でのリアルタイムな経路生成には向きである。一方、ポテンシャル法は計算量が少なくリアルタイム性に優れた手法である。

本研究では、加速度推定機能を組み込んだポテンシャル法による動的障害物回避手法の構築を目的とする。加速度推定を導入することで、障害物の将来的な運動をより高精度に予測し、動的環境下においてより滑らかで安全な経路生成を実現する手法を提案し、最後にシミュレーションによって提案する手法の有効性を検証する。

In recent years, research on autonomous mobile robots has been actively conducted. In particular, in the logistics industry, the development and legal reforms toward the practical use of autonomous delivery robots have been progressing, which are expected to help reduce the long working hours of truck drivers and alleviate labor shortages.

For the social implementation of autonomous delivery robots, safe path generation in unknown environments is essential. Although methods such as global path planning and neural networks have been proposed, global path planning tends to cause robots to approach obstacles too closely at corners, and neural networks require a large amount of training data and time. Therefore, these methods are not suitable for real-time path generation in unknown environments. On the other hand, the potential field method is a lightweight algorithm with low computational cost and excellent real-time performance.

This study aims to construct a dynamic obstacle avoidance method based on the potential field approach incorporating acceleration estimation. By introducing acceleration estimation, the robot can predict the future motion of obstacles more accurately, enabling smoother and safer path generation in dynamic environments. Finally, the effectiveness of the proposed method is verified through simulation.

目 次

1 序論	1
1.1 研究背景	1
1.2 研究目的	2
2 従来研究	4
2.1 ポテンシャル場の勾配	4
参考文献	6

1 序論

1.1 研究背景

近年、自動走行ロボットの研究が盛んに行われている。特に物流業界では、自動配送ロボットの実用化に向けた開発や法律の改正が進められている [1]。これにより、トラック運転手の長時間労働の是正や物流分野の人手不足の緩和が期待される。このような背景から、物流業界では労働力不足を補う手段として、自動配送ロボットの社会実装が強く期待されている。そこで社会実装を実現するために、未知環境下や未知障害物の存在下において、安全かつ安定した経路を生成する必要がある。特に、動的障害物を考慮した経路生成を行う場合は、障害物の検出を行い、その移動を適切に予測することが重要となる。

移動ロボットにおける障害物回避のための経路生成手法として、大局的経路計画やニューラルネットワーク、ポテンシャル法を用いた方法がある。大局的経路計画では、ロボットが地図全体などの環境情報をすでに把握している場合において、スタートからゴールまでの最適な経路をあらかじめ計算して求める手法である。この手法では、静的環境下では非常に有効だが、動的障害物が存在する場合には、障害物の移動のたびに経路を再計算する必要があり、計算コストが高くなるという欠点がある [2]。また、ニューラルネットワークは学習に多くのデータと時間を要する [3]。これに対し、ポテンシャル法 [4] は、目的地からの引力および障害物からの斥力によって構成されるポテンシャル場を生成し、ロボットがそのポテンシャル場の勾配に従って移動することで、目的地への経路を導出する手法である。図 1 にポテンシャル場の例を示す。ポテンシャル法は計算量が少ないシンプルなアルゴリズムのためリアルタイム性が優れている手法である。しかし、ポテンシャル法には「停留問題」がある。「停留問題」とは障害物の斥力と目的地の引力が釣り合い、勾配が限りなく 0 に近い状態に陥り目的地にたどり着けなくなる問題である [4]。

従来研究 [5]～[8] では、ポテンシャル場の勾配ベクトルに沿ってロボットを移動させることが考えられている。特に従来研究 [7] では、停留した際に障害物の向こう側に仮ゴールを A*探索法を用いて設定することで、「停留問題」を解決することに成功しており、静的障害物の回避に有効であることが示されている。さらに、壁沿い走行に加えて回り込み走行を組み込むことで、より柔軟に停留を回避する手法も提案されている。一方、従来研究 [8]

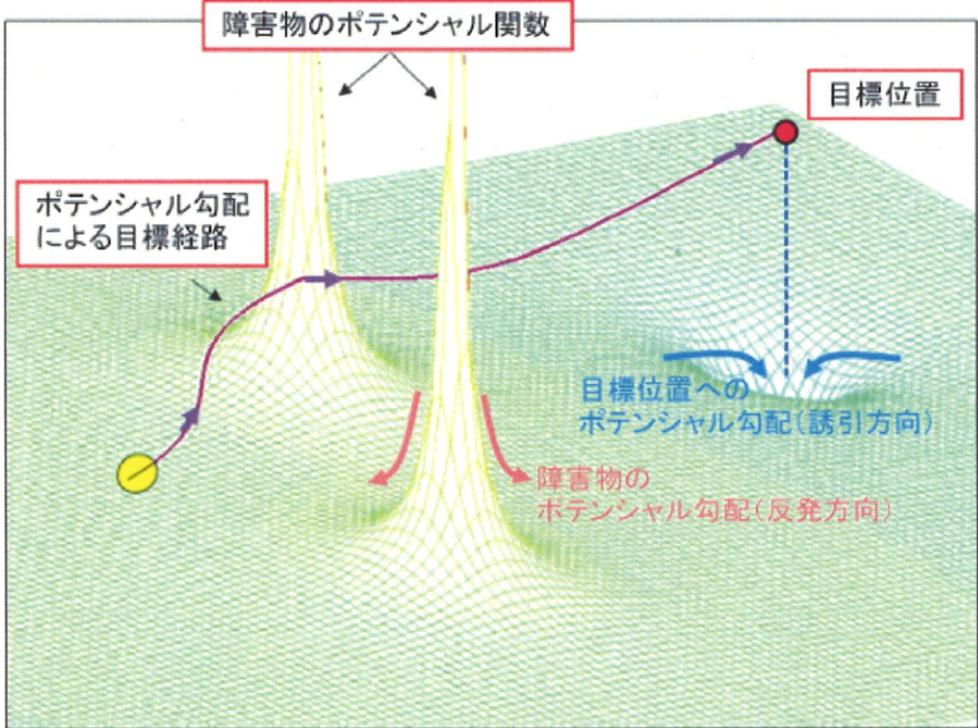


図 1: ポテンシャル場の例 [9]

では、ポテンシャル法に速度推定機能を組み込むことで、動的障害物の回避に成功している。この手法では、動的障害物の回避においてその速度情報を基に仮ゴールの設定を行っている。そのため、障害物の速度や進行方向を考慮した経路生成が可能となり、従来の静的障害物に対する回避手法を発展させた形で、動的環境下における自律移動を実現している。しかし、加速度をもつ障害物に対しては、速度のみを基にした仮ゴールの設定では適切な回避が困難となるという問題がある。その結果、生成される経路が遠回りになったり、目標地点までの最短経路で進行できない場合がある。また、急加速や急減速を行う障害物の挙動を十分に反映できず、スムーズな回避動作を実現することが難しい。

1.2 研究目的

本研究では、従来研究 [8] を基に、ポテンシャル法に障害物の加速度予測機能を組み込んだ動的障害物回避手法を提案する。提案手法では、障害物の位置変化から速度および加速度を算出し、障害物の将来位置を予測する。これにより、障害物の将来位置を考慮したより精度の高い回避行動を実現することを目的とする。また、障害物の将来位置を複数ス

ステップ先まで予測し、それらを斥力ポテンシャル場に反映させることで、ロボットが障害物の進行経路に侵入することを防ぎ、より安全かつ安定した経路生成を実現する。最後に、シミュレーションを通じて提案手法の有効性を検証する。

2 従来研究

2.1 ポテンシャル場の勾配

従来研究 [8] では、障害物から発生する斥力ポテンシャル場、目的地から発生する引力ポテンシャル場、および全体のポテンシャル場を次式のように定めている。

- 障害物座標の斥力ポテンシャル関数 $P_{ob}(x_r, y_r)$

$$P_{ob}(x_r, y_r) \triangleq \frac{1}{\sqrt{(x_r - x_{ob})^2 + (y_r - y_{ob})^2}} \quad (1)$$

- 目的地座標の引力ポテンシャル関数 $P_{ds}(x_r, y_r)$

$$P_{ds}(x_r, y_r) \triangleq -\frac{1}{\sqrt{(x_r - x_{ds})^2 + (y_r - y_{ds})^2}} \quad (2)$$

- 全体のポテンシャル場 $P(x_r, y_r)$

$$P(x_r, y_r) \triangleq \sum \omega_{ob} P_{ob} + \omega_{ds} P_{ds} \quad (3)$$

(x_r, y_r) ロボットの座標

(x_{ob}, y_{ob}) 障害物の座標

(x_{ds}, y_{ds}) 目的地の座標

$P_d(x_r, y_r)$ 引力ポテンシャル関数の重み

$P_o(x_r, y_r)$ 斥力ポテンシャル関数の重み

ここで、 (x_r, y_r) はロボットの座標を示し、 (x_{ob}, y_{ob}) 、 (x_{ds}, y_{ds}) はそれぞれ障害物の座標と目的地の座標を表している。また、(3) 式の ω_{ob} 、 ω_{ds} はどちらも正の実数の重み付けパラメータであり、それぞれ引力ポテンシャル関数 $P_d(x_r, y_r)$ と斥力ポテンシャル関数 $P_o(x_r, y_r)$ の重みとなっている。ただし、 ω_{ob} を大きくしてしまうと障害物の斥力から受ける影響が強まり、目的地への到着が難しくなる可能性があるため $\omega_{ob} < \omega_{ds}$ とする。ロボットの動く方向は、ポテンシャル場の勾配によって決められ、 x 方向、 y 方向における勾配は次式のように求められる。

x 方向の勾配

$$\frac{\partial P_{ob}(x_r, y_r)}{\partial x} = -\frac{x_r - x_{ob}}{\{(x_r - x_{ob})^2 + (y_r - y_{ob})^2\}\sqrt{(x_r - x_{ob})^2 + (y_r - y_{ob})^2}} \quad (4)$$

$$\frac{\partial P_{ds}(x_r, y_r)}{\partial x} = \frac{x_r - x_{ds}}{\{(x_r - x_{ds})^2 + (y_r - y_{ds})^2\}\sqrt{(x_r - x_{ds})^2 + (y_r - y_{ds})^2}} \quad (5)$$

$$\frac{\partial P(x_r, y_r)}{\partial x} = \sum \omega_o \frac{\partial P_{ob}(x_r, y_r)}{\partial x} + \omega_d \frac{\partial P_{ds}(x_r, y_r)}{\partial x} \quad (6)$$

y 方向の勾配

$$\frac{\partial P_{ob}(x_r, y_r)}{\partial y} = -\frac{y_r - y_{ob}}{\{(x_r - x_{ob})^2 + (y_r - y_{ob})^2\}\sqrt{(x_r - x_{ob})^2 + (y_r - y_{ob})^2}} \quad (7)$$

$$\frac{\partial P_{ds}(x_r, y_r)}{\partial y} = \frac{y_r - y_{ds}}{\{(x_r - x_{ds})^2 + (y_r - y_{ds})^2\}\sqrt{(x_r - x_{ds})^2 + (y_r - y_{ds})^2}} \quad (8)$$

$$\frac{\partial P(x_r, y_r)}{\partial y} = \sum \omega_o \frac{\partial P_{ob}(x_r, y_r)}{\partial y} + \omega_d \frac{\partial P_{ds}(x_r, y_r)}{\partial y} \quad (9)$$

よって、ポテンシャル場内のロボット位置 (x_r, y_r) における勾配 $\nabla p(x_r, y_r)$ は、次式のように表される。

$$\nabla p(x_r, y_r) \triangleq \left(\frac{\partial P(x_r, y_r)}{\partial x}, \frac{\partial P(x_r, y_r)}{\partial y} \right) \quad (10)$$

地点 (x_r, y_r) にいるロボットは、式 (10) で表される勾配ベクトルに従って移動することで、目的地へと向かう。

参考文献

- [1] 経済産業省, 自動配送ロボットの将来像を取りまとめました <https://www.meti.go.jp/press/2024/02/20250226002/20250226002.html>
- [2] 青柳 誠司, 佐藤 伸仁, 山本 恭輝, 高橋 智一, 鈴木 昌人, ”移動ロボットの移動障害物回避に関するファジィルールの学習 ポテンシャル法, 強化学習法との比較,” システム制御情報学会論文誌, vol. 34, no. 8, pp. 209–218, 2021.
- [3] Ngangbam Herojit Singh and Khelchandra Thongam, ”Neural network-based approaches for mobile robot navigation in static and moving obstacles environments,” Intelligent Service Robotics 12.1 (2019): 55–67. Web. <https://doi.org/10.1007/s11370-018-0260-2>.
- [4] Xing. Yang, Wei. Yang, Huijuan. Zhang, Hao. Chang, Chin-Yin. Chen, and Shuangchi. Zhang, ”A new method for robot path planning based artificial potential field,” 2016 IEEE 11th Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA), pp. 1294–1299, 2016.
- [5] 粕山 剛輝, ”壁沿い走行を組み込んだ仮想ゴールポイントに基づくポテンシャル法による停留と障害物回避”, 東京都市大学自動制御研究室 2021 年度卒業論文 (2021)
- [6] 平岡 翔, ”ポテンシャル法における停留問題の回避, および効率的な経路生成手法”, 東京都市大学 2022 年度卒業論文 (2022)
- [7] 小池 基也, ”A*探索法を組み込んだ静止障害物に対するポテンシャル法の回避方法”, 東京都市大学 2023 年度卒業論文 (2023)
- [8] 榎田 日和, ”速度推定機能を組み込んだポテンシャル法による動的障害物の回避”, 東京都市大学 2024 年度卒業論文 (2024)
- [9] 瑠城 祐亮, 江口 和樹, 岩崎 聰, 山内 由章, 中田 昌宏, ”ポテンシャル法によるロボット製品の障害物回避技術の開発,” 新製品・新技術特集 三菱重工技法, vol.51, no.1, pp.40–45, 2014.

謝辞

本研究を進めるにあたり，ご多忙にも関わらず丁寧にご指導，ご鞭撻のほどをいただきました大屋 英稔 教授，星 義克 講師に深く感謝申し上げます。また，悩んでいるところを見逃さず声をかけていただいた大学院生の先輩方，日頃から同じ研究室の仲間として相談に応じてくださった自動制御研究室の皆様にもお礼を申し上げます。この1年間での研究生活を通じて，様々な経験を積むことができ大きく成長することができました。今後的人生でもこの経験を活かしていきたいと思います。ありがとうございました。