

ポテンシャル場の先導配置による 複数ロボットの隊列走行制御に関する研究

知能システム制御研究室 立花 涼斗

1. はじめに

新型コロナウイルス感染症拡大からオンラインでの消費行動に変化が生じている。国土交通省の調査により、倉庫業界では業務量増加だけでは留まらず、従業員の高齢化が進んでいる [1]。このような場合、労働力削減の観点から AMR(Autonomous Mobile Robot) や AGV(Automatic Guided Vehicle) 等の搬送ロボットが注目され、既に導入されている倉庫や工場は少なくない。搬送ロボットの補充を考えた場合、対象環境のモデル構築、走行のガイダンスの見直し等の問題がある。

このような背景から本研究では追従という形態をとる。追従手法の先行研究に際して倉庫や工場内を想定した隊列走行に関する研究はいくつかあるが、どの研究においても走行経路軌跡に近似することが困難であり、近似性の高い手法は他経路への汎用性が低い等課題がある。三浦 [2] は制御系をバネマスタンプ系とし、先導ロボット走行情報を追加することで追従を可能とするが、車間距離が長くなるほど追従精度が劣化してしまう。その他の先行研究として人工ポテンシャル法が提案されている。小池 [3] は複数の引力ポテンシャルを用いることで巡回経路の経路誘導をしている。この手法では予測できる経路から外れた場合の自律移動が困難である。

以上の先行研究を応用して本研究では人工ポテンシャル法を用いて先導ロボット後方に次々にポテンシャル場を配置するシステムを構築し、先導ロボットの移動に柔軟な追従走行を実現する。また、ポテンシャル場を先導配置することで車間距離に影響を受けない高精度な追従を行う。さらに、先導ロボットの経路の曲率からポテンシャル場の谷の深さの形状を変形させることで追従精度の補完も行う。

2. 追従システム

2.1 人工ポテンシャル場

人工ポテンシャル法とはロボットの出発点を目標点より相対的に高くなるように仮想的なポテンシャル場を配置することでそのポテンシャル場上の勾配から受ける力の合力に従って経路誘導を行う手法である。

Fig.1 より、指数関数型ポテンシャル場は谷中央付近で急激に引力が小さくなる形状をしている。ただし谷中央を基準として異なるポテンシャル関数で構成されているため正負で場合分けをする必要がある。指数関数型ポテンシャル場 U^s は、ポテンシャル場の傾き a_g とポテンシャル場の谷の深さに関係

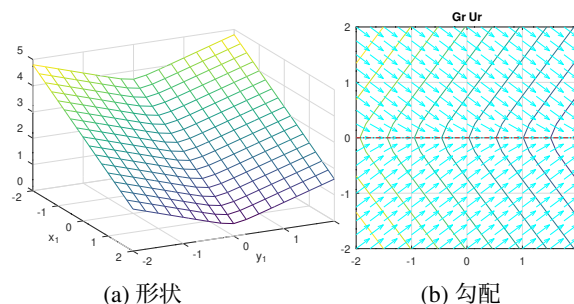


Fig. 1 : 指数関数型ポテンシャル場

する係数 b および c , 配置したい座標 (x, y) を用いて式 (1) と式 (2) のように表す。

$$U_1^s = -a_g x + b \left(y + \frac{1}{c} e^{-cy} \right) \quad (y \geq 0) \quad (1)$$

$$U_2^s = -a_g x + b \left(-y + \frac{1}{c} e^{cy} \right) \quad (y < 0) \quad (2)$$

2.2 追従システム

Fig.2 に追従ロボットに加わる力の概要図を示す。追従ロボットに加わる力の大きさ F_v と向き ψ_1 は、ポテンシャル場から受ける力 f^g の x 成分 f_x^g と y 成分 f_y^g を用いて式 (3), 式 (4) のように表す。

$$F_v = \|f^g\| = \sqrt{(f_x^g)^2 + (f_y^g)^2} \quad (3)$$

$$\psi_1 = \tan^{-1} \left(\frac{f_x^g}{f_y^g} \right) \quad (4)$$

追従ロボットから見た追従ロボットに加わる力の向き ψ_2 は、式 (4) の ψ_1 と追従ロボットの進行方向を用いて式 (5) のように表す。

$$\psi_2 = \psi_1 - \theta_2 \quad (5)$$

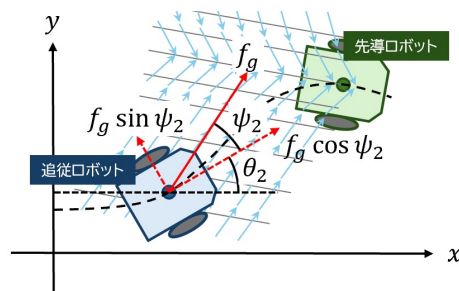


Fig. 2 : 追従ロボットに加わる力の概要図

追従ロボットの速度 v_r は、調整ゲイン α と式 (3) の F_v および式 (5) の ψ_2 を用いて式 (6) のように表す.

$$v_r = \alpha F_v \cos \psi_2 \quad (6)$$

追従ロボットの角速度 ω_r は、調整ゲイン β と式 (3) の F_v および式 (5) の ψ_2 を用いて式 (7) のように表す.

$$\omega_r = \beta F_v \sin \psi_2 \quad (7)$$

3. 提案手法

3.1 先行履歴を加味したポテンシャル場の配置

Fig.3 に先行履歴を加味したポテンシャル場の配置の概要図を示す. 先行研究より, ポテンシャル場が追従ロボットの位置に近いほど追従精度が向上することが分かっている. 追従走行を行う上で車間距離を近づけるとはロボット同士の衝突のリスクを高めてしまう. また追従ロボットの台数を増やした場合, 先導ロボットから離れる後続のロボットほど追従精度は落ちてしまう. そこで, 追従ロボットの位置に近い先導ロボットの走行履歴にポテンシャル場を配置させることで目標距離を短くすることなく追従精度の向上を試みる. Fig.3 より, 遅れ D をサンプリング時間 Δt につけて, 先導ロボットの実位置から時刻 $D\Delta t$ 前の任意の先導ロボットの走行履歴を取り出し, ポテンシャル場を配置させる.

3.2 曲率とポテンシャル場の谷の深さ

ポテンシャル場の谷中央への引力は旋回時の追従精度に一因している. そこで, 先導ロボットの曲率に応じてポテンシャル場の谷の深さを変更することで旋回時にかけて谷中央への引力が大きくなるようにし, さらなる追従精度の向上を試みる.

先導ロボットの曲率 κ は, 先導ロボットの角速度 ω_1 と速度 v_1 を用いて式 (8) のように表す.

$$\kappa = \frac{\omega_1}{v_1} \quad (8)$$

ポテンシャル場の谷の深さに関する係数 b は, ポテンシャル場の谷の深さの変形速度 b_c と式 (8) の曲率およびポテンシャル場の谷の基準深さに関する係数 b_0 を用いて式 (9) のように表す.

$$b = |b_c \kappa + 1| b_0 \quad (9)$$

式 (9) のポテンシャル場の谷の深さに関する係数は先導ロボットが旋回をすると共に増加するため, Fig.1 の形状を基準に谷方向への勾配が時々刻々と大きくなるように変形する.

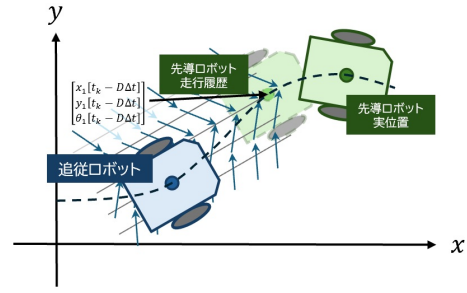
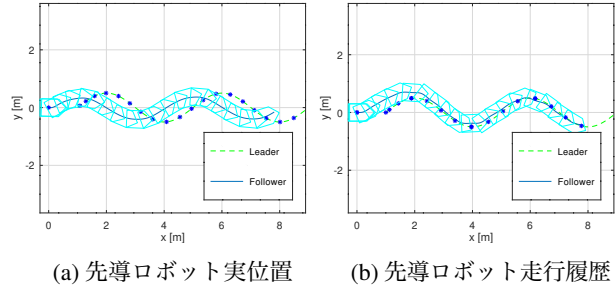


Fig. 3: 先行履歴を加味したポテンシャル場の配置の概要図



(a) 先導ロボット実位置 (b) 先導ロボット走行履歴

Fig. 4: S-shaped trajectory of robots by potential field configuration position

4. シミュレーション

Fig.4 にポテンシャル場の配置位置による S 字旋回時のロボットの経路を示す. 緑色の点線が先導ロボット, 青線が追従ロボットの経路を表している. Fig.4(b) より, ポテンシャル場を先導ロボットの走行履歴に配置することで追従精度の向上が確認できた.

5. まとめ

本研究では倉庫や工場内のような狭い経路での追従走行の実装を目指し, 人工ポテンシャル法を応用した追従手法の作成, ポテンシャル場の先導配置を考えた. シミュレーションにより, 高い追従精度を確認できた. また, 走行経路の曲率を考慮しポテンシャル場の形状を変化させることで追従精度の補完も行うことが可能である. 人工ポテンシャル法を用いた追従システムの有効性を確認できたため, 今後は走行実験を行い提案手法の検証をする.

参考文献

- [1] 物流施設における労働力調査
<https://www.mlit.go.jp/common/000043954.pdf>
(2024 年 1 月 10 日アクセス)
- [2] 三浦 洋靖, 奥川 雅之, “速度ベクトルと先導ロボット情報を利用した移動ロボットの隊列走行制御”, Dynamics & Design Conference 2016 講演論文集, セッション ID:429
- [3] Koike, M. and Takemori, F., “Path Planning for Mobile Robot by Sequential Generation of Valley and Saddle-shaped Potential Fields”, Proceedings of the 11th IIAE International Conference on Intelligent Systems and Image Processing 2024, pp. 203-209, 2024