

1. はじめに

近年、倉庫業界では慢性的な人手不足と、宅配取り扱い個数の増加により、労働者一人当たりの負担が大きくなっている。改善するためには、労働時間削減と稼働率向上により労働効率性を向上させることが求められる [1]。このような場合、移動ロボットが注目されるが、移動ロボットを導入するにおいて対象環境のモデル構築や走行のガイダンスが必要となり、導入するまでに時間やコストがかかる。そこで先導ロボットへの“追従”をコンセプトに経路生成を行うことで、直ちに移動ロボットを導入することができる。本研究では、追従ロボットが先導ロボットの移動軌跡を通るように追従する運搬支援システムを構築し、労働者一人当たりの負担を軽減することを目的に開発を行う。

先行研究 1 では、追従制御則で先導ロボットに追従している [2]。この手法では、追従経路を考慮しておらず、狭い道や曲がり道等で追従が困難である。先行研究 2 では、モデル式を先導ロボットと追従ロボットそれぞれから見た仮想連結点の速度が等しくなると考え、追従車の速度と角速度の関係式を導出する [3]。この手法では、追従ロボットが先導ロボットよりも内側を走行してしまう。

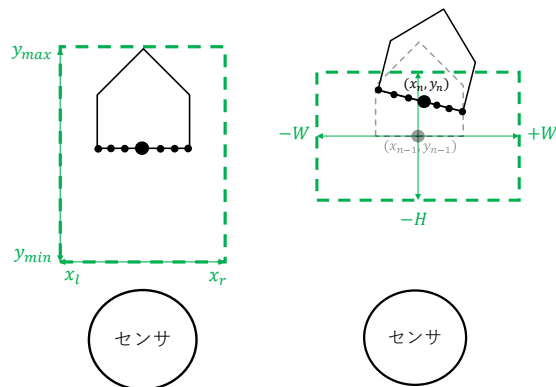
そこで本研究では、先行研究 1 の追従制御則を用いて先行研究 2 の仮想連結点まで追従することで、追従経路を考慮したシステムの構築を行う。追従制御即ち制御における振動抑制効果や無駄時間を低減し、仮想連結点は先導ロボットの移動軌跡の履歴に近い状態を追従ロボットに反映できる。追従システムで必要となる先導ロボットの位置と向き情報は、追従ロボットの視覚機構であるレーザーセンサを用いて取得する。

2. 追従システムの概要

2.1 センサによる先導ロボットの重心の取得方法

まず、先導ロボットの特特定方法を Fig.1(a) に示す。レーザーセンサから前後左右の測定範囲 $x_r, x_l, y_{min}, y_{max}$ を決める。範囲内の連続している測定点のデータを抜き出し、抜き出した点群の重心を取得する。また、点群の傾きを先導ロボットの向きとする。

次に先導ロボット特定後の、重心を利用した輪郭の抽出方法を Fig.1(b) に示す。1 走査前の先導ロボットの重心 (x_{n-1}, y_{n-1}) から縦横の測定範囲 W, H を決める。範囲内の連続している点群の重心 (x_n, y_n) と点群の傾きを求める。この方法により先導ロボットの輪郭だけを抽出することが可能である。



(a) 先導ロボットの特特定 (b) 先導ロボットの重心を利用した輪郭の抽出方法

Fig. 1 先導ロボットの重心の取得方法

2.2 仮想連結点の決定

仮想牽引モデルの概要図を Fig.2 に示す。仮想牽引モデルとは、仮想連結点 (x_c, y_c) で仮想棒 l_1 が仮想棒 l_2 を牽引していると仮定することで隊列走行を実現するモデルである。本研究では、仮想連結棒の比は $l_1 : l_2 = 1 : 1$ に設定している。 x_s, y_s は追従ロボットの視覚機構であるレーザーセンサの座標軸であり、2.1 節に記載した方法で先導ロボットの重心と向きを取得する。先導ロボットの重心座標を (x_1^s, y_1^s) 、追従ロボット側から見た先導ロボットの向きを θ_1^s とする。レーザーセンサで取得した、 x_1^s, y_1^s, θ_1^s を用いて、仮想連結点 (x_c, y_c) は式 (1) で求められる。

$$\begin{cases} x_c = x_1^s - l_1 \cos \theta_1^s \\ y_c = y_1^s - l_1 \sin \theta_1^s \end{cases} \quad (1)$$

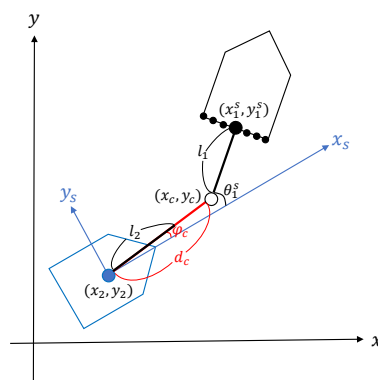


Fig. 2 仮想牽引モデルの概要図

2.3 追従方法

先導ロボットが前進すると仮想連結点までの距離が元の長さ l_2 よりも長くなるため、長くなった分だけ追従ロボットを前進させる必要がある。Fig.2 の d_c, ϕ_c は式 (2), 式 (3) で求められる。

$$d_c = \sqrt{x_c^2 + y_c^2} \quad (2)$$

$$\phi_c = \arctan\left(\frac{y_c}{x_c}\right) \quad (3)$$

元の長さ l_2 よりも長くなった分の距離を $d = d_c - l_2$ として、追従制御則を用いた式 (4) で仮想連結点まで追従する。先導ロボットの速度 v_{ref} 、先導ロボットの角速度 ω_{ref} は式 (5) で求められる。 v_2, ω_2 は追従ロボットの速度と角速度であり、オドメトリ法で求めた。 $K_1, K_2, K_3, G_1, G_2, G_3$ はゲインであり、任意に調整する。

$$\begin{bmatrix} u_v \\ u_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_1 & 0 \\ 0 & G_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{ref} \\ \omega_{ref} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_2 & 0 \\ 0 & G_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d \\ \phi_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_3 & 0 \\ 0 & G_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{d} \\ \dot{\phi}_c \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\begin{cases} v_{ref} = \dot{d} + v_2 \\ \omega_{ref} = \dot{\phi}_c + \omega_2 \end{cases} \quad (5)$$

式 (4) から、対向2輪モデルの式を用いて、各車輪の速度を求める。最後にフィードバック制御をかけ、実機に実装する際の両車輪の差をなくし、目標までのずれを改善することで追従を行う。 W は車幅を表している。

$$\begin{cases} v_R^r = u_v + \frac{W}{2} u_w \\ v_L^r = u_v - \frac{W}{2} u_w \end{cases} \quad (6)$$

3. シミュレーション

先導ロボットに適当に速度と角速度を与え、提案手法を用いて先導ロボット1台、追従ロボット3台の計4台で隊列走行のシミュレーションを行った。結果をFig.3に示す。Fig.3(a)より、追従ロボットが先導ロボットと同じ軌跡を追従していることが分かる。Fig.3(b)より、車間距離の変動が小さく、最大でも約5cm以内で追従できている。倉庫内での荷物運搬を想定すると許容範囲内であると考えられる。これにより、提案手法を用いることで複数台の隊列走行制御が可能であることが確認できた。

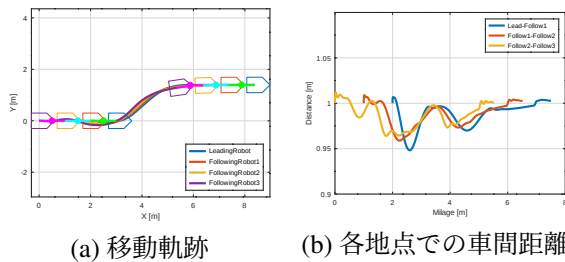


Fig. 3 シミュレーション結果

4. 実機実験

4.1 実験機材

先導ロボット1台、追従ロボット2台の計3台で実機実験を行う。先導ロボットは自動走行を行うため、適当に速度と角速度を与える。各追従ロボットにはレーザーセンサを搭載している。

4.2 実験結果

先導ロボットが前進した場合の追従結果をFig.4(a), 右旋回した場合の追従結果をFig.4(b), 左旋回した場合の追従結果をFig.4(c), S字旋回した場合の追従結果をFig.4(d)に示す。結果より、先導ロボットの移動軌跡を通るように追従しており、追従経路を考慮した追従が行えていることが確認できた。

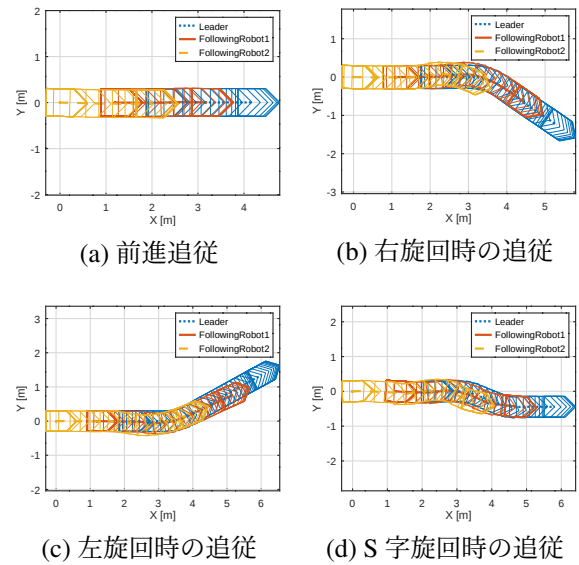


Fig. 4 実機実験結果

5. まとめ

本研究では、シミュレーションと実機を用いて仮想牽引モデルを応用した移動ロボットの隊列走行制御の実装を確認した。今後は、追従ロボットの台数を増やし実機を用いて追従性を確認したい。

参考文献

- [1] 足りないのはドライバーだけではない！物流・倉庫の人手不足の現状と原因 <https://www.shifop.jp/column/c206>, (2022年12月1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] 古江 紘也, 竹森 史暁: 重み付き最小二乗法による人の姿勢推定法と仮想連結モデルを応用したロボットの人追従機能, ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集, 2P3-B07(2021)