

3D LiDAR 点群および適応的群移動制御法を用いた 全方位台車ロボットによる大型物体の協調運搬の実現

北川昌樹^{*1}, 李謹傑^{*1}, 杉原惇一郎^{*2},
松本美起也^{*3}, 北村敬広^{*3}, 長藤圭介^{*1}, 趙漢居^{*1},

Cooperative transportation of large object by swarm of omni-directional mobile robots with 3D LiDAR point cloud and adaptive formation control

Masaki Kitagawa^{*1}, Jinjie Li^{*1}, Junichiro Sugihara^{*2},
Mikiya Matsumoto^{*3}, Takahiro Kitamura^{*3}, Keisuke Nagato^{*1} and Moju Zhao^{*1}

^{*1} Department of Mechanical Engineering, Tokyo University
7-3-1 Hongo, bunkyo-ku, Tokyo 113-8654, Japan

^{*2} Department of Mechano-Informatics, Tokyo University
7-3-1 Hongo, bunkyo-ku, Tokyo 113-8654, Japan

^{*3} TOYOTA MOTOR COMPANY, 1 Toyota-chou
Toyota-shi, Aichi 471-8571, Japan

Many AGVs (Automated Guided Vehicles) and AMRs (Autonomous Mobile Robots) are used for transportation. However, these systems are typically designed to transport a single object, which limits their versatility. In this study, we propose a novel cooperative control strategy for efficiently transporting large objects using multiple small omni-directional robots based on an autonomous localization system. First, we develop a highly accurate autonomous localization method based on Iterative Closest Point (ICP) and LiDAR Inertial Odometry (LIO) with 3D LiDAR. Second, we implement precise velocity control for omni-directional robots by LIO feedback. Third, we integrate hierarchical control methods that combine both distributed and centralized control elements and coordinate the robots to maintain optimal formation. Finally, to evaluate the effectiveness and adaptability of the proposed control strategy, we conducted a series of experiments in which three robots transported a large two-dimensional pallet.

Key Words : Swarm robot, Cooperative transportation, Omni-directional robot

1. は じ め に

現在,多くの自動車組立工場では,効率化のために部品運搬として AGV (Automated Guided Vehicle) や AMR(Autonomous Mobile Robot)⁽¹⁾といった自動運搬車両が利用されている.この車両の上に専用の治具を取り付けて,特定の部品や組み立てに必要な治工具類を運搬している.しかしながら,これらの車両は特定の物体を運搬するために専用設計されたものとなっており,新規部品を運搬するには治具や車両を再設計が必要となりコストがかかる上,工場などの室内空間では運用できる車両に限りがある.このように,運搬の際の汎用性の無さが新製品を開発する障害となっている.そこで,単体のロボットで運搬するのではなく複

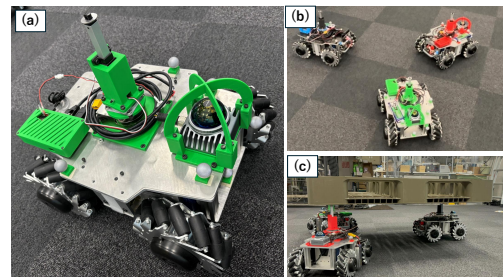


Fig. 1: (a) Mecanum wheel module robot platform. (b) Group moving of robots. (c) Cooperative transportation of large pallet.

数のロボットが協調することによって運搬する手法が提案されている. E.Tuci ら⁽²⁾によると,マルチロボットシステムによる物体の協調搬送に関する研究は,大きく3つに分類することができる.

(a) 押すだけの戦略: ロボットは物体に物理的に接続

^{*1} 東京大学大学院工学研究科機械工学専攻 (〒113-8654 東京都文京区本郷 7-3-1)

^{*2} 東京大学大学院情報理工学系研究科知能機械情報学専攻 (〒113-8654 東京都文京区本郷 7-3-1)

^{*3} トヨタ自動車株式会社 (〒471-8571 愛知県豊田市トヨタ町1番地)

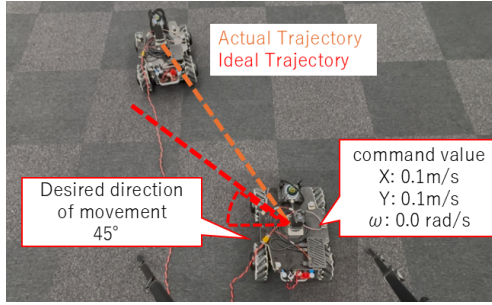


Fig. 2: Speed controllability issues for mecanum wheel robots.

されておらず，物体を押すことによって輸送が実現されます．

- (b) 把持戦略：ロボットは物体に物理的に接続され，物体を押すか引っ張るか（またはその両方）によって輸送が実現されます．
- (c) ケージング戦略：この戦略は，プッシュのみの戦略に似ています．ロボットは，オブジェクトを捕らえる（つまり，ケージングする）ように分散され，輸送中にオブジェクトをしっかりと保持します．

しかしながら，押し戦略やケージング戦略では運搬時に床と運搬物が物理的に接触しているため，床面によっては運搬物を傷つける可能性がある．また，把持戦略では，床面との接触はないものの，事前に運搬物と各ロボットとの取付作業を必要とするため，本研究の背景における汎用性の課題は解決しない．そこで，本研究では Fig.1 に示すように，全方位メカナムロボットの自律的な自己位置推定と全体フォーメーション群制御を構築し，物体との固定を必要とせず搬送物をロボットの上部に積載して運搬する “非固定把持戦略” により大型物体を協調運搬することを目指す．

個々の台車ロボットの自己位置の同定について，最も高精度なのがモーションキャプチャシステムである．しかしながら，地上ロボットが物体を運搬する際には運搬対象物の下側に入り込むため，ロボットを検出することができず，モーションキャプチャが機能しないことが考えられる．そのため，ロボットが自律的に自己位置を推定することのできるシステムが必要となる．自律した自己位置推定技術の一つとして，2D LiDAR による 2D AMCL や 2D SLAM が挙げられる⁽³⁾⁽⁴⁾．しかしながら，これらの自己位置推定手法は二次元の断片的な情報を利用しているため，特に工場環境では，部品製造のライン変更が頻繁に起こり環境変化が大きく，安定しない．そこで，より安定した自己位置推定技

術として，3D LiDAR による 3D AMCL や 3D SLAM が挙げられる．⁽⁵⁾⁽⁶⁾これらは前述の 2D の自己位置推定手法と比較すると，3 次元情報を扱うため，非常に高精度であると言えるものの，AMCL は，既知マップを必要とするため，環境変化に弱く，遅延や精度の低下が起こりやすい．一方で，SLAM は，その都度地図を更新するため，環境変化や動的変化に対応できるものの，ドリフトが発生しやすく，誤差累積が課題となる．そこで，本研究では，それぞれの台車に 3D LiDAR を搭載し，既知地図との Iterative Closest Point (ICP)⁽⁷⁾ と LiDAR Inertial Odometry(LIO)⁽⁸⁾⁽⁹⁾を組み合わせたロバストで高精度な自己位置推定システムを各台車で自律的に行うことを目指す．

個々の台車の速度制御について，メカナムホイールロボットは，個々のホイールが独立して回転することで，前後左右，斜めの方向へ自由に移動することが可能になる⁽¹⁰⁾．多くの場合，各車輪にはロータリエンコーダが取り付けられ，その回転角度や角速度を計測することで目標の速度への追従制御に用いられる．しかしながら，メカナムホイールは全方位性を獲得する半面，ホイールと地面との接地面積が小さいため十分なグリップを確保できず空転しやすく，速度の誤差が大きいという欠点がある⁽¹¹⁾⁽¹²⁾．本研究の事前検証でも，Fig.2 に示すように，メカナムホイールロボットの速度制御性に課題があることが確認されている．そこで，本研究では，フィードバック制御による全方位ロボットの速度追従制御により，正確な速度制御の実現を目指す．

協調運搬において，台車のフォーメーションを維持することが必要不可欠である．Koung ら⁽¹³⁾は最適化ベースのアプローチを用いて，運搬時のロボットの間隔保持速度制御を行った．この手法では間隔保持制御をモデル化し，二次計画問題 QP(Quadratic Problem) を解くことで，特定の制約条件を満たす，最適な制御入力を決定しており，間隔の値をユーザーが指定することで，特定の幾何形状を形成することができる．そこで，本研究ではこの手法と各台車の方向制御を組み

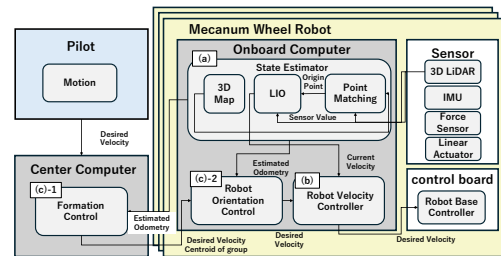


Fig. 3: Overview of this work and system architecture.

合わせて、ロボット群の適応的フォーメーション制御の構築を目指す。

本研究のシステムの概要を Fig.3 及び下記に示す。

- (a) ICP と LIO を利用した点群マッチングによる高精度自己位置推定
- (b) フィードバック制御による全方位ロボットの速度追従制御
- (c) ロボット群のフォーメーションおよび方向制御

本稿では、2 章で 3 次元点群を利用した高精度自己位置推定、3 章で全方位ロボットの速度追従制御、4 章ではロボット群のフォーメーション制御、5 章では (a) ~ (c) の実機検証および二次元パレット運搬実験について示す。

2. 3 次元点群を利用した自己位置推定

2.1 既知地図との ICP による離散的な高精度位置推定 事前作成された広範囲環境地図と 3D LiDAR から得られる点群情報に ICP⁽⁷⁾を適用することにより、点群のマッチングを行い、高精度のグローバル位置推定を行う。ICP とはおおまかな初期位置関係を元に、2 つの点群同士の高精度位置合わせを繰り返し計算によって実現する手法である。式 (1) は、移動する点群 p_i と参照点群 q_i の間で、回転行列 R と並進ベクトル t を見つけ、対応する点の距離 (誤差) を最小にするという ICP の基本的な最適化問題を表している。

$$R, t = \arg \min_{R, t} \sum_i \|R p_i + t - q_i\|^2 \quad (1)$$

この手法を元に、実空間座標からの位置を高精度に求めることができる。しかしながら、この処理は計算コストが大きいため、高周期での処理が難しい。そのため、離散的な絶対位置推定として低周期で実施することで、世界座標からの位置を求め、後述の LIO のドリフトを補正する役割を担う。

2.2 LIO によるローカル位置推定と連続性補完 Xu ら⁽⁸⁾⁽⁹⁾の手法を元にした高周期でロバストな LIO による移動量推定手法を利用した。この手法は計算コ

ストが少なく、100Hz の高周期で推定することができ、環境地図をアドホックに生成するため、環境変化や動的な変化が起こる環境下でも、ロバストに正確な移動量を推定することができる。この手法を利用して、高周期のローカル位置推定が可能となる。

本手法の概要を Fig.4 に示す。このように、低周期、高精度な点群マッチング (ICP) と高周期、ロバストな LIO を利用することにより、高精度でロバストな自己位置推定手法へと拡張した。

3. 全方位ロボットの速度追従制御

メカナムホイール全方位ロボットのフィードバック速度制御を構築した。本制御のモデルを Fig.5 と式 (2) ~ 式 (11) に示す。本フィードバック制御では、目標速度との差を極座標を用いて定義し、P 制御を用いて制御することで、目標速度への追従を実現した。角速度では、P 制御を用いて、目標角速度への追従を実現した。

$$\theta_{\text{current}} = \tan^{-1} \left(\frac{v_{y,\text{current}}}{v_{x,\text{current}}} \right) \quad (2)$$

$$\theta_{\text{target}} = \tan^{-1} \left(\frac{v_{y,\text{target}}}{v_{x,\text{target}}} \right) \quad (3)$$

$$e_r = |\mathbf{v}_{\text{target}}| - |\mathbf{v}_{\text{current}}| \quad (4)$$

$$e_\theta = \theta_{\text{target}} - \theta_{\text{current}} \quad (5)$$

$$e_\omega = \omega_{\text{target}} - \omega_{\text{current}} \quad (6)$$

$$u_r = K_p^r e_r \quad u_\theta = K_p^\theta e_\theta \quad u_\omega = K_p^\omega e_\omega \quad (7)$$

$$v_{x,\text{corrected}} = (|\mathbf{v}_{\text{target}}| + u_r) \cos(\theta_{\text{target}} + u_\theta) - v_{x,\text{target}} \quad (8)$$

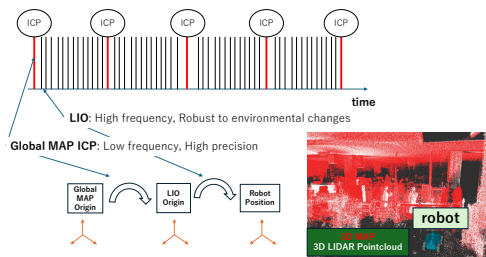


Fig. 4: Localization based on global ICP and LIO

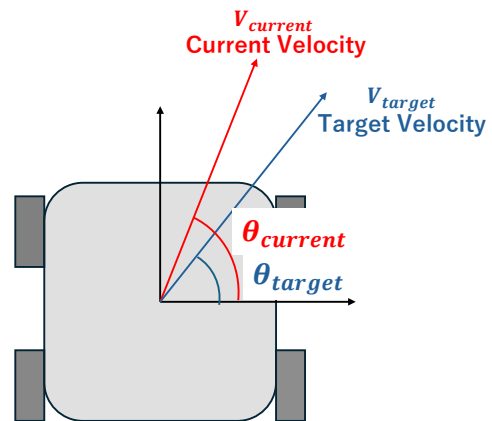


Fig. 5: Feedback velocity control model

$$v_{y,corrected} = (|\mathbf{v}_{target}| + u_r) \sin(\theta_{target} + u_\theta) - v_{y,target} \quad (9)$$

$$\omega_{corrected} = \omega_{target} + u_\omega \quad (10)$$

ただし,

$$0 \leq |\mathbf{v}_{target}| + u_r \quad (11)$$

4. ロボット群のフォーメーション制御

複数の全方位ロボットで運搬作業を行うには、全体のロボットが間隔と姿勢を維持しながら移動する機能が必要であると考えられる．そこで、二次計画法を利用した間隔保持制御とP制御による方向保持制御を構築した．

4.1 集中制御による間隔保持制御 Koung ら⁽¹³⁾が提案する最適化アプローチを用いて、運搬時のロボットの間隔を保持するための、集中制御による間隔保持制御を構築した．今回、我々は間隔の定常偏差を軽減することを目的として、この手法に積分項を追加した．

Fig.6(a) に示すように定義すると、二点間の距離は式 (12) のように表現できる．

$$d_{ij} = \|\mathbf{p}_j - \mathbf{p}_i\| \quad (12)$$

これを時間に関して微分すると、ロボット間の距離の変化と位置の変化は式 (13) のように表現される．

$$\dot{d}_{ij} = \left(\frac{(\mathbf{p}_j - \mathbf{p}_i)^T}{d_{ij}} \right) (\dot{\mathbf{p}}_i - \dot{\mathbf{p}}_j) \quad (13)$$

Fig.6(b) のように3台では、式 (13) を元に、ヤコビアンを用いて式 (14),(15) のように表現される．

$$\dot{\mathbf{d}}_f = \mathbf{J}_f \mathbf{u}_f \quad (14)$$

$$\mathbf{J}_f = \begin{pmatrix} -n_{12} & n_{12} & 0_{1 \times 2} \\ -n_{13} & 0_{1 \times 2} & n_{13} \\ 0_{1 \times 2} & -n_{23} & n_{23} \end{pmatrix}, \quad n_{ij} = \frac{(\mathbf{p}_j - \mathbf{p}_i)^T}{d_{ij}} \quad (15)$$

ここで、式 (16) のように積分項を追加して、 $\dot{\mathbf{d}}_f$ を定義する．

$$\dot{\mathbf{d}}_f = -\lambda_f (\mathbf{d}_f - \mathbf{d}_f^*) - \lambda_I \int_0^t (\mathbf{d}_f(\tau) - \mathbf{d}_f^*(\tau)) d\tau \quad (16)$$

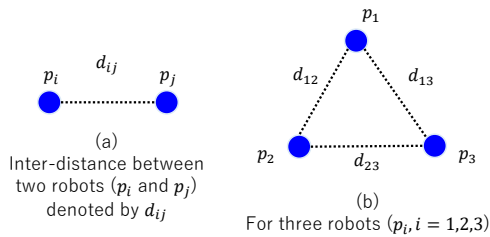


Fig. 6: Group formation model

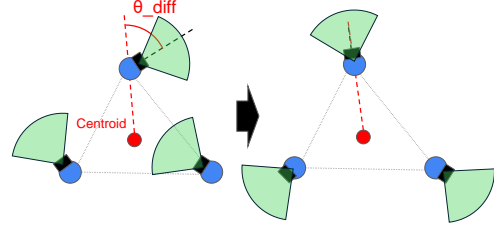


Fig. 7: Robot orientation control model

以上のことから、フォーメーションの関係式は式 (17) のように定義される．なので、 u_f は式 (14) に式 (16) に代入することで等式が成立し、 \mathbf{J}_f の疑似逆行列を使用することで求めることができるが、速度に関する制約条件を付加するため、個々のロボットの速度 u_f は式 (18), (19) で表現されるQPを解くことで得られる．ここで、 d_f^* は目標間隔値を示し、 λ_f, λ_I はフォーメーションコントロールゲインを示す．また、 u_{lim} は各ロボットの制限速度を表す．

$$\mathbf{J}_f \mathbf{u}_f = -\lambda_f (\mathbf{d}_f - \mathbf{d}_f^*) - \lambda_I \int_0^t (\mathbf{d}_f(\tau) - \mathbf{d}_f^*(\tau)) d\tau \quad (17)$$

$$\min_{u_f} \left\| \mathbf{J}_f \mathbf{u}_f + \lambda_f (\mathbf{d}_f - \mathbf{d}_f^*) + \lambda_I \int_0^t (\mathbf{d}_f(\tau) - \mathbf{d}_f^*(\tau)) d\tau \right\|^2 \quad (18)$$

$$u_f \leq u_{lim} \quad (19)$$

4.2 方向保持制御 各ロボットの方向をフォーメーション重心の位置を受け取ることで制御する．3D LiDAR ができる限り運搬物や他のロボットにより阻害されないように、ロボットの向きをフォーメーションの重心からの外方向に保持するようにフィードバック制御を構築した．各ロボットの位置とヨー角、重心の位置を $r_i = (x_i, y_i)$ θ_i , $r_{cog} = (x_{cog}, y_{cog})$ とする- Fig.7, 式 (20 ~ 22) のように、重心からの方向を計算し、P制御により、角速度を制御した． λ_ω はオリエンテーションコントロールゲインを示す．

$$\theta_{cog,i} = \arctan 2 (y_i - y_{cog}, x_i - x_{cog}) \quad (20)$$

$$\theta_{diff} = \theta_{cog,i} - \theta_i \quad (21)$$

$$\omega_f = \lambda_\omega \theta_{diff} \quad (22)$$

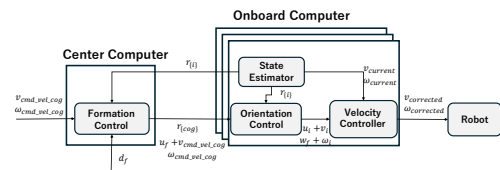


Fig. 8: Overview of the control framework developed in this work.

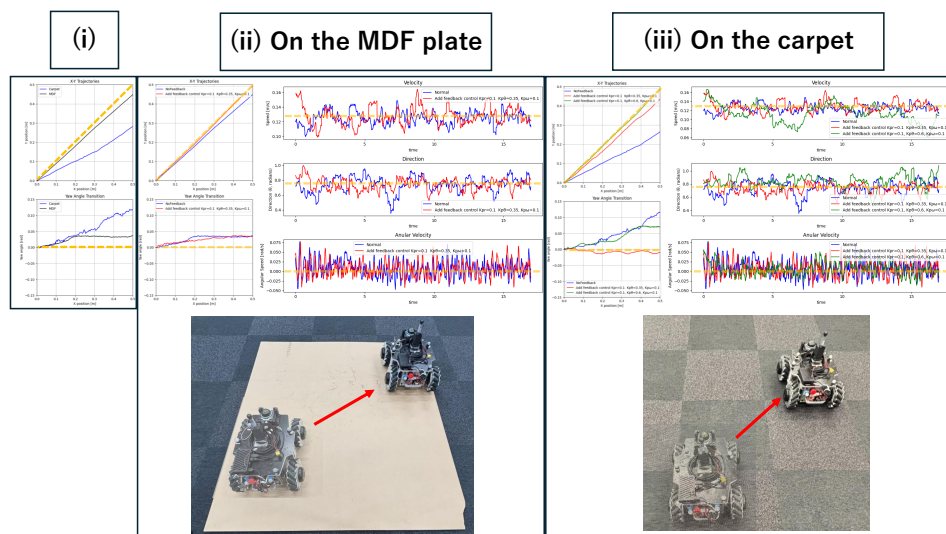


Fig. 9: (i)Trajectory and posture of the robot without feedback control on the MDF plate and carpet.(ii)Trajectory, posture, a magnitude of velocity, direction of speed of the robot on the MDF plate with control and without control. Blue line expresses under no control. Red line expresses under feedback control. (iii)Trajectory, posture, a magnitude of velocity, direction of speed of the robot on the carpet with control and without control. Blue line expresses under no control. Red line expresses under feedback control of which gain is same as (ii). Green line expresses under feedback control of which gain is larger than (ii).

4.3 全体構成 制御系の全体構成を Fig.8 に示す．まず，各 Onboard Computer が 3D LiDAR を用いて State Estimator により自己位置推定する．求めた自己位置を Center Computer に返し，ロボット全体の重心位置とフォーメーション維持のための速度入力 that 求められる．この速度とパイロットからの重心速度司令を各 Onboard Computer の Orientation Control に渡す．各ロボットの座標系に変換されたのち，Orientation Control で計算される角速度と足し合わせて，Velocity Controller に渡される．Velocity Controller では State Estimator から，現在の速度が送られ，フィードバック追従制御に用いられる．

5. 実験

本システムを評価するために，下記の 3 種の実験を行った．メカナムホイールの制御性の低さによって，床面の状況によって速度制御性が違う．

工場環境のような補正された地面を再現するために，地面に MDF のプレートを敷いて実験を行った．

- (a) 45 °方向の 1 台のロボットの移動制御
- (b) 3 台でのフォーメーション制御
- (c) 3 台でのフォーメーション制御による非固定把持パレット運搬

5.1 プラットフォーム 本システムの開発にはロボット用のミドルウェアとして広く利用されている ROS(Robot Operating System) を利用し，Formation Control, State Estimator, Robot Orientation Control, Robot Velocity Controller の処理に活用された．ハードウェアは，Onboard Computer として，Khadass 社製 Vim4(KVIM4-B-001)，3D LiDAR,IMU として Livox 社製 Mid-360，地上ロボットにはヴィンストン社製メカナムホイール全方位移動台車ロボット メカナムローパー ver3.0 を用いた．Center Computer には，Lenovo Thinkpad Extreme Gen を用いた．これらのロボットプラットフォームを 3 つ利用し，後述の実験をおこなった．それぞれのロボットを色分けし，Black,Red,Green の 3 色で呼称する．

5.2 45 °方向の 1 台のロボットの移動制御 ロボットに 45 °方向の速度司令 ($x = 0.1, y = 0.1, \omega = 0.0$) を与え，フィードバック制御ありなしでの追従性を比較した．実験の結果を Fig.9 に示す．(i) 及び (ii),(iii) の左図は上からロボットの軌跡と yaw 方向の姿勢を表しており，(ii),(iii) の右図は上からそれぞれ，速度の大きさと方向，角速度を示している．また，黄色の点線が目標軌跡，目標姿勢，目標速度，目標移動方向，目標角速度，を示している．(i) は速度追従制御を加えない場合における，MDF と絨毯上でのロボットの軌

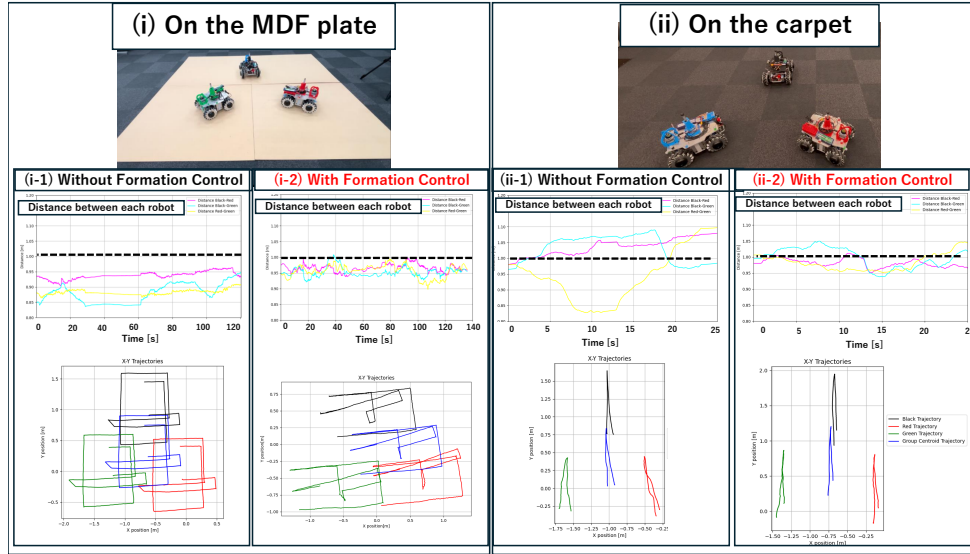


Fig. 10: (i)Swarm movement on the MDF plate with formation control and without its control. (ii)Swarm movement on the carpet with formation control and without its control. Upper figures express the distance transition of each robot. Magenta is black-red distance. Cyan is black-green distance. Yellow is red-green distance. Lower figures express the trajectories of each robot and centroid of group robots (blue line).

跡をそれぞれ、黒、青の線で示している。MDF 上ではおおよそ 48° 方向に移動しているにもかかわらず、絨毯上では 30° 方向に移動している。このことから、MDF のような平坦できれいな床面のほうが、絨毯のような粗い床面と比較して、制御性が高いことが確認できる。

(ii) では (i) の制御無しでの MDF 上での挙動を青線、フィードバックゲインをそれぞれ、 $K_p^r = 0.1$ $K_p^\theta = 0.35$ $K_p^\omega = 0.1$ として、フィードバック制御を追加し、MDF 上を移動した場合の挙動を赤線で示した。yaw 方向の姿勢に関しては、(i) の時と大きな差は見られなかったが、移動軌跡から、 45° 方向の動きによく追従できていることが確認できる。

(iii) では (i) の制御なしでの絨毯上での挙動を青線、(ii) と同様のフィードバックゲインで絨毯上移動した場合の挙動を赤線、フィードバックゲインをそれぞれ、 $K_p^r = 0.1$ $K_p^\theta = 0.6$ $K_p^\omega = 0.1$ として制御し、絨毯上を移動した場合の挙動を緑線で示した。(ii) と同様のフィードバックゲインでは、 40° 方向への移動軌跡となっており、絨毯上では目標の方向に追従しきらないことが確認できる。このように、床面の素材や粗さによって、ゲインを調節することにより、制御性を高めることができることが確認できた。

5.3 3 台でのフォーメーション制御 各ロボットの間隔を Table.1 とし、フォーメーションを維持したままの並進移動実験をおこなった。Fig.10 の (i) では、

MDF のプレートの上 (ii) では、絨毯の上で移動した結果を示している。比較のために (i-1),(ii-1) はフォーメーションの制御を抜いた状態で移動した結果であり、(i-2),(ii-2) はフォーメーションの制御を入れた状態での移動した結果である。それぞれ上図が各ロボットの間隔の変化、下図が各ロボットとフォーメーションの重心の軌跡を示している。上図ではマゼンタが Black-Red 間、シアンが Black-Green 間、黄色が Green-Red 間の移動中における間隔の時間推移を表している。下図が各ロボットの色の線がそれぞれの軌跡を表し、青線がフォーメーション重心の軌跡を表している。(ii) では緑線が水色のロボットを表している) フォーメーション制御の有無によって、ロボットの相対距離の遷移に大きな差が出ていることが確認できる。特に制御ありの MDF 上では、どのロボット間も $0.95[\text{m}]$ 付近に位置しており、 $0.05[\text{m}]$ ほどのオフセット誤差が発生している。しかしながら、その殆どが $\pm 0.05[\text{m}]$ ほどの範囲にとどまっており、非常に安定的であると言える。⁽¹⁴⁾ によると、本研究で提案される自己位置推定手法では MAP に対する向きにより $\pm 60\text{mm}$ ほどのズレが発生し、繰り返し誤差は $\pm 10\text{mm}$ ほどであることが報告されている。そのため、本実験でも同様に生じた $0.05[\text{m}]$ ほどのオフセット誤差は自己位置推定の誤差によるものだと考えられるものの、繰り返し誤差が小さいため、誤差が $0.05[\text{m}]$ 付近でかなり恒常的であることが確認できる。また、絨毯の上ではフォーメー

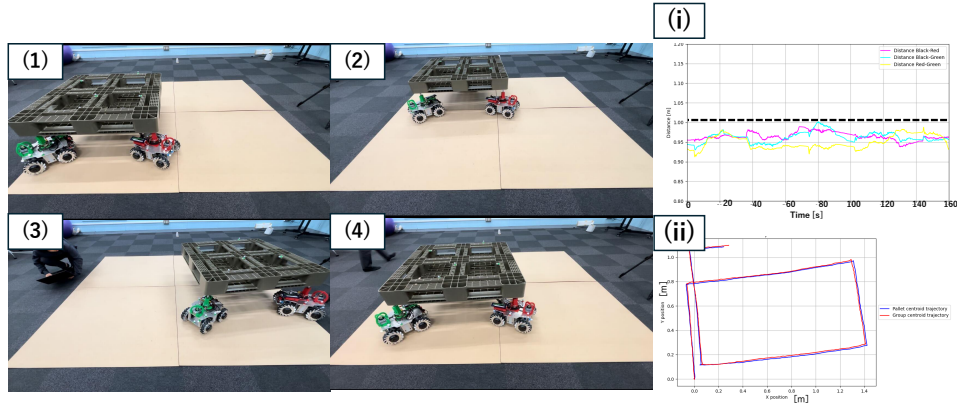


Fig. 11: (i) Distance transition of each robot. Magenta is black-red distance. Cyan is black-green distance. Yellow is red-green distance. (ii) Trajectories of centroid of pallet and centroid of group robots.

ションの制御により、相対距離が著しく大きくなることは避けられたが、MDF 上での挙動と比較して相対距離の振幅は大きなものとなっている。

Table 1: d_f in the experiment.

d_{12} [m]	d_{23} [m]	d_{31} [m]
1.0	1.0	1.0

5.4 3台でのフォーメーション制御による非固定把持パレット運搬 (ii) での結果を踏まえ、各ロボットの間隔を Table.1 とし、MDF 上でフォーメーションを維持したまま台車上部にフォークリフト用パレット (1.1[m] × 1.1[m] × 0.14[m] 18[kg]) を載せ、非固定把持で運搬移動実験をおこなった (Fig.11 左図). 実験の結果得られた (i) 各ロボットの間隔及びロボットの重心と (ii) パレットの重心の軌跡を Fig.11 の右図に示す. (i) は Fig.10 と同様に、マゼンタが Black-Red 間、シアンが Black-Green 間、黄色が Green-Red 間の移動中における間隔の時間推移を表している. (ii) は、青線がパレットの軌跡、赤線がロボット群の重心の軌跡である. (i) では前節と同様にオフセット誤差が 0.05[m] ほど発生しているが、前節と比較してばらつきが小さい. これは、パレットの重さにより、ロボットの動きが抑制されたからであると考えられる. また、(ii) では、パレットの重心とほぼずれることなく、運搬できていることが確認できる. このことから、各ロボットとパレットの接触点は大きな滑りを起こさず運搬することができたと言える. したがって、フォーメーション制御による協調運搬において高い安定性を実現したと言える. しかしながら、各ロボットの接触点の多少のズレが確認されており、今後は接触点のズレの評価とズレにくい機構が要求される.

6. 結 言

本研究では、3 台の全方位ロボットの独立した自己位置推定と LIO を利用した速度追従制御、フォーメーション制御により、MDF 上で二次元的なパレットを運搬することを試みた. 18kg ものフォークリフト用パレットを安定して運搬することができたものの、オフセット誤差があることが確認された. しかしながらオフセット誤差は恒常的であったため、かなり小さい誤差範囲で移動ができていたと評価できる. また、パレットの下部で遮蔽が大きい環境でも、かなり正確な自己位置推定と制御が行えることが実証された. また、フィードバック速度制御により、より正確な速度制御が可能となったが、床面の状況によっては、車輪の空転が目立つケースや、最悪の場合スタックして動けなくなってしまう状況も確認でき、床面に合わせてゲインを調節する必要があるという知見が得られた. 今後は運搬時にはカセンサからのフィードバック制御を追加し、位置によるフォーメーション制御に加えて、力学的な適応性を獲得し、把持安定性を高める必要がある. 加えて、路面環境を事前に測定し、悪路を避けて、正確な速度制御を可能にするプランニングも重要であると言える. 接触力の調節と正確な速度制御により、三次元的な物体の把持の実現を目指す.

参 考 文 献

- (1) Zhang, J., Yang, X., Wang, W., Guan, J., Ding, L., and Lee, V. C. S., “Automated guided vehicles and autonomous mobile robots for recognition and tracking in civil engineering”, *Automation in Construction*, Vol.146, (2023), p.104699.
- (2) E. Tuci, M. H. M. Alkilabi and O. Akanyeti, “Cooperative Object Transport in Multi-Robot Systems: A Review of

- the State-of-the-Art”, *Frontiers in Robotics and AI*, Vol.5, (2018), DOI:10.3389/frobt.2018.00059.
- (3) F. Dellaert, D. Fox, W. Burgard and S. Thrun, “Monte Carlo localization for mobile robots”, *Proceedings 1999 IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No.99CH36288C)*, Vol.2, (1999), pp.1322–1328.
 - (4) W. Hess, D. Kohler, H. Rapp and D. Andor, “Real-time loop closure in 2D LIDAR SLAM”, *2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, (2016), pp.1271–1278.
 - (5) Perez-Grau, Francisco J., Caballero, Fernando, Viguria, Antidio, and Ollero, Anibal, “Multi-sensor three-dimensional Monte Carlo localization for long-term aerial robot navigation”, *International Journal of Advanced Robotic Systems*, Vol.14, No.5, (2017), pp.1729881417732757.
 - (6) Weingarten, Jan and Siegwart, Roland, “EKF-based 3D SLAM for structured environment reconstruction”, *2005 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, (2005), pp.3834–3839.
 - (7) Rusinkiewicz, S. and Levoy, M., “Efficient variants of the ICP algorithm”, *Proceedings Third International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling*, (2001), pp.145–152.
 - (8) Xu, Wei and Zhang, Fu, “FAST-LIO: A Fast, Robust LiDAR-Inertial Odometry Package by Tightly-Coupled Iterated Kalman Filter”, *IEEE Robotics and Automation Letters*, Vol.6, No.2, (2021), pp.3317–3324.
 - (9) Xu, Wei, Cai, Yixi, He, Dongjiao, Lin, Jiarong, and Zhang, Fu, “FAST-LIO2: Fast Direct LiDAR-Inertial Odometry”, *IEEE Transactions on Robotics*, Vol.38, No.4, (2022), pp.2053–2073.
 - (10) Taheri, Hamid and Qiao, Bing and Ghaeminezhad, Nourallah, “Kinematic Model of a Four Mecanum Wheeled Mobile Robot”, *International Journal of Computer Applications*, (2015), pp.6–9.
 - (11) Zhewen, Z., Hongliu, Y., Chengjia, W. et al. “A comprehensive study on Mecanum wheel-based mobility and suspension solutions for intelligent nursing wheelchairs”, *Scientific Report*, (2024), 14, 20644.
 - (12) PS Yadav, JC Mohanta, V Agrawal, MDF Ahmed “Modeling and Performance Evaluation of Mecanum Wheel Platform with Reduced Vibration and a Robust Path Planning”, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Science*, (2024), 46, 292.
 - (13) D. Kounig, O. Kermorgant, I. Fantoni and L. Belouaer, “Cooperative Multi-Robot Object Transportation System Based on Hierarchical Quadratic Programming”, *IEEE Robotics and Automation Letters*, Vol.6, No.4, (2021), pp.6466–6472.
 - (14) 北川 昌樹 , 松本 美起也, 北村 敬広, 長藤 圭介, 趙 漠居, “3D LiDAR を用いた全方位 AMR の工場内における高精度な自己位置推定と自律走行に関する研究”, 第 25 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, 1F6-12, (2024).