

自律移動ロボット群の分散制御に基づく 点検・監視システムの検討

目黒優太[†] 高橋秀幸^{††}

近年、警備業界では深刻な人手不足と高齢化が懸念されており、省人化に向けた自律移動ロボットの導入が期待されている。施設警備や設備点検の自動化では、巡回業務を長時間にわたり安定して継続できることが重要である。しかし、実環境では、ロボットの故障やバッテリー低下などにより巡回が中断し、確認漏れが生じる可能性がある。また、地上移動ロボットは、走行可能エリアに制約があり、立ち入り困難箇所や見通しの悪いエリアでは監視の抜けが発生しやすい。そこで本研究では、巡回の中断リスクを低減しつつ監視の取りこぼしを抑えることを目的として、複数台の地上移動ロボットによる引継ぎ機構と小型ドローンによる補完的な監視を統合しながら点検・監視を行う屋内巡回システムについて述べる。

Investigation of an Inspection and Monitoring System Based on Distributed Control of Multiple Autonomous Robots

Yuta Meguro[†] Hideyuki Takahashi^{††}

In recent years, the security industry has faced a severe labor shortage and an aging workforce, leading to high expectations for the introduction of autonomous mobile robots to reduce staffing requirements. For automating facility security and equipment inspections, it is crucial that patrol operations can be performed stably and continuously over long periods. However, in real-world environments, patrols may be interrupted due to robot malfunctions or low battery levels, potentially resulting in missed checks. Furthermore, ground-based mobile robots have limitations on their navigable areas, making surveillance gaps more likely in hard-to-reach locations or areas with poor visibility. Therefore, this study describes an indoor patrol system that integrates a handover mechanism using multiple ground-based mobile robots with supplementary surveillance by small drones. The goal is to reduce the risk of patrol interruptions while minimizing surveillance oversights.

1. はじめに

近年、警備サービスの需要増加に伴い事業者数は増加傾向にあるものの、人員の伸びは鈍化しており、中でも従事者の高齢化が進行している[1]。加えて、小規模事業者が大半を占める産業構造ゆえに採用・教育・配置に十分なコストをかけられず、将来的に人手不足の更なる深刻化が予想される。また、これまで屋内施設における警備・監視は、監視カメラの設置によって実現されることが一般的であった。監視カメラは広範囲を継続的に記録できる一方で、撮影範囲には限界があり、遮蔽物や曲がり角などで死角が発生しやすい。こうした状況下において、ロボティクスの発展により、これまで人が担ってきた業務をロボットが代替・分担しようとする動きが加速している。実際に警備業界においても、自律的に巡回するロボットを取り入れる動きが見られ、国土交通省が主催するセミナー等においても将来的な労働不足を見据えた警備の高度化と省人化が主要テーマとして取り上げられており、ロボットを活用した新たな警備モデルの構築が議論されている。

こうした背景のもと、屋内環境を自律的に巡回するロボットの普及が進み、警備や設備点検、災害発生時の状況把握などへの活用が報告されている[2]。一方で、屋内環境には、段差や閉鎖区間など地上移動ロボットのみでは進入できないエリアが存在し、地上ロボット単独の巡回では確認できない死角が残り得る。さらに、実運用を想定すると巡回は長時間に及び、走行不能や自己位置推定の破綻、通信途絶などにより巡回が中断するリスクがある。

それゆえ、巡回の網羅性と継続性を両立するには、単体ロボットの自律移動性能の改善だけでなく、異なる移動能力を持つ移動体や相互補完が可能なシステム構成を組み合わせる必要がある。このように各個体の短所を相互に補い合うことで、従来の監視手法よりも死角の少ない警備を実現し、かつ長時間の運用に備えた自律的な警備システムの構築が期待できる。

本研究では、死角の解消と稼働停止リスクの分散を図るシステム構築により、屋内環境における巡回の「網羅性」と「継続性」の双方の確立を目的とする。そこで地上ロボットと小型ドローンを組み合わせた異種ロボット協調システム、および複数台の地上ロボットによる連携手法を基本とした点検・監視システムを提案する。本稿では、主な機能として、(1) 自律巡回機能、(2) 巡回引継ぎ機能、(3) ドローン切り替え機能、(4) 追跡・撮影・通知機能の4つの機能の設計と予備実験について述べる。

[†] 東北学院大学教養学部情報科学科

Department of Information Science, Faculty of Liberal Arts, Tohoku Gakuin University

^{††} 東北学院大学情報学部データサイエンス学科

Department of Data Science, Faculty of Informatics, Tohoku Gakuin University

2. 関連研究と技術的課題

近年、業務の効率化を目的として、警備・点検・倉庫管理などの応用に向けた自律移動ロボットおよびドローン技術の研究開発が進められている[3-5]。これらの研究では、ロボットが移動しながら情報を取得することで、従来は人手に依存していた巡回や作業の省力化を図る試みが報告されている。例えば、IoT 技術を統合した監視警備用の自律移動ロボットを開発し、その有効性を検証している研究がある[6]。この研究では、超音波センサを用いた障害物回避機能や、リアルタイム映像伝送機能の実装を行い、Blynk IoT アプリを介した遠隔監視が可能であることが確認されている。しかし、実運用を想定した場合、バッテリーの持続時間や充電頻度に関して改善の余地が残されている。また、単一の地上ロボットのみによる巡回では、カメラの視点が低位置に限定されるため、遮蔽物の陰や高所などの死角を解消することは困難である。

次に、地上ロボットが棚まで自律移動し、ドローンで高所情報を取得する異種ロボットシステムの研究がある [7]。地上ロボットが既知地図に対して AMCL (Adaptive Monte Carlo Localization) を用いて自己位置推定を行い、ナビゲーション機能により自律移動する構成が示されている。このように地上移動と空中移動を組み合わせることで、地上ロボット単体では得られない視点からの情報取得が可能となることを示している。一方、障害物回避のための検出センサ構成や回避方法、動的障害物・狭路でのすれ違いといった運用上の課題に対する具体的な設計・評価は十分に示されていない。

さらに、地上ロボットとドローンが協調してミッションを遂行する自律協調ロボットシステムの概念設計を提案し、地上ロボット上面を一時的な着陸地点 (LZ) として利用し、ドローンの無線充電を想定した運用に関する研究がある[8]。しかし、概念設計および競技会を想定したタスク設計が中心であり、実環境の警備巡回において課題となる段差・物陰などをドローンで補完した際の効果には述べられていない。

本研究では、ドローンを必要な場面に限定して運用することでバッテリー消費を抑えつつ、段差、狭隘部、物陰など地上ロボットのみでは巡回できないエリアをドローンで補完する協調巡回を構築し、警備巡回の網羅性向上を検証する。

3. 自律移動型巡回システムの提案

3.1 機能概要

図1に提案システムの概要を示す。本提案システムでは、地上移動ロボット（ロボット）と小型ドローン（ドローン）を組み合わせ、それぞれの特性を活かして適材適所に運用する。平常時は、ロボットが屋内を自律巡回し、通路や部屋などの走行可能エリアにおける状況把握を担当する。一方、段差や狭隘部などロボットのみでは状況把握が困難な局面では、ドローンへ離陸指示を行い、該当エリアを補完飛行する。ま

た、ロボット A が巡回不能となった場合には、ロボット B が自律的に巡回を引継ぎ、巡回の継続性を確保する。さらに、ロボットとドローンに搭載したカメラで人物を検知した際には、対象の追跡・撮影を行い、取得した画像を管理者へ通知することで、警備現場の状況をリアルタイムに把握するための情報を提供する。

3.2 (1) 自律巡回機能

自律巡回機能は、屋内環境を対象に、あらかじめ定めた巡回経路に従って自律移動し、通路を継続的に見回る機能である。巡回経路は常に固定ではなく、フロアマップを確認しながら経路上で通過すべき目標地点、すなわちウェイポイントを設定し、それらをシステムに登録することで、目的や環境変化に応じて柔軟に変更できる。例えば、巡回対象範囲の追加や優先度の変更が生じた場合でも容易に対応可能である。また、マップを編集して仮想障害物を設定できるため、立入制限区域などをロボットが走行しないエリアとして容易に設定可能である。これにより、巡回ルートの再設計にかかる作業負担を低減しつつ、運用条件に応じた巡回が可能となる。

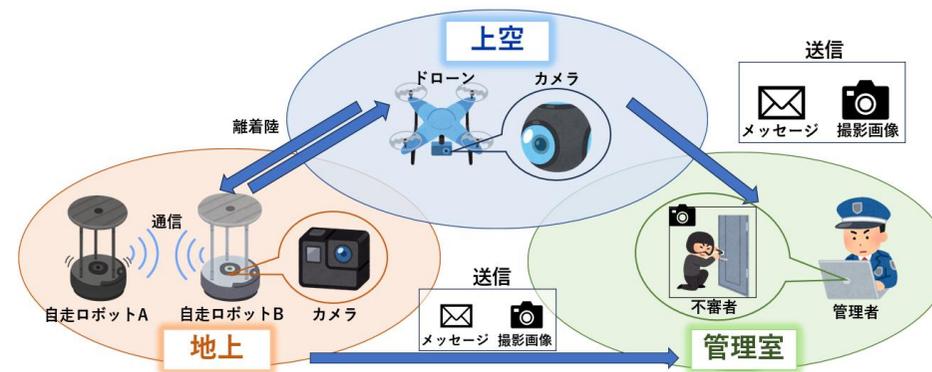


図1 提案システムの概要

3.3 (2) 巡回引継ぎ機能

巡回中のロボット A が故障や通信途絶等により走行不能となった場合に、待機中のロボット B がその状況を自律的に検知し、巡回を引継ぐ機能である(図2)。ロボット B は、ロボット A からの定期的な状態通知が途絶したことを異常と判断し、巡回の代替を開始する。この状態通知は一定周期で送信されるため、一定時間受信できない場合に「ロボット A の巡回困難」とみなし、引継ぎ処理へと移行する。また、ロボット A

のバッテリー残量が所定の閾値を下回った場合も引継ぎ対象とする。これにより、故障の発生に限らず、長時間の運用に伴うバッテリー切れによる停止を事前に回避することで、単一ロボットに依存した運用で生じる巡回の中断を抑え、警備巡回の継続性を確保することが可能である。

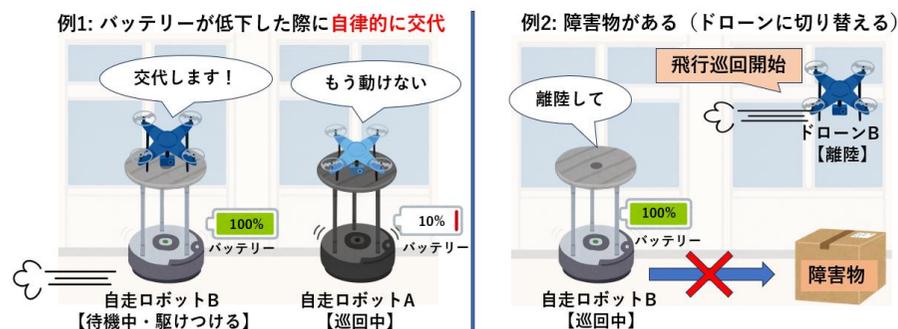


図2 巡回引継ぎ機能・ドローン切り替え機能

3.4 (3) ドローン切り替え機能

巡回中にロボットが特定のウェイポイントへ到達したことを契機として、巡回をドローンに引継ぐ機能である(図2右)。ロボットは、該地点で一時的に停止し、ドローンへ離陸指示を行うことで、地上走行から空中移動へと巡回の役割を切り替える。ドローンは離陸後、あらかじめ定めた飛行経路に沿って飛行し、高所や遮蔽物の影などロボット単体では確認が困難なエリアの状況を取得する。ドローンの移動により視点を上方へ変更できるため、地上走行では得られない角度から周辺状況の把握が可能となる。飛行完了後、ドローンはロボット上へ帰還して着陸し、ロボットは巡回を再開する。これにより、ドローンの飛行を必要な局面に限定することでバッテリー消費を抑えつつ、ロボットの巡回で生じる死角を補完することが可能となる。

3.5 (4) 追跡・撮影・通知機能

ロボットおよびドローンに搭載したカメラから人物を検知した際に、対象の位置関係を継続的に把握し、追跡しながら画像を取得し、管理者へ通知する機能である(図3)。人物を検知すると、対象が視野内に留まるようにロボットまたはドローンが向きや位置を調整し、対象と一定距離を保ちながら追跡を行い、追跡中の静止画を記録する。取得した画像は即時に管理者へ送信されるため、管理者は遠隔から現場の状況をリアルタイムに把握でき、必要な対応を迅速に行える。これにより、警備員の安全確

保と現場確認の負担を軽減しつつ、警備業務の効率向上が可能となる。

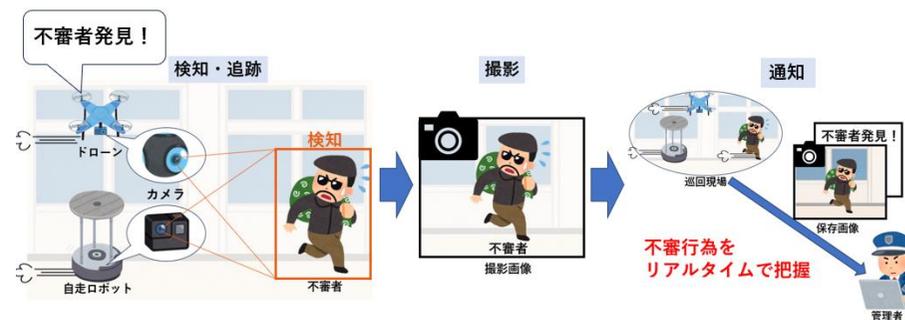


図3 追跡・撮影・通知機能

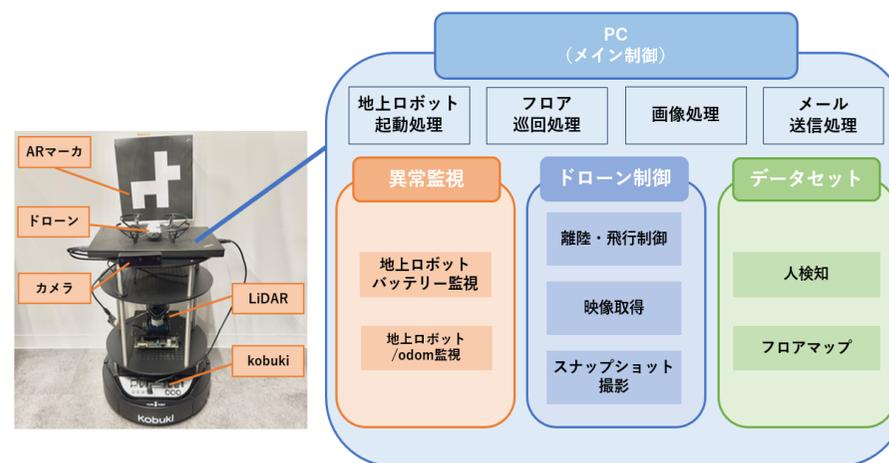


図4 巡回ロボットの構成

4. 試作システムの設計と実装

4.1 試作システムの構成

図4に試作システムの構成を示す。具体的には、制御PCにROS2 Humbleを導入し、

各機能を ROS2 ノードとして実行することで、センサ情報の取得、移動制御、および協調動作の統合を行う。ロボットには Yujin Robotics 社の Kobuki[9]、ドローンには Ryze Tech 社の Tello[10]を用いた。またロボットには、人物検知のため Luxonis 社の OAK-D Lite (Depth AI) カメラ[11]、周囲環境計測および自己位置推定に必要な情報取得のため Shenzhen EAI Technology 社の 2 次元 LiDAR(YDLIDAR X4 Pro)[12]を設置している。以上から地上移動による巡回とカメラ、LiDAR を用いた状況把握を組み合わせること、点検・監視のためにフロアを巡回することが可能な試作システムの設計を行った。

4.2 実装

4.2.1 自律巡回機能

ロボットは、事前に SLAM により作成したフロアマップに対して、LiDAR で観測した周囲の環境を照合することで、AMCL により自己位置を推定する。推定された位置は地図座標上で逐次更新され、ロボットは現在位置を把握しながら移動を行う。この自己位置とマップ上から指定したウェイポイントを用いて、自律移動ロボット用ナビゲーションフレームワークである Nav2 が走行を制御し、ロボットは各ポイントを順に追従することで自律巡回を行う。巡回経路をウェイポイント列とし、ロボットは目的点へ到達するたびに目標を更新しながら巡回を継続する。これにより、運用目的に応じた巡回ルートを設定でき、屋内環境における継続的な見回りが可能となる。

4.2.2 巡回引継ぎ機能

例えば、ロボットを 2 台用い、巡回中のロボットを A、待機中のロボットを B とする。その際、巡回引継ぎ機能は、ロボット B 上で動作する監視ノードにより実装する。本ノードは、ロボット A が発行するオドメトリ (/odom) およびバッテリー残量情報を取得し、受信が継続している間はロボット A が動作中とみなす。/odom は、移動ベースの状態に応じて周期的に送信されるため、ロボット A が正常に巡回可能な状態であるかを判断する指標として利用できる。一方、/odom の受信が一定時間以上途絶した場合には、ロボット A が何らかの理由で停止したと判断し、引継ぎ処理を開始する。また、バッテリーが所定の閾値を下回った場合にも、引継ぎ処理を開始する仕組みとした。引継ぎ開始後は、ロボット B の移動ベースを制御可能な状態にしたのち、走行させるノードを起動して巡回動作へ遷移させる。

4.2.3 ドローン切り替え機能

ロボットの巡回処理とドローン制御は、別ノードとして実装し、ROS2 通信で同期可能とした。ロボットが切り替え対象のウェイポイントに到達すると一時停止し、ドローンへ飛行指示を送信する。ドローンは、Python で実装した制御プログラムから Tello SDK コマンドを送信し、離陸後に所定経路に沿って飛行する。飛行経路は、対

象エリアの状況把握を目的とした動作で構成されており、地上ロボットでは確認が困難な高所や段差の先を撮影できる視点確保を想定している。飛行後にロボット上へ安定して帰還するため、ロボット上面には AR マーカを設置した。これは、ドローン搭載のカメラからマーカを検出してロボット位置を視覚的に確認し、着陸位置のずれを抑えながら帰還着陸を行うための基準点として用いる意図である。ドローンは、着陸完了をもって完了通知を送信し、ロボット側は、この通知の受信をトリガとして巡回を再開する。

4.2.4 追跡・撮影・通知機能

人物検知、追跡制御、画像取得、通知送信の各処理を ROS2 ノードとして分離し、トピック通信により連携させて実装した。まず、人物検知に関しては、ロボット側では、OAK-D Lite が AI カメラとして推論機能を備えているため、カメラ上で人物検知を行い、検出結果を取得する。一方、ドローンでは、ドローンのカメラ映像を制御 PC で取得し、各フレームに対して PC 側で YOLO による推論を実行して人物の検出結果を得ている。次に、追跡制御では、検出結果から人物が画面中心に維持されるようにロボットまたはドローンの位置を調整し追跡する。追跡中は、人物が確認できるフレームを静止画として保存し、状況記録を行う。人物が検知され追跡が開始されたタイミングで、保持している最新画像を添付し、Gmail API[13]を用いて管理者へメールを送信する。また、連続検出による多重送信を防ぐため、送信後一定時間の通知間隔を設けている。

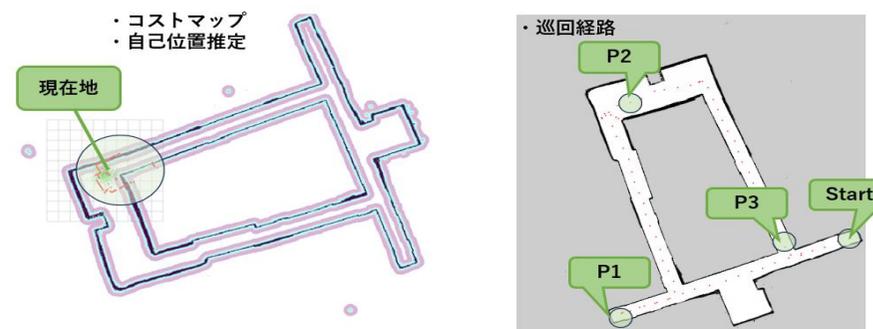


図 5 自律巡回機能の動作確認実験の様子

5. 予備実験

5.1 自律巡回機能の予備実験

マップから指定したウェイポイントを順に追従し、実験フロア内を一周する自律巡回が可能であることを確認した(図 5)。また、RViz2 上で可視化されるコストマップにおいても壁面周辺に生成される膨張エリアを適切に回避し、壁への衝突なく巡回を完了した。以上より、本システムは屋内環境における巡回経路に沿った巡回走行が安定して実行可能であることを示した。

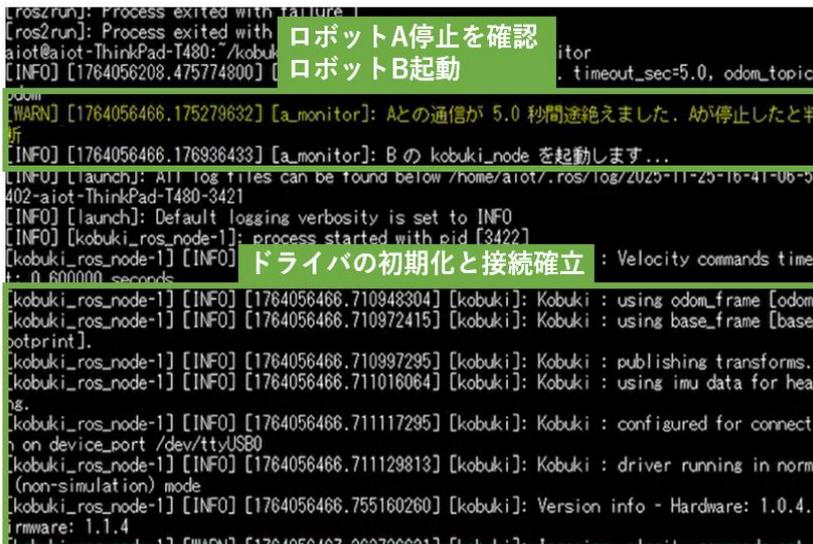


図 6 巡回引継ぎ機能の予備実験

5.2 巡回引継ぎ機能の予備実験

ロボット A の異常状態を模擬するため、走行制御を担うノード (kobuki_node) を手動で停止させた。なお、ロボット B は待機場所で自己位置推定を完了した状態で待機させた。ロボット A は、速度指令を出力できなくなり、巡回動作が継続できない状態となる。また、/odom などの状態通知も停止するため、待機側のロボット B はロボット A の動作が途絶した状態として検知された。その後、ロボット A の状態通知が一定時間途絶したことを契機として、待機していたロボット B が走行ノードを自律的に起動して走行を開始することを確認した(図 6)。以上より、ロボット A の停止を検知した際にロボット B が巡回を引継ぐことで、巡回の中断を抑え、継続性を確保できることを確認した。

5.3 ドローン切り替え機能の予備実験

ロボットが切り替え対象のウェイポイントに到達した際に一時停止し、ドローンへ切り替える一連の動作を確認した。ロボットは、目的地点に到達後、停止状態でドローン制御側へ飛行開始の指示を送信し、ドローンが離陸した。離陸後、あらかじめ定めた飛行動作を実行し、地上ロボット単体では確認が困難なエリアを補完可能であることを確認した。飛行完了後、ドローンはロボット上面に設置した AR マーカを検出(図 7)し、マーカの位置を基準として微細な位置と姿勢の調整を行いながらロボット上に帰還し、再度ロボットが巡回を行うことを確認した。本機能により地上巡回から空中巡回への切り替えと帰還着陸までを一連の処理として実行可能であることを確認した。

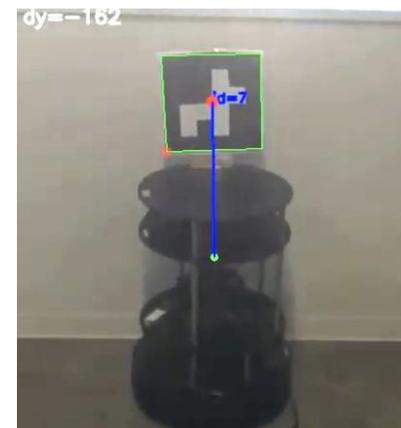


図 7 AR マーカ認識



図 8 メール受信

5.4 追跡・撮影・通知機能の動作確認

ロボットおよびドローンのそれぞれにおいて人物検知が可能であることを確認し、人物を検知した際には、検出結果に基づいてロボットまたはドローンが向きや位置を調整し、対象が視野内に留まるように追従動作を行えることを確認した。さらに、取得した画像を添付したメールが正常に受信できることを確認した(図8)。以上より、人物検知、追跡、撮影、通知までの一連の処理が成立することを実証した。

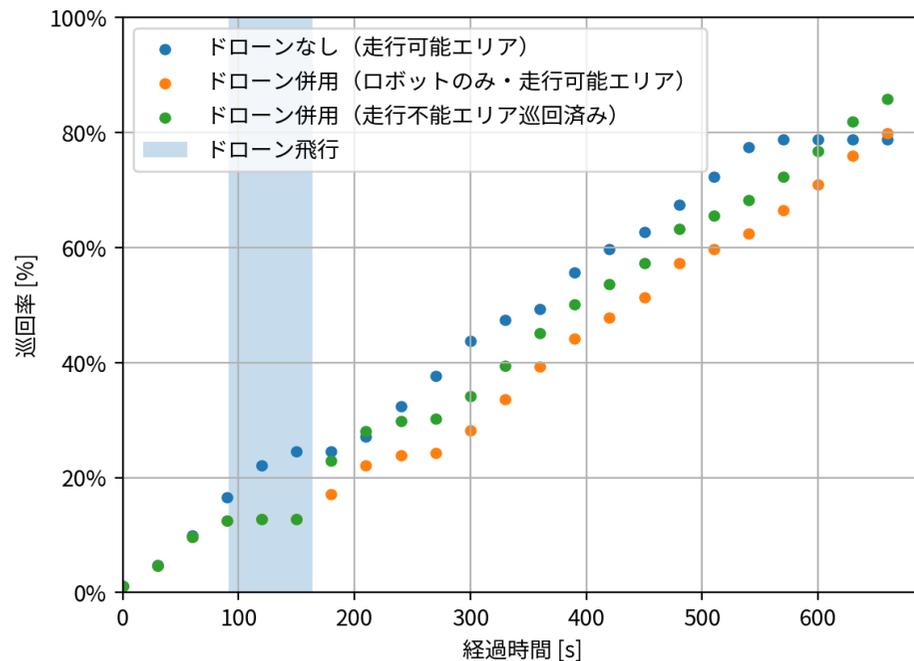


図9 巡回率の比較結果

6. 評価

予備実験により、各機能が設計意図どおりに動作することを確認した。本評価では、提案システムが屋内警備に求められる巡回の網羅性をどの程度改善できるかを定量的に確認する。評価指標には巡回率を用いた。巡回率は巡回中に得られた自己位置ログを中心とする廊下の半幅程度に相当するエリアを「巡回済み」とみなして時系列に累

積した面積を、走行可能エリアの総面積で除した割合として定義する。比較条件は、(1) ロボットのみで巡回、(2) ドローンを併用するが巡回率はロボットの走行可能エリアのみで算出、(3) ロボットが到達できないエリアについてドローンが確認できると仮定し、その効果を巡回率に反映する理想条件の3つとした。

図9よりロボット単体(青)は開始直後から巡回率が増加し、短時間で走行可能エリアを広くカバーできる一方、走行不能エリアが残るため最終値に上限が生じる。これに対して、ドローン併用(橙)では、ドローンの離着陸・飛行に伴い地上巡回が一時的に停滞する区間が生じ、所要時間が増加する傾向が確認された。しかし、走行不能エリアをドローンが補完するとみなした条件では、最終巡回率が上昇し、ロボットのみでは残存する未巡回エリアを縮小できることが確認された。

特に未巡回エリア(100% - 巡回率)に注目すると、最終時点においてロボット単体では未巡回エリアが約22%残存したのに対し、ドローンによる補完を反映した条件では約15%まで低下した。すなわち、未巡回エリアは約7%分減少し、元の未巡回エリアに対して約32%の削減に相当する。以上より、本手法は巡回時間の増加を伴う一方で、ロボットの死角となる走行不能エリアを補完し、屋内警備における巡回の網羅性向上が可能であることを確認した。

7. おわりに

屋内環境における巡回の「網羅性」と「継続性」の双方の確立を目的とし、地上移動ロボットと小型ドローンを組み合わせた異種ロボット協調システム、および複数台の地上ロボットによる連携手法を基盤とする点検・監視システムを提案した。また、予備実験により各機能が動作することを確認した。今後は、各機能の高度化や認識率等の精度を向上させるとともに巡回引継ぎ機能の有効性について定量的な評価を行う。

謝辞

本研究の一部は、JSPS 科研費 24K07933 の助成を受けたものである。

参考文献

- 1) 警視庁生活安全局生活安全企画課, “令和6年における警備業の概要”, <<https://www.npa.go.jp/publications/statistics/safetylife/reiwa6keibigaikyo.pdf>> (参照 2026-1-16)
- 2) セントラル警備保全株式会社, “警備会社が考える公共交通のセキュリティ向上策”, <<https://www.mlit.go.jp/unyuanzen/content/001471451.pdf>> (参照 2026-1-16)
- 3) S. Joy, R. L. Paulraj, P. M, S. M, S. Goudar and R. S, “A Raspberry Pi based Smart Security Patrol

- Robot,” Proc. of the 7th International Conference on Computing Methodologies and Communication (ICCMC 2023), pp.1140-1145, Apr. 2023.
- 4) G. Slavic, L. Marcenaro, D. M. Gómez and C. Regazzoni, “Methodology for Localizing an Indoor Drone Using Onboard Sensors and Validating by a Fixed Lidar,” Proc. of the 12th International Workshop on Metrology for AeroSpace (MetroAeroSpace 2025), pp.137-142, Aug. 2025.
 - 5) V. R. Kiruthika, S. Jeya Nandini, N. Sangavi, J. Nirmala Devi, “Smart Night Patrolling Robot using YOLOv8,” Proc. of the 2nd International Conference on Automation, Computing and Renewable Systems (ICACRS 2023), pp. 1879-1884, Dec. 2023.
 - 6) M. S. Sepeeh, S. A. -L. Nagarajan, M. E. O. Nguba, H. F. Jamahori, S. A. Zulkifli, R. Jackson, “Development of Autonomous Mobile Robot Based IoTs Integration for Surveillance Guard,” Proc. of the 2024 IEEE 22nd Student Conference on Research and Development (SCOREd), pp.323-327, Feb. 2025.
 - 7) A. Sales, P. Mira, A. Maria Nascimento, A. Brandão, M. Saska and T. Nascimento, “Heterogeneous Multi-Robot Systems Approach for Warehouse Inventory Management,” Proc. of the 2023 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), pp.389-394, June 2023.
 - 8) R. Szabolcsi, G. Molnár and T. Wüthrl, “Conceptual Design of a UAV-UGV Autonomous Collaborative Robot System,” Proc. of the 2024 IEEE 7th International Conference and Workshop Óbuda on Electrical and Power Engineering (CANDO-EPE), pp.000207-000212, Dec. 2024.
 - 9) Kobuki, <<https://www.turtlebot.com/turtlebot2/>> (参照 2026-1-16)
 - 10) Tello, <<https://www.ryzerobotics.com/jp/tello>> (参照 2026-1-16)
 - 11) OAK-D Lite, <<https://docs.luxonis.com/hardware>> (参照 2026-1-16)
 - 12) LiDAR, <<https://jp.ydlidar.com/>> (参照 2026-1-16)
 - 13) Gmail API, <<https://developers.google.com/workspace/gmail/api/reference/rest?hl=ja>> (参照 2026-1-16)