

基地局との接続を維持する群ロボットの分散・階層型巡回監視アルゴリズム

○小林 一穂 (横国大), 樋口 丈浩 (横国大), 上野 誠也 (横国大)

Hierarchical and Distributed Patrol Strategy for Robotic Swarms with Continuous Connectivity Including Base Station

○Kazuho KOBAYASHI (Yokohama National Univ.), Takehiro HIGUCHI (Yokohama National Univ.),
and Seiya UENO (Yokohama National Univ.)

Abstract: This paper proposes a hierarchical and distributed strategy for patrolling missions by robotic swarms, including a fixed base station. One of the essential requirements for autonomous robotic swarms is predictability from human operators. As a clue to satisfy this requirement in patrolling missions, the strategy employs a hierarchized algorithm to maintain continuous connectivity to the base station by (i)global patrol and (ii)nearby patrol. Each robot chooses the location to patrol by one of the two algorithms, according to the robot's role. The paper also introduces a performance metric for the base station's situational awareness, which may indicate the swarm behaviors' predictability. The simulation study demonstrated the successful patrol behavior of the swarms with continuous connectivity to the base station. Future studies will compare the proposed strategy to existing patrol strategies in terms of both metrics: patrol performance and situational awareness.

Keywords: Swarm Robotics, Patrolling, Multi-Robot System, Hierarchical Control, Situational Awareness

1 緒言

本稿では、群ロボットが基地局との通信接続を維持しながら巡回監視 (パトロール) を行う手法を提案する。提案手法は群を代表するロボットによる大域巡回と他のロボットによる局所巡回とで階層化され、共に基地局からの指示に依存しない分散的な性質を持つ。

群ロボット工学 (スワームロボティクス) は複数のロボットを分散的に制御し、ロボット間の相互作用による機能発現も含めて運用する技術であり、

- ロボットの一部分を失っても活動し続ける頑健性
- 協調機構の切替で様々な機能を付与しうる柔軟性
- ロボットが増えても同じ協調機構が使える拡張性

に優れる[1]。また、複数のロボットを広域に配置することで迅速に任務を実施できる[2]。これらはスウォームロボティクス、マルチロボットシステムなどとも呼ばれ、ロボット技術の発展に伴い注目を集めている。

災害現場、国境地帯、重要施設などの巡回監視はこの特性が活かされる用途であると考えられる。低コストで効率的な巡回監視の実現、および人間の負担軽減のためにも、群ロボットの活用が期待される。

一方、群ロボットの実用化事例は少なく、その多くは中央集中型の運用を行っている[3]。中央集中型のシステムは基地局の機器またはオペレータが各ロボットを個別に操作する方式であり、前述した群ロボットの利点は得難い。実用化が進まない理由として、ロボットの動作が人間にとって予測しづらいという欠点が挙げられる[3]。これは単体のロボットにも言えることではあるが、特に群ロボットは各ロボット間の相互作用によっても動作を創発するものであり、全ての相互作用を人間が把握することは困難である。このことから群

ロボットの振る舞いの予見可能性が低く、特に複雑なタスクや人命が関わる場面などへの導入に際して使用者側の懸念に繋がっている[4]。

この問題の改善策として、群ロボットと基地局の通信接続を常続的に維持する方策が考えられる。これはロボット間の全相互作用を観測することの困難さは改善しないが、群全体としての振る舞いを監視して介入や非常停止などを容易にすることに加え、任務の進捗状況を把握することで、各ロボットまたは群全体の次の行動を予測しやすくすると考えられる。また、高度な環境認識、リスクを伴う行動を実行する許可など、基地局の人間が群ロボットの能力を補助できる利点もある[5]。更に、ロボット間の相互通信は合意制御などを始めとして群ロボット協調機構の前提となっていることが多く、常続的接続はいずれにせよ要求されうるという観点でも導入の利点大きい。これまでの研究では、この観点を明確に考慮した巡回監視アルゴリズムの事例は少なく、基地局による監視も評価指標とはされてこなかった。

以上の観点から、本稿では巡回監視を行う群ロボットを基地局と常続的に接続する方式の提案を行う。更に、任務の進捗に対する基地局による状況認識 (SA: Situational Awareness) を示す指標を導入する。以降、第2章で関連研究、第3章で提案手法、第4章で提案手法のシミュレーションによる評価、第5章で結論をそれぞれ述べる。

2 関連研究

既存の研究については、Huang らが巡回監視 (Patrolling) [6], Amigoni らが通信接続を加味した探索

(Exploration with communication constraint) [7]をそれぞれまとめている。巡回監視の研究ではロボット間の通信を前提にした手法も多いが、通信の接続自体を目的または制約とした事例は少ない。探索についても、基地局の存在を考慮した研究においてもその状況認識についてまでは検討されず、接続は制約、あるいは単に他のロボットと情報交換を行う手段として取り扱われてきた。これらの中で、Yanmaz-Adamらはドローン群の巡回監視において監視優先と基地局との接続優先の2方式を導入し、不審物の発見確率とその報告の早さを比較した[8]。しかし、報告の早さは不審物の発見時にのみ基地局の状況認識を短期的に示すもので、巡回監視の進捗などの把握度合いを常時かつ詳細に示すには不十分であった。筆者らも先行研究で基地局との接続を維持する群ロボットの巡回監視についてシミュレーションを行った[9]。一方でこの研究は基地局の状況認識を所与のものとし、状況認識に基づいた基地局の指示によるタスク処理という群ロボットの巨視的な性能を評価するものであった。

以上を踏まえ、本稿では基地局との常続接続を可能とする巡回監視アルゴリズムを作製するとともに、基地局による状況認識を定量的に示す指標を導入する。

3 提案手法

3.1 問題設定

この項では検討対象について定義する。本稿では各グリッドを要監視地点とみなす二次元グリッドマップにおける群ロボットの巡回監視を想定する。既存研究の多く(例えば[10])は要監視地点をノード、それらを結ぶ経路をエッジとして粗く離散化した環境グラフを任務環境として用いるが、無人車両やドローンなどによる広域の巡回監視を想定するには、多数の要監視地点を定義し、かつその地点間の経路を限定しない形が適切であることから、このようなグリッドマップ形式とした。

3.1.1 想定環境と基本評価指標

任務領域をグリッドマップ $G := \{g^k \mid k = 1, 2, \dots, K\}$ で表す。 g^k は各グリッドを表し、添え字は位置などによる識別記号を、 K はグリッド総数を示す。

各グリッド g^k が実際にロボットから監視を受けたかどうかを示す指標として *idleness* [10]を導入し、 i^k で表す。これは各地点が最後に監視を受けてから経過した時間であり、現在時刻を t 、 g^k が最後に監視を受けた時刻を t^k とすれば、 $i^k = t - t^k$ で得られる。巡回監視任務の主目的は *idleness* の低減、すなわち各グリッドになるべく頻繁に訪問し監視することであると言える。

3.1.2 群ロボット

群ロボットを $R := \{r_n \mid n = 1, 2, \dots, N\}$ と表す。添え字はIDなどによる識別記号を、 N はロボットの総数を示す。各ロボットは自己位置推定、接続相手との相互通信などの機能を持つものとする。

各ロボット r_n は巡回監視の実績として、マップと対応する記憶 $G_n(t) := \{(i_n^k, t_n^k) \mid k = 1, 2, \dots, K\}$ を保持する。 i_n^k は g^k の *idleness* 推測値、 t_n^k はその最終更新時刻を示す。*idleness* は環境センサによる検知が困難であることから、各ロボットは自身による巡回監視実績、および他のロボットからの報告によって G_n を更新する。細部は3.3.1項で詳述する。

3.2 役割切替を用いた接続維持

各ロボットは基地局 (Base Station), 中継器 (Repeater), 群リーダー (Local Leader), 群メンバ (Explorer) の4種類の役割のいずれかとして行動する。基地局はオペレータとのインターフェース役を想定し原点に固定する。中継器は基地局と群リーダー間の通信を維持するために必要に応じ配置される。群リーダーは環境中を行動する群の代表として局地的な意思決定を担う。群メンバは群リーダーに隷属し、実際のタスクの担い手となる。群の典型的な形態の模式図を Fig. 1 に示す。通信維持は、基地局・群リーダー間の通信維持と、群リーダー・群メンバ間の通信維持の2段階によって達成される。前者については、群リーダーと中継器の間での役割切替を行うことで中継器の設置・回収を行う手法[11]を用いる。後者については群メンバの位置を群リーダー近傍に維持(3.3.2項で詳述)しつつ、同じく[11]で導入したネットワーク形成手法を用いる。この手法では、各ロボットが識別距離 d_s 以内に所在する他ロボットについて新たに接続するかどうかを、通信距離 d_c 以内に存在する既に接続中の他ロボットについて引き続き接続すべきかをそれぞれ判定することでネットワークを形成する。なお、 d_c 以遠のロボットについては強制的に接続を切断する。

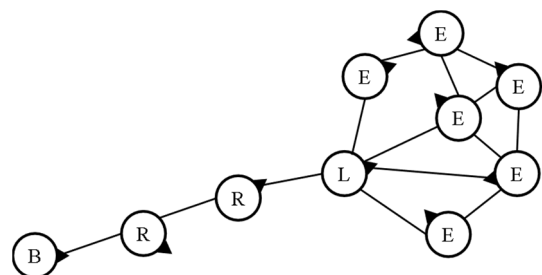


Fig. 1 A typical form of a swarm (B: Base station, R: Repeater, L: Local leader, E: Explorer). The circles, triangles, and lines show the robots, their orientation, and communication connections, respectively.

3.3 巡回監視アルゴリズム

3.3.1 記憶の更新

各ロボットは前述した記憶 G_n の更新を毎時刻行う。更新手順は *DTA-Greedy* 法[12]とほぼ同一であるが、概要を Algorithm 1 に示す。まず、ロボットから監視を受けない限り各グリッドの *idleness* が増加するのは自明であるから、時間の経過に従って記憶 G_n 内の各推定 *idleness*: $i_n^k(t)$ を増加させる (行 1-3)。次に、自身が監視したグリッドについてはその実績で G_n を更新する (行 4-6)。更に、互いの巡回監視実績を共有するため、記憶 G_n を他のロボットに送信する (行 7-10)。ここで、 $A_n(t)$ は時刻 t においてロボット r_n と通信が繋がったロボットの集合である。なお、行 9 の巡回目標地点の共有は、後述する Algorithm 2 において、群メンバが目標地点を他のロボットと重複させないためのものである。一方、受信した記憶については、その最終更新時刻を参照し、より新しい項目があれば更新する (行 11-17)。他のロボットの巡回監視実績が自機の記憶に反映され、その記憶がまた周囲のロボットに転送されるプロセスを繰り返すことにより、全ロボットが互いが持つ情報を共有できる。

Algorithm 1: 時刻 t におけるロボット r_n による記憶 G_n の更新

```

1  for all  $i_n^k(t) \in G_n$ 
2     $i_n^k(t) \leftarrow i_n^k(t-1) + 1$ 
3  end for
4  if  $r_n$  have just arrived a grid  $g^j$  at time:  $t$ 
5     $\{i_n^j, t_n^j\} \leftarrow \{0, t\}$ 
6  endif
7  if  $A_n(t) \neq \emptyset$ 
8    send  $G_n(t)$  to all  $r_m \in A_n(t)$ 
9    send current patrol target to all  $r_m \in A_n(t)$ 
10 endif
11 for all  $G_m$  sent from  $r_m \in A_n(t-1)$ 
12   for all  $g^k \in G_m(t)$ 
13     if  $t_m^k > t_n^k$ 
14        $\{i_n^k, t_n^k\} \leftarrow \{i_m^k, t_m^k\}$ 
15     endif
16   endfor
17 endfor

```

3.3.2 階層型の巡回監視目標選定

各ロボットによる巡回監視目標地点の選定に際しては、群リーダーによる大域巡回、および群メンバによる局所巡回の 2 種類で階層化する。いずれの手法も前項で述べた記憶に基づき、現在の目標地点に到着する度に選定を行う。なお、中継器および基地局は巡回監視を行わない。

大域巡回において群リーダー r_L は、自機の記憶 G_L を全て参照して、すなわちマップ全域を検討範囲として次の巡回監視目標地点を決定する。具体的には、式(1)に示

す効用関数 U_L^k が最大となるグリッド g^k を選択する。 Δt^k は g^k への到達所要時間を示す。推定 *idleness* の累乗を用いることで、長期間訪問されていないグリッドの効用を高め、当該グリッドが遠方であるがゆえに選択されない事象を防ぐ。

$$U_L^k = (i_L^k)^2 / \Delta t^k \quad (1)$$

局所巡回は群メンバ r_E による目標地点選定手法であり、群リーダー r_L との距離を維持しつつ、自機の近傍から目標地点を選定する。手法の詳細を Algorithm 2 に示す。

Algorithm 2: 群メンバ r_E による巡回監視目標選定

```

when  $r_E$  have arrived at the current target
1  assume  $r_E'$ :  $\mathbf{x}_{E'} = \mathbf{x}_E + \alpha(\mathbf{x}_L - \mathbf{x}_E) + \beta\mathbf{u}_L$ 
2   $G_E' := \{g^j \mid \|\mathbf{x}^j - \mathbf{x}_{E'}\| < \delta\}$ 
3  for all  $g^j \in G_E'$ 
4    if  $g^j$  is a current target for robot:  $r_m \in A_E$ 
5       $G_E' = G_E' \setminus g^j$ 
6    endif
7  endfor
8   $g_E^{next} = \operatorname{argmax}_{g^j \in G_E'} U_E^j$ 

```

$\mathbf{x}_{E'}$ は群メンバの現在地 \mathbf{x}_E を群リーダー r_L の位置 \mathbf{x}_L および速度入力 \mathbf{u}_L によりオフセットして得る仮想位置である (行 1)。 α , β は適当な係数であり、本稿ではそれぞれ 0.6, 0.4 とした。 $\mathbf{x}_{E'}$ から距離 δ 以内の近傍グリッド (行 2) から目標地点を選定する (行 8) ことで、 r_L との距離を保ち、通信接続を維持している。なお、 \mathbf{x}^j はグリッド g^j の重心の位置を示す。なお、自身と通信が直接繋がったロボットが目標地点としているグリッドについては候補から除外している (行 3-7)。効用関数 U_E^j については、式(2)を用いた。

$$U_E^j = i_E^j / \Delta t^j \quad (2)$$

以上の階層型目標地点選択についてイメージ図を Fig. 2 に示した。群リーダー r_L はマップ全域を検討範囲 (Fig. 2 の赤点線) として次の監視目標を選択する。それぞれの群メンバ r_E は r_L の位置および移動方向を考慮して位置 $\mathbf{x}_{E'}$ に仮想自機 r_E' が位置すると仮定し、その位置を基準として距離 δ 以内のグリッド (Fig. 2 の青点線) から次の監視目標を選択する。

3.3.3 基地局による状況認識の評価指標

基地局 r_B によるグリッド g^k に対する状況認識の程度を示す指標として、状況認識遅れ: D_{SA}^k を導入する。これは基地局の記憶: $G_B(t)$ における *idleness* 推定値の更新時刻 t_B^k と現在時刻 t の差分: $D_{SA}^k(t) = t - t_B^k$ で表される。 t_B^k は他のロボット同様に Algorithm 1 によって得ら

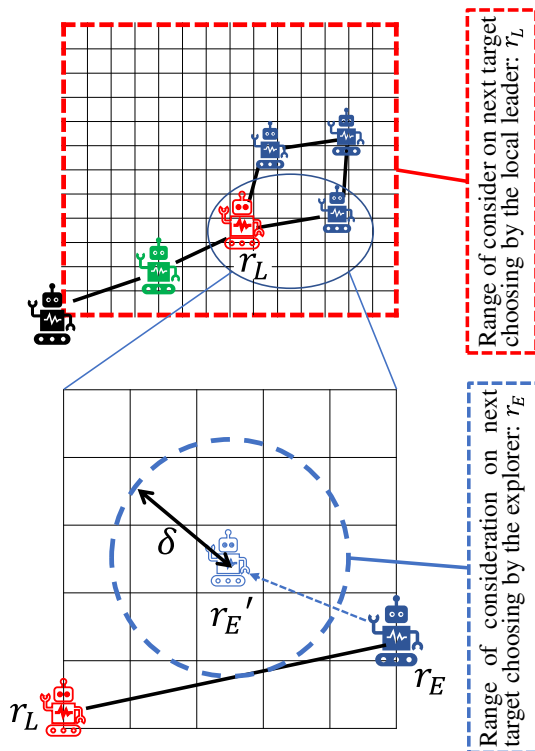


Fig. 2 Schematic diagram of the hierarchical algorithm for the next patrol target selection. The solid black lines indicate connections between the robots.

れる。更に、状況認識遅れの全グリッド・全期間に渡っての平均を平均状況認識遅れ： D_{MSA} として式(3)によって示し、本稿ではこれを基地局における状況認識の指標として採用する。ただし T は任務時間を表す。

$$D_{MSA} = \frac{1}{T \cdot K} \sum_t^T \sum_k^K D_{SA}^k \quad (3)$$

4 シミュレーション

提案手法が作製意図通りに動くことを確認するため、シミュレーションを行った。

4.1 条件

模擬任務として、 600×600 [m]の領域を 30×30 [m]のグリッドで区切ったマップ上を、群ロボット ($N = 10, 15, 20$ 機) が巡回監視することを考える。ただし、マップ左下端を原点とし、各グリッドの位置はその重心の座標によって表す。各ロボットの初期配置として、 r_1 を基地局として原点に固定し、 $r_2 \sim r_N$ については $\|x_n\| \leq 2\sqrt{N}$ [m]を満たす扇型の領域にランダムに配置する。原点最近傍のロボットを群リーダー、それ以外を群メンバーとする。

群ロボットは適宜中継器を配置しつつ、3.3.2の手法によって巡回監視目標地点を選定し、移動する。Algorithm 2における群メンバーのグリッド選定範囲 δ は $\delta = 20\sqrt{N}$ [m]とした。これは $N = 10$ 機の場合、概ね上下左右方向に2マスずつ、斜め方向に1マスずつが含まれる。選定したグリッドの重心から3 [m]以内に接近すれば、当該グリッドの監視完了とし、次の巡回監視目標地点の選定を行う。中継器の配置、各機の目標地点への移動、群リーダーの位置・速度入力情報の群メンバーへの伝播、ネットワークの形成・復旧などについては[11]に準じる。識別距離は $d_s = 90$ [m]、通信距離は $d_c = 150$ [m]とした。ロボットの最高速度は1.5 [m/s] (並進)、1.0 [rad/s] (旋回)、各試行の長さは $T = 10000$ タイムステップ(10000秒を想定)とし、各条件10試行を行った。

4.2 結果

本研究で提案する手法により、その作製意図どおりに群ロボットは巡回監視任務を行うことができた。任務の進捗の様子をFig. 3に示す。

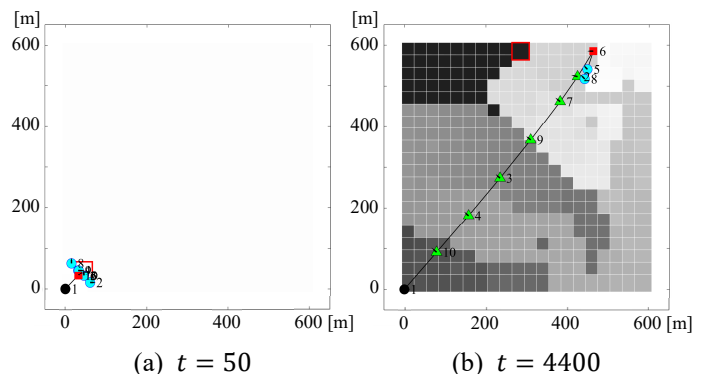
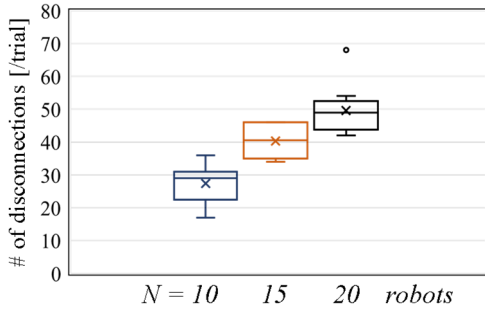


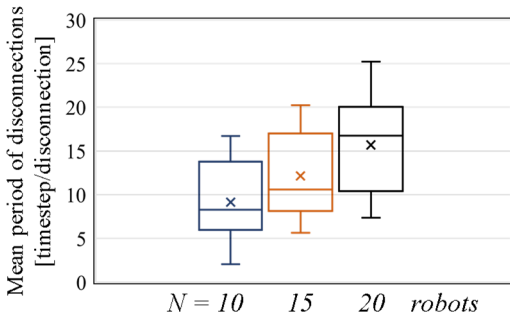
Fig. 3 Screenshots of the typical mission progress ($N = 10$)

群ロボットは[11]で導入した手法によって基地局・群リーダー間の通信接続を維持し、かつ3.2.2項の手法により群リーダー・群メンバー間の通信接続も同様に維持しながら領域内を移動した。Fig. 3(a)は任務開始直後 ($t = 50$)の様子であり、基地局周辺に全ロボットが密集している。Fig. 3(b)は $t = 4400$ における様子である。赤い四角形で示された群リーダー： r_6 と黒い円で示された基地局： r_1 の間の通信は、緑の三角形で示された中継器が維持している。群リーダー： r_6 は式(1)に示す効用関数に従い、比較的近傍で、かつ推定 *idleness* が高い点を監視目標に選定しており、 $t = 4400$ 時点では赤枠で示した領域最上段中央のグリッドが選定されている。この時点では青い円で示した r_5, r_8 が群メンバーであり、 r_6 の近傍をAlgorithm2に従って局所巡回している。なお、グリッドは色が濃いほど *idleness* が高い、すなわち当該グリッドが長期間監視を受けておらず、監視の必要性が高まっていることを示す。

Fig. 4 に通信の接続状況を示す. ここで通信が維持されているとは, 基地局を含む全ロボットの通信ネットワークで示される無向グラフが連結グラフである状態を言い, そうでない状態を切断が起こったと言う. 群ロボット間の通信は断続的な切断は起こりつつも, 都度復旧しながら全体的には維持されていることが示された.



(a) The number of disconnections that occurred per trial

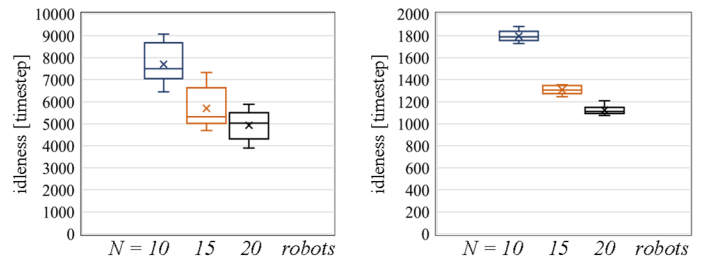


(b) Mean period of disconnections per trial

Fig. 4 Disconnections and recoveries during the missions

Fig. 4(a)は1 試行あたりの切断発生回数, Fig. 4(b)は切断1 回ごとに復旧に要した期間の1 試行あたり平均を示す. Fig. 4(a)において最大数十回の切断が発生する一方, Fig. 4(b)に示すように概ね全て数十秒以内に復旧しており, 全体としては通信を維持できた. 一方で, 群が大きくなるほど切断の回数, 期間ともに増大する結果となった. これは群メンバの局所巡回において, 群が大きいくほど δ が大きくなり, より広い範囲から目標地点を選択するためにロボットの密集度が下がることが原因と考えられる.

巡回監視の成績および基地局における状況認識のデータからも, 提案手法が概ね製作意図通りに提案手法が機能していることを確認した. 結果を Fig. 5 および Fig. 6 に示す. なお, 各指標とも低いほど性能が優れる. Fig. 5(a)は任務中に最大値を取った *idleness* の値を示す. 全条件において試行長さ $T=10000$ を下回っており, 一度も監視を受けないグリッドは存在せず網羅的に監視ができたことが示された. Fig. 5 (b)は全域・全期間の



(a) Worst Idleness (b) Graph Idleness

Fig. 5 Patrol mission performance by the swarm

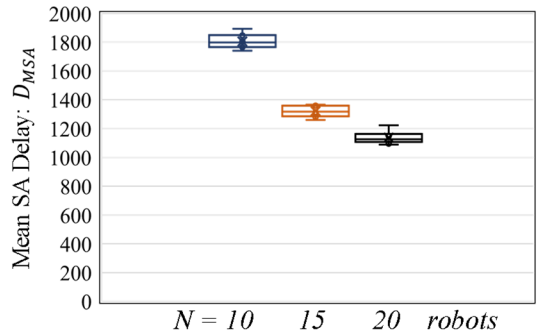


Fig. 6 Degree of the situational awareness by the base station

idleness の平均値, Fig. 6 は基地局による平均状況認識遅れ: D_{MSA} を示す. 機体数が増えるほど値が下がり性能が向上しているなど, 概ね提案手法が意図通り動くことが確認できた. 一方で, 投入した機体の数に対して性能の向上が緩やかになる現象が見られた. これは各ロボット間で巡回目標地点の重複があるためと考えられる. 各ロボットは自身と直接通信が繋がった相手に対してのみ, 巡回目標地点の重複を避けている. 従って群リーダーの周囲に群メンバが集まる提案手法では, 機体数が多いほど, 直接通信が繋がっていないロボットと巡回目標地点の重複が発生し, 巡回監視全体の効率が低下している.

平均状況認識遅れは通信頻度と巡回監視性能による複合的な性能指標である. 各ロボットからの通信によって基地局は各ロボットの記憶を受信する一方で, 各ロボットが十分な巡回監視実績を持たなければ基地局自身の記憶: G_B は有効に更新されない. 例えば, 全てのロボットが基地局周辺に留まる場合, 基地局は頻繁に各ロボットからそれぞれの記憶を受信できる. 一方で, 基地局から離れた領域は巡回されず, その領域に関して G_B における推定 *idleness* 値は更新されないため, 状況認識遅れは増大する. 今後提案手法の性能向上を図るにあたっては, この点に留意する必要がある.

本研究では提案手法の実証のみを行ったが, 今後は [10]が列挙するような既存の巡回監視アルゴリズムと

の性能比較等を行っていく。提案手法は中継器が巡回監視に参加しない、ロボットが領域中に広く分散しないなど、性能上不利と予想される点も多い。実際に、グリッド間の距離、ロボットの移動速度、グリッドの総数から推測される全期間・全域の平均 *idleness* の限界値は Fig. 5(b)に比べ半分から3分の2程度と予測される。一方で基地局の指示を常時受けられ、また発見したタスクに複数のロボットを迅速かつ集中的に投入できるなど、実運用上の利点がある可能性がある。これらの観点を加味した多角的な分析を行い、使用者からも信用され実世界でも運用できる群ロボットシステムの実現を目指す。

5 結言

本稿では固定基地局との通信を維持しながら、群ロボットが巡回監視を行うための分散型かつ階層型のパトロール手法を提案した。シミュレーションにより、各ロボットが基地局との通信を維持しながら領域全体の巡回監視を実施可能であることを示した。また、基地局による状況認識を示す指標として状況認識遅れを導入し、群ロボットシステムの予見可能性の定量的指標を提案した。*idleness*などで示される巡回監視性能と、状況認識遅れなどで示される基地局の状況認識の両方を改善することで、人間からの予見性が高い群ロボットシステムの実現に寄与すると考えられる。

参考文献

- [1] E. Sahin, Swarm Robotics: From Sources of Inspiration to Domains of Application, Swarm Robotics, pp. 10-20, 2005
- [2] D. Guzzoni, A. Cheyer, L. Julia, et al., Many robots make short work: Report of the SRI International mobile robot team, AI magazine, vol. 18, no. 1, p. 55, 1997.
- [3] M. Schranz, M. Umlauft, M. Sende, et al., Swarm Robotic Behaviors and Current Applications, Frontiers in Robotics and AI, vol. 7, no. 36, 2020
- [4] D. Carrillo-Zapata, E. Milner, J. Hird, et al., Mutual Shaping in Swarm Robotics: User Studies in Fire and Rescue, Storage Organization, and Bridge Inspection, Frontiers in Robotics and AI, vol. 7, no. 53, 2020
- [5] A. Kolling, P. Walker, N. Chakraborty, et al., Human Interaction With Robot Swarms: A Survey, IEEE Transactions on Human-Machine Systems, vol. 46, no. 1, pp. 9-26, 2016
- [6] L. Huang, M. Zhou, K. Hao, et al., A survey of multi-robot regular and adversarial patrolling, IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, vol. 6, no. 4, pp. 894-903, 2019
- [7] F. Amigoni, J. Banfi, and N. Basilico,

Multirobot Exploration of Communication-Restricted Environments: A Survey, IEEE Intelligent Systems, vol. 32, no. 6, pp. 48-57, 2017

- [8] E. Y. ADAM, Leveraging connectivity for coverage in drone networks for target detection, Balkan Journal of Electrical and Computer Engineering, vol. 7, no. 3, pp. 218-225, 2019.
- [9] K. Kobayashi, T. Higuchi, and S. Ueno, Hierarchical Control and Subgroup Formation for Robotic Swarms in Patrol Missions (ON PRESS), International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research.
- [10] A. Machado, G. Ramalho, J.-D. Zucker, et al., Multi-agent Patrolling: An Empirical Analysis of Alternative Architectures, Multi-Agent-Based Simulation II, pp. 155-170, 2003.
- [11] K. Kobayashi, T. Higuchi, and S. Ueno, Connectivity maintenance for robotic swarms by distributed role switching algorithm, Artificial Life and Robotics, vol. 27, no. 4, pp. 876-884, 2022
- [12] A. Farinelli, L. Iocchi, and D. Nardi, Distributed on-line dynamic task assignment for multi-robot patrolling, Autonomous Robots, vol. 41, no. 6, pp. 1321-1345, 2017