

基地局への報告行動を考慮した群ロボットの分散型パトロールアルゴリズム

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

Distributed Multi-Robot Patrol Algorithm Considering Reporting to the Base Station

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

Abstract: In patrol missions by multi-robot systems, providing better situation awareness to base stations is essential to promote the real-world deployment of such systems. This paper proposes a distributed patrol algorithm: *Local Reactive* algorithm to provide a base station with better situation awareness. Each robot, patrolling according to the proposed algorithm, selects its patrol target based on its local assumption and its reporting need to the base station. The design of the utility function, which integrates those factors, provides appropriate patrol target selection to pursue both patrol performance and better situation awareness. The simulation study demonstrated that the proposed algorithm performs better than existing algorithms in both patrolling the assigned field and providing better situation awareness.

Keywords: Swarm Robotics, Multi-Robot Systems, Patrolling, Situation Awareness, Persistent Surveillance

1 緒言

本稿は複数のロボットが領域を巡回監視 (パトロール) する任務において, その進捗の基地局への報告を考慮するアルゴリズムを提案する. 提案手法は事前の計画, 中央集権的な指示に依存せず, 各ロボットが分散的に実行できる. 用途としては, UAV (Unmanned Aerial Vehicle: 無人航空機), UGV (Unmanned Ground Vehicle: 無人車両), USV (Unmanned Surface Vehicle: 無人航走体), UUV (Unmanned Underwater Vehicle: 無人潜水艇) 等を用いた環境観測, 災害現場監視等を想定する.

広い領域のパトロール任務は複数の無人機 (ロボット) を用いて分散的に実施することが有効と考えられる. ロボットの使用により, 人間が監視を行う場合に比べ見落とし, 負傷等のリスクが低減できる. 更に, 複数のロボットが同時に多くの地点を観測することで効率的に任務を遂行できる. 本稿ではこのシステムを群ロボットと呼ぶ. パトロールの模式図を図1に示す.

このようなシステムの実用化を促進するためには, システムが任務の進捗や自身の稼働状況を適切に基地局に報告する仕組みが必要である. 現状, 実用化に向けた課題としてはロボットの振る舞いに対する人間からの予見可能性の低さが挙げられている [1]. 必ずしもロボット技術の専門家とは限らないユーザーおよび管理者にとって, 自律的に行動するロボットの行動を予見できないことはロボット活用の忌避感に繋がる. システムが基地局に状況を適切に報告することで, 任務進捗を基にロボットの行動を予測できるほか, ロボットの誤作動に対する介入可能性を確保し, この課題を軽減することができる.

過去の研究は基地局の存在を考慮しない点, 中央集権的な手法に依る等の点でこの課題を完全に解決するとは言い難い. パトロール手法としてはランダムウォークを活用した手法 ([3] など) や各パトロール地点の訪問間隔を考慮する手法 ([4, 5, 6] など) があるが, 基地局の存在は考慮されなかった. 基地局への報告を

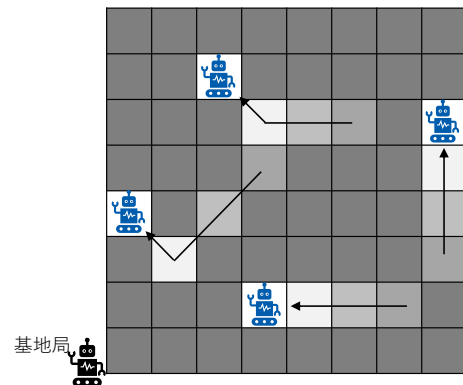


Fig.1 パトロール任務のイメージ図 [2]. 各グリッドが要パトロール地点を示し, グリッドの色が濃いことは当該グリッドがパトロールを受けていないことを示す.

加味した研究は文献 [7, 8] などがあるが, 各ロボットの振る舞いが中央集権的に計画された. 文献 [9] では分散的に基地局との通信を維持するパトロール方式が導入され, 通信を考慮せずパトロール効率を最大化する手法と比較された. しかしこの文献では, 任務環境中のタスクの発見から報告に要した時間のみが評価され, 任務全体を通じてロボットが基地局にどの程度の状況認識を提供するかは評価されなかった.

そこで本稿では, 分散型かつ基地局に定期的に状況報告を行うパトロールアルゴリズムとして LR (Local Reactive) 法を提案する. 提案手法では各ロボットのパトロール目標地点を各地点の評価値に基づいて選択する. この評価値の計算に際して, 基地局への報告所要を考慮することでパトロール行動と基地局への報告を両立する. 本稿の内容は過去の成果 [10] を発展させ, 追加の評価を行ったものである. 以降, 問題設定 (第2章), 提案手法 (第3章), シミュレーションによる評価 (第4章), 結論 (第5章) を述べる.

2 問題設定

本項では本研究の問題設定に述べる。以降、時間 t は 0 以上の整数値をとるタイムステップとし、1 タイムステップは 1 秒に相当するものとする。

2.1 任務と任務領域

任務領域としてグリッドマップ $G := \{g^k \mid k = 1, 2, \dots, K\}$ を定義する。 K は領域中のグリッド総数である。各グリッドには idleness: $i^k(t)$ [4] を定義する。これはロボットが最後に当該グリッドをパトロールしてから経過した時間を指す。実世界でのパトロールは全ての地点を満遍なく、かつ極力頻繁に訪問する行為と考えられ、これは idleness を小さく保とうとする取り組みに相当する。

2.2 ロボット

本研究では前進と旋回により移動するロボットを導入する。同一機種によるロボット群を $R := \{r_n \mid n = 1, 2, \dots, N\}$ と定義する。 N はロボット総数、 n は各ロボットの ID とする。各ロボットは自身の正確な位置 x_n を把握できるものとする。また、ロボットは自身からセンサ領域 d_s 以内にいる他ロボットを識別・認識するとともに、必要に応じそれらと通信を接続することができる。通信の接続は相互に接続したロボット間の距離が最大通信距離 $d_c (> d_s)$ を超えるまで継続し、その間に必要な情報を交換できるものとする。発信した情報は宛先に 1 タイムステップ後に到達し利用可能となる。また、ロボット同士の衝突、ロボットの故障は考えないものとする。 r_1 を基地局または基地局に対するインターフェース役を担うロボットとして領域左下端の原点 $x_1 = [0, 0]$ に固定する。基地局はパトロールへの参加、パトロール行動の指揮ともに行わず、状況認識を計算する主体としてのみ機能する。

2.3 評価指標

任務の評価指標として、パトロールそのものの性能と、基地局の状況認識の程度を示す指標を導入する。

2.3.1 パトロール性能の指標

パトロールそのものの性能指標としては、idleness を基に Graph Idleness と Worst Idleness を導入する。Graph Idleness は全期間・全領域の idleness の平均値、すなわち平均訪問頻度を以下の式で示すものである。

$$I_G = \frac{1}{(T - t_0)K} \sum_{t=t_0}^T \sum_{k=1}^K i^k(t) \quad (1)$$

ここで t_0 は任務開始時刻、 T は任務終了時刻を示す。Worst Idleness は全期間・全領域を通じて最大値をとった idleness であり、以下の式で表される。

$$I_W = \max_{t_0 \leq t \leq T, k \in K} i^k(t) \quad (2)$$

Graph Idleness は概してどの程度効率よく、領域全体を巡回したかを示す指標である。対して Worst Idleness は任務中に一部でも長期間パトロールせずに放置したグリッドがなかったか、パトロールの網羅性を示す。いずれも値が低いほどパトロール性能が優れることを示す。

2.3.2 状況認識の指標

基地局の状況認識を示す指標として、各グリッドごとに状況認識遅れ $D_{SA}^k(t)$ [2] を導入する。これは基地局がどの程度迅速に任務状況を把握しているかを示す指標であり、各グリッドに関する情報について、基地局が知る範囲の最終更新時刻と現在時刻の差分によって示す。ある時刻 t^k にいずれかのロボットがグリッド g^k をパトロールし、その事実が基地局に伝達されると、以降の時刻 t において、 g^k に関する状況認識遅れは $D_{SA}^k(t) = t - t^k$ となる。それ以前の別のパトロール実績が基地局に到達していればそのパトロール時刻を t^k として用い、そうでなければ $t^k = 0$ として計算する。

任務全体の評価指標としては平均値と最大値として平均状況認識遅れ D_{MSA} と最大状況認識遅れ D_{WSA} を定義する。idleness を用いた指標同様、値が小さいほど性能が優れることを示す。平均状況認識遅れは全期間・全領域に渡っての状況認識遅れの平均値であり、以下の式で表される。

$$D_{MSA} = \frac{1}{(T - t_0)K} \sum_{t=t_0}^T \sum_{k=1}^K D_{SA}^k(t) \quad (3)$$

最大状況認識遅れは全期間に渡って最も大きな値を取った状況認識遅れであり、以下の式で表される。

$$D_{WSA} = \max_{t_0 \leq t \leq T, k \in K} D_{SA}^k(t) \quad (4)$$

2.3.3 指標の正規化

各指標の値については必要に応じて、文献 [4] の方法に従い、ロボット総数、グリッド総数の影響を排除する正規化を実施する。計算式を以下に示す。

$$M^n = M \frac{N - 1}{K} \quad (5)$$

ここで M は正規化対象となる指標を示す。本研究では r_1 が基地局役としてパトロールに参加しないため、元論文とは異なり上式の分子として $N - 1$ を用いている。正規化した指標が一定であることは、アルゴリズムがロボット総数、領域の大きさに対して拡張性を持ち、逆に変動することはロボット総数、領域広さの変動に比して相応以上の性能変化が起こったことを示す。

3 提案手法

本研究では提案手法である LR 法として、ロボットが持つ想定 idleness と、パトロール目標グリッドの選択について述べる。各ロボットは最適化計算等を行うことなく、自身が利用可能な知識である想定 idleness を維持・更新し、それに基づいてパトロール目標グリッドの選択を行う。パトロール任務は各ロボットの想定 idleness の更新、パトロール目標グリッドの選択、当該目標グリッドへの移動の繰り返しに帰着される。

3.1 想定 idleness の定義

ロボット r_n は自身の知識として想定 idleness: $H_n := \{h_n(t) = \{i_n^k(t), t_n^k(t)\} \mid k = 1, 2, \dots, K\}$ を保持する。 $i_n^k(t)$ は r_n による g^k の idleness の想定値であり、 $t_n^k(t)$ はその最終更新時刻を示す。 idleness はその定義から、ロボットに搭載する外界センサ等で計測することは不可能である。従って各ロボットは過去のパトロール実績とその時点からの経過時間によって idleness を想定する必要がある、 $h_n(t)$ はその想定を表している。

r_n は自身のパトロール実績および他のロボットの実績を通信で取得することによって $H_n(t)$ を更新する。細部の手順をアルゴリズム 1 に示す。この更新手順は [6] の手法に類似するが、本研究では毎時刻実行する。具体的にはまず、全グリッドに対していずれのロボットもパトロールを実施していないと想定し、時間の経過とともに全グリッドの idleness 想定値を増加させる (3-4 行目)。今次タイムステップに r_n が自身のパトロール目標グリッド g_n^r のパトロールを完了したら、当該グリッドの idleness は $i^r(t) = 0$ であり現在時刻がそれを確認した時刻であるから、その情報をもって想定を更新する (5-6 行目)。またこの際にパトロール目標グリッドの再選定を行う (7 行目)。これについては次節で説明する。

次に、他のロボットとの情報交換を行う。時刻 t において r_n と直接接続が繋がったロボットの集合を $A_n(t)$ と表す。まず、その時点で接続する全ての相手に $H_n(t)$ を送信する (8-9 行目)。逆に他のロボット $r_m \in A_n(t-1)$ から想定 idleness を受信していた場合、含まれる全ての情報を順に参照し、最終更新時刻がより新しい情報があれば対応する情報を上書きする (10-12 行目)。ここで受信した情報のタイムスタンプが $t-1$ となっているのは、第 2 章で定義したように送信した情報が相手に届くのには 1 タイムステップを要することによる。8-12 行目の手順により、各ロボットがパトロールをした事実とその時刻は、想定 idleness の形で他のロボットに伝搬する。

ここで、基地局役を務める r_1 が持つ想定 idleness のうち $i_1^k(t)$ を、前章で述べた状況認識遅れの計算に使用する。 $i_1^k(t)$ の値は基地局が知る範囲で最後に g^k がパトロールされた時刻であり、 $D_{SA}^k(t) = t - i_1^k(t)$ と計算で

Algorithm 1 時刻 t での $H_n(t)$ の更新

```

1: procedure UPDATE ASSUMPTION( $H_n(t-1)$ )
2:    $H_n(t) \leftarrow H_n(t-1)$ 
3:   for all  $i_n^k(t) \in H_n(t)$  do
4:      $i_n^k(t) \leftarrow i_n^k(t) + 1$ 
5:   if  $r_n$  が  $g_n^r$  のパトロールを完了 then
6:      $h_n^r(t) \leftarrow [0, t]$ 
7:     新しい  $g_n^r$  を選択
8:   for all  $r_m \in A_n(t)$  do
9:      $r_m$  に  $H_n(t)$  を送信
10:  for all  $r_m \in A_n(t-1)$  から送信された  $H_m(t-1)$  do
11:    if  $t_m^k(t-1) > t_n^k(t)$  then
12:       $h_n^k(t) \leftarrow h_m^k(t-1)$ 
13:  return  $H_n(t)$ 

```

きる。指標の定義から、状況認識遅れの改善には各ロボットが極力多くのグリッドに頻繁に訪問し、かつそれを迅速に基地局に報告する必要があるといえる。

3.2 パトロール目標グリッドの選択

本節ではロボット r_n による自身のパトロール目標グリッド g_n^r の選択について述べる。基本的な方式としては効用関数を用いて最も効用が高いものを選択するが、各ロボットが持つ報告所要 $p_n(t)$ に基づいて効用の補正を行う。この値が高い時は基地局に近いグリッドの効用を高く見積もることで基地局に近付き状況を報告する可能性を向上し、パトロール行動と基地局への報告を両立する。

3.2.1 効用関数の計算

各ロボットは自身の想定 idleness に基づき、周囲のグリッドのパトロール効用を計算し、最も効用が高いものを新しいパトロール目標グリッドとする。この手順は任務開始時およびロボットが自身のパトロール目標グリッドのパトロールを完了した時のみ実行される。効用関数を以下に示す。

$$g_n^r = \operatorname{argmax}_{g^k \in G_n^o(t)} U_n^k(t) \quad (6)$$

$$U_n^k(t) = \alpha_n^k(t) \frac{i_n^k(t) + \Delta_n^k(t)}{\Delta_n^k(t)}$$

$G_n^o(t)$ は r_n の現在地 $x_n(t)$ から距離 δ 以内にあるグリッドの集合である。 $\Delta_n^k(t)$ は $x_n(t)$ から g^k までの移動所要時間を示す。第 2 式より、基本的により現在地から近

く、かつ idleness 値が高いと想定されるグリッドを優先して選択する。 $\alpha_n^k(t)$ は各グリッドの評価値に乗じる補正值であり、自身の報告所要 $p_n(t)$ に基づき評価値を補正することによってパトロールと基地局への報告を両立する。細部は次節に示す。

3.2.2 報告所要 $p_n(t)$ の更新と補正值 $\alpha_n^k(t)$ の計算

ロボット r_n は自身が $H_n(t)$ として持つ任務の進捗状況を基地局に報告すべきかの程度を示す値として報告所要 $p_n(t)$ を保持、更新する。詳細な手順をアルゴリズム 2 に示す。具体的にはまず、 $p_n(t)$ を時間とともに増加させる (2 行目)。ただし最大値 p_{\max} 以上には増やさない。次に各ロボットからのメッセージを参照し、相手が基地局であれば、基地局との最終通信時刻 $T_n^b(t)$ を更新する (6-7 行目)。相手が基地局以外であれば、互いの基地局との最終通信時刻を比較し、自身の方が値が小さい、すなわち長期間基地局と通信していない場合は、自身の報告所要を相手のそれを加えた値で更新する (8-9 行目)。これは相手のロボットが蓄積した任務進捗の報告義務を請け負うことに相当する。 η は割引率であり、本研究では 0.5 と設定した。この手順が一度も発生しない場合は相手が自身の報告所要を受け取ったとみなし、 $p_n(t)$ をゼロで更新する (11-12 行目)。他のロボットが同じ手順を実行できるよう、自身の T_n^b を全ての接続相手と共有する (13-14 行目)。基地局に十分近接した場合は、報告が完了したとみなし $p_n(t)$ をゼロで更新する (15-16 行目)。近接の閾値はセンサ覆域の半分とした。

この手順によって、ロボット同士が出会い互いに接続した場合は、前節の想定 idleness の更新によって互いのパトロール実績を共有するとともに、より長期間基地局に報告をしていないロボットの報告所要をより高め、そうでないロボットの報告所要をゼロとする。これはロボットが基地局に報告を実施する機会をロボット間で均等化することを企図している。ロボットによる基地局への報告は、実世界では報告に加えて補給・整備を受ける機会に相当し、これを均等化することに一定の利点があると考えられる。

最終的にこの $p_n(t)$ に基づきグリッドごとの補正值 $\alpha_n^k(t)$ を決定する。これは以下の式によって計算する。

$$\alpha_n^k(t) = \exp \left\{ -\frac{(\max\{x^k, y^k\} - (p_{\max} - p_n(t)))^2}{2\sigma^2} \right\} \quad (7)$$

$\max\{x^k, y^k\}$ は g^k の位置 x^k の x , y 座標のうち大きい方の値を示す。上の式はガウス分布様の関数であり、 $\alpha_n^k(t)$ は $p_n(t)$ が小さい時、基地局から離れた、すなわち $\max\{x^k, y^k\}$ が大きな g^k に対して大きな値、 $p_n(t)$ が大きい時には基地局から近い g^k に対して大きな値を取る。この補正により、報告所要が高いロボットは基地局に近いグリッドの効用を高く見積もる。結果、基地局方向に移動する確率を高めることで基地局への報告行動

Algorithm 2 時刻 t での $p_n(t)$ の更新

```

1: procedure UPDATEP( $p_n(t-1)$ )
2:    $p_n(t) \leftarrow \min\{p_n(t-1) + 1, p_{\max}\}$ 
3:    $is\_update \leftarrow false$ 
4:   if  $A_n(t-1) \neq \emptyset$  then
5:     for all  $r_m \in A_n(t-1)$  do
6:       if  $r_m$  が基地局 then
7:          $T_n^b(t) \leftarrow t$ 
8:       else if  $T_m^b(t-1) > T_n^b(t)$  then
9:          $p_n(t) \leftarrow \max\{p_n(t), p_m(t-1)\} + \eta \min\{p_n(t), p_m(t-1)\}$ 
10:         $is\_update \leftarrow true$ 
11:     if  $is\_update == false$  then
12:        $p_n(t) \leftarrow 0$ 
13:     for all  $r_m \in A_n(t)$  do
14:        $p_n(t)$  と  $T_n^b(t)$  を  $r_m$  に送信
15:     if  $x_n(t) \leq d_s/2$  then
16:        $p_n(t) \leftarrow 0$ 
17:   return  $p_n(t)$ 

```

Table1 ロボットの設定

記号	値	単位	備考
v_{\max}	1.5	m/s	最大並進速度
ϕ_{\max}	1.0	rad/s	最大旋回速度
d_c	180	m	最大通信距離
d_s	90	m	センサ覆域
δ	180	m	目標グリッドの検討範囲

が促進される。逆に報告所要が低いロボットは基地局から遠いグリッドの効用を高く見積もることで、積極的に遠方領域のパトロールを実施する。

4 シミュレーション

本章では提案手法を評価したシミュレーションとその結果について述べる。

4.1 設定

ロボットの設定を表 1、シミュレーションの設定を表 2 に示す。任務開始を $t_0 = 0$ とし、基地局 r_1 を領域の左下端に固定し、その周囲 $2\sqrt{N}$ [m] 以内の扇形の領域にロボットをランダムに配置しパトロールを開始する。各ロボットがパトロール目標グリッドの重心から 3[m] 以内に近付いたら、当該グリッドのパトロールを完了したとみなす。

Table2 シミュレーション条件

記号	値	単位	備考
N	5, 10, 15	robots	ロボット総数
K	20×20	grids	グリッド総数
T	43200	timesteps	任務1回の長さ
-	10	trials	条件あたり試行回数

4.2 比較対象手法

提案手法と性質に近い手法として、Conscientious Reactive (CR) 法 [4], Expective Reactive (ER) 法 [5], および Distributed Task Assignment Greedy (DTAG) 法 [6] を比較対象とする。DTAG 法については改良版である DTAP 法もあるが、本研究の設定では性能に差異が見られなかったことから DTAG 法のみを採用した。想定 idleness の保持・更新等は各アルゴリズムに従うが、基地局との通信に際してのみ、状況認識遅れの計算のためアルゴリズム 1 を用いる。また LR 法同様に群のうち 1 機のロボットを基地局として配置し、各ロボットはセンサ覆域内に基地局がいれば通信を接続する。

4.3 シミュレーション結果

シミュレーションでは LR 法の設計意図通り動作することが確認できた。動作の様子を図 2 に示す。マップ中の青い円がロボットであり、左下の黒い円が基地局役を示す。各ロボットに併記された数字は上段が ID, 下段が報告所要 $p_n(t)$ を表す。ただし基地局 r_1 には報告所要は表示していない。図中では r_5, r_8, r_{10} が相互に接続しており、非表示ではあるが基地局との最終通信時刻 T_5^b, T_8^b, T_{10}^b を比較し、もっとも値が小さい r_5 に報告所要が集約されている。また r_4 はこの時点で基地局への報告を完了しており、まだ接続が維持されていることから $p_4(t)$ がゼロに保たれている。

idleness を指標としてパトロール性能を評価した結果、LR 法が他のアルゴリズムよりも概ね優れることが示された。図 3, 4 に Graph Idleness I_G , Worst Idleness I_W を指標としたパトロール性能を示す。下線を引いた LR 法が本研究の提案手法である。各指標は稼働ロボット数 $N-1$ とグリッド総数 K で正規化を行っている。各グリッドへのパトロール間隔の平均値を示す I_G では 2 番目に性能が優れる ER 法, DTAG 法と比べても 20% 程度優れた性能を発揮した。パトロールの網羅性を示す I_W でも LR 法は優れた成績を示したが、最も優れた DTAG 法よりは最大 15% 程度劣る結果となった。DTAG 法はパトロール目標グリッドの選定に際して領域中の全グリッドを候補とするため、idleness 値が高いグリッドにより迅速に対応したと考えられる。LR 法でも目標グリッドの検討範囲である δ を大きくすることで同等の性能を発揮し得るが、領域が広くなるほど演算負荷

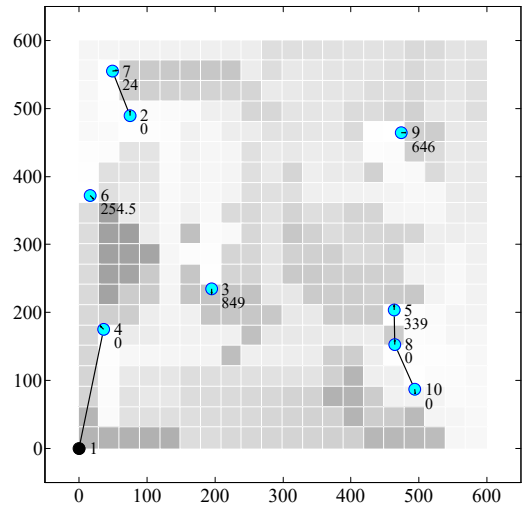
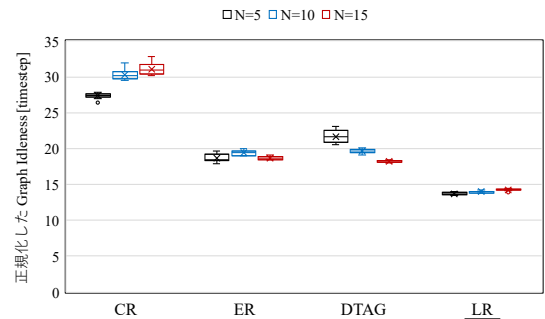
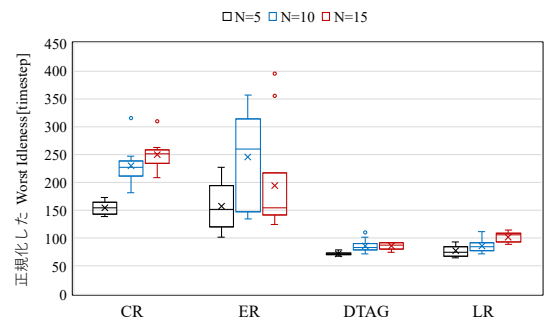


Fig.2 パトロール任務のシミュレーションの様子。

Fig.3 Graph Idleness I_G を指標としたパトロール性能。

が上がる点に注意を要する。

更に、状況認識遅れを指標とした基地局における状況認識は、いずれのアルゴリズムよりも LR 法が優れた。図 5, 6 に平均状況認識遅れ D_{MSA} と最大状況認識遅れ D_{WSA} を指標とした結果をそれぞれ示す。いずれの場合でも提案手法が最も優れた結果を示した。LR 法は I_W において DTAG 法に劣ったことから、一部のグリッドを DTAG 法よりも長くパトロールせずに放置したが、当該グリッドを含め各グリッドをパトロールした後はその情報を迅速に基地局に報告し、各グリッドに関する基地局の状況把握の面は DTAG 法に優れたと言える。

Fig.4 Worst Idleness I_W を指標としたパトロール性能。

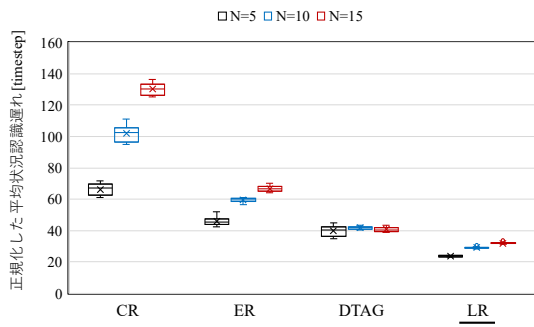


Fig.5 平均状況認識遅れ D_{MSA} を指標とした基地局状況認識.

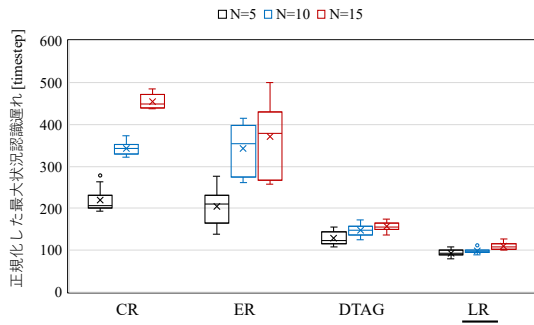


Fig.6 最大状況認識遅れ D_{WSA} を指標とした基地局状況認識.

一方で、LR 法では各ロボットが基地局と通信する回数を均等化することを企図したが、この点では優位性が見られなかった。表 3 に、各 10 試行分を全て合算した、ロボット 1 台あたりの基地局との通信回数を示す。太字は提案手法を示す。通信回数は一度基地局と通信断となったロボットが再度基地局と接続した時に一回と数えた。表が示すように、他の手法と比べて特段に基地局との通信回数が均等となる結果は確認できなかった。ただし、特に N が小さい群の時に LR 法は通信回数が多い傾向にあり、基地局との通信を促進した結果が反映されている可能性がある。複数のロボットが通信をすると 1 台のロボットに報告所要が集約されることから、 N が大きいとロボット同士が接続する機会が増し、この傾向が弱まっていると考えられる。

5 結論

本研究ではパトロール性能と基地局の状況認識を両立するパトロールアルゴリズムとして Local Reactive

Table3 ロボット 1 台あたりの基地局との通信回数

N		CR	ER	DTAG	LR
5	平均回数	6.7	9.0	7.0	13.2
	標準偏差	1.8	1.9	2.2	2.2
10	平均回数	6.3	8.2	6.6	9.5
	標準偏差	1.5	2.0	2.4	1.8
15	平均回数	6.2	8.3	6.3	7.6
	標準偏差	1.6	1.9	2.9	1.7

(LR) 法を提案した。提案手法では各ロボットが自身の想定に基づき、パトロールの必要性と基地局への報告の必要性の両方を考慮して分散的に行動を決定する。シミュレーションの結果、LR 法はパトロール性能および基地局への状況認識の提供の両方の点で既存アルゴリズムに比べ高い性能を発揮することができた。

参考文献

- [1] M. Schranz, M. Umlauft, M. Sende, and W. Elmenreich, "Swarm Robotic Behaviors and Current Applications," *Frontiers in Robotics and AI*, vol. 7, no. 36, 2020.
- [2] 小林, 樋口, 上野, "群ロボットのパトロール任務における基地局による状況認識の定量評価指標," in *ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集*, 2023, pp. 1P1-G01.
- [3] 佐藤, 坂本, 前田, 國井, 戸田, and 加藤, "群ロボットによる広域分散面探索のための確率的存在密度制御," *日本ロボット学会誌*, vol. 41, no. 10, pp. 869-880, 2023.
- [4] A. Machado, G. Ramalho, J.-D. Zucker, and A. Drogoul, "Multi-agent Patrolling: An Empirical Analysis of Alternative Architectures," in *Multi-Agent-Based Simulation II*, 2003, pp. 155-170.
- [5] C. Yan and T. Zhang, "Multi-robot patrol: A distributed algorithm based on expected idleness," *International Journal of Advanced Robotic Systems*, vol. 13, no. 6, pp. 1-12, nov 2016.
- [6] 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.
- [7] J. Banfi, N. Basilico, and F. Amigoni, "Minimizing communication latency in multirobot situation-aware patrolling," in *2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2015, pp. 616-622.
- [8] J. Scherer and B. Rinner, "Multi-Robot Patrolling with Sensing Idleness and Data Delay Objectives," *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, vol. 99, no. 3, pp. 949-967, 2020.
- [9] 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.
- [10] K. Kobayashi, S. Ueno, and T. Higuchi, "Multi-robot patrol algorithm with distributed coordination and consciousness of the base station's situation awareness," <https://doi.org/10.48550/arXiv.2307.08966>, 2023.