

群ロボットのパトロール性能評価における任務環境表現の影響

○小林 一穂（横国大） 上野 誠也（横国大） 樋口 丈浩（横国大）

Patrolling is one of the potential applications of multi-robot systems. In a simulation study for patrol algorithms, the way how the study represents the mission environment is also important, as well as the algorithm's design. This study introduces several existing patrol algorithms and evaluates them in grid maps which are different environments than where they have been evaluated. Simulation studies showed that the operation in grid maps, which are suitable to represent large fields, may demonstrate a different performance than maps with other characteristics. The results quantitatively demonstrate the importance of appropriate environmental representation according to the mission characteristics.

1. 序論

本稿では複数のロボットを用いて特定の領域をパトロールする問題について報告する. 具体的には, 作製したパトロール手法の評価において, 性能評価のためのシミュレーションを行う際の環境表現のあり方によって評価結果が異なり得る現象を示し, その理由について考察する. ここでパトロール手法とは, 各ロボットがある地点に到達し当該地点のパトロールを完了した際, 次に目標とすべき地点を決定するためのルールのことを指す.

群ロボットのパトロールは, 無人航空機 (UAV: Unmanned Aerial Vehicle), 無人車両 (UGV: Unmanned Ground Vehicle), 無人航行艇 (USV: Unmanned Surface Vehicle), 無人潜水艇 (UUV: Unmanned Underwater Vehicle) などの移動ロボットを用いて領域の監視, 捜索等を行うものであり, 多数のロボットを配置することで迅速に任務を遂行することが期待できる. 特にロボット同士の相互作用によって創発的に協調行動を実現する技術はスウォームロボティクス (スウォームロボティクス) とも呼ばれ, その適用によるコストの削減, 冗長性の向上等も期待されている [1]. パトロール任務の図を Fig 1 に示す. Fig 1 ではパトロール対象領域をグリッドで区切り, 4機のロボットが巡回している. パトロールとは領域中で発生した望ましくない状況を早急に検知するため, 各地点を満遍なく, かつ極力頻繁に訪問することであると表現できる.

過去の研究の中でも分散型, 特にその中でも反射型 [2] と分類されるものは, 中央集権的な指示を受けることなく, かつ各ロボットがある地点のパトロールを終える毎に, 自機が持つ局所的な情報に基づいて自機の周辺から次のパトロール目標地点を選ぶ手法である. 分散・反射型の手法は

- ロボットの増減に対し頑健かつ柔軟であること
- 事前の学習等が不要で実装・配備が容易であること
- 監視対象から此方側の振る舞いを予見されにくいこと

などの利点があると考えられ, これまで様々なアルゴリズムが開発されてきた [3, 4, 5]. 筆者らも同様に分散型のアルゴリズムの開発・改良を行っている [6].

パトロール性能の評価においてアルゴリズム以外で重要となる観点として, 配備するロボットの総数, 任務環境の性質などが挙げられる. 前者についてはロボッ

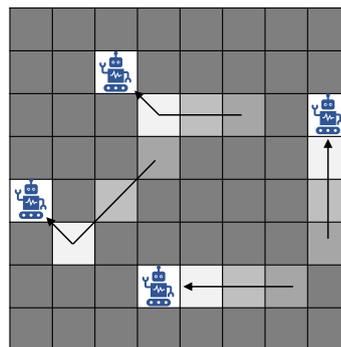


図 1 Conceptual image of multi-robot patrol missions by four robots. The mission divides its assigned area into grids corresponds to patrol locations, and the darkness of the color of each grid corresponds to the time that has elapsed since that grid was last patrolled.

トの総数が多いほど性能は向上するが, その程度がロボット総数に比例するとは限らず, 互いの干渉による性能の低下等を考慮する必要がある. 後者については過去の研究では, 環境をノードとエッジからなるグラフとして表現しており, グラフの特性によって性能を発揮しやすいパトロール手法が異なることが指摘されている [7].

本稿では特に後者の環境の性質について着目する. 前述のとおり, 過去の研究ではグラフマップを用いて評価がなされてきた一方, 筆者らの研究ではグリッドマップを採用してきた. 前者は部屋とそれを繋ぐ廊下から構成されるような屋内環境に, 後者は障害物が少ないが監視範囲が広い屋外環境に, それぞれ適すと考えられる. 研究の過程でグリッドマップ環境において既存の手法を評価・比較したところ, 手法間での比較結果に違いが生じ得ることが認められた. そこで本稿では, 国内では研究事例が少ない群ロボットによるパトロールの手法を紹介するとともに, 環境表現の差によって性能比較結果に違いが生じる現象について報告する.

2. 問題設定

本章では本研究で用いた問題設定について述べるとともに, 検証に用いた過去のパトロールアルゴリズムについて紹介する. それぞれのアルゴリズムはその作

製時にグラフマップ上で検証されているが、本稿ではそれらをグリッドマップ上で再現し性能の評価、比較を行った結果を示していく。

2.1 任務環境とロボット

始めに任務環境としてグリッドマップ $G := \{g^k | k = 1, 2, \dots, K\}$ を定義する。ここで g^k はパトロール地点に相当する各グリッドを示し、 K はグリッド総数である。パトロールはロボット群 $R := \{r_n | n = 1, 2, \dots, N\}$ が実施する。ここで N はロボットの総数を示す。各ロボットはパトロール目標グリッドの選択と当該グリッドへの移動を繰り返すことでパトロールを実施する。

2.2 評価指標

評価指標として、各グリッド g^k に付随する *idleness* という指標 [3] を用い、 i^k と表す。 i^k は g^k が最後にパトロールされてから経過した時間を示す。従って、任務の基本的な目標は i^k を極力小さく保つことであると言える。Fig 1 では、各グリッドの色の濃さが i^k に対応する。

1度の任務全体におけるパトロール成績を評価する指標として、*graph idleness* および *worst idleness* を導入し、それぞれ I_G , I_W と表す。任務中に g^k がパトロールを受けた時刻を順に $t_1^k, t_2^k, \dots, t_j^k$ とすると、 I_G は式 1 のように表すことができ、これは各グリッドがパトロールを受ける間隔の平均値を示す。当該間隔の最大値が I_W (式 2) であり、これは任務中最も長い期間パトロールされず放置されたグリッドの *idleness* を示す。 I_W はパトロールの網羅性と均等性の指標となる。また同じく均等性の指標として、全ての $t_j^k - t_{j-1}^k$ の標準偏差を I_{SD} と表し、これも同様に評価指標とする。

$$I_G = \frac{1}{KJ} \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^J \{t_j^k - t_{j-1}^k\} \quad (1)$$

$$I_W = \max_{j,k} \{t_j^k - t_{j-1}^k\} \quad (2)$$

2.3 パトロールアルゴリズム

本稿では過去の研究のうち、分散・反射型またはそれに準ずるものとして、古典的なものと比較的最近に作製されたものをそれぞれ 2 つずつを比較する。以下にその概要を示す。なお、各手法はグラフマップでの使用を想定して作製されているが、本稿ではグリッドマップでの使用を想定するため、説明においてもグリッドマップを想定した用語を用いる。

2.3.1 Random Reactive 法 [3]

Random Reactive 法 (RAND 法) では、各ロボットが現在地と隣接するグリッドからランダムに 1 つを選択しパトロール目標とする。ロボット同士の通信、それに基づく情報交換と協調は行わない。

2.3.2 Conscientious Reactive 法 [3]

Conscientious Reactive 法 (CR 法) では、各ロボットが現在地と隣接するグリッドから最も *idleness* が高いグリッドを選択しパトロール目標とする。ロボット同士の通信、情報交換、および協調は行わない。なお *idleness* はその性質上外界センサによる計測が不可能

であることから、各ロボットが自身の各グリッドへの訪問時刻を元に *idleness* の推定値を保持し、それに基づき行動するものとする。例えば、 r_n が g^k を時刻 t_n^k にパトロールした場合、時刻 t において r_n による g^k の *idleness* 推定値は $i_n^k(t) = t - t_n^k$ と表現できる。この考え方は他の手法についても同様である。

2.3.3 Expected Reactive 法 [4]

Expected Reactive 法 (ER 法) は、各ロボットが現在地と隣接するグリッドから最もパトロール効用が高いグリッドを選択しパトロール目標とする。効用は各グリッドの *idleness* 推定値および当該グリッドまでの移動所要時間から計算する。また各ロボットはパトロール目標に到達または新たなパトロール目標を決定する毎に、その訪問 (予定) 時刻を全ロボットに発信する。各ロボットは *idleness* 推定値の計算に際し受信した情報も考慮する。具体的には、訪問時刻については当該グリッドについて自機が保持する訪問時刻と比較し、より値が大きい、すなわち新しい情報を訪問時刻として保持する。訪問予定時刻を受信した場合はその情報をそのまま自機の訪問時刻とするが、自身も当該グリッドを目標としている場合は値が小さいものを採用する。

2.3.4 DTAP 法 [5]

DTAP 法は、各ロボットがマップ全体から最もパトロール効用が高いグリッドを選択しパトロール目標とする。効用は各グリッドの *idleness* 推定値、当該グリッドまでの現在地および初期位置からの距離を用いて計算する。また、各ロボットはその際、全てのグリッドに関する自身の *idleness* 推定値を全ロボットに発信する。ER 法同様に効用計算においてはこの情報が考慮される。更に、効用計算に基づき選択されたグリッドは一度ロボット間で競売にかけられる。各々が保持するパトロール目標の数と、それらの中間地点から競売対象のグリッドまでの到達所要時間の積が入札額となる。最も低い入札額を提示したロボット、すなわち、保持する目標数が少なく、かつ競売対象と目標群が近いロボットが最終的にそのグリッドを自身のパトロール目標に加える。各ロボットは複数の目標を同時に保持し得るが、次の目標を選択する際は、目標群について再度効用を計算し、最も効用が高いものを採用する。

3. シミュレーション

前述の 4 つの手法について、グリッドマップ環境での性能評価をシミュレーションによって実施した。結果については第 1 章でも述べたように、より新しい手法の古い手法に対する性能向上幅に特に着目する。本章ではシミュレーション条件およびその結果を示す。

3.1 シミュレーション条件

シミュレーション条件を表 1 に示す。任務は 600[m] 四方のフィールドをパトロールすることとし、当該フィールドを 30[m] 四方のグリッドで区切ったグリッドマップとして取り扱う。各ロボットの初期位置はフィールド内のランダムな位置とする。目標グリッドの中心から 3m 以内にロボット近付いたら当該グリッドのパトロールを完了したものとし、各ロボットは次の目標の選定を行う。なお各ロボットは自己位置を正確に推定

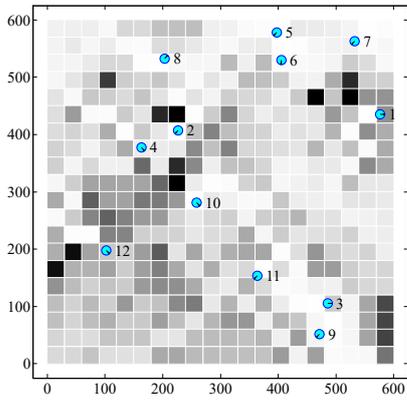


図 2 A screenshot of the simulation with the robots: $N = 12$ Each circle represents a robot, and the number attached to it indicates its ID. The darker the color of each grid, the higher the idleness.

できるものとし、故障、通信不達等は発生しないものとする。また、フィールドはロボットの大きさに対して十分に広い状況を想定し、衝突についても考慮しない。ER 法、DTAP 法については、元の文献に倣って通信可能範囲についても制限しない。時間については離散化し、1 タイムステップが 1 秒に相当するものとして 12 時間の任務を想定する。

表 1 Configurations

記号	意味	値	単位
K	グリッド総数	20*20	-
-	グリッド 1 辺長さ	30	m
N	ロボット総数	4, 12, 20	-
T	任務時間	43200	タイムステップ
-	条件ごとの試行数	5	回
v_{max}^l	並進最大速度	1.5	m/s
v_{max}^a	旋回最大速度	1.0	rad/s

3.2 シミュレーション結果

パトロールの様子を図 2 に例示する。図では円で示された 12 機のロボットが CR 法に従ってパトロールを行っているが、外観は他の手法を用いている場合でも同様である。各ロボットに付記された数字はそれぞれの ID である。また、各グリッドは色が濃いほど idleness が高いことを示す。

各条件について、1 回目の試行の結果を表 2 に示す。各指標はグリッドへの訪問間隔である idleness から計算されるため、値が小さいほど性能が良いことを示す。各ロボットが局所的かつランダムな判断を行う RAND 法において、特に I_{SD} および I_W が劣る結果となった。idleness 推定値に基づいた目標選択を行う残りの 3 手法は RAND 法に比べて性能が向上しており、特にロボット同士の情報共有を行う ER 法、DTAP 法が優れた結果を示した。図 3 および図 4 にそれぞれ I_G およ

び I_W について全 5 試行分の結果を示すように、この傾向は概ね試行回数を繰り返しても再現された。ただし RAND 法における I_W については、その手法の特性上、ばらつきが大きい結果となった。

表 2 Simulation Results

N	使用手法	I_G	I_{SD}	I_W
4	RAND	2854.5	4993	38034
	CR	3472.1	2667.8	14610
	ER	1631.9	1385.5	5955
	DTAP	3068.3	1093.4	7071
12	RAND	975.9	1753.5	23509
	CR	1149.6	1026.2	7430
	ER	560.08	475.23	2208
	DTAP	953.5	666.88	4229
20	RAND	591.56	1055.3	28814
	CR	685.15	691.94	5404
	ER	335.73	283.7	1395
	DTAP	564.39	484.39	3689

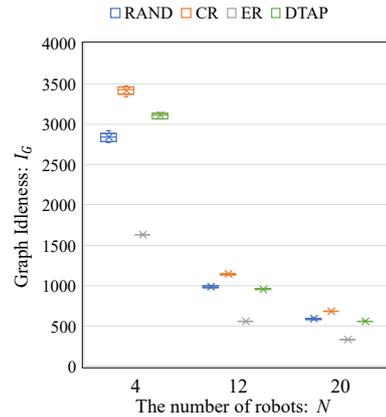


図 3 A box plot of graph idleness: I_G by five trials for the four algorithms. The boxes in each group classified by N correspond to RAND, CR, ER, and DTAP from left to right, respectively.

本研究で導入した限りにおいては、文献 [4] との対比として ER 法と CR 法を、文献 [5] との対比として RAND 法、CR 法、および DTAP 法を比較することが可能である。以降はそれぞれについて詳細に述べる。

ER 法はグラフマップ上で CR 法に対し優れた性能を示した実績があり、2 種類のマップ、4 通りのロボット総数で 3 試行ずつ検証を行い、それぞれの指標について概ね 30~50% の指標低減、すなわち性能の改善を実現してきた。他方で、本稿におけるグリッドマップでの検証では、表 2 に示すようにグラフマップ上での結果以上に顕著な性能改善が見られ、ER 法が CR 法と比較して 50~75% 程度の改善を示した。

DTAP 法はグラフマップ上で I_{SD} および I_W において RAND 法、CR 法に比べ顕著に優れていた実績がある。この傾向はグリッドマップ上でも同様であったが、

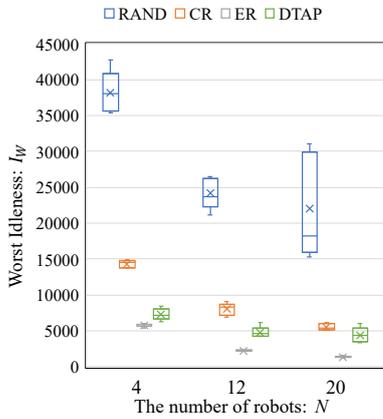


図4 A box plot of graph idleness: I_W by five trials for the four algorithms. The boxes in each group classified by N correspond to RAND, CR, ER, and DTAP from left to right, respectively.

その改善幅については、ER法に関する考察と異なり、グラフマップ、グリッドマップのいずれの場合も同程度であった。ただし、RAND法とCR法の性能差についてグラフマップ環境での文献[5]における実績と本稿のグリッドマップ環境での結果とを比較すると、ER法に関する考察同様、概ねグリッドマップ環境での検証の方が性能差が大きい結果であった。具体的には、グラフマップ環境における I_{SD} および I_W の性能差がそれぞれ4~55%、45~70%程度であったのに対し、グリッドマップ環境ではそれぞれ30~55%、55~85%程度であった。なおRAND法における I_G は実際の性能との解離が大きく、idleness値が低いグリッドに繰り返し訪問することにより見かけ上の性能が高くなっていることから、ここでは考察の対象外とした。

3.3 考察

前項で示したように、各パトロール手法はグリッドマップ上でも設計意図通りに動作した一方、その態様には先行研究との差異が認められた。具体的には、ER法はCR法に対して、CR法はRAND法に対して、グラフマップでの検証結果以上に顕著な性能改善を示した。これらの理由として、グラフマップではパトロール地点間を移動する経路に制約が大きいと考えられる。グリッドマップ環境の場合はグリッド間の移動経路に制約が存在せず、近隣のグリッド全てがパトロール目標となり得る。過去の研究で用いられたグラフマップでは、各ノード（パトロール地点）から伸びるエッジは高々2~3本程度であり、1本のみいわゆる行き止まりとなっている場所も多く存在した。目標選択時に選択肢の数が少ないほど、アルゴリズム同士の差異は出づらいつと考えられ、このことがグラフマップよりもグリッドマップでの検証の方が性能差が大きく表れることに繋がっていると考えられる。一方で、DTAP法については検証環境の表現の違いに起因する結果の違いは見られなかった。グラフマップ環境においても、DTAP法は全てのノードを目標候補とすることが可能であり、実質的にグリッドマップと同様の条件であったと考えることができる。RAND法、CR法、およびER法のように、隣接する地点のみから次のパトロー

ル目標を選ぶ手法を用いる場合に、環境表現による違いが特に強く出ると考えられる。

以上のことから、群ロボットのパトロールアルゴリズムの開発に際しては想定任務環境に適した検証環境を用いること、既存アルゴリズムの選定に際しても試験環境と想定運用環境の差異に留意することが重要であると言える。特にUAV、UUVなどは3次元的な行動が可能のため、空港近隣空域の警戒監視や海中環境モニタリング等の任務を想定する場合は3次元グリッドマップを用いて環境を表現することも考えられる。更に、グラフマップのみでの検証であっても、ロボットの総数やグラフの連結度に応じて結果が異なることが示されており[7]、領域の大きさや経路の道幅等によってグラフの表現を変更する必要がある。アルゴリズム性能と任務環境特性の関係性については今後さらに詳細に分析を進めるとともに、本研究で特に重視する広域のパトロール、すなわちグリッドマップにより表現される環境に適したパトロールアルゴリズムの開発を目指す。

4. 結論

本稿では国内では研究事例が少ない群ロボットのパトロールアルゴリズムについて紹介し、性能評価シミュレーションにおいて任務環境の表現方法によっても評価結果が変わり得ることを示した。この結果は想定任務環境に適したアルゴリズムを開発または選定すること、またシミュレーション評価においては実運用環境の特性を反映した環境を用いることの重要性を、改めて定量的に示すものである。

参考文献

- [1] E. Sahin, "Swarm robotics: From sources of inspiration to domains of application," *Swarm Robotics*, pp. 10-20, 2005.
- [2] L. Huang, M. Zhou, K. Hao, and E. Hou, "A survey of multi-robot regular and adversarial patrolling," *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, vol. 6, no. 4, pp. 894-903, 2019.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 小林, 樋口, and 上野, "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," in **第35回自律分散システム・シンポジウム**, 2013, pp. 83-88.
- [7] D. Portugal and R. P. Rocha, "Multi-robot patrolling algorithms: examining performance and scalability," *Advanced Robotics*, vol. 27, no. 5, pp. 325-336, 2013.