

群ロボットのパトロールにおける基地局への状況報告とパトロール性能のトレードオフ検討

○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)

Trade-off Study Between Connectivity Requirement and Mission Performance in Multi-Robot Patrolling

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

Abstract: This paper reports the trade-off study on patrol performance and requirements for connectivity maintenance during multi-robot patrolling missions. In real-world applications of multi-robot patrolling, providing situation awareness to human operators is a key requirement as well as merely performing patrol efficiently in the assigned field. Some patrol algorithms require continuous connectivity amongst robots and a base station during missions to satisfy this requirement. However, this requirement also restricts the performance, preventing the robots from spreading out to the field and pursuing patrol efficiency. According to this background, this paper evaluates the relationship between the requirement for connectivity and patrol mission performance. Two patrol algorithms, with and without continuous connectivity, have been introduced for the study. The emulated patrolling mission demonstrated that in a certain condition, fewer requirements of connectivity result in both efficient patrolling and efficient task progress.

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

1 緒言

本稿では群ロボットを用いたパトロール任務において、基地局との通信接続に関する要求とパトロール性能とのトレードオフ関係について分析する。各ロボットに対して、基地局とより頻繁な、あるいは常続的な通信接続を要求すると、運用者はロボットの状態および任務の進捗をより正確かつ迅速に把握できる。一方で任務自体はその要求が少ないほど迅速に進むと考えられ、それらはトレードオフの関係にあると予想できる。本稿ではパトロール中のタスクと対処行動をモデル化し、このトレードオフ関係の一例を定量的に示す。

災害状況監視等を目的としたパトロール任務において、複数の無人機（ロボット）を用いることでより効果的に任務を実施できる。人間の観測員に比べ負傷リスクを低減できる点等がロボット導入の大きな利点である。更に、複数のロボットを用いることで同時に多くの地点を観測可能であり、任務が効率的に進捗すると考えられる。このようなシステムはスワーム（スウォーム）ロボット、マルチロボットシステム等とも呼ばれるが、本稿では群ロボットと呼ぶ。

群ロボットの実用化事例、特に野外環境における事例は非常に少ないことが指摘されており、その原因の一つとしてロボットの振る舞いの予見可能性および信頼性が挙げられている [1]。この問題の対処のため、基地局とロボットの通信を維持することで、基地局が時々刻々の各ロボットの動作状況および任務進捗を把握することが試みられている（例えば [2, 3, 4]）。しかしながら、全てのロボットが常続的に基地局と直接または間接的に通信を接続することは、ロボットの行動範囲の制限等に繋がる恐れがあり、これらは相反する要求となっている。

通信接続に対する要求と任務性能のトレードオフ検討の事例は少ないが、例えば文献 [5] で検討されてい

る。当該文献ではロボットが基地局との通信を優先して探索する場合と領域の探索効率を優先して探索する場合とで、領域中に一定期間の間発生するタスクをその存在期間中に検知・報告できる確率を検証した。ただしこの研究ではタスクの検知までを取り扱っており、対処およびそれに際しての基地局の役割については検討範囲外であった。ここで基地局の役割とは、タスク従事許可の発行やタスクの対処優先度の評価等を指す。災害救助等の複雑かつ人命も関わる任務では運用上、これらの段階で判断に人が介入することが要求されると想定される。これはロボットの行動に対しては制約となるが、一方で人間が判断することでロボットの環境認識機能を補完できる利点もある [6]。

そこで本研究ではこのトレードオフ関係をより詳細に分析することを目的とし、基地局との通信断絶を許容した分散性の高いパトロールアルゴリズムと、基地局と常続的に接続を維持するパトロールアルゴリズムとの二種類を比較する。比較においてはタスクと対処行動を定義し、タスクへの対処性能を評価する。この際、実世界におけるタスクの性質を踏まえ、タスク対処に際して基地局が果たす役割についても定義することで、二種類のアルゴリズムにトレードオフ関係を持たせる。この評価を通じて、基地局との通信接続への要求とタスク対処性能のトレードオフ関係を例証する。以降、第2章で問題設定、第3章で検証手法、第4章で性能評価シミュレーション、第5章で結論を述べる。

2 問題設定

本研究では、任務領域をロボット群が二種類のパトロールアルゴリズムに基づいてパトロールし、タスクの検知、報告、対処を行うことを任務とする。これは 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, 警備等の任務を想定したものである。以降, 基本的な問題設定を述べる。

2.1 任務環境

任務環境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 はグリッド総数を示す。各グリッドは一辺長さ σ の正方形とし, その位置はグリッドの重心位置で代表する。

各グリッドには, そのグリッドが最後にパトロールされてから経過した時間として idleness: $i^k(t)$ [7] を定義し, 次章で説明する二種類のパトロールアルゴリズムは主にこの値に基づきパトロールを実施する。各ロボットが自身のパトロール目標グリッドの重心から ρ 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。

2.2 ロボット

ロボットについては基本的に文献 [8] と同一とし, 前進と旋回によって二次元平面を移動するロボット群 $R := \{r_n \mid n = 1, 2, \dots, N\}$ を想定する。 n はロボットの ID, N はロボット総数を示す。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覆域 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。通信は互いの距離が最大通信距離 $d_c (> d_s)$ を超えるまで継続できる。通信が繋がったロボット同士は, タスクに関する情報を持っていればそれを共有する。 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。

3 検証手法

本節では本研究で用いた検証手法として, タスクの詳細な定義, ならびにパトロールおよびタスク対処を行うアルゴリズムについて述べる。なお, 以降において時刻 t は 0 以上の整数とし, 1 秒が 1 タイムステップに相当するものとする。

3.1 タスクのモデル化

本研究ではタスクとして負傷者の状況確認と応急処置など, その実施に際して何らかの形で基地局からの指揮監督を受ける必要があるものを想定し抽象化する。これらのタスクの例としては, 災害現場を巡回するロボットが負傷者を発見し, その画像等の情報を基地局に後送して対処優先度と従事許可を得て, 実際に救護や保護に従事するプロセス等が挙げられる。抽象化したタスク τ_j およびその対処について以下の想定を置く。ただし j はタスク ID を示し, タスク発生順に付与される自然数とする。

- 毎時刻, 一定確率 p でタスク τ_j が発生する。
 - 発生位置は G からランダムに選択されたグリッドの重心位置とする。
 - τ_j が発生中のグリッドをパトロールを完了するとロボットは確実に τ_j を検知できる。
- 各タスクは基地局の許可を受けた後でなければ着手できない。
- タスク検知を基地局に報告すれば, 直ちに従事許可を得られる。
- タスク τ_j は重要度 s_j とそれに応じたタスク量 w_j を持つ。
 - s_j はタスクごとにランダムに決まる自然数とする。
- タスク τ_j の重要度 s_j はロボットには判断できず, 従事許可発行の際に基地局が判断しロボットに通知する。
- 従事許可を得たロボットは当該タスクが存在するグリッド重心から距離 σ 以内に留まることので従事することができる。
 - 1 タイムステップでロボット 1 機あたりタスク量を 1 単位減少させることができる。
 - ただし 1 タイムステップあたりのタスク量の減少は s_j で頭打ちとなる。
- タスク量はロボットにも認識可能で, タスク量が 0 以下になったらタスク従事を終了する。
- タスク量が 0 以下になった旨が基地局に報告されればタスク完了とみなし, マップから当該タスクが消滅する。

3.2 パトロールアルゴリズム

本研究では, 基地局との通信断を許容するアルゴリズムと, 基地局と常続的に通信を維持するアルゴリズムとの二種類を用いて, 通信接続に対する要求とタスク対処性能のトレードオフ関係を検証する。本節では二種類のアルゴリズムについて述べる。

3.2.1 基地局との通信断を許容するアルゴリズム

基地局との通信断を許容するアルゴリズムとして文献 [8] で作製されたものを用いる。これは各ロボットが自身の周囲からパトロール目標グリッド選択を実施するものである。任務の経過時間およびロボット同士の位置関係に応じて基地局に近いグリッドの選択可能性を高めることで, 基地局へ任務進捗を報告する機会を設ける仕組みになっている。

前節で述べた通り, パトロール中にタスクを発見した際には基地局に報告をしに行く必要があることから, その実施プロセスをステートベース AI (ステートマシン) [9] によって定義する。ステートマシンの構造を図 1 に示す。

図中に番号で示した各状態の遷移条件は以下のとお

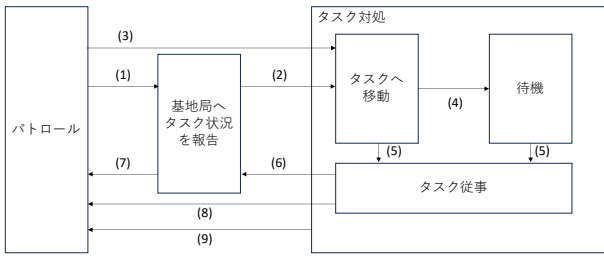


Fig.1 基地局との通信断を許容するパトロールアルゴリズムの状態遷移構造. 各遷移条件は本文中 3.2.1 節に示す.

りとする.

1. タスクを検知した, または基地局への報告を委任された.
2. 検知報告を完了した, または検知報告を委任した.
3. 上記以外で要対処タスクの情報を保持している.
4. 従事許可を得る前にタスク位置に到着した.
5. タスク従事許可を持っている.
6. タスク従事を完了し, かつ従事したロボットの中で ID が最も小さい.
7. タスク終了報告を完了した, または終了報告を委任した.
8. タスクに従事するロボットの数が s_j より多い.
9. 対処予定のタスクに既に s_j 機のロボットが従事中である.

基地局への報告は, 特に指定が無い場合はタスク検知の報告とタスク従事終了の報告の両方を指す. また, 報告の委任とは, 相互に接続したロボット的一方が基地局に報告に向かう途上で, もう一方のロボットの方が基地局に近い場合に, 前者のロボットが後者のロボットに報告を委任することをいう. 項番 3 は, ロボットが従事許可を得たタスクに関する情報を持つ別のロボットと通信を接続し, 当該タスク情報を受け取った場合等を想定する. タスク従事状態に遷移したとき, タスク τ_j に従事するロボット数が既に s_j 機に達していた場合は, 項番 8 のパトロール状態への遷移を実行する. なお, 同時に複数のロボットがタスク従事状態に遷移した場合, タスクに従事するロボットは ID が小さい方が優先される. 項番 9 は既に s_j 機以上のロボットが従事中であるタスクに別のロボットが接近し, 従事中のロボットから当該ロボットがタスク情報を得た時に発生する.

3.2.2 基地局と常続的に通信を維持するアルゴリズム

基地局と常続的に通信を維持するアルゴリズムとして文献 [4] で作製されたものを用いる. これは各ロボットに中継器, 群リーダー, および群メンバーの役割を持たせ, それぞれが役割に応じて階層的に組織構造形成とパトロール目標グリッド選択を行うものである. 分散的な役割切替と, 組織構造を維持可能な領域から各ロ

ボットがパトロール目標グリッドを選択することで, 基地局との通信を維持する. ただし, 本研究では当該文献のアルゴリズムに加えて, 以下の 2 つの変更を加えた.

- 中継器役のロボットがパトロールに参加する.
 - パトロール目標グリッドの選択は, 文献 [4] 中の群メンバーのパトロールに準じた手法を用いる.
 - ただし中継器役ロボットの仮想位置は, 自身と通信が繋がった 2 機のロボットの間地点とする.
- 群リーダーと群メンバーからなるサブグループの分割を行う.
 - 群リーダーと隷下群メンバーの全てがタスク τ_j に従事し, その数が s_j を超えた時には, 余剰となったロボットでもう一組の群リーダーと群メンバーからなるサブグループを形成する.
 - サブグループの分割は分割元の群リーダーがトリガとなって行い, タスク従事中の ID が小さい順に分割先の群リーダー 1 機と残りの群メンバーを選定する.
 - 分割先サブグループは, 分割元の群リーダーが直接接続する中継器をネットワークの分岐元とし, パトロールを継続する.
 - 分割元サブグループが分割のきっかけとなったタスクを終了次第, 分割先のサブグループに合流する.

上記も含めた一連の任務は同じくステートマシンに基づき実装した. 状態遷移の構造を図 2 に示す. 図中に番号で示した各遷移条件は以下のとおりとする.

1. タスクを検知した, またはその情報を共有された.
2. タスク発生位置に到着した.
3. (群リーダーのみ) 隷下の全ての群メンバーがタスクに従事し, かつその総数が s_j より多い.
4. サブグループ分割が完了した.
5. 分割先サブグループとしてパトロールを再開した.
6. 未分割または分割元のサブグループがタスク従事を終了した.
7. サブグループの合流を完了した. (合流先の状態がパトロール)
8. サブグループの合流を完了した. (合流先の状態がタスク従事)
9. 群メンバーが群リーダーとの接続を喪失した.

タスク検知後に報告が必要である等の前提は基地局との通信断を許容するアルゴリズムを用いる場合と同様である. ただし, このアルゴリズムでは高々数タイムステップの間に報告が完了するため, 図 2 では省略した. また, 項番 9 は群メンバーが一連のタスク対処中に群リーダーとはぐれたケースを想定している. この場合,

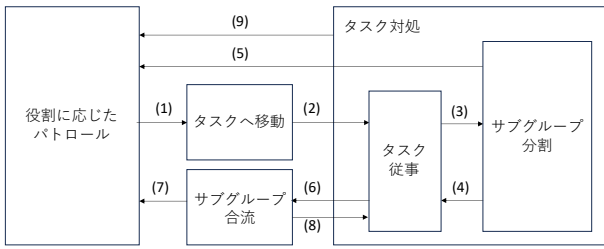


Fig.2 基地局と常統的に通信を維持するパトロールアルゴリズムの状態遷移構造. 各遷移条件は本文 3.2.2 節に示す.

記号	値	単位	備考
v_M	1.5	m/s	最大並進速度
ϕ_M	1.0	rad/s	最大回転速度
d_c	180	m	最大通信距離
d_s	90	m	センサ覆域

群メンバは一度パトロール状態に戻り、同時に基地局と常統的に通信を維持するアルゴリズムに組み込まれた通信復旧プロセスを実行する。これは一度基地局に帰還し、中継器役のロボットから誘導を受けながらネットワークを辿ることで再合流を行うものである。

4 シミュレーション

本章では二種類のアルゴリズムをそれぞれ用いたパトロール任務をシミュレーションにより実施し、タスク対処性能を評価する。

4.1 設定

ロボットの設定および任務の設定をそれぞれ表 1, 2 に示す。第 2 章およびこれらの表に示すように、30[m] 四方のグリッドが 20 個ずつ縦横に並んだ 600[m] 四方の二次元領域で、最大速度 v_M , ϕ_M のロボットによりパトロール任務を実施する。各任務の開始時にはまず r_1 を基地局役として領域の原点（左下端）に固定する。残りの $N-1$ 機については基地局近傍、基地局から距離 $2\sqrt{N}$ [m] 以内の扇形領域内のランダムな位置に配置する。1 試行あたりの時間は 12 時間の任務を想定し 43200 タイムステップとし、その間にロボット群が領域をパトロールし、発生したタスクについて検知、報告、対処を実施する。領域中にタスクが 3 つ以上生じること、同一のグリッドに重複してタスクが生じる事象は発生しないものとした。

4.2 シミュレーション結果

シミュレーションの一例として $N=10$ 機によるパトロールの様子を図 3 に示す。図 3(a) では基地局との通信断を許容するアルゴリズムを用いた任務の様子を示す。各円がロボットを示しており、添え字は ID を

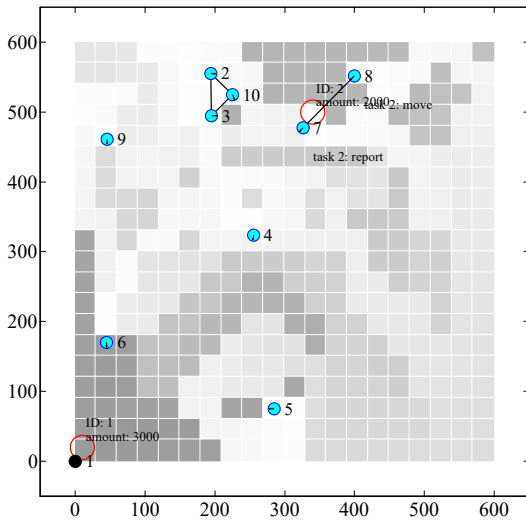
Table2 任務の条件

記号	値	単位	備考
p	0.001	-	タスク発生確率
s_j	$1 \leq s_j \leq 4$	-	タスク重要度（自然数）
w_j	$1000s_j$	-	タスク量
N	10, 15	robots	ロボット総数
K	20×20	grids	グリッド総数
σ	30	[m]	グリッド一辺長さ
ρ	3	[m]	パトロール完了判定閾値
T	43200	timesteps	任務一回の期間
-	20	trials	条件あたり試行回数

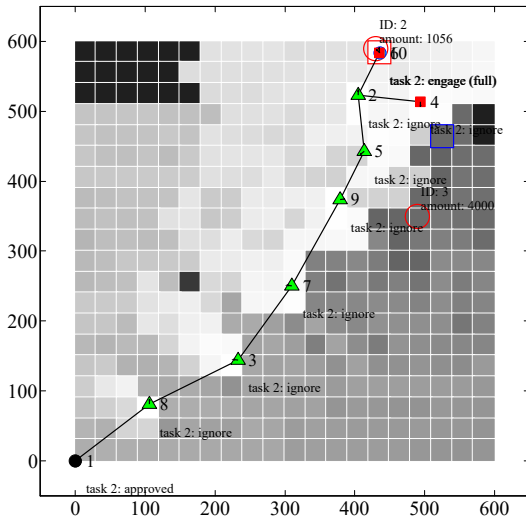
示す。赤い円が領域中に発生したタスクであり、添え字は ID とタスク量 w_j を示す。図中では r_7 がタスクを検知し、基地局へタスク状況を報告する状態に遷移している。 r_6 は、 r_7 がタスクを検知する前から r_6 と通信が繋がっていたため、図 1 の項番 3 の遷移によりパトロール状態から直接タスクへ移動状態に遷移している。この後、 r_6 は r_7 が基地局から対処許可を得てタスク位置に戻るまで待機状態に遷移する。対して、図 3(b) は基地局と常統的に通信を維持するアルゴリズムを用いた任務の様子を示す。緑の三角形が中継器、赤い四角形が群リーダー、位置が重なったため表示されていないが青い円が群メンバを示す。図中ではロボットがタスクを検知した結果、群リーダーと群メンバの r_6, r_{10} がタスクに従事している。従事中のタスク τ_2 は重要度 $s_2=2$ であることから、余剰となった r_4 が r_6, r_{10} から分離し、中継器役の r_2 を起点としてパトロールを継続している。

シミュレーションの結果、断続的な基地局との通信断を許容するアルゴリズムがいずれの観点でも優れる結果となった。なお、以降図示する全ての指標は値が小さいほど性能が優れていることを示す。図 4, 5 にパトロールそのものの性能として、各試行における Graph idleness I_G [7] と、タスク発生から検知までに要した時間の平均値をそれぞれ示す。 I_G は各グリッドをロボットが訪問した間隔の全期間・全領域に渡っての平均値を示す。両者は概ね同じ値を取る結果となり、各グリッドに頻繁に訪問するほどタスクを素早く検知できていた。この点において、通信に関する要求が低い、基地局との通信断を許容するアルゴリズムは I_G が低い、すなわち高いパトロール性能を発揮しており、タスクの検知も基地局と常統的に通信を維持するアルゴリズムに比べ迅速であった。

一方で、基地局と常統的な通信を維持するアルゴリズムの利点は、タスク進捗に伴う基地局への報告が迅速に実施できることにあり、シミュレーションではその利点の程度が示された。図 6~9 は、各タスクが領



(a) 基地局との通信断を許容するアルゴリズムを用いた場合のパトロール任務の様子。



(b) 基地局と常続的に通信を維持するアルゴリズムを用いた場合のパトロール任務の様子。

Fig.3 シミュレーションの様子。

域中に発生した時点点を基準として、当該タスクを検知し基地局に報告するまで (図 6)、基地局から対処許可を得てタスク従事を開始するまで (図 7)、タスク従事を終了するまで (図 8)、タスク従事の終了を基地局に報告するまで (図 9) に要した時間をそれぞれ示している。図 5 では大きく差が開いた二種類のアルゴリズムの性能差は、タスク対処行動の後段になるにつれて、徐々に縮まる結果となった。特に、ロボット総数に余裕がある $N = 15$ のケースでは両者の性能差はほぼなくなる結果となった。

しかしながら、図 9 における $N = 15$ のケースでも差が縮まったに留まり、本節冒頭で述べた通りいずれの指標でも基地局との通信断を許容するアルゴリズムの方が性能が優れることが示された。このアルゴリズムでは各ロボットがより自由に領域中を動き回ること

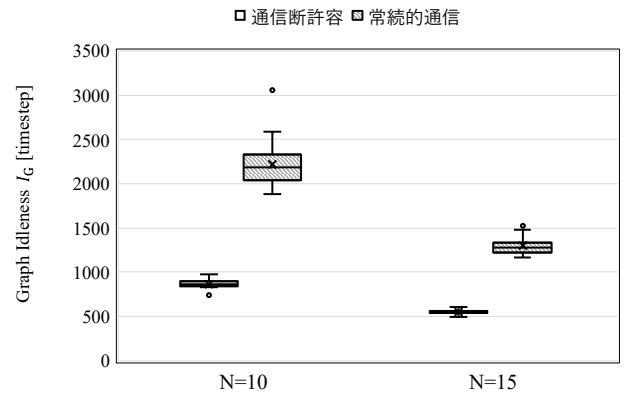


Fig.4 各グリッドに対するパトロール間隔の平均値である Graph Idleness I_G .

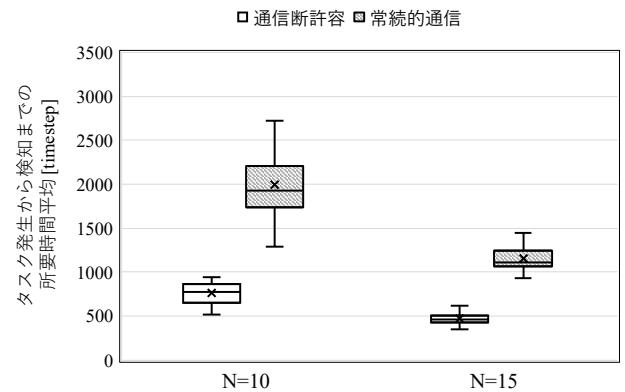


Fig.5 タスク発生から検知までに要した時間。

より効率のよいパトロールが可能であり、その結果としてタスクをより迅速に検知できる (図 5)。タスク検知以降のプロセスは基地局と常続的に通信を維持するアルゴリズムがスムーズであるが、タスク検知に要した時間の差を覆すには至らない結果となった。

ただし、本研究でモデル化したパトロール任務およびタスクは、ある一定の想定の下でモデル化したものであり、そのやり方によって性能も異なり得る点には留意が必要である。より単純でロボット自身が自律的にタスク重要度 s_j を評価し対処着手が可能なタスクであれば、性能差はより顕著になると考えられる。逆により複雑なタスク、あるいはタスク自体が移動するようなケースの場合、常続的な通信を要求することが有効ともなり得る。この場合、常続的な通信を通じてオペレータがタスクの位置、状況等を監視し、必要に応じてロボットによる対処に対し介入・補助することで、より効果的な任務を実施できる可能性がある。

5 結論

本研究では群ロボットを用いたパトロール任務において、基地局との通信維持に関する要求の高さと任務性能のトレードオフ関係を例証した。パトロール任務および任務中のタスク対処を模擬したシミュレーションの結果、基地局との通信断を許容するパトロールア

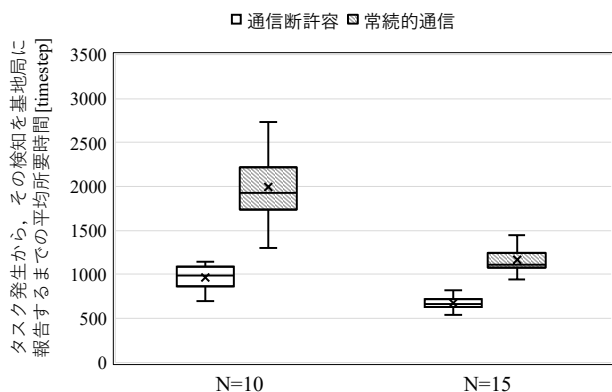


Fig.6 タスク発生からその検知を基地局に報告するまでに要した時間.

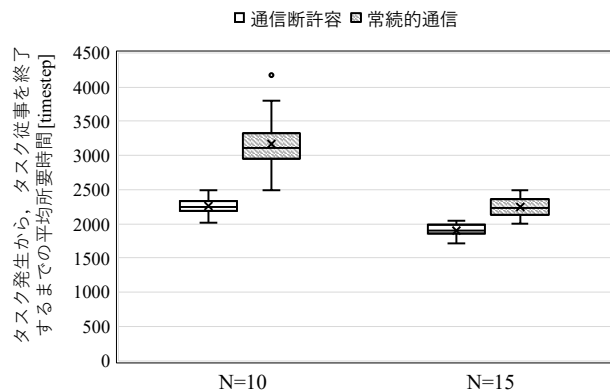


Fig.8 タスク発生から、当該タスクの従事を終了するまでに要した時間.

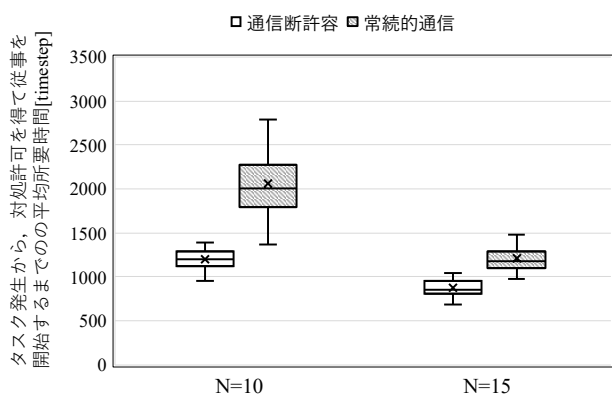


Fig.7 タスク発生から、当該タスクの対処許可を得てタスク従事を開始するまでに要した時間.

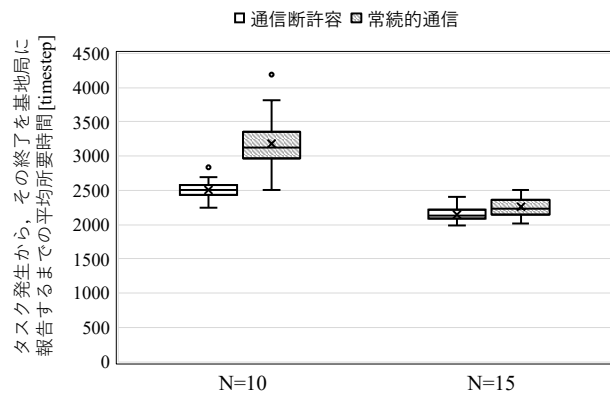


Fig.9 タスク発生から、当該タスクの従事終了を基地局に報告するまでに要した時間.

ルゴリズムが総合的に優れた性能を示した。通信に関する要求が高く、常時基地局と通信を維持しながらパトロールを行うアルゴリズムでは、タスク進捗時の基地局への報告は迅速であったものの、要求を満たすためにパトロール効率が低く、報告の迅速さでは補えない程度にタスク検知に時間を要した。今後は想定するタスクに合わせ、様々な条件で同様の検討を行っていく。

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] M. N. Rooker and A. Birk, "Multi-robot exploration under the constraints of wireless networking," *Control Engineering Practice*, vol. 15, no. 4, pp. 435–445, 2007.
- [3] 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.
- [4] 小林, 樋口, 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・シンポジウム予稿集*,

- 2023, pp. 83–88.
- [5] 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.
- [6] A. Kolling, P. Walker, N. Chakraborty, K. Sycara, and M. Lewis, "Human Interaction With Robot Swarms: A Survey," *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*, vol. 46, no. 1, pp. 9–26, 2016.
- [7] 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.
- [8] 小林, 上野, 樋口, "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," in *第36回自律分散システム・シンポジウム予稿集*, 2024.
- [9] 三宅, *ゲーム AI 技術入門-広大な人工知能の世界を体系的に学ぶ (第5章)*. 技術評論社, 2019.