

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

Performance Metric for Base Station Situational Awareness in Robotic Swarm Patrolling

○正 小林一穂 (横国大) 樋口丈浩 (横国大) 上野誠也 (横国大)

Kazuho KOBAYASHI, Yokohama National University, kobayashi-kazuho-dj@ynu.jp/kazuho.kobayashi@gmail.com

Takehiro HIGUCHI, Yokohama National University

Seiya UENO, Yokohama National University

This paper proposes a quantitative performance metric for patrolling missions by robotic swarms. Real-world robotics applications require predictability from human operators at a base station to prevent unexpected robotic behaviors and resultant harmful outputs. However, functions to ensure predictability, such as frequent communication to the base station, may reduce mission performance. The proposed performance metric quantifies the degree of situational awareness at the base station, which is strongly related to predictability. The metric visualizes the advantage of the functions for predictability enhancement and enables trade-off studies between mission performance and predictability from humans. Simulated patrolling missions with two different patrol algorithms exemplified the usage of the proposed metric.

Key Words: Swarm Robotics, Performance Metric, Patrolling, Base Station, Situational Awareness

1 緒言

群ロボット (スワームロボット, スウォームロボット) の実世界利用を促進するためには, 人間の運用者がその挙動を信頼できることが不可欠である [1]. この実現策として, 人が所在する基地局との常続的な通信接続, またはある一定の接続頻度を確保し, 群ロボットの動作状況や任務の進捗を把握可能とする手法が開発されてきた [2]. 一方でこれらの研究では接続そのものを目的とし, その具体的な利点が評価される事例は稀であった. 更に, 基地局の存在を考慮した群ロボットの振る舞いはロボットの行動可能範囲が制限されるなどの欠点もあり得る (例えば [3]). そこで, 基地局との接続の具体的な利点を可視化し, 前述の欠点と併せて比較考量可能とすることが群ロボットの実世界利用の促進に必要である.

基地局の存在および基地局との接続の具体的な利点に関する評価指標は十分に整備されていない. 既存の指標の例としては, 高速な通信が可能な場合はロボットが取得した動画を閲覧できるという機能が指標であり利点となる [4]. それ以外でも例えば巡回監視任務において異常検知から報告までに要した時間を評価指標とすることもできる [5]. 取得した情報を基地局に報告するまでの時間を最小化, またはその最大値を保証する研究 [6] も行われており, 同様に評価・比較指標として活用できる可能性がある. 一方でこれらは要報告事項が発生し, かつそれをロボット自身が検知・識別できる場合にのみ適用可能な指標である. それらに該当しない, 平常時も含めて状況を把握する必要がある場合, 人が状況の判断をする必要がある場合などにも適用可能な指標も有効と考えられる. そのような指標により, 実世界利用に適した群ロボットの研究開発, 導入の促進, 導入に際しての比較評価可能性の向上など, 更なる効果が見込まれる.

上記の背景を踏まえ, 本稿では先行研究 [7] でも使用した指標を改めて詳説し, 群ロボットと基地局との接続によって得られる利点を定量的に評価可能な指標を提案する. 具体的には群ロボットによる巡回監視任務 (パトロール) を想定し, 任務の進捗に関する基地局の状況認識 (Situational Awareness [8]) を指標化する. 更に, シミュレーション環境において群ロボットのパトロールを行い, 提案指標の使用法を例示する.

2 問題設定

この項では検討対象を定義する. 本稿では二次元グリッドマップを群ロボットでパトロールする任務を想定する.

2.1 想定環境と基本評価指標

パトロール対象とする任務領域をグリッドマップ $G := \{g^k | k = 1, 2, \dots, K\}$ で表す. 各 g^k がパトロール対象となる地点を表し, 添え字 k は位置などによる識別記号, K はグリッド総数を示す.

パトロールに関する基本的な性能指標として *idleness* [9] を導入する. これはある地点がパトロールを受けてから経過した時間を示す. パトロールは複数の地点を巡回し異常の有無などを確認する任務であることから, 状況認識を加味しない, 任務の基本的な目標は *idleness* の低減, すなわち各地点に極力頻繁に訪問することであると言える. グリッド g^k の *idleness* を i^k で示す.

2.2 群ロボットと基地局

群ロボットを $R := \{r_n | n = 1, 2, \dots, N\}$ と表す. 各 r_n が各ロボットに対応し, 添え字 n は ID などによる識別記号, N はロボットの総数を示す. 各ロボットは自己位置推定, 通信可能距離範囲内に位置する基地局との相互通信, 後述する記憶の保持・更新などの機能を持つものとする. ただし, 本稿では基地局との通信を除きロボット同士の通信およびそれに基づく協調は行わない. r_1 を基地局とし, 任務環境の原点 (左下端) に固定する. ここまで述べたパトロール任務について, グリッド数 $K = 64$, 基地局を含むロボット総数 $N = 5$ としたイメージ図を図 1 に示す. 黒い矢印は各ロボットが直近に辿った経路を示し, 各グリッドは色が濃いほど *idleness* が高いことを示す.

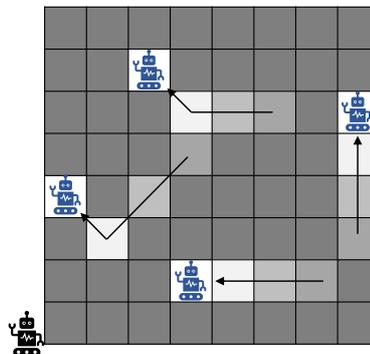


Fig.1: Conceptual image of patrol mission in grid map with $K = 64$ ($8 * 8$) grids by $N = 5$ robots including one base station.

文献 [10] および先行研究 [7] と同様、ロボット r_n は任務領域に関する記憶 $G_n(t) := \{(i_n^k(t), t_n^k(t)) | k = 1, 2, \dots, K, n = 1, 2, \dots, N\}$ の保持および更新を行う。ここで $i_n^k(t)$ は g^k の *idleness* 推測値、 $t_n^k(t)$ はその最終更新時刻、 t は現在時刻を示す。本研究の想定では時間はタイムステップとして離散化し、 $t := \{t \in \mathbb{Z} | 1 \leq t \leq T\}$ とする。ただし T はパトロール任務の総時間である。

idleness を外界センサによって計測することは困難であることから、各ロボットは時間経過と自身のパトロール実績によって記憶を更新し、基地局と通信が可能な場合はその共有を行う。手順の詳細をアルゴリズム 1 に示す。まず、各ロボットは他のロボットによるパトロールの進捗、すなわちグリッドへの訪問を考慮せず、全グリッドに対して時間経過に応じ想定 *idleness*: $i_n^k(t)$ を増加させる (1-3 行目)。次に、自身があるグリッド g^j をパトロールした際、当該グリッドの想定 *idleness* を 0 で、当該情報の最終更新時刻を現在時刻 t でそれぞれ更新する (4-6 行目)。基地局との通信の接続がある場合は、自身の記憶を基地局に送信する (7-9 行目)。逆に他のロボットから記憶を受信した場合は、各グリッドについてより新しい情報が含まれた場合、古い情報を上書きする (10-16 行目)。ここで $A_n(t)$ は時刻 t においてロボット r_n と通信接続があるロボットの集合である。ただし、前述のとおり本稿では基地局でないロボット $r_n (n = 2, 3, \dots, N)$ 同士は接続せず、基地局は自身の記憶を他のロボットへ送信しないため、10-16 行目は基地局のみが実行する処理である。

Algorithm 1 update of assumption $G_n(t)$ [7]

```

1: for all  $i_n^k(t) \in G_n(t)$  do
2:    $i_n^k(t) \leftarrow i_n^k(t-1) + 1$ 
3: end for
4: if  $r_n$  have just arrived at a grid  $g^j$  then
5:    $\{i_n^j(t), t_n^j(t)\} \leftarrow \{0, t\}$ 
6: end if
7: if connected to the base station then
8:   send all items in  $G_n(t)$  to the base station
9: end if
10: for all items in  $G_m(t-1)$  sent from  $r_m \in A_n(t-1)$  do
11:   for all items in  $G_m(t)$  do
12:     if  $t_m^k(t-1) > t_n^k(t)$  then
13:        $\{i_n^k(t), t_n^k(t)\} \leftarrow \{i_m^k(t-1), t_m^k(t-1)\}$ 
14:     end if
15:   end for
16: end for

```

3 提案する評価指標

本章では本稿の主な提案として、基地局による状況認識を示す指標である「状況認識遅れ」について述べる。第 1 章で述べたように、群ロボットの実世界利用促進には基地局と情報を共有することの具体的な利点を示すことが有効である。そこで、基地局による状況認識、すなわち基地局が任務の進捗状況、ロボットの動作状況をどの程度把握できているかに着目する。これはパトロール任務においては平常時、異常検知時間問わず、人間の運用者が求める情報と考えられる。

具体的には、基地局 r_1 が保有する記憶 $G_1(t)$ に着目し、任務状況の把握の遅滞の程度を指標とする。2.2 項で述べたように、各機体を持つ記憶 $G_n(t)$ は、各グリッドに関する *idleness* の推定値と、当該グリッドへの訪問をもって推定を更新した時刻を記録している。基地局による記憶 $G_1(t)$ はそれらを集約し、各ロボットによるパトロール実績とそれに基づく現在の任務環境の状

況の推定を示すものであり、基地局による状況認識そのものであると言える。

$G_1(t)$ はそれ単体では可視化が困難であることから、これを状況認識遅れとして指標化する。時刻 t におけるグリッド g^k に関する状況認識遅れ $D_{SA}^k(t)$ を式 (1) で示す。 $D_{SA}^k(t)$ はグリッド g^k の状況を任意のロボットが確認してから現在時刻 t までにどの程度の時間が経過したかを基地局の視点で示すもので、値が小さいほど基地局が状況を遅滞なく把握できていることを示す。更に、全領域、全任務期間に渡る $D_{SA}^k(t)$ の平均を平均状況認識遅れ D_{MSA} として式 (2) のように定義する。 D_{MSA} は任務全体を通じて、任務環境の状況をどの程度の遅滞を持って基地局が把握しているかを示す。

$$D_{SA}^k(t) = t - t_1^k \quad (1)$$

$$D_{MSA} = \frac{1}{TK} \sum_{t=0}^T \sum_{k=1}^K D_{SA}^k(t) \quad (2)$$

なお、同様に基地局における想定 *idleness* である i_1^k とその真値 i^k の差分を用いて類似の指標を得ることもできる。ただし、 i^k は実環境におけるパトロール任務中には必ずしも利用可能な情報ではないことから、本研究では状況認識遅れを指標として採用した。

4 提案指標の試用

この項では、提案する定量評価指標の使用例を示す。シミュレーション環境において群ロボットによるパトロールを行い、*idleness* ベースのパトロール性能および状況認識遅れに関する性能についてデータを取得、評価する。

4.1 パトロールアルゴリズム

基本的なパトロールアルゴリズムとして *Conscientious Reactive* 法 (CR 法) [9] および本研究で CR 法を基に修正した手法 (改 CR 法) を用いる。ここでパトロールアルゴリズムとは、各ロボット r_n が、任務開始時およびパトロール目標グリッドへの訪問後、次のパトロール目標グリッド r_n^T を選定する法則を指す。

4.1.1 *Conscientious Reactive* 法

CR 法は各ロボット r_n が自身の記憶 $G_n(t)$ に基づき、現在位置と隣接するグリッドから *idleness* の推定値 i_n^k が最も高いグリッドを選択する貪欲法の一つである。隣接するグリッドの範囲はマップの定義によって異なるが、本研究では図 2a に網掛けで示すように、上下左右に斜めを加えた現在地の周囲 8 マスを対象とする。細部は改 CR 法と合わせてアルゴリズム 2 に示す。本項で述べた CR 法はアルゴリズム 2 においてパラメータ T^{bs} が任務時間 T より大きい、すなわちパトロール中に行 9 以降が実行されることが無い特別なケースと言える。

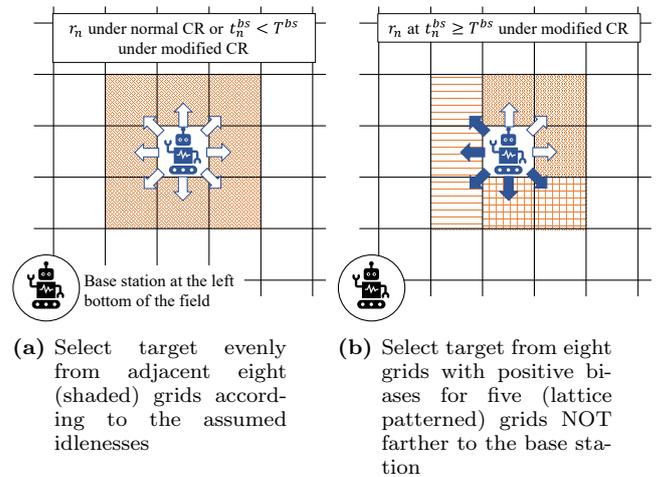


Fig.2: Schematic image of next patrol target selection by robots under two different patrol algorithms

4.1.2 基地局への情報伝達を考慮した修正 Conscientious Reactive 法

2つ目の評価対象として、基地局への情報伝達を考慮した修正 Conscientious Reactive 法 (改 CR 法) を導入する。基本的なアルゴリズムは CR 法と同一であるが、基地局との通信をより積極的に行い、基地局の状況認識を向上させる。具体的には、任務開始または基地局との通信から一定時間経過後に、図 2b に格子模様で示した基地局から遠ざからない方向の5つのグリッドの想定 *idleness* を上昇させる。細部をアルゴリズム 2 に示す。

Algorithm 2 Patrol strategy for robot: r_n

```

1: if  $t == 1$  or  $r_n$  is connected to the BS then
2:    $t_n^{bs} \leftarrow 0$ 
3: else
4:    $t_n^{bs} \leftarrow t_n^{bs} + 1$ 
5: end if
6: if  $t == 1$  or  $r_n$  just arrived at its target  $g_n^\tau$  then
7:   if  $t_n^{bs} < T^{bs}$  then
8:      $g_n^\tau \leftarrow \operatorname{argmax}_{g^k} \{i_n^k \mid g^k \in \text{adjacent eight grids}\}$ 
9:   else
10:    for all  $g^k \in \text{adjacent eight grids}$  do
11:      if  $g^k$  is in the direction NOT farther to the
        base station then
12:         $j_n^k \leftarrow i_n^k * \frac{t_n^{bs} + \alpha}{T^{bs} + \alpha}$ 
13:      else
14:         $j_n^k \leftarrow i_n^k$ 
15:      end if
16:    end for
17:     $g_n^\tau \leftarrow \operatorname{argmax}_{g^k} \{j_n^k \mid g^k \in \text{adjacent eight grids}\}$ 
18:  end if
19: end if

```

ロボット r_n は任務開始後または最後に基地局に状況を報告してから経過した時間 t_n^{bs} を保持する (行 1-5)。任務開始またはパトロール目標グリッド g_n^τ に到着時 (行 6) に各ロボットは次のパトロール目標グリッドを選定する。ここで、 t_n^{bs} がある閾値 T^{bs} より小さい時、各ロボットは通常の CR 法と同じ振る舞いをする (行 7-8)。そうでない時は、自機の周囲 8 マスのうち基地局から遠ざからない方向の想定 *idleness* を行 12 により増加させた後、CR 法と同様に次のパトロール目標グリッドを選択する (行 17)。行 12 における α は経過時間による想定 *idleness* の増加を緩やかにする係数である。

4.2 シミュレーション条件

前項で述べた 2 つのパトロールアルゴリズムを用いてシミュレーション環境にて模擬パトロール任務を行い、提案する状況認識遅れを試用した。使用したパラメータについては表 1 に示す。総機体数が異なる 3 種類のロボット群それぞれについて、2 種類のパトロールアルゴリズムを用いて各 10 回ずつ計 60 回、20000 タイムステップのパトロール任務を実施した。各ロボットは差動二輪式を想定した並進・旋回によってパトロール目標グリッドに向かうものとし、目標グリッドの中心から一定距離以内に到達した場合に当該グリッドのパトロールを完了したと判定した。

4.3 シミュレーション結果

CR 法、改 CR 法ともシミュレーションの様子は同様であり、 N 機のロボットのうち基地局を除く $N-1$ 機が領域中をパトロールした。 $N=10$ 機のロボットによるシミュレーション中の様子を図 3 に示す。領域中の各円がロボット、各ロボットの添え字は ID

Table 1: Simulation parameters

項目	値	単位
ロボット総数 n	10, 15, 20	機
ロボット並進速度	0.015	/タイムステップ
ロボット旋回速度	1	rad/タイムステップ
グリッド総数 K	400 (20 * 20)	個
グリッド 1 辺長さ	0.3 * 0.3	-
通信可能距離	1	-
目標グリッド到着閾値	0.03	-
任務時間 T	20000	タイムステップ
条件当たり試行回数	10	回
T^{bs}	3000	タイムステップ
α	4000	-

を示す。ロボット r_5 は基地局 r_1 と通信可能な距離範囲内に位置し、その通信接続を実線で示している。図 1 同様、各グリッドはその色が濃いほど *idleness* が高いことを示す。ただし、2.2 項で述べたように、各ロボットは自身のパトロール実績のみから想定 *idleness* を更新するため、必ずしも各ロボットの想定 *idleness* は図 3 と一致しない。

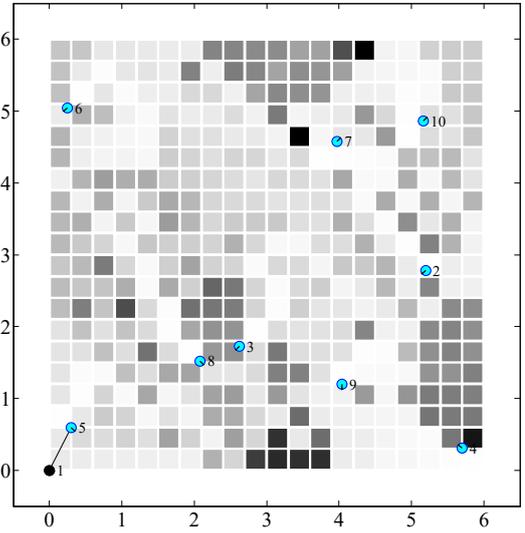


Fig.3: Screenshot of a patrol simulation

シミュレーションを通じて、基地局による状況認識の程度を定量化・可視化し、改 CR 法を用いることで基地局の状況認識を改善できることを示した。図 4 に各条件における平均状況認識遅れ (図 4 縦軸では Mean SA Delay と表記) を示す。いずれのアルゴリズムでも機体数 N が大きいほど平均状況認識遅れが低減、すなわち基地局の状況認識が向上し、また改 CR 法によって平均状況認識遅れが平均 25-30% 程度改善することを示した。

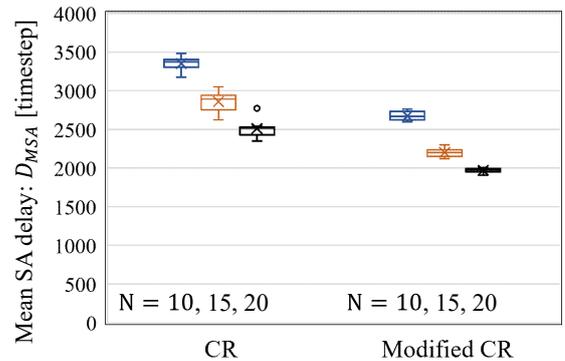


Fig.4: Mission performance in terms of the base station's situational awareness

一方, *idleness* を性能指標としたパトロール自体の性能は, 改 CR 法が若干劣る結果となった. 図 5 は *idleness* を性能指標としたパトロール成績であり, 全期間・全グリッドの平均 *idleness* である *Graph Idleness: GI* [9] を示す. 改 CR 法は CR 法に比べ *Graph Idleness* が平均 4-8% 程度悪化した. これは各ロボットが $t_n^{bs} \geq T^{bs}$ の時, すなわち最後に基地局と通信してから $T^{bs} = 3000$ タイムステップが経過して以降は, 基地局から遠ざからない方向のグリッドの優先度を向上し, *idleness* が高いが基地局から遠ざかる方向のグリッドのパトロールを行わないことがあるためと考えられる.

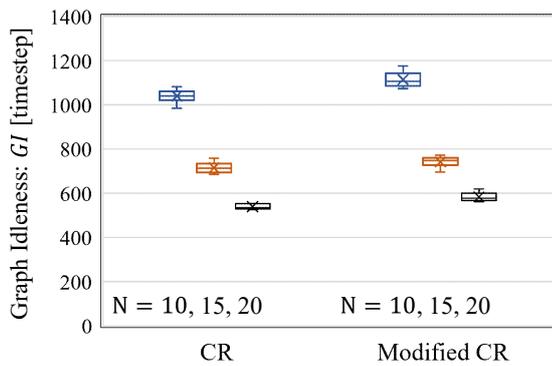


Fig.5: Mission performance in terms of *Graph Idleness*

5 まとめ

本稿で提案する平均状況認識遅れにより, 図 4 のように基地局における状況認識の程度を定量化・可視化できることを示した. 例えば $N = 10$ 機の群ロボットを用いて CR 法によりパトロールした場合, 平均状況認識遅れは平均 3300 程度であり (図 4 左), 改 CR 法により平均 2700 程度に減少する (図 4 右). これは各地点の実情報を, CR 法を用いてパトロールした場合は当該情報の取得時点から平均 3300 タイムステップ程度の遅れで基地局が取得可能であり, 改 CR 法であれば平均 2700 タイムステップ程度の遅れに改善できることを示している. 本研究で実施したシミュレーションでは *idleness* が実情報に相当するが, 実世界では各地点で取得した画像, 調査標本, 回収物などに対応する.

パトロールアルゴリズムの調整により, 図 4 に示すように平均状況認識遅れを改善できることを示した. 一方で, 本指標は *idleness* ベースの性能との複合的な指標であることに注意が必要である. 例えば各ロボットのパトロール性能が低い, すなわちアルゴリズム 1 の行 4-6 に示す自身のパトロール実績による想定 *idleness* の更新頻度が低い場合, 行 10 以降の基地局における想定 *idleness* の更新頻度も低下し, 状況認識遅れの低減が行われない. 各ロボット自身の稼働状態のみを状況認識の対象とする場合などは, 基地局との通信頻度などを評価指標に加える必要がある. また, 図 4, 5 に示すように, 提案指標により表現される基地局における状況認識と *idleness* を指標とした純粋なパトロール性能はトレードオフの関係になる可能性がある. 従って, 提案指標を改善するパトロールアルゴリズムの開発を行う場合は, *idleness* の低減と基地局との通信頻度向上の両方を考慮する必要がある.

6 結論

本研究では群ロボットが人間の運用者からの信頼を得るために必要な状況認識に着目し, その定量評価指標である「平均状況認識遅れ」を提案した. 更に, 既存のパトロールアルゴリズムおよび本研究で作製したその改良型アルゴリズムを用いてその使用例を示した. 今後は *idleness* を指標とした性能と平均情報認識遅れを指標とした性能を両立するパトロールアルゴリズムの考案を目指す. また提案した指標については複数のパトロールアルゴリズムの比較を検討する手段としても用いていく予定である.

参考文献

- [1] Schranz M, Umlauf M, Sendel M, et al. Swarm Robotic Behaviors and Current Applications. *Frontiers in Robotics and AI*. 2020;7(36).
- [2] Amigoni F, Banfi J, Basilico N. Multirobot Exploration of Communication-Restricted Environments: A Survey. *IEEE Intelligent Systems*. 2017;32(6):48–57.
- [3] Rooker MN, Birk A. Multi-robot exploration under the constraints of wireless networking. *Control Engineering Practice*. 2007;15(4):435–445.
- [4] Banfi J, Li AQ, Basilico N, et al. Communication-constrained multirobot exploration: Short taxonomy and comparative results. In: *Proceedings of the IROS workshop on on-line decision-making in multi-robot coordination*; 2015. p. 1–8.
- [5] ADAM EY. Leveraging connectivity for coverage in drone networks for target detection. *Balkan Journal of Electrical and Computer Engineering*. 2019;7(3):218–225.
- [6] Scherer J, Rinner B. Multi-uav surveillance with minimum information idleness and latency constraints. *IEEE Robotics and Automation Letters*. 2020;5(3):4812–4819.
- [7] Kobayashi K, Higuchi T, Ueno S. 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. p. 83–88.
- [8] Endsley MR. *Designing for Situation Awareness: An Approach to User-Centered Design*, Second Edition (2nd ed.). CRC Press.; 2004.
- [9] Machado A, Ramalho G, Zucker JD, et al. Multi-agent Patrolling: An Empirical Analysis of Alternative Architectures. In: *Multi-Agent-Based Simulation II*; 2003. p. 155–170.
- [10] Farinelli A, Iocchi L, Nardi D. Distributed on-line dynamic task assignment for multi-robot patrolling. *Autonomous Robots*. 2017;41(6):1321–1345.