

Title	ロボット群の適応的な自己組織化及びその収束性
Author(s)	神ノ尾, 淳; 李, 根浩; 丁, 洛榮
Citation	日本機械学会論文集, 83(846): 16-00448
Issue Date	2017-01-25
Type	Journal Article
Text version	author
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10119/16111">http://hdl.handle.net/10119/16111</a>
Rights	This is the author's version of a work accepted for publication by The Japan Society of Mechanical Engineers. Copyright (C) 2017 日本機械学会. 神ノ尾 淳, 李 根浩, 丁 洛榮, 日本機械学会論文集, 83(846), 2017, p.16-00448. <a href="http://dx.doi.org/10.1299/transjsme.16-00448">http://dx.doi.org/10.1299/transjsme.16-00448</a>
Description	

# ロボット群の適応的な自己組織化及びその収束性

神ノ尾 淳<sup>\*1</sup>, 李 根浩<sup>\*2</sup>, 丁 洛榮<sup>\*3</sup>

## Adaptive Self-Configuration of Robot Swarms and Its Convergence Degree

Atsushi SHINNOH<sup>\*1</sup>, Geunho LEE<sup>\*2</sup> and NakYoung CHONG<sup>\*3</sup>

<sup>\*1</sup> Faculty of Engineering, Utsunomiya University  
7-1-2 Yoto, Utsunomiya-shi, Tochigi, 321-8585, Japan

<sup>\*2</sup> Department of Environmental Robotics, Faculty of Engineering, University of Miyazaki  
1-1 Gakuen Kibanadai-Nishi, Miyazaki-shi, Miyazaki, 889-2192, Japan

<sup>\*3</sup> School of Information Science, Japan Advanced Institute of Science and Technology  
1-1 Asahidai, Nomi-shi, Ishikawa, 923-1292, Japan

Received 21 September 2016

### Abstract

This paper addresses the problem of the coordinated deployment of a swarm of mobile robots in an area with geographical constraints. The objective of our research is to investigate how to build an ad hoc network of robotic sensors in a real-world environment. For attaining scalability and robustness, it is desirable that each robot can configure themselves into an area through local interactions with adjacent robots, using only locally available information. Therefore, a decentralized deployment scheme is presented based on geometric ideas allowing robots to converge to the uniform spatial distribution by forming regular triangle lattices. The convergence of the deployment scheme is mathematically examined, and verified through extensive simulations and experiments. In addition, a new evaluation index is proposed, to estimate a relative convergence degree with respect to a desired geometric configuration. Our results indicate that the deployment scheme can be applied to the problem regarding the coverage of an area of interest by a swarm of mobile robotic sensors.

**Key words** : Robot Swarm, Self-Configuration, Triangular Mesh Pattern Adaptation, Convergence Degree

## 1. 緒 言

本論文では、地理的な制約のある平面内においてロボットが正三角形のネットワークを形成するための局所的なアルゴリズムについて提案する。例えば、液体粒子は容器の形に合わせてその形状を変化させる。このような観察に触発され、本論文においては自律型の群移動ロボットが、任意の形状をした領域をどのように被覆するかという問題、及びリーダーや ID、協調のための共通の枠組みなどを持たずに局所的な規則だけを用いて、どのように所望の形状を実現するかという問題に取り組む。もし隊列の中でロボットが欠損すると、各ロボットはそのネイバーロボットの数が最大となるように再配置を行うことにより、ロボットの損失を補う。このことは群ロボットが高い接続性を維持できることを意味しており、ネットワーク構造における冗長性と耐故障性を保証するものである。動作制御における局所的な相互作用と自己組織化アルゴリズムの収束特性については、リアプノフの安定性理論を用いて証明が行われている (Slotine and Li, 1991)。本論文においては、提案したアルゴリズムの有効性を

---

No.xx-xxxx [DOI: 10.1299/transjsme.2014xxx000x]

<sup>\*1</sup> 正員, 宇都宮大学工学部技術部 (〒 321-8585 栃木県宇都宮市陽東 7-1-2)

<sup>\*2</sup> 正員, 宮崎大学工学部環境ロボティクス学科 (〒 889-2192 宮崎県宮崎市学園木花台西 1-1)

<sup>\*3</sup> 北陸先端科学技術大学院大学情報科学研究科 (〒 923-1292 石川県能美市旭台 1-1)

E-mail of corresponding author: geunho@cc.miyazaki-u.ac.jp

検証するために、収束性、一様な適応性、及びロバスト性を示す一連のシミュレーションを行った。

本論文は以下のように構成される。まず第2章において本論文の関連研究を述べる。続いて、第3章において適応的な自己組織化問題に対する定義を与えたとともに、ロボットの目標形状（正三角形格子）への収束度を表す評価指標について述べる。第4章においては、3ロボット間の局所的な相互作用について記述する。第5章において今回提案した適応的な自己組織化アルゴリズムを用いてロボットの動きのシミュレーション及び実験による解析を行う。最後に、第6章において結言を述べる。

## 2. 関 連 研 究

ロボット群の分散制御は、センサや通信に距離的な制約があるかどうかにより、大域的な手法と局所的な手法に分類される。大域的な手法 (Suzuki and Yamashita, 1999) は高速で正確かつ効率的な配置を与える一方で技術的に実現することが難しく、またロボット台数の増加に対する拡張性に欠ける。一方、局所的な手法は個々のロボット間の相互作用に基づくものであり、蟻の巣や魚の群れ、または結晶化のような物理現象に触発されて開発された手法である。局所的な手法は更に生物に触発されたもの (Ikemoto et al., 2005)(Shimizu et al., 2006)、振る舞いに基づくもの、仮想物理に基づくものに分けられる。多くの振る舞いに基づく、または仮想物理に基づく手法はファン・デル・ワールス力 (Zheng and Chen, 2007) やバネ力 (Fujibayashi et al., 2002)(Shucker et al., 2008)、重力 (Spears et al., 2006)、ポテンシャル場 (Zou and Chakrabarty, 2003)、電荷、分子の平衡、そしてその他の仮想力 (Wang et al., 2004) のような物理現象を用いている。これらの研究においては、互いの引き付け力や反発力を引き起こす個体間の相互作用の力の平衡を用いている。その理由としては、主に力に基づく相互作用の規則は単純であるが効果的だと考えることができ、個々の振る舞いの直観的な理解を与えるからである。

これらの局所的な相互作用により、創発的な手法に基づく格子型の配置を与えることができる。格子型の配置は、トポロジーの観点から高い信頼性と適応性を保証する高レベルの範囲と複数の冗長な接続を提供する。これらのトポロジー的な特徴は領域外の環境や生息地の監視といった様々な応用のためのデータ収集・送信を行う際にロボット群にとって非常に重要である。しかしながら、データの受信範囲は不安定であったり受信が不可能であることがあり、またその接続性も一様ではない。このことから、もし格子点が一様に分布していない場合には、創発的な振る舞いが保証されるとは限らない。仮想物理に基づく手法とは対照的に、我々の提案手法は人工的な振る舞い規則の集合に依存しているため、ロボットに一樣な望ましい格子模様を形成させることができる。局所的な振る舞い規則を通して、ロボット群は受信範囲と接続性を保証する手法で境界と障害物を持つ領域に一樣により確実に自己配置することができる。即ち、我々が今回提案した手法により、単純なアルゴリズムによって1. 多数台のロボットを正三角形格子に配置することができ、更に2. 領域内に存在する障害物に適応して目標形状を実現することができる。

ここで、我々の手法の特徴をいくつか紹介する。最初に、このアルゴリズムはセンサに距離と正確さの制約がある場合に、ロボット群を未知の領域に配置させることができる。二番目に、この研究はある領域を被覆するための効果的でロバストなネットワーク構築のために正三角形格子の隊列を構築する分散型のアルゴリズムを開発することを目的としている。(Lee and Chong, 2009) において、我々は同じ辺の長さ  $d_n$  を持つ三角形、正方形、六角形の格子の幾何学的特徴について、その被覆範囲、被覆密度、及び結合度について調べている。六角形の格子が正方形や三角形の格子と比べてより良い被覆領域を持っていることは明らかである。対照的に、この研究により三角形格子は被覆領域の代わりに高い被覆密度と接続度を持っている。三番目に、全ての正多角形の中で、正三角形格子はその限られたネイバーの数によりその計算の境界を減らすことができる。同様に、個々のロボットは通常他のロボットからより影響を受けない振る舞いを示す。四番目に、局所的な相互作用のアルゴリズムはそれぞれのロボットが他のロボットの相対位置測定のみを利用するという点で、計算量的に効率的である。なお、物理学に基づいた手方を組み込んだ多くの局所的な相互作用のアルゴリズムは、ロボット間の引き付け力や反発力を計算するために相対速度や相対加速度を必要とし、更に、そのほとんどは多くの制御パラメータの微調整を必要とするが、こうした事柄が局所的な相互作用アルゴリズムを計算量の観点から複雑にしている。この点において、我々の手法はロボット ID や共通座標系、大域的方向、直接の通信といった主要な仮定を取り除いているため、ロボットは一時的な誤差に対処でき、過去の行動や状態についての記憶なしにその移動位置を計算すること

ができる．更に，従来の物理法則や生物の振る舞いに基づく手法は，そのダイナミクスが一般的に非線形で複雑なものであるのに対して，我々の手法は単純な方程式を用いた簡潔で分かりやすい手法であるということも利点として挙げられる．なお，これらのアルゴリズムにおいて，従来の研究ではロボット間の通信に損失が存在しないことを仮定していたが，ロボット間の通信に損失が存在する場合の対処法についての研究も最近行われている(神ノ尾 et al., 2016)．

### 3. 問題設定

本論文においては， $r_1, \dots, r_n$  で表される  $n$  台の自律型の移動ロボットを考える．全てのロボットは任意の初期位置に配置されているものとする．各ロボットは2次元平面内を移動し，リーダーやID，共通の座標系及び過去の行動に関する記憶を持たないものとする．各ロボットは制限されたセンシング範囲  $SB$  でのみ他のロボット位置を見つけることができる．また，各ロボット間において移動を行う時間についての同期は取られておらず，その周期についても特に制約は設けられていない．

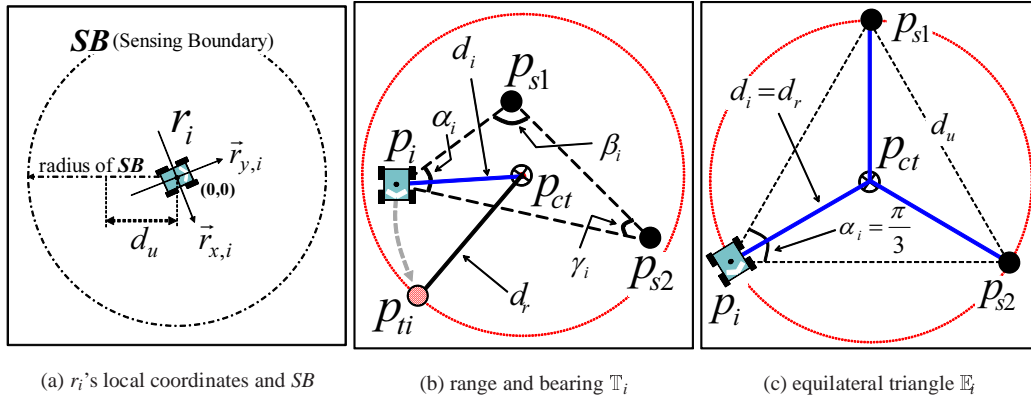


Fig. 1 Definition and notations of robot model

これらの仮定に基づき，局所座標系  $r_{x,i}$  と  $r_{y,i}$  を持つロボット  $r_i$  を考える．ここで， $r_{y,i}$  はロボットの進行方向である  $r_i$  の垂直軸を表す． $r_{x,i}$  は  $r_{y,i}$  を時計回りに  $90^\circ$  回転させることにより定義される．また，ロボット  $r_i$  の位置  $p_i$  から別のロボット  $r_j$  の位置  $p_j$  までの距離を  $dist(p_i, p_j)$  で表す．目標とする隊形におけるそれぞれのロボット間の既定の距離を  $d_u$  で表す．また，2つの任意のベクトル  $\vec{m}_i$  と  $\vec{n}_i$  の間の角度を  $ang(\vec{m}_i, \vec{n}_i)$  で表す．各ロボットは制限されたセンシング領域  $SB$  を持つものとし， $r_i$  が  $SB$  内で他のロボット  $p_1, p_2, \dots$  を見つけると， $r_i$  の局所座標系に基づくロボット位置の集合  $O_i$  が得られる． $r_i$  は形成される三角形の外周の長さが最小となるように他の2台のロボット  $r_{s1}$  と  $r_{s2}$  を選び，この集合  $N_i = \{p_{s1}, p_{s2}\}$  をネイバーと呼ぶ． $p_i$  と  $N_i$  が与えられると，3つの位置の集合  $\{p_i, p_{s1}, p_{s2}\}$  によって三角形配置  $\mathbb{T}_i$  が与えられる．与えられた  $\mathbb{T}_i$  に対して， $r_i$  に関する距離の配列として以下の行列  $\mathbf{D}_i$  を考えることができる．

$$\mathbf{D}_i = \begin{cases} (dist(p_m, p_n) - d_u)^2 & \text{if } m \neq n, \\ 0 & \text{otherwise,} \end{cases} \quad (1)$$

但し， $p_m, p_n \in \mathbb{T}_i$  である．ここで簡単のため， $(dist(p_m, p_n) - d_u)^2$  を  $(d_k - d_u)^2$  と表すことにする．ここで， $\mathbb{T}_i$  の全ての距離配列の値が  $d_u$  である配置  $\mathbb{E}_i$  を正三角形配置と定義する． $\mathbb{T}_i$  と  $\mathbb{E}_i$  を用いて，局所的な相互作用を次のように定義することができる．「与えられた  $\mathbb{T}_i$  に対して，それぞれの時間において ( $\mathbb{E}_i$  の形成に向けて)  $r_i$  がそのネイバーとの距離を  $d_u$  に維持するように局所的な相互作用を実行する」．このような局所的な相互作用則に基づき，本論文においては次のように定義される問題に取り組むものとする．

“2次元平面内で任意に区別された位置を持つロボット群  $r_1, \dots$  を，どのようにして平面の境界に従いながら  $\mathbb{E}_i$  を形成するように配置するか”

ここで，本論文では次の2つのアルゴリズムを提案する：1．自己配置アルゴリズム，2．領域境界適合アル




ゴリズムである．このうち，自己配置アルゴリズムは多数のロボットが  $\mathbb{E}_i$  に収束するための局所的な相互作用を拡張したものである．領域境界適合アルゴリズムは，領域内の離散点を移動できないロボットとして考えることによりロボットと相互作用させようとするというものである．このアルゴリズムは  $O_i$  と  $r_i$  の局所座標系に関する領域境界を入力とし，各時刻における  $r_i$  の目標位置を出力とする．各ロボットは同じアルゴリズムを実行するが，それぞれ独立して他のロボットとは協調せずに動く．各時刻において， $r_i$  は  $O_i$  及びその領域境界に基づいてその移動位置を計算し，計算された位置に向かって移動する．こうした行動は  $r_i$  が最終位置に収束するまで繰り返して行われる．

続いて，ランダムな初期位置に配置されたロボットが目標とする正三角形の形状を構成していく過程において，ある時点でのロボットの配置が目標とする正三角形の形状からどの程度離れている（又は近い）のかを評価するための評価指標について述べる．群ロボットにおける隊形制御においては，ランダムな初期位置に配置されたロボットが互いに情報を交換しながら既定の形状を形成するが，その過程においてロボットの位置が目標とする形状からどの程度近付いているかを調べることは，収束度を判定する上で重要である．これを定量的に測るための評価指標としては，ロボットが完全な正三角形の形状を構成している時には 0 の値を取り，ロボットの配置が目標とする正三角形から離れていくにつれてその値が徐々に大きくなっていくようなものが望ましい．ここでは，こうした要求を満たすため以下の評価指標 (EI) を用いてロボット配置の目標形状である正三角形格子への収束度を測るものとする．この評価指標においては，ある時点における各ロボットの位置を頂点とする Delaunay 三角形を計算し，各三角形の各辺の長さ及び面積から以下の式を用いて目標形状である正三角形への収束度を計算するものとする．



$$EI = \sum_{k=1}^M \left( \frac{(a_k^2 - b_k^2)^2 + (b_k^2 - c_k^2)^2 + (c_k^2 - a_k^2)^2}{4S_k^2} \right) \quad (2)$$

ここで，構成された Delaunay 三角形に  $k = 1, \dots, M$  の番号を割り振った時の， $a_k, b_k, c_k$  は三角形  $k$  における各辺の長さを， $S_k$  はその面積を表している．() 内の評価関数は，各三角形が完全な正三角形である場合には 0 を，形成される三角形の形状が正三角形から離れていくにつれて徐々に大きな値を取るよう設計されており，それらの総和を取ることで評価指標 (EI) の値は，その時点におけるロボット配置が正三角形格子に近いほど小さい値を，離れているほど大きな値を示すことになる．

#### 4. 適応的な自己配置

適応的な自己配置アルゴリズムは，局所的な相互作用に基づく自己配置アルゴリズムと領域境界適合アルゴリズムとに分けられる．SB の内部に領域境界が発見されると， $p_i$  から最小の距離  $d_e$  で境界表面に射影した点を  $p_e$  と定義し，点  $p_e$  における境界表面の接線を  $l_e$  と表す（ 参照）．明らかに  $l_e$  は  $\vec{p_i p_e}$  と垂直である． $A(l_e)$  を領域境界と  $p_i$  を通り  $l_e$  に平行な線との間の領域とする． $r_i$  が境界表面と相互作用する条件を決定するために，1.  $r_i$  は  $A(l_e)$  内にネイバーが存在しない，2. もしくは  $d_e \leq \frac{\sqrt{3}d_u}{2}$  を満たすかどうかを調べる．この条件が満たされれば， $r_i$  は領域境界適合アルゴリズムを実行し，満たされなければ自己配置アルゴリズムを実行する．

##### 4.1 局所的な相互作用

まずは，1 辺の長さが  $d_u$  の正三角形を形成するための 3 台のネイバーロボット間の局所的な相互作用について記述する． 1-(b) に示す通り， $r_i$  及びそのネイバー  $r_{s1}, r_{s2}$  はその頂点を  $p_i, p_{s1}, p_{s2}$  とする  $\mathbb{T}_i$  を構成する． $\mathbb{T}_i$  において，それぞれの内角を  $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$  と表す．理想の  $\mathbb{E}_i$  として， 1-(c) のように  $\Delta p_i p_{s1} p_{s2}$  の重心  $p_{ct}$  を中心とする半径  $d_r$  の円に外接する正三角形を考える． $\mathbb{E}_i$  の形成に向けて， $r_i$  の望ましい移動位置  $p_{ti}$  は  $p_{ct}$  からの距離  $d_i(t)$  と角度  $\alpha_i(t)$  によって決定される．ここで， $d_i(t)$  は以下の方程式によって制御される．

$$\dot{d}_i(t) = -a(d_i(t) - d_r) \quad (3)$$

但し， $a$  は正の定数であり  $d_r = d_u/\sqrt{3}$  である．この方程式の解は  $d_i(t) = (d_i(0) - d_r)e^{-at} + d_r$  であるので， $t \rightarrow \infty$  の時  $d_i(t)$  は  $d_r$  に収束する．次に， $\alpha_i(t)$  は次の方程式により制御される．

$$\dot{\alpha}_i(t) = k_1(\beta_i(t) + \gamma_i(t) - 2\alpha_i(t)) \quad (4)$$

ここで、 $k_1$  は正の定数である．ここで、三角形の内角の和が  $180^\circ$  であることを考慮すると、上記の方程式は以下のように書き直すことができる．

$$\dot{\alpha}_i(t) = k(60^\circ - \alpha_i(t)) \quad (5)$$

但し、 $k = 3k_1$  である．この方程式の解は  $\alpha_i(t) = (\alpha_i(0) - 60^\circ)e^{-kt} + 60^\circ$  なので、 $t \rightarrow \infty$  の時、 $\alpha_i(t)$  は  $60^\circ$  に収束する．

この収束性アルゴリズムの収束性については、(Lee and Chong, 2009) で証明されている．

## 4.2 自己配置アルゴリズム

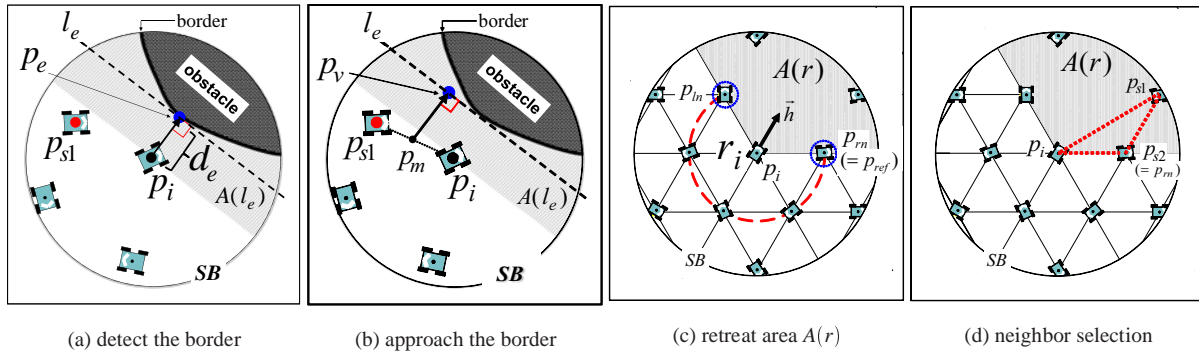


Fig. 2 Illustration of the self-configuration algorithm

本節においては、多数台のロボットに正三角形格子を形成させるための自己配置アルゴリズムについて記述する．多数台のロボットを正三角形格子に配置するために、ロボット  $r_i$  は 2 台のネイバーを必要とする．1 番目のネイバー  $r_{s1}$  は  $r_i$  から最短の距離に位置するロボットとして選ばれる．2 番目のネイバー  $r_{s2}$  は、 $r_i, r_{s1}, r_{s2}$  で構成される三角形の外周の長さが最小となるように選ばれる．そして、 $r_i$  はネイバーの集合  $N_i$  と共に  $\mathbb{T}_i$  を構成し、 $\mathbb{T}_i$  が  $\mathbb{E}_i$  と等しいかどうかを調べる．もしこの条件が満たされると、 $r_i$  は次に最も近いネイバーを見つける．ここで、 $r_i$  からの距離が  $d_u$  以内に存在するロボットの位置の集合を  $P_u$  とする．図 2-(c) に示す通り、 $r_i$  は参照するネイバー  $p_{ref}$  を  $P_u$  の中から  $\text{ang}(\vec{r}_i, \vec{p_i p_{ref}})$  が最小となるように選ぶ．そして  $r_i$  は  $\vec{p_i p_{ref}}$  を  $60^\circ$  時計回りに回転することによりその領域内に他のネイバーが存在するかどうかを調べる．もしネイバーが存在したら、 $r_i$  は更に  $60^\circ$  時計回りに回転することで次のネイバーを調べる． $r_i$  はこの動作をネイバーが見つからなくなるまで続け、最後のネイバーを  $p_{ln}$  と定義する．同様に  $r_i$  は  $\vec{p_i p_{ref}}$  を反時計回りに回転させることでネイバーを見つけていき、最後のネイバーを  $p_{rm}$  と定義する．そして  $SB$  内の  $\vec{p_i p_{rm}}$  と  $\vec{p_i p_{ln}}$  に囲まれた領域を ( $P_u$  の要素の存在しない) 領域  $A(r)$  と定義する．図 2-(d) に示す通り、 $r_i$  は  $A(r)$  の中から最も近い距離にあるロボットを  $r_{s1}$  として選ぶ． $p_{s2}$  は  $A(r)$  の内部から  $p_{rm}$  もしくは  $p_{ln}$  を  $p_{s1}$  から  $p_i$  までの距離が最小化されるように選ぶ．最終的に、選ばれた  $N_i$  により形成された  $\mathbb{T}_i$  に基づいて、 $r_i$  は式 (3) 及び式 (5) を用いた局所的な相互作用を実行する．

## 4.3 領域境界適合アルゴリズム

続いて、群ロボットを平面の境界に適合させる領域境界適合アルゴリズムについて記述する．ここで、領域境界とはロボットが配置された平面内において、障害物などのロボットの立ち入ることのできない領域の境界線を表すものとする．ロボット  $r_i$  により境界が発見された場合、その最短距離に位置するロボット  $r_{s1}$  が定義され、他のネイバーロボットが  $A(l_e)$  の内部に存在するか、もしくは  $d_e \leq \frac{\sqrt{3}d_u}{2}$  を満たすかどうかを調べられる (図 2(a) 参照)．もしこの条件が満たされれば、 $r_i$  は  $\vec{p_i p_{s1}}$  の中点  $p_m$  を計算し、図 2-(b) に示すように  $p_m$  から  $l_e$  に下ろした

垂線の足  $p_v$  を定義する．ここで， $p_v$  を  $p_{s2}$  とみなし， $N_i$  を  $\{p_{s1}, p_v\}$  として定義する．選ばれた  $N_i$  により生成された  $\mathbb{T}_i$  に基づき， $r_i$  は式 (3) 及び式 (5) を用いた局所的な相互作用を実行する．

ここで， $p_v$  は仮想点であることに注意する．更に， $r_i$  は制限された感知領域  $SB$  を持っているため，全ての領域境界を見つけることが難しいことにも注意する．このため，一般的に，ロボットが正確に  $\mathbb{T}_i$  を形成することはほとんど不可能である．このことを考慮に入れて， $\mathbb{T}_i$  の距離順列  $\mathbf{D}_{i,e}$  を以下のように修正する．

$$\mathbf{D}_{i,e} = \begin{bmatrix} 0 & (dist(p_i, p_{s1}) - d_u)^2 \\ (dist(p_i, p_{s2}) - d_u)^2 & 0 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

ここで，測度  $\mathbf{D}_{i,e}$  は  $p_{s2}(= p_v)$  と相互作用する領域境界近くに位置するロボットにのみ適用するものとする．

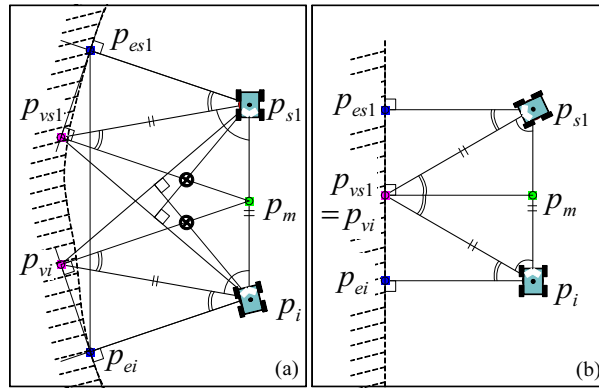


Fig. 3 Uniform conformity to the shape of the border ((a): indented border, (b): flat border)

$r_i$  は  $\mathbf{D}_{i,e}$  によって  $p_{s1}$  と  $p_v$  を頂点に持つ二等辺三角形に収束する．今，ロボットは領域境界に適合する間に距離  $d_u$  を維持することが示されている．図 3 において， $p_{vi}$  と  $p_{vs1}$  がそれぞれ仮想点  $r_{vi}$  と  $r_{vs1}$  の位置を表すものとする．一様な適合性のため，長さが  $d_u$  である  $\overrightarrow{p_i p_{s1}}$  が  $\overrightarrow{p_{ei} p_{es1}}$  に平行であることが必要である（但し， $p_{ei}$ （又は  $p_{es1}$ ）は  $p_i$ （ $p_{s1}$ ）から境界に下ろした垂線の足である）．ここで， $SB$  は範囲が制限されているため， $r_i$  は  $\overrightarrow{p_i p_{ei}}$  と  $\overrightarrow{p_{s1} p_{es1}}$  が平行であるかどうかを認識できない．境界の幾何形状により， $p_{vi}$  は  $l_e$  の変化とともに変わる．

ここで， $\overrightarrow{p_i p_{s1}} = \overrightarrow{p_{vi} p_{s1}} = \overrightarrow{p_{vs1} p_{s1}}$  であるので， $\triangle p_i p_{s1} p_{vi}$  と  $\triangle p_{s1} p_{s1} p_{vs1}$  は 1 辺の長さが  $d_u$  の二等辺三角形であり，その高さは共に  $\frac{\sqrt{3}d_u}{2}$  なので，合同である．同様に， $\angle p_{s1} p_i p_{vi} = \angle p_i p_{s1} p_{vs1}$ ， $\angle p_{s1} p_{vs1} p_m = \angle p_i p_{vi} p_m$  より， $\angle p_{vi} p_i p_{ei} = \angle p_{vs1} p_{s1} p_{es1}$  なので， $\triangle p_{vi} p_i p_{ei}$  と  $\triangle p_{vs1} p_{s1} p_{es1}$  は合同である． $\overrightarrow{p_i p_{ei}} = \overrightarrow{p_{s1} p_{es1}}$  及び  $\angle p_{s1} p_i p_{ei} = \angle p_i p_{s1} p_{es1}$  であるので， $\square p_i p_{s1} p_{es1} p_{ei}$  は二等辺台形である．こうして， $\overrightarrow{p_i p_{s1}}$  と  $\overrightarrow{p_{ei} p_{es1}}$  が平行であることが示される．これより，境界に近いロボットは隊列におけるロボット間の理想距離である  $d_u$  で境界の形状に適合することができる．

## 5. 検証実験及び考察

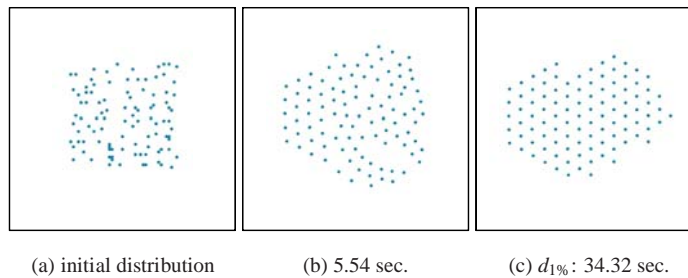


Fig. 4 Simulation results for self-configuration from a random configuration

本論文で提案したアルゴリズムの有効性を検証するため，収束性，ロバスト特性を実証する一連のシミュレ-

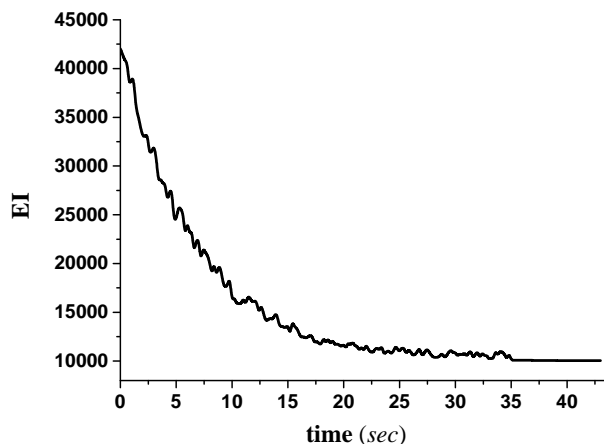


Fig. 5 Variations of EI value during self-configuration from the random configuration of 100 robots in Fig. 4

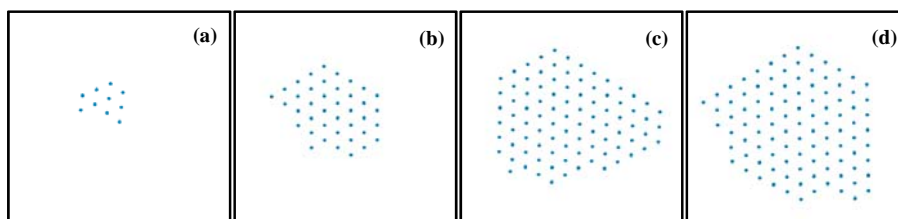


Fig. 6 Comparison of coverage areas according to the number of robots ((a): 10 robots, (b): 40 robots, (c): 90 robots, (d): 100 robots)

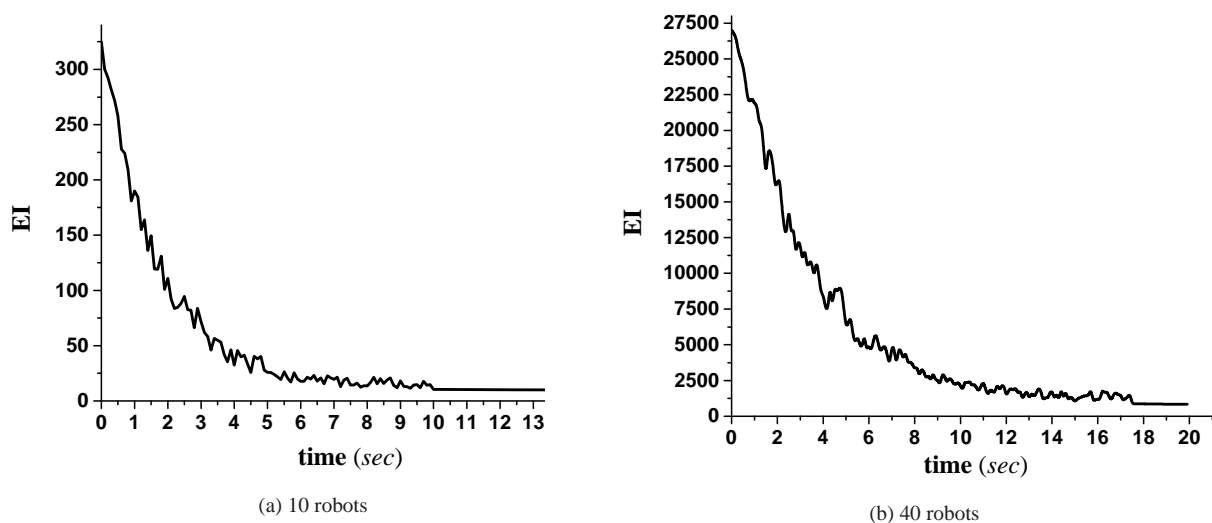


Fig. 7 Variations of EI value during self-configuration from a random configuration in Figs. 6 (a) and (b)

ションを行った．各ロボットは  $d_u$  の 2.5 倍の長さの  $SB$  を持つものと仮定する．アルゴリズムは全てのロボットの 2 台のネイバーとの距離が  $d_u \pm 1\%$  に収束した時に終了するものとする．

図 4 は 100 台のロボットがランダムな初期配置から一様な空間密度で開かれた領域に自己配置していく様子，図 5 はその際の EI 値の変化を示している．それぞれのロボットは  $\mathbb{E}_i$  を形成するため，局所的な相互作用の制御により望ましい平衡点へ向かって動いている．次に，図 6 ではロボットの台数を 10 台，40 台，90 台，100 台と増加させていった時の収束領域の比較結果を，図 7 ではロボット台数が 10 台及び 40 台の時の EI 値の変化を示している．期待通り，収束領域はロボット数の増加と共に拡大しており，このことは本手法の拡張性を示している．配置領域の境界は一般的にロボットの初期分布と台数に一致しないが，ロボット群は可能な限り凸な形状を保とうとしている．なお，提案手法は様々な形状に適合する必要がある外周部を除いて全てのノードが一様な空間密度



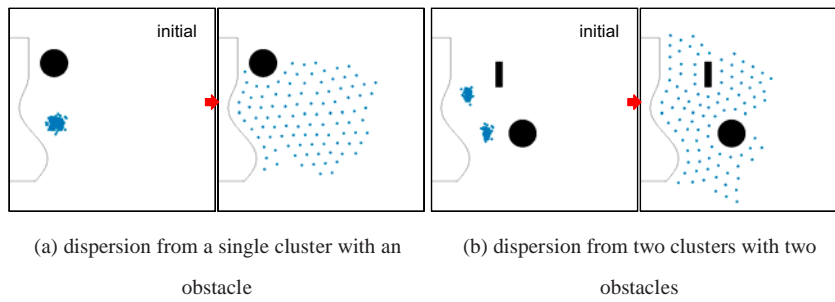


Fig. 8 Self-configuration of 100 robots over a curved surface and obstacles

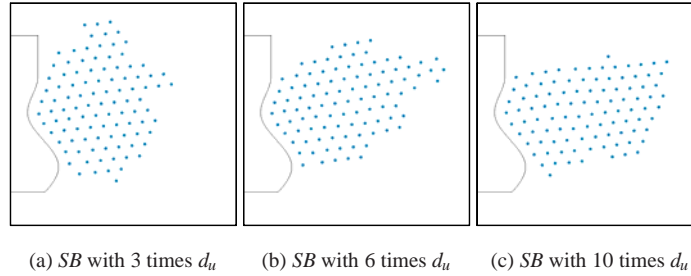


Fig. 9 Simulation results for adaptive self-configuration over the curved surface according to changes in SB

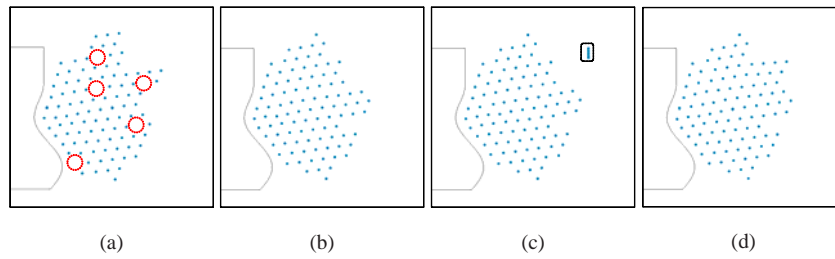


Fig. 10 Robustness against loss of 5 robots over a curved surface ((a): loss of 5 robots, (b): redeployment with 95 robots, (c): replaced 5 robots, (d): redeployment with 100 robots)

で配置されることを意図している．このように、ロボットを開かれた領域に配置する時には境界を維持するための制御は存在しない．このことは床表面に落とされた液体の広がり に似ている．以上のシミュレーションにより、4.2 節で提案した自己配置アルゴリズムによって、多数台のロボットを正三角形の形状に自己配置させることができることを確認した．

続いて、図 8 は 100 台のロボットが曲面の境界及び障害物を持つ領域に自己配置する様子を示している．ロボットは境界に適した  $\mathbb{E}_i$  に最終的に収束していくことが観察される．ほとんどのロボットは直接に領域境界を見つけることは無いが、それでも隣人ロボットとの局所的な相互作用を通じて境界の形状に適合している．これにより、4.3 節で提案した領域境界適合アルゴリズムによって、ロボットが領域内に存在する障害物に適應して目標形状である正三角形格子を形成できることが確認された．

次に、SB の範囲が  $d_u$  の 3 倍、6 倍、10 倍となった時に、自己配置を行う際に SB が個々のロボットに与える効果について検証した．図 9 は領域の境界に適した  $\mathbb{E}_i$  にロボットが収束する様子を示している．図より他のロボットがそれぞれの正三角形の頂点に収束しているのに対し、何台かのロボットは境界を見つけそれに近付いている様子が観察された．もし領域境界が何台かのロボットにより発見されると、そのロボットはネイバーロボットが  $A(l_e)$  の内部に存在する、若しくは  $d_e \leq \frac{\sqrt{3}d_u}{2}$  を満たすかどうかを調べる．この条件を調べることにより、ロボットは境界に向かって再配置を行うか他のネイバーと相互作用するかを選択できる．

続いて、ロボットの欠損に対するロバスト性を調べた．図 10-(a) において 5 台のロボットが欠損すると、それぞれのロボットはその SB 内に穴が存在するかどうかを調べる．穴が周囲に存在すると、そのロボットは適応的な自己配置アルゴリズムを繰り返し実行する．アルゴリズムは穴が満たされるようにそれぞれのロボットを移動さ



せる． 10-(b) は 95 台のロボットの再配置を示す．加えて，欠損したロボットが同数の新しいロボットにより置き換えられた時の様子を 10-(c) に示す．Fig.10-(d) は 100 台のロボットの再配置を示す．シミュレーション結果より，適応的な自己配置アルゴリズムは群ロボットの指定された領域の一様な範囲のロバスト性を改良するのに効果的であることが分かる．



Fig. 11 Experimental results for self-configuration from a random configuration of 3 robots



Fig. 12 Experimental results for self-configuration from a random configuration of 4 robots

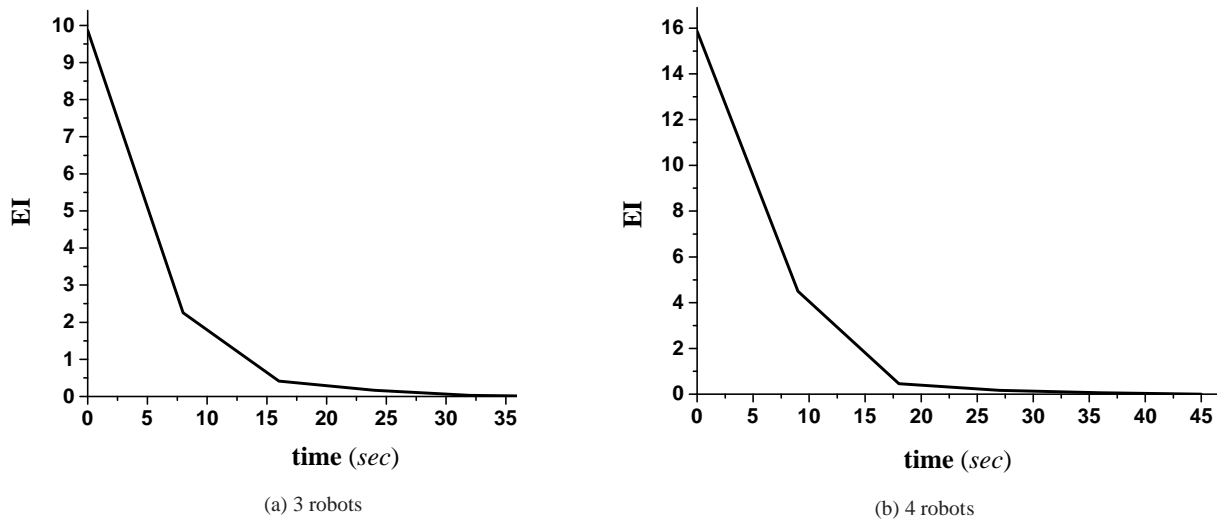









Fig. 13 Variations of EI value during self-configuration from a random configuration in Figs. 11 and 12, respectively

次に，実際のロボットを用いて自己配置アルゴリズムを実行した時の実験結果を 11 及び 12 に示す． 11 においては，ランダムな初期位置に配置された 3 台のロボットが自己配置アルゴリズムを実行することにより，正三角形の形状を実現する様子を示している．この時に各ロボット間の距離及びこれらのロボットにより形成される三角形の面積より計算された，目標形状である正三角形への収束度を表す評価指標 EI(式(2)) の変化を示すグラフを 13-(a) に示す． 13-(a) より，評価指標 EI の値は最初の状態から徐々に減少していき，最終的にその値が 0 に収束していることから，自己配置アルゴリズムによりロボットが目標形状である正三角形を形成していることが確認される．同様に，ロボットの台数を 4 台とした時のロボットの動きを 12 に，その時の評価指標 EI の値の変化を 13-(b) に示す．この場合も評価指標 EI の値は最初の状態から徐々に減少し，最終的には 0 に収束していることから，今回提案したアルゴリズムはロボットの台数を増やしても有効であると認められる．

## 6. 結 言

本論文においては、ロボット群を地理的に制約のある平面に配置するための適応的な自己配置問題について取り組んだ。実用的な観点から、ロボットの ID や各ロボットに共通の座標、大域的な方向、及びロボット間の直接の通信は仮定しない。各ロボットは一時的なエラーに対処するための過去の行動や状態に関する記憶を用いることなしにその位置を計算する。また、センサは観測範囲に制約を持っている。こうした条件の元で、本論文では領域の境界や障害物に適応してロボットを配置するための分散型のアルゴリズムを提案した。そして、本論文で提案した各ロボットが 2 台のネイバーロボットとのみ関係するという局所的な相互作用は、他のロボットの位置情報のみを利用していているという点で、計算量的に効率的である。こうした各ロボットの局所的な振り舞いにより、一様に分布したロボット群で環境を満たすことができる。アルゴリズムの収束性はシミュレーション及び実験によりその有効性が検証された。現実世界での応用に用いるための効率的な群ロボットの配置アルゴリズムを開発するための最初のステップとして、我々はロボットやセンサ、環境についての有効で現実的なモデルを組み込んだ。今回のアルゴリズムはロボットが他のロボットを様々な別の物体から区別できることを仮定している。ハードウェアの開発や技術的な問題については今後の研究課題とする。

## 文 献

- Fowler, T., Mesh networks for broadband access, IEE Review, Vol.4 (2001), pp.17–22.
- Slotine, J. E. and Li, W., Applied nonlinear control, Prentice-Hall (1991).
- Suzuki, I. and Yamashita, M., Distributed anonymous mobile robots: formation of geometric patterns, SIAM Journal on Computing Vol.28 (1999), pp.1347–1363.
- Ikemoto, Y., Hasegawa, Y., Fukuda, T. and Matsuda, K., Graduated spatial pattern formation of robot group, Information Sciences, Vol.171 (2005), pp.431–445.
- Shimizu, M., Mori, T. and Ishiguro, A., A development of a modular robot that enables adaptive reconfiguration, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems 2006 (2006), pp.174–179.
- Zheng, Y. F. and Chen, W., Mobile robot team forming for crystallization of protein, Autonomous Robots, Vol.23 (2007), pp.69–78.
- Fujibayashi, K., Murata, S., Sugawara, K. and Yamamura, M., Self-organizing formation algorithm for active elements, FORMA, Vol.18, No.2 (2003), pp.83–95.
- Shucker, B., Murphey, T. D. and Bennett, J. K., Convergence-preserving switching for topology-dependent decentralized systems, IEEE Transactions on Robotics, Vol.24 (2008), pp.1405–1415.
- Spears, D., Kerr, W. and Spears, W., Physics-based robot swarms for coverage problems, International Journal of Intelligent Control and Systems, Vol.11 (2006), pp.124–140.
- Zou, Y. and Chakrabarty, K., Sensor deployment and target localization based on virtual forces, IEEE International Conference on Computer Communications 2003 (2003), pp.1293–1303.
- Wang, G.-L., Cao, G. and Porta, T. L., Movement-assisted sensor deployment, IEEE International Conference on Computer Communications 2004 (2004), pp.2469–2479.
- Ghosh, S., Basu, K. and Das, S. K., An architecture for next-generation radio access networks, IEEE Network, Vol.19 (2005), pp.35–42.
- Chen, C.-T., Linear system theory and design, 3rd edition, Oxford University Press (1999).
- Lee, G. and Chong, N. Y., A geometric approach to deploying robot swarms. Annals of Mathematics and Artificial Intelligence, Vol.52 (2009), pp.257–280
- Dolev, S., Self-Stabilization, MIT Press (2000).
- 神ノ尾 淳, Défago, X, 丁 洛榮, 李 根浩, 群ロボットの目標形状への収束度の評価手法 - 正三角形格子を例として -, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2014 (2014).
- 神ノ尾 淳, 丁 洛榮, 李 根浩, 群ロボットの隊形制御における指数関数を用いた外挿手法の提案, 計測自動制御学会論文集, Vol.52, No.1 (2016), pp.28–36.

## References

- Fowler, T., Mesh networks for broadband access, IEE Review, Vol.4 (2001), pp.17–22.
- Slotine, J. E. and Li, W., Applied nonlinear control, Prentice-Hall (1991).
- Suzuki, I. and Yamashita, M., Distributed anonymous mobile robots: formation of geometric patterns, SIAM Journal on Computing Vol.28 (1999), pp.1347–1363.
- Ikemoto, Y., Hasegawa, Y., Fukuda, T. and Matsuda, K., Graduated spatial pattern formation of robot group, Information Sciences, Vol.171 (2005), pp.431–445.
- Shimizu, M., Mori, T. and Ishiguro, A., A development of a modular robot that enables adaptive reconfiguration, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems 2006 (2006), pp.174–179.
- Zheng, Y. F. and Chen, W., Mobile robot team forming for crystallization of protein, Autonomous Robots, Vol.23 (2007), pp.69–78.
- Fujibayashi, K., Murata, S., Sugawara, K. and Yamamura, M., Self-organizing formation algorithm for active elements, FORMA, Vol.18, No.2 (2003), pp.83–95.
- Shucker, B., Murphey, T. D. and Bennett, J. K., Convergence-preserving switching for topology-dependent decentralized systems, IEEE Transactions on Robotics, Vol.24 (2008), pp.1405–1415.
- Spears, D., Kerr, W. and Spears, W., Physics-based robot swarms for coverage problems, International Journal of Intelligent Control and Systems, Vol.11 (2006), pp.124–140.
- Zou, Y. and Chakrabarty, K., Sensor deployment and target localization based on virtual forces, IEEE International Conference on Computer Communications 2003 (2003), pp.1293–1303.
- Wang, G.-L., Cao, G. and Porta, T. L., Movement-assisted sensor deployment, IEEE International Conference on Computer Communications 2004 (2004), pp.2469–2479.
- Ghosh, S., Basu, K. and Das, S. K., An architecture for next-generation radio access networks, IEEE Network, Vol.19 (2005), pp.35–42.
- Chen, C.-T., Linear system theory and design, 3rd edition, Oxford University Press (1999).
- Lee, G. and Chong, N. Y., A geometric approach to deploying robot swarms. Annals of Mathematics and Artificial Intelligence, Vol.52 (2009), pp.257–280
- Dolev, S., Self-Stabilization, MIT Press (2000).
- Shinnoh, A., Défago, X., Chong, N.Y. and Lee, G., Comparison of Estimation Methods on Communication Loss in Swarm Robots - Let Equilateral Triangle Formation Be an Example, Robomech2014 (2014).
- Shinnoh, A., Chong, N.Y. and Lee, G., Novel Extrapolating Methods Using Exponential Function in Formation Control of Swarm Robots, Transactions of SICE, Vol.52, No.1 (2016), pp.28–36.

## 付 録

### 4.2 節の自己配置アルゴリズムの収束性に関する証明

自己配置アルゴリズムは  $\sum_{i=1}^n \mathbb{E}_i$  個の正三角形を与える。更に、このアルゴリズムは位置の重なりや穴といった不規則性無しに一様な空間密度でロボット群を配置することができる。ロボット  $r_i$  は各時刻において  $SB$  内でネイバーを動的に変化させる。ここで、最初に  $\mathbb{T}_i$  に適合してネイバーを変化させる間に望ましい  $\mathbb{E}_i$  に到達する自己配置の効果を解析する。ここで、以下のスカラー関数を用いてリアプノフの安定性理論を適用する。

$$f_{s,i} = \sum_{\mathbb{T}_i} (d_k - d_u)^2 + f_{l,i} \quad (a)$$

ここで、 $f_{l,i}$  は  $f_{l,i} = \frac{1}{2}(d_i - d_r)^2 + \frac{1}{2}(60^\circ - \alpha_i)^2$  で与えられる関数であり、また  $\sum_{\mathbb{T}_i} (d_k - d_u)^2$  は各時刻において  $\mathbb{T}_i$  に関して一定であると定義される関数である。よって、 $f_{l,i}$  の定義式より、(a) 式は  $d_i \neq d_r$  及び  $\alpha_i \neq 60^\circ$  の時を除いて正定となる（もし  $\mathbb{T}_i$  が  $\mathbb{E}_i$  と等しい時、 $\sum_{\mathbb{T}_i} (d_k - d_u)^2$  は 0 となる）。(a) 式の微分は以下で与えられる。

$$\dot{f}_{s,i} = \dot{f}_{l,i} = -a(d_i - d_r)^2 - k(60^\circ - \alpha_i)^2 \quad (b)$$

(b) 式は負定である．最後に，スカラ関数  $f_{s,j}$  は  $\|x\| \rightarrow \infty$  の時に無限大となるため，半径方向に非有界である．よって，平衡状態は漸近安定であり，このことはロボットが互いに部分的に重なり合うことなく (a) 式より任意の  $\mathbb{T}_i$  から  $\mathbb{E}_i$  の頂点に収束することを意味する．

二番目の問題は，ロボットが不規則性無しに様な空間密度で分布しようすることである．言い換えると， $r_i$  は以下の式で表されるような  $SB$  内部の理想の配置  $\mathbb{E}_i$  の最大数に到達しようとする．

$$\max\left[\sum_{m=1}^s (\mathbb{E}_i)_m\right] \quad (c)$$

ここで， $s$  は 1 以上 6 以下の数である． $s$  は理想とする配置が 6 個の正三角形格子から成る規則的な六角形であることから，その最大値は 6 を超えないことに注意する．

$\max[\sum_{m=1}^s (\mathbb{E}_i)_m]$  の値を得るために，今回提案するアルゴリズムは任意の時刻において  $r_i$  が  $\mathbb{E}_i$  を形成するかどうかによりその隣人を変える．ここで，(a) 式を次のように修正する．

$$f_{sc,i} = \begin{cases} \sum_{m=1}^c (f_{l,i})_m + f_{s,i} & \text{if } \mathbb{T}_i = \mathbb{E}_i \\ f_{s,i} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (d)$$

ここで， $f_{s,j}$  は (a) 式より与えられ，また  $c$  は  $\max[s]$  未満である．(d) 式を用いて，(c) 式は以下のように書き直される．

$$f_{sc,i} = \min\left[\sum_{m=1}^s (f_{l,i})_m\right] \quad (e)$$

ここで，(e) 式は  $\mathbb{E}_i$  の値を最大化することによりエネルギー（若しくは不規則さの程度）を最小レベルにする．次に，自己配置の間に  $r_i$  に関して増加又は減少する仮想エネルギー  $q_i$  を次のように定義する．

$$q_i = \sum_{m=1}^c (f_{l,i})_m \quad (f)$$

$\mathbb{T}_i$  が  $\mathbb{E}_i$  に等しい時， $q_i$  によって  $r_i$  はネイバーを変えることで別の正三角形格子を形成するための局所的な相互作用を行う．ここで， $q_i$  は任意の非負の初期値  $q_i(0)$  から始まり，以下の方程式に従うものとする．

$$\dot{q}_i = \sum_{m=1}^c (\dot{f}_{l,i})_m \quad (g)$$

ここで， $r_i$  が次の最近接のネイバーに近付くことにより，(f) 式は  $f_{s,j}$  を最小化する．もし  $q_i$  の値が減少すると， $r_i$  が  $\min[\sum_{m=1}^s (f_{l,i})_m]$  に向かって動いていると予測できる．これを繰り返し実行することにより，群の中の不規則な穴は取り除かれる．

各ロボットが有限の活性化ステップを実行した後，ネイバーロボットの数を増加させる間に  $\max[\sum_{m=1}^s (\mathbb{E}_i)_m]$  に収束することを示すために，次のスカラ関数を用いてリアプノフの安定性理論より  $r_i$  の収束性を示す．

$$f_{sc,i} = f_{s,i} + q_i \quad (h)$$

ここで， $q_i(0)$  は非負の値であり (g) 式に従うことに注意する．更に， $q_i$  は  $f_{l,i}$  が要求される時に増加するように定義されていることにも注意する． $\mathbb{T}_i = \mathbb{E}_i$  である時いつでも， $q_i$  は  $q_i(0)$  に設定される．また，(a) 式より  $f_{s,i}$  は正定である．よって， $f_{s,j} > 0$  かつ  $q_i > 0$  より， $f_{sc,i} > 0$  は明らかである．続いて， $f_{sc,i}$  を微分すると，

$$\dot{f}_{sc,i} = \dot{f}_{s,i} + \dot{q}_i = \dot{f}_{s,i} + \sum_{m=1}^c (\dot{f}_{l,i})_m = \dot{f}_{l,i} + \sum_{m=1}^c (\dot{f}_{l,i})_m \quad (i)$$

この式は次のように簡略化される．

$$\dot{f}_{sc,i} = \sum_{m=1}^s (\dot{f}_{l,i})_m \quad (j)$$

ここで， $\dot{f}_{sc,i}$  が負定性は明らかであるので，リアプノフの安定性理論より， $r_i$  の位置は  $\sum_{m=1}^s (\mathbb{E}_i)_m$  に収束する．



最終的に,  $n$  台のロボット群の  $n$  次共同スカラー関数  $\mathbf{F}_{sc}$  は, 範囲と方向に関する代数的な集合の解が  $\{r_i | 1 \leq i \leq n\}$  の平衡点の集合に密接に関係するという特性を持つ非零の関数である. 一般性を失うことなしに,  $\mathbf{F}_{sc}$  はスカラーポテンシャルを持ったエネルギー関数である. ここで,  $n$  台のロボット群に対するアルゴリズムの収束性を示す.  $\mathbf{F}_{sc}$  は次のように定義される.

$$\mathbf{F}_{sc} = \sum_{i=1}^n f_{sc,i} = \sum_{i=1}^n f_{s,i} + \sum_{i=1}^n q_i \quad (k)$$

ここで,  $\mathbf{F}_{sc}$  が正定であることを示すのは容易である. 同様に,  $\dot{\mathbf{F}}_{sc}$  は負定であり  $t \rightarrow \infty$  の時に無限大となることから半径方向に非有界である. よって,  $n$  台のロボット群は  $\sum_{i=1}^n (\max[\sum_{m=1}^s (\mathbb{E}_i)_m])$  に収束する.