

# スワームロボットネットワークによる電波強度を用いた 任意ノードへの集合行動の提案

Aggregation of Swarm Robotic Network to an Arbitrary Node  
Based on the Received Signal Strength

学 片岡光留 (摂南大) 正 片田喜章 (摂南大)

Hikaru KATAOKA, Setsunan University

Yoshiaki KATADA, Setsunan University, katada @ele.setsunan.ac.jp

One of the most studied collective behaviors in swarm robotics is aggregation. This paper proposed the novel algorithm for swarm robotic network aggregating to an arbitrary node robot based on the received signal strength. We conducted a series of real experiments in order to investigate the validity of the proposed the method.

**Key Words:** Swarm Robotics, Aggregation, Collective Behavior, Signal Strength

## 1 はじめに

スワームロボティクス (SR) とよばれる分野 [1][2][3] が近年、急速に注目を集めるようになってきている。その中でも Sahin ら [4] は単一ロボットでは問題解決が困難もしくは非効率なタスクに対して、構造が簡単で安価に構築でき制御器を含めて完全に均質な自律ロボット (シミュレーションではなく実機) を多数 (最低でも 10-20 台) 用いて解決策を提示しようというアプローチを提案している。上述の設計理念に従うと、各ロボットの構成は制御器を含めて均質であることが望ましい。このように設計された SR は頑健性・拡張性・柔軟性という特性を示すことが期待される [1]。

SR では、これまでに空間的な組織化行動・探索行動・集団的意思決定といったタスクが取り扱われてきた [1]。空間的な組織化行動とは、集合・パターン形成および構造物の自己組立や形成を指す。空間において、どのようにロボットと物体を組織化し分散させるか (配置するか)、どのように凝集したロボットが構造物を形成するかについて焦点を当てた研究が行われている。群れに関する大域的な情報の取得と相互通信が可能でかつ精度が求められる場合には、中央集権的な制御手法が適用される。精度は保証されるが、頑健性・拡張性・コストの面で問題がある。一方、群れに関する局所的な情報取得と近隣程度のロボット同士の通信が可能である場合、分散的な制御手法が適用される。精度は期待できないものの、頑健性・拡張性・構築の容易さといった利点がある [5]。本研究では後者に焦点を当てる。

空間的な組織化行動の中で最も簡潔なものは集合である。集合行動では一般的に、ある制約条件のもとでロボット群の初期位置をランダムに配置し、空間内でロボット群をお互いに最接近させる。ここで、集合行動に分散的な制御手法を適用する場合、ロボットの制御器は行動規範型設計 [6] または進化ロボティクスアプローチ [7][2] によって設計される。多くの研究 [8][9] がなされているが、群れに関する局所的な情報を取得するセンサの測定範囲によって、1つのクラスターへの集合が困難になるといった問題が報告されている [10]。1つのクラスターに集合する場合であっても空間内のどこに集合するかは明示的ではなく、あくまで集合行動は自己組織化の結果として現れてくる。

本稿では、無線通信により連結された群れロボットによるネットワーク (SR ネットワークとよぶ) を対象とし、無線電波強度に基づいてネットワーク内の任意のノードロボットへ集合する手法を提案する。提案手法の性能を車輪型移動ロボット群を用いた実機実験において検証する。提案手法は任意ノードへの集合を仮定したものであるが、我々の研究グループで研究を行っている、SR ネットワークによるターゲット探索 [11][12][13][14] のタスク終了後の (無線) 基地局への帰還を想定したものにもなっている。

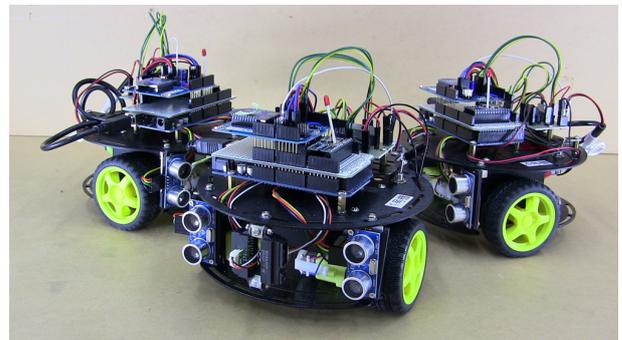


Fig.1 Setup for swarm mobile robots



Fig.2 Wireless communication device: TWE-Lite DIP

## 2 スワームロボット構成

本研究では、左右二輪独立駆動型の移動ロボットを採用する。図1の台車 (直径 170mm, 高さ 75mm) に (長) 距離センサ (超音波: 前方検出に 2 個) (短) 距離センサ (赤外線: 左右側面方向検出に 2 個)、マイクロコントローラ (Arduino)、モータドライバ、無線通信装置 (XBee, TWE-Lite) を搭載する。距離センサの測定可能距離は約 4500mm と約 300mm である。駆動装置としてギヤつきの DC モータ 2 個を採用し、モータドライバを介しマイコンから制御する。無線通信装置 XBee は Zigbee 規格であり、アドホックネットワークを構成し、マルチホップ通信が可能である。各ロボットに搭載する XBee は router に設定する。本研究では、各ロボットが行動開始信号を受け取るために使用する。

一方、無線通信装置 TWE-Lite (図 2) はポイントツーポイント通信に用いる。TWE-Lite は TWE-Lite 同士の通信に成功したときにシリアルデータとして受信した電波強度 (LQI 値) や相手の個体番号などを取得する。電波強度は距離と相関があるので、相対的な距離を得ることができる。本研究では、TWE-Lite は後述する電波強度測定と ID 伝播に使用する。

### 3 任意ノードへの集合行動アルゴリズム

#### 3.1 提案アルゴリズムの概要

任意のノードへ向かってランクに従いスワームロボットが逐次的に集合するアルゴリズムを提案する。特定のデバイスを用いた実装例は 3.2 節で述べることにし、本節ではより一般的な記述を行う。なお、何らかの方法で近隣のロボットと通信できることを仮定する。

図 3 はランク ( $i = 0, 1, \dots$ ) が付けられた状態のノード (ロボット) 群の例を示している。図中の黒丸は集合すべき任意のノード (以下、目標ノード)、番号付きの円はランクが付いたノードを表し、色がついた円はそれぞれノードのランク付与範囲を表す。ここで、通信可能範囲・ランク付与範囲を円状にそれぞれ仮定・設定し、各々の半径を  $r_c, r_{err}$  とする。これらの値はすべてのノードで一定と仮定する。なお、 $r_{err} < r_c$  とする。

実験開始時に目標ノードを除く全ノードはランク 0 に初期化される。つぎに、目標ノードのランク付与範囲に存在するノードにランク 1 が付与される。つぎにランク 1 のランク付与範囲に存在するノードにランク 1 ノードからランク 2 が付与される。順次この流れを繰り返す。なお、すでに上位ランク (0 を除く数) がより小さいランク) が付与されているノードのランクは変更されない。図 3 の右上および左上のノードはどのノードのランク付与範囲にも属さないため、ランク 0 のままである。

集合アルゴリズム開始後に、ロボットは初期位置で近隣ロボットと通信を行い自身のランクを確定させる。一定時間経過後、下記の条件を満たす場合にロボットは移動を開始する。

1. ランクが 0 である。
2. ランクが 0 または 1 ではなく、通信範囲に以下のノードが存在しない。
  - ランク 0 ノード
  - 自身よりも下位ランクをもつノード

これらの条件を満たさない場合にロボットは停止する。ロボットの移動行動は前進と回転で構成される。詳細は 3.2.2 節で述べる。移動中、障害物が検出された場合は障害物回避行動をとる。移動によって自身よりも上位のランク付与範囲に入ったときのみ、ランクは変化する。一連の行動はランクが 1 になるまで実行される。すべてのロボットのランクが 1 になれば、すべてのロボットが目標ノードのランク付与範囲に存在することになり、集合は完了とする。

#### 3.2 提案アルゴリズムの実装

##### 3.2.1 ランクの逐次変化

本稿の実験で使用するランクは  $i = 1, 2, 3, 4, 0$  の合計 5 種類である。前節で提案したアルゴリズムでは任意のノードへの集合を目的としている。本実験では基地局を上述の目標ノードに設定し、基地局への集合をタスクとして、提案アルゴリズムを実装する。

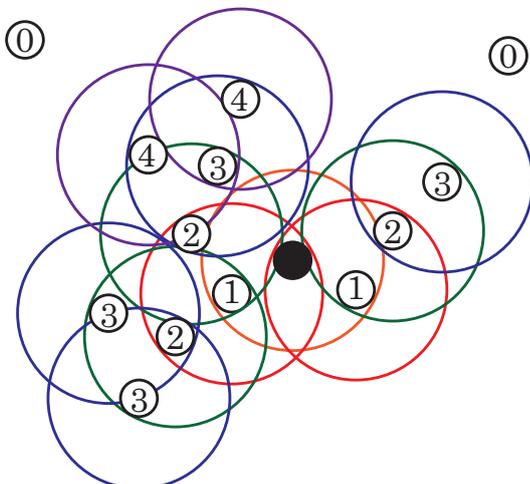


Fig.3 Ranking method for aggregation

2 節で述べた TWE-Lite では基板上 (図 2) の DI 端子 (デジタル入力) に印加する電圧を LOW に設定すると、それに対応するデータが変化したシリアルデータが送信される。この機能を利用して、目標ノード以外のロボットのランクを逐次変化させる。まず、目標ノードの DI1 端子を LOW に設定し、周囲のロボットに自身が目標ノードであることを示すシリアルデータを送信する。目標ノードであることを示すシリアルデータを受信したロボットは、同時に受信する電波強度 (以下 LQI 値とする) を確認し、その数値がランク付与範囲内であることを示す閾値以上であれば自身のランクを 0 から 1 に変化させる。ランクが 1 に変化したロボットは DI2 端子を LOW に設定し周囲のロボットに自身がランク 1 であることを示すシリアルデータを送信する。それを受信したロボットは LQI 値が閾値以上であれば自身のランクを 0 から 2 に変化させる。ランク 2 になったロボットは DI3 端子を LOW に設定することで周囲に自身がランク 2 であることを示し、それを受信してランク 3 になったロボットは DI2・DI3 端子を LOW に設定し周囲に自身がランク 3 であることを示すシリアルデータを送信する。それを受信してランク 4 になったロボットは DI4 端子を LOW に設定し周囲に自身がランク 4 であることを示すシリアルデータを送信する。ランク 0 のロボットはすべての DI 端子が HIGH の状態であり、自身がランク 0 であることを示すシリアルデータを送信する。自身のランクが変化したロボットはそのランクを保持し、上位ランクから下位ランクに変化することはない (ランク 0 からの変化を除く)。なお、ランクの変化は単純に TWE-Lite の通信が成功する距離ではなく、閾値以上の LQI 値で受信したときに行われることに注意されたい。これによって、より逐次的に集合することが可能になると予想される。

##### 3.2.2 移動行動

移動行動は前方への直進 (10 秒間) を基本とし、直進中に障害物が検出された場合は障害物回避行動を行う。直進後、自身よりも上位のすべてのロボットから離れた場合には約 180 度の回転を行う。逆にランク上位のロボット 1 台に対してでも近づいた場合には回転は行わない。

直進後の回転の実行判定は以下のように行う。直進終了後に 10 秒間停止した状態で 1 秒間隔で送られてくるデータを受信する。前受信データ (直進前) と現受信データ (直進後) の LQI 値 (有効データ) の最大値・最小値・平均値 (直近のデータで最大 5 回分) の 3 項目に関して比較を行い、2 項目以上の数値が増加が確認される場合に近づいていると判断する。ここで、有効データとは通信が成功したときのデータである。平均値は成功した通信が 3 回の場合はそのデータの合計を 3 で割った値、6 回以上の場合には最新データから 5 回分のデータの合計を 5 で割った値を採用する。最大値・最小値に関しては、10 秒間で取得したすべてのデータを対象とする。

表 1 を取得したデータ例として説明を行う。表中の"—" は通信に失敗したことを表す。自身のランクは 3 であると仮定する。0x03 は自身より下位ランクなので無視する。平均をとるときに使用する有効データは、0x01 では上から 5 データ分 (直近) を用い、0x02 では上から 4 データ分 (before) および 3 データ分 (after) を用いる。0x01 に関して、移動前後の LQI 値の平均は 89 と 86、最大値は 120 と 130、最小値は 60 と 55 となっている。数値が増加した項目は 1 つなので遠ざかっていると判定する。同様に 0x02 では、平均は 53 と 53、最大値は 88 と 78、最小値は 21 と 32 と

Table 1 Received LQI values before and after moving

data No.	ID, rank					
	0x01, 3		0x02, 2		0x03, 4	
	before	after	before	after	before	after
1 (lastest)	120	130	60	50	—	10
2	80	92	88	78	—	—
3	60	72	44	32	—	—
4	75	80	21	—	—	—
5	110	55	—	—	—	—
6	80	100	—	—	—	—
7	90	102	—	—	—	—
average	89	86	53	53	—	10
max	120	130	88	78	—	10
min	60	55	21	32	—	10

なっている．数値が増加した項目は1つだけなので遠ざかっていると判定する．以上より，0x01と0x02の結果から，ランク上位のロボットに対し遠ざかっているため約180度の回転を行う．

#### 4 ターゲット探索実験

##### 4.1 実験設定

壁で囲まれた廊下で実験を行う．目標ノードとして，ロボットに搭載されているものと同じTWE-Liteを配置する(図4手前)．ロボットの初期位置として，図4に示すように目標ノードから等間隔 $D$  [m]に配置する．

本タスクは電波強度に基づいて各ロボットが目標ノード(基地局)付近に集合することである．集合アルゴリズムとして3節で提案した電波強度を用いたランクに基づく集合アルゴリズムを検証する．タスクはすべてのロボットのランクが1になる(目標ノード付近に集合)か，600秒(10分)経過した場合に終了とする．ロボット台数を5として実験を行った．ランク付与範囲(3節)を $r_{err} = 6$  [m]に設定する． $r_{err}$ と同距離もしくはそれ以下の場合として， $D \in \{3, 6\}$  [m]とし，それぞれについて実験を行う．初期位置における，基地局から最遠方のロボットの位置は $D = 3$  [m]のときに15 [m]， $D = 6$  [m]のときに30 [m]となる．各実験の試行回数は10回とする．

##### 4.2 実験結果

図5にタスク終了時における各ロボットから目標ノードまでの距離を示す．プロットの色は，タスク終了時のランクを表し，赤がランク1，青がランク2，黒がランク3を表す．

$D = 3$  [m]の場合(図5(a))ではすべてのロボットがランク1となっている．多くのロボットが目標ノードのランク付与範囲である $r_{err} = 6$  [m]以下に集合している．一方でランク1にもかかわらず，目標ノードから10 [m]以上の位置にいるロボットも散見される．

$D = 6$  [m]の場合(図5(b))ではタスク終了時にランク1になっていないロボットが見られる．目標ノードのランク付与範囲である $r_{err} = 6$  [m]以下に集合しているロボットは1または2台である．目標ノードから10 [m]以上の位置にいるロボットも多い．ロボットの初期位置の最遠方である30 [m]以上の位置にいるロボットも見られ，目標ノードと反対方向に移動してしまっていることがわかる．

##### 4.3 考察

本実験の結果から以下の2つの問題点が挙げられる．

- ランク1になっているにもかかわらず，目標ノードのランク付与範囲外(6 [m]以上)に位置するロボットが存在する．提案アルゴリズムではランク1になればロボットは停止する設定となっており，そこから移動することはない．本実験ではロボット毎に無線通信装置が実装されている．そこから発生するノイズや干渉，環境からの電波の散乱・回折・反射などの影響により，実際の距離から想定される電波強度よりも大きい電波強度を取得したり，より遠方に電波が届くなどの現象が観察された[15]．これが問題の原因だと考えられる．
- 下位ランクのロボットが当該ランクから想定される以上の遠方に位置する．上述の問題点であった遠方でランク1となったロボットから情報を受け取り遠方でランク2となる場合と，想定される位置でランク2になった後に遠方に移動してしまう場合が観察された．3節で説明したように本提案アルゴリズムでは，移動によって自身よりも上位のランク付与範囲に入ったときにのみ，ランクは変化する設定となっていた．これは電波強度に依って上位ランクのロボットから遠ざかった場合には約180度の回転を行い，自身よりも下位ランクをもつロボットが周辺に存在しなければ移動を行うという設定にしていることから，ランクの改善を想定し，改悪を想定していなかったためである．

以上の問題点は，改悪方向を含めたランクの変化を可能にすること，ランク1であってもより目標ノードに近づく移動を設計すること，によって改善されると考えられる．

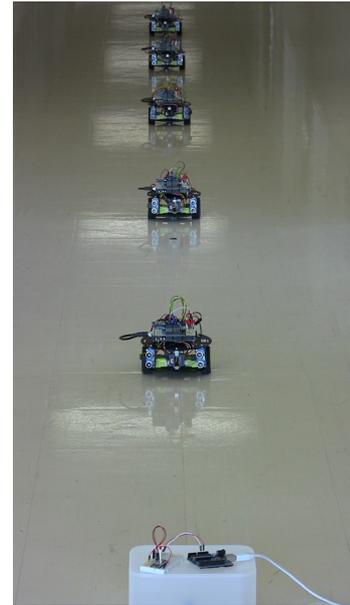


Fig.4 Setup for aggregation to the base station

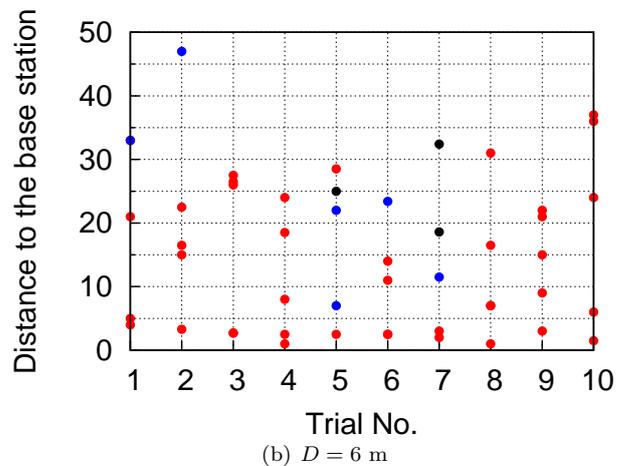
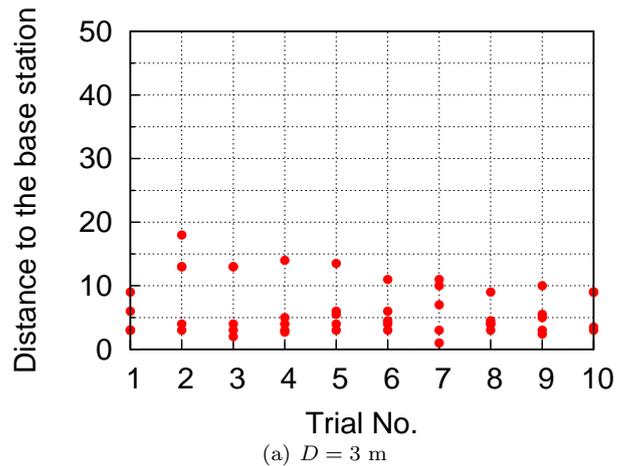


Fig.5 Distance to the base station from each robot: Red for rank 1, Blue for rank 2, Black for rank 3

## 5 おわりに

本稿では、無線通信により連結された群れロボットによるネットワークを対象とし、無線電波強度に基づいてネットワーク内の任意のノードロボットへ集合する手法を提案した。つぎに、提案手法の性能を車輪型移動ロボット群を用いた実機実験において検証した。ロボットの初期位置間隔を短く設定した試行では、多くのロボットが目標ノードに対し10m以内に集合できた。4.3で述べた問題点を改善することでより品質の良い集合行動が設計できると予想される。本実験では目標ノードとして、ロボットとは形状の異なる基地局を用いた。これはスワームロボットが探索などのタスクを実行した後に基地局に帰還することを想定したためである。しかし、提案する集合アルゴリズムは均質な無線通信ノードで構成された通信ネットワークにおける任意のノードを指定することで実行が可能である。ロボットのIDが取得できるならば、それを指定することにより任意のロボット位置周辺に集合させることができると予想される。今後の予定として、ロボット台数を増やし、より広範囲な初期分布からの集合行動の検証を行いたい。

## 参考文献

- [1] Brambilla, M., Ferrante, E., Birattari, M., Dorigo, M., "Swarm Robotics: A Review from the Swarm Engineering Perspective," *Swarm Intelligence*, Vol.7, No.1, pp.1-41, 2013.
- [2] Trianni, V., *Evolutionary Swarm Robotics*, Springer-Verlag 2008.
- [3] "スワーム：群れの創発的挙動生成", 計測と制御, Vol.52, No.3, pp.179-276, 2013.
- [4] Sahin, E., "Swarm Robotics: From Sources of Inspiration to Domains of Application," *Lecture Notes in Computer Science*, Vol.3342, pp.10-20, 2005.
- [5] Bahçeci, E., Soysal, O., Şahin, E., "A Review: Pattern Formation and Adaptation in Multi-Robot Systems", Technical Report CMU-RI-TR-03-43, CarnegieMellon University, 2003.
- [6] Brooks, R., "A Robust Layered Control System for a Mobile Robot", *IEEE Journal of Robotics and Automation*, Vol.2, No.1, pp.14-23, 1986.
- [7] Nolfi, S., Floreano, D., "Evolutionary Robotics: The Biology, Intelligence, and Technology of Self-Organizing Machines", MIT Press, 2000.
- [8] Garnier, S., Jost, C., Jeanson, R., Gautrais, J., Asadpour, M., Caprari, G., Theraulaz, G., "Aggregation Behaviour as a Source of Collective Decision in a Group of Cockroach-like-robots", In *Lecture notes in Computer Science: Vol. 3630. Advances in Artificial Life*, Springer, pp.169-178, 2005.
- [9] Soysal, O., Bahçeci, E., Şahin, E., "Aggregation in Swarm Robotic Systems: Evolution and Probabilistic Control", *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, Vol.15, No.2, pp.199-225, 2007.
- [10] Gauci, M., Chen, J., Li, W., Dodd, T. J., Groß, R., "Self-Organised Aggregation without Computation", *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 33, No. 9, pp. 1145-1161, 2014.
- [11] 片田喜章, 西口晃央, 森脇和也, 渡壁亮介, "レヴィフライトを用いたスワームロボットネットワークのターゲット探索", *ロボティクス・メカトロニクス講演会'15, 講演論文集 CD-ROM, 2A1-K06*, 2015.
- [12] 片田喜章, "スワームロボットによるターゲット探索 - レヴィフライトに関するシミュレーションを用いた考察", *計測自動制御学会 第16回システムインテグレーション部門講演会講演論文集*, pp.47-52, 2015.
- [13] 片岡光留, 片田喜章, 谷島遼馬, "スワームロボットネットワークのターゲット探索 - 個体の損失に対する頑健性の検証", *ロボティクス・メカトロニクス講演会'16, 講演論文集 CD-ROM, 1A1-05a4*, 2016.
- [14] 片田喜章, "スワームロボットによる掃引作業 - レヴィフライトに関するシミュレーションを用いた考察", *計測自動制御学会 第17回システムインテグレーション部門講演会講演論文集*, pp.306-311, 2016.
- [15] 羽田靖史, "ロボットの通信に求められる問題点と要件", *計測自動制御学会 第16回システムインテグレーション部門講演会講演論文集*, pp.2163-2164, 2015.