

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—

Swarm Robotic Networks in Target Detection Problem
-Fault Tolerance for the Loss of Individuals-

○ 片岡光留 (撰南大) 正 片田喜章 (撰南大)
谷島僚馬 (撰南大)

Hikaru KATAOKA, Setsunan University
Yoshiaki KATADA, Setsunan University, katada @ setsunan.ac.jp
Ryoma TANISHIMA, Setsunan University

One approach in swarm robotics is homogeneous system which is embedded with sensing, computing, mobile and communication components. Such a system enhances the potential to be robust, scalable and flexible. In our previous study, we confirmed that Lévy flight is useful for an exploration strategy of swarm robotic network in a target detection problem. This study investigates the robustness of swarm robotic network in the target detection problem, where robustness is the ability to cope with the loss of individuals.

Key Words: Swarm Robotics, Fault Tolerance, Wireless Communication Networks, Target Detection Problem, Lévy Flight

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、これまでに分散協調的な探索、搬送、囲い込み、形態形成、隊列の形成・維持といったタスクが取り扱われてきた [1]。本研究では、協調探索に分類される、ターゲット探索 [5] をタスクとして取り扱う。ここでは、無線ネットワークによって通信可能な複数ロボットを用いてターゲットの探索を行う。あるロボットがターゲットを発見すると、その情報は無線ネットワークを介して基地局に送られる。このとき、ターゲットを検出したロボットから基地局までは無線ネットワークによって「連結 [6]」されている必要がある。以降、SR により構成される無線ネットワークを SR ネットワークとよぶ。

我々の研究グループでは、粒子のつながり方を扱うパーコレーション理論に基づき、無線通信可能距離に対して群れロボットの密度に SR ネットワークの連結性を満たす臨界値が存在することを計算機実験で確認している [7]。さらに、SR ネットワークの連結性を考慮したロボットの台数と無線通信装置を使用し、実環境においてターゲット探索の実機実験を行っている [8]。文献 [8] では、探索アルゴリズムとしてランダムウォークとレヴィフライト [9] を実装し、ターゲット探索におけるタスク達成率を比較した。その結果、移動距離が一定なランダムウォークに対し、移動距離が可変なレヴィフライトが圧倒的に優位であることを確認した。また、文献 [10] ではレヴィフライトの移動距離を決定する確率密度関数のパラメータの効果をターゲット探索に関する計算機実験において調べている。本稿では、先に述べた特性の 1 つである頑健性、つまり、個体の損失に対処するスワームシステムとしての能力を計算機・実機実験において検証する。

2 レヴィフライト

本研究でははじめに述べたようにターゲット探索を扱う。ここでは、探索実行以前に環境に対する知識が全くない状況を想定している。この場合の一般的な探索行動としてランダムウォークがある。ランダムウォークの中でもブラウン運動として扱われるものが一般的である。一方、ランダムウォークの 1 つで、移動距離がレヴィ分布とよばれる確率密度関数にしたがう、レヴィフライト (Lévy flight [9]) が知られており、レヴィ分布は以下の式で表される。

$$L_{\alpha, \gamma}(w) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} e^{-\gamma q} \cos(wq) dq, \quad \gamma > 0, w \in R \quad (1)$$

ここで、 γ は分布の大きさを決めるパラメータであり、 α は分布の形状を決めるパラメータで $0 < \alpha < 2$ の値をとる。(1) 式は $\alpha = 1$ のときにコーシー分布、 $\alpha \rightarrow 2$ のときにガウス分布と等価になる。この確率密度関数は $w = 0$ に関して対称であり、無限大の 2 次モーメントをもつことが特徴である。本研究では文献 [11, 12] に従い、 $\gamma = 1$ とする。

レヴィ分布に従う確率変数を生成するアルゴリズムが提案されている [11]。以下にその生成式を示す [11, 12]。

$$v = \frac{x}{|y|^{\frac{1}{\alpha}}},$$

$$w = \{(k(\alpha) - 1)e^{-\frac{|v|}{c(\alpha)}} + 1\}v \quad (2)$$

ここで、 x と y はガウス分布に従う独立な確率変数であり、 $k(\alpha)$ と $c(\alpha)$ は α に依存し、 (α, k, c) の各値の組合せは文献 [11] で与えられている。

第 4.2 節で詳細を述べるが、本研究では (2) 式を用いて移動ロボットの直進移動時間を決定する。したがって、(2) 式の $w \geq 0$ の範囲だけを必要とするため、(2) 式中の x を $|x|$ として計算する。これにより、(1) 式の値は $w > 0$ の範囲で理論上 2 倍になる。

文献 [8] では、移動距離の決定に使用される確率密度関数は (1) 式の近似を用いていたが、本研究では近似式ではなく、文献 [10] で得られた知見を参考に、(2) 式 (ただし、 $\alpha = 0.8, k = 0.795112, c = 2.483$) を用いて移動距離を決定する。

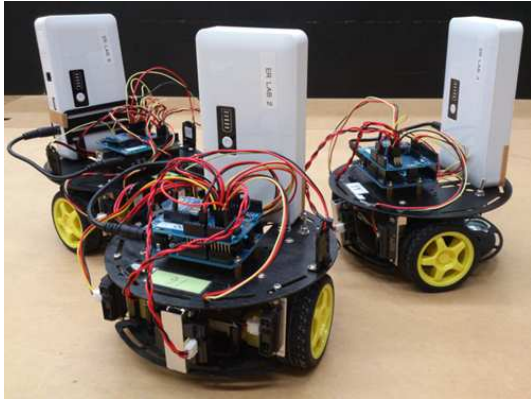


Fig.1 Setup for swarm mobile robots

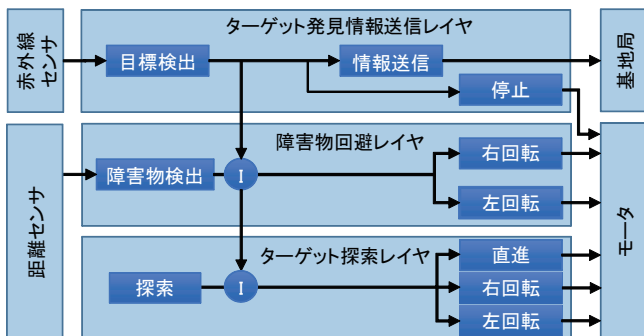


Fig.2 Layer structure of SSA

3 スwarm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、距離センサ(赤外線:前方に4個)、ターゲット検出センサ(赤外線:両端に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)を搭載する。距離センサの計測可能距離は約300mm、ターゲット検出センサの計測可能距離は約200mm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。また、本研究ではターゲットとして取扱いが容易なことから、ロボカップジュニア・サッカーに使用される赤外線発光ボール(直径74mm)を使用する¹。

4 コントローラ

4.1 サブサンプリングアーキテクチャのレイヤ構造

図2にswarmロボットに実装するサブサンプリングアーキテクチャ(SSA)[13]のレイヤ構造[8]を示す。本研究で扱うタスクを実現するSSAは、ターゲット発見情報送信レイヤ・障害物回避レイヤ・ターゲット探索レイヤの3層から構成される。図中のIは抑制を表し、上位のレイヤが活性化する場合、下位のレイヤを抑制することを表している[13]。各レイヤはモジュールの結合により構成されている。

各レイヤの動作を説明する。ターゲット探索レイヤの探索モジュールは後述する探索アルゴリズムにより、直進モジュール・右回転モジュール・左回転モジュールのいずれかに実行指令信号を送る。障害物回避レイヤの障害物検出モジュールは3節で述べた距離センサからの入力値をもとに、左回転もしくは右回転モジュールに実行指令信号を送り、障害物を回避する。ターゲット発見情報送信レイヤの目標検出モジュールは3節で述べた左右いずれかのターゲット検出センサの出力値がしきい値を上回った場合に停止モジュールと情報送信モジュールに実行指令信号を

¹波長が異なるため距離センサが発する赤外線とは識別可能である。

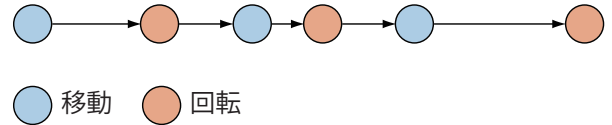


Fig.3 Transition between move phase and rotate phase in navigation

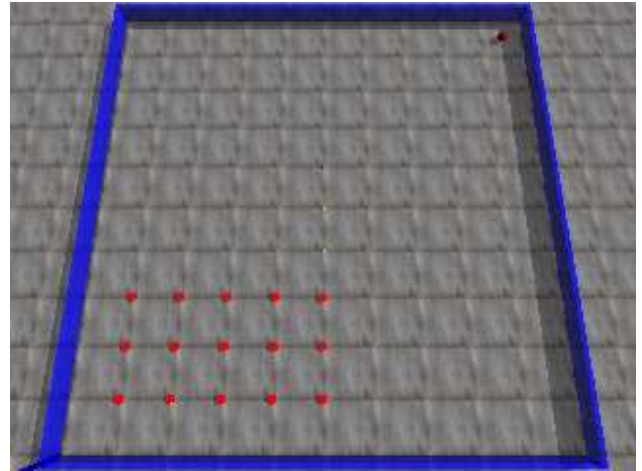


Fig.4 Setup for computer simulation

送る。情報送信モジュールはSRネットワークを介して基地局へターゲット発見情報を送信する。

4.2 探索アルゴリズムの実装

本研究で用いる左右二輪独立駆動型移動ロボットの仕様では、回転を伴う移動(一般的には旋回と言う)において回転方向をランダムにすること、移動距離を一定にすることを同時にすることがその構造上難しい。そこで、回転フェーズと移動フェーズに分けて設定する(図3)。移動フェーズでは、ロボットは左右モータを回転させ前進する(図2における直進モジュール)。移動フェーズにおける1ステップの実行時間は実機における予備実験の結果に基づいて6秒に設定した。移動フェーズ毎の移動ステップ数は2節で述べたレヴィ分布によって決定され、さまざまな値をとる。回転フェーズでは、{45, 90, 135}[°]のうちいずれかの角度と回転方向(時計回り, 反時計回り)をランダムに選択し、あらかじめ測定しておいた、おおよそ、その角度に回転するであろう実行時間でその場で回転する(図2における左右回転モジュール)。また、移動フェーズと回転フェーズを交互に選択する(図3)。

5 ターゲット探索計算機実験

5.1 実験環境

文献[10]の設定と同様に、壁に囲まれた正方形を実験環境とする(図4)。図4の左下に無線通信基地局(以下、基地局)の設置を仮定する。本実験は計算機実験のため、実際には基地局との通信を行わないが、SRネットワークの連結性のチェックに基地局の位置情報が必要となる。また、図4の右上(基地局の対角線上)に3節で述べたターゲットである球を設置する。swarmロボットの初期位置は基地局近傍とし、図4の左下とする。

5.2 ロボットモデル

本計算機実験では、3節で述べた移動ロボットを動力学シミュレータODEを用いてモデル化する。センサの計測可能距離も3節と同じ値に設定する。

5.3 実験設定

本swarmロボットのタスクは、所定の時間内にターゲットを見つけ、ネットワークを介して基地局にその発見情報を送信することである。したがって、タスクの達成にはターゲットの発見とネットワークの連結性を同時に満たす必要がある。

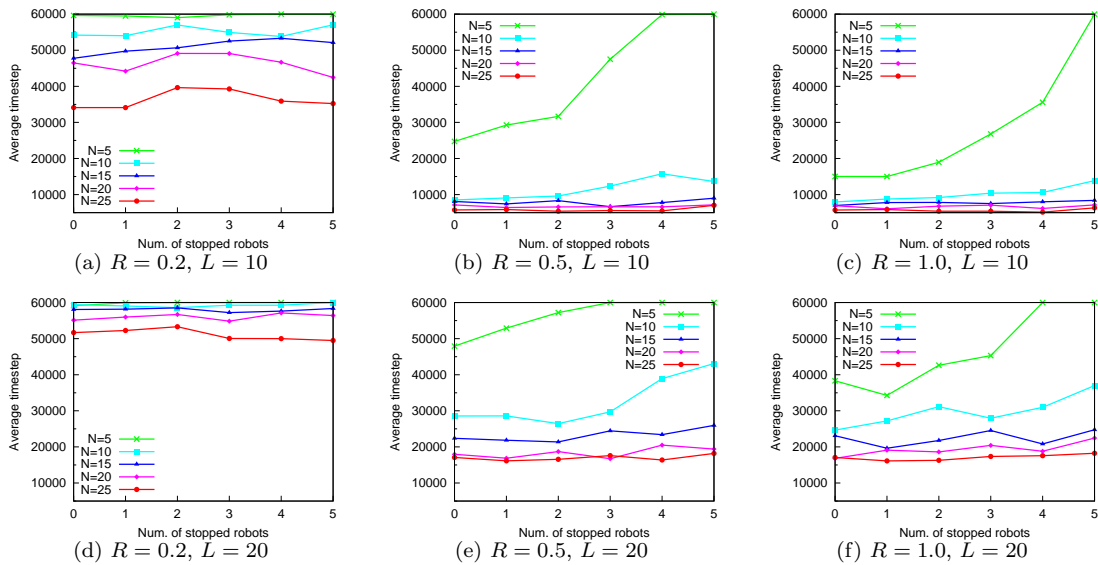


Fig.5 Average time to achieve the task for each N and the number of stopped robots

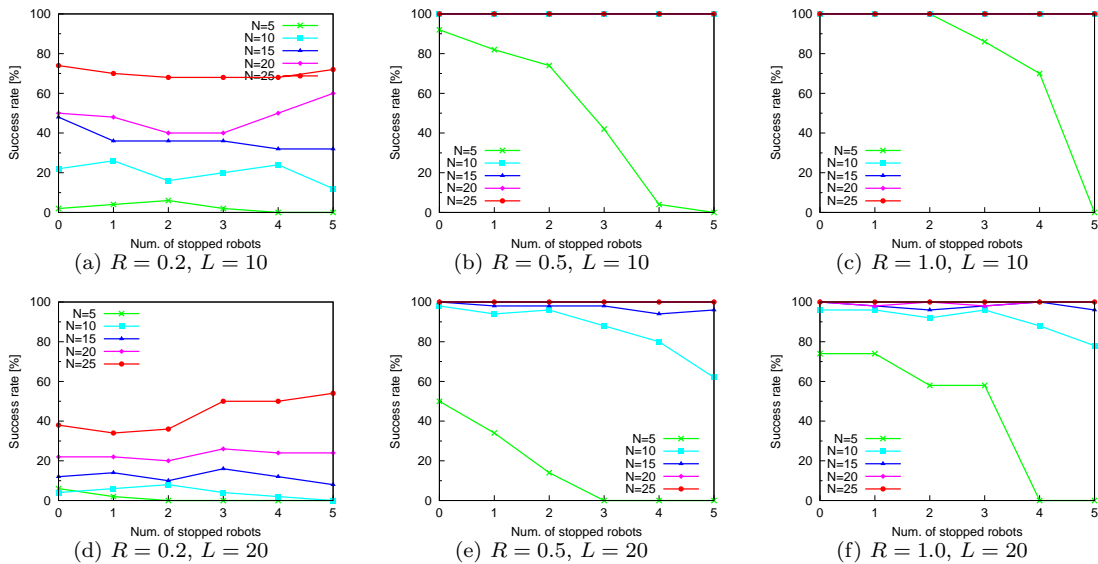


Fig.6 Success rate for each N and the number of stopped robots

探索アルゴリズムとして2節および4.1節で述べたレヴィフライトをターゲット探索レイヤ(図2)に実装したSSAを採用する。正方形環境の一辺の長さを $L \in \{10, 20\}m$ とし、 L に対する無線の通信可能距離の相対値を $R \in \{0, 2, 0.5, 1.0\}$ とする。なお、無線の通信可能範囲は半径 R の円を仮定し、幾何学計算だけで連結性を判定する。文献[10]では、上述と同設定で通信可能距離 R が小さく、ロボット台数が少ないほど、タスク達成率が低下し、タスク達成時間も遅くなることを確認している。また、 L が大きいときにこの傾向は顕著であった。この結果を踏まえて、本研究における目的は1節で述べたようにスワームロボットの頑健性を検証することにある。そのため、故障を模擬し、実験開始5分後に D 台のロボットを停止させる。実験開始時のロボットの台数(初期ロボット台数)を $N \in \{5, 10, 15, 20, 25\}$ と変化させ、各 N に対して停止ロボット台数を $D \in \{1, 2, \dots, 5\}$ と変化させて実験を行う。なお、 N 台のうち停止させる D 台はあらかじめ実験開始前にランダムに決定しておく。タスクはSRネットワークを介して基地局と連結している任意のロボットがターゲットを発見するか、1800秒(30分)経過した場合に終了とする。各実験の試行は各ロボットの初期姿勢を変えて50回行う。

5.4 実験結果

各 (R, L) に対する平均タスク達成時間(シミュレーションのステップ数。1ステップは0.03sに設定)およびタスク達成率を図5と図6にそれぞれ示す。各グラフは横軸に停止ロボット台数 D をとり、初期ロボット台数 N を変えた結果を示している。 $N=5$ の場合および $(R, L) = (0.5, 20), (1.0, 20)$ のときの $N=10$ の場合を除いて、各 (R, L) において同じ N の値で比較した場合、停止ロボット台数の変化に対し大きな差は見られない。文献[10]で確認された結果と同じように、 R が小さく、または、 L が大きいときタスク達成時間・タスク達成率ともに性能が悪くなる。

$N=5$ の場合の性能が悪いのはある意味当然である。その理由は、初期ロボット台数5台に対し、停止ロボット台数を $1 \rightarrow 5$ と変化させることで、環境で稼働し続けるロボット台数は極端に少なくなるからである。とくに $(R, L) = (0.2, 10), (0.2, 20), (0.5, 20)$ の場合では、数台が停止すると、環境で稼働しているロボットだけでは基地局との無線の連結を保つことが難しいため、ターゲットを発見したとしても基地局にその情報を送れないことが起き、タスク達成率はほぼ0となる(図6(a), 図6(d), 図6(e))。

6 ターゲット探索実験

6.1 実験環境

本実験は摂南大学寝屋川キャンパス1号館6階の廊下を環境とした(図7の黄色部分)。廊下と隣接する部屋としては、製図室・学生実験室などがある。図7の右上に各ロボットに搭載した無線通信装置と同じXBee (coordinatorとして設定)をPCに接続し、無線通信基地局(以下、基地局)として設置する。また、図の左下にターゲットである赤外線発光ボール(3節参照)を設置する。スワームロボットの初期位置は基地局近傍とし、図の右下とする。本環境の特徴として、ターゲットと基地局の間の見通しが不可能であり、また、直接通信も不可能という点が挙げられる。

6.2 実験設定

本タスクは5節と同様に、基地局と直接通信が不可能な距離(約80m先)にあるターゲットを見つけ、基地局にその発見情報を送信することである。本環境では予備実験の結果、XBeeの仕様から算出される通信可能距離(45m)よりも長い距離(54m)で通信可能であることがわかっている。本環境では初期ロボット台数を $N = 15$ として実験を行った。停止ロボットの設定は5節と同じとする。タスクはロボットがターゲットを発見し基地局にその情報を送信するか、1800秒(30分)経過した場合に終了とする。探索アルゴリズムとして5節と同様にレヴィフライトを実装したSSAを採用する。各実験の試行回数は10回とする。

6.3 実験結果

図8に停止ロボット台数に対するタスク達成率および平均タスク達成時間を示す。停止ロボット台数 $D = 0$ の場合のタスク達成率は90%であり、 $D = 1, 3$ の場合に減少、 $D = 4, 5$ の場合に増加している。一方、タスク達成時間は $D = 0$ の場合が最も遅く、数台のロボットが停止する場合の方が早い。

この結果から停止ロボット台数が多い方が良い結果を示す。これは本環境における $N = 15$ 台が本タスクに対し冗長であることを示す。では、何台が適切かという話になるが、個々の環境に対して適切なロボット台数はいくつかという議論は本稿の趣旨ではない。提案するスワームロボットが「数」に関して冗長であり、個体の損失に対し頑健性を確認できたことが重要だと考える。5.4節の結果についても同様のことがいえる。

6.4 考察

停止したロボットが動作を継続しているロボットに与える影響を調べるために、停止ロボット台数分をあらかじめ差し引いた初期ロボット台数で追加実験を行った。初期ロボット台数 $N = 10$ 、停止ロボット台数 $D = 0$ とし、上記実験と同じように10試行を行った。初期ロボット台数 $N = 15$ 、停止ロボット台数 $D = 5$ の場合と比較した結果を表1に示す。どちらもタスク達成率は100%であり、タスク達成時間に大きな差は見られない。このことから、停止したロボットが動作を継続しているロボットに悪い影響を与えていないことが確認できた。

7 おわりに

本稿では無線通信を用いたSRネットワークによるターゲット探索に関する計算機実験および実機実験を行い、個体の損失に対するスワームロボットの頑健性を確認した。今後、囲いのない開放空間への拡張を行っていきたい。

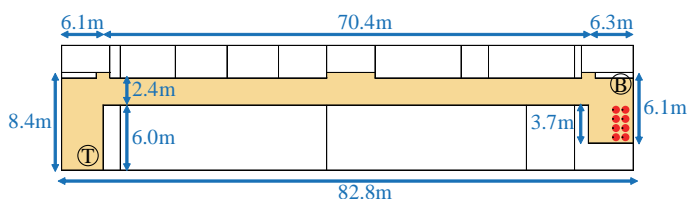


Fig.7 Setup for target detection problem in the real environment (B: base station, T: target)

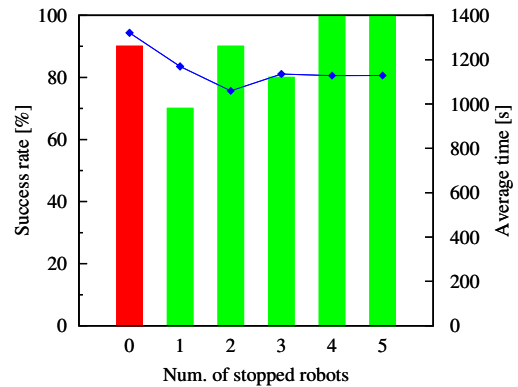


Fig.8 Success rate and average time for each number of stopped robots

Table 1 Comparison between the trials with and without stopping the robots

初期台数 (停止台数)	$N = 15$ (5)	$N = 10$ (0)
平均タスク達成時間 [s]	1129	1111
タスク達成率 [%]	100	100

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*, Volume 3342/2005, pp.10-20, 2005.
- [5] 杉山久桂, 辻岡哲夫, 村田正, "ネットワーク化された群ロボットにおける被災者発見システム", *情報処理学会論文誌*, Vol.46, No.7, pp.1777-1788, 2005.
- [6] Li, J., Andrew, L.L.H., Foh, C. H., Zukerman, M., Chen, H.H., "Connectivity, Coverage and Placement in Wireless Sensor Networks," *Sensors*, Vol.9, No.10, pp.7664-7693, 2009.
- [7] 西口晃央, 片田喜章, "パーコレーション理論を用いたスワームロボットネットワークの連結性—通信距離とロボット数に関する考察—", *ロボティクス・メカトロニクス講演会'14*, 講演論文集 CD-ROM, 2A2-X06, 2014.
- [8] 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.
- [9] Lévy, P., "Theorie de l'Addition des Variables Aleatoires", Gauthier-Villars, 1937.
- [10] 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", 第16回計測自動制御学会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.
- [11] Mantegna, R.N., "Accurate Algorithm for Numerical Simulation of Lévy Stable Stochastic Processes," *Physical Review E*, Vol. 49, No. 5 pp.4677-4689, 1994.
- [12] Lee, C-Y. and Yao, X., "Evolutionary Programming Using Mutations Based on the Lévy Probability Distribution," *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, Vol.8, No.1, pp.1-13, 2004.
- [13] 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.