レヴィフライトを用いたスワームロボットのターゲット探索 最小移動量とターゲット分布に関するシミュレーションによる性能検証

Swarm Robots Using Lévy Flight for Targets Exploration -Computer Simulation for Performance on Minimum Movement And Distribution of Targets-

正 片田 喜章 (摂南大)

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

This study tackles the task for swarm robotics where robots explore the environment to detect many targets. When a robot detects a target, the robot must be connected with a base station via intermediate relay robots for wireless communication. In our previous results, we confirmed that Lévy flight outperformed the usual random walk for exploration strategy in real robot experiments. This paper investigated the performance of Lévy flight varying minimum movement in navigation through a series of computer simulations. The results suggest that the search efficiency of Lévy flight has an optimal value for minimum movement and the overall target detection rate was not significantly different between environments with uniformly and non-uniformly distributed targets.

Key Words: Swarm robotics, Navigation, Mobile robots

1 緒言

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.このアプローチでは各ロボットに指示を出す監督 的なエージェントの存在を前提としないため,スワームの群れ行 動は各ロボットの局所的相互作用から必ず創発的に生成されるこ とになる.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]. 我々の研究グ ループでは,探索行動の中で協調探索に分類される,ターゲット 探索をタスクとして取り扱ってきた.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い,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 [5]. 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.これまで,スワームロボットネットワーク における基地局と各ロボット間の無線通信の連結性 [6] を保証す る通信可能距離とロボット台数の関係について,パーコレーショ ン理論にもとづく計算機実験を行った [7,8].さらに,上述の SR により構成される無線ネットワーク (以降, SR ネットワークとよ ぶ)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 [9,10]. 文献 [9, 10] 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 [11] を実装し,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.

レヴィフライトはレヴィ分布とよばれる確率密度関数に従って 移動距離を決定するランダムウォークの1種である. 文献 [12] で は,レヴィ分布を表すいくつかの数式表現およびパラメータがス ワームロボットネットワークによる探索性能に与える影響につい て計算機実験により考察を行っている.本稿では,文献[12]で 有効と報告されている数式を用いて、レヴィフライトをロボット に実装する際に設定する必要がある最小移動量に関して複数ター ゲットが分布する環境における探索性能を検証する.以下,2節 ではレヴィ分布について述べる.3節では車輪型移動ロボットの モデルについて述べる.4節ではロボットの制御器とレヴィフラ イトの実装法について説明する.5節では複数ターゲット探索に 関する計算機実験を行う.

レヴィフライト 2

探索実行以前に環境に対する知識が全くない場合を想定する。 この場合の探索行動としてランダムウォークが考えられる.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[11]) が知られている

レヴィ分布は w を移動距離として以下の式で表される.

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

文献 [12] では, レヴィ分布を表すいくつかの数式を用いた場 合の性能を比較し,小山ら[13]が用いた式が最も良い探索性能を 示すことを報告している. 文献 [13] では, w ≫ 1 としてレヴィ 分布を近似した次式を移動距離の決定に使用している.

$$L(w) \propto w^{-\alpha} \tag{2}$$

ここで, α は分布の形状を変えるパラメータである.本研究では 文献 [12] [13] に従い,

$$L(w) \equiv w^{-1.2} \tag{3}$$

に設定する.式(3)の分布を図1に示す

4.2節で詳細を述べるが,本研究では(3)式を利用して移動ロ ボットの直進移動時間を決定する.移動方向に関しては,一様分 布に従うものとして扱う.



Fig.1 Lévy distributions



Fig.2 Differential wheeled robots in an ODE simulation



Fig.3 Ray of the distance sensers and the target detection sensers

3 スワームロボット構成

本研究では, 文献 [9, 10] の実験で使用した, 左右二輪独立駆動型の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(図 2).設定を以下に示す.直径 170mm,高さ 75mmの台車に,距離センサ(前方に4個:図3の点線),ターゲット検出センサ(両端に2個:図3の1点鎖線),無線通信装置を搭載する.距離センサの計測可能距離は300mm,ターゲット検出センサの計測可能距離は200mmとする.駆動装置としてモータ2個を用いる.無線通信装置はZigbee 規格を想定し,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と仮定する.

4 コントローラ

4.1 サブサンプションアーキテクチャ

図 4 にスワームロボットに実装するサブサンプションアーキ テクチャ(SSA)[14] のレイヤ構造 [10] を示す.本タスクを実現す 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層から構成されている.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[14].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 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

本研究で想定して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と,一定距離を移動することを同時に行



Fig.4 Layer structure of SSA



Fig.5 Transition between move phase and rotate phase in navigation

うことがその構造上難しい、そこで,移動フェーズと回転フェーズを交互に選択する(図 5)、移動フェーズでは,ロボットは任意の移動時間(後述)の間に左右モータを回転させ前進する(図 4 における直進モジュール)、文献[12]では,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 秒に設定していた、この値は移動フェーズにおける最小移動量 に相当し,実用上,環境の大きさなどを考慮して適切に設定しなければならない、本研究では,最小移動量を表すパラメータwo を設定し,探索性能に与える影響を検証する、したがって,移動 フェーズ毎の移動時間は2節で述べたレビィ分布により得られ る移動ステップ数とwoの積で決定される、回転フェーズでは, {45,90,135}[°]のうちいずれかの回転角度をランダムに選択し, あらかじめ測定しておいた,その角度に対応する実行時間の間は その場で回転する(図 4 における左右回転モジュール).

5 複数ターゲット探索に関する計算機実験

5.1 実験環境

壁に囲まれた正方形を実験環境とする (図 6(e)).環境の左下 に無線通信基地局 (以下,基地局)1 台の設置を仮定する.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.スワームロボットの初期位置は基地局近傍とし,図の左下方 とする.本研究では文献 [12]の計算機実験設定と同様に,ロボッ トの初期位置付近を除く領域 (図 6(e)右上の白枠内)に T 個の 円柱 (直径 75mm)をターゲットとして設置し,ロボットが発見 した円柱の数を最大数で割った値を発見率として定義しスワーム ロボットの探索性能評価を行う. $T = \{84,168,336\}$ とし,ター ゲットが一様に分布する環境 (84,168,336, uniform:図 6(a),図 6(c),図 6(e))と偏って分布する環境 (84,168, non-uniform:図 6(b),図 6(d))を設定する.

5.2 実験設定

本スワームロボットのタスクは,所定の時間内にできる限り多 くの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,ターゲットの発見時 には発見したロボットと基地局はネットワークを介し,連結され ている必要がある.また,連結性を満たして発見されたターゲッ トは環境から取り除かれるものとする.

探索アルゴリズムとして4節で述べたレビィフライトを実装したSSAを採用する.正方形環境の一辺の長さを20mとし,無線の通信可能距離を20mとする.なお,無線の通信可能範囲は半径20mの円を仮定し,幾何学計算だけで連結性を判定する[6,7,8]. 1節で述べたスワームロボットの定義および文献[7,8]を参考に

No. 19-2 Proceedings of the 2019 JSME Conference on Robotics and Mechatronics, Hiroshima, Japan, June 5-8, 2019



 ${\bf Fig. 6} \,\, {\rm Set \ up \ for \ computer \ simulation: \ distribution \ of \ targets}$

ロボット台数を $N \in \{5, 10, 15, 20\}$ と変化させて, また, 4 節で 述べた最小移動量を表すパラメータを $w_0 \in \{1, 5, 10, \cdots, 30\}$ と 変化させて実験を行う.つまり,確率密度関数によって移動距離 を決定する際に最小移動量が複数ロボットによる探索にどのよう な影響を与えるかを考察する.タスクはすべてのターゲットを発 見するか, 36 万ステップ (3600 秒に相当) 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.

5.3 実験結果

5.3.1 w₀に関する比較

各ターゲット分布に関して, N = 20の場合に w_0 を変えたときの時間経過に対する発見率を図7に示す.すべての w_0 で最終ステップでの発見率はほぼ100%に近づき, w_0 の値で有意な差があるとはいえない. $w_0 = 1$ では発見率の増加(以下,増加率とよぶ)は最も小さいうちの1つとなる. $w_0 = 5$ のときに増加率は最も大きくなる. $w_0 > 5$ の範囲では w_o の値が増加すると増加率は低下する. $w_0 = 10$ では増加率は最も小さいうちの1つとなり,探索の終盤では $w_0 = 1$ よりも増加率は小さくなっている. w_0 に関する探索性能の傾向は各ターゲット分布に関しても確認できた.



Fig.7 Average detection rate for each time step with N = 20

No. 19-2 Proceedings of the 2019 JSME Conference on Robotics and Mechatronics, Hiroshima, Japan, June 5-8, 2019

5.3.2 各ターゲット分布に関する比較

前節で発見率の増加が最も大きかった $w_0 = 5$ の場合の, 各 N に関してターゲット分布を変えた場合の時間経過に対する発見率を図 8 に示す. T が大きい方が増加率は大きくなっている.本実験設定ではターゲットの重なりは想定していないため, 一様な分布で T が大きいとターゲットは環境に対し相対的に広く分布する.そのため, ロボットの初期位置に近いターゲットも増えることで増加率は若干大きくなる.同じ N では一様な分布の方が偏った分布の場合よりも発見率の増加は大きくなっている. 偏った分布ではロボットの初期位置よりも離れた場所にターゲットが分布しており, この結果も妥当なものだと考えられる. N が大きい方が発見率の増加は大きくなっている.

6 おわりに

本稿では,レヴィフライトをロボットに実装する際に設定す る必要がある最小移動量と複数ターゲットの分布に関して探索性 能を検証した.最終的なターゲットの発見性能に関しては,十分 な時間が経過すれば,各設定に大きな差は見られないことを確認 した.探索効率に関しては,最小移動量に閾値が存在すること, ターゲットが一様に多く分布する方が効率が良いことがわかった. また,ロボット台数が多い方が良い性能を示すことを確認した. 今後,最小移動量を自動的に更新する手法を検討したい.

参考文献

- M. Brambilla, E. Ferrante, M. Birattari, M. Dorigo: Swarm Robotics: A Review from the Swarm Engineering Perspective, Swarm Intelligence, vol.7-1, pp.1–41, 2013.
- [2] V. Trianni: Evolutionary Swarm Robotics, Springer-Verlag, 2008.
- [3] 大倉和博: 特集 スワーム: 群れの創発的挙動生成, 計測と制御, vol.52-3, pp.179–182, 2013.
- [4] E. Şahin: Swarm Robotics: From Sources of Inspiration to Domains of Application, Swarm Robotics. SR 2004, Lecture Notes in Computer Science, **3342** Springer, Berlin, pp.10–20, 2004.
- [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.46-7, pp.1777-1788, 2005.
- [6] J. Li, L.L.H Andrew, C.H. Foh, M. Zukerman, C. Hsiao-Hwa: Connectivity, Coverage and Placement in Wireless Sensor Networks, Sensors, vol.9-10, pp.7664–7693, 2009.
- [7] Y. Katada: Connectivity of Swarm Robot Networks for Communication Range and the Number of Robots Based on Percolation Theory, Proceedings of the 2014 IEEE/SICE International Symposium on System Integration, pp.93–98, 2014.
- [8] 片田喜章:通信距離とノード数に対する無線通信ネットワークの連 結性,計測自動制御学会システム・情報部門学術講演会2015 講演 論文集, pp.1135–1138, 2015.
- [9] 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.
- [10] Y. Katada, A. Nishiguchi, K. Moriwaki, R. Watakabe: Swarm Robotic Network Using Lévy Flight in Target Detection Problem, Artificial Life and Robotics, vol.21-3, pp.295–301, 2016.
- [11] P. Lévy: Theorie de l'Addition des Veriables Aleatoires, Gauthier-Villars, 1937.
- [12] 片田喜章, "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 による探索 - 掃引作業に関する計算機実験を用いた検証", 計測自 動制御学会論文集, vol.54-1, pp.22-30, 2018.
- [13] 小山英朗, 生天目章: Random Walk と Levy Flight に基づく探索 方法の比較, 電子情報通信学会技術研究報告. AI, 人工知能と知識処 理, vol.107-523, pp.19-24, 2008.
- [14] R. Brooks: A Robust Layered Control System for a Mobile Robot, IEEE Journal of Robotics and Automation, vol.2-1, pp.14–23, 1986.



Fig.8 Average detection rate for each time step with $W_0 = 5$