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 -最小移動量の更新則の提案とシミュレーションによる性能検証-_{片田 喜章(摂南大学)}

Swarm Robots Using Lévy Flight in Targets Exploration -Computer Simulation for Performance of Lévy Flight with Updated Minimum Movement-

Yoshiaki KATADA (Setsunan University)

Abstract : 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 with the update method of the minimum movement in navigation through a series of computer simulations. The results suggest that the performance of Lévy flight with the update method fell between the best and worst performance with the fixed values of minimum movement.

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,注目を集めている.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.文献[13]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と複数ターゲットの分布に関 して探索性能を検証した.探索効率に関して最小移動量に 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.本稿では,最小移動量を自 動的に更新する手法を提案し,その性能を計算機実験によ り検証する.

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.節ではレヴィフライトを実装する際の最小移動量を 決定するパラメータに関する自動更新則を提案する.6.節 では複数ターゲット探索に関する計算機実験を行う.

2. レヴィフライト

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



Fig. 1: Lévy distribution

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.

$$L_{\alpha,\gamma}(w) = \frac{1}{\pi} \int_0^\infty e^{-\gamma q^{\alpha}} \cos(wq) dq, \quad \gamma > 0, \ w \in R$$
(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 [14] 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 [14] では, $w \gg 1$ 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][14] に従い,

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

に設定する. (3) 式の分布 $(1 \le w \le 30)$ を Fig.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,一様分布に従いランダムに決定する.

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 (Fig.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: Fig.3の点線), ターゲット検出センサ(両端に2個: Fig.3



Fig. 2: Differential wheeled robots in an ODE simulation



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

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

Fig.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)[15] 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 [15].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



Fig. 4: Layer structure of SSA



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

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う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を交互に選択する (Fig.5).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 (Fig.4 における左右回転モジュール).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 (Fig.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,モータ(車輪)の回転速度を一定に設定しているため に移動フェーズにおける最小移動量を設定することに相当 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. 文献 [13] では, この値を, 最小移動量を 決定するパラメータ wo として設定し,探索性能に与える 影響を検証している.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,厳密にはこれに車輪の角速度 と半径を掛けることで移動量が算出される.

5. 最小移動量の更新則

1. 節で述べたように,レヴィフライトを用いたスワームロボットの探索効率に関して最小移動量を決定するパラ メータ w_0 に閾値が存在する. w_0 の最適値は環境大きさ・ 形状およびターゲット分布に依存することが予想される. この値を適切に決定しなければならない.そのための1つ の方法として, w_0 の値はSRの設計者によって経験と勘に 基づいて決定されるか,望ましい振舞いが得られるまでパ ラメータ調節を行うことが考えられる.我々の研究グルー プはこれまでこの方法を採用してきた.別の方法として, 自動設計という観点からパラメータの自動調節が考えられ る.そこで,探索過程におけるターゲットの発見頻度に基 づく w_0 の更新則を以下のように提案する.

各ロボットにおいて w₀ を次のように更新する.

$$w_0 \leftarrow \begin{cases} w_0 - \Delta w_0, & \text{if } s = 1 \text{ and } w_0 > w_{0\min} \\ w_0 + \Delta w_0, & \text{if } s = 0 \text{ and } w_0 < w_{0\max} (4) \\ w_0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

ここで, $w_{0\min}$, $w_{0\max}$,sはそれぞれ w_0 の下限値,上限値,新しいターゲットを発見したフラグを表す. Δw_0 は1に設定する.文献[13]における先行研究の実験結果を参考に, $w_{0\min} = 1$, $w_{0\max} = 30$ に設定する.各試行における w_0 の初期値を $w_{0\min}$ とする.sを以下のように設定する.

$$s = \begin{cases} 1, & \text{if a new target detected and } \Delta t > 5 \\ 0, & \text{if } \Delta t > 10 \\ -1, & \text{otherwise} \end{cases}$$

ここで, Δt [s] は各ロボットがターゲットを最後に発見してからの経過時間もしくはリセットされてからの経過時間を表し, (4) 式により w_0 が更新されたときにリセットされる.

6. 複数ターゲット探索に関する計算機実験

6.1 実験環境

壁に囲まれた正方形を実験環境とする (Fig.6(e)).各環 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 (Fig.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



(e) T = 336, uniform

Fig. 6: Set up for computer simulation: distribution of targets

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: Fig.6(a), 6(c), 6(e)) と偏って分布する環境 (84, 168, non-uniform: Fig.6(b), 6(d)) を設定する.

6.2 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] を参考にロボット台数を $N \in \{5,15,20\}$ 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を決 定するパラメータの更新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.

6.3 実験結果

ロボット台数 N と各ターゲット分布に関して,時間経過 に対する発見率を Fig.7-9 に示す.比較のために,先行研究 の実験 [13] で得られている w_0 を固定 $(w_0 \in \{1, 5, 10, 30\})$ した結果を併せて示している. N = 5 の場合ではいずれの 設定でも最終ステップでの発見率は 100 % に達しなかっ た. N = 15,20の場合では発見率は100%に達し, w₀の 更新則を用いた場合でも発見率は100%に達した.発見 率の増加(以下,探索効率とよぶ)に関して,更新則を用 いた場合を含めてターゲットが一様に,かつ,多く分布す る方が効率が良いことがわかった.更新則を用いた場合, $w_o = 5 \ge w_0 = 1,30$ に関する探索効率の間の値をとるこ とがわかる.つまり,提案する更新則は,woを固定した場 合に示す最高効率を上回ることはないが,最低効率よりも つねに良い性能を示す.本実験では,試行開始時にすべて のロボットの w₀ を w_{0min} に初期化していた. 多様性を考 慮し,例えば $w_{0\min} \leq w_0 \leq w_{0\max}$ の範囲でランダムに初 期化するという方法も今後考えられる.

7. 結言

本稿では,レヴィフライトをロボットに実装する際に必要な最小移動量を決定するパラメータを自動的に更新する 手法を提案し,その探索性能を計算機実験により検証した. 提案する自動更新則は,十分なロボット台数を使用していれば,最終ステップではターゲット発見率100%を示し, 探索過程では最小移動量を決定するパラメータを固定した 場合の探索効率の最悪値と最良値の間の値を示すことを確 認した.探索効率に関してパラメータを固定した場合の最

良値を優越することはないが,適応的にパラメータを更新 することが可能であり,実用的な手法であるといえる.今 後,最小移動量を決定するパラメータをランダムに初期化 する方法を用いて,提案する自動更新則の探索性能を検証 したい.

参考文献

- [1] 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) V. Trianni:
- [2]"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) E. Şahin: Swarm Robotics: "From Sources of
- |4| 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 Sympo-
- ing of the 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] 片田喜章: "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",ロ ボティクス・メカトロニクス講演会'19講演論文集, CD-ROM, 1P2-H06(2019)
- [14] 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)
- [15] 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. 7: Average detection rate for constant and updating w_0 with N = 5





Fig. 8: Average detection rate for constant and updating w_0 with N = 15

Fig. 9: Average detection rate for constant and updating w_0 with N = 20