非線形力学系に基づくレヴィウォークを用いた クローラ型スワームロボットの屋内ターゲット探索

Swarm Crawler Robots Using Lévy Walk Based On Nonlinear Dynamics for Target Exploration in an Indoor Environment

正 片田喜章 (摂南大) 山下海斗(摂南大)

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

This study tackles the task for swarm robotics where robots explore the environment to detect a target. 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 walk outperformed the usual random walk for exploration strategy in real robot experiments using the small differential wheeled robots. This paper investigated the performance of a new Lévy walk generator, which is recently proposed in biology, for the target exploration problem on robotics through a series of real experiments using the crawler robots. The results suggest that the new Lévy walk, based on nonlinear dynamics, outperformed the one based on probability for search efficiency.

Key Words: Swarm Robot, Autonomous Mobile Robot, Lévy Walk

1 緒言

スワームロボティクス (SR) とよばれる分野 [1, 2] が注目を集 めている.その中でもSahin ら [3] 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 [4]. 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 [5] 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-クにおける基地局と各ロボット間の無線通信の連結性 [5] 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 [6, 7]. 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 [8,9]. 文献 [8,9] では,探索アルゴリズムとしてランダムウォー クとレヴィウォーク [10] 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 レヴィ分布に従って可変なレヴィウォークが圧倒的に優位である ことを確認した.また,文献 [11] ではレヴィウォークの移動距 離を決定する確率密度関数の種類やそのパラメータの効果を複数 ターゲット探索を意識した掃引作業に関する計算機実験において 調べている.我々の研究以外でもレヴィウォークの多くは確率分 布に基づいて議論されてきた.

Abe[13] は生物学的な観点からレヴィウォークが発現する機構 を解明するために,非線形力学に基づく数理モデルを提案し,発 現したレヴィウォークが,ある動物種の移動軌跡と一致すること を確認している.これを移動ロボットの行動規則に組み入れるこ とで,これまで観察されていない振舞いが発現したり,探索性能 が向上するのではないかという期待が本研究の動機となってい る.本稿では,屋内環境であるコの字型をした廊下(長手方向:約 80m)を探索環境とし,上述の非線形力学に基づくレヴィウォー クおよび確率分布に基づくレヴィウォークを実装したクローラ型 スワームロボットの探索性能を実機実験により比較・検証する.

以下,2節ではレヴィウォークについて述べる.3節ではスワームロボットとして使用するクローラ型移動ロボットの構成について述べる.4節ではロボットのコントローラとレヴィウォークの実装法について説明する.5節ではターゲット探索に関する実機実験の設定およびその結果を示す.

2 レヴィウォーク

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,移動距離が一定で,移動方向がランダム に決定されるブラウン運動として知られるものが一般的である. 一方,ランダムウォークの1つであるレヴィウォーク(LW)は, 移動距離がべき分布に従う[10].本節では,べき分布を表すため に従来用いられてきた確率分布に基づくLWと非線形力学系に 基づくLWについて述べる.

2.1 確率分布に基づく LW

LW を表す確率分布はレヴィ分布とよばれ, 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.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.

文献 [11] では、レヴィ分布を表すいくつかの数式を SR の探索 に用いた場合の性能を比較し、小山ら [12] 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 [12] 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.

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

本研究では文献 [11][12] に従い,

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



Fig.1 Lévy distribution

に設定する. (3) 式の分布 $(1 \le w \le 30)$ 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,ランダムに決定する.

2.2 非線形力学系に基づく LW

Abeは,レヴィウォークが示す,べき分布は非線形システムの 臨界現象から生じるという仮説のもと,シンプルかつ決定論的な 数理モデルを構築し,そのダイナミクスを解析している.本稿で 示す本モデルの実装方法はロボティクスの観点から以下の点で魅 力的である.

- LW が発現する過程が初期状態をランダムに決定すること 以外は決定論的である.確率分布としては特殊なレヴィ分 布をソースコードにを記述する必要がない.
- LW を生成する計算コストが低い.
- 移動ロボットに実装するにあたって,モデルに物理的な意味を付与できる.
- LWを実装する際に多く採用される様式である,移動フェーズと回転フェーズに分ける必要がない.これは実装を用意にし,移動ロボットの姿勢制御を陽に必要としない.

数理モデルを以下に示す.非線形システムは内部状態を表す 2 つの変数 $x_t, y_t \in [0, 1]$ をもつ.内部状態は次式で更新される.

$$x_{t+1} = (1-\epsilon)f(x_t) + \epsilon f(y_t)$$
(4)

$$y_{t+1} = (1-\epsilon)f(y_t) + \epsilon f(x_t), \qquad (5)$$

ここで, $\epsilon \in [0.0, 0.5]$ は $x \ge y$ の結合強度を表し,大きいほど互いに影響を及ぼす.また, f は非線形関数を表す.文献 [13] では, $f \ge 0$ として以下のテント写像を採用している.

$$f(x) = \begin{cases} x/r & (x < r) \\ (1-x)/(1-r) & (x \ge r), \end{cases}$$

ここで, r はテント写像の傾きを決めるパラメータを表す. エージェントの移動は上記の内部状態を用いて以下のように決定される.

$$\Delta \theta = c(x_t - y_t) \tag{6}$$

$$\theta_{t+1} = \theta_t + \Delta\theta \tag{7}$$

$$X_{t+1} = X_t + \cos \theta_t \tag{8}$$

$$Y_{t+1} = Y_t + \sin \theta_t, \tag{9}$$

ここで, $c = \pi/\max|x_t - y_t|$ であり, θ, X, Y はエージェントの姿勢と位置を表す.また,エージェントの単位時間ステップあたりの移動量を1としている.文献 [13]では,(7)式のダイナミクスは ϵ の値によって大きく変化することを報告している.つまり, ϵ が小さいときにはプラウン運動を示し, ϵ が臨界点に近いときにはレヴィウォークを示し, ϵ が臨界点以上のときにはほぼ直線運動を示す.r = 0.7のとき, $\epsilon = 0.22$ 付近で臨界現象を示す.本研究でもr = 0.7, $\epsilon = 0.22$ を採用する.

3 スワームロボット構成

本研究では、クローラ型の移動ロボットを採用する (図 2). Nexus robot 社製の台車 $(310 \times 300 \times 110 \text{ mm})$ に,距離セン サ (赤外線:前面に 2 個,左右側面に各 1 個),ターゲット検出セ ンサ (赤外線:前面に 1 個,左右側面に各 1 個),マイクロコント ローラ (Arduino 互換),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.上述の台車には駆動装置として クローラと連結された DC モータ 2 個が内蔵されており,マイ コンに実装されている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.



(a) front view



(b) side view

Fig.2 Setup for a crawler robot

4 コントローラ

4.1 サブサンプションアーキテクチャのレイヤ構造

図3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[9]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[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の無線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.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 ト探索レイヤではLWを実装している.次節で詳細を述べる.

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 Layer structure of SSA



Fig.4 Detail of the target exploration layer for LW_{nd}

```
4.2 探索アルゴリズムの実装
```

4.2.1 非線形力学系に基づく LW

2節で述べたように,非線形力学系に基づくLW(以降,LW_{nd}) は左右二輪独立駆動型の移動ロボットの場合,簡単に実装できる. 車輪の回転速度を以下のように制御する.

$$v_r = \omega_{max} \cdot x \tag{10}$$

$$v_l = \omega_{max} \cdot y, \tag{11}$$

ここで, $v_r \ge v_l$ は左右クローラの回転速度, ω_{max} は最大回転 速度を表し,x, y は (4)(5) 式により決定される.(4)(5) 式は一定 周期 (6[s]) で更新する.この左右回転速度に従ってロボットは移 動することから,結果として (6) 式で表される運動学的な姿勢が 現れる. LW_{nd} 用の探索レイヤを図4に示す.

4.2.2 確率分布に基づく LW

2節で述べた確率分布に基づく LW(以降, LW_{prob})では,回転フェーズと移動フェーズに分けて交互に実行する(図6).移動フェーズでは,ロボットは左右モータを同一速度で回転させ前進する(図5における直進モジュール).このときの回転速度は一定とし,LW_{nd}の ω_{max} と等しい値に設定する.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節で述べたレビ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5における左右回転モジュール).

5 ターゲット探索実機実験

5.1 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の灰色部分).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.

5.2 実験設定

本スワームロボットのタスクは,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.したがって,タスクの達成にはネッ



Fig.5 Detail of the target exploration layer for LW_{prob}



Fig.6 Transition between move phase and rotate phase for LW_{prob}

トワークの連結性 (ターゲットを発見したロボットと基地局間の マルチホップ通信が可能)を同時に満たす必要がある.本研究で は,8台のロボットを用いて実験を行った.タスクはロボットが ターゲットを発見し基地局でその情報を受信するか,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4節で 述べた LW を実装した SSA を採用する.各実験の試行回数は20 回とする.

5.3 実験結果

表 1 に各 LW を用いた場合の結果を示す. どちらの LW も 100%のタスク達成率を示した. 20 試行中の最良値では, LW_{prob} の方が良い値を示すものの, 平均値では LW_{nd} が LW_{prob} よりも良い結果を示す.なお,この2群の平均値の差は有意水準 1%で Mann-Whitney の U 検定を行った結果,有意であることを確認している.図8に LW_{nd} を用いた場合の探索とターゲット発見時の様子を示す.

5.4 考察

LWprob より LWnd の方がターゲット発見に要した時間が短 くなった.その理由として,本実験環境には細くて長い廊下が含 まれ,ターゲットが存在する方向に長距離移動する必要があるこ とが考えられる.細長い廊下で角度の大きい方向転換をすると ロボットが初期位置方向を向いて初期位置側に引き返してくる ことがある.つまり,本廊下では角度の大きい方向転換をしにく い方がターゲットに近づきやすいと考えられる. LWprob は回転 フェーズでその場回転するため方向転換に広いスペースを必要と せず,細長い廊下でも角度の大きい方向転換を行える(図 9(a)). -方,LW_{nd}は旋回しながら方向転換するので,角度の大きい 方向転換を行うには広いスペースを必要とする.本実験環境には LWnd が旋回して角度の大きい方向転換を行えるほどの広いス ペースがない.そのため, LW_{nd} は LW_{prob} に比べてターゲット 方向に進みやすかったと考えられる(図 9(b)).以上の理由より LWnd は LWprob より短時間でターゲットを発見できたと考えて いる.



Fig.7 Setup for target detection problem in the indoor environment (T: target)

trial	LW_{prob}	LW_{nd}
No.1	953	804
No.2	833	402
No.3	832	389
No.4	557	514
No.5	956	709
No.6	916	496
No.7	915	587
No.8	1530	736
No.9	663	263
No.10	648	1244
No.11	1209	472
No.12	547	460
No.13	868	415
No.14	865	558
No.15	644	398
No.16	808	540
No.17	771	306
No.18	210	401
No.19	729	750
No.20	471	689
best	210	263
average	796	557**
worst	1530	1244

Table 1 Time [s] for detecting the target for each LW

6 おわりに

本研究では,屋内環境でクローラ型ロボットを8台使用し,従 来より用いてきた確率分布に基づくレヴィウォークと新しく採 用した非線形力学系に基づくレヴィウォークの探索性能の比較を 行った.本実験を行った細長い廊下を含む環境では,確率分布に 基づくレヴィウォークより非線形力学系に基づくレヴィウォーク の方が高い探索性能を示すことを確認した.今後の展望としては, 非線形力学系に基づくレヴィウォークの実装方法のさらなる検討 およびレヴィウォークを実装したスワームロボットを使用して, より広い屋外環境で複数ターゲット探索を行いたい.

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] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] Y. Katada, "Connectivity of Swarm Robot Networks for Communication Range and the Number of Robots Based on Per-



(a) exploration

(b) detecting the target

Fig.8 Behavior of the robots



Fig.9 Images of the behavior of the robots with each LW

colation Theory," Proceedings of the 2014 IEEE/SICE International Symposium on System Integration, pp.93–98, 2014.

- [7] 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.
- [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] 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.
- [10] P. Lévy, "Theorie de l'Addition des Veriables Aleatoires," Gauthier-Villars, 1937.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] M. Abe, "Functional Advantages of Lévy Walks Emerging near a Critical Point", Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 117(39), pp.24336– 24344, 2020.
- [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.