

計測自動制御学会東北支部 第 281 回研究集会(2013.6.21)

資料番号 281-21

# フェロモン・コミュニケーション型ロボット群の ランダムウォークの最適化

**Random Walk Optimization of Swarm Robots**

**Using Pheromone Communication**

○戸田大貴\*, 藤澤隆介\*\*

○Hiroki Toda\*, Ryusuke Fujisawa\*

\*八戸工業大学 大学院, \*\*八戸工業大学

\*Hachinohe Institute of Technology

キーワード : Swarm Robotics, Pheromone Communication,

Random Walk, Levy Flight,

連絡先 : 〒031-0814 青森県八戸市妙字大開 88 番地 1 号, 八戸工業大学 大学院 工学研究科

戸田大貴, E-mail:m13104@hi-tech.ac.jp

## 1. はじめに

本研究では, 社会性昆虫が行うコミュニケーションのひとつである, フェロモン・コミュニケーションに着目した. フェロモン・コミュニケーションをロボット・システム内の情報共有手段とし応用することで, システムに与えられたタスクを, 効率的に解決することを目的としている.

### 1.1 フェロモン・コミュニケーション

アリやシロアリ, ハチなどは社会性昆虫と呼ばれ, 群れを成して行動している. 群れを成す理由としては採餌効率を高めることによる, 群れ全体の生存可能性の上昇などがある. 個々は比較的単純な知能しか持っていないが, 階層構造などの複雑な社会の形成, 外敵からの攻撃への集団での対応, 効率的な採餌行動など, 複雑な群行動を創発する. このような群行動を行うことができる要因として, フェロモンによるコミュニケーションがあげられる. アリやシロアリの群れは採餌行為を行う際に環境にフェロモンを残す. このフェロモンによってほかの個体と情報共有を行い, 広範囲の探索を可能としている. このようなフェロモンによるコミュニケー

ションは, 巡回セールスマン問題をはじめ様々な分野に応用されている. 本研究ではフェロモンによるコミュニケーションをロボット間の情報共に応用することで自律分散型のロボット・システムを構築している.

### 1.2 Levy walk

空間上にランダムに存在する目標を, 効率的に探索する方法に関して, 多くの分野で研究されてきた. 広い空間を探索する際には, ランダムウォークによる探索よりも Levy walk に基づく探索のほうが効率が良いという結果が報告されている[1]. Levy walk に基づいた探索とは, 前進距離にべき分布を適用した正の履歴をもつランダムウォークである. 簡潔に説明するならば短い距離を前進する回数が多く, 長い距離になればなるほど前進する回数が少なくなっていくランダムウォークといえる. 探索を行っている最中に, 時折極端に長い前進を行うことがあり, この長い前進によって同じ場所を何度も探索する可能性を減らすことができる. そのため, 探索効率を向上させることができる. 自然界においても, アホウドリやミツバチ, アリなどが Levy walk に基づいた探索を行っているとの報告がなされている[2,3,4,5].

### 1.3 研究目的

本研究ではこれまで、ロボット群のフェロモン・コミュニケーションに焦点を当てて研究を進めてきた。そのため、ロボット単体の行動の最適性は無視してきた。ロボットの群行動アルゴリズムの一つとしてランダムウォークを用いている。ランダムウォークでは52%の確率で前進を選択し、16%の確率で、右超信地旋回を選択、同様に16%の確率で左超信地旋回を選択する。また、16%の確率で後進を選択する。この確率は、実験的に試行錯誤の結果導出したものであり、計算機シミュレーションに基づいた結果ではない。個体のランダムウォークが集団の最終的なパフォーマンスに影響を与えることは容易に想像することができる。そこでランダムウォークの前進確率を変更することで、システム全体の採餌効率の向上を図ることを研究の目的とした。

## 2. ロボット・システム概要

### 2.1 ロボット概要

本研究で使用するロボットの概要を説明する。ロボットは、巣を感知するネストセンサ、エタノールを搭載するタンク、機体を動かすバッテリー、他の機体、壁、餌との接触を感知するタッチセンサ、色を判別するカラーセンサ、色を出すフルカラーLED、エタノールを撒くポンプ、機体を動かすモータ、フェロモンとして撒かれるエタノールを感知するアルコールセンサで構成されている。Fig. 1にロボットの構成を示す。

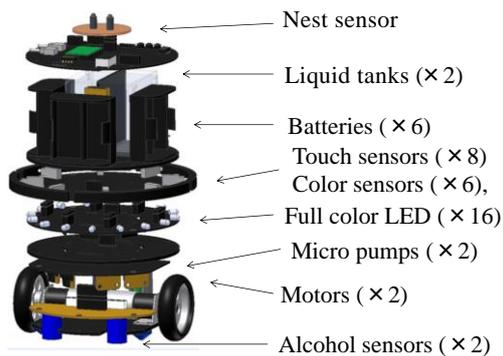


Fig. 1 Configuration of experiment robot

### 2.2 ロボットの採餌アルゴリズム

本研究で用いている採餌アルゴリズムを模式化したものを Fig. 2 に示す

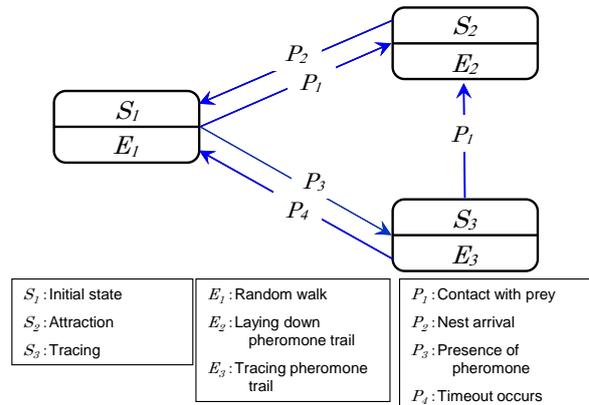


Fig. 2: State transition rule group foraging

各ロボットの初期内部状態は  $S_1$  であり、ロボットはランダムウォーク ( $E_1$ ) を行いながら探索をする。ロボットの内部状態が  $S_1$  から  $S_2$  へ遷移するときのアルゴリズムを説明する。ロボットがランダムウォークを行っている時に知覚標識  $P_1$  が表れるとロボットは餌を知覚し、内部状態を  $S_1$  から  $S_2$  へ遷移する。内部状態が  $S_2$  になるとロボットはトレイル敷設 ( $E_2$ ) を行いながら巣へ帰巢する。その後巣まで近づくと知覚標識  $P_2$  が現れ、ロボットは巣への到着を知覚し内部状態を  $S_2$  から  $S_1$  へと遷移させる。次に内部状態が  $S_1$  から  $S_3$  へ遷移するときのアルゴリズムを説明する。ロボットがランダムウォーク中にフェロモン・トレイルに近づくと知覚標識  $P_3$  が現れ、フェロモンの存在を知覚し内部状態を  $S_1$  から  $S_3$  へと遷移させる。内部状態が  $S_3$  になるとトレイル追従 ( $E_3$ ) を行う。追従中にフェロモン・トレイルから外れてしまうと知覚標識  $P_4$  が現れ、フェロモンを知覚しなくなり内部状態が  $S_1$  へ遷移してしまい、再びランダムウォーク ( $E_1$ ) を行う。フェロモン・トレイルから外れずに追従し餌まで辿り着くと知覚標識  $P_1$  が現れ、内部状態が  $S_3$  から  $S_2$  へと遷移し、トレイル敷設 ( $E_2$ ) を行う。この繰り返しで採餌アルゴリズムは成り立っている。

## 3. 計算機シミュレーション

本研究では、ロボット・システムの構築に実際のロボットに加え、計算機シミュレーションを用いている。計算機シミュレーションの仮想空間を描画したものを Fig. 4 に示す。フィールド上に点在しているものがロボッ

トである。フィールドに巣である Nest と餌である Food を配置し、ロボットの採餌行動のシミュレーションを行うことができる。

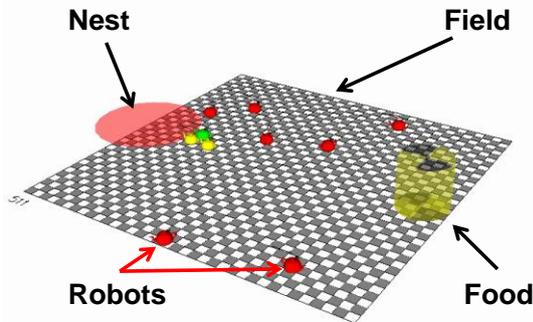


Fig. 4: Simulation space

### 3.1 前進確率の変更

計算機シミュレーションを用いて、ランダムウォークの前進・右超信地旋回・左超信地旋回・後退の確率を変更した場合の採餌効率への影響を検討する。全体のロボットの数は10[体]とし、フィールドサイズは3.6×3.6[m]とする。また、実験フィールド上の Nest と Food は対面に配置する。シミュレーション時間は20分とした。計算機シミュレーションにおける主要なパラメータを Table 1 に示す。

Table 1: Simulation setting

Parameters	Setting
Number of robots	10
Field size	3.6×3.6[m]
Forward probability	0~96[%]

ランダムウォークの確率を変更するに当たり、左右の超信地旋回と後退の確率を等しくすることで、前進確率による影響のみを調査することとした。つまり、前進以外の行動の確率を等しくなるため、前進の確率は0~96%の間を3%刻みで変化することとなる。シミュレーションの結果は採餌回数で出力される。前進確率と採餌回数の関係をグラフ化したものを Fig. に示す。横軸は前進の確率、縦軸には採餌回数の40回平均を表示している。

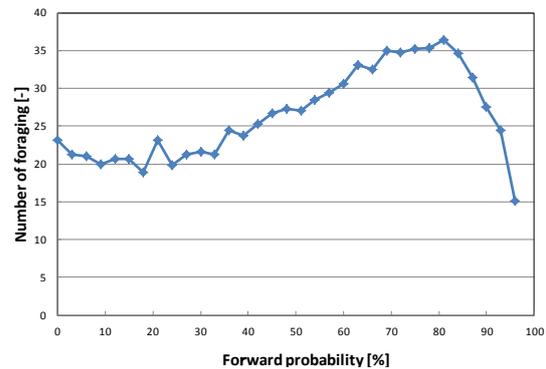


Fig. 3: Simulation result

前進確率が上昇するにつれ、採餌回数も上昇しているのが見て取れる。採餌回数のピークは従来の前進確率よりもかなり高い前進確率となった。従来の結果と、最も良い結果を比較すると、3割以上採餌回数が上昇している。採餌回数が増加した要因として、他個体が敷設したフェロモンを見つけやすくなったことが考えられる。前進の確率が上がることで、連続で前進することが多くなり、結果として線上に敷設してあるフェロモンの上を通過しやすくなる。前進確率が0%でも一定の採餌を行っているが、これは後進によって Food に触れることで採餌を行っていると考えられる。また、前進確率が極めて高い場合採餌回数が極端に低くなっている。フィールドの端に接触した場合、一定距離後退し再びランダムウォークを開始するように設定してあるため、Field の端で何度も往復を繰り返してしまう為だと考えられる。

### 3.2 群れスケールの変更

本研究のロボットは数を増やすことで群れのスケールを大きくすることが可能である。前述の計算機シミュレーションの結果は Robot の総数が10体のものである。10体の群れでの前進確率の適地はかなり高い値となったが、この結果がより大きい集団に適應できるかはわからない。そのため、全体の Robot の数を増やし、計算機シミュレーションを行うこととした。基本的なパラメータは先のシミュレーションと同じとし、ロボットの総数を20・40・60・80[体]でシミュレーションを行う。前進確率も10体の際と同様に0~96[%]の間で変化するものとする。シミュレーションのパラメータは Table 2 にまとめる。

Table 2: Simulation setting for scalability of swarm

Parameters	Setting
Number of robots	20~80
Field size	3.6×3.6[m]
Forward probability	0~96[%]

計算機シミュレーションによって得られた前進確率と採餌回数の関係をグラフ化したものを Fig. 5 に示す. 横軸は前進確率[%], 縦軸には採餌回数を表示している.

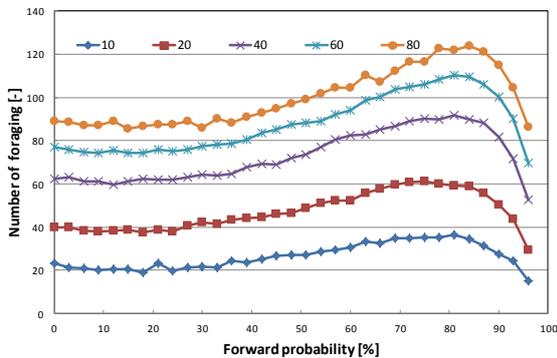


Fig. 5: Simulation result for scalability of swarm

群れのスケールが大きくなった場合でも 70~90%の間で採餌回数が増えている. 最適化前の 52%と比較すると, すべてのパターンで約 2~3 割採餌回数が向上している. ここから, 群れのスケールが変化しても前進確率と採餌回数の関係に与える影響は少ないと言える.

#### 4. 探索面積の検証

先の計算機シミュレーションでは, 前進確率と採餌回数の関係について検証を行った. その際, 採餌回数が増加する要因として, フェロモンを発見しやすくなることを挙げた. しかし, 実際に探索能力が向上しているのを確認するためには, 定量的な数値が必要である. そこで, 計算機シミュレーション内で探索できたフィールドの面積の検証を行うこととした. 検証の対象がフィールド内の探索面積のため, ロボット・システム内のフェロモン・コミュニケーションに関係している部分を省略した. また, フィールド上に Nest と Food を配置しない. 面積に対する個体数

が多い場合, 早期にフィールド上すべてを探索できてしまうことが考えられるため, シミュレーション時間は 2 分とした. その他の主なパラメータは Table 3 に示す. また, 同時にロボット 1 体での探索面積についても検証を行う.

Table 3: Simulation setting for search area

Parameters	Setting
Number of robots	1,10
Field size	3.6×3.6[m]
Forward probability	0~96[%]

計算機シミュレーションの結果は探索できた面積で出力される. 探索面積と前進確率の関係をグラフ化したものを Fig. 6 及び Fig. 7 に示す. 横軸は前進確率[%], 縦軸は探索できた面積[m<sup>2</sup>]を表示している.

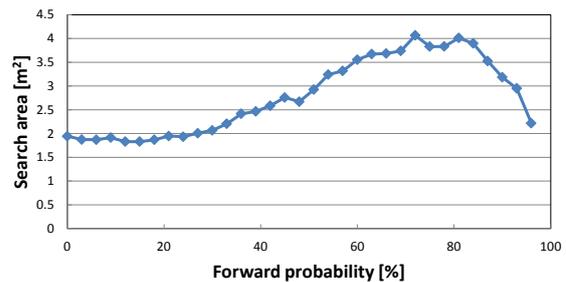


Fig. 6: Simulation result for search area (Robot=1)

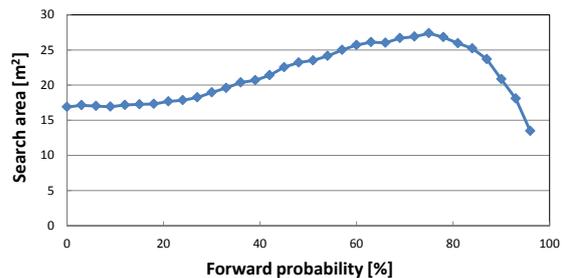


Fig. 7: Simulation result for search area (Robot=10)

前進確率が上昇するにつれて, 探索効率も上昇している. 探索効率の上昇の仕方は採餌効率の上昇の仕方と酷似している. つまり, 前進確率がそれぞれの効率に与える影響はほぼ同一であるといえる.

## 5. 最適値の検証

計算機シミュレーションの結果, 前進確率が高いほど採餌回数が多くなるという結果をだした. しかし, 前進確率のみでは Levy walk を行っているかは判断できない. そこで, 探索行動中の前進の距離と頻度を計測し, そこから導出される近似曲線と Levy walk モデルを比較する.

単体での探索行動をシミュレーションするため, ロボットの数に1 [体]とする. また, 探索時にフィールドの端に触れることでの後退などの防ぐために, 36×36[m]の十分な広さのフィールドでシミュレーションを行う. 探索行動に影響を及ぼすフェロモン・コミュニケーションに関する機能は省略し, Nest と Food は配置しない. シミュレーションのパラメータをまとめたものを Table 4に示す.

Table 4: Simulation setting

Parameters	Setting
Number of robots	1
Field size	36×36[m]
Forward probability	81[%]

計算機シミュレーションの結果は時間ごとのロボットの移動の状態出力される. 出力された値を分析し, 前進した距離とその回数をまとめる. 前進距離とその頻度の関係を図示したものを Fig. 8 に示す. 横軸には前進した距離[m], 縦軸は頻度を表す. また, グラフ内の黒線はプロットされた点の近似曲線を表している.

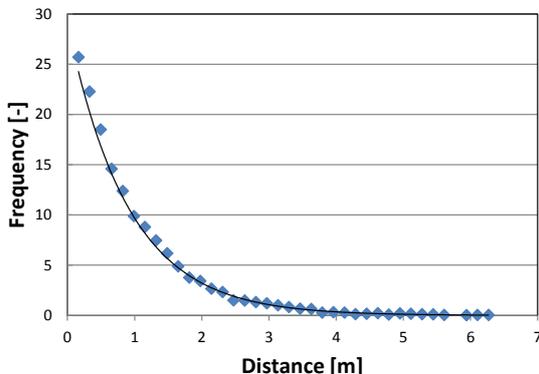


Fig. 8: Simulation result distribution

分布から, 短い距離の前進ほど回数が多く, 前進距離が長くなるにつれてその回数は減っていくのが見て取れる. 前進確率の分布から頻度を前進距離  $d$  の関数として近似式を導出した結果,(1)式ようになった.

$$P(d) = 29.086d^{-1.1} \quad (1)$$

一般に Levy walk モデルでの前進距離  $d$  の分布は (2)式の関数で定義される.

$$P(d) = d^{-\lambda} \quad (2)$$

ここで  $\lambda$  はべき指数であり,  $1 < \lambda < 3$  の範囲を取る. (1)式の傾きは(2)式に沿っているため, この探索行動は Levy walk に基づいた探索だと言える.

## 6. 結論

計算機シミュレーションの結果より, 本研究のロボット・システムのランダムウォークの前進確率従来の前進確率よりもかなり高い値であることを結論づけた. また, この前進確率の値は集団のスケールによらず不変であり, Levy walk に基づいた探索行動であることがわかった. 今後, このシミュレーションの結果が現実のロボット・システムにおいても適応されるかどうかを検証するため, 実機による実験を行っていく予定である.

- [1] 小山 英朗 生天目 章. (2008). Random Walk と Levy Flight に基づく探索方法の比較. 情報処理学会研究報告. 2008 年(No.20), pp.19-24
- [2] FREDERIC BARTUMEUS. (2005). ANIMAL SEARCH STRATEGIES: A QUANTITATIVE. Ecology, Vol.86(No.11), pp.3078-3087.
- [3] G. M. Viswanathan, S. V. (1999). Optimizing the success. NATURE Vol.401, pp.911-914.
- [4] G.M.ViswanathanAfanasyev, Sergey V. Buldyrev, E. J. Murphy, P. A. Prince, & H. Eugene StanleyV. (1996). Lévy flight search patterns of wandering albatrosses. NATURE Vol.381, pp.413-415.
- [5] HodgmanSean. Levy Flight Searches in the Foraging Behaviour of Ants. wwwrphysse.anu.edu.au..