

# 他と作用するエージェントの曖昧な探索

## Ambiguous Exploration Based on Local Interactions

崎山朋子<sup>\*1</sup>  
Tomoko Sakiyama

郡司ぺぎオ幸夫<sup>\*2</sup>  
Yukio Pegio Gunji

<sup>\*1</sup> 神戸大学  
Kobe University

<sup>\*2</sup> 神戸大学  
Kobe University

We investigated whether Levy-like walk was driven from agents' interactions. We released ten Japanese Carpenter ants (*Camponotus japonicus*) into an acrylic bowl and obtained each forager's trajectory. We found that ants showed power-law distributed step lengths. Therefore, we conducted 1-dimensional random walk simulation in which multiple agents changed their directional rule intervals based on local other agents' movement directions and obtained that simulated agents also showed power-law distributed step lengths even though they obeyed Brownian motion initially.

### 1. はじめに

多くの生物にとって、効率的な探索を実現することは必要不可欠である。ランダムウォークアルゴリズムは、その意味において、動物のランダムサーチングにも広く利用されている[1-7]。レヴィウォークは低密度の資源探索に他のアルゴリズムよりも最適であるという理由から、昔から議論されている[8]。しかしながら、実際の動物の振る舞いは、レヴィ・ブラウンを文脈によって上手く調整しているように思われる[9-11]。しかしながら、アルゴリズムを設定するうえで、レヴィ分布仮定なしでのレヴィライクな振る舞いの実現に答えている研究は少ないように思われる[12]。エージェント自体が自らの探索軌跡を見渡すことができない以上、どのように移動すれば、結果的に効率よく資源を見つけられるのかは、局所的情報に依拠しなければいけない[13]。ミツバチやアリなどの社会性昆虫や、群れを形成する生き物にとって、自らの動きと他個体の動きというのは、独立したものであるのだろうか。社会的情報は、エージェントにとって、どこか知らない利益へ導いてくれるものである。しかしながら、追従に徹してしまうと、新たな資源の発見に乏しくなってしまう。外的なノイズを導入することによって、この問題は解決され、探索をある程度維持できると考えられている[14]。すなわち、受動的情報への従属からの解放である。外的なノイズの役割は、レヴィ分布を仮定しなくても、ある程度超拡散的性質を維持できるランダムウォークアルゴリズムを形成するうえでも大切である。とはいうものの、外的なノイズに依存してしまう以上、それは形をかえて、ベキ則の仮定が必要になってくる[15]。他の動き、社会的情報への隷属は、今まで従ってきた自らの規則・記憶から、外的情報への切り替えにすぎず、区別されたものを適度に行き来するだけである。他個体の動作に、“どこか遠くに導いてくれるもの”という意味を見出したとしても、場所に対する言及、すなわち要素の生成は達成できていない。曖昧な到達点、内的なゆらぎの形成は、他の個体が有した情報を自らの規則に組み込むことで、ある程度達成されると考えられる。そのため、本論文では、他個体の動きを予測しつつ、自らの規則を補正するエージェントのランダムウォークアルゴリズムを構築することで、上記の問題解決へアプローチする。

### 2. 蟻歩行実験及びシミュレーション

#### 2.1 蟻歩行実験

クロオオアリ(*Camponotus japonicus*)のワーカー10匹をアクリルボウル(直径 27cm)に入れ、上からカメラ(Panasonic, HDC-TM700)で撮影した。視覚的情報は完全に排除した。この状況で、ボウル内を自由に運動させた。撮影は1時間行い、1秒1フレームで解析を行った。クロオオアリのワーカーは単独でforagingをし、たまにタンデムランニングで数個体を動員することが知られている。化学フェロモンによる大規模動員は行わないので、本実験に用いた。

#### 2.2 1次元シミュレーションモデル

ここでは、1次元上で大きさ1のステップで移動するエージェント歩行モデルを構築した。今回は、個体数を10とし、フィールド長40内にランダムに初期位置を与えた。それぞれのエージェントは毎時、乱数 $R(t)$ (0.00~1.00)を与えられるとする。右、あるいは左のどちらに動くかは、乱数値と下記に定められる $I_0$ 及び $I_1$ で決定される。これら二つの方向を与える規則は、初期設定としてはブラウン運動として与えられるものとする。さらに、各個体に1,2,3の値を閾値数として割り振る。この閾値数よりも、周囲の個体数が上か下かで、下記に記す規則変更の補正幅を調整する。

$$x(t+1) = x(t)-1, \text{ if } R(t) \in I_0(t); \\ = x(t)+1, \text{ if } R(t) \in I_1(t);$$

$$I_0(0)=[0.0, 0.50], I_1(0)=[0.50, 1.00];$$

上記の設定の中で、以下のイベントが発生した場合、エージェントは方向を与える規則のインターバルを下記のように変更する。

1. 他個体が視覚領域に居るか？(YES→2, NO→4)

2. 視覚領域内の個体数が閾値数より上か下か?  
 他個体数  $\geq$  閾値数  $\rightarrow$   $\text{count}_{-x} = \text{count}_{+x} = 0.01$   
 他個体数  $<$  閾値数  $\rightarrow$   $\text{count}_{-x} = \text{count}_{+x} = 1.00$

3. 他個体の次のステップへの移動方向を読み取る  
 他個体が  $-x$  へ;  $\text{count}_{-x} = \text{count}_{-x} + 1$   
 他個体が  $+x$  へ;  $\text{count}_{+x} = \text{count}_{+x} + 1$

視覚領域内全てのエージェントの動作読み取りが終了したら、以下のように規則を変える。

$$I_0(t) = [0.0, \text{count}_{-x}/S];$$

$$I_1(t) = [\text{count}_{-x}/S, 1.00];$$

$$S = \text{count}_{-x} + \text{count}_{+x};$$

( $\rightarrow 4$ )

4. 乱数  $R(t)$  と規則に従って、方向を決定 ( $\rightarrow 5$ )  
 5.  $t = t + 1$  ( $\rightarrow 1$ )

シミュレーションは 1 ステップを 1 秒に対応づけ、3600 ステップを 1 試行と定めた。また、視覚領域はすべてのエージェントに共通で、直径 2.00 と定めた。

ここで一つ例を挙げる。あるエージェントの近傍(直径 4.00)以内に  $-x$  方向に行こうとしている他個体が 2 匹、 $+x$  方向に行こうとしている他個体が 1 匹いたとする。このような場合、エージェントの設定閾値数に依存して、下記のようにインターバルが変更される。

閾値未満だと

$$\text{count}_{-x} = 1.00 + 2.00 = 3.00$$

$$\text{count}_{+x} = 1.00 + 1.00 = 2.00$$

のとき、 $I_s(t)$ ,  $s=0,1$  は

$$I_0(t) = [0.0, 0.60]$$

$$I_1(t) = [0.60, 1.00]$$

閾値以上だと

$$\text{count}_{-x} = 0.01 + 2.00 = 2.01$$

$$\text{count}_{+x} = 0.01 + 1.00 = 1.01$$

のとき、 $I_s(t)$ ,  $s=0,1$  は

$$I_0(t) = [0.0, 0.67]$$

$$I_1(t) = [0.67, 1.00]$$

### 3. 結果

#### 3.1 蟻歩行実験

10 匹のクロオオアリのワーカーの内、ランダムに選ばれた 2 匹のワーカーの歩幅に関する累積度数をプロットしたのが図 1 である。歩幅は、 $x$ - $y$  速度成分符号が同時に変更するまでに描いたループの曲線長を歩幅と定義した。図 1 を見るように、ワーカーの歩幅はベキ分布に従うことが分かる。(AIC weights of power-law = 0.99,  $\mu=1.69$ ,  $N=21$ )。

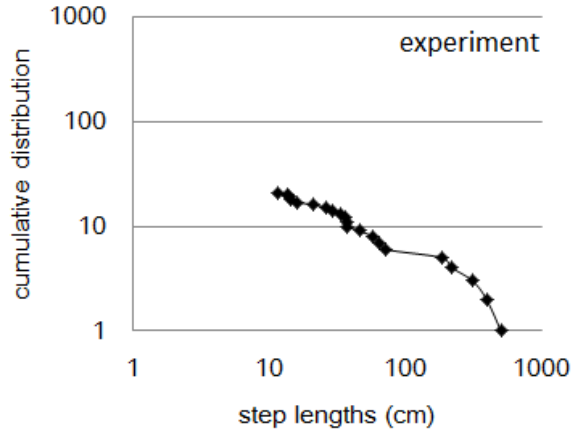


Figure1. Log-scale plot of step lengths and that cumulative distribution obtained from two agents from 1 trial in Experiment.

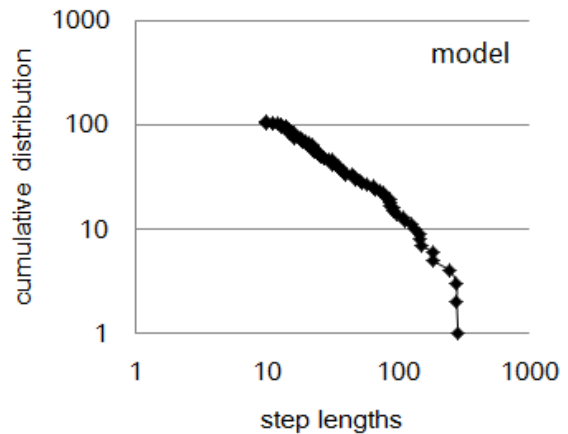


Figure2. Log-scale plot of step lengths and that cumulative distribution obtained from two agents from 1 trial in simulation.

#### 3.2 1次元シミュレーション

実験と同様に、モデルでも単位時間当たりの  $x$  成分の符号が反転するまでの移動距離を歩幅と定義し、図 2 にプロットした。実験と同様、モデルから得られたエージェントの歩幅もベキ分布を示すことが分かった (AIC weights of power-law = 1.00,  $\mu=1.86$ ,  $N=107$ )。さらに、ランダムに選択された 2 個体同士が隣接を継続させる時間についても見積もった (図 3)。ここでの隣接距離は他個体を検知する視覚領域近傍と等しいとした (= 2.00)。図 3 より、モデル (model) と実験 (exp) に関しての、時間分布に相違はないことが分かった (model vs. exp: Chi-squared test,  $\chi^2=0.023$ ,  $df=1$ ,  $P=0.88$ , NS)。一方、対照実験として定めたブラウン運動 (初期条件として設定されたルールインターバルが 1 試行終了まで固定化された場合の運動, model (control)) と上記二つに関しては、それぞれ時間分布に相違が見られることが分かった (model vs. model(control): Fisher's exact test,  $P<0.01$ , exp vs. model(control): Chi-squared test,  $\chi^2=15.62$ ,  $df=1$ ,  $P<0.001$ )。すなわち、クロオオアリの歩行実験と、本モデルではたまにある個体同士が長い間くっつくということが分かる。これはブラウンライクに振る舞うエージェントでは見られない結果であるということになる。

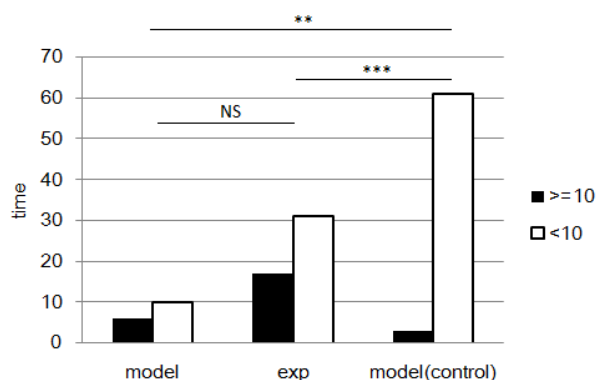


Figure 3. Time frequency in each category (less than 10.00, more than 10.00) for each version (model, experiment, model (control)). Model (control) indicates that Brownian movement simulation.  $**P < 0.01$ ,  $***P < 0.001$ , NS indicates non-significant.

#### 4. 考察

クロオオアリのワーカーを群がらせることで、レヴィライクな運動が実現できることを示した。砂漠アリのワーカーにおける単独時での巣サーチングの歩行はブラウン運動であることが知られている [16]。一方で、馴染みのないテストエリア (視覚的風景に関して) に放たれたときは平均値の異なる二つの指数分布を足し合わせた振舞によって、説明できるとされている [17-19]。すなわち、巣サーチングにおける歩幅のフレームが可変的に調節されているということになる。ここには、歩幅フレームの幅を生み出すことで、指数分布が重なり合っベキ則が出現する可能性が示唆されている。馴染みある風景・馴染みない風景は区別できるものではなく、知らないものがある程度知っているものとして扱うことは、とりもなおさず、知らない領域を知らない領域として留めておくということである。本論文におけるモデルでは他のエージェントの仄めかす情報を担保するサーチングモデルを考案することで、歩幅に関するベキの出現に挑み、クロオオアリの歩行実験をある程度説明できるモデルであるという結果が得られた。他方、歩幅のみならず、個体間隣接継続時間に関する非正規的分布の出現も、実験・モデルから達成できた。群れを形成する時間に関して、たまに長い間同一個体と隣接を維持するということになるが、見方を変えるならば、時間間隔自体が伸びたり縮んだりしているということになる。時間間隔の形成に関しても、間隔のフレームを緩くずらすことによって、伸び縮みを達成しているのかもしれない。

以上のように、局所的情報を大域的に担保することが、正規分布からベキ則への移行を達成すると考えられる。個体にとって、他の動きに意味をつけるだけでなく、そこにある程度場所の言及、すなわち要素を形成させることが、限られたフレーム枠からずれた運動を促進させ、臨界的振舞へと近づけるのかもしれない。

今後の予定としては、すでに場所の知識を有した個体、すなわちクルーターを想定することで、引っ張る・引っ張られるの両義性を、群れにおけるリーダーの不定性から数値解析していく予定である。併せてタンデムランニングに関する実験も行いたい。

#### 参考文献

- Kareiva, R.M. & Shigesada, N. 1983 Analyzing Insect Movement as a Correlated Random Walk. *Oecologia (Berlin)* 56, 234-238.
- Viswanathan, G.M., Afanasyev, V., Buldyrev, S.V., Murphy, E.J., Prince, P.A. & Stanley, H.E. 1996 Lévy flight search patterns of wandering albatrosses. *Nature* 381, 413 - 415
- Bartumeus, F., Luz, M. G. E., Viswanathan, G.M. & Catalan, J. 2005 Animal Search Strategies: A Quantitative Random-Walk Analysis. *Ecology* 86(11), 3078-3087
- Bartumeus, F., Catalan, J., Viswanathan, G.M., Raposo, E.P. & Luz, M.G.E. 2008 The influence of turning angles on the success of non-oriented animal searches. *J. Theor. Biol.* 252, 43-55
- Edwards, A.M., Phillips, R.A., Watkins, N.W., Freeman, M.P., Murphy, E.J., Afanasyev, V., Buldyrev, S.V., Luz, M.G.E., Raposo, E.P. & Stanley, H.E. 2007 Revisiting Lévy flight search patterns of wandering albatrosses, bumblebees and deer. *Nature* 449(25), 1044-1049
- Humphries, N.E., Weimerskirch, H., Queiroz, N., Southall, E.J., & Sims, D.W. 2012 Foraging success of biological Lévy flights recorded in situ. *Proc. Natl Acad. Sci. USA.* 109(19), 7169-7174
- Sueur, C., Briard, L. & Petit, O. 2011 A Non- Lévy Random Walk in Chacma Baboons: What Does It Mean? *PLOS ONE* 6(10), 1-8
- Viswanathan, G.M., Buldyrev, S.V., Havlin, S., Luz, M. G. E., Raposo, E.P. and Stanley, H.E. Optimizing the success of random searches. 1999 *Nature* 401, 911-914
- Humphries, N.E., Queiroz, N., Dyer, J.R.M., Pade, N.G., Musy, M.K., Schaefer, K.M., Fuller, D.W., Brunnshweiler, J.M., Doyle, T.K., Houghton, J.D.R., Hays, G.C., Jones, C.S., Noble, L.R., Wearmouth, V.J., Southall, E.J. & Sims, D.W. Environmental context explains Lévy and Brownian movement patterns of marine predators. 2010 *Nature* 465, 1066-1069
- Sims, D.W., Humphries, N.E., Bradford, R.W. & Bruce, B.D. 2012 Lévy flight and Brownian search patterns of a free-ranging predator reflect different prey field characteristics. *J. Anim. Ecol.* 81, 432-442
- López-López, P., Benavent-Corai, L., García-Ripollés, C. & Urios, V. 2013 Scavengers on the Move: Behavioural Changes in Foraging Search Patterns during the Annual Cycle. *PLOS ONE* 8(1), e54352 (doi: 10.1371/journal.pone.0054352)
- Viswanathan, G.M., Raposo, E.P., Luz, M.G.E. 2008 Lévy flights and superdiffusion in the context of biological encounters and random searches. *Phys. Life Rev.* 5, 133-150
- Sakiyama, T. and Gunji, Y.P. 2013 Emergence of an optimal search strategy from simple random walk. *J. R. Soc. Interface* 10(86), 1-6
- Detrain, C. & Deneubourg, J.L. 2006 Self-organized structures in a superorganism: do ants "behave" like molecules? *Phys. Life Rev.* 3, 162-187

- 15 Bartumeus, F. & Levin, S.A. 2008 Fractal reorientation clocks: Linking animal behavior to statistical patterns of search. *Proc. Natl Acad. Sci. USA.* 105(49), 19072–19077
- 16 Schultheiss & Cheng, K. 2012 Finding food: outbound searching behavior in the Australian desert ant *Melophorus bagoti*. *Behav Ecol* 143 28-35
- 17 Schultheiss & Cheng, K. 2011 Finding the nest: inbound searching behaviour in the Australian desert ant, *Melophorus bagoti*. *Anim Behav* 81 1031-1038
- 18 Schultheiss, P., Wystrach, A., Legge, E.L.G. & Cheng, K. 2013 Information content of visual scenes influences systematic search of desert ants. *J. Exp. Biol.* 216, 742-749
- 19 Reynolds, A.M., Schultheiss & Cheng, K. 2014 Does the Australian desert ant *Melophorus bagoti* approximate Lévy search by an intrinsic bi-modal walk? *J. Theo. Biol.* 340 17–22