フェロモンに基づく群移動体の物体輸送効率に関する解析

Analysis of efficiency of object transportation with multiple agents based on pheromone trails

○ 非 中山 和樹 (大阪大) 正 末岡 裕一郎 (大阪大) 正 石川 将人 (大阪大)
正 杉本 靖博 (大阪大) 正 大須賀 公一 (大阪大)

Kazuki NAKAYAMA, Osaka University, nakayama@dsc.mech.eng.osaka-u.ac.jp
Yuichiro SUEOKA, Osaka University Masato ISHIKAWA, Osaka University
Yasuhiro SUGIMOTO, Osaka University Koichi OSUKA, Osaka University

In this paper, we investigate the efficiency of object transportation with multiple agents. This research is motivated by distributed transportation of ants' foraging behavior. We define fundamental event rules of autonomous agent model using two kinds of pheromones in the cellular world. We then introduce two types of ant agents: one is oriented ants, which follow pheromone trails, the other is random ants, which don't follow pheromone trails when they explore the food sources. Suppose the food is finite in the source and the food source randomly emerges if one food source is exhausted. We analyze the number of object transportation at different density of two different types of ants.

Key Words: Distributed autonomous system, Heterogeneous agents, Cellular automata

1. 緒言

自然界には、蟻や蜂のように個体レベルでは局所的な相互作用に基づく単純なルールによって行動しているにもかかわらず、群れとしては大域的で興味深い振る舞いを見せる生物がいる [1]。そこで本研究では、フェロモンという局所的情報に基づいて大域的に安定した行列を形成する蟻の採餌行動を例に、これを規範とした自律分散エージェントによる物体輸送行動に着目する。

本研究では、動的なパターンを解析する手法の一つであるセルオートマトンを取り入れる [2]。すべての事象はセル状に分割した離散空間上で生起するものと仮定し、離散空間上に巣と餌場、さらに指向性アリとランダムアリという 2 種類のアリを導入する。餌場には有限の餌が存在し、餌場の枯渇時には他の場所にランダムに餌場が出現するモデルを仮定し、指向性アリとランダムアリの充填率と輸送数との関係性の解析を行った。

2. 準備：蟻の採餌行動に着想した離散モデル

各アリエージェント（以下ではアリとする）は道しるべフェロモンと帰巣フェロモンという 2 種類のフェロモンを分泌し、感知する能力があるものとする。また、地上に分泌されたフェロモンは揮発性物質であり、時間と共に地上から蒸発し、空間内を拡散するものとする。このとき、地上に分泌されたフェロモンのことを地上フェロモン、大気中に拡散されたフェロモンのことを大気中フェロモンと呼ぶこととする。さらに、各アリは Fig. 1 のように、探索モード（巣から出現したアリが餌場を探索するモード）と輸送モード（餌場を発見したアリが餌を巣まで輸送するモード）という 2 種類の状態を持つものとする。

Mode 1 (探索モード)

- ステップ毎に帰巣フェロモンを分泌する。
- 道しるべフェロモンのみ感知できる。
- 餌場に到達すると、餌を 1 つ積載して輸送モードに切り替わる。

Mode 2 (輸送モード)

- ステップ毎に道しるべフェロモンを分泌する。
- 帰巣フェロモンのみ感知できる。
- 巣まで餌を輸送すると探索モードに切り替わる。

さらに、本論文では 2 次元ユークリッド空間を六角格子状のセルを用いて離散化する。各アリはステップ毎に前方、右前方、左前方の 3 つのセルに存在する地上フェロモン、大気中フェロモン、および巣が自身の前方にあるかどうかという曖昧な大域的

情報を知覚し、それに応じて以下の 4 種類の行動を自律的に選択し、セル間を移動する。

Fig. 1 The switching model between exploration and transportation modes in the foraging behavior of ants

Action rule 1 (地上フェロモン追従)

前方 3 セルの内、前方のセル上から地上フェロモンを感知した場合には前方のセルに進み、それ以外のセルから地上フェロモンを感知した場合には、地上フェロモンの濃度勾配の高いセルへ確率的に進行する。

Action rule 2 (大気中フェロモン追従)

前方 3 セルから地上フェロモンを感知せず、大気中フェロモンを感知した場合、大気中フェロモンの濃度勾配の高いセルへ確率的に進行する。

Action rule 3 (ランダムウォーク)

前方 3 セルから地上フェロモン、および大気中フェロモンを感知しなかった場合、ランダムウォークを行う。

Action rule 4 (反転)

輸送モード時に、巣が自身の前方にないことを知覚すると姿勢を 180° 反転させる。

3. 物体輸送効率の解析

先行研究 [3] と同様に、2 種類のアリ“指向性アリ”、“ランダムアリ”を導入し、物体輸送の解析を行うが、ランダムアリの輸送時の行動ルールをフェロモン追従ができるように変更を加える。

Procedure Type 1 (ランダムアリ)

探索モード時には Action rule 3 に基づき、ランダムにセル間を移動し、輸送時にはフェロモンの濃度勾配の高いセルに確率に進行するアリ。

- 探索モード：Action rule priority 3
- 輸送モード：Action rule priority 4 → 1 → 2 → 3

Procedure Type 2 (指向性アリ)

すべての *Action rule* に従い、感知したフェロモンの濃度勾配の高いセルへ確率的に進行するアリ。

- 探索モード：Action rule priority 1 → 2 → 3
- 輸送モード：Action rule priority 4 → 1 → 2 → 3

3.1 群れの物体輸送効率の解析

フィールドの中央に巣を設置し、巣から放射状に等距離の6つの箇所からランダムに3つの餌場を出現させる。餌場には600個の餌が存在し、すべての餌の輸送が終わると餌場ではない3箇所のうち1地点に600個の餌が出現するものとする。

アリの総数は600体とし、指向性アリとランダムアリの充填率の違いによる餌の輸送効率の解析を行う。群れにおけるランダムアリの充填率を変化させ、繰り返しシミュレーションを行った際のランダムアリの充填率と餌の輸送数との関係を Fig. 2 に示す。まず、ランダムアリのみの輸送数は指向性アリのみの輸送数より少ないことが分かる。しかし、Fig. 2 からランダムアリと指向性アリの割合が適切な値の時の群れは指向性アリのみの群れよりも輸送数が多いことが分かる。

ここで、ある餌場が枯渇した際の指向性アリのみの群れと指向性アリが60%、ランダムアリが40%の群れのシミュレーション結果の一例をそれぞれ Fig. 3(a), (b) に示す。まず Fig. 3(a) を見てみると、指向性アリのみの群れではある餌場が枯渇し、新しい餌場が出現してもすぐには新たな餌場を探索しないことが確認できる。これは指向性アリが持つフェロモンに追従する性質のために、枯渇した餌場周辺のフェロモンに多くの指向性アリが追従してしまうためと考えられる。次に Fig. 3(b) を見てみる。こちらではある餌場が枯渇して新しい餌場が出現すると、200step 後にはその餌場と巣との間にフェロモンの道が形成されている様子を確認することができる。これは餌が枯渇した際に、ランダムアリがフェロモンを感知せずに新たな餌場を探索するために、指向性アリのみの群れよりも早く新たな餌場を開拓することができたためと考えられる。

3.2 各個体の物体輸送効率の解析

次に各アリ1体ずつの餌の輸送効率を調べる。Fig. 4(a), (b) はそれぞれ群れにおけるランダムアリの充填率を変化させた際のランダムアリ1体、指向性アリ1体毎の餌の輸送数を表したものである。Fig. 4(a) より、ランダムアリは群れにおける充填率に関係なく、ほぼ一定の輸送効率を示すことが分かる。次に Fig. 4(b) より、指向性アリは群れにおけるランダムアリの充填率が増加するにつれて餌の輸送効率が上昇することが確認できる。

4. 結言

本論文では、餌場に有限の餌が存在する場合の群移動体による物体輸送の解析を行った。枯渇する餌場を用いた場合のシミュレーション結果からすべてが指向性アリの群れよりも適度にランダムアリが存在する群れの方が餌の輸送数が高いことが分かった。また、ランダムアリの充填率を変化させた場合の各個体の輸送効率は、ランダムアリはほぼ一定であるのに対し、指向性アリはランダムアリの充填率の増加に伴い輸送効率が上昇することを確認した。

文 献

- [1] M. Hansell, "Built by Animals: The Natural History of Animal Architecture", Oxford University Press, 2009.
- [2] S. Wolfram, "Cellular Automata and Complexity: Collected Papers", Westview Press, 1994.
- [3] K. Nakayama, Y. Sueoka, T. Kita, M. Ishikawa, Y. Sugimoto, and K. Osuka, "Analysis of Distributed Transportation with Autonomous Mobile Agents Inspired by Foraging Behavior of Ants", in *Proc. of International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications*, pp. 53–56, 2013.

Fig. 2 The relation between the density of random ants and the number of transported food packets

Fig. 3 The exploration of a new food source at the time when an old food source was exhausted (purple lines show pheromone trails)

(a) Transportation rate per a random ant

(b) Transportation rate per an oriented ant

Fig. 4 The relation between the density of random ants and the average number of food packets transported by one ant