

軍隊アリの生態を取り入れたマルチエージェントシミュレーション

Bio-inspired Multi-agent Simulation from Army Ants

石渡裕之 伊庭斉志
Hiroyuki Ishiwata Hitoshi Iba

東京大学大学院 工学系研究科 電気系工学専攻

Department of Electrical Engineering and Information Systems, Graduate School of Engineering, The University of Tokyo

This paper presents a multi-agent simulation inspired from army ants. Several studies have been conducted on Bio-inspired methods such as the idea presented in this paper; especially, social insect's cooperation has been widely discussed in Artificial Intelligence circles. Interestingly, researchers in biology have discovered the fact that army ants dig holes or gulfs in the route from a food source to the nest. This is a behavior helps to optimize the food gathering performance of the ants. We have noted that this behavior is sometimes useful in engineering applications. The purpose of this study is to understand this biological behavior by creating a computer simulation.

1. 概要

自然界の生物は長い年月をかけ、その形態や行動を進化させてきた。そのなかで環境にうまく適応できたものが生き残り、現在に至っている。そのため彼らの形や動きといったものは、長い時間をかけて最適化されたものであり、実際に工学に応用できるものも多く存在する。[Dusan 07][Sebastian 08] 特にアリやハチなど社会性昆虫と呼ばれている種は、群の中で小さな社会を営んでおり、非常に効率の良い協調行動を行う姿なども確認できる。[Deneubourg 02] Ant Colony Optimization [Dorigo 99]などは、その最も有名な応用例の一つだといえる。

本研究では、軍隊アリが餌を採集する際に見せる利他行動をコンピュータシミュレーション上で再現し、作って理解することによって工学へ還元することを目指す。

2. 軍隊アリの利他行動

利他行動とは、自分より他者の利益を優先した行動であり、時には自分自身を犠牲にしてでも他者を助ける行為である。一部の軍隊アリは、行軍の経路中に障害となる穴や溝を発見したとき、自らの体を使って「橋」を構築し、仲間を近道させることがある。[Anderson 02] この行為は、餌の探索や運搬といったアリが本来目的としている仕事とは切り離されたものである。よって余りに多くのアリがこの行為に従事してしまったり、不必要な場所に橋を構築するようなことがあれば、群全体の捕食能力を低下させる可能性もある。しかし実際に自然界のアリはこの行為をバランスよく行っているようであり、群全体としてのパフォーマンスが向上していることが確認された。[Powell 07] Powellらの実験によれば、軍隊アリはこの利他行動を行うことによって群の捕食能力を最大26%上昇させているという。

3. 問題設定

マルチエージェントシミュレーションで扱う問題について解説を行う。今回取り扱うシミュレーションは、アリの捕食活動と前述の利他行動を模したものである。尚、シミュレータは

Swarmを用いて作成した。図1にシミュレータの画面のスクリーンショットを示す。

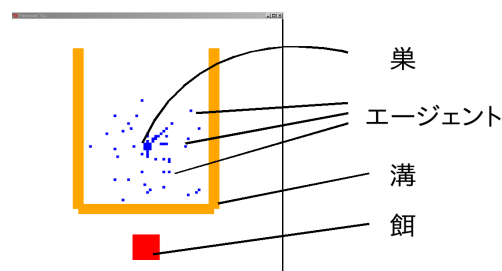


図1: シミュレータ

ここで、「エージェント」はアリの動きを模したものであり、餌の探索や餌を巣まで運ぶといった動作をする。「巣」はエージェントのスタート地点であり、またエージェントが餌を持ち帰る場所でもある。「フェロモン」は餌を見つけたときにエージェントが発するものである。実際に自然界のアリが用いるフェロモン同様、一度分泌されると減衰しながら拡散していき、仲間に餌の在り処の情報を伝える役割をする。また「溝」は、基本的にはアリの行軍を妨げるものであるが、利他行動を行い橋を構築した場合、他のエージェントはその上を渡ることができる。それ以外のケースでは通り抜けることはできないものとする。

各エージェントは図2の状態遷移図に従って動く。また各状態の動きを表1に示す。

Altruism状態に遷移するときの条件だが、実際のアリがどのような条件で橋の構築場所などを決定するのか、またどのようなときに橋の構築を止めるのかは分かっていない。そこで仮説と実験によって条件を定めることとした。

4. 実験

4.1 実験1: 仮説による判断基準

4.1.1 仮説

ここでは軍隊アリの判断基準として以下のような2つの仮説を立て、マルチエージェントシミュレーションによる実験を

連絡先: 石渡 裕之, 東京大学 工学系研究科 電気系工学専攻, 〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1, 03-5841-6751, ishiwata@iba.t.u-tokyo.ac.jp

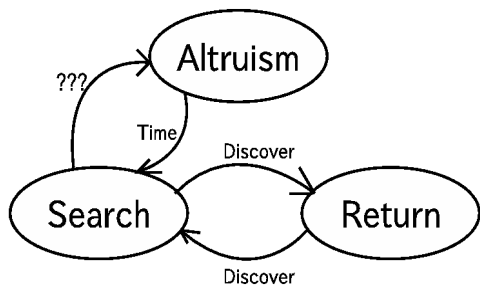


図 2: エージェントの状態遷移



Simple

Difficult

図 3: 実験用マップ

表 1: エージェントの状態と行動

状態	行動
Search	エージェントの初期状態であり、餌場を発見するまでランダムウォークを続ける。餌を発見したとき Return に、ある条件を満たしたとき Altruism に遷移する。またフェロモンを感知すると、その濃度の濃い方へと引き寄せられる
Return	餌を巣まで持ち帰る。このとき、エージェントはフェロモンを発しながら移動を行う。そして巣に到着したとき Search 状態に遷移する。尚、エージェントは帰巣本能があり、巣の場所を覚えているものとする。
Altruism	溝に橋を構築する。橋になっている間は動くことができない。ある条件を満たしたときに抜け、Search 状態へと遷移する。

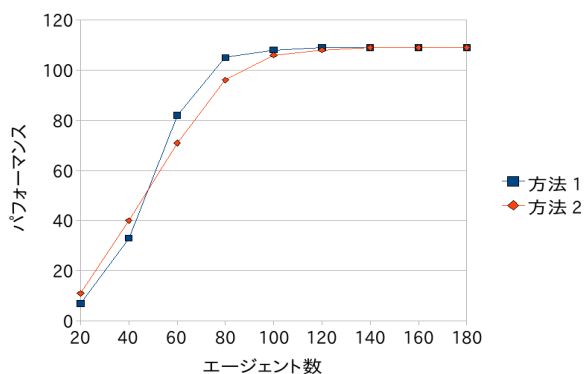


図 4: Simple マップ実験結果

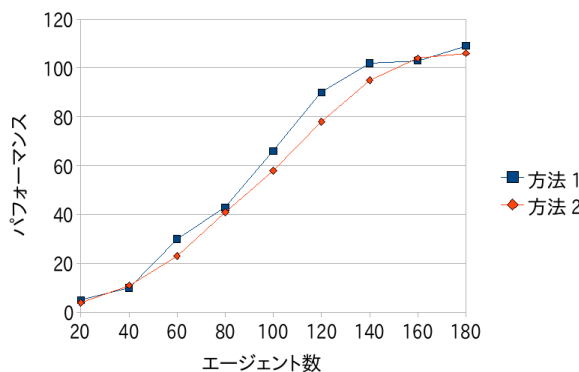


図 5: Difficult マップ実験結果 1

行い、それぞれの性質を検証した。

方法 1: 近傍の仲間がいるかどうかで判断

エージェントの近傍に仲間のエージェントがいるときに橋を構築する。この方法ならば闇雲に橋を構築するよりは効率的であり、仲間がショートカットする可能性も高いだろうと仮定した。

方法 2: フェロモンによる判断

フェロモンは前述した通り、仲間のアリの餌の在り処を伝える役目をするものである。しかしフェロモン濃度が一定以上濃い場所というのは多くのアリ通ろうとした場所であるとも考えられる。また、基本的にフェロモンは餌場と巣との間に分泌されるので、効率的な場所に橋を作成できるだろうと仮定した。

これらの仮説が有効かどうか判断するために、それぞれをシミュレータに組み込み、実験によって有用性を確かめた。

4.1.2 仮説検証実験

実験は図 3 のような 2 種類のマップを使用した。この実験では一定時間内に集めた餌の数を指標としてそれぞれのパフォーマンスをチェックした。また実験はエージェントの数を変化させながら各 10 回行い、その平均値を比較した。Simple マップでの実験結果を図 4 に示す。横軸をエージェント数、縦軸を一定時間内に集めた餌の数とした。Simple マップでは僅差ではあるものの、方法 1 の方が若干高いパフォーマンスを発揮した。Difficult マップでの図 5 と図 6 に実験結果を示す。全体的には方法 1 が勝っているものの、エージェント数が多くなった後

半で方法 2 に逆転されていることが確認できる。

図 6 は実験を別の尺度から観察したものである。横軸は先ほどと同様にエージェントの数とし、縦軸はエージェントが橋を構築した回数、橋を渡った回数を数えておき、その比率とした。このデータにおいては、方法 2 が常に方法 1 よりも高い値を取っていることが確認できる。方法 1 においては常に 1 前後の値をとっている。これは橋を作っても、仲間のエージェントがあまり活用しなかったことを意味しており、非効率的である。Simple マップとは異なり Difficult マップには様々な箇所にも溝があるので、方法 1 では不必要な箇所にも橋を構築し

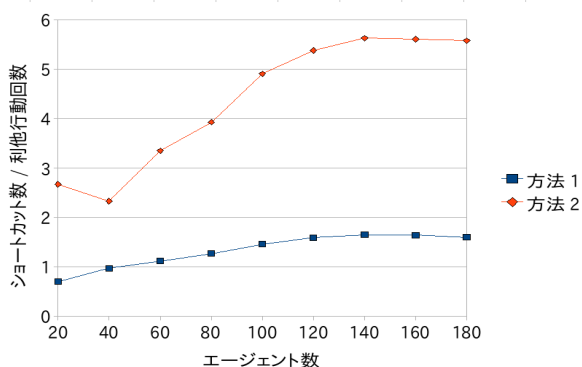


図 6: Difficult マップ実験結果 2

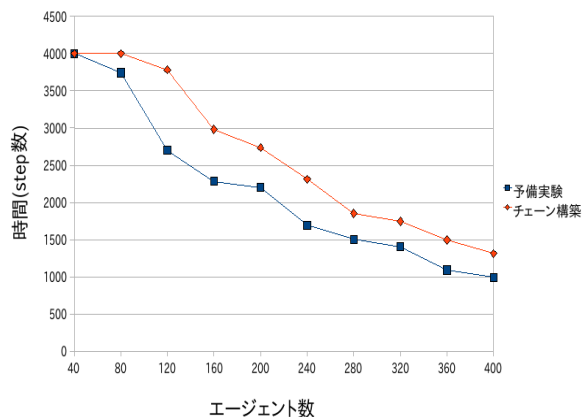


図 7: エージェント数-時間

てしまったためである。

一方で方法 2 は、常に方法 1 よりも高い値をとっていることが確認できる。またグラフからは確認できないが、方法 2 は橋を構築する場所も餌を巣を行き来する上で必要な箇所にしか設けておらず、タイミング、構築場所ともに優れた手法だった。これは方法 2 のフェロモンが餌場と巣の間のみ発生するため、橋を構築する上で最適な場所の情報を与えているためである。

しかし方法 2 には、一度餌場に辿りついてからでないと橋の構築ができないという問題点がある。実際のアリの場合は、餌場にたどり着く前から必要な場所に橋を設けているようなケースも目撃されている。そのため実際にはこれらの条件を複合的に用いているか、あるいは別の判断基準を持っているものと思われる。

4.2 実験 2: アリのチェーン構築を参考にした判断基準

4.2.1 チェーン構築とは？

橋の構築と類似するトピックとして、チェーン構築 [Lioni 01] がある。これは、アリが行軍中に極端な高低差を見つけたときに構築するものである。これによって仲間を安全に下へと下ろし、また登らせることもできる。

Lioni らの研究では、自作の実験機器とカメラを用いてチェーン構築の際のアリの行動について観察している。その結果、アリが「チェーン構築に参加する確率」 P_e 及び「チェーン構築から抜ける確率」 P_s は以下のような式で近似できるという。

$$P_e = C_{e0} + \frac{C_{e1}X}{C_{e2} + X} \quad (1)$$

$$P_s = C_{s0} + \frac{C_{s1}X}{C_{s2} + X^\nu} \quad (2)$$

ここで X はチェーン構築に参加しているアリの数、その他の数は定数である。これはつまり、チェーン構築に参加するアリが多ければ、参加しやすく抜けにくいことを示している。

これらの式を判断基準として適用し、実験を行った。

4.2.2 式 (1) 検証実験

シミュレータの基本的な動作は実験 1 のときと同様だが、Altruism 状態に遷移する判断基準として Lioni らの公式を使用した。これを実験 1 で用いた方法 2 と比較する実験を行った。

図 7 は横軸にエージェント数、縦軸を餌を集め終わるまでの時間としたものである。実験 1 で用いた方法の方が短い時間

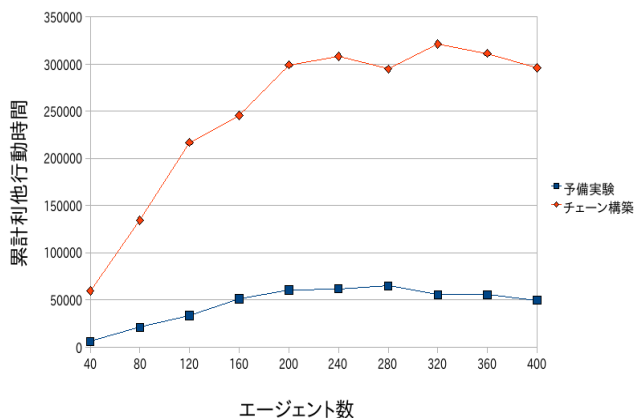


図 8: エージェント数-累計利他行動時間

で餌を集め終わっていることが確認できる。また図 8 は横軸をエージェント数、縦軸をエージェントが利他行動に従事している時間の累計としたものである。実験 1 の方法 2 では、早い段階で収束していることが確認できる。しかし Lioni らの公式を取り入れたモデルにおいては、エージェント数が増えるにつれ、利他行動に従事する時間も増えている。図 9 は実験途中の一場面であるが、実験 1 の方法は必要な箇所に橋の構築がされているのに対して、Lioni らの公式を取り入れたモデルでは必要な箇所以外でも橋を構築していることが観察できた。

Lioni らの式 (1) を取り入れたモデルは、餌場の発見をせずとも利他行動を行うことができるという利点もある。また式 (1) より、エージェントが集まりやすい所で利他行動をする確率が高くなるという特徴を持つ。これによって、餌場や巣の付近、あるいはそれらの間などで多く利他行動に及ぶことが期待できる。

しかし現状ではパフォーマンスにおいては実験 1 の方法 2 に劣るという結果に終わってしまった。Lioni らの実験ではチェーンの構築場所を一ヶ所に限定して計算したものであるため、今回作成したシミュレータのような連続的に橋の構築場所があるモデルにはそのまま適用できなかったためだと思われる。

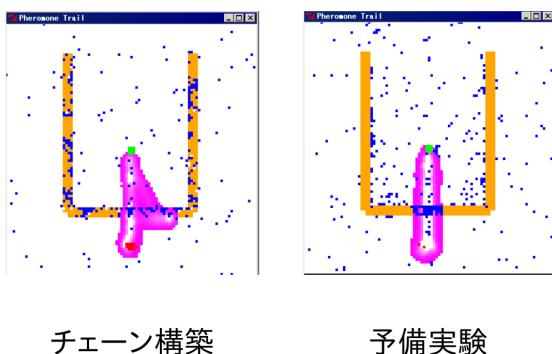


図 9: 実験結果比較

4.2.3 式 (2) 検証実験

式 (2) は利他行動を止める確率を求める式としてシミュレータに組み込んだ。

ここでは式 (2) が適切な判断基準として機能しているかどうかを調べるため、マップ上の巣と餌場の間にある溝の幅を変え、実験を行った。これによって、橋を開通させるのが困難な溝に対しての振る舞いをみる。実験結果を図 10 に示す。幅 6

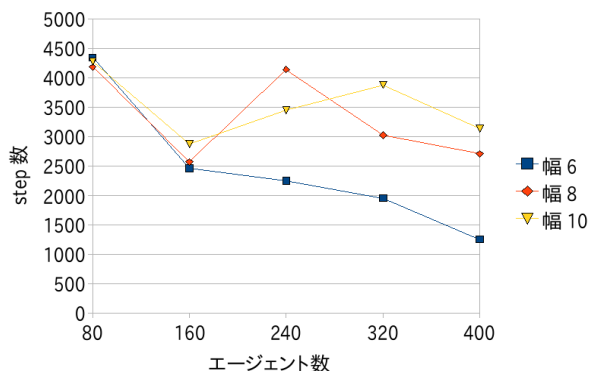


図 10: 実験結果比較

のときはエージェント数を増加させるにつれてパフォーマンスも改善されていることが確認できる。ところが溝の幅 8 のマップ、幅 10 のマップではエージェント数が 160 のときが最もパフォーマンスが高いという結果がでている。

そこでシミュレータの動きを目視で観察したところ、エージェント数が多いときは幅の広い溝を設置したマップであっても橋を構築し、仲間をショートカットさせられていることを確認した。そしてエージェント数が少ないときには、橋を構築することができずに溝を避けながら餌を集めていた。しかしその中間程度の数のエージェント数のときには、中途半端に橋を構築してしまい、またその橋を渡ろうとして行き詰まるエージェントも出てくるため図 10 のような結果が出てしまったものと考えられる。

これらの解決策として考えられることは、式 (2) を改良するか、他の判断基準などと組み合わせて開通の見込みのない橋の構築をやめさせることなどが挙げられる。

5. まとめ

実験 1 では、フェロモンを利用することで効率的な構築場所・タイミングを判断することができたが、一度餌場に辿り着く必要があった。この手法の代替案として、類似トピックであるチェーン構築の動きの一部として式 (1) に従い、確率的な判断基準を取り入れてみたが、そのままうまく適応できずにパフォーマンスの低下が見られた。

また現状では利他行動を終了する条件として Lioni らの式 (2) でその判断を行っている。式 (2) の検証実験の結果から分かる通り溝の幅があまり大きくないない場合は、以上の方法でもある程度はうまく動くが、溝の幅が大きい場合は現状のままでは無駄が多い。そのため橋の開通が困難な場合は利他行動を止めるための仕組みが必要であると考えらる。

6. 今後の課題

今後の課題としては以下のことが挙げられる。

- Lioni らの式 (1) をシミュレータに合うように変更する。あるいはフェロモンなどの別の判断基準と組み合わせることで複合的に用いることでシミュレータに適応させる。
- 橋の開通が困難な場合には、途中で橋を崩すといった判断が可能にする。

これらの課題を解決するために、今後も仮説と実験による検証を行っていききたい。また、チェーン構築のような類似したトピックを参考にしたり、アリの生態などをもっと詳しく調べ、実際のアリがどのような判断基準でもって橋の構築場所やタイミングを決定するのかを調査していきたい。

参考文献

- [Anderson 02] C.Anderson : Self-assemblages in insect societies, *Insectes sociaux*, vol. 49, 2002
- [Deneubourg 02] J. L. Deneubourg: Dynamics of Aggregation and Emergence of Cooperation, *The Biological Bulletin*, vol. 202, 2002
- [Dorigo 99] Dorigo.M: Ant Algorithms for Discrete Optimization, *Artificial Life*, Vol.5, No. 2, 1999
- [Dusan 07] Dusan.T: Swarm intelligence systems for transportation engineering:Principles and applications, Science Direct, 2008
- [Lioni 01] A.Lioni: Chain Formation in *CEcophylla Ingindoda*, *Journal of Insect Behavior*, vol.14, No.5, September 2001
- [Powell 07] S.Powell: How a few help all: living pothole plugs speed prey delivery in the army ant *Eciton burchellii*, *Animal Behaviour* Volume 73, Issue 6, June 2007
- [Sebastian 08] Sebastian von Mammen: Evolutionary Swarm Design of Architectural Idea Models, *GECCO'08*, 2008