

ハキリアリのコロニー形成過程のシミュレーション

A Simulation of Leaf-cutter ant Colony in the Process of Formation

小菅智丈*¹ 佐久間淳*¹ 小林重信*¹
Tomotake Kosuge Jun Sakuma Sigenobu Kobayashi

*¹東京工業大学
Tokyo Institute of Technology

Today, many researchers study what decisions make critical influence on system with simulation model on computer. There are interesting systems in nature. That is leaf-cutter ant colony system. They have only simple function and simple means of communication. But they have complex system by sharing many tasks. I am interested in modeling this system on computer, because the knowledge of the system is useful for multiagent system that have complex task.

1. はじめに

現在マルチエージェントモデルによる社会シミュレーションの研究が盛んである。社会シミュレーションの利点として経済学、市場における理論の実験的検証、SARSなどの感染症の感染シミュレーション、村落の人口減少シミュレーション等幅広い応用が期待される [1][2]。これらの研究はトップダウンアプローチでは構築、分析が困難な複雑な社会シミュレーションを対象として、そこで動作するエージェントの行動規範の妥当性をシミュレーションを通して実験的に検証することを目的としている。

一方、複雑な社会を持つ例としてアリのコロニーが挙げられる。アリは個体が単純な機構を持ちながら、単純なコミュニケーションを通じて全体として効率良く行動している。特にハキリアリのコロニーは何百万もの個体を有する中、成長過程で7種の階級に分化が起こり、29種の仕事を分業している。

本研究ではこのようなハキリアリのシステムを計算機上に構築することを目標とする。具体的にはハキリアリのシステムをモデル化し、各階級の行動規範がシステムに対しどのような影響を及ぼすかを検証する。現実のハキリアリと同じシステムを構築することで各階級の行動規範の知見を得ることが期待される。

このようなシステムに対する行動規範の知見の応用先としては、マルチエージェントシステムや機能の分化した群ロボットの制御が挙げられる。群ロボットは人の入れないような場所で活用されることが期待されている。その場合、群ロボットはタスクを分業し協調的に活動することが期待される。このシステムは先に挙げたハキリアリのシステムと構造上似通っている点が多いと考えられる。このような点からハキリアリモデルのシミュレーションによる各階級の行動規範の知見は群制御ロボットへの応用が期待できる。

本論文の構成は6章からなる。2章ではハキリアリの分業制御を説明する。3章ではハキリアリのシステムのモデル化の方法を述べる。4章ではシミュレーションの結果と考察を述べる。5章では今回用いた行動規範の妥当性を検証する。6章では今後の課題を述べる。

2. ハキリアリの分業制度

ハキリアリは主に南米に生息しているアリの種である。特徴的な行動の図を図1に示す。図の記号はQは女王アリ、Wは働きアリ(葉採集アリ)、Sは兵隊アリ、Fは農園アリ、Eは外敵である。また菌糸はハキリアリの食料で農園アリが働きアリによって集められた葉に菌を植えて育てたものである。働きアリが外部空間で葉を採集し、農園アリがその葉を噛み砕き、菌を植え菌糸を育てる。また働きアリが外部で葉を採集して巣付近に戻ってくる際、敵である寄生ハエが働きアリによってくる。その敵を撃退することが兵隊アリの仕事である。図1の他

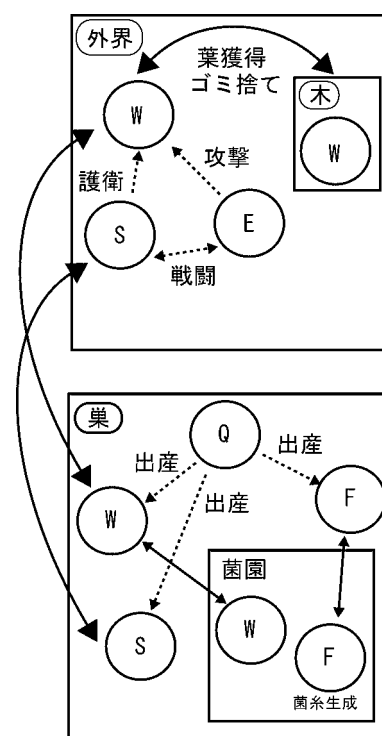


図 1: 実際のハキリアリのワークフロー。Q:女王アリ, W:働きアリ(葉採集アリ), S:兵隊アリ, F:農園アリ, E:外敵

にも、年齢による働きアリのタスクの変化等興味深い行動が多い。この他にも細かく階級が分化し、複雑な社会を形成してい

る。このような階級からなるハキリアリについて葉獲得行動と菌糸生成活動に特化したシミュレーションモデルを構築する。図2に構築するハキリアリモデル基本的なワークフロー図を示す。

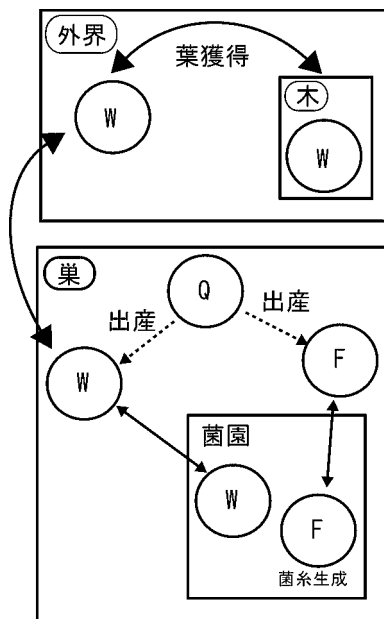


図 2: 本研究におけるハキリアリモデルのワークフロー図, Q: 女王アリ, W:働きアリ (葉採集アリ), F:農園アリ

3. モデル

3.1 モデルの構造

3.1.1 SOARS

シミュレーションフレームワークとしてエージェント間の相互作用を干渉分解可能にする ABM 開発言語である SOARS (Spot Oriented Agent Role Simulator) を用いた [2] . SOARS 上に上で述べたハキリアリの特徴的な行動を簡略化してモデルを構築する。図3に SOARS の実行画面をふす。

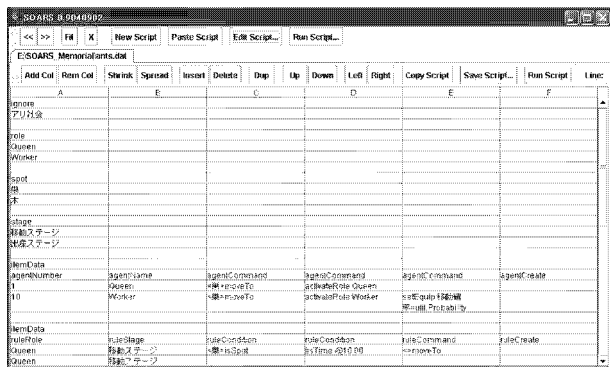


図 3: SOARS 実行画面

3.1.2 空間構造

モデル内には、ハキリアリの巣を想定する巣空間と、巣の外部を想定する外部空間の2つの空間が存在する。

巣内空間には、エージェントが出生する出産場所空間、菌糸(餌)を栽培する菌園空間が存在する。また、外部空間には探索を行う、または葉の得られる木に相当するグリッドが存在する。空間構造の概略を図5に示す。

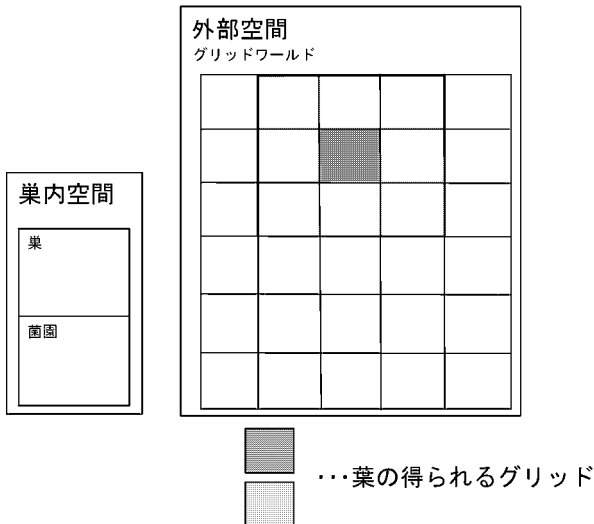


図 4: モデル - 巣内空間外部空間

< 巣内空間 >

巣内空間では特殊なエージェント以外エージェントは移動しない。それぞれのタスクに従事するのみの専用空間構造となっている。

- 巣空間:Queen エージェントの生息空間、葉を得て戻ってきた Worker エージェントがここから外部空間に移動する。
- 菌園空間:Farmer エージェントの生息空間。葉を得た Worker エージェントが戻ってくる場所。菌園には葉枚数と菌糸数の2つの属性が存在する。

< 菌園空間の属性 >

- 葉枚数 $[0, \infty)$. Worker エージェントが持ち帰った葉の数
- 菌指数 $[0, \infty)$. Farmer エージェントが葉から生成した菌糸の数

< 外部空間 >

外部空間の特徴はグリッドワールドになっていることである。Worker エージェントは各グリッドを移動して葉の探索を行う。外部空間では Worker エージェントのみが活動する。外部空間で葉を得ることによってのみ巣内空間へ移動する。また、グリッドワールドは葉獲得確率とフェロモン値の2つの属性を持っている。

< グリッドワールドの属性 >

- 葉獲得確率属性: $[0, 1]$. そのグリッドで葉の得られる確率。
- フェロモン値属性: $[0, \infty)$. そこで葉を得た Worker によって付加される。

3.2 時間単位

シミュレーション時間単位はエージェントの1行動とした。図5に模式図を示す。

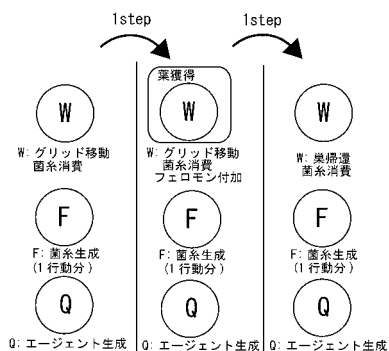


図 5: シミュレーション時間の進み方. Queen が 1 エージェント生成する時間, Worker が 1 グリッド間移動する時間, Farmer が 1 行動分の餌を生成する時間は同じ

3.21 アリ (エージェント) について

アリエージェントは属性として階級, 行動規範を持っている. これらの属性に応じてエージェントは行動する.

< エージェントの属性 >

エージェント属性である階級, 行動規範の詳細な説明をする.

< 階級属性 >

- Queen: 各階級にエージェントを生成
- Worker: 葉の探索を行う
- Farmer: 葉から菌糸を生成

< 行動規範属性 >

- ランダム行動: 取りうる行動を等確率で選択 (Worker, Queen のみの属性)
- 情報に基づく行動: 得られる情報によって決まった行動を選択 (Worker, Queen のみの属性)
- 一定行動: どの時間 step においても同じ行動 (群) を選択 (Farmer, Worker のみの属性)

3.22 イベントの説明

エージェントはイベントを経験し, 属性を変更する. イベントは葉獲得イベント, 死亡イベント, フェロモン伝播イベント, フェロモン感知イベントの 4 つある.

< 葉獲得イベント >

Worker 属性のエージェントはグリッドワールドで葉を獲得することで行動規範属性を一時的に一定行動に変化させる.

< 死亡イベント >

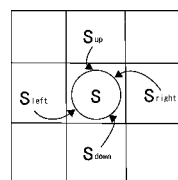
全てのエージェントは菌園の菌糸が 0 になると死亡イベントが発生し活動を停止する.

< フェロモン伝播イベント >

1step ごとに各グリッドのフェロモン属性の値が更新される. フェロモン属性の更新式は式 (1) で表される. ここで

$$F(s) = F(s) + \epsilon(F(s_{up}) + F(s_{down}) + F(s_{left}) + F(s_{right})) \quad (1)$$

ここで $F(s)$ は現在考えているグリッドのフェロモン属性, $F(s_{up,down,left,right})$ はそのグリッドの上下左右のグリッドのフェロモン属性である. 図 6 に概念図を示す.



フェロモン更新式
 $F(s) = F(s) + \epsilon \{ F(s_{up}) + F(s_{down}) + F(s_{left}) + F(s_{right}) \}$

図 6: フェロモンの伝播の概念図と更新式

3.23 エージェントの行動選択の説明

各エージェントは階級属性と行動規範属性の組み合わせに従い行動を選択する. 各階級の行動規範属性による行動選択を説明する

< Worker 階級 >

- ランダム行動: $A = \{up, down, left, right, stay\}$ によって等確率に上下左右の隣接するグリッドに移動, または滞在.
- 情報に基づく行動: 上下左右または現在のグリッドのフェロモン属性を参照し, その値の大きいグリッドに移動.
- 一定行動: 菌園に戻り巣を經由してグリッドワールドに移動.

< Queen 階級 >

- ランダム行動: 1step に Worker または Farmer エージェントのどちらかを等確率で生成.
- 情報に基づく行動: 菌園の葉枚数属性と菌糸数属性を参照し, 葉枚数 > 菌糸数 であれば Farmer 生成, 葉枚数 < 菌糸数 であれば Worker 生成.

< Farmer 階級 >

- Farmer は常に葉 1 枚から Worker 1 行動分の菌糸を生成する.

3.24 ハキリアリコロニーの状態

状態は生存状態と絶滅状態の 2 つで定義される. それぞれの定義は表に示す.

- 生存: 菌糸数 > 0
- 絶滅: 菌糸数 = 0

4. シミュレーション

Worker エージェントと Queen エージェントの行動規範属性がハキリアリコロニーの状態に及ぼす影響のシミュレーションを行った. 本シミュレーションモデルではそれぞれのエージェント階級は行動規範を属性として持つ. 具体的には, Worker 階級と Queen 階級の行動規範にランダム行動と情報に基づく行動をそれぞれ適用した場合のハキリアリコロニーの状態をシミュレーションによって検証した. 行動規範設定は, 設定 1 を Queen: ランダム行動, Worker: ランダム行動, 設定 2 を Queen: ランダム行動, Worker: 情報に基づく行動, 設定 3 を Queen: 情報に基づく行動, Worker: ランダム行動, 設定 4 を Queen: 情報に基づく行動, Worker: 情報に基づく行動とする. ハキリアリコロニーの状態はシミュレーション終了後, 生存状態か絶滅状態かで判断した. シミュレーション期間は 240step とした.

4.1 初期設定及び環境設定

5 × 5, 10 × 10 の大きさの違う二つの外部環境を用意した。それぞれの属性を以下に記す。

<5 × 5 のグリッドワールド>

葉の得やすいグリッドワールドとして設定した。図 7 左:環境 1 に葉獲得確率の詳細を示す。また菌園空間の属性である葉枚数, 菌糸数を共に 100 とした。初期のエージェントは Queen エージェント 1, Farmer エージェント 1, Worker エージェント 3 とした。

<10 × 10 のグリッドワールド>

葉の得にくいグリッドワールドとして設定した。図 7 右:環境 2 に葉獲得確率の詳細を示す。また菌園空間の属性である葉枚数, 菌糸数を共に 500 とした。

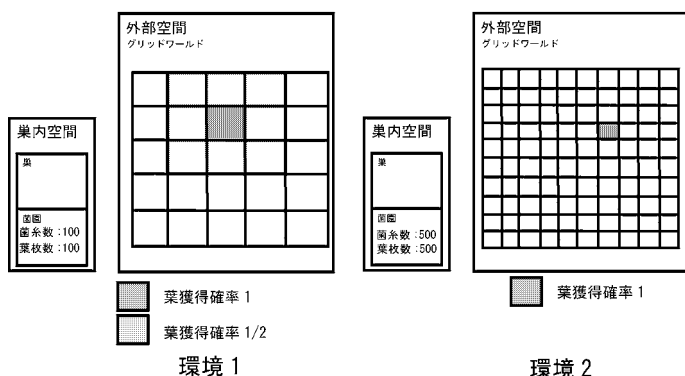


図 7: 5 × 5 及び 10 × 10 のグリッドワールドと初期属性値

4.2 結果, 考察

シミュレーション結果を以下に示す。それぞれの数字は各環境で各シミュレーション設定を 20 試行を行いその生存率の平均を表している。本シミュレーションの結果から、環境 1 ではハ

表 1: 実験結果

設定	設定 1	設定 2	設定 3	設定 4
生存率	15%	5%	100%	100%
生存率	0%	10%	0%	40%

キリアリコロニーの状態は Queen の行動規範のみに依存していることが分かる。

これは、環境 1 が葉を得やすい環境であることと、葉を得たら 10 行動分の餌が得られるという設定ではフェロモンという情報の価値が下がってしまうことが考えられる。また, Farmer エージェントの行動が一定行動であるため, Farmer 数は常に Worker 数を上回っていることが理想である。このため Queen の行動規範属性がコロニーの状態に与える影響が大きかったと考えられる。

また、葉の得にくい環境 2 でも同様に Farmer 数が Worker 数を常に上回っていることが理想である。さらに、環境 2 では Worker が 10 行動以内で効率よく葉を得なければ菌糸は減り続けてしまう。このことから環境 2 では Queen と Worker の両方の行動規範がコロニーの状態に影響を与えている結果となったと考えられる。

5. 行動規範の評価

本稿で設定した行動規範の評価のためのシミュレーションを行った。評価対象は先のシミュレーションでどの環境でもある程度生存できた設定 4 である。評価方法は初期菌糸数に対する生存率とした。図 8 に結果を示す。この結果は少なくとも初期に環境を十分に探索するためには相当量の菌糸数が必要であることがわかる。ハキリアリはコロニーの分化が起こる際、女王アリが元のコロニーから菌糸を少し持っていくことが知られている。このシミュレーション結果では十分な量の菌糸数が必要であることを示しているが、これは行動数に置き換えた数であるからと考えられる。今後ハキリアリの定量的なデータを集めシミュレーションモデルの精度を向上する必要がある。

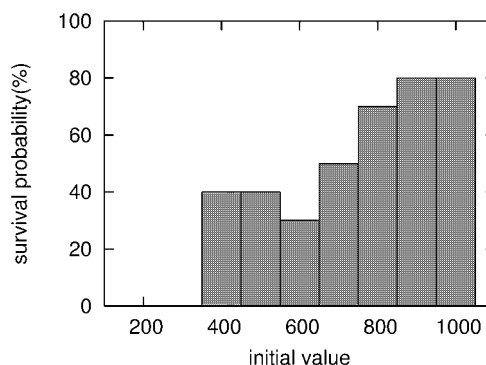


図 8: 初期菌糸に対する依存度

6. おわりに

現存する環境に適応しているハキリアリのシステムを計算機上に構築し、そこから行動規範の知見を得た後に、多数多機能エージェントの協調制御アルゴリズムに適用することを目標に本研究を行った。本論文ではその基盤をつくるべくハキリアリの特徴的だと考えられる行動のみのモデルを構築し、行動規範についても単純なものをういシミュレーションを行った。シミュレーションの結果、コロニーの形成に環境の要因が大きな部分を与えることが明らかになった。今後は、ハキリアリ実際の定量的なデータをもとにモデルを忠実に再現し、種々の実験を行い群知能に関する知見を集積する予定である。

参考文献

- [1] 出口弘; SOARS Spot oriented Agent Role Simulator の設計と応用, 第 32 回計測制御学会システム工学部会『社会組織経済におけるエージェント指向システムモデリング ~ エージェント指向社会科学への文理融合型の接近 ~』, pp.53-60 (2004).
- [2] 山本一徳; "SOARS を用いた村落の人口減少についてのデモグラフィックシミュレーション", 東京工業大学総合理工学研究科知能システム科学専攻平成 16 年度修士論文 (2005).