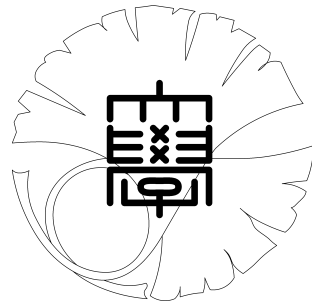


修士論文

軍隊アリの生態シミュレーションを用いた
協調行動の創発



2010年2月9日

指導教員 伊庭 斉志 教授

東京大学大学院 工学系研究科

電気系工学専攻

37-086460

石渡 裕之

Abstract

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.

内容概要

自然界に存在する様々なものは、長い年月をかけて進化してきたものである。現在まで生き残っている種は、環境の変化や外敵の侵略などからうまく身を守ることができたものであり、その生態や形状は最適化されたものであると言ってもいい。

その進化の方向性は様々であり、単体での行動に最適化された種もあれば、我々人間のように集団での生活を営むようになった種もある。

その中で社会性昆虫と呼ばれる種は、体の機構や脳は単純ながらも、小さな社会を営んでいることが知られている。単純な行動規範に則りつつも、群れ全体としては、統率のとれた群行動をとる姿が確認されている。これは工学への応用を考えた場合には、少ない計算量あるいは計算資源で、効率のよい結果を導き出すことを意味しており、彼らの行動を模範とすることで、工学的に望ましい性質を備えた手法の提案などもされている。

本論文では、軍隊アリが集団行動する際に見せる利他的な行動について、シミュレーションを行いながら、その行動原理を解明することを目指す。この利他行動は、行群の経路中にある溝に直面したアリが、自分たちの体を用いて橋を構築し、仲間を助けるといった協調行動をさす。これによって、群れ全体のパフォーマンスを向上させていることが、近年の研究によって確認されている。しかしながら、一見単純に見える彼らの行動の法則性などは、未だ完全には解明されていない。そこで本論文では、コンピュータシミュレーション上でこのような協調行動を再現し、作りながら理解していくことで、現実世界のアリとの接地を図り、行動規範を解明することを目指す。

目次

第1章 序論	1
1.1 背景	2
1.2 本研究の目的	2
1.3 本論文の構成	3
第2章 軍隊アリの利他的協調行動	5
2.1 軍隊アリとは	6
2.2 軍隊アリの身体	6
2.3 フェロモンコミュニケーション	6
2.4 利他行動とは	7
2.5 軍隊アリの協調行動	7
2.5.1 生きた橋	7
第3章 関連研究	9
3.1 構成論的アプローチを用いた研究	10
3.1.1 パターン形成	10
3.1.2 人工社会, 人工市場	11
3.1.3 音響の協和・不協和音知覚モデル	11
3.1.4 生物の種形成	12
3.1.5 動物の餌選択行動	12
3.1.6 進化ロボティクス	12
3.2 アリに関する研究	13
3.2.1 フェロモンコミュニケーションの起源に関する研究	13
3.2.2 蟻コロニーのマクロモデルの生成	13
3.2.3 Chain Formation に関する研究	14
3.2.4 利他行動を行う個体による群れ全体への寄与	17
3.3 応用研究	17
3.3.1 デジタルフェロモンロボット	17
3.3.2 ガスフェロモンロボット	17

3.3.3	フェロモンコミュニケーションを用いた協調搬送の研究	17
第4章	軍隊アリの生態シミュレータ	21
4.1	マルチエージェントシミュレータ	22
4.1.1	Swarm	22
4.2	画面説明	22
4.3	エージェントの動作	23
4.4	フェロモンコミュニケーション	23
4.5	帰巣行動	25
4.6	溝回避行動	25
4.7	利他行動	26
第5章	評価実験	28
5.1	実験1:仮説による判断基準	29
5.1.1	仮説	29
5.1.2	仮説検証実験	29
5.2	実験2:アリのチェーン構築を参考にした判断基準	31
5.2.1	チェーン構築とは?	31
5.2.2	トーラス環境におけるチェーン構築式検証実験	33
5.2.3	非トーラス環境におけるチェーン構築式検証実験	34
5.2.4	考察	37
5.3	実験3:エージェント数に応じた戦略の変更	39
5.3.1	軍隊アリの集団的な行動決定	39
5.3.2	比較実験	39
5.4	実験4:役割分化	43
5.4.1	固定役割と動的役割の比較実験	45
第6章	考察	49
6.1	利他行動の判断基準について	50
6.2	フェロモンコミュニケーションと近傍感知による創発	50
6.3	シミュレーションと生物実験の接地	50
第7章	結論	52
7.1	まとめ	53
7.2	得られた知見	53
7.3	今後の展望	54

7.3.1	群れの大規模化	54
7.3.2	餌場の動的な位置変更	54
7.3.3	軍隊アリの身体的な特徴の導入	54
	参考文献	57
	発表文献	60

目次

2.1	Living bridge	7
2.2	軍隊アリの利他行動 [19] より	8
3.1	実在の魚の模様 (A)(B)(C)(D) とシミュレーション結果 (E)(F)(G)(H) [22]	10
3.2	Sugarscape モデル [6]	11
3.3	Evolved Virtual Creatures [18]	13
3.4	中道らが用いたシミュレータ [23] より	14
3.5	車谷らが用いたシミュレータ [25] より	15
3.6	車谷らが用いたシミュレータ [26] より	16
3.7	経路中にある穴を協力して塞ぐアリ [19] より	18
3.8	pherobot [17]	19
3.9	Pheromone in real world [16]	19
3.10	藤澤らが製作したロボット [29]	20
4.1	シミュレータスクリーンショット	22
4.2	エージェントの状態遷移	24
4.3	シミュレータ動作	27
5.1	実験用マップ	30
5.2	Simple マップ実験結果	31
5.3	Diffucult マップ実験結果 1	32
5.4	Diffucult マップ実験結果 2	33
5.5	軍隊アリのチェーン構築 [1] より	34
5.6	実験に使用したマップ	35
5.7	Map1 トーラス 実験結果 (パフォーマンス)	35
5.8	Map1 トーラス 実験結果 (利他行動時間)	36
5.9	Map2 トーラス 実験結果 (パフォーマンス)	36
5.10	Map2 トーラス 実験結果 (利他行動時間)	37
5.11	Map1 非トーラス 実験結果 (パフォーマンス)	37
5.12	Map1 非トーラス 実験結果 (利他行動時間)	38

5.13 Map2 非トラス 実験結果 (パフォーマンス)	38
5.14 Map2 非トラス 実験結果 (利他行動時間)	39
5.15 実験結果比較	40
5.16 Map1 実験結果 (パフォーマンス)	41
5.17 Map1 実験結果 (利他行動時間)	41
5.18 Map2 実験結果 (パフォーマンス)	42
5.19 Map2 実験結果 (利他行動時間)	42
5.20 橋のサイズの変移	43
5.21 チェーンのサイズの変移 ([2] からのデータプロット)	44
5.22 生来の役割の時間による変異の一例	45
5.23 実験に使用したマップ	46
5.24 役割分担を行った際の実験結果 (Map1)	47
5.25 役割分担を行った際の実験結果 (Map2)	48
5.26 Map2 実験結果	48

表目次

4.1 エージェントの状態と行動	23
5.1 実験 1 実験条件	29
5.2 実験 2 実験条件	33
5.3 実験 3 実験条件	40
5.4 実験 4 実験条件	46

第1章

序論

1.1 背景

自然界に生きる生命は、時に人間が想像し難いほど効率的な動きをするものや、機能的な構造を持つ種が存在する。地球の歴史上、初期に地上に現れたとされる昆虫は、長い年月をかけ、現在まで生き残ったことから特に適応力の高い種であると考えられる。現在、昆虫の種数は地球上において最も多いとされており、見方によっては地球上で最も繁栄しているともいえる。

通常昆虫の脳は小さく、人間の脳のように複雑な情報処理をすることはできない。しかし昆虫の中には個体としての知能レベルは決して高くないが、群れを形成し、仲間との協調によって高い知能を実現している種がある。アリやハチに代表されるそれらの種は、社会性昆虫と呼ばれている。彼らは女王アリなどの群れの長を中心にコロニーを形成し、高度な協調行動によって仲間と支えあいながら生存競争を行っている。個体では知能が低いとされている彼らは、仲間との効率的な情報交換や協調行動によって高い知能を創発しているのである。

彼らの効率的な集団行動は工学的な関心の対象にもなっている。アリの集団行動に使われるフェロモンコミュニケーションからヒントを得た Ant Colony Optimization は、様々問題に適用可能な最適化手法として知られている。また、アリの集団行動を解明し、群ロボットに適用することで、中央集権的なコントロールから脱し、故障やトラブルに対してロバストな群ロボットコントロールを実現しようとする研究も知られている。しかしながら、彼らの生態については未だに解明がなされていない部分を数多く存在する。

対象の生物を模したモデルを作ることで、生物の生態を理解しようとする研究も行われている。そのようなアプローチは構成論的アプローチと呼ばれており、これによって未解明とされてきた生物の生態を説明付ける結果を挙げている研究も存在する。

構成論的アプローチによって作り挙げたモデルの妥当性を検証するために、生物実験のデータとの比較などを行う必要がある。その際、定量的に比較を行うためには、詳細なモデルの構築が必要であり、生物や自然界の対象を扱う場合は特に困難である。また、構成要素の増大や、モデルの複雑化は解析をより困難なものにする可能性が高い。そのため、構成論的アプローチで自然界の対象を取り扱う際には、最初はシンプルなモデルを構築し、それを基に改良を進め、生物実験などとの比較は定性的に行うという手法も取られている。

1.2 本研究の目的

本論文では、軍隊アリが行う利他的な協調行動について取り扱う。彼らは採餌行動中などに自身の身体をつなぎ合わせて「橋」を構築し、仲間を渡らせることで群れの活動を効率化するという協調行動を行うことがある。

軍隊アリは複雑な処理を行うような大きな脳を備えておらず、ほぼ盲目であり近距離の物の動きをわずかに認識できる程度の知覚しか備えていない。そのような条件にも関わらず、彼らは高

度な集団行動を実現している。単純な判断の積み重ねで、高度な協調行動を行うということは、工学への応用を考えた際に、有用な性質であるといえる。例えばマルチロボットのコントロールなどでは、少ない計算量で効率的な情報交換や協調行動を行うことが可能であることを意味している。

本研究では、軍隊アリの生態についての調査を行いながら、構成論的アプローチによって、シミュレータを作成することで、彼らの協調行動を理解することを目的としている。軍隊アリの生態については現在解明されていない部分も多く、そのような部分に関しては、仮設とシミュレーションによる検証を行いながら研究を進めてきた。

1.3 本論文の構成

本論文は全7章で構成されている。
各章の内容は以下の通りである。

第1章 序論

本章である。研究の背景を述べ、目的を明らかにする。

第2章 軍隊アリの利他的協調行動

本研究で取り扱う軍隊アリについての紹介を行う。また本論文で取り扱う特徴的な協調行動について解説を行う。

第3章 関連研究

関連性が高いと思われる研究についての紹介を行う。また、それらの研究との比較を通して、本研究の位置づけを明らかにする。

第4章 軍隊アリの生態シミュレータ

軍隊アリの協調行動を理解するために作成したシミュレータについての解説を行う。

第5章 実験

第4章で提案したモデルを実装し、行った評価実験について説明し、実験結果を示す。また、一部の実験では実在の軍隊アリの生物実験のデータとの比較を行うことで、本論文で作成したシミュレータの妥当性を検証する。

第6章 考察

実験から得られた結果に対して考察を行う。

第7章 まとめ

まとめを行い，本研究から得られた知見について述べる．最後に，今後の展望を記す．

第2章

軍隊アリの利他的協調行動

2.1 軍隊アリとは

軍隊アリはアリの中の特定の種である。真社会性昆虫として知られている。ここで「社会性」とは次の3つの性質を基準にしている。

1. 同種の複数個体が共同して子供を育てる。
2. 生殖のみを行う個体と生殖を行わない個体がいる。
3. 親世代と子世代が共存している。

この3つの性質全てを満たしていることが真社会性の定義となる。軍隊アリは真社会性を持つ数少ない種のうちの一つである。

主な餌は虫や小動物であり、数十万から数百万という規模で群れを成しているため、巣の周辺の餌は短期間で食べ尽くしてしまう。そのため固定の巣を持たず、定期的な大規模な移動を行うのが特徴である。この頻繁な移動のためか、軍隊アリの中には自らの身体を使って構造物を構築することが知られている。例えば、巣は地面に穴を掘って作るわけではなく、既にある洞窟などを利用する。その際天井が崩れないように、軍隊アリ達は自分の身体を用いて「柱」を構築して支えることが知られている。

2.2 軍隊アリの身体

軍隊アリも、他のアリ同様に一匹の女王アリを中心とした群れを作る。その他の働きアリ達も数種類いるが、基本的な構造は共通である。特徴を以下に挙げる。

- 脳みそがない
- 盲目である
- フェロモンを感知する器官がある
- 近距離ならば物が動いていることを感知できる

2.3 フェロモンコミュニケーション

フェロモンは昆虫同士の情報交換や、特定の行動の抑制などに使われる化学物質である。社会性昆虫であるアリは、高度の協調行動や状況判断をこのフェロモンによって実現している。

人間は光や音による情報交換を基本的にを行う。これらの手段は送信側から受信側への情報伝達が高速に行われるが、送信側が信号を発することを止めると、受信側は即座に受信ができなくなる。

一方でフェロモンコミュニケーションでは、遠くの仲間に情報を伝えることは難しいが、その場に止まることが可能である。これにより、フェロモンは場所・濃度の勾配などといった情報を非同期的に伝えている情報通信手段であるといえる。



図 2.1: Living bridge

2.4 利他行動とは

利他行動とは、自分自身の利益よりも他者の利益を優先する行動のことを指す。アリやハチは直接自分自身の子孫を残すことができるものは極僅かであり、群れの中のほとんどの個体が兵隊であり、その多くが女王や仲間のために命を落とす。この社会性により、アリは自然界の他の生物には見られないような高度な協調行動を実現しているものと思われる。

2.5 軍隊アリの協調行動

2.5.1 生きた橋

軍隊アリが行う特徴的な利他行動の一つとして、「橋」の構築が上げられる。本来、単体では通り抜けることが困難な溝や隙間を、兵隊アリが埋めることで仲間をショートカットさせるといった行為である。これに類する行為は、大小様々なものが目撃されており、植物の葉の小さな穴を埋めるような行為もあれば、数十匹が連結して作る橋もある。

この行為は、各所で目撃はされているものの、その行動原理は完全には解明されていない。例



図 2.2: 軍隊アリの利他行動 [19] より

えば、構築中の構造物を構成するアリの数が仲間のアリの行動に影響を与えているという報告はあるが [2]、アリがどのようにして仲間の数を数えているのかは定かではない。また、このような行為によって群れ全体として、餌の獲得数を向上させていることは報告されているが [19]、アリがどのような判断基準に基づいて橋を構築し、群れの能力向上を達成しているのかはわかっていない。

第3章

関連研究

概観

本章では、本論文に関連が深いと思われる研究について紹介を行う。以下、大きく2種類の研究紹介を行う。一つは、構成論的手法により、作りながら対象を理解していくといった手法を取る研究を紹介し、本研究との関連を述べる。もう一つは主に軍隊アリを対象として行った生物学の研究である。

3.1 構成論的アプローチを用いた研究

本研究では、第2章で紹介した軍隊アリの協調行動を再現・理解するために、構成論的アプローチを用いている。構成論的アプローチは対象となるモデルを作ることで、対象の理解を図るアプローチである。

3.1.1 パターン形成

Alan Turing は生物の形態生成をモルフォゲンという仮想的な化学物質の反応拡散で説明できるとするモデルを提案した。近年になって彼の提唱したモルフォゲンに対応する遺伝子が発見され、引き続き研究が行われている。例えば山口らは Turing の反応拡散モデルを参考にし、魚の模様がどのようにして現れるのかを遺伝子レベルで証明するための研究 [22] を行っている。この研究では、最初は実体のあるモデルの動きを参考にした仮説を立て、シミュレーションを用いた検証を行っていき、最終的にモデルとの対応を生物実験レベルで証明する。したがって、これは本稿で提案するアプローチの実現例であると考えられる。

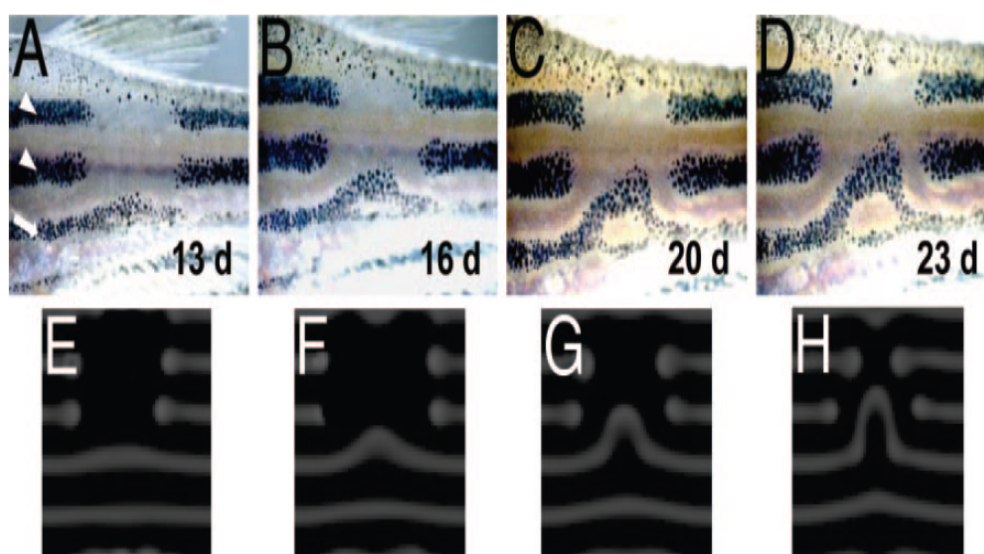


図 3.1: 実在の魚の模様 (A)(B)(C)(D) とシミュレーション結果 (E)(F)(G)(H) [22]

また、巖佐らはチューリングモデルを拡張し、バクテリアや皮膚癌のコロニー形成を説明するモデルを構築している [28]。パラメータ数を調整することで、栄養が十分に供給されれば球形の癌組織が、不足すれば成長がゆったりと起こり、でこぼこした複雑なコロニー形状が形成されることを検証した。

3.1.2 人工社会，人工市場

シュガースケープは Joshua Epstein と Robert Axtell によって提案された人工社会を形成するモデルである [6]。基本的にはアリが砂糖を求めて動き回るシミュレーションだが、交配や戦争、取引などの概念を取り入れることで社会現象のメカニズムを解明することを目的としている。

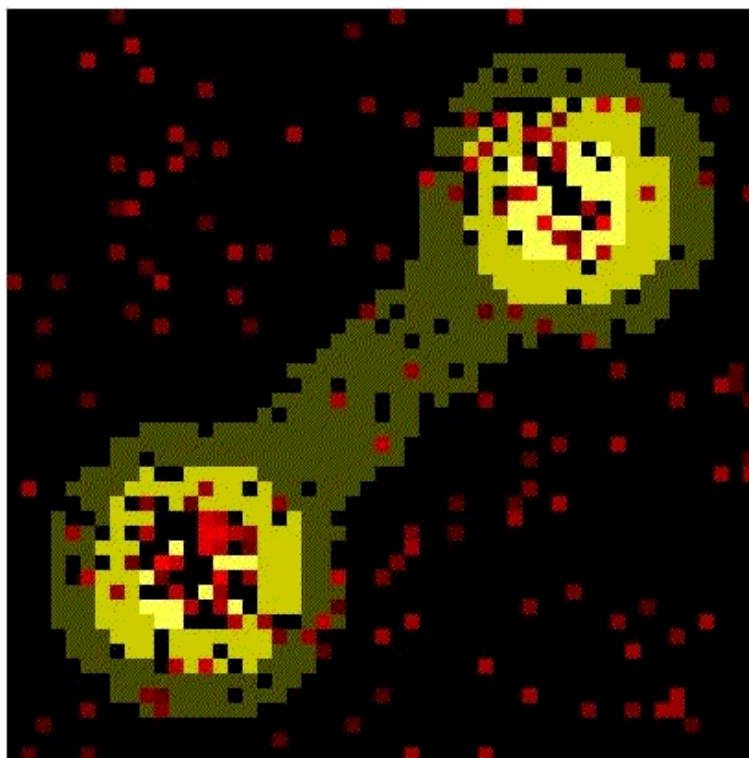


図 3.2: Sugarscape モデル [6]

また和泉 [24] は、実際のディーラへのインタビューを行ってマクロな現象（レート変動の頻度分布、コントラリ・オピニオンなど）のミクロレベルでの因果律における説明を試みている。

3.1.3 音響の協和・不協和音知覚モデル

二つ以上の楽音が鳴っているとき、人間はそれらが心地よい協和音が耳障りな不協和音かを知覚する。協和・不協和音の知覚モデルは、倍音同士が一致する度合いに依存するというヘルムホルツ [21] の音近親説が基本となっている。また、亀岡、厨川 [10, 11] によって数学的なモデルとして定式化され、心理実験によって内部のパラメータが決定された。

3.1.4 生物の種形成

Clement は生物の種形成について、魚の生態を調べることで研究した [4]。魚を模した人工生命を作り、どのようなクラスタリングが種形成に有効であるかを調べた。

また Metivier は、ストレスが個体の種形成にどのように影響するのかを Life Drop というシミュレータを用いて検証を行った [13]。環境から受けるストレスによって異種間での交叉などが起こり易くなり、それが種形成に影響を与えるようなシミュレータを作成した。その結果、ストレスが進化に大きく貢献しているという考えに至った。シミュレーション結果はバクテリアを用いた生物実験の結果とも対応している。

3.1.5 動物の餌選択行動

動物の補食行動 (Foraging) における最適戦略の研究が、数理生態学 [8] や行動生態学 [12] の分野で盛んに研究されている。複数種の食物があり、各々の食物の栄養価 (g_i) と摂取にかかわるコスト (h_i) が与えられているとする。このとき補食行動の最適戦略の理論から導き出される仮説は次のようになる。

Claim1 各食物が一樣な頻度で生じる場合、食物の選好順序は $\frac{g}{h}$ の大きい順になる。

Claim2 好ましい食物 ($\frac{g}{h}$ が大きい食物) が豊富にあれば、それだけを食べるべきである。

Claim3 好ましい食物を食べるか否かの判断は、より好ましくない食物の量に依存しない。

筆者らは、クラシファイアシステムを用いて最適戦略の学習などのシミュレーションを行ない、これらの仮説に適合するルールが獲得されることを確認した [7]。さらに、このような餌選択を実現するための探索像 (効率よい採餌のために形成される認知モデル) の研究も行われている [27]。また Erichsen らは認知モデルをシジュウカラを用いて実験的に検証している [9]。

3.1.6 進化ロボティクス

Karl Sims は有向グラフで表すことのできるクリーチャーに動きを与えることで、生物のように見える Evolved Virtual Creatures を作った [18]。ここで生まれるクリーチャーは人間が想像もしない形や動きを発現することもあり、ロボットの形態生成に応用する研究もある [20]。

構成論的アプローチにより、ロボットに人間の幼児並の学習能力を獲得をさせることを目的とした RobotCub というプロジェクトもある [3, 5, 15]。このプロジェクトでは、幼児が特定のタスクに対して、どのように学習するのか、またその学習には何が必要なのかを明らかにすることを目標にしている。

また川人らはサルの歩行中の脳活動情報を用いて、ヒューマノイドロボットで歩行を再現することで脳をより理解するための研究を行った [14]。また神崎らはカイコガ、あるいはその脳とロボットを接続し、カイコガにロボットをコントロールさせることで脳の仕組みを理解する研究を

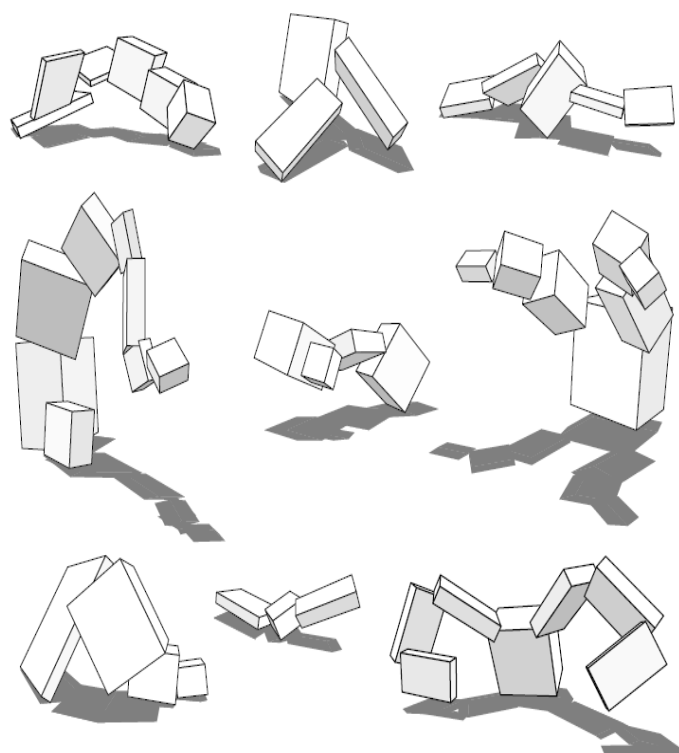


図 3.3: Evolved Virtual Creatures [18]

行っている [30] .

3.2 アリに関する研究

3.2.1 フェロモンコミュニケーションの起源に関する研究

中道らは図 3.4 に示したようなシンプルなシミュレータを用いて昆虫が行うフェロモンコミュニケーションを創発するための研究を行った. 基本的な構成要素を用意し, 進化計算を行うことで, フェロモンコミュニケーションがどのようにして創発したのか, その起源を探るための研究である. その中で, 複数種類のフェロモンを用いることも可能なようにしており, 単体のフェロモンを用いたものとの比較などを行った. また, 進化計算により得られたシミュレータは人手で設計したコミュニケーションよりも適応的な振る舞いを実現している.

3.2.2 蟻コロニーのマクロモデルの生成

車谷らはアリが餌を集めるフェロモントレイルモデルにおいて, ミクロな構成要素の振る舞いからマクロな挙動を推論する方法を提案している. [25, 26] 作成するモデルにおいては, 餌を集めるパフォーマンスだけではなく, 実在のアリの挙動などにも注意を払い、「過度な入力に

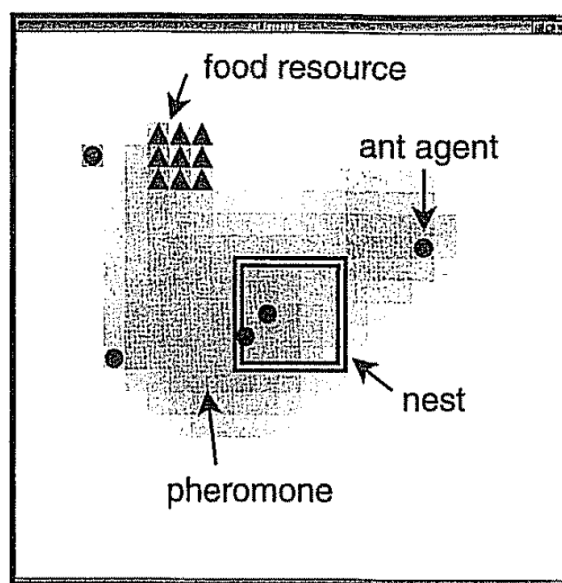


図 3.4: 中道らが用いたシミュレータ [23] より

よって生物の感覚機能は飽和する」という生物学的な根拠を用いて、エージェントのフェロモンに対する感受性を一時的に失わせるというメカニズムを導入することで、採餌行動場所の一点集中を排除し、リスクを分散しつつ効率的に餌を収集するマクロモデルを実現した。

3.2.3 Chain Formation に関する研究

A.Lioni らは、軍隊アリが自身の身体を用いて構築する「Chain」に関する研究を行っている。この Chain は、本論文で取り扱う橋の構築と類似するトピックとして知られており、ある程度以上の高低差があるような場面において、仲間を安全に下ろすことや、上に登らせることを可能にしている。

A.Lioni らはこの協調行動を行う際の軍隊アリの挙動に注目し、研究室内に軍隊アリの巣を作り、その動きを観察することで、行動原理の解明をしようと試みた。その結果、構築中の Chain に接近した軍隊アリの行動はチェーンを形作っている仲間の数と確率に影響されているという結論にいたり、その確率を近似する式を導き出した。

また、Chain が複数箇所に構築されている場合、軍隊アリがどのような行動に出るのかを調べたところ、活動中の群れの個体数に応じて、その行動を変化させていることも確認した。群れの個体数が多いときには、複数箇所にチェーンを作り、少ないときには作らない。そして、中間程度の数の場合には、一ヶ所に集中して作るといった動きが観察されている。

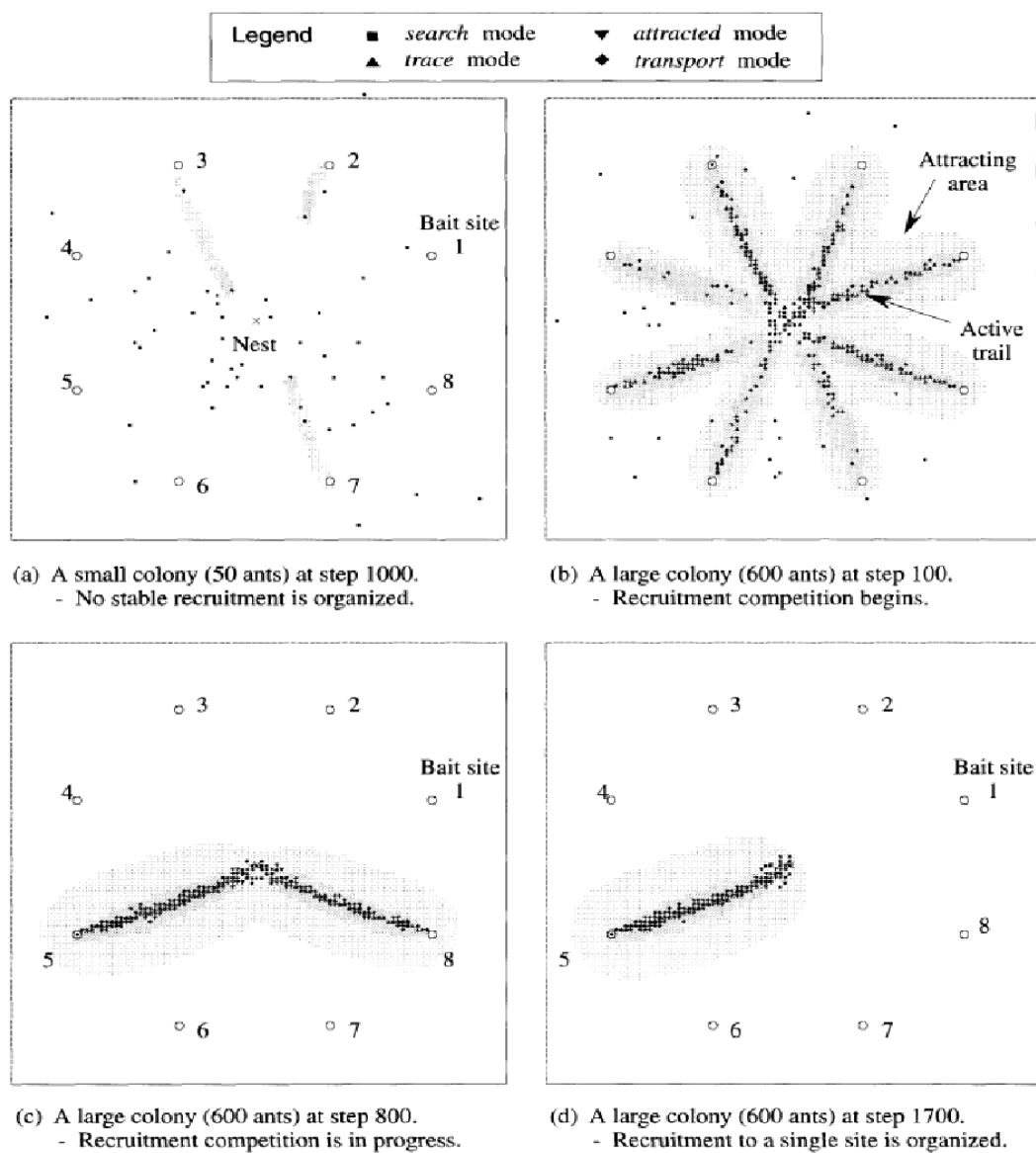


図 3.5: 車谷らを用いたシミュレータ [25] より

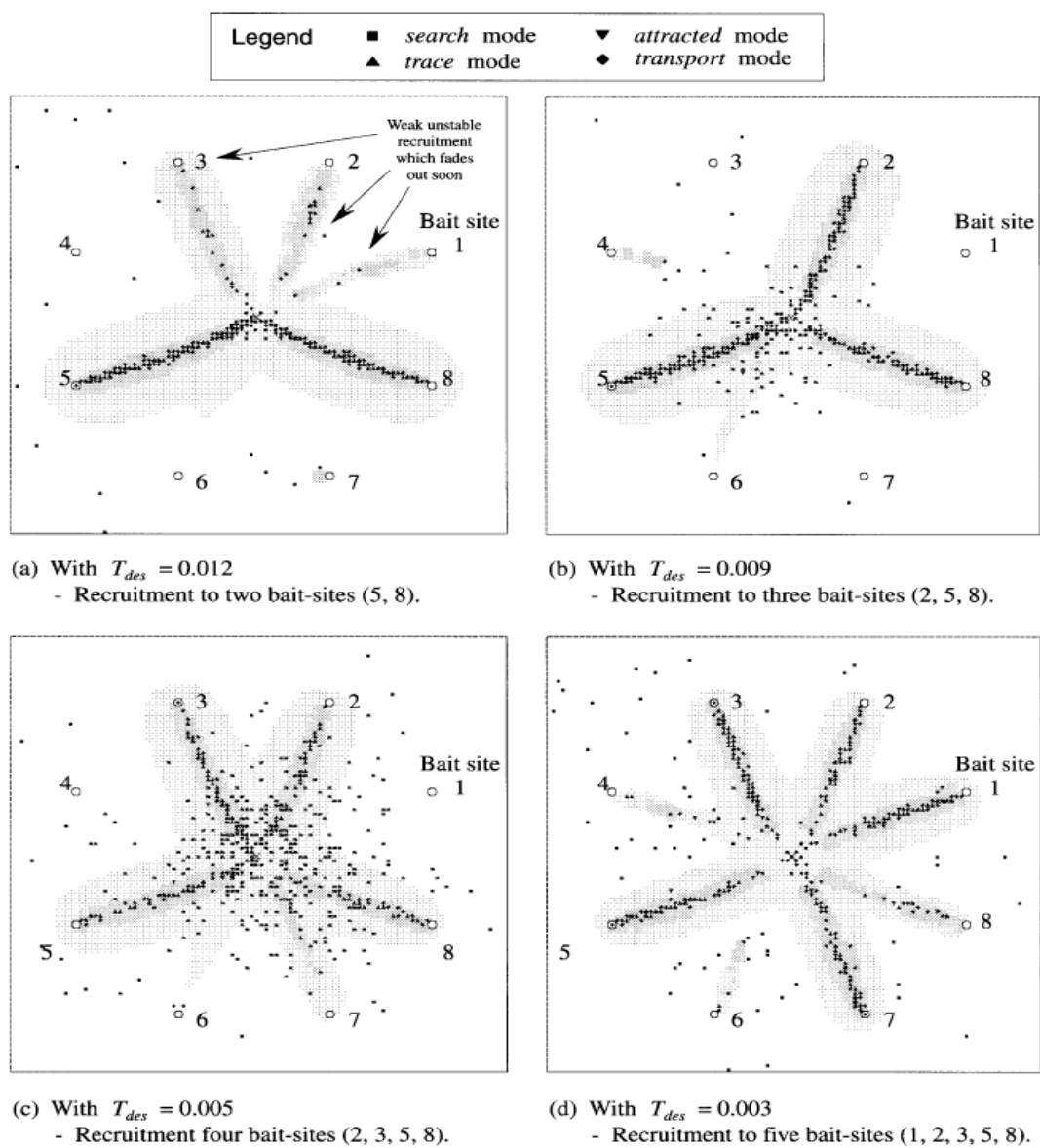


図 1 エージェントの空間内での分布 (不応期メカニズムを有する場合)

図 3.6: 車谷らを用いたシミュレータ [26] より

3.2.4 利他行動を行う個体による群れ全体への寄与

S.Powell は、アリ行群の経路中に、アリの行動を妨げるような小さな穴が複数あった場合に、一部のアリが自己犠牲的な行為によって、自らの身体を使うことでこの穴を埋めていることに着目した。通常のアリが通る経路とは異なり、穴が開いた道を通る際には移動速度が落ちてしまうが、仲間のアリが身体を張ってこの穴を埋めることで、移動速度を落とさずに行群することを可能にしており、群れ全体の活動に寄与していること示した。[19] また、彼らの動きから穴を塞ぐ協調行動を行わなかった場合に比べ、どの程度の性能向上が見られたかを数値的に示した。その中で、比較的大きな穴を埋める際には、初めは小さなアリがその穴を塞ぐこともあるが、適度なサイズのアリがいた場合には、役割を交換していることも観察できたという。

3.3 応用研究

3.3.1 デジタルフェロモンロボット

昆虫が行う協調行動を現実のロボットに応用する研究がいくつかされている。まず、フェロモンをデジタルデータとして再現して利用しようというものがある。[17]

フェロモンコミュニケーションは環境を介した非同期コミュニケーション手法である。そのためフェロモンを残し、拡散し、一定時間が過ぎれば薄めて消すような機能を持つロボットを定義し、これをフェロロボットと呼んでいる。フェロロボットは上記の機能に加え、自分たちがいる空間の内部構造などをグラフ構造として保持する機能まで備えている。そのため、フェロロボットからのデータを利用してグラフアルゴリズムをそのまま使うこともできる。

フェロロボットはこれらの機能を赤外線通信により実現している。しかしフェロロボットはそれ自体で探索を行うようなものではないため、フェロモンの情報を有効に活用するには別に探索用のロボットが必要である。またフェロロボットの保持する情報を人間に見えるように加工し、表示するデバイスも合わせて開発済みであり、自律型ロボットのためだけではなく人間のサポートも視野にいられている。

3.3.2 ガスフェロモンロボット

ガスとガスセンサー搭載のロボットを用いることで同様の効果を実現しているロボットもある。[16] 実際に化学物質を用いることで、フェロモンの持つ特性である揮発性などを再現することに成功している。

3.3.3 フェロモンコミュニケーションを用いた協調搬送の研究

藤澤らはエタノールとアルコールセンサを用いて、フェロモンコミュニケーションを実世界で実現する群ロボットに関する研究を行っている。[29] タスクとして、1つの餌を複数個体で運ぶ協

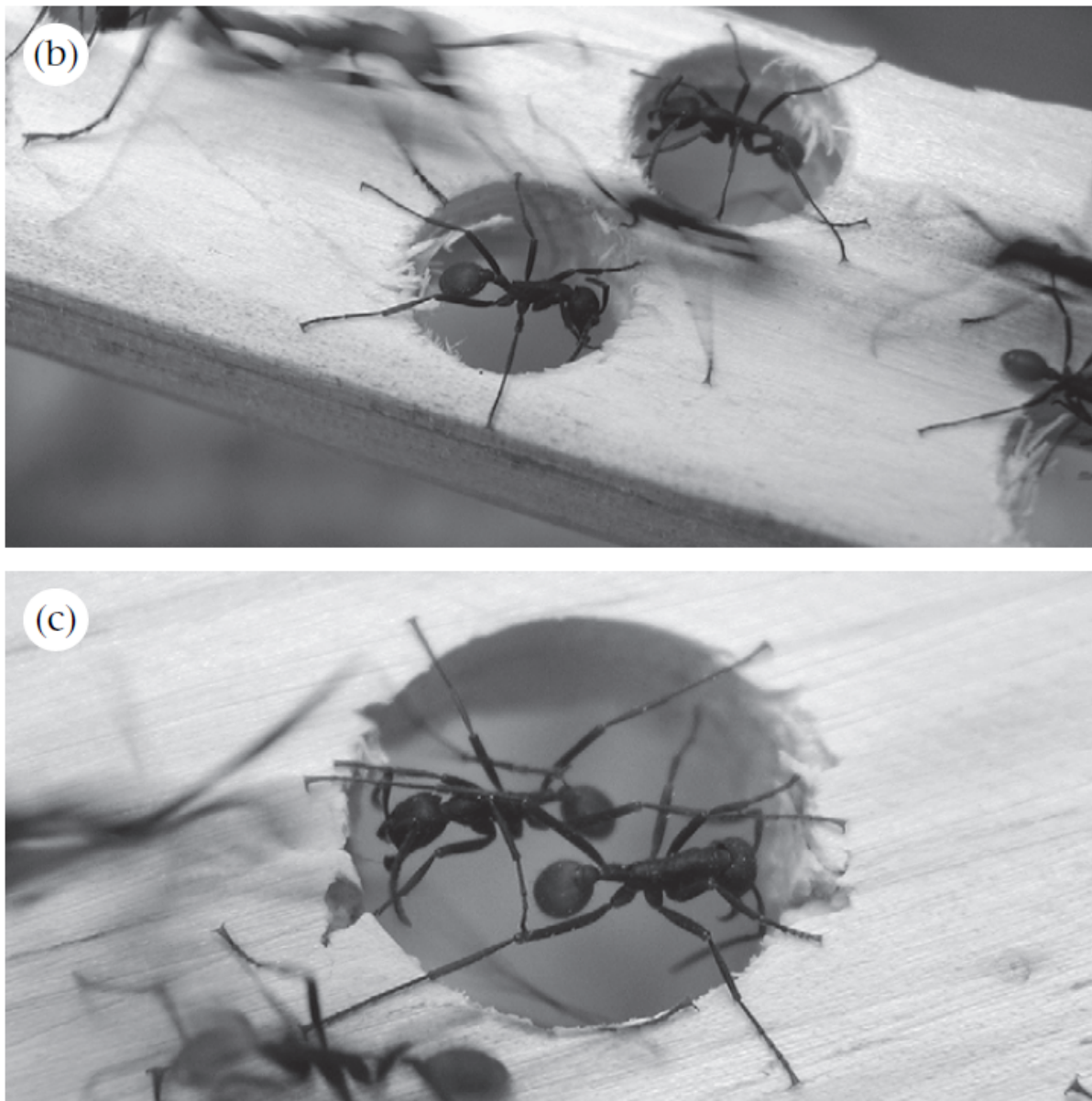


図 3.7: 経路中にある穴を協力して塞ぐアリ [19] より

調搬送を取り扱っている。餌の重量は大きめに設定されており、単体では運ぶことができないようになっている。そのため、フェロモンにより仲間を集め、進行方向などを意識しながら餌を運ぶ必要があるものになっている。



図 3.8: pherobot [17]

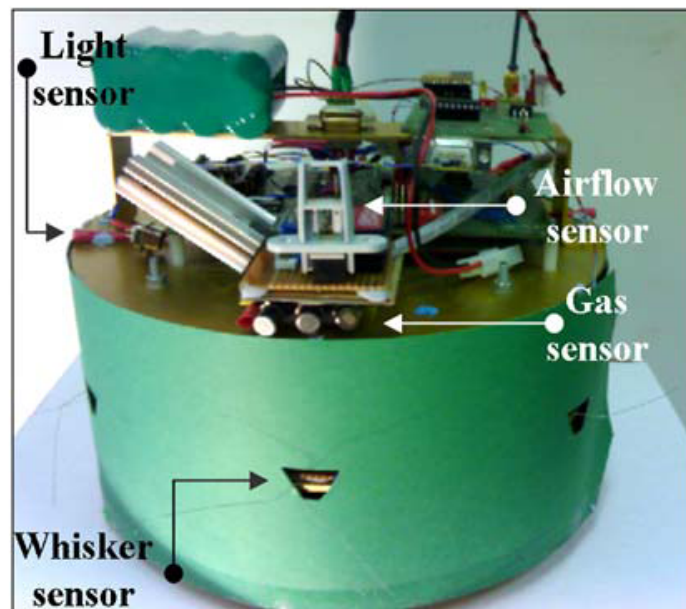


図 3.9: Pheromone in real world [16]

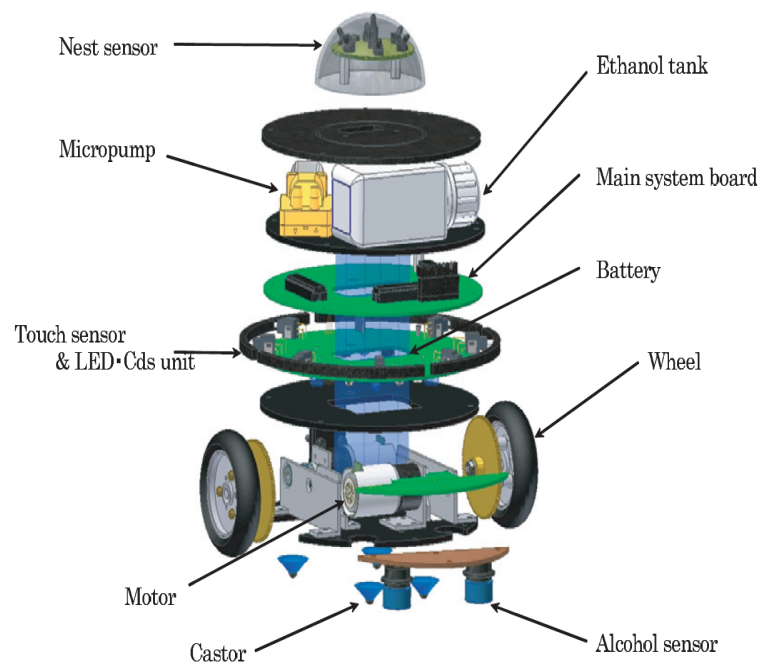


図 3.10: 藤澤らが製作したロボット [29]

第4章

軍隊アリの生態シミュレータ

4.1 マルチエージェントシミュレータ

シミュレータでは、軍隊アリが餌を集める行動をモデル化する。ここでは、作成したシミュレータについての解説を行う。

4.1.1 Swarm

Swarm はマルチエージェントシミュレーションを作成するためのライブラリである。Objective-C または Java から利用することができる。マルチエージェントシミュレータを作成するためのライブラリやソフトウェアは他にもあるが、自由度、作りやすさなどの観点から今回はこの Swarm を用いてマルチエージェントシミュレータを作成し、実験を行うこととした。

4.2 画面説明

図 4.1 はシミュレータのスクリーンショットである。図中の「エージェント」は軍隊アリの動きを模倣した動きをするものである。その詳細な動作については後述する。「巣」はエージェントの初期位置である。また「餌」を持ち帰る場所でもある。「餌」の位置は固定であり、エージェントはこれを探し出し、「巣」に持ち帰ることを目的としている。「溝」はエージェントの動きを妨げるものであり、エージェントは通常これを越えて進むことができないものとする。

また白いグリッドはエージェントが行動可能な場所を表わしており、一つのグリッドに同時に存在できるエージェントは1個体だけとする。

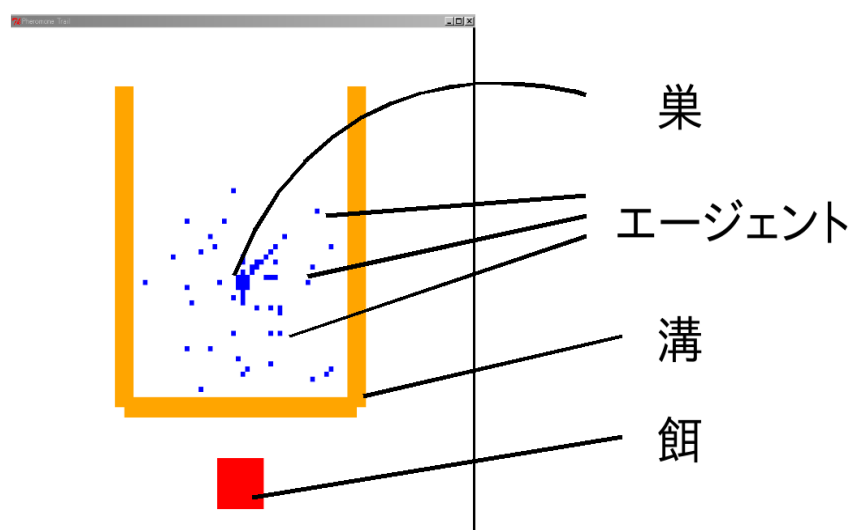


図 4.1: シミュレータスクリーンショット

表 4.1: 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，ランダムウォークで餌を探索する．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，その濃度の濃い方向に引き寄せられる．
Return	フェロモンを発しながら餌を巣まで持ち帰る．そして巣に到着したとき Search 状態に遷移する．
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．

4.3 エージェントの動作

各エージェントは Fig. 4.2 の状態遷移図に従って動く．また各状態の動きを Table 4.1 に示す． Search 状態，Return 状態のエージェントは周囲 8 近傍に動くことができる．ただし，溝がある場所や他のエージェントが既に存在するグリッドへは移動することができない．

この3状態の遷移を繰り返しながらエージェントは餌を集めるために行動する．しかし，Altruism 状態へ遷移するための「条件」は，生物学系の研究においても完全には解明されていない．そこで本論文では，以下の2種類の方法を用いて研究を進めた．

- アリの生態を考慮した上で独自の仮説を立て，シミュレータに組み込み，実験において検証を行う．
- 他のアリの協調行動などを参考にし，実験において検証を行う．

4.4 フェロモンコミュニケーション

フェロモンは動物などが発する揮発性の科学物質である．フェロモンは以下のような働きをする．

- 時間が経過と共に薄まり，やがては消える
- 同じ場所で重ねて分泌されれば累積されていき，強度が上がる
- 周囲に拡散することで情報を伝える役割を行う

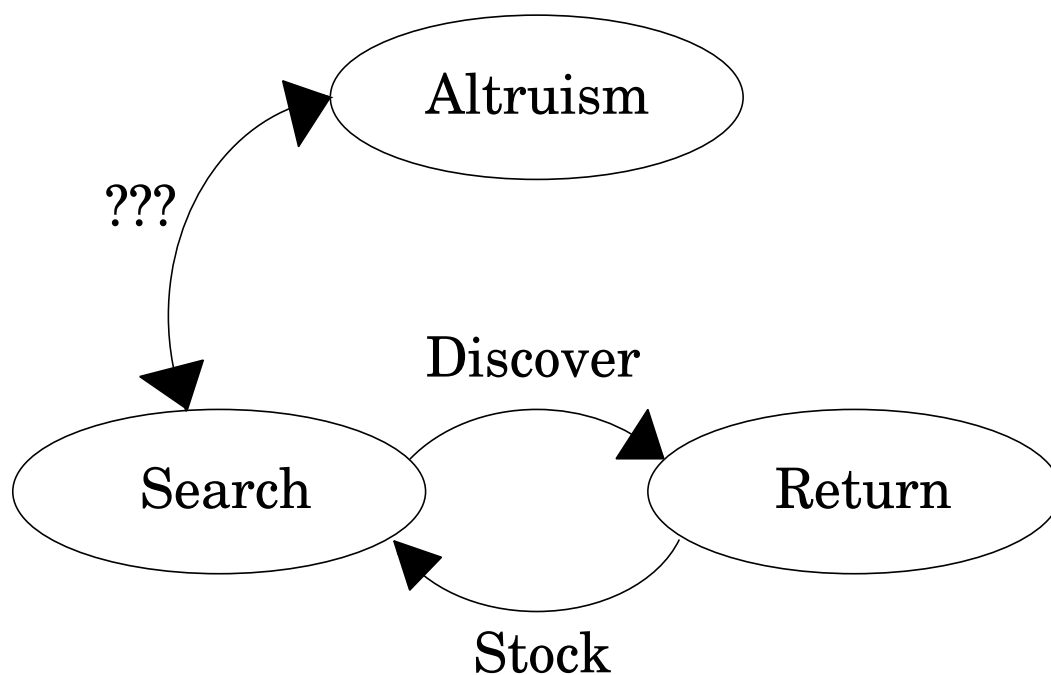


図 4.2: エージェントの状態遷移

一部の昆虫はこのフェロモンを用いて仲間とのコミュニケーションを取る。このフェロモンによるコミュニケーションは環境を介して行うのが特徴である。情報を発してから受け手が受け取るまでに遅延があるので、非同期的なコミュニケーション手段であるといえる。アリは巣に餌を集める際にこのフェロモンを用いて活動する。

フェロモンコミュニケーションの優れている点として、それ自体がタイムスタンプのような機能を持っていることが挙げられる。これにより、場所と時間、あるいは仲間の数などの情報を交換することが可能である。

本シミュレータ内においてもフェロモンは同様の役割を果たす。フェロモンは発せられると減衰し、周囲に広がりながら、仲間に情報を伝える。ここで $Pheromone(x, y, t)$ をある地点 (x, y) における t ステップ目のフェロモンの濃度であるとする。すると $t + 1$ ステップにおける (x, y) のフェロモンの濃度は以下の式で表される。

$$\begin{aligned}
 Pheromone(x, y, t + 1) = & Pheromone(x, y, t) + diffusionRate(Pheromone(x, y + 1, t) \\
 & + Pheromone(x, y - 1, t) + Pheromone(x + 1, y, t) \\
 & + Pheromone(x - 1, y, t) - 5(Pheromone(x, y, t))) \quad (4.1)
 \end{aligned}$$

ここで、 $diffusionRate$ はフェロモンの減衰率を表している。

Search の状態のエージェントは、通常ランダムウォークで餌の探索を行うが、フェロモンを感知するとフェロモン濃度の濃い方へと引き寄せられるように動くようにしている。さらに、巣から遠い方向のフェロモンは、実際の濃度よりも濃く感知するように補正を加えている。これによ

り、餌近辺に進みやすくなっており、一度エージェントが餌場を発見すると、仲間のエージェントがそれに続き、効率的に採餌行動を行うようになっている。

なお、実際の軍隊アリは餌の発見の際に以外にも、様々な場面でフェロモンを活用している。同一種の軍隊アリであっても異なる群れのメンバーである場合は区別が必要であり、その判断のために用いられるケースもある。また、女王アリは兵隊アリの成長を抑制するフェロモンを発することでカースト制度を実現し、異なる役割を持った複数種の兵隊アリを作っている。このように軍隊アリは実際には複数のフェロモンを有効に活用することで、小さな社会を営んでいるが、このシミュレータの中では、それらには触れず、餌の発見の際にのみフェロモンによる誘引を行うものとする。

4.5 帰巣行動

実在の軍隊アリは、太陽の方向などを利用することで大まかな巣の位置を覚えており、ある程度巣に近づいた後に、フェロモンなどを辿ることで巣に帰るといふ。本シミュレータでは、この部分は簡易的に作成しており、エージェントは予め巣の位置、方向を知っているものとして帰巣することにしている。

4.6 溝回避行動

帰巣の際、溝によりエージェントの進行が妨げられた場合、回避しながら帰る必要がある。場にフェロモンが存在しない場合は、ランダムにどちらかの方向に進むものとしている。そしてフェロモンが存在している場合は、フェロモンを用いて確率的に回避する方向を決定することになっている。

エージェントが溝を発見した場合、右側の方向へ進行する確率を P_r 、左側の方向へ進行する確率を P_l としたとき、以下の式に従った動きをするようにした。なお、 $Pheromone_{right}$ はエージェントの進行方向を基準として、右側にあるフェロモンの濃度を、 $Pheromone_{left}$ は左側にあるフェロモンの濃度を洗わしている。

$$P_r = \frac{Pheromone_{right}}{Pheromone_{left} + Pheromone_{right}} \quad (4.2)$$

$$P_l = \frac{Pheromone_{left}}{Pheromone_{left} + Pheromone_{right}} \quad (4.3)$$

フェロモンの濃度により進行方向を決定することで、どちらかの経路の方が短い距離で餌場と巣を往復できるような場合には、短い経路の方がフェロモンの濃度が濃い状態になるため、エージェントは近い経路を判断できるようになる。

4.7 利他行動

図 4.2 に示したように、エージェントは特定の条件を満たしたときに Altruism 状態に遷移し、「橋」を構築する。「橋」となったエージェントは動くことはできず、その上に仲間のエージェントを一体だけ置いておくことが可能となる。つまり、通常の探索空間と同様に、一つのグリッド内に存在できるエージェントの数は1個体のみとなる。

図 4.3 にシミュレータの大まかな流れを示す。

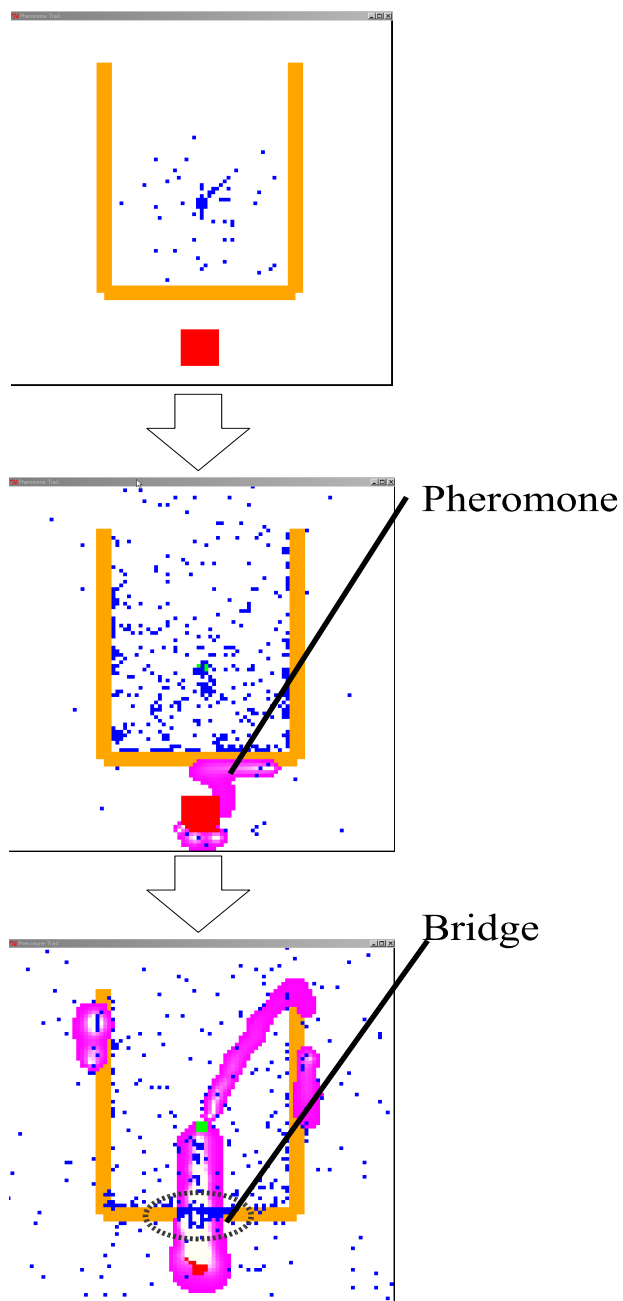


図 4.3: シミュレータ動作

第5章

評価実験

概要

モデルの有効性を評価するため、評価実験を行った。ここでは大きく2種類の実験により、作成したモデルの動きと実際の軍隊アリの動きの接地を図った。

5.1 実験 1: 仮説による判断基準

5.1.1 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行い、それぞれの性質を検証した。

方法 1: 近傍に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は溝の上に橋を構築する。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

前述した通り、このシミュレータにおけるフェロモンはエージェントがエサにたどり着いた際に分泌され、これによって仲間にエサの在り処を伝える役目をするものである。このため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、またこれから通る場所であるとも考えられる。この性質を利用することで効率的な場所に橋を作成できだろうと仮定し、フェロモンによる判断基準を検証することとした。

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。

5.1.2 仮説検証実験

実験は図 5.1 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。表 5.1 に実験条件を示す。実験はそれぞれの条件につき10回ずつ行い、一定時間内に集められた餌の数の平均などを評価指標とした。

表 5.1: 実験 1 実験条件

Number of Step	700
Population	20, 40, 60, 80, 100, 120, 140, 160, 180

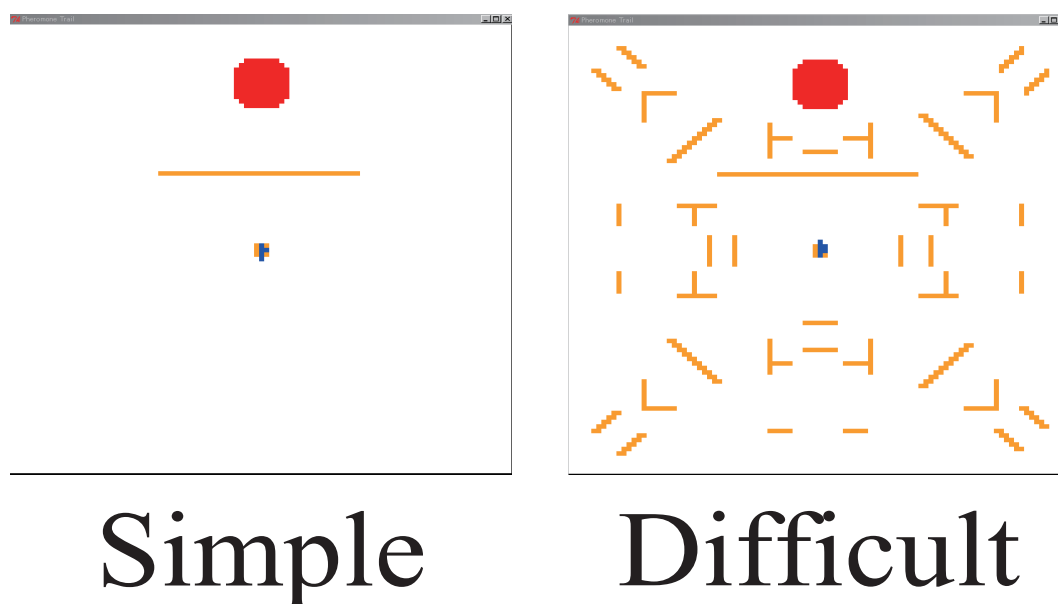


図 5.1: 実験用マップ

Simple マップでの実験結果を図 5.2 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。なお、図中「Neighbor」は方法 1、「Pheromone」は方法 2、「No Altruism」は橋を作らずショートカットも行わない場合の結果を表している。ショートカットのために橋を構築する方が橋を構築しない「No Altruism」よりも高いパフォーマンスを発揮していることが確認できる。しかしながらエージェント数が 60 程度までは分散も大きく、必ずしも性能の向上を達成しているわけではないことも読み取れる。方法 1 と方法 2 を比較した場合、エージェント数が少ない場合においては、方法 2 の方が若干良い成績を挙げていることがわかる。

次に、Difficult マップでの図 5.3 と図 5.4 に実験結果を示す。Difficult マップにおいても Simple マップと同じような性質が確認できる。平均的にショートカットを行うシミュレータの方が高いパフォーマンスを発揮し、方法 2 の方が常に良い成績を挙げていることがわかる。

図 5.4 は実験を別の尺度から観察したものである。横軸は先ほどまで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累計回数、エージェントが橋を渡った累計回数をカウントし、それらの比率とした。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、非効率的であるいえる。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き設けておら

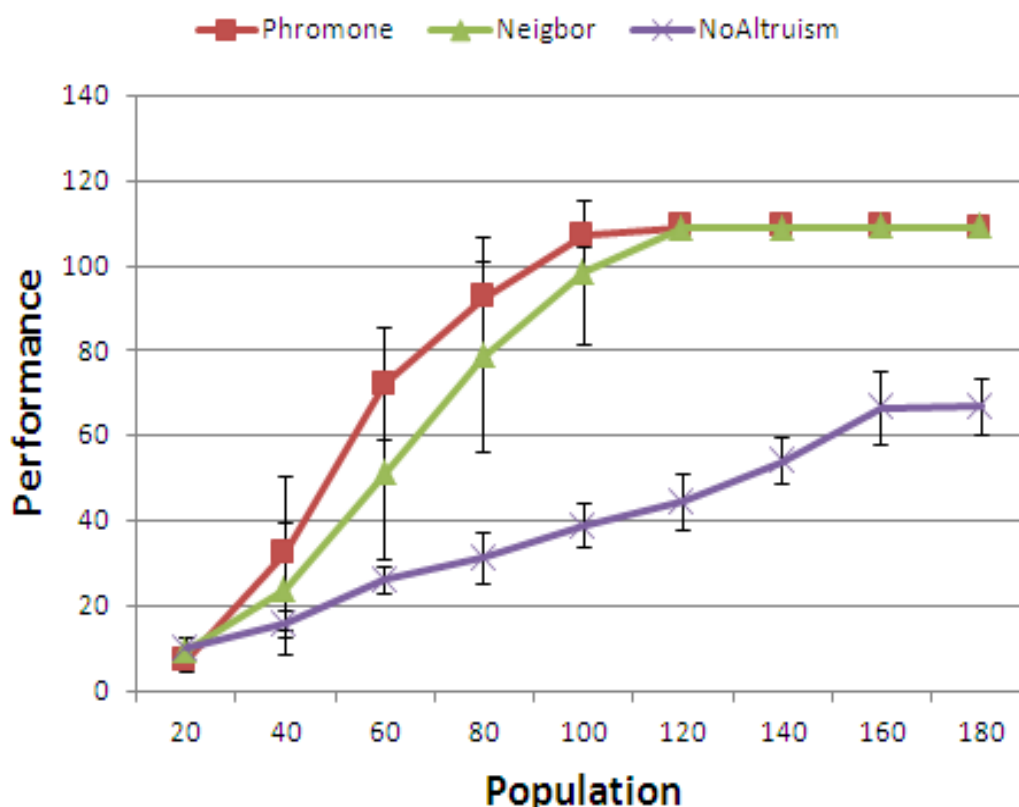


図 5.2: Simple マップ実験結果

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。

5.2 実験2:アリのチェーン構築を参考にした判断基準

5.2.1 チェーン構築とは？

橋の構築と類似する利他的な協調行動として、チェーン構築がある。ここで言うチェーンとは、アリが行軍中に極端な高低差を見つけたときに自らの体を使って構築するものである。これによって仲間のアリを安全に下へと下ろすことが可能になる。

Lioni らの研究 [1] では、研究室内にアリの巣を作り、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」

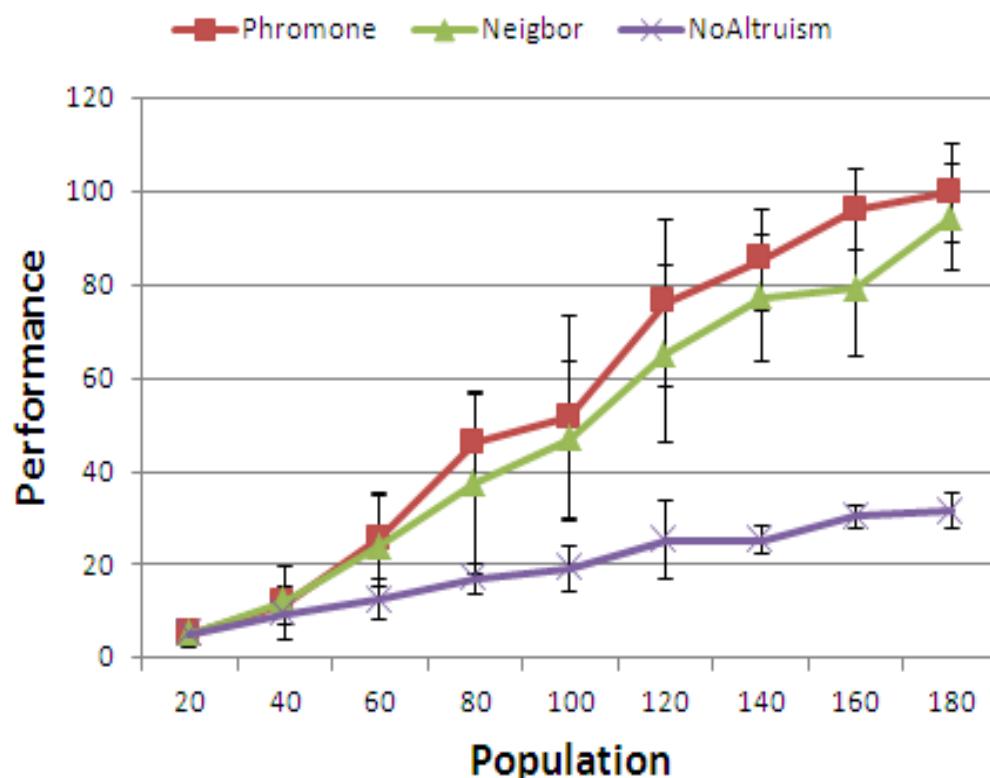


図 5.3: Diffucult マップ実験結果 1

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.

$$P_e = C_{e0} + \frac{C_{e1}X}{C_{e2} + X} \quad (5.1)$$

$$P_s = C_{s0} + \frac{C_{s1}X}{C_{s2} + X^\nu} \quad (5.2)$$

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.

ここではチェーン構築の動きを取り入れたシミュレータの性能を検証するために, フェロモン濃度を Altruism 状態に遷移するための条件として使用したものとの比較実験を行う. 上端と下端, 右端と左端がそれぞれ繋がっているトーラス環境と, 繋がっていない非トーラス環境それぞれについて以下のような2種類のマップにおいて実験を行った. 表 5.2 に実験条件を示す. 実験はそれぞれの条件で 10 回行い, 一定時間内に集めることができた餌の数, エージェントの累計他行動時間などを評価指標とした.

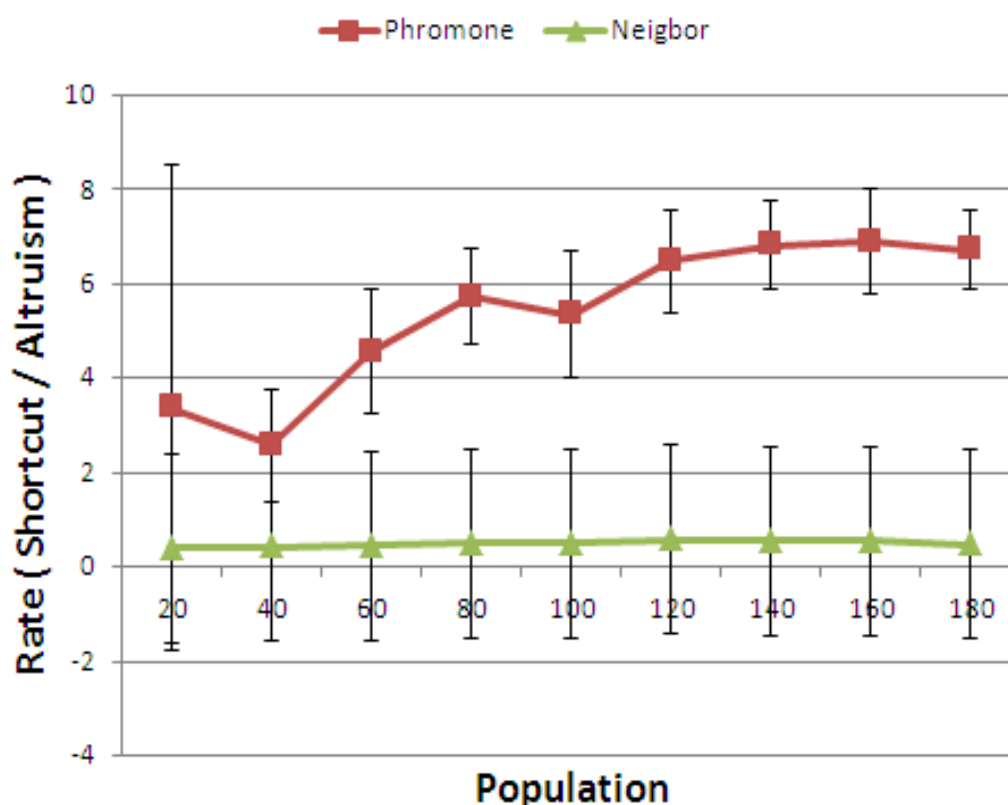


図 5.4: Diffucult マップ実験結果 2

表 5.2: 実験 2 実験条件

Number of Step	4000
Population	80, 160, 240, 320, 400

5.2.2 トーラス環境におけるチェーン構築式検証実験

図 5.7 にトーラス環境における実験結果を示す。横軸をエージェント数、縦軸を一定時間内に集められた餌の数としている。エージェント数が少ない中盤においては、チェーン構築の動きを取り入れたモデルの方が高いパフォーマンスを示しているが、エージェント数が十分に多い場合、分散なども考慮に入れると有意な差が見られない。

Map2 は、巣の餌場の間にある大きな溝を取り除き、その他の場所にランダムに溝を接地したマップである。つまり、如何に無駄な橋を作らずに餌を集めることができるのかを調べる目的で作ったマップである。

図 5.9 では、常にフェロモンを判断基準として用いたものの方が高いパフォーマンスを示している。図 5.10 から読み取れるようにチェーン構築を判断基準として取り入れた方法は、不必要

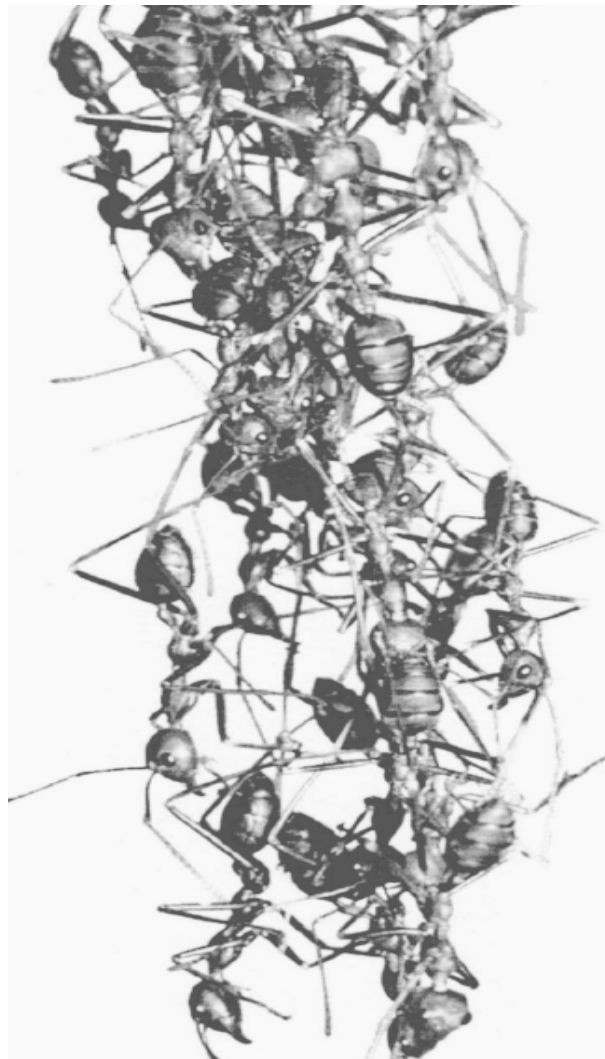


図 5.5: 軍隊アリのチェーン構築 [1] より

な箇所にも橋を作り、餌の探索や運搬を行うワーカーの数を減らしてしまったものと考えられる。

以上の実験結果から、フェロモンを判断基準として用いた手法は、少ないエージェント数で橋を構築し、効率的に仲間のサポートを行っているものと思われる。しかしながら、フェロモンを用いて橋の構築のタイミングと場所を決定するには、一度仲間が餌場にたどり着いている必要がある。トーラス環境では、溝に阻まれることなく餌場に到達することも可能であるため、そのような要素を排除した実験も必要である。そこで、非トーラス環境におけるパフォーマンスをチェックすることで、性質がどのように変化するかを示す。

5.2.3 非トーラス環境におけるチェーン構築式検証実験

以下に非トーラス環境における実験結果を示す。

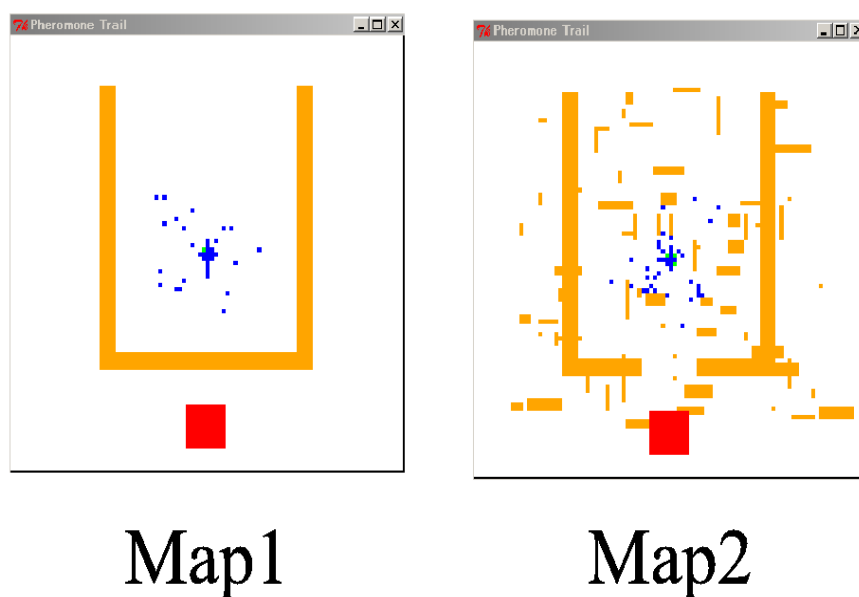


図 5.6: 実験に使用したマップ

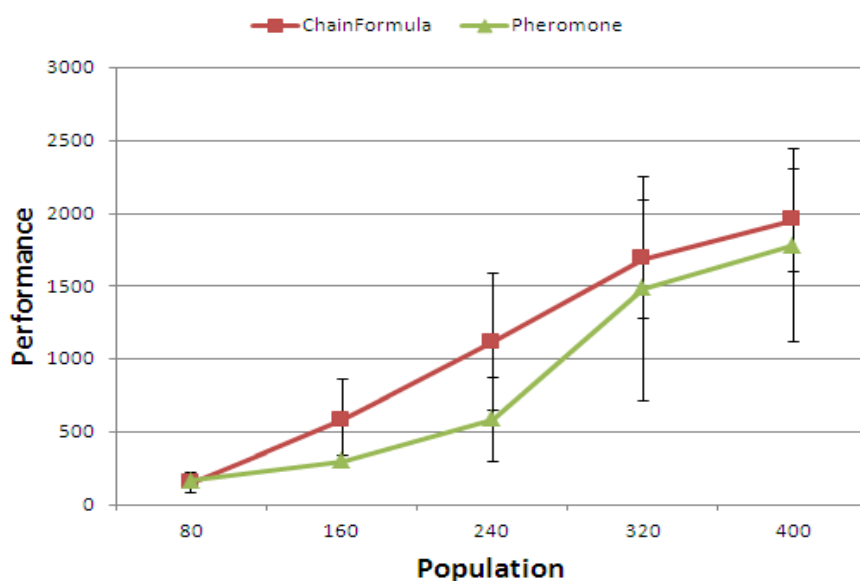


図 5.7: Map1 トーラス 実験結果 (パフォーマンス)

図 5.11 は, Map1 における実験結果を示したものである. 図 5.7 よりも顕著に性能差が表れていることが確認できる. 餌場に辿り着くことなく, 橋の構築場所を決定できるチェーン構築の判断方法の方が, 早く餌を集めることができたものと考えられる.

図 5.12, 図 5.14 も同様の実験結果示している.

図 5.13, 図 5.14 に Map2 における実験結果を示す. トーラス環境と同様に, Map2 においては

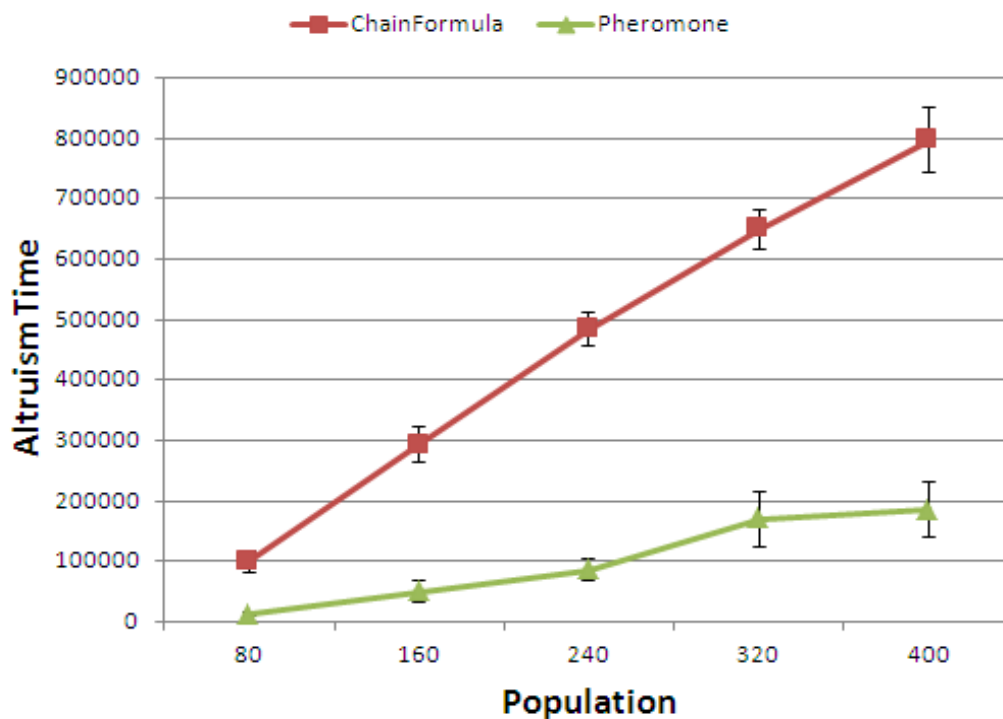


図 5.8: Map1 トーラス 実験結果 (利他行動時間)

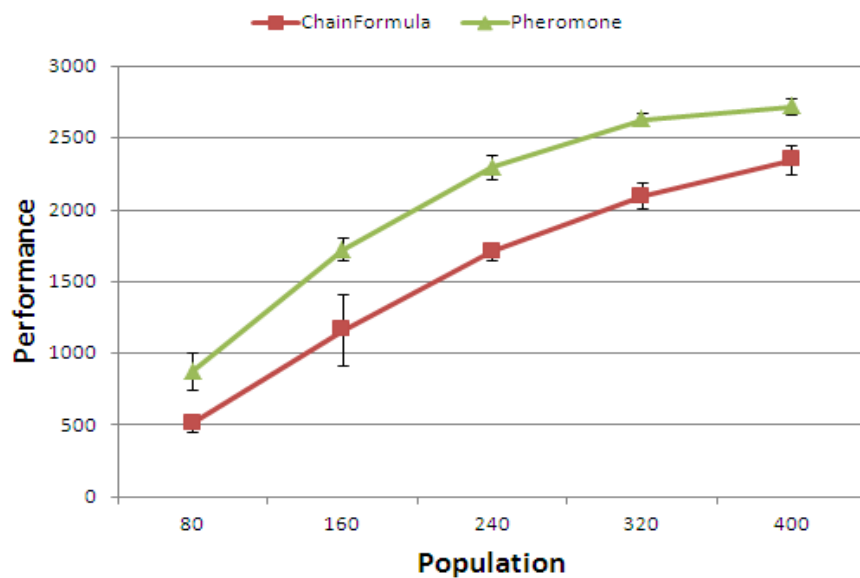


図 5.9: Map2 トーラス 実験結果 (パフォーマンス)

フェロモンを判断基準として用いた手法の方が高いパフォーマンスを示した。

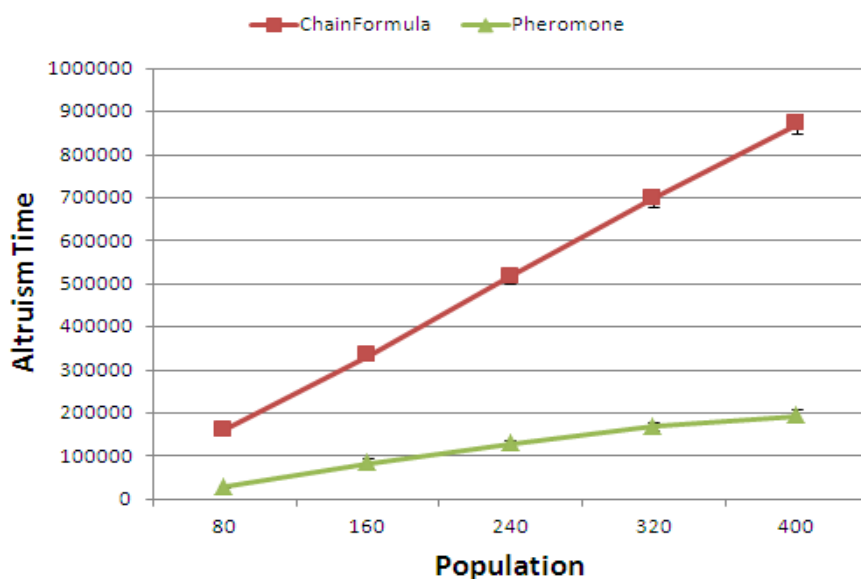


図 5.10: Map2 トーラス 実験結果 (利他行動時間)

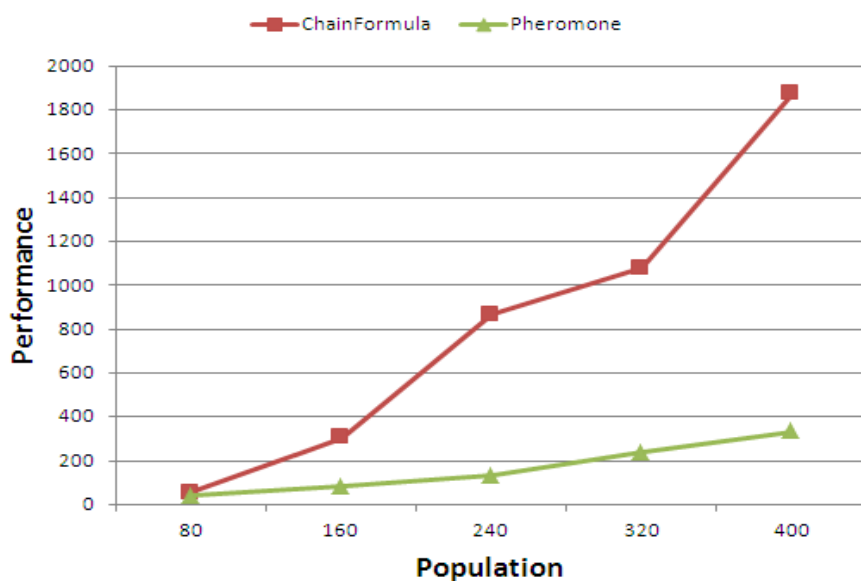


図 5.11: Map1 非トーラス 実験結果 (パフォーマンス)

5.2.4 考察

いくつかの実験を通して、チェーン構築の式を判断基準として用いた手法は平均的に高いパフォーマンスを示した。図 5.15 は実験結果の一場面であるが、フェロモンを用いた手法は必要な場所に作られた橋のみが残るのに対し、チェーン構築の式を判断基準として用いた手法では、不

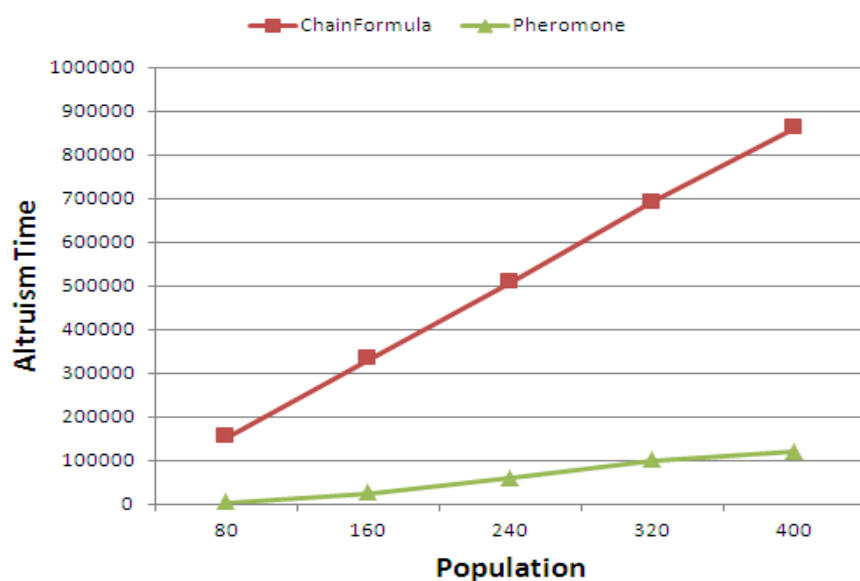


図 5.12: Map1 非トラス 実験結果 (利他行動時間)

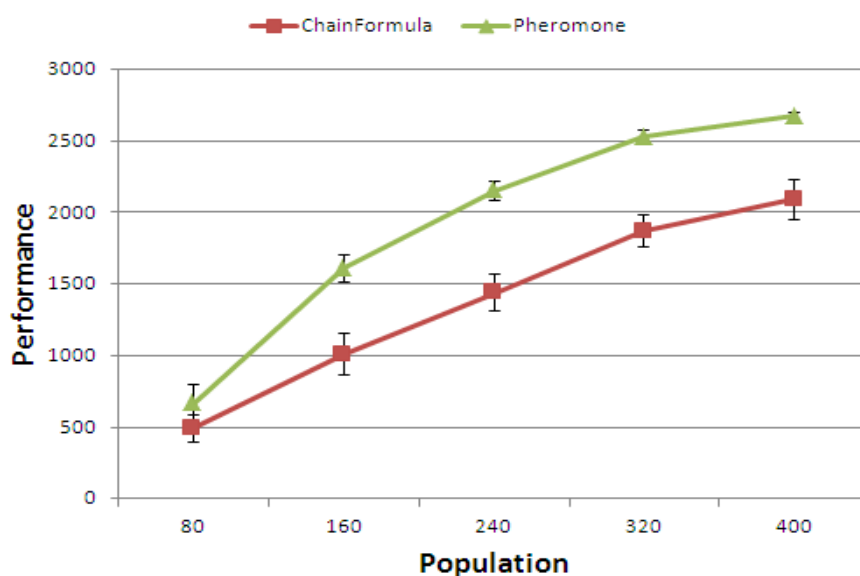


図 5.13: Map2 非トラス 実験結果 (パフォーマンス)

必要と思われる箇所にも多くの橋を作ってしまう。これでは、その分餌の探索と運搬を行うエージェントの数が減少してしまう。

チェーン構築の式は、チェーンの構築場所がヶ所という前提の下に作られた式であるため、複数箇所に橋を構築可能な今回のシミュレータにはうまく適応できなかったものと思われる。式のパラメータを調整してみたが、有意な差は現れなかった。

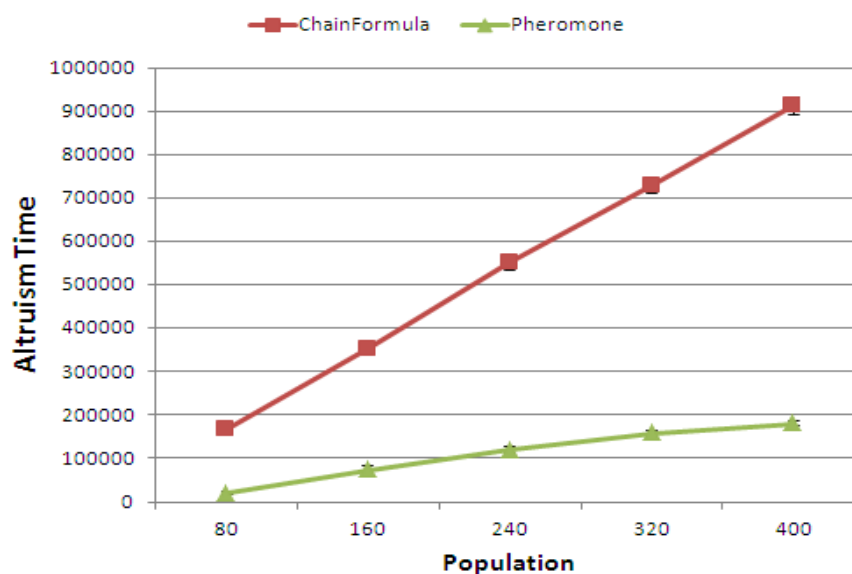


図 5.14: Map2 非トラス 実験結果 (利他行動時間)

そこで、軍隊アリの生態を参考に他の判断基準の仮説を立て、チェーンの式と複合的に用いることで、効率的な判断が行えるものと考え、次のような実験を行った。

5.3 実験3: エージェント数に応じた戦略の変更

5.3.1 軍隊アリの集団的な行動決定

実際のアリは活動している仲間の数に応じて集団的な行動を決定しているといったことが確認されている [1, 2]。例えばチェーン構築においては、仲間の数が少ない場合はチェーンの構築は確認されず、また仲間の数が多いときには複数の場所にチェーンを作ることもある。しかし、その中間程度の数の仲間と共に活動する場合、一時は複数のチェーンが作られ共存するのだが、ある時点を境にして片方のチェーンの成長が止まり、徐々にチェーンのサイズが小さくなっていき、そしてもう片方のチェーンは成長を続けていくといったことが確認されている。しかしアリがどうやって仲間の数をカウントし、どのようにその数を自らの行動に影響させているのかは未だ分かってはいない。

5.3.2 比較実験

今回はチェーンを構築する際の条件として、Lioniらの式に加え、近傍にいる仲間の数が一定以上の場合に橋を構築するようにすることで、集団のサイズをエージェントの動きに影響させることにした。そして、近隣のエージェントの情報を利用しない手法とパフォーマンスや利他行動に従事した時間を比較することで性能の検証を行った。実験は図 5.6 に示した2つのマップでそれぞれ行っ

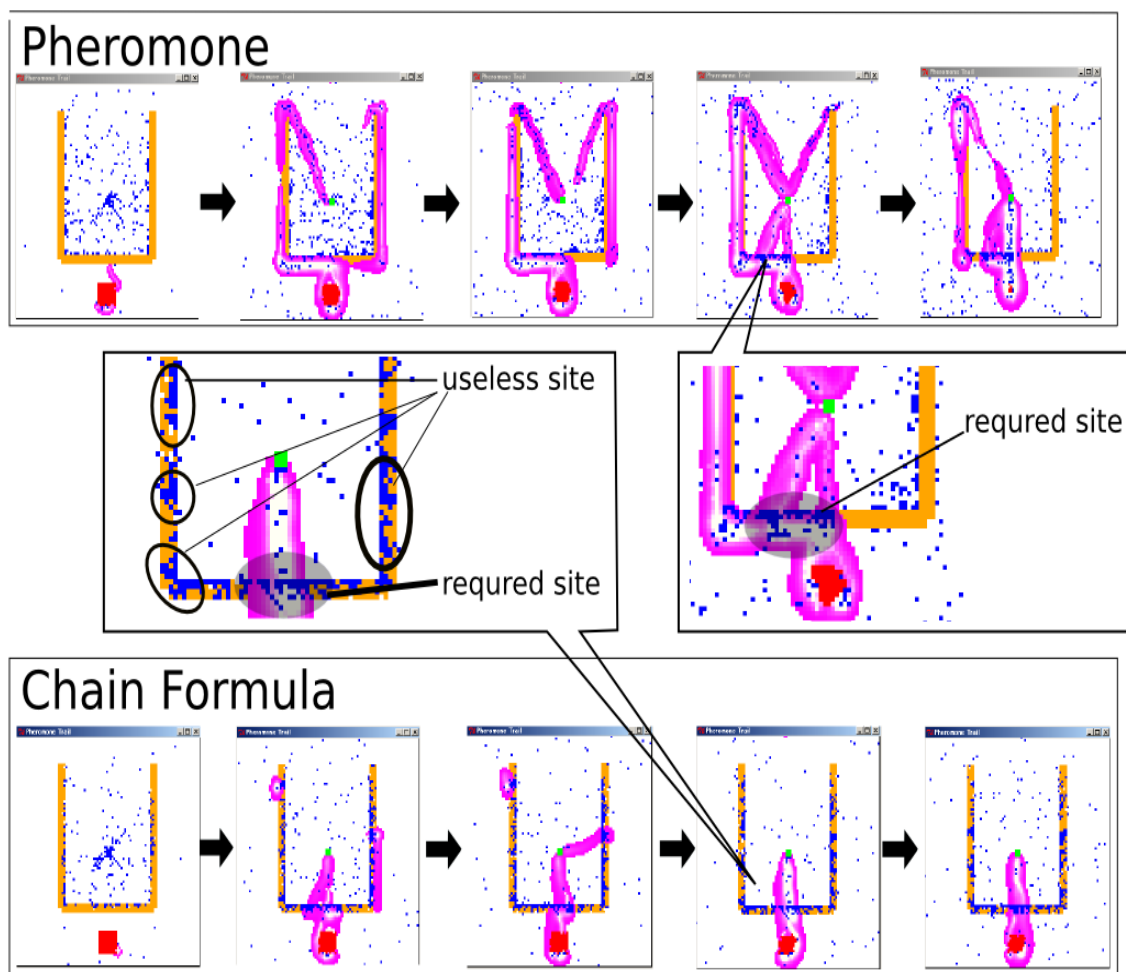


図 5.15: 実験結果比較

た. 表 5.3 に実験条件を示す. 実験は, それぞれ 10 回行い一定時間内に集められた餌の数, エージェントの累計利他行動時間などを評価指標とした.

表 5.3: 実験 3 実験条件

Number of Step	4000
Population	80, 160, 240, 320, 400

図 5.16 と図 5.17 に Map1 における実験結果を示す. なお, 図中の「with Check Neighbor」は近傍の仲間の数を考慮する手法を表し, 「without Check Neighbor」は近傍の仲間の数を考慮しない手法を表す. 図 5.16 は横軸をエージェントの数, 縦軸を一定時間内に集めたエサの数をパフォーマンスとした. Map1 においては, 近傍の情報を取り入れない手法の方が高いパフォーマンスを発揮した. これは橋を構築するための条件が緩いために, 早い段階で橋を作りエサにたどり着くため

であると思われる。

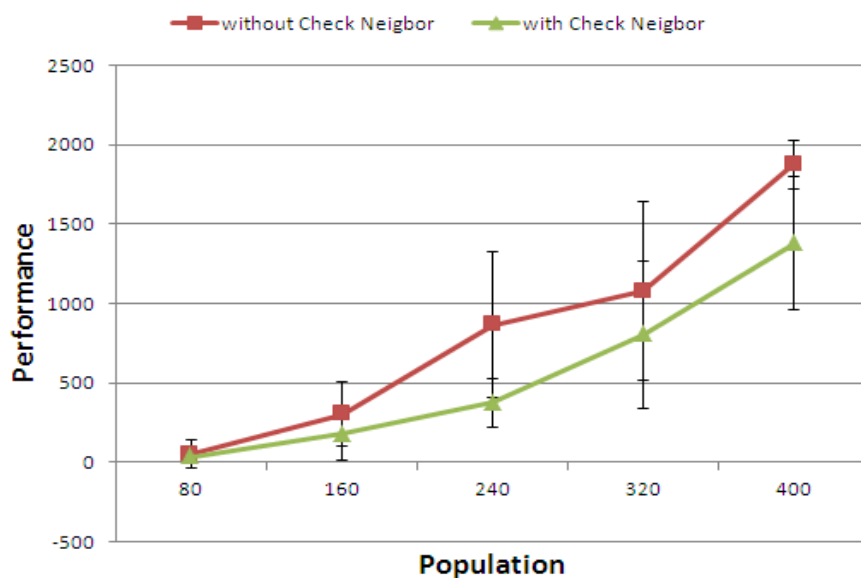


図 5.16: Map1 実験結果 (パフォーマンス)

図 5.17 は利他行動時間の累計を表わしたグラフである。近傍の仲間の数を考慮に入れる場合とそうでない場合では、常時 2 倍程度の差があることがわかる。

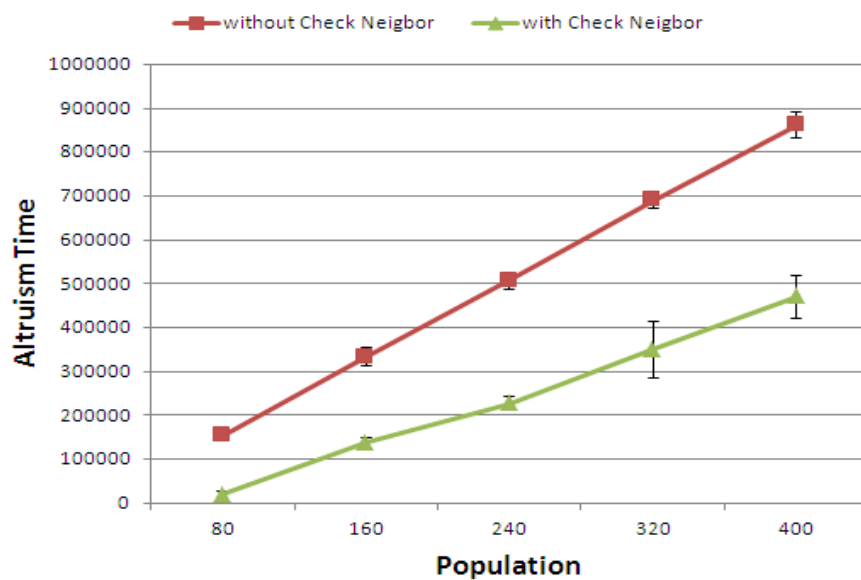


図 5.17: Map1 実験結果 (利他行動時間)

Map2 における実験結果を以下に示す。

図 5.18, 図 5.19 より, 近傍の仲間の数を考慮に入れることで, 餌を集めるパフォーマンスが向上し, 利他行動に従事する時間も少なくなっていることが確認できる.



図 5.18: Map2 実験結果 (パフォーマンス)

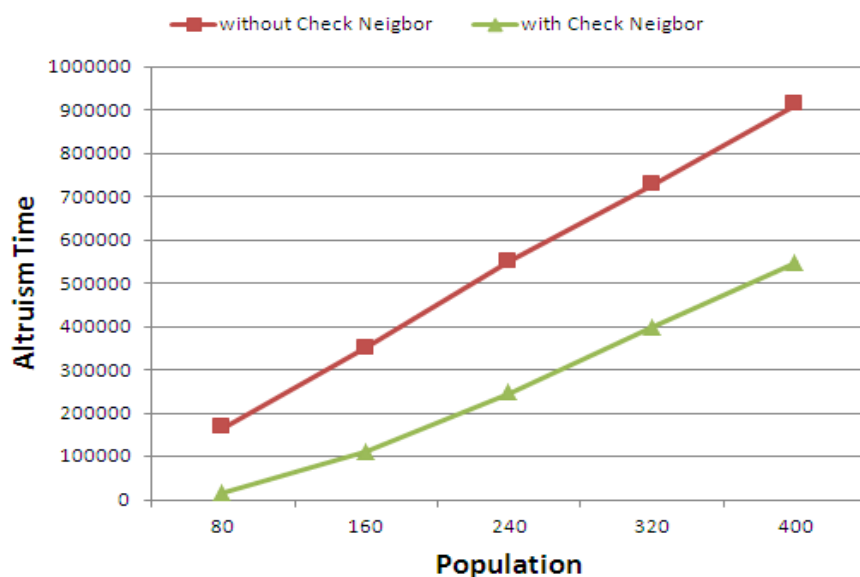


図 5.19: Map2 実験結果 (利他行動時間)

また図 5.20 は Map1 において, 時間とともにどのように橋のサイズが成長しているのかを示したものである. 図中の「1st」はその時点で最もサイズの大きい橋を表し, 「2nd」は2番目にサイズ

の大きい橋を表す。横軸は時間、縦軸は橋のサイズが大きいもの上位2つのサイズを表している。序盤は複数の橋が共存し、どれも同じように成長していくが、終盤になるにつれ差が広がっていく様子が確認できる。

また図 5.21 は、Lioni らの研究 [2] における生物実験のデータである。チェーンを構築する場所が2箇所あった場合にそれぞれのチェーンがどのように成長していくのかを記録したものであり、図中「1st」「2nd」はそれぞれの別の場所にあるチェーンのサイズを洗わしている。なお、図 5.21 は論文をからデータを読み取り、新たにプロットしたものである。

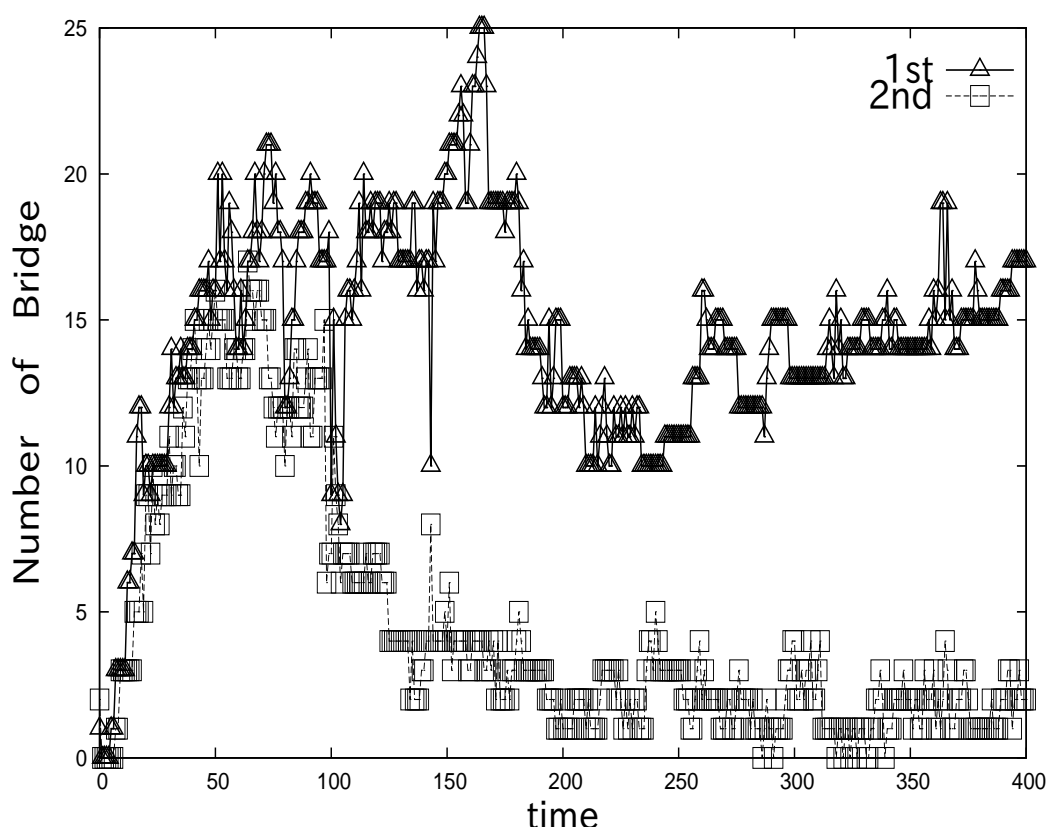


図 5.20: 橋のサイズの変移

図 5.20, 図 5.21 双方において、序盤は均等にサイズが増加していき、時間が進むにつれて1つの橋(あるいはチェーン)に集中していくといった動きが見られ、これらの動きは定性的に一致していると考えられる。

5.4 実験4:役割分化

実験3において、シミュレータの実験結果と生物実験の結果との定性的な対応が見られた。軍隊アリの協調行動を理解するために、モデルは可能な限りシンプルであることが望ましいが、生

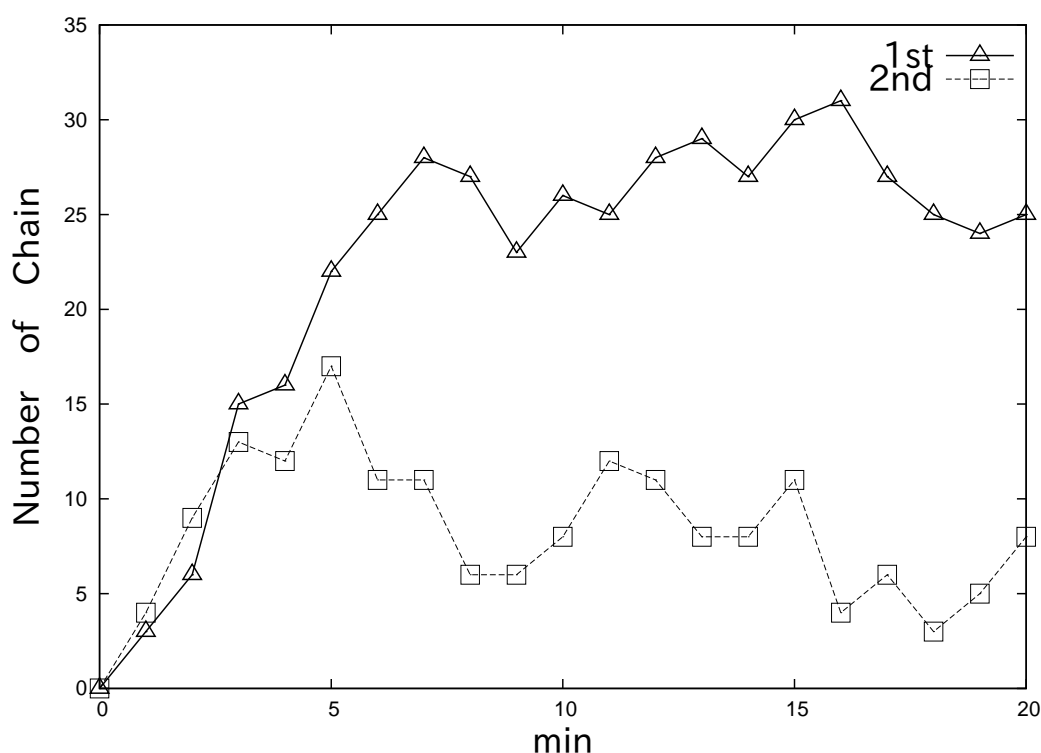


図 5.21: チェーンのサイズの変移 ([2] からのデータプロット)

物実験と照らし合わせるためには、実在する軍隊アリの動きにモデルの動きをある程度近づけていく必要があると思われる。そこで、実在する軍隊アリの行動を模倣し、エージェントに固定の役割を持たせて実験を行った。

現実世界の軍隊アリは階級制度によって、子孫を残すことが可能なもの、そうでないものにわかれているが、労働階級の軍隊アリもさらに細かく分化している。

同じ種であるにも関わらず、身体の構造や大きさが大きく異なっている状態で生まれるのである。種によっても異なるが例えば以下のような役割分化が見られる。

- 外敵から群れを守るアリ
- 餌の運搬や掃除，橋の構築を行うアリ
- 長い脚を有しており，大きな餌を運ぶアリ

このような役割は生来備えているものだけでなく，図 5.22 のように，時間によって変動があることも知られている。

橋の構築を行う階級は一番小さい軍隊アリであると言われており，他の種における軍隊アリにおいても同様のことが言える可能性はある。

しかしながら，図 5.22 のように同一階級内での役割分担も十分に考えられることではある。

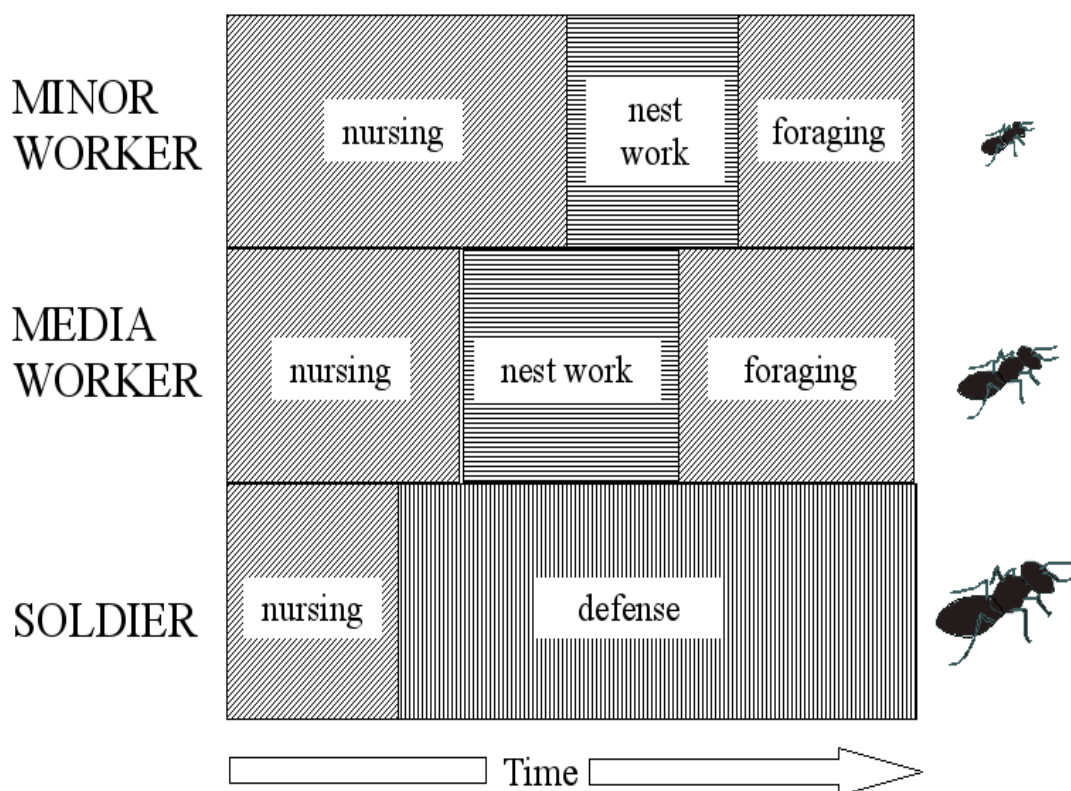


図 5.22: 生来の役割の時間による変異の一例

[19] によると群れを構成するアリのうち穴を塞ぐ役割を持ったアリの数が一定数以上いることで、群れのパフォーマンスの向上が見られるとあった。これまでの実験では、明確な役割分担はもたせずに実験を行ったため、エージェントの誰もが橋になれるようなシミュレータとしていた。

ここでは、スタート時点でエージェントに固定の役割を与え、役割を分担するようシミュレータに変更を加えた。それによって、群れの行動にどのような変化が起きるのかを実験する。

5.4.1 固定役割と動的役割の比較実験

今回の実験では、今までのシミュレータのエージェントの役割を以下のような2種類に分けた。

役割 A

餌の探索と運搬のみを行うエージェント

役割 B

橋の構築を行うエージェント

実験は図 5.23 に示した 2 種類のマップにおいて行った. 今回は非トーラス環境に限定して実験を行った. 表 5.4 に実験条件を示す.

表 5.4: 実験 4 実験条件

Number of Step	4000
Population	160, 240, 320, 400, 480
役割 B の割合	10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80%, 90%

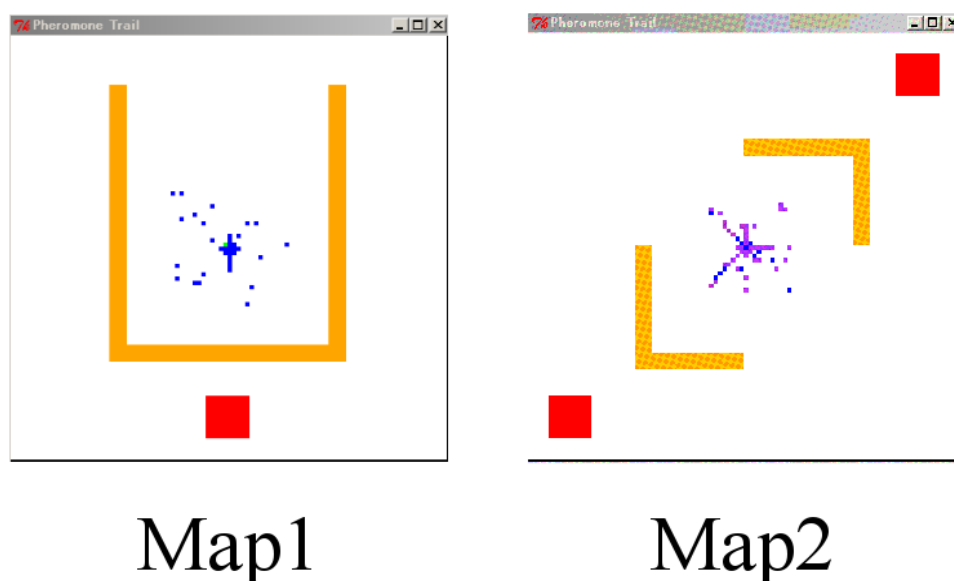


図 5.23: 実験に使用したマップ

図 5.24, 図 5.25 に実験結果を示す.

横軸は一定時間内に集めることができた餌の総数を示している. 「DynamicAssignment」は本稿の実験 3 で用いたシミュレータであり, 固定の役割を持たないエージェントによるシミュレーションである. また「分担 0.1」は橋を作る役割のエージェントが全体の 10% の場合の実験結果を示す.

Map1 においては最も優れたパフォーマンスを示したのは, 従来通りの固定の役割を持たないシミュレータとなった. エージェント数 240 の際には, 「Rate0.4」「Rate0.5」「Rate0.6」も同程度の値となっているが, その他の条件においては DynamicAssignment

Map2 では固定の役割を持たないシミュレータはエージェント数に関わらず平均的に高いパフォーマンスを示した. しかし, 固定の役割を持ったエージェントはその構成比によっては優れたパフォーマンスを示している. 特に「Rate0.5」「Rate0.6」のときには, 優れていることが図 5.25 から確認できる.

図 5.26 は, グリッドごとにエージェントの滞在時間の累計を取ったものであり, 実験を通して

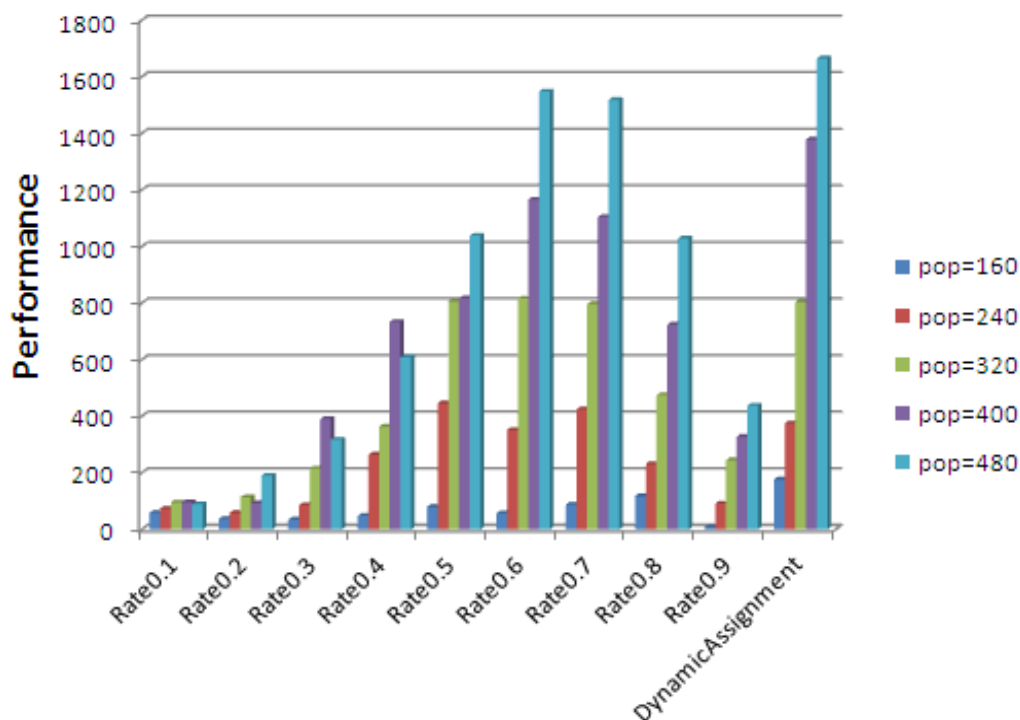


図 5.24: 役割分担を行った際の実験結果 (Map1)

どのような動きが見られたかを表わすものになっている。図 5.26 を見てもわかる通り、複数箇所に餌があるマップにおいても、一点集中などを起きず、複数箇所に橋を構築し、餌を集めている様を確認できる。

この実験では、役割分担の比率次第で性能が大きく変わることが示された。またエージェントが動作するマップや、役割分担の比率にも依存するが、固定の役割を持たないシミュレータよりも高いパフォーマンスを発揮する可能性があることが分かった。

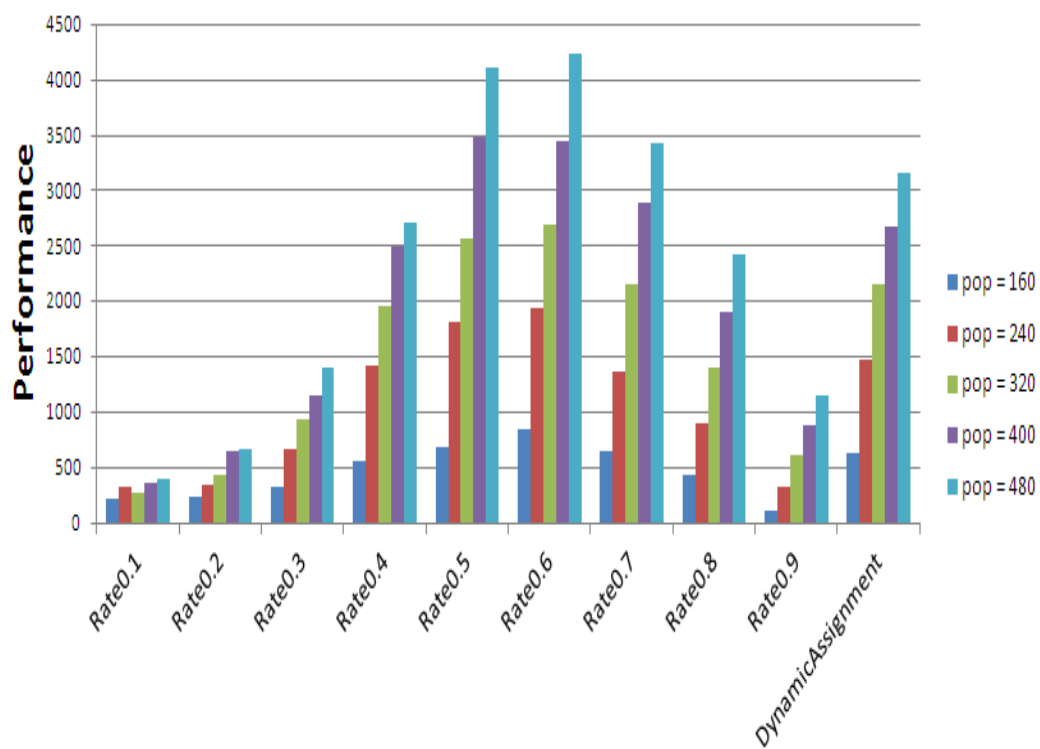


図 5.25: 役割分担を行った際の実験結果 (Map2)

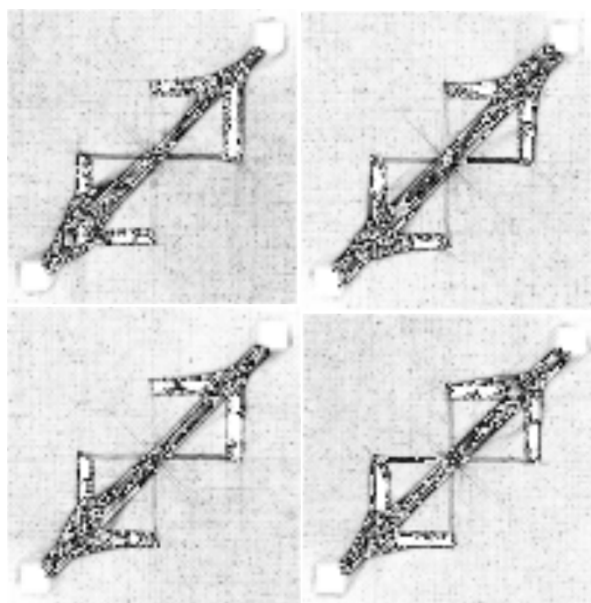


図 5.26: Map2 実験結果

第6章

考察

6.1 利他行動の判断基準について

利他行動を行う際の条件としてフェロモンの濃度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、ここで使っているフェロモンは、エサを持ち帰る際に発するものであるため、一度餌場に辿り着く必要があった。現実のアリの動きは必ずしもそのような制限はないため、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たモデルを作成した。しかし参考にした現実のアリが活動する環境とシミュレータの環境での差異などもあり、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。

確率的な判断基準を取り入れた手法に近傍で活動している仲間の数を考慮し利他行動を行うための条件として取り入れたところ、無駄な場所に橋を作ることが減り、環境によってはパフォーマンスが向上することが確認できた。

6.2 フェロモンコミュニケーションと近傍感知による創発

近隣のエージェントを判断基準の一部として組み込む方法がうまくいった背景には、フェロモンの存在が大きな役割を果たしている。餌場と巣の間の経路が確立される中盤以降は、その経路上に存在するフェロモンの濃度は充分濃くなり、その経路上で作業するエージェントが増えるので、ランダムウォークで周囲を探索するエージェントの数が少なくなる。これによって、餌場や巣とは関係の浅い場所にある橋は徐々に減っていき、必要な場所にある経路付近の橋のみが残ることとなる。この際の振る舞いは、類似する協調行動であるチェーンフォーメーションのサイズの変異と定性的に一致しており、フェロモンコミュニケーションと近傍感知によって、実世界の軍隊アリが行うような集団的な行動決定が創発できたものと考えられる。

6.3 シミュレーションと生物実験の接地

シミュレーションの実験結果と生物実験の結果の接地を行うために、定量的な接地を図るためには、モデルを複雑にしていく必要もある。定性的な接地のためには、モデルはできるだけシンプルに止めておき、モデルを構成する要素のうち、どの要素がシミュレーション結果に結びついているのかを考察できるようにする必要がある。

本研究においても、当初はシンプルなモデルにしておくことで、定性的な実験結果の一致が確認できた。

今回作成したシミュレータのモデルの妥当性を検証するためには、現実世界の生物実験の結果とシミュレーション結果の定性的な一致をさらに重ねる必要がある。そこで、シミュレーションのモデルを現実の環境に近づけることにした。実際の軍隊アリの模倣し、役割分担を取り入れたところ、溝の少ないシンプルな構造の場合は、固定の役割を持たないシンプルなモデルの方が良

いパフォーマンスを残した。しかし溝の多いマップの場合においては、役割を分担したモデルの方が高いパフォーマンスを発揮した。主にジャングルなどで行動する軍隊アリは、複雑な環境での行動に最適化されているものと考えられる。

第7章

結論

7.1 まとめ

本研究では、軍隊アリの特徴的な協調行動の原理を理解することを目的とし、構成論的アプローチで対象を理解することで目的の達成を目指した。これについて、本論文では以下のような構成で論じてきた。

第1章では、本研究の背景と目的について述べた。

第2章では、本研究で理解する対象となる軍隊アリの生態とその協調行動についての解説を行った。

第3章では、関連研究を紹介すると共に、その中での本研究の位置づけについて論じた。

第4章では、軍隊アリが行う利他的な協調行動をモデル化し、作成したシミュレータについて解説をした。

第5章では、シミュレータを用いて行った実験について説明し、その実験結果を示した。作成したモデルにおいて実験を重ね、現実世界の軍隊アリの挙動などと比較することで、定性的に、また定量的にその性能を解析した。

第6章では、実験結果に対する考察を述べ、

次節では、本研究について得られた知見についてまとめ、合わせて今後の展望を述べることで本論文の結論とする。

7.2 得られた知見

実験3においては、フェロモンコミュニケーションと近傍の状況に応じたエージェントの条件判断が関連し合うことで、無駄な場所に構築される橋の数、それに従事するエージェントの数が減少するという望ましい動きが得られた。また、その挙動は実在する軍隊アリのそれと定性的に一致していることを示した。このような結果が得られた背景には、モデルを組み上げる際に、極力シンプルな構成要素に止めておいたことが有効に働いたものと思われる。これにより、シミュレータの解析が容易になり、協調行動において本質的に効果的な構成要素が何であるのかを見定めることができた。

数値的な解析以上にシミュレータの動きを目視により観察することも有効であった。Swarmという環境でシミュレータを作成することで、容易にそれを実現することができた。

作成したモデルの妥当性を検証するための手段の一つとして、対象となった実在するモデルとの比較を行うことなどが挙げられる。また実在のモデルとの比較の際には、その挙動の本質を見抜き、理解する必要があると考えられる。実在のモデルの挙動と定量的な一致を図るためには、精巧なモデルを作り上げる必要があり、生物、特に大規模な群行動の解析を行う場合には、それは多大な労力を要する。また前述したように、最初から精巧なモデルを構築した場合には、解析が困難になる恐れもある。モデルの構成要素をシンプルなものに止めながらも、その妥当性を示す

ためには、実在するモデルの実験結果などを解析し定性的な特徴を捉えることが重要であると考えられる。

以上をまとめると、本研究においては以下の3つの知見が得られたといえる。

1. 構成論的にモデルを組み上げる場合、可能な限りシンプルにしておくことで解析が容易になる。
2. マルチエージェントシミュレータのようなものは数値的な解析に加えて、目視による解析も有効である。
3. 実在するモデルとの比較の際には、実在モデルの抽象化を行い、本質的に類似している部分を見出す必要がある。

7.3 今後の展望

本論文では、できるだけシンプルなモデルで軍隊アリの行う協調行動を再現し、それがどのように創発するのか解明することを目標としていた。そして、考案したモデルが現実世界の軍隊アリと同じ動きをしていることを述べるために、生物学の実験データなどとの定性的な照らし合わせを行った。しかし、シンプルなモデルが十分成熟した後には、その構成要素を増やし、現実世界との接地を図っていくことも必要であると考えられる。

そのために考えられるモデルの変更点としては、以下のようなものが挙げられる。

7.3.1 群れの大規模化

通常軍隊アリの群れは1000万匹もの個体で構成されており、現実世界の環境でのアリ達の動きは、数にもものを言わせていることが多い。このような変更点によって、場合によっては小規模の群れでは考えられなかった行動が創発する可能性もある。

7.3.2 餌場の動的な位置変更

雑食である軍隊アリは、様々なものを食べることで有名である。軍隊アリほど多種の餌を食べる動物は他にいないとも言われている。そのため、当然餌は動いているものも多く含まれている。そのような際に仲間と行うコミュニケーションなどが、本論文で扱った橋の構築に使われている可能性もある。

7.3.3 軍隊アリの身体的な特徴の導入

本研究では、終始エージェントは「点」で、体の向きや足については省略してきた。これは本研究では、軍隊アリの協調行動において「橋の構築のタイミング」「単純な条件判断とチープな知覚能力でどのように協調しているのか」を第一に解明しようと考えたからである。これに身体的な要素を加えることで、「橋を構築する際にどのように結合しているのか」が見えてくると思わ

れる。これにより、彼らがどのようにして高い強度の橋を実現しているのかなど、新たな知見が得られるものと思われる。

謝辞

本研究を進めるにあたり、多くの方々からご指導ご鞭撻を承りました。

指導教員である伊庭斉志教授には、研究の方法論や心構えなどを教えていただきました。また、私の研究に対して熱心な助言を多数いただき、正しい方向へと導いて頂きました。伊庭教授の下で過ごした2年間は、今後の人生においても財産になると確信しています。

研究室の先輩方に感謝いたします。柳瀬利彦氏には、研究に対する意見をいただき、研究以外の専門知識も数多く教えていただきました。丹治信氏には、研究室の計算機環境の面で大変お世話になり、快適な環境で研究させていただきました。Claus Aranha 氏には英語の面でとてもお世話になりました。またプログラミングに関するおもしろいサイトを多数教えて頂きました。Liu Shu 氏には中国の文化などについて教えていただき、刺激を受けました。

修士課程の同期である熊谷基樹氏、藤原健太氏、渡辺晃生氏、渡辺幹生氏とは多くの時間を共有し、様々なアドバイスを頂きました。

研究室の後輩である、Hettiarachchi Dhammika Suresh 氏、Vatanutanon Jiradej 氏、Badarch Tserenchimed 氏、今川哲矢氏、執行恵太氏、福井啓氏、坪井祐樹氏、小宮一樹氏、に感謝致します。

最後に私を経済面・精神面において支え、これまで根気強く育ててくれた両親に、この場を借りて御礼申し上げます。

参考文献

- [1] A.Lioni. Chain formation in *oecophylla longinoda*. *Journal of Insect Behavior*, Vol. 14, No. 5, pp. 679–696, 2001.
- [2] A.Lioni. Collective decision through self-assembling. *Naturwissenschaften*, Vol. 91, No. 5, pp. 237–241, 2004.
- [3] Luc Berthouzea and Giorgio Metta. Epigenetic robotics: Modeling cognitive development in robotic systems. visual expectations in infants: Evaluating the gaze-direction model, 2005.
- [4] R . Clement. Visualising speciation in models of cichlid fish. In *Proceedings of the 17th European Simulation Multiconference*, pp. 344–348, 2003.
- [5] S. Degallier, L. Righetti, L. Natale, N. Nori, G Metta, and A. Ijspeert. A modular, bio-inspired architecture for movement generation for the infant-like robot icub. In *IEEE RAS/EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechanics (BioRob) 2008*, pp. 19–22, 2008.
- [6] Joshua M . Epstein, Robert Axtell. 人工社会 複雑系とマルチエージェント・シミュレーション. 構造計画研究所, 1999.
- [7] Hitoshi Iba, Hugo de Garis, and Tetsuya Higuchi. Evolutionary learning of predatory behaviors based on structured classifiers. In *Proceedings of the second international conference on From animals to animats 2 : simulation of adaptive behavior*, pp. 356–363, 1993.
- [8] Yoh Iwasa, Masahiko Higashi, and Norio Yamamura. Prey distribution as a factor determining the choice of optimal foraging strategy. *The American Naturalist*, Vol. 117, No. 5, pp. 710–723, May 1981.
- [9] J . T . Erichsen, J . R . Krebs, A . I . Houston. Optimal foraging and cryptic prey. *Journal of Animal Ecology*, Vol. 49, pp. 271–276, 1980.
- [10] Kameoka, A . , Kuriyagawa, M. Consonance theory , part i:consonance of dyads. *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 45, No. 6, pp. 1451–1459, 1969.

- [11] Kameoka, A . , Kuriyagawa, M. Consonance theory , part ii:consonance of complex tones and its computation method. *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 45, No. 6, pp. 1460–1469, 1969.
- [12] J . R . Krebs, N . B . Davies:. 行動生態学. 蒼樹書房, 1991.
- [13] M . Metivier, C . Lattaud, J . C . Heudin. A stress-based speciation model in lifestream. In *Artificial life VIII: proceedings of the eighth International Conference on Artificial Life*, pp. 121–126, 2003.
- [14] Kawato Mitsuo. From ‘ understanding the brain by creating the brain ’ towards manipulative neuroscience. *Philosophical Transactions of the Royal Society*, Vol. 363, No. 1500, pp. 2201–2214, 2008.
- [15] Fitzpatrick P., Needham A., Natale L., and Metta G. Shared challenges in object perception for robots and infants. *in a special issue of Infant and Child Development*, Vol. 17, pp. 17–24, 2008.
- [16] David Payton, Regina Estkowski, and Mike Howard. Compound behaviors in pheromone robotics. *Robotics and Autonomous Systems*, Vol. 44, pp. 229–240, 2003.
- [17] Anies Hannawati Purnamadajaja and R. Andrew Russell. Guiding robots’ behaviors using pheromone communication. *Auton. Robots*, Vol. 23, No. 2, pp. 113–130, 2007.
- [18] Karl Sims. Evolving virtual creatures. In *Proceedings of Computer Graphics*, pp. 15–22, 1994.
- [19] S.Powell. How a few help all: living pothole plugs speed prey delivery in the army ant *eciton burchellii*. *Animal Behaviour*, Vol. 73, No. 6, pp. 1067–1076, 2007.
- [20] Tohge, T . , Iba, H . Evolutionary morphology for polycube robots. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, pp. 221–232, 2008.
- [21] Hermann L. von Helmholtz. *On the Sensations of Tone as a Physiological Basis for the Theory of Music*. Dover, New York, 1954. Original title: [21].
- [22] Yamaguchi, M . , Yoshimoto, E., Kondo, S . Pattern regulation in the stripe of zebrafish suggests an underlying dynamic and autonomous mechanism. *Proc Natl Acad Sci USA*, Vol. 104, No. 12, pp. 4790–4793, 2007.

- [23] 中道義之, 有田隆也. フェロモン・コミュニケーションの起源に関する進化シミュレーション (数理生物学, 特集, 第 11 回 mps シンポジウム: 複雑系の科学とその応用). 情報処理学会論文誌. 数理モデル化と応用, Vol. 47, No. 1, pp. 78–88, 2006.
- [24] 和泉潔. 人工市場-市場分析の複雑系アプローチ. 森北出版, 2003.
- [25] 車谷浩一. 蟻コロニーにおける協調採餌行動のマクロモデルの生成 (1): 単純モデルにおけるシミュレーションとモデル生成. 人工知能学会誌, Vol. 15, No. 5, pp. 829–836, 2000.
- [26] 車谷浩一. 蟻コロニーにおける協調採餌行動のマクロモデルの生成 (2): 外界からの刺激に対する不応期メカニズムの導入による分散制御. 人工知能学会誌, Vol. 15, No. 5, pp. 837–843, 2000.
- [27] 大崎直太. 擬態の進化 ダーウィンも誤解した 150 年の謎を解く. 海游舎, 2009.
- [28] 巖佐庸. 生命の数理. 共立出版, 2008.
- [29] 藤澤隆介, 今村光, 橋本敬, 松野文俊. フェロモン場を用いて誘引を行うロボット群の開発. 情報処理学会研究報告. MPS, 数理モデル化と問題解決研究報告, Vol. 2008, No. 85, pp. 37–42, 2008.
- [30] 神崎亮平, 倉林大輔. 生体-機械融合システムによる生物の環境適応能の理解と構築. 計測と制御, Vol. 46, No. 12, pp. 934–939, 2007.

発表文献

国際会議発表論文(査読付き)

- [C1] Hiroyuki Ishiwata, Hitoshi Iba. Emergence of Cooperation in a Bio-Inspired Multi-Agent Simulation of Army Ants. Genetic and Evolutionary Computation Conference(GECCO 2010), 2010.(Submitted)

研究会・シンポジウム等発表論文

- [M1] 石渡裕之, 伊庭斉志. 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. フレッシュマンのための人工知能研究交流会 2009, 2009. 優秀発表賞受賞
- [M2] 石渡裕之, 伊庭斉志. 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による協調行動の創発. 第2回進化計算フロンティア研究会, 2009.
- [M3] 石渡裕之, 伊庭斉志. 軍隊アリの生態シミュレーションによる協調行動の創発. 第22回自律分散システムシンポジウム, 2010.

全国大会発表論文

- [P1] 石渡裕之, 伊庭斉志. 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. 第23回人工知能学会全国大会, 2009.