

令和 6 年 6 月 19 日現在

機関番号：56101

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2023

課題番号：19K04318

研究課題名（和文）複雑系ネットワーク解析に基づくアントコロニーアルゴリズムの構築

研究課題名（英文）Construction of Ant-Colony Algorithm based on Complex Network Analysis

研究代表者

福田 耕治（Fukuda, Koji）

阿南工業高等専門学校・創造技術工学科・教授

研究者番号：40208955

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、蟻コロニーにおける蟻の活動全般をカバーするトータル行動モデルの構築を目指すものである。研究の結果、まず新たにトータル行動モデルの構成を提案した。そして、3Dシミュレーションシステムに提案モデルを実装しているところである。また、巣内部での蟻の行動をとらえるための実験システムを考案・構築している。さらに、群ロボットシステムにトータル行動モデルを実装するため、小型移動ロボットに直接フェロモンコミュニケーションを模擬する機能を追加している。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、採餌活動など部分的にとらえられていた蟻の群知能発現のしくみを、蟻の活動全般をカバーする行動モデルを構築することで、蟻の複雑に見える行動の仕組みを明らかにし、さらに蟻コロニーが存続することができる仕組みを明らかにすることができれば、それらを工学的に利用できる可能性があると考えている。そして、蟻コロニーが存続できる仕組みを応用することで、多様な条件・状況に対し柔軟に対応して非常に失敗しにくいシステムを構築するための知見が得られるものと考えている。

研究成果の概要（英文）： This research aims to construct a total behavior model that covers all ant activities in ant colony. As a result of the research, we proposed a new configuration for the total behavior model. This proposed model is being implemented in a 3D simulation system currently under development. We also devised and constructed an experimental system to capture ant behavior within the nest. Furthermore, in order to implement the total behavior model in a swarm robot system, hardware that simulates pheromone communication through contact has been added to a small mobile robot.

研究分野：知能ロボティクス，群集行動

キーワード：群知能 群集行動 フェロモンコミュニケーション 蟻のトータル行動モデル 役割分担決定モデル  
マルチマーカートラッキング 小型移動ロボット

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

### 1. 研究開始当初の背景

蟻は社会性昆虫として、蟻自身が分泌するいくつかのフェロモンによって、採餌活動をはじめとする生体活動において効率的な活動を実現している。このような知見は、生物学的には以前から知られており、蟻の実験観察に基づく多くの定性的特性が報告されている。一方、工学的には採餌活動を主な対象として、コンピュータシミュレーションによりその有効性が確認され、現実課題への応用も報告されている。さらに、蟻の行動モデルをロボットに適用し、フェロモンに見立てた物質等を用いて、実際に荷物の効率的な運搬や協調運搬を実現した研究も見られる。

しかしながら、生物学の分野では行動を定量的にとらえ、それをモデル化するという発想があまりみられない。コンピュータシミュレーションでは、様々な行動モデルが検討されているが、協調運搬にせよ単独での効率的な運搬にせよ、個別に検討されているに過ぎず、巣内部にまで活動を広げた総合的・画一的なモデルについて研究された例は見られない。さらに、実際に群知能を実現するロボットシステムについては、個々の蟻の行動モデルに基づき、群知能が発現することやその効果に関する研究は見られるが、個々のロボット挙動と実際の蟻の挙動に着目した研究は見られず、やはり蟻の採餌行動など一つの活動に関する研究にとどまっている。

蟻の生体活動は地表における採餌活動ばかりでなく、巣内部における餌の貯蔵、女王蟻をはじめ卵や幼虫の世話、内部の清掃など蟻ごとに役割を分担している。この役割分担は、いわゆる「さぼり」をする個体も含めて蟻個体どうしの接触によるフェロモンコミュニケーションにより、生理的反応として定まるという説が有力である。そこで、図1のような蟻の生体活動全般をカバーするトータル行動モデルを構築すれば、蟻の生体活動を通して得られる様々な場面での群知能としての働きを再現でき、それを工学的に利用できる可能性があるのではないかと考えた。

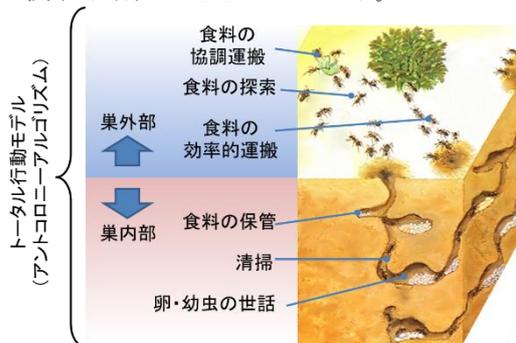


図1 トータル行動モデルの概念

### 2. 研究の目的

本研究は、蟻の巣外部での採餌活動ばかりでなく工学的にはこれまでほとんど着目されなかった巣内部での活動も含め、蟻の行動軌跡の取得と解析による行動モデルの推定、数値シミュレーション、および群ロボットシステムによる行動モデル構築と実証実験を通して、蟻の効率的な生体活動全般をカバーする行動モデルとして「アントコロニーアルゴリズム」の構築を目指すものである。

### 3. 研究の方法

本研究では、研究を以下の3つに分類し遂行する。

(1) 実世界システム：巣内部および外部における実際の蟻の行動を記録・解析し、行動に対する知見を与える。また、シミュレーションとの比較をすることでモデルの精緻度を向上させる。

このテーマでは、実際に蟻コロニーを飼育し、巣内部および外部での蟻の行動をトラッキングする必要がある。このため、蟻個体を識別する必要があるため極小マーカーを蟻に貼り付けカメラで映像を記録する実験システムを構築する。

(2) シミュレーションシステム：行動モデルを提案し、それに基づく数値シミュレーションシステムを構築する。このシステムでは、巣内部と外部を同時にシミュレートし、期待する行動や群としての特性が得られるかを評価する。

(3) ロボットシステム：シミュレーションによって得られた行動モデルとしての「アントコロニーアルゴリズム」を小型移動ロボットに適用し、活動フィールドを巣内部と外部に境界分割して群ロボットシステムを動作させ、モデルの有効性を確認する。図2には、提案時の群ロボットシステムの構成を示す。PCにはUSBカメラを接続してロボットの位置を計測し、ロボットの状況によってフェロモンをディスプレイ

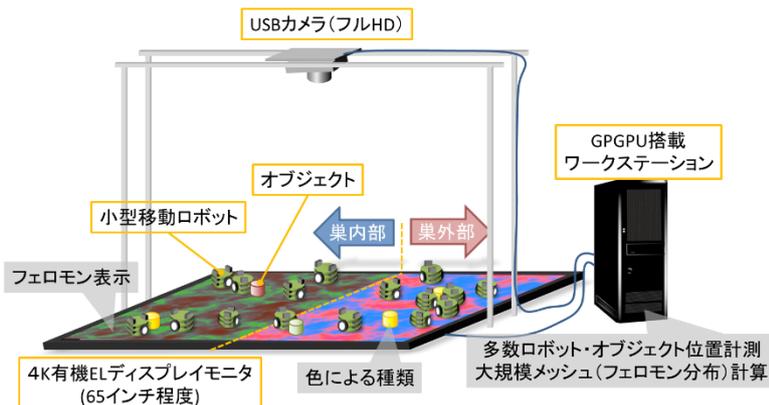


図2 提案した群ロボットシステムの構成

プレイに表示する。重要な点は、PC がロボットに対して何の指示もせず、ロボットが自律動作する点にある。そして、この群ロボットシステム構築のためには、まずロボットが相互に直接接触によるフェロモン情報交換に対応する機能を備える必要がある。

#### 4. 研究成果

(1) 以下に、本研究の成果を項目別に提示する。

##### ① 蟻のトータル行動モデル(アントコロニーアルゴリズム)の提案

図3には、提案する蟻のトータル行動モデルの構成を示す。図のように、蟻の行動は一般化してとらえることができる。すなわち、蟻は基本的にターゲットとなる対象を探索し、ターゲットを発見した際に特定の行動をする。なお、探索中にターゲットに至る情報を獲得した場合にはその情報を辿るが、全く情報が得られない場合は彷徨することになる。ここで、ターゲットやターゲット捕捉時の特定の行動は役割ごとに異なり、それにより役割特有の行動が発生することになる。

このような行動モデルの構成はこれまでに提案されておらず、新しいモデルを提示できたと考えている。

##### ② 蟻の役割分担決定モデル

蟻の役割分担決定モデルとしては、既に提案され広く認知されている固定反応閾値モデルをベースとした変形モデルを新たに提案し、これを用いた個体数推移シミュレーションシステムを構築してその有効性を確認した。提案したモデルの特徴は、固定反応閾値モデルに含まれる、蟻の各個体が知り得ない情報を排除した点にある。さらに、排除した情報の代替情報が蟻の直接接触によるフェロモンコミュニケーションによって獲得できるとした点にも特徴がある。図4には、シミュレーションの一例を示す。図では、100個体の蟻の job[0] から job[3]、および no job の個体数の推移を示しているが、およそ2000回で変動の範囲が安定していることがわかる。さらに、5000回の時点で no job の27個体を取り除いて73個体でシミュレーションを継続するとすぐに no job の個体が発生し、各々の個体数比率は no job 個体を取り除く前と大きく変わらないという結果を得ている。

##### ③ 蟻を飼育する巣の設計・製作

蟻の巣については、巣内部がカメラで撮影することから、巣の上部が透明で蟻の居場所スペースを水平に配置したものとした。巣は蟻の居場所と通路を1つのモジュールとし、それを組み合わせて構成する。図5には設計した3種のモジュール、およびそれらを組み合わせた巣の構成例を示す。このように、異なるサイズの巣を容易に構成できるようにしている。図6は、type A のモジュールを4つ用いて実際に製作した最小サイズの巣である。この巣での蟻の行動を記録するため、ズーム機能のあるカメラを4台用いて巣全体をカバーする。

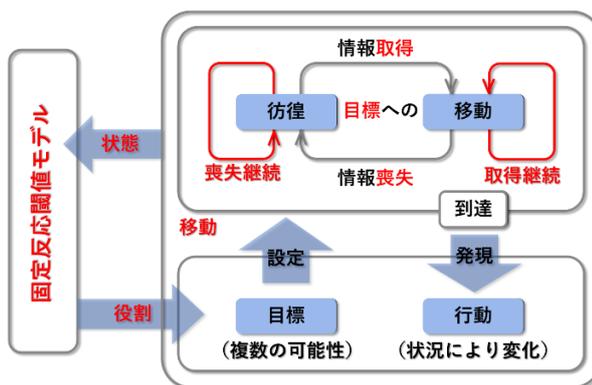


図3 提案した蟻のトータル行動モデル構成

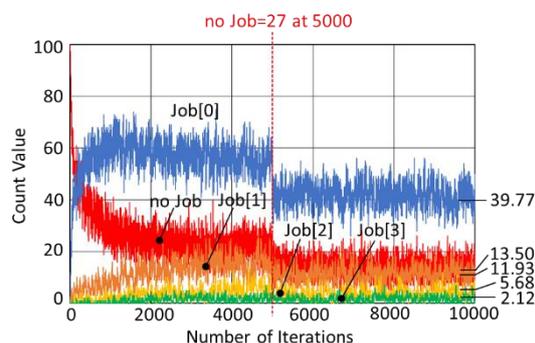


図4 役割分担シミュレーションの一例

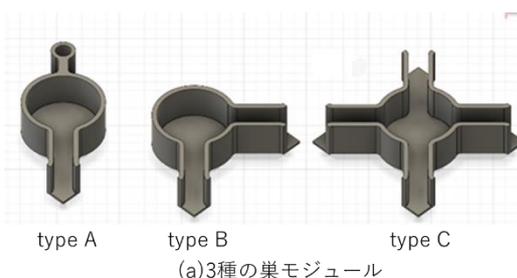


図5 巣モジュールと巣の構成例

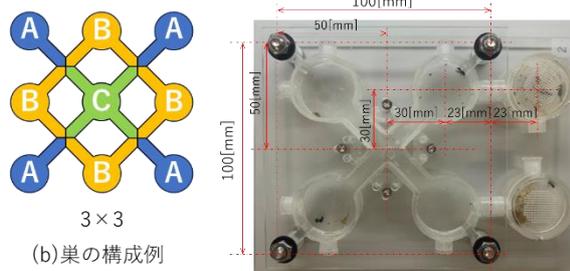


図6 製作した巣

##### ④ マルチマーカートラッキングシステム

蟻の行動を検出するため、蟻に1[mm]×1[mm]のマーカを貼り付けてトラッキングするシステムを構築した。現時点で蟻にマーカを貼り付けた実験を実施するには至っていないが、実際のマーカをトラッキングできることを確認している。マーカを、図6の1つのモジュールの蟻の居場所スペースである直径30[mm]の円形範囲内を移動させてトラッキングした例を図7に示す。図7ではわかりにくいですが、全てのフレームでマーカを検出できたわけではなく間欠的に

検出できないフレームが発生している。ただし、この結果からわかるように、移動をトラッキングするという点では問題ないといえる。

#### ⑤シミュレーションシステムの構築

研究成果①から④に基づき、蟻の活動全般をカバーする3D トータルシミュレーションシステムを構築している。現在、図3に示したトータル行動モデル構造を実装し、まず採餌活動に適用するため、個々の動作を確認しているところである。図8には、構築中のシミュレーションシステムの実行例を示す。図6に対応した巣、多様なオブジェクトの表示、蟻の日齢に対応した形態、などを実装している。

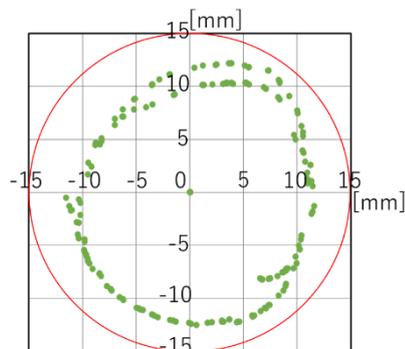


図7 マーカートラッキング例

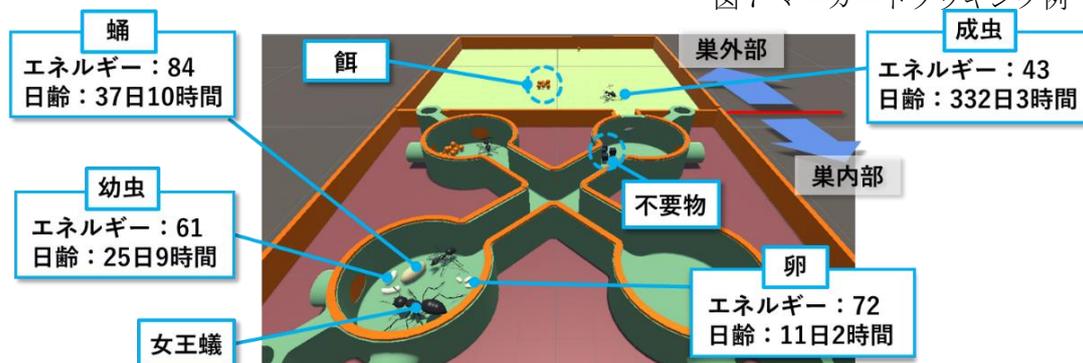


図8 構築中3Dシミュレーションシステム実行例

#### ⑥直接フェロモンコミュニケーションを模擬する小型移動ロボット

小型移動ロボットは既に開発しているが、直接フェロモンコミュニケーションを模擬する機能部分を追加する必要があった。この機能部分を実現するため、小型のロボットに組み込むことを前提としてフルカラーLEDとカラーセンサを組み合わせたユニットを設計・試作した。しかし、特性を確認したところ、赤色や青色の光には他の色の計測値はゼロに近かったのに対し、緑色の光に対しては青色も反応する結果となった。これ自体はセンサの感度特性に原因があることが分かっていることから、緑色の計測値に対して一定比率で青色の計測値が発生することを考慮した処理をすることで解決すると考えているが、このユニットの開発は進んでいないのが現状である。

##### (2)まとめ

- ①トータル行動モデルは基本的な構成・挙動を提案することができた。
- ②巣内の蟻の行動を記録することができる巣を提案し、計測システムを含め設計・製作した。
- ③極小マーカーをマルチトラッキングするシステムを構築した。
- ④トータル行動モデルを実装した3Dシミュレーションシステムを構築しているところである。
- ⑤蟻の直接フェロモンコミュニケーションを模擬する小型移動ロボットは、追加機能部分を試作した段階である。

本研究テーマには今後も継続して取り組み、3Dシミュレーションシステムの構築をはじめとして、実験による蟻の行動分析、群ロボットシステムの開発をすすめていく。なお、関連研究については、以下のように本報告作成段階で日本国内での国際学会発表が承認されていることを付しておく。

<発表予定>

[1] Atsushi Yamashita, Koji Fukuda, Ryuzaburo Sugino, Motoi Hirayama, Hiroharu Matsubara and Shuhei Miyake, "Development of the Ant Colony 3D Simulation System - Construction for Total Behavior Modelling and Its Elementary Function -", SICE FESTIVAL 2024 WITH ANNUAL CONFERENCE

[2] Manato Yamaguchi, Koji Fukuda and Ryuzaburo Sugino, "Development of the Tactile Presentation Function for the VR Crowd Experiment System", SICE FESTIVAL 2024 WITH ANNUAL CONFERENCE

[3] Yusaku Takano, Ryuzaburo Sugino, Koji Fukuda, Shin Itami, Motoi Hirayama, Hiroharu Matsubara, Syuhei Miyake and Toshiaki Sumitomo, "Development of Trajectory Tracking Method for Fish Schooling Behavior", SICE FESTIVAL 2024 WITH ANNUAL CONFERENCE

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計10件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 唐住祐哉, 杉野隆三郎, 三宅修平, 福田耕治
2. 発表標題 個体間情報交換を考慮したアリの役割分担シミュレーション
3. 学会等名 計測自動制御学会四国支部学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 品川裕依菜, 杉野隆三郎, 福田耕治
2. 発表標題 共創場原理を考慮した群集行動モデルの提案と検討
3. 学会等名 計測自動制御学会四国支部学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Naoya Sawaguchi, Koji Fukuda, Ryuzaburo Sugino, Shuhei Miyake
2. 発表標題 Numerical Simulation Based on 3D Behavior Model for Fish Schooling
3. 学会等名 The 3rd International Symposium on Swarm Behavior and Bio-Inspired Robotics 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 柴野顕豊, 杉野隆三郎, 福田耕治
2. 発表標題 Depthカメラによる3次元魚群遊泳計測システムの構築
3. 学会等名 計測自動制御学会四国支部学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 高岡実里, 杉野隆三郎, 福田耕治
2. 発表標題 VRを利用した群集行動実験システムの開発
3. 学会等名 計測自動制御学会四国支部学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 山口真翔, 杉野隆三郎, 福田耕治
2. 発表標題 群集VR実験システムにおける接触感覚提示システムの開発
3. 学会等名 計測自動制御学会四国支部学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 吉原大貴, 福見淳二, 福田耕治, 杉野隆三郎, 住友寿明
2. 発表標題 藻場モデル水槽内における魚類行動に対するカオス性の解析
3. 学会等名 計測自動制御学会四国支部学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 三好俊輔, 福見淳二, 福田耕治, 杉野隆三郎, 住友寿明
2. 発表標題 360°カメラを用いた水槽内の魚類行動計測システムの開発
3. 学会等名 計測自動制御学会四国支部学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 美馬歩高, 杉野隆三郎, 福田耕治
2. 発表標題 巣内部での蟻の行動記録システムの開発
3. 学会等名 計測自動制御学会四国支部学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 山下敦史, 三宅修平, 杉野隆三郎, 福田耕治
2. 発表標題 蟻コロニーの3Dシミュレーションシステム開発 - トータル行動モデルの検討と基本機能の構築 -
3. 学会等名 計測自動制御学会四国支部学術講演会
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	三宅 修平  (Miyake Shuhei)  (00200139)	東京情報大学・総合情報学部・教授   (32515)	
研究分担者	杉野 隆三郎  (Sugino Ryuzaburo)  (10259822)	阿南工業高等専門学校・創造技術工学科・教授   (56101)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------