

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 17 日現在

機関番号：31302

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009 年度～2011 年度

課題番号：21500190

研究課題名（和文）非線形動力学的観点からの社会性昆虫の数理モデル化と群ロボットへの応用

研究課題名（英文）Modeling of behavior of social insects based on nonlinear dynamics and its application for multi-robot system

研究代表者

菅原 研（SUGAWARA KEN）

東北学院大学・教養学部・准教授

研究者番号：50313424

研究成果の概要(和文):本研究の成果は大きく分けて3つあげられる。①アリの行動を解析し、単体にはリズム現象がみられ、複数個体ではそのリズムのカップリングが見られる傾向があることを示した。比較的単純な数理モデルを通して、その現象の理解につなげることを試みた。②女王のパトロール行動にみられるワーカー密度依存性について基本的な実験結果を得た。③パトロール行動のモデル化により分散物収集群ロボットシステムへの応用を行った。

研究成果の概要(英文):①By analyzing the behavior of ants, it was found there is a tendency that single ant shows periodicity of active-inactive states, and that a few ants show a coupled periodicity in their states. A simple model for this phenomenon is proposed. ②Fundamental data which show the workers' density dependence in patrolling is obtained. ③I proposed a collecting algorithm for multi-robot system based on the model of patrolling behavior of the ants.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2010 年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2011 年度	900,000	270,000	1,170,000
総計	3,100,000	930,000	4,030,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学・知覚情報処理・知能ロボティクス

キーワード：トゲオハリアリ、パトロール行動、個体間相互作用、リズム現象、群ロボット

1. 研究開始当初の背景

社会性昆虫は、集団の適応的な振る舞いが、個体間の局所的な相互作用から生じている興味深い生物である。しかしながらその背後にあるメカニズムについて実験的に明らかになっている面は必ずしも多くなく、行動学的視点からの数理モデルを通じた構成論的アプローチによって理解を深める試みも必要不可欠となっている。

本研究課題で取り扱うトゲオハリアリは、1コロニーを形成する個体数が100匹程度と比較的小規模なコロニーを形成する。そのた

め、他の種類のアリと比較して「個体レベルで見られる行動特性」と「コロニーが示す集団の特性」の関係が観察しやすい。このアリの集団が示す特徴的な行動のひとつとして「女王はコロニー内を適宜パトロールし、決まった時間内に全ワーカーとの接触を行うが、そのパトロール頻度はコロニーサイズに依存した適応的なものとなっている」ことが知られているが、この行動のメカニズムとして女王とワーカーの局所的な相互作用が効いているという仮説が提唱されている。

また、このアリを用いて「巣も餌もない」均

質な空間内における単体および少数の行動の解析から、「速度の分散と身体の向きの変化に関して時間に対するべき乗則があること」、「2 個体のアリの行動において、探索範囲に空間的な偏りが存在すること」、「2 個体が接触して小休止する場所が局在していること」などの特徴が見出されてきており、それらの行動の理解に向けた数理モデルもいくつか提案されてきている。

2. 研究の目的

少数のアリの行動を「局所的な相互作用を有する自己駆動粒子系の振る舞い」と捉えることで、そのダイナミクスの数理モデル化を試みるとともに、群ロボットシステムへの応用の可能性を探ることを目的とする。サブテーマと到達目標は以下の通りである。

(1) トゲオオハリアリの個体レベルでの行動解析

単体アリの行動は、基本的に活動と休止の繰り返しによって構成されていることが知られている。また、同じコロニーから採取した 2 個体以上のア리를空間内に放つと、各個体の基本行動である活動と休止に加え、2 匹が寄り添って停止する行動も見られるようになる。申請者のこれまでの実験により得られた「停止場所の空間的な偏りの形成」、「各個体が示す移動-休憩の位相の同期」などの特徴的な振る舞いについて、より詳細な解析を可能とするために、より均質性を高めた環境下で少数アリの観察回数を増やし、得られた現象の普遍性を探る。

(2) 自己駆動粒子系としてのトゲオオハリアリの行動の数理モデル化

アリの行動における、「停止場所の空間的な偏りの発生」は、足跡フェロモンの導入によりモデル化することが可能であると考えられる。また、「複数個体間に見られる移動-休憩の位相のずれ」は、各個体の内部に振動子を仮定し、振動子同士の簡単なカップリングを導入することで、説明が可能であると考えられる。これらを作業仮説として設定し、「モデル化」「シミュレーション」「観察事実との適合性」を照らし合わせながら、より普遍性の高いモデルの構築を目指す。

(3) 自律分散型探索収集ロボットシステムへの応用

トゲオオハリアリの女王が示すパトロール行動を数理モデル化し、それに基づいたロボットシステムを構築する。ワーカーを小型収集機、女王を回収機と見なして、親子型自律分散収集システムの試作を目指す。小型収集機は空間的に分散し、各自収集作業を行う。回収機は収集機と局所的な通信を行い、状況に応じて適応的に回収作業を行う。

3. 研究の方法

本研究はトゲオオハリアリを中心として、「個体レベルでの行動計測と解析」、「計測に基づいた“自己駆動粒子系”としての行動の数理モデル化」、「構成したモデルに基づく自律分散型群ロボットシステムへの応用」を密接に関連付けていくものである。

(1) 個体レベルでの行動計測と解析

用いる個体数：2～10匹

実験フィールド：半球フィールドおよび円環状通路

すでに知られているように、単体アリは活動と休止を繰り返すことを基本行動としている。また、2 個体以上のアリが存在すると、寄り添って停止する行動もとるようになり、その停止場所は空間的な偏る。そこで、半球フィールド (2 次元空間)、円環状通路 (疑似 1 次元空間) におけるアリの行動を観察・計測する。計測する量は、各個体の位置、方向、速度、および個体間の距離の時系列である。基本的な行動特性は 2 次元平面における行動観察から得られると予想されるが、円環状通路による実験も並行することで、アリの行動の時空間パターンの解析が容易になり、モデルの構築に有用な知見が得られることが期待される。

(2) 自己駆動粒子系としてのアリの行動の数理モデル化

当初はエージェントベースでシミュレーションを行う。各個体の内部状態として振動子を導入し、その位相によって移動と休憩を繰り返すモデルを考える。個体間の距離に応じたカップリングを導入し、位相の引き込みが生じるダイナミクスを検討していく。エージェントベースで得られたこれらの結果をもとにトップダウンモデルとしてまとめていく。

(3) 自律分散型探索収集ロボットシステムへの応用

トゲオオハリアリのパトロール行動をモデル化し、そのアルゴリズムを応用した群ロボットシステムを試作する。本研究ではワーカーを小型収集機、女王を回収機と見なした親子型自律分散収集システムについて論じる。トゲオオハリアリの女王が示すパトロール行動は、ワーカーの卵巣の発達とそのセンシングというワーカーと女王の局所的な相互作用のみで最適化が図られると考えられている。そこで、収集可能量が有限な小型収集機が収集したゴミの量を卵巣発達度合と関連付け、適宜、女王に見立てた回収機に受け渡す必要があるシステムを考えると、局所的な通信のみによって、全体として効率のよい分散物収集・回収を実行する群ロボットシステムを構築することができると考えられる。この有効性をコンピュータシミュレーションによって実証する。

4. 研究成果

(1) 個体の行動にみられるリズム現象
社会性昆虫の集団行動の基本は2個体間（もしくは少数個体間）の局所的な相互作用にある。そこで、何もない実験空間内でのトゲオオハリアリのワーカーの行動に焦点を当て解析した。移動軌跡の計測から空間的な分布に偏りが生じることを明らかにした。また、移動速度の計測から active-inactive の繰り返しが生じることを示した。active-inactive が相互に現れる傾向があることから、アリの内部状態における「周期性の存在」と「引き込み的な相互作用」が存在することが示唆された。そこで、この現象を理解へ向けて簡単な引き込みモデルを仮定し、シミュレーションによる定性的な理解を試みた。主に個体1匹、ならびに2匹の行動に焦点を当て解析した。女王の他、働きアリにおいて、主に巢外で行動する「外役」、巢内で行動する「内役」を区別して実験を行った。得られた結果は以下の通りである。

- ① 2匹の行動において、活発・不活発の周期的行動が見られるが、その周期を計測した結果、女王≒内役>外役の関係が得られた。
- ② 2匹の行動において、外役—外役の組み合わせでは、活発・不活発の周期性において、同位相になる傾向が見られた。また、内役—内役の組み合わせでは、その周期性が逆位相になる傾向がみられた。円環内の行動解析についてはあまり明確な結果が得られなかった。今後も継続・検討を要する課題であると考えている。

(2) トゲオオハリアリの行動特性を定性的に理解することを目的とした数理モデルの構築

① 個体の行動にみられるリズム現象の数理モデル化

申請者らがこれまでに行ってきた実験から、均質な閉空間内に単体あるいは少数でおかれたトゲオオハリアリは「動き回る活発な状態」と「ほとんど動かない不活発な状態」をある程度周期的に示すことが分かってきた。特にワーカーに焦点を当て、主に巢外で活動する「外役」と、主に巢内で活動する「内役」に大別して、それらの組み合わせによって活発・不活発の周期性を計測したところ、(i) 外役—外役の組み合わせでは、活発・不活発が同位相の周期性を示しやすい、(ii) 内役—内役の組み合わせでは、逆位相の周期性を示しやすい、という傾向が見られることが明らかになった。そこで、この現象を数理的に理解すべく、簡単な振動子の位相引き込みモデルを構築した。「単純な振動子に閾値を導入し、それを超えている間だけ移動するものとする」「一定の確率で出会うものとする」「出

会ったときに結合定数に応じて位相が修正される」という仮定のもので数値計算を行い、実験結果に相応する計算結果を示すことができた。

② パトロール行動の数理モデル化

トゲオオハリアリはコロニー統制のためにパトロール行動を示すことが知られている。別の研究グループからの報告により、「コロニーからしばらく隔離された個体群を再びコロニーに戻した際、その個体群の割合に応じて女王のパトロール時間が変化する」ことが明らかになった。そこでこのグループと共同で、この実験結果を定性的に理解することを目的とした数理モデルの構築を行った。女王、ワーカーに内部状態を導入し、接触によって内部状態量が増減することをベースとした単純なモデルであるが、定性的な理解につながるモデルとすることができた。

(3) 群ロボットシステムへの応用

コンピュータシミュレーションによって有限領域内での分散物収集ロボットシステムの振る舞いを検証した。子機の数を変えるなどの変動に対しても安定的に最適あるいは準最適な状態、つまり、回収する親機ロボットの移動量を長くすることなく、分散物の収集が可能であることを示した。

(4) 2つの部屋をもつ巣内における女王のパトロール行動

当初の計画には入っていなかったが、簡便ながらも示唆に富む結果が得られそうな実験の提案があったため、以下の実験を実施し、その結果を検討した。

トゲオオハリアリの女王は移動と休止を繰り返しながら全ワーカーと接触する“パトロール行動”を示すことが知られている。しかし、その行動パターンを詳細に調べた先行研究がない。そこで以下の実験を行った。

① 簡易巣内における女王のパトロール行動の解析を行った。その結果、女王の周囲に存在するワーカー数が多いほど、女王の移動速度が遅くなる傾向が見られた。

② この結果が、ワーカー数に依存しているのか、ワーカー密度に依存しているのかを明確にする実験を行った。2つの部屋をもつ人工巣を作り、女王のみが両部屋を行き来できるような環境を作った。各部屋のワーカー数や部屋のサイズを変化させた結果、ワーカー密度に依存することが明らかになった。また、ワーカーを取り除く実験を通して、密度の認識には個体間の直接接触と、場に残っている間接的な情報の両者に依存していることが分かった。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕 (計 6 件)

- ① Yoshikatsu Hayashi, Mai Yuki, Ken Sugawara, Tomonori Kikuchi, Kazuki Tsuji, Rhythmic Behavior of Social Insects from Single to Multibody, Robotics and Autonomous Systems, 60, 2012, pp.714-721, 査読有
DOI:10.1016/j.robot.2011.06.016
- ② Ken Sugawara, Kazuyuki Yaegashi, Yoshikatsu Hayashi, Tomonori Kikuchi, Kazuki Tsuji, Modeling the patrol behavior of the *Diacamma*'s gamergate", Artificial life and robotics, 14, 3, 2009, pp.318-320, 査読有

〔学会発表〕 (計 11 件)

- ① 結城、菅原、林、菊地、辻、少数のアリに見られる行動特性の解析：トゲオオハリアリが示すリズム現象、第 23 回自律分散システムシンポジウム、2011 年 1 月 30 日、札幌 (北海道大学)
- ② 結城、菅原、林、菊地、辻、トゲオオハリアリが示す行動のリズム、日本動物行動学会 第 29 回沖縄大会、2010 年 11 月 20 日、那覇 (沖縄県男女共同参画センターていりる)
- ③ 木島、菅原、トゲオオハリアリのパトロール行動をモチーフとした群ロボットシステム、情報処理学会東北支部研究報告、2010 年 2 月 12 日、仙台 (東北学院大学)
- ④ Ken Sugawara, Mai Yuki, Yoshikatsu Hayashi, Tomonori Kikuchi, Kazuki Tsuji, Ethological Analysis of Ant's Behavior from Single to Multi-body, IEEE Int. Symp. Robots and Systems (IROS2009)2009 年 10 月 11 日、St. Louis (Hyatt Regency St. Louis Riverfront)

〔図書〕 (計 1 件)

- ① 東 正剛・辻 和希編、菅原研、海游舎、社会性昆虫の進化生物学、2011、496

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.cs.tohoku-gakuin.ac.jp/~sugawara>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

菅原 研 (SUGAWARA KEN)

東北学院大学・教養学部・准教授

研究者番号：50313424

(2) 研究協力者

林 叔克 (HAYASHI YOSHIKATSU)

研究者番号：00611641