

## 研究課題別評価

### 1. 研究課題名 非線形動力学的手法による群知能ロボット

### 2. 研究者氏名 菅原 研

### 3. 研究の狙い：

複雑な人間社会において、効率的に適応し機能するロボットシステムの開発には、単体の機能向上のみならず、集団として協調的に機能する技術の確立も必要不可欠な要素となる。個々のロボットの知能レベルは低い、多数集団になることによって初めて高度な機能を発現するタイプの群知能システムに関する研究はまだ発展途上にあり、多くの研究が進められてきているものの、個体間の相互作用により高次の機能を発現させるための一般的な方法論はまだ確立されていない。一方、多数集団による協調行動発現の好例として生物システムがあげられる。

本研究では生物システムが有する「個体が群れを形成して集団で行動する」特性に注目し「均質な要素の集団が簡素な相互作用により、効率的な機能や作業を自己組織的に発現する」群知能ロボットシステムの構築を行う。

生物システムは階層構造を有し、細胞内分子レベルから人間の社会システムに至るまで様々なスケールで多様な協調現象が見られるが、本研究では「形態」と「機能」の側面から、特に「魚や鳥の群れをモチーフとした集団の行動と構造」と「社会性昆虫をモチーフとした集団の協調作業と作業効率」を対象として、そのモデル化ならびに実機による検証実験を行うものとした。具体的な研究項目として「多様な行動とフォーメーション形成」、「協調行動と分化・分業アルゴリズムの探求」の2点を設定する。

研究項目「幾何学的な群れフォーメーション形成」についての方法論を探るものである。ここでは「迷走」「蚊柱」などの群れ行動を表現できる非線形動力学モデルをベースとし、それを拡張していくことで形状の設計を含めた行動の発現に関する方法を確立していく。特に個体間に設ける力学的相互作用に工夫を加えて群れの様々な形状を作り出すことを試み、任意のフォーメーションを形成するための法則もしくはルールとはいかなるものか詳細を検討していく。そしてシミュレーションで確認できた群れパターンを実環境下でのロボット実験により検証していくものとする。

研究項目「単純な相互作用を有する個体に何らかの作業を与えた時に適応的な協調行動を引き起こすための方法論」について探求するものである。具体的には単一作業における協調の効果と分業における協調の効果を探求していくが、後者については特に最適比率の自律調整、つまり各作業に対する個体数比率を状況に合わせて安定に保つ機能、について研究を進める。何らかの原因によりある作業に従事する個体数に変動が生じた場合、他の作業に従事している個体が作業を切り替えることで全体としての比率を調整し、かつ、その比率も環境の変化に応じて柔軟に変わるダイナミクスは分業を行う群れロボットシステムには欠かせない機能であると考えられる。このような側面を重視した分業モデルを確立すると共に、実際にそのダイナミクスを群れロボットシステムに組み込むことで、その有効性を分かりやすく示していく。

### 4. 研究結果：

本研究の成果は大別して3つに分類できる。単純な相互作用力の導入による群れのフォーメー

ション形成、集団の協調作業、ならびに新しい実験システムの開発である。

#### 4 - 1 群れロボットによる構造形成

##### (1) 動力学モデルによるフォーメーション形成

相互作用を有する移動体において、内部状態として、ある時定数で速度ベクトルの向きに合わせるような緩和ダイナミクスを有する頭軸ベクトル (個体の向きを表すベクトル) を導入し、かつ個体間に適当な引斥力を導入することで、格子状の配列を持つ秩序状態から、特定の配列を有さない蚊柱状のカオス状態まで様々な行動形態を発現できる動力学モデルを元に、ポテンシャルに感度方向依存性を持たせるなどの拡張により基本的な幾何構造の形成を目指した。また、検証用の実験ロボットを試作し、その基本特性を確認した。

##### (2) 仮想非線形バネと結合数を用いたフォーメーション形成

有限のセンシング半径と、それに依存する仮想的な非線形バネをロボット間の引斥力として導入することにより、幾何学的なフォーメーションを形成するためのアルゴリズムについて研究を行った。結合数に関する情報と、デッドロック回避のための確率的な不安定性を導入することで目的の基本幾何形状 (三角形、六角形、梯子型など) を構築することができた。

#### 4 - 2 群れロボットの適応型分化 分業アルゴリズムの探求

ここでは2つのサブテーマを設けた。ひとつは社会性昆虫が示す探索収集行動を例にして集団の効率を計るものであり、もうひとつは、高度な社会性動物がもつ特性である分業のための自律的な比率制御に関する基礎的な研究である。

##### (1) 単純な相互作用を有するロボット群の探索収集問題

社会性昆虫の餌集め行動をモチーフとした探索収集作業を通して、単純な相互作用を有する群れロボットの作業効率に関する研究を行った。個体間の相互作用のみならず、環境との相互作用も含めた形で行動が現れる例として、収集基地から等距離 等間隔で分散した資源の回収作業を設定したとき、個体間の相互作用力が弱い時と強い時とで、その振る舞いは大きく変化する。相互作用力が弱いときは並列的な処理を行い、相互作用力が強いときは直列的な処理をするが、このとき時計回りあるいは反時計回りに処理されていくという一種の秩序構造が現れることを明らかにするとともに、この現象が生じる頻度は相互作用時間、相互作用距離、ロボット数、ならびに餌場の数に依存する現象であることを明らかにした。

##### (2) 最適比率制御モデル

社会性昆虫の世界では、各個体は比較的単純な振る舞いを見せるが、コロニーをうまく機能するために、集団として分業を行い、かつその分業に関する比率制御を巧みに行っていることが知られている。本研究では分業を行うロボットシステムへの応用を念頭において、その基礎となる動的な比率制御を行うことが可能なモデルについて考察した。ここでは主に、年齢に大きく依存する分業形態である齢差分業も表現しうる仮想ポテンシャルモデルを提案し解析を行った。

また、40 台のロボットからなる群ロボットシステムを製作し、このモデルの検証実験を行った。

#### 4 - 3 小型ロボット実験用動的仮想空間の開発

個体同士がコミュニケーションをとる際、その手段は物理的手段と化学的手段に大別できる。化学的手段の特長として「個体の有無に関わらず情報が環境にとどまる」増強されないと拡散し

て消える」などがあげられ、環境も含めた興味深いコミュニケーション手段であると考えられる。化学的コミュニケーション手段を有する群ロボットシステムには、これまでの群ロボットシステムには見られない高度な振る舞いが期待できるが、化学物質の扱いやセンサーの関係で、現時点での実現は容易ではない。また、実現できても、その化学物質の可視化は難しく現象理解の大きな妨げになる。

本研究ではテーマの一環として、仮想的な化学物質場を表現できるようなシミュレーション空間の開発をおこなった。ロボット実験用動的仮想空間 V-DEAR (Virtual Dynamic Environment for Autonomous Robots)は CCD カメラと液晶プロジェクタから構成され、カメラでフィールド内のロボットをトラッキングしながら、その位置に合わせてCGのフェロモンを投影するシステムである。ロボットは自身が有する光センサーを用いて「場の濃度」を検出し、その行動を決定するシステムになっている。このシステムでは、化学物質の拡散速度や揮発性、風向きなどを任意にコントロールでき、かつ、その振る舞いが可視化できるという特長を有している。

#### 5.自己評価：

本研究では生物を規範とした群ロボット作りを目指したものであり、シミュレーションと実ロボットシステムによる実験を通して基本的な概念を確立・検証することに主眼を置いてきた。研究計画において当初狙っていた目標への達成度という点では残念ながらあまり高い評価はできず、特に実証用の実験システムについては極めてプリミティブなレベルでの検証しか行うことができなかったところが大きな反省点となっている。完全な個人研究において群ロボットの実験的側面まで扱う場合、実験対象が多数の移動ロボットにより構成されるシステムであるという点を考慮して、テーマを充分絞り込むべきであったと考えている。

群の多様な行動とフォーメーション形成については、ベースとなる力学モデルを拡張していくことで多様な行動と形状を生み出すための手法の確立を目指したが、形状の制御は研究期間終了時点では極めて限定された形状のみの表現にとどまった。しかし一方で期間中に仮想バネモデルによるフォーメーション形成という新たな枠組みも提案し、この手法によりいくつかの基本的な幾何形状を表現することはできた。この研究は局所的な結合情報に基づいてグローバルな構造を形成していくための基礎として十分な意義があると考えている。今後はこれらのモデルを組み合わせることで、移動する群ロボットが状況に合わせて行動と構造の形態を変化させていくための方法論を確立させたいと考えている。また、本研究で製作した群ロボットシステムを用いて積極的に実験を行っていく予定である。

比率制御に関する研究については、これまでもいくつかモデルが提唱されてきたが、本研究で示した仮想ポテンシャルモデルは社会性昆虫の齢差分業を表現し得るという興味深いモデルになっていると考えている。今後は生物学的知見とも照らし合わせ、その妥当性を詳細に検討していくとともに、工学的な応用を視野に入れた群ロボットシステムへの組み込みにも取り組んでいきたいと思っている。

小型ロボット実験用動的仮想空間 V-DEAR の開発は、当初の計画には入っておらず、この3年間に新たに着想し開発したシステムとなっている。その仕組みはいったって単純であるが、化学物質によるコミュニケーション手段が持つ大きな可能性をコンピュータグラフィックスという制御可能な光刺激に置き換えることでシミュレートできるという点でたいへん興味深いシステムになると考えている。特にロボットの持つ「身体性」とヴァーチャルな化学物質の組み合わせは単なる化学物

質の可視化にとどまらず、実世界でのロボットシステムを構築する上で純粋なシミュレーションにはないリアリティーがあると考えることができ、この点が大きな特徴であると考えている。

なお、計画当初は基礎を念頭に置きつつ、生産現場などへの応用も検討していきたいと考えていたが、本研究で得られた知見からエンターテイメントの方向への応用もあり得るといふ別の方向性も見えてきている。特に V-DEAR は単なる研究手段にとどまらず、科学館などでの展示システムとしても活用可能ではないかと考えている。

以上、反省点は多くあるものの、これから研究を進めるべき方向が多方面に渡って具体的に見えてきたこと、70 台を超えるいくつかのタイプの実験用群ロボットシステムを製作できたことなどから、与えていただいた研究期間にこれからの展開の基礎が十分に出来たと考えている。これまで得られた知見や技術をベースとして、群知能ロボットシステムに関するより大きな枠組みの理解・応用を目指していきたい。

#### 6. 研究総括の見解：

本研究は、生物システムが有する「個体が群れを形成して集団で行動する」特性に注目した群知能ロボットシステムの構築を目指すものである。

単純な相互作用力の導入による群れのフォーメーション形成、集団の協調作業、ならびに新しい実験システムの開発に関して、シミュレーションと実ロボットシステムによる実験を通して基本的な概念を確立・検証することで成果を上げた。

これまで得られた知見や技術をベースとして、群知能ロボットシステムに関するより大きな枠組みの理解・応用を目指していくなど今後の研究発展が大いに期待できる。

#### 7. 主な論文等：

1. K. Sugawara, M. Sano and T. Watanabe, "A Study on a Foraging Behavior of Interacting Simple Robots", Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics Vol.7, No.2 (2003) pp.108-114.
2. K. Fujibayashi, S. Murata, K. Sugawara, and M. Yamamura, "Self-Organizing Formation Algorithm for Active Elements", FORMA, Vol.18, No.2 (2003) pp.83-95.
3. K. Sugawara and T. Watanabe, "A Study on Biologically Inspired Flocking Robots," Proc. Of the 2003 IEEE Int. Conf. On Robotics, Intelligent Systems and Signal Processing (RISSP2003) pp. 324-330.
4. K. Sugawara and T. Watanabe, "A Study on Foraging Behavior of Simple Multi-robot System", Proc. of The 28th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON '02) pp.3085-3090.
5. K. Sugawara and T. Watanabe, "Swarming Robots - Foraging Behavior of Simple Multi-robot System"; Proc. of 2002 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS2002) pp.2702-2707.
6. K. Fujibayashi, S. Murata, K. Sugawara, and M. Yamamura, "Self-Organizing Formation Algorithm for Active Elements", Int. Workshop on Self-Repairing and Self-Configurable Distributed Systems (2002) pp.416-421.
7. K. Sugawara and M. Sano, "Cooperative Behavior of Interacting Simple Robots in a Clock-face

- Arranged Field", Distributed Autonomous Robotic System (2002) pp.36-40.
8. K. Sugawara, R. Arai, M. Sano, Y. Hayakawa, T. Mizuguchi, and T. Watanabe, "Collective Motion of Interacting Simple Robots", Proc. of the 27th Annual Conf. of the IEEE Industrial Electronics Society(IECON'01)(2001) pp.428-432.
  9. K. Sugawara, Y. Hayakawa, M. Sano, and T. Watanabe, "Collective Motion of Interacting Robots", 2001 Int. Symp. on Nonlinear Theory and its Applications(NOLTA2001) (2001) pp.569-572.
  10. K. Sugawara, M. Sano, I. Yoshihara, K. Abe and T. Watanabe, "Cooperative Behavior of Multi Robot System with Simple Interaction", Proc. Artificial Life and Robotics, (2001) pp.109-112.