

論文の内容の要旨

論文題目 個体の状態分化と集団の分業を扱う蟻コロニーのモデル化とその設計手法
氏名 中村真理

本研究の目的は、蟻に見られるような協調作業を適応的に自己組織する自律分散システムを設計するための汎用性・適用性の高い方法論を構築することである。蟻はフェロモン信号を用いて空間構造を動的に作りだし、この空間構造を通信手段として利用しながらコロニー内部の役割分担を自己組織し、その結果コロニー全体で協同作業を形成することが知られている。本研究ではこのような蟻の協調作業を模倣したシステム設計の方法論を構築した。

この方法論はフェロモンのように蒸発・拡散する信号を用いる均質で大規模なマルチエージェントシステム(MAS)を対象とする。まず、信号の空間分布を手掛かりにして、タスク遂行に必要な動作を各状態のエージェントに割り当てていき、有限オートマトンの状態遷移の形でエージェントの行動則を構築する。この行動則に従うMASは、空間構造や作業分担の形成を通じて、協調作業を自己組織する。ここでその数値実験結果から協調作業の効率や作業分担を数値評価し、更に必要な動作を行動則に組み込んで試行錯誤で設計改善を繰り返す。このような構成論的システム設計の手順を容易にするためには、行動則を簡潔化する必要がある。

本論文では本方法論に基づいて蟻コロニーの様々な協調作業をモデル化し、様々な機能を持つ

MAS を構成論的に設計した。これらのシステムは簡潔な行動則を持ち、より効率的な協調作業を自己組織する。以上より、本論文の目的を支持する結果が得られたことを確認した。

以下、本論文の具体的な内容について説明する。本論文の第 1 章では、研究の背景・関連研究・目的（「蟻に見られるような協調作業を適応的に自己組織する自律分散システムを設計する」ための汎用性・適用性の高い方法論を構築する）について述べる。

第 2 章では、まず蟻コロニーの協調作業、特に空間パターンの形成と作業分担の形成について説明し、これらに関する従来のモデル研究について説明する。更にこれらを踏まえて、上記方法論の詳細な手順について説明する。

更に 3～5 章では本方法論に基づいて、蟻コロニーの様々な協調作業をモデル化する。本方法では柔軟なモデルの設計が可能となるので、従来取り扱えなかった様々な機能を導入して蟻コロニーモデルの設計を改善する。以下、その内容について具体的に説明する。

第 3 章では上記方法論に基づいて、下記の機能を柔軟にモデルに導入し、ハンドコーディングで蟻の採餌行動をモデル化する（採餌効率は時間当たり餌輸送量で与えられる）。

- [トレイルモデル]：徐々に減衰するフェロモントレイルを利用して、餌場の位置を記憶する機能を持つモデルを構築する。数値実験の結果、このモデルは餌探索に大きく偏った作業分担を形成する。
- [誘引モデル]：トレイルモデルにフェロモン拡散効果を導入し、離れた位置の蟻を餌場まで誘引する機能を持つモデルを構築する。数値実験の結果、このモデルは信号動員に偏った作業分担を形成する。
- [不応期モデル]：誘引モデルに蟻のフェロモン信号不応期を導入し、作業分担の自己調整機能を持つモデルを構築する。数値実験の結果、このモデルは餌探索・信号動員サブタスク間のトレードオフにより高い採餌効率を示す。

設計改善の結果、より効率的に機能するシステムを簡潔な行動則で実現できる。

第 4 章では本方法論を進化計算に拡張し、採餌タスクモデルの自動設計を行なう。進化計算には 3 章で用いた 11 個のルールを再利用する。進化過程で生じる 4 種類のモデルのうち上位 3 種は 3 章で設計したモデルに相同であり、進化計算の準最適解は不応期モデルに相同となる。これ

より 3 章の設計の妥当性を支持するものである。

第 5 章では本方法論を用いて、採餌タスクとゴミ塚形成タスク（これらのタスクはそれぞれ MAS で観測される二種類の自己組織的挙動の典型例である）の間の分業をハンドコーディングでモデル化し、それらの間の相互作用について調べる。まずゴミ塚形成タスクをモデル化する。

- [ゴミ塚形成モデル]：このモデルは地上にゴミを散らすよう短い時間スケールで動作し、その結果、地上に広く分散した小規模なゴミ塚を形成する。このモデルはコロニーの縄張りを誇示するよう動作するので、その作業効率をゴミ塚の分散度で評価する。

上記のゴミ塚形成タスクに対し、3・4 章で説明したように採餌タスクでは巣への走性を利用して大規模な空間構造を形成し、より長い時間スケールで餌を巣へ集めるよう機能的に動作する。

これらの異質なタスク間の分業をモデル化するため、タスクに対応する階層性を状態遷移（行動則）に導入し、次のようにシステム設計を改善する。

- [単純分業モデル]：ゴミ塚形成モデルと不応期モデルの行動則を融合し、採餌・ゴミ塚形成タスクを並行処理する単純分業モデルの行動則を構築する。数値実験の結果、このモデルは巣周辺に集中して大きいゴミ塚を形成し、ゴミ塚形成タスクの作業効率低下を示す。
- [分業切替モデル]：単純分業モデルにタスクを積極的に切り替えるルールを導入し、分業切替モデルを構築する。数値実験の結果、このモデルでは採餌効率・ゴミ塚形成タスクの両方で作業効率の向上を示す。

第 6 章では本方法論の有効性を示すため、既存の集荷モデルに信号拡散効果を導入した信号拡散モデルを構築する。両者の数値実験結果を比較すると、後者で作業効率の向上（平均収束ステップ数の減少）が見られるので、本方法論の有効性を確認できる。

以上、本論文では、本方法論を用いて様々なモデルを設計した。これらのモデルは簡潔な行動則を持ち、より効率的な協調作業を自己組織する。以上より本論文の目的を支持する結果が得られた。第 7 章では本論文の結論をまとめ、今後の展望について述べている。