

研究成果概要書

助成対象事業名	新世代ネットワークのための自己組織型制御技術の研究開発
助成対象事業者 (研究代表者名)	大阪大学 (若宮直紀)
1 事業の概要 <p>本研究開発の対象とする「自己組織化」は、これまでにない拡張性、柔軟性、頑健性を有する新世代ネットワークを実現するための設計原理の一つとして注目を集めており、国内外で様々な研究プロジェクトが実施されている。しかしながら、いずれにおいても、個別課題への自己組織型制御技術の適用事例が示されているに過ぎず、新世代ネットワークの基盤となる自己組織化技術の基本原理や、ネットワーク科学や基礎理論としての「自己組織化」については、未だ顕著かつ有効な成果が得られていない。また、新世代ネットワークアーキテクチャの研究においては、単なる理論やモデル、手法の提案にとどまらず、実環境における有効性、実用性を検証することが強く求められており、比較的長期的な視野での基礎的な研究開発分野である自己組織型ネットワーク制御についても、基礎理論の確立を目指すだけでなく、実機実験等によってその実用性を示すことが重要である。しかしながら、そのような研究はこれまで十分に行われておらず、自己組織化にもとづくネットワーク制御の有効性、実用性の検証が強く望まれている。本研究開発では、自己組織型ネットワークの実現に向けた今後の研究開発の発展および実用化の促進に資するため、特に生物システムの自己組織化機構に着想を得た自己組織型ネットワーク制御に関する理論の構築と、その応用としての自己組織型ネットワーク制御の実現を目的とする。具体的には、生物モデルとネットワーク制御の分類学、生物モデルにもとづく自己組織型ネットワーク制御と自己組織型ネットワークの階層構造の設計論、および生物モデルにもとづく自己組織型ネットワーク制御の特性を明らかにする。</p>	
2 共同研究体制と分担内容 <p>日本側研究開発体制 研究代表者 若宮 直紀 (大阪大学大学院情報科学研究科・教授) 研究補助者 3名 生物システムの自己組織化機構に学ぶネットワーク制御の理論と応用に関する研究開発においては、分類項目の策定と、主に数理モデルにもとづく生物モデルと一般的なネットワーク制御の分析および分類を担当する。また、自己組織型ネットワーク制御の階層間相互作用の分析に関する研究開発においては、階層的な自己組織化制御の数値解析評価やシミュレーションによる評価、および実験評価を担当する。</p> <p>米国側研究開発体制 共同研究者 Douglas SICKER (コロラド大学ボルダー校計算機科学科・准教授) 研究補助者 1名 生物システムの自己組織化機構に学ぶネットワーク制御の理論と応用に関する研究開発においては、分類項目の策定と、主に数理モデルにもとづかない生物モデルと無線ネットワークを中心としたネットワーク制御の分析および分類を担当する。また、テストベッド環境における自己組織型ネットワーク制御の評価に関する研究開発においては、無線ネットワークテストベッドやスマートフォン実験システムの構築、整備、およびそれら実験システムへの自己組織化制御の実装、評価を担当する。</p>	

3 事業の成果

生物システムの自己組織化機構に学ぶネットワーク制御の理論と応用（分類学）の研究については、生物モデルとして、アリの採餌行動の数理モデルである ACO（Ant Colony Optimization）について、特性分析とネットワーク制御への適用のための収束性、拡張性の向上に取り組んだ。また、蜂などの群れにおける役割分担メカニズムを表した反応閾値モデル（Response Threshold Model）について、収束性、安定性、頑健性などの特性解析と、モデルが適用可能な環境条件ならびにパラメータ領域の分析を行った。具体的には、ACO を応用した経路制御プロトコル AntNet を対象に、ネットワークの規模（敷設エリアサイズ、ノード数）の拡大に対して、経路収束までに要する時間が急激に増加することを確認した。次に、アドホックネットワークにおける経路制御としては、より短い収束時間が望まれることから、集中制御なく、自律的に領域を分割し、各小領域内で経路構築を行うことで、経路制御における自己組織性を損なうことなく、ネットワーク規模拡大に対する収束性の向上を図った。その結果、AntNet と比較して経路収束時間を大きく短縮するとともに、経路長も短くすることができ、性能が改善された。また、AntNet と同様に ACO をベースとした経路制御手法である HOPNET と比較して、経路制御のオーバーヘッドを大きく抑え、拡張性を向上できた。

一方、反応閾値モデルについては、その基本モデルを離散時間力学系として記述し、局所的漸近安定、大域的漸近安定に達するためのパラメータ領域を導出した。これにより、任意の状態から収束状態に達することのできる収束性の高いシステムを構築することができる。さらに、コロニーサイズ（総個体数）に対する拡張性、パラメータ設定に対する感度、動的な摂動、障害に対する耐性、得られる結果の最適性について分析した。特に、ノード故障やメッセージ棄却が発生する環境において、ノード故障やメッセージ損が平衡状態の有無、また、過渡状態における振動の有無に与える影響について解析的に評価し、シミュレーションでも検証を行った。さらに、故障率やメッセージ棄却率、ならびに制御パラメータと、故障からの回復時間の関係についても解析的に導出し、反応閾値モデルに基づく自己組織型ネットワーク制御の適用領域（ノード故障率とメッセージ棄却率）や、故障時間を短縮するための制御パラメータ設定を明らかにした。

自己組織型ネットワーク制御の階層間相互作用の分析（設計論）の研究については、アドホックネットワークとオーバーレイネットワークでの非線形数理モデルにもとづく階層的な経路制御の packets ベースシミュレータによるシミュレーション評価を行った。具体的には、生物の環境適応機構の数理モデルであるアトラクタ選択モデルを応用した自己組織型経路制御を対象に、経路長（ホップ数）に基づいて経路の良さを評価するアドホックネットワーク経路制御と、エンド間遅延に基づいて経路の良さを評価するオーバーレイネットワーク経路制御が相互作用する場合について、相互作用の強さが、ノード故障からの回復時における経路の安定性、経路長、配送率、遅延、および回復時間に与える影響について評価した。その結果、アドホックネットワーク、すなわち下位層が、上位層であるオーバーレイネットワークの経路品質を考慮して経路制御を行うことにより、より短く配送率の高い経路に安定的に、かつ早く収束できることが明らかとなった。これにより、階層的な自己組織型経路制御を実現するための設計指針が示された。

さらに、テストベッド環境における自己組織型ネットワーク制御の評価（実証）の研究については、平成 23 年度は、概念実証のためのスマートフォン実験システムの構築、整備、および実験評価する生物モデルとネットワーク制御手法の選出に取り組んだ。

また、テストベッド環境における自己組織型ネットワーク制御の評価（実証）の研究については、米国研究機関において、スマートフォンを用いた無線テストベッド環境を構築し、実環境における自己組織型ネットワーク制御の実機実験を行い、その有効性が確認された。