

( 続紙 1 )

京都大学	博士 (工学)	氏名	Yanran Wang
論文題目	Formation Control of Swarm in Two-Dimensional Manifold: Analysis and Experiment (二次元多様体における群形成の制御:解析と実験)		
(論文内容の要旨)			
<p>本論文は、ワイヤレス・センサー・ネットワーク (Wireless Sensor Network: WSN) におけるエネルギー消費の問題に、群知能 (Swarm Intelligence: SI) の相互作用のメカニズムに基づくアルゴリズムを用いたアプローチを導入し、課題解決の可能性を論じたものである。WSN が避けられないエネルギーの制約にセンサー・ネットワークのクラスタリングを導入した効率向上が検討され、スケール則の確認やデータ集約のプロトコルの開発が行われている。本論文は SI に着想を得た情報伝達メカニズムによりこの課題へのアプローチを提案し、外部環境の変化の下においても情報伝達を可能にする手法を提案すると共に、複数のホイールロボットを用いた群フォーメーションの実験によりその有効性を確認している。本論文は 6 章からなっている。</p> <p>第 1 章は、まず本論文で扱う WSN と SI について紹介し、各々の概念及び基礎的事項についてまとめている。まず WSN の分野で広く普及している通信プロトコルの概要について説明し、その限界と課題について述べている。次に SI について関連研究の背景と提案されている種々の解析手法について説明した後、SI の応用例を紹介している。最後に、WSN と SI の両概念に跨る課題を示した後、その解決に挑む本論文の構成を示している。</p> <p>第 2 章は、本論文の基礎となる SI のモデルとその解析法をまとめている。まず群を構成するエージェントのフォーメーションについて説明し、これを微分幾何学の測地線偏差方程式を用いてモデル化し解析する手法をまとめている。次に、各種 2 次元表面を移動する群のフォーメーションについて数値シミュレーションを行っている。そして状態空間を支配する多様体の曲率に着目することにより、群のフォーメーションの変化を解析することができることを明らかにしている。その結果、群のフォーメーションから状態空間の多様体固有の曲率を定量的に求め、外部環境の変化を知る手がかりが得られることを示した。これらはさらに高次元の空間における群のフォーメーションの解析に展開できるものであることを示した。</p> <p>第 3 章では、第 2 章のモデルで表された群がフォーメーションを保つ制御を扱っている。ここでは群がフォーメーションを保つ機構としてリーダー・フォロワーを基本単位とする制御手法を採用している。従来のリーダー・フォロワー制御手法とは異なり、群がフォーメーションを保つメカニズムをフォロワーによる軌道推定問題として扱う。さらに、本章ではクーブマン作用素理論と拡張動的モード分割 (EDMD) を導入し、外部環境の変化の下で群のフォーメーションを維持する手法として適用できることを明らかにしている。提案手法の有効性をシミュレーションにより具体的に評価すると共に、EDMD によるフォロワーの自律的軌道予測に影響する測定値を比較して選択し、その処理アルゴリズムを開発している。</p> <p>第 4 章は、群のフォーメーションを保つ軌道に対する曲率の推定とその精度について評価している。群を成すエージェントの距離やエージェント間の距離等の測定頻度など</p>			

京都大学	博士 (工学)	氏名	Yanran Wang
<p>のアルゴリズムを定める設定パラメータの影響について、2つのアルゴリズムを例に評価している。特に提案手法の具体的な系への実装に重要となる解析精度とシステムの制御性に関して、相互のバランスの重要性を明らかにしている。</p> <p>第5章は、提案手法の有効性を確認するため、ホイールロボットをエージェントとし、製作した放物2次曲面上で複数のホイールロボットによる自律的なフォーメーション走行実験を実施している。リーダー・フォロワーを単位とする制御機構にクープマン作用素理論とEDMDを適用した群のフォーメーション制御系を実装し、提案手法が実現できると共に、フォーメーション制御を介して外部環境の変化を測定できることを確認した。この検証により、提案手法が具体的なシステムに実装が可能であることを明らかにした。本章ではシステムの基本設計、ハードウェア構成、ロボット制御アルゴリズムについて詳細に示し、得られた実験結果が再現できるための条件を示した上で、評価している。検証の結果、本論文の提案手法の具体的なシステムへの実装可能性と有効性を明らかにした。</p> <p>第6章は本論文の結論である。本論文で示された成果をまとめると共に、研究成果の将来の方向性についてまとめている。</p>			

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、ワイヤレス・センサー・ネットワーク (Wireless Sensor Network: WSN) におけるエネルギー消費の問題に、群知能 (Swarm Intelligence: SI) の相互作用のメカニズムに基づくアルゴリズムを用いたアプローチを導入し、課題解決の可能性を論じたものである。WSNが避けられないエネルギーの制約にセンサー・ネットワークのクラスタリングを導入した効率向上が検討され、スケール則の確認やデータ集約のプロトコルの開発が行われている。本論文は SI に着想を得た情報伝達メカニズムによりこの課題へのアプローチを提案し、外部環境の変化の下においても情報伝達を可能にする手法を提案すると共に、複数のホイールロボットを用いた群フォーメーションの実験によりその有効性を確認している。以下に本論文で得られた結果の要旨を示す。

- (1) 群個体に対して外部環境を  $(n - 1)$  次元のリーマン多様体、すなわち方程式  $F(x_1, \dots, x_n) = 0$  の解によって定義した。この測地線偏差方程式を用いた多様体内での群のフォーメーション変化の観測から、多様体の曲率の推定を行い、外部環境変化に関する情報が得られることを示し、シミュレーションにより確認した。
- (2) リーマン多様体  $M$  上での群フォーメーションの制御法を導いた。群のフォーメーション制御問題は、リーダー・フォロワーの組み合わせを単位とする軌道推定問題として扱えることを明らかにした。特に、クープマン作用素理論と拡張動的モード分解 (EDMD) を適用した制御アルゴリズムを導き、リーダーに対してフォロワーが軌道を予測し群のフォーメーションを維持する制御に適用できることを確認した。またその予測に影響する測定量およびパラメータについても詳細に検討した。
- (3) 上記(1), (2)の理論的結果を検証するため、複数のホイールロボットからなる群を採用してリーダー・フォロワー系を構成し、フォロワーに実装した予測制御アルゴリズムにより、外部環境の変化の下でその知見を持たないフォロワーが群のフォーメーションを保つことが可能であることを示すと同時に、フォーメーションを維持するのに十分な軌道精度が得られることを確認した。

上記の結果は、WSNが基地局との通信で消費するエネルギーの削減を図るため、新たにSIのメカニズムを利用した軌道予測法と追従制御法を提案したもので、その理論を整理すると共にシミュレーションにより有効性を確認し、ホイールロボット群に実装して有効性を示している。分散システムにおける計測、通信による微分幾何学的関係の変化を用いた外部環境変化の予測および制御方法の開発に資するところが少なくない。よって、本論文は博士 (工学) の学位論文として価値あるものと認める。また、令和5年12月21日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。