



群ロボットのハイブリッド制御に関する研究

村山, 暢

(Degree)

博士 (工学)

(Date of Degree)

2012-09-25

(Date of Publication)

2014-02-14

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

甲5630

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D1005630>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



論文内容の要旨

氏 名 村山 暢

専 攻 情報知能学専攻

論文題目 (外国語の場合は、その和訳を併記すること。)

群ロボットのハイブリッド制御に関する研究

指導教員 羅 志偉 長野 明紀

(注) 2, 000 字～4, 000 字でまとめること。

複数のサブシステムが集まって構成されるシステムは数多く存在し、様々な分野で研究の対象となっている。特に、人間社会や生物の群れは、集団となることで要素単体とは異なる、複雑で多様な振る舞いを見せる。このような集団システムを模倣・解析し、人工システムの設計・制御に役立てることが期待される。近年では、広域を効率よくセンシングするためのセンサネットワークや、エネルギーを最適に利用するための電力網の分散制御など、自律分散システムに対する注目が集まっている。群ロボットもその一つであり、集団であることを利用した協調的な動作を目的とした制御、情報観測、状態推定の手法が近年数多く研究されている。

群ロボットの制御に関する研究は多数あるが、ロボット間の通信ネットワーク構造に着目し、ロボットの運動とネットワーク構造を同時に制御する研究は少ない。しかしながら、一般的に群ロボットは近傍のロボット同士を無線通信させる事によって全体で無線通信網を構築し、情報交換を行うことが想定されている。このため、ネットワーク構造を考慮した群ロボットの制御手法を研究することは重要である。

本論文は、無線通信によって情報交換を行うことを想定した移動群ロボットシステムの制御手法に関する研究をまとめたものである。一般的に無線通信を行う際、電力コストや干渉などの理由によって通信可能範囲に上限が存在することから、各ロボットが自由に移動するとネットワーク全体の連結性が崩れてしまい、群ロボットシステム全体に情報が行き渡らなくなる恐れがある。群ロボット間の無線通信構造(ネットワーク構造)における通信リンクの接続/切断はコントローラによって制御可能な要素であることから、本研究では群ロボットシステムを、ネットワーク構造を離散的な状態としたハイブリッドダイナミカルシステムとして定式化を行った。このモデルに対して、通信可能範囲や連結性制約を考慮する Receding Horizon 制御ベースの制御手法を提案した。さらに、提案手法に対して理論的な安定性や実行可能性の解析と、計算時間に関する考察を行った。

本研究は主に次の 3 つの場合について、制御手法の提案と解析・考察を行った。

- まず第 3 章では、無線通信範囲制約を有する群ロボットシステムに対して、連結性維持のための制御手法を研究した。通信範囲に関する制約をまずロボットの位置とネットワーク構造を変数として含む論理式で記述し、それを等価な不等式に書き換えた。また、制約を取り扱うことのできる制御手法の一つである Receding Horizon 制御(以下では RHC と書く)に着目し、研究を進めた。RHC は最適制御問題をサンプリング間隔毎に解く事で制御入力を決定する手法である。そのため、連結性制約を考慮する最適制御問題の解法を示した。しかしながら、ここで提案する手法は集中制御手法であり、特に最適制御問題を解く際にかかる計算時間の面で難があった。

次に第 4 章で、無線通信範囲制約を有する群ロボットシステムの分散制御手法を研究した。ここではまず、制約集合の性質を理論的に解析した。制約集合の凸性に着目し、初期状態から目標状態への可到達性や、目標状態へ収束する勾配に関する定理を導出した。その後、分散制御手法を提案した。複数のロボットが独立した意思決定によりリンクを切断する場合、ネットワークの連結性が崩れる恐れがあるが、本手法はネットワークの制御権を各ロボットに巡回させることによって連結性を保証している。また、提案手法の実行可能性および安定性に関する条件を解析した。提案手法によって前述の集中制御手法と比較して計算時間を大幅に短縮することができた。

第 5 章では、不確かさを含む群ロボットシステムの動作計画手法を考えた。ここでは、各ロボットが Kalman フィルタを使うことで観測情報から自己の状態を推定する場合を想定した。さらに、無線通信範囲内にいるロボット同士が相互観測を行い、観測情報をやり取りするとした。この場合、単独観測の場合よりも推定に使うことのできる情報が増える。以上のモデルに対して動作計画を行うために、未来の観測更新を考慮することのできる Partially Closed Loop RHC を用いた。提案手法により、相互観測によって単独観測よりも不確かさを減らし、より短距離で目標位置へ到達できる経路を導出することができた。

以上の 3 つの場合について、本研究のモデルと手法の有効性を示した。群ロボットシステムにおけるネットワーク構造を制御可能な状態であるとしてモデル化し、ロボットの運動とネットワーク構造を同時に制御することによって制御の幅が広がり、多様な行動を行わせることが可能となった。本研究の提案制御手法ではいずれも混合整数計画問題を解く際に指数オーダーの計算時間を要するため、計算時間の更なる改善が今後の課題として挙げられる。また、本研究で用いたハイブリッドモデルは群ロボットに限らず、ネットワーク構造を変化させることのできるシステムに対して有効であるため、一般的な分散 RHC 手法や分散最適化アルゴリズムの研究によって様々な集団システムの制御を行うことが可能となるだろう。

氏名	村山 暢		
論文 題目	群ロボットのハイブリッド制御に関する研究		
審査委員	区 分	職 名	氏 名
	主 査	教授	羅 志偉
	副 査	教授	太田 有三
	副 査	教授	横小路 泰義
	副 査	准教授	長野 明紀
	副 査		
要 旨			
本論文は、群ロボットのフォーメーション制御について研究している。ここでは、各ロボットに対する動的制御を、ロボット間の通信ネットワークの連結制御と同時に考慮することで、ロボット全体が連結性の保たれた通信ネットワークを介して相互作用し合い、目的のフォーメーションを実現する制御手法を提案している。具体的には、各ロボット間で無線通信によって情報交換することを想定し、群ロボットシステムの制御問題をハイブリッドシステムとして定式化し、3種類の制御方式を提案している。群ロボットのフォーメーション制御では、ロボット間の無線通信の通信範囲に上限があることから、各ロボットが自由に移動するとネットワーク全体の連結性が崩れ、群ロボット全体に情報が行き渡らなくなる恐れがある。ネットワークにおける各リンクのオン・オフを離散的な状態とすることで、フォーメーション形成問題をハイブリッドダイナミカルシステムとして扱い、このモデルに対して、通信可能範囲や連結性制約を考慮する Receding Horizon 制御手法を提案された。また、提案手法の収束性や実行可能性も解析され、計算時間に関する考察を行った。本学位論文は、以下の6章で構成されている。 第1章では、群ロボット研究と関わる生物の集団形成や各種通信ネットワークについて述べている。そして群ロボットに関する今までの研究背景、手法と成果について考察されている。さらに、本研究の目的と論文構成について説明している。 第2章では、本研究に係る基礎となるグラフ理論、ハイブリッドシステムの定式化の一つである MLD (Mixed Logical Dynamical) システムと Receding Horizon 制御などの数理基礎を記述している。 第3章では、無線通信範囲制約を有する群ロボットシステムに対して、連結性維持のための制御手法を研究し、通信範囲に関する制約をロボットの位置とネットワーク構造を変数として含む論理式で記述し、等価な不等式に変換した。また、本制約を取り扱う制御手法の一つである Receding Horizon 制御(以下では RHC と書く)について研究を進めた。RHC は最適制御問題をサンプリング間隔毎に解くことで制御入力を決定する手法で、ここでは、連結性制約を考慮する最適制御問題の解法として提案した。ただし、この手法ではすべてのロボットに関する情報が必要で、一種の集中制御手法であり、特に最適制御問題を解く際に莫大な計算時間が必要である。 この問題に対して、第4章では、無線通信範囲制約を有する群ロボットシステムの分散制御手法を研究した。ここではまず、制約集合の性質を理論的に解析し、制約集合の凸性に着目して、初期状態から目標状態への可到達性や、目標状態へ収束する勾配に関する定理を導出した。そして、各ロボットが局所的な他のロボットの情報のみで制御する分散制御手法を提案した。複数のロボットが単独にリンクを切断する場合、ネットワークの連結性が崩れる恐れがあるが、本手法ではネットワークの制御権を各ロボットに巡回させることによって連結性を保証している。また、提案手法の実行可能性および収束性に関する条件を解析し、提案手法によって前述の集中制御手法と比較して計算時間を大幅に短縮することができた。 第5章では、各ロボットに観測ノイズがある場合における群ロボットシステムの動作計画手法を考察した。ここでは、各ロボットが Kalman フィルタを使うことで観測情報から自己の状態を推定する場合を想定した。さらに、無線通信範囲内にいるロボット同士が相互観測を行い、観測情報をやり取りすることで、単独観測の場合よりも推定に使える情報が増えることが確認できた。以上のモデルに対して動作計画を行うために、未来の観測更新を考慮できる Partially Closed Loop RHC を用いた。提案手法により、ロボット同士の相互観測は単独観測よりも不確かさを減らし、より短距離で目標位置へ到達できる経路を導出することができることを判明した。 第6章では、本論文で得られた成果をまとめ、そして今後の研究課題について総説している。 以上で、本論文で得られた3つの研究成果は、実際の通信範囲制約がある群ロボットのフォーメーション制御にとって、いずれも新規性のある重要な知見を得たものとして価値ある集積であると認める。よって、学位申請者の村山暢は、博士(工学)の学位を得る資格があると認める。			