

令和 5 年 6 月 26 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2022

課題番号：19K04439

研究課題名（和文）多様なタスクを包括したマルチエージェントシステムの幾何・位相的制御理論の体系化

研究課題名（英文）Systematization of geometric and topological control theory for multi-agent systems including diverse tasks

研究代表者

櫻間 一徳 (Sakurama, Kazunori)

京都大学・情報学研究科・准教授

研究者番号：10377020

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究の目的は、マルチエージェントシステムの多様なタスクを包括する新しい制御理論を構築し、タスクごとの試行錯誤を不要とする、統一的な解析・設計理論の基礎を築くことである。エージェントが得られる情報が自身の位置・姿勢によって変わる相対測定値で、近隣のエージェントの情報のみである場合に所望の配置を実現するという問題を考えた。主結果として、このタスクが達成可能かどうかを判断するための厳密な条件を導いた。その条件は、所望の配置集合が相対測定値の集合のオービットである、ネットワークがクリークリジッドであるというものである。さらに、この条件の下で最適な分散制御器を設計する方法を提案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

既存研究では、マルチエージェントシステムの制御は従来の制御理論の延長として捉えられ、タスクごとに個別に解析・設計がなされてきた。これに対して、本研究では、多様なタスクを包括化するという他の研究者にはない独自の点に着眼し、マルチエージェント特有の制御理論を構築することで、制御工学の新しい理論体系を構築した。これは、新しい学術的分野を切り開く、世界に先駆けた創造的な研究成果である。また、本成果は、多様なタスクに適用できる制御技術であるため、様々なサイバーフィジカルシステムの運用に応用できる。これより、本研究の成果は産業界に対しても貢献し、その社会的意義は大きい。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this study is to construct a new control theory that includes the various tasks of multi-agent systems and to lay the foundation for a unified analysis and design theory, which eliminates the need for trial-and-error for each task. We considered the problem of achieving a desired configuration when the only information available to the agent is that of its neighbors, with relative measurements that vary with its own position and posture. As a main result, we derived rigorous conditions for determining whether this task is achievable. The conditions are that the desired set of configurations is an orbit of the set of relative measurements and that the network is clique-rigid. Furthermore, we proposed a method for designing an optimal distributed controller under these conditions.

研究分野：制御工学

キーワード：マルチエージェントシステム 分散制御

1. 研究開始当初の背景

近年, IoT (Internet of Things) の普及によって, モバイル端末, 電気機器, 建築物, 乗用車など様々な要素システムが情報交換によって繋がり, 全体として大規模なネットワークを構成しつつある. このような情報と物理システムが融合した「サイバーフィジカルシステム」の効率的な運用法を生み出すことは, 将来, 社会インフラを中心に多大な利益をもたらす. その例として, 次世代交通ネットワークがある. 車同士(あるいは車とインフラ間)の通信・観測による情報交換が点線で描かれている. 得られた情報を効率的に利用することができれば, 運転アシスト・自動運転の技術を飛躍的に向上させることができる.

制御工学の分野では, サイバーフィジカルシステムの抽象モデルとして, 「マルチエージェントシステム」に対する研究が盛んである. このシステムでは, 多数のエージェント(要素システム)がネットワークによって繋がれている. このような研究では, 大規模システムでも各エージェントの負荷が増加しない利点から, ネットワーク上の近隣エージェントの情報のみを用いる「分散制御器」を設計することが重要視されている. これまでの研究では, エージェントの状態を漸近的に一致させる「合意制御」に対して, 分散制御器の設計・解析が精力的になされており, その結果がグラフ理論に関連する形でまとめられている.

2. 研究の目的

マルチエージェントシステムのタスク(制御目的)は合意以外にも, ロボットや車両に対してはフォーメーション・包囲・縦列走行・グルーピング, 電力系に対しては同期・需給総和のゼロ化など多様なものが存在する. 現状, 多様なタスクを統一的に扱う手段がないため, タスクごとに試行錯誤的に分散制御器を設計するという見通しの悪い方法が続けられている.

この状況を打破するためには, タスクに関する適切な表現形式を備えることで, 多様なタスクを包括できるマルチエージェントシステム特有の制御理論を新しく構築することが求められている. では, どのような表現形式が適切であり, この枠組みで構築した新しい制御理論は, 従来の制御理論にどのように対応するであろうか?

以上の問いに答えるため, 本研究では次の二つを研究目的とする.

- (1) マルチエージェントシステムの多様なタスクを包括する新しい制御理論を構築する. この成果は, タスクごとの試行錯誤を不要とする, 統一的な解析・設計理論の基礎になる.
- (2) マルチエージェントシステムの制御理論と従来の制御理論との相違を明確にする. これによって, これら両方を含むより一般的な制御理論を体系化することを目指す.

既存研究では, マルチエージェントシステムの制御は従来の制御理論の延長として捉えられ, タスクごとに個別に解析・設計がなされてきた. これに対して, 本研究課題は, 多様なタスクを包括化するという他の研究者にはない独自の点に着眼している. このような観点に立って初めて従来の制御理論との相違が明確になるため, マルチエージェント特有の制御理論を構築し, より一般的な制御理論を体系化することが可能となる. このように本研究は, 制御工学の新しい理論体系を構築しその学術的分野を切り開く, 世界に先駆けた創造的な研究となる. また, 本研究は, 多様なタスクに適用できる制御理論を構築するため, 様々なサイバーフィジカルシステムの運用に応用することができる. これより, 本研究の成果は産業界に対しても大きな還元となり, その社会的波及効果が期待される.

3. 研究の方法

本研究の目的は, マルチエージェントシステムの多様なタスクを包括する新しい制御理論を構築し, 従来の制御理論との相違を明確にすることである. 比較対象は仮に非線形システムの制御理論とし, 以下について検討する.

- (1) 制御目的の表現: 従来の制御理論では, 状態 $x(t)$ を所望の状態 x_* (一点) に収束させる問題が与えられる. 一方, マルチエージェントシステムのタスクは多様であり, この形式では制御目的を記述することはできない. この問題を解決するため, 所望の状態を集合 T として定義し, 多様なタスクを統一的に $\lim_{t \rightarrow \infty} [x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)] \in T$ と記述する. ただし, $x_i(t), i = 1, 2, \dots, n$ は各エージェントの状態である.
- (2) 可制御性: 従来の制御理論では, ある状態 x_* に対する可制御性(状態の操作性)が, 状態方程式における関数 $f(x), g(x)$ の微分幾何的な構造によって特徴付けられる. これに習うと, マルチエージェントシステムの可制御性は, 所望の状態集合 T に対する操作性として定義される. このとき可制御性は, T の幾何的構造とネットワークの位相的構造によって特徴付けられることが予想される. このような条件を導出し, マルチエージェント特有の可制御性を確立することがここでの課題である.
- (3) 可観測性: 可制御性と同様の議論を行う. 相対観測量によって引き出される従来の制御理論との相違に注目し, マルチエージェント特有の可観測性を確立する.
- (4) 設計論: 従来の制御理論では, ロバスト制御などの様々な設計論が提案されてきた. マルチエージェントシステムについては, 任意のタスクを統一的に扱える設計論が求められる.

次に、提案法の有効性を検証するために、次世代交通システムのシミュレーションおよびロボットによる実証実験を行う。交通システムのシミュレーションでは、自動運転された自動車群に対して、高速道路における合流・分流、および信号機群と協調した交通整理などの様々なタスクを考える。本研究の成果によって、これらのタスクに対して統一的な方法で分散制御器を設計し、事故防止・渋滞軽減が図れることを確認する。また、ロボットの実験によってその実用性を検証する。

4. 研究成果

まず、多様なタスクに対する達成度を計る指標の統一化を行った。具体的な表現形式として、目標集合 T からの偏差を採用することを提案した。つまり、 $V = \text{dist}([x_1, x_2, \dots, x_n], T)$ という形の指標である。ここで、 dist は点と集合間の距離を表す。主要な成果として、目標集合 T とネットワーク G が与えられたときに、この指標を最小化するという意味において、最適な分散協調制御器を設計したことである。この制御器は分散性(ネットワークで直接つながった相手の情報のみを利用する性質)を確保するため、 V を G における「クリーク」(完全部分グラフ)単位に分割した指に基づいて設計されている。従来研究ではエッジ、つまり2要素間のつながりを用いていたのに比べ、本研究ではクリークというエッジ以上の要素のつながりを用いている。それでも制御器の分散性が崩れないこと、しかも、これが最適であることを証明したことがポイントである。制御器の分散性の要求から、クリークというグラフ理論の概念を世界に先駆けて制御理論に導入したという点で、本研究の新規性は高い。

つぎに、このような問題の典型的な応用として、自律移動システム群の配置問題について考えた。これに特有の問題が、観測情報の「相対性」、すなわち、位置や姿勢などによって観測情報に変化することである。例えば、自分と相手が絶対座標 x_i, x_j にいるとき、相手の座標を表す観測値は $x_j^{[i]} = M_i^{-1}(x_j - x_i)$ となる。ただし、 M_i は姿勢などによる座標変換を表す。このようにして得られる観測値 $x_j^{[i]}$ を「相対観測値」と呼ぶことにする。搭載するセンサによっては自分の絶対座標や姿勢がわからないため、相対観測値からは相手の絶対座標はわからない。相対観測値のみが制御に利用できること、そのクラスが搭載するセンサによって異なることが、自律移動システム特有の問題となる。このような相対観測値を统一的に扱うため、観測値変換集合 C を用いた $x_j^{[i]} \in \{M_i^{-1}(x_j - x_i) : M_i \in C\}$ という形式で表現することを提案した。集合 C によって、様々な相対観測値のクラス、すなわち、センサの搭載状況を表現することができる。例えば、コンパスがなく方位が未知の場合、 C は特殊直交群(回転行列の集合)で与えられる。さらに、キャリブレーションが不確かで距離が未知の場合、 C はスケール付特殊直交群で与えられる。

本研究の主要な成果は、目標集合 T に対してタスクが実現可能であるために観測値変換集合 C が満たす必要十分条件が、群論の概念である「オービット」を用いた条件式 $T = \text{orbit}(C)$ であることを導いたことである。この条件式は、曖昧さのある観測値(C)によってタスク(T)の達成度を評価するためには、タスクにも同じ構造の曖昧さが入っていないとしないことを意味する。例えば、方位や距離がわからない場合、タスクとしては所望の配置に方位や大きさの自由度を含ませた相似な図形が要求されることになる。このような相対性による観測情報の曖昧さは群の「不変性」に対応するものであり、これを群論の概念であるオービットによってタスクに取り入れるという本手法は、他に類を見ない独創性の高いものである。

なお、導出した条件は必要十分条件であるため、逆問題にも適用することができる。つまり、搭載センサ(C)を与えると、実現可能なタスク(T)の全てがわかる。 T が得られれば、最適な分散制御器を設計できる。このように、提案法は、自律移動システム群の制御系設計法として汎用的かつ系統的なものであるため、今後、世界中で利用される標準ツールとなることが期待される。既存のマルチエージェントシステムの研究との違いとして、これまでは、合意制御に対して、ネットワークの位相的構造が及ぼす影響が調べられてきたのに対して、本研究では、多様なタスクを表現した所望の状態集合 T の幾何的構造を取り入れることが特徴である。このような視点に基づいて、タスクの幾何的構造およびネットワークの位相的構造を備えたマルチエージェントシステムの制御理論という、制御工学の新しい理論体系を構築することができた。

本研究成果をまとめた内容は、Generalized Coordination of Multi-robot Systems というタイトルで、専門家にも定評のあるモノグラフシリーズ Foundations and Trends(r) in Systems and Control に掲載された。また、本成果の一部により、計測自動制御学会制御部門研究賞(木村賞)を受賞した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 K. Sakurama, T. Sugie	4. 巻 9(1)
2. 論文標題 Generalized Coordination of Multi-robot Systems	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Foundations and Trends in Systems and Control	6. 最初と最後の頁 1-170
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1561/2600000025	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 T. Ogawa, K. Sakurama, S. Nakatani, S. Nishida	4. 巻 13
2. 論文標題 Relative Position Estimation for Formation Control with the Fusion of Predicted Future Information and Measurement Data	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration	6. 最初と最後の頁 225-232
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.9746/jcmsi.13.225	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 K. Sakurama	4. 巻 7
2. 論文標題 Clique-Based Distributed PI Control for Multiagent Coordination With Heterogeneous, Uncertain, Time-Varying Orientations	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Control of Network Systems	6. 最初と最後の頁 1712-1722
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TCNS.2020.2997130	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 K. Sakurama	4. 巻 66
2. 論文標題 Unified Formulation of Multi-agent Coordination With Relative Measurements	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Automatic Control	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TAC.2020.3030761	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 K. Sakurama, H. Ahn	4. 巻 112
2. 論文標題 Multi-Agent Coordination over Local Indexes via Clique-Based Distributed Assignment	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Automatica	6. 最初と最後の頁 108670
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.automatica.2019.108670	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計16件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 9件)

1. 発表者名 K. Sakurama
2. 発表標題 Formation Control of Mechanical Multi-Agent Systems under Relative Measurements and its Application to Robotic Manipulators
3. 学会等名 The 60th IEEE Conference on Decision and Control (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 C. Peng, K. Sakurama, and M. Yamazumi
2. 発表標題 Distributed Formation and Orientation Control of Multiple Holonomic Mobile Robots Using Relative Measurements
3. 学会等名 The 5th IEEE Conference on Control Technology and Applications (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 R. Aasi, and K. Sakurama
2. 発表標題 Formation Control of Two-Wheeled Mobile Robots Keeping Constant Distance to Wall
3. 学会等名 The 4th International Symposium on Swarm Behavior and Bio-Inspired Robotics (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 C. Peng, K. Sakurama
2. 発表標題 Distributed Formation and Orientation Control for Multi-Robot Systems via Local Frames
3. 学会等名 The 4th International Symposium on Swarm Behavior and Bio-Inspired Robotics (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 櫻間一徳
2. 発表標題 相対観測値による機械システムのフォーメーション制御
3. 学会等名 第64回自動制御連合講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 浅井良, 桜間一徳
2. 発表標題 壁面と一定間隔を保つ二輪移動ロボットの隊列移動,
3. 学会等名 第65回システム制御情報学会研究発表講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 K. Sakurama
2. 発表標題 Formation Control of Multi-Agent Systems With Generalized Relative Measurements
3. 学会等名 Proc. of the 59th IEEE Conference on Decision and Control (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 K. Sakurama
2. 発表標題 Formation Control of Multi-Agent Systems with Relative Measurements through Group and Graph Theoretic Approach
3. 学会等名 The 20th International Conference on Control, Automation and Systems (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 K. Sakurama
2. 発表標題 Formation control of non-holonomic multi-agent systems under relative measurements
3. 学会等名 IFAC-PapersOnLine (21th IFAC World Congress) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 桜間一徳
2. 発表標題 一般化相対座標によるマルチエージェントシステムのフォーメーション制御
3. 学会等名 第63回自動制御連合講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 C. Peng, K. Sakurama
2. 発表標題 相対観測によるマルチエージェントシステムのクリークベースフォーメーション・姿勢制御
3. 学会等名 第63回自動制御連合講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 桜間一徳
2. 発表標題 マルチエージェントシステムの制御における線形性と非線形性
3. 学会等名 第8回 計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 N. Khurewattanakul, K. Sakurama
2. 発表標題 Multiagent Assignment Using Distance-Based Weighted Targets
3. 学会等名 Proc. of the 59th Annual Conference of the Society of Instrument and Control Engineers of Japan (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 桜間一徳
2. 発表標題 非ホロノミックなマルチエージェントシステムのフォーメーション制御
3. 学会等名 第7回計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 K. Sakurama
2. 発表標題 Formation-Oriented Motion Coordination of Multi-Agent Systems over Relative Measurements
3. 学会等名 Proc. of the IEEE 58th Conference on Decision and Control (CDC) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 桜間一徳
2. 発表標題 フォーメーション形状によって方向付けしたマルチエージェントシステムの移動制御
3. 学会等名 第62回自動制御連合講演会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関		
韓国	Gwangju Inst. of Science & Technology		