

平成 30 年 6 月 27 日現在

機関番号：34315

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K06158

研究課題名(和文) 入出力制約を有するマルチエージェントシステムの分散協調制御に関する基礎的研究

研究課題名(英文) Fundamental Study on Distributed Cooperative Control of Multi-agent Systems with Input and Output Constraints

研究代表者

鷹羽 浄嗣 (Takaba, Kiyotsugu)

立命館大学・理工学部・教授

研究者番号：30236343

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：入出力制約を有する線形マルチエージェントシステムの分散協調制御(同期制御)問題の研究を行なった。まず、各サブシステムに対して閉ループ系の応答軌道が入出力制約を満たすような状態ベクトルの不変集合を特徴づけ、この不変集合を構成するフィードバック制御則を設計した。得られた不変集合と制御則から、マルチエージェントシステム全体に対して、入出力制約と同期制御を同時に達成する相対フィードバック制御則と不変集合の設計法を構築した。さらに凸最適化計算を用いて不変集合を最大化することにより、広い同期可能領域を確保することができることを示した。提案法の有効性を数値シミュレーションにより検証した。

研究成果の概要(英文)：We have studied distributed cooperative control (synchronization control) of linear multi-agent systems with input and output constraints. For each sub-system, we first characterized the invariant set of state vectors which ensure the constraint fulfillment, and designed a feedback control law which forms this invariant. By making use of this invariant set and control law, we have proposed a new design method of the relative feedback control law and the invariant set which achieve both of the synchronization and input/output constraints for the whole multi-agent system. It also turned out that a wide region of attraction to the synchronized states can be obtained by maximizing the invariant set with the aid of convex optimization. The effectiveness of the proposed methods were verified through numerical simulations.

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 分散協調制御 同期制御 入出力制約 不変集合

1. 研究開始当初の背景

近年、応用範囲の広さからマルチエージェントシステムの分散協調制御に対する関心が高まっている。マルチエージェントシステムとは、右図のようにネットワーク上に散在する複数のエージェントから成り、隣接エージェント間の局所的な通信に基づいて自律分散的な制御を行なうことにより、系全体として同期・合意形成・フォーメーションなどの協調的タスクを実行するシステムのことである。初期の先行研究(例えば、O.-Saber, Fax, Murray, "Consensus and cooperation in networked multi-agent systems," Proc of IEEE, vol.95, 2007 参照)においては、合意形成問題などに見られる積分器・2重積分器のような非常に簡単なダイナミクスを扱っていたが、近年、高次のダイナミクスをもつエージェントからなるマルチエージェントシステムに対する分散協調制御の研究が進んでいる(R.Sepulchre(フランス),F.Lewis(米国),F.Allgower(ドイツ),原(東大)など)。また、エージェントモデルの不確かさやネットワーク構造の変動に対してロバストな分散協調制御系の解析・設計(鷹羽(立命館大),Trentelman(オランダ),原(東大),Zampieri(イタリア),Mesbahi(米国)など)に関する研究も活発に行なわれている。

一方、実際のマルチエージェントシステムでは、各エージェントに様々な制約条件が課せられる。例えば、移動ロボットのフォーメーション制御では、駆動モータに印加する指令電圧の大きさはモータの規格によって制限(入力制約)されているし、カメラやレーザスキャナなどのセンサ範囲・分解能にも限界(観測信号の制約)がある。このような制約を有するマルチエージェントシステムに対しては、制御目的や制御対象のハードウェアに応じてアドホックに分散協調制御系を設計してきたのが現状であると研究代表者は認識している。

そこで、本課題では、入出力信号に制約を有する複数のエージェントからなるマルチエージェントシステム(以下では、制約付マルチエージェントシステムと呼ぶ)に対して、協調的な制御目的が達成されるための条件を明らかにすることにより、制約付マルチエージェントシステムに対する分散協調制御系を設計するための理論的枠組の構築を図る。

2. 研究の目的

複数のエージェントがネットワーク上で自律分散的に相互作用し、協調的なタスク(同期、合意形成、フォーメーションなど)を達成するシステムをマルチエージェントシステムという。本課題の目的は、各エージェントの入出力信号の振幅または変化率に制約がある状況の下で、マルチエージェントシステムが協調的な制御タスクを達成するための条件を解析することによって、ネッ

トワーク構造、制御性能、制約充足のトレードオフを解析し、マルチエージェントシステムの制御理論に新しい知見を与えることにある。さらに、入出力制約を有するエージェントからなるマルチエージェントシステムに対して分散協調制御系を構築するための理論的基盤を提案することをも目標とする。

3. 研究の方法

(1) まず、入力制約を有する線形エージェントからなるマルチエージェントシステムに対する同期制御について研究する。入力制約を有するシステムは、入力チャンネルにリミッタ(飽和要素)を挿入することで、入力飽和システムとして扱うことができる。ここでは、閉ループの制約付マルチエージェントシステムにおいて、円板条件に基づいて同期状態への引き込み領域を定式化し、引き込み領域の内部近似を与える。この内部近似領域を最大化する最適化手法および制御系設計法を提案する。なお、エージェント間通信が対称(双方向)のネットワークの場合だけでなく、非対称通信ネットワークやエージェントダイナミクスが非均一の場合についても検討をおこなう。

(2) 前項の研究では、円板条件に基づく入力飽和システムの局所安定化を援用するが、より保守性の小さい解析手法を用いて、より広い引き込み領域を保証する制御系設計法についても検討する。

(3) 単一の制約システムに対する最大出力許容集合の構成法を拡張して、マルチエージェントシステムに対する最大出力許容集合の構成法を検討する。ここで、合意形成や同期の問題では閉ループシステム全体は漸近安定にならないので、単一の制約システムの結果がそのまま適用可能ではないことに注意が必要である。さらに、この最大出力許容集合を用いて、制約付マルチエージェントシステムの分散協調制御手法を検討する。

(4) 上述の理論的成果を、ビークル群の編隊制御や電力ネットワークの分散型電力管理などの実問題へ応用できるかどうか応用可能性を検討する。

(5) 上記のいずれの研究項目においても、適宜、本補助金での購入設備と現有設備を利用してシミュレーションおよび実験にて理論の検証を行なう。

4. 研究成果

(1) 入力制約を有するマルチエージェントシステムは、各エージェントの入力チャンネルにリミッタ(飽和要素)を挿入することで、入力飽和システムとして扱うことができる。入力飽和を有する線形エージェント群の無向グラフ(エージェント間通信が対称のネッ

トワーク)上の分散協調制御(同期制御)において, 相対状態フィードバックおよび相対出力動的フィードバックの場合に対して, それぞれ線形行列不等条件と双線形行列不等式条件による同期制御器設計法を提案した. これらの条件を用いれば, 同期状態への引き込み領域を楕円筒領域で近似することができ, この楕円筒領域を最大化することによって, 広い引き込み領域を実現できることを示した(論文[3],[4]).

(2) 前項の拡張として, 入力端にセクター有界な非線形要素を有する線形エージェント群に対して, 任意のセクター有界な非線形要素に対して同期を達成する相対状態フィードバック制御器の設計法を与えた(論文[5]).

(3) 入出力制約を有する線形エージェントからなるマルチエージェントシステムの無向グラフ上の同期制御問題について考察した. まず, 個々のサブシステムに対して, 閉ループ系の時間応答軌道が入出力制約を満たすような状態ベクトルの不変集合(出力許容集合と呼ぶ)を楕円体で特徴づけ, この不変楕円体を構成する相対状態フィードバック制御則の設計法を提案した. 得られた不変楕円体から, マルチエージェントシステム全体に対して, 入出力制約と同期を同時に達成する出力許容集合を構成する方法を与えた. さらに, マルチエージェント系の不変楕円体を凸最適化計算を用いて最大化することにより, 広い同期可能領域を確保できることを示した(学会発表[6],[7], 論文[1]).

(4) 上記は, 均一なダイナミクスの線形エージェント群に対する結果であった. 非均一なダイナミクスをもつ線形エージェントからなるマルチエージェントシステムに対しては, 各エージェントモデルのバラつきを公称モデルからのパラメトリックな不確かさとみなす事により, ロバスト制御論の考え方を援用することができる.

ここでは, 前項の不変楕円体とロバスト制御論に基づき, 入出力制約の下で同期をロバストに達成する制御系の解析・設計法を与えた. 具体的には, 適当な座標変換によって得られる個々のサブシステムを同時にロバスト安定化し, かつ, 入出力制約を満たすような状態フィードバックゲインと不変楕円体を求めた. この状態フィードバックゲインと不変楕円体からマルチエージェントシステム全体に対して, 入出力制約の下でロバストに同期を達成する相対状態フィードバック制御則と楕円筒型不変集合を構成した. 提案手法では, 線形行列不等式制約の下で数値的凸最適化により, 所望のフィードバックゲインを効率的に設計可能である. この成果は, 現在, 論文投稿中(予備的結果は学会発表[1])である.

(5) 入出力制約が状態に関する線形制約になる場合, 楕円体よりも凸多面体を不変集合として用いた方が保守性が小さい. 離散時間線形マルチエージェントシステムの入出力制約付き同期制御系の凸多面体不変集合を用いた解析手法について検討した. まず, 各エージェントにおいて, 隣接エージェントからの信号を外部入力とみなし, 入力制約を満たす初期状態の凸多面体集合を外部入力パラメトライズする. 各エージェントの状態の時間変化に応じて更新される凸多面体集合を追跡する事により, 入出力制約の下での同期条件を導出する. 本成果は発表準備中である. また, 制御設計への発展などいくつかの課題が残っているため, 本補助金終了後も引き続き研究を続ける予定である.

(6) 本課題研究の応用の可能性として, フォーメーション制御に関する研究を行った(論文[2], 学会発表[3],[4],[5]).

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計5件)

- [1] K. Takaba: “Synchronization of linear agents with input/output constraints,” IFAC PapersOnline, vol. 50, no. 1, pp. 1817-1821, 2017, 査読有.
DOI: 10.1016/j.ifacol.2017.08.176
- [2] D. Tsuzuki, K. Takaba: “Vehicle following and formation control of nonholonomic vehicles using time-state control form,” Proceedings of SICE Annual Conference 2016, vol.1., pp.1666-1672, 2016, 査読有.
DOI: 10.1109/SICE.2016.7749222
- [3] K. Takaba: “Local synchronization of linear multi-agent systems subject to input saturation,” SICE Journal on Control, Measurement, and System Integration, vol. 8, pp. 334-340, 2015, 査読有.
DOI: 10.9746/jcmsi.8.334
- [4] K. Takaba: “A dynamic protocol for local synchronization of linear multi-agent systems subject to input saturation,” Proceedings of 54th IEEE Conf. on Decision and Control, vol.1, pp. 4923-4928, 2015, 査読有.
DOI: 10.1109/CDC.2015.7402988
- [5] K. Takaba: “Synchronization of linear agents with sector-bounded input nonlinearities,” Proceedings of 15th International Conf. on Control, Automation and Systems, vol.1, pp.1-6, 2015, 査読有.
DOI: 10.1109/ICCAS.2015.7364868

〔学会発表〕(計 7 件)

- [1] K. Takaba: “Robust synchronization of linear multi-agent system with input/output constraints,” 2nd Int. Symposium on Swarm Behavior and Bio-inspired Robotics (SWARM2017), 2017
- [2] A. Ohashi, K. Takaba: “A modified GMRES method for solving large-scale Lyapunov equations for multi-agent systems,” SICE Annual Conference 2017
- [3] K. Takaba: “Synchronization of linear agents with input/output constraints,” 20th World Congress of International Federation of Automatic Control (IFAC2017), 2017
- [4] 鷹羽, 宮川: “斜面上のピークルフォーメーション制御,” 第 59 回自動制御連合講演会, 2016
- [5] 木本, 鷹羽: “エージェント間の距離と角度に基づくフォーメーション制御,” 第 60 回システム制御情報学会研究発表講演会, 2016
- [6] 鷹羽: “入出力制約を有する線形エージェント群の同期制御,” 第 3 回 SICE 制御部門マルチシンポジウム, 2016
- [7] 鷹羽: “出力制約を有する線形マルチエージェントシステムの分散協調制御,” 第 58 回自動制御連合講演会, 2015

6 . 研究組織

(1)研究代表者

鷹羽 浄嗣 (Takaba, Kiyotsugu)

立命館大学・理工学部・教授

研究者番号 : 30236343