

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 16 日現在

機関番号：12101
研究種目：基盤研究(C)（一般）
研究期間：2020～2022
課題番号：20K04543
研究課題名（和文）イベント駆動型通信・推定・制御機構を有するマルチエージェントシステムの協調制御系

研究課題名（英文）Cooperative control of multi-agent systems with event-triggered communication, estimation and control mechanisms

研究代表者
楊子江（Yang, Zi-Jiang）
茨城大学・理工学研究科（工学野）・教授

研究者番号：30243984
交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：複数のエージェントの一部だけが指令値情報を受信し、全体が近傍通信を介して、指令値に追従するという同期追従制御の手法を実システムに適用しようとする時、ネットワーク通信や計算装置と制御装置のコスト低減が望まれる。本研究では、必要な時だけ離散的に作動するイベントトリガ型制御の観点から、直接受信できない指令値をイベントトリガ通信を介して推定するというイベントトリガ推定機構、及び過度な制御入力更新を回避するイベントトリガ制御機構を備え持つ実用的分散型同期追従制御系を構築した。その性能を理論的に明らかにした。さらに、単体の実非線形システムに対するイベントトリガ制御系を構築し、実験によって有効性を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

「超スマート社会」を目指す未来社会において、新しい価値やサービスが創出される大規模な社会インフラシステムの整備は不可欠である。とりわけ、非線形モデルで表現される実システムの（ロボットの協調制御、分散型発電装置の電圧・周波数同期追従など）協調制御手法の確立は、実用上重要である。ネットワーク通信を介して、大域的な目的を達成するというマルチエージェントシステム制御系がこれから期待される重要な技術である。通信コストや各エージェントに搭載される計算装置と制御装置の消費電力を極力抑えることが実用化のための喫緊の課題であり、解決されれば、「超スマート社会」の実現への波及効果は極めて大きい。

研究成果の概要（英文）： When trying to apply the method of consensus tracking control to a real multi-agent system, where only a part of the follower agents receives reference information of the leader, and the follower agents achieve consensus tracking through neighboring communication, limitations by the cost of network communication and calculation devices and control devices become a problem. In this research, from the viewpoint of event-triggered control that operates discretely only when necessary, we constructed a practical distributed consensus tracking control system where each agent has an event-triggered estimation mechanism that estimates the reference information of the leader through event-triggered communication, and an event-triggered control mechanism that avoids excessive control input updates. Furthermore, we constructed some event-triggered control methods for some real nonlinear systems and showed their effectiveness through experiments.

研究分野：制御工学

キーワード：イベントトリガ制御 マルチエージェントシステム 非線形システム

1. 研究開始当初の背景

複数の動的エージェントが相互作用しながら、大域的な目的を達成するというマルチエージェントシステムの制御は近年注目されている。とりわけ、不確かさを有する非線形モデルで表現される実システムの(ロボットの協調制御、分散型発電装置の電圧・周波数同期追従など)協調制御手法の確立は、実用上重要である。

これまでの研究では、エージェント間の通信や計算装置と制御装置の作動が連続時間で行われるという問題設定が多く、通信や制御のコストが高いことが実用化の妨げとなっていた。そこで、信号の時間推移を評価するトリガ関数がある閾値を超えたというイベントが発生した場合のみ、制御入力を更新したりするイベントトリガ型制御が注目され、マルチエージェントシステムの協調制御にも適用され始めている。

これまでの研究は、簡単な二重積分器や、すべてのエージェントが同一のモデルをもつ線形システムに限定するケースが多く、非線形特性や外乱などを考慮した研究はまだ少ない。さらに、制御機構がイベントトリガに基づいて作動するものの、トリガタイミングを決定するトリガ関数がエージェント間の連続時間通信に頼ってしまう手法が多く、イベントトリガ通信を行いながら協調制御を実現する手法の開発が強く求められる。

2. 研究の目的

上記の喫緊の要請に応えるため、イベントトリガ通信・推定・制御の観点から、直接受信できない指令値を、イベントトリガ近傍通信を介して推定するというイベントトリガ分散型信号推定機構を備え持つ実用的分散型同期追従制御系を提案する。とりわけ、イベントトリガ通信・推定・制御のための各トリガ関数の設計方針、トリガ時刻間隔の下限の保証および制御系全体の性能保証を明らかにする。さらに、シミュレーションで検証することによって、イベントトリガによるマルチエージェントシステムの実用的同期追従制御系の手法を確立する。また、指令値を分散推定によって得られた場合、各単体のエージェントのイベントトリガ制御手法の確立が重要となる。これまでに、イベントトリガ制御手法に関しては、実機実験による確認は少ないが、本研究では、ロボットマニピュレータと三重タンクシステムなど、個別の非線形エージェントシステムに対して、イベントトリガロバスト制御を構築し、実機実験によってその有効性を明らかにする。

3. 研究の方法

制御技術の方法論的研究が中心であるので、研究代表者1人を中心に研究を行ってきた。大学院生数名の協力を得て、シミュレーションと実験を行った。具体的には、以下の方針で研究を進めてきた。

- (1) 文献の検索、新しい手法の提案と理論的性能解析。
- (2) Matlab を用いた計算機上のシミュレーションにより、開発する手法の性能や設計方針の検討。
- (3) イベントトリガ制御系の実機実験。
- (4) 国内会議と国際会議での口頭発表。
- (5) 国際雑誌と国内の学会論文誌での研究成果の公表。

4. 研究成果

リーダーの指令値が一部のフォロアー(追従者)エージェントだけに送信され、各エージェントが近傍と交信しながら、協調して指令値に追従するといった同期追従制御が活発に研究されている。従来のマルチエージェント協調制御系では、エージェント間は時間的に連続な通信を行うという設定が多い。ネットワーク通信資源の制限や、エネルギー消費の低減などを考えると、必要な時だけ離散的に作動するイベントトリガ型通信や制御を行うことが強く望まれる。

そこで、不確かさを持つ高次の非線形マルチエージェントシステムの同期制御問題について、以下のような研究成果を得た。(1)一部のエージェントだけが指令値とその必要次数までの微分を受信できる場合、すべてのエージェントにおいて、各次数の微分信号の変化の速さに応じて、イベントトリガ型通信を行いながら、それらを推定するイベントトリガ型指令値推定器を開発した。(2)得られた指令値推定値を用いて、不確かさを有する各個別の非線形システムに対して、イベントトリガ型非線形ロバスト制御系を構築し、ロバストな同期追従制御系を構築した。(3)

さらに厳密な理論的解析を行い，理論的性能保証を確立した。研究成果は雑誌論文(Yang and Takei 2022)に公表した。

指令値をイベントトリガ分散型推定器で得られると，それぞれの個別の非線形エージェントのイベントトリガ制御系の構築が課題となる。制御手法の提案と理論的解析も重要であるが，実機実験によるイベントトリガ制御系の有効性の検証に関する報告はあまり見かけない。そこで，ロボットマニピュレータと三重タンクシステムに対して，それぞれに適したイベントトリガ制御系を開発し，理論解析を行った上で，実機実験によって確認した。実機に应用の際に起きた問題点と解決法についても検討した。研究成果を国際会議論文(Kameyama ほか 2022)，雑誌論文(佐藤，楊 2023, Hosokawa ほか 2023)で公表した。このように，実機実験による確認は，制御工学の魅力と有効性を産業界へアピールするためにも，強い説得力のある手段である。

また，ドローンシステムに対して，制御誤差の過渡的特性と終局的特性を事前に指定できるロバストあるいは適応制御手法を開発した。研究成果を雑誌論文(Yang 2021, Sasaki and Yang 2020)，国際会議論文(Yang 2021)で公表した。今後，ドローンのイベントトリガ型のマルチエージェント協調制御系への発展が期待される。

ほかに，マルチエージェントによる分散的かつ協調的信号処理手法についても，海外の研究者と共同で研究を行った。研究成果を雑誌論文(Zhu ほか 2022, Zheng ほか 2021, Du ほか 2020)，国際会議論文(Peng ほか 2022, Chen ほか 2022)で公表した。さらに，出力計測値にインパルス上の雑音，入力計測値にも雑音が存在する場合において，ロバストな信号処理手法を開発し，雑誌論文(Jia ほか 2022)，国際会議論文(Wang and Yang 2021, Zhang ほか 2021)で公表した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 9件/うち国際共著 4件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 楊 子江, 佐藤 和輝	4. 巻 59
2. 論文標題 三重タンクシステムのイベントトリガロバスト出力フィードバック制御	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 計測自動制御学会論文集	6. 最初と最後の頁 203-211
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.9746/sicetr.59.203	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 C. Zhu, L. Jia, Zi-Jiang Yang and R. Tao	4. 巻 29
2. 論文標題 Spatial-temporal Minimum error random interaction networks for distributed estimation	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Signal Processing Letters	6. 最初と最後の頁 2283/2287
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/LSP.2022.3219354	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
1. 著者名 A.Hosokawa, Y. Mitsuhashi, K. Satoh and Zi-JiangYang	4. 巻 133
2. 論文標題 Output feedback full-order sliding mode control for a three-tank system	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 ISA Transactions	6. 最初と最後の頁 184/192
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.isatra.2022.06.038	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 Zi-Jiang Yang and D. Takei	4. 巻 32
2. 論文標題 Robust event-triggered consensus tracking control of high-order uncertain nonlinear systems	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 International Journal of Nonlinear and Robust Control	6. 最初と最後の頁 2273-2299
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/rnc.5946	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 L. Jia, Y. Li, Zi-Jiang Yang and Ran Tao	4. 巻 122
2. 論文標題 Diffusion bias-compensated recursive maximum correntropy criterion algorithm with noisy input	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Digital Signal Processing	6. 最初と最後の頁 103373
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.dsp.2021.103373	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

1. 著者名 Zi-Jiang Yang	4. 巻 35
2. 論文標題 Adaptive robust output feedback control for attitude tracking of quadrotor unmanned aerial vehicles	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 International Journal of Adaptive Control and Signal Processing	6. 最初と最後の頁 2075-2093
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/acs.3309	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 C. Zheng, L. Jia and Zi-Jiang Yang	4. 巻 40
2. 論文標題 Diffusion bias-compensation RLS estimation over noisy node-specific networks	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Circuits, Systems, and Signal Processing	6. 最初と最後の頁 2564/2583
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00034-020-01591-8	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

1. 著者名 K. Sasaki and Zi-Jiang Yang	4. 巻 51
2. 論文標題 Disturbance observer-based control of UAVs with prescribed performance	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 International Journal of Systems Science	6. 最初と最後の頁 939/957
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/00207721.2020.1746436	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 Y. Du, L. Jia, S. Kanae and Zi-Jiang Yang	4. 巻 18
2. 論文標題 Diffusion logistic regression algorithms over multiagent networks	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Control Theory and Technology	6. 最初と最後の頁 160/167
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s11768-020-0009-2	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6件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 6件)

1. 発表者名 S. Wang and Zi-Jiang Yang
2. 発表標題 State Estimation under outliers by the maximum correntropy extended kalman filter
3. 学会等名 60th Annual Conference of SICE (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Zi-Jiang Yang
2. 発表標題 Robust output feedback control for attitude tracking of a quadrotor UAV
3. 学会等名 2021 International Conference on Advanced Mechatronic Systems (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 S. Peng, L. Jia, S. Kanae and Zi-Jiang Yang
2. 発表標題 Bias-compensated sparse RLS algorithms over distributed networks
3. 学会等名 Proceedings of the 41st Chinese Control Conference (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Z. Chen, L. Jia, S. Kanae and Zi-Jiang Yang
2. 発表標題 Robust diffusion adaptive networks with noisy link and input
3. 学会等名 Proceedings of the 41st Chinese Control Conference (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 T. Kameyama, X. Zhao and Zi-Jiang Yang
2. 発表標題 Event-triggered sliding mode control of a robot manipulator
3. 学会等名 2022 International Conference on Advanced Mechatronic Systems (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Z. Zhang, L. Jia, S. Kanae and Zi-Jiang Yang
2. 発表標題 Blind equalization under noisy environment using bias-compensated RLS method
3. 学会等名 Proceedings of the 40th Chinese Control Conference (国際学会)
4. 発表年 2021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
---------	---------