

令和 6 年 6 月 10 日現在

機関番号：12501

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20H02167

研究課題名（和文）人間を含むネットワーク化制御系における不確定要因の推定と制御性能解析

研究課題名（英文）Uncertainty Estimation and Control Performance Analysis in Networked Control Systems Including Humans

研究代表者

残間 忠直（Zanma, Tadao）

千葉大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号：20324543

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 9,200,000円

研究成果の概要（和文）：2020年に、ネットワーク化制御系においてデータ量子化、データ欠落、データ伝送スケジューリングに強化学習を用いる手法を提案し、その有効性を実験で確認した。2021年には、強化学習を用いたスケジューリングの他に、疎行列を用いた行列不等式に基づく手法を提案し、シミュレーションで有効性を示した。2022年には、機械学習や強化学習を用いてネットワークの欠落推定や遅延保障の手法をリアルタイムで実行可能にし、実験でその有効性を確認した。2023年には、ドローンによる移動体の追跡や追尾の手法を提案し、少ない観測データでの推定とリアルタイムでの最適制御を実現した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

得られた研究成果は、ネットワーク化制御系における強化学習や機械学習の応用による新たな展開を示す。特に、データ伝送スケジューリングや移動体の追跡制御に関する提案は、実験によってその有効性が明らかにされる。これにより、ネットワークシステムにおいてリアルタイムでの学習と制御を統合することが可能となり、データ伝送の効率や移動体の追跡精度の向上が期待される。さらに、異なる時定数の制御対象においても効果的なスケジューリングが可能であることが示される。このように、これらの研究成果はネットワーク制御技術の発展に貢献し、実時間での最適化や制御の実現に向けた新たな可能性を示唆する。

研究成果の概要（英文）：In 2020, we proposed a method using reinforcement learning for data quantization, data missing, and data transmission scheduling in networked control systems, and confirmed its effectiveness in experiments. 2021, in addition to scheduling using reinforcement learning, we proposed a method based on matrix inequalities using sparse matrices, and showed its effectiveness in simulations. In 2022, we proposed a method of missing estimation and delay guarantee in real-time using machine learning and reinforcement learning, and confirmed its effectiveness in experiments. and optimal control in real-time.

研究分野：システム制御

キーワード：サイバーフィジカルシステム

1. 研究開始当初の背景

我が国が目指す Society5.0 とは、サイバー空間（仮想空間）とフィジカル空間（現実空間）を高度に融合させて経済発展と社会的課題の解決を両立する人間中心の社会である。その実現のためには、人間・ロボット・メカトロニクス・マシン・情報を含む系がネットワークを介して結合したサイバーフィジカルシステム（Cyber-Physical Systems: CPS）の基盤技術の発展が不可欠である。これは我が国だけではなく世界的にも同様であり、欧州のインダストリー5.0 では「人間中心」「一過性ではない継続性（サステナブル）」「柔軟な適応性（レジリエンス）」をキーワードとして次世代の産業のあり方として提唱されている。

CPS によって空間的に離れた複数の人間が複数のマシンを操作することでたとえば遠隔医療・遠隔探査が可能となる。ただし、CPS にはネットワークの容量制限や膨大な量のデータの送受信に伴うデータ遅延・データ欠落などの問題があり、これがマシン操作のリアルタイム性を低下させるため、新たな制御の展開が望まれている。

2. 研究の目的

本研究では情報・人間・機械からなるネットワーク化制御系に関して、ネットワーク化制御系における不確定要因（人間の操作意図・ネットワークトラフィックの変化）を推定し、制御性能の改善に活用する制御手法について提案しその有効性を明らかにする。本研究によって、これまでのネットワーク化制御系で積極的に扱われていなかった人間の挙動や操作意図およびネットワークのトラフィック推定などの精度を向上させることにより、保守性の軽減された制御系の構築を目指す。求められる制御性能は状況に応じて異なる。そのような場合のシステム全体の最適化手法を開発し、その有効性を実験によって明らかにする。

3. 研究の方法

ネットワークに仮想的に接続された装置の制御を、想定されたデータ欠落・データ遅延の下で推定・予測を行うことで最適制御を行う。最適化手法としてモデル予測制御と LMI（線形行列不等式）を使用し、確率モデルとしてマルコフ過程モデルを用いる。さらに、制御手法としてモーションコントロール、機械学習を用いる。

4. 研究成果

2020 年：ネットワーク化制御系に関してデータ量子化・データ欠落・データ伝送スケジューリングに関して強化学習を用いた手法を提案し、実験によってその有効性を明らかにした。

2021 年：強化学習によるデータ伝送スケジューリングを展開する一方で、疎行列を用いた行列不等式に基づくスケジューリング手法も展開し、後者はその有効性をシミュレーションによって明らかにした。シミュレーションにとどまった理由は異なる時定数の制御対象の実機を準備することができなかったためであるが、本シミュレーション結果によって「遅い」対象と「速い」対象があっても効果的にデータ伝送をスケジューリングできることが明らかになった。

2022 年：機械学習や強化学習を用いてネットワークの欠落推定や遅延保障に関する手法を提案し、実験によってその有効性を明らかにした。これまで機械学習がオフラインで実行されていたのに対して、本研究ではリアルタイムでそれを可能にし、学習と制御を同時に実行することを可能とした。

2023 年：系に人間を含む場合を対象として、移動体をドローンによって追跡する制御やドローン搭載のカメラによる移動体の追尾問題に関する手法を提案しその有効性を実験によって明らかにした。特に少ない観測データから移動体の動作を推定することを可能とし、推定誤差を考慮した最適制御を実現した。また、データ伝送スケジューリングについても最適化をリアルタイムで行い、これも実時間で実行できることを可能とした。

学術論文：

Optimal Control Input for Discrete-Time Networked Control Systems with Data Dropout, Tadanao Zanma, Naohiro Yamamoto, Kenta Koiwa, Kang-Zhi Liu, IET Cyber-Physical Systems: Theory & Applications, 7, 3, 113-123, Sep-22

Codesign of Communication Scheduling and Controller of Networked Control System, Tadanao Zanma, Toru Kuribayashi, Kenta Koiwa, Kang-Zhi Liu, IET Cyber-Physical Systems: Theory & Applications, 7, 2, 81-92, Jun-22

Estimation of Network Traffic Status and Switching Control of Networked Control Systems with Data Dropout, Tadanao Zanma, Daiki Hashimoto, Kenta Koiwa, Kang-Zhi Liu, IET Cyber-Physical Systems:

Theory & Applications, 7, 2, 69-80, Jun-22

Predictive-based optimal automatic formation control of mobile vehicles, Tadanao Zanma, Shunta Haga, Kenta Koiwa, Kang-Zhi Liu, IET Cyber-systems and Robotics, 3, 4, 331-342, Dec-21

国際会議発表：

Drone Tracking Control Using Motion Prediction of Moving Objects, Hirotooshi Kaneko, Tadanao Zanma, Kenta Koiwa, Kang-Zhi Liu, The 42nd Chinese Control Conference (CCC 2023), 2023

Target Tracking of a Quadrotor equipped with a Camera, Kenta Ochi, Tadanao Zanma, Kenta Koiwa, Kang-Zhi Liu, The 42nd Chinese Control Conference (CCC 2023), 2023

Estimation of data dropout and control of networked control systems, Kazumasa Shibuya, Tadanao Zanma, Kang-Zhi Liu, Kenta Koiwa, The 41st Chinese Control Conference (CCC 2022), 2022

Estimation of data dropout and control of networked control systems, Kazumasa Shibuya, Tadanao Zanma, Kenta Koiwa, Kang-Zhi Liu] The 8th IEEE International Workshop on Sensing, Actuation, Motion Control, and Optimization (SAMCON 2022) 2022

国内会議発表：

Tracking Control of Drone Using Motion Estimation of Moving Object, Hirotooshi Kaneko, Tadanao Zanma, Kenta Koiwa, Kang-Zhi Liu, 第 11 回計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム, Mar-24

Optimal drone tracking control using camera image information, Kenta Ochi, Tadanao Zanma, Kenta Koiwa, Kang-Zhi Liu, 第 11 回計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム, Mar-24

Delay estimation and compensation of cyber-physical systems using machine learning, Mizuki Kono, Yoshiro Wada, Tadanao Zanma, Kenta Koiwa, Kang-Zhi Liu, 第 24 回 公益社団法人 計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, Dec-23

Optimal data transmission scheduling of cyber-physical systems, Hayate Sawada, Tadanao Zanma, Kenta Koiwa, Kang-Zhi Liu, 第 24 回 公益社団法人 計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, Dec-23

Tracking control of drone using motion estimation of moving object, Hirotooshi Kaneko, Tadanao Zanma, Kenta Koiwa, Kang-Zhi Liu, 第 24 回 公益社団法人 計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, Dec-23

Estimation of data dropout and control of discrete-time networked control systems considering estimation uncertainty, Kazumasa Shibuya, Tadanao Zanma, Kang-Zhi Liu, Kenta Koiwa, 第 23 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会 (SI2022) , Dec-22

Delay estimation and compensation in discrete-time networked control systems using machine learning, Yoshiro Wada, Tadanao Zanma, Kang-Zhi Liu, Kenta Koiwa, 第 23 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会 (SI2022) , Dec-22

Drone trajectory generation using reinforcement learning in discrete state space and discrete input systems, Hirotooshi Kaneko, Tadanao Zanma, Kang-Zhi Liu, Kenta Koiwa, 第 23 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会 (SI2022) , Dec-22

Drone tracking control using motion prediction of dynamic object, Hirotooshi Kaneko, Tadanao Zanma, Kang-Zhi Liu, Kenta Koiwa, 第 65 回自動制御連合講演会 , Nov-22

Delay estimation and compensation in discrete-time networked control systems using RNN, Yoshiro Wada, Tadanao Zanma, Kenta Koiwa, Kang-Zhi Liu, 第 65 回自動制御連合講演会, Nov-22

Estimation of data dropout and control of discrete-time networked control system, Kazumasa Shibuya, Tadanao Zanma, Kenta Koiwa, Kang-Zhi Liu, 第 65 回自動制御連合講演会, Nov-22

Communication Scheduling using Reinforcement Learning, Yuta Ito, Tadanao Zanma, Kenta Koiwa, Kang-Zhi Liu, 電気学会研究会, Dec-21

5. 主な発表論文等

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

1. 著者名 Zanma Tadanao, Yamamoto Naohiro, Koiwa Kenta, Liu Kang Zhi	4. 巻 1
2. 論文標題 Optimal control input for discrete time networked control systems with data dropout	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IET Cyber-Physical Systems: Theory & Applications	6. 最初と最後の頁 1
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1049/cps2.12028	査読の有無 無
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 Zanma Tadanao, Kuribayashi Toru, Koiwa Kenta, Liu Kang Zhi	4. 巻 1
2. 論文標題 Codesign of communication scheduling and controller of networked control systems	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IET Cyber-Physical Systems: Theory & Applications	6. 最初と最後の頁 1
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1049/cps2.12026	査読の有無 無
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 Zanma Tadanao, Haga Shunta, Koiwa Kenta, Liu Kang Zhi	4. 巻 3
2. 論文標題 Predictive based optimal automatic formation control of mobile vehicles	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IET Cyber-Systems and Robotics	6. 最初と最後の頁 331 ~ 342
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1049/csy2.12034	査読の有無 無
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 Zanma Tadanao, Hashimoto Daiki, Koiwa Kenta, Liu Kang Zhi	4. 巻 1
2. 論文標題 Estimation of network traffic status and switching control of networked control systems with data dropout	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IET Cyber-Physical Systems: Theory & Applications	6. 最初と最後の頁 1
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1049/cps2.12024	査読の有無 無
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 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Kazumasa Shibuya, Tadanao Zanma, Kenta Koiwa, Kang-Zhi Liu
2. 発表標題 Estimation of data dropout and control of networked control systems
3. 学会等名 The 8th IEEJ International Workshop on Sensing, Actuation, Motion Control, and Optimization (SAMCON2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kazumasa Shibuya, Tadanao Zanma, Kang-Zhi Liu, Kenta Koiwa
2. 発表標題 Estimation of data dropout and control of discrete-time networked control systems considering estimation uncertainty
3. 学会等名 第23回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会（
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yoshiro Wada, Tadanao Zanma, Kang-Zhi Liu, Kenta Koiwa
2. 発表標題 Delay estimation and compensation in discrete-time networked control systems using machine learning
3. 学会等名 第23回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会（SI2022）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hirotohi Kaneko, Tadanao Zanma, Kang-Zhi Liu, Kenta Koiwa
2. 発表標題 Drone trajectory generation using reinforcement learning in discrete state space and discrete input systems
3. 学会等名 第23回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会（SI2022）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hirotooshi Kaneko, Tadao Zanma, Kang-Zhi Liu, Kenta Koiwa
2. 発表標題 Drone tracking control using motion prediction of dynamic object
3. 学会等名 第65回自動制御連合講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yoshiro Wada, Tadao Zanma, Kenta Koiwa, Kang-Zhi Liu
2. 発表標題 Delay estimation and compensation in discrete-time networked control systems using RNN
3. 学会等名 第65回自動制御連合講演会
4. 発表年 2022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