

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 21 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420412

研究課題名(和文)サイバーフィジカルシステムのための通信と制御の同時最適化

研究課題名(英文) Simultaneous Optimization of Communication and Control for Cyber-Physical Systems

研究代表者

小林 孝一 (Kobayashi, Koichi)

北海道大学・情報科学研究科・准教授

研究者番号：50452115

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：サイバーフィジカルシステムでは、制御対象と制御器は通信ネットワークを介して接続されている。制御系設計においては、通信を抑制しつつ高い制御性能を得ることが重要である。本研究課題では、サイバーフィジカルシステムにおける通信と制御の同時最適化に関する研究に取り組んだ。主な成果として、マルチホップ制御ネットワークのモデル予測制御、制御入力列の送信に基づく自己駆動モデル予測制御、および分散型イベント駆動制御に関する新しい手法を提案した。

研究成果の概要(英文)：In cyber-physical systems, plants and controllers are connected through a communication network. In control design, it is important to enhance the control performance under low communication loads. In this research, researches on simultaneous optimization of communication and control in cyber-physical systems have been studied. As the main results, new methods on model predictive control of multi-hop control networks, self-triggered model predictive control based on transmission of control input sequences, and decentralized event-triggered control have been proposed.

研究分野：システム制御理論とその応用

キーワード：サイバーフィジカルシステム マルチホップ制御ネットワーク 自己駆動モデル予測制御 分散型イベント駆動制御

1. 研究開始当初の背景

サイバーフィジカルシステム(CPS)とは、物理システムと情報システムが有機的に相互結合したシステムである。近年、CPSの解析や制御は、制御工学や計算機科学の融合領域として盛んに研究が行われている。CPSの制御における研究目的は、物理システム(制御対象)と情報システム(最適化アルゴリズムなどが実装された制御器)の相互結合を利用して、高性能な制御システムを構築することである。CPSの応用は、家庭内のエネルギー管理システム(HEMS)や自動車の車載システムなど多岐に渡る。

制御工学におけるCPSの研究では、ハイブリッドシステム、離散事象システム、ネットワーク化制御が基礎となっている。また、計算機科学では、リアルタイムシステムが基礎となっている。しかしながら、物理システム、情報システムは多様であり、CPSに対する統一的な制御手法を構築することは難しい。重要な性質に着目し、それぞれに対して制御手法を確立することが、理論面および実用面の双方から望ましい。CPSの重要な特徴として、システム全体のネットワーク構造や大規模性などが挙げられている。本研究では、物理システムと情報システムの相互結合(通信ネットワーク)に着目する。通信ネットワークを介した制御(ネットワーク化制御)は盛んに研究が行われている。しかしながら、通信と制御の同時最適化(制御入力や制御入力を送信するタイミング、通信経路を同時に最適化する手法)はまだ十分に研究されていない。通信と制御の同時最適化問題は、一般に、非線形最適化問題や組合せ最適化問題に帰着される。したがって、実用化に向けては、問題を解く計算時間の短縮が課題となっている。

2. 研究の目的

上記の学術的背景を踏まえ、本研究では次の2点に取り組むことを目的とした。

(1) マルチホップ制御ネットワークの最適制御

(2) 自己駆動制御による安定化モデル予測制御

3. 研究の方法

初年度および次年度の前半では、マルチホップ制御ネットワークの最適制御を中心に研究を進めた。次年度の後半および最終年度では、自己駆動制御による安定化モデル予測制御を中心に研究を進め、最後に研究全体を総括した。

また、理論検討および計算機実験を適切な周期で実施した。

4. 研究成果

本研究課題により得られた主な成果は以下の通りである。

(1) マルチホップ制御ネットワークのモデル予測制御

マルチホップ制御ネットワークとは、複数の制御対象と複数の制御器がマルチホップネットワークを介して接続された制御系である。マルチホップネットワークでは、複数の中継端末を経由してデータの送受信を行う。したがって、広範囲での通信が可能となることから、マルチホップ制御ネットワークは様々な応用が期待される。しかしながら、制御問題では、通信路と制御入力を同時に最適化する必要があるため、計算が困難となる場合がある。

本研究では、マルチホップ制御ネットワークのモデル予測制御に関する新しい手法を提案した。モデル予測制御とは、有限時間区間の最適制御問題を各時刻で繰り返し解く制御手法である。本研究では、指定した周期で制御器が制御入力を計算することを仮定した。この仮定のもとで、事前に通信路の候補を列挙することで、制御対象のモデルを導出した。得られたモデルは線形スイッチングシステムとなる。有限時間区間の最適制御問題では、混合整数計画問題を解く必要がある。しかしながら、通信路の候補数を事前に調整することで、計算時間を削減することが可能である。計算機実験により、通信路と制御入力が適切に得られることを確認した。

提案手法は、パケットロスが発生する場合にも拡張が可能である。また、センサやアクチュエータが分散的に配置されているセンサ・アクチュエータネットワークへの応用も可能である。

(2) 制御入力列の送信に基づく自己駆動モデル予測制御

自己駆動制御とは、サンプル値制御において制御入力とサンプリング周期(通信タイミング)を同時に求める制御手法である。ネットワーク化制御における自己駆動モデル予測制御では、制御入力およびその制御入力を印加する時間区間を計算する必要がある。一方、一定の制御入力を印加し続けることは、制御性能の観点から望ましくない。そこで、本研究では、一つの制御入力ではなく、制御入力の時系列を制御器から制御対象に送信する方法を提案した。送信する時系列の長さは外乱の影響を考慮して求めることとした。提案手法を利用することで、通信回数を抑制しつつ、制御入力の切替が実現できる。提案手法の有効性は計算機実験で検証した。

(3) 分散型イベント駆動制御

イベント駆動制御とは、イベント駆動条件を満たしたときのみ、センサから制御器へ計測データを送信する(すなわち、制御入力を更新する)制御手法である。イベント駆動条件では、計測データと直近で送信したデータの差を評価している。計測値が大きく変化していない場合は、制御性能の観点から送信が

不要である。したがって、制御性能を維持しつつ、通信を削除する方法として有用である。また、イベント駆動制御は自己駆動制御の理想的なケースに相当することから、イベント駆動制御と自己駆動制御は深く関連している。従来のイベント駆動制御ではセンサの計測データを一つのセンサに集約する必要がある。しかしながら、センサネットワークに代表されるセンサが分散的に配置されている場合、データの集約は通信回数の増加を招く。この場合、センサごとにイベント駆動条件を割り当てる分散型イベント駆動制御が適切である。

本研究では、分散型イベント駆動制御による最適レギュレータ問題の解法を提案した。提案手法では、線形行列不等式を解くことで、制御器を得ることができる。提案手法の有効性は計算機実験で検証した。

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11件)

- (1) Koichi Kobayashi and Kunihiro Hiraishi: Design of Probabilistic Boolean Networks Based on Network Structure and Steady-State Probabilities, IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems (available online) 査読有
DOI: 10.1109/TNNLS.2016.2572063
- (2) Koichi Kobayashi and Kunihiro Hiraishi: Optimization-Based Approaches to Control of Probabilistic Boolean Networks (Review Paper), Algorithms, Vol. 10, No. 1, 31 (16 pages) (2017) 査読有
DOI: 10.3390/a10010031
- (3) Kyohei Nakajima, Koichi Kobayashi, and Yuh Yamashita: Linear Quadratic Regulator with Decentralized Event-Triggering, IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences, Vol. E100-A, No. 2, pp. 414-420 (2017) 査読有
DOI: 10.1587/transfun.E100.A.414
- (4) Dai Satoh, Koichi Kobayashi, and Yuh Yamashita: Periodic Model Predictive Control of Multi-Hop Control Networks, IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences, Vol. E100-A, No. 2, pp. 406-413 (2017) 査読有
DOI: 10.1587/transfun.E100.A.406
- (5) Koichi Kobayashi: Attractor-Based Simultaneous Design of the Minimum Set of Control Nodes and Controllers in Boolean Networks, Applied Mathematics, Vol. 7, No. 14, pp. 1510-1520 (2016) 査読有
DOI: 10.4236/am.2016.714131
- (6) Koichi Kobayashi: Self-Triggered Model Predictive Control for Linear Systems Based on Transmission of Control Input Sequences, Journal of Applied Mathematics, Vol. 2016, Article ID 8249062, 7 pages (2016) 査読有
DOI: 10.1155/2016/8249062
- (7) Koichi Kobayashi and Kunihiro Hiraishi: Event-triggered and Self-triggered Control for Networked Control Systems Using Online Optimization, IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences, Vol. E99-A, No. 2, pp. 468-474 (2016) 査読有
DOI: 10.1155/2016/8249062
- (8) Koichi Kobayashi and Kunihiro Hiraishi: Optimal Control of Multi-Hop Control Networks Based on the MLD Framework, IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering, Vol. 10, No. 6, pp. 699-705 (2015) 査読有
DOI: 10.1002/tee.22149
- (9) Koichi Kobayashi, Takuro Nagami, and Kunihiro Hiraishi: Optimal Control of Multi-Vehicle Systems with Temporal Logic Constraints, IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences, Vol. E98-A, No. 2, pp. 626-634 (2015) 査読有
DOI: 10.1002/tee.22149
- (10) Koichi Kobayashi and Kunihiro Hiraishi: ILP/SMT-Based Method for Design of Boolean Networks Based on Singleton Attractors, IEEE/ACM Transactions on Computational Biology and Bioinformatics, Vol. 11, No. 6, pp. 1253-1259 (2014) 査読有
DOI: 10.1109/TCBB.2014.2325011
- (11) Koichi Kobayashi and Kunihiro Hiraishi: An optimization-based approach to sampled-data control of networked control systems with multiple delays, Applied Mathematics and Computation, Vol. 247, pp. 786-794 (2014) 査読有
DOI: 10.1016/j.amc.2014.09.064

[学会発表](計17件)

- (1) 中島共平, 小林孝一, 山下裕: 分散型イベント駆動条件をもつネットワーク化制御システムの非同期制御, 電子情報通信学会技術研究報告, Vol. 116, No. 433,

- RCC2016-70, pp. 31-34, 横須賀, 2017/1/27
- (2) 佐藤大, 小林孝一, 山下裕: マルチホップ制御ネットワークのモデル予測制御, 計測自動制御学会 システム・情報部門 学術講演会 2016, pp. 688-693, 大津, 2016/12/8
- (3) 中島共平, 小林孝一, 山下裕: サイバーフィジカルシステムのための分散型イベント駆動制御, 計測自動制御学会 システム・情報部門 学術講演会 2016, pp. 682-687, 大津, 2016/12/8
- (4) 佐藤大, 小林孝一, 山下裕: センサ・アクチュエータネットワークの制御入力と経路の同時最適化, 電子情報通信学会技術研究報告, Vol. 116, No. 339, RCC2016-52, pp. 89-93, 高松, 2016/12/1
- (5) Kyohei Nakajima, Koichi Kobayashi, and Yuh Yamashita: Linear Quadratic Regulator with Decentralized Event-Triggering, Proc. of the 42nd Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society, pp. 5374-5379, Florence (Italy), 2016/10/26, 査読有
- (6) Dai Satoh, Koichi Kobayashi, and Yuh Yamashita: Periodic Model Predictive Control of Multi-Hop Control Networks, Proc. of the 2016 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, pp. 1279-1284, Budapest (Hungary), 2016/10/12, 査読有
- (7) Dai Satoh, Koichi Kobayashi, and Yuh Yamashita: Model Predictive Control of Multiple Plants over Communication Networks, Proc. of the SICE Annual Conference 2016 (Position paper), pp. 1737-1740, Tsukuba, 2016/9/23, 査読有
- (8) 中島共平, 小林孝一, 山下裕: 分散型イベント駆動制御器を用いた最適レギュレータ, 電子情報通信学会 2016 年ソサイエティ大会, A-10-6, 札幌, 2016/9/20
- (9) 佐藤大, 小林孝一, 山下裕: マルチホップ制御ネットワークの周期的モデル予測制御, 電子情報通信学会技術研究報告, Vol. 116, No. 24, RCC2016-4, pp. 17-22, 東京, 2016/5/13
- (10) 中島共平, 小林孝一, 山下裕: 離散時間線形システムの分散型イベント駆動準最適制御, 電子情報通信学会技術研究報告, Vol. 115, No. 442, RCC2015-88, pp. 13-16, 大阪, 2016/1/29
- (11) Koichi Kobayashi: Notions of Opacity in Hybrid Systems for Cybersecurity, Proc. of the 21st International Symposium on Artificial Life and Robotics, pp. 83-86, Beppu, 2016/1/21, 査読有
- (12) 小林孝一, 平石邦彦: 通信と制御の同時最適化: 事象駆動制御と自己駆動制御, 計測自動制御学会システム・情報部門学術講演会 2015 講演論文集, pp. 1112-1115, 函館, 2015/11/20
- (13) 小林孝一: 外乱を有するネットワーク化制御システムの自己駆動モデル予測制御, 第 58 回自動制御連合講演会, 1D2-1, 神戸, 2015/11/14
- (14) Koichi Kobayashi and Kunihiko Hiraishi: On Event-triggered and Self-triggered Control Using Online Optimization, Proc. of the 2015 IEEE International Conference on Mechatronics, pp. 582-587, Nagoya, 2015/3/8, 査読有
- (15) 小林孝一, 平石邦彦: 制御入力列を送信する自己駆動/事象駆動モデル予測制御について, 電子情報通信学会技術研究報告, Vol. 114, No. 388, RCC2014-73, pp. 45-48, 名古屋, 2015/1/15
- (16) 小林孝一, 平石邦彦: 拘束線形システムの Self-Triggered モデル予測制御, 第 57 回自動制御連合講演会, pp. 425-426, 伊香保, 2014/11/10
- (17) Koichi Kobayashi and Kunihiko Hiraishi: Design of Boolean Networks Based on Prescribed Singleton Attractors, Proc. of the 13th European Control Conference, pp. 1504-1509, Strasbourg (France), 2014/6/26, 査読有
- 〔図書〕(計 0 件)
なし
- 〔産業財産権〕
- 出願状況(計 0 件)
なし
- 取得状況(計 0 件)
なし
- 〔その他〕
なし
6. 研究組織
- (1) 研究代表者
小林 孝一 (KOBAYASHI, Koichi)
北海道大学・大学院情報科学研究科・准教授
研究者番号: 50452115
- (2) 研究分担者
なし
- (3) 連携研究者
なし
- (4) 研究協力者
なし