

平成 30 年 6 月 4 日現在

機関番号：62615

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2016～2017

課題番号：16H07412

研究課題名(和文) 不確かなプラントのためのネットワーク化制御理論の構築：省リソース化の実現に向けて

研究課題名(英文) Design of networked control systems for uncertain plants: To achieve resource-efficient control

研究代表者

岸田 昌子(Kishida, Masako)

国立情報学研究所・大学共同利用機関等の部局等・准教授

研究者番号：60782141

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、サンプリングとアクチュエータ駆動にそれぞれ必要なコスト比が与えられた時、不確かさを持つフィードバック制御システム全体のコストを最適化する省リソースな手法を構築した。このため、ネットワークを介した制御システムにおいて、1)不確かさを考慮したプラントモデルに自己駆動の手法を適用することで、制御に必要なシステムの状態のサンプリングとサンプリングデータの通信量を削減し、2)制御器が受け取るシステムの状態に対して事象駆動の手法を適用することで、アクチュエータ駆動とアクチュエータ駆動のための通信量を削減した。

研究成果の概要(英文)：For uncertain networked control systems, this study developed algorithms that minimize the cost of the overall feedback control system for a given ratio of sampling cost and actuator update cost. This is achieved by applying 1) the self-triggered control approach to the plant model, which takes uncertainties into account, for sampling and 2) the event-triggered control approach to the sampled data for actuator signal updates.

研究分野：ネットワーク化制御

キーワード：制御 ネットワーク 不確かさ 自己駆動 事象駆動

### 1. 研究開始当初の背景

近年、コンピュータと通信の技術の発達に伴い、センサ、アクチュエータ、制御器、および制御対象であるプラントが、有線・無線ネットワークを介して接続されることが多くなってきた。これは、ネットワークを介することで、以前の直接接続に比べ、制御のための初期コストや管理コストが削減され、システムの空間自由度が上がるため、大規模で複雑なプラントの制御が可能になるからである。そして今では、宇宙探査や航空機の運行システム、発電システム、群ロボットといった、幅広い産業分野でネットワーク化制御が不可欠となっている。(図1)

この新しい枠組みにおいては、その特徴を取り入れた従来とは異なるシステム最適化手法や意思決定手法の開発が重要な課題となっており、現在、研究者間で活発に研究が行われている。

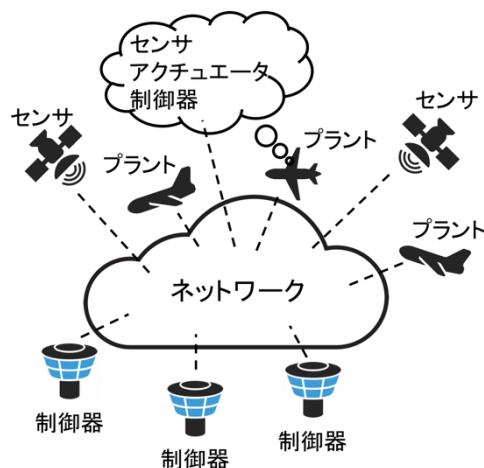


図 1: ネットワークを介した制御

ネットワーク化制御の特徴の一つは、通信や計算、電力などのリソースの十分な確保が困難という点にある。このため、プラントの状態のサンプリング、アクチュエータ駆動やこれらに関わる通信や計算をなるべく削減する必要がある。一方で、大規模になればシステムに含まれる不確かさを無視することも出来ない。しかしながら、ネットワーク化制御の既存の理論は、ネットワークそのものの不確かさを考慮するものが多く、制御対象であるプラントの不確かさを考慮するものについてはさらなる研究が望まれる。

提案者はこれまで、不確かさを有するシステムの解析および制御手法に関する研究を遂行し、成果を上げてきた。とりわけ、「不確かさがシステムに与える影響の時間発展の解析に関する研究」は、不確かな(非線形)動的システムの未来の最悪ケースの状態を予測するものであり、その予測に基づいて制御に必要な状態のサンプリングを減らすこ

とが出来るとは思わなかった。様々な制御システムの中で、特にネットワーク化制御においては、システムの安定条件や制御性能条件を満たすために必要な通信量や電力消費量が問題となっている。そこで、上記研究結果の応用として、ネットワーク化制御における、通信、サンプリング、およびアクチュエータ駆動の低減を目的とした理論の構築とアルゴリズムの開発を目指す本研究の着想に至った。

### 2. 研究の目的

本研究は、不確かなプラントが確実に要求条件を満たす省リソースな制御システム設計を行うことを目的とする。

具体的には、プラントのパラメータなどに含まれる不確かさと制御に必要なサンプリングとアクチュエータ駆動の関係をそれぞれ解明し、それらの関係に基づいて、制御・最適化の理論の構築とアルゴリズムの設計を行う。

### 3. 研究の方法

本研究では、

- 不確かさを考慮したプラントモデルに自己駆動の手法を適用することで、制御に必要なシステムの状態のサンプリングとサンプリングデータの通信量を削減し、
- 制御器が受け取るシステムの状態に対して事象駆動の手法を適用することで、アクチュエータ駆動とアクチュエータ駆動のための通信量を削減する

という、2つのアプローチを融合させることで、ネットワークを介した不確かな制御システムの省リソース化を図った。(図2)

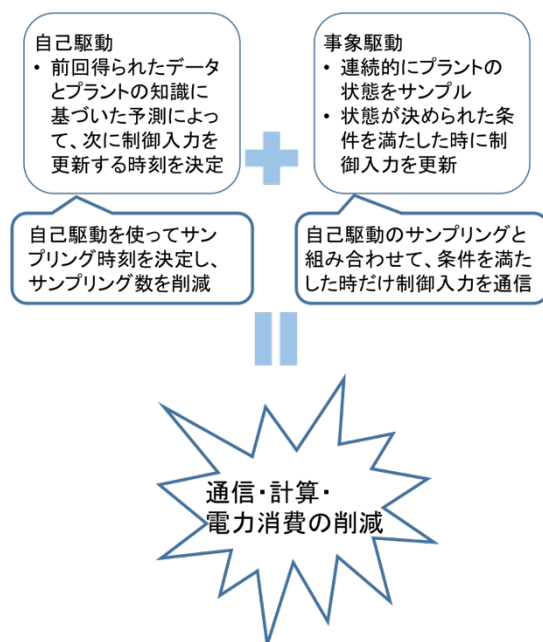


図 2: 制御システム全体のコストを最適化

## 4. 研究成果

### 連続時間線形システム

初めに、最も扱いやすい連続時間線形システムについて、検討した。(1) — (2) これらの具体的な手順は次のとおりである。

まず、システムの状態の現在のサンプリング値および次で述べられるアクチュエータ駆動の有無に基づいて、最悪ケースにおいても現時刻から次のサンプリング時刻まで安定性と制御性能が満たされるよう、システムのパラメータなどに含まれる不確かさを考慮したプラントモデルを使って次のサンプリング時刻を決定する。センサも通信も、サンプリング時刻のみアクティブになっていればよいので、電力消費と通信の削減が可能となる。

次に、事象駆動を用いたアクチュエータ駆動のアルゴリズムを構築する。プラントには不確かさが含まれており、サンプリング時刻は最悪ケースに基づいて決定されているため、実際のサンプリング時刻において、必ずしも安定性や制御性能が損なわれそうになっているわけではない。現在のサンプリング値に基づいて、今現在アクチュエータ駆動が必要なのか、次のサンプリング時刻でのアクチュエータ駆動で十分なのかを改めて計算、決定することで、電力消費と通信の削減が可能となる。

最後に、サンプリングとアクチュエータ駆動の両方にそれぞれ必要となるコストを考慮に入れ、システム全体を最適化する。

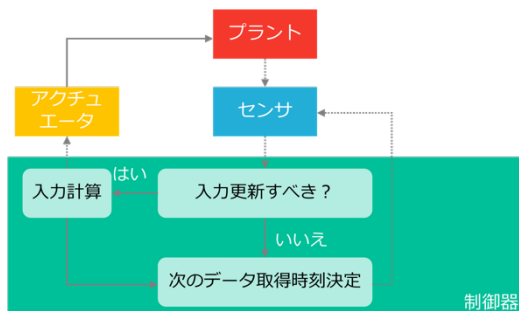


図3：提案アルゴリズム

この提案手法は、標準的な自己駆動制御に比べて、アクチュエータ駆動の回数を削減するだけでなく、与えられたサンプリングとアクチュエータ駆動に関わるコスト比に対して、サンプリング回数とアクチュエータ駆動の回数を最適化することで、全体のコストを最適化することを可能にする。

### (1) 有限ゲインL2安定性の保証

自己駆動を用いたサンプリングと事象駆動を用いたアクチュエータ駆動を用いて、パラメータと外乱に不確かさを持つ連続時間線形システムが有限ゲインL2安定性を保証する制御手法を提案した。ここで、有限ゲインL2安定性とは、制御系の外乱に対するロバスト性を測る評価指標の一種である。

### (2) 制御性能条件の保証

自己駆動を用いたサンプリングと事象駆動を用いたアクチュエータ駆動を用いて、パラメータに不確かさを持つ連続時間線形システムが与えられた制御性能条件を満たす制御手法を提案した。

(1) との主な相違点は、システムの数値モデルと制御目的である。(1) が安定性を保証することを目的とするのに対し、こちらは制御性能条件を保証することを目的とする。このため、その制御アルゴリズムを構築するために用いる手法や手順も異なるものとなっている。

### 離散時間線形システム

次に、離散時間線形システムについて、検討した。

### (3) Uniform ultimate boundedness の保証

パラメータと外乱に不確かさを持つ離散時間線形システムが uniform ultimate boundedness を満たすような自己駆動制御を構築した。ここで、uniform ultimate boundedness とは、初期状態によらず、ある一定の時間後に、システムの状態が決められた範囲内に入ってそこに留まることをいう。

この提案手法は、線形計画法で制御入力決定し、skewed 構造化特異値を用いて、システムの状態の将来予測を行い、その結果に基づき、次のサンプリング及びアクチュエータ駆動を行う時刻を決定するものである。

その後、(1) — (2) と同様、事象駆動によってアクチュエータ駆動時刻を決定する方法に拡張した (査読中)。

### 離散時間非線形システム

最後に離散時間非線形システムについて検討した。

### (4) 非線形システムの安定化

事象駆動と離散時間状態依存型リカッチ方程式を組み合わせ、離散時間非線形システムが安定化する省リソースな制御手法及び制御性能条件を満たす省リソースな制御手法を構築した。

(1) — (4) の提案手法はそれぞれ、シミュレーションにより、その有効性を確認した。

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 1 件)

- ① M. Kishida, M. Koegel, and R. Findeisen, “Combined event- and self-triggered control approach with guaranteed finite-gain L2 stability for uncertain linear systems,” *IET Control Theory & Applications*, vol.11, pp.1674-1683, 2017 (査読あり)  
DOI: 10.1049/iet-cta.2016.1263

[学会発表] (計 4 件)

- ① M. Kishida, “Event-triggered control for discrete-time nonlinear systems using state-dependent Riccati equation,” *Proc. of European Control Conference* 2018 (査読あり)
- ② M. Kishida, “Self-triggered control for uniform ultimate boundedness using skewed structured singular values,” *Proc. of IFAC World Congress*, pp.15878-15883, 2017 (査読あり)  
DOI:10.1016/j.ifacol.2017.08.2448
- ③ M. Kishida, M. Koegel, and R. Findeisen, “Event-triggered actuator signal update using self-triggered sampled data for uncertain linear systems,” *Proc. of American Control Conference*, pp. 3035-3041, 2017 (査読あり) DOI:10.23919/ACC.2017.7963413
- ④ M. Kishida, “Event-triggered control signal updates with self-triggered sampling for uncertain linear systems,” SICE Annual Conference, 2016

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

○取得状況 (計 0 件)

名称：

発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年月日：  
国内外の別：

[その他]  
ホームページ等  
平成 29 年度国立情報学研究所 オープンハウス  
IoT 時代の制御節約術 ネットワークを介して効率よくモノの動きをデザインするための工夫  
<https://www.nii.ac.jp/event/openhouse/2017/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者  
岸田 昌子 (KISHIDA, Masako)  
国立情報学研究所・情報学プリンシプル研究系・准教授  
研究者番号：60782141

(2) 研究分担者 ( )

研究者番号：

(3) 連携研究者 ( )

研究者番号：

(4) 研究協力者 ( )