

# IoT/CPS 時代における制御と通信の同時設計手法の開発

代表研究者 小林 孝一 北海道大学 大学院情報科学研究科 准教授

## 1 はじめに

第5期科学技術基本計画では、サイバー空間とフィジカル空間が高度に融合した「超スマート社会」の実現を目指している[1]。超スマート社会とは、「必要なもの・サービスを、必要な人に、必要な時に、必要なだけ提供し、社会の様々なニーズにきめ細かく対応でき、あらゆる人が質の高いサービスを受けられ、年齢、性別、地域、言語といった様々な違いを乗り越え、生き活きと快適に暮らすことのできる社会」と定義されている。超スマート社会の実現に向けた基盤技術として、サービスプラットフォームに必要な技術（サイバーセキュリティ、IoT（Internet of Things）システム構築、ビッグデータ解析、AI（Artificial Intelligence）、デバイスなど）、および新たな価値創出のコアとなる強みを有する技術（ロボット、センサ、バイオテクノロジー、素材・ナノテクノロジー、光・量子など）が挙げられている。また、複数の機器を管理する情報システムや制御対象である物理システムが共存するシステムは、サイバーフィジカルシステム（CPS）と呼ばれ、IoT技術が活用されている。

超スマート社会の基盤技術とシステム制御理論は密接に関連している。サイバーセキュリティにおいて重要となる攻撃の検知では、未知入力オブザーバを利用した方法が研究されている[2],[3]。また、IoTシステムでは、制御器と制御対象が通信ネットワークで接続されたネットワーク化制御システムが重要な役割を果たす[4]。さらに、超スマート社会では、おもてなしシステムや地域包括ケアシステムといったサービス科学に関する取り組みも重要視されている。サービス科学においても、サービス提供者のモデル化やアシストへのシステム制御理論の適用が検討されている[5],[6]。サービス科学以外にも、例えば、エネルギー管理システムはシステム制御理論の重要な対象となっている[7]。以上から、システム制御理論は、超スマート社会の実現において必要不可欠な基礎理論であると位置づけられる。

本研究では、IoTやCPSが実社会で活用される時代（IoT/CPS時代）におけるシステム制御理論に着目する。あらゆる機器がインターネットを介して接続しているIoT/CPS時代においては、制御と通信の理論を融合することが重要となっている。これまでは制御と通信は個別に捉えられていた。しかしながら、制御性能の向上や実装の簡便化という観点から、両者の理論を融合することが重要となっている。本研究では、制御と通信の同時設計手法として、事象駆動制御および自己駆動制御に着目する。

事象駆動制御とは、ある条件を満たしたとき（事象が成立したとき）のみ、センサから制御器に計測データを送信する制御手法である[8]。センサが直近で制御器に送信した計測値と最新の計測値を比較し、誤差がしきい値以上になったとき、事象が成立したと定義する場合が多い。制御器からアクチュエータへの送信を考える場合もある。連続時間システムの事象駆動制御では、事象と事象の間の時間間隔が問題となる。すなわち、この時間間隔が0になると、有限時間で事象が無限回発生してしまう（ゼノン軌道と呼ばれている）。この点を避けることが必要である。一方、離散時間システムではこの問題が発生しないため、扱いやすい。制御器を状態フィードバック制御器とするか出力フィードバック制御器とするかでも、難しさが大きく変わる。状態フィードバックの場合、すべての状態が計測可能であると仮定している。したがって、計測値の送信有無による状態の誤差が評価しやすい。本研究では、複数のセンサが分散的に配置されているセンサネットワークをもつシステムに対する事象駆動制御手法の開発に取り組んだ。また、通信路で発生する量子化誤差を考慮した事象駆動制御（量子化事象制御）の研究にも取り組んだ。

自己駆動制御とは、センサが計測する時刻を制御器が決定する制御方法である[8]。計測データを用いて制御入力を更新することから、制御入力の更新間隔を決定する制御手法と言うこともできる。事象駆動制御と同様に、連続時間システムより離散時間システムの方が扱いやすい。すなわち、離散時間システムの場合、制御入力の更新間隔は整数となり、更新を何回スキップすればよいかを計算すればよい。本研究では、マルチホップ制御ネットワークおよびセンサ・アクチュエータネットワークの制御手法の開発に取り組んだ。

また、IoT/CPS時代では、マルチエージェントシステムの制御が重要となっている。複数のエージェントがデータを送受信しながら、ある機能を実現するという問題はIoT技術の典型的な活用例である。本研究では、複数エージェントによるグラフ上の監視問題に取り組んだ。さらに、監視問題を解く計算時間の高速化

にも取り組んだ。

本報告の構成を以下に示す。2章では、分散型自己駆動制御の方法として、マルチホップ制御ネットワークおよびセンサ・アクチュエータネットワークの制御手法について説明する。3章では、分散型事象駆動制御の方法として、一様終局有界性に基づく方法、および量子化事象制御の方法について説明する。4章では、グラフ上の監視問題について説明する。5章では、まとめと今後の展望について説明する。

## 2 分散型自己駆動制御

### 2-1 パケットロスを考慮した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、複数の制御対象と制御器がマルチホップ通信を介して接続された制御システムである。CPSの一種として知られている。簡単な例を図1に示す。

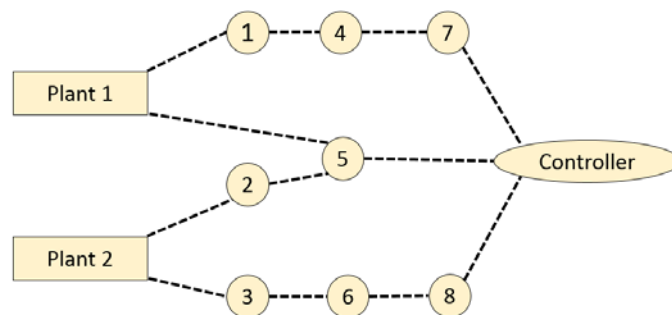


図1 マルチホップ制御ネットワークの例

この例では、制御対象が2つ、制御器が1つである。ノード1から7は中継端末である。制御入力や計測値のデータは中継端末を経由して、制御対象や制御器に送受信される。マルチホップ制御ネットワークの制御においては、制御入力と制御対象-制御器間の通信路の両方を求める必要がある。また、パケットロスを考慮することも重要である。本研究では、マルチホップ通信で発生するパケットロスを考慮した制御手法を開発した。パケットロスを確率的な振る舞いとみなして、状態の期待値および制御入力からなる評価関数を最小化するモデル予測制御問題（最適制御問題）を考えた。モデル予測制御とは、有限時間区間の評価関数を最小化する問題を各時刻で解く制御手法である。制御対象と制御器間の利用可能な通信路を列挙することで、状態の期待値の時間変化を混合論理動的（MLD）システムモデルによってモデル化した。モデル予測制御問題は混合整数計画（MIP）問題に帰着される。提案手法の有効性は計算機実験により検証した。

### 2-2 センサ・アクチュエータネットワークのモデル予測制御

センサ・アクチュエータネットワークとは、複数のセンサ、アクチュエータ、制御器が通信ネットワークを介して接続されたシステムである。マルチホップ制御ネットワークの一般化と捉えることもできる。簡単な例を図2に示す。この例では、2つのアクチュエータ、2つのセンサがネットワーク上に配置されている。ノード1から7は中継端末である。この図では制御対象が一つであるが、一般に複数であってもよい。マルチホップ制御ネットワークと異なり、アクチュエータとセンサのそれぞれに対し、通信路（起動スケジュール）を決定する必要がある。センサ・アクチュエータネットワークをMLDシステムモデルによってモデル化することで、スケジューリングと制御入力の同時に求めるモデル予測制御問題はMIP問題に帰着される。

図2のセンサ・アクチュエータネットワークに対する計算例を図3に示す。制御対象は3状態2入力の線形システムである。図3右図の○は制御器から制御対象に制御入力のデータを送信したことを意味する。また、図2から、2つの制御入力を同時に更新することができないことに注意されたい。図3右図から、最初は実線に対応する制御入力を優先的に更新していることが理解できる。図3左図から、状態が原点付近に収束していることが理解できる。

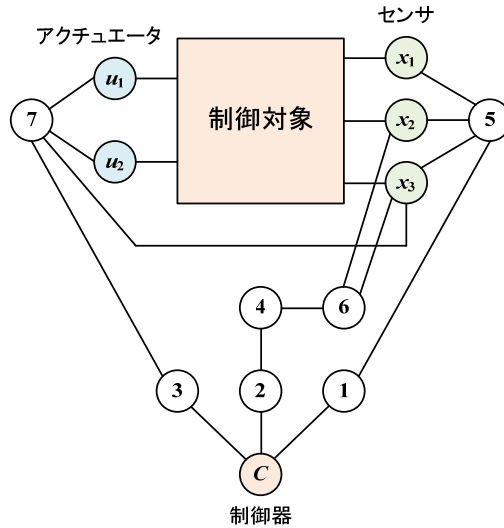


図2 センサ・アクチュエータネットワークの例

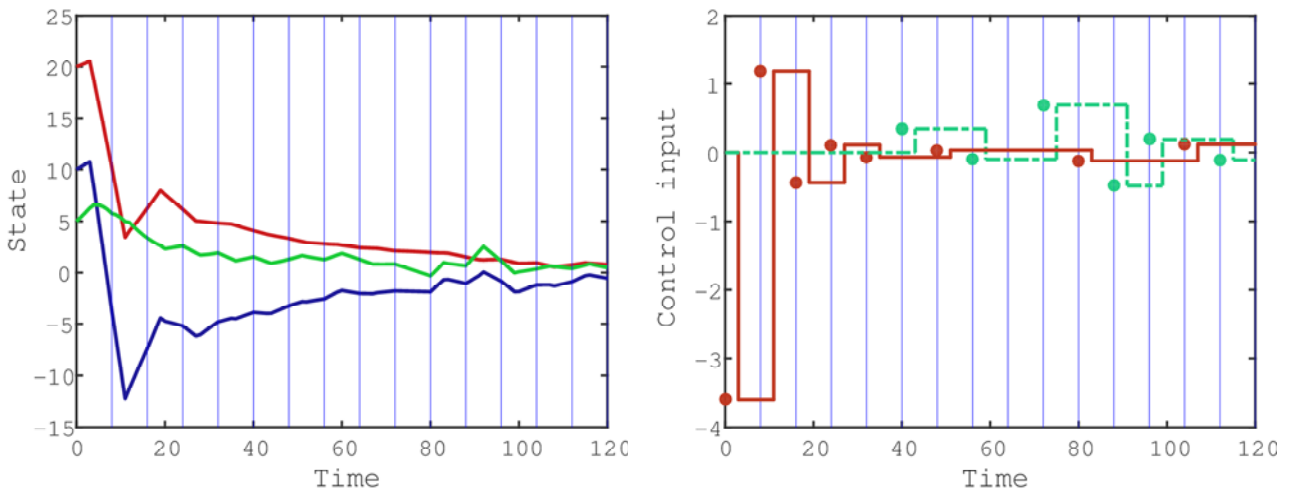


図3 センサ・アクチュエータネットワークの計算例. 左図：状態の時間応答, 右図：制御入力

### 3 分散型事象駆動制御

#### 3-1 一様終局有界性に基づく分散型事象駆動制御

一様終局有界性とは、状態が指定した領域に入ったとき、その領域内に留まる性質である。また、分散型事象駆動制御とは、センサネットワークをもつシステム（図4参照）に対する事象駆動制御の手法である。センサが分散的に配置されているため、事象がセンサ毎に割り当てられている。本研究では、一様終局有界性を満足する制御器を設計する方法を提案した。制御器を設計する問題は線形行列不等式を制約としてもつ凸最適化問題に帰着される。したがって、簡単に制御器を設計することができる。提案手法の有効性は計算機実験により検証した。

#### 3-2 量子化事象駆動制御

通信ネットワークを介してセンサから制御器に計測データを送信する際、計測データを量子化する必要がある。量子化誤差が制御性能に影響を及ぼす可能性がある。本研究では、量子化誤差を考慮した事象駆動制御（量子化事象駆動制御）の手法を提案した。量子化事象駆動制御においても、一様終局有界性を制御仕様とした問題は凸最適化問題に帰着される。

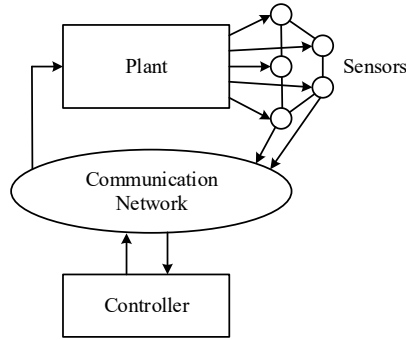


図4 センサネットワークをもつシステムの例

計算例を図5に示す。制御対象は2状態1入力の線形システムである。右図より、状態が原点付近に就職していることが理解できる。また、左図より、状態の軌道が指定した楕円に入ったのち、楕円体内に留まっていることが理解できる。提案手法では、適切な楕円体も設計可能である。

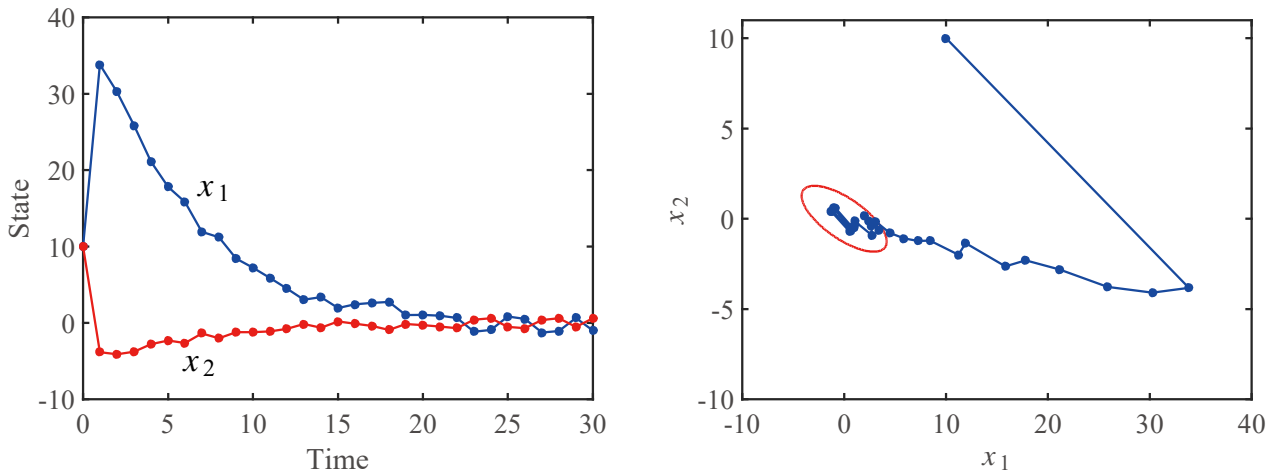


図5 量子化事象駆動制御の計算例。右図：状態の時間応答。左図：状態の軌道

## 4 グラフ上の監視問題

### 4-1 混合論理的システムモデルを用いたエージェントおよび巡回状況のモデル化

監視したい領域がグラフによって与えられているとする(図6参照)。グラフの各頂点が監視領域の中で重要な監視点に対応する。エージェント(監視ロボット)は辺に従って監視点間を移動することとする。障害物や建物の配置に応じてグラフを生成することで、現実的な監視問題を考えることができる。また、図6のグラフでは、例えば、ノード $v_1$ からノード $v_6$ への移動は少なくとも3単位時間必要である。単位時間は監視領域の広さやエージェントのハードウェアに依存して決定される。

監視状況は監視点にペナルティを課すことでモデル化する。すなわち、ある時刻において、ある監視点にエージェントがない場合、その監視点に対するペナルティに1を加算する。エージェントがいる場合、ペナルティをゼロにリセットする。監視点のペナルティの総和を最小化するエージェントの移動経路を求めることで、指定した領域をまんべんなく監視することができる。本研究では、エージェントの動きおよびペナルティの時間変化をMLDシステムモデルとしてモデル化する方法を提案した。MLDシステムモデルを用いることで、監視問題はMIP問題に帰着される。

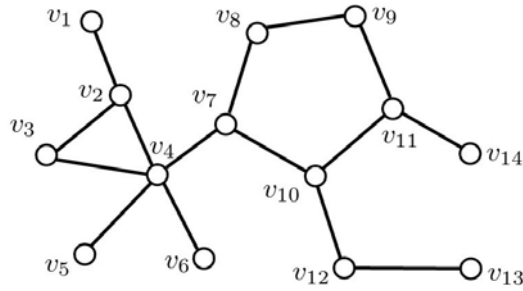


図6 監視領域を表現するグラフの例

計算例について説明する. 3台のエージェントが図6のグラフを監視した計算例を図7に示す. 図7から, 監視領域をまんべんなく監視していることが理解できる. また, 途中から, 各エージェントの軌道が周期的になっていることが理解できる.

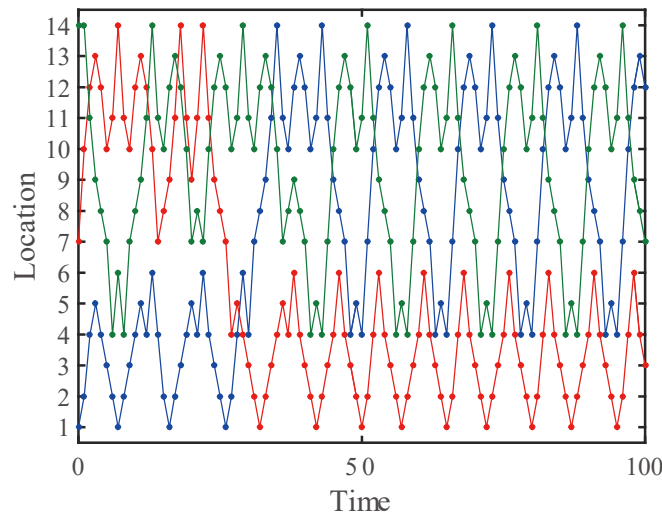


図7 監視問題の計算例

#### 4-2 時系列モデリングによる監視問題の高速化

監視領域が広い場合, グラフの頂点数が増え, MIP 問題の計算時間が一般に長くなる. また, エージェントの移動経路を求めるためには, 各時刻で MIP 問題を解く必要がある. したがって, 実用においては計算の高速化が重要になる. 本研究では, 時系列モデリングによる高速化の手法を提案した. 時系列モデリングとは, エージェントがどこの頂点にいるかという情報を利用して, グラフの不要な有向辺を削除する手法である. 提案手法の有効性はスケールフリーネットワークを用いた計算機実験によって検証し, 約 20% 高速化できることを確認した.

## 5 おわりに

本研究では, IoT/CPS 時代における制御と通信を融合させた制御系設計手法を開発した. 自己駆動制御や事象制御は制御と通信の同時設計手法として知られている. したがって, これらの手法の発展は IoT/CPS 時代の社会に大きく貢献すると考えられる. また, 監視問題は, 災害時の行方不明者の探索, 都市のパトロールなど IoT 技術と関係したさまざまな応用が期待される. 以上から, 本研究の成果は IoT/CPS 時代の基盤技術になると考えられる.

最後に, 今後の展望について説明する. まず, 提案手法の実システムへの応用が重要である. 特に, エネルギー管理システムへの応用が重要であると考えられる. スマートメータの導入により, 需要家の制御が実

現可能な段階になりつつある。例えば、自動デマンドレスポンスでは、家庭内のさまざまな計測データを収集し、エアコンの設定温度などを調整することで、電力使用量を制御している。この場合、通信を抑制しながら高性能な制御を実現することが重要である。

次に、本研究では、マルチエージェントシステムの制御の代表的な問題として、監視問題を考えた。この問題では、各エージェントの位置情報などを制御器が収集する必要がある。悪意ある第三者にデータを傍受された場合、パトロールが意味をなさなくなってしまう。また、データを改ざんされた場合、適切な監視ができなくなる。したがって、改ざん防止などセキュリティ対策が重要である。セキュリティ対策として、ブロックチェーンの利用が考えられる。ブロックチェーンとは、分散型のデータ管理技術である。データを適当な単位で鎖状に連結することで、データの改ざんを防止している。ブロックチェーンを利用したマルチエージェントシステムの制御の研究はまだ十分に行われておらず、今後の発展が望まれる。

## 【参考文献】

- [1] 内閣府 科学技術基本計画: <http://www8.cao.go.jp/cstp/kihonkeikaku/index5.html>
- [2] S. Amin, X. Litrico, S. Sastry, A. M. Bayen, Cyber security of water SCADA systems—Part I: Analysis and experimentation of stealthy deception attacks, *IEEE Trans. on Control Systems Technology*, vol. 21, no. 5, pp. 1963-1970, 2013.
- [3] S. Amin, X. Litrico, S. Sastry, A. M. Bayen, Cyber security of water SCADA systems—Part II: Attack detection using enhanced hydrodynamic models, *IEEE Trans. on Control Systems Technology*, vol. 21, no. 5, pp. 1679-1693, 2013.
- [4] T. Samad, Control Systems and the Internet of Things, *IEEE Control Systems Magazine*, vol. 36, no. 1, pp. 13-16, 2016.
- [5] K. Hiraishi, N. Uchihira, S. Choe, and K. Kobayashi, Information supervisory control of Human Behavior - Concept and experiments toward realization -, *Proc. of the 2016 IEEE Int'l Conf. on Systems, Man, and Cybernetics*, pp. 790-795, 2016.
- [6] K. Kobayashi, K. Hiraishi, S. Choe, and N. Uchihira, Behavioral analysis in nursing and caregiving services using switched linear regression models, *Proc. of the 20th IFAC World Congress*, pp. 4668-4673, 2017.
- [7] JST CREST 分散協調型エネルギー管理システム構築のための理論及び基盤技術の創出と融合展開 (EMS 領域): [https://www.jst.go.jp/kisoken/crest/research\\_area/ongoing/bunyah24-1.html](https://www.jst.go.jp/kisoken/crest/research_area/ongoing/bunyah24-1.html)
- [8] W. P. M. H. Heemels, K. H. Johansson, and P. Tabuada, An introduction to event-triggered and self-triggered control, *Proc. of the 51st IEEE Conf. on Decision and Control*, pp. 3270-3285, 2012.

## 〈発表資料〉

題 名	掲載誌・学会名等	発表年月
MPC-Based Co-Design of Control and Routing for Wireless Sensor and Actuator Networks	International Journal of Control, Automation and Systems	2018年5月
Optimal Monitoring of Multiple Agents via Time Sequence-Based Modeling	SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration	2018年5月
Quantized Event-Triggered Control of Discrete-Time Linear Systems with Switching Triggering Conditions	IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences	2018年2月
MPC-Based Surveillance over Graphs by Multiple Agents	SICE Journal of Control, Measurement, and System	2017年5月

	Integration	
Computationally Efficient Model Predictive Control for Multi-Agent Surveillance Systems	2018 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics	2018年10月 (採録決定)
Self-Triggered Predictive Pinning Control for Consensus of Multi-Agent Systems	SICE Annual Conference 2018	2018年9月 (採録決定)
Switching Controller Design for Quantized Event-Triggered Control	SICE Annual Conference 2018	2018年9月 (採録決定)
Predictive Pinning Control with Communication Delays for Consensus of Multi-Agent Systems	15th International Workshop on Advanced Motion Control	2018年3月
Quantized Event-Triggered Control of Discrete-Time Linear Systems with Switching Triggering Conditions	SICE Annual Conference 2017	2017年9月
Optimal Monitoring of Multiple Agents via Time Sequence-Based Modeling	SICE Annual Conference 2017	2017年9月
Stochastic Model Predictive Control of Multi-Hop Control Networks with Packet Dropouts	SICE Annual Conference 2017	2017年9月
BMI Approach to Design of Networked Control Systems with Decentralized Event-Triggering	18th IEEE International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications	2017年7月
マルチエージェントシステムの合意問題のための自己駆動型ピンニング制御	電子情報通信学会 システム数理と応用研究会	2018年6月
量子化イベント駆動制御のための切替型制御器の設計	電子情報通信学会第31回回路とシステムワークショップ	2018年5月
事象駆動型マルチエージェント監視システムの設計	計測自動制御学会第63回離散事象システム研究会	2018年3月
サイバーフィジカルシステムのための同期型/非同期型分散イベント駆動制御	電子情報通信学会 システム数理と応用研究会	2018年3月
マルチエージェントシステムの合意問題のためのピンニング予測制御	電子情報通信学会 高信頼制御通信研究会	2017年12月
量子化信号を利用した離散時間線形システムの事象駆動制御	計測自動制御学会 システム・情報部門 学術講演会 2017	2017年11月
時系列モデリングによるグラフ上のマルチエージェントモニタリング	計測自動制御学会 システム・情報部門 学術講演会 2017	2017年11月
パケットロスが発生する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	平成29年電気学会産業応用部門大会	2017年8月
離散時間線形システムに対する量子化イベント駆動制御	第61回システム制御情報学会研究発表講演会	2017年5月