

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 3 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2012～2016

課題番号：24360164

研究課題名(和文)サイバーフィジカルシステムにおける制御とスケジューリングの協調設計

研究課題名(英文)Co-design of Control and Scheduling in Cyber-Physical Systems

研究代表者

潮 俊光 (USHIO], TOSHIMITSU)

大阪大学・基礎工学研究科・教授

研究者番号：30184998

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,200,000円

研究成果の概要(和文)：物理システムである制御対象と制御入力を計算する計算機システムがネットワークなどを介してデータの送受信を行うサイバーフィジカルシステムでの制御とスケジューリングに関する基礎的な問題について検討した。特に、マルチタスクシステムにおける過負荷状態を回避するためのジョブスキッピングの下での最適制御法、マルチホップネットワークを用いてデータの送受信を行うときの制御とデータ送信の協調的スケジューリング、事象駆動型制御を用いたデータ送信量の削減、オートメーションサプライズの発生を操作者に知らせる警報システムの開発などを行った。さらに、クアドロータ群の監視システムを開発し、その実機実験を行った。

研究成果の概要(英文)： We focused on several fundamental issues related to control and scheduling in cyber-physical systems consisting of physical plants, embedded computers, and data networks. We developed optimal control under job skipping in multi-tasking systems to avoid overload situations, co-scheduling of control and data transmissions via multi-hop networks, reduction of the amount of transmission data using event-triggered control, and alarm systems to inform operators the possibility of the occurrence of automation surprises. Moreover, we developed a supervisory system for a group of quad-rotor helicopters and conducted its experiment.

研究分野：システム理論

キーワード：システム制御工学 サイバーフィジカルシステム スケジューリング 事象駆動型制御 ネットワーク  
人間機械系 クアドロータ

1. 研究開始当初の背景

制御対象である物理システムとそれを制御する計算機システムが密接結合したシステムをサイバーフィジカルシステム(CPS)という。2007年8月に公表されたアメリカの大統領府科学技術諮問委員会(PCAST)の答申書「Leadership Under Challenger: Information Technology R & D in a Competitive World」を受けて、2008年4月にCyber-Physical System Week (CPSWEEK)が始まり、毎年、CPSに関連した複数の国際会議を同時に開催している。それ以外にもCPSに関連する国際会議が急速に増えている。車載ネットワーク、スマートグリッド、スマートハウス等の我々の日常生活にとって重要なシステムがCPSとみなせる。米国でのCPS研究の目的は、制御対象となる物理システムと制御器が実装される情報システムとの間の相互干渉を解析し、より効率的な組み込み制御システムを構築することにある。組み込み制御系の性能評価指標としてQoCが提案されている。また、Lund大学のK. Arzenらは、制御とスケジューリングとの協調の重要性を主張しており、理論的結果のみならずJitterbugと呼ばれるリアルタイム制御の性能評価のためのMatlabツールボックスを開発している。

2. 研究の目的

サイバーフィジカルシステムの制御において必要となる基礎的な制御手法を提案することを目的とする。特に、制御タスクを処理するマルチタスクシステムの適応性の向上、ネットワーク化制御におけるデータ転送とスケジューリングの協調、ネットワークリソースの効率的利用を実現するための事象駆動型制御法、オートメーションサプライズが発生しない操作支援システムなどの開発を目的とする。

3. 研究の方法

(1) マルチタスクシステムにおいて過負荷を解消するためにジョブスキップを用いる場合、スキップの仕方に応じて、最適制御入力の計算を変更する手法を提案した。

(2) マルチホップネットワークを介して制御対象と制御器の間で制御データを送受信するネットワーク化制御システムの特徴の論理式表現を求めた。SATソルバを用いて、制御データの送信スケジュールと各制御器のサンプリング時刻とを同時に決定する方法を開発した。

(3) クラウド上で制御入力を計算するネットワーク化制御システムにおいて、事象駆動型の制御を導入して、リアプノフ関数を用いて安定性を保証しつつデータ転送量を削減する制御法を提案した。

(4) 人間機械系においてインタフェース表示を見ながら操作を行うとき、予想される結果と実際の結果とが異なる現象をオートメ

ーションサプライズという。オートメーションサプライズを機械とユーザモデルとの間の模倣関係として定式化した。この模倣関係を基にして、オートメーションサプライズやアンセーフな状態への到達の可能性があるとき、ユーザにそのことを知らせる警報システムの設計法を開発した。

(5) 複数のクアドロータを一人の操作者が操作するとき、操作支援を行うシステムのアーキテクチャを提案した。

4. 研究成果

(1) マルチタスクシステムにおけるジョブスキッピングの下での最適制御：サイバーフィジカルシステムでは、複数の制御タスクの実行をリアルタイムに行うマルチタスクシステムによって制御が行われる。マルチタスクシステムは組み込み計算機システム上に実装されるが、物理的制限や製造コストの面から、利用可能な計算リソースが制限される場合が多い。限られた計算リソースを有効利用し、最大限の性能を実現することはマルチタスクシステムの設計、開発する上で重要な課題である。マルチタスクシステムにおいて、何らかの理由で一時的に過負荷状態の起こる可能性がある。このようなとき、タスクがリリースするジョブの一部をスキップすることにより過負荷状態を回避する手法がジョブスキッピングである。この判断をする装置を調停器という。調停器でジョブがスキップされたとき、状態観測器の状態も更新されないために、状態推定の性能が劣化する。この劣化を避けるために、スキップの情報を基にリリースするジョブの処理内容を変更し、状態推定性能の劣化を抑える方法を提案した。図1にその構成図を示す。スケジューラは、デッドラインミスが発生しないように、スキップするジョブの個数などを表すジョブスキッピングパターンを決定し、各タスクに伝える。各タスクは、その情報を基に状態推定と最適制御入力を決定する動的適応制御法を提案した。

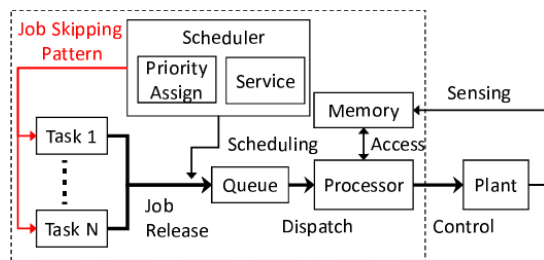


図1 提案されたマルチタスクシステム

本手法をクアドロータの姿勢制御に応用した。図2は従来手法のとき、図3は提案手法のときの時間応答のシミュレーション結果である。本手法により安定に姿勢制御されていることが分かる。

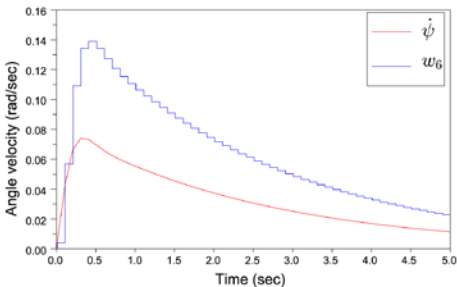
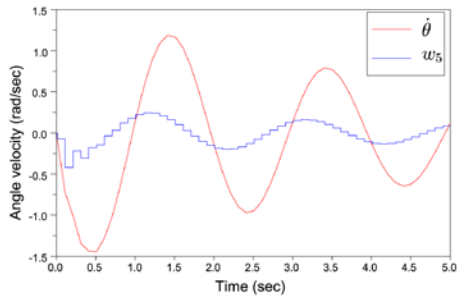
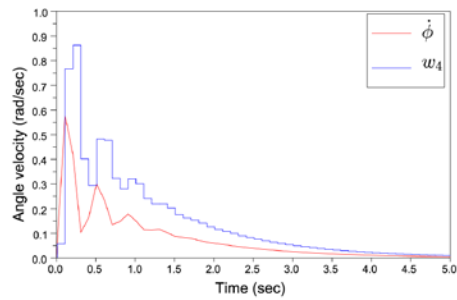


図2 従来の手法での時間応答

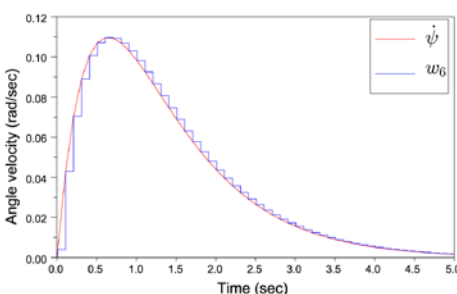
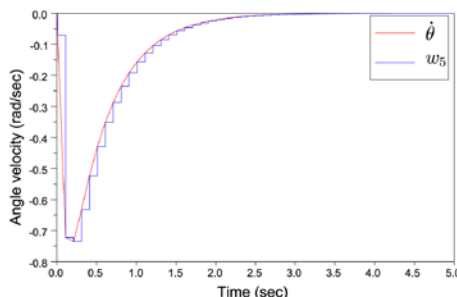
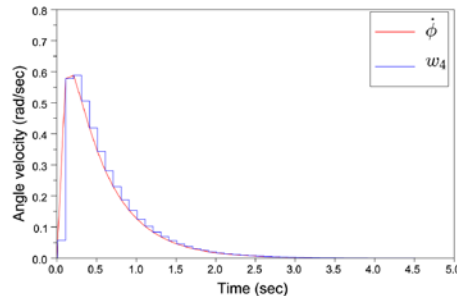


図3 提案手法を用いたときの時間応答

サイバーフィジカルシステムでは、プロセッサの故障やネットワークの輻輳などによって一時的に過負荷状態に陥る可能性がある。このようなときに本手法は有効である。

(2) マルチホップネットワークを用いた制御システムにおけるスケジューリング法：図4に示すような、複数の制御対象の観測データを計算機に送信し、制御入力を計算した後、それを制御対象に送信するマルチホップネットワークを用いたネットワーク化制御システムを対象にした。システム全体の制約条件を論理式で記述し、SATソルバを用いて制御データの転送スケジューリングとサンプリング時間を同時に決定する方法を開発した。特に、補題の再利用を用いた方法を提案した。図5に補題の再利用を行った場合と行わない場合の計算時間を示す。再利用を用いると計算時間が短縮されることがわかる。本方法は、通信ネットワークによる分散制御においてリソースの有効利用に資する技術である。

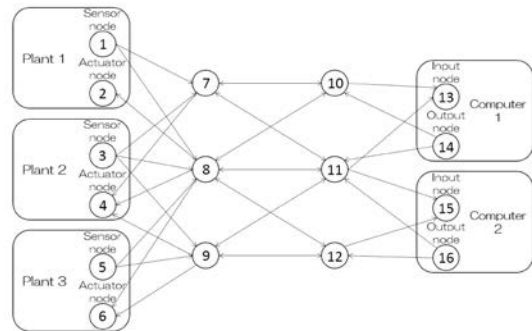


図4 マルチホップネットワークを用いた制御システムの例

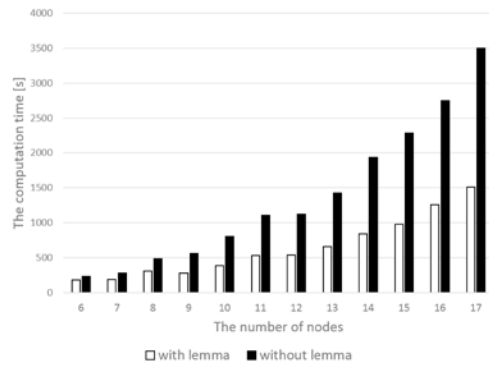


図5 補題の再利用をした場合としない場合の平均計算時間とノード数との関係

(3) 事象駆動型ネットワーク化制御：複数のサブシステムから構成される大規模システムにおいて、各サブシステムの出力をクラウドに送信して、システム全体の状態推定をクラウド上で実行するcloud-assisted観測器を用いた分散事象駆動型制御法を提案した。図6に制御系の概念図を示す。本制御法を用いるとシステムが入力-状態安定で、ゼノン現象が発生しないことを理論的に証明した。

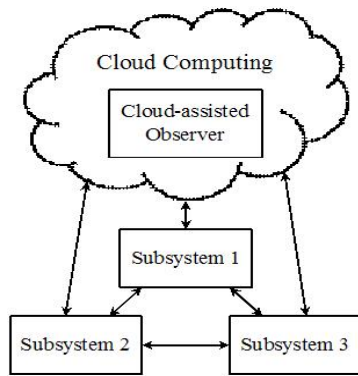
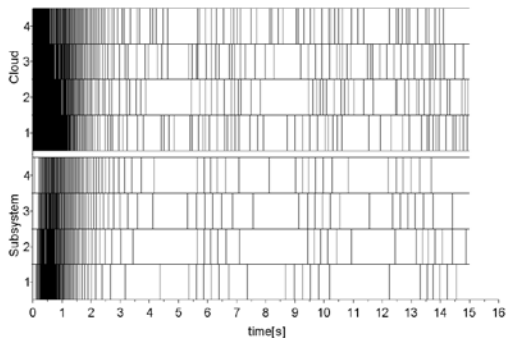
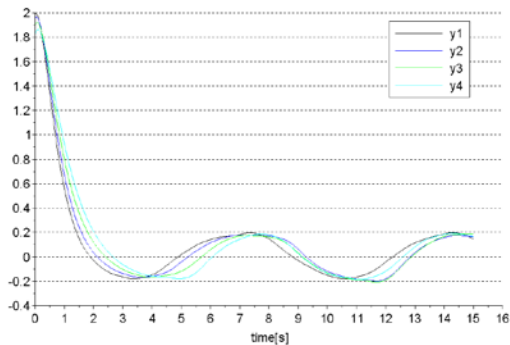


図6 クラウドを利用した制御システム



(a)データ送信タイミング



(b)時間応答

図7 Cloud-assisted 制御系の応答

ただし、有限時間区間で無限回のデータを送信する現象をゼノン現象という。図7(a)に、4つのサブシステムからなる大規模システムに対して提案法を行ったときのデータの送信時刻を縦棒で表す。Cloudと書いている部分はcloudから各サブシステムへ推定状態の送信、subsystemと書いている部分は各サブシステムからクラウドへの観測出力の送信を表す。過渡状態ではデータの送信が頻繁に行われているが、定常状態に達した後は、送信頻度が減少するとともに送信時刻が分散しており、ネットワーク負荷が軽減できることが分かる。図7(b)は各サブシステムの出力の時間応答である。推定出力と観測出力の誤差が指定された値より大きくなったときに観測出力を送信するという規則になっているので、その誤差の範囲で振動していることが分かる。大規模なシステムの制御にクラウドを用いるときに、安定性を保証して通信コストを抑えることができる点が本制御法の特徴である。

さらに、ネットワーク化制御に強化学習を用いた適応最適制御法も提案した。

(4) オートメーションサプライズ警報システムの開発：人間機械系において操作者はインタフェースを見ながら次の指示を決定する。サイバーフィジカルシステムのように大規模なシステムの場合には、表示される情報に限りがあるために、システム全体の状態を推測しながら意思決定を行うことになる。このとき、表示される情報が不十分であると、操作者がシステム状態を誤って推測して指示を出すと、その結果が操作者の予想と異なってしまうことがある。このような現象をオートメーションサプライズという。機械の動作についての操作者が持つ知識をユーザモデルという。オートメーションサプライズは、機械とユーザモデルとの間に対応関係がなくなることによって発生すると考えられる。この対応関係を一種の模倣関係として定式化した。この模倣関係を応用して、オートメーションサプライズの発生を操作者に伝える警報システムを開発した。図8に警報システムのアーキテクチャを示す。本結果は、ユーザインタフェースを見ながら安心して操作できる人間機械系の構築のための基礎技術としての意義がある。

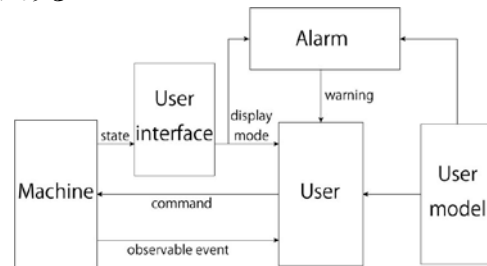


図8 警報システム

(5) クラウドロータ群の操作支援システムの開発：ネットワークを介して複数のクラウドロータを一人で操作するときの操作支援システム CLASS (Cloud Assisted Sensing and Supervision) を開発した。図9にシステムのアーキテクチャを示す。システムは、CLASS クライアント、CLASS サーバ、UAV マネージャからなる。CLASS クライアントは操作者とのインタフェースを管理する。CLASS サーバでは、UAV の現在の状態、操作者の指令を基に各 UAV の飛行計画を決定し、各 UAV へ指令を送る。UAV マネージャは受け取った指令を基に UAV を制御する。また、適時、UAV の現在の状況を CLASS サーバに送信する。現在すべての機能を実装できていないが、一部の機能を実装して、図10のように2機のUAVを操作することに成功した。

また、複数のUAVを用いた実験システムの構築のために、オリジナルの実験機を製作し、複数機による編隊飛行を実現した。開発した機体を図11に、編隊飛行制御系の構成図を図12に示す。地上局と各UAVはWiFiまたは

ZigBee での無線通信で接続されている。本研究では、リーダー・フォロワー型の編隊飛行制御系を構成し実際に飛行できることを確認した。

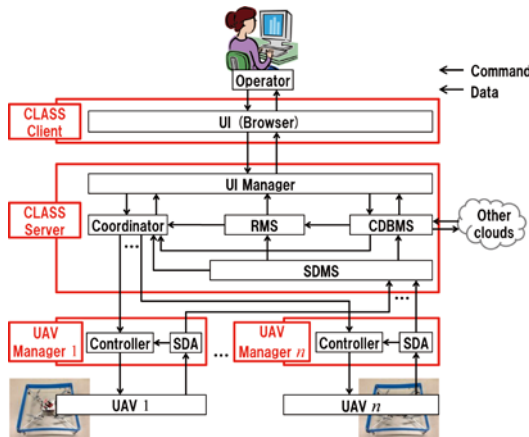


図9 クアッドロータ操作支援システム



図10 実機実験



図11 開発した UAV

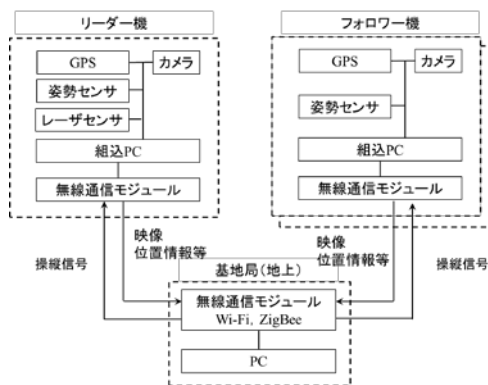


図12 編隊飛行制御系の構成図

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計11件)

- (1) 前田 佳樹, 潮 俊光, プリエンプティブ制御時間付きペトリネットの SMT 論理式表現と分散メディアータへの応用, システム制御情報学会論文誌, vol. 60, pp. 518-524, 2016, 査読有.

- (2) Daiki Ishii and Toshimitsu Ushio, A bisimulation-based design of user interface with alerts avoiding Automation surprises, IEEE Transactions on Human-Machine Systems, vol. 62, pp. 316-323, 2016, 査読有, DOI:10.1109/THMS.2014.2360892.
- (3) Taishi Fujita and Toshimitsu Ushio, Optimal digital control with uncertain network delay of linear systems using reinforcement learning, IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences, vol. E99-A, pp. 454-461, 2016, 査読有, DOI: 10.1587/transfun.E98.A.323.
- (4) Takashi Takimoto and Takashi Shigekuni, Dynamic state-derivative feedback controller for uncertain equilibrium point stabilization, International Journal of Control and Automation, vol. 9, No. 1, pp.201-208, 2016, 査読有.
- (5) 藤田 浩平, 潮 俊光, 離散時間システムに対する計算遅延を考慮した事象駆動1型サーボ系の設計, 電子情報通信学会和文論文誌 A, vol. J98-A, pp. 389-397, 2015, 査読有.
- (6) 吉本 達也, 潮 俊光, 安積 卓也, プロセッサ故障に伴う過負荷状態の回避を考慮した最適出力フィードバック制御器の設計, 情報処理学会論文誌, vol. 56, pp. 1560-1567, 2015, 査読有.
- (7) Tatsuya Yoshimoto, Toshimitsu Ushio, and Takuya Azumi, Adaptive assignment of deadline and clock frequency in real-time embedded control systems, IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences, vol. E98-A, no. 1, pp.323-330, 2015, 査読有, DOI:10.1587/transfun.E98.A.323.
- (8) 坂井 勇哉, 潮 俊光, 中村 祐一, SMT を用いた分散リアルタイムシステムのタスク配置とスケジューリング, 電子情報通信学会和文論文誌 A, vol. J97-A, pp. 574-583, 2014, 査読有.
- (9) Shogo Nakao and Toshimitsu Ushio, Self-triggered predictive control with time-dependent activation costs of mixed logical dynamical systems, IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences, vol. E97-A, pp. 476-483, 2014, 査読有, DOI: 10.1587/transfun.E96.A.878.
- (10) Yasuki Nanamori and Toshimitsu Ushio, Co-scheduling of communication and control of multi-hop control networks, IEICE Transactions on

Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences, vol. E96-A, pp. 878-885, 2013, 査読有, DOI: 10.1587/transfun.E96.A.878.

- (11) Saori Teraoka, Toshimitsu Ushio, and Takafumi Kanazawa, Potential game based distributed control for Voronoi coverage problem with obstacle avoidance, IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences, vol. E95-A, pp. 1156-1163, 2012, 査読有, DOI: 10.1587/transfun.E95.A.1156.

[学会発表] (計 14 件)

- (1) Tenga Tanaka, Hidetaka Fujii, Takayuki Matsuo, Takashi Takimoto, Development of Quad-rotor Type Underwater Robot for Fixed-point Observation, Autonomous Underwater Vehicles 2016, 2016 年 11 月 7 日, 東京大学生産技術研究所 (東京都目黒区).
- (2) 堀航, 滝本隆, 石井和男, 屋外環境下におけるマルチローターヘリコプターの編隊飛行制御システム, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会, 2016 年 6 月 8 日, パシフィコ横浜 (神奈川県・横浜).
- (3) Kenichi Fukuda, Kohei Fujita, and Toshimitsu Ushio, Dynamic event-triggered minimal-order observer for linear systems, 2nd International Conference on Event-Based Control, Communication and Signal Processing, 2016 年 6 月 15 日, クラクフ (ポーランド).
- (4) Taishi Fujita, Toshimitsu Ushio, RL-based optimal networked control considering network delay of discrete-time linear systems, 2015 European Control Conference, 2015 年 7 月 17 日, リンツ (オーストリア).
- (5) Kohei Fujita and Toshimitsu Ushio, Distributed event-triggered output feedback control with cloud-assisted observer, First IEEE International Conference on Event-Based Control, Communication, and Signal Processing, 2015 年 6 月 18 日, クラクフ (ポーランド).
- (6) Takashi Shigekuni, Toshimitsu Ushio, and Takuya Azumi, Cloud-assisted sensing and supervision of multiple unmanned aerial vehicles by a single operator, ACM/IEEE 6th International Conference on Cyber-Physical Systems, 2015 年 4 月 15 日, シアトル (米国).
- (7) Taishi Fujita and Toshimitsu Ushio, Reinforcement learning-based optimal control considering L computation time delay of linear discrete-time systems,

2014 IEEE Symposium on Adaptive Dynamic Programming and Reinforcement Learning, 2014 年 12 月 11 日, オランダ (米国).

- (8) Takumi Fukuda, Takashi Takimoto, Development of an unmanned autonomous flying wing for aerial observations, 2014 14th International Conference on Control, Automation and Systems, 2014 年 10 月 22 日, ソウル (韓国).
- (9) Satoshi Kubo, Akinori Sakaguchi, Takashi Takimoto, Development of flying observation system with helium gas balloon and tilt rotors, 2014 14th International Conference on Control, Automation and Systems, 2014 年 10 月 22 日, ソウル (韓国).
- (10) 重國高志, 滝本隆, フォーマーション制御を利用したマルチローターヘリコプターによる観測システムの開発, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2014, 2014 年 5 月 25 日, 富山国際会議場 (富山県・富山市).
- (11) 河野達也, 潮俊光, 滝本隆, 有限時間最適制御を用いたマルチロータヘリの軌道生成法の実験的検討, 電子情報通信学会システムと数理応用研究会, 2014 年 1 月 31 日, 豊田中央研究所 (愛知県・長久手市).
- (12) Ken Imai and Toshimitsu Ushio, Effective combination of search policy based on probability and entropy for heterogeneous mobile sensors, 2013 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, 2013 年 10 月 15 日, マンチェスター (イギリス).
- (13) 河野達也, 潮俊光, 滝本隆, マルチロータヘリの軌道生成への有限時間最適制御の応用, 電子情報通信学会 2013 年ソサイエティ大会, 2013 年 9 月 20 日, 福岡工業大学 (福岡県・福岡市).
- (14) Tatsuya Yoshimoto and Toshimitsu Ushio, Design of Modified Observer to Reduce State Estimation Error Caused by Job Skipping in Cyber-Physical Systems, ACM/IEEE 3rd International Conference on Cyber-Physical Systems, 2012 年 4 月 17 日, 北京 (中国).

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

潮俊光 (TOSHIMITSU USHIO)  
大阪大学・大学院基礎工学研究科・教授  
研究者番号: 30184998

### (2) 研究分担者

滝本隆 (TAKASHI TAKIMOTO)  
北九州工業高等専門学校・生産デザイン工学科・准教授  
研究者番号: 60581220