

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 7 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(A)（一般）

研究期間：2013～2016

課題番号：25249058

研究課題名（和文）超解像制御：アクチュエータとセンサの限界を超える制御

研究課題名（英文）Super-resolution Control: Control beyond the limits of sensors and actuators

研究代表者

杉江 俊治（SUGIE, Toshiharu）

京都大学・情報学研究科・教授

研究者番号：80171148

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 23,500,000円

研究成果の概要（和文）：アクチュエータとセンサのハードウェア的な解像度が不十分な場合でも、あたかも解像度の高い場合の性能を得る「超解像制御」について以下の成果を得た。センサ側の解像度不足を補うために、システムモデルの同定法を提案した。一方、マルチエージェント系における超解像フォーメーション制御に関して考察し、低解像度の情報に対処できる制御法を提案した。また、マルチエージェントシステム上での変換による超解像制御の枠組みを構築などの成果を得た。

研究成果の概要（英文）：Super-resolution control, which achieves the high-resolution performance even if low-resolution sensors/actuators are used, is studied. Some identification methods are proposed in order to compensate the low-resolution sensor signals. On the other hand, some control methods are developed for formation control of multi-agent systems subject to low-resolution information. Furthermore, a new framework for super-resolution control in multi-agent systems is constructed through the sigma-delta modulation over the multi-agent systems.

研究分野：制御工学

キーワード：モデリング マルチエージェント システム同定 分散化制御

1. 研究開始当初の背景

(超解像制御)

近年、アクチュエータとセンサのハードウェア的な解像度が不十分な場合でも、ソフトウェア技術で超解像化し、あたかも解像度の高いもので制御しているかのような結果を得る方法が生まれつつある。このような制御を本研究グループは「超解像制御」と呼び、アクチュエータとセンサの限界を超える制御の実現を目指してきている。

超解像制御が実現されると、今まで想像すらできなかった世界が広がってくる。図1はそのイメージをしめしている。たとえば、ナノスケールの位置決め制御は、ハードディスクの高容量化や、原子間力顕微鏡の高解像度化の鍵となるが、超解像制御によって、これまでと同じ精度のアクチュエータとセンサで、より精細なピコスケールの位置決め制御が現実のものとなる。また、最近の自動車には、およそ200個のアクチュエータとセンサが使用されているが、もし、超解像制御が実現されれば、現在の機能を保ちながら、これを半分に減らせる可能性をも秘めている。

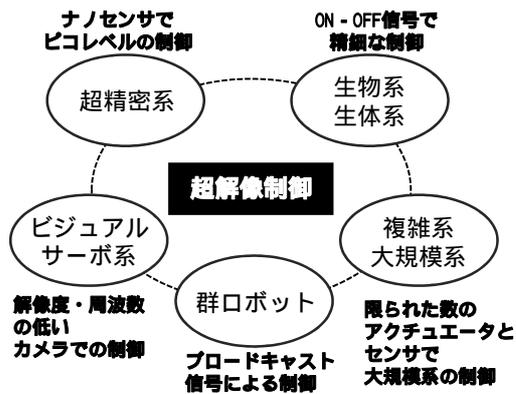


図1 超解像制御の応用範囲

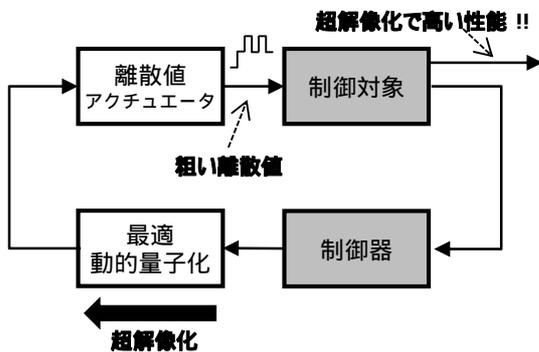


図2 シーズ技術 (最適動的量子化による超解像化)

(研究動向)

このような背景のもと、本研究グループでは、平成17年度および平成21年度からの基盤研究(B)で、超解像制御の実現の鍵を発見している。これは図2のように示される。制御対象に、ON-OFF型のような粗い離散値のアクチュエータが用いられた場合、通常の制御理論では高い性能を得ることは難しいと考えられてきた。これに対し、応募者らは「最適動的量子化」と呼ばれる超解像技術を開発し、連続値アクチュエータを使用した場合と同程度の性能を得ることに成功している。このように、応募者らは、アクチュエータの限界を超える制御が可能であることを証明し、これまでの制御工学者の常識を超える成果を挙げている。

(着想に至った経緯)

一方で、図1に示されるような未来像を実現するためには、この結果をシーズとして、超解像制御を2つの方向に大きく展開する必要がある。第一の方向は、センサ側の超解像化である。実際、アクチュエータとセンサはペアの関係にあるが、アクチュエータ側の成功とは裏腹に、センサ側の超解像化に対する成果は限定的であった。第二の方向は、アクチュエータとセンサの「数的」な超解像化である。これまでは、「精度」の超解像化を目指していたが、近年注目を集めているスマートグリッドや高度交通システムなどの大規模系においては、限られた数のアクチュエータとセンサで、あたかも多数のものが用いられた場合と同じ性能が得られれば、その効果は大きい。しかし、そのような数的な制約を克服する超解像化の研究も、本研究グループが発見した「不可制御なシステムを疑似的に可制御にする技術(ブロードキャスト制御)」の結果を除いて、現段階では見当たらない。

2. 研究の目的

本課題では、超解像制御の基盤技術を確立する。このために以下の課題に取り組む。

課題1 センサ側の超解像化：フィードバック制御系において精度の低いセンサが用いられた場合に、超解像化する理論および手法を確立する。また、アクチュエータ側とセンサ側に対して個別に開発された方法を融合させ、アクチュエータとセンサを統合的に超解像化する技術の検討を行う。

課題2 数的な超解像化：既存のシーズ技術および課題1の成果をもとに、数的な超解像化を行う理論および手法を確立す

る．特に，数的な超解像化が必要とされる大規模マルチエージェント系を対象を絞り，その性質を最大限利用した結果を目指す．

課題 3 実験検証：実機実験を実施して，その有効性を検証する．位置決め制御系における精度に関する超解像制御が検証および，マルチピークルシステムを対象とした数的な超解像制御について検証する．

3．研究の方法

(A) センサ側の超解像化

センサ側の超解像化には対象システムのモデルや状態推定が不可欠である．低解像度のセンサ情報に基づくモデル構築について検討する．これとともに，センサにおける情報欠損過程を（確率モデルとして）モデル化し，これを用いて，情報欠損した観測値から本来の出力値を推定する統計的推論手法について検討する．さらに，この手法を，制御工学で発展してきた動的な状態推定手法（例えばカルマンフィルタ）に統合し，情報欠損した観測値の時系列から制御対象の状態を高精度で推定する超解像手法を確立する．

(B) 数的な超解像化

マルチエージェント系を対象とし，アクチュエータ側の超解像化に取り組む．ここで考えるシステムは全体を制御するグローバル制御器と，各エージェントに搭載されるローカル制御器が設計変数になっている．この際，ローカル制御器の設計には，エージェント同士をつなぐネットワーク構造（の一部）の扱いも含まれている．少ないアクチュエータでもシステム全体を高精度で制御できるようなグローバル制御器とローカル制御器の設計方法を確立する．

(C) モデリングおよび制御の基盤整備

超解像制御において，モデリングの精度は実現しうる制御性能と強く関連している．一方で，モデルの複雑さは推定機構の複雑さ，すなわち制御器の複雑さに直結し，精度が高いモデルが得られたとしても，それが過度に複雑であれば制御器の実装は困難になる．そこで，大規模で複雑なシステムに対し，所望の精度を持ちながらもコンパクトな表現となるモデル化手法を開発する．共同研究者らがこれまでに開発してきた区分的線形モデルの同定法をさらにレベルアップし，これまでと同等の精度を保ちながら，その表現に必要なデータ数を大幅に圧縮する手

法を開発する．制御器の設計を踏まえたモデリング手法の開発へと発展させる．特に，制御器の実装において本質的に必要とされる部分を抽出し，この部分に焦点をあてることでコンパクトなモデルを得ることを目指す．また，解像度やデータ長が不十分な状況におけるモデリングの手法についても検討する．

一方で，超解像化制御の基盤となる制御手法そのものについても検討を進める．特に，制御対象情報の超解像化に対応するようなモデルフリー（あるいはごく粗いモデルしか利用できない場合の）制御手法の検討，ノンパラメトリックなモデルに基づく制御手法の検討，シース技術である量子化制御をより発展させる．

4．研究成果

(A) センサ側（およびアクチュエータ側）の超解像化

- ・ 解像度の低いセンサが用いられる場合において，粒子フィルタに基づいた超解像型状態推定の基本的なアイデアを提案し，それをシミュレーションおよび実機実験で検証した．

- ・ 同時摂動最適化を用いて，動的線形システムと静的非線形システム要素から構成されるシステムを同定する手法を提案した．推定すべきパラメータ数が多数であるにもかかわらず，その有効性を数値例により確認した．

- ・ 低解像度のセンサ情報からモデルを構築する手法に関して，比較的簡単なアルゴリズムにもかかわらず高い性能を発揮することで知られる差分進化を用いた同定について検討した．ノイズの大きさ，センサ解像度等に注目して詳細な数値検討をおこない，閉ループ系での有効性を確認した．

- ・ 一般的な非線形システムに対するアクチュエータの超解像化手法の開発を行った．

- ・ 生物の走化性現象に着目し，簡単な超解像制御によって，これが説明できることを示した．

- ・ アクチュエータおよびセンサがともに低解像度である場合の超解像制御を検討した結果，制御対象が安定な場合，これまでに提案している手法の組み合わせにより，超解像制御が機能していることを数値例および位置決め制御系の実験により確認した．一方で，制御対象が不安定

な場合には、センサの低解像度を克服するのにさらなる工夫が必要であることがわかった。

(B) 数的な超解像化

・多数のエージェントから構成されるマルチエージェントシステムに対して、エージェントの個々の情報を用いるのではなく、全体の目的達成度を含むスカラに集約された情報を用いて、高精度なフォーメーションを形成するための方法の検討を行った。

・数的な超解像化に関して、情報交換が量子化される場合のフォーメーション制御を検討した。特に、ディザ型移動に基づいた制御則を提案し、それによってどの程度所望のフォーメーションが達成できるかを明らかにした。

・マルチエージェントシステムの超解像フォーメーション制御に関して下記の成果を得た。一つは、ブロードキャスト型の情報交換において、エージェントの移動量の最大値が制約される(つまり低解像度の移動能力)場合を検討したことであり、その結果、従来手法において単純に移動量を打ち切った場合でも収束性を保証できることを明らかにした。もう一つは、目標フォーメーションが低解像度の信号で与えられる場合を検討し、それを実現するハイブリッド型の制御器を開発したことである。

・マルチエージェントシステムの超解像フォーメーション制御については、さらに次の成果を得た。エージェント間で情報交換を行う場合には、通信量をできる限り小さくすることが望まれる。そのような場合でも高精度な制御を実現するための方法として、ランダムディザ信号を用いることを提案し、その性能解析を行った。また、マルチエージェントシステム上での変換によるON/OFF制御の超解像化の枠組みを構築するとともに、エージェントの単調性の性質だけを用いた超解像型安定化の方法を開発した。

・マルチエージェントシステムにおいて、エージェント間の情報交換が限定されている場合に、自動運転ネットワークシステムを支援するリニア信号機という概念を提案し、そのプロトタイプの実験装置を構成し、有効性について検証した。

(C) モデリングおよび制御の基盤整備

・データに基づいたノンパラメトリックなモデル表現について考察し、データ量

を削減した場合、すなわちモデルの解像度が粗い場合に発生する誤差の評価を行う手法と、その評価に基づくモデル構築法を提案した。

・短いデータからシステムモデルの確率分布表現を求めることができるカーネル型同定とよばれるシステム同定手法について検討し、事前情報を有効利用することにより、データ長と等しいパラメータ数のモデルが得られることを確認した。この手法に着目し、同定に適した入力設計法を示した。

・ごく粗いモデルしか利用できない対象にも適用可能な制御手法について、粗いモデルをもとに安定化の可能性を判別する条件を導出し、実機実験によって得られた条件の妥当性と手法の有用性を確認した。

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 14 件)

S. Azuma, K. Owaki, N. Shinohara, and T. Sugie: Performance Analysis of Chemotaxis Controllers: Which has Better Chemotaxis Controller, Escherichia coli or Paramecium caudatum?, IEEE/ACM Transactions on Computational Biology and Bioinformatics, Vol. 13, No. 4, pp. 730-741 (2016)

DOI:10.1109/TCBB.2015.2474397

井上大輔, 東 俊一, 杉江俊治: 量子化観測を伴う移動ロボットシステムのランデブー制御 ディザを用いた制御と性能解析, システム制御情報学会論文集, Vol. 29, No. 7, pp. 311-317 (2016)

DOI:10.5687/iscie.29.311

S. Izumi, S. Azuma, and T. Sugie: Stabilization by Controller Networks, Systems & Control Letters, Vol. 94, pp. 77-83 (2016)

DOI:10.1016/j.sysconle.2016.05.014

M.A. Ahmad, S. Azuma, and T. Sugie: Identification of Continuous-time Hammerstein Systems by Simultaneous Perturbation Stochastic Approximation, Expert Systems with Applications, Vol. 43, pp. 51-58 (2016)

DOI:10.1016/j.eswa.2015.08.041

藤本悠介, 丸田一郎, 杉江俊治: ノンパラメトリック表現を用いたデータ駆動制御,

計測自動制御学会論文集, 51 巻, 12 号, pp. 829-835 (2015)
DOI:10.9746/sicetr.51.829

Y. Tanaka, S. Azuma, and T. Sugie: Simultaneous Perturbation Stochastic Approximation with Norm-Limited Update Vector, Asian Journal of Control, Vol. 17, No. 6, pp. 2083-2090 (2015.11)
DOI:10.1002/asjc.1153

S. Izumi, S. Azuma, and T. Sugie: Distributed hybrid controllers for multi-agent mass games by a variable number of player agents, Asian Journal of Control, Vol. 17, No. 3, pp. 762-774 (2015)
DOI:10.1002/asjc.930

杉山開路, 丸田一郎, 杉江俊治: 能動的外乱除去制御器を用いた場合の閉ループ系の安定解析とその応用, 計測自動制御学会論文集, 51 巻, 7 号, pp.494-502 (2015)
DOI:10.9746/sicetr.51.494

藤本悠介, 丸田一郎, 杉江俊治: 推定 Hessian を利用したノンパラメトリック PWA モデルの構築法, 計測自動制御学会論文集, 51 巻, 3 号, pp. 197-205 (2015)
DOI:10.9746/sicetr.51.197

M.A. Ahmad, S. Azuma, I. Baba, and T. Sugie: Switching Controller Design for Hybrid Electric Vehicles, SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration, Vol. 7, No. 5, pp. 273-282 (2014)
DOI:10.9746/jcmsi.7.273

M.A. Ahmad, S. Azuma, and T. Sugie: A Model-Free Approach for Maximizing Power Production of Wind Farm Using Multi-Resolution Simultaneous Perturbation Stochastic Approximation, Energies, Vol. 7, No. 9, pp. 5624-5646 (2014)
DOI:10.3390/en7095624

大仲智也, 丸田一郎, 杉江俊治: 知的 PID 制御系のデジタル実装に関する一考察, 計測自動制御学会論文集, Vol. 50, No. 4, pp. 366-373 (2014)
DOI:10.9746/sicetr.50.366

田中洋輔, 東 俊一, 杉江俊治: 一定距離型の確率的移動によるブロードキャスト制御, 計測自動制御学会論文集, Vol. 50, No. 2, pp. 139-146 (2014)
DOI:10.9746/sicetr.50.139

S. Azuma and T. Sugie: Dynamic

Quantization of Nonaffine Nonlinear Systems, IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences, Vol. E96-A, No. 10, pp. 1993-1998 (2013)
DOI:なし

〔学会発表〕(計 18 件)

吉川徹哉: リニア信号機による自動運転ネットワーク, 第 4 回計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム, 2017 年 3 月 9 日, 岡山

Y. Fujimoto: Informative Input Design for Kernel-Based System Identification, 55th IEEE Conference on Decision and Control, 2016 年 12 月 13 日, Las Vegas

S. Izumi: On a Relation between Graph Signal Processing and Multi-Agent Consensus, 55th IEEE Conference on Decision and Control, 2016 年 12 月 12 日, Las Vegas,

藤本悠介: カーネル型システム同定のための入力設計に関する一考察, 第 59 回自動制御連合講演会, 2016 年 11 月 10 日, 北九州

井上大輔: ネットワーク化単調システムの安定性解析, 第 59 回自動制御連合講演会, 2016 年 11 月 10 日, 北九州

三田拓也: 進化型計算を用いた量子化出力に基づくシステム同定, 第 60 回システム制御情報学会研究発表講演会, 2016 年 5 月 27 日, 京都

坂口弘成: 超解像制御系設計に関する一考察, 第 60 回システム制御情報学会研究発表講演会, 2016 年 5 月 26 日, 京都

Y. Fujimoto: Synthesis of non-parametric controllers based on I/O data from closed-loop experiment, The 34th Chinese Control Conference and SICE Annual Conference 2015, 2015 年 7 月 28 日, 杭州

Y. Fujimoto: Error bound analysis and optimal construction of non-parametric PWA models, 53rd IEEE Conference on Decision and Control, 2014 年 12 月 17 日, Los Angeles,

M.A. Ahmad: Identification of Continuous-time Hammerstein Models using Simultaneous Perturbation Stochastic Approximation, 14th International Conference on Control, Automation and

Systems, 2014 年 10 月 24 日, Seoul

M.A. Ahmad: A Model-Free Approach to Wind Farm Control using Simultaneous Perturbation Stochastic Approximation, 21st International Symposium on Mathematical Theory of Networks and Systems, 2014 年 7 月 10 日, Groningen

泉晋作: グラフ信号処理と合意制御, 第 2 回制御部門マルチシンポジウム, 2015 年 3 月 5 日, 東京

大仲智也: 走化性を司る制御器の同定, 第 2 回制御部門マルチシンポジウム, 2015 年 3 月 5 日, 東京

児嶋佑典: パケットベース制御: 間欠的な入力による精密な制御, 第 2 回制御部門マルチシンポジウム 学生ポスターセッション, 2015 年 3 月 5 日, 東京

吉田卓弘: プーリアンネットワークの構造的振動条件, 第 2 回制御部門マルチシンポジウム 学生ポスターセッション, 2015 年 3 月 5 日, 東京

藤本悠介: 入出力データに基づくノンパラメトリック型制御器の設計, 第 57 回自動制御連合講演会, 2014 年 11 月 11 日, 伊香保

筈井祐介: 量子化出力に基づくオンライン状態推定を実現する粒子フィルタ, 第 1 回制御部門マルチシンポジウム, 2014 年 3 月 7 日, 調布

稲垣聡: 相対位置もしくは相対距離のいずれかを観測できる環境下におけるマルチエージェントシステムの剛性条件, 第 1 回制御部門マルチシンポジウム, 2014 年 3 月 5 日, 調布

6. 研究組織

(1) 研究代表者

杉江 俊治 (SUGIE, Toshiharu)
京都大学・大学院情報学研究科・教授
研究者番号: 8 0 1 7 1 1 4 8

(2) 研究分担者

東 俊一 (AZUMA, Shun-ichi)
京都大学・大学院情報学研究科・准教授
研究者番号: 4 0 4 2 0 4 0 0

丸田 一郎 (MARUTA, Ichiro)
京都大学・大学院情報学研究科・助教
研究者番号: 2 0 6 2 5 5 1 1