

令和 6 年 6 月 22 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2019～2022

課題番号：19H02161

研究課題名（和文）ハイパートラッキングと外乱抑制—超高周波における制御と信号処理の新展開

研究課題名（英文）Hypertracking and hyperrejection - New developments on control and signal processing in super high frequencies

研究代表者

山本 裕 (YAMAMOTO, YUTAKA)

京都大学・情報学研究科・名誉教授

研究者番号：70115963

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 12,000,000 円

研究成果の概要（和文）：本研究は、Shannonの先駆的研究以来デジタル制御の高域処理限界とされてきたナイキスト周波数（サンプリング周波数の半分）以上の制御・信号処理の限界を、代表者が開発、推進してきた現代的サンプル値制御理論に基づいて乗り越えるところを目的とした。具体的には、このような高周波のトラッキング問題、あるいは外乱除去問題に対し、適切なプラントモデルと信号生成モデルを併せることによって、マルチレート信号処理により正確なトラッキングあるいは外乱除去が可能となることを示した。主な成果として、このような制御問題におけるロバスト性条件の導出、複数信号に対する適用、非線形リフティングモデルの導入が挙げられる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究によりこれまでほとんど不可能と考えられていた、Nyquist周波数を超える信号に対するサンプル値制御が実用的に可能になった意義は大きい。従来はサンプル周期を速めることでしか対応できないと考えられてきた数々の課題が、実用的なサンプル周期の範囲内で解決可能となった。例えばハードディスクなどの回転系やロボット制御などハードウェアの制約からサンプル周期を速めることができない数多くの実課題に対して、実用的な回答を与えたことの意味は極めて大きい。またこの目標を達成するためのロバスト性条件を導いたことも、学術的、実用的に意義が大きい。

研究成果の概要（英文）：The present research project intends to establish a new paradigm for sampled-data control theory that makes it possible to overcome the difficulty of controlling signals beyond the Nyquist frequency (i.e., half the sampling frequency). The new theory bases itself on the modern sampled-data control theory developed by the principal investigator. Specifically, by introducing a suitable signal generator model along with an appropriate plant model, one can achieve tracking or disturbance rejection via multirate signal processing. Of notable related accomplishments are the derivation of a robustness condition for this scheme, application to several composite signals, and also the introduction of a nonlinear lifting scheme for nonlinear sampled-data systems.

研究分野：システム・制御理論

キーワード：サンプル値制御 ハイパートラッキング ハイパーリジェクション マルチレート処理 デジタル信号処理

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

研究代表者はこれまで、現代的サンプル値制御理論を用いたデジタル信号処理の理論、ことにアナログ特性を最適にするデジタルフィルタの設計手法を世界に先駆けて提案し、研究してきた。この手法の大きな特徴は、サンプル値制御理論がサンプル点間のアナログ特性をも最適化することに着目することにより、Shannon らによるこれまでのデジタル信号処理では不可能であった Nyquist 周波数を超える広域特性までも最適に復元、処理し得ることにある。このような研究方向の主たる成果として、与えられたサンプル周期の限界を超える信号の復元、再生において問題となっていた超高周波信号の最適な復元が可能となった。しかしながら、これらは H-infinity 評価規範による最適化であり、全体としての最適化は達成されるものの個別の個々の信号に対しては、必ずしも正確な復元、再生を可能にするものとは言いがたかった。特に制御問題において、特定の周波数信号に対する追従、外乱除去などは重要な課題であるものの、これらに対して全面的な有効性は達成されたとは言いがたかった。

一方サンプリング定理に基づく従来の考えでは、Nyquist 周波数を超える信号に対するサンプル値制御はほとんど不可能と考えられており、ことにフィードバック制御の範疇ではほとんど取り上げられてこなかった。一方、現実には様々な、主として物理的な制約により、サンプリング周波数は望むだけ高く（すなわち望むだけ短いサンプル周期で）取ることが不可能であり、にも関わらず、そのような信号を処理しなければならない現実的な要求は数多く存在している。典型的な例としてハードディスクなどの回転系において、ディスクの回転によって生じる高周波外乱の除去、またロボット制御などにおいて、位置測定用カメラなどのサンプル時間の制約を超えてスムーズな移動を可能にする軌道制御問題などである。

2. 研究の目的

本研究は以上の状況に鑑み、Nyquist 周波数を超える信号成分を持つ信号に対して、トラッキング、外乱抑制の枠組みを確立し、その体系を構築することを目的としている。基本的には単一周波数の正弦波を対象とするが、さらに複数の周波数成分を持つ信号、またトラッキングと外乱除去の同時制御も対象とする。また実用上重要な課題として、この枠組みで構成した制御系のロバスト性条件を明らかにすることも目標とする。さらにもし可能ならばこのような枠組みを非線形サンプル値制御系に拡張することも視野に入れる。

3. 研究の方法

上記の課題の解決のため、H-infinity サンプル値制御理論を用いることとし、単一周波数成分をもつ目標値信号へのトラッキングをまず取り上げた。これに対して、この周波数にピークを持ち、かつそれ以外の周波数成分を除去する帯域通過フィルタを重み関数として用いてサンプル値制御系設計を行い、その可能性を検討した。

さらに複数信号に対するトラッキング問題については、対応する周波数成分に対する帯域通過フィルタを重み関数として採用することを試みる。またトラッキングと同時に同様の高周波外乱が印加される場合も同様のアプローチであるが、各々異なった一般化プラントを設定するなどの対応も必要となる。またプラントおよび信号に変動が生じた場合のロバスト性の保証については代表者の過去の擬有理型システムの研究との関連において、むだ時間システムのロバストトラッキングの条件との関係を明らかにすることを念頭に研究を進める。

4. 研究成果

本研究において得られた主な成果は次のとおりである：

1) Nyquist 周波数を超えるトラッキング信号あるいは外乱信号に対し、その目標周波数にピークを持つ重み関数を設定し、H-infinity サンプル値制御理論を適用することにより、トラッキング、あるいは外乱除去が可能となることを示した。この際注意すべきことは、従来のものと異なり、低周波信号に対する重みは低く抑えられ、したがって得られたコントローラはバンドパス特性を持つことである。

2) このスキームが実用的に意味をなすためには、プラント変動に対するロバスト性が最も重要である。これに対して次の重要な定理を得た：

トラッキング信号の周期を T 、またトラッキング実現のために許容したコントローラの遅れを L としたとき、本スキームがロバストであるためには、 L/T が整数であることが必要かつ十分である。逆にこの条件を満たさない場合には、目標信号の周波数の変動、あるいはプラントのわずかな変動に対してロバスト性条件を満たしえず、これらのわずかな変動に対してトラッキング、外乱除去が達成し得ないこと、また甚だしい場合には閉ループ安定性すら保証されえないことが明らかとなった。これは代表者の過去のサンプル値制御理論と擬有理型システム理論に基づく極めて明快かつ重要な結果といえる。したがって本手法の野放図な採用は望ましい結果を与えるとは限らないことに注意が肝要である。

3) その他、設計用一般化プラントを適切に設定し、また複数ピークを持つ帯域通過フィルタを重み関数として採用することにより、複数信号に対するトラッキング、外乱除去も同様に扱えることを確認した。

4) 最後に、本研究からの発展的な結果として、非線形システムに対するリフティングの枠組みを新たに導入した。これにより、これまで比較的初等的なシステム近似（例えばオイラー近似）に基づいて議論されてきた非線形サンプル値制御理論系が近似を介さずに取り扱う事が可能となった。これは非線形システムのサンプル値制御において、非常に重要な知見となり得る。直接的な成果として、リフティングされたシステムの Koopman 作用素の解析を行い、そのスペクトルなどは保存されることを明らかにした。さらに高速サンプリングによるシステム近似による新たな安定化手法の検討、システム受動性、消散性などの性質の保存などを示すことにより、非線形サンプル値制御系の研究に新たなアプローチを切り開きつつある。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Kaoru Yamamoto, Yutaka Yamamoto and Masaaki Nagahara	4. 巻 AC-68
2. 論文標題 Hypertracking and hyperrejection: control of signals beyond the Nyquist frequency	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Automatic Control	6. 最初と最後の頁 6232-6239
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TAC.2022.3230599	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yutaka Yamamoto and Kaoru Yamamoto	4. 巻 56
2. 論文標題 Nonlinear sampled-data systems - A lifting framework	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IFAC-PapersOnLine	6. 最初と最後の頁 6406-6410
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.ifacol.2023.10.840	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Masaaki Nagahara and Yutaka Yamamoto	4. 巻 36
2. 論文標題 A survey on compressed sensing approach to systems and control	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Mathematics of Control, Signals, and Systems	6. 最初と最後の頁 1-20
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s00498-023-00366-1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Masaaki Nagahara and Yutaka Yamamoto	4. 巻 1
2. 論文標題 Sparse representation for sampled-data H-infinity filters	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Realization and Model Reduction of Dynamical Systems: A Festschrift in Honor of the 70th Birthday of Thanos Antoulas	6. 最初と最後の頁 427-444
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/978-3-030-95157-3_23	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yutaka Yamamoto and Catherine Bonnet	4. 巻 54
2. 論文標題 Bezout Identity in pseudorational transfer functions	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IFAC-PapersOnLine	6. 最初と最後の頁 353-358
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ifacol.2021.06.153	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Masashi Wakaiki and Yutaka Yamamoto	4. 巻 138
2. 論文標題 Stability analysis of perturbed infinite-dimensional sampled-data systems	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Systems and Control Letters	6. 最初と最後の頁 1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.sysconle.2020.104652	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Masaaki Nagahara and Yutaka Yamamoto	4. 巻 53-2
2. 論文標題 Sparse representation of feedback filters in delta-sigma modulators	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IFAC Papers Online	6. 最初と最後の頁 512-517
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ifacol.2020.12.320	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件(うち招待講演 1件/うち国際学会 4件)

1. 発表者名 Masaaki Nagahara, Y. Fujimoto, Yutaka Yamamoto
2. 発表標題 Sparse system identification with kernel regularization
3. 学会等名 25th International Symposium on Mathematical Theory of Networks and Systems (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Y. Yamamoto and C. Bonnet
2. 発表標題 Bezout identity in pseudorational transfer functions
3. 学会等名 25th International Symposium on Mathematical Theory of Networks and Systems (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yutaka Yamamoto
2. 発表標題 Hypertracking: a new approach to signals beyond the Nyquist frequency - a brief overview
3. 学会等名 21st IFAC World Congress (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yutaka Yamamoto and Kaoru Yamamoto
2. 発表標題 Nonlinear sampled-data systems - A lifting framework
3. 学会等名 22nd IFAC World Congress, Yokohama, Japan (国際学会)
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

山本 裕のホームページ https://sites.google.com/site/yutakayamamoto/
--

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担者	山本 薫 (Yamamoto Kaoru) (20834104)	九州大学・システム情報科学研究院・准教授 (17102)	

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 協力者	永原 正章 (Nagahara Masaaki)		

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関		
フランス		Centrale Supelec	