

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 6 月 16 日現在

機関番号：13601

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420433

研究課題名(和文) 並列モデルを用いた非最小位相系の制御系設計方法の構築

研究課題名(英文) Development of control design method for non-minimum phase system using parallel model

研究代表者

千田 有一 (CHIDA, Yuichi)

信州大学・学術研究院工学系・教授

研究者番号：00345753

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題は、非最小位相系制御対象において、非最小位相性に起因した位相遅れの制約を出来る限り低減化させ、見通し良く未知外乱推定器の設計方法を実現することを目的とする。そのため、並列モデルの導入によって広い周波数帯域に渡って性能向上を図る方法について検討し、並列モデルの設計方法ならびにそれを用いた未知外乱推定器の設計手法の提案を行った。さらに、実験システムに対して提案方法を適用し、その有効性を検証した。

研究成果の概要(英文)：In the present research, development of a novel design procedure of the unknown disturbance estimator is discussed. A design method of the unknown disturbance observer is proposed in order to improve the estimation performance in the high frequency band-width which is affected by the non-minimum phase property of the plant. For the purpose, a parallel model of the plant is introduced and a virtual minimum phase plant is used for designing the unknown disturbance estimator. The effectiveness of the proposed method is verified by some experimental results using an experimental setup.

研究分野：制御・システム工学

キーワード：制御システム 未知外乱推定 非最小位相系 並列モデル

1. 研究開始当初の背景

制御理論は、産業界の多くのシステムで応用され、有効な性能を実現している。例えば、HDD (Hard Disk Drive) のヘッド位置決め制御問題では、既存のあらゆる制御法が適用検討され、真に効果のある手法が採用されている。現在なおその努力は継続され、ごく僅かな性能向上を図るために、常に新たな手法を模索している。しかしながら、HDD 制御対象は非最小位相系であるため、最小位相系に比較して性能の向上が難しい。すなわち、フィードバック制御問題については、その位相遅れのために制御性能の広帯域化が難しく、未知外乱推定問題については最小位相性が前提条件となるスライディングモードオブザーバなど既存の様々な方法の適用ができず、結果として推定性能の向上が難しい。したがって、非最小位相性に起因する性能限界を超えることができれば、従来では実現できなかった性能を得ることができるため、アクティブ制御技術のブレークスルーにつながる。

2. 研究の目的

非最小位相系では、最小位相系に比較して制御性能が向上しにくいといった問題がある。さらに、未知外乱推定器では、制御対象の最小位相性を前提条件とする方法論も多く、その場合には非最小位相系には適用できない。そこで、非最小位相系における性能向上を図る制御系あるいは未知外乱推定器の設計方法を提供するため、並列モデルに基づく設計方法を構築し、従来では実現できなかった高性能制御あるいは高精度推定を実現することを目的とする。

3. 研究の方法

本研究においては、次の3つの課題の解決について取り組んだ。

(1) 並列モデルの設定方法の提案

提案する設計手法では、図1に示すように真の制御対象  $P_r(s)$  に並列モデル  $P_m(s)$  を並列結合した仮想モデル  $G(s)$  を考える。その際、並列モデル  $P_m(s)$  は仮想モデル  $G(s)$  が最小位相系となるように選ぶ設計パラメータとなるが、単に最小位相化するだけでは意味を持たない。すなわち、真の制御対象は  $P_r(s)$  であるため、仮想モデル  $G(s)$  に対して設計した制御系や未知外乱推定器と  $P_r(s)$  との関係を明確化する必要がある。そのため、 $P_m(s)$  の設定方法を工夫することによって、より効果的な制御系を構築することが期待できる。そこで、 $P_m(s)$  の設定方法について効果的な方法の提案を目指す。

(2) 並列モデルを用いた未知外乱推定手法の構築

並列モデルを適切に設定することにより、仮想的に構成した最小位相系を対象として

未知外乱推定器を設計する方法の提案を目指す。制御対象を最小位相系と見なせる場合には、スライディングモードオブザーバなどの方法によって、推定性能の広帯域化が期待できる。そのためには、 $P_m(s)$  の適切な設定と共に、並列モデルを統合した仮想的なモデル  $G(s)$  に対する推定値から真の未知外乱推定値を再構成するロジックに工夫が必要である。そこで、これを実現するための効果的な方法論の構築を目指す。

(3) 実験装置を用いた提案手法の有効性の検証

開発した未知外乱推定手法の性能を検証するため、実験装置を用いた検証実験を実施する。

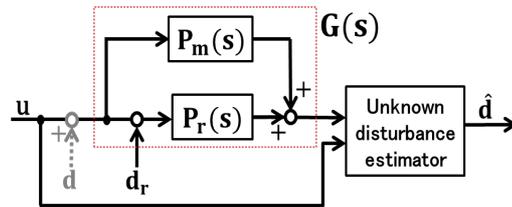


図1 並列モデルを併合した仮想的な制御対象 (未知外乱推定器の場合)

4. 研究成果

(1) 並列モデルの設定方法の提案

並列モデル  $P_m(s)$  の見通しの良い設定方法を構築することを目指し、周波数応答マッチングによる方法について検討した。その結果、周波数応答のマッチング性能を評価関数とし、最小位相性の制約条件を LMI によって定式化することで適切な設計問題として定式化することができた。その際、最小位相性の制約条件式の記述が可解性に大きく影響するが、KYP 補題を用いた表現による別解法を見出した。その結果、従来の方法に比較して、より広い制御対象においても数値的に不安定となることなく、解の導出が可能となることが確認できた。これらの成果は学術論文として掲載された。〔雑誌論文 - 〕

(2) 並列モデルを用いた未知外乱推定手法の構築

上記(1)で求めた LMI に基づく定式化を用いて、幾つかの例題に対して未知外乱推定器を設計し、その性能を検証した。未知外乱推定器の設計方法としては、従前のいずれの方法も適用できるため、外乱オブザーバを用いた。その結果、非最小位相系の制御対象に直接的に未知外乱推定器を設計する場合に比較して広帯域化が図れることが明らかとなった。さらに、非最小位相性の特性によって位相が遅れる周波数帯域においても、指定した周波数帯域において未知外乱推定器の性能が確保できることも確認できた。非最小位相性に伴う位相遅れが存在する周波数帯域における未知外乱推定性能の確保は、従前

の方法では必ずしも容易ではないため、本方法による有効性が確認できた。ただし、一つの推定器によって、低周波数帯域から非最小位相性による位相遅れが発生する周波数帯域の全域にわたる広帯域化は困難であることも確認できた。そのため、バンドパスフィルタを併用することによって周波数帯域分割し、推定する周波数帯域を制限した複数の未知外乱推定器を複数用いることで広帯域化を図る方法についても提案した。以上の結果については、学術論文として報告し、掲載されている。〔学会発表 - 〕

### (3) 実験装置を用いた提案手法の有効性の検証

上記(1)および(2)の方法の有効性を実証するため、図2に示す軸ねじり実験装置を用いて実験検証を行った。

図2の系を対象として、従来の方法および提案方法によって未知外乱推定器を設計し、その性能について実験検証を行った。

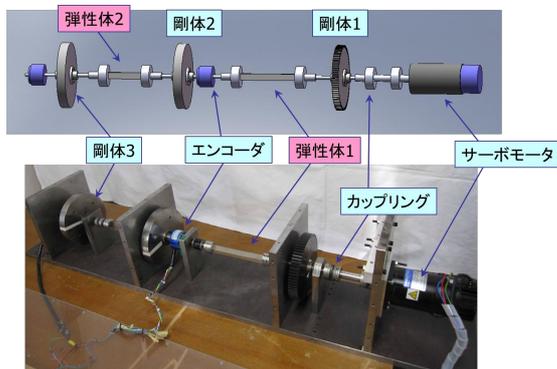


図2 軸ねじり系実験装置

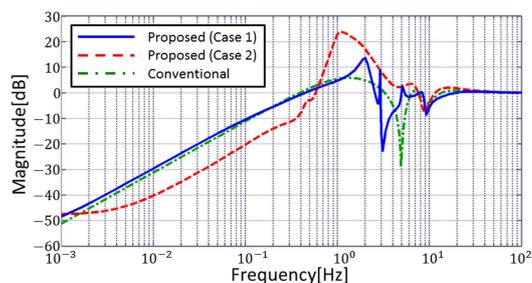


図3 未知外乱推定性能

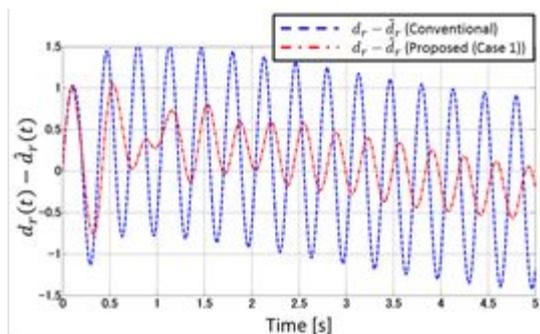


図4 推定誤差

未知外乱推定器は、非最小位相性に伴う位相遅れが存在する周波数帯域（図3における3Hz近傍）において推定性能を向上させたもの（提案方法のCase1）および低い周波数帯域において推定性能を向上させたもの（提案方法のCase2）の2通りの設計方法による結果を図3に示す。図3によれば、指定した周波数帯域において、未知外乱推定性能が向上していることが確認できる。これらの設計は、並列モデルの周波数特性を指定した周波数帯域で制御対象の周波数特性にマッチングさせていることによって実現できる。また、従来の方法による外乱推定性能と比較して、指定した周波数帯域では提案方法による推定性能が良好であることも確認できる。さらに、図4に示すように、外乱推定誤差の時間応答によっても良好な推定性能が得られたことが確認できる。これらの結果については、学術論文として投稿中である。

### 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 7 件)

種村昌也, 山城始之, 千田有一, 丸山直人: 反共振を含む制御対象におけるSACの問題点とPFCの設計による改善, 日本機械学会論文集, Vol.81, No.824, pp.12( Paper No.14-00474), 2015, 査読有

種村昌也, 千田有一: 単純適応制御における周波数応答マッチングに基づくPFCの設計, 計測自動制御学会論文集, Vol.51, No.8, 579-586, 2015, 査読有

Masaya Tanemura, Yuichi Chida, Hiroyuki Kobayashi and Mitsuo Hirata: Parallel Feedforward Model for Improving Estimates of Unknown Disturbances to Non-Minimum-Phase Systems, SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration, Vol. 8, No. 5, pp. 354-361, 2015, 査読有

Masaya Tanemura and Yuichi Chida: PFC design method for SAC based on the stability theorem of the descriptor system and frequency response fitting, Mechanical Engineering Journal, Vol.2(2015), No.3, pp.13(Paper No.mej14-00547), 2015, 査読有

飯田智晴, 千田有一, 池田裕一: 2自由度サーボ系の制御器の切替えによる過渡応答の改善, 日本機械学会論文集, Vol.80, No.817, 11p, 2014, 査読有

小池雅和, 千田有一, 池田裕一: 非線形量子化器を伴う空圧式除振台の制御, 計測自動制御学会論文集, Vol.49, No.4, 488-496, 2013, 査読有

小池雅和, 飯田智晴, 丸山直人, 千田有一, 池田裕一: On-Off 弁を用いた 3 自由

度系空圧式除振台の振動抑制制御, 日本機械学会論文集(C編), 79巻, 803号, 199-211, 2013, 査読有

[学会発表](計14件)

Tomoharu Iida and Yuichi Chida : Feedback control design of a switched system using non-common solutions of a quadratic minimization problem, Proceedings of the 2014 IEEE International Conference on Control Applications (CCA). Part of 2014 IEEE Multi-conference on Systems and Control, 1509-1514, 2014, 査読有, October 8-10, Antibes, France

種村昌也, 千田有一: 最小位相性を保存したモデル低次元化法の提案, 計測自動制御学会中部支部シンポジウム 2014, 13-14, 2014, 9月19日, 信州大学工学部, 長野市

Kenta Narumi, Tomoharu Iida, Yuichi Chida: Controller Design for System with Different Time-Delays Depending on Polarity of Control Input and Application to a Pneumatic Isolation Table, Proceedings of the SICE Annual Conference 2014, 171-174, 2014, 査読有, September 9-12, Hokkaido University, Sapporo, Hokkaido, Japan

Naoto Maruyama, Tomoharu Iida, Yuichi Chida : Transient Response Improvement of Pneumatic Isolation Table by Controller Switching Method, Proceedings of the SICE Annual Conference 2014, 1011-1016, 2014, 査読有, September 9-12, Hokkaido University, Sapporo, Hokkaido, Japan

Masaya Tanemura, Yuichi Chida, Hiroyuki Kobayashi, Mitsuo Hirata : Parallel Feedforward Design Using LMI for Unknown Disturbance Estimation of Non-Minimum Phase System, Proceedings of the SICE Annual Conference 2014, 1998-2003, 2014, 査読有, September 9-12, Hokkaido University, Sapporo, Hokkaido, Japan

Masaya Tanemura, Yuichi Chida, Yuichi Ikeda : PFC design method based on frequency response fitting -Assurance of minimum phase property by stability theorem of descriptor system, Proceedings of the 12th International Conference on Motion and Vibration Control (MoViC2014), 11p(USB Paper No.2B-33), 2014, 査読有, August 4-6, Sapporo Convention Center, Sapporo, Hokkaido, Japan

種村昌也, 千田有一: ある種のBMI条件を伴う2次評価関数最小化問題のLMI化による解法, 第2回計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム, (USB 733-1

Paper No.SY0003/15/0000-1083) 6p, 2014, 3月4日~7日, 東京電機大学, 足立区  
種村昌也, 千田有一, 池田裕一: LMIを用いたPFC設計方法の提案, 第56回自動制御連合講演会, (CR-ROM Paper No.404) 295-300, 2013, 11月16日~17日, 新潟大学, 新潟市

Yuichi Chida, Shota Sekiguchi, Hiroyuki Kobayashi, Yuichi Ikeda : Unknown Disturbance Estimator Design for Non-Minimum Phase Plants Using Parallel Feed-Forward Model, Proceedings of the ASME 2013 Dynamic Systems and Control Conference( DSCC2013), 8p(CD-ROM Paper No.DSCC2013-3774), 2013, 査読有, October 21-23, Palo Alto, California, USA

種村昌也, 千田有一, 池田裕一: LMIによる並列フィードフォワード補償器の設計方法, 計測自動制御学会中部支部シンポジウム 2013, 74-75, 2013, 9月20日, 信州大学工学部, 長野市

小林弘幸, 千田有一: 並列モデルを用いた非最小位相系の未知外乱推定における並列モデル設計に関する研究, 計測自動制御学会中部支部シンポジウム 2013, 84-85, 2013, 9月20日, 信州大学工学部, 長野市

Tomoharu Iida, Yuichi Chida, Masakazu Koike, Yuichi Ikeda : Switching Control Method of Servo System Using Disturbance Observer, Proceedings of the SICE Annual Conference 2013, 691-696, 2013, 査読有, September 14-17, Nagoya University, Nagoya, Japan

Naoto Maruyama, Masakazu Koike, Yuichi Chida, Yuichi Ikeda : Model Predictive Control of Pneumatic Isolation Table with Quantized Input, Proceedings of the SICE Annual Conference 2013, 727-732, 2013, 査読有, September 14-17, Nagoya University, Nagoya, Japan

種村昌也, 千田有一, 池田裕一: SACにおける分散型PSOを用いたPFC設計方法の提案, 第13回「運動と振動の制御」シンポジウム MoViC2013, 10p(USB論文集 Paper No.D27), 2013, 8月27~30日, 九州産業大学, 福岡市

[その他]

ホームページ URL :

<http://www.mech.shinshu-u.ac.jp/laboratories/a/member/chida.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

千田 有一 (CHIDA, Yuichi)

信州大学・学術研究院工学系・教授

研究者番号：00345753

(2)研究分担者

池田 裕一 ( IKEDA, Yuichi )

信州大学・学術研究院工学系・助教

研究者番号：80435396