

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 13 日現在

機関番号：13601

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22560443

研究課題名（和文） 対象システムの動的解析・推定に基づく制御系の高性能化

研究課題名（英文） Performance Improvement of Control Systems by Dynamical Analysis and Estimation of Plant

研究代表者

千田 有一（CHIDA YUICHI）

信州大学・工学部・教授

研究者番号：00345753

研究成果の概要（和文）：

本研究では、制御対象変動や未知外乱など、制御性能に悪影響を与える要因を高精度で推定し、さらにその結果を制御に反映することにより、制御性能の高性能化を実現することを目的とする。そのため、離散時間スライディングモードオブザーバの設計理論を構築し、未知外乱推定に応用可能とした。一方、制御対象の変動の補償には単純適応制御（SAC）の応用を検討し、振動励振を避けた方法を開発した。

研究成果の概要（英文）：

The objective of the present research is to realize high performances of control systems by using precise estimation of plant perturbations or unknown disturbances which are provides adverse affects to the performances. By the research, a discrete-time sliding mode observer design method is developed and it is applied to the unknown disturbance estimation. On the other hand, a modification procedure of SAC(Simple Adaptive Control) is proposed for compensation of plants, it is shown that the procedure can avoid vibration excitation.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2011年度	900,000	270,000	1,170,000
2012年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
総計	2,900,000	870,000	3,770,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・制御工学

キーワード：制御システム，外乱推定，適応制御

## 1. 研究開始当初の背景

フィードバック制御理論は、種々のシステムで応用され、実用化されている。例えば、HDD（Hard Disk Drive）のヘッド位置決め制御問題では、既存のあらゆる設計法が適用検討され、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。この性能限界のブレークスルーのためには、制御対象変動や未知外乱など、制御性能に悪影響を与える要因を動的に推定し、その結果を制御則に反映させることが必須である。このためには、未知外乱を精度良く推定し、適切な補償制御を行えば、かなり

の性能向上が図れることも少なくない。

## 2. 研究の目的

特性変動の主要因となる制御対象の特性変動や未知外乱を高精度に推定し、その結果を制御に反映する準適応的な制御の方法を構築し、従来の制御では実現できなかった高性能制御を実現することを目的とする。そのため、具体的な研究課題として、次の3項目について検討を行う。

(A) FDI フィルタ設計理論に基づく未知外乱推定手法の構築

(B) 制御系の部分的要素における変動量の動的推定手法の構築

(C) 未知外乱/制御要素の部分的変動の高精度推定に基づく制御手法の確立

上記項目が達成できれば、従来の制御では実現できなかった高性能制御を実現できるようになり、産業界、特に HDD 制御系のように性能向上を追求する分野に与えるインパクトは大きい。

## 3. 研究の方法

上記研究目的を達成するため、以下の3点について検討を行った。

(1) 離散時間系スライディングモードオブザーバ (SMO) の設計理論の構築とそれによる未知外乱推定器への応用。

(2) 単純適応制御 (SAC) の機械振動系への応用時の振動励振問題の指摘とそれを解決する方法論の開発。

(3) 未知外乱推定器の活用による過渡応答改善方法の空圧式除振台への応用。

以上の項目について新規方法を開発し、その有効性を実証することによって、研究目的の達成を試みた。

## 4. 研究成果

(1) 離散時間スライディングモードオブザーバの設計方法の構築と未知外乱推定器の設計への応用

FDI フィルタの設計にも応用されている、SMO (Sliding Mode Observer) に基づく未知外乱手法の構築に取り組み、連続時間ベースの設計方法を開発した。これにより、多くの対象において高性能な未知外乱推定器の設計が可能となった。しかしながら、サンプリング周波数が低い場合には、オイラー近似などによる離散化では性能が劣化するばかりか、不安定化することを見いだした。この問題を解決するため、離散時間ベースの設計方法の構築に着手し、設計方法の開発に成功した。さらに、提案方法の性能を検証するため、

ハードディスクヘッドの位置決め制御問題に適用し、連続時間系設計法のオイラー近似における限界を明確化し、新規開発した離散時間系スライディングモードオブザーバの設計理論によれば、粗いサンプリング周期においてもその性能が保持されることを示した。また、種々の機械系への応用も実施し、軸ねじり機械振動系への適用結果によれば、従来の手法である外乱オブザーバ等に比較して高精度な推定が可能であることを明らかにした。結果の一例を図1に示す。その結果は、IFAC のシンポジウム、および計測自動制御学会において研究発表を行った。さらに、IFAC World Congress 2011 に論文採択された〔雑誌論文〕⑤、⑧。

また、実験結果によれば、量子化誤差による悪影響を受ける場合があるため、その対策について検討を行った。その結果、制御系設計時にハイパスフィルタを併用することによって、劣化を軽減できることを見いだした。その結果は、第12回「運動と振動の制御」シンポジウムで研究発表を行った。さらに、ほか、IEEE の transaction on Control System Technology に論文投稿中である。

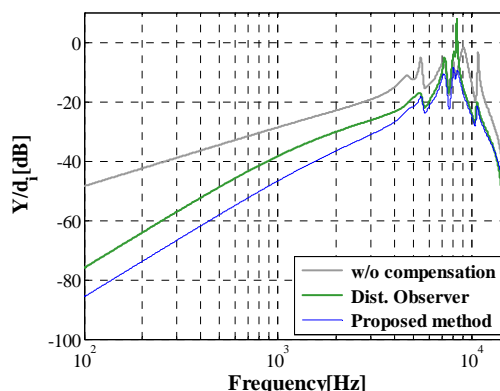
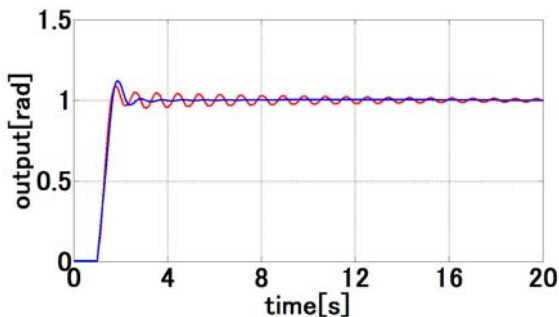


図1 ハードディスクドライブ系における未知外乱推定誤差の周波数特性 (サンプリング 30kHz) (青: 提案方法, 緑: 従来方法)

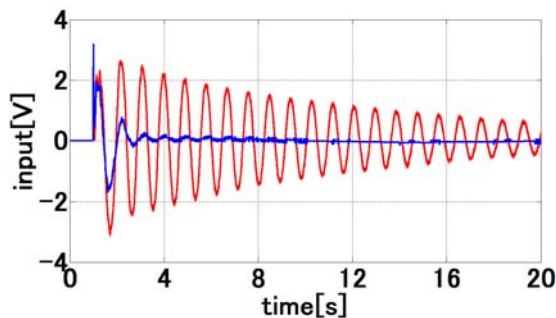
(2) 単純適応制御 (SAC) の機械振動系への応用時の振動励振問題の指摘とそれを解決する方法論の開発。

実用的な適応制御理論の手法として広く知られている SAC (Simple Adaptive Control) に着目し、SAC の応用による手法の確立を目指した。その結果、SAC を機械振動系に適用した場合の問題点として、反共振周波数の変動が制御性能に悪影響を及ぼすことを見いだした。さらに、適応型ノッチフィルタを規範モデルに組み込むことで性能劣化を防ぐ方法を提案し、機械振動系実験装置への応用によってその有効性を検証した。その結果は、

計測自動制御学会において研究発表を行った〔学会発表〕⑮). また, さらに性能を改善させるため, 適応ノッチフィルタの併用に代えて, SAC の制御構造を変更すると共に, 並列フィードフォワード補償器の設計方法を工夫することによって性能改善する方法を開発した. この方法によれば, より簡単な構造でより効果的な性能を実現することができる〔学会発表〕⑨, ⑩). ただし, 並列フィードフォワードの設定には試行錯誤的な部分がこのされていた. その点についても, 最適化手法を用いることによってシステムティックな設定方法として開発できた. 応答の一例を図2に示す. 従来のSACでは制御入力に振動的な応答を励振し, その結果として制御出力応答が振動的となる. それに比較して, 開発した方法によれば制御入力の振動を除去することができ, 安定性の良い制御出力的が得られている.



(a) 制御出力応答 (青: 提案法, 赤: 従来法)



(b) 制御入力応答 (青: 提案法, 赤: 従来法)

図2 SACによる応答の比較

(3) 未知外乱推定器の活用による過渡応答改善方法の空圧式除振台への応用.

これまで開発した未知外乱推定器の設計方法を過渡応答の改善に適用することを検討した. 制御対象としては, 空圧式除振台を想定した. 最終目標としては空圧式除振台に代表されるオン・オフ駆動系における外乱応答の除去にあるが, まずは空圧式除振台そのものの制御から着手した. その結果, リアプノフ関数を評価関数とした切替制御則によっ

てシステムの有界性を保証し, 従来法に比較して制御性能の改善が見られることを確認した〔雑誌論文〕①~④). さらに, 未知外乱推定器の活用による過渡応答の改善についても検討を行い, レギュレータとサーボ系を適切に切り替えることによって応答劣化の低減が可能であることを示した〔学会発表〕④, ⑧).

## 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8件)

- ①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
- ②M. Koike and Y. Chida, Rapid Vibration Attenuation and Height Level Compensation Control for a Pneumatic Isolation Table with Quantized Input, Proceedings of the 2012 International Conference on Advanced Mechatronic Systems, 707-712, 2012, 査読有
- ③M. Koike and Y. Chida, Multivariate Control Design Considering Quantization Error and Input Time-Delay for Pneumatic Isolation Table, Proceedings of JSME 2012 11th Motion and Vibration Conference (DSCC2012-MOVIC2012), 10p, 2012, 査読有
- ④小池雅和, 中澤裕司, 千田有一, 池田裕一, 安田悦郎, On-Off 操作と入力むだ時間の補償による空圧式除振台の高速振動抑制制御, 日本機械学会論文集 (C 編), 77 巻, 48-61, 2011, 査読有
- ⑤Shota Ohyachi, Yuichi Chida, Yuichi Ikeda, Unknown Disturbance Estimation and Compensation by a Discrete-Time Nonlinear Observer and Its Application to a Dual-Stage Actuator System, Preprints of the 18th IFAC World Congress, 4067-4075, 2011, 査読有
- ⑥Yuichi Ikeda, Takashi Nakajima and Yuichi Chida, Vehicular slip ratio control using nonlinear control theory, Preprints of the 18th IFAC World Congress, 8403-8408, 2011, 査読有
- ⑦鷹合仁司, 千田有一, 櫻井希美, 磯辺剛司, 保守性を低減化したロバスト制御による発電用風車のピッチ角制御, 計測自動制御学会論文集, 46 巻, 486-492, 2010, 査読有

⑧ Yoshihito Kinoshita, Yuichi Chida, Yuichi Ikeda and Shota Ohyachi, Unknown disturbance estimation by sliding mode observer and compensation control for a dual-stage actuator system, Proceedings of the 5th IFAC Symposium on Mechatronic Systems (Mechatronics '10), 55-62, 2010, 査読有

[学会発表] (計 15 件)

- ① 飯田智晴, 伊藤冬樹, 小池雅和, 千田有一, 空圧式除振台における on-off 弁とサーボ弁を併用したハイブリットシステムの制御, 計測自動制御学会 第 13 回制御部門大会, 2013.3.5, 福岡
- ② 高田貴之, 千田有一, フィードバック制御による可変構造アームの制振制御, 計測自動制御学会中部支部シンポジウム 2012, 2012.9.25, 長野
- ③ 池田裕一, 矢沢駿弥, 千田有一, スライディングモードオブザーバと外乱オブザーバを用いた車両横力推定, 計測自動制御学会中部支部シンポジウム 2012, 2012.9.25, 長野
- ④ 丸山直人, 小池雅和, 千田有一, 入力むだ時間と on-off 操作を伴う 3 自由度系空圧式除振台の多変数制御, 計測自動制御学会中部支部シンポジウム 2012, 2012.9.25, 長野
- ⑤ 飯田智晴, 小池雅和, 千田有一, 池田裕一, サーボ系における過渡応答改善方法の提案と空圧式除振台への応用, 日本機械学会 Dynamics and Design Conference 2012, 2012.9.18, 横浜
- ⑥ Masakazu Koike and Yuichi Chida, Active Control Design by Finite Input Switching for a Pneumatic Isolation Table, MIPE2012, 2012.6.18, Santa Clara, California, USA
- ⑦ 山城始之, 千田有一, 反共振を含む機械振動系に対する単純適応制御系設計, 第 12 回計測自動制御学会制御部門大会, 2012.3.14, 奈良
- ⑧ 山城始之, 千田有一, 反共振を含む機械振動系に対する単純適応制御系設計, 計測自動制御学会中部支部シンポジウム 2011, 2011.9.30, 上田
- ⑨ 後藤大介, 池田裕一, 千田有一, SMO を用いた自動車の前後輪アクティブ操舵制御, 計測自動制御学会中部支部シンポジウム 2011, 2011.9.30, 上田
- ⑩ 後藤大介, 池田裕一, 千田有一, センサノイズを考慮した車両のアクティブ操舵制御-スライディングモードオブザーバによる外乱推定手法を用いたアプローチ-, 第 12 回「運動と振動の制御」シンポジウム MoViC2011, 2011.6.29, 長野

⑪ 太田修司, 大谷内翔太, 千田有一, 池田裕一, 離散時間非線形オブザーバを用いた回転機械系の未知外乱推定, 第 12 回「運動と振動の制御」シンポジウム MoViC2011, 2011.6.29, 長野

⑫ 大谷内翔太, 千田有一, 池田裕一, 離散時間非線形オブザーバを用いた未知入力外乱推定と機械振動系への応用, 第 11 回計測自動制御学会 制御部門大会, 2011.3.16, 沖縄

⑬ 小柳高士, 千田有一, 機械振動系への SAC 応用上の問題点とその解決手法について, 第 11 回計測自動制御学会 制御部門大会, 2011.3.16, 沖縄

⑭ 大谷内翔太, 千田有一, 池田裕一, 離散時間非線形オブザーバを用いた HDD 制御系の未知外乱推定, 第 53 回自動制御連合講演会, 2010.11.4, 高知

⑮ 大谷内翔太, 千田有一, 池田裕一, 離散時間非線形オブザーバを用いた未知外乱推定, 計測自動制御学会中部支部シンポジウム 2010, 2010.10.29, 上田

[その他]

ホームページ URL :

<http://chida-lab.shinshu-u.ac.jp/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

千田 有一 (CHIDA YUICHI)

信州大学・工学部・教授

研究者番号 : 00345753