

令和 6 年 6 月 19 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究

研究期間：2021～2023

課題番号：21K14179

研究課題名（和文）システム同定と機械学習の連携による繰り返し学習制御の位置決め性能と汎化性能の両立

研究課題名（英文）Connecting System Identification and Machine Learning for Achieving Both Performance and Generalization Capability in Iterative Learning Control

研究代表者

大西 亘（Ohnishi, Wataru）

東京大学・大学院工学系研究科（工学部）・准教授

研究者番号：60823888

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,600,000円

研究成果の概要（和文）：位置決め制御系の性能向上のため、(1)フィードバック制御器の高帯域化、(2)高精度フィードフォワード制御、(3) Iterative Learning Control (ILC)、を統合的に取り組んだ。(1)においては、周波数応答データ直接駆動外乱オブザーバ設計、(2)においては、非因果的制御入力を用いた昇圧コンバータの精密出力制御、(3)においては、状態追従ILCの提案、汎化性能向上のための機械学習との連携、を行った。研究期間全体を通して、非因果的制御入力軌道追従制御問題へ非常に有効であることが明らかになったため、最終年度前年度応募によって、今後は基盤研究(B)において、計画を発展させる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

(1)フィードバック制御器のさらなる高帯域化、(2)モデルを正確に捉えたフィードフォワード制御、(3) ILC、を統合的に取り組み、目標値追従性能を向上させる研究を行った。システム同定によって得られた周波数特性データを、(1)-(3)の制御系設計とどう連携させるか、という点では、周波数特性直接駆動で外乱オブザーバやILCを設計する枠組みを提示したことは、設計コストの低減に役立つ成果である。システム同定、ILC、機械学習を連携させる点では、機械学習における過学習をいかに抑止するかが課題であることが示されたと同時に、非因果的な制御入力有効であることが示された。

研究成果の概要（英文）：To improve the performance of positioning control systems, we have worked on (1) high-bandwidth feedback controllers, (2) high-precision feedforward control, and (3) Iterative Learning Control (ILC), in an integrated manner. In (1), frequency response data direct-drive disturbance observer design, (2) precise output control of boost converters using non-causal control inputs, and (3) a state-tracking ILC proposal and ILC integration with machine learning to improve task flexibility. Since it became clear throughout the research period that non-causal control input is very effective for the trajectory tracking control problem, we will develop the plan in the Grant-in-Aid for Scientific Research(B) by applying in the final year of the project.

研究分野：制御工学

キーワード：フィードバック制御 フィードフォワード制御 学習制御 周波数応答データ 凸最適化 非因果的制御入力

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

半導体製造装置・液晶製造装置や工作機械では、「ムーアの法則」に知られているように、製品の加工精度がますます微細化している。生産性と加工精度を両立させるため、ステージの大型化と高速高精度位置決めが求められている。ステージが大型化すると共振周波数が低下し、フィードバック(FB)制御器の高帯域化難しい。そのため、軌道追従のためには、(1) フィードバック制御器のさらなる高帯域化、(2) モデルを正確に捉えたフィードフォワード制御、(3) モデルでキャプチャしきれなかったダイナミクスに対しては、Iterative Learning Control (ILC)が有効である。

2. 研究の目的

本研究では、制御性能を統合的に向上させるべく、上述の(1)-(3)に取り組んだ。

(1) フィードバック制御器の高帯域化

産業界における熟練技術者の不足により、サーボシステムにおけるフィードバック制御器のゲイン調整の自動化が望まれている。ノンパラメトリックモデルである、周波数応答データを用いた制御器最適設計法としては、遺伝的アルゴリズム[1], Nelder-Mead 法[2], 粒子群最適化[3]などが提案されている。凸最適化に基づく手法は、望みの開ループ特性との差を最小化する手法[4]や、Concave-Convex Procedure による逐次線形化(Sequential Convex Programming: SCP)による手法[5]が提案されている。一般に、制御器パラメタの最適化問題は、非凸問題である。一方で、それを凸近似すると、その近似問題においては局所最適解が大域最適解であるという特性や、商用・非商用のソルバが充実しているため、凸化する研究が多くなされている。

(2) モデルを正確に捉えたフィードフォワード制御器

研究代表者らは、非最小位相特性を持つ線形時不変システムに対して、非因果的は制御入力(Preactuation)の適用により、目標値追従特性が向上することを示した[6]。一方で、直流と直流を変換するパワエレ回路である昇圧コンバータは、非線形かつ非最小位相系だと知られている。昇圧コンバータに対して、急激に制御入力である Duty 比を変更すると、アンダーシュートが生じるため、従来の多くの制御は遅いフィードバック制御に頼っていた。高速・高精度な出力電圧制御を実現できれば、素子の小型化やモータ駆動の高効率化が期待できる。

(3) Iterative Learning Control (ILC)による高性能化

ILCの周波数領域設計(Frequency domain ILC)により、離散時間制御系におけるサンプル点上での制御性能が向上することが知られている。しかし、サンプル点間の応答が劣化する課題、そしてタスク汎化性能に欠けるという課題がある。この両者は、ILCの広汎な応用を妨げている要因の一部である。

3. 研究の方法

(1) フィードバック制御器の高帯域化

我々の研究成果[7]においては、2次Qフィルタを持つ外乱オブザーバの凸最適化に基づく、システム同定直接駆動の自動設計法を提案した。外乱オブザーバは、図1のような構成をしており、外乱を推定・補償することで、プラントのノミナル化と高い外乱抑圧特性をもたせるものであり、市販のサーボドライバにも導入されている。本手法は、非凸な制約条件で定式化される外乱オブザーバの設計問題について、凸近似を行うことで、線形行列不等式(Linear Matrix Inequality)として定式化するものであり、一般的なソルバを用いて最適化することができる。さらに本手法は、任意次数Qフィルタ[8]や、ノミナルプラントとQフィルタの同時最適化[9]へと発展し、図2に示す位置決めステージで有効性を実証した。

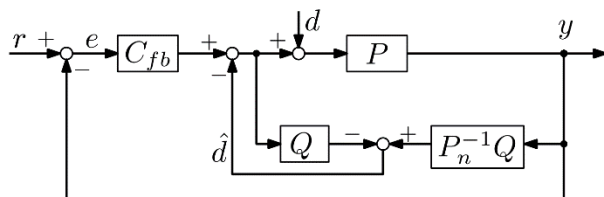


図1：外乱オブザーバのブロック図[9]

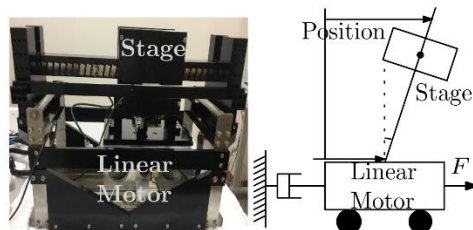


図2：精密位置決め実験ステージ[9]

## (2) モデルを正確に捉えたフィードフォワード制御器

研究代表者らは、文献[10]において、非線形モデルである状態空間平均化モデルに対して、それをそのまま正確な逆系を設計することを提案した。これは非最小位相系であるため、素直に逆系を構成すると、不安定となり制御入力が無限大に発散する。これに対し、研究代表者らは、非線形微分方程式を、時間軸逆に非線形に解くことにより、指令電圧に完全追従するような制御入力を生成することに成功した。

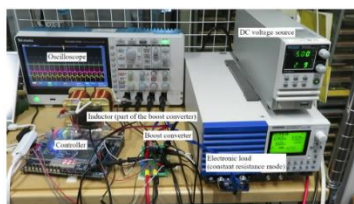
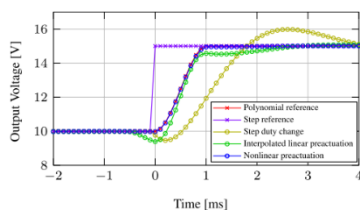
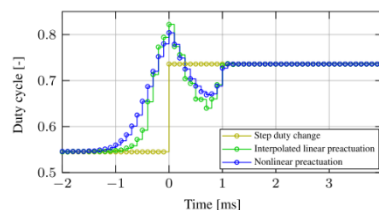


Fig. 8. Experimental bench of a boost converter.



(b) One-period averaged output voltages of (a) and reference voltage trajectories



(f) Input duty cycles

図 3 左: 昇圧コンバータ[10]

図 3 中: 出力電圧[10]

図 3 右: 制御入力[10]

## (3) Iterative Learning Control (ILC)による高性能化

研究代表者らは、文献[11]において、出力でなく状態変数に追従する ILC を提案した。図 4 に示すように、位置だけでなく速度にも追従するために、サンプル点間誤差を抑圧できている。また、設計手法としては Frequency domain ILC と同じく、周波数応答データから Iteration domain の安定性を判別できるという利点がある。

また文献[12]においては、ILC の汎化性能向上を機械学習を用いて行った。ILC によって得られた制御入力を教師データに、Non-causal neural networks の導入が実際に効果があることを、産業用プリンタを用いた実験により示した。

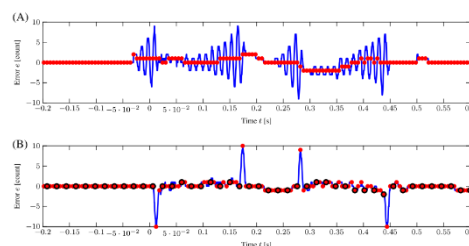


FIGURE 12 Tracking error comparison of the best iteration. The presented state-tracking ILC outperforms the output-tracking ILC in intersample behavior (blue solid line). The output-tracking ILC achieves a small tracking error at every  $T_s$  (red filled circle) at the cost of oscillating intersample behavior. The state-tracking ILC achieves a small tracking error at every  $nT_s$  (black open circle), and the oscillating intersample behavior is not observed. It is achieved by the concept of the state-tracking of the presented ILC. (A) Output tracking ILC at iteration 29. (B) State tracking ILC at iteration 32

図 4: 出力追従 ILC と、提案する状態追従 ILC の比較[11]

## 4. 研究成果

第 3 章で述べたように、(1) フィードバック制御器のさらなる高帯域化、(2) モデルを正確に捉えたフィードフォワード制御、(3) Iterative Learning Control (ILC), を統合的に取り組み、目標値追従性能を向上させる研究を行った。

システム同定によって得られた周波数特性データを、(1)-(3)の制御系設計とどう連携させるか、という点では、周波数特性直接駆動で外乱オブザーバや ILC を設計する枠組みを提示したことは、設計コストの低減に役立つ成果である。システム同定、ILC、機械学習を連携させる点では、機械学習における過学習をいかに抑止するかが課題であることが示されたと同時に、非因果的な制御入力が有効であることが示された。

研究期間全体を通して、非因果的信号処理、そして非因果的制御入力が、非最小位相特性をもつことが多い位置決め制御系への軌道追従制御問題へ非常に有効であることが明らかになった。機械学習や学習制御の従来研究において、この点が十分に議論されているとは言えない。そのため、研究計画最終年度前年度応募によって、今後は基盤研究 (B) (研究課題/領域番号 23H01431) において非因果的制御入力に着目し、計画を再構築し、研究を進めていく。

[1] K. S. Tang, K. F. Man, G. Chen, and S. Kwong, "An optimal fuzzy PID controller," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 48, no. 4, pp. 757–765, 2001

[2] S. Lee, N. Marsolan, T. Sun, S. Lee, and B. Kilian, "Application of Self-Optimizing Controllers to Variable Time-Delay Processes," in American Control Conference, pp. 1275–1280, 1985.

[3] Z.-L. Gaing, "A Particle Swarm Optimization Approach for Optimum Design of PID Controller in AVR System," IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 19, no. 2, pp. 384–391, 2004.

[4] A. Karimi and G. Galdos, "Fixed-order  $H_\infty$  controller design for nonparametric models by convex optimization," Automatica, vol. 46, no. 8, pp. 1388–1394, 2010.

[5] A. Yuille and A. Rangarajan, "The Concave-Convex Procedure," Neural Computation, vol. 15, no. 4, pp. 915–936, 2003.

[6] W. Ohnishi, T. Beauduin, and H. Fujimoto, "Preactuated Multirate Feedforward Control for Independent Stable Inversion of Unstable Intrinsic and Discretization Zeros," IEEE/ASME Trans. Mechatronics, vol. 24, no. 2, pp. 863–871, 2019, doi: 10.1109/TMECH.2019.2896237.

- [7] X. Wang, W. Ohnishi, and T. Koseki, "Bandwidth Maximization of Disturbance Observer Based on Experimental Frequency Response Data," *SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration*, vol. 13, no. 6, pp. 257–264, 2020.
- [8] X. Wang, W. Ohnishi, and T. Koseki, "Linear Matrix Inequality Based Data-driven Disturbance Observer Design: Application to a Non-Minimum Phase Motion Stage", *IEEJ Journal of Industry Applications*, Vol. 11, No.2, pp. 334-340, 2022.
- [9] X. Wang, W. Ohnishi, and T. Koseki, "Frequency Response Data-based Disturbance Observer Design: With Application to a Non-minimum Phase Motion Stage", *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Vol. 27, No.6, pp. 5318-5326, 2022.
- [10] 三好正太, 大西亘, 古関隆章, 佐藤基, "非因果的非線形フィードフォワードによる昇圧コンバータの出力電圧軌道精密追従制御法," *電気学会論文誌 D (産業応用部門誌)*, vol. 143, no. 3, pp. 242-255, 2023.
- [11] W. Ohnishi, N. Srijbosch, and T. Oomen, "State-Tracking Iterative Learning Control in Frequency Domain Design for Improved Intersample Behavior," *Int. J. Robust Nonlinear Control*, no. August, pp. 1–19, 2022, doi: 10.1002/rnc.6511.
- [12] L. Aarnoudse et al., "Control-relevant neural networks for feedforward control with preview: Applied to an industrial flatbed printer," *IFAC J. Syst. Control*, p. 100241, Jan. 2024, doi: 10.1016/j.ifacsc.2024.100241.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Wataru Ohnishi, Nard Strijbosch, Tom Oomen	4. 巻 33
2. 論文標題 State-Tracking Iterative Learning Control in Frequency Domain Design for Improved Intersample Behavior	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 International Journal of Robust and Nonlinear Control	6. 最初と最後の頁 4009 - 4027
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/rnc.6511	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 該当する

1. 著者名 Xiaoke Wang, Wataru Ohnishi, Takafumi Koseki	4. 巻 27
2. 論文標題 Frequency Response Data-based Disturbance Observer Design: With Application to a Non-minimum Phase Motion Stage	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE/ASME Transactions on Mechatronics	6. 最初と最後の頁 5318 - 5326
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TMECH.2022.3176138	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 Xiaoke Wang, Wataru Ohnishi, Takafumi Koseki	4. 巻 11
2. 論文標題 Linear Matrix Inequality Based Data-driven Disturbance Observer Design: Application to a Non-Minimum Phase Motion Stage	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEJ Journal of Industry Applications	6. 最初と最後の頁 334 - 340
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1541/ieejjia.21005770	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 三好 正太, 大西 亘, 古関 隆章, 佐藤 基	4. 巻 143
2. 論文標題 非因果的非線形フィードフォワードによる昇圧コンバータの出力電圧軌道精密追従制御法	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 電気学会論文誌D (産業応用部門誌)	6. 最初と最後の頁 242 ~ 255
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1541/ieejias.143.242	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8件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 4件）

1. 発表者名 Kentaro Tsurumoto, Wataru Ohnishi, Takafumi Koseki, Nard Strijbosch, Tom Oomen
2. 発表標題 Non-causal state estimation for improved state tracking in iterative learning control
3. 学会等名 Modeling, Estimation, and Control Conference (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Xiaohe Wang, Wataru Ohnishi, Takenori Atsumi
2. 発表標題 Design of loop shaping filters based on convex optimization guaranteeing robust performance
3. 学会等名 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 佐々木怜音, 大西亘, 古関隆章
2. 発表標題 リニアモータにおける状態変数依存外乱のガウス過程を用いた補償実験
3. 学会等名 電気学会メカトロニクス制御研究会資料 (電気学会研究会資料)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Xiaohe Wang, Wataru Ohnishi, Takenori Atsumi
2. 発表標題 凸最適化とRBode plotを用いた最適ループ整形法の提案と2段アクチュエータHDDベンチマーク問題への適用
3. 学会等名 電気学会メカトロニクス制御研究会資料 (電気学会研究会資料)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 弦本健太郎, 大西亘, 古関隆章
2. 発表標題 基底関数と周波数領域設計を組み合わせたタスク柔軟で高精度なILCの基礎検討
3. 学会等名 電気学会メカトロニクス制御研究会資料(電気学会研究会資料)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 XiaoKe Wang, Wataru Ohnishi, Takenori Atsumi
2. 発表標題 ロバスト性能を満たす高次制御器のRCBode plotの支援に基づくデータ駆動設計~HDDベンチマーク問題への適用~
3. 学会等名 電気学会産業応用部門大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kentaro Tsurumoto, Wataru Ohnishi, Takafumi Koseki, Nard Strijbosch, Tom Oomen
2. 発表標題 Improved state estimation by non-causal state observer
3. 学会等名 8th IEEJ international workshop on Sensing, Actuation, Motion Control, and Optimization (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 XiaoKe Wang, Wataru Ohnishi and Takafumi Koseki
2. 発表標題 Data-based simultaneous design of plant model and robustness filter in disturbance observer
3. 学会等名 American Control Conference (国際学会)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 昇圧コンバータ	発明者 大西 巨, 三好 正 太, 古関 隆章	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、2022044719	出願年 2022年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

-

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
---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------