

解 説

2025 年度 SMC 高田賞を受賞して*

小杉 彩加**

* 2026 年 6 月 5 日原稿受付

**芝浦工業大学大学院，理工学研究科，国際理工学専攻，〒337-8570 埼玉県さいたま市見沼区深作 307

1. はじめに

この度は名誉ある SMC 高田賞を賜り，誠に光栄である．受賞論文は「Ultra local モデルに基づくモデルフリー制御器パラメータの同時最適化手法の提案と水圧人工筋への適用」であり，本論文の共著者である芝浦工業大学の伊藤和寿教授と鶴原理司殿をはじめ，本研究にご協力いただいた関係者の皆様に心より感謝申し上げる．本稿では受賞論文の研究について，その背景と概要を紹介させていただく．

2. 研究背景

水圧人工筋は軽量，安価，高パワー密度などの利点を有するアクチュエータである．さらに，本研究では，水道水圧を直接利用するためポンプを必要とせず，省エネルギーかつ環境負荷が小さいという特長を持つ．一方で，水圧人工筋は摩擦などに起因する強い非対称ヒステリシス特性を有しており，高精度なモデル化や制御器設計が容易ではない．そのため，数学モデルに基づく制御手法では，モデル構築やパラメータ同定に多大な工数を要することが課題となっている．

このような背景から，近年では，少ない実験データを用いて直接制御器を設計するデータ駆動制御が注目されている．データ駆動制御には，Virtual Reference Feedback Tuning ²⁾ (以下，VRFT)や Fictitious Reference Iterative Tuning ³⁾ のようなあらかじめ与えられた制御器構造のパラメータを入出力データから調整する手法と，Model Free Control ⁴⁾ (以下，MFC)や Model Free Adaptive Control ⁵⁾ のように制御則そのものを構成または更新する手法が存在する．特に MFC は，誤差ダイナミクスから導出される安定制約条件に基づいて制御器パラメータを設計することで，閉ループ系の漸近安定性を保証できるという特長を有する．著者らは，既報 ⁶⁾ にて MFC と VRFT を組み合わせた制御手法を提案し，水圧人工筋制御に適用した．既報では，MFC の安定制約条件を満たす範囲内で設計パラメータの最適化を行ったが，複数の設計パラメータを段階的に調整していたため，パラメータ間の相互作用を十分に考慮できず，必ずしも最適なパラメータの組合せが得られるとは限らないという課題が残されていた．

そこで本研究では，VRFT を用いた MFC パラメータの同時最適化手法を提案した．一方で，MFC の全パラメータを同時に最適化することは容易ではない．これは，各パラメータの大きさや感度が大きく異なるためである．この違いは最適化計算を困難にし，適切な解が得られにくくなる要因となる．そこで提案手法では，パラメータのスケール差を補償するスケーリング行列を導入し，同時最適化を可能にした．最後に，水圧人工筋を用いた実験により提案手法の有効性を検証した．実験では，正弦波目標値に対する追従性能を評価するとともに，最適化時とは異なる負荷条件下で実験を行い，提案手法のロバスト性についても評価した．

3. MFC の概要

MFC では Ultra-local モデル(以下，ULM)に基づきシステムを表現する ⁴⁾．MFC では，各サンプリングタイムにおいて，システムを ULM に近似する．離散時間系での一次遅れ ULM の構造を式(1)に示す．

$$y(k+1) = y(k) + F(k) + \alpha u(k) \quad (1)$$

ただし， $y(k)$ は出力， $u(k)$ は制御入力， $F(k)$ はモデル化されない動特性および外乱， α は MFC において重要な設計パラメータ，である．内部制御器に PI 制御器を用いるとき，制御入力は以下で与えられる．

$$u(k) = \frac{1}{\alpha} \left\{ -\hat{F}(k) + y_r(k+1) - y_r(k) - K_p e(k) - \frac{K_i T_s}{1-z^{-1}} e(k) \right\} \quad (2)$$

ただし, $y_r(k)$ は目標値, 誤差を $e(k) = y_r(k) - y(k)$, $[K_p, K_i]$ は PI ゲイン, T_s はサンプリングタイム, $\hat{F}(k) = y(k) + y(k-1) - \alpha u(k-1)$ とする. 式(1), (2)より, 追従誤差の動特性が式(3)として得られる.

$$e(k+1) - (2 + K_p + K_i T_s)e(k) + (1 + K_p)e(k-1) - F(k) + \hat{F}(k) = 0. \quad (3)$$

式(3)より導かれる特性多項式の根が単位円内に存在するとき, MFC は閉ループ系の漸近安定性を保証する⁴⁾.

4. VRFT-MFC の概要

VRFT は一組の初期入出力データのみを用いて制御器の設計を行うデータ駆動型制御手法の一つである. 既報⁶⁾にて提案した, 安定制約条件下において VRFT-MFC の設計パラメータを段階的に最適化する手法の設計手順を Algorithm 1 に示す.

Algorithm 1 VRFT-MFC design procedure

Step 1 Obtain a single set of I/O data $\{u_0(k), y_0(k)\} (k = 1, \dots, N)$.

Step 2 Calculate:

- Assume that the virtual reference $\bar{r}(k)$ equals $y_r(k)$ and obtain as follows :

$$y_r(k) = \bar{r} \triangleq M^{-1}y_0(k), \quad (4)$$

where reference model $M(z)$ is designed except $M(z) = 1$.

- Assume that the virtual tracking error equals $e(k)$ and calculate as follows :

$$e(k) = \bar{e}(k) \triangleq (M^{-1} - 1)y_0(k). \quad (5)$$

- The virtual input is obtained as follows :

$$\bar{u}(k) = \frac{1}{\alpha} \left\{ -\hat{F}(k) + \bar{r}(k+1) - \bar{r}(k) - K_p \bar{e}(k) - \frac{K_i T_s}{1 - z^{-1}} \bar{e}(k) \right\}. \quad (6)$$

Step 3 Filter each signal by prefilter $L(z)$ ¹⁾:

$$e_L(k) = L(z)\bar{e}(k), \quad (7)$$

$$u_L(k) = L(z)u_0(k). \quad (8)$$

Step 4 Calculate θ, α by minimizing the following evaluation function:

$$J_{PI}^N(\theta) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \left\{ (u_L(k) - \bar{u}(k))^2 + u_{PI}^2(k) \right\}, \quad (9)$$

$$J_{\alpha}^N(\alpha) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \left\{ (u_L(k) - \bar{u}(k))^2 + \Delta \bar{u}(k)^2 \right\}, \quad (10)$$

where $\theta = [K_p, K_i]$, $\Delta \bar{u}(k) \triangleq \bar{u}(k) - \bar{u}(k-1)$,

$$u_{PI}(k) = \frac{1}{\alpha} \left[\left\{ -\hat{F}(k) + \bar{r}(k+1) - \bar{r}(k) \right\} + \left\{ K_p \bar{e}(k) + \frac{K_i T_s}{1 - z^{-1}} \bar{e}(k) \right\} \right]. \quad (11)$$

5. 提案手法

本研究では, 安定条件を考慮した VRFT を用いて, MFC の PI ゲインおよび α を同時に最適化する. 本手法の概念図を図 1 に示す. 設計手順は先述の Algorithm 1 と同様であるが, 以下の新たな評価関数を設計する.

$$J_{sim}^N(\theta) = \frac{1}{N} \left\{ (u_L(k) - \bar{u}_{sim}(k))^2 + \omega u_{PI}^2(k) \right\}, \quad (12)$$

s. t. Case 1 If $K_p(2 + K_p + K_p K_i) > 0$, then

$$-2 < K_p < 0,$$

$$K_i < 0, \quad K_i > -\frac{1}{T_s}(K_p + 2). \quad (13)$$

Case 2 If $K_p(2 + K_p + K_p K_i) < 0$, then

$$-2 < K_p < 0,$$

$$K_i > -\frac{2}{T_s}(K_p + 2), \quad K_i < -\frac{1}{T_s}(K_p + 2). \quad (14)$$

ただし,

$$\bar{u}_{sim}(k) \triangleq [\alpha \quad K] \lambda \begin{bmatrix} -\hat{F}(k) + \bar{r}(k+1) - \bar{r}(k) \\ e_L(k) \\ \frac{T_s}{1 - z^{-1}} e_L(k) \end{bmatrix}, \quad (15)$$

とし、 ω は $u_{PI}(k)$ の重み、 $K = [K_p, K_i]$ 、 $\text{diag } \lambda = [\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3]$ はスケーリング行列である。なお、 u_{PI} はPI ゲインが過度に小さくなることを防ぐため導入する。提案手法では、式(12)を最小化することで、 α および K を同時に最適化する。

6. 実験条件および実験結果

6.1 実験条件

水圧人工筋を用いて、提案手法により設計した制御器の制御性能と、負荷変化に対するロバスト性の評価を行う。本実験では、図2に示す水圧回路を持つ水圧人工筋を用い、0-10 Vの入力電圧制約を持つ。無負荷状態でVRFTを用いてMFC内のPIゲインおよび α を同時に最適化し、段階的な最適化を行った場合⁶⁾と制御性能を比較する。併せて、負荷変化に対するロバスト性を評価するために、無負荷状態で最適化した設計パラメータを使用し、有負荷状態(44 N)での制御実験結果も比較する。離散化したVRFTの参照モデルと重み関数はそれぞれ $M(z)=0.0095/(z-0.99)$ 、 $W(z)=0.0095/(z-0.99)$ とした。調整パラメータは、提案手法において $\omega = 3.3 \times 10^{-3}$ 、 $\lambda = [1/150, 1, 1]$ 、従来手法⁶⁾において $[\omega_{PI}, \omega_\alpha] = [1.08, 0.008]$ とそれぞれ試行錯誤的に決定した。VRFTで最適化した結果、提案手法の設計パラメータは $[\alpha, K_p, K_i] = [0.91, -0.0017, -0.0078]$ が得られ、このとき特性多項式の根の絶対値は $[0.9915, 0.9915]$ である。従来手法は $[\alpha, K_p, K_i] = [1.52, -0.0019, -0.021]$ が得られ、このとき根の絶対値は $[0.9904, 0.9904]$ である。したがって、両手法において安定制約条件を満たしつつ最適化が可能であることが確認された。また、目標値は振幅20 mm、オフセット40 mm、周波数0.3 Hzの正弦波である。

6.2 実験結果

設計時と実験時の負荷が異なるとき、および実験中に負荷を変えたときの実験結果をそれぞれ図3および図4に示す。さらに、二乗平均平方根誤差(以下、RMSE)は、提案手法において、無負荷:1.20 mm、有負荷:1.33 mm、従来手法において、無負荷:2.07 mm、有負荷:2.21 mmとなった。図3、4およびRMSEの結果より、全ての条件において提案手法の方が高い性能を有することがわかる。これは、同時最適化により設計パラメータ同士の最適性が改善したためと考えられる。特に、提案手法と従来手法の間において、 α の値が最も異なることから、 α が制御性能に及ぼす影響は大きいと考えられる。また、有負荷実験では両手法において0.1 mm~0.2 mm程度の劣化がみられるが、十分に小さい。したがって、MFCは無負荷状態で設計パラメータを最適化した場合も、有負荷状態において高い制御性能を維持しており、負荷変化に対し非常に高いロバスト性を有すると言える。MFCは、第2節で示す通り、負荷変化のような外乱を $F(k)$ としてULMに取り込む。したがって、 $\hat{F}(k)$ の推定が正しく行われている場合、MFCは外乱の影響に対してロバストな制御を行うことが可能である。ここで、式(3)よりMFCの内部制御器は $\hat{F}(k)$ の推定誤差を補償するための修正項として働くため、PIゲインの値を適切に設計することは、制御性能の向上だけでなく、ロバスト性の向上にもつながると考えられる。一方で制御性能は、試行錯誤的に決定した調整パラメータ $[\omega, \lambda]$ に強く依存することが確認されており、その定量的な設計方法が今後の課題である。

7. 結言

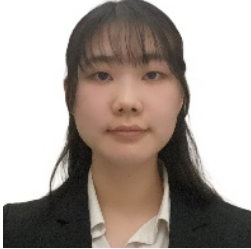
本報告ではMFCとVRFTを組み合わせ、安定制約条件を考慮しつつ、MFCの設計パラメータを同時に最適化する手法を提案した。段階的な最適化を行ったMFCの制御性能と比較して、同時最適化を行った提案手法は高い制御性能を示した。さらに、提案手法と従来手法は負荷変化に対して高いロバスト性を有することを確認した。

参考文献

- 1) 小林亘, 伊藤和寿: 水道水圧駆動マッキベン型人工筋の変位制御(第1報, 人工筋のモデル化およびBouc-Wenモデルの適用), 日本フルードパワーシステム学会論文集, Vol. 45, No. 6, p. 85-93, (2014).
- 2) Campi M.C., Lecchini A., Savaresi S. M.: Virtual reference feedback tuning: a direct method for the design of feedback controllers," Automatica, Vol. 38, p. 1337-1346, (2002).
- 3) Soma S., Kaneko O., Fuji T.: A new method of controller parameter tuning based on input-output data-fictitious reference iterative tuning (FRIT)-, IFAC Proceedings Volume, Vol. 37, No. 27, p. 789-794, (2004).
- 4) Fliess M., Join C.: Model-free control, International Journal of Control, Vol. 86, No. 12, p. 2228-2252, (2013).
- 5) Tsuruhara S., Ito K.: Data-driven model-free adaptive displacement control for tap-water-driven artificial muscle and parameter design using virtual reference feedback tuning, Journal of Robotics and Mechatronics Vol. 34, No. 3, p. 664-676, (2022).

- 6) Kosugi A., Tsuruhara S., Ito K.: Ultra-Local Model Based Data-Driven Control for McKibben-type Artificial Muscles with Control Parameter Optimization Using VRFT, Proceeding of JFPS International Symposium on Fluid Power, 1B2-03, p. 1-10, (2024).

著者紹介



こすぎ あやか
小杉 彩加 君

2026 年芝浦工業大学大学院工学研究科国際理工学専攻修了。同年、民間企業に入社。在学中は水圧システム制御およびデータ駆動制御に関する研究に従事、日本フルードパワーシステム学会の会員。修士(工学)。

E-mail: bq20074@shibaura-it.ac.jp

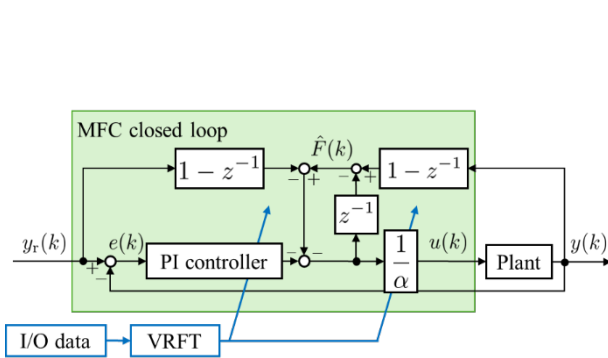


図 1 VRFT-MFC の概要

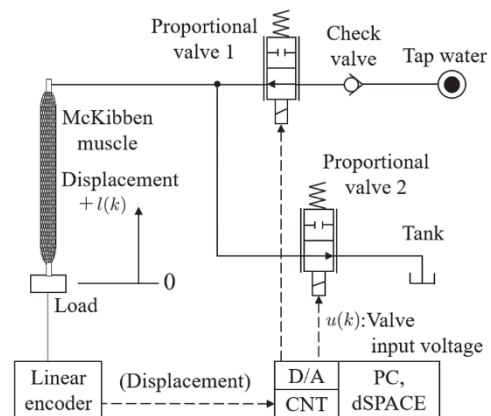


図 2 実験装置の水圧回路

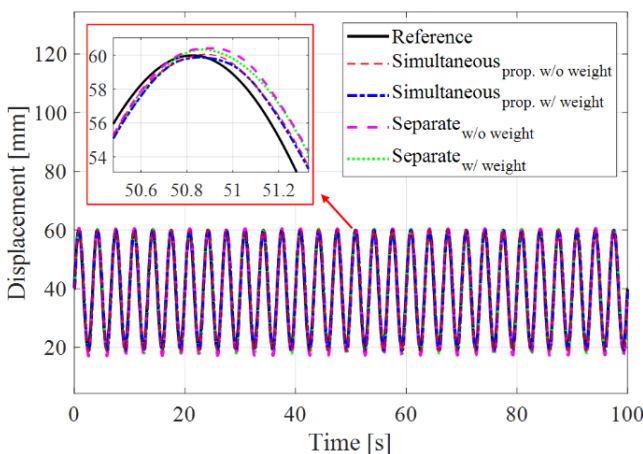


図 3 負荷無し/負荷有りにおける提案手法と既存手法の正弦波に対する追従性能の比較

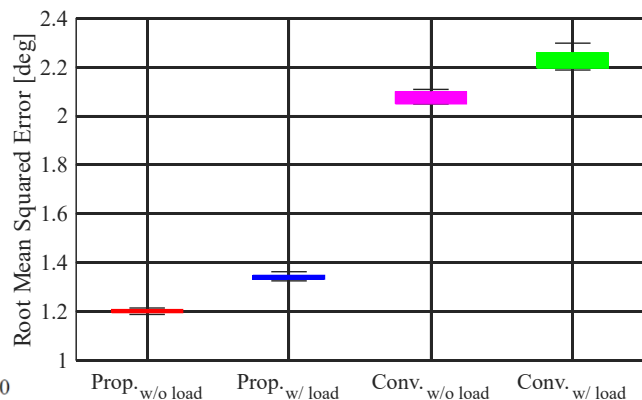


図 4 負荷無し/負荷有りにおける提案手法と既存手法の箱ひげ図 (試行回数 5 回)