

人間のパラメータ調整作業を効率化する フィードバック制御器設計法の研究

A Feedback Controller Design for Efficiency Improvement of Manual Parameter Tuning

2161020



研究代表者

名古屋工業大学大学院
電気・機械工学専攻

准教授

前田 佳 弘

[研究の背景と目的]

電子部品加工・実装機や工作機械などに用いられる各種産業サーボシステムにおいて、高速・高精度位置決め制御は高生産性・高加工品質の観点から重要な要素技術の一つである。所望の制御性能を獲得するためには、複数の設計仕様（追従性、安定性、外乱抑圧性、ロバスト性など）を満足するように制御パラメータを設定する必要があり、産業現場では、人がパラメータ調整を行うケースが多く見受けられる。

人によるパラメータ調整は、人の知識や経験に基づく知識能力（試行錯誤能力）を活かした効果的な方法の一つと考えられるが⁽¹⁾、産業現場においてパラメータ調整作業を行う調整者は制御理論に精通していない技術者であることも多く、探索的な調整による作業効率の低下が問題となっている。例えば、フィードバック（FB）制御パラメータ調整においては、不安定化を憂慮しながらの消極的な調整を余儀なくされ、試行錯誤能力を十分に発揮できず、調整時間の長大化を招く。また、調整者の個人差による制御性能や調整時間のばらつきも併せて存在する。効率のかつ普遍的なパラメータ調整を可能とする“熟練”調整者の育成には多くの時間と経験を必要とし、時間的・人的コストの増加に繋がるため、“非熟練”調整者にも扱いやすい新しいパラメータ調整方法が求められる。

本研究では、制御理論に対する高度な知見やパラメータ調整に対する膨大な経験を必要とせず、効果的かつ効率的な調整を実現するために、安定なFB制御パラメータ範囲を調整者に視覚提示するためのFB制御器設計法を提案し、実機実験によりその有効性を検証する。

[研究の内容、成果]

本研究では、設計や調整の容易さから産業界で多用されているPID制御器を扱い、以下では安定パラメータ範囲の導出方法ならびに実験検証結果について述べる。

1. 最適化問題の可解性を利用した安定パラメータ範囲の導出

1.1 所望の安定余裕を具備するFB制御器設計の基本理論⁽²⁾

設計対象となるPID制御器の伝達関数を次式で定義する。

$$C_{PID}(s) = K_P + \frac{K_I}{s} + \frac{K_D s}{\tau_{DS} + 1} = \boldsymbol{\Psi}_{PID}(s) \boldsymbol{\rho} \quad (1)$$

$$\boldsymbol{\Psi}_{PID}(s) = \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{s} & \frac{s}{\tau_{DS} + 1} \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{\rho} = [K_P \quad K_I \quad K_D]^T \in \mathbf{R}^{3 \times 1}$$

ここで、 $\boldsymbol{\rho}$ は K_P, K_I, K_D の3つのパラメータによって構成されるパラメータベクトルであり、

これを最適化問題の枠組みで設計する。

最適化問題における評価関数 J は、サーボ性能に係る指標として、低周波数帯における所望の感度特性 $S_d(s)$ と実感度特性 $S(s)$ の 2 乗誤差面積を用いる。ここで、 $S_d(s)$ を用いて目標開ループ特性 $L_d(s)$ を次式で定義する。

$$L_d(s) = \frac{1 - S_d(s)}{S_d(s)} \quad (2)$$

ある周波数 ω における $L_d(j\omega)$ と実開ループ特性 $L(j\omega)$ との距離は、次式で表現できる。

$$|L_d(j\omega) - L(j\omega)| = \left| \Psi_{L1}(j\omega) \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \right| \quad (3)$$

$$\Psi_{L1}(j\omega) = [L_d(j\omega) \quad -P(j\omega) \Psi_{PID}(j\omega)] \in \mathbf{C}^{1 \times 4}$$

(3) 式を離散周波数 $\omega_m (m=1, \dots, M)$ に適用することで、 J を次式で定義する。

$$J = \sum_{m=1}^M \left[1 \quad \rho^T \right] \Psi_{L2}(j\omega_m) \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\Psi_{L2}(j\omega_m) = \Psi_{L1}^T(j\omega_m) \Psi_{l1}(j\omega_m) \in \mathbf{R}^{4 \times 4}$$

一方、所望の安定余裕を有するために、円条件を用いた制約条件を定式化する。開ループ特性 $L(s) = P(s)C_{PID}(s)$ のナイキスト軌跡に対する円条件を図 1 に示す。円条件で用いる指定円 C_s の中心 $(-\sigma_s, 0)$ と半径 r_s は、所望のゲイン余裕 g_m dB と位相余裕 ϕ_m deg を用いて定義される定数である⁽²⁾。このとき、ある周波数 ω

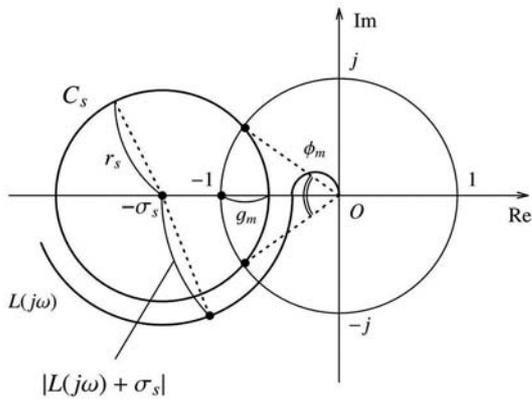


図 1 ナイキスト線図に対する円条件

における $L(j\omega)$ が C_s の外側を通過すれば、FB 制御系は所望の安定余裕を獲得できる。その条件式は次式で表される。

$$|L(j\omega) + \sigma_s| > r_s \quad (5)$$

$$0 < r_s < \sigma_s, (\sigma_s - 1)^2 < r_s^2$$

(1) 式を (5) 式に代入すると、次式を得る。

$$\left| \Psi_1(j\omega) \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \right| > r_s \quad (6)$$

$$\Psi_1(j\omega) = [\sigma_s \quad P(j\omega) \Psi_{PID}(j\omega)] \in \mathbf{C}^{1 \times 4}$$

(6) 式の両辺を 2 乗して整理すると、次式の不等式を得る。

$$H(\rho) = \left[1 \quad \rho^T \right] \Psi_2(j\omega) \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} - r_s^2 > 0 \quad (7)$$

$$\Psi_2(j\omega) = \Psi_1^T(j\omega) \Psi_1(j\omega) \in \mathbf{R}^{4 \times 4}$$

(7) 式を離散周波数 $\omega_n (n=1, \dots, N)$ に適用し連立することで、安定余裕制約とする。

以上より、所望の安定余裕を具備する FB 制御パラメータ ρ を次式的最適化問題によって導出可能となる。

$$\begin{aligned} \min_{\rho} \quad & J \\ \text{sub. to} \quad & H_n(\rho) > 0 \end{aligned} \quad (8)$$

1.2 人による制御パラメータ探索を考慮した FB 制御器設計法への展開

1.1 の FB 制御器設計理論を基調に、人による試行錯誤的なパラメータ探索を制御パラメータ変化と捉え、制御パラメータ変化に対するロバスト安定化問題へと展開する。まず、パラメータ変化成分 $\Delta_P, \Delta_I, \Delta_D$ を次式で定義する。

$$\begin{aligned} \Delta_P &= 1 + k\alpha \quad (|\alpha| \leq 1) \\ \Delta_I &= 1 + k\beta \quad (|\beta| \leq 1) \\ \Delta_D &= 1 + k\gamma \quad (|\gamma| \leq 1) \end{aligned} \quad (9)$$

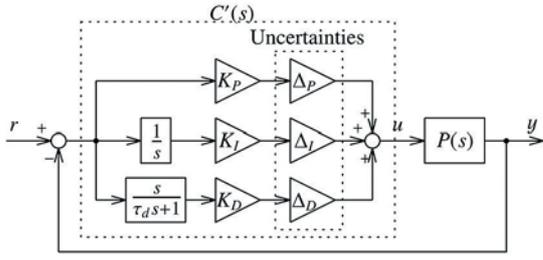


図2 制御パラメータ変化を有するFB制御系

ここで、 k : 制御パラメータの変化幅を指定する正の実数($0 < k < 1$), α, β, γ : 制御パラメータの変化幅の刻みを指定する実数である。 $\Delta_P, \Delta_I, \Delta_D$ を図2に示すようにPID制御器に直列接続すると、PID制御器は次式で再定義できる。

$$C'_{PID}(s) = \left[\Delta_P \quad \frac{\Delta_I}{s} \quad \frac{\Delta_D s}{\tau_D s + 1} \right] \rho$$

$$= \Psi'_{PID}(s) \rho \quad (10)$$

ここで、例として $k=0.1$, α, β, γ がそれぞれ $\{-1, 0, 1\}$ の値をとるとき、パラメータ変化範囲は図3のような27個の格子点を有する直方体で表すことができる。(10)式を(1)式の代わりに用いると、(5)式は次式で表現できる。

$$H(\rho) = \begin{bmatrix} 1 & \rho^T \end{bmatrix} \Psi'_2(j\omega) \begin{bmatrix} 1 \\ \rho \end{bmatrix} - r_s^2 > 0 \quad (11)$$

$$\Psi'_2(j\omega) = \Psi_1^T(j\omega) \Psi_1'(j\omega) \in \mathbf{R}^{4 \times 4}$$

$$\Psi_1' = [\sigma_s \quad P(j\omega) \quad \Psi'_{PID}(j\omega)] \in \mathbf{C}^{1 \times 4}$$

従って、制御パラメータ変化に対するロバスト安定性を保証する ρ は、(11)式を k, α, β, γ の全ての組合せで定義し、さらにそれらを離散周波数 $\omega_n (n=1, \dots, N)$ に対して連立した(8)式の制約付き最適化問題によって導出可能である。最適化問題が可解の場合、図3における直方体内部のパラメータは所望の安定余裕が確保される。厳密には、図3中の直方体の格子点で安定性を保証するものであるが、 k, α, β, γ を適切に選べば実用上は問題とならない。例として、 $k=0.1$, α, β, γ がそれぞれ $\{-1, 0, 1\}$, ゲイン余裕 $g_m=5$ dB, 位相余裕 $\phi_m=30$ degの条件で獲得した直方体において、格子点以外の複数のパ

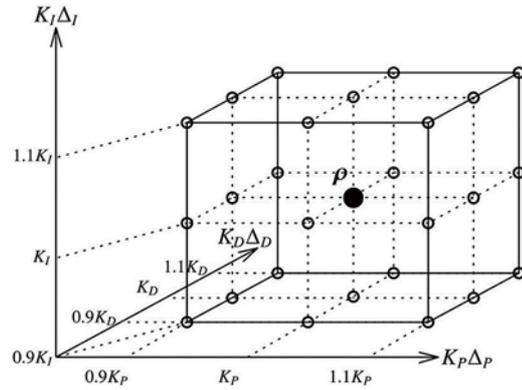


図3 制御パラメータ変化範囲

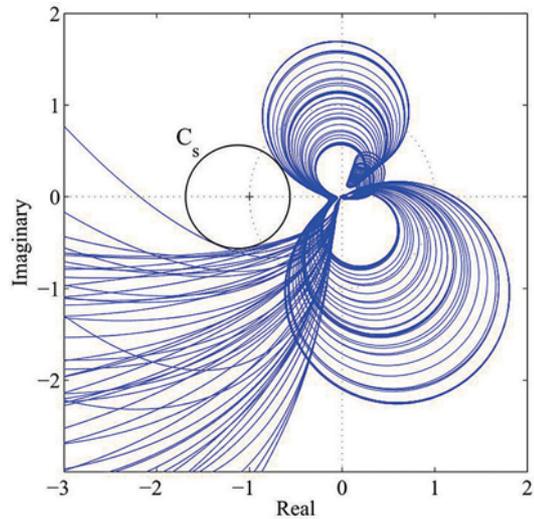


図4 ナイキスト線図

ラメータ条件でナイキスト線図を描いたものが図4である。全てのナイキスト線図が円条件を満足する安定な軌跡となっていることが確認できる。

ここで、 k の値を大きくすると最適化問題の解空間が縮小し、ある値以上では最適化問題が求解不可となる。本研究ではこの可解性という性質を利用して、 k を大きな値から徐々に減少させながら全探索的に最適化問題を求解していき、可解時の安定パラメータ範囲を逐次獲得することで安定範囲図を構築する。 k を0.5から0まで0.0001刻みで減少させて獲得した安定範囲図を図5に示す。図より、ハイゲイン化に伴って安定範囲が徐々に縮小していく図が得られており、制御設計でよく経験されるハイゲイ

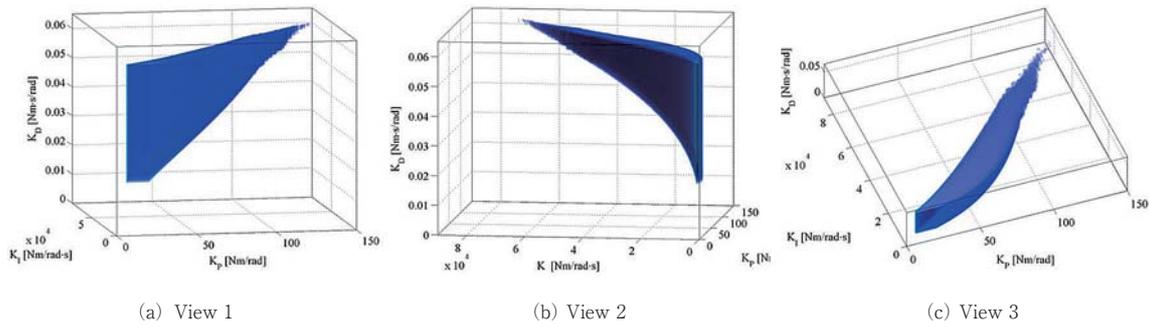


図5 安定パラメータ範囲図

ン化と安定性のトレードオフの関係と一致する。

2. 実験検証

図5の安定パラメータ範囲を調整者に提示することでパラメータ調整作業に要する時間・回数が削減されるかについて、レーザ加工機で供されるガルバノスキャナの位置決め応答調整実験（整定精度： $\pm 12 \mu\text{m}$ ，整定時間： 1ms ）により評価する。被験者は、制御理論とパラメータ調整に関する知識・経験を有する人と有さない人がそれぞれ10人ずつの計20人とした。なお、不安定なパラメータ選択による実機の破損を防ぐために、図5を提示しない場合に安定パラメータ範囲外を選択したときはそれを判別し、再度パラメータ探索を行わせる。このとき、範囲外選択回数も調整回数に含める。

実験により測定した調整時間・回数をまとめたものを、図6に示す。図から、安定範囲の提示によって調整時間・回数共に平均値が大幅に減少した（調整時間：31分17秒 \rightarrow 4分36秒（ -85% ），調整回数：68回 \rightarrow 4回（ -94% ））。また、調整者の知識・経験に起因するばらつきも同時に抑制されている。以上の結果より、提案法は人の知識能力を効果的に発揮させ、パラメータ調整作業の効率化に資することが検証された。

[今後の研究の展開]

本研究で得られた成果を基盤として、実用化に向けて以下について取り組む予定である。

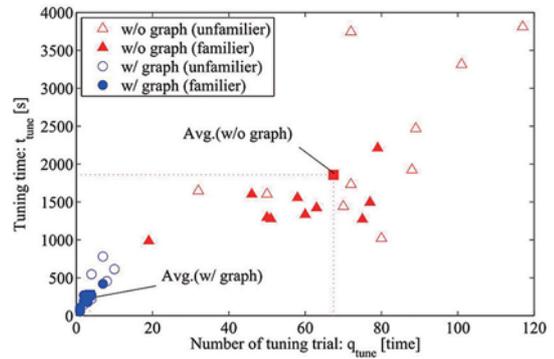


図6 実験結果

- ・ インターフェース（視認性・操作性）の改良
- ・ 非線形パラメータ構造FB制御器への拡張
- ・ 誘導機能の付与

[研究成果発表（予定）]

- [1] 郷直樹，前田佳弘，岩崎誠：「最適化問題の可解性を利用した人によるフィードバック制御器パラメータ調整の効率化」，平成29年電気学会産業応用部門大会，2-37，2017
- [2] 内園貴大，前田佳弘，岩崎誠：「非線形パラメータ構造FB制御器設計における凸評価関数への簡易変換法とその評価」，平成29年電気学会産業応用部門大会，2-36，2017

<参考文献>

- (1) 野田他：「制御パラメータ調整作業を自動化するための能動型探索アルゴリズムと、その適用事例について」，システム制御情報学会論文誌，Vol. 29，No. 2，pp. 65-75，2016.
- (2) Y. Maeda et al., "Circle condition-based feedback controller design for fast and precise positioning," IEEE Trans. Ind. Electron., Vol. 61, No. 2, pp. 1113-1122, 2014.