

制御性能と設計効率を高度に両立する協調型数理最適化による自動制御設計

名古屋工業大学 大学院工学研究科 工学専攻 電気・機械工学系プログラム 準教授
前田 佳弘

1. テーマ設定の背景

半導体・液晶製品やプリント基板をはじめとするエレクトロニクス産業基盤素形材の製造・加工を行う種々の精密機械では、ワークや工具等の高速・高精度位置決め制御性能が製品品質と生産性を大きく左右する。高性能制御の実現には高度な制御設計技術が必要となるが、現状では熟練技術者が手動で制御設計を行うのが一般的であり、多大な設計労力・時間を要し、それは製品の高コスト化にも直結する。危機的な生産年齢人口減少が予想されている我が国において労働生産性の向上は喫緊の課題であり、制御設計の自動化に対する産業界からのニーズは極めて高い。本研究は、制御性能と設計効率の飛躍的な向上を目的に、“カスケード構造フィードバック（FB）制御器の数理最適化ベースの自動設計”という、実用かつ学術的問題の解決を目標としている。

2. 素形材分野との関連性

本研究は、上記エレクトロニクス関連素形材の高生産性かつ高品質な製造・加工を支える制御技術に関連する。具体的には、“制御設計”という高性能制御実現のために行われる一連の設計プロセスについて、従来の手動設計から数理最適化アプローチによる設計労力フリーかつ設計時間短縮を実現する自動設計へと革新するものである。本研究により、研究・開発から生産に至る広範の工程における制御器の設計効率を飛躍的に向上し、さらに低コスト化、要求制御性能の高度化といった付加価値の具備によって、素形材製造・加工分野で諸外国を圧倒する差別化技術を創出する。

3. 研究開発の成果

本研究は、カスケード構造 FB 制御器を設計対象として、所望の安定余裕を確保しながら制御性能を最大化する制御器構造とパラメータを、独創的な数理最適化アプローチによって自動設計する方法を提案するものである。カスケード構造制御器とは、FB 制御器を伝達関数表現したとき、複数の要素補償器が直列接続（積構造）の形となるものを指し（図 1）、機構共振振動を抑制しながら高い応答性が求められる高速・高精度位置決め制御の技術分野で主流の FB 制御器構造である。カスケード構造制御器では、パラメータ同士の強い非線形性によりパラメータ最適化問題が非凸問題に帰着され、大域的最適解の獲得が極めて困難となる¹⁾。

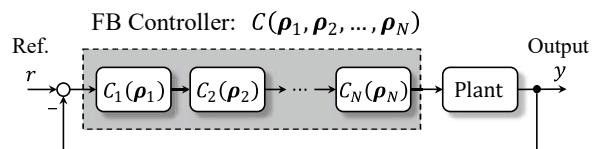


図 1 カスケード構造制御器を用いたFB制御系： FB制御器 C の伝達関数は、要素補償器 $C_n, n=1, \dots, N$ のパラメータ p_n 同士の複雑な乗除算を含む非線形なパラメータ構造となる。

この問題に対し、筆者らは局所空間の勾配情報に基づいて効率的な解探索を実行可能な逐次二次計画法（SQP）と、発見的アプローチで大域空間の解探索を可能とする遺伝的アルゴリズム（GA）という、特徴が異なる 2 つの数理最適化手法を効果的に組み合わせた『協調型数理最適化』を構築してきた（図 2）。そこでは、

- ① 各最適化手法の探索対象パラメータの区分と
両最適化手法の効果的な協調方法の提示²⁾

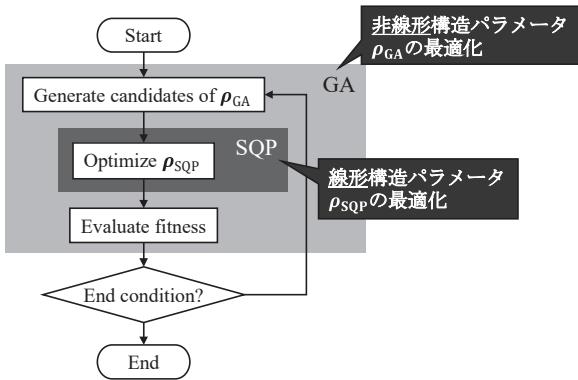


図2 協調型数理最適化に基づくパラメータ設計アルゴリズム：GAをベースアルゴリズムとし、SQPはその中の一プロセスを担う。SQPとGAによる設計対象パラメータはパラメータ構造によって区分し、両最適化手法間で探索パラメータやその評価値を共有しながら協調的にパラメータ最適化を行う。

② SQPによるパラメータ探索が必ず実行可能となるパラメータ初期点設定法の理論的な提示³⁾によって、これまでの数理最適化アプローチに基づく自動設計法では困難であった、大域的最適解の効率的探索を実現した（図3）。

提案手法は、プリント基板穴明加工機のガルバノスキャナ FB 制御器設計に適用され、設計時間は手動設計の 3 日に対して自動設計では約 40 分に短縮でき、飛躍的な設計効率改善をみた³⁾。また、本手法を基調としてプラント変動に対するロバスト安定FB制御器設計技術へと発展させ⁴⁾、高い実用性を備える産業応用技術として確立した。

4. 訴求点

FB 制御器の自動設計は学術界で古くから取り組まれており、これまでにも様々なアプローチに基づく自動設計法が提案してきた。例えば、非線形最適化手法やメタヒューリスティクス単体で設計する方法^{1),5),6)}、非凸最適化問題を凸近似して設計する方法⁷⁾が挙げられる。しかし、本研究で扱う“カスケード構造 FB 制御器”的場合、パラメータ初期点近傍の局所最適化しかできない、一つの要素補償器のパラメータしか最適化できない、などの問題が存在するため、本研究の目標解決に資する設計法は見当たらなかった。それらの従来法に対して、提案する『協調型数理最適化に基づく自動設計法』は、

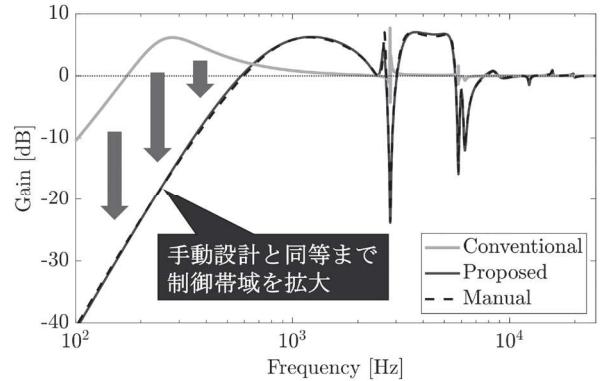


図3 提案手法により設計したFB制御系の感度特性（要素補償器段数 = 3、パラメータ数 = 8）：提案手法は熟練技術者が手動設計した制御系と同等の周波数特性を自動的に設計できている。これに対し、文献1)の従来法により自動設計した場合は、制御性能の低い周波数特性となっている。

- ◆ 全ての要素補償器の全てのパラメータを効率的に設計可能
 - ◆ パラメータ初期点に依存せず大域的最適解を効率的に探索可能
 - ◆ パラメータのみならず制御器構造も同時に最適化可能⁸⁾
- という圧倒的な優位性を有し、実質的に“調整”レベルであった従来法から、真の意味で“設計”レベルへと発展した。その独創的なアプローチは学術的新規性が極めて高く、さらに様々な精密機械の位置決め機構への適用が可能な実用性を兼ね備え、高性能化と飛躍的な制御設計効率を共に実現している。

本研究テーマは多数の産学連携共同研究を通じて実施され、液晶製造装置、プリント基板加工機、産業用ロボットなど、我が国が他を圧倒する素形材製造・加工装置に内在する位置決め機構の制御設計に研究成果が適用された。その結果、プリント基板レーザ及びドリル穴明加工機に代表される世界トップシェアを誇る製品創出において、その核となる制御設計技術を支えてきた。今後も我が国の当該技術分野の伸長と、諸外国に対する圧倒的な労働生産性の実現と差別化技術の創出という波及効果が大いに期待される。なお、提案した協調型数理最適化は、FB 制御器のみならず制御系全体の自動設計、システム同定の自動実行⁹⁾、機構と制御の最適連携設計などへも応用可能であ

る。数理最適化アプローチを基調とした高付加価値を備える新たな制御技術の創成に向けて、今後の発展が大いに期待される。

参考文献

- 1) 萩木, 田中, 松原, 垣野, 「構造が固定された英漁期の数値最適化による周波数整形（送り系のための制振フィルタの設計）」, 日本機械学会論文集 (C編), vol. 70, no. 691, pp. 79-84 (2004)
- 2) Y. Maeda, E. Kuroda, T. Uchizono, and M. Iwasaki, "Hybrid Optimization Method for High-performance Cascade Structure Feedback Controller Design," Proceedings of the 44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, WD-004154, pp. 4588-4593 (2018)
- 3) E. Kuroda, Y. Maeda, and M. Iwasaki, "Autonomous Parameter Design for Cascade-Structure Feedback Controller Based on Cooperative Optimization Method," IEEJ Journal of Industry Applications, vol. 10, no. 4, pp. 457-468 (2021)
- 4) E. Kuroda, Y. Maeda, and M. Iwasaki, "Efficient Autonomous Feedback Controller Parameter Design Considering Robust Stability for Galvanometer Scanner," Electrical Engineering in Japan, vol. 215, issue 3, pp. N/A (2022)
- 5) S. Ibaraki and M. Tomizuka, "Tuning of a Hard Disk Drive Servo Controller Using Fixed-Structured H_∞ Controller Optimization," Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, vol. 123, no. 3, pp. 544-549 (2001)
- 6) A. Nath and S. Kaitwanidvilai, "High Performance HDD Servo System Using GA Based Fixed Structure Robust Loop Shaping Control," Proceedings of 2009 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, pp. 1854-1859 (2009)
- 7) M. Hast, K.J. Åström, B. Bernhardsson, and S. Boyd, "PID Design by Convex Concave Optimization," Proceedings of 2013 European Control Conference, pp. 4460-4465 (2013)
- 8) Y. Maeda, S. Kunitate, E. Kuroda, and M. Iwasaki, "Autonomous Cascade Structure Feedback Controller Design With Genetic Algorithm-based Structure Optimization," Proceedings of the 21st IFAC World Congress, pp. 8529-8535 (2020)
- 9) 大橋, 塩原, 前田, 「協調最適化に基づくプラント周波数応答関数の高効率自動モデリング」, 精密工学会 春季大会学術講演会, pp. 698-699 (2023)