

報告日 2015年(平成27年)6月9日
報告者 名古屋工業大学 大学院工学研究科 准教授
関 健太

1. 研究概要

(和文)

(1)課題名 (日本語)

空気圧アクチュエータと電磁アクチュエータを併用した荷重制御装置に対する制御系設計

(2)研究者氏名

関 健太 名古屋工業大学 大学院工学研究科 准教授

(3)研究概要 (日本文)

本研究では、空気圧アクチュエータと電磁アクチュエータを併用した荷重制御装置を対象として、目標荷重に高精度に追従するために、制御帯域の拡大を目指した制御系の設計を行う。供試装置では、動作周波数が異なる二つのアクチュエータを併用するため、その境界周波数近傍で干渉が発生し制御性能を劣化させる。さらに、機構系の有する共振振動により制御帯域が制限される。これらの課題を解決するために、干渉と振動抑制の両立を実現するフィードバック補償器の設計を行い、その有効性を供試荷重制御装置による実験で検証した。

(4)キーワード

空気圧アクチュエータ, 電磁アクチュエータ, 制御系設計, 外乱抑制, 干渉抑制

(英文)

(1) Research title

Controller Design for Load Devices Combined Pneumatic Actuator with Electromagnetic Actuator

(2) Name of researcher with title of position

Kenta Seki, Associate Professor, Nagoya Institute of Technology

(3) Summary

This study proposes a controller design approach to achieve the high accuracy load control in load devices with a pneumatic actuator and a voice coil motor. In the target load devices, the control performance is deteriorated by disturbances due to the interference force between the actuators as well as the frequency variation in the mechanical resonance. In order to solve the problems, a robust controller is designed by PQ method and H infinity control framework against the disturbances to the system. Effectiveness of the proposed approach has been verified by frequency analyses and experiments

using an actual load device.

(4) Research title

Pneumatic actuator, Electromagnetic actuator, Controller design,
Disturbance suppression, Interference suppression

2. 本研究の意義・特色

研磨装置では、研磨材を被加工物に押し当てることで加工を行う。そこでは、被加工物に対する高精度加工を実現するために目標荷重への高精度追従が要求される。本研究で対象とする荷重制御装置では、持続的に荷重を保持することに適した空気圧アクチュエータを主駆動源として利用するが、応答性の高いボイスコイルモータ (VCM) を併用した 2 段アクチュエーションを採用し、空気圧アクチュエータ単体では実現できない広い周波数範囲で高精度な荷重制御を達成する。しかし、アクチュエータの併用は適切な制御器を設計しなければ、動作干渉を引き起こして制御精度を劣化させる場合がある。さらに、機構系の有する共振振動およびその周波数変動が、制御精度と共にシステムの安定性を劣化させる。本研究では、これらの制御課題を解決するための一つの制御系設計手法を提案し、実験によりその有効性を確認している。

産業機器の高性能化や差別化を達成するためには、アクチュエータの協調動作による複雑な動作の実現や性能向上が一つの解決であると考えられる。アクチュエータの協調制御系に対する一般的な設計論が研究される一方で、制御系はその製品の制御目的やアクチュエータの性能、機器の構成により様々な制約条件を持つために一般論を適用できない場合も多い。本研究では、具体的な荷重制御装置を題材として、そこで発生する問題に対する具体的な解決法と一つの制御系設計方法を提案している。本研究の制御系設計の考え方と具体的アプローチは、同様の形態を持つ様々な産業機器へ適用できると考えられる。

3. 実施した研究の具体的内容、結果 (本文)

3.1 供試装置のシステム構成

本研究で対象とした供試荷重制御装置の模式図とシステム構成図を、図 1, 2 にそれぞれ示す。制御対象は、空気圧アクチュエータと VCM が配置され、両者は鉛直方向に力を発生する。制御システムは、補償器演算を行う Digital Signal Processor (DSP), 空気圧アクチュエータ, サーボバルブ, VCM, 各アクチュエータのサーボアンプ, 荷重値を検出するロードセルから構成される。図 2 中, r は目標荷重値, u_a はサーボバルブへの制御入力, u_v は VCM への制御入力, f はロードセルで検出される荷重値を示す。荷重値 f は AD 変換器を介して DSP 内に取り込まれ、空気圧アクチュエータと VCM に対して設計された補償器により各制御入力が計算される。計算された制御入力は、DA 変換されたアナログ信号 u_a , u_v として、各サーボアンプを介してサーボバルブ及び VCM へ入力される。サーボバルブは制御入力に応じてバルブの開閉を行い、空気圧シリンダ内の

圧力を変化させることで力を発生し、荷重値を制御する。一方、VCMは制御入力に応じた電磁力を発生させることで、荷重値を制御する。

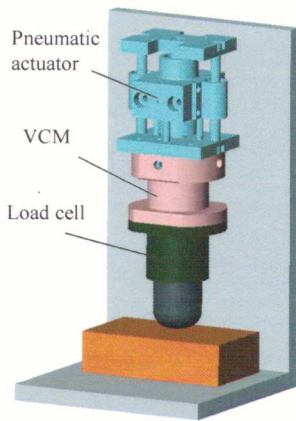


図1 供試装置の模式図

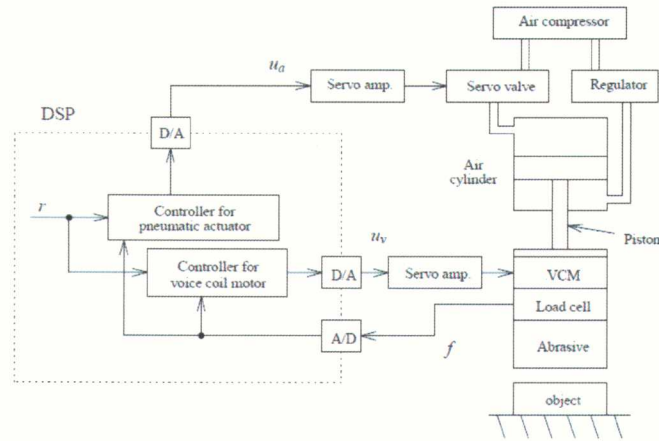


図2 制御システムの構成

3.2 制御系設計と実験による評価

3.2.1 供試装置の制御課題

供試装置は、応答速度の異なる2つのアクチュエータを併用している。このような場合、一般的にローパスフィルタ、ハイパスフィルタを付加して、各アクチュエータへの制御入力を整形して動作帯域の分離が行われる。しかしながら、このような単純な方法では、動作分離周波数近傍のゲインと位相ずれによって動作干渉が発生する可能性がある。一方で、空気圧アクチュエータには空気の圧縮性に起因したばね力により共振振動が発生する。さらに、この共振周波数は、動作環境や経年劣化により変動するため、変動に対するロバスト性を考慮した振動抑制補償器を設計する必要がある。本研究では、1) 動作干渉を抑制する補償器設計、2) 共振振動抑制とその周波数変動に対するロバスト制振補償器設計、の2段階の設計手法を提案する。

3.2.2 制御系の設計

図3に、本研究で設計するフィードバック制御系の構成を示す。図中、 C_1 はVCM(P_v)に対する補償器、 C_2 は空気圧アクチュエータ(P_a)に対する補償器、 C_0 は拡大制御対象 $G_0 (=C_1P_v + C_2P_a)$ に対する補償器であり、 d は被加工物からの外乱を示す。本研究では、2つのアクチュエータの動作干渉を抑制するためにPQ法を適用した。PQ法は、2つのアクチュエータを併用した装置に対して、干渉抑制を考慮する際に設計の見通しが良く、アクチュエータ相互の出力関係を決める動作分離周波数を任意に決定できる利点を持つ。本制御対象では、設計指針として、動作分離周波数を10 Hz、動作分離周波数におけるアクチュエータ間の位相差120 deg以内を与えた。具体的な補償器構造には、 C_1 は、制御入力の飽和を回避するためハイパスフィルタを適用し、 C_2 は、アクチュエータ間の位相差を小さくするため、位相進み補償器を適用した。

PQ法に基づいて干渉抑制を考慮した各補償器を含めた図3の点線部を拡大制御対象として、共振振動の抑制とその周波数変動に対するロバスト性能を具備する補償器 C_0 を設計する。具体的には、 H^∞ 制御理論を適用して共振周波数変動に対するロバスト安定性を陽に考慮した。

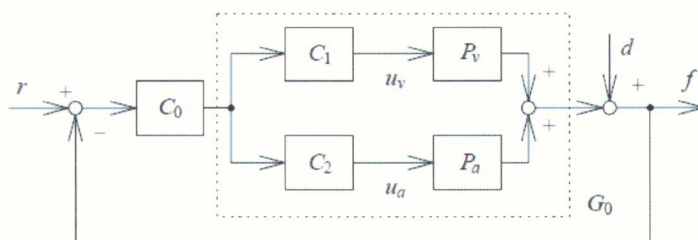


図3 提案フィードバック制御系の構成

3.2.3 制御系の設計結果と実験による評価

本研究で設計した制御系の性能を評価する。図4は、制御系に加わる外乱 d から荷重値 f までの感度特性であり、破線はPQ法を適用して干渉抑制を考慮した設計結果、実線はPQ法を適用せずに単純にローパスフィルタとハイパスフィルタで帯域分離した設計結果を示す。この結果より、干渉抑制を考慮することで、動作分離周波数10Hz近傍のゲインの増大を抑制しつつ、幅広い帯域でゲインを低減できている。すなわち、提案制御系では、制御系に加わる外乱の影響を抑制しつつ、高精度に目標値に追従できる。図5は、干渉抑制を考慮した制御系に対して H^∞ 制御理論に基づき共振周波数変動に対するロバスト性能を考慮して補償器 C_0 を設計した結果の感度特性を示している。本制御対象は、約220Hzに固有振動数を有するが、振動抑制を考慮して補償器を設計することにより、図中実線に示すように、共振周波数近傍のゲインピークを抑制できている。さらに、共振周波数が215Hzに変動したとしても同様にゲインピークを抑制できている。

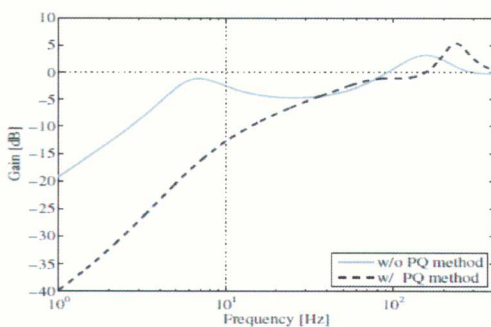


図4 PQ法を適用した感度特性

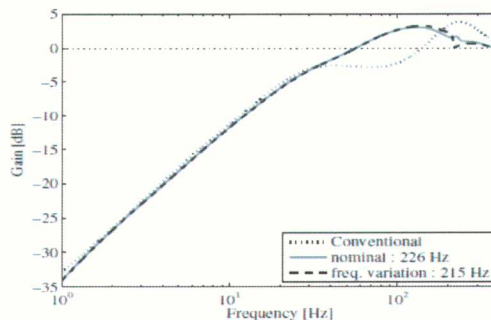


図5 H^∞ 制御理論を適用した感度特性

図6, 7, 8は、目標荷重値を一定(10N)にした状態で、外乱 d としてステップ外乱を加えた時の荷重応答結果である。図6の実線は干渉抑制を考慮していない制御系での荷重応答、破線は干渉抑制を考慮した制御系での荷重応答波形である。この結果より、

干渉抑制を考慮することで、外乱に対して速やかに零に収束して高精度な荷重追従制御が実現できている。図 7 の破線は、共振周波数が変動した時の荷重応答波形であり、共振周波数が微小変化しただけでも残留振動が発生していることがわかる。一方で、図 8 は H_∞ 制御理論を用いて共振周波数変動を考慮して補償器を設計した時の荷重応答波形である。この結果から、共振周波数が変動した時において残留振動は発生せず、変動前と同様の荷重応答が得られており、変動に対してロバストな制御系が設計できていることがわかる。

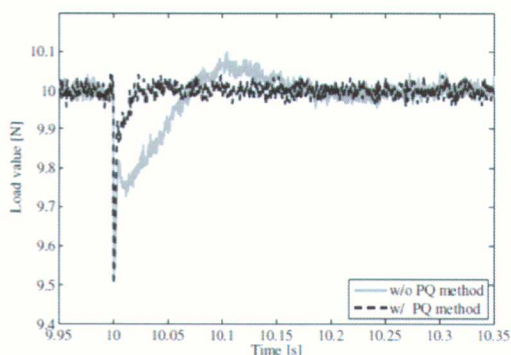


図 6 ステップ外乱に対する荷重応答

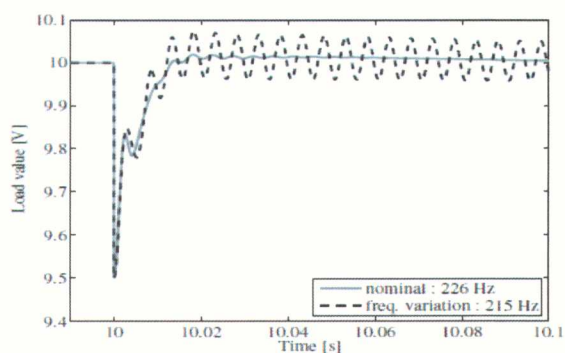


図 7 共振周波数変動時のステップ外乱に対する荷重応答

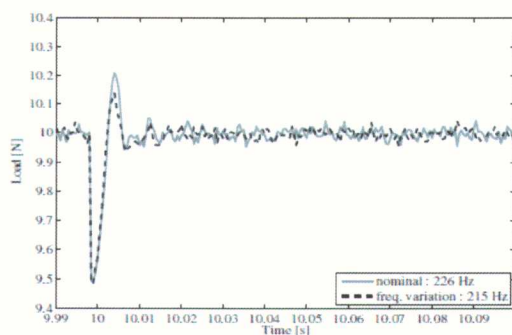


図 8 提案制御系におけるステップ外乱に対する荷重応答

4. 本研究を実施したグループに属するおもな研究者の氏名・役職名

関 健太・名古屋工業大学・准教授

5. 研究実施時期

2013年（平成25年）3月 から 2015年（平成27年）2月まで

6. 本研究に関連して発表した主な論文等

[1] 篠原 悠作, 関 健太, 岩崎 誠, LP モデルを用いた周波数推定による荷重制御装置

の外乱抑圧制御，平成 25 年電気関係学会東海支部連合大会，No.B2-5，2013/9

[2] 篠原 悠作，関 健太，岩崎 誠，干渉と周波数変動を考慮した 2 段アクチュエータ制御系設計，電気学会産業計測制御／メカトロニクス制御研究会，IIC-14-65，MEC-14-53，pp.55-60，2014/3

[3] 廣田 純一，篠原 悠作，関 健太，岩崎 誠，荷重制御装置に対する圧力センサと圧電素子を併用した外乱抑圧制御系の設計，平成 26 年電気関係学会東海支部連合大会，No.C1-5，2014/9

[4] Y.Shinohara, K.Seki, M.Iwasaki, Robust Vibration Suppression Control for Resonant Frequency Variations in Dual-Stage Actuator-Driven Load Devices, Proc. of the 8th IEEE International Conference on Mechatronics, pp.628-633, 2015/3

[5] 篠原 悠作，関 健太，岩崎 誠，珍田 寛，高橋 昌樹，荷重制御装置に対する共振周波数変動を考慮した 2 段アクチュエータのロバスト制御，日本機械学会論文集，Vol.81, No.824, 10pages(14-00351), 2015/4

7. 内外における関連研究の状況

2 つのアクチュエータを併用した制御系設計手法については，ハードディスクドライブのヘッド位置決め機構を対象として海外の大学および研究機関より様々な手法が提案されている。これらは，VCM と圧電アクチュエータを制御対象とした位置決め制御系設計手法である。このように，比較的動作周波数が低く大型の産業機器から小型で動作周波数の高い情報機器に至るまで，複数のアクチュエータ，もしくはセンサを併用することによって既存の制御性能を打破する取り組みが盛んに行われている。その中で，本研究は具体的なアプリケーションを対象とした一つの制御系設計事例を示すことができ，その考え方は様々な製品へ適用できると考えられる。

8. 今後の発展に対する希望

複雑化する機器や求められる性能が高度化する中，統一的な制御系設計手法を確立するだけでなく，今後は，具体的な設計事例で生まれた考え方を応用し，製品毎に最適な制御系をカスタマイズすることが必要であると考えられる。本研究では，空気圧アクチュエータと VCM を併用した制御系設計手法の一例を示したが，その他にも過大な外力が作用した時の制御入力飽和を回避する手法や，異なる性質を有するアクチュエータを併用した際の設計手法を確立するなど，様々な応用展開が必要である。