

氏名	シノハラ ユウサク 篠原 悠作
学位の種類	博士（工学）
学位記番号	博第975号
学位授与の日付	平成27年3月23日
学位授与の条件	学位規則第4条第1項該当 課程博士
学位論文題目	荷重制御装置に対する2段アクチュエータ制御系の設計 (Controller Design for Dual-Stage Actuator in Load Devices)
論文審査委員	主査 教授 岩崎 誠 教授 森田 良文 准教授 小坂 卓

論文内容の要旨

【研究の背景】

被加工物の研削や研磨を行う加工装置には、生産性や加工品質向上の観点から高速・高精度加工の進展が常に望まれている。中でも、炭化ケイ素やダイヤモンドなどの研磨材を利用した研磨装置では、被加工物に対して一定荷重を維持する必要があるため、目標荷重への高速応答性や高精度荷重制御の実現が求められる。

本研究で対象とする研磨装置は、一定荷重を維持するため、エネルギー効率の観点から空気圧アクチュエータを主な駆動源としている。しかしながら、空気圧アクチュエータは入力に対する応答速度が遅いため、更なる高速・高精度化を実現することが困難である。そこで、応答性の高い電磁アクチュエータを併用した2段アクチュエーションを採用し、広い周波数範囲で高精度な荷重制御系の実現を目指す。

【研究の課題と提案手法】

本研究で用いる研磨装置は、空気圧アクチュエータとボイスコイルモータ(以下、VCM)を併用した荷重制御装置であり、空気圧シリンダへの空気量およびVCMへの印加電圧を制御することで被加工物への荷重値を制御する。しかし、動作の異なるアクチュエータを併用し、高精度荷重制御系を実現するためには、以下に挙げる課題を解決する必要がある。

A) アクチュエータ間の干渉

各アクチュエータは入力に対する応答性が異なるため、アクチュエータ同士が互いの動作を阻害し、制御精度を劣化させる。そのため、干渉抑制を考慮した制御系の設計が必要となる。

本研究では、干渉抑制を考慮した制御系設計手法としてPQ法を用いて、各アクチュエータの周波数特性を基に補償器を設計し、干渉抑制を実現する。

B) 入力飽和による制御精度劣化

VCMは空気圧シリンダに対して動力密度が小さいため、被加工物の凹凸に起因した外乱が発生した時、制御入力に飽和し、本来有する性能を十分に発揮できない。そのため、入力飽和発生時の性能劣化抑制を考慮した制御系設計が必要となる。

本研究では、入力飽和時に空気圧シリンダの補償器を切り替え、飽和時に発生する共振振動を抑制することで、制御性能劣化の抑制を実現する。

C) プラントの周波数変動による外乱抑圧性能劣化

空気圧シリンダは設置環境や経年劣化により共振周波数が変動し、外乱に対する抑圧性能の劣化、あるいは制御系の不安定化が生ずる場合がある。そのため、特性変動に対してロバスト性を有する制御系の設計が必要となる。

本研究では、 H_{∞} 制御系設計の枠組みで、共振周波数変動に対するロバスト性を考慮した重み関数を設定し、各アクチュエータに対する補償器の設計を行う。

D) 研磨用モータ駆動時の振動

被加工物を研磨する際、研磨材を回転させるモータの回転数に同期した特定周波数外乱が発生し、荷重値が振動的な応答となり、一定荷重を維持できない。そのため、振動抑制を考慮した制御系の設計が必要となる。

本研究では、モータ駆動による外乱が特定の周波数成分であることに着目し、その特定周波数における外乱抑圧特性を改善する補償器を設計し、振動抑制を実現する。

【研究の成果】

本研究では、空気圧シリンダとVCMを併用した2段アクチュエータ制御系で構成される荷重制御装置を制御対象に、アクチュエータ間の動作干渉を抑制してサーボ帯域の広帯域化を実現すると共に、被加工物の凹凸に起因した突発的な外乱や研磨用モータの回転振動に起因した外乱に対する抑圧性能向上を実現した。さらに、プラントの共振周波数変動に対してロバスト性を考慮した制御系を設計することで、変動した場合でも制御性能を保持できる。各提案手法の有効性は、数値シミュレーションおよび供試装置を用いた実機実験により評価・検証している。

論文審査結果の要旨

被加工物の研削や研磨を行う加工装置には、生産性や加工品質向上の観点から高速・高精度加工の進展が常に望まれている。中でも、炭化ケイ素やダイヤモンドなどの研磨材を利用した研磨装置では、被加工物に対して一定荷重を維持する必要があるため、目標荷重への高速応答性や高精度荷重制御の実現が求められる。本研究で対象とする研磨装置は、一定荷重を維持するため、エネルギー効率の観点から空気圧アクチュエータを主な駆動源としている。しかしながら、空気圧アクチュエータは入力に対する応答速度が遅いため、更なる高速・高精度化を実現することが困難である。そこで、応答性の高い電磁アクチュエータを併用した2段アクチュエーションを採用し、広い周波数範囲で高精度な荷重制御系の実現を目指した。

本研究で用いる研磨装置は、空気圧アクチュエータとボイスコイルモータ(以下、VCM)を併用した荷重制御装置であり、空気圧シリンダへの空気量およびVCMへの印加電圧を制御することで被加工物への荷重値を制御する。しかし、動作の異なるアクチュエータを併用し、高精度荷重制御系を実現するためには、以下に挙げる課題を解決する必要がある。

- A) アクチュエータ間の干渉： 各アクチュエータは入力に対する応答性が異なるため、アクチュエータ同士が互いの動作を阻害し、制御精度を劣化させる。そのため、干渉抑制を考慮した制御系の設計が必要となる。本研究では、干渉抑制を考慮した制御系設計手法としてPQ法を用いて、各アクチュエータの周波数特性を基に補償器を設計し、干渉抑制を実現した。
- B) 入力飽和による制御精度劣化： VCMは空気圧シリンダに対して動力密度が小さいため、被加工物の凹凸に起因した外乱が発生した時、制御入力に飽和し、本来有する性能を十分に発揮できない。そのため、入力飽和発生時の性能劣化抑制を考慮した制御系設計が必要となる。本研究では、入力飽和時に空気圧シリンダの補償器を切り替え、飽和時に発生する共振振動を抑制することで、制御性能劣化の抑制を実現した。
- C) プラントの周波数変動による外乱抑圧性能劣化： 空気圧シリンダは設置環境や経年劣化により共振周波数が変動し、外乱に対する抑圧性能の劣化、あるいは制御系の不安定化が生ずる場合がある。そのため、特性変動に対してロバスト性を有する制御系の設計が必要となる。本研究では、 H_{∞} 制御系設計の枠組みで、共振周波数変動に対するロバスト性を考慮した重み関数を設定し、各アクチュエータに対する補償器の設計を行った。
- D) 研磨用モータ駆動時の振動： 被加工物を研磨する際、研磨材を回転させるモータの回転数に同期した特定周波数外乱が発生し、荷重値が振動的な応答となり、一定荷重を維持できない。そのため、振動抑制を考慮した制御系の設計が必要となる。本研究では、モータ駆動による外乱が特定の周波数成分であることを着目し、その特定周波数における外乱抑圧特性を改善する補償器を設計し、振動抑制を実現した。

本研究では、空気圧シリンダとVCMを併用した2段アクチュエータ制御系で構成される荷重制御装置を制御対象に、アクチュエータ間の動作干渉を抑制してサーボ帯域の広帯域化を実現すると共に、被加工物の凹凸に起因した突発的な外乱や研磨用モータの回転振動に起因した外乱に対する抑圧性能向上を実現した。さらに、プラントの共振周波数変動に対してロバスト性を考慮した制御系を設計することで、変動した場合でも制御性能を保持できる。各提案手法の有効性は、数値シミュレーションおよび供試装置を用いた実機実験により評価・検証した。

以上から、本論文は博士論文として十分値するものと認める。