

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 1 日現在

機関番号：15301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420178

研究課題名(和文) 遅延を考慮した6軸空圧式アクティブ除振システムの構築

研究課題名(英文) Development of Pneumatic Anti-Vibration Apparatuses with Six Degrees-of-Freedom Considering Time Delay

研究代表者

中村 幸紀 (Nakamura, Yukinori)

岡山大学・自然科学研究科・講師

研究者番号：90574012

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、空圧式除振装置のむだ時間補償と姿勢制御について検討した。まず、むだ時間補償のため、Smith補償器の予測むだ時間の調整方法と除振装置のモデルの設定方法を提案した。つぎに、むだ時間により生じる除振台の回転運動を抑制するため、目標値整形を用いた姿勢制御法を提案し、実機検証を行った。最後に、むだ時間が存在する場合の圧力制御系の帯域拡大について検討した。Smith法と相対変位一階微分正帰還を併用することで、共振、反共振が抑制され帯域が拡大されることを示した。

研究成果の概要(英文)：This paper considers dead-time compensation and attitude control of pneumatic anti-vibration apparatuses. First, we propose the tuning method of model of apparatuses and setting method of time delay in a Smith predictor. Then, in order to avoid the rotation of the apparatuses due to dead time, we present the attitude control method, which employs reference shaping. The effectiveness of this method is demonstrated by experiment. Finally, we consider the bandwidth expansion of pressure control system of anti-vibration apparatuses under the condition that the dead time exists. It is shown that resonance and anti-resonance can be suppressed by using Smith prediction and relative displacement derivative positive feedback, resulting in the expansion of control bandwidth.

研究分野：制御工学

キーワード：空圧式除振台 むだ時間 姿勢制御 Smith法

1. 研究開始当初の背景

半導体の露光処理では精密ステージが用いられており、電子デバイスの微細化のためにはさらなる位置決め精度の改善が求められている。このため、露光装置には床からの振動伝達を抑える空圧式アクティブ除振装置が搭載されている。同除振装置はアクチュエータとして空気ばねを有しており、ばねに供給される圧縮空気の流量はバルブにより調整される。生産加工現場では、バルブの保守・点検を容易にするため、バルブを空気ばね直近に取り付けず、除振台から離れた場所に設置する。

しかし、バルブと空気ばねを繋ぐ配管が長くなり、結果的に圧縮空気が空気ばね到達するまでの遅れ時間(むだ時間)が増加する。このため、制御系に対する位相余裕は減少し、制御性能が劣化する。

また、産業応用の場面で使用されている除振装置は、通常複数の空気ばねを有する6軸の多自由度除振装置である。このため、空気ばねごとに配管ごとが接続されており、むだ時間が複数存在する。さらに、バルブを遠方に集約するとき、周辺機器の設置状況により各配管の長さが一致しないことがあるため、各むだ時間に差異が生じる。それにより、圧縮空気が供給されるタイミングは空気ばねごとに異なり、結果的に除振台に対して不要な回転運動が生じる。このような回転は、除振台上のステージの位置決め精度を低下させる要因となる。

従来の除振台に対する振動制御の研究では、その多くが遅れ時間について陽に考慮されていなかった。また、遅延を補償した振動制御法もいくつか報告されているものの複数の異なる遅れ時間の場合については議論されていなかった。以上の理由により、むだ時間に差異がある環境下において、除振台の姿勢制御を検討するに至った。

2. 研究の目的

本研究では、圧縮空気を空気ばねへ供給する際に生じるむだ時間と、姿勢制御を考慮した多自由度空圧式除振システムの構築が目的である。遅延の一補償方法として、Smith法が知られており、様々な分野への応用例が報告されている。しかし、配管ごとに遅延時間が異なる場合、制御系の安定解析が困難となり、多自由度除振装置に実装するのは容易ではない。また、同手法を用いる際に除振台のモデルとむだ時間を正確に同定する必要がある。また、産業応用の場面では、モード制御が施されており、同制御系に対するSmith法の適用可能性を明らかにすることも重要である。これらの諸課題について検討し、Smith法を実装する上での対策を明らかにする。そして、遅延を補償することで、除振台の回転モードの発生を抑える姿勢制御法を提案する。

また、本研究を進める過程で、除振台の回

転運動を速やかに抑えるため、空気ばねの応答性を改善することになった。除振装置は、空気ばね特性を表す空圧系と除振台の機械特性を表す機械系で構成されており、同空圧系は共振・反共振特性を有する。それにより、圧力制御系の帯域が制限されるため、むだ時間を考慮した共振・反共振の抑制について取り組んだ。また、空気ばねの応答をさらに改善するため、圧力管理の際にモード制御を用いた圧力モード制御についても検討した。

3. 研究の方法

前述の目的を達成するため、以下の内容を実施した。

(1) Smith法を用いて空圧式除振装置のむだ時間補償を行うにあたり、同手法の実装課題を検討した。具体的には、Smith補償器で用いる除振装置のモデルの設定方法と予測むだ時間の調整方法である。モデルの設定については、配管の長さを変えながら、空圧系の周波数特性を測定し、そのときの共振周波数を評価した。また、予測むだ時間の調整については、調整の指標を示すため、予測むだ時間の設定誤差が制御系の共振周波数へ及ぼす影響、またステップ応答の偏差の時間積分へ及ぼす影響を評価した。

(2) 通常の多自由度除振台では、センサ情報を並進運動や回転運動など運動モードに分離し、各モード別に制御を行う運動モード制御が実装されている。その一方で、同制御系に対してはSmith法が用いられていなかった。そこで、運動モード制御が使用されているときに、Smith法の効果が得られるかについて検討した。その際、2軸除振装置のシミュレータ開発、空圧系や機械系のパラメータ同定、そしてモード制御を実装し、実験環境を構築した。

(3) 地震発生時における除振装置の停止方法を検討した。産業応用の場面では、地震が発生すると、空気ばね内の空気を強制的に排気することで、除振台を立ち下げる。しかし、配管ごとに遅延時間が異なると、立ち下げ時に除振台が回転するため、機械衝突を招く可能性がある。その対策として、目標値軌道の整形を提案した。同手法は、除振台の立ち下げに時に起こり得る回転運動に対して、逆方向の回転が生じるように回転モードの目標値を修正する。それにより不要な回転運動を抑えることができる。

(4) 半導体露光装置では、除振台上の精密ステージが高速に移動するため、同ステージを含めた除振台の重心位置は変化する。その際、除振台に傾きが生じるため、速やかに元の状態へ戻さなければならない。そのためには、圧力制御系の帯域を拡大することで、空気ばねの応答速度を改善する必要がある。しかし、除振装置の空圧系には、共振・反共振が存在し、それが帯域拡大の妨げとなっていた。その対策として、相対変位一階微分正帰還が提案されているものの、除振装置にむだ時間が

含まれる場合には、制御系は非因果的になるという問題があった。

そこで、Smith 法を併用することで、むだ時間の影響を補償し、同正帰還による共振の抑制を図る。本手法の有効性を実機実験により検証した。また、従来の除振台の振動制御では、遅延を含むときの除振率について十分に検討されていなかった。除振率は除振装置の性能指標であるため、遅延を含む環境下で除振率を評価した。

(5) 露光装置に対する空圧式除振台では、除振台の変位・加速度・圧力を計測してフィードバックする多重ループの制御系が採用されている。従来、変位・加速度については運動モードごとに制御を行う運動モード制御が用いられる。同制御法により制御器調整の自由度を高めることができる。

しかし、圧力については空気ばねごとに制御を行う独立制御が採用されていた。このため、圧力管理についても運動モード制御を用いることで、除振台の回転運動の抑制効果が期待できる。以上の理由により圧力のモード制御を提案し、実験による性能評価を行った。

4. 研究成果

Smith 法のモデルの設定方法については、配管長に応じて空気ばね内の共振周波数が変化することを確認した。これは配管を通過する空気の入射波と空気ばね内の反射波により、配管内で定常波が生成され、それにより生成される気柱共振が原因である。このため、モデルの設定では、同共振を考慮したものを提案した。

また予測むだ時間の調整方法として、予測むだ時間と除振装置の遅れ時間が一致するとき、制御系の共振周波数と偏差の時間積分が最小になることを示した。さらに、予測むだ時間の設定に誤差を含む場合について安定解析を行った。上記の研究成果は国際会議・国内会議にて発表され(学会発表)、また論文誌に掲載された(雑誌論文)。また、雑誌論文 に対して、その成果が高く評価され、マザック財団高度生産システム優秀論文賞を受賞した。

また、モード制御が施された制御系に対して、Smith 予測器を用いることで閉ループ系の分母多項式にむだ時間要素が含まれないことを示した。つまり、多自由度の除振台に対しても、Smith 法によるむだ時間補償の効果が得られることを明らかにした。そして、配管ごとにむだ時間が異なる場合で実験を行い、同手法により除振台の回転運動が抑制されることを確認した(学会発表)。

つぎに、目標値整形による除振台の立ち下げについて、その有効性を検討した。従来の強制排気による立ち下げでは、アンダーシュートを伴う応答を確認した。その際、Smith 法のみでは、立ち下げの幅が大きいくほど、回転運動の抑制効果が小さくなることが分かった(学会発表)。これは、Smith 補償

器に実装した除振台のモデルが線形近似モデルであり、立ち下げ幅が大きくなるほど、近似誤差の影響も増加し、その結果 Smith 法の効果が減少したと考えられる。そこで、提案した目標値整形を用いて立ち下げ実験を行い、その結果を図 1 に示す。同図は立ち下げ時の除振台の変位と角度である。提案法を用いない場合、回転運動により角度に関してアンダーシュートが発生している。一方、提案法を用いた場合、回転運動による振動が軽減されることを確認した。

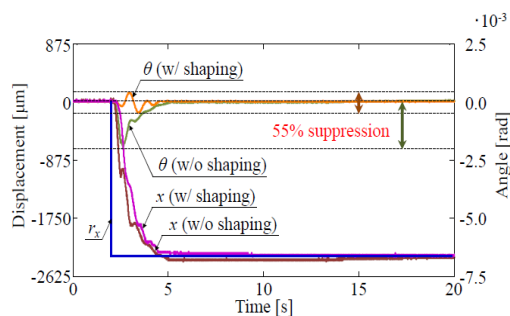


図 1 除振台の位置と角度

圧力帯域の拡大については、空気ばねの共振・反共振を抑圧する手法として、相対変位一階微分正帰還が従来提案されていたが、むだ時間を含めない場合を前提としていた。そこで、入力遅れが発生する場合について検討し、遅延を含む場合には同正帰還を用いた制御系は非因果的となることを示した(雑誌論文)。

その対策として Smith 法を用いることにより、制御系は因果的となり、同正帰還を実装することが可能となった。実機検証やシミュレーションにより、共振・反共振が抑制されることをボード線図、根軌跡など周波数特性に基づいて評価した(学会発表)。

また、帯域拡大により空気ばねの速応性が改善されることを時間応答から確認できた(学会発表)。さらに、むだ時間の大きさに応じて除振率は変化することも示した(雑誌論文)。なお、むだ時間を含むときの除振率の改善方法までは示されておらず、その点が今後の課題となる。

圧力管理にモード制御を用いる手法については、制御器の調整自由度が改善されることを周波数特性から確認することができた(学会発表)。また、回転運動に関するゲイン調整の際に、他のモード(並進運動)の特性にはほとんど影響を与えないこと、つまり非干渉化されることを解析的に示した(学会発表)。このため、圧力モード制御を用いることで、他のモードへの影響を抑えつつ、制御器の調整を行うことができる。さらに、実験により、圧力モード制御を用いることで除振台の回転運動が抑えられることを確認した(学会発表)。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計2件)

Yukinori Nakamura, Hiroki Kawakami, and Shinji Wakui, Bandwidth Expansion of a Pressure Control System for Pneumatic Anti-Vibration Apparatuses in Presence of Dead Time, Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, 査読有, Vol.9, 2015, 1-13, 10.1299/jamdsm.2015jamdsm0031

Yukinori Nakamura, Satoru Goto, and Shinji Wakui, Tuning Methods of a Smith Predictor for Pneumatic Active Anti-Vibration Apparatuses, Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, 査読有, 7, 2013, 666-676, 10.1299/jamdsm.7.666

〔学会発表〕(計10件)

Yukinori Nakamura, Hiroki Kawakami, Shinji Wakui, Suppression of Anti-Resonance and Resonance in Pneumatic System of Vibration Isolator Considering Time Delay, 41st Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON), November 11, 2015, Pacifico Yokohama (Kanagawa・Yokohama)

青木ゆうい, 中村幸紀, 涌井伸二, 圧力モード制御を用いた二自由度空圧式除振台に対するパラメータ調整とその解析, 電気学会制御研究会, 2015年10月31日, 東京農工大学小金井キャンパス(東京・小金井市)

青木ゆうい, 中村幸紀, 涌井伸二, 二自由度空圧式除振台に対する圧力モード制御の検討, 電気学会制御研究会, 2015年6月27日, 広島大学学士会館(広島・東広島市)

中村幸紀, 川上宙輝, 涌井伸二, むだ時間を考慮した空圧式除振装置に対する圧力制御系の帯域拡大, 電気学会制御研究会, 2015年3月27日, 香川高等専門学校高松キャンパス(香川・高松市)

Satoru Goto, Yukinori Nakamura, and Shinji Wakui, Attitude Control of Pneumatic Active Anti-Vibration Apparatuses with Two Degrees-of-Freedom in Shutdown Process, 2015 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT2015), March 17, 2015, Seville (Spain)

後藤怜, 中村幸紀, 涌井伸二, むだ時間を考慮した二軸空圧式除振装置に対する姿勢制御, 平成26年電気学会電子・情報・シス

テム部門大会, 2014年9月5日, 島根大学松江キャンパス(島根・松江市)

Satoru Goto, Yukinori Nakamura, and Shinji Wakui, Smith Predictor-Based Time Delay Compensation for Attitude Control of Pneumatic Anti-Vibration Apparatuses with Two Degrees-of-Freedom, IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM), July 8, 2014, Besancon (France)

後藤怜, 中村幸紀, 涌井伸二, モード制御を備えた二軸空圧式アクティブ除振装置に対するSmith補償器の実装, 第56回自動制御連合講演会, 2013年11月16日, 新潟大学工学部(新潟・新潟市)

Yukinori Nakamura, Satoru Goto, Takuya Horie, and Shinji Wakui, Implementation of a Smith Predictor for Pneumatic Vibration Isolators with Dead Time, 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON), November 13, 2013, Vienna (Austria)

後藤怜, 中村幸紀, 涌井伸二, 空圧式アクティブ除振装置に対するSmith補償器の予測むだ時間の設定法, 2013年8月29日, 平成25年電気学会産業応用部門大会, 山口大学吉田キャンパス(山口・山口市)

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕
出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

〔その他〕
ホームページ等
<http://web.tuat.ac.jp/~wakuiken/publications/publications.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中村 幸紀 (NAKAMURA, Yukinori)
岡山大学・自然科学研究科・講師
研究者番号: 90574012

(2) 研究分担者

涌井 伸二 (WAKUI, Shinji)
東京農工大学・工学(系)研究科(研究院)・教授
研究者番号: 70334472