

令和 3 年 6 月 8 日現在

機関番号：15301

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18K04022

研究課題名（和文）不規則な圧力脈動と配管共振に頑健な空圧式除振システムの開発

研究課題名（英文）Development of Robust Pneumatic Isolation Systems for Random Pressure Variation and Pipe Resonance

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） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、圧縮空気圧の変動により生じる圧力外乱の補償法と配管共振を抑制するための圧力推定について検討した。Central Pattern Generatorや繰り返し制御器などを用いて振動の抑制効果を改善した。さらに圧力外乱の抑制効果と床からの振動に対する除振性能を両立した制御系の設計を提案した。またUnscented Kalman Filterや粒子フィルタを使用した圧力推定についても検討した。推定に要する計算時間の短縮方法などを提案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

圧力外乱は、その周期が圧縮空気の消費流量に依存して不規則に変動する。さらに、配管共振は圧力外乱による振動を増幅させる要因となり得る。よって同外乱の補償法を提案した本研究の成果は学術的意義を有している。また本研究の成果により、振動の抑制効果が改善されると、除振装置に搭載された精密ステージの位置決め精度が向上し、小型で微細なLSIの製造が期待できる。このため本研究は社会的意義も有している。

研究成果の概要（英文）：This study considers compensation methods for pressure disturbance, which is caused by variation of compressed air pressure, and pressure estimation methods for suppression of pipe resonance. Vibration of an isolation table is attenuated by using a central pattern generator, a repetitive controller, etc. Furthermore, a design method for vibration isolation systems is proposed in order to overcome the tradeoff between pressure disturbance attenuation and transmissibility reduction. Pressure estimation with unscented Kalman Filter and particle filter is also considered. A method of computation time reduction of estimation is presented.

研究分野：制御工学

キーワード：空圧式除振装置 空気ばね 圧力制御

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

半導体露光装置には床からの振動伝達を抑制するため、空圧式除振装置が使用されている。同除振装置には、コンプレッサからの圧縮空気が供給されるが、圧縮空気の生成過程で圧力が脈動することで圧力外乱が生じる。また外乱の周波数が配管共振の周波数と一致することで圧力外乱が顕著に表れる。さらに、空気ばねが複数の多自由度除振装置では、圧力外乱が多入力となり、高次振動モードが生じる。これらの影響で除振台上に積載されたステージの位置決め精度は低下する可能性があり、圧力外乱を補償する必要がある。

2. 研究の目的

圧力外乱はコンプレッサが起動と停止を繰り返すことで生じるため、周期性を有している。また、製造現場においては、1台のコンプレッサを複数の空圧機器で共有することが多く、除振装置やその他の空圧機器の稼働状況に応じて圧縮空気の消費流量は変化する。その結果、圧力外乱の周期は変動するという特徴がある。また、複数の空気ばねを有する多自由度の除振装置では、圧力脈動の周期が空気ばねごとに異なることで高次の振動モードが生じる。これらの点を踏まえ、本研究の目的は、圧力外乱による振動と高次振動モードの抑制である。

3. 研究の方法

(1) 圧縮空気圧の変動は周期的であるため、圧力外乱は周期外乱とみなせる。同外乱の周期性に着目し、Central Pattern Generator (以下、CPG)、繰返し制御器、Sinusoidal 補償器 (以下、S 補償器) を用いた振動補償に取り組んだ。CPG には入力の周波数に同期した出力を生成する引き込み現象という特長があり、それを利用して圧力外乱の周期変動に対応した振動補償を行う。繰返し制御による補償では、同制御器のパラメータ設定について検討し、圧力外乱と床からの振動の両方を考慮した制御系を設計した。また S 補償器による振動抑制では、同補償器を用いたときに生じる振動の抑制方法などを検討した。

(2) 配管共振の影響を抑えるため、空気ばねの内圧を用いた圧力フィードバックが知られている。多自由度除振装置では空気ばねの数が増えるため、それに伴って必要な圧力センサの数も増加する。ここではセンサの設置コストを削減するため、圧力推定について検討した。粒子フィルタや Unscented Kalman Filter (以下、UKF) を用いた非線形フィルタリングにより推定を行った。また除振装置で用いる電磁バルブのモデリングを行い、同モデルを用いて推定精度を評価した。

4. 研究成果

(1) 周期変動を伴う圧力外乱に対して、CPG による補償法が報告されている。同補償法による振動抑制効果を改善するため、CPG の状態量をフィードバックした振動制御法を提案した。シミュレーションと実機実験による検証を行い、位置制御器を用いた従来手法に比べて提案手法では除振台の振動が軽減されることを確認した。また、CPG を振動制御に用いた従来研究では時間領域のみに基づく評価が多いが、一方で本研究では記述関数法を用いることで、提案手法の効果を周波数領域の観点からも検討した。その結果、CPG の出力の一次遅れ信号を用いることで、低周波域から中周波域ではループゲインを増加させる効果が得られ、それにより外乱抑制効果が改善されたことを確認した。

(2) CPG を用いた振動抑制手法を多自由度の空圧式除振装置に実装し、実機検証により同手法の性能を評価した。除振装置は工場内の設置場所により、各空気ばねにつながれた配管の長さに変異が生じる。それにより、圧縮空気が空気ばねに到達するまでの遅れ時間が配管ごとに異なる。そこで本実験では、まず配管長が空気ばねごとに異なる場合で検証した。2自由度除振装置を使用し、配管が同じ場合に比べて、除振台の回転方向の振動が増加したことを確認した。つぎに、その対策として上記(1)の CPG による振動抑制手法を用いて検証した。市販の多自由度の除振装置では、各空気ばねのごとのセンサ出力を運動モードに変換するモード制御が採用されている。これにより制御系が非干渉化され、運動モード別に制御器を設計できる。本手法では、除振台の並進と回転の運動モードに対して、それぞれ CPG を内包した制御系を設計した。実験結果より、CPG を用いることで回転運動が抑制されることを示した。最後に CPG を用いた制御系において、除振台を平衡位置へ安定浮上させる方法を検討した。通常、除振装置には除振台の安定浮上の役割を担う PI 制御器が用いられる。一方、CPG の内部状態を用いることで PI 制御器と同様の効果が得られることを、記述関数法に基づく周波数解析により示した。このため、PI 制御器を用いることなく、CPG 単独で除振台が安定浮上することを実験結果から確認できた。以上の成果は、産業応用の場面において本手法を実装する際に有用な知見であると考えられる。

(3) 圧力外乱による振動抑制効果と床からの振動 (以下、床振動) に対する除振性能の改善について検討した。ここでは、まず周期外乱に対する一抑制手法である繰返し制御について、同制御

器のパラメータ設定に焦点をあてた。繰返し制御器は内部にフィードフォワード項(以下,FF項と呼称)を含んでいる。提案手法では,除振台の機械共振の帯域が圧力外乱のそれと異なる点を踏まえ,FF項として動的な補償器を設定する。それにより,圧力外乱を補償しつつ,振動伝達率の増加が抑制されることを制御系の周波数特性に基づいて解析した。また提案するFF項の折点周波数を効率よく設定するため,同周波数の探索範囲に関する指針を示した。さらに,スカイフックスpringを用いた従来手法と比較を行い,提案手法と従来手法で除振効果が得られる帯域は異なることを明らかにした。通常,繰返し制御では外乱抑圧効果を改善させるため,FF項を定数とした静的補償器として設定し,同項をハイゲインに調整することが多い。一方,除振装置においては,圧力外乱の抑制効果と床振動の除振性能の間にはトレードオフの関係がある。その両立を図るため本研究ではFF項を動的補償器と設定しており,その点が従来研究と異なる。今後の展望として,振動伝達率を実機実験により測定し,提案手法の効果を評価することが挙げられる。

(4) 空圧式除振装置に対して床振動の除振帯域を拡大する手法を提案した。通常,除振装置の振動伝達率は,除振台の機械共振より高周波域では減少する。このため,機械共振の周波数を低周波域に推移させることができれば,除振帯域を広げられる。そこで,CPGを用いた振動制御系において,新たに調整ゲインを用意し,空気ばね剛性を消去するようにゲインを設定する。機械共振の周波数は,空気ばねと除振台の剛性により決まるため,空気ばね剛性を消去することで共振周波数を低下させることができる。シミュレーションによる評価を行い,提案手法により除振帯域が拡大されることを確認できた。

(5) 空圧式除振装置では,空気ばねの内圧を用いた圧力フィードバックを施すことで,配管共振を抑制し,空気ばねの応答を改善する効果がある。しかし,微振動を抑制するため,高分解能な圧力センサが必要であり,その設置コストが課題となる。そこで,ソフトセンシングにより空気ばねの内圧を推定する方法を検討した。空気ばねが非線形性を有しているため,非線形フィルタリングの一手法である粒子フィルタを用いる。同手法では,システム雑音や観測雑音が正規性に制限されず,有用性が高いという特長がある。一方,推定に要する計算時間が課題であるため,計算時間の削減方法を提案した。シミュレーションにより,本手法の有効性を検証した。その結果,提案手法では,計算時間は短縮されるものの,推定誤差は増加したため,その改善に今後取り組む必要がある。

(6) UKFによる圧力推定に取り組んだ。まず推定対象となる電磁バルブのモデリングに着手した。実験で使用する電磁バルブは三ポート型双ノズルフラップ弁であり,圧縮空気特性によりモデルが変化する切替え系として記述できることを示した。またモデルのパラメータ値を差分進化などにより同定した。構築したモデルの妥当性を評価するため,ここでは準備として空気圧シリンダと電磁バルブで構成される位置決め制御系の実験環境を構築し,位置決めの応答波形とシリンダの内圧の応答波形を測定した。本実験結果より,シミュレーションと実験により得られた応答は類似しており,提案するモデルが妥当であると判断している。またUKFによる圧力推定のシミュレーションを行い,推定精度を評価した。ここでは推定対象の状態制約を考慮したUKFを適用している。シミュレーション結果と実測結果を比較した結果,応答の過渡状態では推定誤差が残存しているものの,応定常状態においては精度よく推定できていることを確認した。このため,構築した電磁バルブのモデルが圧力推定に有効であると考えられる。今後は,同モデルを用いて空気ばねの圧力推定を行い,推定量をフィードバックした圧力制御系を設計する予定である。

(7) 圧力外乱を抑制する一手法として,S補償器を用いた振動制御法が報告されており,本研究ではS補償器を除振装置に実装する上での課題とその対策について検討した。第一の課題は,除振台が平衡位置に定位しているときにS補償器を起動または停止させると,その過渡状態において除振台が振動することである。これは,同補償器の起動や停止の際に制御入力が大きく変化することが原因である。対策として,ソフトスイッチを用いた制御系を提案し,本手法によりS補償器からの制御入力の変化が緩やかになり,それにより除振台の振動が軽減された。第二の課題は,S補償器を起動した後の定常状態において高周波の振動が残存することである。その要因を明らかにするため,ここでは制御系の一巡伝達関数の周波数特性を評価した。その結果,S補償器の位相遅れにより,安定余裕が低下していることを確認した。このため,安定余裕の低下が高周波振動の要因であると考えられる。振動抑制のため,圧力外乱を抑制するS補償器に加えて,高周波振動に対するS補償器を併用した制御法の適用を試みたが,位相余裕の減少により制御系が不安定化した。その結果を踏まえ,位相進み型PIS制御を提案し,同制御法により安定余裕を改善した。また提案手法により高周波振動が抑制されることを実験により確認した。また,S補償器を用いた振動制御の研究では,圧力外乱の抑制のみが扱われているが,本研究では床振動に対する除振性能も評価した。振動伝達率を評価した結果,S補償器を用いることで反共振と共振が表れることを確認した。制御系の伝達関数モデルを低次のそれに近似して解析を行い,S補償器により制御系の減衰係数が減少したことが原因で反共振と共振が生じることを示した。今後は共振を抑制するS補償器の設計方法を検討する予定である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 柏崎翔, 涌井伸二, 中村幸紀	4. 巻 139
2. 論文標題 CPGを用いた2自由度空圧式除振装置の安定浮上と流量外乱抑制	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 電気学会論文誌C	6. 最初と最後の頁 520-521
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1541/ieejeiss.139.520	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 中村幸紀, 野口裕喜, 涌井伸二	4. 巻 86
2. 論文標題 圧力脈動と機械共振の帯域の差異を考慮した空圧式除振台に対するフィードフォワード項の一設定方法	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 精密工学会誌	6. 最初と最後の頁 493-501
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2493/jjspe.86.493	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 NAKAMURA Yukinori, AKAGAWA Hirota, WAKUI Shinji	4. 巻 7
2. 論文標題 Flow disturbance attenuation for pneumatic anti-vibration apparatuses with a Sinusoidal compensator and vibration transmissibility analysis	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Mechanical Engineering Journal	6. 最初と最後の頁 1-15
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1299/mej.19-00454	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計15件（うち招待講演 1件/うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Yukinori Nakamura, Yutaro Tetsuno, Kentaro Hirata, Kuniyoshi Okano
2. 発表標題 A setting method of output-end frequency-shaped sliding mode hyperplane for a pneumatic vibration isolator
3. 学会等名 International Conference on Mechanical, Electrical and Medical Intelligent System (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yukinori Nakamura, Yuki Noguchi, Shinji Wakui
2. 発表標題 Consideration on transmissibility reduction for pneumatic vibration isolators using a pseudo differentiator
3. 学会等名 SICE Annual Conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 鉄野裕太郎, 中村幸紀, 平田健太郎, 岡野訓尚
2. 発表標題 空圧式除振装置に対する周波数整形型スライディングモード制御系の切換超平面の設計に関する検討
3. 学会等名 第63回システム制御情報学会研究発表講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中村幸紀, 林田拓也, 平田健太郎, 岡野訓尚
2. 発表標題 スライディングモード制御を用いた空気圧シリンダに対する流量外乱補償の実機検証
3. 学会等名 電気学会制御研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中村幸紀, 野口裕喜, 涌井伸二
2. 発表標題 圧力脈動の帯域を考慮した繰返し制御による空圧式除振台の振動補償
3. 学会等名 第62回自動制御連合講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中村幸紀, 東山和司, 平田健太郎, 岡野訓尚
2. 発表標題 ネットワーク通信を介した粒子フィルタに基づく推定の計算時間短縮
3. 学会等名 スマートシステムと制御技術シンポジウム2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 江田真大, 中村幸紀, 平田健太郎, 岡野訓尚
2. 発表標題 三ポート型双ノズルフラップ弁を用いた空気圧シリンダのモデリング
3. 学会等名 第7回計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yukinori Nakamura, Yuki Noguchi, Shinji Wakui
2. 発表標題 Repetitive control-based vibration attenuation for pneumatic vibration isolators using a phase-lag type compensator
3. 学会等名 IEEE International Conference on Mechatronics (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 柏崎翔, 中村幸紀, 涌井伸二
2. 発表標題 CPGのみを用いた空圧式除振装置に対する流量外乱抑制の向上
3. 学会等名 電気学会制御研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 中村幸紀
2. 発表標題 非線形フィルタによる状態推定
3. 学会等名 電気学会制御研究会（招待講演）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 柏崎翔, 平柳渉, 中村幸紀, 涌井伸二
2. 発表標題 CPGを用いた2自由度空圧式除振装置に対する流量外乱抑制の実機検証
3. 学会等名 計測自動制御学会 システム・情報部門学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 柏崎翔, 平柳渉, 涌井伸二, 中村幸紀
2. 発表標題 配管長の異なる2自由度空圧式除振装置に対するCPGを用いた流量外乱抑制の一試み
3. 学会等名 スマートシステムと制御技術シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中村幸紀, 北山大樹, 平田健太郎, 岡野訓尚
2. 発表標題 差分進化を用いた位置決めステージの摩擦同定
3. 学会等名 電気学会制御研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中村幸紀, 江田真大, 平田健太郎, 岡野訓尚
2. 発表標題 三ポート型双ノズルフラップ弁を用いた空気圧シリンダ系の圧力推定
3. 学会等名 電気学会スマートシステムと制御技術シンポジウム2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中村幸紀
2. 発表標題 CPGの内部状態を用いた空圧式除振装置の除振率改善
3. 学会等名 日本機械学会情報・知能・精密機器部門講演会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担 者	涌井 伸二 (Wakui Shinji) (70334472)	東京農工大学・工学(系)研究科(研究院)・教授 (12605)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------