

平成 30 年 5 月 31 日現在

機関番号：15301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2017

課題番号：16K18038

研究課題名(和文) 流量外乱に着目した空圧式除振台と空圧ステージに対する振動制御技術の開発

研究課題名(英文) Development of Vibration Control Technique for Pneumatic Anti-Vibration Apparatuses and Pneumatic Stages Considering Flow Disturbance

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) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、流量外乱が周期性を有していることを踏まえ、繰返し制御やPIS制御を用いた除振装置の振動抑制手法を提案した。また、モデル追従制御やスライディングモード制御などを用いて、空圧ステージやシリンダの位置決め再現性を改善する方法について検討した。さらに、粒子フィルタを用いたシリンダの圧力推定も検討した。

研究成果の概要(英文)：In this study, since flow disturbance is periodic, we propose the vibration suppression methods, which use repetitive control and PIS control. The positioning repeatability of pneumatic stages and cylinders is improved by using model following control, sliding mode control, etc. Furthermore, we also consider the particle filter-based estimation of pressure in cylinders.

研究分野：制御工学

キーワード：流量外乱 空圧式除振装置 空圧ステージ

1. 研究開始当初の背景

電子ビーム露光装置を用いた半導体集積回路 (IC) の製造では、精密ステージを移動させ、ウエハに対して露光処理が施される。IC の小型・微細化を実現するためには、以下の点が重要である。

(a) ウエハを目標位置へ正確に運搬すること (ステージの移動精度の向上)

(b) ウエハ上の目標箇所を電子ビームを正確に照射すること (ビームの照射精度の向上)

上記 (a) を達成するためには、床からの振動抑制が必要であり、その対策として空圧式除振台が用いられる。同除振台は空気ばねで支えられており、ばねの内圧を管理することで振動の伝達を抑える。また、(b) については、電磁モータ駆動のステージを使用すると磁気漏洩を伴うため、電子ビームの照射精度が低下する。このため、空気圧で駆動するステージ、すなわち空圧ステージが注目されている。空圧式除振台と空圧ステージには、コンプレッサで生成した圧縮空気が供給される。しかし、圧縮空気の生成過程で圧力が変動すると流量外乱が発生し、それに同期して振動が生じている。また、空圧ステージの場合も流量外乱の影響を受け、それにより位置決め精度の再現性は低下する。除振装置に関する従来研究の多くは、床からの振動抑制を、空圧ステージに関する従来研究ではシリンダの摩擦補償を主に対象としている。このため、両研究分野では流量外乱について十分に議論されておらず、その抑制方法を検討する必要がある。

2. 研究の目的

本研究の目的は、流量外乱の抑制により空圧式除振台の除振性能を改善し、空圧ステージの位置決め精度の再現性を確保することである。産業応用の場面で使用される空圧式除振台は複数の配管が接続されているので除振台は多自由度となり、1 自由度の場合と比べて振動の抑制が困難である。また、空圧ステージにおいても配管が複数あり、流量外乱が配管ごとに発生するため、位置決め精度の再現性を確保するのは困難である。さらに、製造現場では、周辺機器の設置位置により各配管の長さが異ならざるを得ない。これにより圧縮空気が空圧機器に届くまでの伝達時間が異なる。よって、流量外乱の加わるタイミングが配管ごとに異なる。一方、圧縮空気はコンプレッサ内部にあるピストンが往復運動することで生成され、その際にピストンが起動・停止を繰り返すため圧縮空気圧は周期的に変化する。したがって、流量外乱は周期外乱の一種とみなせる。また、ステージを駆動するシリンダは非線形特性を有している。これらの特徴を踏まえて、本研究では流量外乱の抑制を試みる。

3. 研究の方法

(1) 空気圧除振台に対する流量外乱の抑制手法として繰返し制御を用いた。繰返し制御器にはフリーパラメータとしてフィードフォワード項が存在する。除振台の位置情報のみをフィードバックする単一ループ型の制御系については、これまで研究代表者はフィードフォワード項としてノッチフィルタを設定することで、流量外乱の抑圧と除振率の改善が両立されることを示した。一方、通常の除振装置では、除振台の位置情報に加えて加速度情報などもフィードバックした多重ループで構成される。そこで、多重ループ型の制御系を構築し、シミュレーションと実験検証により除振台の位置と除振率を評価した。

(2) 空圧式除振台に対する流量外乱のもう一つの抑制手法として、Proportional Integral Sinusoidal (PIS) 制御を適用した。同制御法は PI 補償器と S 補償器で構成され、S 補償器は周期外乱と同じ周波数の周期信号を生成する機構である。本研究では、PI 補償器と S 補償器を直列に接続した直列型 PIS 補償器について、同補償器を用いたときの制御系の安定性を解析した。また、実験により除振台の位置を測定し、振動の抑圧効果を評価した。

(3) 空圧ステージについては、バルブから空圧ステージまでの各配管の長さに差異があるときの制御法を検討した。シリンダ・配管・バルブなどで構成される空圧系に対して、物理パラメータの不確かさを補償するため、本研究ではモデル追従制御を用いている。同制御法では、所望の応答を得るためのモデルを設定し、制御対象の応答がモデルの出力に追従するように操作量を補正する。しかし、配管長が異なる場合については、同制御器やモデルのパラメータの調整方法が明らかにされていない。そこで、配管長に差異があるときの空圧ステージのモデリングを行い、得られた数理モデルから、モデル追従制御器の調整方法を検討した。

(4) バルブとシリンダを繋ぐ配管が長くなると、圧縮空気がシリンダに届くまでの伝達時間が増加する。その結果、シリンダの応答の遅れ時間が生じ、それが位置決め精度を低下させる要因となる。そこで、空圧機器に対するむだ時間補償を検討した。ここでは、むだ時間の誤差を考慮した状態予測制御により安定化を試みた。また、位置決め精度の再現性を確保するため、スライディングモード制御による流量外乱抑制についても検討した。さらに、流量外乱が位置決め精度に影響を解析するため、空気の圧縮性や電磁バルブの特性を考慮したシリンダの非線形モデルを構築した。

(5) 空圧ステージと空圧式除振台の位置制御では、シリンダや空気ばねの適切な内圧管理が求められる。しかし、市販の圧力センサでは、分解能の面で制御性能の向上に限界が

あり、また圧力センサの使用はコストの増加につながる。以上の理由から、ソフトセンシングによる圧力の推定について検討した。上記の(4)より、空気圧シリンダの数理モデルが非線形であることを考慮し、ここでは粒子フィルタを用いた状態推定手法を検討した。非線形系に対する推定手法としては、粒子フィルタ以外にも拡張カルマンフィルタや Unscented Kalman Filter などが知られている。しかし、これらの手法では、システムに加わる雑音は正規分布に従うという制約がある。それに対して、粒子フィルタでは雑音が非正規分布の場合にも適用可能という特長があるため、同推定法を選択した。

4. 研究成果

(1) 繰返し制御による流量外乱抑制については、多重ループ型の制御系の場合、繰返し制御器のフィードフォワード項としてノッチフィルタを用いると除振率は悪化することを確認した。その対策として、本研究では、スカイフックスプリングの手法を用いた。具体的には、除振台の加速度情報を一階積分し、それにより得られる速度情報をフィードバックする。このとき、除振台の加速度制御系を積分特性に整形することで、速度情報はさらに位置情報へ変換される。その結果、除振台の機械特性を表す機械系の剛性を調整することができる。本手法により、除振率を改善しつつ、繰返し制御により流量外乱が補償されることを確認した。以上の成果を学会で発表した(学会発表)。また論文誌への投稿に向け原稿を執筆中である。

(2) PIS 制御を用いた振動補償については、PI 補償器と S 補償器を直列に接続したとき、制御系が不安定化した。その原因が S 補償器の位相遅れであることを確認した。本除振装置に対しては、直列接続型 PIS 制御系の PI 補償器のゲインを変更しても安定化できないことを示した。つまり、PI 補償器の再調整では安定化されないため、ここでは位相進み補償器を併用した位相進み型 PIS 補償器を提案した。同補償器を用いることで安定化を実現し、流量外乱が抑制されることを確認した(学会発表)。また発表 に対して Best Session Presentation を受賞した。多自由度の除振装置に対する検証には至っておらず、それが今後の課題である。

(3) 構築した空圧ステージのモデルより、配管長に差異があるとき、配管ごとに空圧系の特性は異なることが分かった。その点を踏まえ、まず各バルブに対して局所的にモデル追従制御器を設計した。同制御法ではシリンダ内の圧力特性のモデルは高次になるが、モデルを設定する際に調整するパラメータ数は少ないことが望ましい。このため、本研究では低次のモデルを設定し、パラメータ数を削減した。

つぎに、モデルのパラメータはゲインと時定数の二種類があり、それぞれの調整方法を

検討した。配管の長さが同じ場合、空圧系を一つのモデルで記述していたが、配管長が異なると、バルブごとに空圧系をモデル化している。両モデルを比較した結果、配管の長さが同じ場合に使用したモデルに対して、ゲインの値を等分し、その値を各モデルのゲインに設定することにした。また、配管が長くなると、時定数が増加することも分かり、同パラメータの設定方法も示した。

最後に、モデル追従制御系の PI 補償器の調整方法を検討した。同制御系では低次の簡易モデルを設定したので、高次の動特性により所望の位置決め結果が得られない可能性がある。解析の結果、配管を長いものへ変更したとき、配管が長い側の積分ゲインを増加させることで高次の動特性の影響は抑えられることを明らかにした。位置決め実験の結果より、提案手法を用いることで応答の再現性が改善されることを確認した。同実験より、圧縮空気に起因した応答の遅れが観測されたため、今後は位置決め速度の向上を検討する予定である。以上の成果が学会で発表され(学会発表)、学会誌に掲載された(雑誌論文)。

(4) 応答遅れをもつシリンダの位置制御について、検証用にボールアンドビーム装置を製作した。同装置を用いた制御系に対して、遅れ時間の誤差を考慮した状態予測制御による安定化を試みた。また、遅れ時間に誤差があるときの応答や周波数特性を評価した。その結果、本研究で採用した予測制御は、従来のそれに比べてむだ時間の許容誤差の上限が大きく、ロバスト性は改善されることを確認した(学会発表)。

また、スライディングモード制御を用いた流量外乱抑制についても検討した。同制御法は、ある種の不確かさを有するシステムに対して、安定性や制御性能のロバスト性を保証する効果がある。しかし、流量外乱の補償効果については十分に議論されていない。そこで、シリンダのロッド位置に関する時間応答をシミュレーションにより評価した。その結果、スライディングモード制御を用いることで、応答の過渡状態においては位置決めの再現性が改善されていることを確認できた(学会発表)。一方、チャタリングが原因で定常状態では振動的な応答が見られた。今後はその対策を施し、実機実験による検証を行う予定である。

そして、構築したシリンダの非線形モデルに基づく位置決め制御を検討した。シリンダの非線形特性と、バルブへの入力電圧の飽和を考慮して、ここではモデル予測制御を用いた。同手法により目標値追従が達成されていることや、パラメータ調整の観点から外乱オブザーバとの比較検討をした(学会発表)。

(5) 粒子フィルタを用いた状態推定について、観測信号の遅れ時間が変動するときの推定手法を提案した。本手法では、推定対象と遅れ時間で構成される拡大系を考え、同拡大系

に対して推定を行う。シミュレーション結果より、本手法を用いることで推定精度が改善されることを確認した(学会発表)。また、空気圧シリンダに対して、シリンダロッドの位置情報などに基づいて、内圧を推定した。従来の粒子フィルタに比べて、提案手法では遅延による推定精度の低下が抑制された。以上の成果を国際会議で発表した(学会発表)。また、空圧シリンダの物理パラメータには、不確かさを含んだものが含まれるため、圧力などの状態量と同時にパラメータを推定する手法も提案した(学会発表)。今後は、推定値を用いたフィードバック制御を実現するため、推定のリアルタイム処理の方法を検討する。また、空気ばねの内圧推定についても検証する予定である。

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1件)

中村幸紀, 武井陸, 涌井伸二, 配管長の差異を考慮した空圧ステージに対するモデル追従制御器の一調整方法, 電気学会論文誌C, 査読有, Vol. 137, 2017, 273-278, 10.1541/ieejieiss.137.273

[学会発表](計9件)

中村幸紀, 東山和司, 平田健太郎, 岡野訓尚, 通信遅延を考慮した粒子フィルタによる状態とパラメータの推定, スマートシステムと制御技術シンポジウム2018, 2018年1月7日, 東広島芸術文化ホールくらら(広島県・広島市)

Yukinori Nakamura, Kazushi Higashiyama, Kentaro Hirata, and Kunihisa Okano, State Estimation over a Network Using Particle Filter, International Conference on Mechanical, Electrical and Medical Intelligent System, November 29, 2017, Kiryu City Performing Arts Center (Gunma, Kiryu)

東山和司, 中村幸紀, 平田健太郎, 岡野訓尚, ネットワーク化制御系における粒子フィルタを用いた状態推定, 第26回計測自動制御学会中国支部学術講演会, 2017年11月25日, 鳥取大学(鳥取県・鳥取市)

中村幸紀, 林祐矢, 平田健太郎, 岡野訓尚, MPCを用いた空気圧シリンダの位置決めに関する検討, 電気学会制御研究会, 2017年8月26日, 首都大学東京日野キャンパス(東京都・日野市)

中村幸紀, 林田拓也, 平田健太郎, 岡野訓尚, 圧力変動を伴う空気圧シリンダに対するスライディングモード制御の効果に関する

検討, 電気学会制御研究会, 2017年3月19日, 宮古島市中央公民館,(沖縄県・宮古島市)

藤永隆孝, 増井詠一郎, 中村幸紀, 平田健太郎, 岡野訓尚, 配管長によるむだ時間を考慮した空気圧シリンダの修正状態予測制御, 第4回計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム, 2017年3月7日, 岡山大学津島キャンパス,(岡山県・岡山市)

Yukinori Nakamura, Hirotaka Akagawa, Shinji Wakui, and Kentaro Hirata, Flow Disturbance Suppression Using Cascade-Type PIS Control for a Pneumatic Vibration Isolator, 42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IEEE IECON), Oct. 26, 2016, Florence Congress Center, Florence (Italy)

中村幸紀, 野口裕喜, 涌井伸二, 平田健太郎, 多重ループ型制御系における空圧式除振装置の流量外乱抑制, 平成28年電気学会電子・情報・システム部門大会, 2016年9月2日, 神戸大学六甲台第2キャンパス(兵庫県・神戸市)

中村幸紀, 武井陸, 涌井伸二, 空圧ステージに対するモデル追従制御器の調整に関する検討, 電気学会制御研究会, 2016年7月9日, 岡山大学津島キャンパス(岡山県・岡山市)

[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

<http://imclab.sys.okayama-u.ac.jp/publication.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