

報告日 2014年(平成26年) 3月11日
報告者 東京農工大学大学院 工学研究院 助教
中村 幸紀

1. 研究概要

(和文)

(1)課題名

流量外乱を抑制した空圧式除振システムの開発

(2)研究者氏名

中村幸紀

(3)研究概要 (日本文)

本研究では、空圧式除振装置への圧縮空気の圧力変動、すなわち流量外乱に対する振動抑制手法を提案した。本手法では、圧力変動は周期性を有することを踏まえ、繰返し制御により流量外乱を補償する。同制御法のフィードフォワード項と遅れ時間の設定方法を検討した。また、外乱オブザーバにより流量外乱を事前に推定し、その時系列信号を適切なタイミングで制御系に印加する方法も提案した。提案手法の有効性を数値シミュレーションと実機実験により検証した。

(4)キーワード

空圧式除振装置, 流量外乱, 繰返し制御, コンプレッサ

(英文)

(1) Research title

Development of a Pneumatic Vibration Isolator Compensating for Flow Disturbance

(2) Name of researcher with title of position

Yukinori Nakamura

(3) Summary

This study proposed the compensation methods for flow disturbance, which is the pressure variation of the compressed air supplied to a pneumatic vibration isolator. In the first proposed method, the flow disturbance is compensated by using repetitive control. The setting of a tunable parameter and time delay in the repetitive controller was investigated. Moreover, in the second compensation method, the time-series signal of the flow disturbance estimated by a disturbance observer is added to the control system for the isolator. The effectiveness of the proposed methods is shown by numerical simulation and experiments.

(4) Key Words

Pneumatic vibration isolator, Flow disturbance, Repetitive control, Compressor

2. 本研究の意義・特色

集積回路(IC)の製造では、半導体ウェハに回路パターンを焼き付ける工程、つまり露光処理が行われる。その際、ウェハを積載した精密ステージを適切な位置へ移動させ、ウェハ上にレーザ光が照射される。ICの高集積化に伴い、ステージの高精度な位置決めが要求されている。このため、露光処理では空圧式除振装置が使用されており、それにより床からの振動が露光装置へ伝播するのを抑制している。同装置は、アクチュエータとして空気ばねを備えており、コンプレッサから圧縮空気が供給される。しかしながら、圧縮空気の圧力は一定ではなく変動する。この圧力変動が流量外乱となり、除振台を振動させる原因となる。本研究では、空圧式除振装置に対する流量外乱の抑制を目的とする。同外乱の影響を軽減することで、位置決めステージなど精密機器の性能を保証することができるため、本研究は工業的に有用である。

3. 実施した研究の具体的内容、結果 (本文)

3.1 流量外乱

本研究で用いた空圧式除振装置とその実験構成を図 1 に示す。本除振装置では、コンプレッサからの圧縮空気がサーボバルブを介して空気ばねへ供給される。バルブへの印加電圧に応じてバルブ弁が調整され、圧縮空気の吸排が行われる。それにより、ばねの内圧を管理することができる。また、除振台を平衡位置で定位させるために位置制御が施されており、制御則は DSP(Digital signal processor)に実装されている。流量外乱による振動の実測結果を図 2 に示す。同図上段は圧縮空気圧、下段は除振台の変位である。圧力変動に同期して、除振台が振動していることを確認できる。また、圧縮空気の圧力は周期的に変動しており、流量外乱は周期性を有することが分かる。

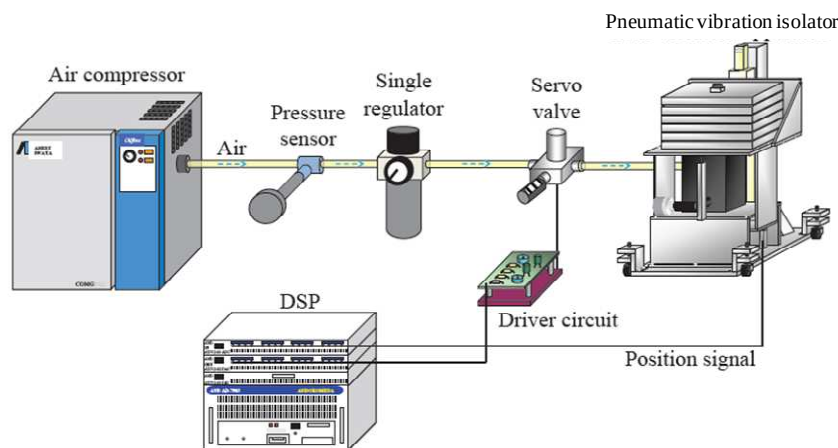
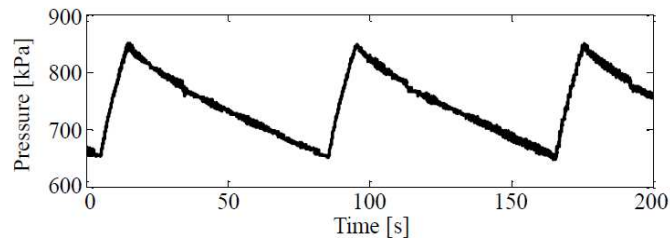
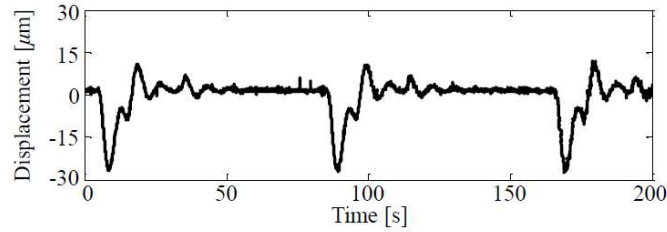


図 1 空圧式除振装置と実験構成



(a) 圧縮空気圧



(b) 除振台変位

図 2 圧縮空気圧と除振台変位

3.2 繰返し制御による流量外乱抑制

図 2 の結果より，周期的に圧縮空気圧は変動する．その理由はつぎの通りである．コンプレッサでは，内部のピストンが往復運動を行うことで圧縮空気が生成される(図 3)．その際に空気圧が上昇する．一方，空気圧が上限に達すると，コンプレッサの仕様によりピストンが停止するため，圧力が低下する．一定時間が経過した後，ピストンは往復運動を再開し，再び圧力は上昇する．この工程が繰り返されるため，圧力変動に周期性が見られる．

このような周期外乱を抑圧する一手法として，繰返し制御が広く知られている．同制御法では，閉ループ系に周期信号の生成モデルが含まれており，それにより周期目標信号への追従性や周期外乱の抑圧特性を改善することができる．このため，本研究では繰返し制御を除振装置に実装した．このときの制御ブロック図を図 4 に示す．図中， a ：繰返し制御器のフィードフォワード項[-]， T_{rc} ：繰返し制御器内のローパスフィルタの時定数[s]， L ：繰返し制御器の遅れ時間[s]， C_{pos} ：位置制御器(PI 補償器)[-]， k_{pos} ：位置センサの感度[V/m]， r ：目標値[V]， u ：バルブへの印加電圧[V]， d ：流量外乱[m³/s]， x ：除振台の変位[m]， x_0 ：床の変位[m]を表す．

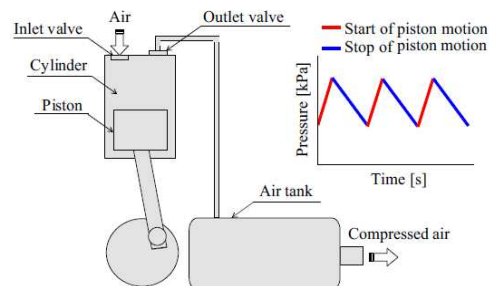


図 3 コンプレッサ

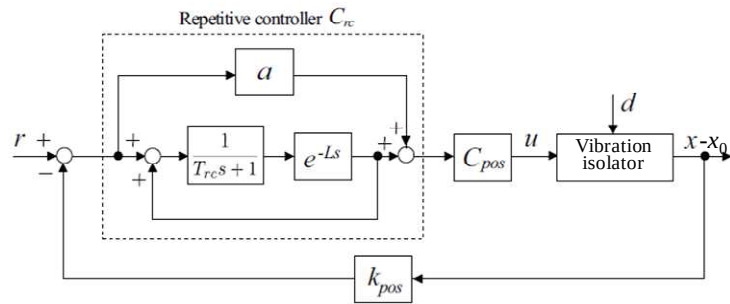


図 4 除振装置に対する繰返し制御系

図 5 に、繰返し制御を用いたときの除振台の変位を示す．本結果と図 1 を比較すると、繰返し制御により除振台の振動は軽減されることが分かる．さらに、繰返し制御器のフィードフォワード項 a を増加させることで、外乱の抑圧特性が改善されることも確認できる．一方、このときの除振率を図 6 に示す．除振率とは、除振台と床の変位の比率 x/x_0 で定義され、除振装置の性能指標である．除振率が低いほど床からの振動の影響は抑制されることを示しており、その場合には除振性能が良いと判断される．図 6 より、フィードフォワード項 a を増加させると除振率が悪化することを確認できる．以上の結果より、流量外乱の抑圧と除振率の改善は、トレードオフの関係にあることを明らかにした．このため、本研究の新たな課題として、フィードフォワード項 a の設定方法を検討した．

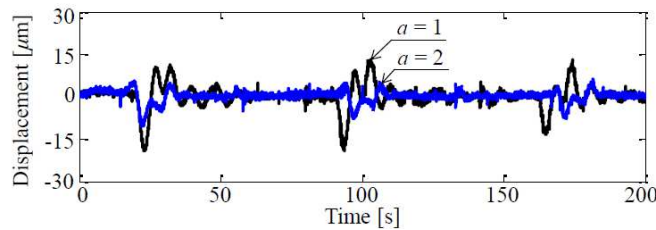


図 5 除振台の変位(a : 定数)

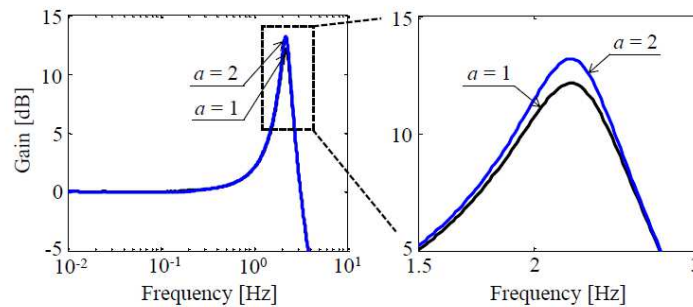


図 6 除振率(a : 定数)

3.3 繰返し制御器の調整：フィードフォワード項の設定

図 6 より、約 2 Hz 付近で除振率のピークが表れる．これは、本除振装置の機械共振が原

因である．よって機械共振を抑えるようにフィードフォワード項 a を設定することで，除振率の悪化が抑えられる．メカトロニクス機器に対する共振の抑制方法として，ノッチフィルタが使用されている．その一方で，同フィルタが市販の空圧式除振装置に実装された例はない．通常ノッチフィルタを用いる際，制御帯域が狭帯域化するかを事前に検討する必要がある．しかし，計測時間が長期に及ぶという理由のため，空圧式除振装置の設計・評価では閉ループ制御系の周波数応答は実測されず，ノッチフィルタが用いられなかった．

そこで，繰返し制御器のフィードフォワード項として，ノッチフィルタを設定した．その際，同フィルタの中心周波数を，除振率のピークとなる周波数(約 2Hz)としている．また，除振率に加えて，流量外乱の抑圧特性も改善させるため，2Hz 付近以外の帯域ではノッチフィルタのゲインが増加するように， $a(s)=2N(s)$ ($N(s)$ ：ノッチフィルタ)と設定している．このときの，除振台変位と除振率をそれぞれ図 7，8 に示す．図 7 より，フィードフォワード項を $a=2N(s)$ としたとき， $a=2$ の場合と同様の外乱抑圧特性が得られている．また，図 8 より，フィードフォワード項としてノッチフィルタを用いることで除振率の悪化が抑えられている．したがって，同項を適切に設定することにより，除振率を維持しつつ，流量外乱の影響を抑制できることを示した．

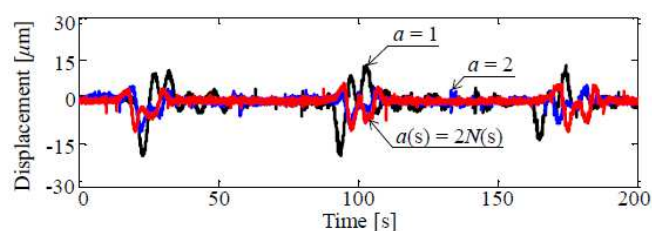


図 7 除振台の変位($a=2N(s)$)

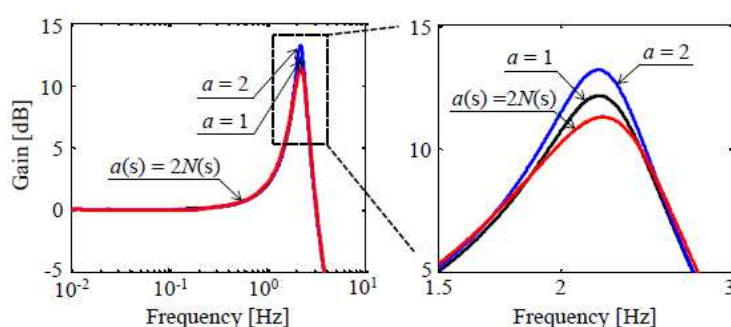


図 8 除振率($a(s)=2N(s)$)

3.4 繰返し制御器の調整：遅れ時間の設定

産業応用の場面では，コンプレッサには複数の空圧機器が接続されており，機器の接続・開放により消費流量が変化する．それに応じて圧縮空気圧の周期も変化する．通常，繰返し制御器の遅れ時間 L は，周期外乱の周期に基づいて決定される．本研究では，流量外乱

の周期変動に対して、適切な遅れ時間の設定方法をシミュレーションにより検討した。まず、遅れ時間 L を固定し、流量外乱の周期を変化させ、そのときの除振台変位に関する時間応答を評価した。結果を図 9 に示す。ここでは、遅れ時間 L を 66 s に設定している。図 9 より、外乱周期が短いほど、振動は軽減されていることがわかる。その原因を解析するため、流量外乱 d から除振台変位 x までの周波数特性 x/d を評価した。結果を図 10 に示す。図中の (修正) 繰返し制御を MRC と記している。なお、実測結果より圧縮空気圧は 60 から 70 s の間で変動したため、その帯域上に破線を記載している。周波数特性 x/d は、そのゲインが低いほど、流量外乱の抑圧特性が良いことを表している。図 10 より、遅れ時間が $L=66$ s のとき、外乱周期が長くなるにつれゲインは低下することがわかる。以上の時間応答および周波数特性より、繰返し制御器の遅れ時間 L は、外乱周期に対して比較的小さく設定することが有効であることを確認した。

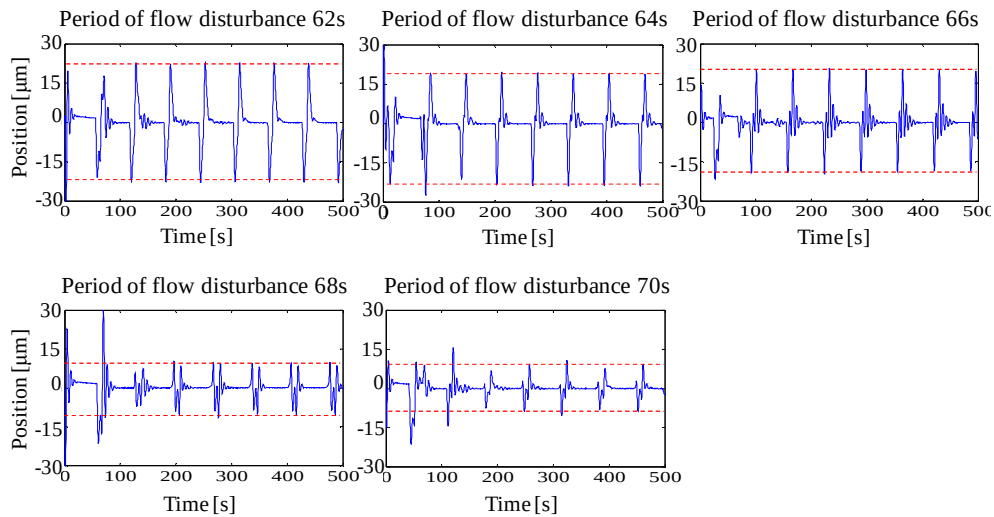


図 9 除振台の変位(外乱周期の影響)

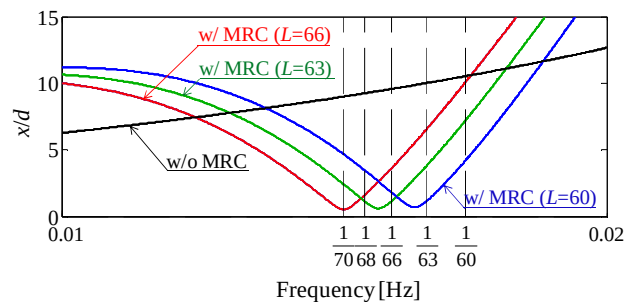


図 10 外乱抑圧特性

3.5 オフライン推定による流量外乱抑制と再現性の確保

圧縮空気の圧力変動は周期性を有することを踏まえ、オフライン推定による流量外乱の抑制方法を提案した。同手法は、まず変位センサからの出力信号に基づき、外乱オブザー

バを用いて流量外乱を推定する．そして，取得した推定信号に対して，外乱一周期分の時系列データをメモリに蓄える．最後に，流量外乱に同期して振動した除振台の変位を測定し，変位が閾値を超えたときに，時系列データを制御系に印加する．それにより，推定信号と流量外乱が相殺され，振動は抑制される．本手法では，変位センサのノイズ除去のため，複数のローパスフィルタを用いている．その一方，フィルタ数を増やすことで，制御系のノミナル化が満たされなくなり，閉ループ特性が変化する．その結果，フィードバック制御器の再調整が必要となり，調整コストの面で望ましくない．このため，推定信号をオンラインでフィードバックせず，メモリに蓄えるようにした．本手法の有効性を示すため，平衡位置からの偏差の絶対平均を評価した．結果を図 11 に示す．同実験では，流量外乱 15 周期分について評価し，1 周期ごとの絶対平均を算出している．図 11 より，提案法を用いることで偏差が減少しており，流量外乱が抑制されることを確認できた．

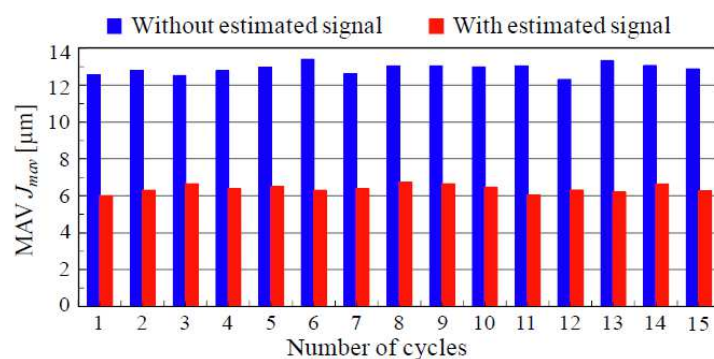


図 11 偏差の絶対平均(赤：提案法使用，青：提案法未使用)

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

中村幸紀・東京農工大学大学院・助教

涌井伸二・東京農工大学大学院・教授

5. 研究実施時期

2012年（平成24年）3月 1日から2013年（平成25年）12月31日

6. 本研究に関連して発表した主な論文等

・論文誌(査読有り)

- [1] Habiburrahman Shirani, Yukinori Nakamura, and Shinji Wakui: Flow Disturbance Compensation Based on Off-Line Estimated Signal for a Pneumatic Isolation Table, Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, vol. 7, no. 4, pp. 498-505, 2013.
- [2] Yukinori Nakamura, Ryo Fukuda, and Shinji Wakui: Suppression of Flow Disturbance to Pneumatic Active Anti-Vibration Apparatuses by Smoothed and Shaped Signals, International Journal of Advanced Mechatronic Systems, vol. 5, no. 4, pp. 288-296, 2013.

・国際会議 (査読有り・口頭発表)

- [3] Yukinori Nakamura, Ryo Fukuda, and Shinji Wakui: Flow Disturbance Rejection of Pneumatic Vibration Isolators Using Compensation Input, in *Proc. 2012 International Conference on Advanced Mechatronic Systems*, pp.247-252, 2012.

・国内会議/研究会 (査読無し・口頭発表)

- [4] Habiburrahman Shirani, Yukinori Nakamura, and Shinji Wakui: Compensation of Flow Disturbance to Isolation Table by Estimated Disturbance Signal: Improvement of Repeatability, 電気学会制御研究会, pp. 45-50, 2013.
- [5] 野口裕喜, 中村幸紀, 涌井伸二: 繰返し制御を用いた空圧式アクティブ除振装置の流量外乱抑制に関する一考察, 平成 25 年電気学会産業応用部門大会, pp. II-111-II-114, 2013.
- [6] 野口裕喜, 中村幸紀, 涌井伸二: 空圧式アクティブ除振装置に対する外乱抑圧抑制と除振性能を考慮した繰返し制御の一調整法, 第 56 回自動制御連合講演会, pp. 1136-1139, 2013.

・論文誌 (投稿中(査読中))

- [7] 中村幸紀, 野口裕喜, 涌井伸二: 除振率を考慮した空圧式アクティブ除振装置に対する流量外乱の一抑制法

・国際会議 (投稿中(査読中)・口頭発表)

- [8] Yuki Noguchi, Yukinori Nakamura, and Shinji Wakui: Flow Disturbance Suppression and Transmissibility Reduction of Pneumatic Anti-Vibration Apparatuses Using Repetitive Control

7. 内外における関連研究の状況

通常, 圧縮空気の圧力変動を抑えるため, レギュレータを多段で接続する方法が用いられる. しかしながら, それにより圧力損失が増大するという欠点がある. また, 所属研究グループでは, 圧力センサを用いたフィードフォワード補償(涌井ら, 精密工学会誌, 2007)を提案しているが, 高分解能なセンサが必要となり, コストの面で課題となる. また, 空圧式除振装置に関する内外の研究では, 除振率のみについて議論されているものの, 流量外乱抑制と除振率改善のトレードオフについてはほとんど検討されていない.

8. 今後の発展に対する希望

本研究では, 除振装置に対して, 位置制御のみが施された場合を検討した. 一方, 産業応用の場面では, 位置フィードバックに加えて, 圧力フィードバックや加速度フィードバックなど多重の制御ループで制御系が構成されている. 今後は, 市販の空圧式除振装置で採用されている制御系に対して, 提案手法の実用上の有用性を示していきたい.