

機関番号：37112

研究種目：若手研究 (B)

研究期間：2009～2010

課題番号：21760176

研究課題名 (和文) 空気ばね式除振台の空気圧供給システムの安定化

研究課題名 (英文) Stabilization of air supply system for pneumatic vibration isolation table

研究代表者

加藤 友規 (KATO TOMONORI)

福岡工業大学・工学部・助教

研究者番号：20390429

研究成果の概要 (和文)：本研究課題は、工場等の空気圧供給システムの安定化を図り、特に超精密機器に使用される空気ばね式除振台やサーボステージの高精度化・高効率化を実現することを目的として実施した。提案した気体圧力の高速・高精度な制御方法を空気ばね式除振台の供給圧力制御に適用することで、従来方式の減圧弁等と圧力容器を用いた圧力制御方法では影響を回避できない供給圧の変動に対して、影響を回避できることを示した。また、台上サーボステージの移動に伴う除振台の傾斜を回避する空気ばね室内の圧制御方法を提案した。

研究成果の概要 (英文)：This research topic concerned stabilization of pressurized air supply systems such as those used in factories, in order to realize highly accurate and efficient pneumatic vibration isolation tables and servo stages for ultra precision devices. Conventional pressure control methods such as the use of pressure regulators and buffer tanks are incapable of cancelling the effects of variations in the supplied air pressure. In the present study, we proposed a fast and precise pressure control method for a pneumatic vibration isolation table which is capable of overcoming such problems. In addition, a new method has been proposed for controlling the air pressure in the air spring of the isolator to compensate for inclinations of the isolation table caused by relatively rapid movements of a servo stage on the table.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	2,700,000	810,000	3,510,000
2010年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,200,000	960,000	4,160,000

研究分野：機械工学

科研費の分科・細目：機械力学・制御

キーワード：振動制御, 空気ばね式除振台, 圧力制御, 圧力微分計, 流量制御, アクティブ制御, 空圧サーボステージ, 外乱補償制御

1. 研究開始当初の背景

加圧気体を取り扱う場合、圧力を調整するための減圧弁は必要不可欠である。可燃性ガスでは漏れが許されないことから、ガスガバナ等が用いられる。空気圧においては漏れが許容されることから、一般的にリリース型の減圧弁が使用される。減圧弁としては手動で調整する直動型やパイロット型、電気信号を入力とする電空レギュレータが広く用いられている。特に空気圧を用いた精密機器等の制御においては、常に安定した空気供給源が要求されることから、高精度な圧力制御器が市販されているが、それらは圧力の整定時間が数秒以上であるなど、応答が遅いものがほとんどであった。

近年、半導体露光装置等で用いられる空気ばね式除振台や精密位置決め空気圧サーボテーブル等、空気圧システムにおける超精密制御において、減圧弁の精度と応答性の向上の両立が求められている。現状、半導体露光装置では減圧弁の応答性が不十分であることから、減圧弁を多段式にする・大型のバッファタンクを用いて減圧弁の動特性の影響を極力抑えるなどの方法がとられている。しかし、それらの方法では供給圧変動の問題は解決されておらず、超精密かつ動特性に優れた圧力レギュレータの開発が強く望まれていた。

2. 研究の目的

本研究課題では、半導体製造ライン等で使用される空気圧供給システムの安定化を図り、空圧式除振台やサーボステージなど、空圧駆動の要素を使用している半導体露光装置や超精密加工機械の高精度化・高効率化を実現することを目的とした。

具体的には、既存の減圧弁・圧力レギュレータに変わる、微圧制御の定位性と高速な応答性とを両立した新しい「気体用精密高速圧力レギュレータ」を提案・開発し、半導体露光装置用の空気ばね式アクティブ除振台と空

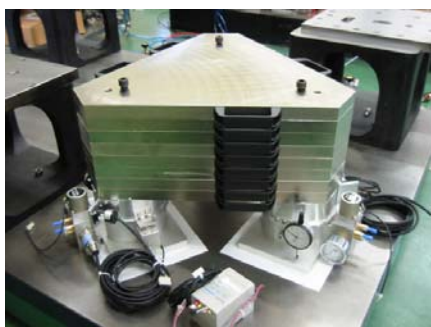


図1 空気ばね式除振台（3軸）

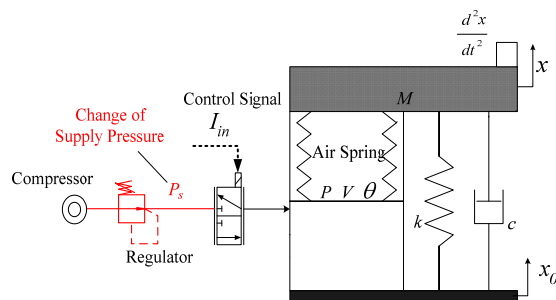


図2 供給空気圧の変動問題

圧式サーボテーブルの供給圧制御に使用し、高精度化・高速化の実現可能性を評価することを目的とした。

3. 研究の方法

本研究課題では、以下の方法・手順で研究を進めた。

(1) 気体用超精密構想応答圧力レギュレータ（HPQR）の製作と改良

気体用超精密高速応答圧力レギュレータ（HPQR）は、スプール型サーボ弁・圧力微分計・圧力センサ・等温化圧力容器などにより構成される、圧力制御器である。本研究課題では、要求される圧力制御速度・分解能に応じた圧力微分計の選定（分解能・動特性）と等温化圧力容器の容積の選定を行い、容積が1[L]と26[L]の2種類のHPQRを試作した。

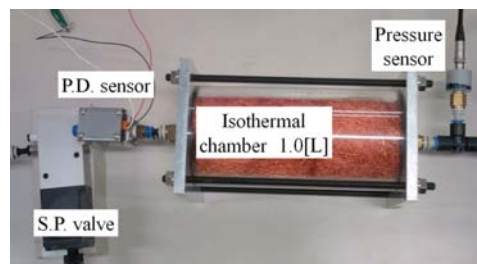


図3 製作したHPQR

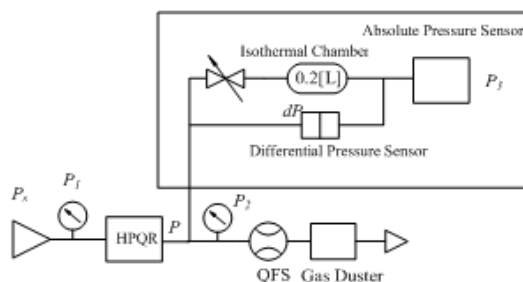


図4 HPQRの性能評価試験用の装置

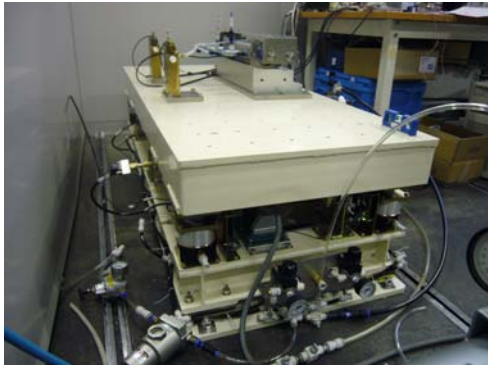


図5 空気ばね式除振台（6軸）

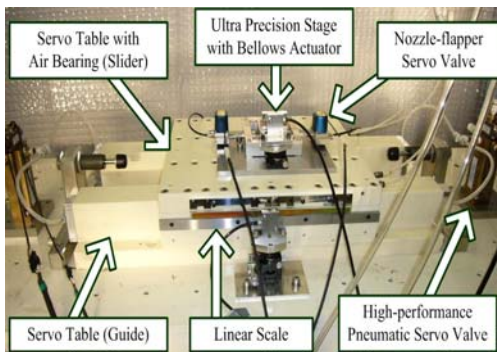


図6 空気圧サーボステージ

(2) HPQRの性能評価方法の確立と評価試験

図4に示すHPQRの性能を評価する装置を構成し、定常安定性、目標値変動追従性および外乱に対する応答を評価した。

(3) HPQRの空気ばね式除振台への適用

製作し性能評価試験を行ったHPQRを、超精密加工機等に使用されるアクティブ制御タイプの空気ばね式除振台の供給圧制御に適用する実験を行い、提案手法の有効性を検証した。空気ばね式除振台は、供給圧力の変動および脈動が制振性・除振性に影響を及ぼすことが知られており、提案手法によって制振性・除振性をどこまで向上できるかを評価した。なお、実験には、3軸タイプ（図1）と6軸タイプ（図5）の2種類の空気ばね式除振台を使用した。

(4) 空気ばね式除振台の流量フィードバック制御

空気ばね式アクティブ除振台の消費エネルギーを低減するために、スプール型サーボ弁の非線形性を層流型高速応答流量計を用いたフィードバック制御により補償し、その圧力制御系を除振台の内圧制御に適用する試みを行い、除振台の消費エネルギーと除振性能を評価した。

(5) 空気圧サーボステージの外乱補償制御

HPQRの製作において開発した圧力微分計を、空気ばね式除振台の空気ばね室内圧の制御に適用することにより、除振台上で空気圧サーボステージ（図6）が移動した際に生じる外乱を補償する制御を行い、効果を確認した。

4. 研究成果

本研究課題の成果として、以下を得た。

(1) HPQRの設計と製作

等温化圧力容器・圧力微分計・スプール型サーボ弁・圧力センサを用いた気体用超精密高速応答圧力レギュレータを製作した。特に、要求される圧力制御速度・分解能に応じた圧力微分計の選定（分解能・動特性）と等温化圧力容器の容積の選定を行い、容積が1[L]と26[L]の2種類のHPQRを試作した。

(2) HPQRの性能評価実験

図4に示す性能評価試験用の装置を用いてHPQRの性能評価実験（上流外乱・下流外乱・定常安定性）を行った。また、同様の実験を幾種類かの圧力制御弁等で行い、比較を行った。

実験の結果、超精密高速応答圧力レギュレータの性能を確認し、特に目標値変動追従性および外乱に対する応答について、優位性を確認した。

(3) HPQRの空気ばね式除振台への適用

HPQRを3軸タイプおよび6軸タイプの空気ばね式アクティブ除振台の供給圧制御に適用し、HPQRの上流側および下流側に外乱を発生させ、除振台の定位性（変位・加速度）を評価する実験を行なった。その結果、他の市販の減圧弁等を用いた場合に比べ、

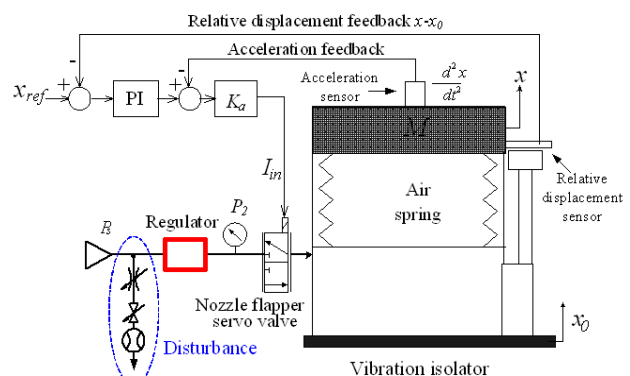


図7 HPQRの除振台への適用

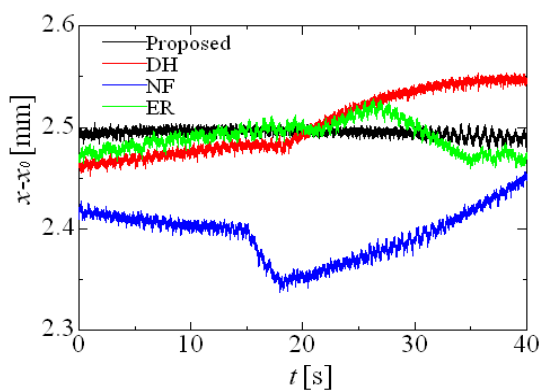


図8 実験結果
(HPQRの除振台への適用, 変位)

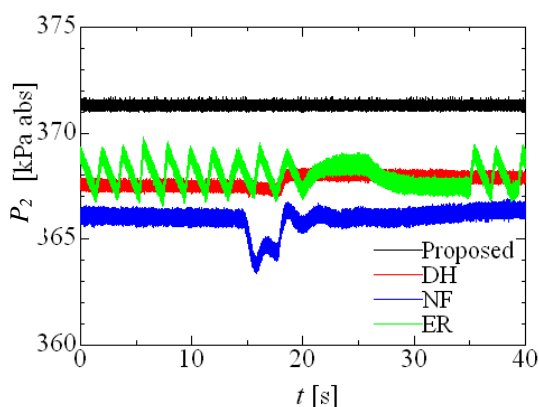


図9 実験結果
(HPQRの除振台への適用, 圧力)

HPQRを用いた場合には、除振台の変位・加速度・圧力ともに、安定性および外乱からの回復応答速度が優れていることが明らかとなった。

(4) 空気ばね式除振台の流量フィードバック制御

スプール型サーボ弁の出力流量を層流型高速応答流量計により計測しフィードバック制御することにより、スプール型サーボ弁の非線形性および中立点変動による影響を低減する高速流量制御系を構築し、その制御系を除振台の圧力制御のマイナーループとして適用する制御系を提案した。鉛直方向3軸支持の除振台を用いた実験の結果より、スプール型サーボ弁を用いた低消費流量で大出力可能な空気ばね式アクティブ除振台の実現可能性を示した。

(5) 空気圧サーボステージの外乱補償制御

空気ばね式除振台の台上装置の運動により生じる振動を低減するために、開発した圧力微分計を用いた新しい制御手法を提案し

た。提案手法は、空気ばね内の微小な圧力変動を圧力微分計で測定し、その値をポジティブフィードバックすることで、ノズルフラップ型サーボ弁の応答性を向上させ、外乱補償効果を高めるものである。提案手法の有効性を、4つの空気ばねで4点支持の除振台と台上の1自由度運動を行う空気圧サーボテーブルを用いた実験装置で確認した。さらに、提案手法を圧力制御系の応答性向上のため一般に用いられる圧力のPI制御や空気ばね式除振台の台上装置の運動を補償するフィードフォワード制御と比較し、提案手法はロバスト性が高く、設計が容易で適用性に優れていることを示した。

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4件)

- ① 川嶋健嗣、加藤友規、金恩敬、新井豪、只野耕太郎、香川利春、圧力微分計を用いた空気ばね式除振台の外乱補償制御、日本機械学会論文集C編、76巻764号、861~868、2010、査読有
- ② 加藤友規、品川大輔、只野耕太郎、川嶋健嗣、香川利春、加速度・速度、流量フィードバックによる鉄道台車の鉛直空気ばねの制御、計測自動制御学会産業論文集、9巻13号、91~97、2010、査読有
- ③ Tomonori KATO, Kenji KAWASHIMA, Tatsuya FUNAKI, Kotaro TADANO, Toshiharu KAGAWA, A New, High Precision, Quick Response Pressure Regulator for Active Control of Pneumatic Vibration Isolation Tables, Precision Engineering, Vol.34, 43~48, 2010, 査読有
- ④ 加藤友規、空気ばね式アクティブ除振台の流量フィードバック制御、自動化技術(韓国) Vo. 25, No. 29, 94-101、2009、査読無

[学会発表] (計5件)

- ① 加藤友規、田代竜太、矢澤孝哲、野崎悠輔、宮崎晃、気体用超精密高速応答圧力レギュレータを用いたエアタービンスピンドルの制御、平成22年秋季フルードパワーシステム講演会、2010年12月2日、別府コンベンションセンター(大分県)
- ② Tomonori Kato, Tatsuya Funaki, Yuichiro Shinohara, Kenji Kawashima, Toshiharu Kagawa, Performance evaluation of a new high-precision, quick response pneumatic

pressure regulator and its application to an actively controlled pneumatic vibration isolator, ASPE 2010 Annual Meeting, 2010年11月2日, Omni Hotel CNN Center (アメリカ)

- ③ 加藤友規、船木達也、川嶋健嗣、香川利春、超精密高速応答圧力レギュレータの応答性能の評価に関する研究、平成22年春季フルードパワーシステム講演会、2010年5月27日、機械振興会館（東京都）
- ④ 金恩敬、新井豪、只野耕太郎、加藤友規、川嶋健嗣、香川利春、圧力微分計を用いた空気ばね式除振台の外乱補償制御、日本機械学会機械力学・計測制御部門第11回「運動と振動の制御」シンポジウム'09、2009年9月4日、アクロス福岡（福岡市）
- ⑤ 加藤友規、品川大輔、只野耕太郎、川嶋健嗣、香川利春、加速度・速度・流量フィードバックによる鉄道台車の鉛直空気ばねの制御、日本機械学会機械力学・計測制御部門第11回「運動と振動の制御」シンポジウム'09、2009年9月4日、アクロス福岡（福岡市）

[その他]

ホームページ等

<http://www.fit.ac.jp/research/search/research/id/147>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

加藤 友規 (KATO TOMONORI)
福岡工業大学・工学部・助教
研究者番号：20390429