

平成 30 年 6 月 25 日現在

機関番号：32657

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05911

研究課題名(和文) 静圧軸受を内蔵する非接触駆動空気圧サーボを用いた超精密X-Yステージの開発と制御

研究課題名(英文) Development of Ultra Precise X-Y Stage with Air Bearing Realizing Non-Contact Drive and Its Control

研究代表者

藤田 壽憲 (FUJITA, TOSHINORI)

東京電機大学・工学部・教授

研究者番号：70242279

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：空気圧アクチュエータのピストンを静圧軸受により浮上させることにより、発熱や摩擦のない非接触駆動を可能とする新しいタイプの空気圧サーボアクチュエータを先に実現した。このアクチュエータを用いた単軸ステージでは従来の空気圧の概念を覆す高速・高精度な性能を有する。本研究ではこのアクチュエータを用いてX-Yステージを構成する方法を提案し、配管を内蔵させたコンパクトかつ高精度なステージを設計・実現した。X-Yステージを構成する際には一自由度に比べ配管が長くなり、制御性能が低下する。そこでX-Yステージを駆動するために必要な制御方法を検討した。シミュレーションではあるが、提案した制御法の有効性を確認できた。

研究成果の概要(英文)：Previously we developed new type a pneumatic actuator which supports a piston by air bearing for non-contact drive, and the stage with one-degree of freedom driven by this actuator, the developed stage has much higher speed and much higher accuracy than pneumatic actuators. In this study, we have designed the X-Y stage using this actuator having pipe to supply other actuator built-in and realized the compact X-Y stage with high accuracy. Pipe length of the X-Y stage is longer than one of the stage with one-degree of freedom, which make degrade the performance of controllability. So we considered the control method for X-Y stage. As a results, the proposed control method is effective in the linear simulation of X-Y stage.

研究分野：工学

キーワード：精密機械システム 機械要素 制御工学 空気圧 超精密位置決め

### 1. 研究開始当初の背景

ナノテクノロジーの進展に伴い、特に半導体産業では露光装置や三次元実装機など、その製造・組立・検査工程ではナノオーダー(数ナノ～百ナノ程度)の超精密位置決め技術が必要とされており、ナノオーダーの超精密位置決めに対する需要はますます高まっている。これまで精密位置決めの場面で使用されるアクチュエータには電動機が使用されてきた。しかしながら、モータとボールねじの組み合わせではその磨耗およびそれに伴う発塵と位置精度が、リニアモータでは推力不足による装置の巨大化と発熱が問題となっている。現在、生産効率の向上のため、高負荷でより短いサイクルタイムの実現が求められているが、電動機ではその限界に近づいており、これに代わる新しいアクチュエータが望まれている。

### 2. 研究の目的

このような背景から、空気圧の比エネルギーの高さに着目し超精密位置決めと高速性能を両立した新しいタイプの空気圧サーボアクチュエータを実現した。このアクチュエータはピストンを静圧軸受により浮上させることで、躍動部がなく発熱や、摩擦のない完全非接触による駆動を可能とするものである。このアクチュエータは、位置決め精度50[nm]、動特性は約40[Hz]という従来の空気圧の概念を覆す結果が得られている。しかし例えば露光装置など、一般にはアクチュエータには多自由度が求められることも多く、この位置決め精度と応答性を多自由度運動でも実現する必要がある。

そこで本研究では(1)先に提案した空気圧サーボアクチュエータを用いて二自由度のX-Yステージを開発するとともに、(2)その制御方法を確立することを目的とする。

### 3. 研究の方法

#### (1) 二自由度のX-Yステージの開発

本研究で提案したX-Yステージの概要を図1に示す。リニアモータ駆動のX-Yステージでは非接触であってもモータ供給用の可動部への配線が必要である。このため配線を引きずり位置精度が悪化したり、ケーブルを搬送する補助装置が必要になったりしている。またリニアモータでは構造的に積み重ねる必要があるため(スタック方式)、大きくなり重心も高くなる。

これに対して提案するステージの場合、図のようにアクチュエータ内に配管を施し、これにより可動部への配管は引きずることもない。この際、Y軸への空気供給は空気だまりを設けることにより対応する。またY軸の取り付け方法をスタック方式ではなくX軸のスライダの側面に取り付け、Y軸のアクチュエータおよびスライダに積載する荷重をスライダ下面に設けた静圧軸受により支え荷重による変形を抑制する。これによりコン

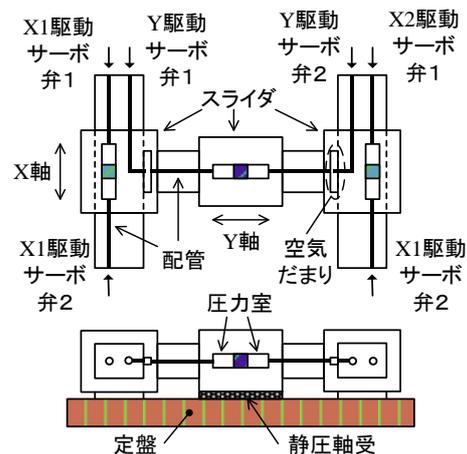


図1 X-Yステージの概要

パクトかつ、平面精度の高いステージを構築した。

#### (2) X-Yステージの制御方法の確立

先に開発した一自由度のような配管長が短い場合、管路の影響が無視でき全体の制御系の応答性はアクチュエータを駆動するサーボ弁の応答性で決まる。これを利用してサーボ弁の動特性に基づいて制御系設計を行う手法を確立した。しかしX-Yステージを構成すると図1からわかるように一自由度の場合より配管長が倍以上になり、サーボ弁の応答周波数よりも低くなる。このことから空気圧管路の共振を補償する制御手法の開発が必要となる。

配管を介した容器内の圧力制御では $H^\infty$ 制御により補償できることができた。この考え方を拡張してX-Yステージでも管路共振の補償を行うことを提案した。

図2にX軸アクチュエータにY軸アクチュエータない配管相当の管路を接続したときの制御対象のボード線図を示す。 $G_v$ はアクチュエータを駆動するサーボ弁の、 $G_c$ は管路とアクチュエータの伝達関数である。サーボ弁の動特性 $\omega_v$ より低い周波数に管路共振 $\omega_T$ が存在し、これはアクチュエータの共振周波数 $\omega_n$ にかなり近く、管路動特性を考慮して設計しなければならないことがわかる。伝達関数 $G_c$ は双曲線関数を含むためそのままでは $H^\infty$ 制御器を設計できない。そこで管路の共振周波数を2次遅れ要素で近似したもの(図2の緑線)をノミナルモデルとし、サーボ弁の動特性と管路の高周波成分を乗法的なモデル化誤差として扱うこととした。

$H^\infty$ 制御では感度関数と相補感度関数に関する重み伝達関数 $W_s$ と $W_T$ が制御器の設計パラメータである。 $W_T$ についてはゲイン線図が乗法的な不確かさを包含するように設定すればよいことが知られている。そこで上述したようにサーボ弁の動特性と管路の高周波成分を乗法的なモデル化誤差として $W_T$ を決定した。一方、 $W_s$ については一時遅れ

要素とし、その時定数を  $W_T$  の交差周波数を見ながら実験的に調整した。

$H^\infty$  制御器だけでは目標値に対する速応性が得られないことが知られている。この場合、速応性を改善するためにフィードフォワード制御器を加えた 2 自由度制御系がしばしば導入される。そこで導出した  $H^\infty$  制御器  $G_c(s)$  をフィードバック制御器とした図 3 に示す 2 自由度制御を構成した。この制御アルゴリズムでは理論的にはフィードフォワード制御器の中にある規範モデル  $G_m(s)$  の応答に完全に一致させることができる。ここで規範モデル  $G_m(s)$  はノミナルモデルの分子多項式と分母多項式の次数差を考慮し 5 次の二項モデルを用いた。規範モデルの動特性は実験により試行錯誤で調整した。

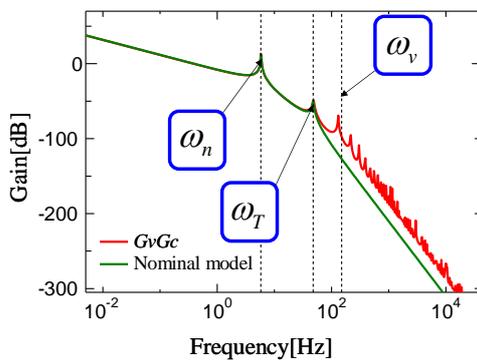


図 2 管路を含むアクチュエータのボード線図

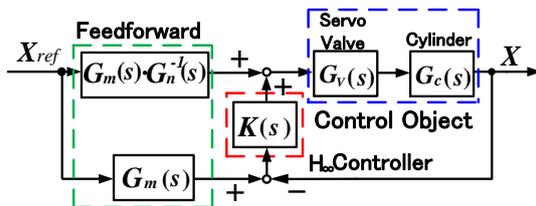


図 3 X-Y ステージの制御アルゴリズム

#### 4. 研究成果

##### (1) 二自由度の X-Y ステージの開発

設計した X-Y ステージを図 4 に示す。X-Y ステージは X 軸アクチュエータ 2 本と Y 軸アクチュエータ 1 本から構成される H 型とした。図 4 のように X 軸と Y 軸のアクチュエータを同一平面上に配することによりコンパクトかつ低重心なステージを実現した。X-Y ステージの全体の大きさは縦 850 × 横 715 × 高さ 130 [mm] である。

X-Y ステージに用いたアクチュエータの構造を図 5 に、仕様を表 1 に示す。図 5 b) の Y 軸アクチュエータが従来の静圧軸受アクチュエータの構造となる。このアクチュエータに配管を露出させずに空気を供給する

ために、図 5 a) のように X 軸アクチュエータは受圧板を 2 か所にし、その間隔はストローク長とした。これにより受圧板間が空気だまりとなり、X 軸アクチュエータがどの位置にあっても Y 軸アクチュエータに空気が供給できる。

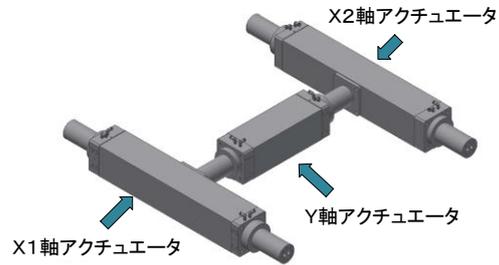
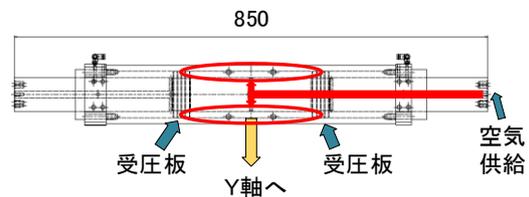
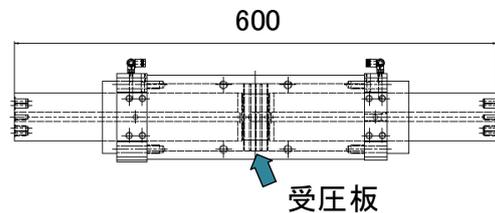


図 4 X-Y ステージの外観



a) X 軸アクチュエータ



b) Y 軸アクチュエータ

図 5 アクチュエータの構造

表 1 アクチュエータの仕様 (単位 mm)

	X 軸	Y 軸
全長	850 mm	600 mm
可動部	□100×650 mm	□100×650 mm
ストローク	85 mm	110 mm
受圧面積	28.5 cm <sup>2</sup>	28.5 cm <sup>2</sup>

製作した Y 軸アクチュエータの応答を図 6 に示す。実験は X 軸の配管相当の管路を付けた Y 軸アクチュエータで行った。この応答は一定のジャーク値 (加速度の微分値) を与えて加速する目標軌道に対する応答である。目標軌道のジャークは 10 [m/s<sup>3</sup>]、最大加速度は 1 [m/s<sup>2</sup>]、定速区間の速度は 0.1 [m/s]、

ストロークは100 [mm]とした。制御方法は一自由度の場合と同様に位置に加え、速度・加速度をフィードバックするPDD<sup>2</sup>制御とした。各制御ゲインは試行錯誤により求めた。

図6の応答は上からアクチュエータの変位、目標軌道との偏差、サーボ弁のスプール開度、目標軌道から得られる理想スプール開度との偏差である。管路があるため試行錯誤で得られた位置ゲインが低下し、アクチュエータの目標軌道との偏差が一自由度の場合より多少、大きくなった。しかし停止精度は同程度であり良好な応答であると言える。

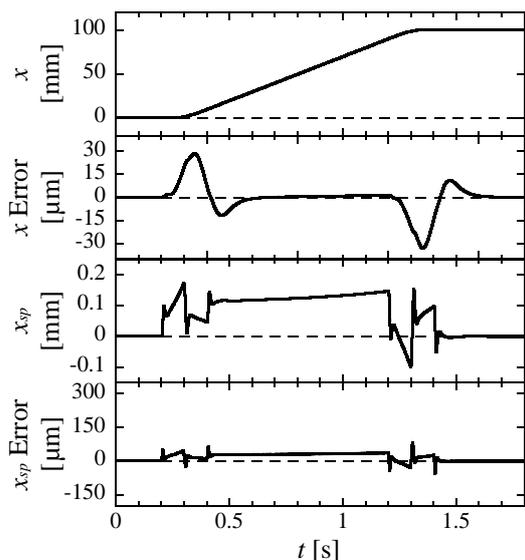


図6 Y軸アクチュエータの応答

## (2) X-Yステージの制御方法の確立

X軸の配管相当の管路を付けたY軸アクチュエータに3章(2)の研究方法で述べた制御方法を適用した。図7に線形シミュレーションの結果を示す。制御性能を確認するためにステップ応答により評価した。ステップ幅は3[cm]である。図よりオーバーシュートもなく、立ち上がり時間も一自由度の場合とほぼ同等の応答となっている。線形シミュレーションでは提案した制御方法の有効性が確認できた。

図8に同じ条件で実機のY軸ステージを駆動した応答を示す。実機の応答はステップ信号に追従していない。線形シミュレーションで有効性が確認された制御器を使っているにもかかわらず、実機で動作させると不安定な応答になってしまった。線形シミュレーションとの差異は、空気圧の持つ非線形性であるため、このことが要因と考えられる。

また提案した制御手法の有効性を確認するために管路がない場合に、サーボ弁の動特性のみを乗法的なモデル化誤差として扱いH<sup>∞</sup>制御器を設計し、ステージに適用した。このときの応答を図9に示す。管路が短い場合でも、提案した制御方法では、これまで用

いてきたPDD<sup>2</sup>制御と比べ、立ち上がり時間も遅れ、大きなオーバーシュートも発生していることがわかる。管路が短い場合においても、実機では有効性に問題があることがわかった。今後は実機で良好な応答が得られない要因を明らかにし、提案した制御アルゴリズムを改良していく必要がある。

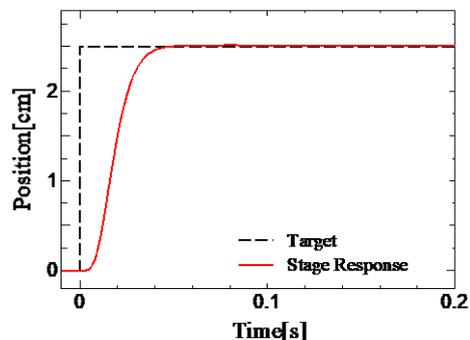


図7 Yステージの応答 (シミュレーション)

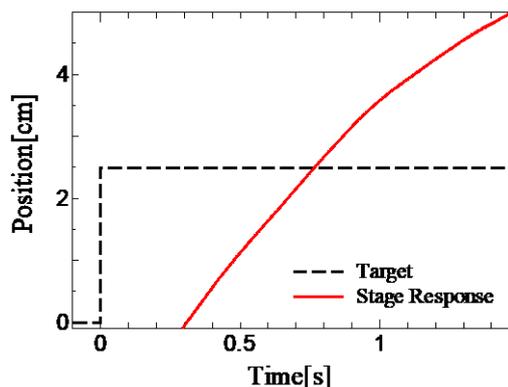


図8 Yステージの応答 (実験結果)

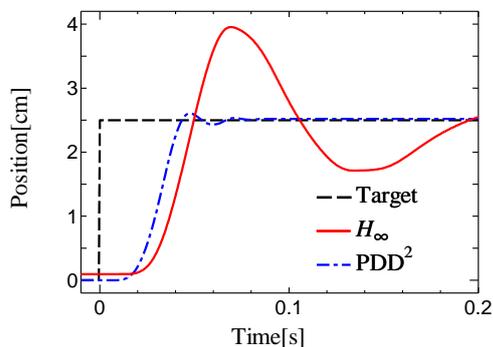


図9 管路がない時のYステージの応答 (実験結果)

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計0件)

〔学会発表〕（計 1 1 件）

- ①杉山洋樹, 藤田壽憲: 非線形フィードフォワードによる静圧軸受エアステージの軌道制御, 日本機械学会 山梨講演会、2017年10月21日, 山梨県甲府市山梨大学
- ②金澤直弥, 藤田壽憲: サーボ弁の動特性を考慮した空気圧駆動システムの $H^\infty$ 制御, 日本機械学会 北陸信越支部第54期総会講演会, 2017年3月9日、石川県金沢市金沢大学
- ③畠山径, 藤田壽憲: サーボ弁の動特性を考慮した静圧軸受エアステージの軌道制御 — 提案した目標軌道の有効性の検証 —, 日本フルードパワーシステム学会 秋季フルードパワーシステム講演会, 2016年10月20日, 青森県青森市青森市文化観光交流会館
- ④伊達亮太, 藤田壽憲:  $H^\infty$  control of the pressure in chamber with pipe、The 13th International Conference on Fluid Control, Measurements, and Visualization, 2015年11月17日, カタールドーハ カタール大学

〔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  
なし

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

藤田 壽憲 (FUJITA, Toshinori)  
東京電機大学・工学部・教授  
研究者番号: 70242279

### (2) 研究分担者

なし

### (3) 連携研究者

なし

### (4) 研究協力者

なし