

平成 22 年 6 月 4 日現在

研究種目：若手研究 (B)
 研究期間：2008～2009
 課題番号：20760100
 研究課題名 (和文) 空気圧サーボ軸受アクチュエータによる超高精度 XY テーブルの開発
 研究課題名 (英文) Development of Ultraprecise Positioning XY Table Composed of
 Pneumatic Servo Bearing Actuators
 研究代表者
 平山 朋子 (HIRAYAMA TOMOKO)
 同志社大学・理工学部・准教授
 研究者番号：00340505

研究成果の概要 (和文)：

本研究では、空気圧サーボ軸受アクチュエータを用いた超高精度 XY テーブルの開発を目標とした。はじめに、XY テーブルに組み込むために新たに開発した 2 連球面型軸受アクチュエータの性能を調査したところ、位置決め制御を施すことなくナノメートルオーダーでの作動が確認できた。それらをテーブルの X 方向に 2 ヶ、Y 方向に 4 ヶ組み込み、超精密 XY テーブルを試作したところ、ステージの位置に関わらず、概ね 10nm 以下の分解能での作動が確認できた。

研究成果の概要 (英文)：

We proposed and developed ‘pneumatic servo bearing actuator’ as a new actuator for ultraprecise positioning. This actuator mainly consisted of a pneumatic servo valve and an aerostatic thrust bearing. It overcame some demerits such as low stiffness and poor response. We confirmed the minimum positioning resolution of the prototype actuator with spherical bearing was 2 nm. As a practical application of the pneumatic servo spherical bearing actuator, a prototype of ultraprecise X-Y stage which consisted of six pneumatic servo bearing actuators was developed. As a result, we confirmed the minimum positioning resolution of the X-Y stage was about 10 nm even without any feedback controls.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	2,900,000	870,000	3,770,000
2009年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：設計工学・機械機能要素・トライボロジー

科研費の分科・細目：トライボロジー

キーワード：軸受、アクチュエータ、超精密位置決め、XY テーブル

1. 研究開始当初の背景

次世代半導体製造装置，MEMS/NEMS，ナノバイオニクス，ナノインプリント，ナノ計測・分析装置等の開発，発展とともに，超精密位置決め機構の需要はますます高まってきている．それらに要求される位置決め精度は，数ナノ又はサブナノであり，極めて厳しい．これら超精密位置決めを実現するために，現在では，電動リニアモータや圧電素子から成るアクチュエータが最も頻繁に使用されている．しかしながら，これらのアクチュエータは電氣的に駆動力を得るものであり，回路から発生する熱が位置決め性能の低下を招くという課題を抱えている．また，特に，圧電素子型アクチュエータに限って言えば，ヒステリシスの発生，熱ドリフト，劣化や破壊等，様々な固有の問題も多く残されている．

そこで申請者らは，生来より剛性を有する空圧要素として静圧軸受に着目し，静圧軸受と空気圧サーボ技術を組み合わせた「空気圧サーボ軸受アクチュエータ」を提案してきた．具体的には，静圧軸受への供給圧力をサーボ弁によって変化させ，軸受すきまの変化を出力変位として得る機構である．静圧軸受を用いた超精密位置決め機構として，過去にいくつか提案されているものもあるが，軸受への供給圧力を直接変化させ，超精密位置決めを実現させているものは見当たらない．本アクチュエータは，軸受部が剛性を有するため，位置フィードバック制御をすることなく，超高精度の位置決めが可能であるという特長を持っている．軸受を用いるため圧電素子では対応が難しい高荷重支持も可能であり，また，温度変化も少なく，ドリフトやヒステリシスを生むような不確定な要因が少ないことも特長である．

プロトタイプアクチュエータを試作し，性能評価を試みたところ，以下に示すような結果が得られた．はじめに，軸受すきまを $7\mu\text{m}$ とした状態を中心とし，軸受への供給圧力を可変とするサーボ弁への入力電圧を変化させ，アクチュエータのヒステリシスを測定した．その結果，オープンループ駆動であっても軸受アクチュエータのヒステリシスはほとんどなく (20nm 以下)，良好な位置再現性を有していることが確認できた．また，オープンループで 5nm ステップ駆動を行ったところ，位置の明確な切り替えが見られた．さらに，静止時での駆動体の微小振れ (ノイズ) はほとんどなく (1nm 程度)，高い位置安定性を実現できることも確認できた．周波数応答試験を行ったところ，数 100Hz に共振点ら

しきものがやや見受けられるものの基本的には典型的な 1 次遅れ系の応答を示し，極めて安定なアクチュエータであることが分かった．

以上より，本申請の基となるプロトタイプアクチュエータにおいて，極めて良好な位置決め特性 (極小ヒステリシス，超精度分解能，高い位置安定性，安定的な周波数応答) を確認することができた．オープンループ駆動でのこれらの成果は，超精密位置決め要素としての軸受アクチュエータの広範な応用の可能性を示唆するものである．本課題申請では，これらの知見を活かした「超高精度 XY テーブル」の開発を最終目標とする．なお，このようなタイプの空気圧アクチュエータは世界にも類を見ないことを付記する．

2. 研究の目的

本課題申請では，「超高精度 XY テーブル」の開発を最終目的とする．これまで，多くの超精密位置決めアクチュエータが提案されているが，サブナノメートルオーダーの分解能で実用化に至っている位置決め機構は，未だごく僅かである．本申請課題で提案する空気圧サーボ軸受アクチュエータは従来にない構造であり，静圧軸受の高剛性を活かした新しいアクチュエータである．また，プロトタイプ (オープンループ駆動) によってすでに 5nm 以下での位置分解能を実現しており，最適設計と外乱オブザーバ制御を施せば，サブナノメートルオーダーでの位置決めは十分に達成し得るものと考えられる．また，XY テーブルでは干渉しない 2 軸の動作が可能であり，静圧軸受と空気圧サーボ弁の特長を活かした挑戦的試みであると言える．

3. 研究の方法

本申請課題では，研究期間を 2 ステージに分け，研究を実施した．

【第 1 ステージ】最適設計・制御によるサブ nm 分解能・超精密位置決めアクチュエータの実現

第 1 ステージでは，前述のプロトタイプアクチュエータ (一軸型軸受アクチュエータ) の改良を行い，現在の分解能 (5nm) をサブナノメートルオーダーまで引き下げることを目標とした．現在のプロトタイプモデルにおいては，特別な最適設計は行っていない．従って，アクチュエータ構成部品の最適設計を検討すれば，さらに位置決め分解能は上がると予測できる．また，現在はオープンループ駆動であるが，外乱オブザーバを用いたクロ

ードループ制御を行えば、ヒステリシス、ドリフトを除去することができる。主に、この2点からアクチュエータの改良を行い、サブナノメートル分解能を有するアクチュエータの実現を目指した。

【第2ステージ】超高精度XYテーブルの開発

第1ステージで開発した一軸型アクチュエータを配置することにより、サブナノメートルオーダーでの位置決めを可能とする超高精度XYテーブルを試作した。現在までに、そのような超高精度での安定的な位置決めを可能とするXYテーブルはほとんど見当たらず、存在するとしても、使用上、機構設計が極めて限定されるものがほとんどである。本申請課題では、半永久的な安定駆動を実現し、かつ、柔軟な設計、仕様に対応可能なXYテーブルの開発を目指すこととした。

4. 研究成果

(1) 2連型球面軸受アクチュエータ

① 作動原理と構造

XYステージへの組み込み用アクチュエータに用いた2連型球面軸受アクチュエータの構造をFig. 1に示す。XYステージに2連型球面軸受アクチュエータを適用する利点は、後の4章にて述べる。右端に取り付けられた空気圧サーボ弁は圧力制御弁であり、静圧スラスト軸受への供給圧力 P_c を変化させることができる。軸受すきま内で発生する圧力分布を積分した量がスプールの軸方向駆動力 f_s である。本機構のような多連型の場合、静止状態においてそれぞれのすきまで発生する軸方向駆動力は等しい。 f_s は P_c と軸受すきま h_i の関数であり、釣合力 $f_b \equiv a_b \cdot P_b$ が f_s と釣り合う位置 $y (=h_1+h_2)$ までスプールは移動する。したがって、サーボ弁によって P_c を精密に変化させれば、微小な変位応答 y を得ることができる。なお、サーボ弁には、トルクモータ駆動ノズルフラップ三方弁 (AS110-035, ピー・エス・シー (株))⁴⁾を用い、スプール変位の測定には高精度静電容量変位センサ (# 2102, 日本 ADE (株), 最小分解能: 0.2nm) を用いた。

② 球面軸受

アクチュエータに用いた球面軸受の写真をFig. 2に示す。静圧軸受の絞りには表面絞りを採用し、半球型軸受の平面側、球面側のそれぞれにエッチング加工によって16本のT字溝を施した。

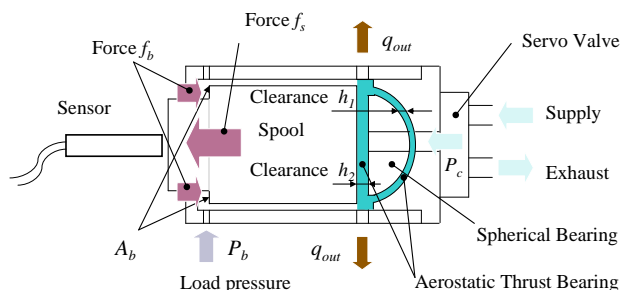


Fig. 1 Schematic diagram of pneumatic servo spherical bearing actuator



Fig. 2 Photographs of spherical bearing parts for actuator

(2) 球面軸受アクチュエータの基礎特性

① 静特性

二連型球面軸受の軸方向駆動力、すなわち、負荷容量をFig. 3に示す。図中には、本軸受が球面部あるいは平面部のみで作動した場合の負荷容量曲線も示している。実験値が両理論曲線より大きいことから、球面部、平面部のどちらも共に軸受として作動しており、2つの軸受すきまが正しく機能していると言える。剛性はほとんどすきまに依存せず、20 μ mまでの全ての領域で、おおよそ0.8N/ μ mで一定であった。

また、XYステージの試作には6つの球面軸受アクチュエータを用いるが、その全ての負荷容量曲線がほぼ同じ曲線上に乗り、ほとんど個体差がないことを確認した。

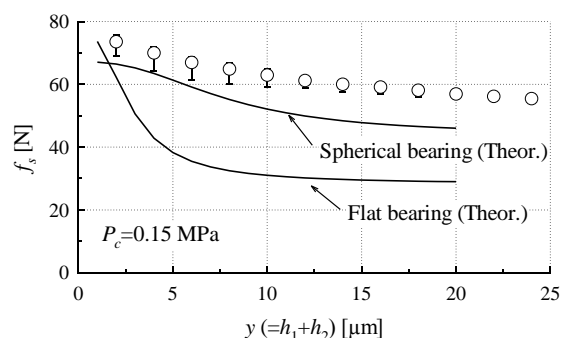


Fig. 3 Axial force curve of spherical bearing actuator

② 微小ステップ応答

球面軸受アクチュエータを微小にステップさせたときの様子をFig. 4に示す。本実験では制御は施していない。ステップ高さを

徐々に変化させ、アクチュエータの最小分解能を調べた。その結果、**Fig. 4**に見られるように、最小で約2nmの分解能を得ることができた。これより、本アクチュエータは、1連型軸受アクチュエータよりより良い最小分解能を実現し得ることが確認できた。これは、軸受を積層構造にすることにより、個々の軸受すきまが狭くなったためであると考えられる。

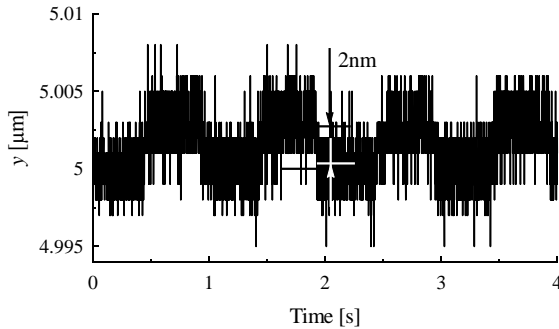


Fig. 4 Ultraprecise step response (Step height = 2 nm)

(3) 超精密位置決め XY ステージの試作

① 構造と原理

本研究で開発した XY ステージの概観を **Fig. 5** に示す。テーブルの側面 6ヶ所に、前章までに提案した 2 連型球面軸受アクチュエータを 6 機取り付け付けた。また、テーブルの底面には自成一型静圧軸受機構を採用した。これにより、テーブルは完全に非接触状態となる。本ステージは、XY θ 方向へのテーブル駆動が同一平面状で実現できるという有意な特長を有する。本稿では θ 方向の駆動は対象としないが、**Fig. 6** に示すように、テーブルが θ 傾斜した場合であっても、半球型の軸受が回転することによってテーブルと軸受の間のすきまを一定に保ち、安定的な作動が可能である。これが本ステージに球面軸受を採用した理由である。

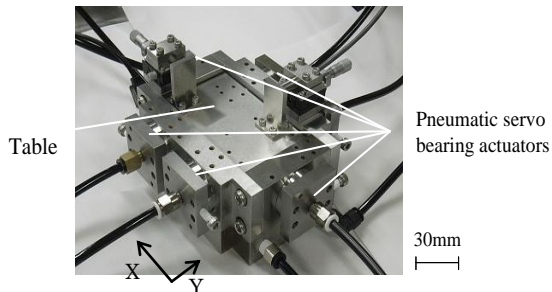


Fig. 5 Photograph of ultraprecise positioning XY stage

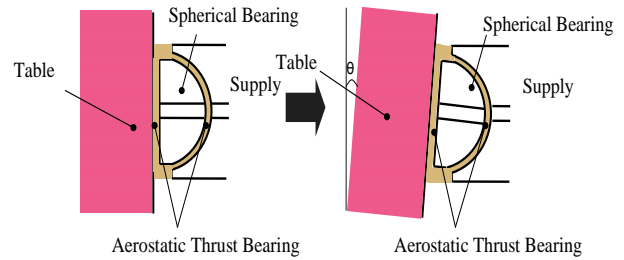


Fig. 6 Schematic views of motion of spherical bearing for table's tilting

② 静特性

XY ステージのストロークと挙動を調べるため、給気圧 P_c を 0.2MPa と固定し、反力 P_b の値を変化させた場合の負荷圧力 P_b とテーブル位置の関係性を調べた。**Fig. 7** に、長軸 (X 軸) 方向への変位結果一例を示す。本実験より、長軸 (X 軸) 方向へのストロークは約 10 μ m、短軸 (Y 軸) 方向へのストロークは約 24 μ m であることを確認した。また、その動作は滑らかであり、中心に対してほぼ対称となる作動特性が得られた。

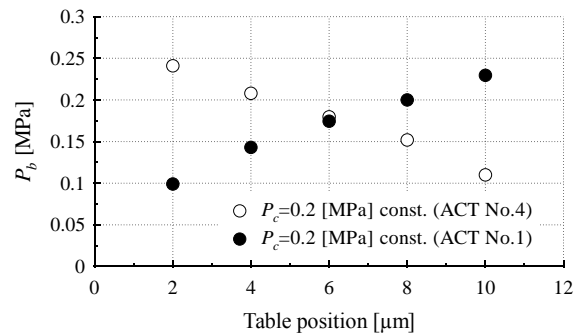


Fig. 7 Table position vs. load pressure along X-axis

③ 最小位置決め分解能

(2)②章と同様に、テーブルのステップ応答を調べることで、それぞれの位置におけるステージの最小分解能を調べた。その結果を **Fig. 8** に示す。□は面内におけるステージの位置を表し、その中に記載されている数値は、X 方向、Y 方向への最小分解能を表している。これより、Y=12 μ m の位置での最小分解能がやや劣る様子が見取れる。この理由として、すきまの広がりによって、テーブルの微小振れ量が大きくなることが挙げられる。しかしながら、非制御であるにもかかわらず概ね全域にわたって 10nm 以下の分解能を実現し得ており、本ステージが超精密位置決め機構として十分有用であることが確認できた。

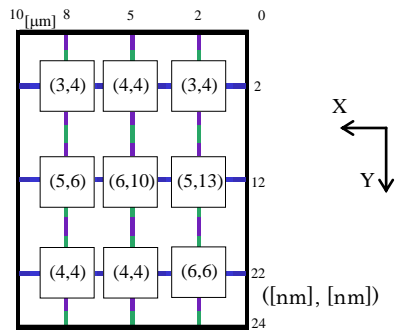


Fig. 8 Minimum resolution map of XY stage

(4) 結論

二連型球面軸受アクチュエータを6機組み込むことにより、XYθ方向へのテーブル駆動が可能な超精密ステージを試作した。その非制御状態での最小位置決め分解能は、ステージ全域にわたって概ね10nm以下であった。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計4件)

- ① Study on Reduction of Nano-Fluctuation of Aerostatic Bearing with Surface Restriction, Takakazu Kitagawa, Takashi Matsuoka, Tomoko Hirayama, Ryota Mizuno, Masato Kadotani, Hiroki Danjo, Katsumi Sasaki, Hiroshi Yabe, International Journal of Surface Science and Engineering, Vol. 4, No. 2 (2010) pp. 111-120. 査読有
- ② Development of Pneumatic Servo Bearing Actuator for Nanometer Positioning, Masato Kadotani, Takakazu Kitagawa, Satoshi Katto, Tomoko Hirayama, Takashi Matsuoka, Hiroshi Yabe and Katsumi Sasaki, International Journal of Automation Technology, Vol. 3, No. 3 (2009) pp. 249-256. 査読有
- ③ 超精密位置決め用空気圧サーボ軸受アクチュエータの開発【解説】，平山朋子，佐々木勝美，設計工学，Vol. 44, No. 3 (2009) pp. 149-153. 査読有
- ④ 超精密機器における流体／気体軸受の設計と技術動向【解説】，平山朋子，精密工学会誌，Vol. 74, No. 9 (2008) pp. 905-908. 査読有

[学会発表] (計9件)

- ① 超精密位置決め用空気圧サーボ軸受アクチュエータとその応用【招待講演】，平山朋子，佐々木勝美，超精密位置決め専門委員会 2010年度4月定例会，東京，2010/4/16.
- ② 空気圧サーボ軸受アクチュエータを用いた超精密位置決めXYθステージの開発，檀上弥輝，平山朋子，松岡敬，杉本敦志，吉村知孝，日本機械学会関西支部 第85

期定時総会・講演会，大阪，2010/3/16.

- ③ Ultraprecise Positioning X-Y Stage Composed of Pneumatic Servo Bearing Actuators, Hiroki Danjo, Tomotaka Yoshimura, Takakazu Kitagawa, Masato Kadotani, Tomoko Hirayama, Takashi Matsuoka, Extended Abstract of World Tribology Congress 2009 (2009) p. 108, 京都，2009/9/7.
- ④ Application of Pneumatic Servo Bearing Actuators for XYθ Ultraprecise Positioning Stage, Hiroki Danjo, Tomotaka Yoshimura, Takakazu Kitagawa, Tomoko Hirayama, Takashi Matsuoka, Extended Abstract of ICMDT2009, Jeju Island (2009) p. 114, 韓国，2009/6/25.
- ⑤ Development of Pneumatic Servo Bearing Actuator for Nano-Positioning, Satoshi Katto, Masato Kadotani, Takakazu Kitagawa, Tomoko Hirayama, Takashi Matsuoka, Katsumi Sasaki, Extended Abstract of JSME-IIP/ASME-ISPS Joint Conference on MIPE 2009 (2009), つくば，2009/6/17.
- ⑥ 超精密位置決め用空気圧サーボ軸受アクチュエータの開発 (位置決め制御による特性向上)，角谷雅人，北川貴一，平山朋子，松岡敬，佐々木勝美，日本機械学会関西支部 第84期定時総会講演会予稿集 (2009)，大阪，2009/3/15.
- ⑦ Pneumatic Servo Bearing Actuator for Ultraprecise Positioning: Part 1, Tomoko Hirayama, Takakazu Kitagawa, Masato Kadotani, Hiroki Danjo, Takashi Matsuoka, Katsumi Sasaki, Hiroshi Yabe, Proceedings of 23rd ASPE Annual Meeting and 12th ICPE (2008), アメリカ，2008/10/22.
- ⑧ 超精密位置決め用空気圧サーボ軸受アクチュエータの開発 (第5報)，角谷雅人，北川貴一，檀上弥輝，甲藤智，平山朋子，松岡敬，佐々木勝美，矢部寛，トライボロジー会議秋名古屋予稿集 (2008) pp. 339-340, 名古屋，2008/9/18.
- ⑨ 動圧／静圧気体軸受の超精密機器への応用事例【招待講演】，平山朋子，関西潤滑懇談会 2008年度7月例会，大阪，2008/7/24.

[その他]

ホームページ

<http://www1.doshisha.ac.jp/~tribolab/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

平山 朋子 (HIRAYAMA TOMOKO)

同志社大学・理工学部・准教授

研究者番号：00340505

(2) 研究分担者
なし

(3) 連携研究者
なし