

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年6月10日現在

機関番号：32657

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22560251

研究課題名（和文） 低流体ノイズ弁による空気圧ベローズ微動ステージのサブナノ位置決め制御法の開発

研究課題名（英文） Development of Sub-Nano Position Control for Slight Movement Stage Driven by Pneumatic Bellows Using Low Flow Noise Type Valve

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

研究成果の概要（和文）：超精密位置決めの研究はナノからサブナノへと移ってきている。本研究では、圧電素子の欠点を補うアクチュエータとして空気圧ベローズを用い、超精密位置決め用の微動ステージを製作した。これがサブナノの位置精度を達成するために、駆動する弁から発生する微小な圧力変動をすきま流れを利用して低減する低流体ノイズ弁を開発し、同時にその制御法を検討した、その結果、最高水準のサブナノの位置精度を実現した。

研究成果の概要（英文）：The study on ultra-precise positioning moves focus from nano positioning to sub-nano positioning. In this study, we fabricated the slight movement stage driven by the pneumatic bellows for ultra precise positioning, covering the shortcomings of piezoelectric element. To increase positioning accuracy of this stage, the low flow noise type servo valve, which reduce the small pressure disturbance by using clearance flow, and the control method driving this stage were developed. Finally, we realized ultimate level of sub-nano positioning.

交付決定額

（金額単位：円）

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|--------|-----------|-----------|-----------|
| 2010年度 | 1,000,000 | 300,000 | 1,300,000 |
| 2011年度 | 1,400,000 | 420,000 | 1,820,000 |
| 2012年度 | 1,000,000 | 300,000 | 1,300,000 |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 総計 | 3,400,000 | 1,020,000 | 4,420,000 |

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学、知能機械学・機械システム

キーワード：精密機械システム・機械要素・流体工学・空気圧・超精密位置決め

1. 研究開始当初の背景

(1) ナノテクノロジーの進展に伴い、特に半導体産業を中心に製品・電子部品の小型化が進んでいる。結果として、三次元実装機など、その製造・組立・検査装置ではナノオーダー（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いる。また新たにバイオテクノロジーにも超精密位置決め技術が応用

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。

一般に超精密位置決めは、ひとつのアクチュエータで実現することは困難であり、粗動と微動用とを分け、それぞれの要求にあったアクチュエータが選択されてきた。その中で圧電（ピエゾ）素子アクチュエータは、応答が速くナノオーダーの微小変位が容易に得

られることから、微動用アクチュエータとして多く使用されている。しかしながら、その変位はアクチュエータの全長に対し 0.3%程度であり、大変位を得るために積層形としても高々50[μm]と小さく、圧電素子のストローク不足が、応用面での制約となっている。また積層する際に使用される接着剤の経年変化から、その耐久性についても問題となっている。

一方、空気圧では微動アクチュエータとしてペローズが用いられてきた。微動とは言えペローズの変位は、全長に対し 30%以上で容易に数ミリ程度の変位が得られる。また金属製ペローズでは材料の信頼性も確立されている。

(2) このような背景から、申請者は空気圧ペローズを超精密位置決めに利用することを提案した。弾性ヒンジで支持された微動ステージを、圧電素子の代わりに空気圧ペローズで駆動した。この超精密位置決めを試みた。この微動ステージに適したフィードバック制御手法を検討し工夫し超精密位置制御を試みた結果、圧電素子より応答性は劣るもののストロークは5倍以上で、精度も 10[nm]と圧電素子とほぼ同等であった。

しかしながら、近年のアクチュエータに関する研究での精度はサブナノメートルまでに達していることを考えれば先に実現した精度では十分とは言えない状況になってきている。位置決め精度を困難にしている要因を調べたところ、ペローズを駆動するサーボ弁から発生する微小な圧力変動、すなわち流体ノイズであることがわかった。また流体ノイズによって励起される振動変位の周波数は、ステージ可動部の質量と弾性ヒンジのバネとでなす共振周波数であり、70[Hz]とサーボ弁の応答周波数と比べて高く、制御による精度向上を阻害していた。

2. 研究の目的

そこで本研究では、この(1)流体ノイズを低減するサーボ弁を開発すること、流体ノイズにより発生する振動周波数を下げのために、弾性案内に代えて(2)静圧案内による微動ステージを製作すること、併せて(3)サブナノを実現する制御システムの構築し、これらを通して微動ステージの精度を向上させ、1[nm]以下のサブナノポジショニングを実現すること目的とした。

3. 研究の方法

(1) 低流体ノイズ弁の開発

図1に一般的な絞り弁とすきま流れを利用した絞り弁の違いを示す。一般的な絞り弁は、ドリル加工などで小孔を空けた単純なものである。この場合、上流側の圧力は絞り弁で流速に変わり下流側に流れ込む、下流側で

は流速は流体の粘性のみによって減衰する。このとき渦などを発生し、これが流体ノイズとなる。これに対してすきま流れを利用した絞り弁では、絞り弁の入り口から下流出口までに放射状のすきまを設ける。この場合、流体がこのすきまを通過する際に圧力損失を生じる。したがって、その分だけ圧力のエネルギーが低下するので、下流側に流れ込む流速を低下させることができる。結果、流体ノイズを低減させることができる。

図2にすきま流れを利用した絞り弁を組み込んだノズルフラップ型のサーボ弁を示す。これまで使用したサーボ弁のフラップはトルクモータで駆動されていたのに対して、ボイスコイルモータに変更されている。ボイスコイルモータはトルクモータに比べ磁気ヒステリシスが小さく、これによりサーボ弁の圧力制御特性の向上も期待できる。

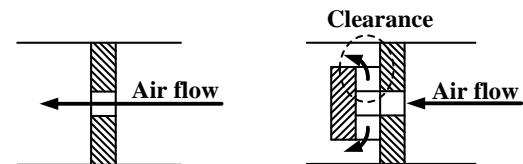


図1 絞り弁の構造

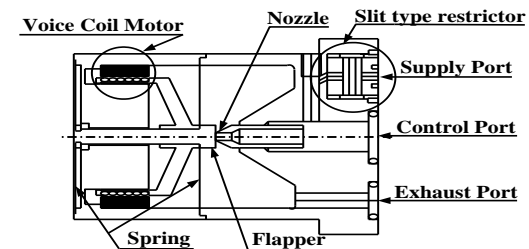


図2 低流体ノイズ弁を組み込んだサーボ弁

(2) 静圧案内による微動ステージの製作

図3に製作した静圧案内による微動ステージを示す。ステージは70×140×18[mm]の大きさのSUS製の金属板であり、セラミック製の静圧軸受により非接触で支持されている。この左右に対向して設置した空気圧ペローズを押し当て、空気圧ペローズに差圧を与えることによってステージを左右に駆動させる。静圧軸受を含めた可動部の重量は2.2[kg]である。またペローズのばね定数は24[N/mm]に設計した。弾性ヒンジを配したことによりステージ系の共振周波数振動数は約17[Hz]と、1/4程度に抑えることができた。この周波数はサーボ弁の応答周波数から比べると低く、制御による振動抑制も可能となった。

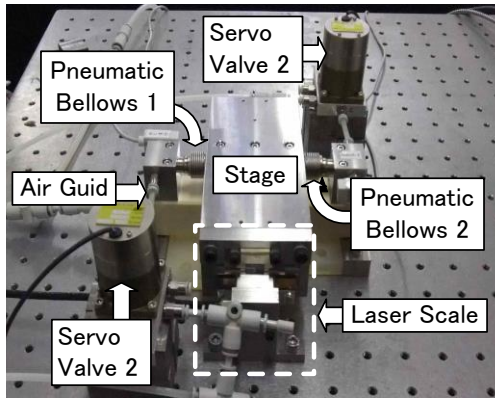


図3 製作した静圧案内による微動ステージ

(3) サブナノを実現する制御システムの構築

図4に構築した微動ステージの制御システムを示す。コントローラには一般的なパーソナルコンピュータを使用し、計測制御ソフトウェア MATLAB Simulink xPC Target により制御プログラムを構築した。制御周期は 0.1[ms]とした。ステージの位置は 62.5[pm]の分解能を有する半導体レーザを用いた格子干渉方式のレーザスケールで計測した。この位置信号のコンピュータへの入力は 40[bit]の I/O ボードを介して行い、操作量であるサーボ弁のアンプへの出力は 16[bit]の D/A 変換器を介して行った。

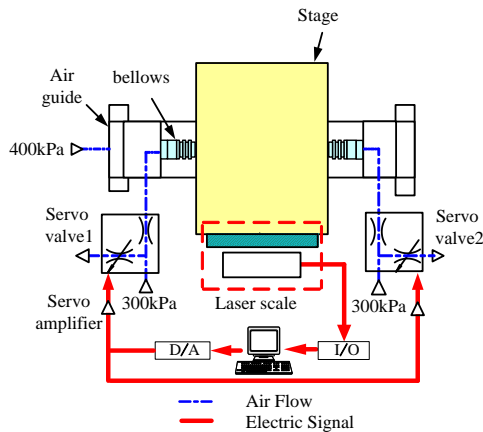


図4 微動ステージの制御システム

ステージの制御アルゴリズムを図5に示す。ベローズはばね特性を有するため制御対象は定位置性を有し、P 制御だけではオフセットを生じる。これを補償するためにフィードフォワード制御を行った。さらにベローズやサーボ弁特性によるヒステリシスの補償のために PI 制御を加えた。フィードフォワードゲインはステージ特性から決定し、比例ゲインと積分時間は位置決め精度を重視しながら試行錯誤により決定した。当初、応答に重乗する振動を低減するために外乱オブザ

ーバや、ステージ速度・加速度のフィードバックの導入も検討していたが、低流体ノイズサーボ弁と静圧軸受の採用によって振動が抑制され単純な制御アルゴリズムで超精密位置決め制御が可能となった。

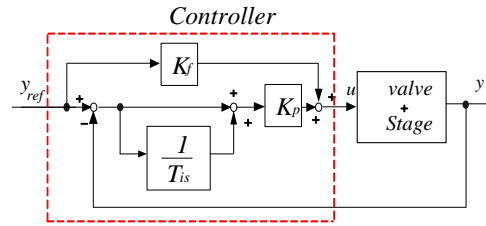


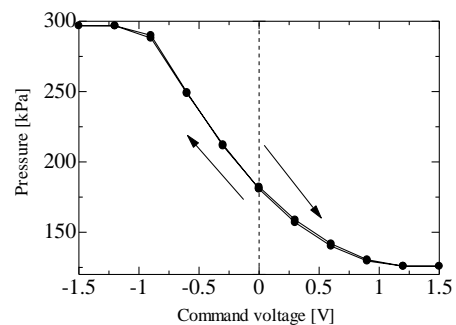
図5 適用した制御アルゴリズム

4. 研究成果

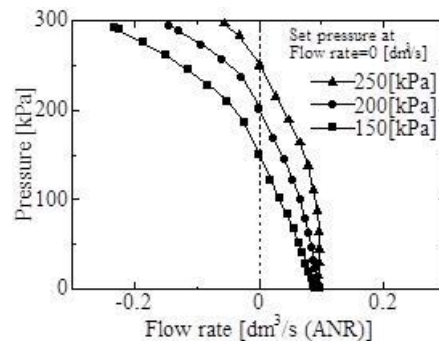
(1) 低流体ノイズ弁の特性とその効果

図6に開発した低流体ノイズ弁の特性を示す。すきま流れを利用した絞り弁の流量特性を調べた結果、一般的な流量特性とは異なり、明確なチョーク領域はなく圧力流量特性は一般的な絞り弁より直線的であること、その関係はすきま流れの式を用いて理論的に算出可能なこと、一般的な絞り弁とは特性が異なるものの IS06358 で規定されている空気圧機器の流量特性表示式を適用可能であることなどが明らかになった。

得られた特性を利用して、ノズルフラップ型サーボ弁を設計したところ、ほぼ設計通りの圧力制御特性、圧力流量特性が得られた。



a) 圧力制御特性



b) 圧力流量特性

図6 低流体ノイズサーボ弁の特性

しかしながら、すきま流れを利用した絞り弁の特性のため圧力制御特性は非線形性が多少、強いサーボ弁となった。またヒステリシスは以前のトルクモータ駆動のサーボ弁の1/10以下になり、非常に小さくフォースモータに変更した効果を確認できた。非線形性が強いことについては、制御系の工夫次第で問題はなく、得られた圧力流量特性と併せてステージの駆動には、十分な特性を有することがわかった。

図7に流体ノイズサーボ弁の効果を示す。この応答はサーボ弁に制御を行わず、サーボ弁に空気圧を供給し一定電圧を加えた時の振動しているステージの応答である。(a)は一般的な絞り弁のノズルフラップ型サーボ弁の場合である。応答に振幅が最大60[nm]の振動が重乗しており、不規則に大きなふらつきも確認できる。これに対し(b)の開発した低流体ノイズサーボ弁で駆動し制御を行った場合には、重乗する振動振幅が最大で10[nm]であり、振動が小さくなっている。同時に不規則なふらつきも抑制されている。一般に流量ゲインが小さくなると流体ノイズは低減されるが、このことを差し引いても低流体ノイズサーボ弁と導入した制御の効果が確認できた。

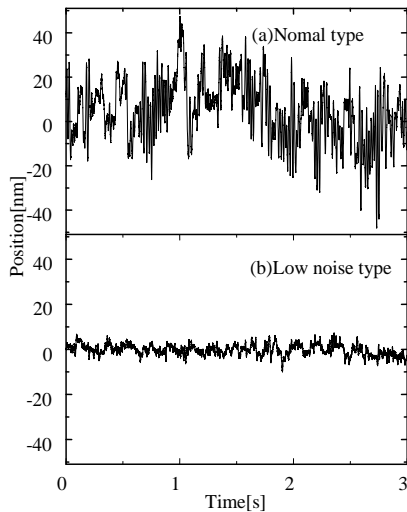


図7 低流体ノイズサーボ弁の効果

(2) 静圧案内による微動ステージの特性

図8は弾性ヒンジ案内から静圧軸受による案内に変更した効果を示す。先の場合と同様に、制御は行わず、両方とも低流体ノイズサーボ弁には一定の電圧を加えている。(a)の弾性ヒンジ案内も、(b)の静圧案内も大きな変動に、それより周波数の高い細かな振動が重乗していることがわかる。大きなその振動の振幅はどの程度であるが、細かな振動の周波数については、静圧案内のほうが低く、そのためノイズが小さくなっているように

見える。振動周波数を低減するという静圧案内の目的が達成できた。

目標値のステップ幅を10[nm]として制御を行ったときのステージ応答を図9に示す。(a)は弾性ヒンジ案内の微動ステージで一般的なノズルフラップサーボ弁で駆動した場合、(b)は静圧案内の微動ステージで低流体ノイズサーボ弁により制御した場合である。(a)の場合は、大きなふらつきが見られるが、(b)では抑制されている。細かな振動についても無制御時には振幅がほぼ同じだったのに対し、制御時は振動の幅が(a)よりも(b)が小さくなっている。静圧軸受により振動周波数が下がり、制御により振動が抑制できるようになったことがわかる。

位置決め精度はかたより e とばらつき σ を用いて $e \pm 3\sigma$ で評価される。図9に示したステップ応答の整定後のデータからこれらを求めると、(a)の場合に 0.02 ± 3.9 [nm]であったのが、 0.01 ± 0.9 [nm]となり、位置精度を大きく改善することができた。

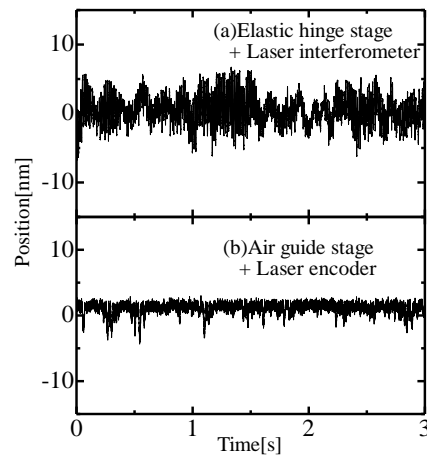


図8 静圧軸受への変更の効果

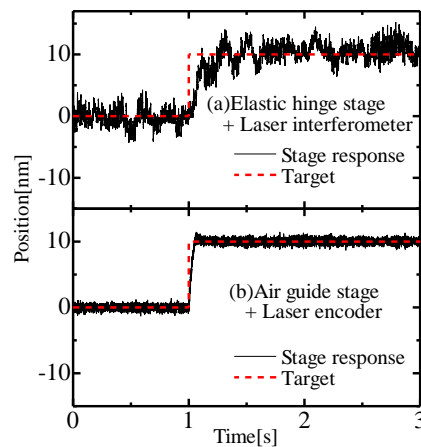


図9 制御時における効果

(3) 構築した制御システムによる位置決め制御結果

図 10 にステージの位置決め精度を調べた結果を示す。(a)が中心付近での結果であり(b)、(c)が中心から±600[μm]の位置での結果である。±600[μm]の位置はステージのストローク端付近である。先と同様に位置決め精度を $e \pm 3\sigma$ で評価した。図 10(a)の場合では 0.02 ± 3.9 [nm]であったのだが、中心付近で位置決め精度は 0.01 ± 0.9 [nm]となり、位置決め精度を大きく改善することができた。これに対し+600[μm]の位置では 0.03 ± 0.9 [nm]、-600[μm]の位置では 0.05 ± 1.2 [nm]の結果となり、中心付近の精度と比べて若干、劣っている結果となった。しかし、変位センサの分解能や実用性を考慮すると中心付近以外でも位置決め精度は良好であると言える。

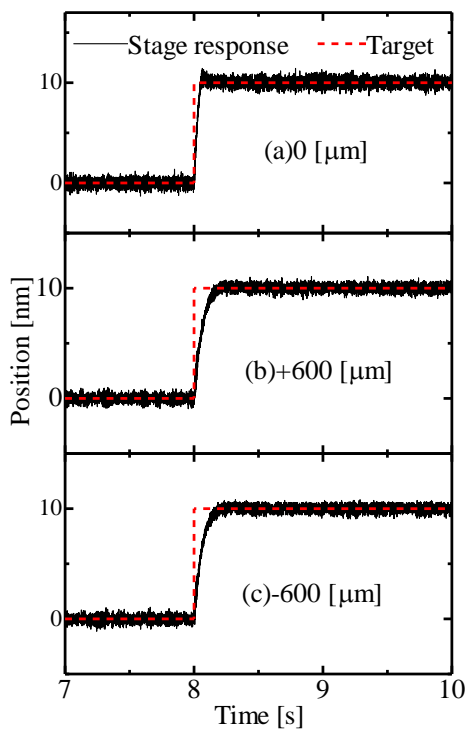


図 10 微動ステージの位置精度

精密位置決めでは精度ばかりではなく、位置決め分解能および再現性からの評価も重要である。これらの点についても調べた。位置決め分解能を調べた結果を図 11 に示す。(a)が中心付近、(b)、(c)が中心から±600[μm]の位置からステップ幅を1[nm]として3秒間隔でステップ信号を階段状に与えたときのステージの応答である。入力したステップ幅で変位を得られれば、その幅の分解能を得ることができる。図 11(b)において毎回のステップ信号に対し、1[nm]毎に目標値に追従しており、1[nm]の分解能を有しているこ

とが確認できる。従来の弾性ヒンジのステージに比べ位置決め分解能も大幅に向上することができた。データとしては示さないが、ステップ幅を10[nm]として3秒間隔でステップ信号を与えステージの応答再現性について調べたところ、毎回の過渡応答の立ち上がりや整定時間がほぼ同じとなり、再現性についても良好であることがわかった。

以上、低流体ノイズサーボ弁により、微動ステージの精度を向上し、最高水準のポジショニングを実現できたことから、当初の目的はほぼ達成できたと言える。また、これまで空気圧で、この精度を実現したものはなく、空気圧アクチュエータの新たな応用分野への展開も期待できる。

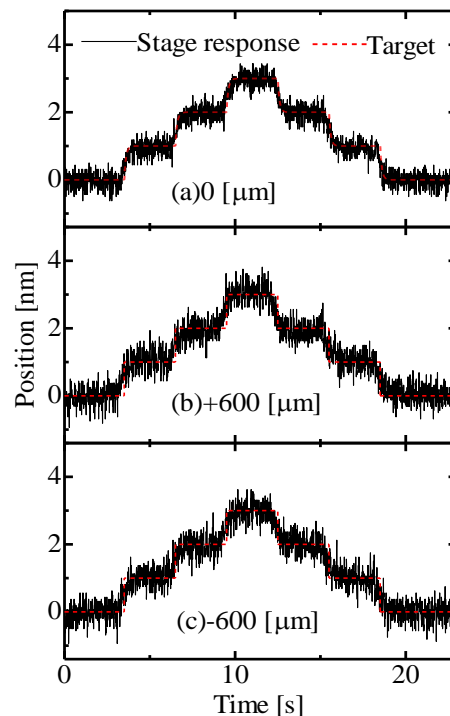


図 11 微動ステージの分解能

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)

[学会発表] (計6件)

- ① 藤田壽憲、空気圧ペローズを用いた静圧案内微動ステージの超精密位置決め、日本機械学会 2012年度年次大会、2012年9月10日、石川県金沢市金沢大学
- ② 藤田壽憲、空気圧ペローズで駆動する静圧案内微動ステージの超精密位置決め制御、精密工学会 春季大会学術講演会、2012年3月16日、東京都八王子市首都大学東京
- ③ 藤田壽憲、ペローズで駆動する空気圧微動ステージの超精密位置決め制御、第53回自動制御連合講演会、2010年11月4日、高知県高知市高知城ホール

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

香川 利春 (KAGAWA TOSHIHARU)

東京工業大学・精密工学研究所・教授

研究者番号：50108221