

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 12 日現在

機関番号：13601

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560159

研究課題名(和文) 同軸二重型差動ボールねじを応用したミリストローク超高分解能直動アクチュエータ

研究課題名(英文) Linear stepping actuator with ultra-fine resolution over a millimeter stroke applying overlapped coaxial differential ball screw

研究代表者

深田 茂生 (FUKADA, Shigeo)

信州大学・工学部・教授

研究者番号：70156743

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円、(間接経費) 1,140,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、最大1mm程度のストローク(ミリストローク)にわたってナノメートルレベルの直動分解能を持つ直動アクチュエータを、同軸二重型差動ボールねじとステッピングモータを一体化することにより設計製作した。また製作したアクチュエータの性能を実験的に評価するとともに誤差の補正方法を検討し、補正システムを実装した。その結果、5nmの駆動分解能と、1mmの全ストロークにわたる累積送り誤差が0.06 μ m(RMS値)以下のリニアステッピングアクチュエータを実現することができた。

研究成果の概要(英文)：In this study, a compact linear stepping actuator with ultra-fine resolution over a one-millimeter stroke (millimeter-stroke) is designed and fabricated by integrating a coaxial differential ball screw with a stepping motor. The performance of the fabricated actuator is evaluated experimentally, and a method of error compensation is devised and applied to this actuation system. Consequently, ultra-precise linear stepping actuator is realized with travel deviation of less than 0.06 microns (RMS) and with fine positioning resolution of 5 nm.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学，設計工学・機械機能要素・トライボロジー

キーワード：ボールねじ 精密位置決め 差動機構 アクチュエータ

1. 研究開始当初の背景

精密位置決め技術は、半導体製造装置や超精密工作機械および精密測定機などの基幹性能を支配する最も重要な基盤技術の一つであり、今後の着実な進展が期待されている。現在までに実用的に使用されている精密位置決め機構は、①工作機械や半導体製造装置のように数十mm～数mの比較的長ストロークの位置決め機構と、②SPM（走査探針顕微鏡）の走査機構等のようにストローク数十μm以下の微動位置決め機構に分化している。そのため、両者の中間的な領域にあたる、ストロークが1～数mmに対してナノメートルレベルの分解能を持つ位置決め装置の実用例が現状では稀少であり、位置決め機構の空白領域となっている。このような空白状況は、精密機器の設計技術者や生産技術者によって強く認識されるようになってきており、微細加工装置や微細形状測定機の設計上で問題となっている。そこで本研究では、最大1mm程度のストローク（“ミリストローク”）に対してナノメートルレベルの分解能を持つ位置決め用直動アクチュエータを、差動ボールねじ機構により実現することを目指した。

2. 研究の目的

現状の精密位置決め機構は、①数十mm～数mの比較的長スロークの位置決め機構と、ストロークが数μm以下の微動位置決め機構に分化している。本研究では、それら両者の中間的な領域にあたる、ストロークが1～数mmに対してナノメートルレベルの分解能を持ち、放電加工機の鉛直軸駆動機構や、超精密レベリング装置、光学機器アライメント装置として利用可能な実用的位置決め装置を、高分解能・高精度・コンパクトな差動ボールねじと、ステッピングモータを応用したセンサレスの装置により極めて低コストで実現することを目的としている。

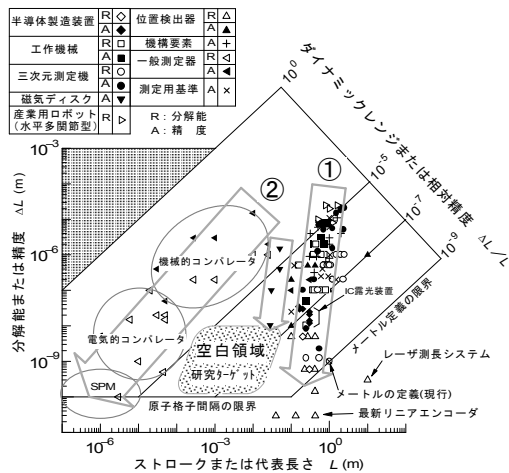


図1 種々の位置決め機構および関連機器の精度・分解能対ストロークのマップ

3. 研究の方法

図1は、種々の精密機械システムを構成する位置決め機構および関連する精密機器のストロークに対する精度・分解能を、研究代表者が整理してマップとして示したものである。同図から読みとれるように、ストロークが1～数mmに対してナノメートルレベルの分解能を持つ位置決め装置の実用例が現状では稀少であり、位置決め機構の空白領域となっている。本研究では、そのような最大1mm程度のストローク（ミリストローク）にわたってナノメートルレベルの直動分解能を持ち、ステッピングモータと同様にセンサレスで駆動可能な低コストなリニアアクチュエータを、コンパクトな差動ボールねじ機構を応用して実現する。これまでに研究代表者は、図2に示すような直列型差動ボールねじの位置決め性能について検討を行ってきた。図2のようにわずかにリードが異なる2本のボールねじを直列に結合すれば見かけ上の差動機構を実現でき、ナノメートルレベルの高分解能を実現できることが実証されたが、軸方向に長大な構造となるため実用的ではない。そこで研究代表者らは、図3に示すようなリードがわずかに異なるボールねじを同軸上に二重に配置したコンパクトな「同軸二重差動ボールねじ」を考案し、ボールねじ本体を試作して原理的な確認を行っている。しかし、本機構をさらにコンパクトに汎用性の高いものとするためには、モータと一体化した汎用的な直動アクチュエータとすることが望まれる。

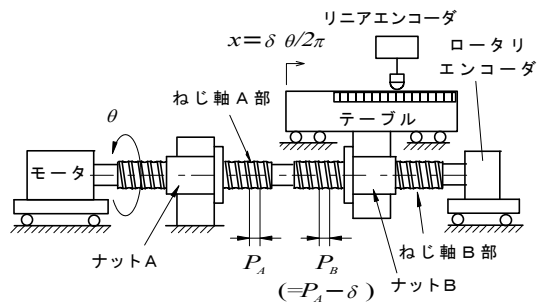


図2 直列型差動ボールねじ位置決め機構

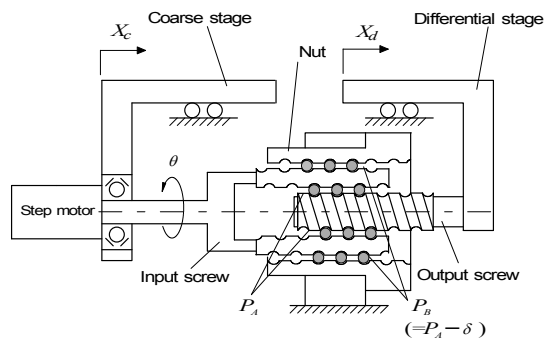


図3 同軸二重差動ボールねじの原理

そこで本研究では、まず同軸二重型差動ボールねじとステッピングモータを一体化し、ミリストロークに対してナノメートルレベルの分解能を持つリニアアクチュエータを設計製作する。位置決め要素としてねじを用いることの利点は、リード精度が確保できればステッピングモータを用いることによりセンサレスで位置決めが可能となることである。ただし位置決め精度はねじのリード誤差などの幾何学的誤差に支配され、制御性能はボール接触部の非線形摩擦特性によって悪化することが予想されるため、これまでに本機構のような純メカ的方法でナノメートルレベルの分解能を安定的に実現できることは学術的に実証されていない。そこで、製作したリニアアクチュエータの特性を種々の条件で測定・評価し、差動ボールねじによる純メカ的手法のナノメートルレベル位置決めへの可能性と限界を明らかにする。

4. 研究成果

(1) アクチュエータの設計と製作

図3で示した同軸二重型差動ボールねじを用いた位置決め機構の基本的な構成原理では、差動ボールねじ部とアクチュエータであるステッピングモータが独立しており、両者を軸上で軸継手等によって連結する構造となっていた。本研究ではそれらを一体化したリニアステッピングアクチュエータを実現するために図4のような構造を採用した。すなわち差動ボールねじの入力軸上にステッピングモータの歯付ロータを直接形成し、周囲にステータ巻線を配置してハイブリッド型ステッピングモータを構成する。

図4に示した構造をもとに詳細な設計を行い、図5のようなアクチュエータを製作した。差動ボールねじ本体は、最外周に位置するナットと、入力軸および出力軸の3個の主要部品から成り、図4の P_A のおねじ($P_{A,m}$)とめねじ($P_{A,f}$)、および P_B のおねじ($P_{B,m}$)とめねじ($P_{B,f}$)の4本のねじ溝により構成されている。基準リードは $P_A=2.00\text{ mm}$ と $P_B=1.90\text{ mm}$ であり、相対リード差 $\delta=0.10\text{ mm}$ の差動ボールねじとして作用する。

表1は、製作した同軸二重型差動ボールねじの仕様を示す。入力軸の外径は 31.5 mm 、出力軸の外径は 15.5 mm で、入力軸の回転範囲は約10回転であり、このとき出力軸のストロークは 1 mm となる。ボール(直径 1.587 mm)はりん青銅製のリテーナで保持され、オーバサイズボール方式により予圧が付与されている。 P_A と P_B ともにボールの巻数は4巻である。材質はクロムモリブデン鋼SCM415Hであり、浸炭焼入れ後にねじ研削によりねじ溝が仕上げられている。ねじ溝の精度等級はJISのC0級相当である。

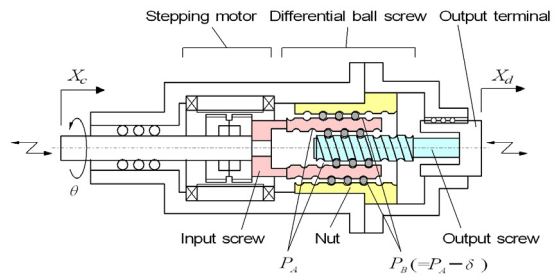


図4 同軸二重型差動ボールねじによるリニアステッピングアクチュエータ

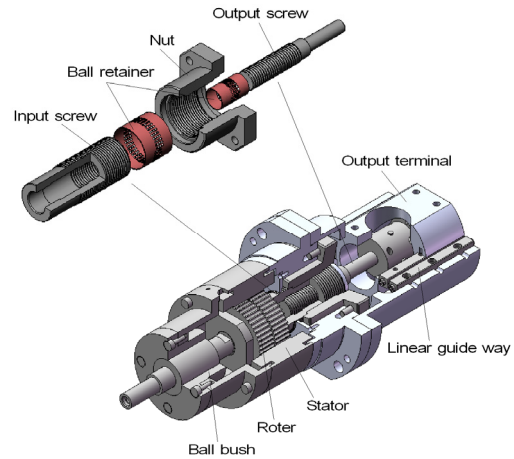
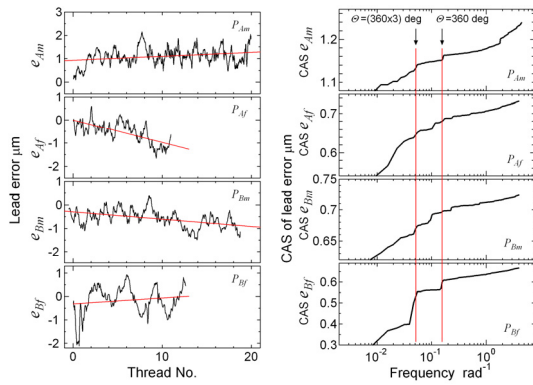


図5 直動ステッピングアクチュエータ

表1 機構の設計仕様

	ねじ A	ねじ B
雄ねじ外径 mm	16	32
基準リード mm	2.0	1.9
差動リード mm	100	
鋼球径 mm	1.5875	
鋼球数	62	122
材質	SCM415H 浸炭焼入れ	
ねじ溝仕上げ	ねじ研削	
精度等級	C0	



(a) 累積リード誤差 (b) リード誤差の CAS
図 6 ねじ溝のリード精度

図 6 は、製作した P_A のおねじ (P_{Am}) とめねじ (P_{Af})、および P_B のおねじ (P_{Bm}) とめねじ (P_{Bf}) の 4 本のねじ溝の累積リード誤差の測定結果を示す。測定は回転テーブルを設置した三次元座標測定機 (CMM) により行った。同図(a)は各ねじ溝の累積リード誤差、(b)はそれらの累積振幅スペクトル (CAS) を示す。各ねじ溝はねじ研削により仕上げられているが、累積代表リード誤差は概ね $1 \mu\text{m}$ 以内に収まっている。また誤差の変動成分としては、1 回転 (360 度) 周期と、3 回転 (360 度 \times 3) 周期の変動が支配的であるが、これは最終仕上げを行ったねじ研削盤の親ねじのリード (6 mm) の影響によると考えられる。

(2) アクチュエータの特性評価

図 7 は、製作したステッピングアクチュエータの特性評価のための実験システムの構成を示す。差動出力ターミナルの変位を分光干渉レーザ変位計 (分解能 1 nm) で測定し、入力軸変位をレーザ測長システム (分解能 1.2 nm) で測定する。また入力軸回転角度をロータリエンコーダ (分解能 720 kppr) で測定した。ステッピングモータは基本ステップ角 0.72 deg の 5 相式で、駆動回路により最小ステップ角を 0.00288 deg まで縮小できる。

まず、モータの最小ステップ角を微細にし、本アクチュエータの位置決め分解能の限界について検討した。図 8 に測定結果を示す。ステップ角 0.018 deg の場合に、差動ステージ変位 x_d は 5 nm の目標ステップ変位に追従したが、 0.0036 deg の場合には明確なステップ状の変位は確認できなかった。従って本機構を一方に駆動した場合の位置決め分解能は 5 nm 程度であると言える。

次に、差動出力ターミナルの全ストローク (1 mm) にわたる送り誤差を測定した。図 9 は、入力軸回転角度 θ に対するステッピングモータの実回転角度誤差 E_θ 、入力軸送り誤差 E_c および差動出力ターミナル送り誤差 E_d の測定結果を示す。同図(a)は累積送り誤差、(b)はそれらの CAS を示す。モータのステップ角

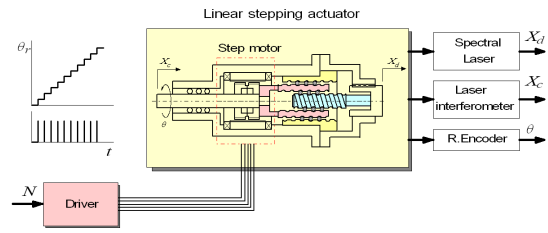


図 7 実験システム

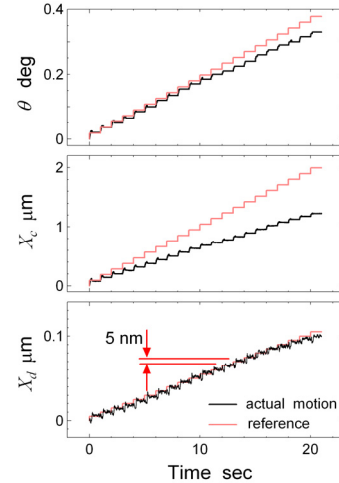
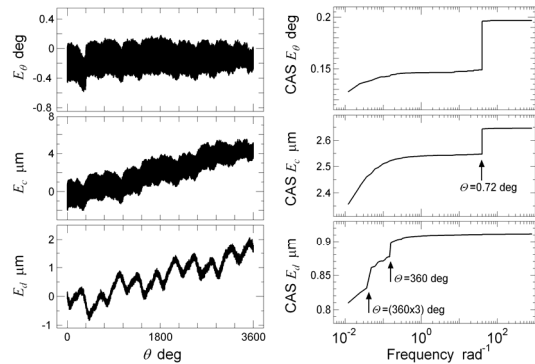


図 8 駆動分解能



(a) 累積送り誤差 (b) 送り誤差の CAS

図 9 送り誤差

は 0.036 deg である。回転角度誤差 E_θ と入力軸送り誤差 E_c には基本ステップ角 (0.72 deg) 周期の変動が顕著に見られるが、差動出力ターミナル送り誤差 E_d にはこの誤差成分は見られない。差動効果による誤差の同相成分除去が有効に作用しているためと考えられる。また差動出力ターミナル送り誤差 E_d には 1 回転 (360 度) 周期と、3 回転 (360 度 \times 3) 周期の変動が見られるが、これは図 6 で示したねじ溝のリード誤差が持つ成分が現れているものとする。なお 1 回転に同期した成分が顕著であり、これは回転案内部の偏心誤差等のねじ溝以外の誤差の影響もあるものと考えられる。同図(b)より、差動出力ターミナルの

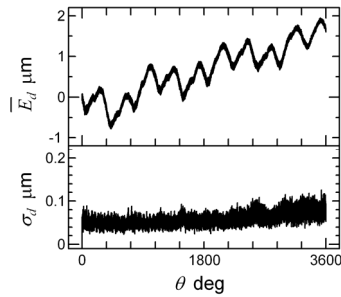
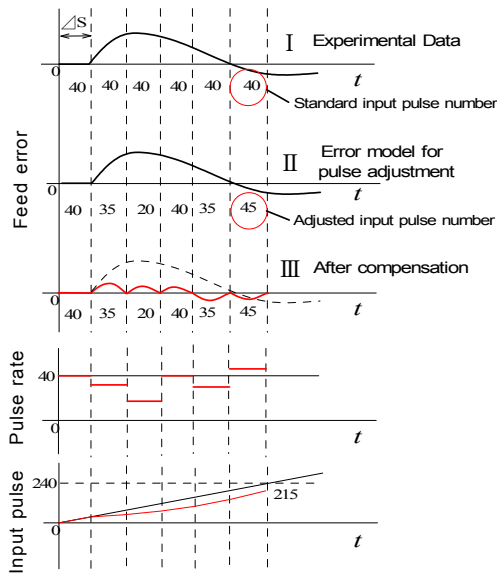
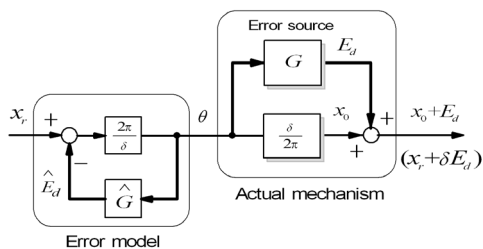


図 10 送り誤差の平均と標準偏差 (20 回繰返し)

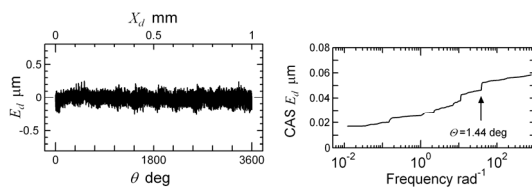


(a) 補正動作のタイミングチャート



(b) 補正システムのブロック線図

図 11 送り誤差の補正方法



(a) 累積送り誤差 (b) 送り誤差の CAS

図 12 補正後の送り誤差

総合的な送り誤差は、RMS 値で約 $0.9 \mu\text{m}$ であると言える。

(3) 補正方法の検討

本アクチュエータの差動出力ターミナルには、約 $0.9 \mu\text{m}$ (RMS 値) の送り誤差が残留していることを前項で示した。ここでそれらの誤差の再現性を検討した。図 10 は 20 回繰返し測定した差動出力ターミナル送り誤差の平均値と各位置の標準偏差を示す。標準偏差は $0.1 \mu\text{m}$ 以下であり、良好な再現性を示した。そこで、同図(a)の平均曲線を記憶して指令パルスを加減することにより、累積送り誤差の補正を試みた。図 10 に本研究で検討した補正方法を示す。実験により得られた送り誤差について、ステッピングモータへのパルス入力を一定の補正間隔 ΔS で区切り、各補正間隔の終点で送り誤差がゼロとなるように目標パルス数をリアルタイムに補正する。さらに補正されたパルス数においても補正間隔の時間が一定となるようにパルス周波数を各区間で変化させる。図 11 に補正後の送り誤差 (補正間隔 $\Delta S=10$ パルス) の測定結果を示す。補正間隔 ΔS を種々に変えて実験を行った結果、 $\Delta S=10$ パルスの場合が最も誤差の低減効果が大きく、差動ステージ送り誤差の RMS 値 (CAS の最終値に対応) を $0.06 \mu\text{m}$ まで低減できた。

(4) 限界精度について

5 nm の分解能と $0.06 \mu\text{m}$ (RMS 値) の送り精度の決定要因について考える。まず分解能については図 8 で示したように、ステッピングモータ自体の応答の限界が本アクチュエータの駆動分解能を制限していると言える。ステッピングモータによる開ループ動作においては、ドライバからの指令に対してモータが 1 ステップずつ確実に動作することが前提となるが、本モータでは 0.018 度が限界であった。理論上はさらに 5 倍の分解能が可能であるが、これらの高分解能化は 0.72 度の基本ステップ動作を電氣的に分割することにより実現しており、実際の分解能を理論分解能に近づけることができればさらなる高分解能化が可能となる。

一方、送り精度については、現状においてねじ溝のリード精度は、ねじ研削盤の精度に制限されるため、図 6 に示した約 $1 \mu\text{m}$ 程度の精度が限界である。それらを組み合わせた場合の運動精度はねじ溝とボールの相対運動により決定されるが、図 9 で示したように本研究で提案する差動ボールねじでは、差動機構による誤差の同相成分除去が効果的に実現されており、誤差の高周波数成分が除去されていたことが高精度化の大きな要因である。低周波成分については、ねじ溝の精度である $1 \mu\text{m}$ 程度の誤差が残留するが、それらの低

周波成分は再現性さえ得られれば本研究で試みたようなソフトウェア補正による高精度化が可能である。補正後の精度は誤差の再現性に支配されることになる。ボールねじではボールの転動が再現性を損なう要因となるため、標準偏差で約 $0.1\mu\text{m}$ 程度が再現性の限界である。さらなる再現性の向上のためには、ねじ溝を超仕上げするなどの表面粗さレベルの平滑化が必要となる。

(5) まとめ

以上により、差動ボールねじとステッピングモータを一体化することにより、 5nm の駆動分解能と累積送り誤差が $0.06\mu\text{m}$ (RMS 値) 以下のリニアステッピングアクチュエータを実現できた。この結果は、差動ボールねじという純メカ的な機構に対して、センサ等によるリアルタイムフィードバックを用いない開ループ制御により得られたものであり、簡便で安価なシステムによってナノメートルレベルの分解能とサブミクロン以下の精度が達成されることが特筆に値する。

本機構は、図 1 で示した空白領域を充足するものとして位置づけることができ、差動ボールねじという純メカ的な方法による新たな可能性を示すものとして重要な意義を持っている。さらに本研究は、ミリストローク超高分解能位置決め用アクチュエータのナノメートルレベルの分解能と精度に関する基礎的知見を示すものとしての意義を有している。

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 S. Fukada, T. Mimura, H. Sato, D. Kobayashi: Linear stepping actuator with ultra-fine resolution using coaxial differential ball screw, Proceedings of the 14th International Conference of the European Society for Precision Engineering and Nanotechnology, 査読有, (2014) Vol. 1, p. 347-350.
- ② 深田茂生: 送りねじ機構による位置決め精度の向上と高分解能化, 日本機械学会第 14 回機素潤滑設計部門講演会講演論文集, 査読無, (2014-4) p. 1-4. (招待講演)
- ③ 三村徹也, 深田茂生: 同軸二重差動ボールねじを用いたリニアステッピングアクチュエータ, 2012 年度精密工学会北陸信越支部学術講演会講演論文集, 査読無, (2012-11) p. 35-36.
- ④ 深田茂生, 佐藤勇仁, 三村徹也: 差動ボールねじを用いたミリストローク超精密位置決め (開ループ駆動における位置決め性能と補正による精度向上), 2012 年度精密

工学会春季大会学術講演会講演論文集, 査読無, (2012-3) p. 263-264.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

深田 茂生 (FUKADA Shigeo)

信州大学・工学部・教授

研究者番号: 70156743

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし