

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24年 5月28日現在

機関番号：12608

研究種目：若手研究（A）

研究期間：2010～2011

課題番号：22686016

研究課題名（和文） ハイブリッド駆動機構を用いた超精密2自由度回転テーブルシステム

研究課題名（英文） Hybrid actuator-driven ultraprecision 2-DOF rotary table system

研究代表者

吉岡 勇人（YOSHIOKA HAYATO）

東京工業大学・精密工学研究所・准教授

研究者番号：90361758

研究成果の概要（和文）：本研究では、超精密2自由度回転テーブルシステムの実現を目的として、その重要な要素技術について提案および評価を行っている。具体的には、高トルク、高応答、低発熱を満足するハイブリッド駆動機構、無限回転可能かつトルクリップルフリーのモータ、高剛性かつ高減衰性を実現する油静圧軸受の提案と評価を行い、これまで実現が困難であった超精密2自由度回転テーブルシステムに要求される基本特性を満たす各要素を実現した。

研究成果の概要（英文）：In order to realize an ultraprecision 2-DOF rotary table system, key technologies for the table system has been proposed and evaluated in this study. A hybrid driving mechanism which can achieve high torque, quick response, and low heat generation, a torque ripple-free electric motor for precise rotation, and a high stiff and high damping hydrostatic bearing system were newly developed, and their basic characteristics were clarified.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	9,500,000	2,850,000	12,350,000
2011年度	10,100,000	3,030,000	13,130,000
年度			
年度			
年度			
総計	19,600,000	5,880,000	25,480,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学，生産工学・加工学

キーワード：ハイブリッド駆動，空気圧アクチュエータ，電磁アクチュエータ，回転テーブル，超精密位置決め，空気静圧軸受

1. 研究開始当初の背景

近年、複雑三次元形状を高精度に創生する超精密加工システムの実現が要求されている。三次元形状は直動機構および回転機構の運動の組み合わせにより工具および工作物を駆動することで実現されるが、直動機構に対して回転機構の研究は少なく、機構の高度化が課題となっている。

超精密回転テーブル機構を実現するためには、回転角度に応じて変化する重力による負荷を安定的に支持することが要求されるとともに、滑らかかつ高速な駆動、高精度回転、高剛性・高減衰性支持が合わせて要求される。これらの要素技術については、現在のシステムは従来からの減速機や転がり軸受を採用したものが多く、その問題点を根本的

に解決しようとする研究は少ない状況である。

2. 研究の目的

- (1) 姿勢変化に伴う重力負荷の変化に対応可能な、高トルク、高応答、高精度駆動を同時に満足するハイブリッド駆動機構の実現。
- (2) 回転精度に対して誤差として作用する因子を排除し、滑らかな無限回転運動を実現するトルクリップルフリーの新たな駆動機構の実現。
- (3) 回転テーブルシステムの高精度かつ滑らかな回転運動を実現可能な、高剛性・高減衰性を有する回転軸受システムの実現。

3. 研究の方法

- (1) ハイブリッド駆動超精密傾斜テーブル
従来の傾斜テーブルの駆動機構は大別して、ダイレクトドライブモータによる直接駆動、あるいはウォームギアなどの減速機を用いた駆動を採用している。前者は高速性および制御性が高いが発熱が大きく、後者はモータの小形化および低発熱の長所があるがバックラッシュや速度制限などの短所を有していた。本研究で提案するハイブリッド駆動機構は、大出力・低発熱を特徴とする空気圧ベーンモータと、制御性・応答性に優れたボイスコイルモータを並列に配置し、同一の駆動軸にトルクを作用させることで両者の得失を補完し合う総合的に優れた性能を有する駆動となっている。

図1に実際に構築した傾斜テーブル外観、図2にその内部構造をそれぞれ示す。一般的に傾斜テーブルは両端を支持し中央にテーブル面を配置した構造であるが、本研究では構造的な剛性を確保するためテーブル面を上面に配置しイケールおよび駆動軸によって閉構造とすることで構造的な剛性を向上している。また軸受要素には空気静圧軸受を採用することで非接触駆動・非接触支持とし、摩擦などの非線形要素を排除している。また回転軸端面に高分解能角度エンコーダを設置しフルクローズドループ制御を行うことで高精度化を行っている。

図3に微小位置決め特性の評価結果の一例を示す。図に示すように、10万分の2度のステップ応答が明確に確認でき、開発した傾斜テーブルが高い位置決め分解能を有していることを確認した。また工作物による重力負荷が作用する状態でも同様の駆動特性が得られた。また長時間にわたる駆動においても、本駆動機構ではトルクの大部分は空気圧モータにより発生しているためその発熱は無視でき、構造各部の温度上昇がないことを確認した。さらにハイブリッド駆動部の制御モ

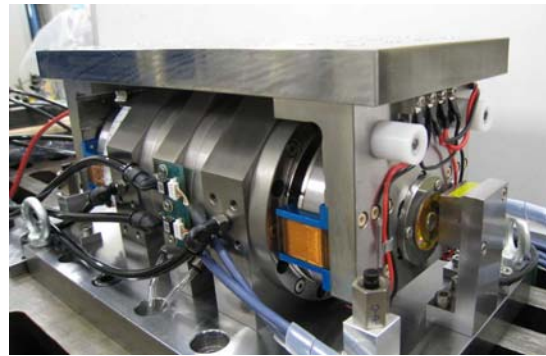


図1 ハイブリッド駆動傾斜テーブルの外観
Table (120mm x 270mm)

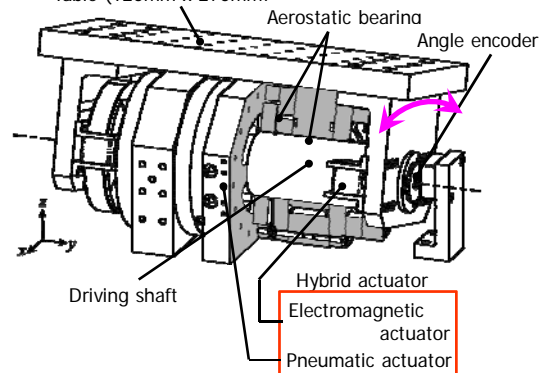


図2 ハイブリッド駆動傾斜テーブルの構造

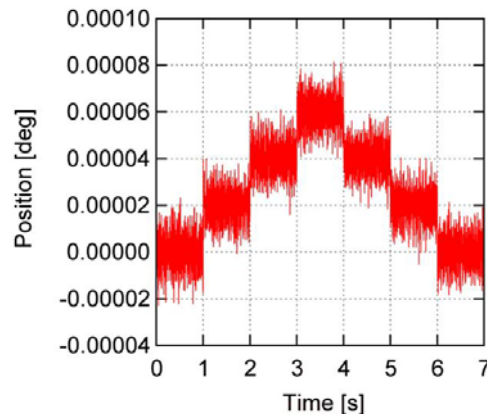


図3 微小位置決め特性

デルを用いて外乱オブザーバを構成することで、センサを用いることなく加工中に作用する加工トルクが推定可能であることを実際の加工実験により確認した。

- (2) トルクリップルフリートロイダルモータ

提案したハイブリッド駆動機構は、空気圧ベーンモータを採用するため、可動角度範囲に制限が生じる。したがって、2自由度回転テーブルの傾斜軸(A軸)には使用できる一方、無限回転が要求されるC軸には適用が困難である。本研究では、超精密回転に対して誤差要因となるトルクリップルを構造的に排除した無限回転可能な超精密回転用モ

タを新たに提案した。

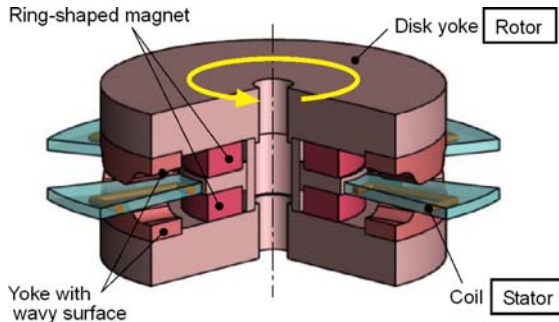


図4 リップルフリートロイダルモータ

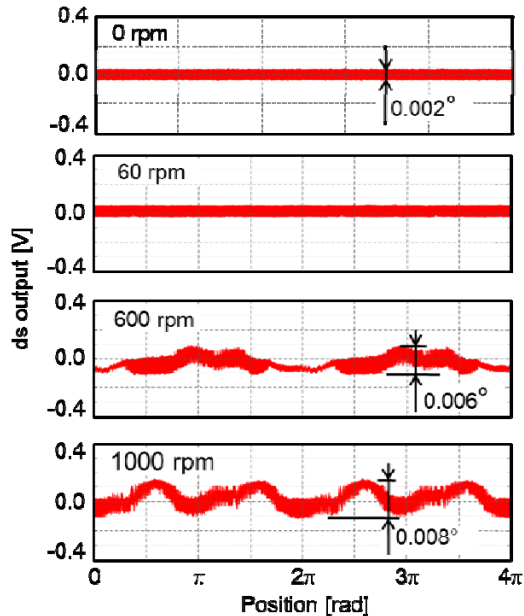


図5 回転中の目標値追従誤差

図4に提案するモータの構造概念図を示す。モータでは複数磁石間の磁束密度のばらつきに起因するトルクリップルを排除するため、軸方向に着磁されたリング形状永久磁石を中央に配置し上下に配置した磁性ヨークによって一方向の磁気回路を構成している。さらにコイルの上下のヨーク表面に周期的な凹凸を形成し、三相コイルの位置において周期的かつ理想的な磁束密度分布を形成することで、回転角度に依存するトルクリップルを排除している。さらにコイルはコアレス構造とすることで角度に依存したコギング力の発生も抑制している。

図5に実際の駆動実験による特性評価結果の一例を示す。回転中の目標値追従精度は、図に示すように回転速度の増加に対してほぼ変化せず、コギング力やトルクリップルの影響を受けていないと考えられ、高精度な駆動を実現可能であることを確認した。

(3) 高剛性・高減衰性を有する軸受システム
高精度な回転運動を実現するためには軸受性能が重要であり、超精密かつ滑らかな回

転を得るためには静圧軸受の採用が有効で

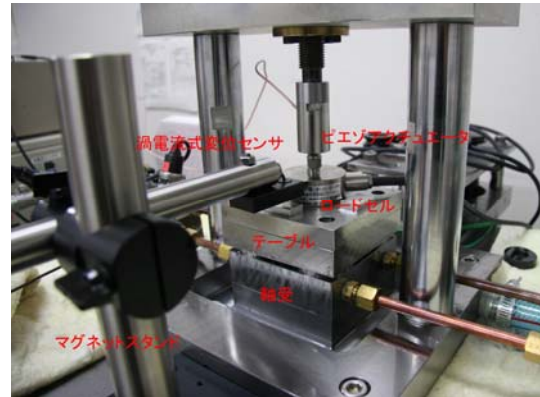


図6 軸受特性評価装置

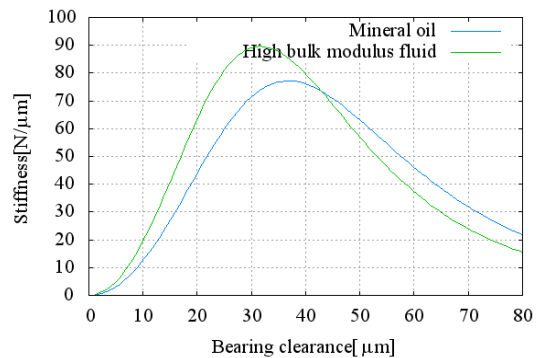


図7 軸受静剛性評価結果

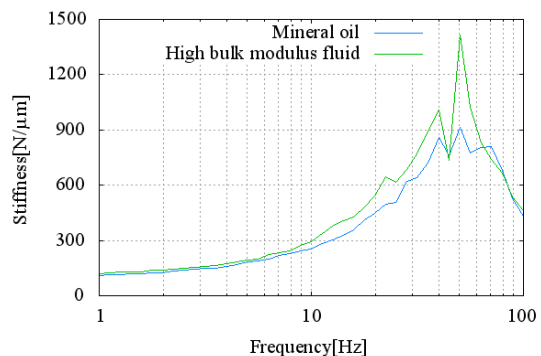


図8 軸受動剛性評価結果

ある。しかし一般に静圧軸受を用いた回転軸の場合、軸受剛性は支持部の軸直径によりほぼ決定されてしまうため、加工力に対して十分な剛性を得るためには構造的に大きくなるを得ず、コンパクトな構造とするためには新たな軸受システムが必要である。

本研究では一般に非圧縮性流体として扱われる油をわずかに圧縮性を有する流体として考え油静圧軸受作動油の体積弾性率に着目し、その圧縮性の向上を行うことで高剛性かつ高減衰性を有する軸受の実現を行った。具体的には、(a)作動油に溶存する気体を真空環境で脱気することによる体積弾性係数の向上、(b)近年開発された分子間すきまが小さい合成油である高剛性油の使用による体積弾性係数の向上を、図6に示す軸受

特性評価装置により負荷作用時の軸受すきまを評価することで、静特性および動特性の実験的に検討を行った。

図7は高剛性油を使用した場合の静剛性の測定結果の一例である。図に示すように作動油を通常の鉱物油から高剛性油へ変更することで、軸受構造を変化させることなく最大剛性が増加していることが確認できる。この場合、約17%の最大剛性の向上が確認できた。さらに図8に軸受に動的な負荷を与えた際の剛性すなわち動剛性の評価結果を示す。低周波領域に比べ粘性の影響により周波数が高くなるに従って高剛性が高くなるが、その効果は高剛性油を使用した場合により大きく生じていることが確認できる。

4. 研究成果

- (1) 案内要素、駆動要素、制御システム、構造配置などに対して、力学的熱的な誤差要因について抽出し、その影響を検討することで構造最適化を行った。その結果従来のトラニオン構造と比較して設置面積に対するテーブル有効面積の比率が大きなトップテーブル形傾斜テーブル構造を提案した。
- (2) 実際にハイブリッドアクチュエータを組み込んだ1自由度回転テーブルを試作した。具体的には空気静圧軸受、ハイブリッド駆動機構を対称に配置し、力学的熱的に安定な回転テーブルを実現した。特性評価の結果、10万分の2度以下の角度分解能で安定して負荷を支持可能なことを明らかにした。
- (3) 実際に負荷を作用させることでその特性を評価した。ハイブリッドアクチュエータの特性を考慮し適切にオブザーバを構成することで、空気圧アクチュエータのみでは非線形性が強く困難な加工力推定に関して、センサレスで高精度に加工力推定が可能であることを明らかにした。
- (4) 駆動角度範囲に制限があるハイブリッドアクチュエータに対して、360度の連続回転可能な高性能回転アクチュエータを実現するため、新たな構造のトルクリップルフリートロイダルモータを提案および構築した。開発したモータはヨーク形状を最適化することで理想的な磁束密度分布を実現する構造であり、磁石の個体差によるトルクリップルの影響を排除している。実際に空気静圧主軸に組み込み回転性能評価を行った結果、広い回転速度範囲にわたって回転中の角度誤差が僅少となる高精度モータを実現した。
- (5) 高剛性かつ高減衰な軸受を実現するため、従来非圧縮性とみなされてきた油静

圧軸受の作動流体に着目し、さらなる剛性実現のため(a)溶解気体を脱気した作動油、(b)新規に開発された高剛性油を用いた高剛性油静圧軸受を試作した。実際に構築した軸受について軸受の基本特性評価を行った結果、特に動剛性の向上が確認でき、提案する軸受が加工力外乱が作用する工作機械用軸受として有用であることを確認した。

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1件)

- (1) Hayato Yoshioka, Yugo Kurisaki, Hiroshi Sawano, Hidenori Shinno, A Newly Developed Ripple-Free Precision Toroidal Type Motor, CIRP Annals - Manufacturing Technology, 査読有, 2012, in press

〔学会発表〕(計4件)

- (1) Hayato Yoshioka, Yugo Kurisaki, Hiroshi Sawano, Hidenori Shinno, A newly developed toroidal type torque ripple-free precision motor, 査読有, 15th International Conference on Mechatronics Technology, 査読有, 2011年12月1日, Melbourne, Australia
- (2) Mamoru Hayashi, Hayato Yoshioka, Hidenori Shinno, Hiroshi Sawano, A hybrid actuator-driven compact tilting motion table system for multi-axis ultraprecision machine tool, 11th International Conference of the euspen, 査読有, 2011年5月25日, Lake Como, Italy

6. 研究組織

(1)研究代表者

吉岡 勇人 (YOSHIOKA HAYATO)

東京工業大学・精密工学研究所・准教授

研究者番号：90361758