

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 5 月 9 日現在

機関番号：27101
 研究種目：若手研究（B）
 研究期間：2010～2012
 課題番号：22760100
 研究課題名（和文） 超高速マイクロスピンドルの 5 自由度回転誤差の同時計測法の開発
 研究課題名（英文） Simple and simultaneous measurement of five-degrees-of-freedom error motions of high-speed microspindle
 研究代表者
 村上 洋（MURAKAMI HIROSHI）
 北九州市立大学・国際環境工学部・准教授
 研究者番号：00416512

研究成果の概要（和文）：近年の工作機械の小型化に伴い、これらに用いる主軸も小型小径化している。しかし、基準球や軸と複数の変位計を用いる従来方法では機械的干渉等の問題により小径主軸の回転精度の評価は困難である。そこで、ロッドレンズとボールレンズを用いることにより、高速小径主軸の 5 自由度運動誤差を簡便に同時計測可能なシステムを開発した。その結果、測定分解能 5nm で超高速マイクロスピンドルの 5 自由度回転精度を評価可能であることを確認した。

研究成果の概要（英文）：We present an optical technique to measure five-degree-of-freedom error motions of a high-speed microspindle. The measurement system consists of a rod lens, a ball lens, four divided laser beams, and multiple divided photodiodes. When the spindle rotates with its concomitant rotation errors, the rod and ball lenses, which are mounted to the chuck of the spindle, are displaced, and this displacement is measured using an optical technique. The results show that the measurement system has a resolution of 5 nm and can be used to evaluate high-speed microspindle rotation errors.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2011 年度	800,000	240,000	1,040,000
2012 年度	800,000	240,000	1,040,000
総計	2,900,000	870,000	3,770,000

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：高速マイクロスピンドル，回転誤差，レーザ，測定，ロッド・ボールレンズ

1. 研究開始当初の背景

近年の金型等の微細・小型化に伴い、省資源、省エネルギー、省スペースを目的とした工作機械の小型化が進み、これらに用いるスピンドルも小型小径化・高速化している。金型などの工作物の形状精度や表面粗さはスピンドル回転時の回転精度に大きく影響される。それゆえに、超高速マイクロスピンドル回転精度の評価方法のニーズが増加している。

このマイクロスピンドルの 5 自由度の回転精度（2つのラジアル方向・1つのアキシャル方向・2つのアンギュラ方向）は基準球や軸と複数の変位計を用いる従来方法では変位計の測定範囲の制限や設置の際の機械的干渉、周波数応答特性などにより測定できない。これは、従来方法で使用する基準球や軸などは変位計（ほとんどが静電容量型の変位計で測定可能な球径、軸径に制限がある）で測定できるように大きく製作されるため、軽

くて小径の軸しか把持できないマイクロスピンドルではこれら比較的大きい基準球や軸をスピンドルのチャックに固定できず従来方法では測定できないためである。また、基準球や軸が小径化すると複数の変位計を設置する際に互いが機械的に干渉し設置できない問題が生じる。

これらの問題を克服するために国内外でいくつかの方法が提案されてはいるが、ラジアルモーション誤差あるいはアキシャルモーション誤差のみの測定であり、2つのラジアルモーション・1つのアキシャルモーション・2つのアンギュラモーションの5自由度の運動誤差を同時に計測することはできない。

2. 研究の目的

本研究は超高速マイクロスピンドル（回転速度30万rpm以上、チャックに把持可能な工具径数mm以下）のラジアルモーション・アキシャルモーション・アンギュラモーション全ての5自由度の回転誤差（スピンドルの半径方向・軸方向・傾きの回転誤差）を同時に測定することを目的としたものである。回転軸の回転振れや軸の傾き、伸びなどが計測可能になることで、超高速マイクロスピンドルの性能向上や加工精度向上および加工誤差の補正などが可能となる。

3. 研究の方法

図1に測定システムの概略図を示す。測定システムは、ロッドレンズ(直径3mm)、ボールレンズ(直径3mm)、レーザ(L1, L2, L3, L4)、対物レンズ(CL1, CL2, CL3, CL4)、分割型フォトダイオード(PD1, PD2, PD3, PD4)から構成されている。スピンドルの軸端にはボールレンズを接着したロッドレンズが取り付けられている。XY両方向からボール・ロッドレンズ側面に向かって集光させたレーザを照射する。ボール・ロッドレンズを透過した光は、各レンズを間にして反対側に設置された分割型フォトダイオードで受光する。ここで、各分割型フォトダイオードで検出する光強度値は電圧値に変換され、それぞれ $I_{RX1}, I_{RX2}, I_{RY1}, I_{RY2}, I_{BX1}, I_{BX2}, I_{BX3}, I_{BX4}, I_{BY1}, I_{BY2}, I_{BY3}, I_{BY4}$ (V)とする。

図2に5自由度運動誤差の定義を示す。また、図3に図1のxy平面におけるロッドレンズレーザ照射位置の断面図を示す。スピンドルの回転に振れない場合は、各分割フォトダイオードの光強度値は等しくなる。しかし、軸に振れがありラジアル方向、アキシャル方向、アンギュラ方向にロッドレンズおよびボールレンズが変位すると、各透過光の屈折方向が変化し、分割フォトダイオード上の光スポットも変位する。図3(a)の初期状態で

は、 $I_{RX1} = I_{RX2}$ および $I_{RY1} = I_{RY2}$ であるが、図3(b)に示すようにラジアル(+X)方向にロッドレンズが変位すると、 $I_{RX1} = I_{RX2}$ および $I_{RY1} > I_{RY2}$ となる。ここで、 I_{RY1} および I_{RY2} を用いたX方向変位の出力 I_{RX} 、 I_{RX1} および I_{RX2} を用いたY方向変位の出力 I_{RY} を式(1)、(2)で定義する。

$$I_{RX} = I_{RY1} - I_{RY2} \quad (1)$$

$$I_{RY} = I_{RX1} - I_{RX2} \quad (2)$$

I_{RX} 、 I_{RY} の変化量および符号によりスピンドル運動誤差量および方向を検出できる。各分割フォトダイオード上の光スポットが変位すると分割フォトダイオードの各素子の光強度値に差が生じ、各レンズ変位の方向を検出できる。

同様に、ボールレンズのX, Y, Z方向変位の出力 I_{BX} 、 I_{BY} 、 I_{BZ} を式(3)、(4)、(5)で定義する。

$$I_{BX} = I_{BY1} - I_{BY2} - I_{BY3} + I_{BY4} \quad (3)$$

$$I_{BY} = I_{BX1} - I_{BX2} - I_{BX3} + I_{BX4} \quad (4)$$

$$I_{BZ} = I_{BX1} + I_{BX2} - I_{BX3} - I_{BX4} \quad (5)$$

ボールレンズのXY方向変位出力 I_{BX} 、 I_{BY} を検出することでXY方向のラジアル方向運動誤差が検出でき、Z方向変位出力 I_{BZ} を検出することでアキシャル方向運動誤差が検出できる。また、ロッド・ボールレンズのXY方向変位の差および各レンズ照射位置の距離Lからアンギュラ方向運動誤差の検出が可能となる。

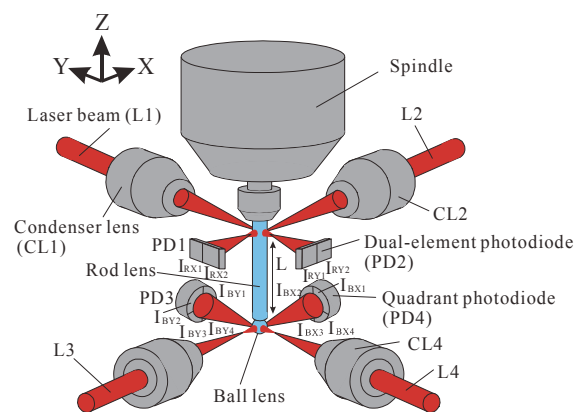


図1 測定システム概略図

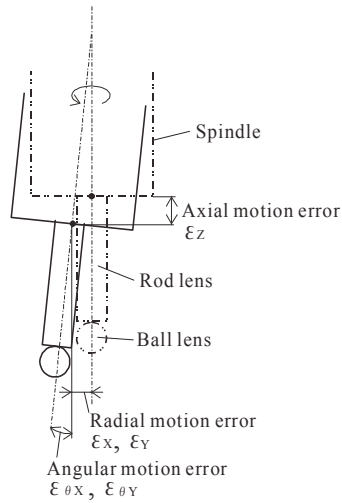
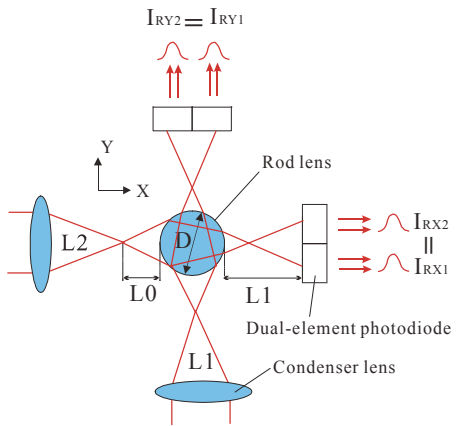
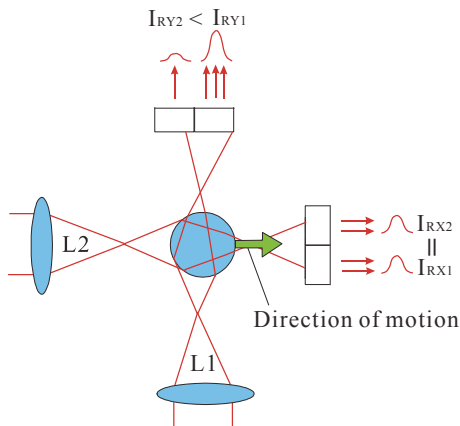


図2 5自由度運動誤差



(a) 初期状態



(b) X方向変位

図3 測定原理

4. 研究成果

図4にロッドレンズをX方向に変位させた際の出力 I_{RX} および出力 I_{RY} の変化を示す。また、図5にロッドレンズをX方向に5nmピッチで変位させた際の出力 I_{RX} の変化を示す。分解能が約5nmであることが確認できる。

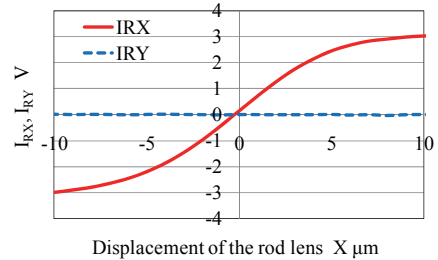


図4 ロッドレンズをX方向に変位させた際の出力 I_{RX} および出力 I_{RY} の変化

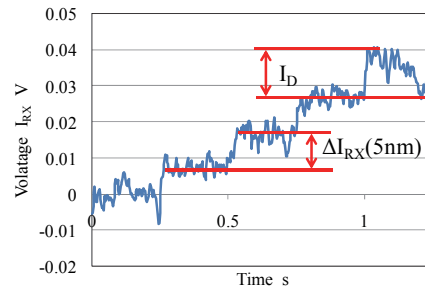


図5 分解能

次に、測定システムの有用性を確認するために測定実験を行った。主軸は150krpmで回転させ、フォトダイオードの出力電圧はサンプリング周波数10MHzのAD変換器を用いて同時取得した。図6に測定中の写真を示す。また、静電容量型変位計を用いて比較測定を行った。図7に測定中の写真を示す。図8(a)に測定システムによるX方向ラジアル方向運動誤差の測定結果(赤の実線)を示す。また、図8(b)に静電容量型変位計での測定結果(赤の実線)を示す。両測定結果は同時にデータを取得してはいないので細かいところは異なるが、振幅の大きさはほぼ一致している。ロッドレンズをスピンドルチャックに固定する際、また、ボールレンズをロッドレンズに接着する際にボールレンズ中心は主軸中心から偏心しており、両測定結果には1回転に1つの正弦波が含まれている。この正弦波は回転誤差ではないため、最小二乗法を用いることで補正する。図8(a),(b)に青の実線で正弦波の近似曲線を示す。図8(c),(d)に補正後の測定結果を示す。また、図9にアキシャル方向運動誤差、図10にアンギュラ方向運動誤差を示す

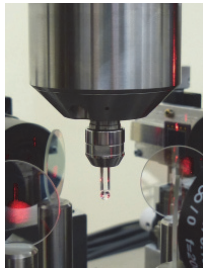


図6 測定システムによる測定

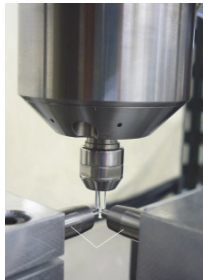
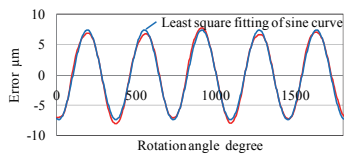
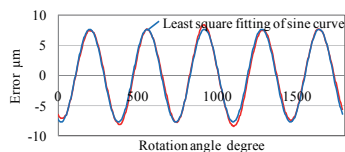


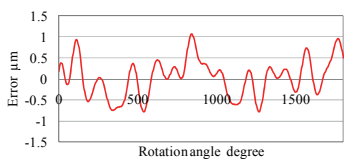
図7 静電容量型変位計による測定



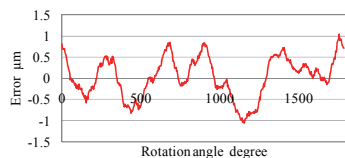
(a) 測定システムの測定結果



(b) 静電容量型変位計の測定結果



(c) 測定システムの測定結果 (補正後)



(d) 静電容量型変位計の測定結果 (補正後)

図8 X方向ラジアル方向運動誤差測定結果

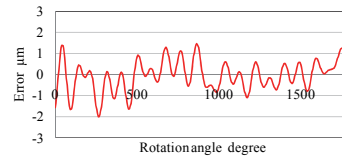


図9 アキシャル方向運動誤差測定結果

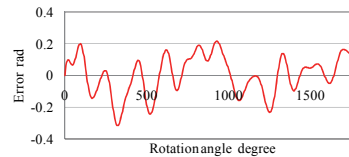


図10 アンギュラ方向運動誤差測定結果

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 Hiroshi MURAKAMI, Norio KAWAGOISHI, Eiji KONDO, Akira KODAMA, Optical Technique to Measure Five-Degree-of-Freedom Error Motions for a High-Speed Microspindle, International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 査読有 Vol.11, No.6, 2010, 845-850.

[学会発表] (計4件)

① 村上 洋, 甲木 昭雄, 鬼鞍 宏猷, 佐島 隆生, 近藤英二, 高速小径主軸5自由度運動誤差の簡易同時測定—誤差解析および評価実験—, 2011年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, 2012.9.20, 金沢大学.

② Hiroshi MURAKAMI, Akio KATSUKI, Takao SAJIMA, Noriya NAKAYAMA, Simple and Simultaneous Measurement of Five-Degrees-of-Freedom Error Motions for a Micro High-Speed Spindle, Proceedings of the 12th euspen International Conference, Vol.2, 2012.6, 46-49 (Sweden).

③ Hiroshi MURAKAMI, Akio KATSUKI, Hiromichi ONIKURA, Takao SAJIMA, Development of an Optical Measurement System for Five-Degrees-of-Freedom Error Motions of a Micro High-Speed Spindle, Proceedings of the 26th Annual Meeting of the American Society for Precision Engineering, Vol.52, 2011.11, 524-527

(United States of America).

④Hiroshi MURAKAMI, Norio KAWAGOISHI, Eiji KONDO, Akira KODAMA, Optical Measurement of Five-Degree-of-Freedom Error Motions for a Micro High-Speed Spindle, Proceedings of the 4th CIRP International Conference on High Performance Cutting, Vol.2, 2010.10, 205-210 (JAPAN).

[産業財産権]

○出願状況 (計1件)

名称：回転精度測定方法及び測定装置
発明者：村上 洋, 皮籠石 紀雄, 近藤 英二
権利者：鹿児島大学
種類：特許
番号：特願 2009-158912
出願年月日：平成 21 年 7 月
国内外の別：国内

[その他]

ホームページ：

<http://www.env.kitakyu-u.ac.jp/~murakami6/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

村上 洋 (MURAKAMI HIROSHI)

北九州市立大学・国際環境工学部・准教授
研究者番号：00416512