

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 4 月 26 日現在

機関番号：11301
研究種目：基盤研究（B）
研究期間：2009～2011
課題番号：21360057
研究課題名（和文）回折光干渉型シングル計測ポイント XYZ 3 軸サーフェスエンコーダに関する研究
研究課題名（英文）XYZ three-axis surface encoder with a single measurement point based on interference of diffraction beams
研究代表者
高 偉 (GAO WEI)
東北大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号：70270816

研究成果の概要（和文）：

次世代 XYZ 3 軸超精密平面ステージなどの計測制御のために、シングルレーザ入射ビームとサーフェス微細格子を用いた回折光干渉型 XYZ 3 軸サーフェスエンコーダという全く新しい XYZ 3 軸変位の計測原理を提案した。また、ステージに搭載可能な小型センサヘッドを試作し、シングル計測ポイントからの情報でステージの XYZ 3 軸変位を 100mm(X) x 100mm(Y) x 1mm(Z) の範囲に渡って 0.1nm の分解能で一括計測できることを実証した。

研究成果の概要（英文）：

A new type of XYZ three-axis surface encoder has been developed for measurement and control of next-generation XYZ three-axis stages. In the surface encoder, a single laser beam is projected onto a micro-structured surface grating. A compact sensor head, which can be mounted on the stage, has been designed and constructed. It has been verified that the surface encoder has the ability to measure the three-axis XYZ displacements with a resolution of 0.1 nm over a measurement area of 100mm(X) x 100mm(Y) x 1mm(Z) by using the information from the single measurement point.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	7,000,000	2,100,000	9,100,000
2010 年度	4,500,000	1,350,000	5,850,000
2011 年度	3,400,000	1,020,000	4,420,000
年度			
年度			
総計	14,900,000	4,470,000	19,370,000

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：多軸計測, 微細格子, 平面ステージ, 回折光

1. 研究開始当初の背景

次世代大面積微細加工と評価装置用に開発中の XYZ 3 軸超精密平面ステージでは、各軸に対してサブ nm オーダの分解能を持ち、また XY 軸に対して数十 mm、Z 軸に対して数十 μm の以上移動範囲を持つことが要求されている。そのための 3 軸変位計測技術の開発が急務となっている。

現在、ステージなどの移動体の 3 軸変位検出にはレーザ干渉側長機の組み合わせで行われている。しかし、複数のセンサの使用によるシステムの煩雑化、大型化、それに伴うコスト高、移動速度及び精度の低下、といった欠点が存在する。また、XYZ 軸それぞれの計測ポイントが異なるので、ステージの制御点座標を正確に割り出すことができず、また、

ステージの姿勢変化によって大きな測定誤差（アッペ誤差）が生じるなどの問題がある。

申請者らはこれまでに XY 方向に刻んだ正弦波格子（角度格子）と角度センサを組み合わせ、格子面内 XY2 軸変位を検出する角度検出型 XY2 軸変位センサを提案し、XY2 軸精密ステージの計測制御に応用した。しかしこのセンサでは、原理的に格子面に垂直な面外 Z 軸変位が測定できないこと、また 100 μm 程度の長いピッチを持つ格子の角度形状を幾何光学的に読み取るため、変位分解能が数 nm 程度に制約されてしまうこと、などの課題が残っていた。

2. 研究の目的

次世代 XYZ 3 軸超精密平面ステージなどの計測制御のために、シングルレーザ入射ビームとサーフェス微細格子を用いた回折光干渉型 XYZ 3 軸サーフェスエンコーダという全く新しい XYZ 3 軸変位の計測原理を提案する。また、ステージに搭載可能な小型センサヘッドを試作し、シングル計測ポイント（レーザビーム入射点）からの情報でステージの XYZ 3 軸変位をサブ nm の分解能で一括計測できることを実証する。

3. 研究の方法

(1) 3 軸サーフェスエンコーダの設計と製作

提案した基本原理（図 1）に基づき、3 軸サーフェスエンコーダの設計を行う。図 2 に示すように、センサは半導体レーザ(LD)、偏光ビームスプリッタ(PBS)、1/4 波長板(QWP)、受光素子ユニット(PD unit)と、スケール用格子と同じ形状を持つ参照用格子などの光学部品から成る。QWP によって回折光の位相と偏光方向を制御し、それぞれの受光素子ユニットにおける干渉信号の間に位相差を生成させ、変位検出と共に方向弁別を行う。センサヘッドが小型になるように光学部品と機械部品の大きさを決める。なお、PBS、QWP 等の光学素子の配置の調整誤差により干渉信号には振幅、オフセットの誤差が生じるため、これらの誤差を電氣的に調整する。このようにして得られた出力信号から、XYZ 3 軸の変位を求める。信号処理に必要な電気回路及びソフトウェアを製作する。

また、工具の微小摩耗をインプロセスで検出できるように、高速工具サーボ機構に高剛性高感度圧電型力センサを組み込む。それを研究室現有の超精密旋盤上搭載し、マイクロ工具を用いて、大面積短ピッチサーフェス格子を加工する。さらに、光干渉型リソグラフィによる大面積短ピッチ格子の製作も試みる。

(2) 3 軸サーフェスエンコーダの性能評価

XYZ3 軸においてサブ nm の分解能が達成で

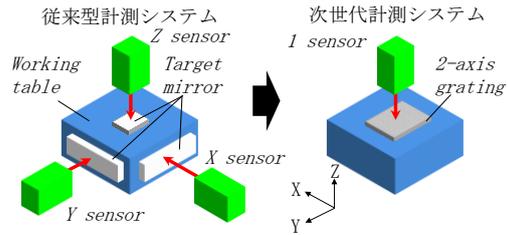


図 1 3 軸変位計測システム

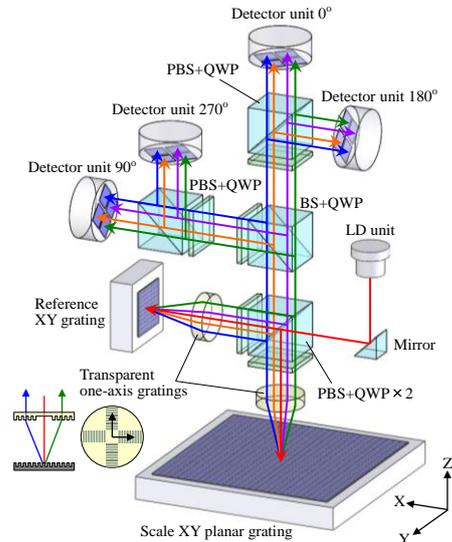


図 2 サーフェスエンコーダの設計と製作

きるかについて評価を行うために、スケール用格子を分解能サブ nm の XYZ 3 軸ピエゾステージ上に載せ、固定したセンサヘッドに対して相対変位を与える。また、サーフェス格子形状誤差などによる影響で、信号ピッチ内変位測定誤差（内挿誤差）が生じる。その内挿誤差を評価するために、ピエゾステージの変位を 3 軸レーザ干渉計で測定することで評価する。なお、信号ピッチ外変位測定誤差（外挿誤差）については、スケール用格子をエアベアリングステージに載せて、同様に 3 軸レーザ干渉計によって評価する。そのほか、センサの計測速度、センサ設置誤差の許容範囲、軸間直角度誤差などの性能も評価する。

(3) 3 軸サーフェスエンコーダの精度向上

サーフェス格子形状誤差が 3 軸サーフェスエンコーダの精度を決める最も大きな要因である。その誤差をソフトウェア補償のアプローチから精度向上を試みる。そのために、上記校正結果に基づく 3 軸空間におけるエラーマップを作成し、誤差補償ソフトウェアを開発する。さらに、格子形状の最適化と加工の高精度化のアプローチからも精度向上を試みる。

4. 研究成果

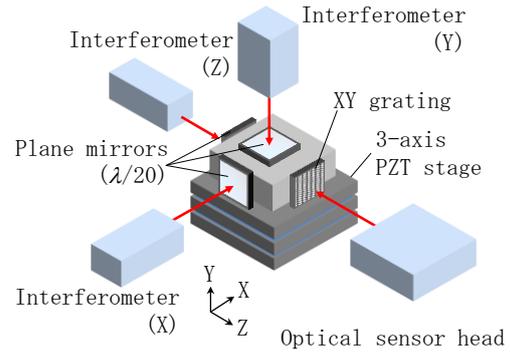
(1) 回折光干渉型 XYZ 3 軸サフェースエンコーダを製作した。センサヘッドからのシングルレーザをサーフェス微細格子の表面に入射させ、格子の表面から回折される 4 つ(XY \pm 1)の回折光の干渉信号を演算し、3 軸移動変位を同時計測することが可能である。

(2) 3 軸サフェースエンコーダの分解能を確認するために図 3(a)に示したように実験装置を構成し、実験を行った。各軸の出力結果を比較するために各軸に参照用干渉計が取り付けられている。3 軸 PZT ステージの XYZ 方向の振動の計測結果(図 3(b))から試作のサフェースエンコーダはXYZ各軸ともサブ nm の分解能を有していることを確認できた。

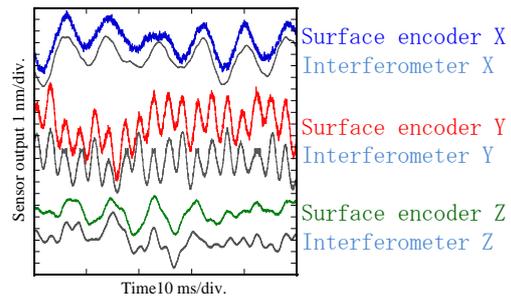
(3) 3 軸サフェースエンコーダの精度を決める最も大きな要因であるサーフェス微細格子の平面度誤差及びピッチ偏差を高速に評価する手法を提案した。フィゾー干渉計を用いて 0 次回折光と 1 次回折光の波面偏差をそれぞれ計測し、その結果に基づいて格子の平面度誤差とピッチ偏差を分離して計測できることを示した。さらにサフェースエンコーダ各軸の計測誤差をソフトウェア的に補正することによって、計測精度を 10 nm 程度まで高めることができた。

(4) 3 軸平面ステージをターゲットに計測実験システムを構築した。実験用ステージの大きさに合わせて、サイズが 100mm x 100mm x 30mm の小型 3 軸サフェースエンコーダを製作した。光源には青色レーザダイオードを使用し、光学部品は 405nm 波長対応のもので構成した。また、スケール格子は格子ピッチ 0.57 μ m のものを新たに製作した。実験結果により、開発の XYZ 3 軸サフェースエンコーダはステージの 3 軸位置をサブ nm の分解能で計測可能なことを確認した。

(5) 長ストロークステージをターゲットに、複数のスケール格子からなるモザイク格子に対応できるマルチプローブ型 3 軸サフェースエンコーダを開発した。 \pm 1 次回折光の回折効率が最も高くなる XY 格子形状を設計、試作した。その結果、15.4%の高い回折効率を持つ XY 格子を実現した。また、実際にリニアステージの位置計測実験を行い、格子間ギャップの影響を受けずにステージの XYZ 3 軸変位をサブ nm の分解能で計測できることを確認した。さらに、格子間の姿勢誤差によりステージ位置計測感度が格子間で異なることを明らかにし、感度補正行列による補正手法を提案し、実験によりその有効性を実証した。



(a) 実験装置の構成



(b) 実験結果

図 3 3 軸サフェースエンコーダの分解能

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)

[雑誌論文] (計 8 件)

1. Akihida Kimura, Wei Gao, WooJae Kim, Koji Hosono, Yuki Shimizu, Lei Shi, Lijiang Zeng, A sub-nanometric three-axis surface encoder with short-period planar gratings for stage motion measurement, Precision Engineering, 査読有, 2012, In press.
2. WooJae Kim, Yuki Shimizu, Akihida Kimura and Wei Gao, Fast Evaluation of Period Deviation and Flatness of a Linear Scale by Using a Fizeau Interferometer, International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 査読有, 2012, In press.
3. WooJae KIM, Akihida Kimura, Koji Hosono, Yuki Shimizu and Wei Gao, Multi-axis grating encoders for stage motion measurement, International Journal of Nanomanufacturing, 査読有, Vol. 7, 2011, pp. 409-426.
4. Akihida Kimura, Koji Hosono, WooJae Kim, Yuki Shimizu and Wei Gao, A two-degree-of-freedom linear encoder with a mosaic scale grating,

- International Journal of Nanomanufacturing, 査読有, Vol.7, 2011, pp.73-91.
5. Koji Hosono, WooJae Kim, Akihhide Kimura, Yuki Shimizu and Wei Gao, Surface Encoders for a Mosaic Scale Grating, International Journal of Automation Technology, 査読有, Vol.5, 2011, pp.91-96.
 6. Akihhide Kimura, Wei Gao, Yoshikazu Arai, Zeng Lijiang, Design and construction of a two-degree-of-freedom linear encoder for nanometric measurement of stage position and straightness, Precision Engineering, 査読有, Vol. 34, 2010, pp.145-155.
 7. Akihhide Kimura, Wei Gao, Zeng Lijiang, Position and out-of-straightness measurement of a precision linear air-bearing stage by using a two-degree-of-freedom linear encoder, Measurement Science and Technology, 査読有, Vol. 21, No. 5, 2010.
 8. Wei Gao, Akihhide Kimura, A fast evaluation method for pitch deviation and out-of-flatness of a planar scale grating, CIRP Annals - Manufacturing Technology, 査読有, Vol. 59, 2010, pp.505-508.
- [学会発表] (計 14 件)
1. 細野 幸治, 金 于載, 清水 裕樹, 伊東 聡, 高 偉, モザイク格子サーフェスエンコーダに関する研究_ マルチプローブセンサヘッドの開発, 精密工学会 2012 春季大会, 2012 年 3 月 14 日, 首都大学東京 (東京).
 2. WooJae Kim, Yuki Shimizu, So Ito, Wei Gao, Fast calibration of XY gratings, 第 47 回日本機械学会東北支部講演会, 2012 年 3 月 13 日, 東北大学(仙台).
 3. WooJae Kim, Akihhide Kimura, Yuki Shimizu, Wei Gao, Evaluation of the linear scale for a linear encoder, 2011 年度 精密工学会東北支部 学術講演会, 2011 年 10 月 21 日, ウェスティンホテル仙台(仙台).
 4. Kang-Won Lee, Wei Gao, Yuki Shimizu, So Ito, Industry Oriented Precision Nanometrology, APMP.TCL Workshop - Collaboration and Support for Industry in Dimensional Metrology, December 3rd, 2011, Osaka.
 5. Yuki Shimizu, Wei Gao, So Ito, Woojae Kim, Akihhide Kimura, Kouji Hosono, Surface Encoders for Precision Measurement of Multi-axis Motions, the 4th International Conference of Asia Society for Precision Engineering and Nanotechnology (ASPEN2011), November 11, 2011, Hong Kong.
 6. Woojae Kim, Akihhide Kimura, Yuki Shimizu, Wei Gao, Fast Evaluation of Period Deviation and Flatness of a Linear Scale by Using a Fizeau Interferometer, The 10th International Symposium on Measurement Technology and Intelligent Instruments (ISMTII2011), June 30, 2011, KAIST (Korae).
 7. Wei Gao, Seung-Woo Kim, Albert Weckenmann, Robert J. Hocken, Sensors and Measuring Instruments for Precision Positioning, The 10th International Symposium on Measurement Technology and Intelligent Instruments (ISMTII2011), June 30, 2011, KAIST (Korae).
 8. Wei Gao, Micro and Nano Measurement Instruments, 10th International Conference of the European Society for Precision Engineering & Nanotechnology (Euspen2010), June 2nd, 2010, Delft, (Netherlands).
 9. Koji Hosono, Akihhide Kimura, Woojae Kim, Wei Gao, Lijiang Zeng, A MULTI-PROBE SURFACE ENCODER FOR MOSAIC XY GRATING, The 10th International Symposium on Measurement and Quality Control (ISMQC), September 7th, 2010 Osaka Japan.
 10. 木村 彰秀, 高 偉, 曾 理江, 回折光干渉型 3 軸サーフェスエンコーダに関する研究 - XYZ 格子形状誤差マップによる計測誤差非線形成分の補正 -, 2010 年度精密工学会春季大会学術講演会, 2010 年 3 月 18 日, 埼玉大学(さいたま市).
 11. 細野 幸治, 木村 彰秀, 高 偉, モザイク XY 格子用光干渉型サーフェスエンコーダに関する研究 -マルチプローブ型光学系の提案と原理確認実験-, 日本機械学会東北支部 第 45 期総会・講演会, 2010 年 3 月 12 日, 東北大学(仙台).
 12. 木村 彰秀, 荒井 義和, 高 偉, 曾 理江, 回折光干渉型 3 軸サーフェスエンコーダに関する研究, 精密工学会 2009 年度秋季大会学術講演会, 2009 年 9 月 10 日, 神戸大学(神戸)
 13. Akihhide Kimura, Yoshikazu Arai, Wei Gao, Evaluation of multi degree of freedom displacement sensors, The 9th International Symposium on Measurement Technology and Intelligent Instruments (ISMTII2009), 01/07, 2009, Saint Petersburg (Russia).
 14. Wei Gao, Yoshikazu Arai, Yusuke Saito, Akihhide Kimura and Takemi Asai, Fast

Measuring Technologies for
Ultra-Precision Manufacturing, The
9th International Symposium on
Measurement Technology and Intelligent
Instruments (ISMTII2009), 01/07, 2009,
Saint Petersburg (Russia).

[その他]
ホームページ等

<http://www.nano.mech.tohoku.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

高 偉 (GAO WEI)
東北大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号 : 70270816

(2) 研究分担者

清水 祐樹 (SHIMIZU YUKI)
東北大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号 : 7060638

(3) 連携研究者

()

研究者番号