

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 5 月 20 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24360050

研究課題名(和文)次世代超精密移動ステージ角度誤差計測用高精度3軸レーザオートコリメータの研究

研究課題名(英文)Development of a three-axis laser autocollimator for measurement of angular error motions of a next-generation ultra-precision positioning stage

研究代表者

高 偉 (Gao, Wei)

東北大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：70270816

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,400,000円

研究成果の概要(和文)：サブnmの位置決め精度を有する次世代超精密ステージ実現のために、超精密移動ステージの動的3軸角度誤差が一括検出できる3軸レーザオートコリメータという多軸角度計測の新原理を提案した。各光学部品を50mm×30mm×30mmのコンパクトなサイズに収めた、リニアエンコーダとスケールを共有するマイクロ光学センサヘッドを設計・試作して、ロール、ヨー測定分解能0.01arcsecond、ピッチ分解能0.2arcsecondを実現した。更に、シングル素子フォトダイオードのエッジ効果を利用した超高感度光位置検出法を提案し、目標分解能である0.001arcsecondを超える測定分解能が得られることを実証した。

研究成果の概要(英文)：To realize next-generation ultra-precision positioning systems having a sub-nanometric positioning accuracy, a new principle for angle measurement, which is referred to as a three-axis laser autocollimator in this research, has been proposed. A compact micro optical sensor head in a size of 50mm×30mm×30mm has been designed and developed based on the proposed method, and its feasibility has been investigated in experiments. It was verified in experiments that the developed sensor had resolutions of 0.01 arcsecond, 0.01 arcsecond and 0.2 arcsecond for measurement of roll, yaw and pitch motions, respectively. Furthermore, a new method, which is referred to as the edge effect in this research, for detecting position of a focused laser beam has also been proposed. Experimental results revealed that the proposed method could achieve measurement resolution of beyond 0.001arcsecond.

研究分野：超精密計測

キーワード：超精密計測 3軸レーザオートコリメータ 多軸角度計測 回折格子 超精密位置決め

### 1. 研究開始当初の背景

半導体分野や超精密機械加工分野においては、サブ nm の位置決め精度を有する次世代超精密ステージの実現に高い関心が寄せられている。その実現には、ステージの移動に伴う最大で 3 軸の微小角度誤差を全軸 0.001 角度秒の高分解能で超精密、高速に計測し、角度誤差による位置決め誤差（アッペ誤差）をリアルタイムに補正することが必要不可欠である。

微小角度計測には、従来からオートコリメータが利用されている。しかしながら、ピッチング、ヨーイングの 2 軸角度しか計測できず、ローリング角（光軸回りの回転角）が原理的に検出できないため、3 軸角度の同時計測はオートコリメータを 2 台組み合わせる必要がある。また、原理的に角度検出感度が焦点距離に比例するため、0.001 角度秒分解能の達成には数 m の焦点距離を持つ超大型レンズが必要となり、その実現が極めて困難である。

これに対し申請者らは、これまでに、4 分割フォトダイオード（QPD）を光位置検出に用いる場合、レンズの小型・短焦点化に伴う焦点面上レーザー光スポットの小径化が光位置検出の高感度化につながることを発見した。これをもとに焦点距離に依存しない角度検出の高感度法を確立し、従来と同程度の分解能（0.01 秒）を持つ世界最小サイズの 2 軸レーザーオートコリメータを実用化した。一方で、従来と同様にローリング角が検出できないこと、また、目標分解能の実現には、QPD の素子間不感帯（5  $\mu\text{m}$  幅）による小径光スポット（10  $\mu\text{m}$  径）の光量損失がボトルネックである、などの課題が残っていた。

### 2. 研究の目的

サブ nm の位置決め精度を有する次世代超精密ステージ実現のために、従来は測定できなかったローリング角を含む超精密移動ステージの動的 3 軸角度誤差が一括検出できる、3 軸レーザーオートコリメータという多軸角度計測の新原理を提案する。また、光量検出用シングル素子フォトダイオード（SPD）のエッジ効果を利用した超高感度光位置検出法を合わせて提案することにより、3 軸角度誤差を全軸 0.001 角度秒（ナノラジアン）まで高精度に一括計測できることを実証する。

### 3. 研究の方法

#### (1) 3 軸レーザーオートコリメータの提案

本研究では、従来の 2 軸オートコリメータ光学系で用いられる平面反射ミラーに代えて 1 軸回折格子を導入し、0 次・1 次反射回折光を用いることで、測定レーザービーム光軸まわりの角度変位の検出も可能とした、3 軸レーザーオートコリメータを開発する（図 1）。提案の光学系では、平面鏡の反射とコリメータレンズの屈折という幾何光学に基づく従来のオートコリメータに、微細格子からのレ

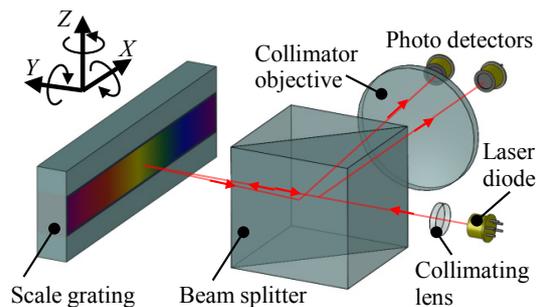


図 1 3 軸角度変位検出原理

ーザ光回折という波動光学の学理を融合させることによって、これまでにない多軸角度一括計測の新原理を創出している。0 次回折光および 1 次回折光をそれぞれ QPD で検出することで、スケール用格子の 3 軸角度変位を一括かつ同時に得ることができる。本提案の原理では、コリメータレンズの焦点距離に依存せず、レーザー光源の短波長化と微細格子の短ピッチ化による角度検出の高感度化が実現できるため、角度検出高感度化に伴うセンサの大型化という従来の欠点を原理的に克服でき、センサの高感度化と小型化が両立する。

#### (2) エッジ効果を利用した超高感度光位置検出法の開発

従来の QPD を用いた角度検出では、目標分解能を実現させるには、分割型 PD の素子間不感帯による光量損失がボトルネックになっている。そこで本研究では、従来光量検出にしか用いられていないシングル素子 PD のエッジを基準に、PD で検出される光量変化から光スポットの位置変化をシンプルな形で極めて高い感度で直接検出できる画期的なエッジ効果を利用した超高感度光位置検出法を提案する（図 2）。PD 上での集光スポット径を光の回折限界まで小さくすることで、従来より一桁高い角度検出分解能の達成が望める。SPD 出力の歪みと非線形性を補正する手法を開発し、3 軸角度を高精度に検出するための信号処理回路を製作する。また、極低ノイズタイプの電気部品を選ぶなど、ノイズの低減に細心の注意を払う。

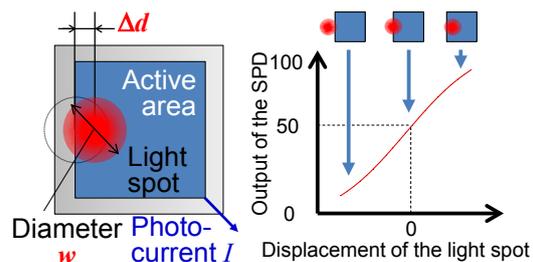


図 2 SPD エッジ効果を利用した超高感度光位置検出法

(3) 光学センサヘッドの開発

提案の3軸レーザオートコリメータの原理を実証するための、スタンドアロン型センサヘッドを開発するとともに、超精密位置決めステージが有する変位計測センサ（リニアエンコーダ）とスケール格子を共用する、組み込み型マイクロセンサヘッドを開発する（図3）。提案の光学センサヘッドでは、位置決め用スケール格子をそのまま微細格子反射鏡に利用できるため、コンパクトで高安定な形でステージへの組み込みができ、今後の実用化にとって非常に有利である。マイクロセンサヘッドの反射格子としてスケール格子と同じ格子ピッチの小型格子を用意する。反射格子を3軸PZT傾斜ステージに載せてマイクロセンサヘッドを組み立て、市販オートコリメータとの比較を行うことによって、センサの基本特性評価を行う。その一方で、センサのマイクロ化によって、光量の減少や軸間干渉などの誤差要因が増加し、センサの特性が計画通りに得られないことが予想される。そのために、光学シミュレーションと実験結果の整合性を確認し、本測定法の感度に影響を与える要素について、目標仕様を満たすための光学系最適化設計を行いながら、センサの設計修正と再調整を繰り返して行うことによって対応する。

4. 研究成果

(1) シングル素子PDのエッジを基準に、PDで検出される光量変化から光スポットの位置変化をシンプルな形で極めて高い感度で直接検出できる画期的なエッジ効果を利用した超高感度光位置検出法の有効性を実証した。シングル素子PD上での集光スポット径の縮小に伴う角度検出感度の向上を確認するため、入射ビーム拡大光学系を有する実験光学系を構築し（図4）、入射ビーム径と角度変化検出感度の関係から、集光スポット径の縮小に伴うセンサ感度向上が可能であることを実験的に明らかにした（図5）。

(2) シングル素子PDのエッジ効果を利用した角度センサ光学系によって得られる最高検出分解能について検討した。検討の過程において、対物レンズの球面収差が感度に及ぼす影響が大きいことを理論および実験から明らかにするとともに、この結果を踏まえて光学系の最適化設計を実施した。再構築した光学系を用いて、精密ピエゾ傾斜ステージの微小傾斜角度検出実験を実施した（図6）。その結果、提案の手法により目標分解能である0.001 arcsecondを超える測定分解能が得られることを実証した。

(3) 3軸レーザオートコリメータの原理に基づいて、各光学部品を50 mm×30 mm×30 mmのコンパクトなサイズに収めたマイクロ光学センサヘッドを設計・試作するとともに、マイクロセンサヘッドの反射格子としてス

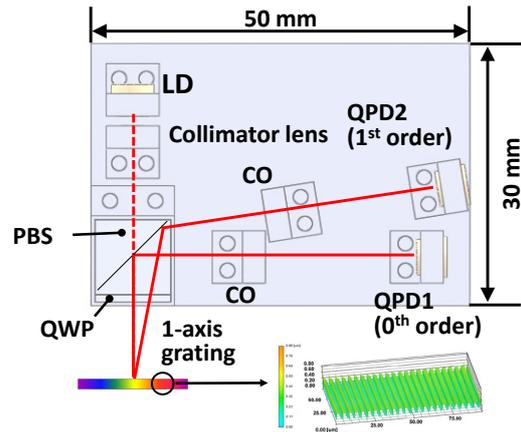


図3 3軸オートコリメータセンサヘッド光学系の設計および試作

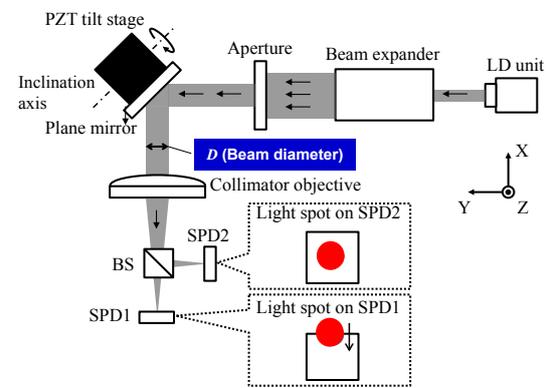


図4 入射ビーム拡大光学系を有する超高感度角度センサ

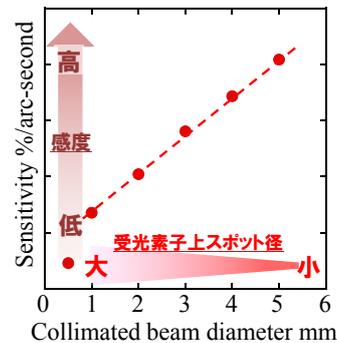


図5 コリメートビーム径と角度検出感度

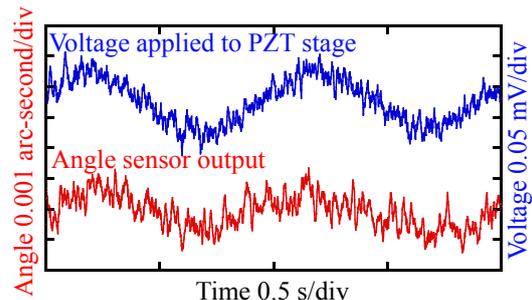


図6 3軸角度変位検出結果

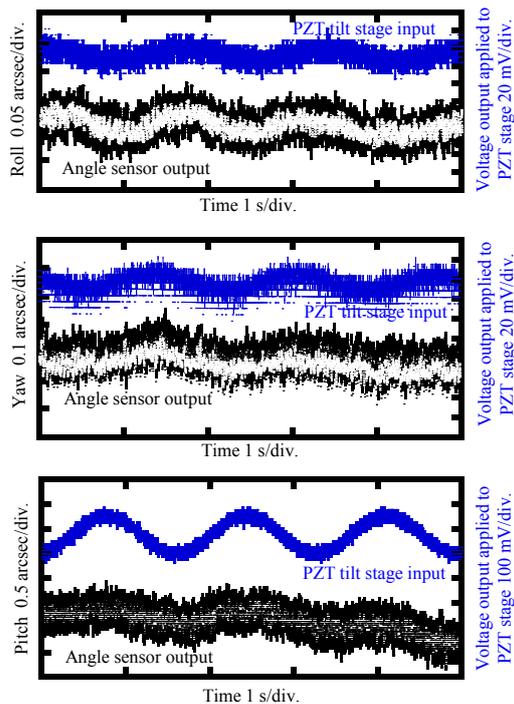


図7 3軸角度変位検出結果

ケール格子と同じ格子ピッチの小型格子を導入して、その基礎特性を評価した。反射格子を3軸PZT傾斜ステージに載せてマイクロセンサヘッドを組み立て、市販オートコリメータとの比較を行った。その結果、ロール、ヨーについては目標測定分解能である0.01 arcsecondを達成した。また、ピッチについては目標分解能である0.1 arcsecondに近い測定分解能(0.2 arcsecond)を実現した(図7)。なお、用いるレーザ光源の短波長化、回折格子の短ピッチ化(4  $\mu\text{m}$ →2  $\mu\text{m}$ )によってピッチについても目標分解能の達成が実現できる見通しが得られている。

以上の結果から、提案の手法により、従来は測定できなかったローリング角を含めた超精密移動ステージの動的3軸角度誤差が一括検出できることを明らかにした。

#### 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6件)

- ① Xinghui Li, Wei Gao, Yuki Shimizu, So Ito, A two-axis Lloyd's mirror interferometer for fabrication of two-dimensional diffraction gratings, CIRP Annals-Manufacturing Technology, 査読有, Vol. 63, 2014, pp. 461-464.  
DOI: 10.1016/j.cirp.2014.02.001
- ② So Ito, Ryo Aihara, Woo Jae Kim, Yuki Shimizu and Wei Gao, Three-axis vibration measurement by using a grating-interferometric vibrometer, Adv. Opt.

Techn., 査読有, Vol. 3, 2014, pp. 435-440.

DOI: 10.1515/aot-2014-0028

- ③ Yuki Shimizu, Takeshi Ito, Xinghui Li, WooJae Kim and Wei Gao, Design and testing of a four-probe optical sensor head for three-axis surface encoder with a mosaic scale grating, Measurement Science and Technology, 査読有, Vol. 25, 2014, pp. 094002.  
DOI: doi:10.1088/0957-0233/25/9/094002
- ④ Xinghui Li, Yuki Shimizu, Takeshi Ito, Yindi Cai, So Ito, and Wei Gao, Measurement of six-degree-of-freedom planar motions by using a multiprobe surface encoder, Optical Engineering, 査読有, Vol. 53, 2014, pp. 122405.  
<http://spiedigitallibrary.org/>
- ⑤ Xinghui Li, Wei Gao, Hiroshi Muto, Yuki Shimizu, So Ito, Songyi Dian, A six-degree-of-freedom surface encoder for precision positioning of a planar motion stage, Precision Engineering, 査読有, Vol. 37, 2013, pp. 771-781.  
DOI: 10.1016/j.precisioneng.2013.03.005
- ⑥ Xinghui Li, Yuki Shimizu, So Ito, Wei Gao, Fabrication of Scale Gratings for Surface Encoders by Using Laser Interference Lithography with 405 nm Laser Diodes, International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 査読有, Vol. 14, 2013, pp. 1979-1988.  
DOI: 10.1007/s12541-013-0269-6

[学会発表] (計14件)

- ① 丸山泰司, 清水裕樹, 伊東聡, 高偉, 光学式3軸角度センサの小型化に関する研究, 精密工学会春季大会学術講演会, 2015年3月17-19日, 東洋大学(東京)。
- ② 丸山泰司, 清水裕樹, Siew-Leng TAN, 村田大, 伊東聡, 高偉, 光学式3軸角度センサの小型化に関する研究, 精密工学会東北支部学術講演会, 2014年11月29日, 弘前大学(青森)。
- ③ Yindi Cai, Yuki Shimizu, Xinghui Li, So Ito and Wei Gao, A study on a six-degree-of-freedom surface encoder, 精密工学会東北支部学術講演会, 2014年11月29日, 弘前大学(青森)。
- ④ Taiji Maruyama, Siew-Leng Tan, Yuki Shimizu, Dai Murata, So Ito, and Wei Gao, A miniaturized three-axis angle sensor, The 6th International Conference on Positioning Technology (ICPT2014), Nov. 18-21, 2014, Kitakyusyu Conference Center, Kitakyusyu, Fukuoka, Japan.
- ⑤ Yindi Cai, Yuki Shimizu, Xinghui Li, So Ito and Wei Gao, Development of a six-degree-of-freedom surface encoder, The 6th International Conference on Positioning Technology (ICPT2014), Nov. 18-21, 2014,

- Kitakyusyu Conference Center, Kitakyusyu, Fukuoka, Japan.
- ⑥ Jun Tamada, Yukitoshi Kudo, Yuki Shimizu, So Ito and Wei Gao, Measurement of angular displacement by using a femtosecond laser, The 6th International Conference on Positioning Technology (ICPT2014), Nov. 18-21, 2014, Kitakyusyu Conference Center, Kitakyusyu, Fukuoka, Japan.
- ⑦ 村田大, Siew Leng Tan, 清水裕樹, 伊東聡, 高偉, 超高感度角度センサに関する研究-測定レーザビーム径拡大に伴うレンズ収差の影響-, 2014 年精密工学会春季大会学術講演会, 2014 年 3 月 18-20 日, 東京大学 (東京) .
- ⑧ 李星輝, 清水裕樹, 伊東聡, 高偉, 2 軸ロイドミラー干渉によるスケール格子の製作に関する研究, 日本機械学会東北支部第 49 期総会講演会, 2014 年 3 月 14 日, 東北大学 (仙台) .
- ⑨ Xinghui Li, Yuki Shimizu, So Ito and Wei Gao: An improved optical sensor for six-degree-of-freedom positioning of a planar motion stage, 精密工学会東北支部学術講演会, 2013 年 12 月 7 日, たざわこ芸術村 (秋田) .
- ⑩ Dai MURATA, Siew-Leng TAN, Yuki SHIMIZU, So ITO, and Wei GAO, An ultra-sensitive angle sensor based on laser autocollimation for stage motion measurement, The 7th international conference on leading edge manufacturing in 21st century (LEM21), November 7-8, 2013, Hotel Taikanso, Sendai, Miyagi, Japan.
- ⑪ Xinghui Li, So Ito, Hiroshi Muto, Yuki Shimizu, Wei Gao and Songyi Dian, Investigation and reduction of crosstalk errors in a six-degree-of-freedom surface encoder for a planar motion stage, The 7th international conference on leading edge manufacturing in 21st century (LEM21), November 7-8, 2013, Hotel Taikanso, Sendai, Miyagi, Japan.
- ⑫ 村田大, 清水裕樹, 伊東聡, 高偉, 超感度角度センサに関する研究, 精密工学会春季大会学術講演会, 2013 年 3 月 13-15 日, 東京工業大学 (東京) .
- ⑬ Xinghui Li, Yuki Shimizu, So Ito and Wei Gao, Low-cost and compact interference lithography of grating fabrication for surface encoders, 精密工学会東北支部学術講演会, 2012 年 12 月 1 日, 山形大学 (山形) .
- ⑭ Xinghui Li, Yuki Shimizu, So Ito, Wei Gao and Lijiang Zeng, Fabrication of diffraction gratings for surface encoders by using a Lloyd's mirror interferometer with a 405 nm laser diode, 8th International Symposium on Precision Engineering Measurements and Instrumentation, August 8-12, 2012, Chengdu, China.

〔図書〕 (計 1 件)

- (1) Xinghui Li, Songyi Dian and Wei Gao, Controller and sensor technologies for surface motor-driven planar stage, in Multi-Degree-of-Freedom (MDOF) Motors, Editor: Yasuhito Ueda, London: Springer (in press).

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 2 件)

名称: 干渉リソグラフィにおける 2 次元パターンの一括露光手法

発明者: 清水裕樹, 高偉, 伊東聡, 李星輝

権利者: 独立大学法人東北大学

種類: 特許

番号: 特許公開 2014-99529

出願年月日: 2012 年 11 月 15 日

国内外の別: 国内

名称: 絶対角測定装置及び絶対角測定方法

発明者: 清水裕樹, 高偉, 伊東聡, 工藤幸利

権利者: 独立大学法人東北大学

種類: 特許

番号: 特許出願 2014-192867

出願年月日: 2014 年 9 月 22 日

国内外の別: 国内

○取得状況 (計 0 件)

〔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 裕樹 (SHIMIZU, YUKI)

東北大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号: 70606384

伊東 聡 (ITO, SO)

東北大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号: 00624818

(3)連携研究者

( )

研究者番号: