

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 6 月 27 日現在

機関番号：82626

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2015

課題番号：26820028

研究課題名(和文)自己校正型ロータリエンコーダを利用した絶対形状測定システムの開発

研究課題名(英文)Development of deflectometric profiler using self-calibratable rotary encoder

## 研究代表者

近藤 余範 (Kondo, Yohan)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・工学計測標準研究部門・主任研究員

研究者番号：10586316

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：表面の局部傾斜角度測定に基づく新たな表面形状測定システムの開発に取り組んだ。本提案では、対象表面に照射したレーザービームの反射光を、ミラーの反射を介して、レンズとポジションセンサにより角度検出する。ペンタミラーを走査することで、表面の局部傾斜角に応じて、センサ上のビームスポット位置が変化するが、スポット位置が変化しないようにミラーを回転することが可能なフィードバック制御システムを開発した。ミラーの回転角度を自己校正型ロータリエンコーダによって測定することにより、間接的に表面の局部傾斜角度を測定できる。平面から数m程度までの曲率を持つ表面形状を数nmの絶対精度で測定できることを実証した。

研究成果の概要(英文)：A novel deflectometric profiler using a self-calibratable rotary encoder (SelfA) has been developed. A laser beam reflected from the surface under test (SUT) is divided by a half mirror and introduced to the proposed null instrument. The null instrument is constructed of a reflection mirror on the rotation stage, a lens, and a quadrant cell photodetector (QPD). The QPD is located at the focal position of the lens; consequently, the beam position on the QPD is changed by changing the local slope angle of the SUT. The angle of the reflection mirror is adjusted so that the beam position on the QPD always remains on the center. The local slope distribution of the SUT is translated to the change in the rotation angle of the reflection mirror. The change in the rotation angle of the reflection mirror is measured by the SelfA. Finally, it has been verified that the proposed system can measure a surface profile with a curvature from the plane to several meter with several nanometers accuracy.

研究分野：生産工学・加工学

キーワード：ロータリエンコーダ 自己校正法 形状計測 平面 球目 自由曲面

### 1. 研究開始当初の背景

表面形状測定は、様々な分野のものづくりや研究開発において欠くことのできない重要な基盤技術の一つであり、その要求性能（高精度化、大口径化など）は年々高まる一方である。例えば、半導体ロードマップによれば、次世代のリソグラフィ技術である EUV においては、マスク基盤の平面度に対して 5 nm 程度以下 ( $3\sigma$ ) の測定精度が必要であるとされている。高精度な表面形状測定法としては、干渉計測法が最も一般的である。干渉計による形状測定法は、2次元の形状分布を一度に得ることができ、分解能もナノメートルレベルが実現可能であるが、参照平面（もしくは球面）との差分測定であるため、測定の絶対精度は参照平面の精度によって制限され、ナノメートルレベルの絶対精度を実現することは容易でない。さらに、差分測定のレンジは数  $\mu\text{m}$  程度の範囲に限られるため、高ダイナミックレンジの測定（例えば自由曲面測定）には適さない。

一方、近年、高精度な形状測定法として、表面の局部傾斜角度測定を用いた手法が注目されている。図1には、測定システムのプロットを示す。この手法は、表面の局所的な角度の変化を逐次測定していき、得られた角度変化データを積分することにより形状を得るといったシンプルな原理に基づく測定法であり、①参照平面を必要としない、②大口径の形状も測定可能、といった特徴を有する。

表面の局部傾斜角度検出器としては、オートコリメータを利用したシステムが多く開発されているが、測定光のビーム径が大きいことによる形状測定の空間分解能が低い、低反射率の表面の測定が困難、角度測定のダイナミックレンジに限られる、といった問題点があり、測定可能な対象は限られている。

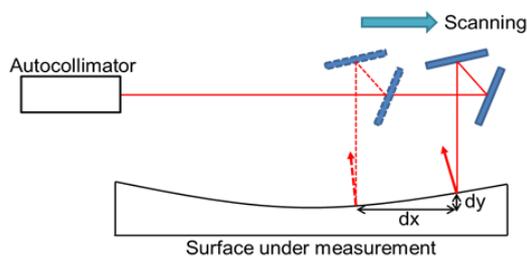


図1. オートコリメータを用いた局部傾斜角測定に基づく形状測定システム

### 2. 研究の目的

本研究では、オートコリメータを用いずに、表面の局部傾斜角度を自己校正型ロータリエンコーダにより間接的に測定できる新たな局部傾斜角度測定システムの確立を目指す。最終的には、平面から数 m 程度までの曲率を持つ表面形状（自由曲面）を数 nm の絶対精度で測定できるシステムの構築を目指す。

### 3. 研究の方法

本研究では、ビーム角度の変化をミラーの回転角に変換するシステム（フィードバック制御システム）を導入し、表面形状の局部傾斜角度の変化をミラーの回転角として、自己校正型ロータリエンコーダにより間接的に測定できるようにすることで上記の問題点を解決する。

測定システム（図2参照）においては、まず口径 1~2 mm 程度のレーザービームをペンタミラーの反射を介して測定対象の表面に照射する。次に、ペンタミラーをステージにより走査し、レーザービームを対象表面上でスキャンさせる。ここで、ペンタミラーを用いることにより移動ステージのピッチングエラーをキャンセルすることができる。今回提案する手法では、図2に示すハーフミラーから切り出された対象表面からの反射光を、ミラーの反射を介して、レンズとポジションセンサにより校正された角度検出システムに入射させる。ポジションセンサは、レンズの焦点面に置かれており、ペンタミラーの走査に伴い局部傾斜角度が変化すると、センサ上のビームスポット位置が変化するが、本提案システムでは、局部傾斜角度が変化してもスポット位置が変化しないように、ミラーの角度を変化することによりフィードバック制御する。ミラーの回転角度は、回転ステージに内蔵された自己校正型ロータリエンコーダによって測定する。そして、このフィードバック制御されたミラーの回転角度により対象表面の局部傾斜角度を測定する。従来の局部傾斜角度測定システムでは、絶対精度を得るために校正済みのオートコリメータが用いられているが、提案システムは、オートコリメータの校正標準として用いられている自己校正型ロータリエンコーダを直接角度測定に用いるため、さらなる高度化が可能である。

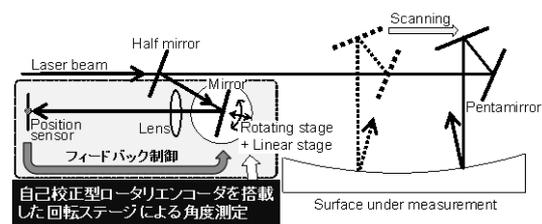


図2. 自己校正型ロータリエンコーダを用いた新たな局部傾斜角測定に基づく形状測定システム

### 4. 研究成果

(1) フィードバックシステムを適用したヌルシステムの開発

フィードバックシステムを適用したヌルシステムに基づく形状測定機を開発した。本システムでは、直径約 1.08 mm ( $1/e^2$ )、波長 658 nm のレーザービーム(LD)を使用した。これまでの形状測定システム（図1）は、オートコリメータからの角度測定ビームを用いており、

試料直前に配置されるアパーチャサイズによって測定可能な形状の横分解能が制限される。多くの研究機関で開発されたオートコリメータに基づく形状測定システムでは、約 5 mm～10 mm 程度のアパーチャサイズが使用されている。一方、開発したシステム (図 3) では、約 1 mm のレーザービームを直接用いるため、横分解能が大幅に向上した (約 5 倍以上)。また、レーザービームの強度を調整することで、従来のオートコリメータでは難しかった低反射率の表面であっても容易に対応が可能となった。

開発したシステムでは、ハーフミラーから切り出された対象表面からの反射光を、ピエゾ回転ステージ上に配置したミラーの反射を介して、レンズとポジションセンサにより構成された角度検出システム (Null instrument) に入射させる。オートコリメータの場合、ポジションセンサとして CCD カメラを用い、ペンタミラーの走査に伴う反射ビーム角度 (局部傾斜角度) の変化を、CCD カメラ上のビームスポット位置の変化として直接測定する方式を用いている。高精度なオートコリメータはサブ nm オーダの形状測定が可能な分解能を有するが、角度測定の精度保証 (校正) が一つの問題点として挙げられる。レンズと CCD カメラによって構成された角度測定システムの精度は何らかの手法による校正が必要であり、特に高ダイナミックレンジ化を実現しようとすると、CCD カメラ感度の 2 次元的な均一性、非線形性が問題となる。一方、開発システムでは、ポジションセンサは中心付近しか用いないため、センサの 2 次元的な均一性、非線形性は問題とならない。図 3 の開発したシステムでは、ピエゾ回転ステージの回転角度は、オートコリメータを用いて測定した。

図 4 にあるガラス表面形状を 10 回繰り返し測定した結果を示す。従来は検出出来なかった細かな凹凸まで検出ができることが分かる。また、10 回の測定の繰り返し性は、 $\pm 0.6$  nm であった。

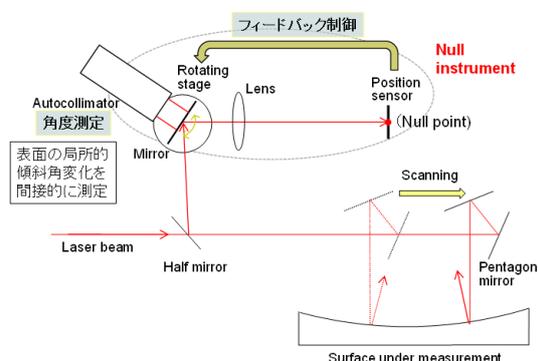


図 3. Null instrument (レーザービーム) を用いた局部傾斜角測定に基づく絶対形状測定装置

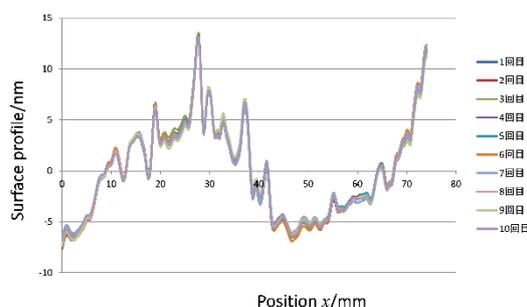


図 4. 細かな凹凸のあるガラス表面形状の測定例 (10 回測定)

## (2) 自己校正型ロータリエンコーダの開発

図 3 の開発システムでは、オートコリメータの測定光を用いてミラーの回転角度を測定した。測定対象が平面の場合、オートコリメータの系統誤差の影響が小さいが、球面や自由曲面を測定対象とした場合、オートコリメータの測定精度が支配的になる。また高精度なオートコリメータの測定可能な範囲は  $\pm 1000$  角度秒 (約 0.28 度) 程度であり、数度程度の局部傾斜角を持つ球面や自由曲面の測定はできない。そこで、本研究では自己校正型ロータリエンコーダを開発した。ロータリエンコーダを用いた角度測定値には、ロータリエンコーダの取り付け (偏心) 誤差や使用するスケール誤差、電気内挿誤差が含まれる。そこで、角度測定の系統誤差を除去する方法として自己校正法を適用した。

実際に回転した角度を  $\theta_i$ 、各センサヘッドの読み取り角度を  $A_{i,j}$ 、各センサヘッドの読み取り誤差を  $B_{i,j}$  とすると、

$$A_{i,j} = \theta_i + B_{i,j} \quad (1)$$

となる。ここで、 $i$  は読み取り番号 ( $i=1 \sim n$ )、 $j$  はヘッド番号 ( $j=1 \sim m=6$ ) である。

ある角度位置での一番目との角度読み取り偏差を  $\delta_{i,j}$  とすると、

$$\delta_{i,j} = A_{i,1} - A_{i,j} = B_{i,1} - B_{i,j} \quad (2)$$

となる。また、ある角度位置での得られた角度偏差の平均値を  $\mu_i$  とすると、

$$\mu_i = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \delta_{i,j} = B_{i,1} - \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m B_{i,j} \quad (3)$$

となる。ここで、フーリエの法則「任意の周期曲線はフーリエ級数で表すことができ、任意の正の整数  $n$  に対してその曲線の位相を  $2\pi/n$  ずらした  $n$  個の曲線の平均をとると、元の曲線を持つ  $n$  の整数倍次のフーリエ成分の総和が得られる」により、式(3)右辺の第 1 項は、ロータリエンコーダのスケール誤差がもつ  $m$  の倍数次フーリエ成分の総和となる。 $m$  の倍数次フーリエ成分の総和が十分小さいとするならば、式(3)の平均値  $\mu_i$  はロータリエンコーダの校正曲線とすることができる。得られた校正曲線を読み取り角度から除去することにより、回転角度が得られる。

$$\theta_i = A_{i,1} - \mu_i \quad (5)$$

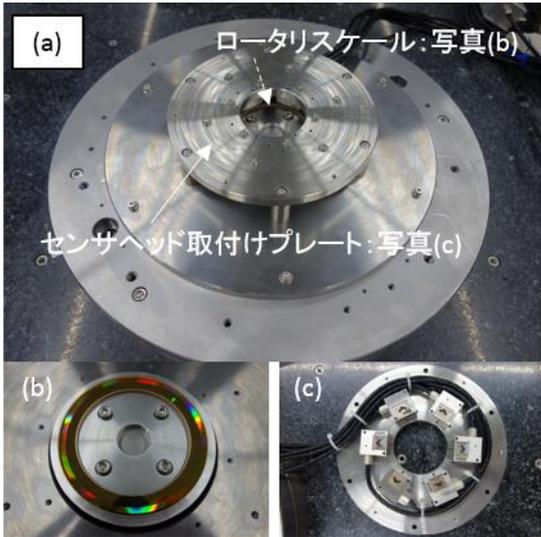


図5. (a)開発した自己校正型ロータリエンコーダの評価の様子(b)使用したロータリエンコーダ(c)センサヘッド配置

図5に開発した自己校正型ロータリエンコーダの写真を示す。0.01 角度秒以下の絶対角度位置決めが可能な超高精度回転テーブル上に開発した自己校正型ロータリエンコーダを配置した。自己校正型ロータリエンコーダは、マグネスケール製のロータリエンコーダと等角度間隔に配置した6個の読み取りセンサヘッドで構成される。ロータリエンコーダの総パルスリ数は $2^{20}$ で、各読み取りセンサの信号は $2^{10}$  通倍器を通してカウントする。各読み取りセンサの分解能は、0.0012 角度秒となる。

はじめに、1 センサヘッドによるロータリエンコーダの測定精度を評価した。図6に評価結果を示す。使用したロータリスケールは、7.1 角度秒(P-V 値)を持つ。この結果は、スケール取り付け誤差に伴う偏心誤差(1次成分)を除去した結果であり、偏心量は100 角度秒程度ある。

次に、偏心量を含む6chの各センサヘッドから取得される角度信号から式(3)に基づき開発した自己校正型ロータリエンコーダの角度測定精度を評価した。図7(a)に評価結果を示す。360度の角度測定範囲に対して、0.6 角度秒(P-V 値)が得られた。本結果は、1次成分の除去はしていない。各センサヘッドが持つ取り付け偏心誤差は、自己校正アルゴリズムによって除去されていることがわかる。一方、6の倍数次成分の周期的な誤差が見られる。フーリエの法則で説明される読み取りセンサヘッド数に起因するものである。

測定対象表面の局部傾斜角度を $\pm 1$ 度(口径35 mm曲率1 mの球面レンズ)と想定したとき、開発した自己校正型ロータリエンコーダの角度測定精度は0.036角度秒(P-V値)となる(図7(b)参照)。ここで、産総研で開発した従来式局部傾斜角測定に基づく形状測定機に用いた高精度オートコリメータ(MÖLLER-WEDEL OPTICAL製ELCOMAT 3000)の評価結果を示

す(図8参照)。開発した自己校正型ロータリエンコーダは、オートコリメータと比較し、測定範囲が拡大するだけでなく、角度測定の絶対精度の向上も実現した。

局部傾斜角度測定に基づく形状測定機は、得られた角度を積分するため、読み取り角度の誤差が累積する。角度測定の系統誤差による形状測定の標準不確かさ $u_{\text{sys}}$ は、校正曲線の最大角度誤差 $e$ (P-V値)を一様分布と考えると、

$$\mu_{\text{sys}} = \frac{e}{2\sqrt{3}} \cdot \sqrt{N} \, dx \quad (6)$$

と表せる。ここで、 $N$ は測定点数で、 $dx$ は試料走査ピッチである。口径35 mm曲率1 mの球面レンズを0.5 mmピッチ( $N=70$ 点)で測定した場合、 $u_{\text{sys}}=0.2$  nmとなる。本結果より、開発した自己校正型ロータリエンコーダを用いた局部傾斜角測定に基づく形状測定機を用いて平面から数 m 程度までの曲率を持つ表面形状を数 nm の絶対精度で測定できることが確認できた。

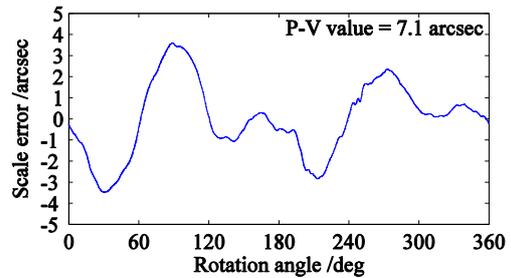
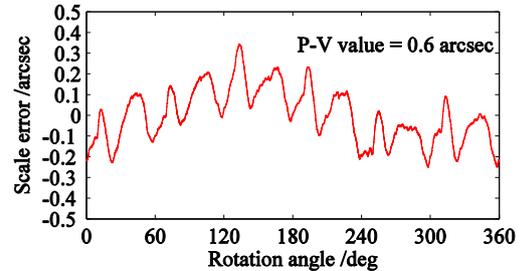
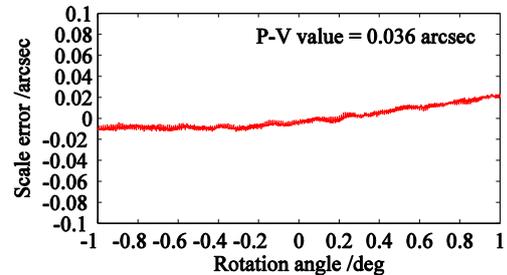


図6. ロータリエンコーダの校正曲線(偏心成分を除く)



(a)評価範囲 360 度



(b)評価範囲 $\pm 1$  度

図7. 自己校正アルゴリズムを適用した角度測定精度

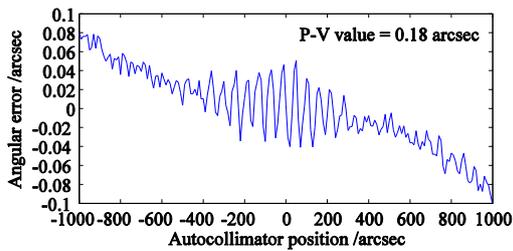


図8. オートコリメータの評価結果例

## 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 2件)

① Youichi Bitou and Yohan Kondo: High-lateral-resolution scanning deflectometric profiler using a commercially available autocollimator, Measurement science and technology, 査読有, 25(9), 095202, 2014

② Yohan Kondo and Youichi Bitou: Evaluation of the deformation value of an optical flat under gravity, Measurement science and technology, 査読有, 25(6), 064007, 2014

〔学会発表〕(計 3件)

① Yohan Kondo, Youichi Bitou and Kazuhide Yamauchi:  $\lambda/100$  reference flat for commercially available Fizeau interferometer, The 8th International Symposium on Advanced Optical Manufacturing and Testing Technologies (AOMATT 2016), Suzhou, China, April 26-29

② 尾藤洋一, 近藤余範: 局部傾斜角測定を利用した高分解能絶対形状測定装置の開発, 応用物理学会秋季学術講演会, 2014年9月17-20日, 北海道大学, 北海道札幌市

③ 近藤余範, 尾藤洋一, 山内一秀: 超高精度平面基板の開発, 精密工学会秋季学術講演会, 2014年9月16-18日鳥取大学, 鳥取県鳥取市

〔図書〕(計 0件)

〔産業財産権〕

○出願状況(計 0件)

○取得状況(計 0件)

〔その他〕

ホームページ等

<https://unit.aist.go.jp/riem/lgt-std/>

## 6. 研究組織

(1)研究代表者

近藤 余範 (YOHAN KONDO)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・工学計測標準研究部門・主任研究員

研究者番号: 10586316