

令和 2 年 6 月 29 日現在

機関番号：82626  
研究種目：若手研究(A)  
研究期間：2017～2019  
課題番号：17H04901  
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大口径三次元絶対形状測定システムの開発  
  
研究課題名（英文）3-D scanning deflectometric profiler using self-calibration 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・計量標準総合センター・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） 18,700,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、測定範囲 800 mmで、平面から数m程度までの曲率を持つ表面形状をナノメートルレベルの絶対精度で測定できる形状測定機を世界で初めて開発に成功した。従来ライン形状に限定された測定装置に試料回転ステージを搭載し、放射状に取得した各ライン形状から三次元形状を算出するシステムを構築した。また、ペンタゴンミラーを利用して角度測定ビームを垂直入射させていた為、透明材料を測定対象とする場合、裏面からの反射ビームが測定ビームと重なってしまい、測定不能となる領域が存在する。そこで、裏面反射ビームを空間的に分離する斜入射光学系システムDual mirror pair (DMP)も開発した。

#### 研究成果の学術的意義や社会的意義

測定範囲 800 mmで、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±5 nm（世界最高精度）の絶対精度で三次元形状測定できる世界で初めての測定装置の開発に成功した。本提案システムの実現により、単に、三次元形状測定の高度化を達成されるだけでなく、例えば、干渉計の参照鏡を測定・校正することにより、干渉計測法の高精度化も期待できる。また、形状そのものの測定精度に加えて、横軸（走査幅）も高精度に測長することが可能である本システムの特徴を生かし、焦点距離の長い曲面の高精度絶対曲率測定などへの適用も期待できる。

研究成果の概要（英文）：We developed an absolute surface profiler based on the local slope angle measurement of the specimen without using the reference surface, which is called the scanning deflectometric profiler (SDP). Measuring devices based on deflectometry have been developed by many laboratories as a highly accurate straightness profile measurement. On the other hand, a problem of deflectometric system was that the measurement was limited to a line (two-dimensional) profile. To solve this problem, we developed a novel method to measure the surface topography. The surface topography was calculated from radial lines obtained by rotating the specimen. We performed the comparison measurement between the SDP system and the Fizeau interferometer. Finally, the proposed method was validated through the comparison measurement.

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 球面 自由曲面

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

近年、最先端の理化学研究分野や半導体業界をはじめ、光通信、計測、医療、天体望遠鏡など、極めて高精度な表面形状を持つ光学部品のニーズは高まる一方である。表面形状の高精度な測定法としては、フィゾー干渉計測法が最も一般的である。フィゾー干渉計による形状測定法は、三次元形状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、基本的に参照平面（もしくは球面）との差分測定であるため、測定の絶対精度は基準原器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はない。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）には適さない。また、フィゾー干渉計は装置の構成上、大型化が非常に困難である。

一方、近年、高精度な形状測定法として、物体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。この手法は、オートコリメータを用い、ペンタミラーを走査することにより物体表面の局所的な角度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。世界的には、ドイツの国立標準研 (PTB) などが先行して開発を進めており、ナノレベルの測定精度が既に達成されている。しかしながら、局部傾斜角度測定に基づく形状測定手法の問題点として、測定が二次元形状（ライン形状）に限られるという点が挙げられる。また、ガラス材など光が透過する平行平面基板を測定する場合、裏面反射の影響により測定できない問題もある。以上のことから、産業ニーズ（高精度化、高ダイナミックレンジ化、大口径化、測定対象へのフレキシビリティなど）に応える新たな局部傾斜角度測定を用いた三次元絶対形状測定システムの確立を目指すこととした。

### 2. 研究の目的

大口径かつ高精度な平面測定手法としては、約 $\Phi 800\text{ mm}$  横型フィゾー干渉計（測定面が重力方向）が市販されている。しかし、大型基板を使用するユーザーは、縦置きで利用することが多く、測定試料の自重変形を含めた形状測定が求められている。縦型干渉計の場合、参照面も重力によって変形するため高精度化が困難であり、また、装置の構造上、大口径化は非常に困難である。そこで、測定範囲 $\Phi 800\text{ mm}$ で、平面から数 $\text{m}$ 程度までの曲率を持つ表面形状（自由曲面）を $\pm 5\text{ nm}$ （世界最高精度）の絶対精度で三次元形状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、先行研究で開発した形状測定装置の試料台に回転ステージを導入し、試料を回転させることで、放射状のライン形状測定を行い、各ライン測定結果を接続することで三次元形状を得る。ただし、この手法では回転ステージの運動誤差に伴い、各ライン測定間の相対関係は不明である。そこで、オートコリメータを用いた回転エラー補正システム（図1参照）を導入することにより、高精度な対象表面の円周形状測定を実施した。放射状のライン形状と円周形状の交差点データより、各ライン測定を接続する際の誤差伝播を抑制する接続アルゴリズムを開発し、三次元形状を求めた（図3参照）。また、平行平面基板を測定するため、表面からの反射光と不要な裏面反射光を分離する DMP: Dual mirror pair（図7参照）の開発にも取り組んだ。局部傾斜角度測定に基づく形状測定システムにおいて、ペンタミラーは走査に伴う運動誤差（ピッチングエラー）を除去する重要なキーデバイスである。新たな DMP は、2組のミラーペアで構成され、不要な裏面反射光を測定光と分離しつつ、走査に伴う運動誤差を除去できる光学システムであり、既存のペンタミラーを DMP に置き換えることにより、平行平面基板の測定を実現した。

### 4. 研究成果

#### (1) 大口径三次元形状測定システムの開発

図1、図2に開発した三次元形状測定システムの概略図及び装置写真を示す。先行研究[1]Y. Kondo and Y. Bitou: Evaluation of the deformation value of an optical flat using under gravity, Meas. Sci. Technol., 25, 064007, 2014]で開発した形状測定装置 (SDP: Scanning Deflectometric Profiler) の試料台に回転ステージを導入し、試料を回転させることで、放射状のライン形状測定を行い、各ライン形状測定結果を接続することで三次元形状を得る。ただし、各ライン形状測定結果は、最小二乗直線からの偏差量（真直度形状）であり、回転ステージのアンギュラー振れに伴い、各ライン形状の相対角度関係は不明である。試料台の裏面中央に設置したミラーの傾き測定によって、各ライン測定間の相対角度関係は決定できる（放射状に測定する各ライン形状の中央1点による接続）。しかし、アンギュラー振れの測定誤差は、試料外周部に向かって増大する。例えば、 $\Phi 300\text{ mm}$ の平面基板を測定する時、 $0.05\ \mu\text{rad}$ （オートコリメータの分解能レベル）の測定誤差がある場合、中心から $150\text{ mm}$ の位置におけるライン形状の測定誤差は $\pm 7.2\text{ nm}$ となる。試料の中央一点で接続することには問題がある。そこで、円周測定に基づく高精度なライン形状接続アルゴリズムを導入した。円周形状の測定は、ライン形状と同様に分解能サブ $\text{nm}$ 、精度 $\pm 1\text{ nm}$ オーダーで測定が可能である。試料外周部（半径数百 $\text{mm}$ オーダー）の円周形状を高精度（ナノメートルオーダー）に測定できることから、各ライン形状間の相対角度関係を高精度に決定することができる。具体的な円周形状の測定方法は、ペンタミラーを回転中心からある半径位置に移動し、ペンタミラーの走査軸と直交した成分の測定対象表面の局部傾

斜角度を測定する。そして、ステージを回転し、円周接線方向の局部傾斜角度分布を測定する。得られた局部傾斜角度分布を積分することにより、円周方向の表面形状が得られる。放射状のライン形状は、円周測定結果との交差点データより相対角度関係が決定できる。

新たな三次元形状測定システムの検証のため、実際に、低熱膨張セラミックス製オプティカルフラットのφ300 mmの範囲の平面度測定を実施した。平面度はPV値131.7 nm、RMS値で26.0 nmであった(図4参照)。提案接続手法の検証のため、産総研が保有する平面度フィゾー干渉計で同一のオプティカルフラットを測定した。平面度はPV値131.2 nm、RMS値で26.4 nmであった(図5参照)。異なる測定原理であるフィゾー干渉計と1 nm以下(PV値比較)で一致した。

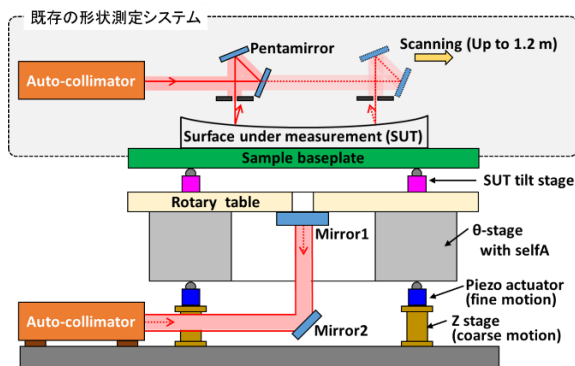


図1 三次元形状測定システムの概念図

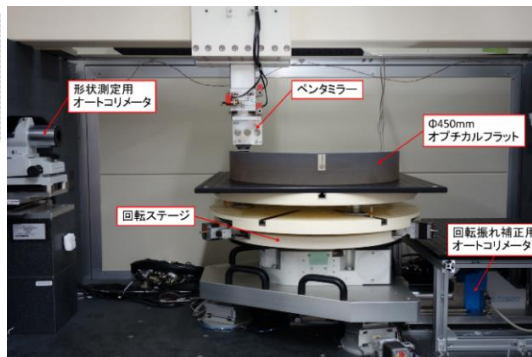


図2 開発した形状測定機(3D-SDP)

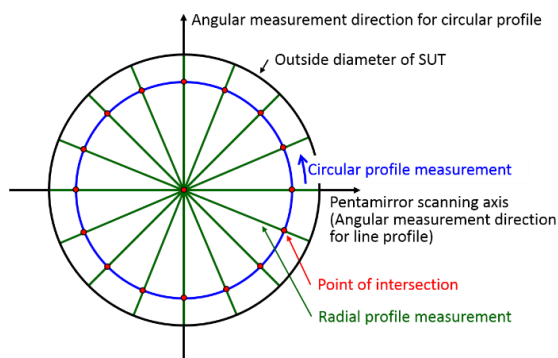


図3 放射ライン形状接続概念図

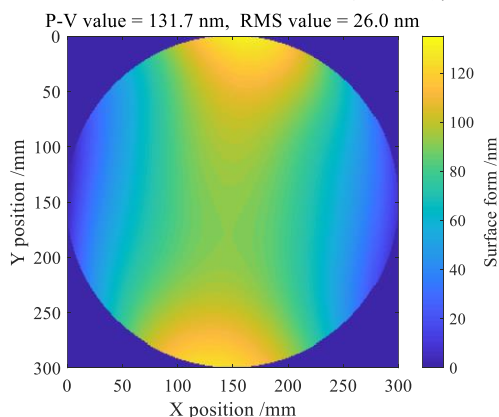


図4 3D-SDPによる三次元形状マップ

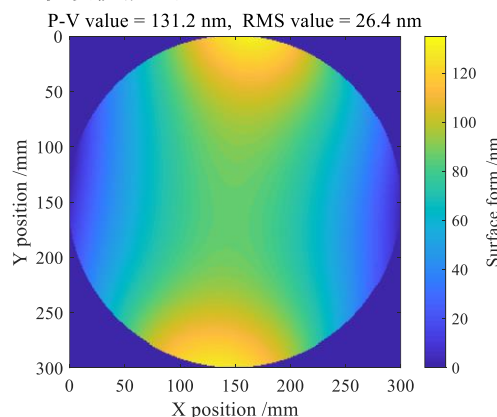


図5 フィゾー干渉計による三次元形状マップ

## (2) 平行平板測定システムの開発

透明材料を測定対象とする場合、裏面からの反射ビームが測定ビーム(試料表面からの反射ビーム)と重なってしまい、測定不能となる領域が存在する。そこで、平行平面基板を測定するため、表面からの反射光と不要な裏面反射光を分離するDMP(Dual mirror pair、図6参照)の開発にも取り組んだ。局部傾斜角度測定に基づく形状測定システムにおいて、ペンタミラーは走査に伴う運動誤差(ピッチングエラー)を除去する重要なキーデバイスである。新たなDMPは、2組のミラーペアで構成され、不要な裏面反射光を測定光と分離しつつ、走査に伴う運動誤差を除去できる光学システムであり、既存のペンタミラーをDMPに置き換えることにより、平行平面基板の測定を実現した。

具体的には、ペンタゴンミラーの設置角度(45°)を変更した二組のミラー対を利用し、測定ビームを試料表面に斜めに入射させることで、裏面反射ビームの位置をずらすことにより、その

影響を除去する。図7にゆるやかな曲面を持つガラス表面（ほぼ平行平板）の測定結果を示す。測定範囲90 mmの試料に対して、10回測定の繰り返し性は $\pm 0.7$  nm以下であり、裏面反射が存在する対象に対しても高精度な測定が可能であることが確認できた。

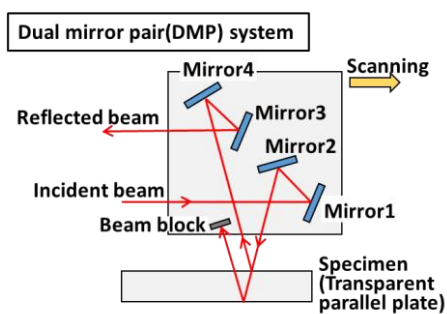


図6 裏面反射分離光学系

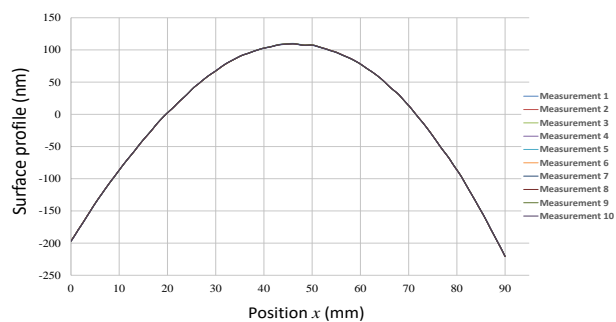


図7 平行平面ガラス表面の測定結果（10回測定）

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 高村 智彦、近藤 余範、尾藤 洋一、高橋 哲、高増 潔
2. 発表標題 Self-calibration method of nanometer profile measurement on large aspheric optical surface
3. 学会等名 ICPE2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 近藤 余範、尾藤 洋一
2. 発表標題 450 mmオプチカルフラットの絶対平面度測定
3. 学会等名 精密工学会秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 郭翔、近藤 余範、尾藤 洋一、高橋 哲、高増 潔
2. 発表標題 Nanometer Profile Measurement on Large Aspheric Optical Surface
3. 学会等名 ASPEN2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 尾藤 洋一、近藤 余範
2. 発表標題 角度測定を利用した高精度形状計測
3. 学会等名 光計測シンポジウム2017
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 尾藤 洋一、近藤 余範
2. 発表標題 Scanning Deflectometric Profiler (SDP) systems at NMIJ
3. 学会等名 The 3rd MacroScale conference
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 近藤 余範、尾藤 洋一
2. 発表標題 角度測定に基づく三次元形状測定システムの開発
3. 学会等名 精密工学会春季大会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----