

令和 3 年 5 月 27 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18H01345

研究課題名（和文）次元変換型マルチビーム角度センサでの多元情報一括検出による次世代光学素子形状計測

研究課題名（英文）Form measurement of the next-generation optical components by the dimension-conversion-type multi-beam optical angle sensor capable of detecting multiple information

研究代表者

清水 裕樹 (Shimizu, Yuki)

東北大学・工学研究科・准教授

研究者番号：70606384

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,500,000円

研究成果の概要（和文）：超精密光学自由曲面形状計測技術の確立を目的として、フェムト秒レーザと分光素子で生成する多元情報マルチビームを光源として用い、空間領域で一括捕捉した反射光群から周波数領域において各ビーム固有の光周波数をもとにビーム位置および局所的傾斜角情報を抽出する、次元変換型マルチビーム角度センサのコンセプトを提案した。理論検討結果をもとにフェムト秒レーザ光源を含む実験光学系を構築し、実験的検討で提案コンセプトの実現可能性を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究での理論的・実験的検討結果から、次元変換型マルチビーム角度センサによって、傾斜角およびビーム位置という空間領域の多元情報を周波数領域で一括取得できることが実証され、その情報を活用した高精度自由曲面形状計測の実現可能性が見いだされた。角度情報を利用した高精度計測手法は国内外で注目を集めており、その高速化と測定不確かさ低減が課題となっているが、今後、光学系の拡張により本手法での2軸方向のスロープマップ同時取得が実現すると、学術的・工業的により高いインパクトを与える技術になるものと期待される。

研究成果の概要（英文）：Aiming to establish a technique for measurement of the profile of an ultra-precision free-form surface, a concept of the multi-beam angle sensor, in which the spatial position and the local slope of the point irradiated by a measurement laser beam in the group of the multiple laser beam can be obtained simultaneously, has been proposed. The theoretical investigation, as well as the development of the experimental setup including a fiber-based femtosecond laser source, has been carried out, and the feasibility of the proposed concept has been verified by the experimental results.

研究分野：精密ナノ計測・制御

キーワード：超精密計測 生産工学・加工学 角度センサ フェムト秒レーザ

1. 研究開始当初の背景

(1) 次世代半導体露光装置向け X 線ミラーなど、400 mm 超の大型自由曲面を有する次世代光学素子形状をサブ nm 級精度で計測する手法の確立が強く望まれている。光学表面計測には、光干渉の原理で基準参照面形状との比較評価を行う波面干渉法が従来より主に用いられているが、基準参照面が必須という原理的制約のため、大型光学表面や自由曲面評価への適用が容易ではない。また、振動外乱に弱い測定原理と参照面自身の形状誤差のため、次世代技術に要求されるサブナノメートル超級精度への到達は困難である。参照面に依らず、投影パターンを用いる評価手法もあるが、測定精度不足のためナノメートル級精度の計測には不向きである。

(2) これに対し、光学式角度センサにより連続的に得た局所的傾き情報（ローカルスロープ）をもとに、積分演算により形状を復元する、走査式傾斜計測法が提案されている。波面干渉法で必須の参照面が不要なため、大型自由曲面にも適用可能で、ナノメートル級の測定精度が実現可能とされており、現在、X 線集光用ミラーの計測などに適用されている。その一方で、ビーム走査運動誤差が積分演算時に蓄積されるため、更なる測定の確からしさ追求が困難である、ビーム走査に多大な時間を要するため、熱的外乱の影響が不可避である、という原理的制約のため、国家計量研など高度な環境制御が可能な機関でしか実現できず、また従来のアプローチでは次世代技術に要求されるサブナノメートル超級精度への到達は困難である。

2. 研究の目的

(1) 次世代半導体露光装置向け X 線光学素子などに要求される超精密形状精度実現に必須となる超精密光学自由曲面形状計測技術確立を目的として、フェムト秒レーザと分光素子で生成する多元情報マルチビームを光源として用い、空間領域で一括捕捉した反射光群から周波数領域において各ビーム固有の光周波数をもとにビーム位置および局所的傾斜角情報（スロープマップ）を抽出する、「次元変換型マルチビーム角度センサ」を用いた新たな光学自由曲面形状計測原理を提案する。

(2) 傾斜角およびビーム位置という空間領域の多元情報を周波数領域で一括取得する、これまでにない発想に基づく高速でロバストな計測原理の確立により、ビーム走査不要の光学自由曲面形状計測を実現し、測定不確かさを低減することを研究の目的とする。

3. 研究の方法

(1) フェムト秒レーザと分光素子による多元情報マルチビーム生成手法の確立：光ファイバベースのフェムト秒レーザ光源を構築して、これに最適化設計した分光素子を組み合わせ、多元情報マルチビーム生成光学系を構築する。マルチビーム幅は、光学曲面計測の原理検討に十分な幅を初期目標として設定して原理検討を進める。

(2) 次元変換型マルチビーム角度センサ光学系の最適化設計：上記マルチビーム生成光学系を組み込んだ角度センサ光学系を構築する。単一受光部により空間領域で一括取得した反射光群を、光スペクトラムアナライザで周波数領域に次元変換し、ビーム固有の光周波数をもとに位置・姿勢角情報（スロープマップ）が抽出可能であることを実証する。

(3) スロープマップからの自由曲面形状復元アルゴリズム構築と光学表面形状評価：上記スロープマップから測定面形状を復元する積分演算アルゴリズムを構築し、これを実装した計測シ

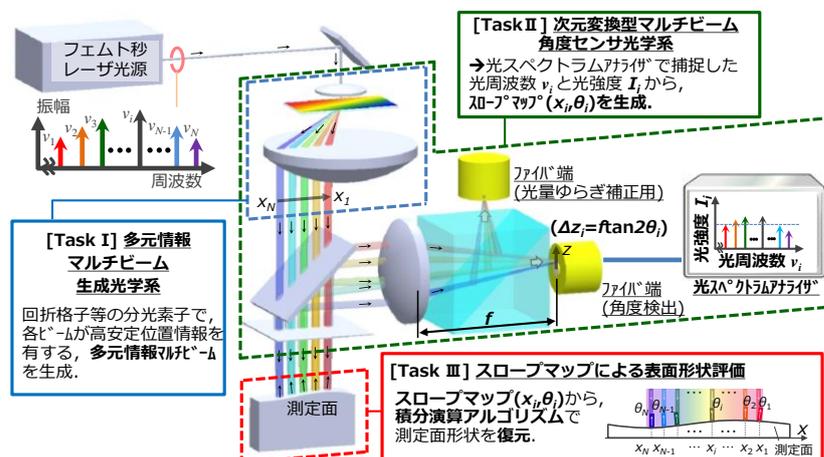


図1 マルチビーム角度センサでのスロープマップ取得による光学曲面形状計測

システムを試作して、提案の次元変換型マルチビーム角度センサにより走査不要の自由光学曲面形状計測が可能であることを実証し、サブ nm 超の測定精度実現を目指す。

4. 研究成果

(1) 提案手法では、反射マルチビーム光を光周波数領域で観測して表面角度情報を取得するため、従来の高精度光学式角度センサで用いられる CCD/C-MOS イメージセンサやフォトダイオードなどに代えて、シングルモードファイバー端を検出器として用いる必要がある。この場合、従来の検出器とは異なる出力挙動を示す可能性がある。そこで、シングルモードファイバー端を検出器として用いた場合の角度センサ出力を、図 2(a)に示す光学系モデルをもとにした数値解析シミュレーションで理論的に検討した。シングルモードファイバーと光スペクトラムアナライザで構成した受光ユニットを有する光学式角度センサ光学系で実現可能な測定分解能および測定レンジも併せて検討し、高感度での角度検出が可能であることを確認した(図 2(b))。

(2) マルチビーム生成に必要となる、光ファイバーベースのフェムト秒レーザ光源を構築した。エルビウム添加ファイバを用いたファイバ共振器を構築し(図 3)、繰り返し周波数が約 100 MHz 程度となるよう共振器長の最適化を試みた。出力されたレーザ光を光スペクトラムアナライザにより光周波数域で観測し、中心波長 1564 nm、全値半幅 24 nm、出力強度約 90 mW の光スペクトルが得られていることを実験的に確認した。また、光パルスを高速フォトディテクタで捕捉し、その出力を RF スペクトラムアナライザで観測することで、ほぼ設計値どおりの繰り返し周波数約 103 MHz を有するパルスレーザ発振が得られていることを併せて確認した(図 3)。

(3) フェムト秒レーザ光源と回折格子を組み合わせた多元情報マルチビーム生成光学系を設計した。溝間隔 600 本/mm、ブレイズ角約 28.4° の反射型回折格子を用い、これにコリメートレーザ光/集束レーザ光を入射する 2 形式のマルチビーム生成光学系を検討した(図 4)。図 4(a)の光学系を構築し、ビームプロファイラを用いた観測(図 5(a))、およびビーム拡がり方向に光ファイバ端を走査してビームを捕捉し、ピーク周波数を検出した結果から、設計どおりのマルチビームが得られることを明らかにした(図 5(b))。

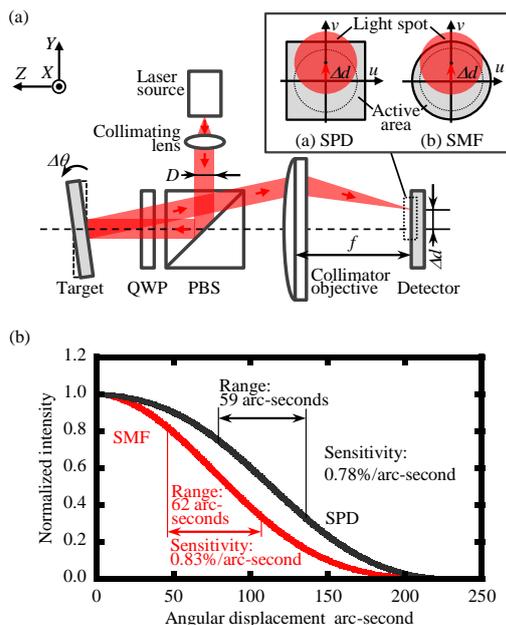


図 2 (a) 光ファイバー角度センサ光学系モデル (b) 角度センサ出力の数値解析計算結果

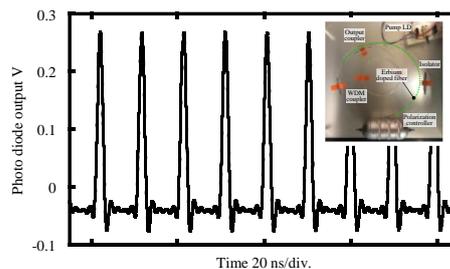


図 3 構築した光ファイバーベースのフェムト秒レーザ光源と検出した超短パルス発振

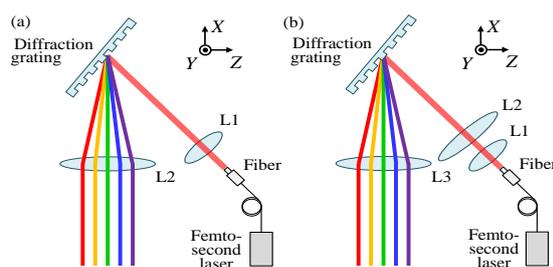


図 4 マルチビーム生成光学系 (a) コリメート光入射方式 (b) 収束光入射方式

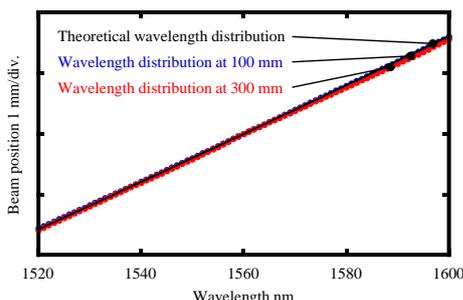
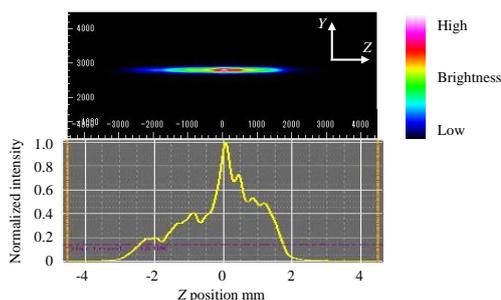


図 5 (a) ビームプロファイラによるマルチビーム観測結果 (b) 走査ファイバ検出器で確認したマルチビームの拡がり

(4) 先に構築したマルチビーム生成光学系を有するとともに、シングルモードファイバーと光スペクトラムアナライザで構成する受光ユニットを有する光学式角度センサ光学系を設計した(図6). マルチビーム生成光学系は、回折格子にコリメート光を入射する図4(a)のものを用いた. なお、受光に用いるシングルモードファイバーは、広範囲の角度検出に向けて、微動圧電(PZT)ステージに搭載して図中X方向の走査ができるよう構成した.

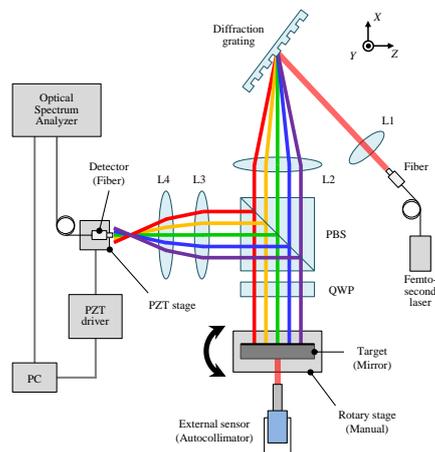


図6 実験装置概略図

(5) 図6の設計をもとに装置光学系(図7)を構築し、その基礎特性を評価した. 傾斜ステージに搭載した平面ミラーを測定対象として、生成したマルチビームを平面ミラーに垂直入射した場合に反射光群をファイバ端で検出できるように調整した後、平面ミラーに角度変位を与え、ファイバ端に捕捉される反射光の光スペクトル変動を観察した. なお、平面ミラーの角度変位は外部センサ(光学式オートコリメータ)で測定した. 光周波数域での観測により、反射光群中に含まれる各モードのファイバ端上での位置変動を検出できることを実験的に確認し(図8)、構築した光学系が角度センサとして機能することを実験的にも実証した. また、コリメート光入射型のマルチビーム生成光学系に加え、収束光入射型のマルチビーム生成光学系も試作し、マルチビームが生成可能であることを実験的に確認するとともに、そのマルチビーム角度センサとしての基礎特性を実験的に評価し、角度センサとして機能することを実験的に確認した.

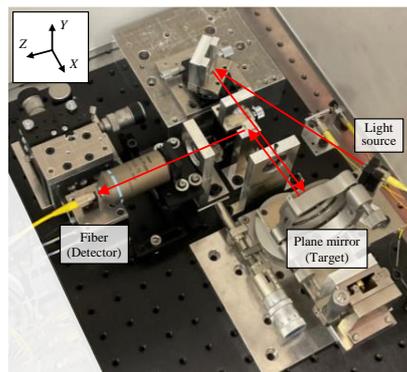


図7 装置光学系写真

(6) 各モードにより得られる角度情報(スロープマップ)から自由曲面形状を復元するアルゴリズムを構築した. マルチビーム生成ユニット設計値をもとに得られるビーム間隔を利用するとともに、受光ユニットへの捕捉光斜入射の影響を低減するための補正式を適用した自由曲面形状復元アルゴリズムを構築した. 積分演算により測定対象の表面プロファイルを算出する計算コードを生成し、その妥当性を数値シミュレーションで検証した.

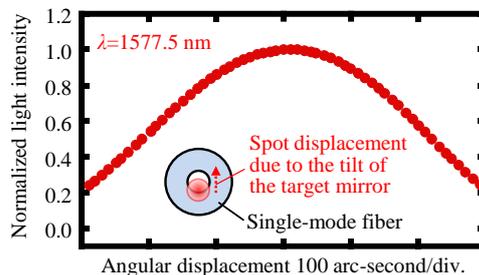


図8 平面ミラー角度変位に伴う捕捉モードの強度変化

(7) 測定対象として凹面鏡を用い、これにマルチビームを照射して得られたスロープマップをもとに、開発した自由曲面形状復元アルゴリズムを用いて測定対象の面形状復元を試みた(図9). 市販のレーザ干渉プロファイル測定機で得られた測定結果との比較を行い、双方の手法で得られるプロファイル測定結果により一致が見られることを明らかにした.

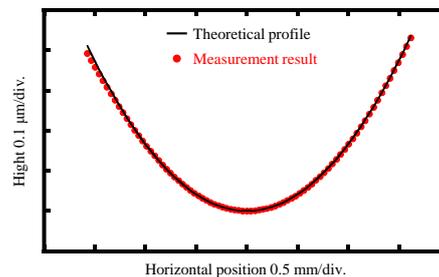


図9 凹面鏡プロファイル測定結果

(8) これらの理論的・実験的検討により得られた結果から、本研究で提案した「次元変換型マルチビーム角度センサ」によって、傾斜角(ローカルスロープ)およびビーム位置(ビーム間隔)という空間領域の多元情報を周波数領域で一括取得できることが実証され、その情報を活用した高精度自由曲面形状計測の実現可能性が見いだされた.

(9) 角度情報を利用した高精度計測手法は国内外において注目を集めており、その測定高速化および測定不確かさの低減が課題となっている. 今後、光学系の拡張により本手法での2軸方向のスロープマップ同時取得が実現すると、学術的・工業的に高いインパクトを与える技術になるものと期待される.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件／うち国際共著 1件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Shota Takazono, Yuki Shimizu, Hiraku Matsukuma, Yuri Kanda, Hajime Inaba and Wei Gao	4. 巻 1
2. 論文標題 An Optical Angle Sensor Based on the Laser Autocollimation employing a Mode-locked Femtosecond Laser Source and a Single Mode Fiber Detector	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of the 14th International Symposium on Measurement Technology and Intelligent Instruments (ISMTII2019)	6. 最初と最後の頁 Paper ID: 26
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Shimizu Yuki, Takazono Shota, Kanda Yuri, Matsukuma Hiraku, Gao Wei, Inaba Hajime	4. 巻 1
2. 論文標題 Development of an Optical Angle Sensor With a Mode-Locked Femtosecond Laser Source for Surface Profile Measurement	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings Series: International Conference on Leading Edge Manufacturing/Materials and Processing	6. 最初と最後の頁 LEMP2020-8501
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1115/LEMP2020-8501	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Shimizu Yuki, Chen Liang Chia, Kim Dae Wook, Chen Xiuguo, Li Xinghui, Matsukuma Hiraku	4. 巻 32
2. 論文標題 An insight on optical metrology in manufacturing	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Measurement Science and Technology	6. 最初と最後の頁 42003
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1361-6501/abc578	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計11件（うち招待講演 3件／うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Shota Takazono, Yuki Shimizu, Hiraku Matsukuma, Yuri Kanda, Hajime Inaba and Wei Gao
2. 発表標題 An Optical Angle Sensor Based on the Laser Autocollimation employing a Mode-locked Femtosecond Laser Source and a Single Mode Fiber Detector
3. 学会等名 The 14th International Symposium on Measurement Technology and Intelligent Instruments (ISMTII2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 清水 裕樹, 真野 和樹, 松永 雅教, 村上 佑記, 松隈 啓, 高 偉
2. 発表標題 非直交型2軸ロイドミラー干渉計による2軸スケール回折格子パターンニング -偏光制御ユニット改良によるパターン高精度化-
3. 学会等名 2019年度精密工学会秋季大会学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 高園翔大, 清水裕樹, 松隈 啓, 神田悠利, 稲場肇, 高偉
2. 発表標題 フェムト秒レーザを用いた光学式角度センサによる表面形状計測に関する研究
3. 学会等名 2019年度精密工学会東北支部学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Xin XIONG, Hiraku MATSUKUMA, Yuki SHIMIZU, Wei GAO
2. 発表標題 Self-calibration of Fizeau interferometer and linear scale in Littrow configuration
3. 学会等名 2019年度精密工学会東北支部学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 馬 旭, 神田 悠利, 松隈 啓, 清水 裕樹, 高 偉
2. 発表標題 高感度光学式角度センサに関する研究
3. 学会等名 2019年度精密工学会東北支部学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 清水 裕樹, 高園 翔太, 中村 一貴, 松隈 啓, 高 偉
2. 発表標題 フェムト秒レーザー光源を用いた角度センサに関する研究-シングルモードファイバの適用-
3. 学会等名 2018年度精密工学会春季大会学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 高園 翔太, 清水 裕樹, 松隈 啓, 高 偉
2. 発表標題 光学式角度センサを用いた表面形状計測に関する研究 - 光ファイバを受光部に用いた角度センサに関する検討 -
3. 学会等名 2018年度精密工学会東北支部学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yuki Shimizu
2. 発表標題 Optical Metrology with a Mode-Locked Femtosecond Laser and Grating Reflectors
3. 学会等名 International High-level Forum on High-end Measurement Instruments & The 11th International Symposium on Precision Engineering Measurements and Instrumentation (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yuki Shimizu
2. 発表標題 Optical Angle Measurement with a Mode-Locked Femtosecond Laser
3. 学会等名 International Symposium on Precision Engineering and Sustainable Manufacturing (PRESM 2020) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 清水裕樹
2. 発表標題 モード同期フェムト秒レーザを用いた「つながる」高精度角度計測
3. 学会等名 日本機械学会 IIP2021 情報・知能・精密機器部門(IIP部門)講演会 若手研究者招待講演(招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 清水裕樹, 高園翔太, 神田悠利, 松隈啓, 稲場肇, 高偉
2. 発表標題 フェムト秒レーザ光源を用いた角度センサによる形状計測に関する研究-マルチビーム角度センサの設計と基礎特性評価-
3. 学会等名 2021年度精密工学会秋季大会学術講演会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 清水裕樹	4. 発行年 2020年
2. 出版社 日本機械学会	5. 総ページ数 -
3. 書名 機械工学年鑑2020 (15. 加工学・加工機器 15.8 加工計測)	

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>東北大学 大学院工学研究科 ファインメカニクス専攻 高・清水・松隈研究室 http://web.tohoku.ac.jp/nanometrology/index.html 高・清水研究室 / 精密ナノシステム研究センター http://web.tohoku.ac.jp/nanometrology/</p>

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
研究協力者	高 偉 (Gao Wei)	東北大学 (11301)	同一分野所属 教授
研究協力者	高園 翔太 (Takazono Shota)	東北大学 (11301)	大学院生

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関