

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 3 年 6 月 16 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2020

課題番号：19K14857

研究課題名（和文）角度時間変換型オートコリメーション法による精密角度計測

研究課題名（英文）Precision angle measurement by conversion from time to angle based on autocollimation

研究代表者

松隈 啓 (Matsukuma, Hiraku)

東北大学・工学研究科・助教

研究者番号：90728370

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、分解能と測定範囲のトレードオフ関係を破る新しい原理のオートコリメーション法を提案する。精密計測分野で培われてきた角度精密計測手法であるオートコリメーション法と、これまで精密計測分野ではほとんど用いられていない、波長可変レーザー技術の融合による学際的開拓である点が本研究の独自の点である。そのために、電流変調型半導体レーザーシステムの開発、および分光システムの開発、さらに角度センサシステムの構築を通して、オートコリメータと呼ばれる既存の角度センサを拡張し、新たな検出原理を創出した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の意義は第一に、精密計測分野ではほとんど用いられていない波長掃引型のレーザーを用いて、角度計測における分解能と測定範囲のトレードオフ関係を破る新しい原理を創出したことにある。これにより、測定範囲の制限を波長掃引レーザーで打ち破ることができることを示した。さらに、波長掃引型のレーザーの用途を示したことで、精密計測学分野境界での光学計測法の裾野を広げたことが波及効果として考えられ、この点については今後の発展を期待し、社会的意義として位置付ける。

研究成果の概要（英文）：In this study, we propose a new autocollimation method that breaks the trade-off between resolution and measurement range. The unique point of this research is that it is an interdisciplinary development by combining the autocollimation method, which is an angle precision measurement method cultivated in the field of precision measurement, and the wavelength tunable laser technology, which has rarely been used in this field. For this purpose, we developed a current-modulated semiconductor laser system, a spectroscopic system, and an angle sensor system to extend the existing angle sensor called an autocollimator and create a new detection principle.

研究分野：光工学

キーワード：半導体レーザー 角度計測

### 1. 研究開始当初の背景

角度は長さとともに物体の形状、運動を記述する最も基本的なパラメータである。精密位置決め装置の角度誤差測定、光学系のアライメントや機械部品・光学部品等の形状計測などにおいて、角度の精密計測が必要な場合、オートコリメーション法が用いられる。図1に従来のレーザオートコリメータの概略図を示す。光源からの光を平行ビームにして、平面反射鏡に入射する。反射ビームは対物レンズによって、光スポットとして検出器に集光される。平面反射鏡の回転変位 $\Delta\theta$ に伴い、光スポットは焦点面内で移動する。光スポットの変位量 $\Delta d$ から $\Delta\theta$ を求めることができる。

光スポットの検出方法は、1次元検出器か2次元検出器による検出に大別される。表1は光スポットの検出方法とその特性を表している。現状では、測定範囲が広範囲である CCD 等の2次元検出器を用いた装置が主流となっているが、計測速度の遅さと装置の大きさの観点から、加工中計測には、ほとんど用いられていない現状がある。しかし、半導体露光装置等の精密位置決めが必要な加工中計測では、リアルタイムの精密角度計測に潜在的な需要がある[1]。フォトダイオード等をもちいた1次元検出器によるオートコリメーション法は、2次元検出器に比べて、計測速度と装置のコンパクトさにおいて、2次元検出器を圧倒している[2-4]。しかし、高分解能であればあるほど測定範囲で劣る難点がある[4]。(後述)

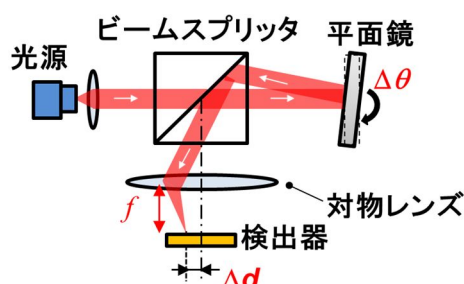


図1 オートコリメータの概略図

表1 光スポットの検出方法とそれぞれの特性

	1次元検出器 フォトダイオードなど	2次元検出器 CCDなど
分解能(角度秒 $''$ )	0.001	0.005
測定範囲(角度秒 $''$ )	~ 10	~ 1000
計測速度	> 1 kHz	~ 10 Hz
検出ユニットサイズ	~ 20 mm	~ 300 mm

### 2. 研究の目的

分解能と測定範囲のトレードオフ関係を破る新たな検出原理に基づいたオートコリメーション法を実現することを本研究の目的とする。

精密計測分野で培われてきた角度精密計測手法であるオートコリメーション法と、これまで精密計測分野ではほとんど用いられていない、原子分子分光学とレーザ技術の融合による学際的開拓である点は独自のである。また、オートコリメーション法で問題となっている測定範囲の不利をレーザ波長掃引により解決する点は創造的と言える。

### 3. 研究の方法

1次元検出器を用いたオートコリメーション法の問題点である、狭い測定範囲を克服する方法として、図2の方法を提案する。

波長可変半導体レーザ (Tunable diode laser: TDL) を用いる点, 回転体に取り付けられた光学素子がミラーから回折格子に変更されている点が従来法と異なる。TDL からの光ビームは周期的に波長を掃引しながら, 回折格子に入射する。回折格子入射時に, 波長に応じて回折角が決まる。従って, 時間的にはレーザ光の回折角が掃引され, フォトダイオード上のレーザ光スポット位置が掃引される。掃引幅の分だけ, 角度の測定範囲が広がるのが最も重要な点である。現実的な TDL の波長掃引幅 0.5 nm に対して光スポット掃引幅は 500 角度秒程度に相当することから, 高分解能を保ち 1 ケタ以上の測定範囲拡大が見込まれる。

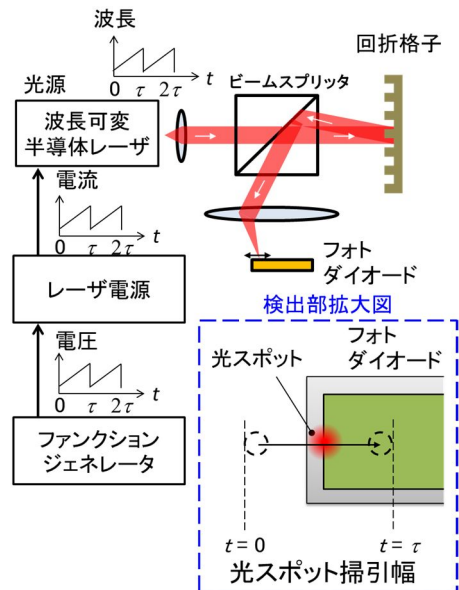


図2 狭い測定範囲を克服する  
オートコリメーション法

#### 4. 研究成果

2019 年度:

(1) 電流変調型半導体レーザシステムの開発, および (2) 分光システムの開発を行った。

(1) 電流変調型半導体レーザシステムの開発: まず, 電流変調型半導体レーザシステムの開発を行った。半導体レーザ駆動電源装置, 半導体レーザを購入, さらにそれらの最適配置を CAD により設計し, 電流変調型半導体レーザシステムを構築した。さらに, ファンクションジェネレータを購入し, 半導体レーザ駆動電源装置に接続することで, 電流変調型半導体レーザシステムの構築を達成した。これらの性能は下記の分光システム開発で確認された。

(2) 分光システム開発: ファブリーペロー共振器による分光システム開発を行った。光学系の最適化を行うことで, 開発したレーザシステムのレーザ光を精密分光できるシステムを構築した。上記の電流変調型半導体レーザシステムより出射したレーザ光を導光することで, 実際に分光システムとして機能することが確かめられた。さらに, 電流変調型半導体レーザシステムを 2020 年度に開発する予定の角度センサに用いられるよう, 縦シングルモードとなる条件を探索し, その周波数変調実験を行った。

2020 年度:

角度計測部: 角度計測部には, 従来光学式角度センサとして用いられているオートコリメーション法を適用した。オートコリメータを製作するために, 理想的な条件下での検出感度をあらかじめ光学シミュレーションにより求め, 0.1 角度秒 (1 角度秒は 3600 分の 1 度) 程度になるように設計を行った。製作したオートコリメータを用いてあらかじめ研究室で所有していたレーザにより所望の 0.1 角度秒の分解能を持つことを確かめた。

以上の通り, 研究の完成に必要な 3 つの要素を独立に構築することに成功した。一方で, 2019 年度末からの新型コロナウイルスの影響により, 最終的な統合実験は未完のままであり, 本システムの最終形態に向けて今後更なる検証を行う。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Hiraku Matsukuma, Yun Asumi, Masashi Nagaoka, Yuki Shimizu, Wei Gao	4. 巻 67
2. 論文標題 An autocollimator with a mid-infrared laser for angular measurement of rough surfaces	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Precision Engineering	6. 最初と最後の頁 89-99
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.precisioneng.2020.09.022	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 Hiraku Matsukuma, Shuhei Madokoro, Wijayanti Dwi Astuti, Yuki Shimizu, and Wei Gao	4. 巻 2
2. 論文標題 A New Optical Angle Measurement Method Based on Second Harmonic Generation with a Mode-Locked Femtosecond Laser	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Nanomanufacturing and Metrology	6. 最初と最後の頁 187-198
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s41871-019-00052-4	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 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 松隈 啓, 清水 裕樹, 高 偉
2. 発表標題 光周波数コムによる精密角度計測
3. 学会等名 一般社団法人レーザー学会学術講演会 第40回年次大会（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 松隈啓, 間所周平, 清水裕樹, 高偉
2. 発表標題 高強度レーザーパルスによる非線形効果を用いた角度計測法に関する研究
3. 学会等名 2019年度精密工学会春季大会学術講演会論文集
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hiraku Matsukuma, Shuhei Madokoro, Masaru Nakao, Yuki Shimizu, Wei Gao
2. 発表標題 An optical angle sensor based on second harmonic generation of a mode-locked laser
3. 学会等名 OPTICS & PHOTONICS International Congress 2019 (Optical Technology and Measurement for Industrial Applications (OPTM2019)) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hiraku Matsukuma, Ryo Ishizuka, Masaya Furuta, Xinghui Li, Yuki Shimizu, Wei Gao
2. 発表標題 Design and Testing a High-Resolution Six-Degree-of-Freedom Surface Encoder
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

〔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

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