

令和 6 年 5 月 7 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2021～2023

課題番号：21H01222

研究課題名(和文)同時フィルタリングデュアル光コム非線形分光法によるトレーサブルな超精密角度計測

研究課題名(英文)Traceable ultra-precision angle measurement by simultaneous-filtering dual-comb nonlinear spectroscopy

研究代表者

松隈 啓 (Matsukuma, Hiraku)

東北大学・工学研究科・准教授

研究者番号：90728370

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,400,000円

研究成果の概要(和文)：2021年度：光周波数コムの設計・製作。繰り返し周波数が可変の光周波数コムを新たに製作した。これはデュアルコム分光法において、繰り返し周波数を自由に設定できる法が実験を行いやすいためである。さらに、位相同期ループ制御により光周波数の安定化を行った。  
2022年度：デュアルコム分光による角度計測。デュアルコム分光を光角度計測法に適用した。  
2023年度：自律校正法の確立。2022年度までに達成したデュアルコム分光による角度計測法に対して自律校正法を確立した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

角度は長さとともに物体の形状、運動を記述する基本的な幾何の要素である。精密加工システムの角度誤差測定、機械部品・光学部品等の形状計測、プローブ顕微鏡のたわみ角度測定など様々な生産・加工分野において角度の精密計測が必要となる。また、サブ100ピコメートル精度が求められる次世代生産においては、測定の信頼性を国家標準に照らして保証する体系(トレーサビリティ体系)の確立が求められる。本研究は、デュアルコム分光を用いて、長さの国家標準に対して、トレーサブルな角度計測を実現し、精密なものづくりに対して利用できる手法を提案した。ナノテクノロジーを支える手法を考案したことは十分に社会的意義があると考えている。

研究成果の概要(英文)：FY2021: Design and fabrication of optical frequency comb. An optical frequency comb with a variable repetition rate was newly fabricated. This is because it is easier to conduct experiments in dual comb spectroscopy when the repetition rate can be freely set. Furthermore, the optical frequency was stabilized by phase-locked loop control.  
FY2022: Angle measurement by dual comb spectroscopy. Dual comb spectroscopy was applied to the optical angle measurement method.  
FY2023: Establishment of autonomous calibration method.

研究分野：精密計測学

キーワード：光周波数コム デュアルコム分光 角度計測 自律校正

## 1. 研究開始当初の背景

角度は長さとともに物体の形状、運動を記述する基本的な幾何の要素である。精密加工システムの角度誤差測定、機械部品・光学部品等の形状計測、プローブ顕微鏡のたわみ角度測定など様々な生産・加工分野において角度の精密計測が必要となる。また、サブ100ピコメートル精度が求められる次世代生産においては、測定の信頼性を国家標準に照らして保証する体系(トレーサビリティ体系)の確立が求められる。近年、国家標準と遠隔地で用いられる長さの基準を精密に繋ぎトレーサブルな測定を可能とするために、協定世界時に同期した光周波数コム装置が用いられる。人工衛星搭載の原子時計から得た周波数で、光周波数コム(以下光コムと呼ぶ)の光周波数を制御することで、トレーサブルな測定が可能となる。光コムとは、精密に安定化された位相同期超短パルスレーザーのスペクトルである。光スペクトルは等間隔 $f_{\text{rep}}$ に並んだ櫛状スペクトルを持つ。

申請者らは、光コムを用いた角度計測法について、いくつかの精密計測法を原理実証してきた。光コムを角度スケールである回折格子に入射することで、光コムの持つ広い光スペクトルが角度ごとに分けられる。これを光ファイバなどの検出器上にレンズで集光すると角度と一対一対応した周波数の光が帯状に並び、回折格子の回折角度に対応した応答スペクトル(角度応答コムスペクトル)が検出される。この原理で従来の光学式角度計測法の計測領域を20倍向上し角度測定範囲 $6^\circ$ を得る光コムオートコリメータを創出した(Precision Engineering 誌)。一方で、この手法は分光器による計測であることから、周波数が極めて近い縦モード1本ごとを区別して測定することは回折限界のためにできないこと(標準的な光コムで縦モード間隔は100MHz程度)、光周波数のトレーサビリティが分光器によって切れ、トレーサブルな計測とならないことが課題として残っていた。

上記を解決するための手段として、縦モードを区別して測定する、デュアルコム分光法がある。デュアルコム分光は2本の光コムビームのうち一方(測定光)を計測対象(ここでは回折格子)に照射して応答スペクトルを得て、もう一方のビーム(参照光)と干渉させ、応答スペクトルをうなりスペクトルに変換して計測する手法であり、ラジオ波領域の電場振動であるため、縦モードを区別して測定できる。うなり周波数スペクトルは応答スペクトルと参照光スペクトルを掛け合わせた形状となる。

## 2. 研究の目的

図1に本研究の目的を図示する。具体的な研究の目的は下記の通りである。

【1】デュアルコム分光に基づく超精密角度計測法を確立し、光コムの縦モードと計測対象の角度変位が一対一対応する国家標準にトレーサブルな角度計測を実現する。

【2】先行研究の回折格子・集光レンズ・検出光ファイバで得られる角度応答コムスペクトルはスペクトルフィルタとしても機能する。すなわち、参照光を測定光と同じ光路へ入射することで、参照光自体が測定光の角度応答スペクトルと常に同じ形状のスペクトルを持ち、これが測定光のスペクトルを同時に追いかける動的フィルタとなる。この「同時フィルタリング」原理から、デュアルコム分光法の計測領域を広げ、光学フィルタの帯域制限を受けない実用的な角度計測法を提案する。

【3】本提案手法「同時フィルタリングデュアルコム非線形角度計測法」に対し，±1 次の2本の回折光による計測をリンクすることで，自律的校正手法を確立する．

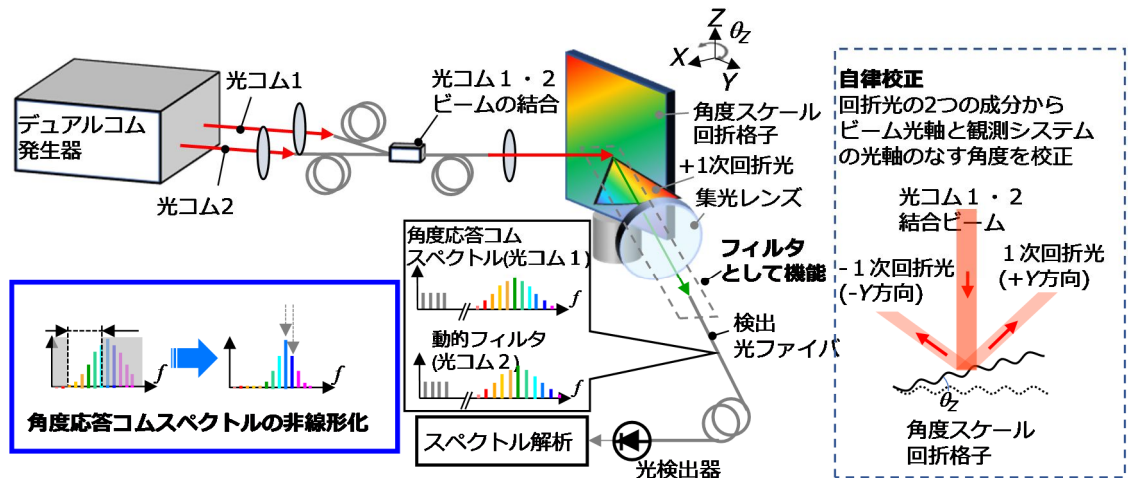


図1 同時フィルタリングデュアルコム非線形角度計測法による広角度範囲計測と応答スペクトル関数の非線形化，2ビームによる自律校正(右)

### 3. 研究の方法

2021年度～2023年度にわたり，およそ下記のような方法で研究を遂行した．

2021年度：光周波数コム設計・製作

繰り返し周波数が可変の光周波数コムを新たに製作した．これはデュアルコム分光法において，繰り返し周波数を自由に設定できる法が実験を行いやすいためである．さらに，位相同期ループ制御により光周波数の安定化を行った．

2022年度：デュアルコム分光による角度計測

デュアルコム分光を光角度計測法に適用した．

2023年度：自律校正法の確立

2022年度までに達成したデュアルコム分光による角度計測法に対して自律校正法を確立した．

### 4. 研究成果

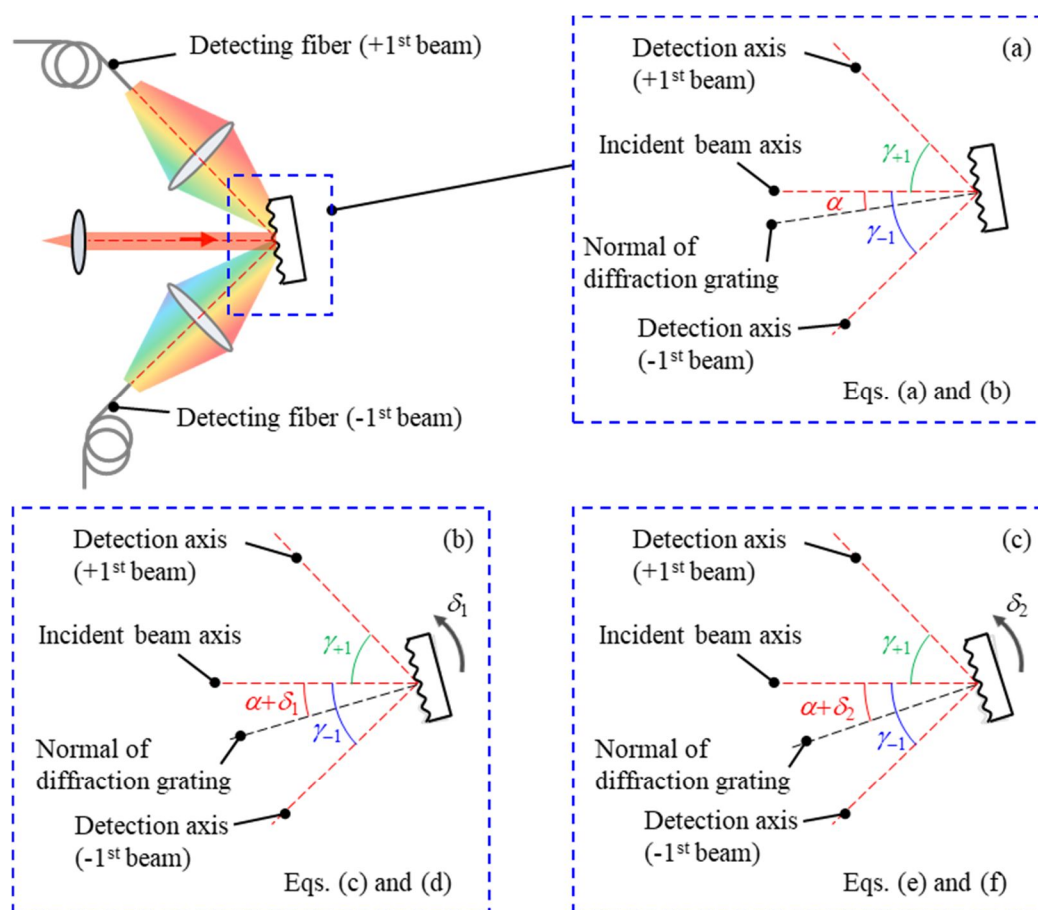
各年度の研究成果をまとめる．

2021年度：当初，レーザー発振がうまくいかずやや時間がかかったが，共振器内の反射による寄生発振が原因であることを突き止め，年度内に発振を成功した．さらに，研究開始前より確立している位相同期ループ制御による光周波数安定化に成功した．

2022年度：デュアルコム分光を行う手法を確立した．光のうなり自体は特に問題なく観測することができた．角度計測用の回転ステージ制御機構の開発・プログラムによる自動制御などを行った．さらに本手法の感度や分解能評価を行った．この段階で論文を1報投稿することを予定していたが，同様の研究（厳密には若干システムは異なる）をおこなっている海外の研究グループが先に論文を出したことから，論文の出版をあきらめざるを得なくなった．

2023年度：デュアルコム分光による角度計測の自律校正法を確立した。我々の計測システムでは，検出器の設置角度や，回折格子ピッチは未知のパラメータであるが，これらをすべて外部の参照標準なしに決定することが好ましいと考えた。そこで，図2に示すようなシステムにより，自律校正法を実施し，上記のパラメータが外部標準なしに決定できることを示した。研究提案時には，回折格子ピッチまでを決定することは困難と考えていたが，計算手法の高度化により，決定が可能になった。

本手法について2024年4月に特許出願を行った他，2024年5月現在，論文投稿の準備中である。



$$(a) \sin \alpha - \sin(\gamma_{-1} - \alpha) = -\frac{\lambda_{-1}}{ng}$$

$$(b) \sin \alpha + \sin(\gamma_{+1} + \alpha) = \frac{\lambda_{+1}}{ng}$$

$$(c) \sin(\alpha + \delta_1) - \sin(\gamma_{-1} - \alpha - \delta_1) = -\frac{\lambda'_{-1}}{ng}$$

$$(d) \sin(\alpha + \delta_1) + \sin(\gamma_{+1} + \alpha + \delta_1) = \frac{\lambda'_{+1}}{ng}$$

$$(e) \sin(\alpha + \delta_2) - \sin(\gamma_{-1} - \alpha - \delta_2) = -\frac{\lambda''_{-1}}{ng}$$

$$(f) \sin(\alpha + \delta_2) + \sin(\gamma_{+1} + \alpha + \delta_2) = \frac{\lambda''_{+1}}{ng}$$

図2 本手法による自律校正法の概要

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔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, 池田 翔, 佐藤 遼, 高 偉
2. 発表標題 デュアルコム分光オートコリメーション による精密角度変位計測
3. 学会等名 2023年度精密工学会春季大会学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Kakeru Ikeda, Hiraku Matsukuma, Yuki Shimizu, Wei Gao
2. 発表標題 Measurement of the angle of a small prism by a mode-locked femtosecond laser autocollimator
3. 学会等名 The 7th International Conference on Nanomanufacturing (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 池田 翔, 松隈 啓, 清水 裕樹, 高 偉
2. 発表標題 マイクロ光学素子の角度計測に関する研究
3. 学会等名 2021年度精密工学会東北支部学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hiraku Matsukuma, Kakeru Ikeda, Ryo Sato, Wei Gao
2. 発表標題 Autocollimation employing optical frequency comb
3. 学会等名 OPTICS & PHOTONICS International Congress 2023 (Optical Technology and Measurement for Industrial Applications (OPTM2023)) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 光学式角度測定装置用校正装置、光学式角度測定装置向け校正方法	発明者 松隈 啓、井口 颯 太、高 偉	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、PCT/JP2024/ 16268	出願年 2024年	国内・外国の別 外国

〔取得〕 計0件

〔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
---------	---------