

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 27 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2015

課題番号：26630087

研究課題名(和文)大型構造物を対象としたコムセルフビート距離計を用いた粗面の三次元絶対形状測定

研究課題名(英文)Absolute profile measurement for large scale construction using comb self beat distance sensor

研究代表者

高増 潔 (Takamasu, Kiyoshi)

東京大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：70154896

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)：コムレーザーのセルフビート信号を用いて、粗面までの絶対距離計測の手法を提案した。2台のコムレーザーによりセルフビート信号をビートダウンすることで、サイクリックエラーなしに位相信号を所得することができた。表面粗さ10 μm 以上の円筒形状の粗面の絶対形状測定を、3 mの距離から測定波長83 mmで数十マイクロメートルの精度で行えた。さらに、セルフビートの2つの周波数(3.5 GHzおよび3.6 GHz)を用いることで、合致法により測定波長以上の絶対距離測定が可能であった。

研究成果の概要(英文)：The absolute distance measurement method to rough surface using self-beat signal of the comb laser is proposed. Phase signal of self-beat without cyclic error can be obtained using beat down method by two comb lasers. The absolute profile of a cylinder with rough surface of roughness over 10 μm can be measured with accuracy of several tens μm from the 3 m distant position with measuring wave length of 83 mm. Moreover, the absolute distance over measuring wave length can be decided using coincident method of two measuring frequencies (3.5 GHz and 3.6 GHz).

研究分野：精密測定

キーワード：コムレーザー 距離測定 粗面 三次元測定 大型構造物

1. 研究開始当初の背景

2009年7月にフェムト秒レーザを利用した光周波数コム装置が、計量法で定める長さの国家標準(特定標準器)となった。従来の特定標準器より精度が300倍になっただけでなく、長さ計測を直接的に計量トレーサビリティ制度へリンクすることができるようになった。開発したフェムト秒コム距離計は、高精度(例えば10mを0.1μm)、高速に絶対距離を計測できる新しいシステムであり、国家標準と直接つながっている。

この距離計を粗面の三次元絶対形状測定へ対応させることで、生産現場において大型機械部品など全ての対象のトレーサブルな粗面の三次元絶対形状測定を可能にするという挑戦的な提案である。

日本が優位性を持つ車輛、航空機、大型タービン、工作機器、プラントなどの生産現場で、全ての対象の三次元絶対形状測定(1m~10mのスケールで10μmの絶対形状測定)ができれば、工作機器等の形状、組立部品形状の管理、大型構造物の形状測定などを簡単に絶対的、三次元的かつ低価格で行うことができ、日本の次世代のものづくりの高度化、環境負荷の低減、安全安心の確保などを飛躍的に推進することができる。

2. 研究の目的

今後の日本のものづくりにおいて世界的な競争力を維持するには、より高精度なものづくりが必要で、その大きな要素が光計測の応用である。光計測を生産環境に導入するには、比較的長い距離(1mから10m)から粗面形状を高い精度(マイクロメートルオーダ)で簡単に低価格で測定するための技術的が必要である。従来の三次元スキャナーは高速であるが、絶対精度が低く、高精度なものづくりには利用できない。

新しい技術(フェムト秒コム距離計)は、光を反射するターゲット(ミラーやコーナキューブプリズム)に対しては、高精度の測定が可能であるが、粗面の形状測定は不可能である。そこで、図1に示すコムレーザのセルフビートを利用した位相計測による距離測定を導入した。しかし、高い周波数の位相計測にはビートダウンが必要であるが、周波数発振器を使ったビートダウンでは測定精度に限界がある。

そこで、2つ目のコムレーザを用いたビートダウンを新しく導入し、上記の問題の解決をめざす。2台のコムレーザを用いた粗面形状測定計は、簡単に大型機械部品、機械構造物の三次元絶対形状測定が可能であり、これをスキャナーと組み合わせることで、トレーサブルな絶対形状測定が可能となる。

研究目的を以下に示す。

- コムレーザのセルフビートを2つ目のコムレーザによりビートダウンし、位相計測をするコムセルフビート距離計を開発し、実用化のフィジビリティを検討す

る。

- 三次元化のためのスキャナー開発の基礎実験を行い、実用化への課題を抽出する。

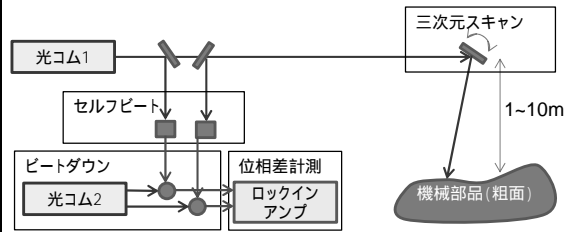


図1 セルフビートを利用した距離測定

3. 研究の方法

コムレーザのセルフビートは広い周波数領域に分布するため、適当ないくつか(2種類あるいは3種類)のセルフビートを利用することで、複数の合成波長による変調測距が可能となる。従来の方法では、セルフビートを周波数発振器によってビートダウンして位相を測定していた。しかし、周波数発振器の位相雑音の影響でサイクリックエラーが発生し、高精度な測定ができなかった。

図2は、2台のコムレーザを利用した粗面測定の実験装置構成である。測定対象面は粗面であるため、放物面鏡を利用し粗面からの散乱光を効率よく検出器に集める。また、参照面を用意することで装置の全体的なドリフトを補正することが可能となる。この構成では、1次元の高精度な計測の基礎的な実験を想定し、低価格化の可能性、ロバスト性などのフィジビリティを確認する。

世界的にフェムト秒レーザを測距に利用する研究は、日本が先行しているが、低価格化、工場での利用、粗面計測、三次元化の研究はまだ行われていない。このように、本研究の着想は独創的かつ斬新で、前述したように、領域を越えた革新的なシステムとして、次世代の生産環境にイノベーションをもたらすことができる。

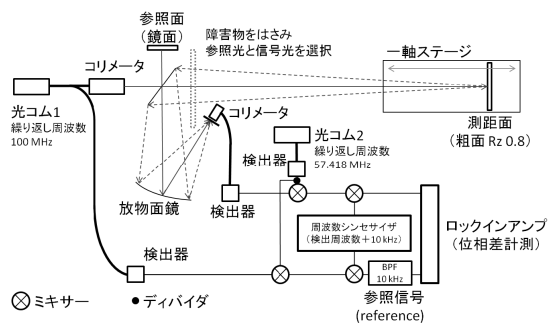


図2 粗面測定の実験装置構成

4. 研究成果

(1) 粗面の形状測定

2台のコムレーザを利用した測定システムとして、図3に示す構成を採用した。この構成では、コム1(comb1)からの光を測定対

象 (measured object) に投影し、反射光を光センサ (detector) で受光する。コム 1 の光は同時に別の光センサに入力し、この 2 つの光センサの信号の位相差を検出する。位相差を検出するために、もう一台のコム 2 (comb2) の信号を利用してビートダウンを行った。当初の構成に対して、音響光素子 (AOM) を使うことで回路の簡便化とノイズの減少を達成できた。

図 4 にこの装置を利用して粗面形状を測定した例を示す。実験条件は以下のようなものである。

- 測定面までの距離：約 3 m
- 測定に利用したビート周波数：3.6 GHz (波長に換算すると 83.27568 mm)
- ロックインアンプの時定数：100 ms
- 測定対象物：直径約 85 mm の円筒面、表面粗さ Ra 10 μm

この条件において、粗面の形状がよく測定できた。測定結果を図 5 に示す。

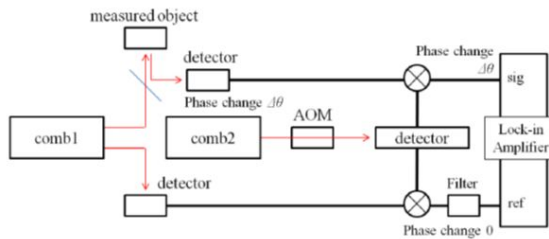


図 3 実際に利用した位相検出回路

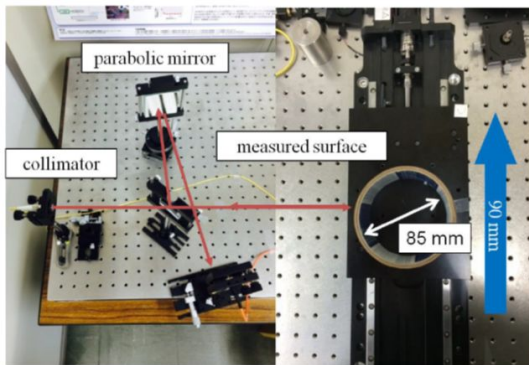


図 4 粗面の測定装置の写真

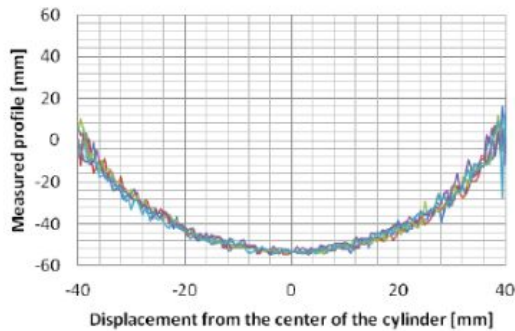


図 5 粗面の形状測定例

(2) 絶対距離計測

形状測定では、ビート信号の波長として 83 mm の条件を利用した。この場合は、形状が不連続で 82 mm 以上の段差などがあると絶対距離の測定ができない。そこで、図 6 で示す合致法によって絶対距離を計測した。合致法では、複数の波長を利用することで、それぞれの波長で行った位相計測の結果を合成して、絶対距離測定が行える。

図 7 の配置で、距離測定を 2 種類のビート周波数 (3.5 GHz および 3.6 GHz) で行った。この 2 つの波長の合成波長は 3 m となり、3 m までの絶対距離測定が可能な構成となっている。表 1 に、50 mm, 75 mm, 100 mm を測定した場合の測定結果と標準偏差を示す。合致法により絶対距離が数十 μm の標準偏差で測定できていることが分かる。

実験条件は、以下のようなであった。

- 測定面までの距離：50 mm, 75 mm, 100 mm
- 測定に利用したビート周波数：3.5 GHz および 3.6 GHz (合成波長 3 m)
- ロックインアンプの時定数：100 ms
- 測定対象物：平面、表面粗さ Ra 1.6 μm

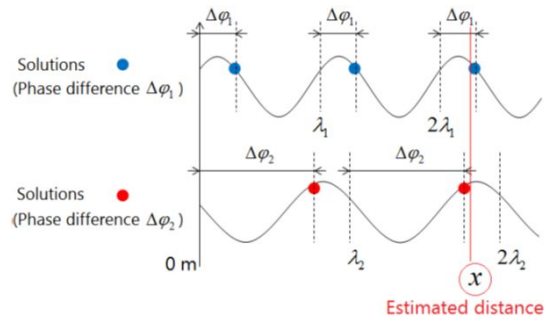


図 6 合致法による絶対距離決定

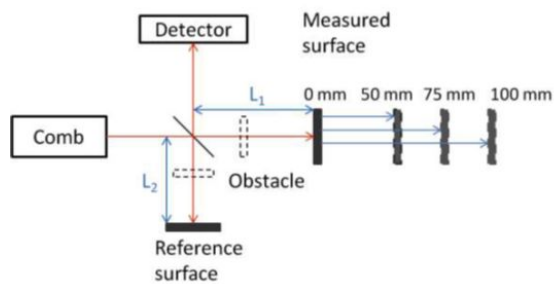


図 7 合致法による絶対距離測定実験の構成

表 1 測定位置と測定結果 (平均, 標準偏差)

測定位置 (mm)	測定結果平均 (mm)	標準偏差 (mm)
50.00	50.062	0.030
75.00	75.072	0.070
100.00	100.038	0.065

(3) 研究結果のまとめ

コムレーザのセルフビートを利用することで、複数の合成波長による変調測距が可能

となる。従来の方法では、ビートダウンにおいてサイクリックエラーが発生し、高精度な測定ができなかった。本研究では、2台のコムレーザを利用したビートダウン手法により、粗面までの絶対測定が可能となった。

さらに、複数の波長を利用することで合致法により絶対距離測定が行えることを示した。以上の研究結果より、以下のことが分かった。

- 2台のコムレーザにより、サイクリックエラーなしに位相信号を所得することができた。
- Ra 10 μm といった粗面に対しても、3 m 遠測から距離測定が行え、形状が測定できた。
- 複数の測定波長を用いることで、合致法により絶対距離測定が可能であった。

(4) 今後の課題

当初の目的である、粗面の絶対距離測定に関してはよい測定成果をあげることができた。しかし、以下の今後の課題が明らかになった。

- 測定の不確かさが、粗面の距離および粗さと大きく関係していることが分かったが、より詳細な解析が必要となる。
- スキャナーについては、十分な検討が行えなかった。ミラー回転タイプのスキャナーによる基礎的な実験が必要となる。

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9件)

Wiroj Sudatham, Hirokazu Matsumoto, Satoru Takahashi, Kiyoshi Takamasu, Diagonal in space of coordinate measuring machine verification using an optical-comb pulsed interferometer with a ball-lens target, Precision Engineering, 査読有, 43, 2016, 486-492

DOI: 10.1016/j.precisioneng.2015.09.017

Wiroj Sudatham, Hirokazu Matsumoto, Satoru Takahashi, Kiyoshi Takamasu, Non-contact measurement technique for dimensional metrology using optical comb, Measurement, 査読有, 78, 2016, 381-387

DOI: 10.1016/j.measurement.2015.07.053

Hirokazu Matsumoto, Kiyoshi Takamasu, Automatic Recording Absolute Length-Measuring System with Fast Optical-Comb Fiber Interferometer, Int. J. of Automation Technology, 査読有, 9, 2015, 482-486

DOI: 10.20965/ijat.2015.p0482

Wiroj Sudatham, Hirokazu Matsumoto, Satoru Takahashi, Kiyoshi Takamasu, Verification of the positioning accuracy of industrial coordinate measuring

machine using optical comb pulsed interferometer with a rough metal ball target, Precision Engineering, 査読有, 2015, 41, 63-67

DOI: 10.1016/j.precisioneng.2015.01.007

Kyohei Ishikawa, Tomohiko Takamura, Muzheng Xiao, Satoru Takahashi, Kiyoshi Takamasu, Profile measurement of aspheric surfaces using scanning deflectometry and rotating autocollimator with wide measuring range, Measurement Science and Technology, 査読有, 25 (6), 2014, 064008 1-7

DOI: 10.1088/0957-0233/25/6/064008

Narin Chanthawong, Satoru Takahashi, Kiyoshi Takamasu, Hirokazu Matsumoto, Performance evaluation of a coordinate measuring machine's axis using a high-frequency repetition mode of a mode-locked fiber laser, International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 査読有, 15 (8), 2014, 1507-1512

DOI: 10.1007/s12541-014-0498-3

Dong Wei, Kiyoshi Takamasu, Hirokazu Matsumoto, Length Traceability using Optical Frequency Comb, Key Engineering Materials, 査読有, 625, 2014, 322-325

DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.625.322

Narin Chanthawong, Satoru Takahashi, Kiyoshi Takamasu, Hirokazu Matsumoto, High-accuracy calibration of CMM using temporal-coherence fiber interferometer with fast-repetition comb laser, Key Engineering Materials, 査読有, 625, 2014, 66-72

DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.625.66

Dong Wei, Masato Aketagawa, Kiyoshi Takamasu, Hirokazu Matsumoto, Two-color absolute length measuring method based on pulse repetition interval lengths, Optical Engineering, 査読有, 53 (12), 2014, 122413 1-5

DOI: 10.1117/1.OE.53.12.122413

[学会発表](計8件)

Taro Onoe, Satoru Takahashi, Kiyoshi Takamasu, Hirokazu Matsumoto, Non-contact precision profile measurement to rough surface objects with optical frequency combs, 12th International Symposium on Measurement Technology and Intelligent Instruments (招待講演), Taipei (Taiwan), 2015年09月24日

Wiroj Sudatham, Hirokazu Matsumoto, Satoru Takahashi, Kiyoshi Takamasu, Absolute precision measurement for space coordinates metrology using an

optical-comb pulsed interferometer with a ball lens target, Proceedings of the 15th euspen International Conference, Leuven, Belgium, 2015年6月3日

Kiyoshi Takamasu, Kyohei Ishikawa, Tomihiko Takamura, Muzheng Xiao, Satoru Takahashi, Nanometer Profile Measurement of Aspheric Surface Using Scanning Deflectometry and Rotating Autocollimator: Self-Calibration Method of Autocollimator, Proceeding of ASPE/ASPEN Summer Topical Meeting, Hawaii, USA, 2014年06月26日

Taro Onoe, Zongluo Yang, Satoru Takahashi, Kiyoshi Takamasu, Hirokazu Matsumoto, Precision measurement technique for rough surface object using self-beat signals of optical frequency comb, 14th euspen International Conference, Dubrovnik, Croatia, 2014年6月4日

〔その他〕

ホームページ: Takamasu - Takahashi Lab
<http://www.nanolab.t.u-tokyo.ac.jp>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

高増 潔 (TAKAMASU, Kiyoshi)

東京大学・大学院工学系研究科・教授

研究者番号: 70154896