

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 16 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2011～2013

課題番号：23656175

研究課題名(和文)フェムト秒レーザーを用いた生産環境のトレーサブル絶対三次元空間化

研究課題名(英文) Generation of traceable absolute three dimensional space in production environment using femtosecond laser

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、(間接経費) 900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、フェムト秒コム距離計を使ったフェムト秒レーザーランの概念設計を行い、そのフィジビリティ(測定精度、測定時間、コスト、環境)の検証を行った。この結果、提案システムの実用性があることが確認できた。また、問題点の一つであったフェムト秒レーザーのパルス間隔については、ファイバーエタロンを利用してパルス間隔を短くする実験を行い、その有効性を確認した。さらに、三次元化のためにスキャナーとCCDカメラの基礎研究を行い、その可能性を確認した。

以上の研究成果から、提案したフェムト秒レーザーランシステムの有効性、産業応用の可能性を認めることができた。

研究成果の概要(英文)：In this research, I performed the conceptual design of the femtosecond laser lan using a femtosecond comb range sensor. I verified the feasibility (measurement accuracy, measuring time, cost, and environmental conditions) of the proposed system. From the feasibility analysis, I have checked the practicality of the proposal system. Moreover, there was a problem in the pulse interval of femtosecond laser. About this, I conducted the experiment which shortens a pulse interval using fiber etalon, and checked the validity of the system. Furthermore, I performed the basic research of a scanner and a CCD camera for three dimensional measurement, and checked the possibility of the system.

From the above results of the research, I was able to realize the validity of the proposed femtosecond laser lan system, and the possibility of industrial application.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・知能機械学・機械システム

キーワード：超精密計測 トレーサビリティ 三次元測定 フェムト秒レーザー

1. 研究開始当初の背景

フェムト秒コム距離計は高精度(例えば 100 m を 2 μ m)かつ高速に絶対距離を計測できる新しいシステムである。この距離計をファイバネットワークおよびスキャナーに接続することで、生産環境においていつでもどこでも絶対三次元計測を可能にすることが本研究の提案である。このための概念設計、フィジビリティの検討、スキャナーを使った三次元化の基礎実験を行う。このシステムにより生産環境を絶対三次元空間化できれば、従来は難しかった工場のライン配置のための位置計測、工作機器等の設置、組立部品位置の管理、大型構造物の計測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、安全安心の確保などを推進することができる。

2. 研究の目的

(1) 研究の背景と目的

自動車産業、重工業などの生産環境における計測技術において、工場全体、ライン、大型構造物などの位置、変位の多次元計測はまったく進歩せず、経験にたよる側面が高く、効率化、省エネルギー、安全安心の面からも大きく遅れている。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、今まで行われていない部分での工場のIT化が必要であり、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100m)を高い精度(マイクロメートルオーダー)で簡単に低価格で測定するための技術的が必要である。

(2) 研究手法

新しい技術(フェムト秒コム距離計)を導入することで、上記の問題の解決をめざす。フェムト秒コム距離計は、簡単に長い距離の絶対距離を計測することが可能であり、これをスキャナーと組み合わせることで、三次元的な絶対座標計測が可能となる。フェムト秒レーザをファイバ網に接続し、スキャナーにより測定対象に設置したキャッツアイ(光反射体)の位置を三角測量するシステムをフェムト秒レーザランと呼び、実用化のため以下の研究を行う。

- ・フェムト秒レーザランの概念設計を行い、実用化のフィジビリティを検討する。
- ・三次元化のアイデア、校正方法、ファイバ網との結合方法を明確にする。
- ・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。

3. 研究の方法

(1) フェムト秒距離計の原理

図1にフェムト秒レーザをファイバ網に接続し、スキャナーにより測定対象に設置したキャッツアイ(光反射体)の位置を三角測量する「フェムト秒レーザラン」による絶対三次元測定概念を示す。図2にフェムト秒コム距離計の原理を示す。図2(a)に示すよう

にフェムト秒モード同期レーザは、周波数領域(フーリエ変換)で考えると、多くのスペクトルの光が周波数として等間隔に櫛の歯(コム: comb)のように並んでいる。このため、複数の多くの光の目盛りが同期的に存在することになる。図2(b)に距離計としての構成を示す。フェムト秒モード同期レーザの反射光をバンドパスフィルタ(BPF)に通し、元の光との位相差を計測する。BPFを複数用意することで、自由な周波数を選択的に検出することができ、この例では240mの距離を1 μ mの不確かさで絶対的に計測可能である。また、波長1.5 μ m付近を使うため、人間に対しても安全である。

(2) フェムト秒距離計の利用方法

このフェムト秒コム距離計は、高精度で高速(位相計の速度のみで決まる)だけでなく、光学系が簡単で、環境条件によらずロバストな測定ができる。現在は、1次元の高精度な計測への応用しか考えられていないが、低価格化の可能性、ロバスト性などの特徴を生かすには、前述したように生産環境への適用が重要である。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、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。

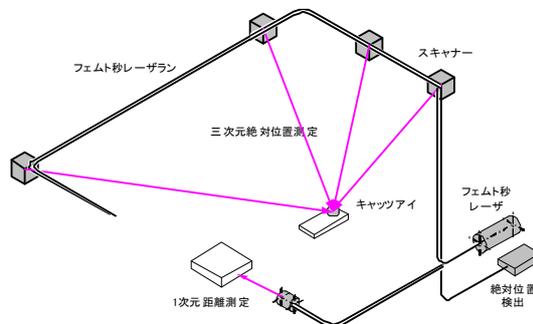
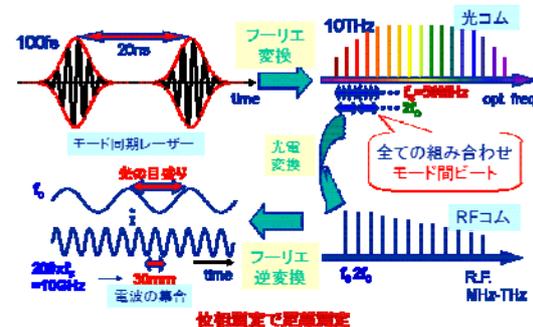
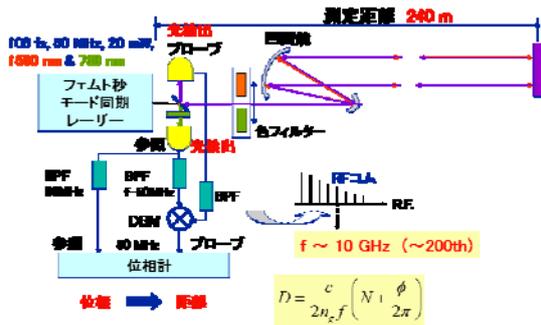


図1 フェムト秒コム距離計を使ったフェムト秒レーザランによる絶対三次元測定概念



(a) 周波数コムレザとセルフビート



(b) フェムト秒距離計の構成方法
図2 フェムト秒コム距離計の原理

4. 研究成果

(1) 研究実施のターゲット

研究は以下の3つの点に絞って行われた。

- ・概念設計：フェムト秒コム距離計を使ったフェムト秒レーザランの概念設計を行い、そのフィジビリティ（測定精度、測定時間、コスト、環境）の検証を行った。
- ・パルス間隔：単独のフェムト秒コム距離計ではパルス間隔が長い為、測定の自由度に問題があった。ファイバータロンを利用することパルス間隔を短くする実験を行った。
- ・三次元化：現状のフェムト秒コム距離計は1次元的な距離計測にのみ使用されている。これを三次元化する場合に必要となる、スキャナーと CCD カメラの基礎研究を行った。

(2) 概念設計

フェムト秒レーザランの概念設計およびフィジビリティの検討を中心に行った。まず、基本技術および問題点を抽出した。また、研究協力者として企業からの意見を聞き生産環境のニーズや概念設計に必要なとされる条件（測定精度、測定範囲、測定時間、コスト）を検討することが可能となった。

図3に概念設計により具体化したフェムト秒コム距離計とファイバとの結合の概念図を示す。フェムト秒コム距離計は高速（数 kHz 以上）に絶対距離（100 m までの距離を $10 \mu\text{m}$ の分解能で計測）の測定が可能であり、空気ゆらぎの影響を受けにくい。また、この高速性を生かしファイバに結合することで、手軽に複数の場所で同時に使えるシステムとなる。絶対距離検出の位相計に関しても、一台にファイバで結合することで処理することができれば、コストの大幅な低減が可能となった。

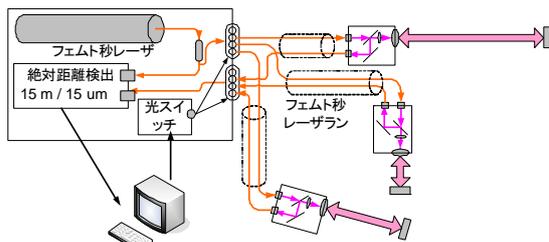


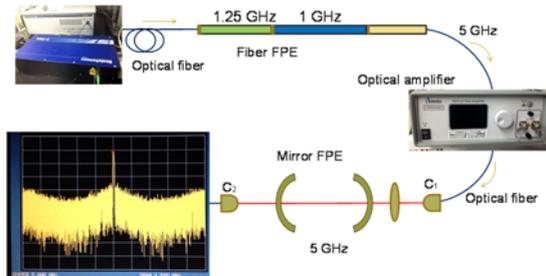
図3 フェムト秒レーザランの概念設計

(3) パルス間隔

単独のフェムト秒コム距離計ではパルス間隔が長い為、測定の自由度に問題があった。ファイバータロンを利用することパルス間隔を短くする実験を行った。図4(a)は開発したファイバータロンであり、図4(b)はファイバータロンとフェムト秒レーザを結合することで、パルス間隔を短くする実験の構成である。この実験によりパルス間隔を 10 mm オーダーにすることが簡単にでき、距離計の自由度を高くすることが可能となった。



(a) ファイバータロン



(b) ファイバータロンによるパルス間隔を短くするシステム構成

図4 ファイバータロンの利用

(4) 三次元化

スキャナーを利用して三次元絶対位置計測の方法として、図5は、キャッツアイを走査して検出する高速な手法の開発方法を示す。RF-IC タグおよび無線ランと組み合わせてキャッツアイの位置をデータベースで管理する方法を利用して、コストの低減が行える。CCD カメラおよびスキャナーの校正については、自己校正を用いた方法が有力であることが分かった。

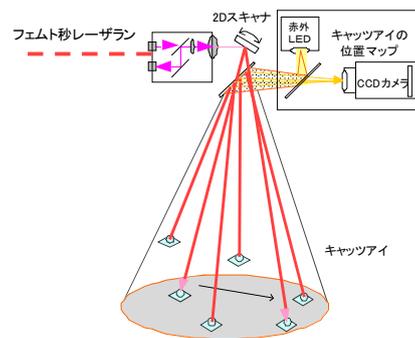


図5 三次元化の概念図

(6) まとめ

本研究では、フェムト秒コム距離計を使ったフェムト秒レーザランの概念設計を行い、そのフィジビリティ(測定精度, 測定時間, コスト, 環境)の検証を行った。この結果, 提案システムの実用性があることが確認できた。また, 問題点の一つであったフェムト秒レーザのパルス間隔については, ファイバーエタロンを利用してパルス間隔を短くする実験を行い, その有効性を確認した。さらに, 三次元化のためにスキャナーと CCD カメラの基礎研究を行い, その可能性を確認した。

以上の研究成果から, 提案したフェムト秒レーザランシステムの有効性, 産業応用の可能性を認めることができた。

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)

- ① D. Wei, K. Takamasu, H. Matsumoto, Synthetic adjacent pulse repetition interval length method to solve integer ambiguity problem: theoretical analysis, Journal of the European Optical Society, 査読有, 8, 2013, 13016 1-6, DOI: 10.2971/jeos.2013.13016
- ② D. Wei, K. Takamasu, H. Matsumoto, A study of the possibility of using an adjacent pulse repetition interval length as a scale using a Helium-Neon interferometer Original Research Article, Precision Engineering, 査読有, 37, 2013, 694-698, DOI: 10.1016/j.precisioneng.2013.02.001
- ③ X. Wang, S. Takahashi, K. Takamasu, H. Matsumoto, Spatial positioning measurements up to 150 m using temporal coherence of optical frequency comb, Precision Engineering, 査読有, 37, 2013, 635-639, DOI: 10.1016/j.precisioneng.2013.01.008
- ④ D. Wei, K. Takamasu, H. Matsumoto, Temporal coherence shaping based on spectral-domain destructive interference of pulses with different self-phase modulations, Journal of the European Optical Society, 査読有, 8, 2013, 13018 1-6, DOI: 10.2971/jeos.2013.13018
- ⑤ D. Wei, N. Wu, K. Takamasu, H. Matsumoto, Remote Internal Diameter Measurement of Ring Gauge based on a Low-coherence Tandem Scheme, Key Engineering Materials, 査読有, 516, 2011, 533-538, DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.516.533
- ⑥ A. Winarno, S. Takahashi, A. Hirai, K. Takamasu, H. Matsumoto, Absolute measurement of gauge block without wringing using tandem low-coherence interferometry, Meas. Sci. Technol., 査読有, 23, 2011, 125001 1-8, DOI: 10.1088/0957-0233/23/12/125001

- ⑦ K. Matsui, H. Matsumoto, S. Takahashi, K. Takamasu, New Non-contact Measurement of Small Inside-diameter Using Tandem Low-coherence Interferometer and Optical Fiber Devices, Key Engineering Materials, 査読有, 523-524, 2012, 871-876, DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.523-524.871
- ⑧ T. Onoe, S. Takahashi, K. Takamasu, H. Matsumoto, Development of a non-contact precision measurement technique using optical frequency combs, Key Engineering Materials, 査読有, 523-524, 2012, 877-882, DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.523-524.877
- ⑨ X. Wang, S. Takahashi, K. Takamasu, H. Matsumoto, Space position measurement using long-path heterodyne interferometer with optical frequency comb, Optics Express, 査読有, 20 (3), 2012, 2725-2732, DOI: 10.1364/OE.20.002725

[学会発表] (計 10 件)

- ① T. Onoe, S. Takahashi, K. Takamasu, Hirokazu Matsumoto, Non-contact precision distance measurement technique using two optical frequency combs, ASPEN2013, Taipei, Taiwan, 2013 年 11 月 13 日
- ② N. Chanthawong, S. Takahashi, K. Takamasu, H. Matsumoto, High-accuracy calibration of CMM using temporal-coherence fiber interferometer with fast-repetition comb laser ASPEN2013, Taipei, Taiwan, 2013 年 11 月 13 日
- ③ D. Wei, K. Takamasu, H. Matsumoto, Length Traceability using Optical Frequency Comb, ASPEN2013, Taipei, Taiwan, 2013 年 11 月 13 日
- ④ H. Matsumoto, X. Wang, K. Takamasu, Absolute Measurement of Base Lines up to 400 m Using Temporal Coherence Heterodyne Interferometer of Optical Frequency Comb, XX IMEKO World Congress, Busan, Korea, 2012 年 9 月 12 日
- ⑤ C. Narin, S. Takahashi, K. Takamasu, H. Matsumoto, Step Gauge Measurement Using High-Frequency Repetitions of a Mode-Locked Fiber Laser, XX IMEKO World Congress, Busan, Korea, 2012 年 9 月 12 日
- ⑥ D. Wei, K. Takamasu, H. Matsumoto, Comparison Experiment for Pulse Repetition Interval Based Length Measurement Linked to a Femtosecond Optical Frequency Comb, XX IMEKO World Congress, Busan, Korea, 2012 年 9 月 12 日
- ⑦ X. Wang, S. Takahashi, K. Takamasu, H. Matsumoto, Super-heterodyne Interferometer for Length-Measurement Using the Beat Signal of Laser Diodes and the Optical Frequency Comb, euspen2012, Stockholm,

Sweden, 2012 年 6 月 6 日

- ⑧ D. Wei, K. Takamasu, H. Matsumoto, Length measurement based on Pulse repetition interval of a femtosecond optical frequency comb, euspen2012, Stockholm, Sweden, 2012 年 6 月 6 日
- ⑨ D. Wei, N. Wu, K. Takamasu, H. Matsumoto, Remote Internal Diameter Measurement of Ring Gauge based on a Low-coherence Tandem Scheme, ASPEN2011, Hong Kong, China, 2011 年 11 月 17 日
- ⑩ X. Wang, S. Takahashi, K. Takamasu, Hirokazu Matsumoto, Experimental evaluation of long path heterodyne interferometers with optical-frequency comb and continuous-wave laser, ISMTII2011, Daejeon, Korea, 2011 年 6 月 30 日

[その他]

ホームページ等

<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