

令和元年6月1日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H04246

研究課題名(和文) 光周波数コム散乱分光による三次元表面トポグラフィの広帯域・レーザー逆散乱測定

研究課題名(英文) Study on Inverse Scattering Method using Optical Frequency Comb for Measuring Surface Topography with Wide Range of Spatial Frequency

研究代表者

高谷 裕浩 (Takaya, Yasuhiro)

大阪大学・工学研究科・教授

研究者番号：70243178

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、レーザー照射領域全体の三次元表面トポグラフィを散乱光強度分布から一度で求める面計測、すなわち先駆的なレーザー逆散乱法を格段に発展させることにより、独創的な光周波数コム散乱分光による広域・面計測法の確立を目的とする。そのため、独自の可視・広帯域化光周波数コム光源を設計・試作し、ピエゾ素子とペルチェ素子による制御性・安定性向上を確立した。さらに、高分解能分光計測データに基づいた新たな光周波数コム・レーザー逆散乱計測アルゴリズムおよびVIPAを利用した光周波数コム分光光学系を開発して、広帯域空間波長成分から構成される三次元表面トポグラフ計測法の基本原理を確立した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年、環境・エネルギー、情報通信、モビリティなどの多様な製造分野において、大型で超精密な自由曲面加工工程における大面積・三次元表面トポグラフィ測定評価への要求が急速に高まっている。本研究は、光周波数コム散乱分光解析に基づいた表面メトロロジーの新分野を切り拓き、さらに広域・表面分析手法への展開も期待されることから、計測学のみならず表面科学においても学術的意義は極めて高い。さらに、オンマシン/インプロセス測定への高い適用性と、世界的な標準であるISOとの高い整合性は製造現場への波及性も高く、広範な産業分野における表面加工精度の飛躍的向上に貢献できる点で、大きな産業的波及効果が期待できる。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study is to develop the novel measurement technique which enables to evaluate a surface topography ranging from several micrometers to millimeter order in spatial frequency. The conventional laser inverse scattering method has a disadvantage in wavelength dependence of the measurement range and resolution to measure a surface topography with wideband spatial frequency. To overcome this problem, the improved laser inverse scattering method based on the scattered light spectroscopy using an optical frequency comb (OFC) was investigated. As the key device, we achieved the broadband OFC including visible light, which is controlled and stabilized using the piezo device and the Peltier element. Moreover, the OFC spectrum measurement using the developed spectroscopic optical system with VIPA was performed. The feasibility of the proposed measurement principle is confirmed by simulation results based on the novel laser inverse scattering measurement algorithm.

研究分野：機械工学・生産工学・加工計測

キーワード：3次元表面トポグラフィ 光周波数コム 散乱分光計 レーザー逆散乱法 フーリエ変換光学系 面計測 ファイバレーザー 加工計測

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

近年、環境・エネルギー、情報通信、モビリティなどの多様な製造分野において、大型で超精密な自由曲面加工工程における大面積・3次元表面トポグラフィ測定評価への要求が急速に高まっている。例えばサイズ(200mm)²以上の自動車用光学部品では、表面粗さが10 nm、うねりが数100 nm以下の高精度な自由曲面光学素子の製作が求められる。一方、従来測定法の多くは触針式/光学式プローブを用いた点計測であるため、大面積の3次元トポグラフィ測定の場合、精密な位置決めや移動制御が必要となり、膨大な測定時間を要する。さらに、空間波長が数 μm の表面粗さや数10 μm のうねりなどの従来の表面性状パラメータだけでなく、数100 $\mu\text{m}\sim\text{mm}$ オーダーに及ぶ中・長周期のうねりの測定評価も要求される。国際的にも、3次元表面性状パラメータを定めた新ISO 25178-2規格¹⁾への対応が必要になり、大面積への高い適用性を備えた新たな3次元表面トポグラフィ測定法が求められている。

2. 研究の目的

これまで研究代表者らは、独自に開発したレーザー散乱パターンによる加工表面性状測定法（以降、レーザー逆散乱法）を、超精密加工表面微細形状の局所・面計測に適用し、以下の成果を上げている。

- 超精密周期表面微細構造測定：回折・散乱光の光学的フーリエ変換理論に基づく周期表面微細構造測定の基本原理を確立し、矩形溝形状測定²⁾、超精密ダイヤモンド切削加工表面構造測定³⁾に適用して、表面微細構造を構成する周波数成分をナノメートルオーダーの分解能で測定可能であることを示した。

- ナノ3次元表面微細形状測定：回折・散乱光から3次元表面微細形状を直接回復する、独自の光逆散乱位相法の基本原則を確立し、ナノ標準格子（周期10 μm 、深さ44 nm）（図1）や非周期的3次元微細構造⁴⁾⁶⁾への適用性を示した。

以上のようなレーザー逆散乱法の基本特性は、レーザー波長 λ による回折・散乱光空間分布の限界が決まるため、測定対象がナノメートルオーダーの超精密加工表面（100 μm 以下の狭帯域な空間波長成分と100 nm以下の振幅）に限られる。従って、広帯域（数 $\mu\text{m}\sim\text{mm}$ ）の空間波長成分、広ダイナミックレンジ（数nm～数100 nm）の振幅から構成される3次元表面トポグラフィの広域（数 mm^2 領域）・面計測に適用するためには、短波長から長波長までの多数のレーザー光源と回折・散乱光の検出器を必要とする。

そこで本研究は、図2に示す光周波数コム散乱分光による3次元トポグラフィの広域・面計測を基本構想とする新たな測定原理の確立をめざし、次の(1)～(3)の達成を目的とする。

- (1) 3次元表面トポグラフィによる光周波数コム散乱分光解析技術の確立
- (2) 3次元表面トポグラフィによる光周波数コム散乱分光計測技術の確立
- (3) 光周波数コム散乱分光によるレーザー逆散乱計測原理の確立

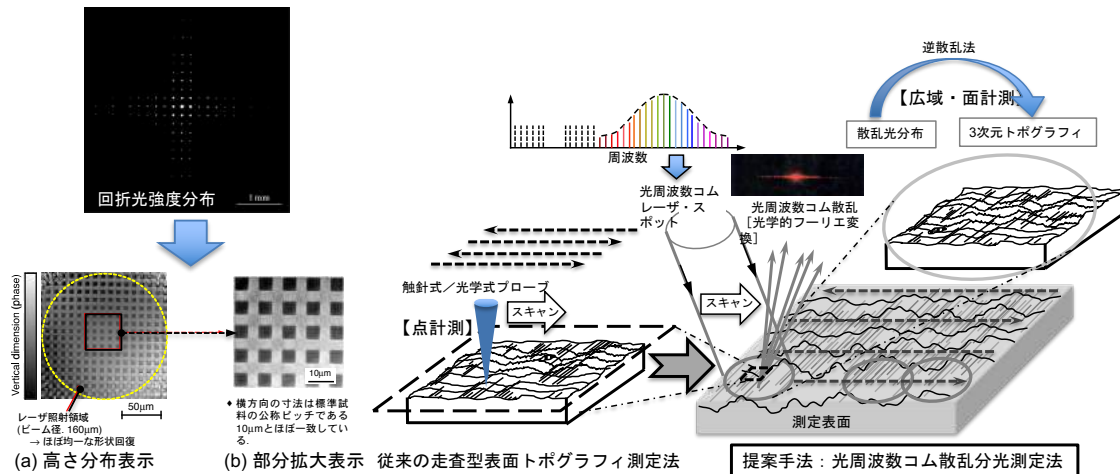


図1 レーザー逆散乱法による測定結果

図2 従来の点計測と本研究の基本構想

3. 研究の方法

一般に切削、研削、研磨などの機械加工によって創成された加工表面の表面トポグラフィは、表面凹凸を構成する多数の基本空間波長 (Λ)（周波数 ω ）の振幅をフーリエ合成したものであると仮定できる。

従って、各高次回折光の強度から輪郭曲線を構成するそれぞれの基本空間波長 $\Lambda_1, \Lambda_2, \dots, \Lambda_i$ の振幅 a_1, a_2, \dots, a_i を求めることができれば、それらをフーリエ合成することによって輪郭曲線を求めることができる。しかし、回折光強度の空間分布のみを利用する場合、光検出器の空間分解能の限界から、高次回折光を細かく分離して計測することが難しく、さらにその帯域も制約が大きい。そこで、光周波数コムの各周波数 (ν_i)（波長 λ_i ）に各高次回折光 ($f\lambda_i/\Lambda_i$) を対応させて回折光強度を周波数空間で分離して測定することができれば、光周波数コムの高密度な周波数（波長）間隔および広い周波数（波長）帯域を利用することによって、広帯域・高

密度の基本空間波長による超精密表面トポグラフィ測定が可能となる。

以上のような構想に基づき、光周波数コム散乱分光による3次元トポグラフィ・レーザー逆散乱計測の基本原理を検討し、図3に示す光周波数コム散乱分光測定光学系の基本構想に基づいた構成要素技術の設計・試作と動作検証実験を遂行した。

(1) 3次元表面トポグラフィの光周波数コム散乱現象解析と光逆散乱計測アルゴリズムの開発

有限差分時間領域法 (FDTD: Finite-difference time-domain method) とフーリエ変換光学系モデルを統合した光周波数コム散乱解析シミュレータを構築し、加工表面トポグラフィ空間波長構造による回折光の数値解析に基づいた、光周波数コムの光学条件 (スペクトル分布, エネルギー分布, 照明領域など) の最適化を検討した。さらに位相回復理論を導入し、新たな光周波数コム・レーザー逆散乱法に基づいた3次元表面トポグラフィ計測理論の構築を行った。

(2) 光周波数コム・ファイバレーザの設計・試作および制御性の検証

光周波数コムの散乱分光特性測定光学系を構成する最重要の要素技術である可制御型光周波数コム・ファイバレーザを開発するため、加工表面の3次元表面トポグラフィ空間波長構造による光周波数コム散乱現象の詳細な解析に基づいた独自の設計・試作を行い、さらに高精度な制御技術を導入し、光周波数コムの制御性・安定性向上を検証する基礎実験を遂行した。

(3) 光周波数コム散乱分光測定光学系の設計・試作および基本特性の検証

光周波数コム・ファイバレーザの可視光領域・広帯域化技術の開発を進めた。また、光周波数コムの基本特性を高精度に検証するため、高分解能分光測定光学系の設計・構築を行い、光周波数コムの分光データ解析を遂行した。さらに、高分解能分光計測データに基づいた光周波数コム・レーザー逆散乱計測アルゴリズムの検証を行った。

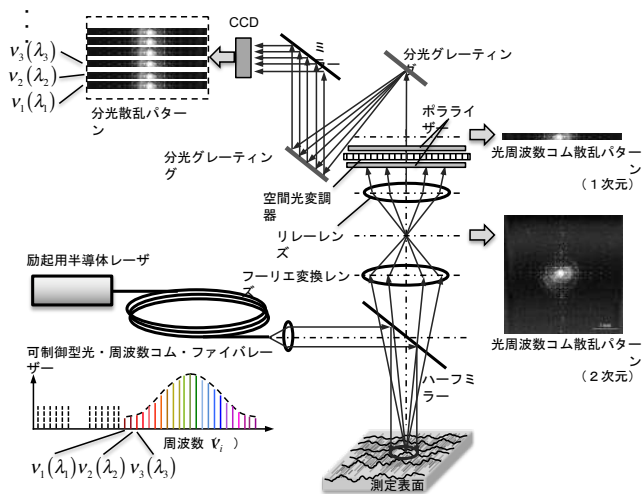


図3 光周波数コム散乱分光測定光学系の構成

4. 研究成果

(1) 光周波数コム・レーザー逆散乱計測アルゴリズムによる計測原理の確立

まず、多波長を用いた Fraunhofer 回折光強度分布の数値解析を遂行し、線幅 1 nm の He-Ne レーザと線幅 1.36×10^{-12} nm の光周波数コムを光源とした場合の測定精度の比較から、光周波数コムの狭い線幅を利用することで測定の信頼性が飛躍的に向上できることを確認し、光周波数コムの使用決定の指針とした。

さらに、FDTD 法による電磁界シミュレーションを用いた物体表面における物体像と Fraunhofer 回折像から反復計算によって位相を復元する Gerchberg-Saxton 法を利用し、光周波数コム散乱スペクトルによる独自の位相アンラッピング手法を適用した、新たな光周波数コム・レーザー逆散乱計測アルゴリズムを開発した。複雑な2段矩形溝形状 (幅 10 μm , 深さ 100 nm の一段目の矩形溝に、1 μm 中心をずらして幅 5 μm , 深さ 100 nm の二段目の矩形溝を加えた表面形状) や図4に示す微細複雑形状などを対象とした計算機シミュレーションを遂行した。波長 630 nm の単波長レーザーでは、二段目の深い溝は測定できていない一方で、新たな光周波数コム・レーザー逆散乱計測アルゴリズムでは位相回復が可能となった。また、測定が難しいエッジ部において、2段矩形溝ではエッジ形状誤差 4.2 nm の高精度な微細表面形状計測が実現できることを示し、図4に示すような複雑な形状に対しても適用可能であることを明らかにした。光周波数コムを

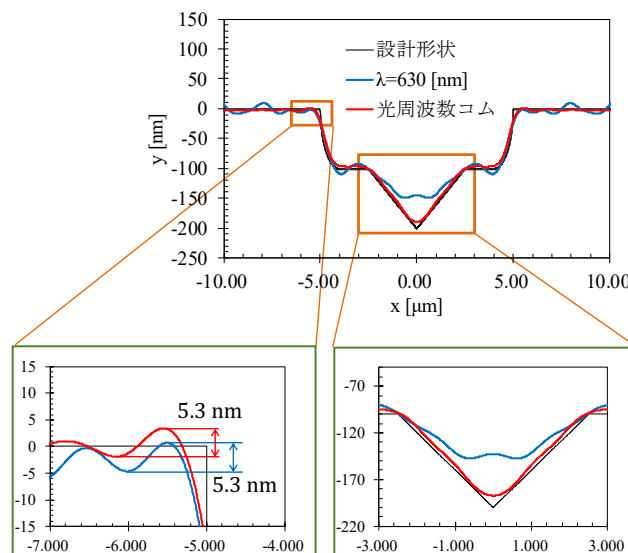


図4 レーザ逆散乱法のシミュレーション結果

利用した新たな3次元表面トポグラフィ計測アルゴリズムの開発は世界的にも初めての研究成果であり、加工計測分野へのインパクトも大きい。

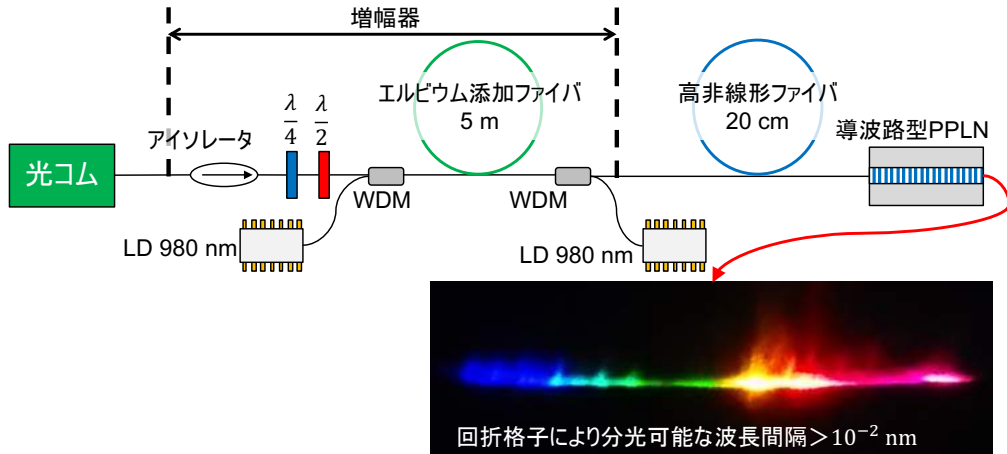


図5 広帯域(可視光-近赤外領域)光周波数コム製作

(2) 可視・広帯域化光周波数コム・ファイバレーザの構築と動作実証

まず、光コムの安定化制御を確立するため、光コム共振器中のEDFに取り付けたピエゾ素子(PZT)と銅板に取り付けたペルチェ素子により、共振器長を変化させることが可能な可制御型光周波数コム・ファイバレーザの設計・試作を行った。それによりPZTによる歪みとペルチェ素子による温度制御によって、繰り返し周波数 f_{rep} (約 47.5 MHz) 制御のダイナミックレンジを拡大した。さらにPZTとペルチェ素子を用いた新たな制御手法によって、制御型光周波数コム・ファイバレーザの f_{rep} の時間安定性制御実験を行い、数分から十数分間の長期化に成功した。 f_{rep} の制御が可能となったことにより、周波数変動を mHz オーダまで抑制できることを実証した。さらに、図5に示す、エルビウムドープファイバー(EDF)光周波数コム共振器、双方励起型EDF光増幅器、広帯域化高非線形ファイバおよび導波路型PPLN(Periodically Poled Lithium Niobate)から構成される新たな光周波数コム光源を開発し、図6の波長分布測定結果に示すように、光周波数コムを 400~700 nm の可視光領域にまで広帯域化することに成功した。この成果により、空間波長が数 μm の表面粗さや数 10 μm のうねりに加え、数 100 μm ~mm オーダに及ぶ中・長周期のうねりを含む、広域3次元表面トポグラフィ測定評価の高精度化が期待される。

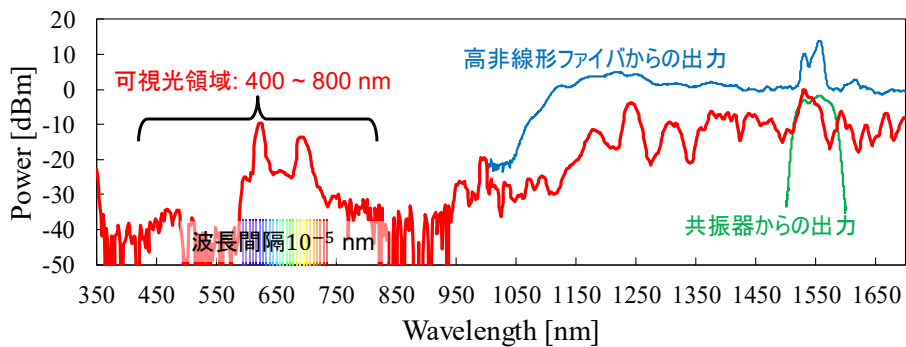


図6 広帯域光周波数コムの波長分布測定結果

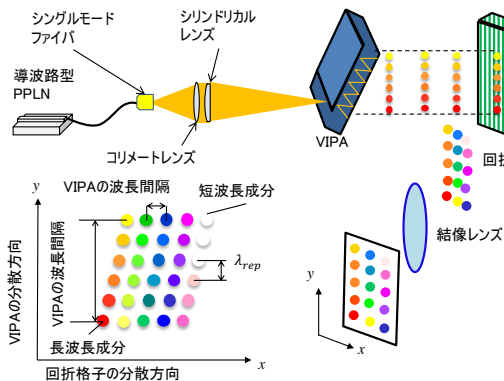


図7 VIPAを用いた高分解能分光光学系の構築

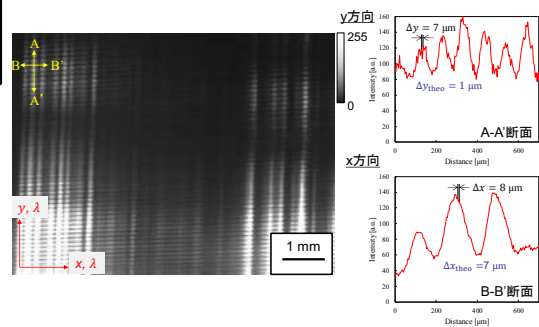


図8 光周波数コムの高精度分光測定結果 ($y:10^{-5}, x:10^{-2}\text{nm}$)

(3) 光周波数コム散乱分光測定光学系の構築と光コム光源特性の評価

図7に示す、波長帯域 600~750 nm の VIPA (Virtually Imaged Phased Array) および回折格子 (1200 groove/mm) からなる独自の光周波数コム分光光学系を構築し、それを用いた可視・広帯域化光周波数コム・ファイバレーザ光源の分光計測によって、図8に示すように、光周波数コムの各波長成分を、縦方向に 10^{-5} nm, 横方向に 10^{-2} nm 間隔に分光計測可能であることを実証した。

本研究によって、提案手法がサブナノメートルの空間波長間隔で3次元表面トポグラフィ測定が実現できる可能性を示しており、本研究の大きな成果として、これまでの測定技術では捉えたことができなかった表面性状を可視化できる可能性がある。さらに、以下の特徴を有する加工計測技術の実用化によって、将来の予測型生産システムにおけるコア計測技術としての展開が期待される。

- 光周波数コムの高密度な周波数間隔に基づき、三次元表面トポグラフィの空間波長構造を高分解能で直接測定できるため、超微細・超精密加工工程における表面粗さやうねり成分の解析や創成原理の解明が可能である。
- 長さの国家標準となっている光周波数コムを用いることで、従来は困難であった光散乱表面性状測定法の不確かさ解析への道が拓け、測定の信頼性が飛躍的に向上する。
- レーザ逆散乱法の基本特性に基づき、ミリメートルのワークディスタンスと、振動およびワークの傾きの影響を受けにくく、精密位置決め制御が不要なため、加工現場への適用性の高い高速走査による大面積測定が実現できる可能性がある。

【引用文献】

- ① ISO 25178-2: Geometrical product specifications (GPS) – Surface texture: Areal – Part2: Terms, definitions and surface texture parameters
- ② 高谷裕造, 三好隆志, 外山 潔, 斉藤勝政: 回折パターンによる極微細溝形状の測定評価に関する研究-矩形溝形状の測定評価-, 精密工学会誌, 57 [11], (1991), pp. 2041-2047, 査読有り
- ③ 梁渭, 高谷裕造, 三好隆志: 超精密ダイヤモンド切削面周期構造の光散乱スペクトル解析, 1996年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (1996), pp. 1113-1114.
- ④ Yasuhiro TAKAYA, Kazuhiro WAKE, Motoki IZUKURA, Satoru TAKAHASHI and Takashi MIYOSHI, The design model based in-process measuring method of a three-dimensional micro-profile by employing the laser inverse scattering phase reconstruction method, Proceeding of SPIE's International Symposium on Intelligent Systems and Advanced Manufacturing, SPIE Vol. 3520, (1998), pp. 170-179.
- ⑤ Atsushi Taguchi, Takashi MIYOSHI, Yasuhiro TAKAYA, Satoru TAKAHASHI, and Katsumasa SAITO(2), 3D Micro-Profile Measurement using Optical Inverse Scattering Phase Method, CIRP ANNALS, VOL.49/1, (2000), pp. 423-426.
- ⑥ Atsushi Taguchi, Takashi Miyoshi, Yasuhiro Takaya, Satoru Takahashi: "Optical 3D profilometer for in-process measurement of microsurface based on phase retrieval technique", Precision Engineering, Vol. 28, No. 2, (2004), pp. 152-163.

5. 主な発表論文等

[学会発表] (計6件)

- ① 高橋一平, 水谷康弘, 高谷裕造, 広帯域光周波数コム散乱分光による表面トポグラフィ計測に関する基礎的研究 -光周波数コムファイバレーザの広帯域化-, 2019年精密工学会春季大会学術講演会, 2019年3月13日-15日, 東京電機大学(東京都)
- ② 谷田航大, 水谷康弘, 高谷裕造, 光周波数コム散乱分光による3次元表面トポグラフィ計測に関する基礎研究, 日本機械学会関西学生会2018年度学生員卒業研究発表講演会, 2019年3月10日, 立命館大学(滋賀県, 草津市)
- ③ Ippei Takahashi, Yasuhiro Takaya and Yasuhiro Mizutani, Fundamental Study on Surface Topography Measurement with Wideband Spatial Frequency using Scattered Light Spectroscopy - Construction of Broadband Optical Frequency Comb -, 19th International Symposium on Optomechatronic technology, 2018年11月5-8日, (Cancun, Mexico)
- ④ 高橋一平, 高谷裕造, 水谷康弘, 3次元表面トポグラフィ計測のための光周波数コムファイバレーザの広帯域化, 2018年度精密工学会関西地方定期学術講演会, 2018年6月29日, 大阪電気通信大学(大阪府・寝屋川市)
- ⑤ 乾和磨, 高谷裕造, 水谷康弘, 3次元表面トポグラフィ計測のための光周波数コムファイバレーザの発振特性の調査, 2017年精密工学会秋季大会学術講演会, 2017年9月20日-22日, 大阪大学(大阪府・豊中市)
- ⑥ 乾和磨, 高谷裕造, 水谷康弘, 3次元表面トポグラフィ計測のための光周波数コムファイバレーザの発振特性, 精密工学会2017年度関西地方定期学術講演会, 2017年6月29日, 摂南大学(大阪府・寝屋川市)

[その他]
ホームページ等
<http://www-optim.mech.eng.osaka-u.ac.jp/research/research.html>

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：水谷 康弘

ローマ字氏名：Mzutani, Yasuhiro

所属研究機関名：大阪大学

部局名：大学院工学研究科

職名：准教授

研究者番号（8桁）：40374152

(2) 研究協力者

研究協力者氏名：高橋 一平

ローマ字氏名：Ippei, Takahashi

(3) 研究協力者

研究協力者氏名：谷田 航大

ローマ字氏名：Koudai, Tanida

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。