

令和元年6月25日現在

機関番号：12401

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H03879

研究課題名(和文) 高速離散波長可変レーザーと擬似光周波数コム干渉顕微鏡の研究

研究課題名(英文) Study of Microscopy with Pseudo-comb Interferometry and high-speed discrete-frequency scanning laser

研究代表者

塩田 達俊 (SHIODA, Tatsutoshi)

埼玉大学・理工学研究科・准教授

研究者番号：10376858

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,000,000円

研究成果の概要(和文)：モノづくり現場における製品の表面形状の検査装置に用いる技術の研究を行った。光学干渉計を用いた非接触計測により、深さ方向にマイクロメートル分解能でミリメートル領域の距離計測が可能な2次元シングルショット計測器を構築した。簡易に発生できる光コムを光源として、高次までの疑似光コム干渉で得られるシングルショット2次元断面層像を体積サンプリング速度の高速なCCDで観測した。一方、その光源としてCCDの撮像時間より早い超高速な光周波数走査繰返し(1MHz)と離散的に周波数走査(200GHz間隔)する高速離散波長可変レーザーを新たに開発して疑似光コム干渉の基礎技術を開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

離散的な波長可変レーザーは、比較的簡便に低コストで作成できる。その上、スキャン速度より遅い検出器で観測することで、光コムと同様の干渉計測信号を得ることができるため、低コストで高感度な計測を実現できる可能性を持つ。さらに、シングルショットで2次元断面形状を計測する光学システムは、振動環境下においても物体のマイクロメートル精度での表面検査などを行うことができ、モノづくりの信頼性を飛躍的に向上できる。

研究成果の概要(英文)：The technology for the inspection of the surface profilometry of the product in the manufacturing field was studied. A two-dimensional single-shot microscopy, which can measure the distance in the millimeter region with micrometer resolution in the depth direction, was constructed as non-contact measurement using an optical interferometer. Single-shot two-dimensional tomographic images obtained by high-order pseudo-optical comb interference fringes were observed by a CCD with a high volume sampling rate, using an optical comb that can be easily generated as a light source. On the other hand, the fundamental technology of pseudo optical comb interference was developed by developing an ultra-high-speed optical frequency scanning repetition (1 MHz). The repetition rate is faster than the imaging time of CCD and a high-speed discrete wavelength tunable laser, which performs frequency scanning discretely (200 GHz interval) as the light source.

研究分野：光計測

キーワード：光学干渉 表面形状計測 離散波長可変レーザー コム干渉 インライン全数検査

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

我が国の製造業における製品の信頼性向上は死活問題でありながら、支柱である金属加工、プラスチック加工、ガラス板の製造ラインでは表面形状・キズや塗装の品質の欠陥で想像以上の歩留りとコスト要因を招き、信頼性向上を阻んでいる。現状の製造方法では検査スピードの制約から抜き出し検査が採用されているが、国際競争力を向上するためには高速な検査スピードで非破壊の全数検査の実現が必須である。

検査スピードの向上には、ミクロン単位の空間分解能と高速な体積サンプリング速度の両立が鍵である。また製造ライン上の製品は、キズやひずみのサイズから水平 100 μ m、奥行 1 μ m 程度の分解能での検査が求められている。一方、ライン上を流れる製品の表面は毎秒幅 10cm x 縦 1mである。つまり毎秒 1 $\times 10^{12}$ 点の体積サンプリング速度が必要となる。

表1の様に既存の表面検査手法の体積サンプリング速度は高々 10^9 点に過ぎないため全数検査に至っていない。これは1本のレーザー光を走査する手法が律速となるためであり、多点を同時計測する手法の開発が望まれてきた。

2. 研究の目的

新規の光コム干渉法(図1)を用いて物体の表面形状を世界最速の 10^{12} 体積サンプリング速度で撮像できる検査装置を開発する。具体的には、高次までの疑似光コム干渉(図2)で得られるシングルショット2次元断層像を体積サンプリング速度(10^{10} sample/s: ~)の高速な CCD で観測する。一方、その光源として CCD の撮像時間より早い超高速な光周波数走査繰返し(1MHz)と離散的に周波数走査(200GHz 間隔)する高速離散波長可変レーザーを新たに開発して疑似光コム干渉を実現する。

また、レーザー出力を高出力化(1W)して高感度化を図る。最後に上記技術を統合し、深さ 1 μ m、水平 100 μ m の分解能を満たす全体試験により、生産ライン全数検査の基盤を確立する。

3. 研究の方法

3-1. ズーム可変シングルショット断層計測

図3に、2Dシングルショットズーム干渉計の光学系を示す。光源には SC 光源の可視波長領域(中心波長 $c=630\text{nm}$ 、全幅半分最大=100nm)を用いた。SC 光源の光束径をビームエキスパンダーで CCD センササイズをカバーする約 10mm まで拡大した。拡大した光束をシングルショットマイケルソン干渉計に導いた。参照光路中には、SPM の表面がカメラ表面に結像するように 4-f 構成の凸レンズ(直径 30mm、焦点距離 150mm)を設置した。ここで、SPM としてエシェル格子(79LPM)を使用した。回折次数の最大値は理論的に LPM を用いて決定できる。

図3は、SPM の設置角について2つの場合における設置例を含む実験系を表す。カメラへ結像させる回折次数 m_{th} (角度 m)を選択することにより、図中の式の通り SPM の照射範囲における伝播光路差 ΔZ を変える。検出するカメラには、3840 x 2748 ピクセル、3.2 fps、6.413 mm x 4.589 mm 光学センサーサイズの可視 CCD カメラを使用した。CCD カメラのフレームレートを最大 12.8fps に引き上げるソフトウェアも開発した。

3-2. 離散波長可変レーザー光源の開発

周波数間隔 200GHz で受光器の応答時間速い繰返し周波数で離散的に光周波数を掃引する波長可変レーザー光源の開発を目指し、原理確認として、レーザー共振器構成によるレーザー発振を確認した。離散走査のためのエタロン(光共振器)を 500 μ m 厚のガラスに金蒸着して

表1. シングルショット形状計測法の比較

分類	感度	体積サンプリング速度
三角測量	○	10 sample/s
白色干渉 (OCT)	○	10^5 sample/s
白色光源+エタロン+SPM	×	10^9 sample/s
波長可変光源+エタロン+SPM	○	10^9 sample/s
提案手法	○	10^{12} sample/s

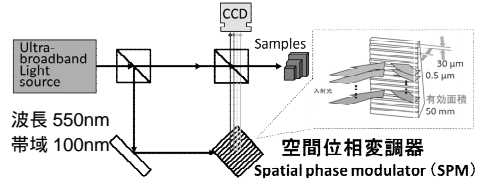


図1. シングルショット断層イメージング装置

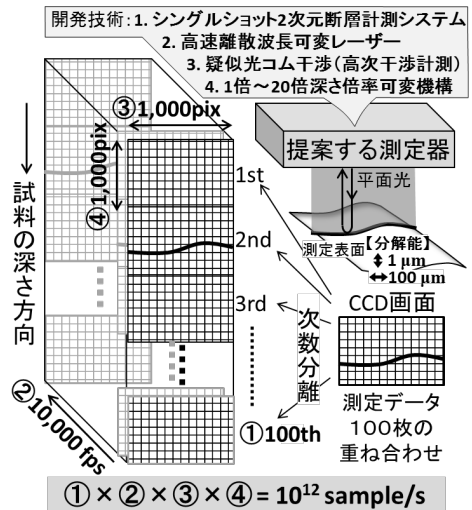


図2. 本提案が目指す測定器が有す技術の概要

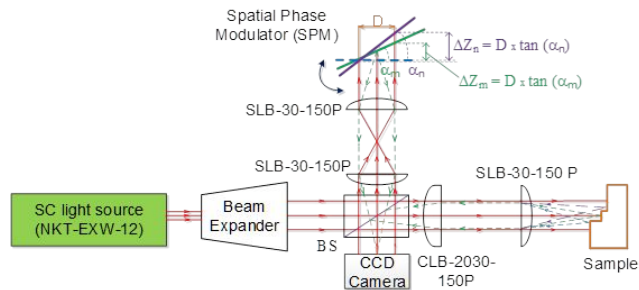


図3 2Dシングルショットズーム干渉計の光学系

作製し離散的な波長走査が可能であることを確認した。

SPMの回折格子としての性質として、Littrow配置で回折次数に相当する複数の設置角で入射光軸に戻り光を示す。空間位相変調器としては高次回折成分では、高分解能な断層像を得ることが可能となる。回折光を直接検出する場合には軸方向（深さ方向）分解能が、回折次数に依存する。本研究では、SPMと検出器間に結像光学系を組むことで回折次数に依存しないシステムで実験を行った。この前提で、SPMの操作により回折次数を光学的に選択してイメージングすると、深さ方向の倍率が次数に比例してズームイン/アウトできることを確認した。特に回折次数を20次まで増やし、CCDで観測されるシングルショット断層画像のピクセルあたりの深さ距離（単位 $\mu\text{m}/\text{pixel}$ ）を制御した。空間位相変調器と検出器の間の結像光学系に4-f光学系を構築して分解能がピクセル数のみに依存することを確認した。

断層スペクトル分光法について、時間領域低コヒーレンス干渉の時間走査を行い相関波形ごとにフーリエ変換するが、複素屈折率分布を分離計測するためにクラマース・クロニッヒ変換を導入して2層膜の分離を実現した。

原理確認用の光源の構成として、第一に半導体光増幅器をレーザー利得媒質として偏波コントローラによる偏光調整と波長走査機構を含むファイバリング型の光源を開発して連続波長走査を確認し、第二にエタロンを適切に設置することで、離散的に光周波数走査が行われることを確認した。ここで波長走査機構は回折格子を含む反射光学系を構築して実現した。ここでは、試験として低速のビーム走査機構を用いてオシロスコープと光スペクトル解析器によりミリ秒の繰り返し時間で走査されることを確認した。

さらに、リング型レーザー共振器内の適切な位置にエタロン（光共振器）を設置する方法で離散的な光波長走査レーザーの作成に成功した。エタロンは $500\mu\text{m}$ 厚のガラスに金蒸着して作製した。波長走査機構としてポリゴンミラーと回折格子を組み合わせた光学系をレーザー共振器内に作成することで、擬似光コム干渉用の光源を作製した。ここで、ナノ秒領域により周波数走査が行われることを確認した。そして、レーザー光でパワーがある上に発生した出力光をフィルタで削ることなく実質の光コムとして干渉計測に利用してより高いエネルギー利用率を得た。これにより高感度化への基本原理を確認した。また、上記のエタロンを設置することで、その周波数が 200GHz 間隔で離散的に発振していることを確認した。

4. 研究成果

4-1. ズーム可変シングルショット断層計測

図4は、異なるSPMの回折次数毎に段差試料の一連のシングルショット2次元干渉画像を示す。SPMの回折次数をCCDカメラに入射した対応する回折ビームにSPMを回転させることによって切り替えた。段差は $100\mu\text{m}$ と一定なので、計測できる深さ方向（図面水平方向）の計測レンジが、SPMの回折次数に依存して変化している様子がわかる。

そこで、SPMの回折次数を横軸にして計測レンジを縦軸にプロットした結果を図5に示す。SPMの回折次数が1次から20次までの間で観測したシングルショット干渉波形のピーク位置の変化の様子がわかる。図4線の干渉像の幅から導いたおおよその深さ方向分解能は $2\mu\text{m}$ 以下であり、この分解能を維持したまま計測レンジを変化させられることがわかった。



図4 回折次数毎のシングルショット断層イメージ（試料： $100\mu\text{m}$ 段差表面）。

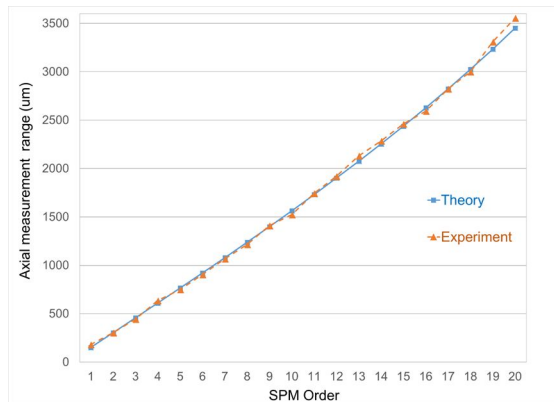


図5 SPM回折次数毎の計測可能範囲。

4-2. 離散波長可変レーザー光源

図6の様に、周波数間隔200GHzで受光器の応答時間0.1msよりも速い1MHzの繰り返し周波数で離散的に光周波数を掃引する波長可変レーザー光源を開発した。レーザー光でパワーがある上に発生した出力光をフィルタで削ることなく実質の光コムとして干渉計測に利用してエネルギー利用効率90%以上を得て高感度化できる。共振器内の構成は、形状計測に必要な帯域をもつレーザー利得媒体を含み、共振器を構成する一方の鏡を回折格子とし、その回折格子への入射角を制御する偏向器で構成される。回折格子への入射角は同方向に反射する波長を選択することを意味する。図7の様に、エタロンを変えるとそれに伴ってスペクトルが変化の様子を確認した。さらに、時間波形を観測してもナノ秒パルスの光パルス列が観測された。偏向器の出射角を制御するマイクロ波周波数を離散的に高速掃引することで、実質的な光コム発生を行うことができた。

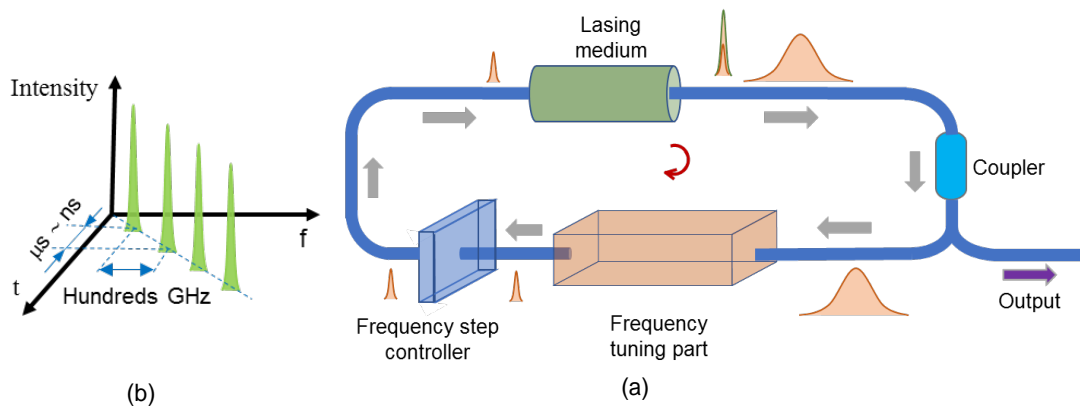


図6 離散波長可変レーザー光源の構成（概略）。

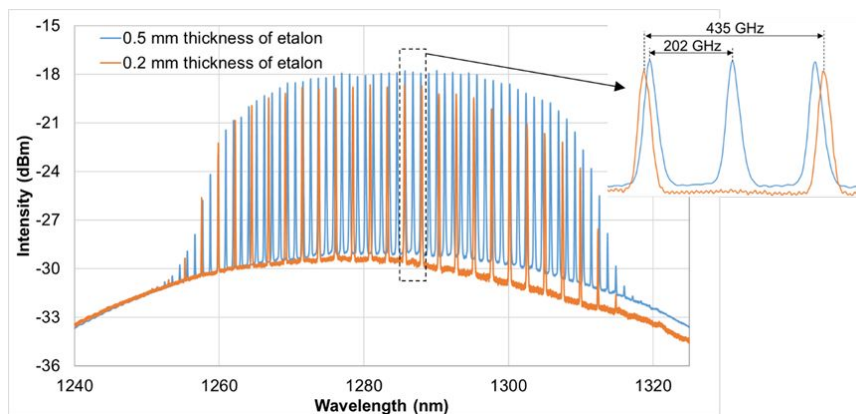


図7 共振器内に設置したエタロンの厚さ（0.2 mm、0.5 mm）によるレーザー出力のスペクトル変化。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計3件)

Tuan Cong Truong, Tuan Quoc Banh, Heuihyeon Kim, Tatsutoshi Shioda "Axial zoomable 2D single-shot comb interferometry using spatial phase modulator for profilometry and tomography,"

Opt. Commun., 439, pp.276-283(2018)

Tuan Cong Truong, Tuan Quoc Banh and Tatsutoshi Shioda "Development of discrete frequency swept laser for 2D single-shot pseudo comb interferometry," Jpn. J. Appl. Phys., Volume 58, Number 5(2018)

塩田 達俊 "光周波数コム合成 / 解析法による超高速光波形計測と分散計測," The Review of Laser Engineering, Vol.46, No.2 pp.73-79(2017)

[学会発表](計 37 件)

塩田 達俊 "光コム合成 / 解析法による超高速光波形計測と分散計測," 一般社団法人レーザー学会学術講演会第 39 回年次大会 S813a 03 Jan.13, 2019

唐澤 悠太郎、郡司 翔平、塩田 達俊 "低コヒーレンス干渉計によるトモグラフィック屈折率計測," 第 66 回応用物理学学会春季学術講演会 10a-PA2-5 Mar.10, 2019

Tuan Cong Truong, Tuan Quoc Banh, Tatsutoshi Shioda "Develop a high energy efficiency swept source optical frequency comb for tomography," The 7th Asia-Pacific Optical Sensors Conference (APOS2018) Thu_2 May.31, 2018, 島根県松江市

Leona Yuda, Hiroaki Tada, Takashi Hasegawa, Nasrin Sultana, and Tatsutoshi Shioda "High-speed Optical Frequency Comb Analyzer with single-detector technique for Ultrafast Waveform Measurement," ASIA PACIFIC LASER SYMPOSIUM2018(APLS2018) P19 May. 28, 2018, XI'AN CHINA

Tatsutoshi Shioda "Variety on time-domain waveforms with optical frequency comb synthesizer and analyzer," ASIA PACIFIC LASER SYMPOSIUM2018 (APLS2018) May. 28, 2018, XI'AN CHINA

湯田 怜央奈、長谷川 尊士、多田 浩明、Nasrin Sultana、塩田 達俊 "超高速光波形計測へ向けた時間並列方式による光周波数コムアナライザの開発," 第 61 回光波センシング技術研究会講演会 LST61-21, 2018/6/13

國分 太志、塩田 達俊 "VIPA / エタロン直列共振器による周波数領域 2 次元光コム干渉のシングルショット断層計測の範囲拡大," 第 61 回光波センシング技術研究会講演会 LST61-22, 2018/6/13

Futoshi Kokubun, Tatsutoshi Shioda "Frequency Domain 2D Incoherent Comb Interferometry for Single-shot Tomographic Imaging," CLEO Pacific Rim 2018(CLEO-PR2018) W4F.6 Aug. 1, 2018, Hong Kong, China

Shohei Gunji, Tatsutoshi Shioda "Improvement of Frequency Accuracy of Spatially-resolved Spectroscopy / Tomographic Spectroscopy," CLEO Pacific Rim 2018(CLEO-PR2018) Tu2F.4 Jul.31,2018, Hong Kong,China

Leona Yuda, Tatsutoshi Shioda "High-speed Optical Frequency Comb Analyzer with Single-detection Technique for Ultrafast Waveform Measurement," CLEO Pacific Rim 2018(CLEO-PR2018) Tu2F.5 Jul. 31, 2018, Hong Kong, China

湯田 怜央奈、長谷川 尊士、多田 浩明、塩田 達俊 "時間並列方式を用いた超高速光周波数コムアナライザ開発の基礎検討," 第 79 回応用物理学学会秋季学術講演会 18p-PA4-17, 2018/9/18

郡司 翔平、塩田 達俊 "トモグラフィック分光計測法の周波数精度改善," 第 79 回応用物理学学会秋季学術講演会 19p-438-18, 2018/9/19

Tatsutoshi Shioda "Optical Frequency Comb Based Ultrafast Waveform Synthesis and Analysis," International Symposium on Imaging, Sensing, and Optical Memory2018(ISOM2018) Mo-E-05, Oct.22,2018, Kitakyushu, Japan

唐澤 悠太郎、郡司 翔平、塩田 達俊 "広帯域光源を用いた簡易な波長可変光源の開発," Optics & Photonics Japan 2018(OPJ2018) 1aP20 Nov. 1, 2018

湯田 怜央奈、サルタナ ナスリン、多田 浩明、塩田 達俊 "時間並列位相検波による光周波数コムアナライザの基礎検討," Optics & Photonics Japan 2018(OPJ2018) 1pB12 Nov.1,2018
Nasrin Sultana, Leona Yuda, Tatsutoshi Shioda "Scan-less dual-heterodyne mixing for dispersion spectrum measurement," Optics & Photonics Japan 2018(OPJ2018) 1pB 9 Nov.1, 2018

西浦 匡則、塩田 達俊 "偏波保持ファイバを用いた 1 μ m 帯光コヒーレンストモグラフィの開発," 第 62 回光波センシング技術研究会講演会 LST62-1 Dec. 4, 2018

Tuan Cong Truong, Masanori Nishiura, Tuan Quoc Banh, Tatsutoshi Shioda "Develop the discrete frequency scanning laser for pseudo frequency comb interferometry using KTN scanner," レーザー学会学術講演会第 38 回年次大会 E424p 12 Jan. 2018

西浦 匡則、唐澤 悠太郎、塩田 達俊 "光波長プロセッサを用いた OCT の分散保障・スペクトル最適化," 第 65 回応用物理学学会春季学術講演会 20a-P2-7 Mar.18, 2018

Takashi Hasegawa, Takayuki Miyamoto, Tatsutoshi Shioda "Time Range Extension of Ultrafast Waveform Measurement by Using Optical Frequency Comb Synthesizer/Analyzer," Laser Science to Photonic Applications (CLEO2017) JTh2A.132. May. 18, 2017, San Jose, California, USA

②1 Tuan Cong Truong, Tuan Quoc Banh, Tatsutoshi Shioda "Development of discrete frequency scanning laser and application to interferometry," 第 59 回光波センシング技術研究会講演会

LST59-2 p.141 ~ 146 Jun.7,2017

- ②② Tuan Cong Truong, Tuan Quoc Banh, and Tatsutoshi Shioda "Novel discrete frequency scanning pulsed-laser for pseudo optical frequency comb profilometry," The 24th Congress of the International Commission for Optics, M1A-04, Aug.21, 2017
- ②③ Takashi Hasegawa and Tatsutoshi Shioda "Improvement of Time Resolution with Range Expanded Ultrafast Waveform Measurement by Using Optical Frequency Comb Synthesizer/Analyzer," The 24th Congress of the International Commission for Optics, P3-05, Aug.22,2017
- ②④ Hikaru Ariya, Tuan Quoc Banh, and Tatsutoshi Shioda "Order Distinction for 2D Single-shot and Two-wavelength Optical Frequency Comb Interferometry," The 24th Congress of the International Commission for Optics, P4-33, Aug. 22, 2017
- ②⑤ M. Koriba, T. Kokubo, T. Mori, Y. Tanaka, T. Kurokawa, T. Shioda "Frequency-variable broadband comb with wide mode spacing for high-resolution spectroscopy," The 24th Congress of the International Commission for Optics, W1A-03, Aug. 23, 2017
- ②⑥ 國分 太志、塩田 達俊 "VIPA を用いた光コム干渉シングルショット 2次元断層計測へ向けた干渉次数判別法," 第78回応用物理学会秋季学術講演会 5a-A414-8 Sep. 5, 2017
- ②⑦ 郡司 翔平、塩田 達俊 "低コヒーレンス干渉と K-K 解析によるサンプル内屈折率計測法の基礎検討," 第78回応用物理学会秋季学術講演会 5a-A414-9 Sep. 5, 2017
- ②⑧ 金 薫賢、杉本 裕晃、塩田 達俊 "距離計測へ向けた DFB-LD の低周波直接変調によるギガヘルツ変調光の生成," 6a-A414-2 Sep.5,2017
- ②⑨ Truong Cong Tuan, Banh Quoc Tuan, Tatsutoshi Shioda "Controlling the dynamic range of 2D single-shot imaging by frequency step of the discrete semiconductor tunable laser," Optics & Photonics Japan 2017 2aB2 Nov.2,2017
- ③⑩ 郡司 翔平、塩田 達俊 "低コヒーレンス干渉計を用いたトモグラフィック分光計測による複素屈折率導出の精度改善," Optics & Photonics Japan 2017 1pB2 Nov.1,2017
- ③⑪ 湯田 怜央奈、長谷川 尊士、塩田 達俊 "光位相スペクトルの時間領域並列計測へ向けた新規遅延回路システムの基礎検討," Optics & Photonics Japan 2017 1pB13 Nov.1,2017
- ③⑫ 國分 太志、塩田 達俊 "シングルショット 2次元形状計測へ向けた VIPA 光コム干渉の次数判別法の研究," Optics & Photonics Japan 2017 2aB6 Nov.2,2017
- ③⑬ 有谷 光、バン クォック トゥアン、塩田 達俊 "バランス検波 2次元シングルショット形状計測システムの基礎検討," Optics & Photonics Japan 2017 2aB7 Nov.2,2017
- ③⑭ 金 薫賢、杉本 裕晃、塩田 達俊 "LD の低周波変調と遅延干渉計による高周波 光マイクロ波の生成と距離計測への応用," Optics & Photonics Japan 2017 2aB10 Nov.2,2017
- ③⑮ 杉本 裕晃、金 薫賢、塩田 達俊 "GA によるギガヘルツ光マイクロ波生成へ向けた半導体レーザー変調波形の最適化の検討," Optics & Photonics Japan 2017 2pB1 Nov.2,2017
- ③⑯ Tatsutoshi Shioda, Hikaru Ariya "Optical Frequency Comb Interferometry for Single-shot 2-dimensional Imaging," Advanced Photonics Congress 2016 JTU4A.17. Jul.2016 Vancouver, Canada
- ③⑰ 有谷光, Tuan Quoc Banh, 塩田達俊 "シングルショット 2次元コム干渉計測のための干渉次数判別法の波長帯依存性," 第77回応用物理学会秋季学術講演会 15a-C32-2 Sep. 2016

[その他]

研究室ホームページ

<http://optel.ees.saitama-u.ac.jp/members.html>

埼玉大学研究者総覧 S-Read

<http://s-read.saitama-u.ac.jp/researchers/pages/researcher/vTsgrVyk>

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。