

令和元年6月14日現在

機関番号：12612

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2018

課題番号：17K17727

研究課題名(和文)光周波数コムとイメージローテーターを用いた瞬時3次元イメージング法の開発

研究課題名(英文)One-shot 3D imaging using optical frequency comb and imaging rotator

研究代表者

加藤 峰士(Kato, Takashi)

電気通信大学・大学院情報理工学研究科・特任助教

研究者番号：20795926

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：光周波数コムを用いた3次元計測手法の原理を開発することに成功し、様々なターゲットを用いてその有用性を実証した。1次元分光器とイメージローテーターを用いた3次元形状計測では、簡便な方法による回転対称性を持つ物体の形状計測を実現した。しかし瞬時かつ高解像度3次元像取得のためには、新しい2次元分光手法が必要であった。そこで、瞬時2次元分光法の発明とそれを用いた高解像度瞬時3次元形状計測手法を開発し、最終的な目標である瞬時3次元形状計測に到達可能な技術の発明に成功した。さらに3次元断層像計測への応用の基礎実験を行い、ガラスの層構造やLEDの表面構造の可視化に成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究成果は、原理的にfsオーダーの時間幅で3次元形状を瞬時に取得できる3次元計測技術である。そのため本手法はsub-psで変化する超高速非定常現象であっても、その瞬間の3次元形状を計測することができ、測定困難な超高速の物理過程を直接計測することで、物理現象の解明に貢献できると考える。また、物体表面からの反射光だけでなく、物体内部からの反射光を計測することで3次元断層像の計測にも適応できる。これにより呼吸や拍動で変動している生体組織の内部構造をとらえることが出来、臨床現場における診断装置として医学に大きく貢献できると期待される。

研究成果の概要(英文)：We succeeded in developing the principle of the one-shot 3D imaging method using the optical frequency comb, and demonstrated its usefulness using various targets. In 3D shape measurement using a one-dimensional spectrometer and an image rotator, shape measurement of an object with rotational symmetry was realized. However, for one-shot and high resolution 3D image, a new 2D spectroscopy method was needed. Therefore, we developed an one-shot 2D spectroscopy and a high-resolution one-shot 3D imaging method using it, and succeeded in the invention of a technology that can reach the final goal of one-shot 3D imaging. Furthermore, basic experiments of application to 3D tomographic imaging were conducted, and the layer structure of glass and the surface structure of LED were successfully visualized.

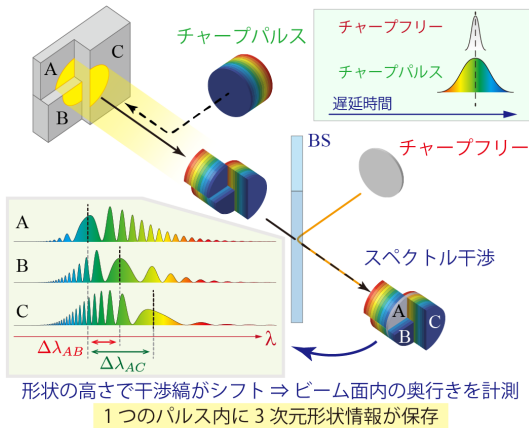
研究分野：光計測

キーワード：光周波数コム 光計測 光演算 形状計測 2次元分光 高速計測

1. 研究開始当初の背景

近年の工学・産業ではロボット制御や自動運転などの技術発展に伴い、高精度な瞬時 3 次元計測手法への展開が切望されている。しかし産業用されている既存法では、高ダイナミックレンジと高精度を両立した瞬時 3 次元計測は容易ではなく、高精度な LIDAR (Light Detection and Ranging) においても計測位置と遅延時間の掃引が必要となり、測定は静止対象物に制限される。この課題に対して、チャープした超短パルス光を用いて時間情報を波長情報に変換して瞬時に多点空間情報をイメージング取得する手法が、研究代表者が所属するグループから報告されている [1]。この手法により、高速現象の瞬時観測や動的物体の形状計測に適用できる高精度瞬時 3 次元計測原理が実証された。しかし機械ステージによる低速応答や、高効率な非線形光学シャッターのために大型で複雑な再生増幅チタンサファイアレーザーが必要などの実用上の課題があった。そのため、高安定かつ実用的な光源を用いた簡便な計測法の開発が必要である。

瞬時 3 次元イメージング法の開発を目的として研究代表者らは、モード同期 Er 添加ファイバレーザーによる光周波数コム（以下、光コム）を用いることを考え、チャープした光コムによるスペクトル干渉を用いた瞬時 3 次元イメージング法の開発を行ってきた [2] (投稿中)。提案した計測原理は、すべての波長の位相が揃った超短パルス(チャープフリー)と、各波長の位相が規則的にシフトしたチャープパルスを干渉させて得られるスペクトル干渉を用いる (図 1)。するとスペクトル上には、パルス間の遅延時間に依存して変化する特徴的な干渉縞パターンが生じる。この干渉縞パターンの変化量と距離の関係は一定なので、このパターンを計測すれば対象までの距離が分かる。



(図 1: チャープした光コムを用いた瞬時 3 次元形状計測原理)

ここで、光コムとは、周波数領域において櫛のように等間隔に並んだスペクトル群で構成される光である。その周波数間隔はモード同期により極めて等間隔で、位相が揃った広帯域光でもあるため fs オーダーの超短パルス列を形成する。光コムは、その高い制御性とコヒーレンスを用いて高精度な周波数計測に利用され、距離計測に用いて計測精度とダイナミックレンジを飛躍的に向上させるなど様々な用途で有用であることが示されている。

研究代表者らは、この光コムを用いた瞬時 3 次元イメージング法の原理を提案し、原理実験を行った。検証実験では、480 μm の段差の形状プロファイルが無走査で不確かさ 1 μm で計測できた。さらに、3 m 離れた 2 枚のミラーの瞬時形状計測も行い、高ダイナミックレンジでも不確かさ 1 μm で計測できた。光コムのコヒーレンスと等間隔性を生かしたパルス間干渉により、不確かさを犠牲にせず測定範囲拡大が可能ことが確認された。しかし、この実験系で 3 次元計測するには問題がある。

[1] Minoshima, K., et al. *Jpn. J. Appl. Phys.* (1994). [2] **T. Kato**, et al., *Sci. Rep.*, 7(1), 2017

2. 研究の目的

光による高精度距離計測は様々な分野で用いられているが、特に近年の工学・産業においては高精度な瞬時 3 次元計測手法が切望されている。そこで研究代表者は、光周波数コムによるスペクトル干渉を用いた高ダイナミックレンジかつ高精度な瞬時 3 次元計測原理を提案し、その有用性を実験で示した。しかし検出系で用いたイメージング分光法では 2 次元形状しか測定できず、3 次元形状計測を行うには新たな分光システムを開発する必要がある。そこで本研究では、並列イメージローテーターを用いた新しい分光計を開発することにより、瞬時 3 次元イメージング法の確立と、瞬時 3 次元断面計測の実現を目指す。この手法は、計測困難な超高速形状変化の計測への展開も期待でき、理工学の発展に大きく貢献すると考える。

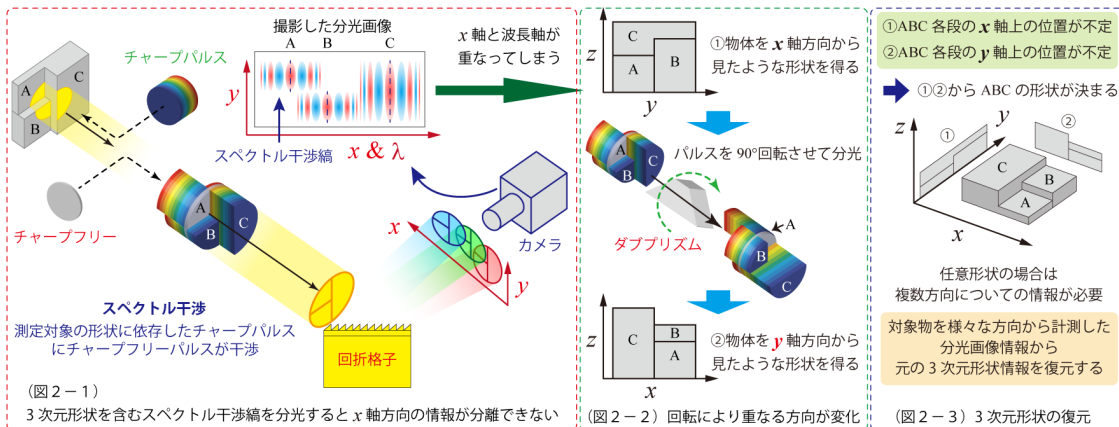
3. 研究の方法

研究代表者らが原理実証した計測手法では、対象物の形状に依存するスペクトル干渉を計測することで形状情報を読み取る。この研究では、回折格子による単純な分光で埋もれてしまう情報を補完し、元の 3 次元形状情報を復元する方法を確立させる。

<回転したスペクトル干渉の分光画像から 3 次元形状情報を復元する方法の確立>

初めに図 2-1 のように、3 次元情報のスペクトル干渉の分光画像を撮影すると、分光方向と同じ X 軸方向の情報が重なったスペクトル干渉が計測される。すると、X 軸方向が重なった 3 次元形状が計測できる。次にイメージローテーター (ダブルプリズム) でスペクトル干渉を 90° 回転させると、Y 軸方向が重なった 3 次元形状が同様に計測できる (図 2-2)。この 2 つの情報はそれぞれ異なる 1 つの次元に不定性があるが、2 つを合わせることでその不定性が補完される。これにより、元の 3 次元形状を復元すること考える (図 2-3)。実際に任意形状物を測定する場合は、より複雑なスペクトル干渉像となることが予想される。これに対しては、より細かい角度で回転

させた分光画像を使うことで、XY 平面の空間解像度を向上させることができると考えられる。そこで、イメージローテーターで1° ずつ回転させた分光画像を取得し、このうちの全部または一部の分光画像を用いて3次元形状を算出する。これにより、空間解像度と必要な角度変化量の関係を明らかにする。



<回転したスペクトル干渉の分光画像を複数同時に計測する光学系の設計・開発>

前年度で確立させた手法に従い、回転したスペクトル干渉の分光画像を必要な数だけ同時計測する光学系を設計・開発し、瞬時3次元イメージング法を確立させる。この光学系はまず、プリズムで必要数に分割したビームをダブリズムでそれぞれ回転させ、それらを回折格子で分光する。このとき、互いの分光画像が重ならないよう配置することで、計測に必要な分光画像を同時に取得できるものである。開発方法としては、まずビームラインの並列化と画像素子への分光画像の最適な配置をそれぞれ明らかにする。その後、これらを一体化した光学系をCADで設計・完成させる。この光学系の完成により、瞬時3次元イメージングが可能となる。完成後、パルス幅がsub-ps程度のチャープパルスで既知の物体を測定し、計測分解能の限界を調べる。

<瞬時3次元イメージング法による瞬時3次元断層計測>

この実験では、開発した瞬時3次元イメージング法によって、測定対象物の3次元断層像を瞬時に計測可能であることを示す。開発した瞬時3次元イメージング法は、照射したチャープパルスが測定対象物から反射した際、その形状に依存した遅延時間を持つことを利用している。一方、光がある程度透過し、内部構造による屈折率の急激な変化があれば、そこで反射光が生じる。そしてその反射光には内部構造に依存する遅延時間が与えられる。よって3次元形状の時と同様に、開発した手法によって3次元断層像を得る可能性は十分ある。

まず既知の厚みのガラス板を積層したものを測定する。これにより、測定した3次元断層像の正確さを検証する。また、光源のモード同期Er添加ファイバレーザーからは1.55 μm帯の光コムが出力されており、生体組織に対して一定の透過性がある。そこで植物の葉、豚や牛の肉といった容易に入手できる生体組織を用いて、本手法による3次元断層計測の有用性を検証する

<上記手法とは異なる新規3次元計測手法の発明>

本研究でイメージローテータを用いた3次元計測手法の開発を目指す。本計測手法の本質は2次元分光を行うことである。そのため、上記手法の開発を行うと共に、カメラ解像度並みの瞬時3次元計測手法の開発も並行して行い、その有用性次第によっては新規手法の開発を主として行う。

4. 研究成果

イメージローテータを用いた3次元形状計測については、当初計画していた基礎実験を実施してその有効性を確認した。具体的には、直交する2方向に向くよう干渉画像を回転させ、ブロックゲージの段差構造計測を行った。この成果についてはCLEOPR2017において口頭発表した。しかし、回転精度による解像度の制限や、並列化させるのに必要な素子数が膨大であることなどから、本研究の最終目標である瞬時3次元計測を達成させる手法として考えると、実用性に課題があることがわかった。そこでこの問題を解決するため、研究代表者は計測原理を根本的に見直し、新しい2次元分光手法の開発を目指した。

スペクトル干渉を用いた手法では、分光手法による制限で高解像度な瞬時3次元イメージを得ることが出来なかった。実際に行ってきた方法としては、1次元分光器を利用してラインスキャンする方法や、バンドルファイバによる2次元分光を行って計測してきた。しかし、前者は高解像度ではあるもののスキャンが必要であり、後者はワンショット撮影ができるが低解像度である。そこで次のステップとして求められるのは、瞬時に高解像度な3次元イメージを取得する新たな検出法の開発である。

スペクトル干渉像から高解像度3次元イメージを取得するには、瞬時取得可能な高解像度2次元分光法の開発が必要となる。2次元分光法、いわゆるハイパースペクトラルイメージングという手法は数多く提案されている。大雑把に分類するならば、①2次元像を分割して分光する方法、②2次元像を複製して複数のバンドパスフィルタを通して分光する方法、③2次元パターンを用

いた圧縮センシングのように 2 次元像に特異なパターンをかけて計測し逆問題を解いて分光情報を再構成する手法がある。細かい手法には依るが、瞬時取得という点では①と②が候補となり、高解像度となると②が有力である。これは画像の横分解能が画像素子と同等であることが理由である。分光性能という点では、従来の 1 次元分光器を使用する①が最も高い。つまり、高解像度と分光性能を両立させる手法は①と②を合わせたような手法であるが、そのような手法はいまだ提案されていなかった。

そこで我々は、その 2 つの性能を両立させる新たな手法を開発した。それが、光ヒルベルト変換とペアフィルタを用いた高解像度 2 次元分光法である。

チャープパルスのスペクトル干渉はある波長帯に低い干渉縞周波数が表れ、この干渉パルスを画像素子の 1 ピクセルのような PD で受光すると、その波長帯の強度に依存した信号が得られる。これはパルス間の遅延時間が変化することで波長帯が変化するため、遅延時間とパルスのスペクトル強度が対応する。つまり、画像素子の各ピクセルで何色の強度を取得したかが分かれば、遅延時間（すなわち距離）が分かり、画像素子と同等の 3 次元イメージが瞬時に得られる。さらに遅延時間を掃引すれば対象物の吸収または透過スペクトル強度分布がわかり、各色の遅延時間の変化を測れば位相スペクトルもわかる。この際、スペクトルに依存する強度を取得する手法として、互いに位相が 90 度ズレた位相差パルスによる光ヒルベルト変換を用いた。これはロックイン検出と同じように、sin 波信号と cos 波信号の 2 乗和平方根を得ることで、振動波形の振幅を求めることに等しく、それを光で瞬時に実行している。

取得したスペクトル依存の強度が何色であるかは、透過スペクトルが異なる 2 枚のフィルタ（ペアフィルタ）によって特定する。これは 3CCD と同じように、異なるフィルタを透過した強度の比を求めることによって、波長を特定するというものである。

図 3 に実験系と 50 円玉の測定結果を示す。図 3 (a) が示す実験系は光コム光源とマッハツェンダー干渉計、ペアフィルタシステムで構成されている。またマッハツェンダー干渉計の片方のパスには位相差信号を作るための小さなマッハツェンダー干渉計が組み込まれている。実験では、2 つの位相差パルス信号を 2 枚のフィルタに透過させて計測したので、計 4 枚の干渉画像を取得した。これは実験配置を工夫することで 1 度に取得できる。図 3 (b) は適切な対物・接眼レンズを導入して取得した 50 円玉の 3 次元データである。従来スキャンしないと得られなかった解像度が瞬時に取得可能となり、図 3 (b) では 120 平方ピクセルの像が得られた。これはバンドルファイバで得た 190 ピクセル画像の約 75 倍の解像度である。

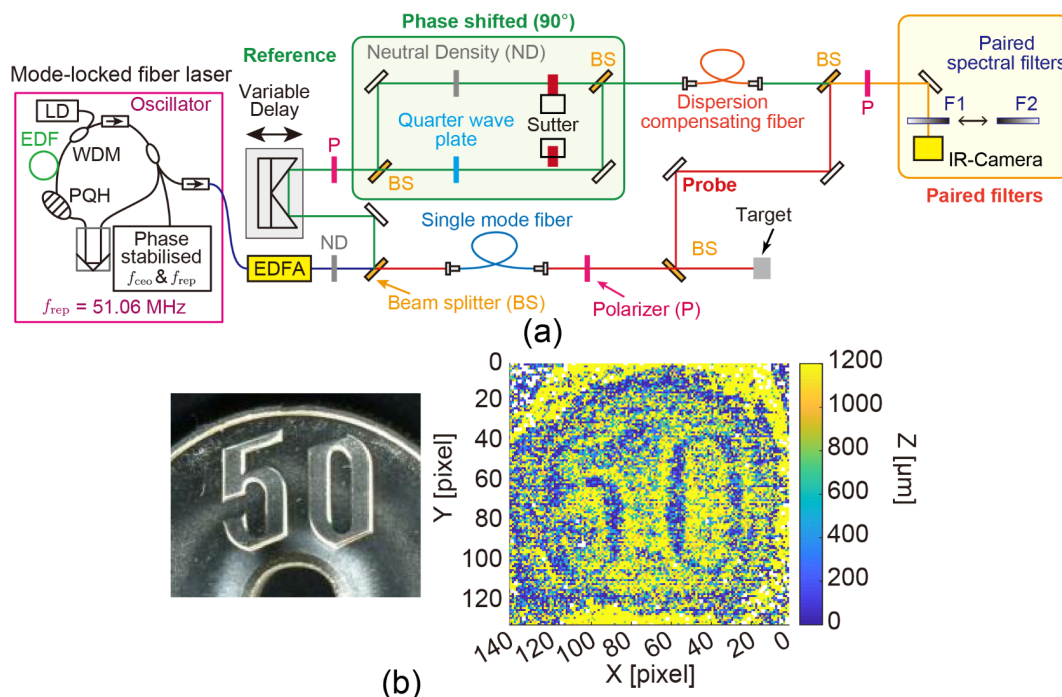


図 3 (a)実験配置図 (b)50 円玉の 3 次元イメージ

以上の成果により、当初考案したイメージローテーターを用いた手法よりも、格段に優れた高解像度瞬時 3 次元計測技術の開発に成功した。本手法では原理的に 3 次元構造の f_s スケールでの可視化が可能となり、1 次元分光器を用いた手法と同様の原理であるため精度は sub- μm まで到達可能な手法である。これは本研究の最終目的である、瞬時かつ高解像度 3 次元イメージング手法が確立されたことになる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (計 10 件) 全て査読あり

- [1]. 加藤峰士, 内田めぐみ, 田中優里奈, 美濃島薫, “チャープした光コムによる瞬時 3 次元計測”, *フォトニクス分科会*, 5(1), 18-23, 2019
- [2]. T. Kato, M. Uchida, Y. Tanaka, and K. Minoshima, “One-shot three-dimensional imaging using a stabilized all-optical Hilbert transform with optical frequency comb,” *The 8th Advanced Lasers and Photon Sources 2019 (ALPS2019)*, ALPS-7-04, 2019
- [3]. T. Kato, M. Uchida, Y. Tanaka and K. Minoshima, “One-shot three-dimensional imaging with a paired filter and chirped-frequency combs,” *Conference on Lasers and Electro-Optics 2018 (CLEO2018)*, STh3L.6. 2018
- [4]. T. Kato, M. Uchida, Y. Tanaka, and K. Minoshima, “One-shot three-dimensional imaging with a paired filter and an optical pseudo-Hilbert transform using chirped-frequency combs,” *The 7th Advanced Lasers and Photon Sources 2018 (ALPS2018)*, ALPS7-I2-4, 2018
- [5]. T. Kato, M. Uchida, and K. Minoshima, “No-scanning 3D measurement method using ultrafast dimensional conversion with a chirped optical frequency comb”, *Sci. Rep.*, 7(1), 3670, 2017
- [6]. T. Kato, M. Uchida, Y. Tanaka and K. Minoshima, “Non-scanning three-dimensional tomographic imaging using chirped-frequency comb”, *Conference on Lasers and Electro-Optics 2017 (CLEO2017)*, SF2C.5. 2017
- [7]. T. Kato, M. Uchida, Y. Tanaka, and K. Minoshima, “Non-scanning tomographic measurements using spectral interferometry with chirped-frequency comb,” *The 24th Congress of the International Commission for Optics (ICO)*, M1A-03, 2017

など

〔学会発表〕 (計 23 件) 査読あり 12 件、査読なし 10 件

- [8]. T. Kato, M. Uchida, Y. Tanaka and K. Minoshima, “One-shot three-dimensional imaging with a paired filter and chirped-frequency combs,” *Conference on Lasers and Electro-Optics*, STh3L.6. 2018(May.)
- [9]. T. Kato, M. Uchida, Y. Tanaka, and K. Minoshima, “One-shot three-dimensional imaging with a paired filter and an optical pseudo-Hilbert transform using chirped-frequency combs,” *The 7th Advanced Lasers and Photon Sources 2018(ALPS2018)*, ALPS7-I2-4, 2018(Apr.)
- [10]. Y. Tanaka, T. Kato, M. Uchida, and K. Minoshima, “No-scanning 3D image detection with sum-frequency generation of chirped optical frequency combs,” *The 7th Advanced Lasers and Photon Sources 2018(ALPS2018)*, ALPS7-I2-3, 2018(Apr.)
- [11]. T. Kato, M. Uchida, Y. Tanaka, and K. Minoshima, “Non-scanning tomographic measurements using spectral interferometry with chirped-frequency comb,” *The 24th Congress of the International Commission for Optics(ICO)*, M1A-03, 2017(Aug.)
- [12]. M. Uchida, T. Kato, Y. Tanaka and K. Minoshima, “Non-scanning three-dimension measurements with a single-mode fiber bundle using a chirped frequency comb interferometry”, *The 24th Congress of the International Commission for Optics(ICO)*, 2017(Aug.)

など

〔図書〕 (計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 3 件)

名称：2次元分光計測方法及び2次元分光計測装置

発明者：加藤峰士、美濃島薫

権利者：同上

種類：特許

番号：特願 2018-038101

出願年：2018

国内外の別：国内

名称：2次元分光法および2次元分光装置

発明者：加藤峰士、美濃島薫

権利者：同上

種類：特許

番号：特願 2018-038102

出願年：2018

国内外の別：国内

名称：干渉信号強度取得方法及び干渉信号強度取得装置

発明者：加藤峰士、美濃島薫

権利者：同上

種類：特許
番号：特願 2018-038103
出願年：2018
国内外の別：国内

○取得状況（計0件）

〔その他〕

【招待講演】（計2件）

- [13]. 加藤峰士, 内田めぐみ, 田中優里奈, 美濃島薫, “光コムの瞬時 3 次元形状および断層像計測法への展開”, 精密測定展, 2018(6月)
- [14]. 加藤峰士, 内田めぐみ, 田中優里奈, 美濃島薫, “チャープした光コムのスペクトル干渉を用いた超高速3次元イメージング法の開発,” 第65回応用物理学会春季学術講演会, 東京2018(3月)

ホームページ等

<http://www.femto-comb.es.uec.ac.jp/>

6. 研究組織

研究代表者のみ

※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。