

令和 3 年 6 月 7 日現在

機関番号：12612

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2020

課題番号：19K15464

研究課題名(和文)高繰り返し光周波数コムによる超高ダイナミックレンジ瞬時3次元計測手法の開発

研究課題名(英文)Development of ultra-high dynamic range one-shot three-dimensional imaging method using high repetition rate optical frequency comb

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) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：チャープした高繰り返しYbファイバレーザーを用いることで、連続かつ長大な計測可能範囲を有する高ダイナミックレンジ瞬時3次元計測を実現した。本研究では繰り返し周波数750 MHzのYb光コムを光源とすることで、パルス間隔40 cmのパルス列を発生させた。これに回折格子対を用いた高分散光学系による高チャープを与えることでパルスの長さを40 cmまで拡大させる事ができ、デッドゾーンフリーを達成した。その結果、原理的な測定範囲が無限大、奥行分解能 $31\ \mu\text{m}$ の超広ダイナミックレンジ計測を実現し、40 cm離れた3枚ミラーの面形状の瞬時計測に成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、高繰り返し光コム光源を形状計測へ応用する世界で初めての試みである。高い繰り返し周波数を利用した連続かつ長大な計測可能範囲を有する瞬時3次元計測手法を確立する。これは、単なる光源の置き換えではなく、“高繰り返し”の性質を積極的に利用したものであり、高繰り返し光コムの光源としての価値を新たに見出す研究と言える。

また、実質的に計測範囲が無限大といえる超広ダイナミックレンジ計測は、任意の物体が任意の位置に不意に出現したとしても必ず計測することが出来る。特に超短パルスを用いることで実質的な露光時間もフェムト秒となり、超高速現象も測定可能な時空間的な広ダイナミックレンジ計測も達成できる。

研究成果の概要(英文)：By using a chirped high-repetition Yb fiber laser, we have achieved one-shot 3D measurement with a high dynamic range that is continuous and has a long measurable range. In this study, the Yb optical comb with a repetition rate of 750 MHz is used as a light source to generate a pulse train with a pulse interval of 40 cm. The pulse length was increased to 40 cm by applying high chirp using a high-dispersion optical system with diffraction grating pairs, and dead-zone-free measurement was achieved. As a result, an ultra-wide dynamic range measurement with infinite measurement range and depth resolution of $31\ \mu\text{m}$ was achieved, and the surface profile of three mirrors 40 cm apart was successfully measured by one-shot.

研究分野：光周波数コム

キーワード：光周波数コム 3次元計測 光演算 干渉計測

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。しかし産業応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3次元情報を取得する手法が研究者代表者の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、超高速現象の形状計測が実現できる高精度瞬時3次元計測の原理が実証された。しかし機械ステージによる低速応答や、低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。

この課題に対し、研究者代表者らはチャープした光周波数コム (以下、光コム) によるスペクトル干渉を用いた瞬時3次元計測法の開発を行った[2]。この計測原理は、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、各波長の位相が線形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)。この時スペクトル上には、パルス間の遅延時間 (すなわち距離) に依存して変化する特徴的な干渉縞パターンが生じるため、これを計測すれば対象までの距離が分かる。

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広帯域光である。その周波数の間隔はモード同期により極めて正確で、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ると共に、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その有用性が示されている。

研究者代表者らはすでに回折格子を用いた従来の分光器でスペクトル干渉パターンを解析し、sub- μm 精度の瞬時3次元形状および断層計測[3]に成功した。さらに光コムによる光演算を使った2次元分光法を発明し[4]、画像素子相当の高解像度な瞬時3次元計測を実現した[5]。

このように本手法の有用性を数々の実験で検証してきた一方で、いくつかの未解決な課題も存在している。それは、光コムのパルス列の間に断続的に生じる計測不可能範囲 (以下、デットゾーン) の存在である。本手法は超短パルス列のパルス間干渉によって高ダイナミックレンジ計測を実現するが、干渉する相手がいないデットゾーンにパルスが重なると、干渉が起きないため計測が出来ない (図2(a))。特に、従来の Er 添加ファイバレーザーではパルスの繰り返し周波数が約 50 MHz と低いためにパルス間隔が広く (約 6 m)、デットゾーンの発生は避けられない。任意の位置にある 3次元形状を計測できるデットゾーンフリーの高ダイナミックレンジ計測を行うためには、高い繰り返し周波数の光コム (以下、高繰り返し光コム) によってパルス列の密度を増やし、さらにパルス間隔を埋め尽くすほどの高チャープパルスでデットゾーンフリー化を行った、新たな瞬時3次元計測手法の実現が必要である。

[1] Minoshima, K., et al. Jpn. J. Appl. Phys., 33(2), 1994

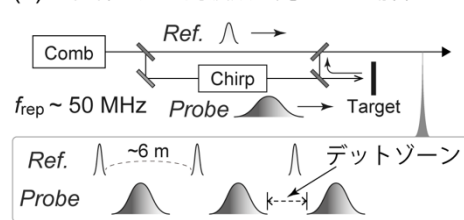
[2] T. Kato, et al., Sci. Rep., 7(1), 2017

[3] T. Kato, et al. CLEO, SF2C.5. 2017

[4] 特願 2018-038101

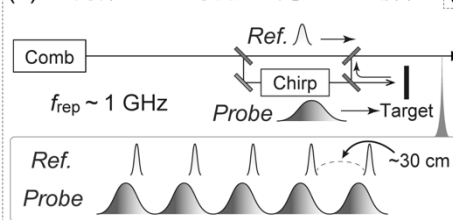
[5] T. Kato, et al. CLEO, STh3L.6. 2018

(a) 低繰り返し周波数の光コムの場合



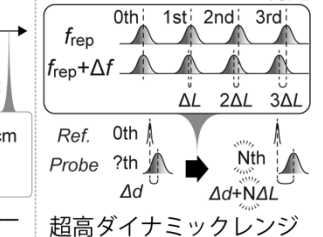
測定対象の位置により干渉しない場合がある

(b) 高繰り返し周波数の光コムの場合

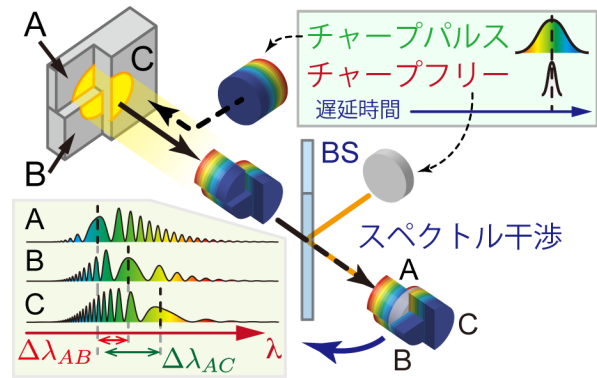


必ずパルスが干渉 ⇒ デットゾーンフリー

(c) 繰り返し周波数の変化でどのプローブパルスか判定



超高ダイナミックレンジ



1つのパルス内に3次元形状情報が記録

図1: 瞬時3次元形状計測の原理

図2 高繰り返し光コムを用いることによる超高ダイナミックレンジの実現

2. 研究の目的

本研究の目的は、チャープした高繰り返し光コムを用いることで、連続かつ長大な計測可能範囲を有する高ダイナミックレンジ瞬時 3 次元計測の実現である (図 2(b))。この際、繰り返し周波数を変化させることで、参照光と物体光 (プローブ光) のパルス間のずれを特定できる (図 2(c))。これにより、干渉計測による高精度測定とパルス間干渉の間隔数を組み合わせで、大型構体の形状や動的変化を瞬時に計測できる。

3. 研究の方法

本研究目的は、チャープした高繰り返し光コムを用いた超高ダイナミックレンジ瞬時 3 次元計測の実現である。これを行うために、研究期間内には以下の内容を実施した。

<高繰り返し光コムの導入と瞬時 3 次元計測のデットゾーンフリー化>

光源として繰り返し周波数 750 MHz の高繰り返し Yb 光コムを採用し、さらにチャープパルスの時間幅を 1 ns に拡大することでデットゾーンフリー状態を達成した。この状態における瞬時 3 次元計測を行い、この際に得られる特異なスペクトル干渉像から奥行き情報を検出する方法を考案した。

<高アスペクト比物体の瞬時計測の実現>

パルス間干渉による瞬時 3 次元計測を行い、高アスペクト比を持つ物体の瞬時計測を行った (図 2(c))。ここでは既知のパルス間干渉を用いて 40 cm を超える対象物での精密測定を行った。

4. 研究成果

<高繰り返し Yb 光コム>

今回使用した光源は、研究代表者が所属するグループで開発した光コムは高繰り返し Yb ファイバレーザである。これは利得媒質として YDF (Yb-doped fiber) を用いたレーザである。YDF は Yb^{3+} イオンをファイバのコアに添加することで作成される。一般に希土類イオンのファイバへの添加はイオン濃度の増加で発行強度が低下する濃度消光おこる。しかし、 Yb^{3+} イオンは濃度消光が起きにくく、高濃度にドープができるため高利得で高出力である。さらに、ファイバは体積あたりの表面積が大きく放熱性に優れているため、YDF は高出力レーザの利得媒質として有用である。

また、発振波長に関して、ファイバレーザとして一般によく使われる Er ファイバレーザでは発振波長が 1.5 μm 帯であるため検出器に InGaAs が用いられているが、Yb ファイバの発振波長は 1 μm 帯であるため比較的安価で高解像度な Si 検出器が使用できる。さらに、フォトニック結晶ファイバなどの非線形ファイバを用いれば、容易に可視光領域にアクセスできるため、イメージング応用にも有用である。

本研究で使用した 750 MHz 高繰り返し Yb ファイバコムの共振器構成を図 3 に示す。共振器はリング型共振器で時計回りに光が伝播する。まず、励起光源として波長 976 nm、最大出力が 750 mW の励起 LD を計 4 台使用し YDF を励起する。4 台のうちそれぞれ 2 台の励起 LD をビームコンバイナで結合し、双方向励起にすることで高効率な励起が可能である。YDF で発生した光はコリメーター付き WDM から出射し、 $\lambda/4$ 波長板 (QWP) と $\lambda/2$ 波長板 (HWP) を透過する。共振器内の波長板は非線形偏波回転によるモード同期をかけるために使用される。次に、共振器分散を調整するために二枚の透過型回折格子を用いた。回折格子を透過した光は PBS、FR、PBS と時計回りに伝播する。ここで PBS は P 偏光を透過、S 偏光を反射させる素子、FR はファラデー効果で偏光を回転させる素子である。PBS と FR を組み合わせることで、アイソレータとして動作させている。EOM は電圧によって屈折率が変化するため、電圧によって共振器長を制御できる。また、ファイバに取り付けられている PZT は印加電圧によって伸縮する素子で、ファイバに圧力を加えることで共振器長を変えられる。

繰り返し周波数は共振器長に反比例するため、高繰り返しコムの実現には共振器長を短くする必要がある。一般にゲインファイバが短いとモード同期がかけられないが、Yb ファイバは高利得であるため短い長さでもモード同期をかけられ、750 MHz の高繰り返しを達成した。

<Yb 光コムによるスペクトル干渉の計測と解析>

スペクトル干渉縞から最低干渉縞周波数波長の位置を決定する解析手法を説明する。チャープしたパルスの干渉では図 4(a)のようにスペクトル上で、不均一な縞間隔の干渉縞パターンが現れる。このスペクトル干渉縞の最低干渉縞周波数を与える特性波長を決定するために、予め取得しておいた干渉していない状態のスペクトルを用いてバックグラウンド処理をして縞の情報を抽出する。更に、抽出した波形 $f(m)$ に対して式(1)のように畳み込みを計算して自己相関をとる。

$$g(n) = \sum f(m)f(n - m) \quad (1)$$

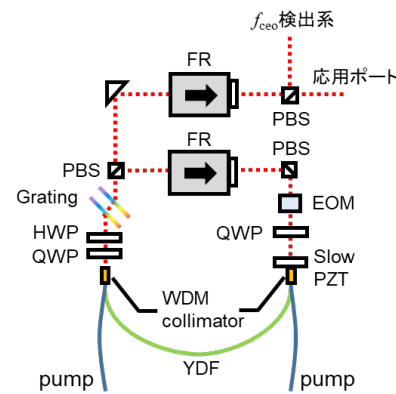


図 3. 共振器の構成

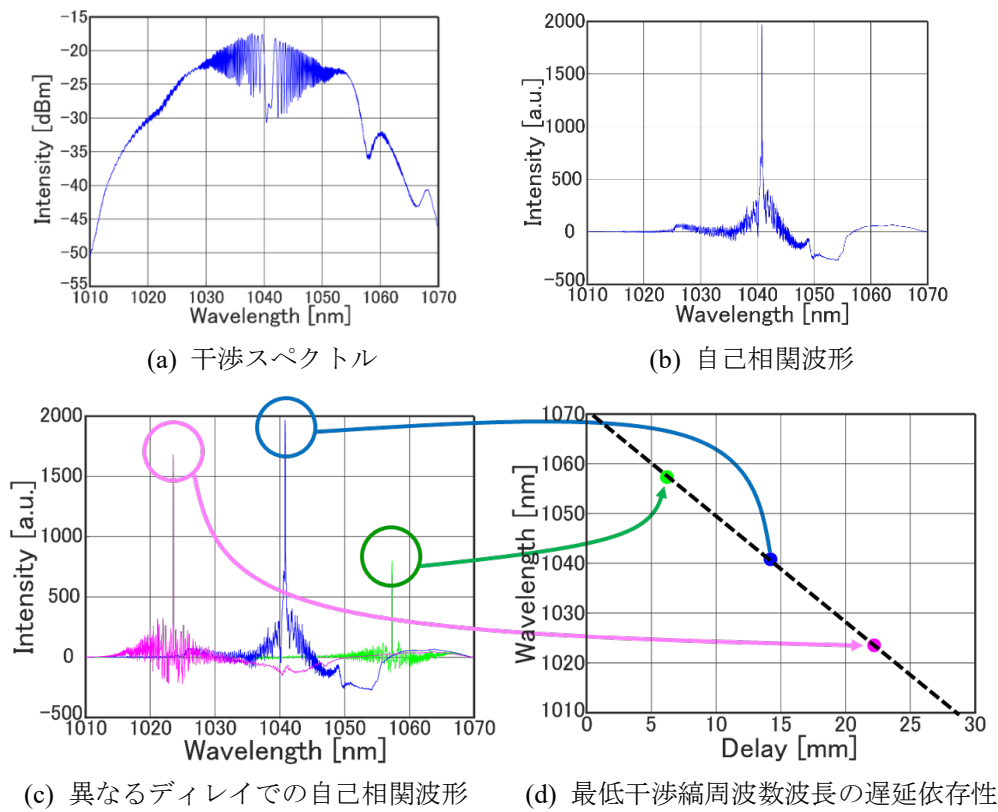


図 4. 自己相関を用いた解析方法

自己相関をとると図 4(b)のように、明瞭なピークが検出でき、特性波長位置を決定できる。次に、異なる遅延を与えて、図 4(c)のように特性波長の位置を変化させる。このとき、遅延に対する特性波長位置を図 4(d)のようにプロットし、プロット点に対してフィッティングすることで校正曲線が得られる。したがって、あらかじめ校正曲線を取得しておけば、校正曲線を用いて干渉スペクトルから奥行情報を読み出すことができ、無走査で計測が行える。

<高繰り返し Yb 光コムによる測定範囲拡大の手法>

スペクトル干渉を用いた計測では、干渉信号を用いるためパルスが存在しないデッドゾーンでは計測が行えない。干渉信号が検出できない場合、繰り返し周波数を変化させ、実効的に光路長を走査させることで干渉信号を検出できる。この手法はステージなどによる機械的な光路長操作と比べて機械的動作による不確かさの影響を抑制できるため有用である。しかし、共振器長を変化させる必要があるため、一度の測定での測定範囲は限られている。そこで、高繰り返し光源を適用することでパルス間隔を狭くするとともに、チャープさせることで図 2(c)のようにデッドゾーンを削減し、同時計範囲を拡大できる。本研究では 750 MHz の高繰り返しファイバコムを用いており、パルス間隔は約 40 cm である。

まず回折格子対を用いた分散光学系によって計測範囲の拡大を行った。光源は中心波長 1040 nm、半値全幅約 20 nm でパワーは 44 mW である。光コムの出力は干渉計の BS でリファレンスとプローブに分けられ、プローブ光にのみ回折格子対(LightSmyth, T-1000-1040, 1000 line/mm) で負のチャープを与えた。チャープしたプローブ光とリファレンス光を干渉させ、移動ステージを用いて遅延時間を変化させながらスペクトルを検出した。このとき、チャープ量は回折格子対の間隔で変化させることができる。回折格子対の実効的な間隔を 84 mm、180 mm、280 mm とすることで、与えられる群速度分散が -0.56 ps^2 、 -1.20 ps^2 、 -1.87 ps^2 となり、それぞれの状態において校正曲線を測定した。

異なるチャープ量において、スペクトル干渉縞の最低干渉縞周波数(最も粗い縞)を与える特性波長の遅延依存性を図 5 に示す。得られた直線の傾きはチャープ量に依存し、回折格子でチャープ量を変化させると、傾きが変化した。直線の傾きの逆数は波長 1 nm 当たりの奥行測定範囲を示しており、チャープ量に対して波長 1 nm 当たりの奥行測定範囲は線形的に増加するため、

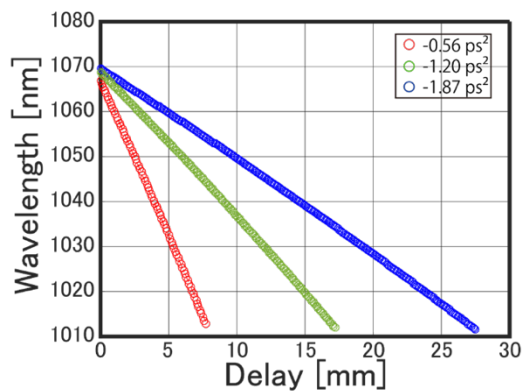


図 5. 最低干渉縞周波数波長の遅延依存性の測定結果

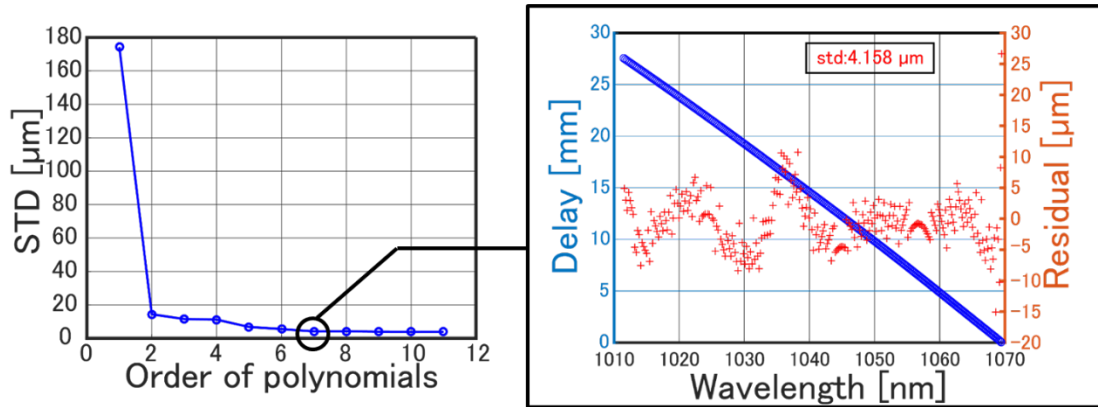


図 6. 多項式近似の近似次数と残差の標準偏差結果

チャープ量を大きくすると同じスペクトル範囲では測定範囲が拡大することが分かった。 -1.87 ps^2 のとき、約 60 nm の波長帯域を用いた一つのパルスでの測定可能範囲は、 27 mm を達成した。

-1.87 ps^2 のときの測定点に対して多項式近似を用いてフィッティングを行い、近似曲線との残差の標準偏差求めた。多項式近似の近似次数と残差の標準偏差を図 6 に示す。近似次数が 7 次でおおよそ一定となり、その標準偏差は $4 \mu\text{m}$ レベルを達成した。

<デットゾーンフリーの達成とパルス間干渉による高アスペクト比物体の形状計測>

上記の準備実験を経て、最適な回折格子対の長さを設計してデットゾーンフリーの達成を目指した。回折格子間隔を約 1 m とし、チャープ量は約 -13.2 ps^2 としたときの最低干渉縞周波数波長の遅延依存性を図 7 に示す。遅延を 0 mm から 86 mm の範囲で動かしたとき、最低干渉縞波長位置は直線的に変化した。さらに遅延を加えると、干渉縞が消えることなく次のパルスとの干渉縞が検出できた。つまり、これはパルス間のデッドゾーンがないことを示している。以上から測定間隔 200 mm に対して全領域で測定可能となり、デッドゾーンフリー計測を達成した。このときの奥行分解能は OSA で計測した場合 $31 \mu\text{m}$ 、イメージング分光器で計測した場合は $81 \mu\text{m}$ となった。

デットゾーンフリーを達成した状態で、異なるパルスにまたがる反射物体の形状計測を行った。図 8 に示すような 3 枚のミラーを用いて、その表面形状を瞬時計測した。このとき 3 枚のミラーは奥行方向に 71.5 mm 、 127.5 mm 間隔で配置し、さらに参照光に設置したディレイステージを折り返し配置にすることで実行的な距離が 2 倍となるようにした。最長 400 mm 程度の奥行き長さを持つような高アスペクト比物体とした。計測した結果を図 8 にプロットした。赤、青、緑線がそれぞれのミラー形状を示しており、 40 cm もの距離でもミラーの平坦な形状が検出できている。このとき赤線と緑線に対応する距離情報はパルス間干渉で計測されている。各ミラー面の標準偏差は 1 mm であり、これは波面形状に起因する干渉縞パターンがピーク検出に影響したためである。今後は検出感度と分解能の向上を行い、より広範な対象にも適応できるよう改善していく。

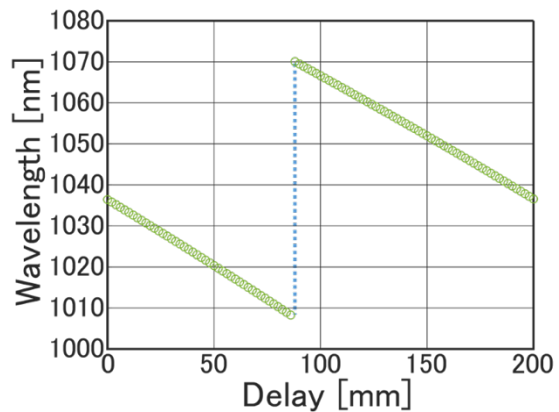


図 7. 最低干渉縞周波数波長の遅延依存性の測定結果

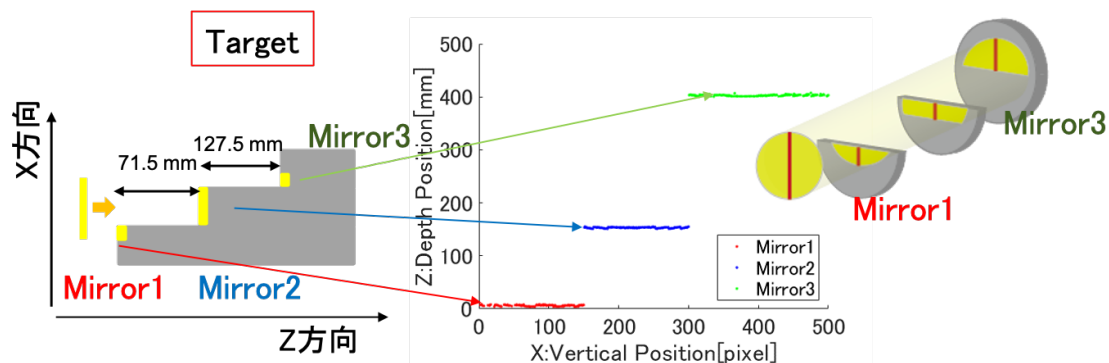


図 8. 最低干渉縞周波数波長の遅延依存性の測定結果

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Kato Takashi, Uchida Megumi, Tanaka Yurina, Minoshima Kaoru	4. 巻 3
2. 論文標題 High-resolution 3D imaging method using chirped optical frequency combs based on convolution analysis of the spectral interference fringe	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 OSA Continuum	6. 最初と最後の頁 20 ~ 20
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/Osac.381540	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 加藤峰士, 内田めぐみ, 田中優里奈, 美濃島薫	4. 巻 5
2. 論文標題 チャープした光コムによる瞬時3次元計測	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 フォトニクス分科会	6. 最初と最後の頁 18 ~ 23
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計17件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 6件）

1. 発表者名 森藤環, 加藤峰士, 寺田和博, 美濃島薫
2. 発表標題 光コムによる全光ヒルベルト変換のためのスペクトル干渉縞検出を用いたパルス位相差安定化法
3. 学会等名 2020年第67回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 加藤峰士, 石井大貴, 寺田和博, 森藤環, 美濃島薫
2. 発表標題 シングルパルスイメージングによる超高速現象の瞬時3次元計測
3. 学会等名 2020年第67回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 寺田和博, 加藤峰士, 森藤環, 美濃島薫
2. 発表標題 光コムの位相制御を用いた全光ヒルベルト変換による瞬時3次元形状計測の範囲拡大に向けての検討
3. 学会等名 2019年日本光学会年次学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 石井大貴, 加藤峰士, 寺田和博, 森藤環, 徐博, 中嶋善晶, 張志剛, 美濃島薫
2. 発表標題 750 MHz高繰り返しYbファイバコムによる広範囲無走査三次元形状計測
3. 学会等名 レーザー学会第538回研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 加藤峰士, 石井大貴, 寺田和博, 森藤環, 美濃島薫
2. 発表標題 パルスピックアップされた光コムによる超高速3次元計測の検討
3. 学会等名 2019年第80回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 加藤峰士, 内田めぐみ, 田中優里奈, 美濃島薫
2. 発表標題 光コムと全帯域位相制御による光演算を用いた高解像度瞬時3次元計測
3. 学会等名 第44回光学シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 加藤峰士, 内田めぐみ, 田中優里奈, 美濃島薫
2. 発表標題 光コムによる精密かつ高解像度な瞬時3次元計測
3. 学会等名 第58回日本生体医工学会大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 加藤峰士, 内田めぐみ, 田中優里奈, 美濃島薫
2. 発表標題 光コムによる全光ヒルベルト変換を用いた3次元形状の高解像連続計測
3. 学会等名 第66回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Kato, H. Ishii, K. Terada, T. Moritoh, K. Minoshima
2. 発表標題 Single-shot three-dimensional imaging with all-optical information processing using phase-controlled chirped optical frequency comb
3. 学会等名 Photonics west LASE 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 T. Kato, H. Ishii, K. Terada, T. Moritoh and K. Minoshima
2. 発表標題 Pico-second single-pulse three-dimensional imaging with an optical frequency comb
3. 学会等名 Conference on Lasers and Electro-Optics 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 T. Kato, M. Uchida, Y. Tanaka and K. Minoshima
2. 発表標題 All-optical Hilbert transform with optical frequency comb for one-shot three-dimensional imaging
3. 学会等名 Conference on Lasers and Electro-Optics 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Kato, M. Uchida, Y. Tanaka, and K. Minoshima
2. 発表標題 One-shot three-dimensional imaging using a stabilized all-optical Hilbert transform with optical frequency comb
3. 学会等名 The 8th Advanced Lasers and Photon Sources 2019(ALPS2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Kato, H. Ishii, K. Terada, T. Moritoh and K. Minoshima
2. 発表標題 Pico-second single-pulse three-dimensional imaging with an optical frequency comb
3. 学会等名 The 9th Advanced Lasers and Photon Sources 2020(ALPS2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 加藤峰士, 内田めぐみ, 田中優里奈, 美濃島薫
2. 発表標題 光コムによる高速光演算を用いた瞬時3次元イメージングの高品位化
3. 学会等名 レーザー学会学術講演会第39回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 森藤環, 加藤峰士, 石井大貴, 寺田和博, 美濃島薫
2. 発表標題 光コムによる全光ヒルベルト変換のための位相差パルス安定化用マルチチャンネル分光器の開発
3. 学会等名 レーザー学会第20回東京支部研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 寺田和博, 加藤峰士, 森藤環, 石井大貴, 美濃島薫,
2. 発表標題 光コムを用いた全光ヒルベルト変換による瞬時三次元形状計測の広範囲化
3. 学会等名 レーザー学会第20回東京支部研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 T. Kato, M. Uchida, Y. Tanaka and K. Minoshima
2. 発表標題 One-shot 3D imaging using ultrafast all-optical Hilbert transform with chirped optical frequency comb
3. 学会等名 Asia-Pacific Optical Sensors Conference 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

美濃島研究室 電気通信大学
<http://www.femto-comb.es.uec.ac.jp/>
 電気通信大学 大学院情報理工学研究科 基盤理工学専攻 加藤峰士
<http://kjk.office.uec.ac.jp/Profiles/71/0007007/profile.html>

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------