

令和 6 年 6 月 3 日現在

機関番号：16101

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H01848

研究課題名（和文）マイクロ光コムによる周波数変調コムLiDARの創出

研究課題名（英文）Development of frequency-modulated comb LiDAR with microcombs

研究代表者

久世 直也（KUSE, Naoya）

徳島大学・ポストLEDフォトリクス研究所・准教授

研究者番号：50852258

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）：本研究では、マイクロコムを使ったLiDARの技術の開発を行った。要素技術としてマイクロコムの周波数掃引技術と周波数変化量の測定技術を開発した。さらに、新規LiDAR手法として、高速化を目指した非対称両側サイドバンドLiDARの原理実証、高精度を目指したコムモードのコヒーレント結合を使ったLiDARの原理実証を行った。非対称両側サイドバンドLiDARでは非対称な周波数変化をサイドバンドに加えることで、1時刻スロットで距離と速度の同時計測ができた。高精度LiDARではコムモード3本をコヒーレント結合し、測定精度の評価を行ったところ、分解能は向上するものの、測定精度が悪化する問題を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の学術的意義はマイクロコムの周波数制御技術が向上したこと、そして、マイクロコムを使った新規LiDAR手法を開発したことである。有効性が明らかになった高速LiDARでは原理実証から1歩進め、実物体を使った実験を進めることにより社会実装に近づけることで今後社会的意義が深まることが期待できる。一方、高精度LiDARではアイデア段階では明らかにならない問題を実験により明らかにできたことが学術的意義である。今後、明らかになった問題を解決する手段を開発する必要がある。

研究成果の概要（英文）：In this study, we have developed LiDAR techniques using microresonator frequency combs. As fundamental techniques for our proposed LiDAR, we developed methods to scan and measure the frequency of the comb modes of a microcomb. Additionally, we have developed two LiDAR techniques that utilize asymmetric double sidebands from comb modes for high-speed measurements and coherent stitching of scanned comb modes for high-precision measurements. In the experiment involving LiDAR with asymmetric double sidebands, we demonstrated the simultaneous measurement of distance and velocity in a single time slot. In the precision LiDAR, we found that the measurement precision was deteriorated, although the depth resolution was improved.

研究分野：レーザー科学

キーワード：光周波数コム LiDAR

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

近年、完全自動運転やドローン、さらには空飛ぶ自動車などの実現を目指して、光を使った距離計測技術である LiDAR の研究開発が進められている。LiDAR の中でも最近では周波数変調 CW (frequency-modulated CW: FMCW) LiDAR と呼ばれる、時々刻々、線形に光周波数が増える CW レーザーを用いる方式が高分解能・高感度な LiDAR として注目され、研究・開発が進められている。次世代の完全自動運転車用の LiDAR (> 10 m) では高速性 (200 M ピクセル/秒) が要求され、現状の 100 倍以上の測定時間の改善が必要である。また自動車に必要な構成部品の微小欠陥部の発見や、遠隔医療用ロボットで使用される近中距離 LiDAR (< 1m) ではサブ mm オーダーの高い分解能が要求され、現手法と比べ 10 倍以上の改善が必要である。しかし、FMCW LiDAR の測定時間は周波数・空間的に CW レーザーを掃引する時間、分解能は CW レーザーの周波数掃引範囲 (周波数掃引範囲が大きいほど高分解能になる) で制限されるため、抜本的な技術革新なく、現在の FMCW LiDAR に頼った漸進的な進歩では実現が難しいという現状がある。

2. 研究の目的

本研究では上記の問題を解決するために、マイクロコムを光源とする FMCW LiDAR (以下、FMcomb LiDAR) を開発することを目的とする。マイクロコムは光周波数コム (comb) の 1 種であり、半導体製造装置で作製可能なため、将来的には小型・量産可能な実用的な光周波数コムとして期待されている。本研究では高速性と高精度性を重視する 2 種類の FMcomb LiDAR の開発を目指す。そのために必要な実時間周波数変化測定法や周波数掃引技術の開発を行う。

3. 研究の方法

(1) 実時間周波数変化測定法の開発

LiDAR で感度や精度を高めるためには周波数を線形に掃引する必要がある。しかし、マイクロコムのコムモードの周波数掃引は非線形になる。本研究ではコムモードの周波数変化を測定する手法を開発し、信号処理によって LiDAR 信号を補正する手法を考案した。コムモードの周波数変化測定では各コムモードが 2 つの自由度 (励起レーザーの周波数とコムモード間隔の周波数) で記述されることに着目する。これは 2 つのコムモードの周波数変化を測定すれば、全てのコムモードの周波数変化を算出できることを意味する。そこで、実験では 2 波長アンバランスマッハツェンダー干渉計 (以下、2 波長アンバランス MZI) を構築した。2 波長アンバランス MZI ではアンバランス MZI の 2 出力に光バンドパスフィルタを導入し、モード次数の異なるコムモードを抽出し、それらを PD に照射する。PD から得られる信号の位相から抽出した 2 モードの周波数変化を測定できる。この情報から全コムモードの周波数変化を算出する。その後、それらの周波数変化に応じてサンプリング時間で LiDAR 信号をリサンプリングすることで、仮想的な線形周波数掃引が得られる。

(2) 周波数掃引技術

マイクロコム (特に本研究で使用するモード同期状態であるソリトンコム) の周波数掃引は励起レーザーの周波数を変化させることで実行する。しかし、ソリトンコムを維持するためには励起レーザーが共鳴周波数に対して長波長側にあり、かつそれらの周波数差をある範囲 (ソリトン維持範囲と呼ぶ) にないといけない。ソリトン維持範囲は 1 ~ 2 GHz であり、周波数掃引をこれより多くするには工夫が必要である。研究では電気光学変調器 (EOM) で励起レーザーの短波長側に光サイドバンドを発生させ、そのサイドバンドも微小共振器に結合する。すると、励起レーザーの周波数変化をさせると光サイドバンドも同じように周波数変化し、それにより光サイド

バンド由来の共振器内パワーが変化し、それにより励起レーザーの周波数変化に追従するように共鳴周波数が増える。よって、実効的なソリトン維持範囲が大きくなり、周波数掃引の範囲を大きくできる。

(3) 高速 FMcomb LiDAR

マイクロコムを波長多重光源とし、FMCW LiDAR の並列化し、LiDAR を高速化する研究報告がある。本研究ではさらなる高速化のためにコムモードを元に、EOM を通して発生する両側の光サイドバンドを1セットでLiDARに使う。この時、励起レーザーとEOMを駆動するRF発振器の周波数の両方に変調を加えることで、それぞれの光サイドバンドに異なる掃引量の周波数変化を、異なる方向に加えることができる。それにより、通常のFMCW LiDARでは光源の周波数を上げる時間スロットと下げる時間スロットを設けることで距離と速度を測定するところを、本研究では1つの時間スロットに同時に周波数が増える時間と下がる時間を導入でき、1つの時間スロットで距離と速度の同時測定が可能になる。つまり並列型のFMcomb LiDARの測定時間を2倍にすることができる。

(4) 高精度 FMcomb LiDAR

高精度FMcomb LiDARでは全てのコムモードを1点に照射し、各コムモードからのLiDAR信号を位相を考慮したコヒーレント接続することに、FMCW LiDARの高精度化を行う。高精度FMcomb LiDARでは2種類の方法を考えており、1つ目は検出系で各コムモードを実際に分離し、信号処理によりコヒーレント接続と行う方法、2つ目は各コムモードの周波数掃引量が違うことを利用し、検出系でコムモードを分離することなく、信号処理によりコムモード分離とコヒーレント接続を行う方法である。

4. 研究成果

(1) 実時間周波数変化測定法の開発

2波長MZIを構築し、ソリトンコムの周波数掃引測定を行った。実験ではコムモード間隔が200 GHzのソリトンコムを発生させ、+12次と-12次のコムモードの周波数掃引量を2波長MZIで測定した。測定結果から-6次のコムモードの周波数掃引量を算出し、実際に別の手法で測定した-6次のコムモードの周波数掃引量を比較することで見積誤差を評価した。その結果、50 GHz程度の周波数掃引を行った際の、測定誤差は10 MHz程度あることが分かった。この結果はLiDAR応用において、仮想的に周波数掃引を線形化するには十分な測定精度である。

(2) 周波数掃引技術

FSRが1 THz、Q値が 10^6 程度の微小共振器を使った。この時、光サイドバンドと励起レーザーの周波数差を1.1 GHzにした時に、最も実効的に周波数掃引量を大きくすることができた。光サイドバンドがない場合のコムモードの周波数掃引量は1 GHz程度であったが、最適化した光サイドバンドを使った場合は17 GHz程度まで大きくすることができた。また、周波数掃引の変調速度が数kHzを超えてくると、共鳴周波数変化が励起レーザー/光サイドバンドの周波数変化に追従できなくなってきて、周波数掃引量が小さくなっていくことが確認された。これは微小共振器の光-熱反応の応答速度で制限されることを明らかにした。

(3) 高速 FMcomb LiDAR

原理実証実験として、ソリトンコムのうち1本のみをバンドパスフィルタで抽出し、そのコムモードを使ってLiDARを行った。実験では回転物体を対象物として使い、距離と速度の計測を行った。想定通り、1つの時間スロットに2つの異なる周波数を持つLiDAR信号を取得できた。さらに、回転体の回転速度を変化させると、それに応じてLiDAR信号の周波数が変わり、回転速度を測定できることが分かった。次に、両側サイドバンドの周波数掃引量の非対称性を大きくしていった時の測定される距離の標準偏差への影響を調査した。結果として、標準偏差は非対称さに

線形に増加するのではなく、ある非対称さを起点として非線形に増大していくことが分かった。これは、非対称さを増大させるにつれ、片側のサイドバンドからの信号の信号雑音比 (SN) が悪化し、標準偏差が SN リミットに到達したと考えられる。2 点目に戻り光のパワーに対する標準偏差依存性を調査した。戻り光が 1 nW 以上の時は特に標準偏差の悪化は見られず、1 nW 以下では指数関数的に標準偏差が悪化することが分かった。これも 1 nW 以下では標準偏差が SN リミットに到達したと考えられる。

(4) 高精度 FMcomb LiDAR

高精度 FM コムライダーの原理実証実験と評価実験を行った。原理実証実験では EO コムのコムモードを 3 本コヒーレントに結合することで、奥行き方向の距離分解能が 3 倍良くなることを確認した。評価実験では同じ条件下で複数試行により距離測定を行い、標準偏差の評価を行った。評価実験でも 3 本のコムモードを使い、コム 1 本ずつの測定による標準偏差評価、コムモードを最大 3 本までコヒーレント結合した時の標準偏差の評価を行った。その結果、複数のコムモードを結合した場合の方が標準偏差が最も標準偏差の小さいコムモード 1 本の結果より悪くなった。これはコム結合の際に振幅や位相補正の信号処理を取り入れているとはいえ、十分な精度でコヒーレント結合ができていないことが原因であると考えられる。

もう 1 つの方法である検出系で各コムモードを実際に分離し、信号処理によりコヒーレント接続を行う方法は研究期間内に実施することはできなかった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Kuse Naoya、Navickaite Gabriele、Geiselmann Michael、Yasui Takeshi、Minoshima Kaoru	4. 巻 46
2. 論文標題 Frequency-scanned microresonator soliton comb with tracking of the frequency of all comb modes	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Optics Letters	6. 最初と最後の頁 3400～3400
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1364/OL.426841	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Nishimoto Kenji、Minoshima Kaoru、Yasui Takeshi、Kuse Naoya	4. 巻 47
2. 論文標題 Thermal control of a Kerr microresonator soliton comb via an optical sideband	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Optics Letters	6. 最初と最後の頁 281～284
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1364/OL.448326	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kuse Naoya、Minoshima Kaoru	4. 巻 30
2. 論文標題 Amplification and phase noise transfer of a Kerr microresonator soliton comb for low phase noise THz generation with a high signal-to-noise ratio	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 318～325
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1364/OE.446903	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 Kuse Naoya、Nishimoto Kenji、Tokizane Yu、Okada Shota、Navickaite Gabriele、Geiselmann Michael、Minoshima Kaoru、Yasui Takeshi	4. 巻 5
2. 論文標題 Low phase noise THz generation from a fiber-referenced Kerr microresonator soliton comb	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Communications Physics	6. 最初と最後の頁 312-1-8
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s42005-022-01100-0	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 該当する

1. 著者名 Nawwar Omnia, Minoshima Kaoru, Kuse Naoya	4. 巻 42
2. 論文標題 Stepped-Frequency THz-Wave Signal Generation From a Kerr Microresonator Soliton Comb	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Journal of Lightwave Technology	6. 最初と最後の頁 2260 ~ 2266
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/JLT.2023.3336991	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計23件 (うち招待講演 4件 / うち国際学会 10件)

1. 発表者名 西本 健司, 美濃島 薫, 安井 武史, 久世 直也
2. 発表標題 単一フォトディテクターによる直列式周波数変調コム
3. 学会等名 第82回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 西本 健司, 美濃島 薫, 安井 武史, 久世 直也
2. 発表標題 マイクロ-ソリトンコムの光サイドバンドによる熱冷却
3. 学会等名 第82回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 久世 直也, 安井 武史, 美濃島 薫
2. 発表標題 マイクロ・ソリトンコムの高速・広範囲周波数掃引と周波数変化測定
3. 学会等名 第82回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 久世 直也
2. 発表標題 マイクロ光周波数コムの新規制御技術の開発
3. 学会等名 2021年電子情報通信学会 ソサイエティ大会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 久世 直也
2. 発表標題 マイクロ光コムとその応用への道筋
3. 学会等名 第5回日本光学会関西支部講演会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kenji Nishimoto, Kaoru Minoshima, Takeshi Yasui and Naoya Kuse
2. 発表標題 Frequency-modulated comb LiDAR without wavelength division de-multiplexer
3. 学会等名 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO) 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hiroki Kitora, Kaoru Minoshima, Takeshi Yasui and Naoya Kuse
2. 発表標題 Simultaneous detection of distance and velocity via asymmetric carrier-suppressed double sideband modulation with a Kerr-microresonator soliton comb
3. 学会等名 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO) 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Naoya Kuse, Takeshi Yasui and Kaoru Minoshima
2. 発表標題 Rapid and large scanning of a microresonator soliton comb with the frequency-shift tracking of all comb modes
3. 学会等名 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO) 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Naoya Kuse, Kenji Nishimoto, Takeshi Yasui and Kaoru Minoshima
2. 発表標題 Phase noise reduction of a dissipative Kerr-microresonator soliton comb by a sideband cooling
3. 学会等名 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO) 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kenji Nishimoto, Kaoru Minoshima, Takeshi Yasui and Naoya Kuse
2. 発表標題 Thermal control of a Kerr microresonator soliton comb via an optical sideband
3. 学会等名 International Symposium on Novel maTerials and quantum Technologies ISNTT 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 久世 直也, 美濃島 薫
2. 発表標題 注入同期によるマイクロコムのコムモードの出力増幅と位相雑音転写
3. 学会等名 第83回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 西本 健司, 木虎 宏輝, 安井 武史, 美濃島 薫, 久世 直也
2. 発表標題 非対称・両方向チャープのサイドバンドを持つマイクロコムによる並列周波数変調コムLiDAR
3. 学会等名 第83回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 西本 健司, 美濃島 薫, 久世 直也
2. 発表標題 結合リング型微小光共振器を利用したマイクロコムの広帯域化
3. 学会等名 レーザー学会学術講演会第43回年次大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 久世 直也, 西本 健司, 美濃島 薫
2. 発表標題 熱鈍感なマイクロコム
3. 学会等名 第70回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 久世 直也
2. 発表標題 マイクロコムの制御：コムモード掃引と低位相雑音化
3. 学会等名 レーザー学会学術講演会第43回年次大会（招待講演）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Kenji Nishimoto, Kaoru Minoshima, Takeshi Yasui and Naoya Kuse
2. 発表標題 Thermal control of Kerr microresonator soliton comb via an optical sideband
3. 学会等名 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO) 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Naoya Kuse and Kaori Minoshima
2. 発表標題 Injection locking of two CW lasers via a Kerr microresonator soliton comb for low noise THz generation
3. 学会等名 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO) 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 西本 健司, 美濃島 薫, 久世 直也
2. 発表標題 結合リング型微小光共振器を利用したマイクロコムの特長
3. 学会等名 第84回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 西本 健司, 美濃島 薫, 久世 直也
2. 発表標題 結合リング型微小光共振器を利用した赤・青側デチューニングマイクロコムの発生
3. 学会等名 第71回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 久世 直也
2. 発表標題 マイクロコムによるLiDAR
3. 学会等名 Optics & Photonics Japan 2023 (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Naoya Kuse, Kenji Nishimoto, and Kaoru Minoshima
2. 発表標題 Thermally insensitive Kerr microresonator soliton comb
3. 学会等名 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO) 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Omnia Nawwar, Kaoru Minoshima, and Naoya Kuse
2. 発表標題 Stepped-Frequency THz-wave Signal Generation from a dissipative Kerr microresonator soliton comb
3. 学会等名 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO) 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Kenji Nishimoto, Kaoru Minoshima, and Naoya Kuse
2. 発表標題 Spectral Broadening of a Kerr Microresonator Soliton Comb via the use of a Coupled-Ring Microresonator
3. 学会等名 Optica Advanced Photonics Congress 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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
---------	---------