

光周波数コムによる高精度全光ヒルベルト変換を用いた瞬時 3 次元計測のためのデュアル位相差スペクトル計測装置の開発

Dual multichannel spectrometer to measuring spectral phase difference for one-shot three dimensional imaging with all-optical Hilbert transform using optical frequency comb



加藤 峰士 (Takashi Kato, Ph. D.)

電気通信大学 情報理工学研究所

基盤理工学専攻 准教授

(Associate professor, The University of Electro-Communications, Department of Engineering Science)

応用物理学会, Optica, 日本光学会, レーザー学会, 他

受賞: 第 40 回応用物理学会講演奨励賞受賞 (2016 年), 第 2 回フォトニクス分科会奨励賞 (2018 年), OPJ2018 講演優秀賞 (2018 年), レーザー学会第 39 回年次大会論文発表奨励賞 (2019 年), 令和 2 年度小澤・吉川記念賞(2020 年), 他 3 件

研究専門分野: 光計測, 光周波数コム, 光演算

あらまし

本研究では、光周波数コムによる高精度全光ヒルベルト変換を用いた瞬時 3 次元計測のためのデュアル位相差スペクトル計測装置の開発を行った。

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、より多くの情報を高速に処理することが求められており、特に高精度瞬時 3 次元計測手法の開発が切望されている。この課題に対し、我々はチャープした光周波数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。これは、すべての波長の位相が揃った超短パルスと、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の波長情報から距離情報を計測する手法である。さらに我々は、光コムの周波数制御性を利用して、チャープしたスペクトル干渉縞のヒルベルト変換を光学的かつ安定に実行する光演算手法を開発した。

本研究では、この光演算の精度と安定性を向上するため、2 つの位相差パルスのスペクトル干渉縞を同時

に取得し、その結果を演算して光コムを制御する FPGA 制御のデュアル分光器を開発した。

1. 研究の目的

光周波数コムによる高精度全光ヒルベルト変換を用いた瞬時 3 次元計測のためのデュアル位相差スペクトル計測装置の開発を行う。

2. 研究の背景

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、より多くの情報を高速に処理することが求められている。これは高度な意思決定に用いる正確かつ膨大な計測情報が必要となったことで、センシング技術からデータ転送、処理技術までの様々な分野が急速に進化している。中でもセンシング技術では、学術分野はもちろん産業や医療において最も基本的な物理量である「形状」を取得する技術として、高精度瞬時 3 次元計測手法の開発が切望されている。

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・高精度・高速性のすべて両立した瞬時 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、我々はチャープした光周波数コム (以下、光コム) [1-3]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。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。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。これを 2 次元面全体で同時計測することで、3 次元像を瞬時に取得することが出来る [4-7]。

一方で、画像素子レベルの高解像度 3 次元像を取得するためには、カラーカメラのように各ピクセルでの色情報を取得しなければならず、瞬時にスペクトル波形の解析を 2 次元的に実行する必要がある。そのため我々は、光コムの周波数制御性を利用して、チャー

光周波数コムによる高精度全光ヒルベルト変換を用いた瞬時 3 次元計測のためのデュアル位相差スペクトル計測装置の開発

Dual multichannel spectrometer to measuring spectral phase difference for one-shot three dimensional imaging with all-optical Hilbert transform using optical frequency comb

プしたスペクトル干渉縞のヒルベルト変換を光学的かつ安定に実行する光演算手法を開発した。この全光ヒルベルト変換は、光コムの周波数制御によって互いに位相が 90 度異なる 2 つの参照光パルスを生成し、それらと物体光パルスのスペクトル干渉縞を同時に取得することで、2 位相ロックインアンプと同等の信号処理を 2 次元的に実行する手法である。すでに基礎的実験には成功したが、精度と安定性を向上するには、参照光である 2 つの位相差パルスを高度に安定化させる必要がある。

3. 研究の方法

2 つの光パルスの相対的な遅延時間を安定化する手法としては、2 つのパルスの干渉波形によるフィードバック制御が簡便でよく用いられる。通常は差動増幅で sin 型波形を検出し、0 V を目標値とする PID 制御を行うのが一般的である。すなわち、ある一定の遅延時間を保持することを目指す。これに対して本申請課題で安定化を目指す全光ヒルベルト変換では、全帯域で 90 度の位相差を持つパルスの相対的な時間差をゼロにする必要がある。すなわち周期的な干渉波形から位相差を考慮して正確な制御位置を検出し、安定化する必要がある。そのため、完全に 2 つのパルスが一致する点から 1/4 波長シフトした目標点を、単純な干渉波形の中から正確に検出するのは非常に困難である。そのため全光ヒルベルト変換の安定化のためには、この目標値を正確に判定する新たな信号検出手法と、その目標値を維持する制御回路が必要となる。

この課題を解決するため、本研究課題では 2 つの位相差パルスのスペクトル干渉縞を同時に取得し、その結果を演算して光コムを制御する FPGA 制御のデュアル分光器を開発する。

制御したい参照光パルスは互いに 90 度位相がずれているため、チャープ量の異なるパルスと同じタイミングで干渉すると、互いに 90 度位相がずれたスペクトル干渉縞が得られるはずである。これをマルチチャンネル分光器で同時に計測して位相比較を行い、90 度の位相差を常に保つような制御信号を出力すれば、位相差パルスを安定化させることが出来る。そこで、

InGaAs の 512 素子ラインセンサ 2 個と FPGA 制御によるデュアルマルチチャンネル分光器の製作と評価を行った。

システムの概要を図 1 に示す。90°の位相差を持たせたパルスをそれぞれチャープの異なるパルスと干渉させた。そして、回折格子によって波長分解し、InGaAs ラインセンサ（浜松ホトニクス、G11508-512SA）に入射してスペクトル干渉縞を測定した。センサの情報は FPGA（Intel、MAX10）によって駆動に必要な信号を与え、FPGA 内蔵の ADC によって読み取る。そのスペクトル干渉縞情報を元に、位相差が全帯域で 90°となるように f_{rep} へフィードバック信号の出力を行った。

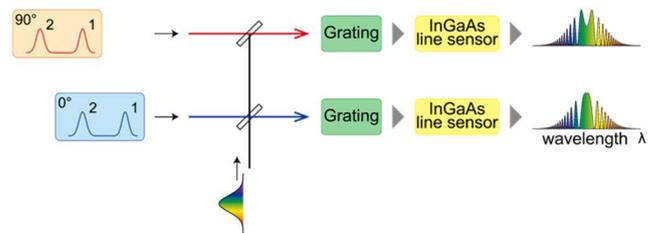


図 1 位相差パルス安定化システム概要



(a) InGaAs ラインセンサ



(b) FPGA ボード

図 2 本研究に用いたラインセンサと FPGA

具体的な光学系を図 3 に示す。位相差パルスはヒルベルト変換のため偏光が直交するように調整した。そのため、位相差パルスそれぞれと干渉するように Probe 光の偏光を調整し、干渉させた。Single Mode Fiber (SMF) に入射しているのは、空間的な重なりを良くするためである。干渉させた後、結晶（Thorlabs、BD40）によ

光周波数コムによる高精度全光ヒルベルト変換を用いた瞬時 3 次元計測のためのデュアル位相差スペクトル計測装置の開発

Dual multichannel spectrometer to measuring spectral phase difference for one-shot three dimensional imaging with all-optical Hilbert transform using optical frequency comb

って偏光で上下に光を分岐させ、回折格子で光を波長ごとに分けてラインセンサに入射した。そして FPGA によってセンサの値を読み取り、スペクトル干渉情報を取得した。

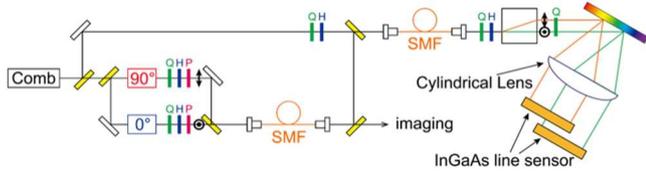


図 3 位相差パルス安定化システム光学系

InGaAs センサを駆動するには、駆動周波数となる CLK 信号と露光時間を設定するための Reset 信号を入力する必要がある。ラインセンサの駆動に関するタイミングチャートを図 4 に示す。

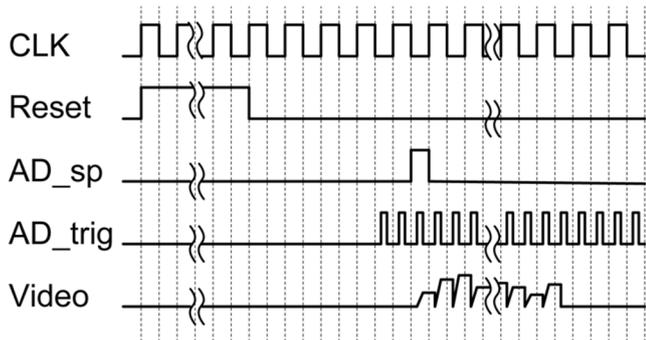


図 4 ラインセンサのタイミングチャート

Reset 信号の High の時間が露光時間として設定され、Reset 信号の 5CLK 後から実際に露光時間を設けている。検出した光は AD-SP 信号を開始の目印として、CLK 信号のタイミングに合わせて 1CLK につき 1 画素ずつアナログ値が出力される。このため、FPGA ではセンサ駆動用の CLK 信号、Reset 信号の出力と、ラインセンサから出力されたアナログ信号の読み取り、全帯域で位相差が 90°となるような f_{rep} へのフィードバック信号の計算と出力を行う。

FPGA から出力した CLK 信号と Reset 信号、InGaAs センサから出力された信号を図 5 に示す。CLK 信号は 1MHz とし、センサには 1550 nm の半導体レーザー (Thorlabs, S4FC1550) を入射し、測定はオシロスコープ (Tektronix, DPO3014) で行った。CLK 信号のタイミングに合わせてアナログ信号が出力されていること

が分かる。

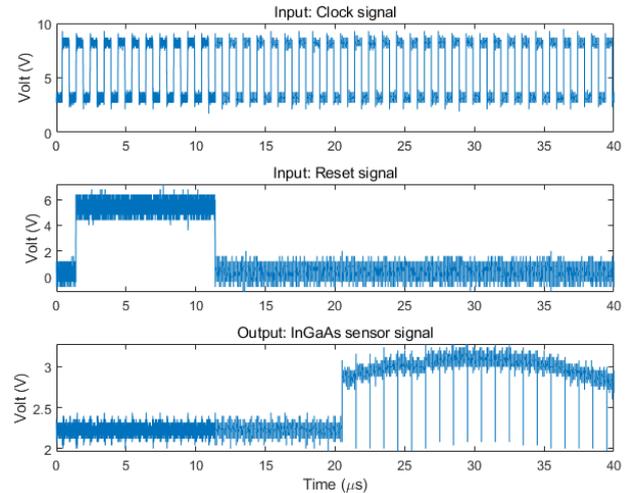


図 5 InGaAs センサの入出力信号。上から、FPGA から出力した CLK 信号 (入力)、FPGA から出力した Reset 信号 (入力)、センサから出力された VIDEO 信号

実際に、我々のグループで構築した全光ヒルベルト変換による瞬時 3 次元形状計測のための実験系の位相差パルスをセンサに入力した。まず、以下に示す実験系のように、干渉させた位相差パルスを SMF に通した後、偏光で分離せず回折格子で分光してセンサに入射した。また、位相差パルスと干渉させる光の光路は Delay ステージによって光路長を調整可能であり、事前に光スペクトルアナライザを用いて Delay ステージの動作範囲内で干渉するように光路長を調整した。

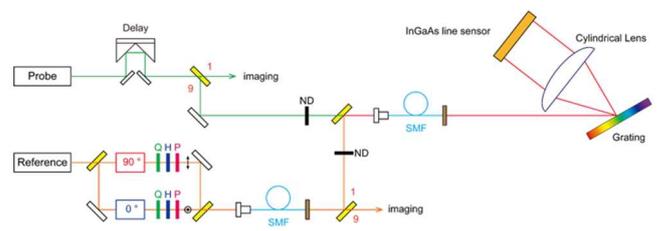


図 6 位相差パルス測定のための実験系

まず、Delay ステージを干渉しない位置 (Delay = 10040) に調整し、ラインセンサの出力をオシロスコープ (YOKOGAWA, DL6154) で測定した。測定結果を図 7 に示す。

光周波数コムによる高精度全光ヒルベルト変換を用いた瞬時 3 次元計測のためのデュアル位相差スペクトル計測装置の開発

Dual multichannel spectrometer to measuring spectral phase difference for one-shot three dimensional imaging with all-optical Hilbert transform using optical frequency comb

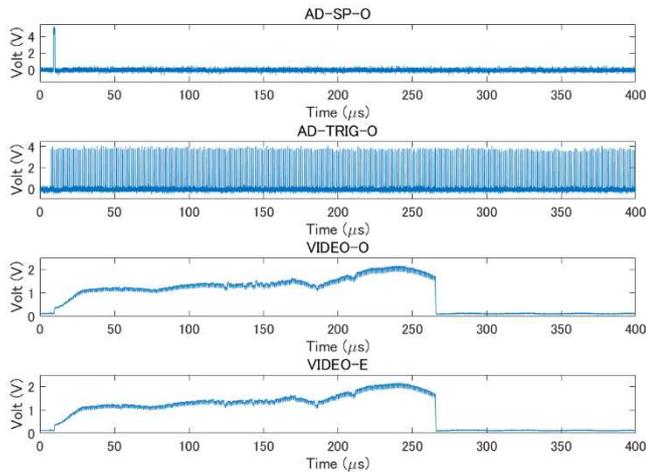


図 7 干渉しない位置(Delay = 10040)でのセンサの出力。上から AD-SP 信号、AD-TRIG 信号、VIDEO-O 信号、VIDEO-E 信号

図 7 で得られるビデオ信号を解析することで、スペクトル情報が得られる。光路長を変化させて実際に計測したスペクトル干渉信号を図 8 に示す。Delay ステージの値を 10040、24260、25713、27188 と変化させて測定した。光路長の値によって湧き出しの位置が変化している様子が確認できる。

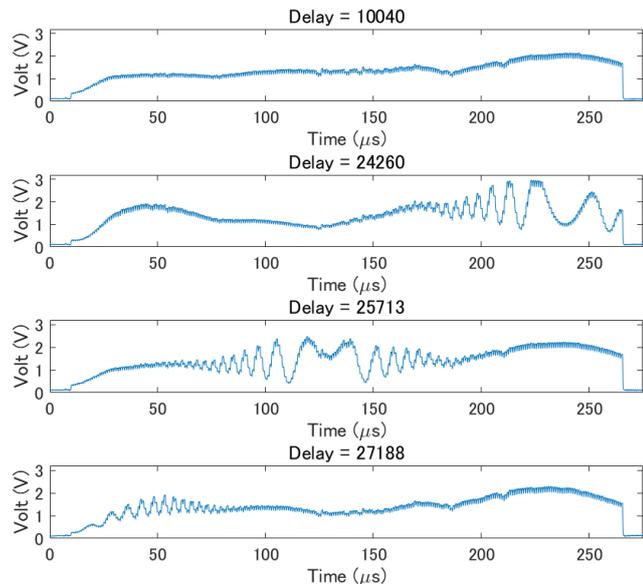


図 8 光路長を変化させたときの VIDEO-O 信号

最後に位相差を与えたスペクトル干渉像を計測した。取得したスペクトルを図 9 に示す。相対的に 90 度位

相がずれたスペクトル干渉信号の計測に成功した。

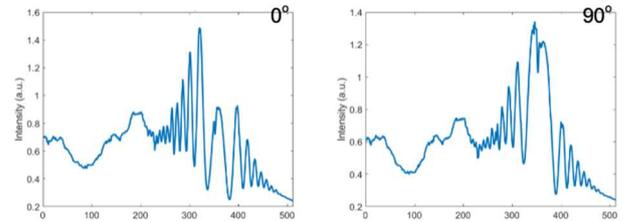


図 11 位相差パルスそれぞれのスペクトル
左：0°のスペクトル、右：90°のスペクトル

4. 将来展望

本研究では、全光ヒルベルト変換による瞬時 3 次元形状計測の高精度化に向けて、スペクトル干渉縞検出を用いたパルス位相差安定化法の開発を行った。今後は 2 つのラインセンサを用いて位相差パルス 0°と 90°のスペクトルの同時測定を行い、そこから得られた情報を f_{rep} へのフィードバックすることで、3 次元形状計測の高精度化を目指す。

参考文献

- [1] T. Udem, J. Reichert, R. Holzwarth, and T. W. Hänsch, *Phys. Rev. Lett.* **82**(18) (1999) 3568-3571.
- [2] D.J. Jones, S.A. Diddams, J.K. Ranka, A. Stentz, R.S. Windeler, J.L. Hall, S.T. Cundiff, *Science* **288** (2000) 635-639.
- [3] K. Minoshima, and H. Matsumoto, *Appl. Opt.* **39**(30) (2000) 5512-5517.
- [4] 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(Dec.).
- [5] T. Kato, H. Ishii, K. Terada, T. Morito, and K. Minoshima, *arXiv:2006.07801*, 2020(Jun.).
- [6] T. Kato, M. Uchida, Y. Tanaka, and K. Minoshima, “High-resolution 3D imaging method using chirped optical frequency combs based on convolution analysis of the spectral interference fringe,” *OSA Continuum* **3**(1), 2020(Dec.).
- [7] T. Kato, M. Uchida, Y. Tanaka, and K. Minoshima, “One-shot

光周波数コムによる高精度全光ヒルベルト変換を用いた瞬時 3 次元計測のためのデュアル位相差スペクトル計測装置の開発

Dual multichannel spectrometer to measuring spectral phase difference for one-shot three dimensional imaging with all-optical Hilbert transform using optical frequency comb

three-dimensional imaging using a two-dimensional spectrometer with a fiber bundle," *Optics Express* 29(26), 43778-43792, 2021(Dec.).

- [8] S. Kurata, H. Ishii, K. Terada, T. Morito, H. Tian, T. Kato, and K. Minoshima, "Dead-zone free single-shot three-dimensional measurement using a high-repetition-rate Yb: fiber comb," *Optics Continuum* 1(11), 2374, 2022(Nov.).

この研究は、令和元年度 S C A T 研究助成の対象として採用され、令和 2 ~ 3 年度に実施されたものです。