# 高精度瞬時3次元形状計測のためのFPGA制御による全光ヒルベルト変換手法の開発

代表研究者 加藤 峰士 電気通信大学 大学院情報理工学研究科 基盤理工学専攻 特任助教

## 1 はじめに

光を用いた 3 次元形状計測は、高速・高精度・広範囲な測定が可能であること [1, 2, 3]から、産業や医療分野における検査装置や、自動車やロボットの自動制御など、様々な応用分野で非常に注目されている。これまでにも光干渉断層計(Optical coherence tomography, OCT) [4, 5]や、共焦点顕微鏡 [6, 7, 8]、LIDAR [9, 10]、デジタルホログラフィ [11, 12]など、様々な手法が提案されている。しかし、定量性は高いが 1 点計測のため広範囲を測定するにはスキャンを必要とするため測定に時間がかかる、広範囲をリアルタイムに測定できるが定量性に欠けているなどと、従来法では高速・高精度・広範囲のすべてを満たした測定は困難であった。

それに対して、これまでにチャープした超短パルスによる時間・空間・周波数の超高速多次元変換を用いた瞬時3次元形状計測手法が開発されている[13]。本手法は、時間とともに周波数が変化するチャープパルスを測定対象に照射し、その反射パルスを光カーシャッタによって瞬時に切り取り、カラーカメラで取得することで、奥行き情報を色情報として瞬時に取得することが可能である。しかし、効率的な非線形光学効果を生じさせるために、光源に高強度かつ大型で複雑なチタンサファイアレーザーを使用しており実用的でない点や、単独パルスの利用に限定されてしまうという原理的な問題点など、課題があった。

これらの課題を解決するため、実用性の優れたファイバレーザーによる光コムを光源に用いて、スペクトル干渉によって周波数情報を取得することで、以前の研究課題を解決した瞬時3次元形状計測手法の開発が行われた[14,15]。光コムは、時間軸上において精密かつ等間隔にパルスが並んだ超短パルスレーザーであり、制御性に優れた光源である。この特徴を活かすことで、測定精度と測定範囲を両立し、ダイナミックレンジの飛躍的な拡大を実現した。これまでに、格子配列されたバンドルファイバを用いることで空間2次元情報を取得した情報を1次元に再配列し、1次元回折格子で多点を1度に波長分解することで距離画像を取得する、瞬時3次元形状計測を実現してきた[16]。形状情報や内部情報の計測を超高速にsub-µmの不確かさで実現させてきたが、3次元画像の解像度がファイバの本数に制限されてしまう問題が残されていた。

そこで、形状計測の高解像度化を目指して、光コムの高い位相制御性を利用して光演算によるヒルベルト変換、全光ヒルベルト変換手法を用いた瞬時高解像度 2 次元分光法が新たに開発された。本手法では色情報の取得に回折格子などの 1 次元分光器を使用しないため、画像素子と同等の高空間解像度有する瞬時 3 次元形状計測を実現し、pm レベルの不確かさによる測定を達成した。全光ヒルベルト変換では、位相差が精密に 90 度であるパルス列対を用いることで、光学的にヒルベルト変換相当の情報を取得している。本手法では、光コムの周波数パラメータである繰り返し周波数  $f_{rep}$  とキャリアエンベロープ周波数  $f_{ceo}$  の周波数比を制御することで、90 度の位相差を持つパルス列対を実現している。この位相差の精度が形状計測の精度に直接影響するのだが、パルスの包絡線を考慮した絶対位相差の実現には、光源の全スペクトル帯域で高精度な位相差を実現する必要がある。そこで、本研究では広スペクトル帯域で位相差の判定を行うことで、高精度に全光ヒルベルト変換を実現し、瞬時 3 次元形状計測手法のさらなる高精度化を目指した。

### 2 光コムのスペクトル干渉を用いた瞬時高解像度3次元形状計測手法の原理

本研究では、増幅したチタンサファイアレーザーを光源に用いた、チャープした超短パルスを用いた時間・空間・周波数の多次元情報の超高速変換手法 [13]を、制御性とコヒーレンスの優れた Er モード同期ファイバレーザーによる光コムに適用し、スペクトル干渉を用いて高精度・広範囲・高速測定を同時に実現した瞬時 3 次元計測手法 [14, 15, 16]を用いている。さらに、光コムの特徴を活かした全光ヒルベルト変換による瞬時 2 次元分光法を取り入れることで、高解像度な 3 次元形状計測手法が開発されている [17]。

本章では、本研究の基本原理であるチャープパルスを用いた瞬時3次元形状計測および、光コムによるスペクトル干渉を用いた瞬時3次元計測の原理について述べる。

## 2-1 チャープパルスによる瞬時 3 次元形状計測

チャープパルスを利用した光カーゲートによる瞬時3次元形状計測手法について述べる。これは、時間によって周波数分布が変化するチャープパルスの特徴を利用した手法である。図2.1のように、チャープパルスを測定対象に照射すると、反射した光は測定対象の段差に応じて遅延時間が変化する。そして、その反射したチャープパルス光を光カーシャッタによって取り出すと、奥行き情報を周波数成分として取得することができる。このように、奥行き情報を時間差に変え、さらに周波数の差に変換することで、ワンショットで3次元形状の計測を可能にした。しかし、この手法で用いられている光源は、大型で複雑な増幅チタンサファイアレーザーであるため、高精度化が困難という課題があった。

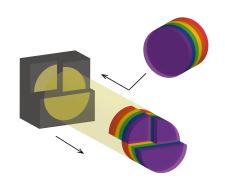


図2.1 チャープパルスによる瞬時3次元形状計測

#### 2-2 光コム光源の導入

2.1 で述べた手法を光コムに適用した、スペクトル干渉による瞬時 3 次元形状計測手法の原理について述べる。図 2.2 に示すように、2.1 と同様にチャープパルスを測定対象に照射し、反射光に形状情報を持たせる。その反射光をチャープフリーパルスと干渉させると、スペクトルに縞が生じる。この干渉縞は一様ではなく、パルス同士が時間的に一致した周波数領域で縞が最も粗い湧き出しが生じる [18]。この湧き出し位置の解析を行うことで、湧き出し位置の波長情報から奥行き情報が求まり、さらにビーム面の各点で解析を行うことで、空間分布から 3 次元形状情報を取得することができる。

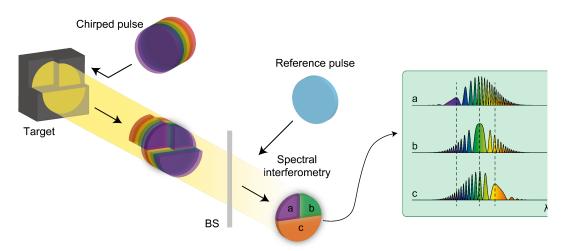


図2.2 スペクトル干渉を用いた3次元形状計測

#### 2-3 スペクトル干渉

形状計測に用いたスペクトル干渉について述べる。

まず、同一の角周波数ωを持つ2つの直線偏波平面の電界を以下のように表す。

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_1 &= \mathbf{A}_1 \exp\left[i(\omega t - \mathbf{k}_1 \cdot \mathbf{r} + \phi_1] \\ \mathbf{E}_2 &= \mathbf{A}_2 \exp\left[i(\omega t - \mathbf{k}_2 \cdot \mathbf{r} + \phi_2] \end{aligned} \end{aligned} \tag{2.1}$$

ここで、A、Aは振幅であり、直線偏波と仮定したため実数ベクトルであり、k1、k2は波数ベクトル、実

数 $\phi_1$ 、 $\phi_2$ は位相である。位相差 $\phi_1 - \phi_2$ が一定のとき 2 つの平面波の波源は互いにコヒーレントといい、位相差が時間と共に不規則に変動するとき、互いにインコヒーレントという。

この2つの波より作られる干渉信号の時間平均強度分布は、電磁放射の時間平均強度が電磁界振幅の2乗 に比例することより以下のように表すことが出来る。

$$I = |\mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2|^2 = I_1 + I_2 + 2\mathbf{A}_1 \cdot \mathbf{A}_2 \cos(\mathbf{K} \cdot \mathbf{r} - \phi)$$
 (2.3)

ここで、 $I_1 = |E_1|^2$ 、 $I_2 = |E_2|^2$ 、 $K = k_1 - k_2$ 、 $\phi = \phi_1 - \phi_2$ である。初めの2つの項は時間平均強度、3つ目の項が干渉光であり、相互コヒーレンスの程度についての情報が含まれている。 2 つの波が互いにコヒーレント( $\phi$  = 定数)で同じ偏波状態の場合、干渉信号強度は安定する。

このように、光は重ね合わせによって干渉信号をつくる。これは超短パルスのキャリアを構成する複数の異なる波長の光においても同様である [19]。

#### 2-4 瞬時高空間分解能 2 次元分光法

2.2節で述べた形状計測手法では、干渉によって切り取られたパルスの周波数情報に奥行き情報が含まれているため、2次元分光によって反射パルスの波長を特定する必要がある。2次元分光法はこれまでに様々な手法が開発されている。例えば、画像を点やライン状に切り取ってスキャンを行う手法 [20, 21]や、バンドパスフィルタを用いて画像全体に分光法を適用する手法 [22]がある。一方で、本研究で扱う 3次元形状計測手法では、瞬時に高空間分解能の画像情報を取得したいため、瞬時計測・高空間分解能・高波長分解能を同時に実現する手法を必要とするが、これらを満たす既存の手法は無かった。そこで開発されたのが全光ヒルベルト変換手法に基づく 2次元分光法 [17]である。光コムの高い位相制御性を生かして高精度に 90 度の位相差を持つパルス列対を生成することで光による演算を行い、スキャンを必要としない高空間分解能・高波長分解能を兼ね備えた手法である。この手法について述べる。

## (1) 全光ヒルベルト変換

波長情報を強度情報に変換するにあたって、遅延時間を走査させて得られる干渉波形の包絡線を求める必要がある。干渉波形では、遅延時間によっては強度がゼロの場合が存在するからである。包絡線を求めるには直交した信号が必要であり、それを得る方法にヒルベルト変換がある。通常、ヒルベルト変換には遅延時間を走査した画像の取得と、フーリエ変換等の複雑な演算が必要であり、瞬時に求めることはできない。

そこで、我々のグループでは、90 度の位相差を持つパルス列のスペクトル干渉により、包絡線を求める手法を開発した [17]。図 2.4 に示すように、互いに 90 度の位相差を持つパルス列をつくり、チャープの異なるパルスと干渉させてスペクトル干渉を計測する。すると、それぞれの干渉縞が  $A\sin\theta$ 、 $A\cos\theta$  に対応する。

包絡線は $\sqrt{(Asin\theta)^2 + (Acos\theta)^2}$ で表されるため、複雑な計算や遅延時間の走査をすることなく、包絡線を求めることができる。これを全光ヒルベルト変換と呼ぶ。互いに 90 度の位相差を持つパルス列は、光コムの繰り返し周波数  $f_{\rm rep}$  とオフセット周波数  $f_{\rm ceo}$  を  $f_{\rm rep}$  = 4  $f_{\rm ceo}$  の関係にすることで実現している。これについては 4.5 で詳しく述べる。

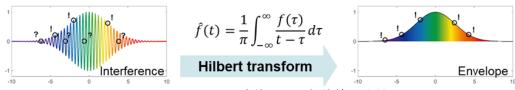


図2.3 ヒルベルト変換による包絡線の取得

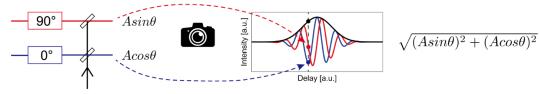


図2.4 全光ヒルベルト変換

#### (2) ペアフィルタシステム

全光ヒルベルト変換によって、遅延時間(波長)に対する干渉縞強度の包絡線を求めることができたが、 単調増加・減少関数でないため同じ強度を示す遅延時間が複数あり、波長に対して強度が一意に定まらない。 そのため、包絡線を単調に変化する関数に変換する必要がある。そこで、図 2.6に示すような透過率の波長 特性が対向するようなペアフィルタを用いる。全光ヒルベルト変換によって得られた包絡線をショートパス フィルタ、ロングパスフィルタフィルタに通すと、図 2.6 のような波長特性が得られる。それを除算するこ とで単調増加関数を得ることができ、遅延に対する透過率を一意に決めることができる。この透過率特性は 特徴色に対応する [20]。

実際には、90°の位相差を持つパルス列対をそれぞれショートパスフィルタ、ロングパスフィルタを通し、カメラで4枚の干渉画像を取得する。そして同じフィルタを通った画像同士の2乗和を求め、さらにそれらを除算することで3次元形状の計測を可能とする。

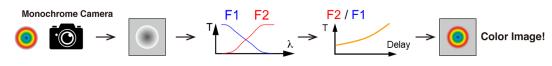


図 2.5 ペアフィルタシステム

#### (3) 光コムによる 90 度位相差パルス列対の生成

全光ヒルベルト変換をするためには、精密に 90 度の位相差を持つパルス列が必要である。光の位相差を調整する方法はこれまでにも様々な手法がある [21, 22, 23]が、本研究では全帯域で正確に 90 度の位相差を持たせるため、光コムの 2 つのパラメータ、繰り返し周波数  $f_{\rm rep}$  とオフセット周波数  $f_{\rm ceo}$  を  $f_{\rm rep}$  = 4  $f_{\rm ceo}$  の関係にする。これにより、隣り合うパルスとの位相差が 90 度となる。このパルス列を 2 つに分岐し、一方の光路にパルス間隔分の遅延を与えて 1 パルス分遅らせる。すると、同じタイミングのパルスが 90 度の位相差を持つようになる。そのため、精密かつ安定に 90 度の位相差を持つパルス列を得ることができる。

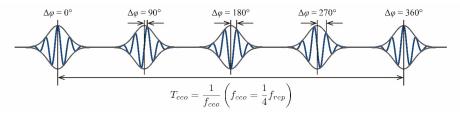


図 2.6  $f_{rep} = 4 f_{ceo}$ の関係のパルス列

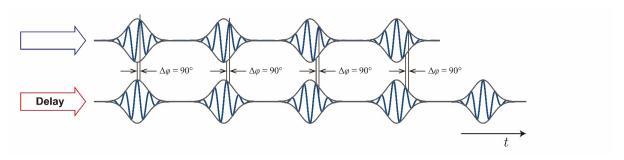
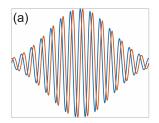


図 2.7 90 度の位相差を持つパルス列対

# 3 広スペクトル帯域位相差判定手法の必要性

これまでに我々のグループでは、瞬時 3 次元形状計測手法と瞬時高解像度 2 次元分光法を組み合わせることで、瞬時高解像度 3 次元形状計測を実現させてきた。さらに高精度な測定を実現するには、精密に 90 度の位相差を持つパルス列対を用いて、全光ヒルベルト変換を正確に行う必要がある。これまでは、光コムの性質を利用して 90 度の位相差パルス列対を生成していたが、実際に位相差が 90 度であるかを確認する手段はなかった。そこで、測定に使用しているスペクトル帯域全域の位相差が 90 度であるかを判定する手法を開発することで、高精度に 90 度位相差を達成するパルス列対を生成し、さらなる 3 次元形状計測の高精度化を目指した。一方で、パルス列対の絶対的な時間関係を一意に決定できるということは、これまでにない新しいパルス制御法を提案するものである。形状計測手法の高精度化にとどまらず、光コムの持つ広スペクトル帯域、パルスの制御性を最大限に活かした新たな応用に発展するものだと考えている。

本章では、瞬時3次元形状計測手法のさらなる高精度化に向けて実現しなければならない、位相差パルスの制御法とその課題について述べる。3.1節では、従来の位相差パルス制御法について、3.2節では、位相差パルス制御の課題について述べる。



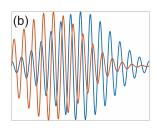


図 3.1 90 度の位相差パルス. (a) 包絡線を含めた絶対位相差が 90 度のパルス, (b) 絶対位相差は 90 度でないパルス

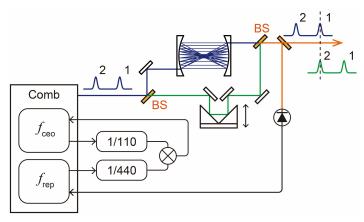


図 3.2 位相差パルスの制御方法

## 4 広スペクトル帯域位相差判定の原理実証

広帯域の位相差を同時に判定するために、スペクトル干渉信号を用いてリサージュ曲線による位相差判定手法を新たに開発した。本手法は、位相差パルスのスペクトル干渉信号を取得し、それらを直交軸としてリサージュ曲線を描くことで、同じタイミングにおける位相差を波長毎に判定する手法である。リサージュ曲線とは、振動している2つの信号を合成して描く平面図形のことであり、周波数の測定などに用いられる。本手法では、リサージュ曲線によって描かれた楕円の傾きに位相差が表れることを利用して、位相差の判定を行った。検出したスペクトル干渉信号の全帯域において位相差判定することで、広スペクトル帯域での位相差判定を実現した。実際に本手法を用いて、位相差パルス列対のスペクトル干渉信号から広帯域での位相差を判定した。

本章では、原理実証として行った広スペクトル帯域での位相差判定について述べる。4.1節では、開発した広スペクトル帯域の位相差を同時に判定する方法について、4.2節では、原理実証の為に用いた実験系について、4.3節では、実際に位相差判定を行った結果と考察を述べる。

## 4-1 リサージュ曲線を用いた位相差判定方法

図4.1 に開発した位相差判定方法の概要を示す。位相差パルス列対に対して別途参照パルスを用意し、各々干渉させてスペクトル干渉縞を取得した。このとき、連続してスペクトルを測定することで、空気揺らぎによって位相が統計的にランダムに変化した干渉縞を取得した。事前にバックグラウンド強度として、干渉しないように光路長を調整したうえでスペクトルの測定を行い、得られたスペクトル干渉縞から除算することでバックグラウンド除去を行い、干渉成分のみの信号とした。次に、位相差パルスの干渉信号をそれぞれ縦軸・横軸としてプロットすることで、各波長におけるリサージュ曲線を求めた。そして、楕円のフィッティング処理を行い、楕円の傾きから位相差を判定した。演算時には、一方の振幅強度を2倍にすることで楕円形状を強調し、フィッティング誤差を小さくするとともに、円の傾きを判定しやすくし、位相がどちらにずれているのかを判定した。

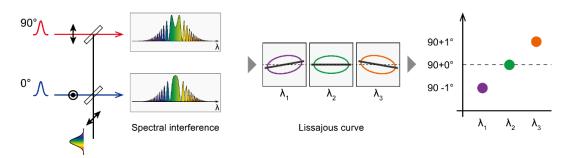


図 4.1 リサージュ曲線を用いた位相差判定方法

#### 4-2 原理実証のための実験系

本実験のために構築した実験系を図 4.2 に示す。光コム光源の出力を 2 つに分岐し、位相差パルス列対の生成と、位相差パルス各々と干渉させるための参照パルスの光路としている。位相差パルスは、各々の偏光子によって偏光が直交するように調整することで、後に偏光によって分離できるようにした。参照パルスは位相差パルス各々と干渉するよう、斜め偏光となるように偏光子を調整した後に、位相差パルスと干渉させた。その後、横モードを揃えるために SMF に導入した後に、方解石 (Thorlabs, BD40) によって偏光で位相差パルスを分離し、各々マルチモードファイバ (MMF) に入射して OSA によってスペクトル干渉縞を測定した。測定は、2 台の OSA を同期させることで、同じタイミングのスペクトルを取得した。

本実験系は、形状計測も同時に行うことを想定している。そのため、スペクトル干渉による形状計測時にチャープ差大きくするために、位相差パルス生成直後の光路に SMF、参照パルスの光路には DCF が導入されている。位相差パルスと参照パルスの光路にある 1/2 波長板、1/4 波長板については、その直後にある偏光子に対して最適な直線偏光状態となるよう調整するために導入した。

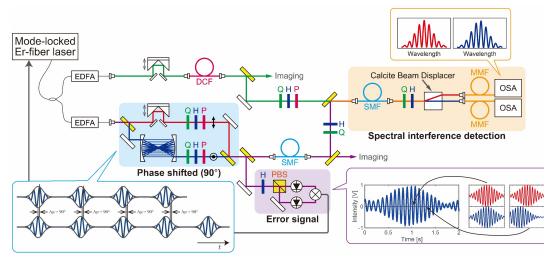


図 4.2 広帯域位相差判定法の原理実証用のための実験系

#### 4-3 位相差判定手順

広スペクトル帯域における位相差判定手法の評価のため、パルス位相差を意図的に変化させて測定し、位相差の判定を行った。本節では、実際の実験手順について述べる。

測定を行う前に、各光路の偏光の調整を行った。はじめに、位相差パルスについて、スペクトル干渉検出部にある方解石で位相差パルスを分離して各々OSAで測定できるよう、MMF後のパワーを確認しながら直前の1/2波長板、1/4波長板によって偏光の調整を行った。その後、参照パルスの偏光を2台のOSAで同じ強

度・形状であるスペクトルを検出出来るよう、位相差パルスと干渉させる前に導入している2枚の波長板を用いて調整した。これらの調整によって2台の0SAに位相差パルス各々のスペクトル干渉縞を検出できるようになる。そして、図4.2に紫色で示した系で位相差パルス同士の干渉信号を取得し、位相差パルスの相対遅延の安定化制御を行うことで、位相差の判定精度を向上させ、スペクトル干渉縞の測定を行った。このとき、連続して50回測定することで、位相の変化したスペクトル干渉縞を取得した。これらの測定を、位相差を掃引して行うことで位相差判定法の評価とした。また、事前に光路長を調整することで干渉縞のないスペクトルを測定し、スペクトル干渉縞のバックグラウンド処理に使用することで干渉成分のみを抜き出し、リサージュ曲線の演算に用いた。

これらの測定を判定法評価のために、位相差パルス同士の干渉信号を用いて位相差を掃引して繰り返し行った。位相差パルス生成部では、パルス間隔分の遅延光路を設けることで同じタイミングのパルスの位相差が 90 度としている。そのため、位相差パルス同士の干渉信号を取得すると、原理的には振幅強度が最大となるときに位相差パルスのタイミングが一致しており、位相差が 90 度であると考えられる。しかし、位相差が 90 度であることを確認する手段はない。そこで、位相差パルス同士の干渉信号における最大振幅付近を掃引するように遅延時間を設定し、測定、位相差の判定を行うことで、90 度位相差となる遅延時間の探索を行った。

90度位相差の探索は粗調と微調の2段階に分けて行った。はじめに、図4.3(a)に示すように、パルス同士の遅延時間を位相差パルス同士の干渉信号の1波長ずつ変化させて測定を行い、位相差が90度となる大まかな遅延時間の把握を行った。その後、最も位相差が90度に近い遅延時間となった付近で、図4.3(b)のように遅延時間を1波長以下で変化させて測定し、高精度に広スペクトル帯域で位相差が90度となる遅延時間を求めた。遅延時間の設定は、位相差パルス生成部にある遅延光路を掃引し、おおよそ設定したい位置に調整する。遅延光路を固定すると、干渉信号は空気揺らぎなどの環境変動によって不安定な値を示す。その振幅強度を確認し、干渉信号の設定したい位置における振幅強度と等しくなるよう、遅延光路長の調整を再度行う。このように調整を何度か行い、位相差パルス同士の干渉信号における設定したい位置の振幅強度と、環境変動によるゆらぎの振幅強度が等しくすることでパルスの遅延時間の調整を行った。この状態で光源の周波数制御を行うことで、位相差を一定に保った状態でスペクトル干渉縞の測定を行った。

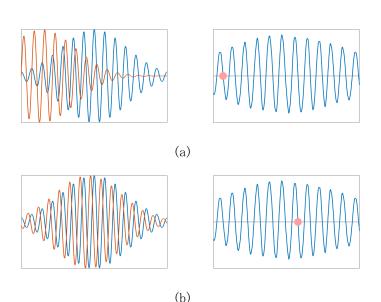


図 4.3 位相差が 90 度となる遅延時間の探索。(a) 1 波長ずつ変化させることで大まかに 判定。(b) 1 波長以下ずつ変化させることでより高精度に位相差が 90 度となる条件を判定

#### 4-4 位相差判定結果と考察

はじめに、図 4.3(a)に示したように位相差パルス同士の干渉信号を用いて、位相差パルス同士の遅延時間を 1 波長ずつ変化させて各々のスペクトル干渉信号を 0SA で測定し、リサージュ曲線を用いて位相差の判定を行った。位相差の判定結果を図 4.4 に示す。横軸は波長、縦軸は位相差パルスの遅延時間を変化させて取得したデータ、色は位相差の 90 度からの差を示している。これより、遅延時間を走査することで、各波長で位相差が連続的に変化していることがわかった。また、この結果を用いて、位相差が 90 生20 度以内のデータ数を遅延時間毎に求めた結果を図 4.6 に示す。これより、広スペクトル帯域で位相差が 90 度に近い値となる遅延時間で最大値となる信号が得られ、Delay = 6 の場合において最も位相差が 90 度に近い値となることを求めることが出来た。

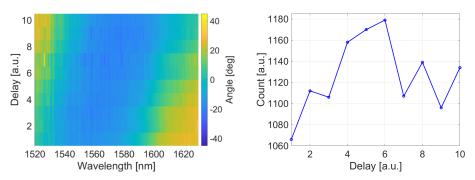


図4.41波長毎に走査した位相差判定結果 図4.5 位相差が90±20度以内のデータ数

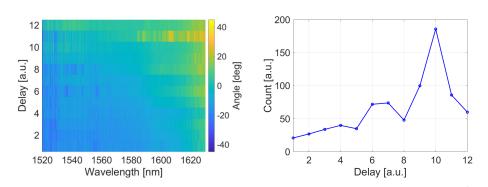


図 4.6 1 波長以下で走査した位相差判定結果 図 4.7 位相差が 90±1 度以内のデータ数

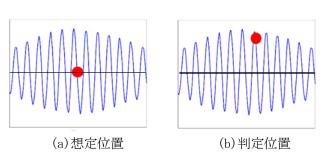


図 4.8 位相差パルス同士の干渉信号における位相差が 90 度となる位置

次に、Delay = 6の付近で位相差パルスの遅延時間を1波長以下で細かく変化させて測定し、位相差判定を行った結果を図 4.6 に示す。これより、図 4.4 に比べて位相差が 90 度から離れているスペクトル帯域がかなり減り、全体的に位相差が 90 度に近づいていることがわかる。また、先ほどと同様に、この結果を用いて位相差が  $90\pm1$  度以内のデータ数を求めたると図 5.7 のようにピークのある信号が得られ、Delay = 10 の

ときに広スペクトル帯域で位相差が90度であると判定することが出来た。

本実験で位相差が広スペクトル帯域で最も90度となる遅延時間は、想定とは異なる位置であった。位相差 パルス同士の干渉信号の振幅が最大となる場合のゼロクロス点で、位相差パルスが最も重なり合い、広帯域 で位相差が 90 度になると予測していたが、実際には図 4.8 に示すように、振幅が最大でもゼロクロス点で もなかった。この原因として、2つの要素があると考えられる。1つは位相差パルスのチャープ差による影響 である。意図的に一方をチャープしているわけではないが、位相差パルス同士の干渉信号を広範囲で確認す ると図 4.9 のように左右非対称な形状となっていることがわかる。このチャープは、位相差パルスを生成す る際の光学系によるものだと考えられる。実際の位相差パルス生成部の光学系は、強度バランスを調整する ための ND や、ビーム径を調整するためのレンズなど、片方の光路にしか使用されていない光学素子がある。 そのため、どちらの光路にも同一の光学素子を使用するように光学系を変更することでチャープ差を改善す ることが可能だと考えられる。また、チャープ差を考慮して遅延時間を予測することでも、位相差90度を達 成できると考えられる。一方で、位相差が広帯域で90度にならないもう一つの原因として挙げられるのは、 波長板の波長依存性による影響である。波長依存性の小さいアクロマティック波長板を使用しているが、約 1450nm から 1650 nm と広いスペクトルの光を使用しているため影響は小さくない。実際に、波長板を波長依 存性の大きいゼロオーダー波長板に変更して同様の実験・解析を行うと図 4.10 のようになった。縦に縞模様 が出来ていることから、アクロマティック波長板使用時に比べて波長毎に位相差が大きく異なることがわか る。本研究では、位相差パルス生成光路において、0度パルスと90度パルスで同じメーカーではあるが異な る型番の波長板を使用していたため、波長依存性の異なる影響が出ていた可能性がある。また、光学系を改 良し、スペクトル干渉縞検出までの波長板の数を減らすことで、更に広スペクトル帯域で90度の位相差を達 成できると考えられる。

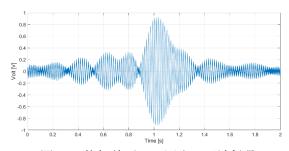


図 4.9 位相差パルス同士の干渉信号

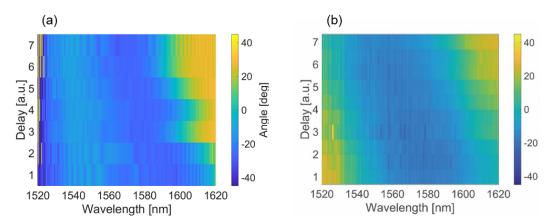


図 4.10 波長板の波長依存性による位相差への影響 (a)ゼロオーダー波長板使用時 (b)アクロマティック波長板使用時

## 5 自作マルチチャンネル分光器による広スペクトル帯域位相差判定

これまでに、広スペクトル帯域で同時に位相差を判定出来ることを確認してきた。一方で、リサージュ曲線を描くために空気揺らぎを利用して位相の異なるスペクトル干渉信号を50回測定する必要がある点や、測定した50点のデータから楕円の傾きを求めるために楕円フィッティングを行う点など、測定にも解析にも時間のかかる位相差判定方法となっていた。一度位相差が90度となる位相差パルス同士の遅延時間を判定することが出来れば、その判定結果を利用して測定することは出来るが、レーザーを立ち上げ直したりすると判定結果は変化するため、測定前に毎回時間をかけて判定しなければならない。そこで、電気信号の位相比較器に相当する演算を応用することで、高速に位相差を判定する手法を新たに開発した。瞬時に位相差を判定することが出来れば、測定中に光源のフィードバック制御を行い、位相差が90度であることを確認しながら形状計測を行うことが可能となる。

本章では、新たに開発した瞬時位相差判定手法とその結果について述べる。5.1 節では、開発した瞬時位相差判定方法について、5.2 節では、位相差判定のために構築した実験系について、5.3 節では、実際に位相差判定を行った結果と考察について述べる。

#### 5-1 瞬時位相差判定方法

新たに開発した瞬時位相差判定方法は、電気信号における位相比較器の演算に位相差パルス各々のスペクトル干渉信号を適用した手法である。図 5.1(a)に示すように、位相比較器では、2 つの信号の積を求め、LPFによって得られた信号の直流成分を求めることで、90 度位相差からの差を評価している。これを応用し、位相差パルス各々のスペクトル干渉信号の積を求め、その直流成分を評価することで位相差が 90 度であるかを判定した。実際には、スペクトル干渉縞には、干渉成分と直流成分が含まれているため、スペクトル干渉縞から直流成分を除去する演算を行ったうえで図 5.1(b)に相当する演算を行った。

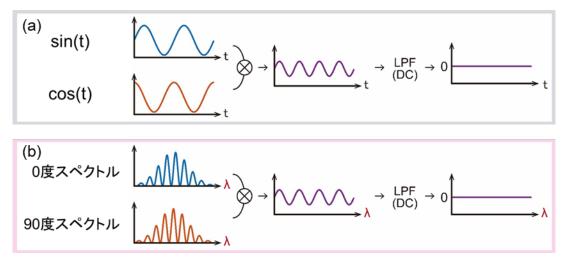


図 5.1 瞬時位相差判定方法 (a) 電気信号における位相比較器 (b) 開発した広帯域位相差判定法

## 5-2 実験系

本実験に用いた光学系を図 5.2 に示す。光源には先に述べた光コム光源を使用しており、偏光子によって直線偏光を確立している。その後、ビームスプリッタによって 1:9 の割合で 2 つに分岐し、強度の強い光路で位相差パルスの生成を行っている。その後、SMF に入射しているが、これはイメージングの際にチャープを与えるために行っている。本実験では位相差パルスの横モードを揃える役割を果たしている。その後、ビームスプリッタによって更に 2 分岐し、1/2 波長板と偏光ビームスプリッタ、バランスディテクタによって位相差パルス同士の干渉信号を取得している。そして、最初に分岐した光と合波することでスペクトル干渉を実現している。スペクトル干渉信号は、2 枚の波長板と偏光ビームスプリッタによって位相差パルスを分岐し、それぞれ InGaAs ラインセンサによって取得している。また、ツェルニターナ型分光器を構築すること

で、分光器としての性能を向上させている。

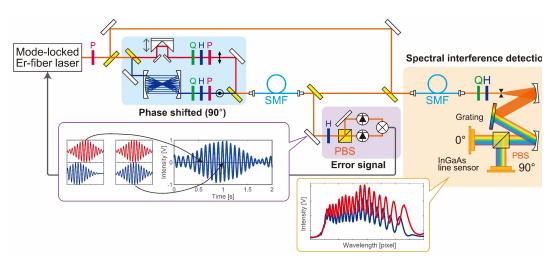


図 5.2 自作マルチチャンネル分光器による位相差判定システム

#### 5-3 ラインセンサを用いた自作マルチチャンネル分光器

位相差判定には、スペクトル干渉信号を用いている。そのため、位相差パルス各々の光を別々の 0SA で測定することで、波長分解能の高いスペクトル干渉信号を位相差判定に使用することは可能である。しかし、位相差判定システムは、イメージングシステムへの導入を目標としているため、コンパクトであることが要求される。そのため、スペクトル干渉信号を 0SA で取得するのではなく、InGaAs ラインセンサ(浜松ホトニクス、G11508-512SA)によって取得するシステムを構築した。本センサは、512 個のフォトダイオードがライン状に並んでおり、外部から入力した 2 つの信号によって動作速度、露光時間を決定する。各画素の信号はクロック信号と同期して、偶数と奇数に分けて 1 画素ずつ出力される。

ラインセンサを駆動する際のタイミングチャートを図 5.3 に示す。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 [28]。

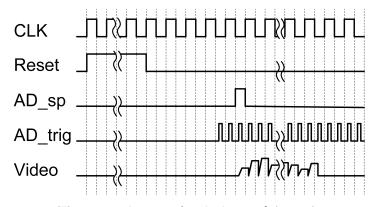


図 5.3 ラインセンサのタイミングチャート

## 5-4 位相差判定結果と考察

本実験でも前回と同様に、位相差パルス同士の干渉信号を用いて、相対遅延を走査して位相差の変化を確認した。図 5.4(b)に、1 波長毎に相対遅延を走査してスペクトル干渉信号を測定し、位相差判定を行った結

果を示す。各波長における 90 度位相差からのズレを表している。本実験において絶対位相差は重要ではなく、90 度であるかどうかだけを評価出来ればよいため、絶対位相差は求めていないが、原理的にはこの縦軸に[deg.]の単位をつけることは可能である。すべての帯域でゼロなる場合が理想的だが、遅延時間によって位相差の波長依存性が大きく異なることがわかる。そこで、遅延時間毎に測定したスペクトル帯域の 90 度位相差からのズレの標準偏差を求めることで位相差の波長依存性を評価したところ、図 5.4(c)のように信号が得られ、Lock position = 8 が最も波長依存性の小さい遅延時間であることを求めることが出来た。次に、Lock position = 8 で遅延時間を 1 波長以下で細かく変化させて測定し、位相差判定を行った。結果は図 5.5(b)のように求まり、波長依存性はほぼ一定を保ちながら、90 度位相差からのズレが変化していた。この結果より、各遅延時間で測定したスペクトル帯域の 90 度位相差からのズレの平均を求めたところ、図 5.5(c) のように信号が得られ、最も位相差が広帯域で 90 度である遅延時間を判定することが出来た。

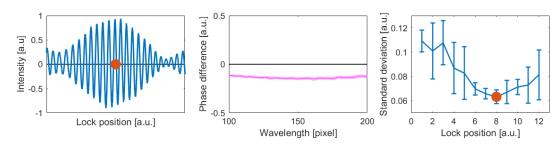


図 5.4 位相差パルスの遅延時間を粗く走査したときの位相差判定結果 (a) 位相差パルス同士の干渉 信号 (b) 波長毎の位相差判定結果 (c) 遅延時間毎の位相差判定結果の標準偏差による評価

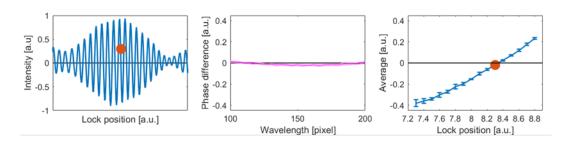


図 5.5 位相差パルスの遅延時間を詳細に走査したときの位相差判定結果 (a) 位相差パルス同士の干渉信号 (b) 波長毎の位相差判定結果 (c) 遅延時間毎の位相差判定結果の平均値による評価

## 5-5 広スペクトル帯域で高精度に90度位相差を達成するための課題

本実験によって、広スペクトル帯域で最も位相差が90度となる条件を判定することが出来た。しかし、図5.6に示すように、一番実現出来ている場合でも若干の波長依存性は残っていた。本節では、除去しきれなかった波長依存性の原因について述べる。

はじめに原因として考えられるのは、位相差パルスのチャープ差である。4.4 節においても議論した内容ではあるが、本実験に関する内容を改めて述べる。本実験に用いた位相差パルス同士の信号だが、図5.4(a)からわかるように、今回も左右非対称であることがわかる。本実験では、位相差パルス生成部の偏光調整用の1/2 波長板、1/4 波長場、偏光子、パワー調整用の可変 ND フィルタは、すべて同じ型番のものに統一し、分散の違いを小さくした。しかし、同一の光学部品を使用できなかったものもある。1 パルス分光路長差を設けるための遅延光路によって拡大されたビーム径を補正するためのレンズと、位相差パルスのスペクトル強度の差を補正するためのロングパスフィルタの2か所である。それぞれ別のパルスの光路に含まれているため、大きな差はないが、位相差パルス同士の干渉信号に表れる程度の分散の違いは生まれてしまっている。これは、一方の光路に分散補償用にガラスを用意し、チャープ差が無くなるように厚さを調整することで改善が見込まれる。なお、遅延光路によるビーム径の拡大については、元々のビーム径を大きくすることでビーム径の差を小さくなり、レンズを導入する必要が無くなると考えている。

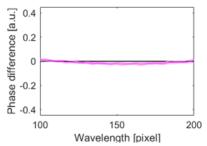


図 5.6 最も位相差が 90 度であると判定したときの波長依存性

# 6 まとめ

これまでに確認することのできなかった、広スペクトル帯域での位相差を判定する手法とシステムの開発を行った。これらの技術を実際に形状計測に使用する光を判定することで、広スペクトル帯域で90度の位相差となる条件を探索ことが出来ると考えており、現在実験を進めている。本技術は全光ヒルベルト変換を高精度に実現でき、高品位な形状計測を達成することを可能にする、超短パルス特性の新しい計測手法といえる。

# 【参考文献】

- [1] T. Dresel, G. Häusler, and H. Venzke, "Three-dimensional sensing of rough surfaces by coherence radar," Appl. Opt. 31(7), 919–925 (1992).
- [2] W. Carter, R. Shrestha, G. Tuell, D. Bloomquist, and M. Sartori, "Airborne laser swath mapping shines new light on Earth's topography," Eos Trans. AGU 82(46), 549 (2001).
- [3] K. Omasa, F. Hosoi, and A. Konish, "3D lidar imaging for detecting and understanding plant responses and canopy structure," J. Exp. Bot. 58(4), 881–898 (2006).
- [4] Y. Jia, O. Tan, J. Tokayer, B. Potsaid, Y. Wang, J. J. Liu, M. F. Kraus, H. Subhash, J. G. Fujimoto, J. Hornegger, and D. Huang, "Split-spectrum amplitude-decorrelation angiography with optical coherence tomography," Optics Express 20(4), 4710-4725 (2012).
- [5] H. Pahlevaninezhad, M. Khorasaninejad, Y. Huang, Z. Shi, L. P. Hariri, D. C. Adams, V. Ding, A. Zhu, C. Qiu, F. Capasso & M. J. Suter, "Nano-optic endoscope for high-resolution optical coherence tomography in vivo," Nature Photonics 12, 540–547 (2018).
- [6] S. Bohn, K. Sperlich, S. Allgeier, A. Bartschat, R. Prakasam, K. M. Reichert, H. Stolz, R. Guthoff, R. Mikut, B. Kohler, and O. Stachs, "Cellular in vivo 3D imaging of the cornea by confocal laser scanning microscopy," Biomedical Optics Express 9(6), 2511-2525 (2018).
- [7] H. J. Tiziani and H.-M. Uhde, "Three-dimensional image sensing by chromatic confocal microscopy," Applied Optics 33(10), 1838-1843 (1994).
- [8] R. H. Webb, "Confocal optical microscopy," Rep. Prog. Phys. 59, 427 (1996).
- [9] K. Kuzmenko, P. Vines, A. Halimi, R. J. Collins, A. Maccarone, A. McCarthy, Z. M. Greener, J. Kirdoda, D. C. S. Dumas, L. F. Llin, M. M. Mirza, R. W. Millar, D. J. Paul, and G. S. Buller, "3D LIDAR imaging using Ge-on-Si single-photon avalanche diode detectors," Optics Express 28(2), 1330-1344 (2020).
- [10] X. Ren, Y. Altmann, R. Tobin, A. Mccarthy, S. Mclaughlin, and G. S. Buller, "Wavelength-time coding for multispectral 3D imaging using single-photon LiDAR," Optics Express, 26(23), 30146-30161 (2018).
- [11] T. Saucedo, F. M. Santoyo, M. D. l. Torre-Ibarra, G. Pedrini, and W. Osten, "Endoscopic pulsed digital holography for 3D measurements," Optics Express 14(4), 1468-1475 (2006).

- [12] F. Merola, P. Memmolo, L. Miccio, R. Savoia, M. Mugnano, A. Fontana, G. D'Ippolito, A. Sardo, A. Iolascon, A. Gambale & P. Ferraro, "Tomographic flow cytometry by digital holography," Light: Science & Applications 6, e16241 (2017).
- [13] K. Minoshima, H. Matsumoto, Z. Zhang, and T. Yagi, "Simultaneous 3-D Imaging Using Chirped Ultrashort Optical Pulses," Jpn. J. Appl. Phys. 33, L1348-L1351 (1994).
- [14] 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, 3670 (2017).
- [15] 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, 20-30 (2020).
- [16] T.Kato, M. Uchida, Y. Tanaka, and K. Minoshima, "One-shot three-dimensional imaging using a two-dimensional spectrometer with a fiber bundle," Optics Express 29(26), 43778-43792 (2021).
- [17] T. Kato, H. Ishii, K. Terada, T. Morito, and K. Minoshima, "Fully non-scanning three-dimensional imaging using an all-optical Hilbert transform enabled by an optical frequency comb," arXiv:2006.07801 (2020).
- [18] H. Wu, F. Zhang, T. Liu, F. Meng, J. Li, and X. Qu, "Absolute distance measurement by chirped pulse interferometry using a femtosecond pulse laser," Opt. Express 23(24), 31582-31593 (2015).
- [19] ヤリーヴ・イェー, 光エレクトロニクス 基礎編, 丸善株式会社 (2010).
- [20] M. Abdo, V. Badilita, and J. Korvink, "Spatial scanning hyperspectral imaging combining a rotating slit with a Dove prism," Opt. Express 27(15), 20290-20304 (2019).
- [21] M. J. Marques, A. Bradu, and A. G. Podoleanu, "Towards simultaneous Talbot bands based optical coherence tomography and scanning laser ophthalmoscopy imaging," Biomed. Opt. Express 5(5), 1428-1444 (2014).
- [22] H. R. Morris, C. C. Hoyt, and P. J. Treado, "Imaging Spectrometers for Fluorescence and Raman Microscopy: Acousto-Optic and Liquid Crystal Tunable Filters," Appl. Spectrosc. 48(7), 857-866 (1994).
- [23] X. Dai, K. Minoshima, and K. Seta, "Simplified spectral imaging using a pair of CCDs with filters for shape measurement," Proc. SPIE, 3782 (1999).
- [24] K. Isobe, A. Suda, M. Tanaka, F. Kannari, H. Kawano, H. Mizuno, A. Miyawaki, and K. Midorikawa, "Multifarious control of two-photon excitation of multiple fluorophores achieved by phase modulation of ultra-broadband laser pulses," Opt. Express 17(16), 13737-13746 (2009).
- [25] Y. Hayasaki, T. Sugimoto, A. Takita, and N. Nishida, "Variable holographic femtosecond laser processing by use of a spatial light modulator," Appl. Phys. Lett. 87, 031101 (2005).
- [26] S. Hasegawa, Y. Hayasaki, and N. Nishida, "Holographic femtosecond laser processing with multiplexed phase Fresnel lenses," Opt. Lett. 31(11), 1705-1707 (2006).
- [27] T. Kato, T. Morito, K. Terada, S. Kurata, and K. Minoshima, "Ultrafast Phenomena Induced in Crystal by one-Shot Three-Dimensional Imaging With Optical Frequency Comb," CLEO:2021, JW1A.85 (2021).
- [28] Y. Nakajima, and K. Minoshima, "Highly stabilized optical frequency comb interferometer with a long fiber-based reference path towards arbitrary distance measurement," Opt. Express 23(20), 25979-25987 (2015).

# 〈発表資料〉

## 【国際会議】

[1] T. Morito, T. Kato, K. Terada, S. Kurata and K. Minoshima, "Development of a broadband phase difference evaluation system for optical frequency combs using spectral interference fringe detection," *The 10th Advanced Lasers and Photon Sources 2021(ALPS2021)*, 2021(Apr.)

#### 【国内学会】

- [2] 森藤環, 加藤峰士, 猫島靖久, 藏田真太郎, 美濃島薫, "光コムパルスの瞬時広帯域位相差判定 による動的な3次元形状計測", レーザー学会学術講演会第42回年次大会 Online 2022(1月)
- [3] 森藤環、加藤峰士、蔵田真太郎、美濃島薫, "光コムパルス列の広帯域位相差判定法による全 光ヒルベルト変換を用いた瞬時 3 次元形状計測法の高精度化," 2021 年第 82 回応用物理学会秋季学 術講演会, Online 2021(9 月)

- [4] 森藤環,加藤峰士,寺田和博,藏田 真太郎,美濃島薫,"スペクトル干渉縞検出による光コムパルスのリアルタイム広帯域絶対位相差判定手法の構築," 2021 年第 68 回応用物理学会春季学術講演会,Online 2021(3月)
- [5] 森藤環,加藤峰士,寺田和博,蔵田 真太郎,美濃島薫,"チャープしたスペクトル干渉縞による光コムパルスの広帯域位相差検出法の開発,"2020年日本光学会年次学術講演会,Online 2020(11月)
- [6] 森藤環,加藤峰士,寺田和博,美濃島薫,"光コムのスペクトル干渉を用いたパルス位相差安定化法の高精度化の検討," 2020年第81回応用物理学会秋季学術講演会,東京2020(9月)
- [7] 森藤環,加藤峰士,寺田和博,美濃島薫,"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," 2020年第67回応用物理学会春季学術講演会,東京2020(3月)

森藤環,加藤峰士,石井大貴,寺田和博,美濃島薫,"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,"レーザー学会第20回東京支部研究会,東京2020(3月)