

インコヒーレントデジタルホログラフィとその
計測応用に関する研究

平成 29 年 3 月

和歌山大学大学院システム工学研究科

渡辺 果歩

Incoherent Digital Holography and Its Applications to Measurement

March 2017

Graduate School of Systems Engineering, Wakayama University

Kaho Watanabe

概要

イメージセンサの高解像度化や計算機の演算処理能力の向上を背景にデジタルホログラフィが盛んに研究されている。本研究ではコヒーレンスの低い光を光源に用いたデジタルホログラフィによるイメージング技術とそれを用いた計測手法の確立を目的とし、時間的低コヒーレンス光を用いたデジタルホログラフィと空間的インコヒーレント光を用いたデジタルホログラフィをそれぞれ取り上げ、3つの手法を提案する。

初めに時間的低コヒーレンスデジタルホログラフィを用いた屈折率・厚さ分布の同時計測手法を提案する。提案手法は参照ミラーを走査し記録したデジタルホログラムの数値再生像から物体光と参照光の光路差0位置を取得し、仮想基準面を導入することにより、屈折率・厚さ分布を計測する。提案手法を用いた計測実験をおこない、屈折率分布・厚さ分布の同時計測手法として有用性を実証した。

次に偏光2チャンネル回転シアリング干渉計を用いた空間的インコヒーレントフーリエデジタルホログラフィを提案する。提案システムでは回転シアリング干渉計と波長板の組み合わせにより、2つの直交する偏光を用いてインコヒーレント物体の余弦・正弦変換の両方の形の干渉縞が得られる。余弦・正弦変換はフーリエ変換の実部・虚部に相当するため、インコヒーレントフーリエデジタルホログラムを取得できる。提案手法を用いたインコヒーレントフーリエデジタルホログラム記録実験をおこない、その数値再生像を取得した。得られた数値再生像においてインコヒーレント物体の強度分布を計測できていることを示した。

その後、先の手法では再生画像が大きな直流光成分を含む課題を指摘し、その課題に対し位相シフト偏光2チャンネル回転シアリング干渉計を用いた空間的インコヒーレントフーリエデジタルホログラフィを提案する。提案手法は新たに波長板を導入し、干渉縞の交流成分の符号が異なるホログラムを得る。それにより、バイアス項のないインコヒーレントフーリエデジタルホログラムを取得できる。よって、再生画像において直流光成分を除去することができる。インコヒーレントフーリエデジタルホログラム記録・再生実験をおこない、直流光成分の低減と同時にインコヒーレント物体の強度分布を定量的に計測できることを示した。

本研究によるインコヒーレントデジタルホログラフィとそれを用いた計測技術の確立の成果はオプトエレクトロニクス、ナノテクノロジー産業、高度先進医療技術の発展に資するものである。

Abstract

Owing to development of the resolution of image sensors and computing technologies, digital holography has been widely studied. In this thesis, digital holography using a low coherent light source and its applications to measurement is studied. Temporally low-coherence digital holography and spatially incoherent digital holography are proposed.

First, the method to measure refractive index and thickness distributions using temporally low-coherence digital holography is described. A reference mirror is scanned vertically and the zero optical path difference of an object and a reference waves is obtained from recorded a series of digital holograms. An introduction of a virtual datum plane enables us to measure refractive index and thickness distributions of a specimen. The optical experiment confirms the proposed method to simultaneous measurement of refractive and thickness distributions.

Second, spatially incoherent Fourier digital holography using a dual channel rotational shearing interferometer is described. A combination of a rotational shearing interferometer and a wave plate makes it possible to obtain the interference patterns as the figures of both the cosine and sine transformations of an incoherent object in two different polarizations. As the cosine and sine transforms are equivalent to real and imaginary parts of the Fourier transform, an incoherent Fourier digital hologram is obtained. An optical experiment to record an incoherent Fourier digital hologram using the proposed method was performed. The intensity distribution of an incoherent object is measured from a numerical reconstruction.

Third, spatially incoherent Fourier digital holography by a phase-shifting dual channel rotational shearing interferometer is described. In the previous incoherent Fourier digital holography, the reconstructed image contains a large bias term. The proposed method introduces another kind of a wave plate, and obtains holograms which have different signed alternating current terms of the interference patterns for solving the bias problem. An incoherent Fourier digital hologram without the bias term is obtained. Therefore, the bias term is removed in a reconstructed image. An optical experiment to record an incoherent Fourier digital hologram was performed. The bias level reduction and measuring the intensity distribution of an incoherent object were shown.

The achievement of incoherent digital holography and measurement by this study contributes to development of opto-electronics, nanotechnology, and medical technology.

目次

第 1 章 序論	1
1.1 本研究の位置付け	1
1.2 研究背景	3
1.2.1 時間的低コヒーレンスデジタルホログラフィを用いた屈折率分布・厚さ分布の同時計測の課題	3
1.2.2 空間的インコヒーレントフーリエデジタルホログラフィの現状と課題	4
1.2.3 自己干渉を利用した空間的インコヒーレントホログラフィの課題	6
1.3 本論文の構成	7
第 2 章 時間的低コヒーレンスデジタルホログラフィを用いた屈折率分布・厚さ分布の同時計測	9
2.1 緒言	9
2.2 時間的低コヒーレンスデジタルホログラフィを用いた屈折率分布・厚さ分布の同時計測原理	9
2.2.1 時間的低コヒーレンスデジタルホログラフィを用いた光路差 0 位置取得法	9
2.2.2 2次元屈折率分布・厚さ分布の同時計測原理	13
2.2.3 単一の干渉計による厚さ分布計測のための信号処理法	15
2.3 時間的低コヒーレンスデジタルホログラフィを用いた屈折率分布・厚さ分布の同時計測実験	16
2.3.1 一様な厚さをもつ物体の屈折率分布・厚さ分布の同時計測実験	16
2.3.2 厚さが空間的に異なる物体の屈折率分布・厚さ分布の同時計測実験	23
2.4 結言	28
第 3 章 偏光 2 チャネル回転シアリング干渉計を用いた空間的インコヒーレントフーリエデジタルホログラフィ	33
3.1 緒言	33
3.2 空間的インコヒーレントフーリエデジタルホログラフィの原理	33
3.2.1 回転シアリング干渉計を用いたインコヒーレントデジタルホログラム記録原理	33
3.2.2 偏光 2 チャネル回転シアリング干渉計を用いたインコヒーレントフーリエデジタルホログラフィの原理	36

3.3	インコヒーレントフーリエデジタルホログラム記録・再生実験	38
3.4	結言	40
第 4 章	バイアスレベル低減のための位相シフト偏光 2 チャネル回転シアリング干渉計を用いた空間的インコヒーレントフーリエデジタルホログラフィ	43
4.1	緒言	43
4.2	位相シフト偏光 2 チャネル回転シアリング干渉計を用いたインコヒーレントフーリエデジタルホログラフィの原理	43
4.3	インコヒーレントフーリエデジタルホログラム記録・再生実験	45
4.4	結言	50
第 5 章	結論	55

謝辞

参考文献

研究業績

付録

第 1 章 序論

1.1 本研究の位置付け

ホログラフィは光の波動としての振る舞いである干渉，回折を利用することにより，被計測物体の情報を取得することのできる技術である．被計測物体からの透過もしくは反射光である物体光と参照光との干渉を光の強度分布として記録する^{1,2)}．この記録した強度分布には，物体の振幅・位相分布が含まれているためホログラムと呼ばれる．ホログラムを記録時に用いた参照光を用いて再生することにより，被計測物体の振幅・位相分布を取得できる^{3,4)}．そのため，この技術は物体の 3 次元像の記録と表示などに利用されてきた⁴⁻⁶⁾．

近年この技術はイメージセンサの高解像度化や計算機の演算処理能力の向上を背景に，記録過程においてホログラムの記録に CCD (Charge Coupled Device) や CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) イメージセンサを用い，得られたデジタルホログラムをコンピュータを用いて数値再生するデジタルホログラフィとして発達し，盛んに研究されている⁷⁻¹¹⁾．デジタルホログラフィは数値再生の結果として被計測物体の振幅・位相分布を定量的に取得できるため，形状計測¹²⁻¹⁴⁾ や生体の観察¹⁵⁾，細胞の顕微鏡検査¹⁶⁾ などに用いられている．また，偏光情報¹⁷⁻²²⁾ や色情報^{23,24)} の取得も可能である．これらの特徴からこの技術は粒子計測²⁵⁾ や産業・工業分野におけるモニタリング²⁶⁻²⁸⁾，欠陥検出^{29,30)} などにも応用されている．

このデジタルホログラフィは物体光と参照光の干渉縞をホログラムとして記録するため，一般的にその光源には時間的にも空間的にもコヒーレンス（可干渉性）の高いレーザーを用いる必要がある．時間的・空間的コヒーレンスと光源の対応の一例を Fig. 1.1 に示す．時間的・空間的コヒーレンスの高いレーザーを用いる必要があるという制約はホログラフィの使用範囲を厳しく限定し³¹⁾，LED (Light Emitting Diode) や

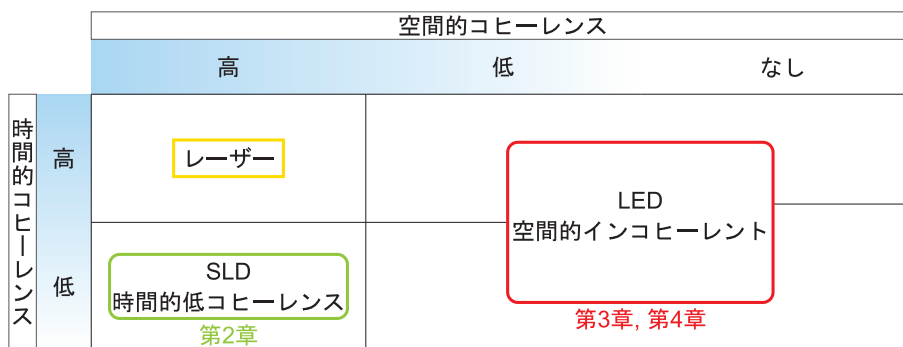


Fig. 1.1 時間的・空間的コヒーレンスと光源の一例

SLD (Superluminescent Diode) などの光に照らされた環境など、より一般的な状況においてはホログラムの記録が困難であり、被計測物体の情報を取得できないという問題がある。また、この光源の制約からホログラフィの再生像には高コヒーレンス光源固有のスペックル（粒状）雑音が生じ、画質の低下をもたらしてしまう³²⁻³⁴⁾。これらのことはホログラフィック（立体）ディスプレイ³⁶⁻³⁸⁾や光計測などへの応用技術の普及の障害となっている。

そこで、デジタルホログラフィの光源にコヒーレンスの低い光を用いることのできる低コヒーレンスデジタルホログラフィ³⁹⁾やインコヒーレント光を用いることのできるインコヒーレントデジタルホログラフィが提案されている。中でも時間的コヒーレンスの低い光のデジタルホログラフィは Fig. 1.1 に示すような空間的コヒーレンスが高く、時間的コヒーレンスの低い光の利用を可能にし、その特長を活かして工業製品の観察⁴⁰⁾や生体細胞の観察^{41,42)}のための顕微鏡法に応用されている。また、空間的インコヒーレントデジタルホログラフィは LED などの空間的コヒーレンスのないインコヒーレント光に照明された物体もしくは自らインコヒーレント光を発する物体のホログラムの記録を可能にする。以降、この空間的インコヒーレント光に照明された物体もしくは自らインコヒーレント光を発する物体をインコヒーレント物体と呼ぶ。そのため、日光に照らされた屋外の風景のホログラムの記録³¹⁾や天文用ホログラフィ⁴³⁻⁴⁵⁾、蛍光顕微鏡⁴⁶⁻⁵²⁾などこれまでの高コヒーレント光を用いたホログラフィでは成し得ない新たな技術応用を実現できる⁵³⁾。

本論文ではこのコヒーレンスの低い光を光源に用いたデジタルホログラフィによるイメージング技術とそれを用いた計測手法の確立を目的とし、時間的コヒーレンス光を用いたデジタルホログラフィと空間的インコヒーレント光を用いたデジタルホログラフィをそれぞれ取り上げ

- (1) 時間的コヒーレンスデジタルホログラフィを用いた屈折率・厚さ分布の同時計測
- (2) 偏光 2 チャネル回転シアリング干渉計を用いた空間的インコヒーレントフーリエデジタルホログラフィ
- (3) バイアスレベル低減のための位相シフト偏光 2 チャネル回転シアリング干渉計を用いた空間的インコヒーレントフーリエデジタルホログラフィ

の 3 つの手法を提案する。次節に、各手法の技術的背景と課題について述べる。

1.2 研究背景

1.2.1 時間的低コヒーレンスデジタルホログラフィを用いた屈折率分布・厚さ分布の同時計測の課題

産業分野の製品検査や生物・医学分野の生体組織の測定・診断のために非接触・非破壊・非侵襲の計測手法が求められている。特に、透明な光学製品の厚み計測や屈折率分布の評価は製品の欠陥検出に重要であり、その計測手法の確立が望まれている。また、屈折率の計測は医療・生物分野における抗原の検出や細胞の観察などのためにも重要である。

一般に固体物質の屈折率計測手法として、計測対象をプリズム形状に加工し、その屈折角を測定する最小偏角法が広く用いられている。しかし、これは被計測物体を加工する必要があるため、非接触・非破壊・非侵襲が求められる場合には用いることができない。そのため、非接触・非破壊・非侵襲の屈折率計測手法として光源に時間的低コヒーレンス光を用いた干渉計測法⁵⁴⁻⁵⁶⁾が提案されている。Hopler らの手法⁵⁴⁾は低コヒーレンス干渉計に被計測物体を挿入し、干渉縞が生じる位置の情報から屈折率と厚さの積である被計測物体の光学的厚さを求め、さらに別の手法であらかじめ厚さを求めておき、屈折率を計測する手法である。この低コヒーレンス干渉計では位相屈折率と群屈折率を結びつける関係式⁵⁷⁾があり、群屈折率だけでなく位相屈折率も計測することができる。

Tearney らの手法⁵⁵⁾や Verma らの手法⁵⁶⁾は光源の低い可干渉性を利用し被計測物体の断層画像を取得する OCT (Optical Coherence Tomography) を応用することで、特殊な被計測物体に対して群屈折率計測をおこなうことができる手法である。しかし、これらの手法では原理的に被計測物体の屈折率と厚さの同時計測をおこなうことができない。

そのため、被計測物体の屈折率と厚さを同時計測可能な手法が提案されている⁵⁸⁻⁶³⁾。Zhou らの手法⁵⁸⁾や Haruna らの手法^{59,60)}は OCT を応用することにより屈折率と厚さの同時計測を実現している。具体的には多光子顕微鏡と OCT を組み合わせることにより、生体試料の屈折率分布と厚さ分布の非侵襲な計測を実現している⁵⁸⁾。また、特殊な試料ホルダーを利用することにより屈折率と厚さの同時計測を可能にしている^{59,60)}。一方、Murphy らの手法⁶¹⁾や Hirai らの手法^{62,63)}は直列に接続した2つの干渉計を用いることによって、光学ガラスを始めとする工業製品の屈折率と厚さの同時計測を可能にしている。しかし、これらの手法は点計測技術であるため屈折率・厚さの2次元分布の同時計測には適していない。加えて、これらの手法⁵⁸⁻⁶³⁾は光学系が複雑であり、光学素子の精密な配置が必要とされるという問題がある。

一方、デジタルホログラフィによる計測は簡易な光学系により、2次元分布の計測をおこなうことができる。この技術を応用した屈折率計測⁶⁴⁾、屈折率・形状計測⁶⁵⁾が提案されている。Chengらの手法⁶⁴⁾は2つの干渉計を用いて、被計測物体からの透過波・反射波と参照光の干渉からなるホログラムを記録する。記録ホログラムを数値再生し、位相接続をおこない取得した2つの位相分布から屈折率計測をおこなうことができる⁶⁴⁾。そのため、高速かつ非接触・非破壊・非侵襲な屈折率計測を実現している。しかしこの手法も、2つの干渉計を用いる必要があるため光学系が複雑になり、光学素子の精密な配置が必要とされる。また、計測結果に位相接続による誤差が含まれてしまうという問題もある。また、Zhangらの手法⁶⁵⁾は特殊なダブルプリズムを用いることにより、透過・内部全反射を組み合わせたデジタルホログラフィック顕微鏡を実現し、屈折率・形状計測をおこなう。しかし、この手法も複数の干渉計と特殊な光学素子を必要とする複雑な光学系が必要となる。それに対して、デジタルホログラフィの光源に時間的低コヒーレンス光を用いた計測手法である、低コヒーレンスデジタルホログラフィが提案されている^{40,42)}。この技術はホログラフィの参照光側のミラー（参照ミラー）を走査し記録したホログラムから被計測物体の再生像を取得する。時間的低コヒーレンスデジタルホログラフィを応用し、反射物体である試料の形状⁶⁶⁾、形状・反射特性同時計測⁶⁷⁾が提案されている。これらの手法は再生像の振幅分布から計測をおこない、デジタルホログラフィとOCTを巧みに組み合わせた技術であると解釈できる。参照ミラーの走査を用いた時間的低コヒーレンスデジタルホログラフィの再生像振幅から計測をおこなうことで、位相接続を必要とせず、その計測の分解能は参照ミラーの走査間隔によって定まるという特長がある。また、計測のダイナミックレンジも参照ミラーの走査範囲で定まるため、広いという長所がある。

本研究ではこの時間的低コヒーレンスデジタルホログラフィを用いた屈折率分布・厚さ分布の同時計測手法を提案する。提案手法は非接触・非破壊・非侵襲な計測手法であり、デジタルホログラフィの長所を活かし屈折率と厚さの2次元分布を単一の干渉計により同時計測できる手法である。具体的には仮想基準面の導入が被計測物体の光学的厚さのみでなく、物理的な厚さの計測も可能にしている。したがって、単一の干渉計を用いて被計測物体の屈折率の計測も実現できる。

1.2.2 空間的インコヒーレントフーリエデジタルホログラフィの現状と課題

デジタルホログラムの記録に空間的インコヒーレント光による照明の利用を可能にする空間的インコヒーレントデジタルホログラフィが研究されている^{31,53,68-70)}。

中でも、空間的インコヒーレントフーリエデジタルホログラフィは近年盛んに研

究されている^{71-73,75-77}。フーリエホログラムはフレネルホログラム^{31,53,68-70}やその他の種類のホログラムと比べて空間-帯域幅積を最も有効に利用できる⁷⁸。また、空間周波数領域においてホログラムを記録するため、ホログラムの扱いが比較的容易、物体からの信号がホログラム全面に広がるため、情報の欠落に強いという長所がある⁷¹。そこで、Kelnerらは空間的インコヒーレント照明によるデジタルフーリエホログラムの記録手法を提案している^{71,72}。これらの手法は回折光学素子を実現するための偏光感受性位相型 Spatial Light Modulator (SLM) を用いて実現することができる。Wanらは三角干渉計⁷⁴を用いて空間的インコヒーレント光に照明された物体の色情報をもつホログラムの記録・再生手法を提案している⁷³。Naikらは空間的インコヒーレントホログラムの生成を複素コヒーレンス関数として捉えてインコヒーレントホログラムを取得する手法を提案している⁷⁵。この手法ではポッケルスセルが空間コヒーレンス関数の回復と定量化のための干渉場の位相シフトに用いられている。一方、干渉を用いずインコヒーレント物体のホログラムを取得する手法が提案されている⁷⁶。この手法はインテグラルイメージングという技術を導入することにより、インコヒーレント照明下において単一露光により取得した画像から、計算処理を加えることにより、デジタルフーリエホログラムを取得できる手法である。

本研究では回転シアリング干渉計を用いた空間的インコヒーレントフーリエホログラム記録法を提案する。回転シアリング干渉計⁷⁹⁻⁸²は簡易な光学系であるという長所があり、パターンマッチング⁸⁰や物体の立体情報の取得⁸³、無限の被写界深度をもつ広視野顕微鏡⁸⁴、フーリエ分光法^{85,86}、デジタルホログラフィック分光法^{87,88}、などにも用いられている。Marksらによって提案された手法⁸³では物体の回転によるトモグラフィを組み合わせた回転シアリング干渉計により立体情報の記録を実現している。Teeranutrannotらの手法⁸⁷は物体の x , y 方向への走査によるトモグラフィとの組み合わせにより立体情報の記録を実現している。回転シアリング干渉計の基本構成はマイケルソン干渉計であり、マイケルソン干渉計の2つのミラーの代わりにそれぞれ直角プリズムが用いられる。2つに分波された光波は自己干渉し、インコヒーレント物体の余弦変換の形の干渉縞を与える⁸⁰⁻⁸²。提案する偏光2チャンネル回転シアリング干渉計では回転シアリング干渉計と波長板の巧みな組み合わせにより、インコヒーレントフーリエホログラムの記録を可能にする。なぜなら、2つの直交する偏光を用いてインコヒーレント物体の余弦・正弦変換の両方の形の干渉縞が得られるからである。この点において提案システムは従来のもの^{80,81}とは異なり、2重像の問題を解決することができる。得られたフーリエ変換ホログラムを逆フーリエ変換を用いて再生することにより、インコヒーレント物体の振幅・位相分布を定量的に取得できる。そのため、形状計測や蛍光顕微鏡など光計測への応用にも有用であると考えられ

る。また、提案システムは SLM やピエゾアクチュエータのような機械的な位相シフトデバイスを用いない簡易な光学系により実現でき、インコヒーレント正弦変換ホログラムの記録にロバストであると考えられる。

1.2.3 自己干渉を利用した空間的インコヒーレントホログラフィの課題

提案手法で用いる回転シアリング干渉計を含めた多くのインコヒーレントホログラフィはインコヒーレント物体が複数の点光源によって構成され、そのそれぞれが自己空間コヒーレントであるという特性を利用してホログラムの記録を可能にしている。ホログラフィにインコヒーレント照明を用いることの可能性は多くの応用において魅力的であるにもかかわらず、その再生画像は非常に大きな直流光成分を含み、インコヒーレントホログラフィの実用性を制限している⁸⁹⁾。この問題はインコヒーレントホログラフィにおいて記録されるホログラムは個々の物体上の点から成る干渉縞の重ね合わせであることに由来する。コヒーレントなホログラフィでは物体上のそれぞれの点からの光が参照光の全てと干渉するのに対して、インコヒーレントホログラフィではそれぞれの干渉縞はインコヒーレント物体上の2つの極めて小さな部分の自己干渉によって形成される。よって、記録されたインコヒーレントホログラムは干渉縞の空間的な変動に対して比較的大きなバイアスレベルを含み、少数の点によって構成されるようなインコヒーレント物体にのみ適用可能、もしくは再生像品質が低下するという問題がある⁹⁰⁾。

この問題を解消するための手法が提案されている^{90,91)}。Kozma らは大きなバイアスを取り除くために干渉計の片側のミラーを時間的に振動させ、多くの点からなる物体や連続的な強度変化をもつインコヒーレント物体に適用するためのインコヒーレントホログラフィを提案した⁹⁰⁾。ホログラムの強度の空間的に変動する部分は時間的に変調される一方、バイアスは変調されないことを利用している。Bryngdahl らは1次元ホログラフィを提案している⁹¹⁾。この手法はインコヒーレントホログラムを形成するインコヒーレント物体上の点の数を制限することにより解決を図っている。円筒レンズと球面レンズを組み合わせたレンズシステムを用いて1方向にのみホログラフィックなフーリエ変換をおこない、ホログラムを形成するインコヒーレント物体上の点の数を減らしている。一方、近年ではこの問題を避けるために位相シフトインコヒーレントデジタルホログラフィや off-axis インコヒーレントデジタルホログラフィが提案されている。Rosen らの手法は SLM に表示された回折光学素子を用いて位相シフト法を実現し、インコヒーレントフレネルデジタルホログラムの記録を可能にしている^{47,53)}。Kim によって提案された手法は平面ミラーと曲面ミラーを用いて

インコヒーレントフレネルディジタルホログラムを記録し、ピエゾアクチュエータを用いた平面ミラーの走査によって位相シフト法を実現している⁴⁴⁾。また、傾けた平面ミラーと曲面ミラーを用いたインコヒーレントホログラムの単一露光記録も提案されている⁶⁸⁾。この手法は一般的な off-axis ホログラフィとして、記録ホログラムを用いてフーリエ領域において適した空間周波数フィルタリングをおこなうことにより複素ホログラムを得ることができる。しかし、有効な空間帯域幅は限られてしまう。Wanらは傾けたミラーを用いた三角干渉計によりインコヒーレント off-axis フーリエディジタルホログラフィを提案している⁷³⁾。この手法は off-axis 光学系によって 0 次光と 2 重像の障害なしのカラー像の再生に有用である。また、Kelnerらは空間的インコヒーレントシングルチャネルフーリエディジタルホログラフィを提案している^{71,72)}。この手法は SLM を用いて位相シフト法を実現でき、直流光成分と 2 重像のない再生像を得ることができる。

本研究では偏光 2 チャネル回転シアリング干渉計を用いた空間的インコヒーレントフーリエディジタルホログラフィの再生画像に含まれてしまう極めて大きな直流光成分と、それゆえに少数の点により構成されるインコヒーレント物体にのみ適用可能という問題を解消する新たな手法を提案する。この手法は新たに波長板を導入した位相シフト偏光 2 チャネル回転シアリング干渉計を用いる。回転シアリング干渉計の片側の光路に導入した 2 種類の波長板によって、直流光成分と 2 重像の両方を取り除くための 4 種類のホログラムを記録でき、そこからフーリエホログラムを取得することができる。この点において偏光 2 チャネル回転シアリング干渉計を用いたシステムを発展させたものである。提案手法は直流光成分の問題を解消し、少数の点により構成されるインコヒーレント物体にのみ適用可能という問題、もしくは再生像品質の低下を防ぐことができるため、蛍光顕微鏡など光計測への応用をより現実的なものにすると考えられる。提案手法は 2 つの直交する偏光において回転シアリング干渉計を用いた位相シフトインコヒーレントディジタルホログラフィを実現する。この位相シフト法は偏光 90° 位相シフト法^{92,93)}を回転シアリング干渉計を用いたインコヒーレントフーリエディジタルホログラフィに適用するために発展させたものである。提案システムは波長板を回転させる必要はあるものの、SLM を用いる必要がないという光学系の簡易さは保持しており、インコヒーレントフーリエディジタルホログラムと直流光成分・2 重像を除去した再生像の取得を実現できる。

1.3 本論文の構成

本論文の構成と内容を記す。

第 1 章 序論

第 2 章では初めに時間的低コヒーレンスデジタルホログラフィを用いた屈折率分布・厚さ分布の同時計測原理について述べる。次に，厚さが空間的に異なる被計測物体を用いた屈折率分布・厚さ分布の同時計測実験の結果について述べる。

第 3 章では初めに偏光 2 チャネル回転シアリング干渉計を用いた空間的インコヒーレントフーリエデジタルホログラフィの原理について述べる。次に，偏光 2 チャネル回転シアリング干渉計を用いておこなったインコヒーレントフーリエデジタルホログラムの記録・再生実験とその結果について述べる。

第 4 章では初めにバイアスレベル低減のための位相シフト偏光 2 チャネル回転シアリング干渉計を用いた空間的インコヒーレントフーリエデジタルホログラフィの原理について述べる。次に，位相シフト偏光 2 チャネル回転シアリング干渉計を用いておこなったインコヒーレントフーリエデジタルホログラムの記録・再生実験とその結果について述べ，第 3 章で提案した手法の再生結果と比較し，本手法の有用性を示す。

最後に，第 5 章で本論文の総括を述べる。

第2章 時間的低コヒーレンスデジタルホログラフィを用いた屈折率分布・厚さ分布の同時計測

2.1 緒言

本章では、初めに時間的低コヒーレンスデジタルホログラフィを用いた屈折率分布・厚さ分布の同時計測原理について述べる。時間的低コヒーレンスデジタルホログラフィを用いて、参照ミラーを走査し記録したデジタルホログラムの数値再生像から物体光と参照光の光路差 0 位置を取得する原理について述べる。次に、低コヒーレンスデジタルホログラフィを用いた 2 次元屈折率分布・厚さ分布の同時計測原理を提案する⁹⁴⁾。次に、単一の干渉計による厚さ分布計測のための信号処理法について述べる。その後、時間的低コヒーレンスデジタルホログラフィを用いた屈折率分布・厚さ分布の同時計測実験の結果について述べる。一様な厚さをもつ物体の屈折率分布・厚さ分布の同時計測実験の結果について述べる。さらに、厚さが空間的に異なる物体の屈折率分布・厚さ分布の同時計測実験の結果について述べ、提案手法の有用性を示す。

2.2 時間的低コヒーレンスデジタルホログラフィを用いた屈折率分布・厚さ分布の同時計測原理

2.2.1 時間的低コヒーレンスデジタルホログラフィを用いた光路差 0 位置取得法

Fig. 2.1 に示すようなマイケルソン型干渉計を用いる。撮像素子面 (X, Y) における物体光と参照光の複素振幅分布をそれぞれ、 $U_o(X, Y)$, $U_r(X, Y)$ とする。記録するホログラム、すなわち、干渉場の強度分布 $I(X, Y)$ は

$$\begin{aligned} I(X, Y) &= \langle \{U_o(X, Y) + U_r(X, Y)\} \cdot \{U_o^*(X, Y) + U_r^*(X, Y)\} \rangle \\ &= \langle |U_o(X, Y)|^2 + |U_r(X, Y)|^2 + 2\text{Re}[U_o(X, Y) \cdot U_r^*(X, Y)] \rangle \end{aligned} \quad (2.1)$$

とあらわされる。ここで、 $\langle \cdot \rangle$, $*$, $\text{Re}[\cdot]$ はそれぞれ、時間平均、複素共役、実部をあらわす演算子である。時間平均演算子 $\langle \cdot \rangle$ は時間的に変化する関数 f に対して

$$\langle f \rangle = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt \quad (2.2)$$

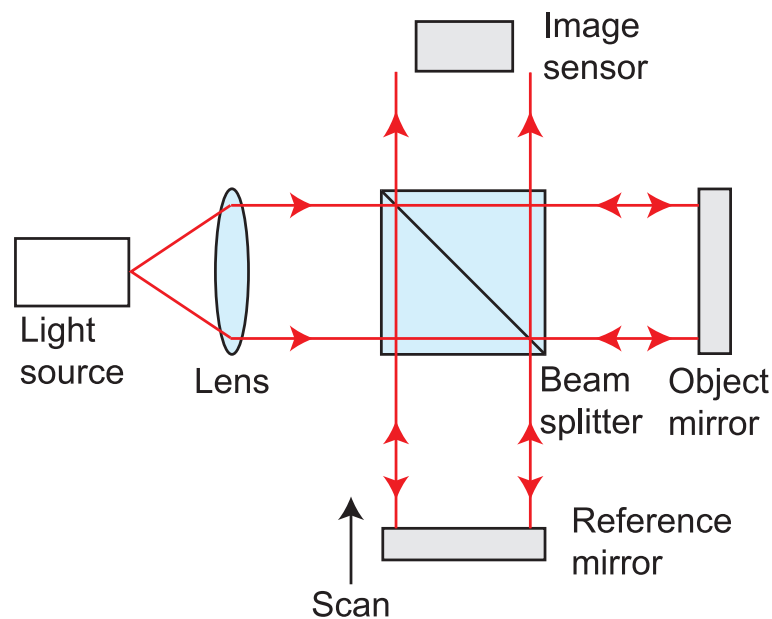


Fig. 2.1 時間的低コヒーレンスデジタルホログラフィの光学系

を演算する。簡単化のため、いかなる時刻を原点としても時間平均の値には影響しないものとし、光波は同じ偏光特性をもつものとする、(2.1) 式は

$$I(X, Y) = \langle |U_o(X, Y)|^2 \rangle + \langle |U_r(X, Y)|^2 \rangle + 2\text{Re}[\langle U_o(X, Y) \cdot U_r^*(X, Y) \rangle] \quad (2.3)$$

と書き換えられる。

ここで、物体光と参照光がそれぞれの光路を伝搬する時間を t_o , $t_o + \tau$ とあらわす。物体光・参照光の光路と伝搬する時間の概念図を Fig. 2.2 に示す。この物体光と参照光が伝搬する時間差 τ を用いると (2.3) 式は

$$I(X, Y) = \langle |U_o(X, Y)|^2 \rangle + \langle |U_r(X, Y)|^2 \rangle + 2\text{Re}[\Gamma_{or}(\tau)] \quad (2.4)$$

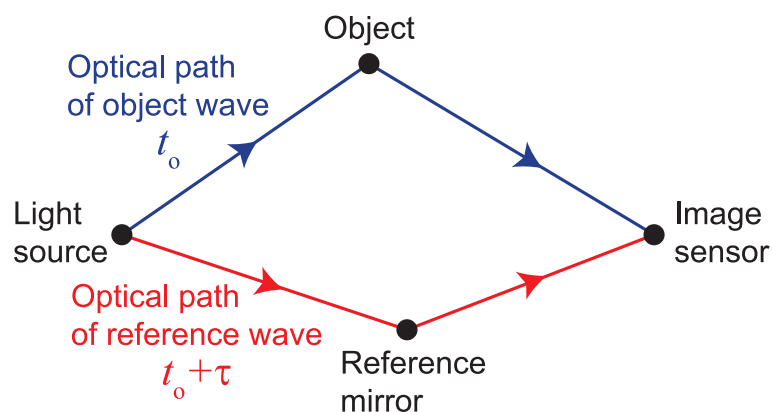


Fig. 2.2 物体光・参照光の光路と伝搬する時間の概念図

2.2 低コヒーレンスデジタルホログラフィを用いた屈折率・厚さ分布同時計測原理

とあらわされる。ここで、

$$\Gamma_{or}(\tau) = \langle U_o(t_o)U_r^*(t_o + \tau) \rangle \quad (2.5)$$

である。 $\Gamma_{or}(\tau)$ は2つの光波 $U_o(X, Y)$, $U_r(X, Y)$ の相関関数であり、相互コヒーレンス関数と呼ばれる。また、

$$\Gamma_{oo}(\tau) = \langle U_o(t_o)U_o^*(t_o + \tau) \rangle \quad (2.6)$$

は自己相関関数または、自己コヒーレンス関数と呼ばれ、この自己コヒーレンス関数 $\Gamma_{oo}(0)$, $\Gamma_{rr}(0)$ を用いて (2.5) 式の相互コヒーレンス関数 $\Gamma_{or}(\tau)$ を規格化すると、規格化相互コヒーレンス関数 $\gamma(\tau)$ は

$$\gamma(\tau) = \frac{\Gamma_{or}(\tau)}{\sqrt{\Gamma_{oo}(0)\Gamma_{rr}(0)}} \quad (2.7)$$

と定義される⁹⁵⁾。この規格化相互コヒーレンス関数 $\gamma(\tau)$ は複素コヒーレンス度と呼ばれる。この複素コヒーレンス度 $\gamma(\tau)$ を用いると (2.4) 式は

$$I(X, Y) = \langle |U_o(X, Y)|^2 \rangle + \langle |U_r(X, Y)|^2 \rangle + 2\sqrt{\langle |U_o(X, Y)|^2 \rangle \langle |U_r^*(X, Y)|^2 \rangle} \text{Re}[\gamma(\tau)] \quad (2.8)$$

と与えられる。ここで、 τ は物体光と参照光が伝搬する時間差であるので、複素コヒーレンス度 $\gamma(\tau)$ は光速 c を用いて $\gamma(\Delta l/c)$ とあらわされる。ここで、 Δl は物体光と参照光の光路差である。

Fig. 2.1 に示すように参照ミラーを光軸に沿って撮像素子面方向に $\frac{1}{2}\Delta z$ ずつ走査し、その都度、ホログラムを記録する。記録する M 枚のデジタルホログラムを以降、ホログラム群と呼ぶ。参照光の光路長は参照ミラーの走査によってホログラムごとに Δz ずつ異なる。そのため、記録するホログラムはそれぞれ異なる光路差 $\Delta l_m = l_o - l_m$ ($m = 0, 1, \dots, M$) をもつ。ここで、 l_o は物体光の光路長、 l_m は m 番目の参照光の光路長をあらわし、光路差 Δl_m の間隔は Δz である。ホログラム群 $I_m(X, Y)$ は

$$I_m(X, Y) = \langle |U_o(X, Y)|^2 \rangle + \langle |U_r(X, Y)|^2 \rangle + 2\sqrt{\langle |U_o(X, Y)|^2 \rangle \langle |U_r^*(X, Y)|^2 \rangle} \text{Re}[\gamma(\Delta l_m/c)] \quad (2.9)$$

と与えられる。このホログラム群 $I_m(X, Y)$ から数値回折積分を計算し、再生することにより、物体面 (x, y) における複素振幅分布群 $\tilde{U}_m(x, y)$ を得る。再生された物体面における複素振幅分布群の振幅分布を再生画像群と呼ぶ。Fig. 2.1 の光学系を用いて記録したホログラム群から取得した再生画像群の概念図を Fig. 2.3 に示す。(2.9) 式の第3項は複素コヒーレンス度の実部 $\text{Re}[\gamma(\Delta l_m/c)]$ が掛けられ、 $\Delta l_m = 0$ 付近におけるホログラムでのみ、干渉縞の交流成分として記録される。そのため、再生された物体光

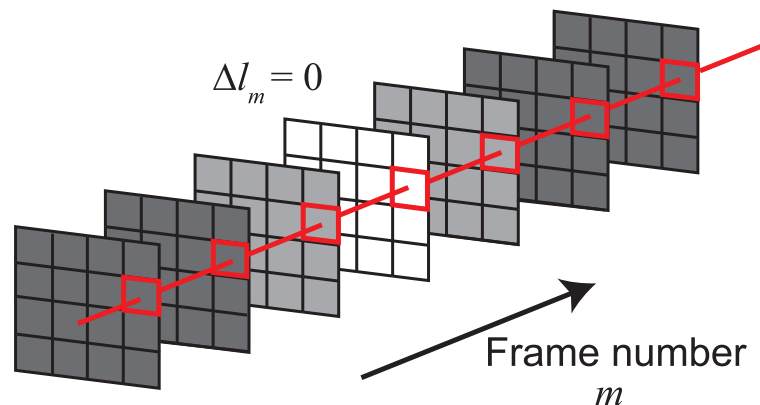


Fig. 2.3 時間的低コヒーレンスデジタルホログラフィによりミラーを再生したときの再生画像群の概念図

$\tilde{U}_o(x, y)$ においても $\text{Re}[\gamma(\Delta l_m/c)]$ が掛けられ, Fig. 2.3 に示すような $\Delta l_m = 0$ 付近の再生画像でのみ, 物体光が再生される. また, Wiener-Khinchine の定理⁹⁶⁾ より, 複素コヒーレンス度 $\gamma(\Delta l_m/c)$ は光源のパワースペクトルの逆フーリエ変換である. よって, 光源にガウス分布のパワースペクトルをもつ時間的低コヒーレンス光源を用いると, 複素コヒーレンス度 $\gamma(\Delta l_m/c)$ もガウス分布となり, 光路差 0 位置において最大値をもつ. したがって, 再生される物体光の振幅 $|\tilde{U}_o(x, y)|$ は光路差に対してガウス分布をもつ. よって, Fig. 2.3 に示すような再生画像群の再生像があらわれる画素に着目し, 横軸を参照ミラーの走査距離, 縦軸を振幅とすると Fig. 2.4 に示すようなプロファイルが得られる. 再生像振幅 $|\tilde{U}_o(x, y)|$ は物体光と参照光の光路長が等しい ($l_o = l_m$) とき, すなわち光路差が $\Delta l_m = 0$ となるときに最大値をもつ. 記録したホログラム群より Fig. 2.4 のような振幅プロファイルを取得し, 最大値をもつときの参照ミラーの走査距離より, 物体光と参照光の光路差 0 位置を取得する. この特徴を活かした屈折率

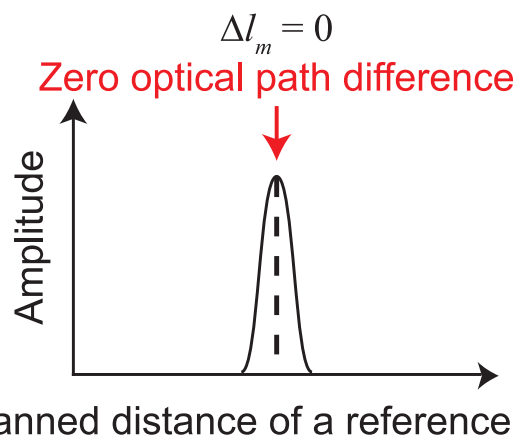


Fig. 2.4 再生像があらわれる画素に着目して取得した振幅プロファイル

分布・厚さ分布同時計測原理を次項で述べる。

2.2.2 2次元屈折率分布・厚さ分布の同時計測原理

Fig. 2.1 の物体ミラーを透過物体である試料と基準となる面に置き換えることを考える。以降、この基準となる面を基準面と呼ぶ。試料のみを配置した場合には、屈折率と厚さの積であらわされる試料の光学的厚さのみが計測される。そのため、屈折率分布と厚さ分布を独立に計測することはできない。そこで、試料による位相遅延の影響を受けない、基準面の導入を提案する。基準面は単一の干渉計を用いて試料の屈折率分布と厚さ分布の同時計測を可能にする。

試料と基準面は Fig. 2.5 に示すように部分的に重ねて配置する。試料は部分的に平行平板の物体を想定する。以降、光波が先に入射する面を表面とする。Fig. 2.5 の n , d , r_d , a はそれぞれ、試料の屈折率、厚さ、試料表面と基準面の物理的距離、試料裏面と基準面の空隙の厚さである。ここで、試料の厚さ d 、試料表面と基準面の距離 r_d 、空隙の厚さ a は Fig. 2.5 に示すように試料の面内位置により異なるものである。試料の屈折率 n は試料の面内位置の関数であり、試料表面に垂直な方向に対しては一様であるとする。言い換えると、提案手法では光軸方向には平均の屈折率が得られる。

参照ミラーを撮像素子面方向に走査する場合を例に説明する。ホログラム群を記録した後、再生画像群を取得する。Fig. 2.5 のように被計測物体を配置すると、物体面において Fig. 2.5 の左側のような基準面と試料が重なる領域と Fig. 2.5 の右側のような基準面だけの領域が存在する。そのため、再生画像群においても、基準面と試料が重なって再生される画素と基準面のみが再生される画素が存在する。前項において述べたように再生像振幅プロファイルを得ると、Fig. 2.6 のようなプロファイルが得られる。Fig. 2.6(a) は基準面と試料が重なって再生される画素に着目して得られる振幅プロファイルであり、Fig. 2.6(b) は基準面のみが再生される画素に着目して得られる振幅プロファイルである。Fig. 2.5 のように試料と基準面を配置すると、物体光は試料を透過し基準面で反射した光、空气中を伝搬し基準面で反射した光、試料裏面で反射し

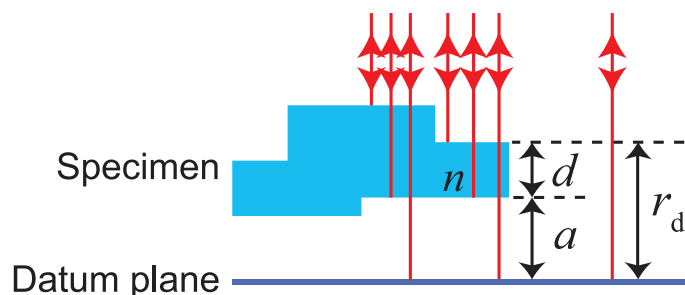


Fig. 2.5 試料と基準面の配置の概念図

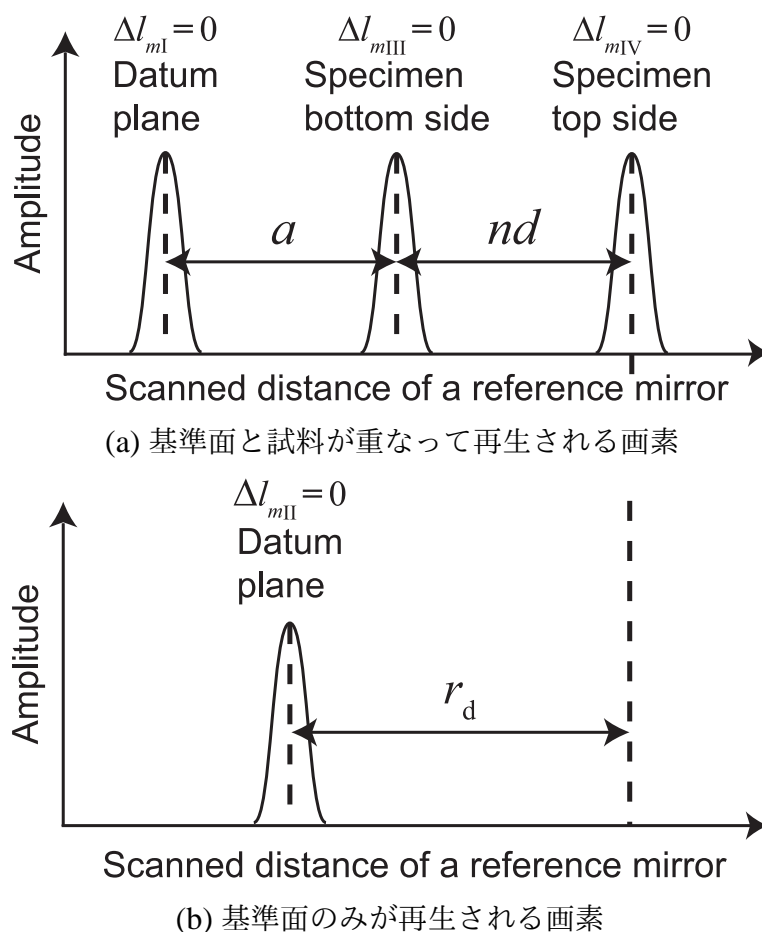


Fig. 2.6 再生像があらわれる画素に着目した振幅プロファイルの概念図

た光，試料表面で反射した光の4つの光路長の異なる光波からなる．そのため，4種の異なる光路差0位置 $\Delta l_{mI} = 0$, $\Delta l_{mII} = 0$, $\Delta l_{mIII} = 0$, $\Delta l_{mIV} = 0$ が存在する．4種の光路差と物体光との対応を Table 2.1 に示す．これら4つの物体光と参照光との光路差0位置の存在から，振幅プロファイル Fig. 2.6 は Fig. 2.5 中の各反射面に対応する4種のピークをもつ．Fig. 2.6(a) は基準面と試料の表裏面が再生される位置に対応した3つのピークをもち，Fig. 2.6(b) は基準面のみが再生される位置に対応した1つのピーク

Table 2.1 4種の光路差と物体光との対応

光路差	物体光
Δl_{mI}	試料を透過し基準面で反射した光
Δl_{mII}	空気中を伝搬し基準面で反射した光
Δl_{mIII}	試料裏面で反射した光
Δl_{mIV}	試料表面で反射した光

2.2 低コヒーレンスデジタルホログラフィを用いた屈折率・厚さ分布同時計測原理

クをもつ。Fig. 2.6(a)において、試料表裏面から得られるピークのピーク間距離が試料の光学的厚さ nd である。空气中においては光学的距離は物理的距離に等しいとみなすことができるため、試料裏面と基準面から得られるピークのピーク間距離が空隙の厚さ a である。Fig. 2.6(a)の試料表面と Fig. 2.6(b)の基準面から得られるピークのピーク間距離が試料表面と基準面の物理的距離 r_d である。

参照ミラーの走査間隔 $\frac{1}{2}\Delta z$ と2つの光路差 0 位置の間のデジタルホログラムの枚数から、試料表面と基準面の距離 r_d 、空隙の厚さ a 、試料の光学的厚さ nd という3つの変数を取得できる。Fig. 2.5より試料の物理的厚さ d は $d = r_d - a$ である。試料の厚さを計測するためには Fig. 2.7に示すような、試料が再生される画素における試料表面と基準面の空气中における物理的距離 r が必要である。振幅プロファイルより取得した r_d を用いて物理的距離 r を算出する手法の詳細は次項において述べる。試料の屈折率 n は、測定した nd を算出した d で除算することにより計測する。試料が再生されるそれぞれの画素において同様の計算をおこなうことにより、試料の2次元屈折率分布・厚さ分布を同時計測できる。

2.2.3 単一の干渉計による厚さ分布計測のための信号処理法

試料背面の基準面を算出することは重要である。なぜなら、試料が配置されているために、 $\Delta l_{m1} = 0$ の位置は物理的な距離として基準面の正しい位置を与えず、光学的な距離として基準面の位置を与えるからである。

試料背面の基準面の空气中における物理的な位置とそれを用いた試料表面と基準面の物理的距離 r の算出のために、仮想的な基準面を考える。以降、この仮想的な基準面を仮想基準面と呼ぶ。仮想基準面を考えるために基準面の配置に着目した概念図を Fig. 2.7に示す。仮想基準面は試料が存在せず、試料の屈折率 n の影響を受けずに光波が空气中を伝搬したときの基準面と一致するものである。Fig. 2.7は試料表面と基準面が平行な off-axis 配置である。変数 r は試料が再生される画素における試料表面と基準面の物理的距離をあらわす。ただし、Fig. 2.7では省略しているが実際には空隙

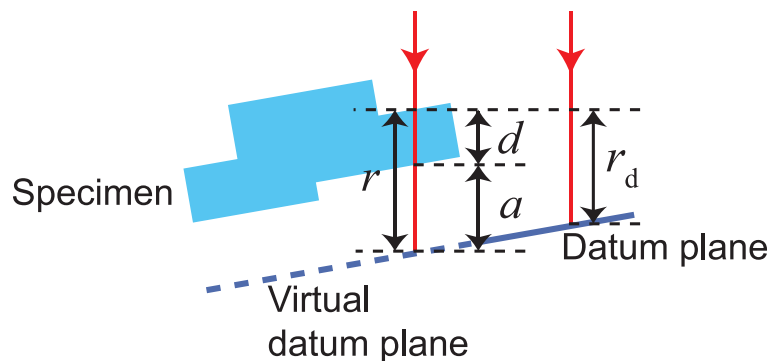


Fig. 2.7 基準面と仮想基準面

の厚さ a の取得のために、光学系において試料背面に基準面を配置する。off-axis 配置では試料が再生される画素における試料表面と基準面の物理的距離 r は、基準面のみが再生される画素における試料表面と基準面の物理的距離 r_d と一致せず ($r \neq r_d$)、厚さ d の計測に誤差が含まれてしまう。そのため、屈折率 n の計測にも誤差が含まれる。この問題を解決するために、仮想基準面の導入を提案する。

前項において述べたように基準面のみが再生される複数の画素を取得することはできる。その概念図を Fig. 2.7 に示す。Fig. 2.7 では簡単化のため1次元の場合が示されているが、実際には2次元の領域において振幅プロファイルを取得する。取得された基準面を Fig. 2.7 中に実線を用いて示す。この実線であらわされる基準面を延長することができれば、Fig. 2.7 に破線であらわされる仮想基準面を取得できる。仮想基準面の算出、すなわち、基準面の方程式の探索には基準面のみが再生される2次元の領域における、 $\Delta l_{mII} = 0$ の参照ミラーの走査距離に対する最小二乗法を用いることができる。この最小二乗法は平面の方程式をモデルとする。Fig. 2.7 に示すように、仮想基準面を用いて試料が再生される画素における試料表面と仮想基準面の物理的距離 r を取得できる。これにより、単一の光学系により屈折率分布・厚さ分布を計測できる。

なお、仮想基準面の概念は平面に限定されるものではないが、本研究では試料に部分的に平行平板の形状の物体を想定しているため、基準面として光学系に配置する物体は平板が適している。また、仮想基準面には平面の方程式をモデルとした最小二乗法を用いる。試料に部分的に平行平板でない形状の物体を想定した場合には、光学系に基準面として同様の表面形状をもつ物体を配置する必要がある、その際は平面の方程式ではなく光学系に配置した基準面の形状をモデルとした最小二乗法を用いることにより仮想基準面を取得できる。

屈折率分布・厚さ分布計測の面内分解能はデジタルホログラムを再生し取得した複素振幅分布の分解能と等しい。提案する計測システムではこの分解能はイメージセンサの画素サイズと同じである。それに対して、鉛直方向の分解能は参照ミラーの走査間隔と光源のコヒーレンス長^{97,98)}に依存する。次節で述べる実験では、Fig. 2.6 に示すような振幅プロファイルは低いコヒーレンス度によってピークをもつため、ピークを容易に得ることができる。そのため、この分解能は走査間隔によって定まる。

2.3 時間的低コヒーレンスデジタルホログラフィを用いた屈折率分布・厚さ分布の同時計測実験

2.3.1 一様な厚さをもつ物体の屈折率分布・厚さ分布の同時計測実験

提案手法の有用性を示すために屈折率分布・厚さ分布同時計測実験をおこなった。

2.3 低コヒーレンスデジタルホログラフィを用いた屈折率・厚さ分布同時計測実験

実験光学系を Fig. 2.8 に示す。試料には厚さ 0.8~1.0 mm、波長 685.2 nm において群屈折率 1.538 で一様であるスライドガラスを用いた。ただし、厚さは仕様書の値である。群屈折率は公表データ⁹⁹⁾に基づく計算値であり、これを理論値としている。提案手法では時間的低コヒーレンス光源が用いられるため、屈折率は群屈折率として計測される。理論値の算出過程の詳細は付録において述べる。基準面には面精度 $\lambda/20$ ($\lambda = 632.8$ nm) の平板であるオプティカルフラットを用いた。試料と基準面は Fig. 2.8 に示すように部分的に重ねて配置した。光源には時間的低コヒーレンス光源である SLD を用いた。SLD のパワースペクトルはガウス分布とみなせるものであり、中心波長 685.2 nm、半値全幅 8.3 nm、コヒーレンス長^{97,98)}は $50 \mu\text{m}$ であった。撮像素子には画素数 1024×768 、画素サイズ $4.65 \mu\text{m} \times 4.65 \mu\text{m}$ の CCD カメラを用いた。CCD カメラと試料・基準面間の距離は 360 mm とした。

SLD から出射した光波を平行光にした後、ビームスプリッタにより物体光と参照光に分波した。試料、基準面から反射した光波と参照光をビームスプリッタにより合波し、CCD カメラに入射させた。その際、参照光と物体光に角度をつけ、off-axis 光学系とした。CCD カメラから最も遠い位置を基準位置 ($0 \mu\text{m}$) とし、基準位置から参照ミラーを $1.0 \mu\text{m}$ 間隔で $3520 \mu\text{m}$ に渡って走査し、ホログラム群を記録した。記録したホログラム群からコンピュータを用いて数値回折積分を計算することにより、再生画像群を取得した。得られた再生画像群から振幅プロファイルを取得した。基準面のみが再生される画素における振幅プロファイルがピークをもつときの参照ミラーの走

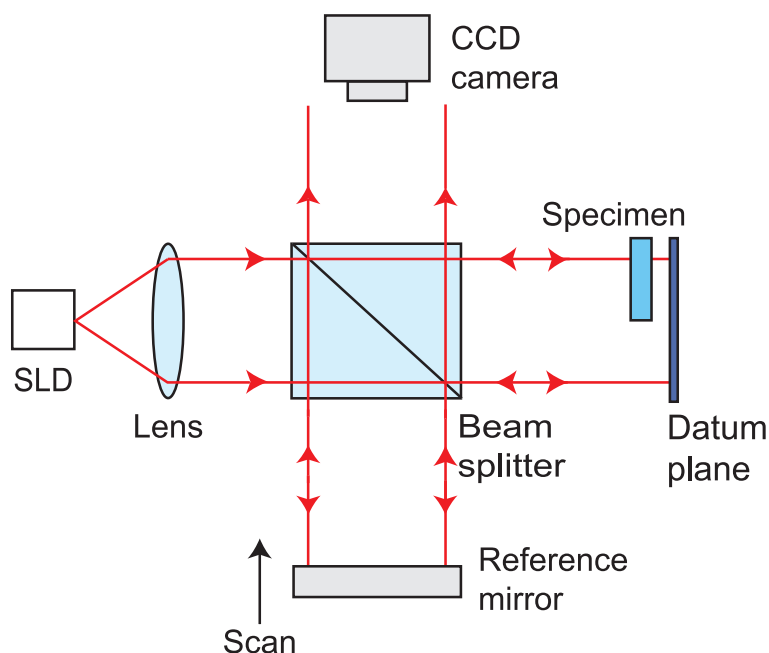


Fig. 2.8 屈折率分布・厚さ分布の同時計測実験に用いた実験光学系

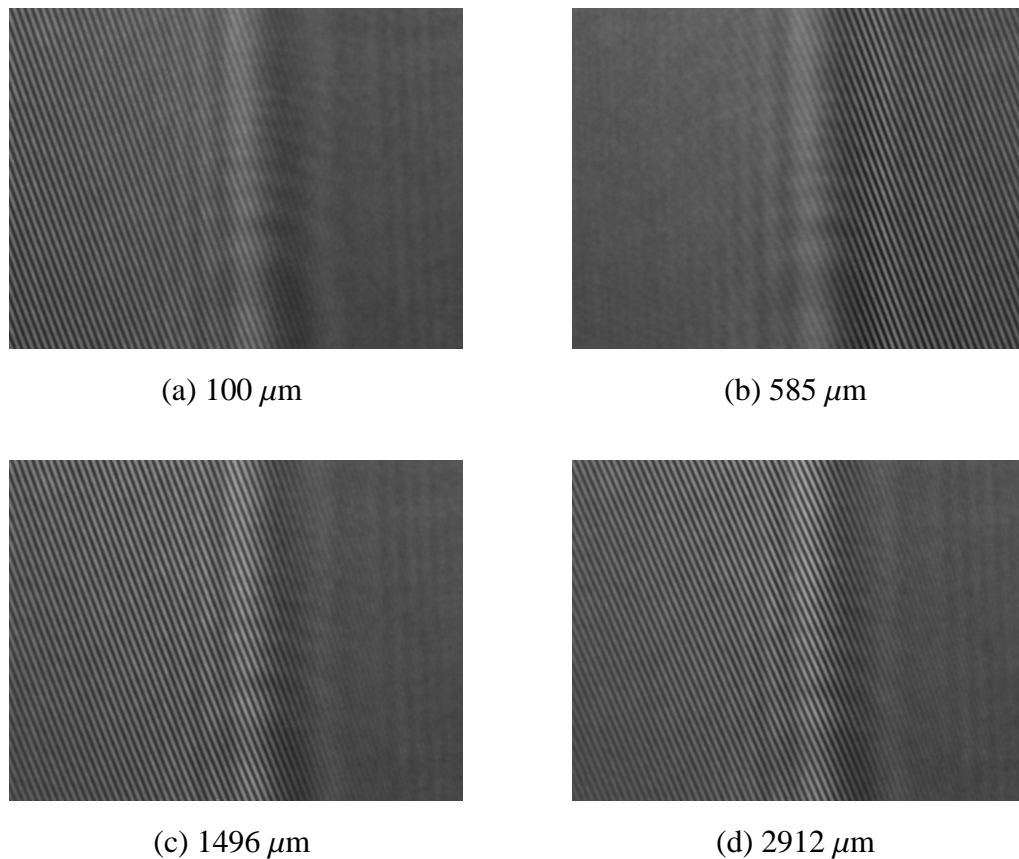


Fig. 2.9 記録したホログラム群の一例（数値は基準位置からの走査距離）

走査距離から，平面の方程式をモデルとした最小二乗法を用いて仮想基準面を算出した．算出した仮想基準面を用いて試料の屈折率分布と厚さ分布を計測した．

記録したホログラム群のうち，参照ミラーを基準位置から 100 μm , 585 μm , 1496 μm , 2912 μm 走査して得られたホログラムを Fig. 2.9 に示す．Fig. 2.9(a), (b), (c), (d) はそれぞれ，試料を透過し基準面で反射した光，空气中を透過し基準面で反射した光，試料裏面で反射した光，試料表面で反射した光と参照光との干渉を記録したものである．off-axis 光学系により斜めの干渉縞があらわれている．

取得した再生画像群の一例として Fig. 2.9 に示すホログラムを数値再生し，得られた再生画像を Fig. 2.10 に示す．全てのホログラムの再生距離を 360 mm とした．この距離は CCD カメラから試料の近い面までの距離である．再生のための数値回折積分には角スペクトル法¹⁰⁾を用いた．そのため，再生像の空間分解能はイメージセンサの分解能と等しい．すなわち，本実験では 4.65 μm × 4.65 μm である．Fig. 2.10(a), (b), (c), (d) においてそれぞれ，試料を透過し基準面で反射した光，空气中を透過し基準面で反射した光，試料裏面で反射した光，試料表面で反射した光が再生されている．試

2.3 低コヒーレンスデジタルホログラフィを用いた屈折率・厚さ分布同時計測実験

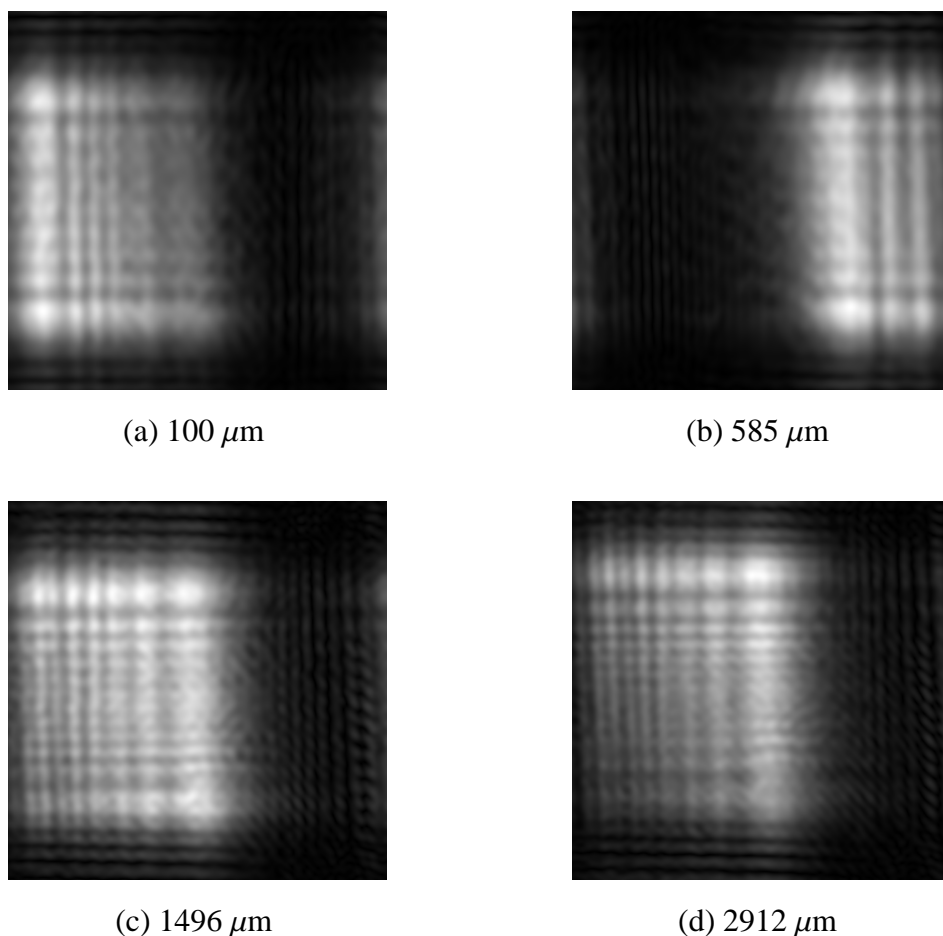


Fig. 2.10 ホログラム群を数値再生し取得した再生画像群の一例

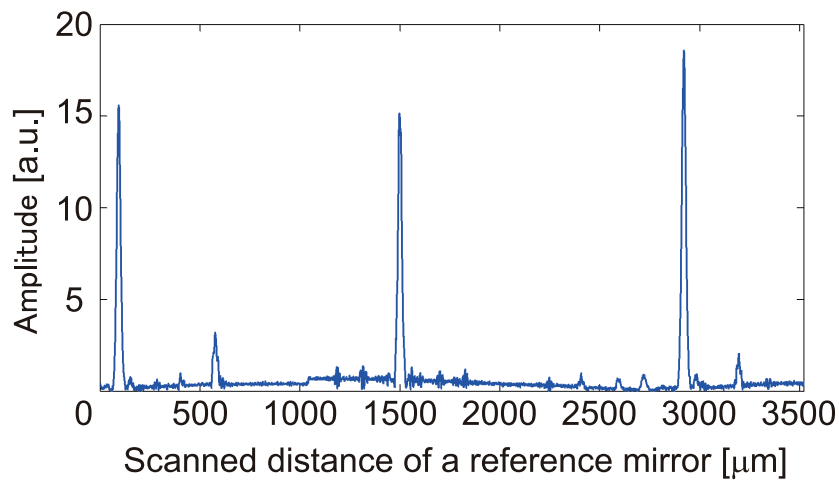
料と基準面は部分的に重ねて配置したため、試料と基準面が重なって再生される画素と基準面のみが再生される画素が存在することがわかる。

取得した振幅プロファイルの一例を Fig. 2.11 に示す。Fig. 2.11(a) は試料と基準面が重なって再生される画素であり、3 点のピークをもっている。それに対して、Fig. 2.11(b) は基準面のみが再生される画素であり、1 点のピークをもっている。

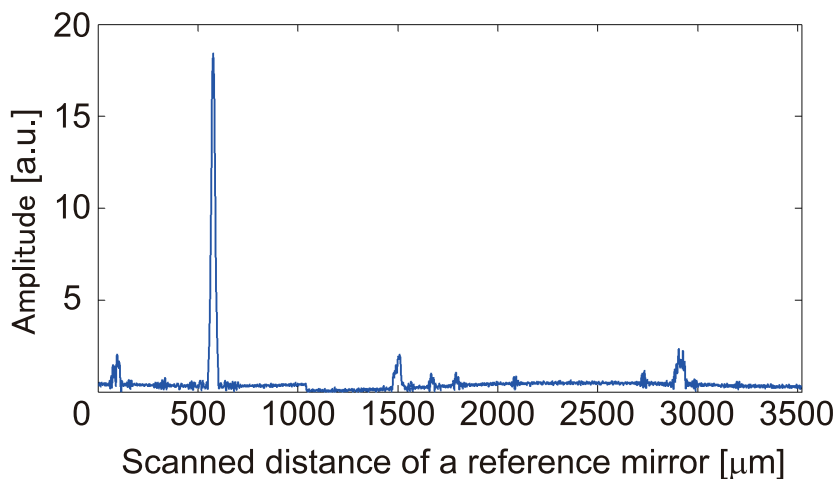
Fig. 2.11(b) のような、基準面のみが再生される複数の画素のピークをもつときの参照ミラーの走査距離の 3 次元プロットを Fig. 2.12 に示す。Fig. 2.12 に示した基準面のみが再生される複数の画素のピークをもつときの参照ミラーの走査距離より、最小二乗法を用いて仮想基準面を算出した。得られた仮想基準面の方程式は

$$\omega = -0.0215x + 0.00825y + 5.910 \times 10^2 \quad (2.10)$$

であった。ここで x , y はそれぞれ横方向、縦方向の画素位置、 ω は仮想基準面の位置、すなわち、参照ミラーの走査距離である。ただし、参照ミラーの走査距離の単位



(a) 画素位置 (200, 500)



(b) 画素位置 (900, 500)

Fig. 2.11 取得した振幅プロファイルの一例

は μm であり、 ω の原点は参照ミラー走査の基準位置と一致している。算出した仮想基準面の3次元プロットを Fig. 2.13 に示す。最小二乗法を用いて仮想基準面を算出する際の誤差の2乗和は画素数 191887 に対して、 $8.530 \times 10^{-22} \mu\text{m}^2$ であった。

試料の屈折率分布、厚さ分布計測結果を Fig. 2.14, Fig. 2.15 にそれぞれ示す。計測範囲は $1976.25 \mu\text{m} \times 2869.05 \mu\text{m}$ であり、空間分解能は $4.65 \mu\text{m} \times 4.65 \mu\text{m}$ である。計測した厚さ分布の平均値は $922.2 \mu\text{m}$ であり、仕様書の範囲内であった。また、標準偏差は $1.640 \mu\text{m}$ であった。計測した屈折率分布の平均値、標準偏差はそれぞれは 1.540, 1.570×10^{-3} であった。付録に示す理論値と比較すると屈折率分布計測結果の平均値は誤差 $1.300 \times 10^{-1}\%$ で近い値をとっていた。また、標準偏差は十分に小さな値であった。これらの結果から提案手法は試料の屈折率分布・厚さ分布を同時計測可

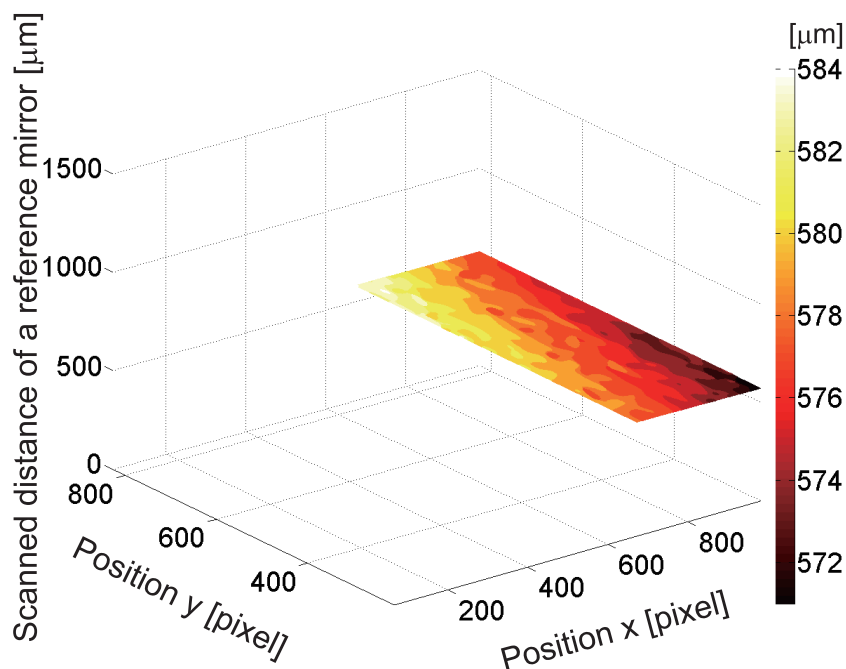


Fig. 2.12 基準面のみが再生される画素における $\Delta l_{mII} = 0$ の参照ミラーの走査距離

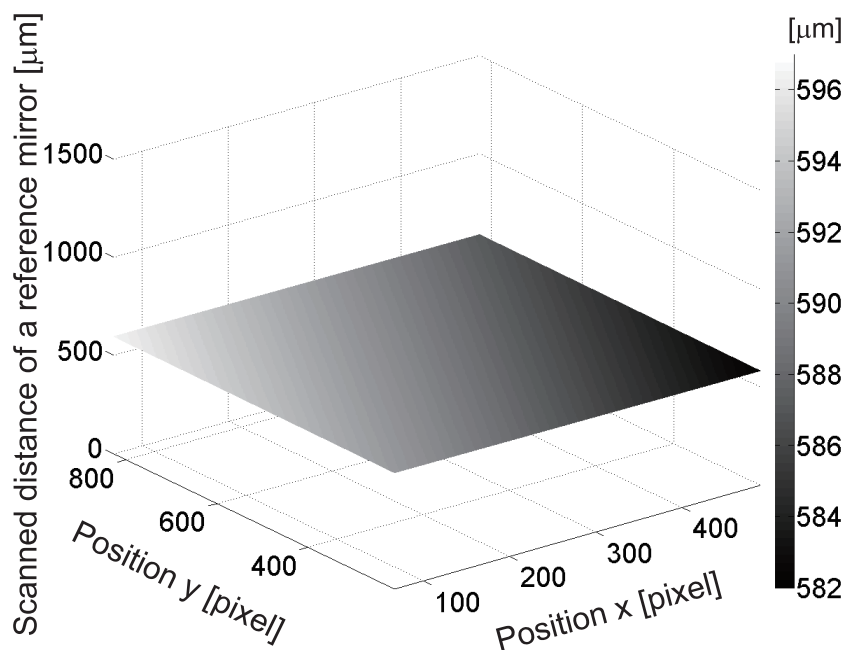


Fig. 2.13 算出した仮想基準面

能であるということを示した。

得られた実験結果を考察する。Fig. 2.11(a) のプロファイルは、Fig. 2.11(b) のピークと同じ走査距離付近において極大値をもったが、その値は他のピークと比べて小さかったため今回の計測結果には影響していない。この極大値は回折の影響により試料

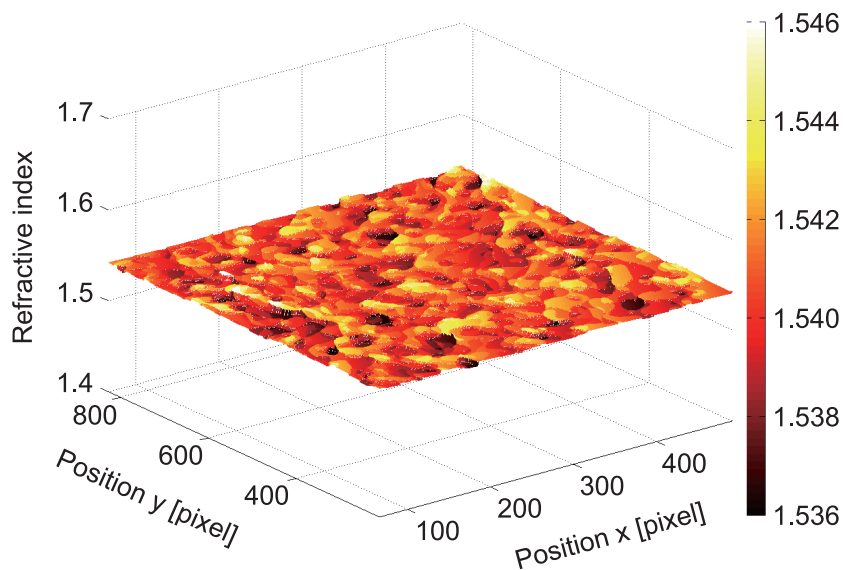


Fig. 2.14 一様な厚さをもつ物体の屈折率分布計測結果

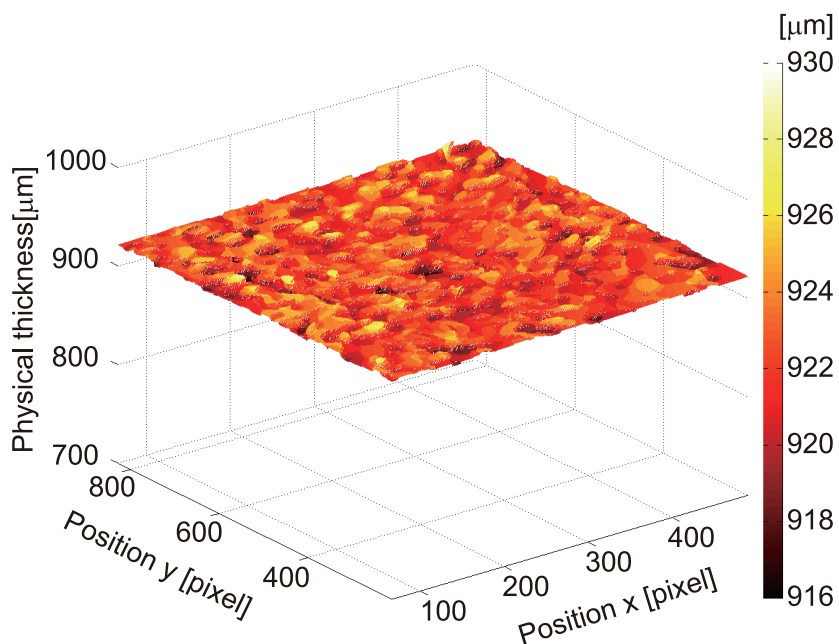


Fig. 2.15 一様な厚さをもつ物体の厚さ分布計測結果

と基準面の境界でリングが生じたことが原因であると考えられる。また、屈折率分布・厚さ分布同時計測結果の誤差の主因として、参照ミラーの離散的な走査であると考えられる。参照ミラーを光軸方向に走査し、振幅プロファイルにおいて離散的に振幅の値を取得することから、その走査間隔が広いほど最大値から得られる光路差 0 位置は真の光路差 0 位置と異なったものになるからである。その他の誤差の原因として、実験中の振動や撮像素子の暗電流などが考えられる。

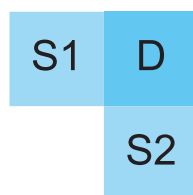


Fig. 2.16 部分的に重ねたスライドガラス 2 枚からなる試料

2.3.2 厚さが空間的に異なる物体の屈折率分布・厚さ分布の同時計測実験

厚さが空間的に異なる物体として、部分的に重ねたスライドガラス 2 枚からなる物体を用いて屈折率・厚さ分布同時計測実験をおこなった。実験に用いた試料の様子を Fig. 2.16 に示す。Fig. 2.16 に示すスライドガラス 1 枚の領域 S1, S2 と、スライドガラスを 2 枚重ねた領域 D を計測した。スライドガラスの端の部分はリングングの影響を避けるため、計測をおこなわなかった。D の領域の表面と S1 の領域の表面は同じスライドガラスの一部分、同じ面である。スライドガラス 1 枚の厚さの仕様、屈折率の理論値は前項において述べたものと同じである。基準面は試料の背面に配置されており、Fig. 2.16 の左下の部分は基準面として用いた。実験光学系、基準面、光源、撮像素子には前項において述べたものと同様のものを用いた。CCD カメラと試料・基準面間の距離は 301 mm とした。参照ミラーを $1.0\ \mu\text{m}$ 間隔で $5600\ \mu\text{m}$ に渡って走査し、ホログラム群を記録した。

記録したホログラム群のうちいくつかのホログラムを Fig. 2.17 に示す。それぞれ干渉縞が記録されていることがわかる。

Fig. 2.17 に示すホログラムを数値再生し、得られた再生画像を Fig. 2.18 に示す。全てのホログラムの再生距離を 301 mm とした。数値回折積分には角スペクトル法¹⁰⁾を用いた。Fig. 2.18 の再生画像では試料の対応する面のみが再生されていることがわかる。Fig. 2.18(c) と (d) では試料右上の 2 枚重ねの領域 D も再生されている。Fig. 2.18(c) では 2 枚重ねた領域の上側のガラスの裏面 (S1 のスライドガラスの裏面に等しい) の反射光が再生されたためである。Fig. 2.18(d) は S1 と D の表面が同一のスライドガラスであることを示している。

スライドガラス 1 枚の領域と基準面のみの領域において取得した振幅プロファイルの一例を Fig. 2.19 に示す。Fig. 2.19(a) は基準面と試料のスライドガラス 1 枚の領域 S1 の表裏面が再生される画素の振幅プロファイルである。Fig. 2.19(b) は基準面のみが再生される画素の振幅プロファイルである。Fig. 2.6 に示すような振幅プロファイルが得られている。

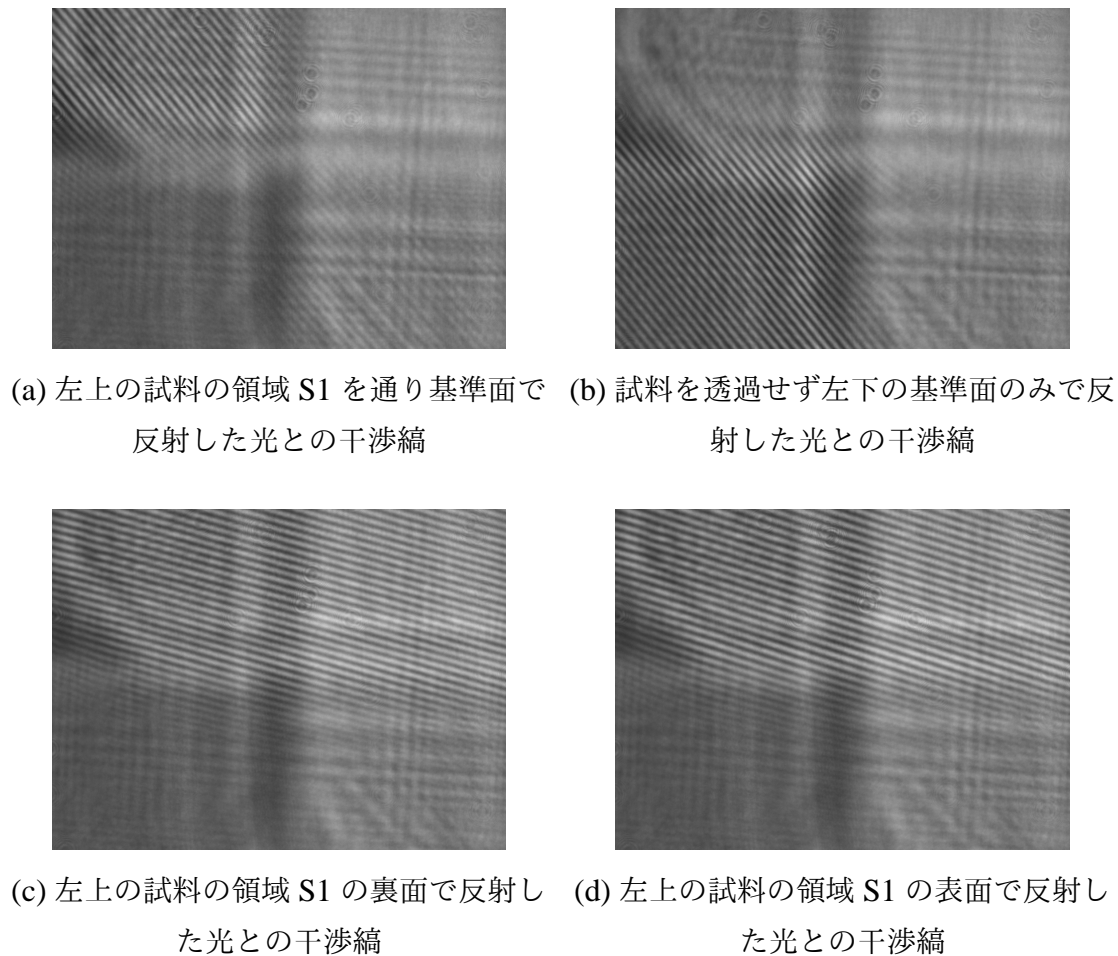


Fig. 2.17 記録したホログラム群の一例

Fig. 2.19(b) のような、基準面のみが再生される複数の画素のピークをもつときの参照ミラーの走査距離の 3 次元プロットを Fig. 2.20 に示す。Fig. 2.20 に示した基準面のみが再生される複数の画素のピークをもつときの参照ミラーの走査距離より、最小二乗法を用いて仮想基準面を算出した。仮想基準面の方程式は

$$\omega = 0.0187x - 0.0133y + 1.087 \times 10^3 \quad (2.11)$$

であった。ここで x , y はそれぞれ横方向、縦方向の画素位置、 ω は仮想基準面の位置、すなわち、参照ミラーの走査距離である。ただし、参照ミラーの走査距離の単位は μm である。算出した仮想基準面の 3 次元プロットを Fig. 2.21 に示す。最小二乗法を用いて仮想基準面を算出する際の誤差の 2 乗和は画素数 155305 に対して、 $7.716 \times 10^{-21} \mu\text{m}^2$ であった。

試料の屈折率分布計測結果を Fig. 2.22 に示す。計測した屈折率の平均値はスライドガラス 1 枚の領域 S1 で 1.544, S2 で 1.546, スライドガラス 2 枚重ねの領域 D で

2.3 低コヒーレンスデジタルホログラフィを用いた屈折率・厚さ分布同時計測実験

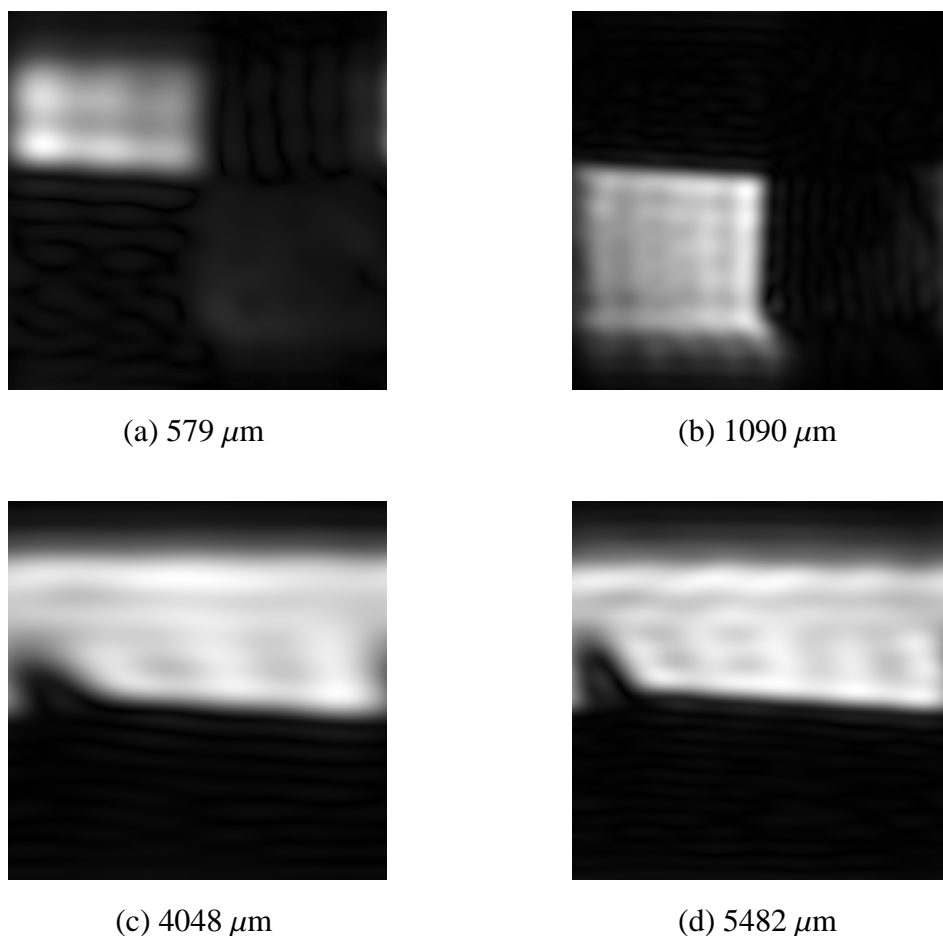
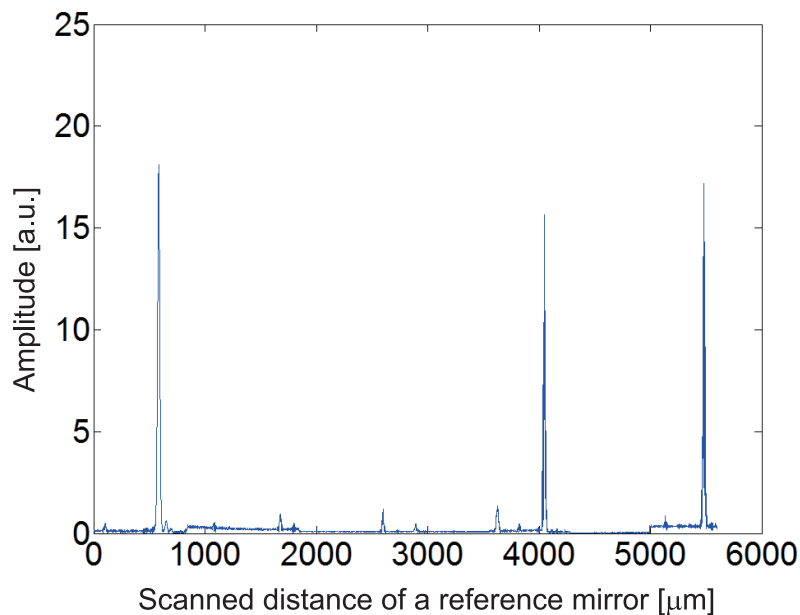


Fig. 2.18 Fig. 2.17 に示すホログラムから取得した再生画像

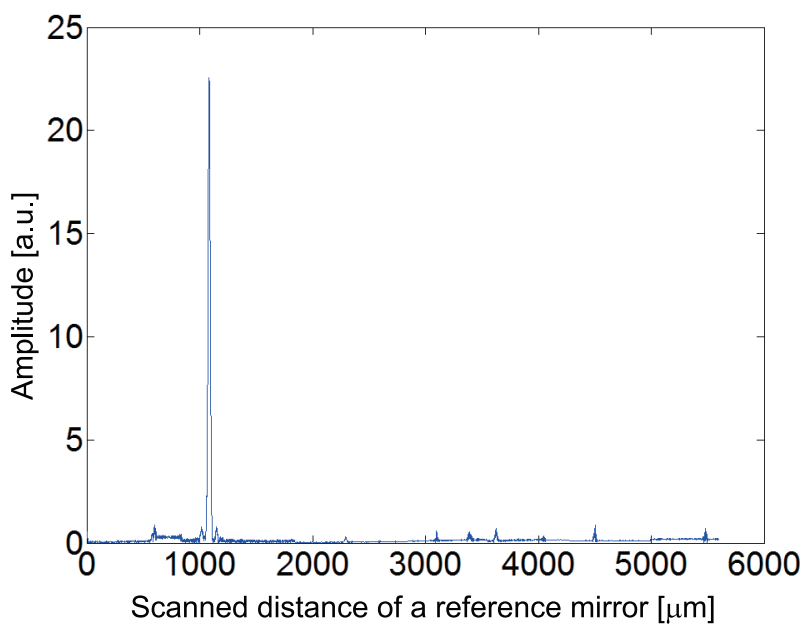
1.527 であった。また、標準偏差はスライドガラス 1 枚の領域 S1 で 2.095×10^{-3} , S2 で 4.369×10^{-3} , スライドガラス 2 枚重ねの領域 D で 1.446×10^{-3} であった。

試料の厚さ分布計測結果を Fig. 2.23 に示す。計測した厚さの平均値はスライドガラス 1 枚の領域 S1 で $927.7 \mu\text{m}$, S2 で $903.6 \mu\text{m}$, スライドガラス 2 枚重ねの領域 D で $1891 \mu\text{m}$ であった。また、標準偏差はスライドガラス 1 枚の領域 S1 で $2.114 \mu\text{m}$, S2 で $6.867 \mu\text{m}$, スライドガラス 2 枚重ねの領域 D で $3.263 \mu\text{m}$ であった。参考として、試料の厚さを接触式の計測手法であるマイクロメータを用いて測った。厚さはスライドガラス 1 枚の領域 S1 で $932 \mu\text{m}$, S2 で $909 \mu\text{m}$, スライドガラス 2 枚重ねの領域 D で $1848 \mu\text{m}$ であった。また、取得した $\Delta l_{m\text{III}} = 0, \Delta l_{m\text{IV}} = 0$ の光路差 0 位置から得た試料の表裏面の位置と屈折率を Fig. 2.24 に示す。この結果は Fig. 2.16 に示す試料の光学的厚さと一致している。これらの結果より、提案手法は厚さ分布を計測可能なことを示した。

屈折率分布の計測ではスライドガラス 1 枚の領域 S1 と S2 では付録に示す屈折率の



(a) 基準面と試料のライドガラス1枚の領域 S1 が再生される画素



(b) 基準面のみが再生される画素

Fig. 2.19 実験的に取得した2種類の振幅プロファイル

理論値と計測結果はよく一致していた。しかし、ライドガラス2枚重ねの領域 D の屈折率は理論値よりも小さな値をとっていた。これは2枚重ねのライドガラスの間に空気の層が存在したためであると考えられる。ガラスよりも屈折率の低い空気の層が存在すると、前節において述べたように提案手法は試料表面に垂直な方向には平均の屈折率を計測するため、計測結果の屈折率の減少をもたらす。ライドガラス2枚

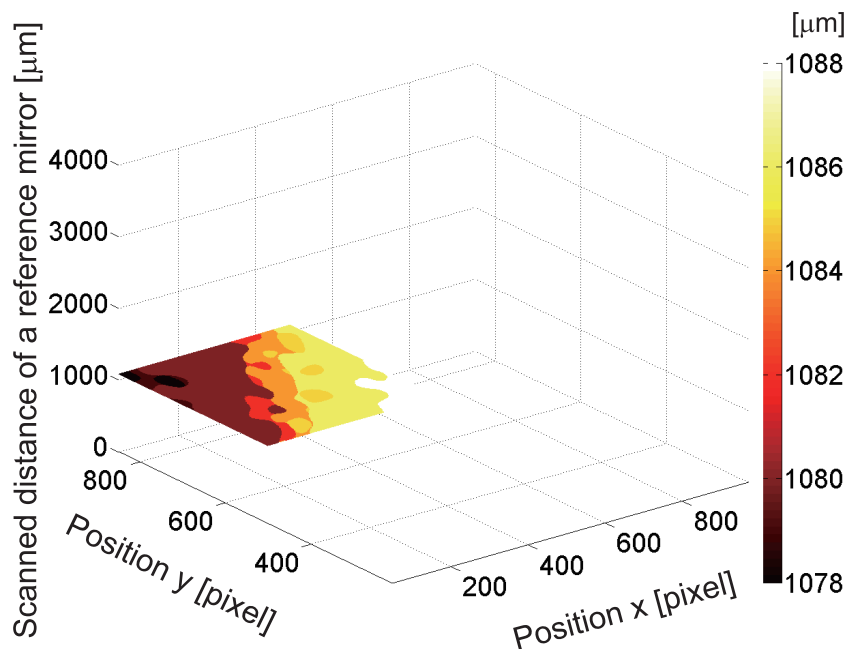


Fig. 2.20 基準面のみが再生される画素における $\Delta l_{mII} = 0$ の参照ミラーの走査距離

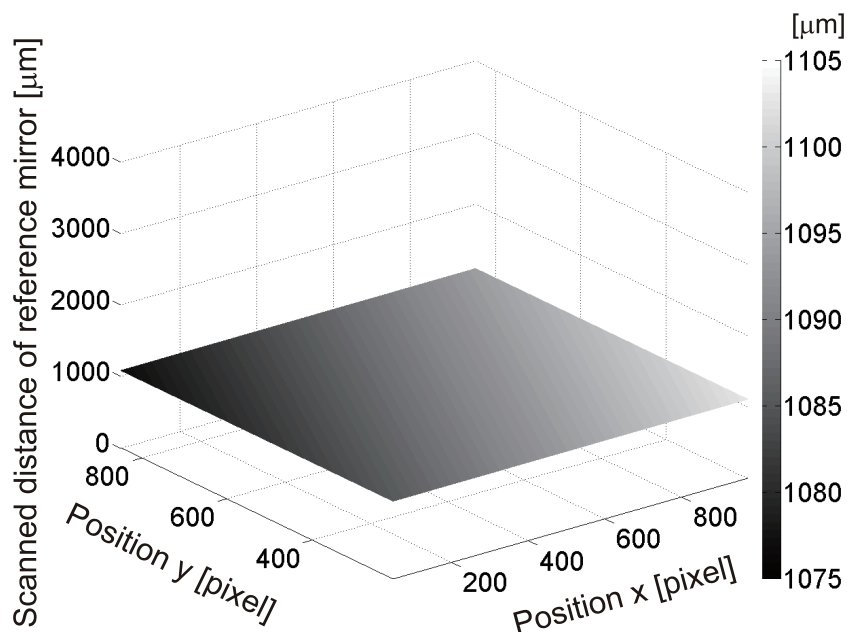


Fig. 2.21 算出した仮想基準面

重ねの D の領域の画素に着目して取得した振幅プロファイルを Fig. 2.25 に示す．参照ミラーの走査距離 $4000 \mu\text{m}$ 付近に注目すると，上側のスライドガラスの裏面と下側のスライドガラスの表面の間に層が存在していることがわかる．このプロファイルから，この画素における 2 枚のスライドガラスと空気の層の厚さはそれぞれ， $1844 \mu\text{m}$ ， $47 \mu\text{m}$ である．この場合，光軸方向に渡る平均の屈折率は 1.524 であり，実験的に計

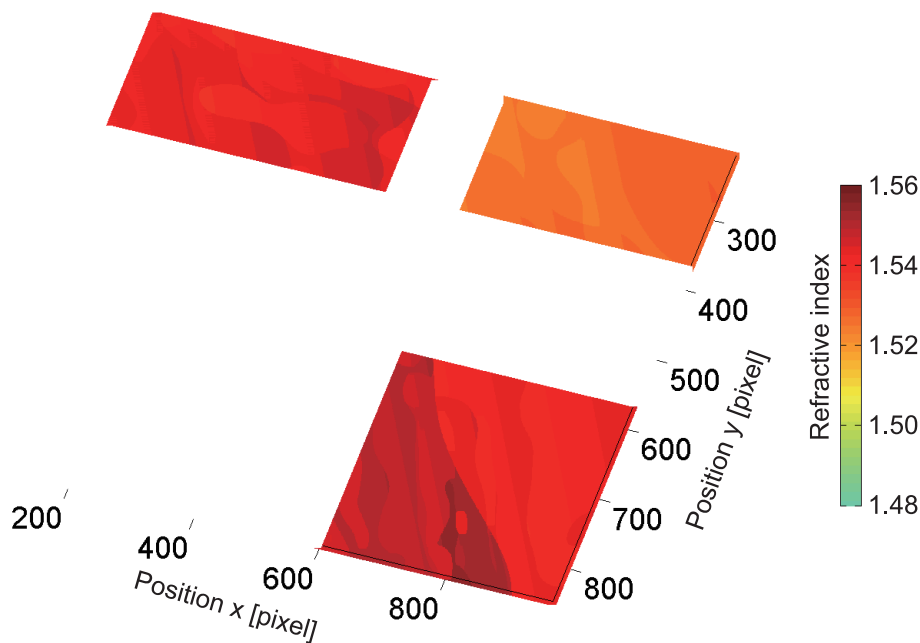


Fig. 2.22 屈折率分布計測結果

測された値 1.527 とよく一致している．よって，これらの実験結果から提案する時間的低コヒーレンスデジタルホログラフィを用いた屈折率分布・厚さ分布同時計測手法は有用であるということを示した．

2.4 結言

本章では時間的低コヒーレンスデジタルホログラフィを用いた屈折率分布・厚さ分布の同時計測手法を提案した．提案した屈折率分布・厚さ分布の同時計測システムを Fig. 2.26 に示す．Fig. 2.26 に示すように，提案手法は光学系における時間的低コヒーレンス光源を用いたデジタルホログラムの記録と信号処理系における数値回折積分を組み合わせ，単一の干渉計という簡易な光学系を用いた 2 次元屈折率分布・厚さ分布の同時計測を実現する．提案手法は試料の背面に基準面を配置し，参照ミラーを走査することによって生じる試料・基準面からの反射光である物体光と参照光との光路差 0 位置ピークを検出することにより計測をおこなうものである．

2.2 節では初めに時間的低コヒーレンスデジタルホログラフィにおいて物体光と参照光の光路差 0 位置で再生像振幅プロファイルが最大値をもつことを述べ，最大値をもつときの参照ミラーの走査距離から物体光と参照光の光路差 0 位置を取得する原理について述べた．次に，時間的低コヒーレンスデジタルホログラフィにおいて試

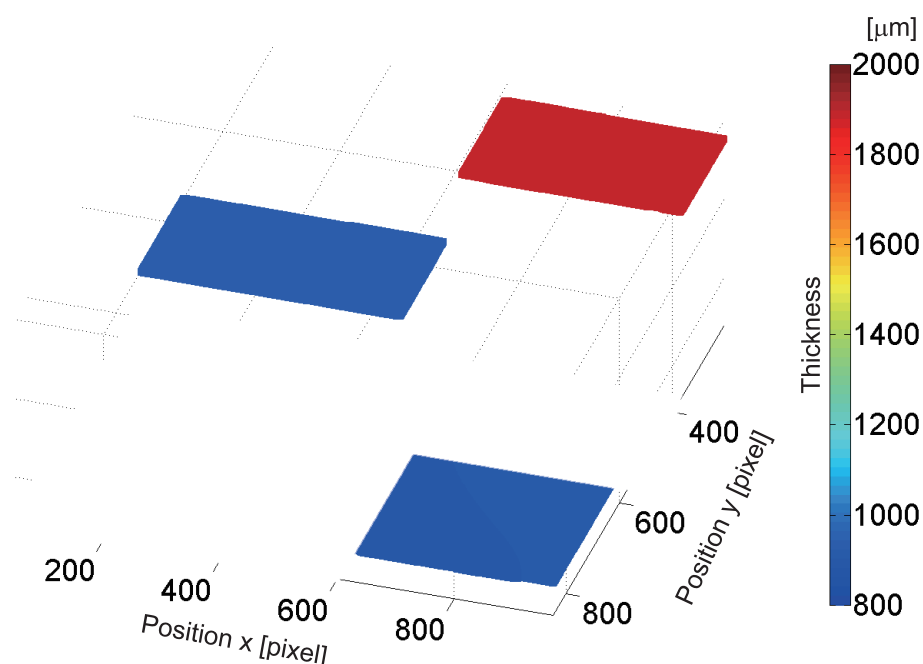


Fig. 2.23 厚さ分布計測結果

料と基準面を部分的に重ねて物体として配置すると、記録したホログラム群から取得した再生画像群の試料と基準面が重なって再生される画素では、試料表・裏面、試料を透過し基準面で反射した光によって振幅プロファイルが3つのピークをもつことを述べた。一方、基準面のみが再生される画素では空气中を伝搬し基準面で反射した光によって振幅プロファイルが1つのピークをもつことを述べた。これら4つのピークのピーク間距離から試料の屈折率・厚さを計測する原理を述べた。その後、基準面のみが再生される複数の画素において振幅プロファイルがピークをもつときの参照ミラーの走査距離より、仮想基準面を算出することで試料が再生される画素においても、試料の屈折率による影響を受けず空气中を伝搬し基準面で反射した光の光路差0位置を等価的に取得可能であることを述べた。仮想基準面を計測に用いることにより、単一の干渉計を用いて2次元屈折率分布・厚さ分布の同時計測を実現できる。

2.3節では提案手法の有用性を示すためにおこなった屈折率分布・厚さ分布の同時計測実験の結果について述べた。初めに試料に一樣な厚さをもつ物体を用いておこなった同時計測実験の実験方法、実験結果について述べ、得られた結果を考察した。厚さ分布計測結果の平均値は仕様書の範囲内であり、提案手法が厚さ分布を計測可能であることを示した。また、屈折率分布計測結果の平均値は理論値と近い値で計測できていることから、屈折率分布を計測可能であることを示した。その後、試料に厚さが空

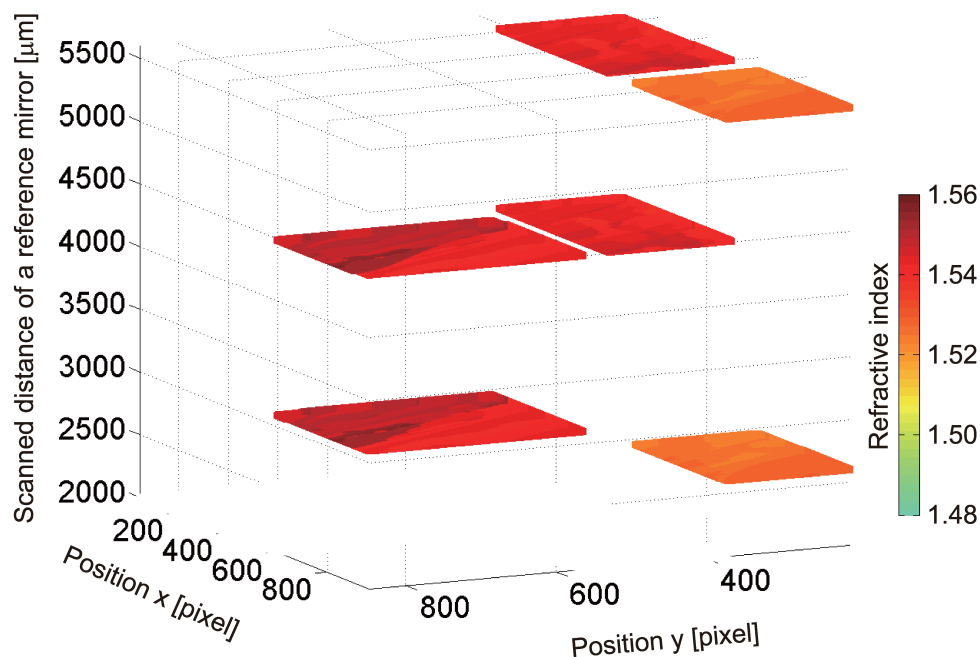


Fig. 2.24 試料の表裏面の位置と屈折率

間的に異なる物体を用いておこなった同時計測実験の実験方法，実験結果について述べ，得られた結果を考察した．厚さ分布については計測結果の平均値は仕様書の範囲内であり，また，参考として接触式のマイクロメータを用いて計測した結果と比較し，有用であることを示した．屈折率分布については計測結果の平均値は理論値と近い値であり，試料の厚さが厚い領域においても，提案手法が光軸方向には平均の屈折率を計測するという観点からよく一致しており，有用であることを示した．光学実験の結果より，提案手法は屈折率分布・厚さ分布の同時計測手法として有用であることを示した．

計測結果の誤差の原因として参照ミラーの離散的な走査が考えられる．参照ミラーを光軸方向に走査し，振幅プロファイルにおいて離散的に振幅の値を取得することから，その走査間隔が広いほど最大値から得られる光路差 0 位置は真の光路差 0 位置と異なったものになるからである．この誤差は光源のコヒーレンス度に基づいた振幅プロファイルの補間技術の導入により，さらに低減できると考えられる．

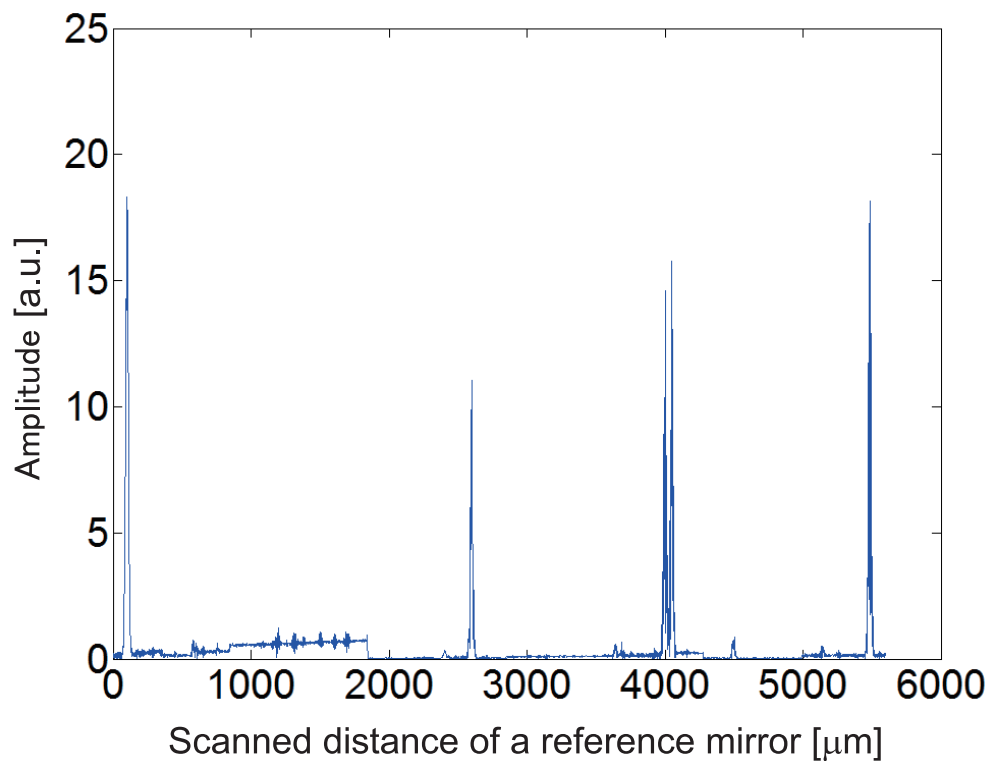


Fig. 2.25 スライドガラス 2 枚重ねの D の領域の画素に着目して実験的に取得した振幅プロファイル

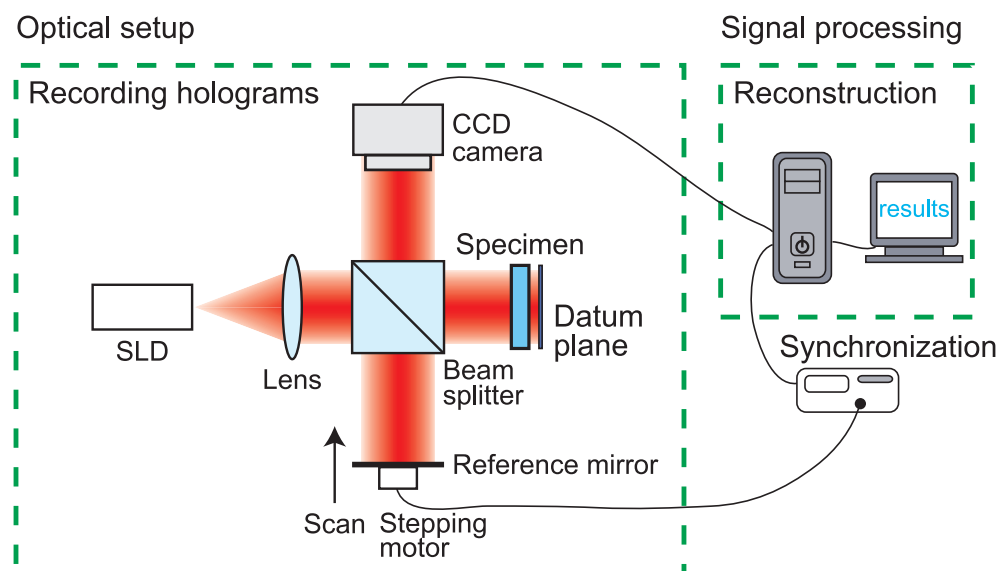


Fig. 2.26 提案した屈折率分布・厚さ分布の同時計測システム

第3章 偏光2チャンネル回転シアリング干渉計を用いた空間的インコヒーレントフーリエデジタルホログラフィ

3.1 緒言

本章では初めに空間的インコヒーレントフーリエデジタルホログラフィの原理について述べる。回転シアリング干渉計を用いて空間的インコヒーレント光の自己干渉を利用したインコヒーレント物体のデジタルホログラム記録原理について述べる。次に、偏光2チャンネル回転シアリング干渉計を提案し¹⁰⁰⁾、それを用いたインコヒーレントフーリエデジタルホログラフィの原理について述べる。その後、インコヒーレントフーリエデジタルホログラム記録実験について述べ、記録ホログラムの数値再生像から提案手法の有用性を示す。

3.2 空間的インコヒーレントフーリエデジタルホログラフィの原理

3.2.1 回転シアリング干渉計を用いたインコヒーレントデジタルホログラム記録原理

Fig. 3.1 に示すような回転シアリング干渉計を用いる。ここで、物体面を (x,y) とす

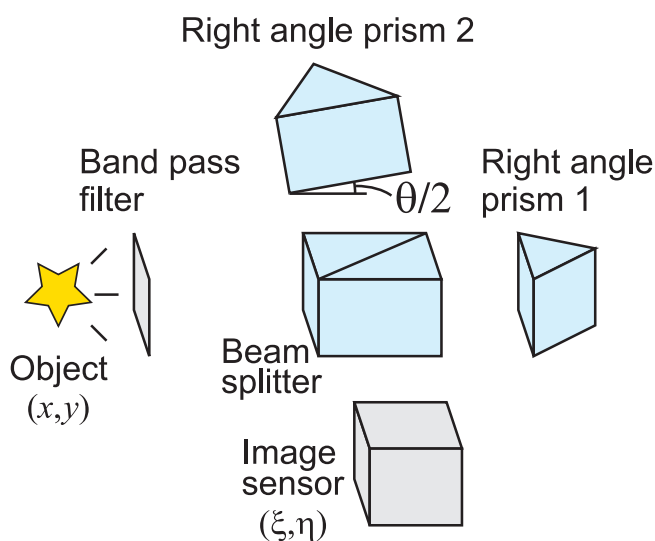


Fig. 3.1 回転シアリング干渉計

る。直角プリズム2に、干渉計の光軸まわりに角度 $\theta/2$ の回転を与える。インコヒーレント物体からの空間的にインコヒーレントな光波を時間的にコヒーレントにするためにバンドパスフィルタを透過させる。その後、この光波はビームスプリッタにより分波され、一方の光路では直角プリズム2によって角度 θ の回転シアを受ける。もう一方の光路では直角プリズム1で反射される。

ここで、Fig. 3.2に示すようなインコヒーレント物体上の任意の点光源 $S(x_0, y_0)$ を考える。この点光源 $S(x_0, y_0)$ は直角プリズム1と2のある2つの光路に分けらる。それらの光波の物体面上の点光源を仮想的にそれぞれ $S_1(x_1, y_1)$ 、 $S_2(x_2, y_2)$ とあらわす。これらは、もとの点光源 $S(x_0, y_0)$ は同一であるが、異なる z 方向の位置をもつ。この直角プリズム1と2による回転作用は角度 0 と θ の回転行列によりあらわされ、

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \end{bmatrix}, \quad (3.1)$$

$$\begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

である。

分けられた点光源 $S_1(x_1, y_1)$ 、 $S_2(x_2, y_2)$ はそれぞれ光路長 l_1, l_2 をもつ。点光源とその光路長と座標の関係をFig. 3.3に示す。ここで、 z_1 と z_2 はそれぞれ、 S_1 と S_2 の物体面 (x, y) と観測面 (ξ, η) の z 方向の光学的距離をあらわす。光路長 l_1, l_2 はそれぞれ

$$l_1 = \sqrt{z_1^2 + (x_1 - \xi)^2 + (y_1 - \eta)^2}, \quad (3.3)$$

$$l_2 = \sqrt{z_2^2 + (x_2 - \xi)^2 + (y_2 - \eta)^2} \quad (3.4)$$

である。ここで2項展開を適用できるように(3.3)、(3.4)式の z_1, z_2 を外に出す。

$$z_1 \gg |x_1 - \xi|, |y_1 - \eta|, \quad (3.5)$$

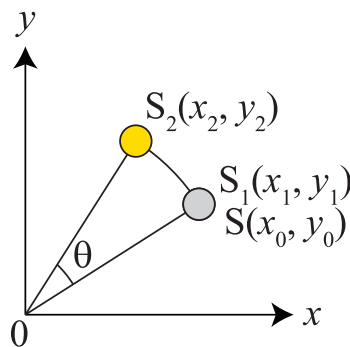


Fig. 3.2 回転シアを受けた点光源

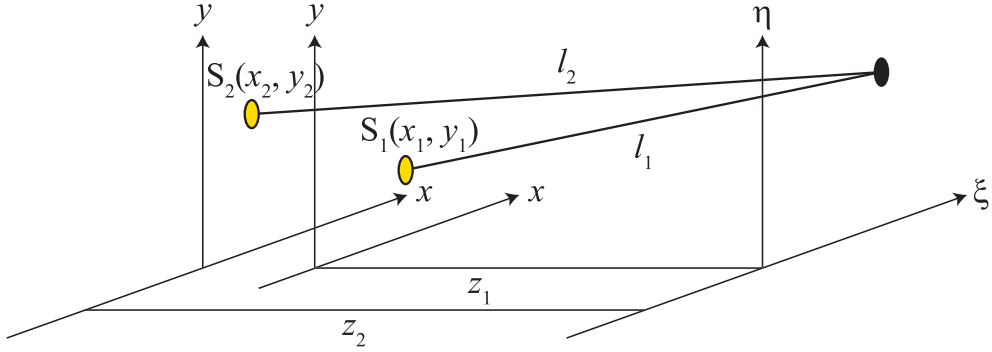


Fig. 3.3 回転シアを受けた点光源の光路長と座標

$$z_2 \gg |x_2 - \xi|, |y_2 - \eta| \quad (3.6)$$

であるとき、2項展開のはじめの2項だけを残し

$$l_1 \cong z_1 \left\{ 1 + \frac{(x_1 - \xi)^2 + (y_1 - \eta)^2}{2z_1^2} \right\}, \quad (3.7)$$

$$l_2 \cong z_2 \left\{ 1 + \frac{(x_2 - \xi)^2 + (y_2 - \eta)^2}{2z_2^2} \right\} \quad (3.8)$$

となる¹⁰¹⁾。これらの式に(3.1)式と(3.2)式を代入することにより、光路差 $l_2 - l_1$ は

$$\begin{aligned} l_2 - l_1 = & z_2 - z_1 - \frac{z_2 - z_1}{2z_1z_2} (x_0^2 + y_0^2 + \xi^2 + \eta^2) + \frac{z_2 - z_1 \cos \theta}{2z_1z_2} (2x_0\xi + 2y_0\eta) \\ & + \frac{z_1}{2z_1z_2} [2(-x_0\eta + y_0\xi) \sin \theta] \end{aligned} \quad (3.9)$$

である。この式の第3項と第4項はその他の項に比べ十分に小さいとみなす。なぜなら $z_2 - z_1$ は $2z_1z_2$ と比べて十分小さく、 θ も小さな角度であるからである。よって、(3.7)式は

$$l_2 - l_1 \cong z_2 - z_1 + \frac{\sin \theta}{z_2} (-x_0\eta + y_0\xi) \quad (3.10)$$

と簡単化することができる。よって、点光源 $S(x_0, y_0)$ による観測面での強度分布 $I(\xi', \eta')$ は

$$\begin{aligned} I(\xi', \eta') = & \frac{1}{2} P(x_0, y_0) + \frac{1}{2} P(x_0, y_0) \cos [k(l_2 - l_1)] \\ = & \frac{1}{2} P(x_0, y_0) + \frac{1}{2} P(x_0, y_0) \cos \left[k\Delta z + \frac{\sin \theta}{\lambda z_2} 2\pi (-x_0\eta + y_0\xi) \right] \end{aligned} \quad (3.11)$$

と与えられる。ここで、 $P(x_0, y_0)$, k , λ はそれぞれ、点光源 $S(x_0, y_0)$ の強度、波数、波長をあらわす。 z 方向の光路差 Δz は

$$\Delta z = z_2 - z_1 \quad (3.12)$$

である。

インコヒーレント物体上の他の点光源もそれら自身と干渉するためホログラム $H(\xi', \eta')$ は、物体面 (x, y) 上の全ての点の寄与として

$$\begin{aligned} H(\xi', \eta') &= \iint_{-\infty}^{\infty} I(\xi', \eta') dx dy \\ &= \frac{1}{2} \iint_{-\infty}^{\infty} P(x, y) dx dy + \frac{1}{2} \iint_{-\infty}^{\infty} P(x, y) \cos \left[\frac{\sin \theta}{\lambda z_2} 2\pi (-\eta x + \xi y) + k\Delta z \right] dx dy \end{aligned} \quad (3.13)$$

となり、ホログラム $H(\xi', \eta')$ はバイアスと干渉縞の空間変動として得られる。

3.2.2 偏光2チャンネル回転シアリング干渉計を用いたインコヒーレントフーリエデジタルホログラフィの原理

インコヒーレントフーリエデジタルホログラム記録のための偏光2チャンネル回転シアリング干渉計を Fig. 3.4 に示す。初めに、物体からの光波の偏光方向を偏光板を用いて45度とする。無偏光ビームスプリッタは垂直偏光成分・水平偏光成分において透過光と反射光の光量を1対1とするため用いている。物体面と観測面の光路長の差 Δz を0と配置すると、垂直偏光成分において干渉縞 $H_v(\xi', \eta')$

$$H_v(\xi', \eta') = \frac{1}{2} \iint_{-\infty}^{\infty} P(x, y) dx dy + \frac{1}{2} \iint_{-\infty}^{\infty} P(x, y) \cos \left[\frac{\sin \theta}{\lambda z_2} 2\pi (-\eta x + \xi y) \right] dx dy \quad (3.14)$$

が得られる。これは第1項であらわされるバイアス成分に第2項であらわされるインコヒーレント物体の強度分布 $P(x, y)$ の余弦変換が加わった形の干渉縞が記録できることを示している。

一方、水平偏光成分では直角プリズム1のある光路を通る光は $\lambda/8$ 板の機能によって、 $-\pi/2$ 遅れる。すなわち、 $\Delta z = -\lambda/4$ となる光路差を与えられる。そのため、撮像素子面における干渉縞 $H_h(\xi', \eta')$ は

$$H_h(\xi', \eta') = \frac{1}{2} \iint_{-\infty}^{\infty} P(x, y) dx dy + \frac{1}{2} \iint_{-\infty}^{\infty} P(x, y) \sin \left[\frac{\sin \theta}{\lambda z_2} 2\pi (-\eta x + \xi y) \right] dx dy \quad (3.15)$$

となり、インコヒーレント物体 $P(x, y)$ の正弦変換の形の干渉縞が得られる。

得られた余弦変換と正弦変換はフーリエ変換の実部と虚部に相当するため、直交する偏光成分においてこれらのホログラムを記録することにより、インコヒーレント

フーリエ変換ホログラム $H_f(\xi', \eta')$

$$\begin{aligned}
 H_f(\xi', \eta') &= H_v(\xi', \eta') - iH_h(\xi', \eta') \\
 &= \frac{1}{2}(1 - i) \iint_{-\infty}^{\infty} P(x, y) dx dy + \frac{1}{2} \iint_{-\infty}^{\infty} P(x, y) \exp \left[-i \frac{\sin \theta}{\lambda z_2} 2\pi (-\eta x + \xi y) \right] dx dy \\
 &= \frac{1}{2}(1 - i) \iint_{-\infty}^{\infty} P(x, y) dx dy + \frac{1}{2} \bar{P} \left(-\frac{\sin \theta}{\lambda z_2} \eta, \frac{\sin \theta}{\lambda z_2} \xi \right) \tag{3.16}
 \end{aligned}$$

を取得可能である。ここで、 $\bar{P}(\xi, \eta)$ はインコヒーレント物体 $P(x, y)$ のフーリエ変換をあらわす。

このインコヒーレントフーリエデジタルホログラムを逆フーリエ変換を用いて数値再生すると再生画像 $R_f(x', y')$

$$R_f(x', y') = (1 - i)\delta(x, y) + \frac{\lambda^2 z_2^2}{2 \sin^2 \theta} P \left(-\frac{\lambda z_2}{\sin \theta} y, \frac{\lambda z_2}{\sin \theta} x \right) \tag{3.17}$$

が得られる。ここで、 $\delta(x, y)$ はディラックのデルタ関数である。(3.15) 式の第 2 項は、もとのインコヒーレント物体 $P(x, y)$ が $\frac{\sin \theta}{\lambda z_2}$ 倍され、その座標が $(x', y') = (-y, x)$ となり -90 度回転した再生像を取得可能なことを示している。また、再生像が -90 度回転することについては 2 次元フーリエ変換の回転定理¹⁰²⁾ から説明できる。

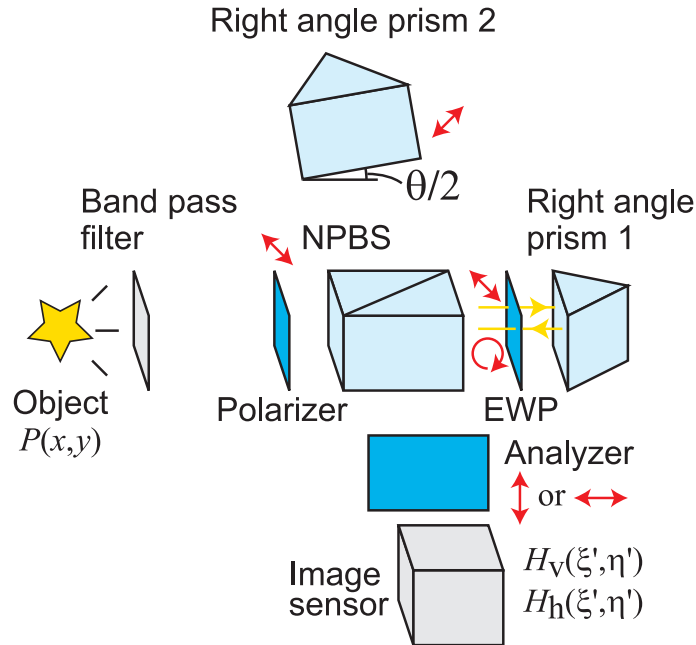


Fig. 3.4 インコヒーレントフーリエデジタルホログラム記録のための偏光 2 チャンネル回転シアリング干渉計: EWP, 1/8 波長板; NPBS, 無偏光ビームスプリッタ

3.3 インコヒーレントフーリエディジタルホログラム記録・再生実験

提案手法の有用性を示すため、ホログラム記録実験をおこなった。光学系には Fig. 3.4 と同様のものを用いた。インコヒーレント物体には Fig. 3.5 に示す「A」の文字を、バックライトが青色 LED の液晶ディスプレイに表示したものを用いた。バンドパスフィルタには中心波長 450 nm, 半値全幅 10.0 nm のものを用いた。直角プリズム 2 は光軸まわりに 2.0 度回転し配置した。ホログラムの記録には画素数 1280×960, 画素サイズ 4.65 μm ×4.65 μm , 階調 8 bit の CCD カメラを用いた。レンズを用いて直角プリズムの稜線を CCD カメラに結像した。

検光子を 90 度回転し、垂直偏光成分・水平偏光成分において干渉縞を記録した。詳細を明らかにするため、ホログラムの中央部分を Fig. 3.6(a), (b) にそれぞれ示す。Fig. 3.6 のホログラムの画素数は 269×269 である。ただし、この画像は干渉縞を認識するためにコントラストを強調したものである。Fig. 3.6 において、「A」の文字の中心を光学系の光軸に配置していないため干渉縞があらわれている。これらの干渉縞は「A」の余弦変換と正弦変換の形に一致している。白い点状のノイズは 30 秒という長い露光時間によるものであり、CCD カメラ面において光の強度が弱かったためこの露光時間とした。

記録したホログラムの数値再生をおこなった。垂直偏光成分において記録した余弦変換ホログラムを逆余弦変換を用いて再生した。取得した再生画像の実部とそのコントラストを強調した画像を Fig. 3.7(a), (b) にそれぞれ示す。画素数は 401×401 である。Fig. 3.7 は物体からの信号は雑音に比べて弱いものの、物体の強度分布が得られていることを示している。再生像の「A」の文字が回転するのは、(3.14) 式であらわされるように記録した余弦ホログラムの座標 (ξ', η') が -90 度回転し、 $(\xi', \eta') = (-\eta, \xi)$ であるためである。物体からの信号の弱さは干渉縞のコントラストの低さと CCD カメラの量子化が原因として考えられる。また、物体面と観測面の光路差 Δz を 0 とする配置の不正確さも考えられる。

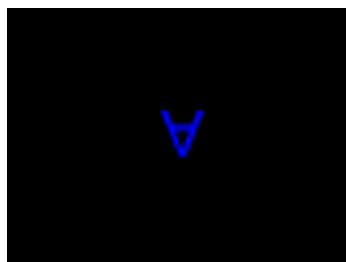


Fig. 3.5 実験で用いたインコヒーレント物体

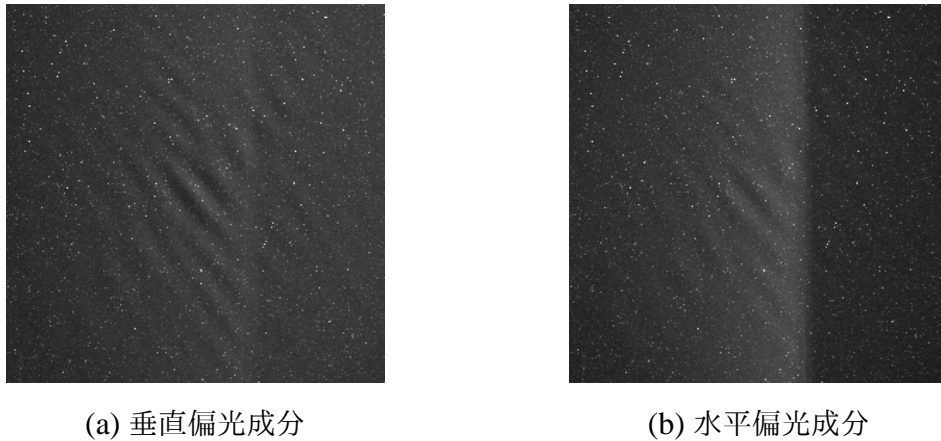


Fig. 3.6 偏光 2 チャンネル回転シアリング干渉計を用いて記録した干渉縞

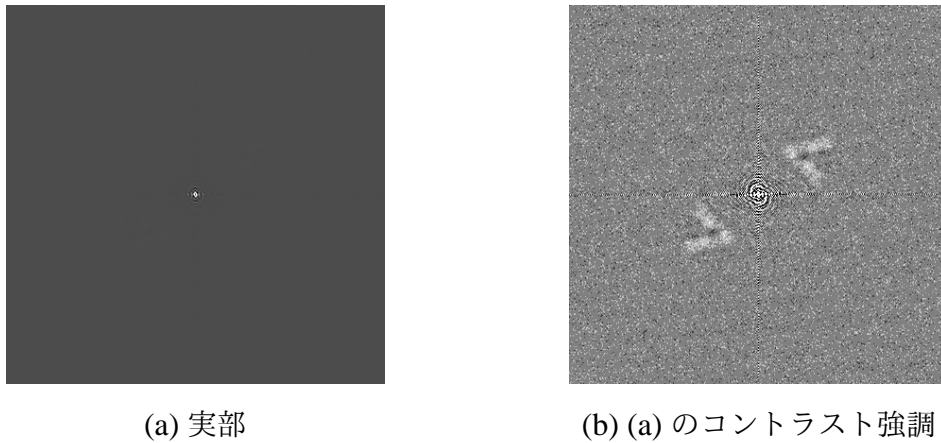


Fig. 3.7 垂直偏光成分において記録した余弦ホログラムの再生画像

偏光 2 チャンネル回転シアリング干渉計を用いて記録したインコヒーレントフーリエデジタルホログラムを逆フーリエ変換を用いて再生した。得られた再生画像の実部とそのコントラストを強調した画像を Fig. 3.8(a), (b) にそれぞれ示す。画素数は 401×401 である。Fig. 3.8 は 2 回のフーリエ変換によって物体面が再生されたことを示している。1 回目は提案したフーリエホログラム記録システムによって光学的になされたもの、2 回目はコンピュータによってデジタル処理としてなされたものである。偏光 2 チャンネル回転シアリング干渉計による余弦・正弦変換の記録によって、インコヒーレント物体の 2 重像を取り除くことができ、インコヒーレント物体の強度分布を計測できている。また、再生像の「A」の文字が回転するのは、前項の (3.17) 式に基づき、もとのインコヒーレント物体の座標 $P(x, y)$ が -90 度回転した再生像 $P\left(-\frac{\lambda z_2}{\sin \theta} y, \frac{\lambda z_2}{\sin \theta} x\right)$ として得られるからである。これらの結果から偏光 2 チャンネル回転シアリング干渉計を用いた空間的インコヒーレントフーリエデジタルホログラフィの有用性を示した。

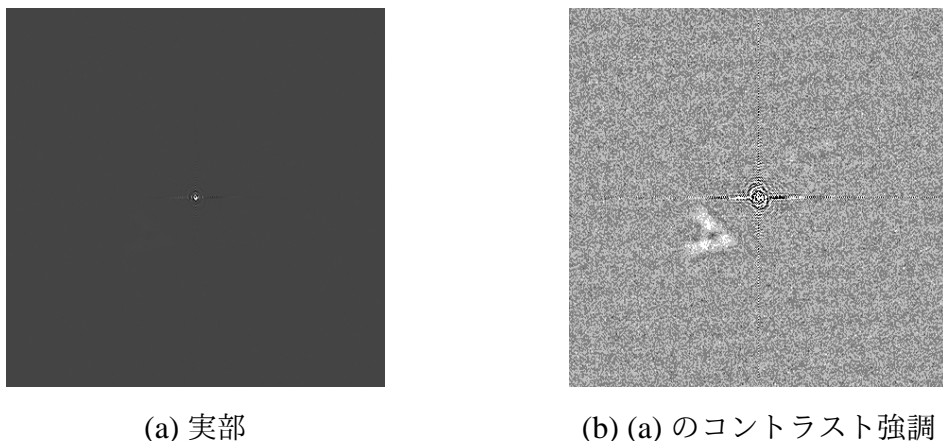


Fig. 3.8 偏光2チャンネル回転シアリング干渉計を用いて記録したフーリエホログラムの再生画像

3.4 結言

本章では偏光2チャンネル回転シアリング干渉計を用いた空間的インコヒーレントフーリエデジタルホログラフィを提案した。提案手法は空間的にインコヒーレントな光波のホログラムの記録を可能にし、簡易な光学系を用いてインコヒーレント物体の再生像が得られる。

3.2節では初めに回転シアリング型の干渉計を用いることにより、空間的インコヒーレント光の自己干渉に基づき、インコヒーレント物体上の任意の点光源が観測面につくる干渉縞について述べた。次に、点光源がつくる干渉縞の重ね合わせとしてインコヒーレントデジタルホログラムが得られることを述べた。その後、インコヒーレントフーリエデジタルホログラム記録のための偏光2チャンネル回転シアリング干渉計について述べた。提案した偏光2チャンネル回転シアリング干渉計は垂直偏光成分と水平偏光成分においてそれぞれ、2つの異なる物体面と観測面の光路差 $\Delta z = 0$ と $-\lambda/4$ を満たすため、インコヒーレントフーリエデジタルホログラムが得られることを示した。

3.3節では空間的インコヒーレント物体を用いておこなった光学実験の結果について述べた。記録したホログラムは物体の余弦・正弦変換の形に一致する干渉縞を含んでいた。記録した余弦ホログラムとフーリエホログラムからコンピュータを用いた数値再生をおこなった。フーリエホログラムと余弦ホログラムの再生画像を比較することにより、偏光2チャンネル回転シアリング干渉計を用いて記録したフーリエホログラムは2重像なしの物体面を与えることを示した。再生像は雑音と比べ信号は弱いものの、インコヒーレント物体の強度分布を計測できていた。実験結果より、提案手法

の有用性を実証した。

しかしながら，自己干渉を利用するインコヒーレントホログラフィの性質上，本章で提案した技術では再生画像が極めて大きな直流光成分を含むことになる．この問題の解消を可能にするインコヒーレントフーリエディジタルホログラフィシステムについては次章で述べる．提案手法は偏光イメージングセンサ¹⁰³⁾や2台のカメラと偏光ビームスプリッタを用いる¹⁰⁴⁾ことにより単一露光記録の実現可能性もあり，計測応用などにも有用であると考えられる．

第 4 章 バイアスレベル低減のための位相シフト偏光 2 チャネル回転シアリング干渉計を用いた空間的インコヒーレントフーリエデジタルホログラフィ

4.1 緒言

第 3 章で述べたインコヒーレントフーリエデジタルホログラフィでは記録されたインコヒーレントホログラムはインコヒーレント物体のフーリエ変換のみではなく、バイアスを含む。そのため、このホログラムを逆フーリエ変換し得られる再生画像にも大きな直流光成分を含み、少数の点によって構成されるような物体にのみ適用可能、もしくは再生像品質が低下するという課題がある。本章ではこの問題を解消する手法を提案する。

初めに、位相シフト偏光 2 チャネル回転シアリング干渉計を用いたインコヒーレントフーリエデジタルホログラフィの原理を提案する¹⁰⁵⁾。次に、インコヒーレント物体として LED と液晶ディスプレイに「O」の文字を表示したものをを用いておこなったインコヒーレントフーリエデジタルホログラム記録・再生実験について述べる。その後、実験により得られた再生結果と第 3 章で提案した手法の再生結果とを比較し、本手法の有用性を示す。

4.2 位相シフト偏光 2 チャネル回転シアリング干渉計を用いたインコヒーレントフーリエデジタルホログラフィの原理

バイアスレベルを低減しインコヒーレントフーリエデジタルホログラムを取得するための位相シフト偏光 2 チャネル回転シアリング干渉計を Fig. 4.1 に示す。基本構成は前章において述べた偏光 2 チャネル回転シアリング干渉計と同じであるが、新たに $\lambda/4$ 板を導入する。それにより干渉縞の交流成分の符号が異なるホログラムが得られる。偏光 2 チャネル回転シアリング干渉計において得られるホログラムとこの干渉縞の交流成分の符号違いのホログラムを減算することにより、バイアス項のない干渉縞の交流成分のみのインコヒーレントフーリエ変換ホログラムを得ることができる。

Fig. 4.1 の位相シフト偏光 2 チャネル回転シアリング干渉計を用いて得られるホロ

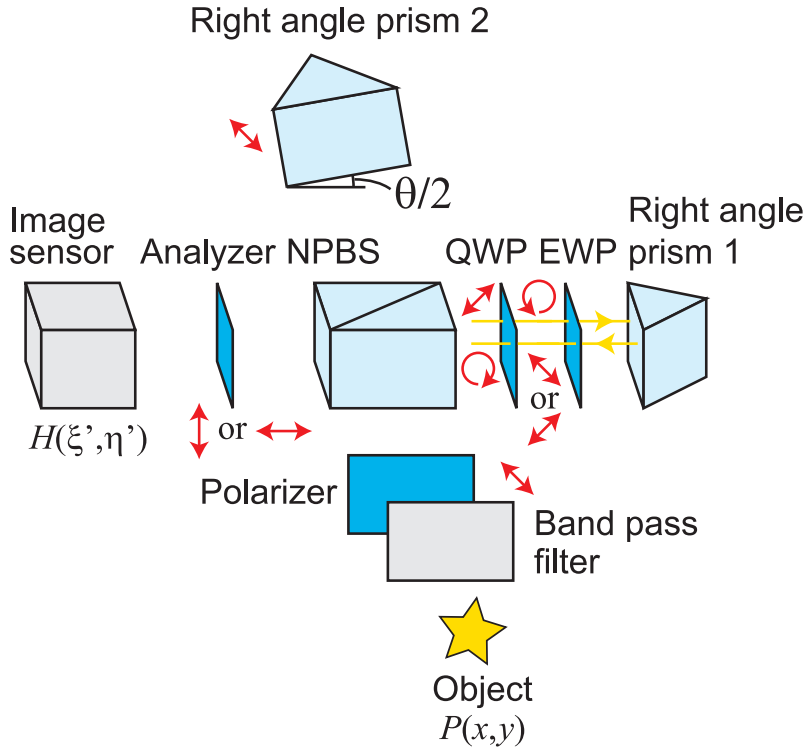


Fig. 4.1 バイアスレベルを低減しインコヒーレントフーリエディジタルホログラムを取得するための位相シフト偏光2チャンネル回転シアリング干渉計: QWP, 1/4 波長板; EWP, 1/8 波長板; NPBS, 無偏光ビームスプリッタ

グラムについて各偏光成分ごとに具体的に述べる. Fig. 4.1 の回転シアリング型干渉計において z 方向の光路差 Δz を 0 とすると (3.13) 式より, 垂直偏光成分においてホログラム $H_1(\xi', \eta')$ は

$$H_1(\xi', \eta') = \frac{1}{2} \iint_{-\infty}^{\infty} P(x, y) dx dy + \frac{1}{2} \iint_{-\infty}^{\infty} P(x, y) \cos \left[\frac{\sin \theta}{\lambda z_2} 2\pi (-\eta x + \xi y) \right] dx dy \quad (4.1)$$

が得られる. $\lambda/8$ 板を 90 度回転し, その遅相軸を検光子の透過軸と一致させる. 直角プリズム 1 のある光路を通る光は $\lambda/8$ 板を 2 回通ることにより $-\pi/2$, すなわち, $\Delta = -\lambda/4$ 遅れる. ホログラム $H_2(\xi', \eta')$ は

$$H_2(\xi', \eta') = \frac{1}{2} \iint_{-\infty}^{\infty} P(x, y) dx dy + \frac{1}{2} \iint_{-\infty}^{\infty} P(x, y) \sin \left[\frac{\sin \theta}{\lambda z_2} 2\pi (-\eta x + \xi y) \right] dx dy \quad (4.2)$$

と取得できる. この位相シフト偏光2チャンネル回転シアリング干渉計を用いて得られるホログラム $H_1(\xi', \eta')$, $H_2(\xi', \eta')$ は前章の偏光2チャンネル回転シアリング干渉計を用いて得られる $H_v(\xi', \eta')$, $H_h(\xi', \eta')$ に相当する.

一方, 水平偏光成分ではプリズム 1 のある光路を通る光は $\lambda/4$ 板を 2 回通ることに

より $-\pi$ 遅れる．よって，ホログラム $H_3(\xi', \eta')$ は

$$H_3(\xi', \eta') = \frac{1}{2} \iint_{-\infty}^{\infty} P(x, y) dx dy - \frac{1}{2} \iint_{-\infty}^{\infty} P(x, y) \cos \left[\frac{\sin \theta}{\lambda z_2} 2\pi(-\eta x + \xi y) \right] dx dy \quad (4.3)$$

と与えられる． $\lambda/8$ 板を 90 度回転させ，プリズム 1 のある光路を通る光は $-3\pi/2$ 遅れる．ホログラム $H_4(\xi', \eta')$ は

$$H_4(\xi', \eta') = \frac{1}{2} \iint_{-\infty}^{\infty} P(x, y) dx dy - \frac{1}{2} \iint_{-\infty}^{\infty} P(x, y) \sin \left[\frac{\sin \theta}{\lambda z_2} 2\pi(-\eta x + \xi y) \right] dx dy \quad (4.4)$$

である．

これらのホログラムから，インコヒーレントフーリエディジタルホログラム $H_0(\xi', \eta')$

$$\begin{aligned} H_0(\xi', \eta') &= H_1(\xi', \eta') - H_3(\xi', \eta') - i\{H_2(\xi', \eta') - H_4(\xi', \eta')\} \\ &= \iint_{-\infty}^{\infty} P(x, y) \exp \left[-i \frac{\sin \theta}{\lambda z_2} 2\pi(-\eta x + \xi y) \right] dx dy \\ &= \bar{P} \left(-\frac{\sin \theta}{\lambda z_2} \eta, \frac{\sin \theta}{\lambda z_2} \xi \right) \end{aligned} \quad (4.5)$$

を取得可能である．インコヒーレント物体 $P(x, y)$ のフーリエ変換の形の干渉縞が得られる．(3.16) 式の偏光 2 チャネル回転シアリング干渉計を用いて得られるインコヒーレントフーリエ変換ホログラムと比べると，この式はバイアス項のない，インコヒーレント物体のフーリエ変換の項のみが得られることを示している．

このインコヒーレントフーリエディジタルホログラムを逆フーリエ変換を用いて数値再生すると再生画像 $R_0(x', y')$

$$R_0(x', y') = \frac{\lambda^2 z_2^2}{\sin^2 \theta} P \left(-\frac{\lambda z_2}{\sin \theta} y', \frac{\lambda z_2}{\sin \theta} x' \right) \quad (4.6)$$

が得られる．(4.6) 式より，得られた再生画像は直流光成分と 2 重像を避けることができ，インコヒーレント物体の再生像が得られることがわかる．また，得られる再生像はもとのインコヒーレント物体 $P(x, y)$ が $\frac{\sin \theta}{\lambda z_2}$ 倍され，その座標は -90 度回転する．

4.3 インコヒーレントフーリエディジタルホログラム記録・再生実験

提案手法の有用性を示すため，ホログラム記録実験をおこなった．実験光学系には Fig. 4.2 に示すものを用いた．物体には LED を用いた．バンドパスフィルタには中心波長 546 nm，半値全幅 10.0 nm のものを用いた．直角プリズム 2 は光軸まわりに

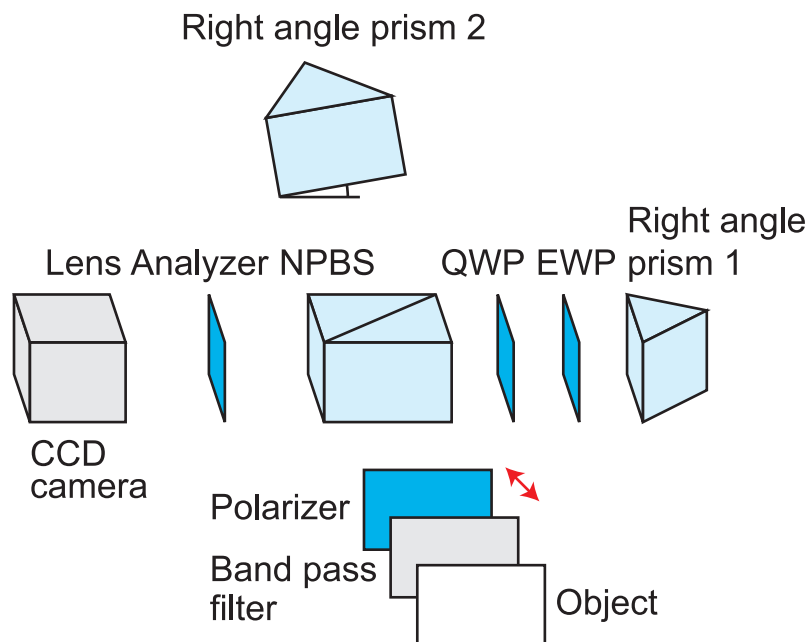
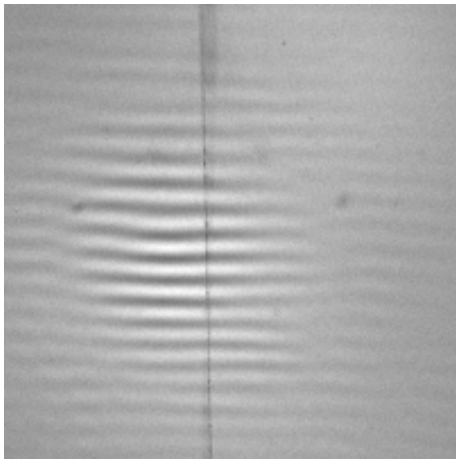


Fig. 4.2 バイアスレベル低減のためのインコヒーレントフーリエデジタルホログラムの記録に用いた実験光学系: QWP, 1/4 波長板; EWP, 1/8 波長板; NPBS, 無偏光ビームスプリッタ

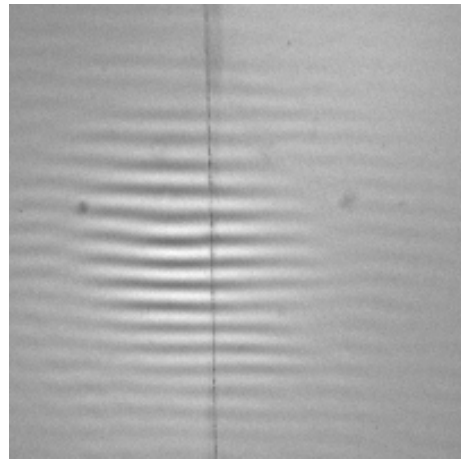
2.0 度回転し配置した. インコヒーレントホログラムの記録には画素数 1600×1200 , 画素サイズ $4.4 \mu\text{m} \times 4.4 \mu\text{m}$, 階調 12 bit の CCD カメラを用いた. レンズを用いて直角プリズムの稜線を CCD カメラに結像した.

1/8 波長板と検光子を回転し, 垂直偏光成分と水平偏光成分においてインコヒーレントホログラムを取得した. 詳細を明らかにするため, 記録したインコヒーレントホログラム $H_1(\xi', \eta')$, $H_2(\xi', \eta')$, $H_3(\xi', \eta')$, $H_4(\xi', \eta')$ の一部分を Fig. 4.3(a)-4.3(d) にそれぞれ示す. 画素数は 201×201 である. Fig. 4.3 において, LED の中心を光学系の光軸に配置していないため, LED からの干渉縞を認識できる. Fig. 4.3(a)-4.3(d) のホログラムは 2 種の波長板により位相差を与えられているため, その干渉縞は相互に異なる.

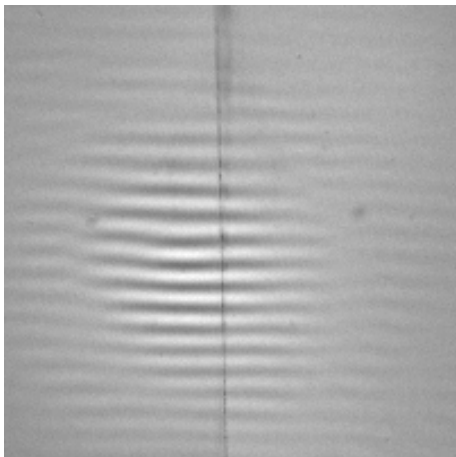
記録したホログラムの数値再生をおこなった. 前節で述べたように記録ホログラム $H_1(\xi', \eta')$ と $H_2(\xi', \eta')$ が従来の偏光 2 チャンネル回転シアリング干渉計で得られる $H_v(\xi', \eta')$ と $H_h(\xi', \eta')$ に相当するため, それらをそれぞれ実部・虚部として取得したインコヒーレントフーリエデジタルホログラム $H_f(\xi', \eta')$ を取得し, 逆フーリエ変換を用いて再生した. ただし, インコヒーレントフーリエデジタルホログラム $H_f(\xi', \eta')$ の再生ではバイアスレベルが高すぎるため, 記録ホログラム $H_1(\xi', \eta')$, $H_2(\xi', \eta')$ から $H_1(\xi', \eta')$, $H_2(\xi', \eta')$ の平均値を減算する処理をおこなっている. 再生像振幅の中央部分を Fig. 4.4(a) に示す. 記録した 4 種のインコヒーレントホログラムから (4.5) 式を



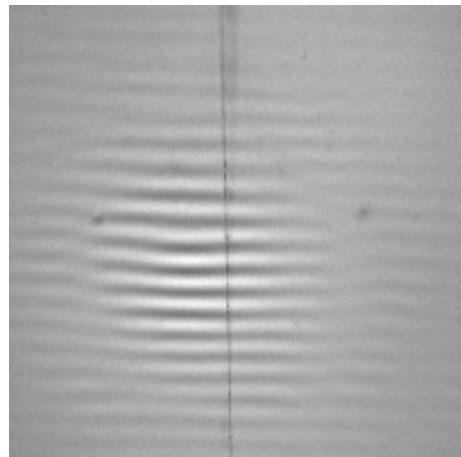
(a) 垂直偏光成分において得られた
 $H_1(\xi', \eta')$



(b) 垂直偏光成分において得られた
 $H_2(\xi', \eta')$



(c) 水平偏光成分において得られた
 $H_3(\xi', \eta')$

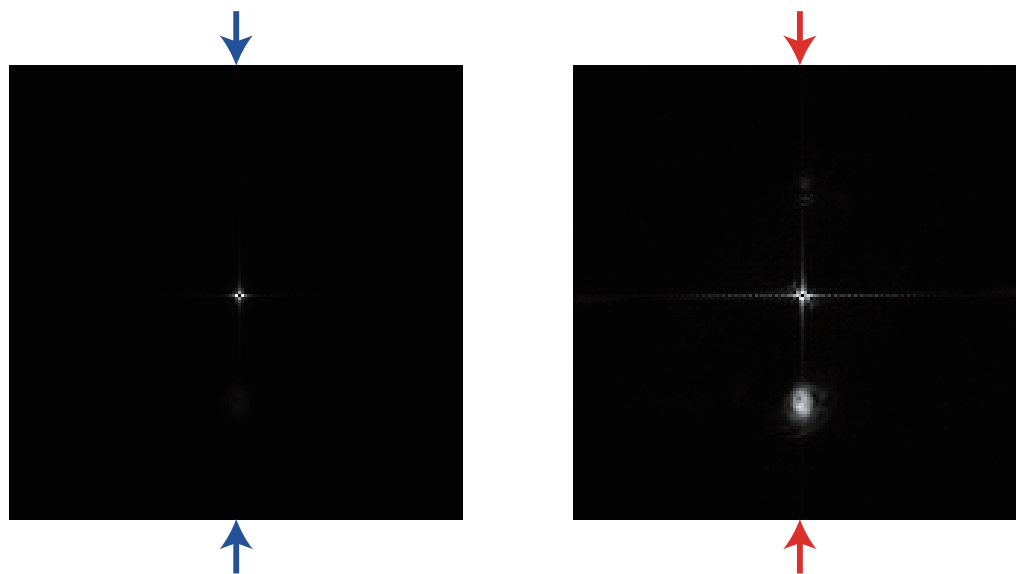


(d) 水平偏光成分において得られた
 $H_4(\xi', \eta')$

Fig. 4.3 位相シフト偏光 2 チャンネル回転シアリング干渉計を用いて LED から得られたインコヒーレントホログラム

用いてインコヒーレントフーリエデジタルホログラム $H_0(\xi', \eta')$ を取得した。このホログラムを逆フーリエ変換を用いて再生した。再生像振幅の中央部分を Fig. 4.4(b) に示す。Fig. 4.4 の再生画像の画素数は 155×155 である。Fig. 4.4(a) ではインコヒーレント物体の再生像は得られず、また、直流光成分を含んでいた。Fig. 4.4(b) はインコヒーレント物体である LED の強度分布が得られていることを示している。

比較のために、再生像振幅の中心の垂直方向の断面図を Fig. 4.5(a) に示す。青線は実部と虚部が $H_1(\xi', \eta')$ と $H_2(\xi', \eta')$ の従来のインコヒーレントフーリエホログラム

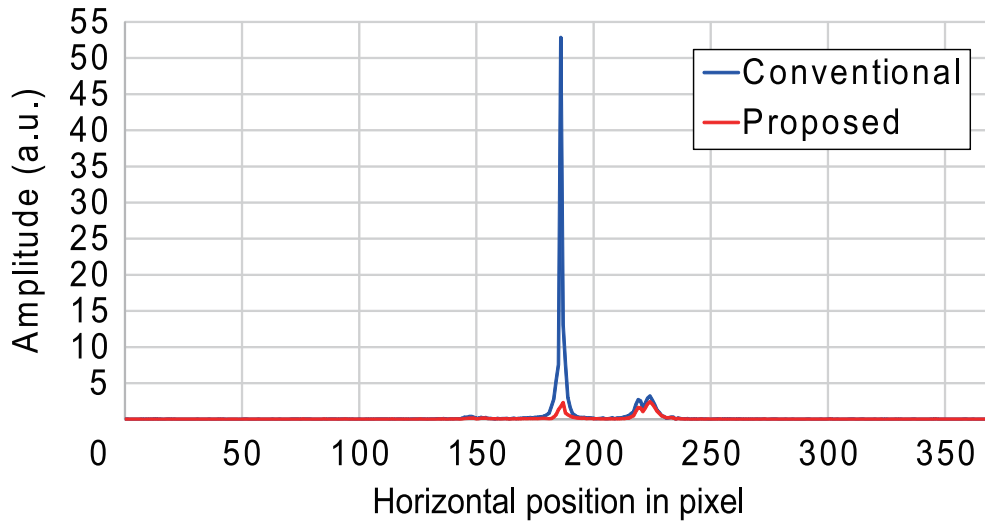


(a) 従来のインコヒーレントフーリエホログラム $H_f(\xi', \eta')$ からの再生 (b) 提案手法によるインコヒーレントフーリエホログラム $H_o(\xi', \eta')$ からの再生

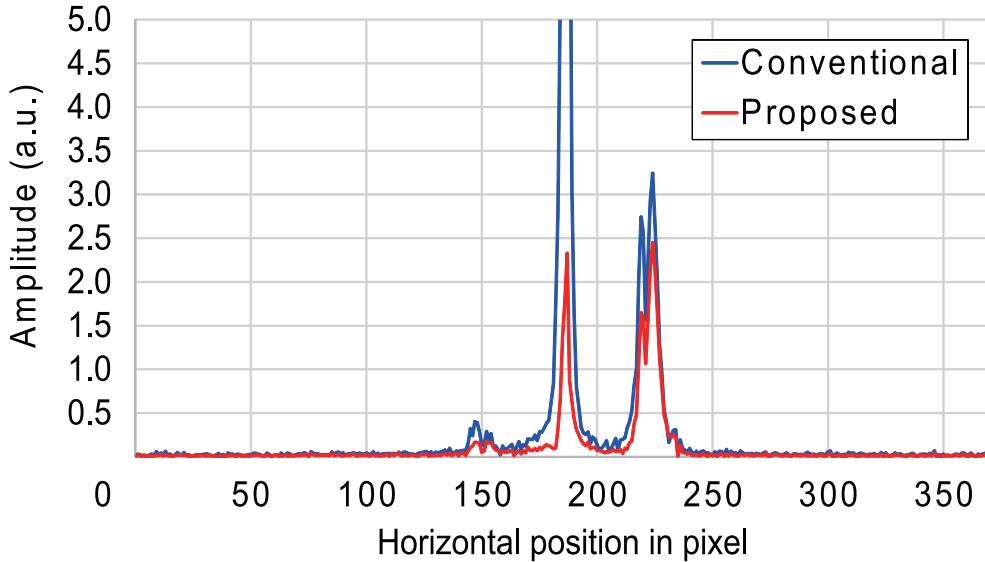
Fig. 4.4 LED の再生像振幅の中央部分

$H_f(\xi', \eta')$ の再生結果から得られた振幅プロファイルであり、赤線は提案手法によるインコヒーレントフーリエホログラム $H_o(\xi', \eta')$ から得られた振幅プロファイルである。従来の手法の断面図は平均値減算をおこなわずに取得したフーリエホログラムの再生像から得たものである。加えて、詳細を明らかにするために振幅の範囲が 0 から 5.0 において得られた断面図を Fig. 4.5(b) に示す。Fig. 4.5(a) は $H_1(\xi', \eta')$, $H_2(\xi', \eta')$ から得られたインコヒーレントフーリエホログラムがバイアス項を含み¹⁰⁰⁾、その再生結果はバイアス項から再生されたものを含むということを示している。インコヒーレント物体からの再生像はバイアスレベルと比べて弱かったため、Fig. 4.4(a) に示すように LED の再生像を得ることができなかった。位相シフト偏光 2 チャンネル回転シアリング干渉計により記録した 4 枚のインコヒーレントホログラムから取得したインコヒーレントフーリエデジタルホログラム $H_o(\xi', \eta')$ はバイアスレベルを低減することができた。Fig. 4.5(b) に示すように従来の手法よりもバイアスレベルが相対的に低いため、Fig. 4.4(b) において LED の再生像を取得できた。再生結果において 2 重像と直流光成分が小さな振幅値をもった原因として CCD カメラの暗電流による雑音、バンドパスフィルタの半値全幅、アライメントの不正確さ、検光子の消光比などが考えられる。これらの結果より提案する位相シフト偏光 2 チャンネル回転シアリング干渉計の有用性を示した。

異なるインコヒーレント物体を Fig. 4.6 に示す。「O」の文字を、バックライトが緑色 LED の液晶ディスプレイに表示したものをを用いた。



(a) インコヒーレントフーリエホログラムからの再生像振幅の断面図



(b) 振幅の範囲が0から5.0において得られた断面図

Fig. 4.5 LEDの再生像振幅の中心の垂直方向の断面図

先ほどと同様に、詳細を明らかにするため記録したインコヒーレントホログラムの一部を Fig. 4.7 に示す。画素数は 213×213 である。文字「O」からの干渉縞があらわれている。4枚のホログラムは位相シフト偏光2チャンネル回転シアリング干渉計の2種の波長板により位相差を与えられている。

ホログラムを数値再生し、LEDの再生と同様に振幅の中心の垂直方向の断面図を取得した。Fig. 4.8(a) はインコヒーレント物体の再生像が得られなかったことを示している。Fig. 4.8(b) はインコヒーレント物体からの再生像を含んでいる。そしてそれはインコヒーレント物体である文字「O」の強度分布を計測できていることを示してい

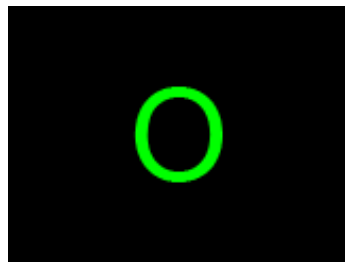


Fig. 4.6 実験で用いたインコヒーレント物体

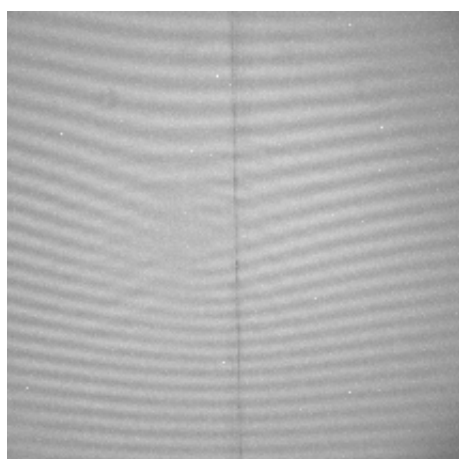
る. Fig. 4.9(a) はインコヒーレント物体からの信号は弱いものの, 位相シフト偏光 2 チャンネル回転シアリング干渉計を用いた 4 枚のインコヒーレントホログラムの記録によるバイアスレベルの低減を示している. Fig. 4.9 に示すように従来の手法よりもバイアスレベルが相対的に低いため, Fig. 4.8(b) において文字「O」の再生像が得られた. 小さなバイアスレベルが残っていることの原因は LED の再生と同様のものであると考えられる. これらの実験結果より, 位相シフト偏光 2 チャンネル回転シアリング干渉計を用いた 4 種のインコヒーレントホログラム記録によるインコヒーレントフーリエデジタルホログラム取得の有用性を示した.

4.4 結言

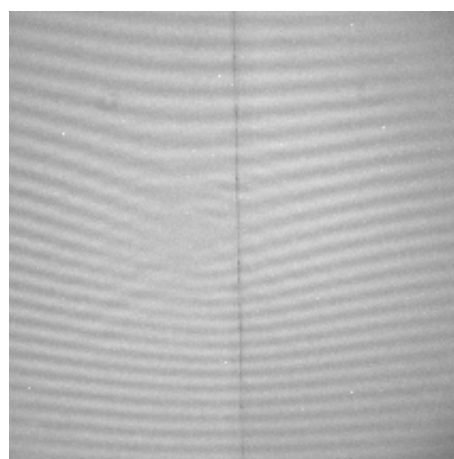
本章ではバイアスレベル低減のための位相シフト偏光 2 チャンネル回転シアリング干渉計を用いた空間的インコヒーレントフーリエデジタルホログラフィを提案した. 提案システムは SLM を用いる必要がないという光学系の簡易さは保持し, 新たに波長板を導入することによりインコヒーレントホログラフィにおいて問題となる極めて大きなバイアスレベルを低減することができる.

4.2 節では, 提案手法は回転シアリング干渉計による自己干渉と位相シフト法に基づいていることを述べた. 提案する位相シフト偏光 2 チャンネル回転シアリング干渉計は $\lambda/4$ 板と $\lambda/8$ 板を有し, 4 つの異なる位相差 $k\Delta z = 0, -\pi/2, -\pi, -3\pi/2$ を水平・垂直偏光成分において満たすことを述べた. したがって, 直流光成分・2 重像の両方を除去したインコヒーレントフーリエデジタルホログラムが得られる.

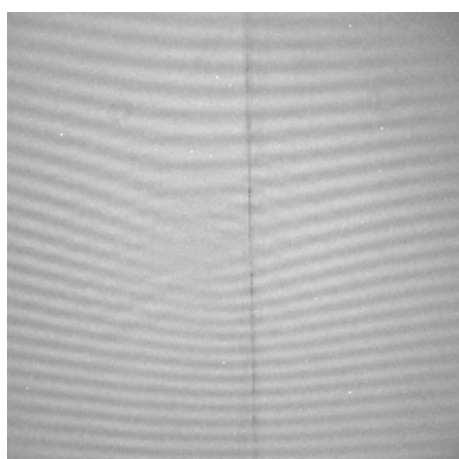
4.3 節では LED と「O」の文字をバックライトが LED の液晶ディスプレイに表示したものをインコヒーレント物体に用いておこなった光学実験とその結果について述べた. 記録したホログラムは与えられた位相差のため相互に異なる干渉縞を含んでいた. 記録した 2 枚のホログラムから従来の手法を用いて得られたインコヒーレントフーリエデジタルホログラムと記録した 4 枚のホログラムから提案手法を用いて得られたホログラムを数値再生した. 再生像を比較し, 位相シフト偏光 2 チャンネル回転シアリ



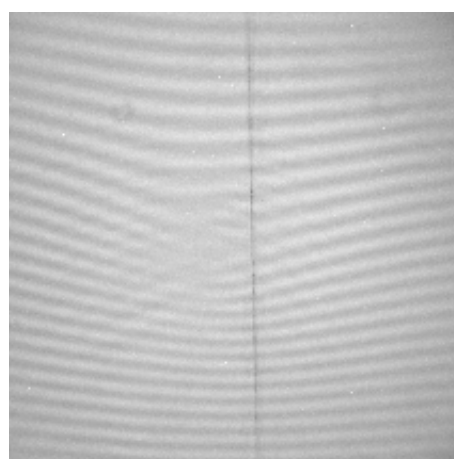
(a) 垂直偏光成分において得られた
 $H_1(\xi', \eta')$



(b) 垂直偏光成分において得られた
 $H_2(\xi', \eta')$



(c) 水平偏光成分において得られた
 $H_3(\xi', \eta')$

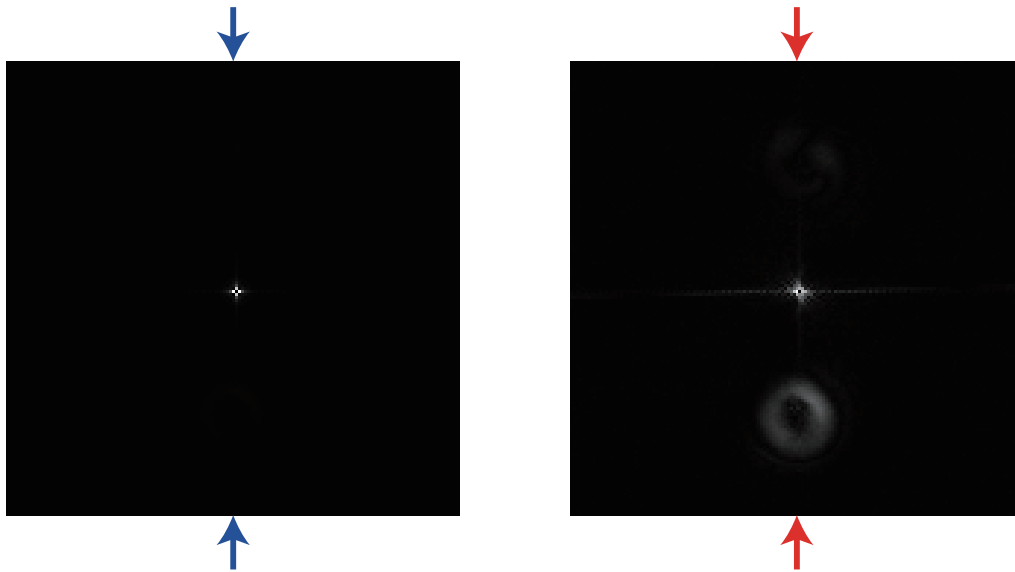


(d) 水平偏光成分において得られた
 $H_4(\xi', \eta')$

Fig. 4.7 位相シフト偏光 2 チャンネル回転シアリング干渉計を用いて液晶ディスプレイに表示した文字「O」から得られたインコヒーレントホログラム

ング干渉計を用いた提案手法によってバイアス項からの再生を低減できることを示した。提案手法による再生画像はインコヒーレント物体である LED と文字「O」の強度分布を計測できていた。実験結果より、提案手法の有用性を実証した。

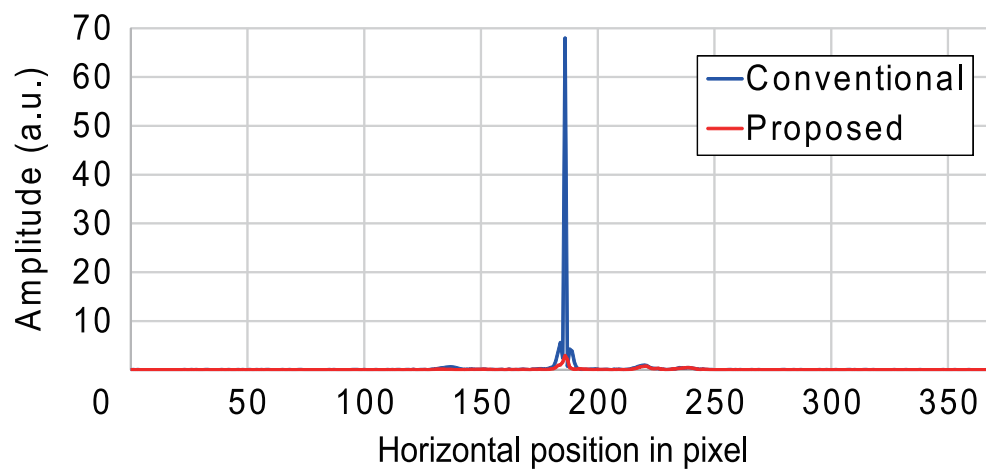
提案手法は偏光イメージングセンサ¹⁰³⁾や2台のカメラと偏光ビームスプリッタ¹⁰⁴⁾を用いてホログラム $H_1(\xi', \eta')$ と $H_4(\xi', \eta')$, $H_2(\xi', \eta')$ と $H_3(\xi', \eta')$ の同時記録の実現可能性もあり、計測などインコヒーレントホログラフィの応用に有用であると考えら



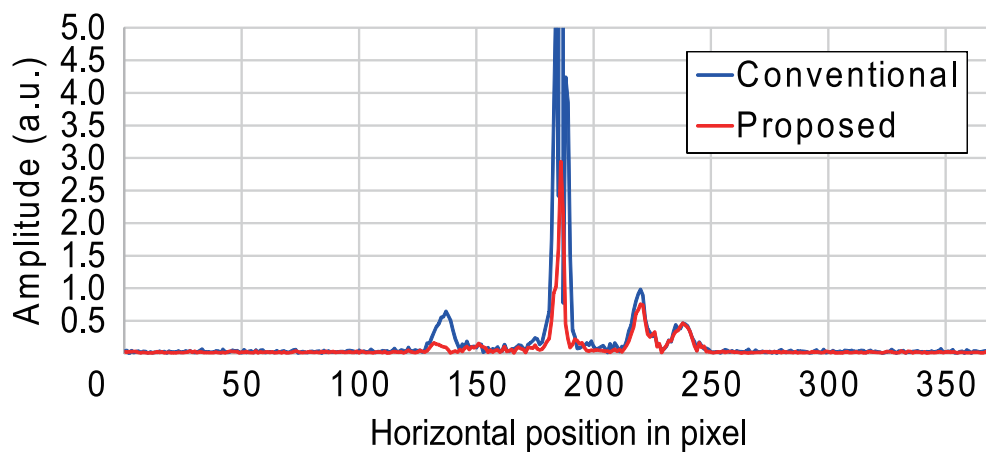
(a) 従来のインコヒーレントフーリエホログラム $H_f(\xi', \eta')$ からの再生
(b) 提案手法によるインコヒーレントフーリエホログラム $H_o(\xi', \eta')$ からの再生

Fig. 4.8 文字「O」の再生像振幅の中央部分

れる.



(a) インコヒーレントフーリエホログラムからの再生像振幅の断面図



(b) 振幅の範囲が0から5.0において得られた断面図

Fig. 4.9 文字「O」の再生像振幅の中心の垂直方向の断面図

第 5 章 結論

本論文ではコヒーレンスの低い光を光源に用いたデジタルホログラフィによるイメージング技術とそれを用いた計測に着目し、時間的低コヒーレンス光を用いたデジタルホログラフィと空間的インコヒーレント光を用いたデジタルホログラフィについて、時間的低コヒーレンスデジタルホログラフィを用いた屈折率・厚さ分布の同時計測、偏光 2 チャンネル回転シアリング干渉計を用いた空間的インコヒーレントフーリエデジタルホログラフィ、バイアスレベル低減のための位相シフト偏光 2 チャンネル回転シアリング干渉計を用いた空間的インコヒーレントフーリエデジタルホログラフィという 3 つの手法を提案し、その成果を実証した。本論文の総括として各章の内容をまとめた後、今後の展望を述べる。

第 1 章ではインコヒーレントデジタルホログラフィとその計測応用について簡単に述べた後、時間的低コヒーレンスデジタルホログラフィを用いた屈折率分布・厚さ分布の同時計測、空間的インコヒーレントフーリエデジタルホログラフィ、自己干渉を利用した空間的インコヒーレントホログラフィの現状と課題について述べた。

第 2 章では時間的低コヒーレンスデジタルホログラフィを用いた屈折率分布・厚さ分布の同時計測手法を提案した。時間的低コヒーレンスデジタルホログラフィを用いて、参照ミラーを走査し記録したデジタルホログラムの数値再生像から物体光と参照光の光路差 0 位置を取得する原理について述べた。次に、この時間的低コヒーレンスデジタルホログラフィを用いた試料の 2 次元屈折率分布・厚さ分布の同時計測原理を述べた。次に、単一の干渉計による厚さ分布計測のための信号処理法について述べた。この信号処理により、簡易な単一の干渉計による 2 次元イメージングを実現でき、off-axis 光学系を採用することによって生じる計測結果への誤差を克服できる。その後、一様な厚さをもつ物体と厚さが空間的に異なる物体の 2 つを試料としておこなった屈折率分布・厚さ分布の同時計測実験の結果を示した。実験結果より提案する時間的低コヒーレンスデジタルホログラフィを用いた屈折率分布・厚さ分布の同時計測手法の有用性を実証した。今後、本手法に拡大レンズを導入すると、細胞などの顕微鏡により観察するような微細な試料に対しても有用な手法となると考えられる。

第 3 章では偏光 2 チャンネル回転シアリング干渉計を用いた空間的インコヒーレントフーリエデジタルホログラフィを提案した。初めに、回転シアリング干渉計を用いて空間的インコヒーレント光の自己干渉を利用し、物体のインコヒーレントデジタルホログラムを記録する原理について述べた。次に、偏光 2 チャンネル回転シアリング干渉計とそれを用いたインコヒーレントフーリエデジタルホログラフィの原理について述べた。2 つの直交する偏光を用いてインコヒーレント物体の余弦・正弦変換の

両方の形の干渉縞が得られる。その後、提案手法を用いておこなったインコヒーレントフーリエデジタルホログラム記録実験について述べ、記録ホログラムの再生像から提案手法が空間的インコヒーレントフーリエデジタルホログラフィとして有用であることを実証した。また、再生画像が大きな直流光成分を含む課題についても指摘した。

第4章では第3章で指摘した課題に対して位相シフト偏光2チャンネル回転シアリング干渉計を用いた空間的インコヒーレントフーリエデジタルホログラフィを提案し解決を図った。初めに、提案する位相シフト偏光2チャンネル回転シアリング干渉計を用いた空間的インコヒーレントフーリエデジタルホログラフィの原理について述べた。新たに波長板を導入することにより干渉縞の交流成分の符号が異なるホログラムを得ることができ、再生画像において直流光成分と2重像を避けることができる。その後、提案手法を用いておこなったインコヒーレントフーリエデジタルホログラム記録実験について述べ、提案手法により得られた再生結果と第3章で提案した手法の再生結果とを比較し、提案手法の有用性を実証した。

提案した時間的低コヒーレンスデジタルホログラフィを用いた屈折率・厚さ分布の同時計測手法は低コヒーレンスデジタルホログラフィによる応用技術として効果的であり、屈折率と厚さの2次元分布の同時計測を1軸のみの走査により実現できる。従来の2つの干渉計を用いて計測する手法と比べて光学系が簡易・小型な点や2次元分布を計測できるという観点から優位性をもっていると考えられる。透明な光学製品の厚み計測や屈折率分布の評価は製品の欠陥検出に重要であるため、提案する同時計測手法は非接触・非破壊・非侵襲の計測手法として、産業分野の製品検査等への応用が期待される。さらに、光軸方向のみの走査によって高速計測が可能のため、医療・生物・産業分野への貢献が期待される。また、提案した空間的インコヒーレントフーリエデジタルホログラフィはLEDなどの光に照らされた物体のホログラムの記録が可能であり、物体の振幅・位相分布を定量的に取得できるため、光計測などの分野においてホログラフィの新たな展望を開くと期待される。加えて、提案した位相シフト偏光2チャンネル回転シアリング干渉計を用いたインコヒーレントフーリエデジタルホログラフィはSLMを用いる必要のない簡易な光学系により、バイアスレベルを低減でき、また、高コヒーレンス光源固有のスペックル雑音による画質の低下がないため、ホログラフィックディスプレイや光計測などへの応用が期待される。また、結像レンズを用いた顕微鏡よりも被写界深度が極めて深いという特長があるため、特に蛍光顕微鏡などの光計測への貢献が期待される。

以上のことより、本研究によって得られたインコヒーレントデジタルホログラフィとそれを用いた計測技術の確立という成果はオプトエレクトロニクス、ナノテク

ノロジー産業，高度先進医療技術の発展に資するものである。

謝辞

本研究は和歌山大学大学院システム工学研究科情報フォトニクス研究室において、野村孝徳教授のご指導のもとにおこなったものである。学部4年生に研究室に配属されてからの6年間、研究の遂行から研究者としての在り方まで終始熱心なご指導、ご鞭撻を賜りました和歌山大学システム工学部光メカトロニクス学科野村孝徳教授に深く感謝の意を表すとともに、心より御礼申し上げます。

本研究を遂行するにあたり、親身になって相談を受けてくださり、貴重なご意見を賜りました和歌山大学システム工学部光メカトロニクス学科最田裕介助教に深く御礼申し上げます。

研究報告会や研究討論を通じて有益なご意見を賜りました光波テクノロジー研究室の沼田卓久元教授に厚く御礼申し上げます。

本論文の審査に際し、貴重なご意見、ご指摘を賜りました和歌山大学システム工学部光メカトロニクス学科土谷茂樹教授、ならびに松本正行教授に厚く御礼申し上げます。

本研究を遂行するにあたり、有益な議論を交わし、研究協力を賜りました和歌山大学大学院システム工学研究科博士前期課程 松田拓也 氏に心より御礼申し上げます。

ホログラフィに関する知識や実験方法など研究室に配属された当初から広くご教授を賜りました和歌山大学大学院システム工学研究科博士後期課程 井邊真俊博士（現、国立研究開発法人産業技術総合研究所物理計測標準研究部門）、森裕博士（現、香川大学工学部電子・情報工学科）、ならびに北澤貴宏 氏に厚く御礼申し上げます。

研究遂行において有益な情報を提供いただきました和歌山大学大学院システム工学研究科博士後期課程 信川輝吉 氏に深く御礼申し上げます。

研究遂行にあたり助成していただきました一般財団法人テレコム先端技術研究支援センター、独立行政法人日本学術振興会、一般社団法人日本光学会、公益財団法人アイコム電子通信工学振興財団、和歌山大学システム工学部、和歌山大学システム工学部同窓会、公益財団法人村田学術振興財団、公益財団法人 NEC C&C 財団、公益財団法人立石科学技術振興財団に厚く御礼申し上げます。

研究室に配属されてからの6年間、お世話になりました和歌山大学情報フォトニクス研究室の皆様にご挨拶申し上げます。

終わりに、長きにわたり学業を応援して下さった両親、ならびに終始激励して下さった伯父、伯母の多大なるご支援の下に本論文が執筆できたことをここに記し、心より感謝の意を表します。

参考文献

- 1) E. N. Leith and J. Upatnieks, “Reconstructed wavefronts and communication theory,” *J. Opt. Soc. Am.* **52**, 1123–1130 (1962).
- 2) E. N. Leith and J. Upatnieks, “Wavefront reconstruction with continuous-tone objects,” *J. Opt. Soc. Am.* **53**, 1377–1381 (1963).
- 3) D. Gabor, “A new microscopic principle,” *Nature* **161**, 777–778 (1948).
- 4) E. Hecht, “Holography,” in *Optics*, 4th ed. (Addison Wesley, 2002), pp. 623–639, Chap. 13.3.
- 5) 谷田貝豊彦, “ホログラフィ,” 光とフーリエ変換 (朝倉書店, 2012), pp. 115–118, 7.2 章.
- 6) G. R. Fowles, “Reconstruction of the wave front by diffraction. Holography,” in *Introduction to Modern Optics*, 2nd ed. (Dover Publications, 1975), pp. 144–147, Chap. 5.7.
- 7) J. W. Goodman and R. W. Lawrence, “Digital image formation from electronically detected holograms,” *Appl. Phys. Lett.* **11**, 77–79 (1967).
- 8) U. Schnars and W. Jüptner, “Direct recording of holograms by a CCD target and numerical reconstruction,” *Appl. Opt.* **33**, 179–181 (1994).
- 9) E. Cuche, P. Marquet, and C. Depeursinge, “Simultaneous amplitude-contrast and quantitative phase-contrast microscopy by numerical reconstruction of Fresnel off-axis holograms,” *Appl. Opt.* **38**, 6994–7001 (1999).
- 10) L. Yu and M. K. Kim, “Wavelength-scanning digital interference holography for tomographic three-dimensional imaging by use of the angular spectrum method,” *Opt. Lett.* **30**, 2092–2094 (2005).
- 11) M. K. Kim, L. Yu, and C. J. Mann, “Interference techniques in digital holography,” *J. Opt. A: Pure. Appl. Opt.* **8**, S518–S523 (2006).
- 12) E. Cuche, F. Bevilacqua, and C. Depeursinge, “Digital holography for quantitative phase-contrast imaging,” *Opt. Lett.* **24**, 291–293 (1999).
- 13) J. Kühn, T. Colomb, F. Montfort, F. Charrière, Y. Emery, E. Cuche, P. Marquet, and C. Depeursinge, “Real-time dual-wavelength digital holographic microscopy with a single hologram acquisition,” *Opt. Express* **15**, 7231–7242 (2007).
- 14) J. Dong, C. Jiang, and S. Jia, “Digital holographic metrology based on multi-angle interferometry,” *Opt. Lett.* **41**, 4301–4304 (2016).
- 15) I. Yamaguchi, J. Kato, S. Ohta, and J. Mizuno, “Image formation in phase-shifting

- digital holography and applications to microscopy,” *Appl. Opt.* **40**, 6177–6186 (2001).
- 16) C. J. Mann, L. Yu, C. Lo, and M. K. Kim, “High-resolution quantitative phase-contrast microscopy by digital holography,” *Opt. Express* **13**, 8693–8698 (2005).
 - 17) T. Colomb, P. Dahlgren, D. Beghuin, E. Cuche, P. Marquet, and C. Depeursinge, “Polarization imaging by use of digital holography,” *Appl. Opt.* **41**, 27–37 (2002).
 - 18) M. Yokota, Y. Terui, and I. Yamaguchi, “Analysis of polarization state by digital holography with polarization modulation,” *Opt. Rev.* **13**, 405–409 (2006).
 - 19) M. Yokota, “Polarization analysis by off-axis digital holography with an improved optical system and an evaluation of its performance by simulation,” *Appl. Opt.* **47**, 6325–6333 (2008).
 - 20) T. Nomura, B. Javidi, S. Murata, E. Nitandai, and T. Numata, “Polarization imaging of a 3D object by use of on-axis phase-shifting digital holography,” *Opt. Lett.* **32**, 481–483 (2007).
 - 21) T. Tahara, Y. Awatsuji, Y. Shimazato, T. Kakue, K. Nishio, S. Ura, T. Kubota, and O. Matoba, “Single-shot polarization-imaging digital holography based on simultaneous phase-shifting interferometry,” *Opt. Lett.* **36**, 3254–3256 (2011).
 - 22) T. Kobata and T. Nomura, “Digital holographic three-dimensional Muller matrix imaging,” *Appl. Opt.* **54**, 5591–5596 (2015).
 - 23) I. Yamaguchi, T. Matsumura, and J. Kato, “Phase-shifting color digital holography,” *Opt. Lett.* **27**, 1108–1110 (2002).
 - 24) T. Kiire, D. Barada, J. Sugisaka, Y. Hayasaki, and T. Yatagai, “Color digital holography using a single monochromatic imaging sensor,” *Opt. Lett.* **37**, 3153–3155 (2012).
 - 25) J. Lu, R. A. Shaw, and W. Yang, “Improved particle size estimation in digital holography via sign matched filtering,” *Opt. Express* **20**, 12666–12674 (2012).
 - 26) M. Yokota, T. Kawakami, Y. Kimoto, and I. Yamaguchi, “Drying process in a solvent-based paint analyzed by phase-shifting digital holography and an estimation of time for tack free,” *Appl. Opt.* **50**, 5834–5841 (2011).
 - 27) W. Osten, T. Baumbach, and W. Jüptner, “Comparative digital holography,” *Opt. Lett.* **27**, 1764–1766 (2002).
 - 28) T. Baumbach, W. Osten, C. Kopylow, and W. Jüptner, “Remote metrology by comparative digital holography,” *Appl. Opt.* **27**, 925–934 (2006).
 - 29) M. Yokota and N. Ishitobi, “Estimation of inner surface profile of a tube by two-wavelength phase-shifting digital holography,” *Opt. Rev.* **17**, 166–170 (2010).

- 30) M. Yokota and T. Adachi, "Digital holographic profilometry of the inner surface of a pipe using a current-induced wavelength change of a laser diode," *Appl. Opt.* **50**, 3937–3946 (2011).
- 31) M. K. Kim, "Full color natural light holographic camera," *Opt. Express* **21**, 9636–9642 (2013).
- 32) Y. Mori and T. Nomura, "Synthesis method from low-coherence digital holograms for improvement of image quality in holographic display," *Appl. Opt.* **52**, 3838–3844 (2013).
- 33) Y. Mori and T. Nomura, "Speckle reduction in hologram generation based on spherical waves synthesis using low-coherence digital holography," *J. Display Technol.* **11**, 867–872 (2015).
- 34) Y. Mori, T. Fukuoka, and T. Nomura, "Speckle reduction in holographic projection by random pixel separation with time multiplexing," *Appl. Opt.* **53**, 8182–8188 (2014).
- 35) Y. Takaki and M. Yokouchi, "Speckle-free and grayscale hologram reconstruction using time-multiplexing technique," *Opt. Express* **19**, 7567–7579 (2011).
- 36) P. A. Blanche, A. Bablumian, R. Voorakaranam, C. Christenson, W. Lin, T. Gu, D. Flores, P. Wang, W. Y. Hsieh, M. Kathaperumal, B. Rachwal, O. Siddiqui, J. Thomas, R. A. Norwood, M. Yamamoto, and N. Peyghambarian, "Holographic three-dimensional telepresence using large-area photorefractive polymer," *Nature* **468**, 80–83 (2010).
- 37) J. Son, B. Lee, O. O. Chernyshov, K. Moon, and H. Lee, "Holographic display based on a spatial DMD array," *Opt. Lett.* **38**, 3173–3176 (2013).
- 38) G. Li, D. Lee, Y. Jeong, J. Cho, and B. Lee, "Holographic display for see-through augmented reality using mirror-lens holographic optical element," *Opt. Lett.* **41**, 2486–2489 (2016).
- 39) T. Poon and J. Liu, "Low-coherence digital holography," in *Introduction to Modern Digital Holography with MATLAB*, (Cambridge University Press, 2014), pp. 126–133, Chap. 5.2.
- 40) G. Pedrini and H. J. Tiziani, "Short-coherence digital microscopy by use of a lensless holographic imaging system," *Appl. Opt.* **41**, 4489–4496 (2002).
- 41) P. Massatsch, E. Cucho, and C. D. Depeursinge, "Low coherence digital holographic tomography," *Proc. SPIE* **5143**, Novel Optical Instrumentation for Biomedical Applications, pp. 18–21 (2003).
- 42) P. Massatsch, F. Charrière, E. Cucho, P. Marquet, and C. D. Depeursinge, "Time-

- domain optical coherence tomography with digital holographic microscopy,” *Appl. Opt.* **44**, 1806–1812 (2005).
- 43) M. K. Kim, “Adaptive optics by incoherent digital holography,” *Opt. Lett.* **37**, 2694–2696 (2012).
 - 44) M. K. Kim, “Incoherent digital holographic adaptive optics,” *Appl. Opt.* **52**, A117–A130 (2013).
 - 45) J. B. Breckinridge, “Two-dimensional white light coherence interferometer,” *Appl. Opt.* **13**, 2760–2762 (1974).
 - 46) J. Rosen, N. Siegel, and G. Brooker, “Theoretical and experimental demonstration of resolution beyond the Rayleigh limit by FINCH fluorescence microscopic imaging,” *Opt. Express* **19**, 26249–26268 (2011).
 - 47) J. Rosen and G. Brooker, “Non-scanning motionless fluorescence three-dimensional holographic microscopy,” *Nature photonics* **2**, 190–195 (2008).
 - 48) G. Brooker, N. Siegel, J. Rosen, N. Hashimoto, M. Kurihara, and A. Tanabe, “In-line FINCH super resolution digital holographic fluorescence microscopy using a high efficiency transmission liquid crystal GRIN lens,” *Opt. Lett.* **38**, 5264–5267 (2013).
 - 49) G. Brooker, N. Siegel, V. Wang, and J. Rosen, “Optimal resolution in Fresnel incoherent correlation holographic fluorescence microscopy,” *Opt. Express* **19**, 5047–5062 (2011).
 - 50) N. Siegel and G. Brooker, “Improved axial resolution of FINCH fluorescence microscopy when combined with spinning disk confocal microscopy,” *Opt. Express* **22**, 22298–22307 (2014).
 - 51) X. Quan, K. Nitta, O. Matoba, P. Xia, and Y. Awatsuji, “Phase and fluorescence imaging by combination of digital holographic microscopy and fluorescence microscopy,” *Opt. Rev.* **22**, 349–353 (2015).
 - 52) T. Yanagawa, R. Abe, and Y. Hayasaki, “Three-dimensional mapping of fluorescent nanoparticles using incoherent digital holography,” *Opt. Lett.* **40**, 3312–3315 (2015).
 - 53) J. Rosen and G. Brooker, “Digital spatially incoherent Fresnel holography,” *Opt. Lett.* **32**, 1806–1812 (2005).
 - 54) M. Hopler and J. Rogers, “Interferometric measurement of group and phase refractive index,” *Appl. Opt.* **30**, 735–744 (1991).
 - 55) G. Tearney, M. Brezinski, J. Southern, B. Bouma, M. Hee, and J. Fujimoto, “Determination of the refractive index of highly scattering human tissue by optical coherence tomography,” *Opt. Lett.* **20**, 2258–2260 (1995).

- 56) Y. Verma, K. Rao, M. Suresh, H. Patel, and P. Gupta, "Measurement of gradient refractive index profile of crystalline lens of fish eye in vivo using optical coherence tomography," *Appl. Phys. B* **87**, 607–610 (2007).
- 57) J. Rogers and M. Hopler, "Conversion of group refractive index to phase refractive index," *J. Opt. Soc. Am. A* **5**, 1595–1600 (1988).
- 58) Y. Zhou, K. Chan, T. Lai, and S. Tang, "Characterizing refractive index and thickness of biological tissues using combined multiphoton microscopy and optical coherence tomography," *Biomed. Opt. Express* **4**, 38–50 (2013).
- 59) M. Haruna, M. Ohmi, T. Mitsuyama, H. Tajiri, H. Maruyama, and M. Hashimoto, "Simultaneous measurement of the phase and group indices and the thickness of transparent plates by low-coherence interferometry," *Opt. Lett.* **23**, 966–968 (1998).
- 60) H. Maruyama, S. Inoue, T. Mitsuyama, M. Ohmi, and M. Haruna, "Low-coherence interferometer system for the simultaneous measurement of refractive index and thickness," *Appl. Opt.* **41**, 1315–1322 (2002).
- 61) D. Murphy and D. Flavin, "Dispersion-insensitive measurement of thickness and group refractive index by low-coherence interferometry," *Appl. Opt.* **39**, 4607–4615 (2000).
- 62) A. Hirai and H. Matsumoto, "Low-coherence tandem interferometer for measurement of group refractive index without knowledge of the thickness of the test sample," *Opt. Lett.* **28**, 2112–2114 (2003).
- 63) A. Hirai and H. Matsumoto, "Measurement of group refractive index wavelength dependence using a low-coherence tandem interferometer," *Appl. Opt.* **45**, 5614–5620 (2006).
- 64) Y. Lin and C. Cheng, "Determining the refractive index profile of micro-optical elements using transmissive digital holographic microscopy," *J. Opt.* **12**, 115402 (5 pages) (2010).
- 65) J. Zhang, C. Ma, S. Dai, J. Di, Y. Li, T. Xi, and J. Zhao, "Transmission and total internal reflection integrated digital holographic microscopy," *Opt. Lett.* **41**, 3844–3847 (2016).
- 66) Y. Tanaka, Y. Mori, and T. Nomura, "Single-shot three-dimensional shape measurement by low-coherent optical path difference digital holography," *Appl. Opt.* **53**, G19–G24 (2014).
- 67) T. Nomura, K. Yoshino, T. Numata, and E. Nitani, "Profilometry and reflectometry using low-coherent digital holography," in *Digital Holography and Three-*

- Dimensional Imaging*, OSA Technical Digest (CD) (Optical Society of America, 2010), paper JMA25.
- 68) J. Hong and M. K. Kim, "Single-shot self-interference incoherent digital holography using off-axis configuration," *Opt. Lett.* **38**, 5196–5199 (2013).
 - 69) R. Kelner, B. Katz, and J. Rosen, "Optical sectioning using a digital Fresnel incoherent-holography-based confocal imaging system," *Optica* **1**, 70–74 (2014).
 - 70) J. Rosen, B. Katz, and G. Brooker, "FINCH: Fresnel incoherent correlation hologram," in *Holography research and technologies*, J. Rosen, ed. (InTech, 2011), pp. 135–154, Chap. 6.
 - 71) R. Kelner and J. Rosen, "Spatially incoherent single channel digital Fourier holography," *Opt. Lett.* **37**, 3723–3725 (2012).
 - 72) R. Kelner, J. Rosen, and G. Brooker, "Enhanced resolution in Fourier incoherent single channel holography (FISCH) with reduced optical path difference," *Opt. Express* **21**, 20131–20144 (2013).
 - 73) Y. Wan, T. Man, and D. Wang, "Incoherent off-axis Fourier triangular color holography," *Opt. Express* **22**, 8565–8573 (2014).
 - 74) G. Cochran, "New method of making Fresnel transforms with incoherent light," *J. Opt. Soc. Am.* **56**, 1513–1517 (1966).
 - 75) D. N. Naik, G. Pedrini, and W. Osten, "Recording of incoherent-object hologram as complex spatial coherence function using Sagnac radial shearing interferometer and a Pockels cell," *Opt. Express* **21**, 3990–3996 (2013).
 - 76) N. T. Shaked, J. Rosen, and A. Stern, "Integral holography: white-light single-shot hologram acquisition," *Opt. Express* **15**, 5754–5760 (2007).
 - 77) R. Kelner and J. Rosen, "Parallel-mode scanning optical sectioning using digital Fresnel holography with three-wave interference phase-shifting," *Opt. Express* **24**, 2200–2214 (2016).
 - 78) J. W. Goodman, "Fresnel, Fraunhofer, image, and Fourier holograms," in *Introduction to Fourier Optics*, 3rd ed. (Roberts & Company, 2005), pp. 322–323, Chap. 9.6.1.
 - 79) O. Bryngdahl and A. Lohmann, "Variable magnification in incoherent holography," *Appl. Opt.* **9**, 231–232 (1970).
 - 80) T. Nomura, K. Itoh, and Y. Ichioka, "Hybrid high speed pattern matching using a binary incoherent hologram generated by a rotational shearing interferometer," *Appl. Opt.* **28**, 4987–4991 (1989).

- 81) T. Nomura, K. Itoh, and Y. Ichioka, “Hartley transformation for hybrid pattern matching,” *Appl. Opt.* **29**, 4345–4350 (1990).
- 82) S. Wang and N. George, “Fresnel zone transforms in spatially incoherent illumination,” *Appl. Opt.* **24**, 842–850 (1985).
- 83) D. Marks, R. Stack, D. Brady, D. Munson, and R. Brady, “Visible cone-beam tomography with a lensless interferometric camera,” *Science* **284**, 2164–2166 (1999).
- 84) D. Weigel, H. Babovsky, A. Kiessling, and R. Kowarschik, “Widefield microscopy with infinite depth of field and enhanced lateral resolution based on an image inverting interferometer,” *Opt. Commun.* **342**, 102–108 (2014).
- 85) K. Itoh and Y. Ohtsuka, “Fourier-transform spectral imaging: retrieval of source information from three-dimensional spatial coherence,” *J. Opt. Soc. Am. A* **3**, 94–100 (1986).
- 86) K. Itoh, T. Inoue, T. Yoshida, and Y. Ichioka, “Interferometric supermultispectral imaging,” *Appl. Opt.* **29**, 1625–1630 (1990).
- 87) S. Teeranutrannont and K. Yoshimori, “Digital holographic three-dimensional imaging spectrometry,” *Appl. Opt.* **52**, A388–A396 (2013).
- 88) M. Obara and K. Yoshimori, “3D spatial resolution and spectral resolution of interferometric 3D imaging spectrometry,” *Appl. Opt.* **55**, 2489–2497 (2016).
- 89) J. W. Goodman, “Holography with spatially incoherent light,” in *Introduction to Fourier Optics*, 3rd ed. (Roberts & Company, 2005), pp. 374–377, Chap. 9.11.
- 90) A. Kozma and N. Massey, “Bias level reduction of incoherent holograms,” *Appl. Opt.* **8**, 393–397 (1969).
- 91) O. Bryngdahl and A. Lohmann, “One-dimensional holography with spatially incoherent light,” *J. Opt. Soc. Am.* **58**, 625–628 (1968).
- 92) T. Kiire, S. Nakadate, and M. Shibuya, “Simultaneous formation of four fringes by using a polarization quadrature phase-shifting interferometer with wave plates and a diffraction grating,” *Appl. Opt.* **47**, 4787–4792 (2008).
- 93) T. Kiire, S. Nakadate, and M. Shibuya, “Phase-shifting interferometer based on changing the direction of linear polarization orthogonally,” *Appl. Opt.* **47**, 3784–3788 (2008).
- 94) K. Watanabe, M. Ohshima, and T. Nomura, “Simultaneous measurement of refractive index and thickness distributions using low-coherence digital holography and vertical scanning,” *J. Opt.* **16**, 045403 (8 pages) (2014).
- 95) E. Hecht, “The mutual coherence function and the degree of coherence,” in *Optics*,

- 4th ed. (Addison Wesley, 2002), pp. 566–571, Chap. 12.3.
- 96) M. Born and E. Wolf, “Spectral representation of mutual coherence,” in *Principles of Optics*, 7th (expanded) ed. (Cambridge University Press, 1999), pp. 566–568, Chap. 10.3.2.
- 97) C. Akcay, P. Parrein, and J. P. Rolland, “Estimation of longitudinal resolution in optical coherence imaging,” *Appl. Opt.* **41**, 5256–5262 (2002).
- 98) G. Nardin, T. Colomb, Y. Emery, and C. Moser, “Versatile spectral modulation of a broadband source for digital holographic microscopy,” *Opt. Express* **24**, 27791–27804 (2016).
- 99) Präzisions Glas & Optik GmbH, “B270 – Superwite,”
www.pgo-online.com/intl/katalog/B270.html
- 100) K. Watanabe and T. Nomura, “Recording spatially incoherent Fourier hologram using dual channel rotational shearing interferometer,” *Appl. Opt.* **54**, A18–A22 (2015).
- 101) J. W. Goodman, “The Van Cittert-Zernike theorem,” in *Statistical Optics*, 2nd ed. (Wiley, 2015), pp. 208–214, Chap. 5.7.
- 102) R. N. Bracewell, “Two-dimensional convolution,” in *The Fourier Transform and Its Applications*, 3rd ed. (McGraw-Hill, 2000), pp. 331–335, Chap. 13.
- 103) T. Nomura, S. Murata, E. Nitandai, and T. Numata, “Phase-shifting digital holography with a phase difference between orthogonal polarizations,” *Appl. Opt.* **45**, 4873–4877 (2006).
- 104) J. Nozawa, A. Okamoto, A. Shibukawa, M. Takabayashi, and A. Tomita, “Two-channel algorithm for single-shot, high-resolution measurement of optical wavefronts using two image sensors,” *Appl. Opt.* **54**, 8644–8652 (2015).
- 105) K. Watanabe and T. Nomura, “Spatially incoherent Fourier digital holography by four-step phase-shifting rotational shearing interferometer and its image quality,” *Opt. Rev.* **24** (accepted).
- 106) E. Hecht, “Group velocity,” in *Optics*, 4th ed. (Addison Wesley, 2002), pp. 296–302, Chap. 7.2.2.
- 107) G. R. Fowles, “Group velocity,” in *Introduction to Modern Optics*, 2nd ed. (Dover Publications, 1975), pp. 13–15, Chap. 1.5.

研究業績

査読付き国際論文誌

- 1) K. Watanabe, M. Ohshima, and T. Nomura, “Simultaneous measurement of refractive index and thickness distributions using low-coherence digital holography and vertical scanning,” *J. Opt.* **16**, 045403 (8 pages) (2014). [selected as **Highlights of 2014**]
- 2) K. Watanabe and T. Nomura, “Recording spatially incoherent Fourier hologram using dual channel rotational shearing interferometer,” *Appl. Opt.* **54**, A18–A22 (2015).
- 3) K. Watanabe and T. Nomura, “Spatially incoherent Fourier digital holography by four-step phase-shifting rotational shearing interferometer and its image quality,” *Opt. Rev.* **24** (accepted).

解説

- 1) K. Watanabe and T. Nomura, “Simultaneous measurement of refractive index and thickness,” in *Lab Talk* (IOP Publishing, 2014).
<http://iopscience.iop.org/journal/2040-8986/labtalk/article/56977;jsessionid=68872B138ABE2D32B58768828C5F7317.c2.iopscience.cld.iop.org>

査読付き国際会議論文

- 1) K. Watanabe and T. Nomura, “Measurement of refractive index distribution by virtual datum plane using low-coherence digital holography,” in *International Workshop on Holography and Related Technologies 2012 Digests*, pp. 81–82 (2012).
- 2) K. Watanabe and T. Nomura, “Refractive index & physical thickness distributions measurement and consideration of dependence of measurement accuracy on scanning interval using low-coherence digital holography,” in *Proceedings of the 2013 IEEE/SICE International Symposium on System Integration* (IEEE, 2013), pp. 586–591.
- 3) K. Watanabe and T. Nomura, “Recording spatially incoherent Fourier hologram using a rotational shearing interferometer,” in *International Workshop on Holography and Related Technologies 2014 Digests*, pp. 72–73 (2014).

- 4) K. Watanabe and T. Nomura, “Self-interference incoherent holography by a dual channel rotational shearing interferometer,” in *Proceedings of The Fourth Japan-Korea Workshop on Digital Holography and Information Photonics*, pp. 90–91 (2014).
- 5) K. Watanabe and T. Nomura, “Recording spatially incoherent hologram using rotational shearing interferometer with a lens for the parallel shear,” in *Proceedings of the 14th Workshop on Information Optics* (IEEE, 2015) Th-P1 (3 pages). **[selected as best student poster award]**
- 6) K. Watanabe and T. Nomura, “Reconstruction of incoherent Fresnel-like hologram by a rotational shearing interferometer,” Proc. SPIE **9659**, International Conference on Photonics Solutions 2015, 96590D (7 pages) (2015). **[selected as best student paper award (oral)]**
- 7) K. Watanabe and T. Nomura, “Incoherent holography to obtain depth information by a rotational shearing interferometer,” Proc. SPIE **9598**, Optics and Photonics for Information Processing IX, 95980D (7 pages) (2015).
- 8) K. Watanabe and T. Nomura, “Incoherent holography by a Michelson type interferometer with a lens for a radial shear,” Proc. SPIE **9867**, Three-Dimensional Imaging, Visualization, and Display 2016, 986711 (6 pages) (2016).
- 9) T. Nomura and K. Watanabe, “Incoherent Fourier digital holography,” in *International Workshop on Holography and Related Technologies 2016 Digests*, pp. 52–53 (2016). **[invited]**
- 10) K. Watanabe, T. Matsuda, and T. Nomura, “Incoherent Fourier digital holography using two rotational shearing interferometers for three-step phase-shifting method,” in *Proceedings of The Sixth Japan-Korea Workshop on Digital Holography and Information Photonics*, pp. 137–138 (2016).

国内学術講演会

- 1) 渡辺果歩, 野村孝徳, “基準面と試料の非平行配置における低コヒーレンスデジタルホログラフィを用いた屈折率分布計測,” 応用物理学会分科会日本光学会情報フォトンクス研究グループ第 10 回関西学生研究論文講演会予稿集, pp. 25–26 (2012).
- 2) 渡辺果歩, 野村孝徳, “基準面と試料の非平行配置における低コヒーレンスディジ

- タルホログラフィを用いた屈折率分布計測のための配置条件の考察,” 第 74 回応用物理学会秋季学術講演会講演予稿集, p. 03-038 (2013).
- 3) 渡辺果歩, 野村孝徳, “低コヒーレンスデジタルホログラフィを用いた試料の 2 次元物理的厚さ・屈折率分布の同時取得,” 日本光学会年次学術講演会 Optics & Photonics Japan 2013 講演予稿集, 14aE3 (2 pages) (2013).
 - 4) 渡辺果歩, 野村孝徳, “回転シアリング干渉計を用いたインコヒーレントフーリエホログラムの取得,” 第 75 回応用物理学会秋季学術講演会講演予稿集, p. 03-075 (2014).
 - 5) 渡辺果歩, 野村孝徳, “2 チャネル回転シアリング干渉計を用いたインコヒーレントホログラフィ,” 日本光学会年次学術講演会 Optics & Photonics Japan 2014 講演予稿集, 6pE3 (2 pages) (2014).
 - 6) 渡辺果歩, 野村孝徳, “回転シアリング干渉計によるインコヒーレント off-axis ホログラムの記録,” 第 76 回応用物理学会秋季学術講演会講演予稿集, p. 03-133 (2015).
 - 7) 渡辺果歩, 野村孝徳, “焦点距離の異なるレンズを用いた回転シアリング干渉計によるインコヒーレントホログラフィ,” 日本光学会年次学術講演会 Optics & Photonics Japan 2015 講演予稿集, P34 (2 pages) (2015).
 - 8) 渡辺果歩, 野村孝徳, “時・空間インコヒーレントデジタルホログラフィ,” 日本光学会ホログラフィック・ディスプレイ研究グループ平成 27 年第 4 回ホログラフィック・ディスプレイ研究会会報 HODIC CIRCULAR (6 pages) (2015). [招待講演]
 - 9) 松田拓也, 渡辺果歩, 野村孝徳, “回転シアリング干渉計を用いた位相シフトインコヒーレントフーリエホログラフィ,” 日本光学会情報フォトンクス研究グループ第 14 回関西学生研究論文講演会予稿集, pp. 47-48 (2016).
 - 10) 渡辺果歩, 野村孝徳, “2 チャネル回転シアリング干渉計を用いた位相シフトインコヒーレントフーリエホログラフィ,” 第 63 回応用物理学会春季学術講演会講演予稿集, p. 03-508 (2016).
 - 11) 渡辺果歩, 野村孝徳, “時・空間インコヒーレントデジタルホログラフィとその計測応用,” 日本光学会情報フォトンクス研究グループ第 17 回情報フォトンクス研究グループ研究会 (秋合宿) 講演予稿集, pp. 19-24 (2016). [招待講演]
 - 12) 松田拓也, 渡辺果歩, 野村孝徳, “回転シアリング干渉計を用いたインコヒーレン

トホログラフィにおける 3 ステップ位相シフト法と 4 ステップ位相シフト法による再生像の評価,” 日本光学会情報フォトンクス研究グループ第 17 回情報フォトンクス研究グループ研究会 (秋合宿) 講演予稿集, p. 54 (2016).

- 13) 渡辺果歩, 野村孝徳, “回転シアリング干渉計によるインコヒーレントホログラフィの再生像倍率,” 日本光学会年次学術講演会 Optics & Photonics Japan 2016 講演予稿集, 2pP19 (2 pages) (2016).
- 14) 松田拓也, 渡辺果歩, 野村孝徳, “回転シアリング干渉計を用いたインコヒーレントホログラフィによる再生像の被写界深度検証実験,” レーザー学会学術講演会第 37 回年次大会, H107aVIII02 (2017).

受賞

- 1) 渡辺果歩, 和歌山大学大学院システム工学研究科長表彰 (2014).
- 2) K. Watanabe, M. Ohshima, and T. Nomura, Highlights of 2014, Journal of Optics, IOP Publishing, European Optical Society (2015).
- 3) 渡辺果歩, 和歌山大学学生表彰 (2015).
- 4) K. Watanabe, Best student poster award for WIO 2015, 14th Workshop on Information Optics (2015).
- 5) 渡辺果歩, 光みらい学生奨励金 (コニカミノルタ科学技術振興財団賞), 日本光学会 (2015).
- 6) K. Watanabe, Best student paper award (oral), The 2nd International Conference on Photonics Solutions (2015).

付録 A 試料に用いたスライドガラスの屈折率の理論値

2.3 節において述べた試料の屈折率の理論値の算出過程を述べる。時間的に低コヒーレントな光源を用いると光源の波長スペクトルが波長幅をもち、複数の波長が用いられるため、屈折率は位相屈折率ではなく群屈折率として得られる。群屈折率 n_g は解析的に

$$n_g = n_p - \lambda_0 \frac{dn_p}{d\lambda_0} \quad (\text{A.1})$$

により計算できる^{106,107)}。ここで、 n_p は波長 λ_0 における位相屈折率である。この式から実験に SLD が光源として用いられたときに計測される群屈折率 n_g の理論値を計算できる。試料に用いたスライドガラスは B270 Superwite[®] である。B270 Superwite[®] の他の波長における位相屈折率の公表値⁹⁹⁾ を Fig. A.1 に示す。それらの値から計算した 4 次の近似曲線を Fig. A.1 に示す。この曲線から実験に用いた SLD の中心波長 685.2 nm における位相屈折率 n_p は 1.519 である。また、 $dn_p/d\lambda_0$ は、681.05 nm から 689.35 nm における位相屈折率より、 $-2.735 \times 10^{-5} \text{ nm}^{-1}$ である。なお、この波長範囲は実験に用いた光源の波長の半値全幅と一致している。したがって、(A.1) 式より群屈折率 n_g の理論値は 1.538 であると計算できる。

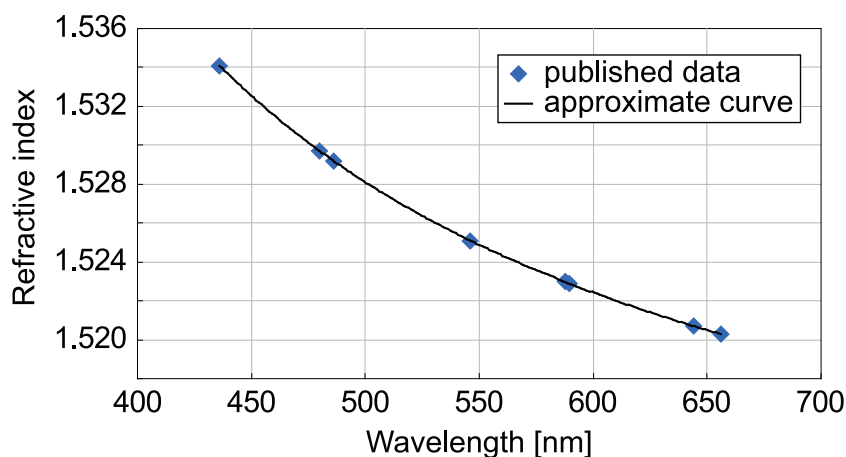


Fig. A.1 公表データに基づく試料の位相屈折率