

イメージングストークス偏光計の高速・高精度化
に関する研究

柴田 秀平

博 士 学 位 論 文

イメージングストークス偏光計の高速・高精度化
に関する研究

**Research of High accuracy and high speed
imaging Stokes polarimeter**

国立大学法人宇都宮大学 大学院工学研究科
システム創成工学専攻

147107K

柴田 秀平

Abstract

本博士論文は高速・高精度なイメージングストークス偏光計を目指し、ポイント計測からイメージング、高速イメージング計測に発展させた計測法を示している。ポイント計測において、位相差板と偏光板を二重回転させた二重回転ストークス偏光計の位相差板の特性の複屈折位相差誤差およびミスアライメント(素子の傾き、初期方位)を補正することで従来の二重回転ストークス偏光計より高精度化を実現した。しかし、計測時間が非常にかかるため、動的な計測が不向きである欠点を解消するために、偏光保存ビームスプリッタを作成し、3つに光線をわけて3つの偏光ビームスプリッタですべてのストークス・パラメータを測定する手法を提案した。この計測法はリアルタイム計測が可能である。しかし、二次元分布のストークス・パラメータを得るには困難である。まず静的な二次元分布ストークス・パラメータをカメラと位相子と偏光子を用いて二重回転ストークス偏光計を提案した。しかし、リアルタイム計測が困難である。そこで回転位相子と偏光アレイ型偏光カメラを用いて動的にすべてのストークス・パラメータを測定し、かつ回転位相子の複屈折位相差のキャリブレーションを可能にした。回転位相子の方位 0° 、 45° 、 90° の検出することで回転位相子の複屈折位相差の自己キャリブレーションが可能となるアルゴリズムを提案する。このストークスイメージング偏光計を用いて、動的な複屈折イメージング偏光計に応用した。偏光子と $1/4$ 波長板により右円偏光をサンプルに入射させ回転 $1/4$ 波長板の方位を 0° 、 45° のとき検出することで従来法の複屈折位相差のダイナミックレンジを拡張した複屈折測定アルゴリズムを提案する。しかし、このアルゴリズムは $1/4$ 波長板の複屈折位相差がキャリブレーションできない。そこで、シミュレーションによりサンプル前後の $1/4$ 波長板に誤差が複屈折測定に影響するか確認する。そして、回転 $1/4$ 波長板の方位 0° 、 45° 、 90° の検出することで回転 $1/4$ 波長板の複屈折位相差の自己キャリブレーションが可能となるアルゴリズムを提案する。このアルゴリズムは右円偏光をサンプルに入射させる $1/4$ 波長板に誤差があるときは精度が低下してしまう。そこで、サンプル前後の位相子を $2:1$ の回転比率で回転させることで2つの位相子の複屈折位相差のキャリブレーションが可能となるアルゴリズムを提案する。波長可変光源によってフォトニック結晶偏光子アレイ型偏光カメラの波長特性を確認する。最後に波長依存性をもつすべての位相子の複屈折位相差のキャリブレーションが可能となったため異なるバンドパスフィルタを用いて分光複屈折計測を提案する。最後にこの偏光カメラを用いたストークス偏光計を用いて微分干渉顕微鏡とフォーカス法の原理を用いた同軸三次元形状計測に発展させた。従来の微分干渉顕微鏡は微分画像しか得られずエッジ強調しかできなかった。また、近年入射の位相を変調させ、位相微分画像を積分させ位相画像を得る手法が提案された。しかし、リアルタイ

ム性に問題があった。そこでこの提案したストークス偏光計を導入し、リアルタイムで微分画像から積分させ位相のリアルタイム計測を可能にさせた。めだかの卵をサンプルさせ、血流の赤血球の形および流れを可視化させた。また、心臓の鼓動などを可視化させた。また、偏光カメラを用いたストークス偏光計を三次元形状計測に導入させた。これはピントボケ情報のコントラストを計測することで三次元形状計測を行う手法で、このコントラストを得るために格子パターンを統制させ位相をずらしていたが、こちらもリアルタイム性に乏しいため、偏光カメラを導入させ、リアルタイムでコントラスト計測を得る。しかし、格子パターンでは偏光カメラで検出できないため、空間光変調器 **SLM** を用いて直線偏光を空間的に回転させた直線偏光パターンを投影させ偏光カメラで検出させている。あらかじめ各高さに応じたコントラストをリファレンスとして得ておき、測定資料のコントラストを比較することで高さ情報を得ることができる。したがって、偏光カメラを用いてリアルタイム同軸三次元形状計測を可能にさせた。

博士論文では以上をまとめたものを報告する。

目次

第 1 章 緒言	1
1. 偏光計測の要求	1
2. 偏光および計測の歴史	1
3. 偏光計測の応用	2
4. 従来の偏光計	2
第 2 章 高精度ポイント偏光計	8
第 3 章 高速・高精度ポイント偏光計	27
第 4 章 高速・高精度イメージング部分偏光計	33
第 5 章 高速・高精度イメージング偏光計	41
第 6 章 高速・高精度イメージング偏光計を用いた応用	57
1. 外力による応力変化計測	57
2. 生体の位相解析	82
3. 三次元形状計測	90
第 7 章 結言	99
参考文献	101
業績	107
謝辞	108

第 1 章 緒言

1 現在の偏光計測の要求

現在の偏光計測の要求は高分解能計測，高精度計測，高速計測および二次元分布計測がある．高分解能計測の領域は回折限界を超えた波長以下(数 nm~数十 nm)の領域での偏光計測が求められており，現在，近接場光を用いた偏光計測が提案されている¹⁻²⁾．高精度計測では現在一般的に提案されている偏光計の精度は数%であるが，求められている精度は 0.1%以下である．光ヘテロダイン方式³⁻⁴⁾や偏光子と位相子の二重回転計測方式⁵⁾および光弾性変調器 PEM⁶⁾による高精度計測が提案されている．高速計測では特にリアルタイム二次元分布計測が求められている．Azzam⁷⁾や川畑⁸⁾が 4 つ検出器を用いた計測法を用いて実現している．しかし，現在までの主流は点計測である．そのため二次元分布計測を得るためには偏光計を走査して計測する必要がある．そのため計測を密にすると計測時間が大幅にかかる．また，サンプルが動的な場合，点計測では空間的にムラが起きてしまう．薄膜計測で用いられているエリプソメトリー^{9,27)}の検出部分や液晶ディスプレイでは見る角度が異なることによる視野角特性の検査¹⁰⁾が求められている．また，複屈折は配向と応力に比例関係であるため，延伸中の高分子フィルム¹¹⁻¹²⁾の配向特性検査や内部応力測定の要求がある．機械工業分野では流動複屈折計測による流体の流れや応力の計測が報告されている¹³⁾．医療分野ではガン細胞の可視化，医療生体におけるコラーゲンなどの配向の測定¹⁴⁻¹⁵⁾，偏光計測から数種類の内臓の区別することができることが報告されている¹⁶⁾．生物分野ではコガネムシの表皮は多層膜構造になっており，表皮を構成している分子が螺旋構造になっており，散乱光は円偏光となる¹⁷⁻¹⁸⁾．しかし，コガネムシがなぜこの特殊な構造を持っているかは解明されていない．

2 偏光および計測の歴史

偏光計測に関する研究は非常に古くから行われている．デンマークの E.Bartholius(1625-1698)が 1669 年に方解石上に線を観察すると二重に見える複屈折現象は発見した⁵⁾．19 世紀初頭にフランスの E.L.Malus(1775-1812)は窓ガラスからの反射光が回転させた方解石上で観察したところ，光強度が変動することを発見し，この光の性質を偏光 (Polarization) と名付けた⁵⁾．フランスの A.J.Fresnel(1788-1827)はこの性質を説明するために光は横波であると仮説し，これによりフレネル反射，複屈折，偏光といった多く光の性質を説明した⁵⁾．数学的な表現についてはアイルランドの

G.G.Stokes (1819-1903)が 1852 年に測定値(光強度)から偏光状態および非偏光を数学的に表記させるためのストークス・パラメータを提案している^{20,25)}。A.Einstein(1879-1955)が光は粒子と波動の二重性¹⁹⁾について発表されるまで注目されなかった。一方、光の波動の理論的観点からアメリカ人の R.C.Jones(1916-2004)は 1941, 1942 年に波動方程式から偏光を電場の方向に区分して表記するジョーンズ・ベクトルおよびジョーンズ行列を提案している^{21-22,25)}。1943 年に H.Mueller(1900-1965)は G.G.Stokes が提案した入射光のストークス・パラメータ関係を取り扱うミュラー行列を提案した⁷⁾。このジョーンズ計算法とストークス・ミュラー計算法の二つの計算法が現在の偏光計算の礎になっている。1959 年に E.Wolf(1922-)は光の伝搬方向に対して直交する振動に対する相互相関から計算されたコヒーレンシー行列を拡張し、偏光の性質を記述している²⁴⁻²⁵⁾。このコヒーレンシー行列によってジョーンズ行列からミュラー行列への変換も可能にさせた²⁶⁻²⁷⁾。この計算法の提案により偏光計測の研究は急速に発展した。

3 偏光計測の応用

機械分野では偏光パラメータの複屈折測定を用いて応力解析が行われている。薄膜計測では多くのエリプソメトリによって様々な薄膜計測が行われている。バイオメディカル分野では偏光解消、複屈折から健康的な皮膚と皮膚ガンの区別や、複屈折測定において紫外線によりコラーゲン分子が切断され、複屈折が低下するため、肌年齢の評価も期待される。また、筋繊維の量で複屈折が異なるため、内臓の区別が容易にできると報告されている。化学薬品分野では円二色性計測することでキラリティの区別ができることが古くから報告されている。

4 従来の偏光計

以上の基本的な偏光理論から様々な偏光計が提案された³⁵⁾。偏光計測の基本的な方法は検光子を回転させる回転検光子法である²⁵⁾。しかし、回転検光子法は円偏光や楕円偏光は測定できない。それに対して、方位が固定された検光子の前に回転された位相子によって変調させ測定する回転位相子法がある²⁵⁾。これは円偏光、楕円偏光が測定することができる。しかし、位相子の複屈折位相差の誤差が測定に影響するため、精度面に問題がある。この問題に対して大谷らは位相子と検光子を 1:3 の回転比率で二重回転させ、位相子の複屈折位相差を自己キャリブレーションさせながらストークス・パラメータを測定している⁵⁾。これらの方法は回転させた検光子もしくは位相子

の方位に応じた光強度をフーリエ変換することで容易にストークス・パラメータを測定している。また、ストークス・パラメータから楕円率、方位および偏光度を算出することができる。また大谷らはフーリエ変換を用いるのではなく半波長板と検光子を二重回転させ2回の位相シフト法を行うことで複屈折測定も可能にした²⁸⁾。野口らは1/4波長板と検光子を二重回転させ位相シフト法による複屈折測定法を報告している²⁹⁾。位相子のキャリブレーションができない問題や動的な現象の測定には不向きであった。ストークス・パラメータの二次元分布計測においては注目すると、岡らは2つの高次位相子によりチャンネルドスペクトルを発生させ、分光イメージングを検出しフーリエ変換によりストークス・パラメータを測定している^{30,31)}。この計測法は機械的、電気的変調が必要なく測定できるが、空間分解能の点で問題がある。また、菊田らは異なる方位を持つ構造複屈折を利用したマイクロアレイと方位が一定の偏光板をCCDセンサーに組み込んだ位相子アレイ型偏光カメラを開発して、ストークス・パラメータを測定している³²⁾。しかし、この位相子アレイ型偏光カメラは位相子の複屈折位相差がキャリブレーションできない。川上らはフォトニック結晶でマイクロ偏光子アレイをCCDセンサーに組み込んだ偏光子アレイ型偏光カメラを開発した³³⁾。また、Viktorらはナノワイアグリッド偏光子アレイを用いて偏光カメラを開発した³⁴⁾。村山らはエアギャップ作り、クロストークを減らすこと可能にさせ、消光比をよくさせた³⁵⁾。しかし、この偏光子アレイ型偏光カメラは円偏光成分 s_3 が測定できないという問題がある。大沼らは川上らのフォトニック結晶のマイクロ偏光アレイをCMOSセンサーに組み込み偏光アレイ型高速度偏光カメラを用いて、回転検光子法の原理によりリアルタイム複屈折測定法を提案している^{36,37)}。しかし、複屈折位相差のダイナミックレンジが狭い問題がある。

表1に過去に提案された偏光計測の測定方法を大まかに区別し、長所と短所をまとめたものを示す。回転機構を利用した機械変調方式、液晶、光弾性変調器もしくは電気光学素子によって位相変調させた電気変調方式、高次位相子を用いてチャンネルドスペクトルを発生させ、フーリエ解析によって測定する波長変調方式、ゼーマンレーザを用いて光ヘテロダイン検出して測定する周波数変調方式、光強度検出器もしくはビームスプリッタの反射等で光軸を変調させ測定する光軸変調方式がある。

Table 1 様々なネットワークス偏光計

方式	測定方法	長所	短所	参考文献
機械変調	回転位相子法	簡易	計測時間・波長分散	[25,38]
	位相子と検光子の二重回転法	高精度	計測時間	[5]
	位相シフト法による計測法	高精度	計測時間	[28]
電気変調	液晶による計測法	中速	温度管理	[40]
	光弾性変調器による計測法	高精度	高価・点計測	[41]
	電気光学素子による計測法	高精度	高価・点計測・高電圧	[42]
周波数変調	光ヘテロダイン法	高精度	高価	[43]
スペクトル変調	チャンネルドスペクトルによる計測法	分光特性	解析が複雑	[44]
空間変調	4ディテクター法を持った計測法	高速・簡易	煩雑	[45,46]
画素変調	偏光カメラによる計測法	高速・二次元分布	楕円率計測不可	[33,34,35]

3 本研究の目的本論文の構成

光学デバイスやコンピュータといったあらゆる性能が向上に伴い、偏光計測も高分解能化、高精度化、高速化、二次元分布計測、波長特性といった情報を測定することが求められてきている。これらの要求に対して、本論文は高精度かつ動的な二次元分布ストークス・パラメータ測定法を提案する。

本論文の章構成を図 1.1 に示す。本論文は 7 章構成となっている。

第 2 章の「高精度ポイント計測」では偏光および複屈折について述べ、はじめに高精度計測に向けて「回転機構の計測原理」を述べ、基本は位相子と検光子を二重回転させてストークス・パラメータを測定する。従来の二重回転は 1:3 の回転比率で位相子の複屈折位相差を同時にキャリブレーションできるが、わずかに回転方位応じた光強度の理論値と測定値が異なることが非常に多い。これはわずかに存在する位相子の直線二色性があると仮説し、位相子と検光子を 3:2 に回転比率で回転させることで、位相子の直線二色性および複屈折位相差をキャリブレーションすることを可能にする方法を提案する。次に「動的な二次元分布計測」に向け、回転位相子と偏光アレイ型偏光カメラを用いてストークス・パラメータの測定原理を述べる。回転位相子の方位 0° 、 45° 、 90° の検出することで回転位相子の複屈折位相差の自己キャリブレーションが可能となるアルゴリズムを提案する。また、「位相子と検光子の二重回転ストークス偏光計」の直線二色性や複屈折位相差のキャリブレーションの結果、ストークス・パラメータ測定の精度検証を示す。原理確認ができた。

第 3 章はリアルタイム計測に向けて「光線分離型による計測原理」を述べる。「光線分離型による計測」の基本原理は偏光保存ビームスプリッタで 3 つの光線に分け、各々の光線を偏光ビームスプリッタで p 偏光、s 偏光に分け光強度を検出することで、ストークス・パラメータを測定する。これはリアルタイム計測が可能であり、非常に測定が簡易で小型な偏光計である。この 3 つの偏光ビームスプリッタを用いたストークス偏光計」の原理確認のための計測結果を示す。「3 つの偏光ビームスプリッタを用いたストークス偏光計」では偏光保存ビームスプリッタの作成および原理を述べ、性能検証を行う。この偏光保存ビームスプリッタと 3 つ偏光ビームスプリッタを用いたストークス偏光計を構築し、ストークス・パラメータの精度検証およびリアルタイム性について述べる。

第 4 章は「高速・高精度イメージング部分偏光計」である偏光カメラによる動的計測について述べる。偏光子アレイ型偏光カメラを用いて動的な二次元分布計測を

試みる．この偏光カメラはナノ周期構造で作成された方位が異なる偏光子アレイが CCD もしくは CMOS センサーでできている．しかし，この偏光子アレイの偏光板の消光比(直線二色性)が悪いため，消光できずに測定誤差が非常に多かった．偏光カメラ前に回転偏光板を置き，回転偏光板の方位に応じた光強度をフーリエ変換することで，各画素の消光比(直線二色性)を求めることができ，キャリブレーションするアルゴリズムを提案する．

第 5 章では回転位相子と偏光子アレイ型偏光カメラを用いて動的にすべてのストークス・パラメータ測定を提案した．かつ回転位相子の複屈折位相差のキャリブレーションを可能にした．まず，位相子と検光子の二重回転方式にカメラで検出することで静的な二次元分布計測を可能にさせた．この手法も同様に直線二色性および複屈折位相差をキャリブレーションでき，二次元分布のストークス・パラメータ測定ができる．コガネムシの表皮の散乱光の円偏光成分を可視化した．原理確認ができたため，実際に回転位相子の方位 0° ， 45° ， 90° の検出することで回転位相子の複屈折位相差の自己キャリブレーションが可能となるアルゴリズムを提案する．このストークスイメージング偏光計を用いて，動的な複屈折イメージング偏光計に応用した．偏光子と $1/4$ 波長板により右円偏光をサンプルに入射させ回転 $1/4$ 波長板の方位を 0° ， 45° のとき検出することで従来法の複屈折位相差のダイナミックレンジを拡張した複屈折測定アルゴリズムを提案する．しかし，このアルゴリズムは $1/4$ 波長板の複屈折位相差がキャリブレーションできない．そこで，シミュレーションによりサンプル前後の $1/4$ 波長板に誤差が複屈折測定に影響するか確認する．そして，回転 $1/4$ 波長板の方位 0° ， 45° ， 90° の検出することで回転 $1/4$ 波長板の複屈折位相差の自己キャリブレーションが可能となるアルゴリズムを提案する．このアルゴリズムは右円偏光をサンプルに入射させる $1/4$ 波長板に誤差があるときは精度が低下してしまう．そこで，サンプル前後の位相子を 2:1 の回転比率で回転させることで2つの位相子の複屈折位相差のキャリブレーションが可能となるアルゴリズムを提案する．波長可変光源によってフォトリソニック結晶偏光子アレイ型偏光カメラの波長特性を確認する．最後に波長依存性をもつすべての位相子の複屈折位相差のキャリブレーションが可能となったため異なるバンドパスフィルタを用いて分光複屈折計測を提案する．

第 6 章は偏光カメラ「動的ストークスイメージングの応用」を用いたストークス偏光計を用いて微分干渉顕微鏡とフォーカス法の原理を用いた同軸三次元形状計測に発展させた．従来の微分干渉顕微鏡は微分画像しか得られずエッジ強調し

かできなかった。また、近年入射の位相を変調させ、位相微分画像を積分させ位相画像を得る手法が提案された。しかし、リアルタイム性に問題があった。そこでこの提案したストークス偏光計を導入し、リアルタイムで微分画像から積分させ位相のリアルタイム計測を可能にさせた。めだかの卵をサンプルさせ、血流の赤血球の形および流れを可視化させた。また、心臓の鼓動などを可視化させた。また、偏光カメラを用いたストークス偏光計を三次元形状計測に導入させた。これはピントボケ情報のコントラストを計測することで三次元形状計測を行う手法で、このコントラストを得るために格子パターンを統制させ位相をずらしていたが、こちらもリアルタイム性に乏しいため、偏光カメラを導入させ、リアルタイムでコントラスト計測を得る。しかし、格子パターンでは偏光カメラで検出できないため、空間光変調器 SLM を用いて直線偏光を空間的に回転させた直線偏光パターンを投影させ偏光カメラで検出させている。あらかじめ各高さに応じたコントラストをリファレンスとして得ておき、測定資料のコントラストを比較することで高さ情報を得ることができる。したがって、偏光カメラを用いてリアルタイム同軸三次元形状計測を可能にさせた。

第7章は結論では論文全体についてまとめを記述する。

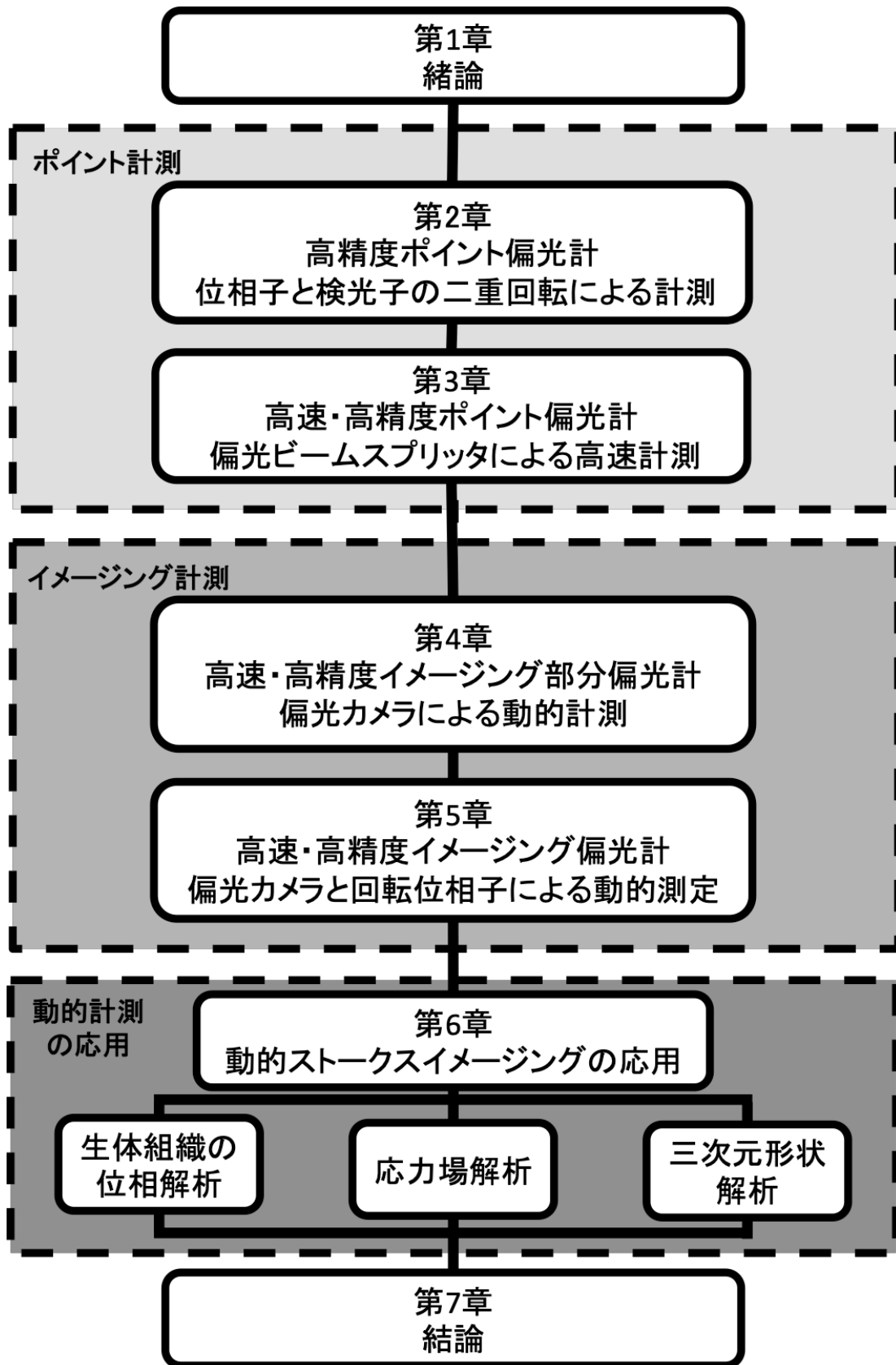


図 1.1 博士論文の構成

第 2 章 高精度ポイント偏光計

2.1 偏光について

2.1.1 偏光

光は横波の電磁波であるので,Maxwell 方程式は,
を満たす.

$$\nabla \times E = \text{rot}E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (2.1)$$

$$\nabla \times H = \text{rot}H = j + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (2.2)$$

$$\nabla \cdot D = \text{div}D = 0 \quad (2.3)$$

$$\nabla \cdot B = \text{div}B = \rho \quad (2.4)$$

ここで E, D, B, H はそれぞれ電場, 磁場, 電束密度, 磁束密度ベクトルを表し, j, ρ はそれぞれ電流密度, 電荷密度を表す⁴⁷⁾.

電磁波が真空中または誘電体を伝搬するとき Maxwell 方程式は,

$$\nabla \times E = \text{rot}E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (2.5)$$

$$\nabla \times H = \text{rot}H = -\frac{\partial D}{\partial t} \quad (2.6)$$

$$\nabla \cdot D = \text{div}D = 0 \quad (2.7)$$

$$\nabla \cdot B = \text{div}B = 0 \quad (2.8)$$

となる.

ここで電束密度 D , 磁場 B は,

$$D = \epsilon_0 E \quad (2.9)$$

$$B = \mu_0 H \quad (2.10)$$

の関係が成り立つ. ここで ϵ_0, μ_0 はそれぞれ真空中の誘電率, 真空中の透磁率である.

上記の Maxwell 方程式である(2.5), (2.6)は

$$\nabla \times E = \text{rot}E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (2.11)$$

$$\nabla \times B = \text{rot}B = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial D}{\partial t} \quad (2.12)$$

となる.

式(2.11), (2.12)から光はお互いに直交な電場と磁場が同位相で進行することがわかる。

Maxwell 方程式(2.11),(2.12)を用いると z 方向に伝搬する光の式は,

$$E = A \exp\{i(\omega t - kz + \varphi)\} \quad (2.12)$$

となる。

ここで a は振幅, i は虚数要素, ω は角周波数, t は時間, k は波数, z は進行方向の位置, φ は位相である。

偏光とは電界が空間的に偏った方向に振動している状態と呼ぶ⁴⁸⁻⁵⁰。 z 方向に伝搬する電界を x, y 成分に分け, それぞれをベクトル式で表すと,

$$E_y = A_y \exp\{i(\omega t - kz + \varphi_y)\} \quad (2.13)$$

$$E_x = A_x \exp\{i(\omega t - kz + \varphi_x)\} \quad (2.14)$$

となる。

ここで x 成分の位相 φ_x と y 成分の位相 φ_y との関係を位相差で表す。

$$\delta = \varphi_y - \varphi_x \quad (2.15)$$

δ は E_x, E_y の位相差である。

z 軸上のある位置に z 軸と垂直な面があると仮定する。その面を振動面と呼び, 振動面上でみた電界の x, y 成分の合成ベクトルの軌跡が偏光状態を表す。偏光状態は電界の x 成分の振幅 A_x と y 成分の振幅 A_y と x, y 成分の電界の位相差 δ によって決定される。位相差 δ が 0 のとき式(2.13), (2.14)は,

$$E_y = A_y \exp\{i(\omega t - kz)\} \quad (2.16)$$

$$E_x = A_x \exp\{i(\omega t - kz)\} \quad (2.17)$$

となり, x, y 成分の電界の位相が揃うため, 電界の合成ベクトルは 1 直線上を動く。図 2.1(a)に示すようにこの偏光状態を直線偏光という。直線偏光の方位は x, y 成分の振幅 A_x, A_y で決まる。常に x, y 成分の振幅 A_x, A_y が 1 のとき位相差 δ が $\pi/2$ のとき式(2.13), (2.14)は,

$$E_y = A_y \exp\{i(\omega t - kz)\} \quad (2.18)$$

$$E_x = A_x \exp\left\{i\left(\omega t - kz + \frac{\pi}{2}\right)\right\} \quad (2.19)$$

となり, 電界の合成ベクトルは円状に回転し, 図 2.1(b)のようにこの偏光状態を円偏光という。また, x 成分に対し, y 成分の位相が $\pi/2$ 進んでいるときは時計回りに回転し, この偏光状態を右円偏光といい, x 成分に対して y 成分が $2/\pi$ 遅れているときは時計

回りに回転し, この偏光状態を左円偏光という. これ以外の振幅 A_x, A_y , 位相差 δ のときは合成ベクトルが楕円形に回転し, 図 2.1(c)に示すようにこの偏光状態を楕円偏光という.

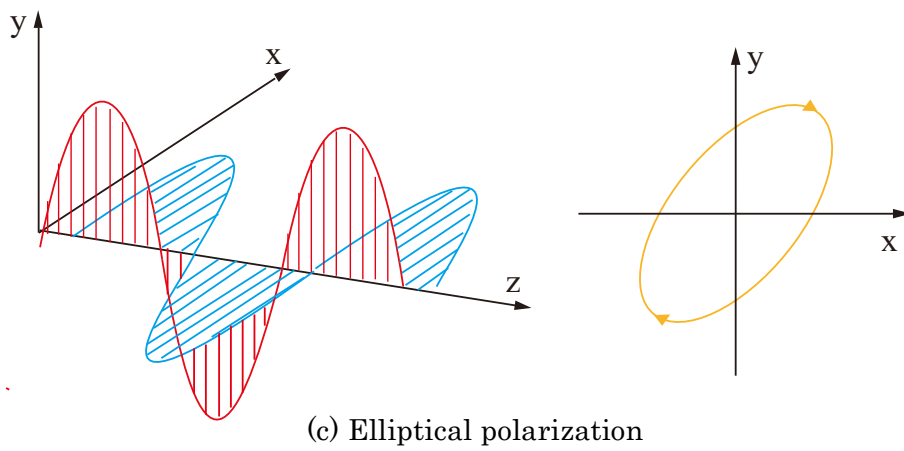
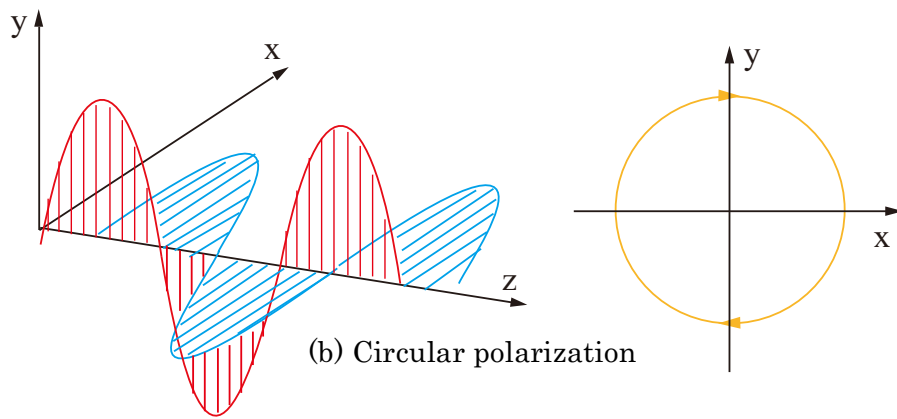
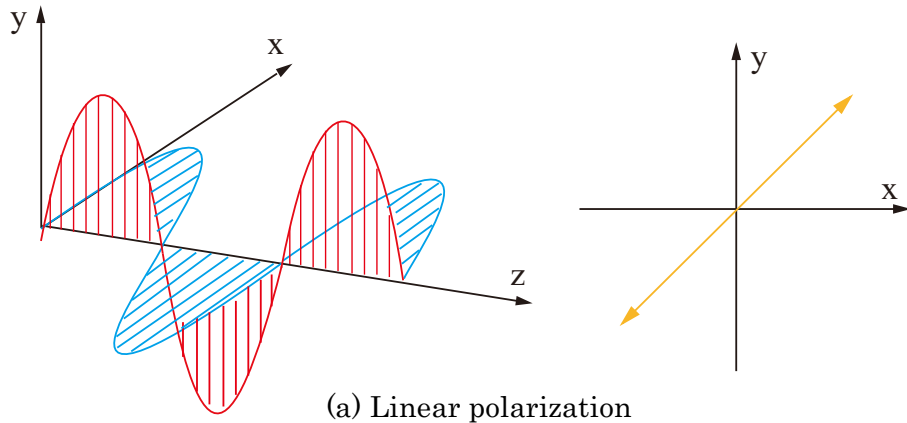


Fig2.1 Polarization

2.1.2 ストークス・パラメータ

偏光状態は4個のパラメータで表すことができる.これらのパラメータをストークス・パラメータという⁴⁸⁻⁵¹⁾.

$$S = \begin{bmatrix} s_0 \\ s_1 \\ s_2 \\ s_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_x E_x^* + E_y E_y^* \\ E_x E_x^* - E_y E_y^* \\ E_x E_y^* + E_x^* E_y \\ i(E_x^* E_y - E_x E_y^*) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_x^2 + A_y^2 \\ A_x^2 - A_y^2 \\ 2A_x A_y \cos \delta \\ 2A_x A_y \sin \delta \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

ここで, s_0 は光強度を表し, s_1, s_2, s_3 はそれぞれ水平直線偏光成分,45°直線偏光成分,右円偏光成分を表す. E_x, E_y はそれぞれ x 方向の電解ベクトル,y 方向の電解ベクトルを表し, A_x, A_y はそれぞれ x 成分,y 成分の振幅を表し, δ は E_x, E_y の位相差を表す.

ストークス・パラメータを実測可能にするために光強度で表すと,

$$S = \begin{bmatrix} s_0 \\ s_1 \\ s_2 \\ s_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_H + I_V \\ I_H - I_V \\ I_{45^\circ} - I_{135^\circ} \\ I_R - I_L \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

となる.

ここで $I_H, I_V, I_{45^\circ}, I_{135^\circ}, I_R, I_L$ はそれぞれ水平直線偏光成分,垂直直線偏光成分,方位45°直線偏光成分,方位135°直線偏光成分,右円偏光成分,左円偏光成分の光強度である.

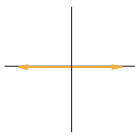
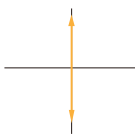
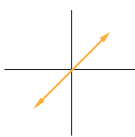
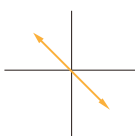
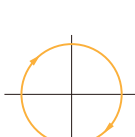
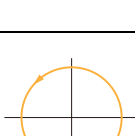
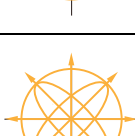
ストークス・パラメータを s_0 で規格化すると,

$$S = \begin{bmatrix} 1 \\ s_1/s_0 \\ s_2/s_0 \\ s_3/s_0 \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

となる.

表 2.1 に代表的な偏光状態とストークス・パラメータの関係を示す. 水平直線偏光は I_H のみ 1 であるため式(2.21)から $[1,1,0,0]$ となり, 垂直直線偏光は I_V のみ 1 であるため式(2.21)から $[1,-1,0,0]$ となる. また, 45°直線偏光は I_{45° のみ 1 であるため式(2.21)から $[1,0,1,0]$ となり, 135°直線偏光は I_{135° のみ 1 であるため式(2.21)から $[1,0,-1,0]$ となり, 右円偏光は I_R のみ 1 であるため式(2.21)から $[1,0,0,1]$ となり, 左円偏光は I_L のみ 1 であるため式(2.21)から $[1,0,0,-1]$ となる. 自然光(ランダム偏光)ではすべての光強度 $I_H, I_V, I_{45^\circ}, I_{135^\circ}, I_R, I_L$ がすべて 1 となり $[1,0,0,0]$ となる.

Table2.1 Stokes parameters of fundamental polarization state

Polarization state	Figure	Stokes parameters
Horizontal linear polarization		$\begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$
Vertical linear polarization		$\begin{bmatrix} 1 \\ -1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$
45°linear polarization		$\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}$
-45°linear polarization		$\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ -1 \\ 0 \end{bmatrix}$
Right circular polarization		$\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$
Left circular polarization		$\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix}$
Random polarization		$\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$

2.1.3 ミュラー行列

ミュラー行列は物体を透過,又は物体表面で反射する光にどのような偏光の変化を

与えるかを物体の偏光特性として 4×4 の行列で表すことができる⁴⁸⁻⁵¹⁾.

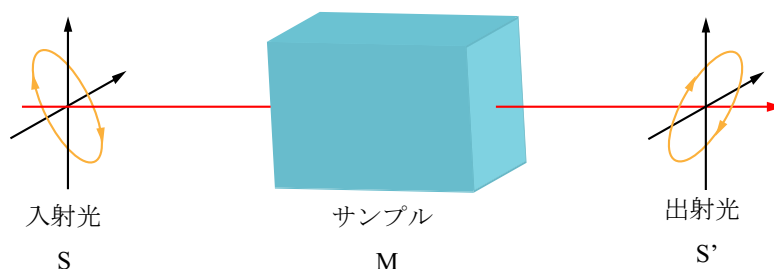


Fig2.2 Relationship between input and output of states of polarization

図 2.2 のようにサンプルのミュラー行列を M , サンプルを透過前後のストークス・パラメータを S, S' とすると,

$$S' = M \cdot S \quad (2.23)$$

$$\begin{bmatrix} S'_0 \\ S'_1 \\ S'_2 \\ S'_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{00} & M_{01} & M_{02} & M_{03} \\ M_{10} & M_{11} & M_{12} & M_{13} \\ M_{20} & M_{21} & M_{22} & M_{23} \\ M_{30} & M_{31} & M_{32} & M_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

式(2.19)のような線形の関係で表せる.したがって入出射光のストークス・パラメータが規定されるとサンプルのミュラー行列が決定される. 表 2.2 に出射光を方位 θ の直線偏光にする偏光子, 方位 θ , 複屈折位相差 δ を持つ位相子, 複屈折位相差 δ が π のときの位相子を半波長板, 複屈折位相差 δ が $\pi/2$ のときを $1/4$ 波長板, 入射光の偏光状態の軌跡を保ちながら, 方位のみ傾ける旋光子, 透過光をランダム偏光にする無偏光板といった代表的な光学素子のミュラー行列を示す.

Table2.2 Mueller matrix of fundamental polarization device

Polarization elements	Mueller Matrix
Polarizer (principal axis θ)	$\frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & \cos 2\theta & \sin 2\theta & 0 \\ \cos 2\theta & \cos^2 2\theta & \sin 2\theta \cos 2\theta & 0 \\ \sin 2\theta & \sin 2\theta \cos 2\theta & \sin^2 2\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$
Retarder (fast axis θ , retardation Δ)	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 - (1 - \cos \Delta) \sin^2 2\theta & (1 - \cos \Delta) \sin 2\theta \cos 2\theta & -\sin \Delta \sin 2\theta \\ 0 & (1 - \cos \Delta) \sin 2\theta \cos 2\theta & 1 - (1 - \cos \Delta) \cos^2 2\theta & \sin \Delta \cos 2\theta \\ 0 & \sin \Delta \sin 2\theta & -\sin \Delta \cos 2\theta & \cos \Delta \end{bmatrix}$
Half wave plate (fast axis θ)	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos 4\theta & \sin 4\theta & 0 \\ 0 & \sin 4\theta & -\cos 4\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}$
Quarter of plate (fast axis θ)	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos^2 2\theta & \sin 2\theta \cos 2\theta & -\sin 2\theta \\ 0 & \sin 2\theta \cos 2\theta & \sin^2 2\theta & \cos 2\theta \\ 0 & \sin 2\theta & -\cos 2\theta & 0 \end{bmatrix}$
Rotator (principal axis θ)	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos 2\theta & \sin 2\theta & 0 \\ 0 & -\sin 2\theta & \cos 2\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$
Depolarizer	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$

2.1.4 複屈折

複屈折とは、2つの屈折率を持つことである。つまり、偏光方向で光の伝播速度が異なることである。図 2.4 は屈折率がそれぞれ n_1, n_2 の複屈折物体を透過したときの様子を示す。図 2.5 は、図 2.4 の偏光面 E_x, E_y ごとに分けて上下に表示したものである。直交する偏光の間には複屈折に応じた複屈折位相差 Δ が生じる⁴⁸⁻⁵¹⁾。

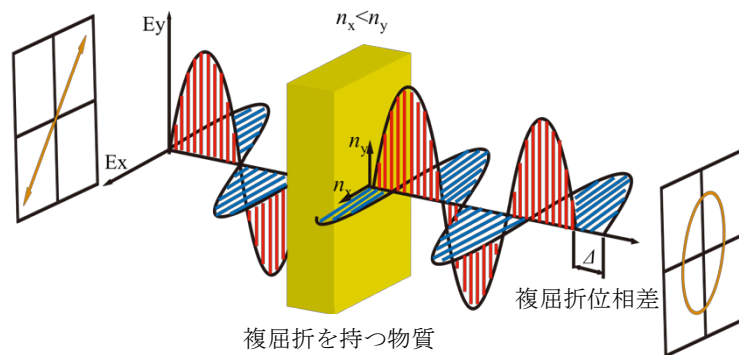


Fig2.4 Birefringence

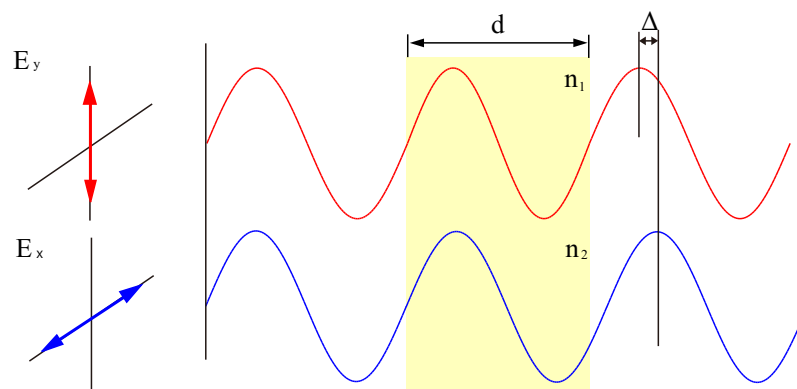


Fig2.5 Principle of birefringence

複屈折 Δn は,

$$\Delta n = n_1 - n_2 \quad (2.25)$$

となる.したがって複屈折位相差 Δ は,

$$\Delta = \frac{2\pi(n_1 - n_2)d}{\lambda} = \frac{2\pi \cdot \Delta n \cdot d}{\lambda} \quad (2.26)$$

となる. ここで d は複屈折性物体の厚さ, λ は波長である.

光の進む速度が速い方位を進相軸, 速度が遅い方位を遅相軸と呼び, 進相軸と遅相軸を総称して複屈折の主軸という. したがって, 複屈折測定は複屈折位相差と主軸方位の決定が要求される.

2.1 高精度ポイント偏光計

位相子と検光子の二重回転ストークス偏光計

光の偏光状態を分析するためのストークス・パラメータを測定するための多くの技術(表1)の中で最も一般的なものの1つは固定偏光子の前に回転リターダを使用している^{25,38)}。この技術の短所は、事前に位相差板の複屈折位相差の較正測定が必要であるため、環境温度の変化または波長の切り替えといった領域では事前較正ができないので使用できない。ストークス・パラメータ測定中のリターダンス変化に対応するために、Tanaka, 他はストークス・パラメータの分光測定⁵⁾のために、回転補償器と検出器の前にある回転アナライザによる二重回転ストークス偏光計を提案している。この方法は、回転補償器のリターダンスを動的に較正することができる。しかし、この較正はより正確な測定のためには十分ではない。なぜならば、このキャリブレーションではモータの分解能よりも小さい方位誤差や回転補償器の軸方向の傾きは考慮されておらずいからである。回転偏光成分を使用する任意の偏光計では、素子の傾きおよび初期配向角などの素子の較正が重要である。ただし、傾きとは、方位角ではなく、光軸に対する角度を意味している。図 2.5 は、標準的な較正手順を用いて、良好な整列状態で我々の二重回転システムによって検出された水平直線偏光の測定値を示す。検出された強度(赤丸)と理想強度(黒線)には差があることがわかります。補償器の軸方向の傾きによって線形の減弱が生じ、一部の雲母の補償器には固有の線形の減弱があることが知られているため、わずかな傾きによって位相差板に直線二色性がわずかに存在するからではないかと仮定する。

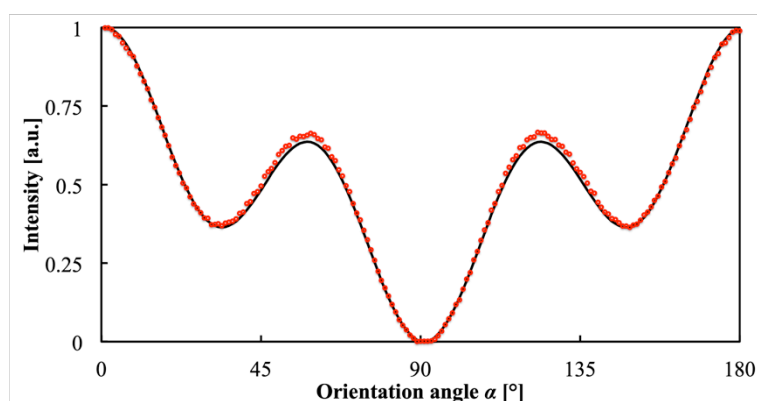


Fig. 2.5 Detected intensity for horizontal linear polarization incident on the dual rotating polarimeter. The black curve indicates the theoretical intensity for an ideal compensator while the red circles indicate measured data.

図 2.6 に示すように、回転位相差板と回転検光子と光強度検出器から構成されている。位相差板は複屈折位相差 δ と軸透過率比 $\gamma = (1 - D) / (1 + D)$ 。ここで、 D は直線二色性である。軸方向の傾き t が増加すると、直線二色性 D が増加する。また、 θ_c と θ_a は位相差板と検光子の初期方位角を表す。位相差板と検光子の二重回転の回転比率 $\alpha:\beta$ である。

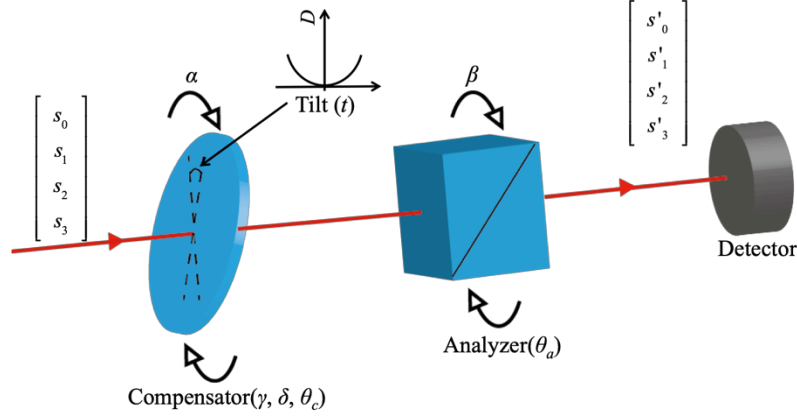


Fig. 2.6 Optical setup of the dual rotating compensator and analyzer polarimeter, where $\alpha - \theta_c = \frac{3}{2}(\beta - \theta_a)$, i.e. the compensator rotates at 3/2 the speed that the analyzer does.

複屈折位相差 δ と軸透過率 γ を持ち、初期方位 θ_c ズレた回転位相差板と初期方位 θ_a ズレた回転検光子のミュラー行列と求める未知のストークス・パラメータ $[s_0, s_1, s_2, s_3]$ を用いて、検光子透過後のストークス・パラメータ $[s'_0, s'_1, s'_2, s'_3]$ を表せる。

$$\begin{bmatrix} s'_0 \\ s'_1 \\ s'_2 \\ s'_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.5 & 0 & 0 \\ 0.5 & 0.5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos 2(\beta + \theta_a) & -\sin 2(\beta + \theta_a) & 0 \\ 0 & \sin 2(\beta + \theta_a) & \cos 2(\beta + \theta_a) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos 2(\alpha + \theta_c) & \sin 2(\alpha + \theta_c) & 0 \\ 0 & -\sin 2(\alpha + \theta_c) & \cos 2(\alpha + \theta_c) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_0 \\ s_1 \\ s_2 \\ s_3 \end{bmatrix}. \quad (2.26)$$

検出される強度は、式 (1) の s'_0 成分から得られる。

$$\begin{aligned}
 I = I_0 [& 1 + a_{2(\alpha-\beta)} \cos 2\{(\alpha - \beta) + (\theta_c - \theta_a)\} + b_{2(\alpha-\beta)} \sin 2\{(\alpha - \beta) + (\theta_c - \theta_a)\} \\
 & + a_{2\beta} \cos 2(\beta + \theta_a) + b_{2\beta} \sin 2(\beta + \theta_a) + a_{2\alpha} \cos 2(\alpha + \theta_c) + b_{2\alpha} \sin 2(\alpha + \theta_c) . \\
 & + a_{2(2\alpha-\beta)} \cos 2\{(2\alpha - \beta) + (2\theta_c - \theta_a)\} + b_{2(2\alpha-\beta)} \sin 2\{(2\alpha - \beta) + (2\theta_c - \theta_a)\}]
 \end{aligned} \quad (2.27)$$

ここで、各周波数の係数 a, b は、

$$\begin{aligned}
a_{2(\alpha-\beta)} &= -\frac{1-\gamma^2}{1+\gamma^2}, & b_{2(\alpha-\beta)} &= -\frac{2\gamma\sin\delta}{1+\gamma^2}s_3, \\
a_{2\beta} &= \left[1 + \frac{2\gamma\cos\delta}{1+\gamma^2}\right]s_1, & b_{2\beta} &= -\left[1 + \frac{2\gamma\cos\delta}{1+\gamma^2}\right]s_2, \\
a_{2\alpha} &= -\frac{1-\gamma^2}{1+\gamma^2}s_1, & b_{2\alpha} &= -\frac{1-\gamma^2}{1+\gamma^2}s_2, \\
a_{2(2\alpha-\beta)} &= \left[1 - \frac{2\gamma\cos\delta}{1+\gamma^2}\right]s_1, & b_{2(2\alpha-\beta)} &= -\left[1 - \frac{2\gamma\cos\delta}{1+\gamma^2}\right]s_2.
\end{aligned} \tag{2.28}$$

理想的な場合には($\gamma = 1$), アライメント誤差なし($\theta_c = \theta_p = 0$)の場合, 理想的な光強度は,

$$\begin{aligned}
I = I_0 \{ & 1 + b_{2(\alpha-\beta)} \sin 2(\alpha-\beta) + a_{2\beta} \cos 2\beta + b_{2\beta} \sin 2\beta \\
& + a_{2(2\alpha-\beta)} \cos 2(2\alpha-\beta) + b_{2(2\alpha-\beta)} \sin 2(2\alpha-\beta) \} ,
\end{aligned} \tag{2.29}$$

入力光のストークス・パラメータは, 光強度 (式 (2.29)) のフーリエ変換によってフーリエ係数から得られる. 同時に、フーリエ係数からの位相差板の複屈折位相差を測定できる.

$$s_1 = \frac{a_{2\beta} + a_{2(2\alpha-\beta)}}{2}, \quad s_2 = -\frac{b_{2\beta} + b_{2(2\alpha-\beta)}}{2}, \quad s_3 = -\frac{b_{2(\alpha-\beta)}}{\sin\delta}, \tag{2.30}$$

$$\delta = \cos^{-1} \frac{a_{2\beta} - a_{2(2\alpha-\beta)} + b_{2\beta} - b_{2(2\alpha-\beta)}}{a_{2\beta} + a_{2(2\alpha-\beta)} + b_{2\beta} + b_{2(2\alpha-\beta)}}. \tag{2.31}$$

位相差板および検光子の初期方位角 (θ_c および θ_a) を推定するには, いくつかの追加手順が必要となる. 検出された光強度(式 (2.27))のフーリエ変換後, 実際に得られたフーリエ係数 A および B は,

$$\begin{bmatrix} A_{2(\alpha-\beta)} \\ B_{2(\alpha-\beta)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos 2(\theta_c - \theta_a) & \sin 2(\theta_c - \theta_a) \\ -\sin 2(\theta_c - \theta_a) & \cos 2(\theta_c - \theta_a) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_{2(\alpha-\beta)} \\ b_{2(\alpha-\beta)} \end{bmatrix}, \tag{2.32}$$

$$\begin{bmatrix} A_{2\beta} \\ B_{2\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos 2\theta_a & \sin 2\theta_a \\ -\sin 2\theta_a & \cos 2\theta_a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_{2\beta} \\ b_{2\beta} \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} A_{2\alpha} \\ B_{2\alpha} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos 2\theta_c & \sin 2\theta_c \\ -\sin 2\theta_c & \cos 2\theta_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_{2\alpha} \\ b_{2\alpha} \end{bmatrix},$$

$$\begin{bmatrix} A_{2(2\alpha-\beta)} \\ B_{2(2\alpha-\beta)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos 2(2\theta_c - \theta_a) & \sin 2(2\theta_c - \theta_a) \\ -\sin 2(2\theta_c - \theta_a) & \cos 2(2\theta_c - \theta_a) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_{2(2\alpha-\beta)} \\ b_{2(2\alpha-\beta)} \end{bmatrix}.$$

である.

水平直線偏光の入力した場合, フーリエ解析を使用して θ_c と θ_a は式 (2.27) の各周波数の位相として計算できる.

$$\theta_a = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{B_{2(\alpha-\beta)}}{A_{2(\alpha-\beta)}} \right), \quad (2.33)$$

$$\theta_c = \frac{1}{2} \left[\frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{B_{2(2\alpha-\beta)}}{A_{2(2\alpha-\beta)}} \right) + \theta_a \right]. \quad (2.34)$$

したがって, モータにより測定された初期方位角 θ_c および θ_a に回転することによって, 位相差板および検光子をアライメントさせることが可能になる. しかしながら, ステッピングモーターの回転分解能以上に初期方位をアライメントできない. さらに精度を高めるために, ステッピングモーターを使用するのではなく, ソフトウェア上で初期方位角に残っている誤差を除去する. 係数 a, b (式 (2.28)) は, 以下の式でフーリエ係数 A, B (式 (2.32)) により算出できる.

$$\begin{bmatrix} a_{2(\alpha-\beta)} \\ b_{2(\alpha-\beta)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos 2(\theta_c - \theta_a) & \sin 2(\theta_c - \theta_a) \\ -\sin 2(\theta_c - \theta_a) & \cos 2(\theta_c - \theta_a) \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} A_{2(\alpha-\beta)} \\ B_{2(\alpha-\beta)} \end{bmatrix},$$

$$\begin{bmatrix} a_{2\beta} \\ b_{2\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos 2\theta_a & \sin 2\theta_a \\ -\sin 2\theta_a & \cos 2\theta_a \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} A_{2\beta} \\ B_{2\beta} \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} a_{2\alpha} \\ b_{2\alpha} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos 2\theta_c & \sin 2\theta_c \\ -\sin 2\theta_c & \cos 2\theta_c \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} A_{2\alpha} \\ B_{2\alpha} \end{bmatrix}, \quad (2.35)$$

$$\begin{bmatrix} a_{2(2\alpha-\beta)} \\ b_{2(2\alpha-\beta)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos 2(2\theta_c - \theta_a) & \sin 2(2\theta_c - \theta_a) \\ -\sin 2(2\theta_c - \theta_a) & \cos 2(2\theta_c - \theta_a) \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} A_{2(2\alpha-\beta)} \\ B_{2(2\alpha-\beta)} \end{bmatrix}.$$

戻り光を防止のため軸上傾斜した位相差板もしくはマイカの位相差板のような透過率比 γ , (直線二色性 D) および複屈折位相差 δ は,

$$\gamma = \sqrt{\frac{1 + a_{2(\alpha-\beta)}}{1 - a_{2(\alpha-\beta)}}} \quad (2.36)$$

$$D = \frac{1-\gamma^2}{1+\gamma^2} = -a_{2(\alpha-\beta)} \quad (2.37)$$

$$\delta = \cos^{-1} \left[\frac{1+\gamma^2}{2\gamma} \cdot \frac{a_{2\beta} - a_{2(2\alpha-\beta)} + b_{2\beta} - b_{2(2\alpha-\beta)}}{a_{2\beta} + a_{2(2\alpha-\beta)} + b_{2\beta} + b_{2(2\alpha-\beta)}} \right] \quad (2.38)$$

と表せる.

同時に求める入射光のストークス・パラメータも

$$s_1 = \frac{a_{2\beta} + a_{2(2\alpha-\beta)}}{2} \quad s_2 = -\frac{b_{2\beta} + b_{2(2\alpha-\beta)}}{2} \quad s_3 = -\frac{1+\gamma^2}{2\gamma \sin \delta} b_{2(\alpha-\beta)} \quad (2.39)$$

表せる.

したがって、ストークス・パラメータ測定をしながら複屈折位相差と直線二色性を同時キャリブレーション可能となる.

図 2.7 は、提案された較正方法を評価するために使用された機器レイアウトを示す. キセノンアークランプ (450nm~750nm) に回折格子走査格子によるスペクトル調整された単色照明, Glan-Thompson 偏光子と 1/4 波長板を組み合わせた円偏光子, サンプル, および二重回転ストークス偏光計で較正されている. 4 分の 1 波長板および検光子は、分解能 0.02° のステッピングモータによって回転される. 位相差板と検光子の回転速度の比は 3 : 2 です. 検出器はシリコン PIN フォトダイオードである.

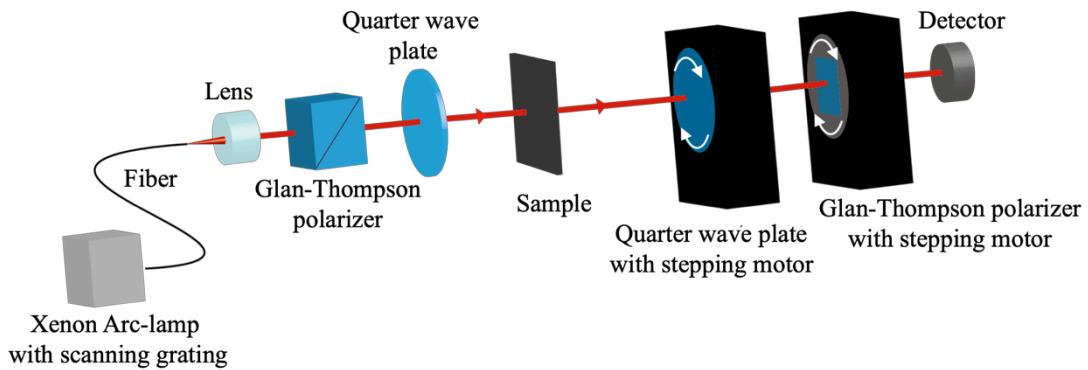


Fig. 2.7 Measurement setup

最初に、初期方位の較正方法がどれだけ良好に推定できるかを検証する. 図 3.2 に初期方位の測定結果を示す. 図 2.8 (a) は、検光子の初期方位角 2° に固定し、位相差板の初期方位角を 0° から $\pm 1^\circ$ 、 $\pm 2^\circ$ 、および $\pm 3^\circ$ にシフトさせて、各初期方位を求

めている. 図 2.8 (b) は、検光子の初期方位角が 0° から $\pm 1^\circ$ 、 $\pm 2^\circ$ 、および $\pm 3^\circ$ にシフトさせて、位相差板の初期方位角を 2° に固定させて、角初期方位角の測定結果を示す. モータ自体は 0.02° の分解能に制限されているので、測定 of x 軸の位置は 0.02° より良い精度で確認することはできません. 各 x 軸の位置について 20 回測定した標準偏差を用いて、校正精度を 0.002° と推定する.

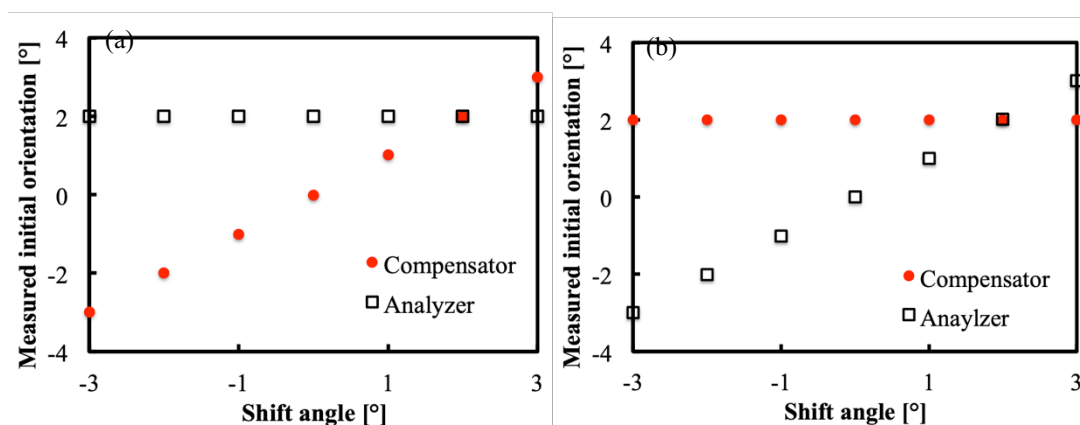


Fig. 2.8 Initial orientation measurement results of (a) compensator shift, (b) analyzer shift.

位相差板の軸方向の傾斜のキャリブレーションの利点を実証するために、位相差板の軸方向傾斜角を 0° から 30° に傾斜させたときの、提案したキャリブレーション方法で各傾斜角において複屈折位相差および直線二色性を測定した結果と、Axoscan Mueller マトリックス偏光計⁵³⁾で測定した結果と比較した. 図 2.9 に示すように、傾斜角度が増加すると複屈折位相差および直線二色性が増加することがわかる. 傾斜角度が増加するにつれて、位相差板の直線二色性が Axoscan Mueller マトリックス偏光計の値と近い値が得られた.

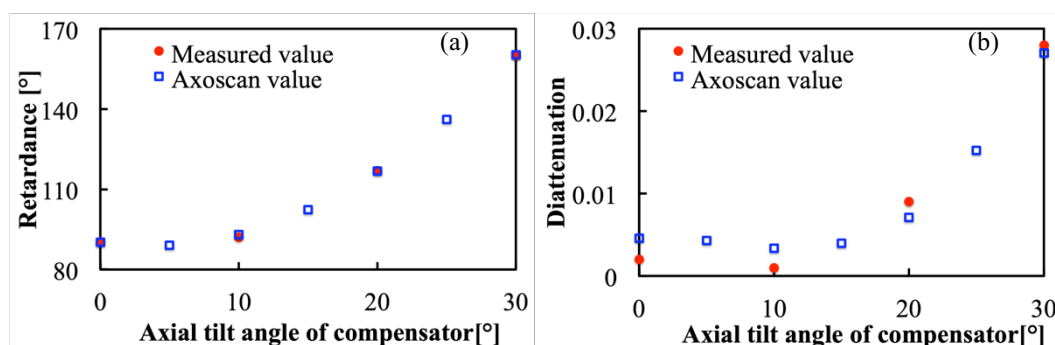


Fig. 2.9 The measurements of (a) the retardance and (b) the diattenuation by changing the axial tilt angle of the compensator. The red circles are

measurements by our calibration method, while the blue points are measurements by the Axoscan polarimeter.

同時較正の利点を実証するために、入射光の波長またはペルチェ素子を用いて偏光計の周囲の外部温度によって複屈折位相差が変化する 2 つ環境での測定結果を示す。図 2.10 は、450nm から 750nm への波長の変化に関する複屈折位相差および直線二色性を示す。入射偏光状態は垂直直線偏光である。図 2.10 (b) の 2 つの点線の曲線は、提案されたキャリブレーション法による結果および Axoscan システムによって測定された結果に 3 次多項式をフィッティングすることによって算出している。波長によって複屈折位相差と直線二色性が共に減少します。次の測定 (図 2.11) は、複屈折位相差を温度 20°C~30°C の関数として示し、キャリブレーションされた複屈折位相差は温度とともに線形の減少し、一方、減縮は変化しない。石英の熱抵抗係数の設定値は $\frac{\Delta\delta}{\Delta T} \approx -1.0 \times 10^{-4} / ^\circ\text{C}$ であり^{54,55)}、これを図 2.11 の黒線で示す。

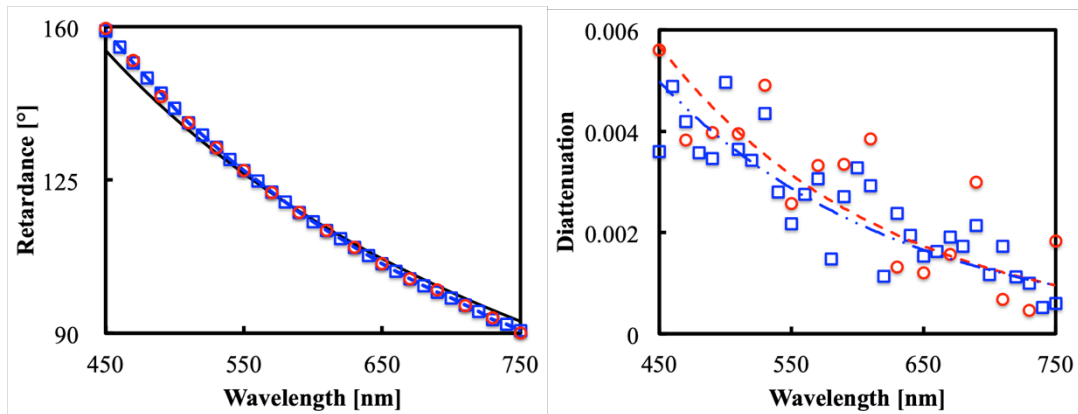


Fig. 2.10 The measurements of (a) the retardance and (b) the diattenuation by changing, the wavelength of incident light. The red circles are measurement by our calibration method, while the blue points are measurement by the Axoscan. The black line is the theoretical curve. In (b), two third-order polynomials are fitted to each set of measurements.

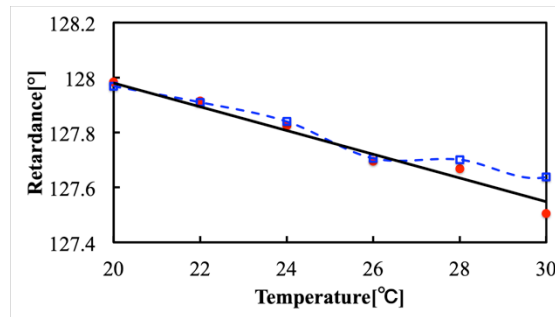


Fig. 2.11 The measurements of the retardance by changing temperature. The red circles are measurement by our calibration method, while the blue points are measurements by the Axoscan. The black line shows the slope $\frac{\Delta\delta}{\Delta T} \approx -1.0 \times 10^{-4} / ^\circ\text{C}$.

表 2.1 に水平直線偏光と 45° 直線偏光および右円偏光を測定した結果を示す. 直線偏光はグラントムソン偏光子を用いている. 右円偏光はグラントムソン偏光子と水晶の $1/4$ 波長板を用いて測定している. pin フォトダイオードで検出した光強度の検出回数は $\omega = 72$ 回で, このストークス・パラメータ計測を 20 回平均している. ストークス・パラメータの誤差は 0.003 で得られた. また, 同時キャリブレーション値である位相子の直線二色性および複屈折位相差も測定することができる. しかし, 円偏光を測定するとき複屈折位相差は測定することができない. なぜならば, 円偏光 $[1, 0, 0, \pm 1]$ もしくは円部分偏光 $[1, 0, 0, \pm \text{CDOP}]$ のときは複屈折位相差を算出する周波数成分のフーリエ係数が 0 になるためである. ただし, CDOP は円偏光度である. この場合は初期方位誤差を測定するときに求めておいた複屈折位相差を用いることで解決する.

Table 3.1 The results of Stokes parameters of typical polarization states

	Stokes parameters	Retardance	Diattenuation
Horizontal linear polarization	$\begin{bmatrix} 1 \\ 1.000 \\ 0.003 \\ 0.000 \end{bmatrix}$	93.17°	0.024
45° linear polarization	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0.007 \\ 0.999 \\ 0.003 \end{bmatrix}$	93.77°	0.028
Right circular polarization	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0.003 \\ 0.001 \\ 0.997 \end{bmatrix}$		0.020

図 2.12 に光強度検出回数 $\omega = 18, 36, 72$ 回で水平直線偏光のストークス・パラメータを 20 回測定した結果を示す。得られたばらつきは $\omega = 18, 36, 72$ 回のそれぞれ 0.001, 0.0008, 0.0007 得られた。非常に高精度で測定することができた。

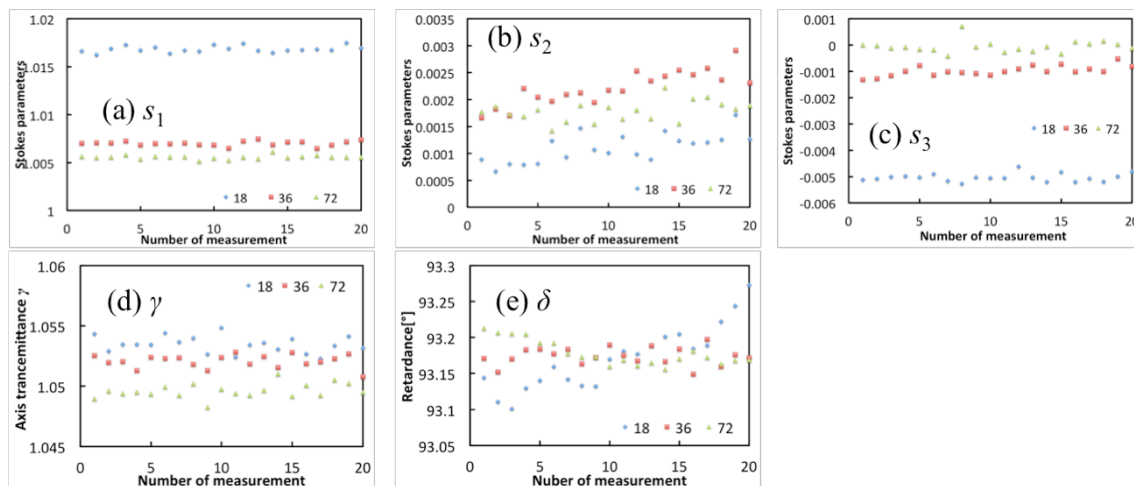


Fig. 2.12 The dispersion in this Stokes parameters measurement

このキャリブレーションの最大の利点を示すために、不十分なアライメントでのストークス・パラメータ測定を実証する。回転位相差板および検光子の傾きを 5° に設定し、位相差板および検光子の初期方位角をそれぞれ 2.91° および 5.02° に設定した。図 2.13 は、 22.5° に配向された固定偏光子の後ろに回転する $1/4$ 波長板からなるサンプルを構成することによってなされた入力偏光状態の測定を示す。この測定では、キャリブレーションされた直線二色性は 0.006、複屈折位相差は 127.78° であり、位相差板および検光子の初期方位角は 2.912° および 5.018° が得られた。

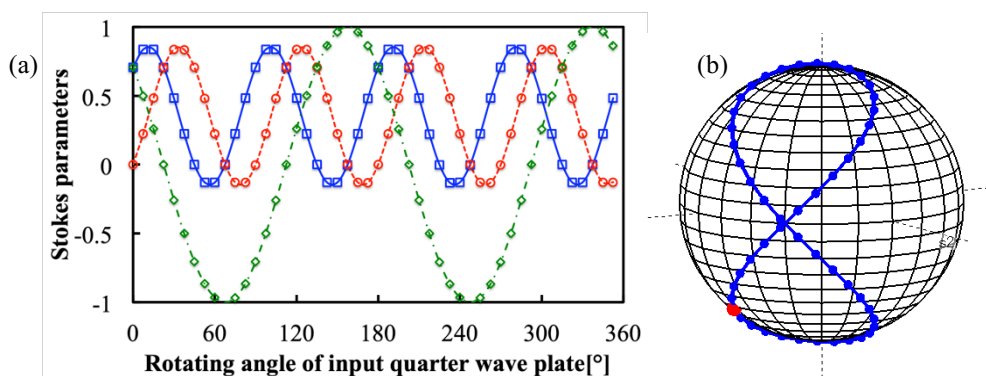


Fig. 2.13 The measurements of the Stokes parameters produced by a sample that consists of a rotating quarter wave plate behind a fixed polarizer oriented at 22.5° . In both (a) and (b), the circles are measurements, while the curves

indicate theoretical values calculated by Mueller calculus and Stokes parameters of this condition. The blue, red, green colors are for s_1 , s_2 and s_3 . In (b), the measurements are mapped to the Poincare sphere.

最後に、熱損傷ポリマー偏光子を回転位相差板として用いたときのストークス・パラメータ測定した。この損傷した偏光子は、線形リターダンスおよび二次減衰パラメータを持つ。表 2.2 は提案法と位相差の直線二色性がゼロと仮定したときの結果（Tanaka の提案法⁵⁾）とを比較したものである。熱損傷したポリマー偏光子を Axoscan 偏光計を用いて測定する。この測定では、偏光子とバビネソレイユ補償器を使用して生成された楕円率 0.5 と軸方位 0° の楕円入力偏光状態[1,0.86,0.05]を入射させる。Tanaka のアルゴリズム⁵⁾では、ストークス・パラメータは大きな誤差を示すが、我々の方法は正確な結果を得られる。

Table 2.2 Measurements of a heat-damaged polymer polarizer

	Stokes parameters	Retardance	Diattenuation
Axoscan	n/a	52.28°	0.46
Tanaka's method[2]	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0.832 \\ 0.054 \\ 0.331 \end{bmatrix}$	67.03°	n/a
Proposed method	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0.845 \\ 0.032 \\ 0.472 \end{bmatrix}$	52.21°	0.47

第3章 高精度・高速偏光計解析

3つの偏光ビームスプリッタを用いたストークス偏光計

2.1 で述べた回転機構による解析は高精度にストークス・パラメータ測定可能であるが、回転機構が必須なため、大きな装置となり、また、高速計測が困難である。そこで、2.2 章では幾何学的に偏光を変調させることにより、機械および電気制御器がないコンパクトな高速ストークス・パラメータ測定法について述べる。

図 3.1 は、入射光のストークス・パラメータ $[s_0, s_1, s_2, s_3]$ のリアルタイム測定のための光学系を示す。入射光の偏光を保持しながら 3 方向分離するビームスプリッタ(3WS)、偏光ビームスプリッタ、および 3 つの出力光のそれぞれの光強度を検出する検出器ペアから構成されています。

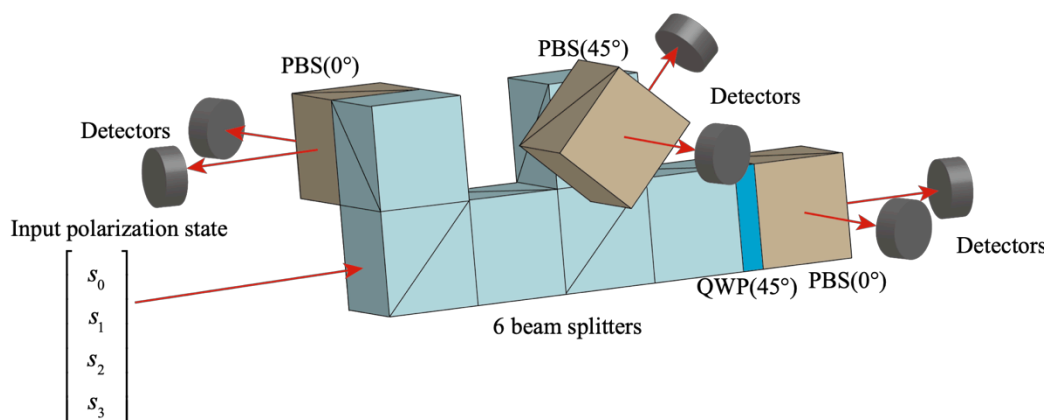


Fig. 3.1 The optical setup of the real-time Stokes polarimeter.

はじめに、3 つの出力光における偏波状態 (SOP) が入射光の SOP と同一を保ちながら、単一の入射光を 3 つに分割する新しいビーム分解法の概要を示す。図 3.2 は 3 つの通常のビームスプリッタを使用して偏光状態を維持しながら、2 つのビームを分離する方法を示す。入射光の電波の振幅 E_x, E_y は、第 1 のビームスプリッタによる透過または反射による直線二色性 $D_1 = (p_1 - q_1) / (p_1 + q_1)$, $D_2 = (p_2 - q_2) / (p_2 + q_2)$, および、複屈折位相差 δ_1, δ_2 が変化する。 p と q は x 軸透過率, y 軸透過率である。それぞれ 90° 回転した第 2, 3 のビームスプリッタは、第 1 のビームスプリッタとほぼ同じ偏光特性を有する場合(透過モードでは $p_1 \approx p_3, q_1 \approx q_3, \delta_1 \approx \delta_3$ 反射モードでは $p_2 \approx p_4, q_2 \approx q_4, \delta_2 \approx \delta_4$), 透過モードでは $D_1 - D_3 = (p_3 q_1 - q_3 p_1) / (p_3 q_1 + q_3 p_1) \approx 0, \delta_1 - \delta_2 \approx 0$ となり、反射モードでは $D_2 - D_4 = (p_4 q_2 - q_4 p_2) / (p_4 q_2 + q_4 p_2) \approx 0, \delta_2 - \delta_4 \approx 0$ となる。したがって、第 1 のビームスプリッタによって誘起される偏光特性は、第 2 のビームが 90° 回転した第 2 のビームスプリッタによって相殺される。

これらの2つを直列に接続して入射光を3つに分離することができます. 3つの出射光は元の入射光と同じ偏光状態を維持する. このアセンブリを“Three-Way-Splitter (3WS)”と呼びます.

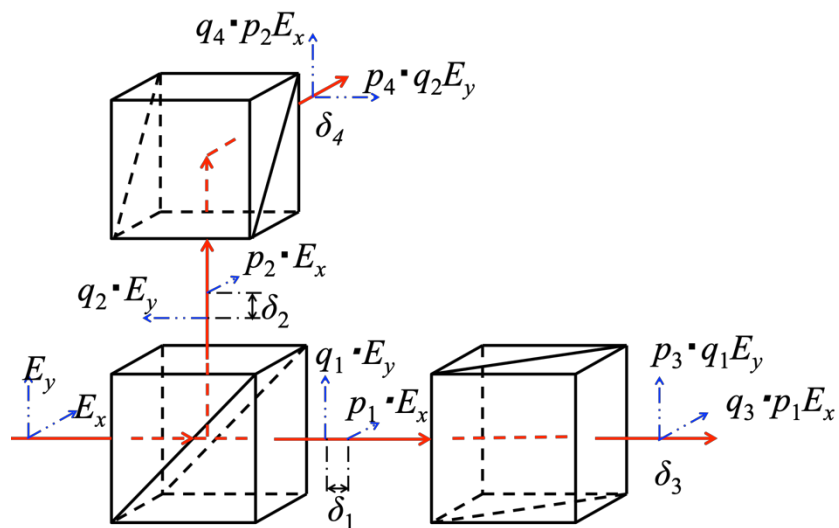


Fig. 3.2 Concept for maintaining the input polarization while dividing the light into two beams.

次に, 図 3.3 は 3WS から分割された 3つの光線後に 1つずつ設定される 3つの偏光ビームスプリッタ (PBS) と 6つの検出器要素が入射光の偏光状態 SOP を測定するためにどのように使用されるかを示す.

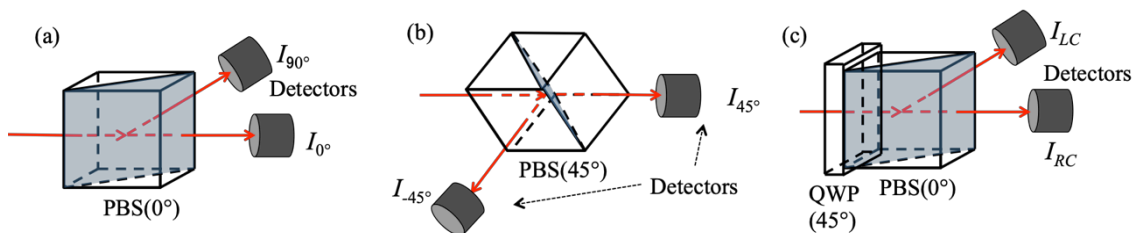


Fig. 3.3 The optical setup for Stokes parameter measurement using a polarized beamsplitter and detector pair oriented at (a) 0° to split horizontal and vertical polarizations to measure s_1 , (b) 45° to split the two states needed to measure s_2 , and (c) 0° in combination with a quarter wave plate oriented at 45° for measuring s_3 .

ここで, 偏光ビームスプリッタごとに透過率と反射率が等しく, および各検出器のゲインが同じであると仮定すると, 規格化された入射光のストークス・パラメータは,

$$s_1 = \frac{I_{0^\circ} - I_{90^\circ}}{I_{0^\circ} + I_{90^\circ}}, \quad s_2 = \frac{I_{45^\circ} - I_{-45^\circ}}{I_{45^\circ} + I_{-45^\circ}}, \quad s_3 = \frac{I_{RC} - I_{LC}}{I_{RC} + I_{LC}}, \quad (3.1)$$

と表せる。ここで、 I は各検出器で検出するそれぞれの光強度である。

現実的なモデルでは、偏光ビームスプリッタは異なる透過率 α_i および反射率 β_i を有し、各検出器のゲイン k_i および k_i' は異なるため、それらを較正する必要がある。 $(i=1, 2, 3)$ はそれぞれ s_1, s_2, s_3 を表す) α_i, β_i, k_i および k_i' を 1 つの方程式に結合すると、決定する必要がある 3 つの合計キャリブレーションパラメータ g_i を定義する。

$$g_i = \frac{k_i \cdot \alpha_i}{k_i' \cdot \beta_i}. \quad (3.2)$$

g_i を測定するために 22.5° の直線偏光をストークス偏光計に通すことができる。 g_i パラメータは、

$$g_1 = \frac{1-s_1}{1+s_1} \cdot \frac{I_0}{I_{90}} = \frac{\sqrt{2}-1}{\sqrt{2}+1} \cdot \frac{I_0}{I_{90}}, \quad g_2 = \frac{1-s_2}{1+s_2} \cdot \frac{I_{45}}{I_{-45}} = \frac{\sqrt{2}-1}{\sqrt{2}+1} \cdot \frac{I_{45}}{I_{-45}}, \quad g_3 = \frac{1-s_3}{1+s_3} \cdot \frac{I_{RC}}{I_{LC}} = \frac{I_{RC}}{I_{LC}} \quad (3.3)$$

である。

最後に、較正パラメータ g_i を用いて規格化されたストークス・パラメータは、

$$s_1 = \left(\frac{\frac{1}{g_1} \frac{I_{0^\circ}}{I_{90^\circ}} - 1}{\frac{1}{g_1} \frac{I_{0^\circ}}{I_{90^\circ}} + 1} \right), \quad s_2 = \left(\frac{\frac{1}{g_2} \frac{I_{45^\circ}}{I_{-45^\circ}} - 1}{\frac{1}{g_2} \frac{I_{45^\circ}}{I_{-45^\circ}} + 1} \right), \quad s_3 = \left(\frac{\frac{1}{g_3} \frac{I_{RC}}{I_{LC}} - 1}{\frac{1}{g_3} \frac{I_{RC}}{I_{LC}} + 1} \right) \quad (3.4)$$

で表せる。

入力偏光状態を維持するのに必要な理想的な複屈折位相差(ゼロ)と理想的な直線二色性(ゼロ)を達成することがどれほど近いかを見るために、3WS の偏光特性を測定する。図 3.4 は Axoscan Mueller マトリックス偏光計による 3WS の複屈折位相差 $\delta(\lambda)$ と直線二色性 $D(\lambda)$ の分光測定を示しており、 $\delta(\lambda)$ と $D(\lambda)$ はゼロに近い値が得られた。

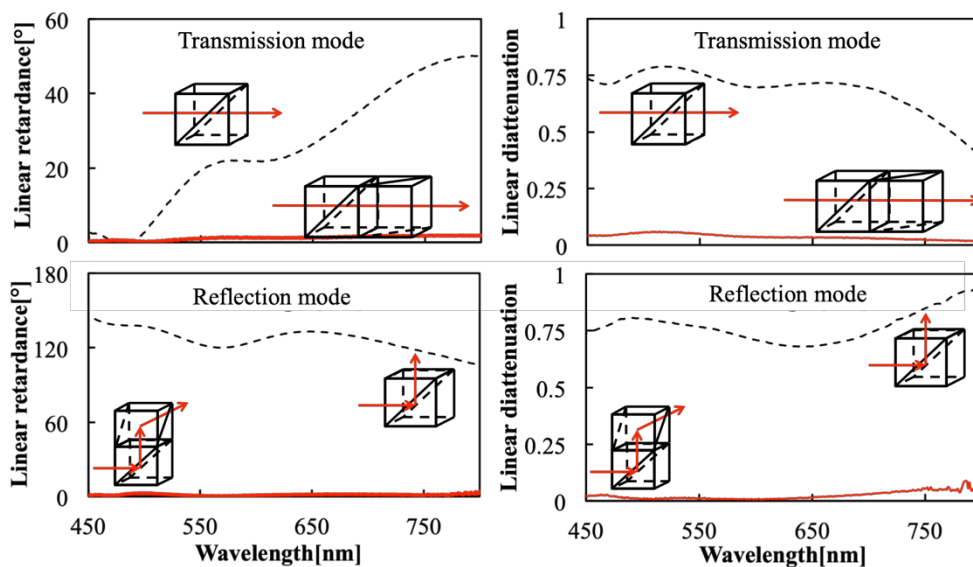


Fig. 3.4. The measurements of beamsplitter polarization properties by the Axoscan polarimeter. The black dashed curves indicate the values after the first beamsplitter, while the red curves indicate the values after the combination of two beamsplitters.

後述の実験では、 $\lambda = 633\text{nm}$ の光源を使用しているため、図 3.4 の測定から複屈折位相差と直線二色性を抜き出し、3WS によって起因される δ と D の非理想的な挙動が偏光状態に及ぼす影響をシミュレーションした (図 3.5) .すべての入射光の偏光状態について、規格化されたストークス・パラメータ測定誤差は、 s_1 が 0.033 未満、 s_2 が 0.046、および s_3 が 0.042 未満であることがわかる。これらの誤差は、残留直線二色性および複屈折位相差をキャリブレーションすることによってさらに誤差は低減することができる。

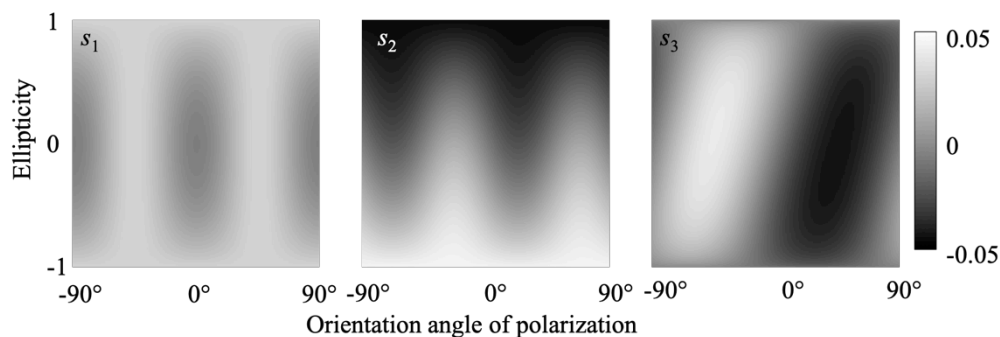


Fig. 3.5. Simulation of the impact that the residual retardance and diattenuation of the 3WS will have on the measurement of the Stokes

parameters at $\lambda = 633\text{nm}$. Plus/minus ellipticity indicates right/left-handed.

The image grayscale indicates the error in the normalized Stokes parameters.

これらの残留値をキャリブレーションするために、ストークス・パラメータ測定は図 3.6 の値を代入することで可能にする。残留値をととても小さいと仮定すると ($D_{si} \times D_{si} \approx 0$, $\sin\delta_{si} \approx \delta_{si}$, $\cos\delta_{si} \approx 1$), キャリブレーションされた規格化されたストークス・パラメータ s'_i は

$$s'_1 = \frac{s_1 - D_{s1}}{1 - s_1 D_{s1}}, \quad s'_2 = s_2 + \frac{D_{s2} s_1 s_2}{1 - s_1 D_{s1}} - \delta_{s2} s_3, \quad s'_3 = s_3 + \frac{D_{s3} s_1 s_3}{1 - s_1 D_{s1}} + \delta_{s3} s_2. \quad (3.4)$$

で表される。ここで、 s_1, s_2, s_3 は式 (2.43) で測定した値であり、 D_{s1}, D_{s2}, D_{s3} は図 3.4 の残留直線二色性であり、 δ_{s2} と δ_{s3} は図 3.8 の残留複屈折位相差を表す。ただし、完全に同じ偏光特性を持つビームスプリッタを準備するできた場合はこのキャリブレーションは必要無くなります。

図 3.6 は、提案ストークス偏光計を評価するために使用された装置レイアウトを示す。波長 632.8nm の HeNe レーザー、偏光子と 1/4 波長板を組み合わせた円偏光子 (Axoscan 偏光計で測定した実際のリターダンス 90.3°) サンプルによって、入力偏光状態を生成し、提案されたストークス偏光計によって測定される (偏光計内部の QWP の実際のリターダンスは Axoscan 偏光計で測定して 89.9° である)。2 つの QWP における小さなリターダンス誤差 (それぞれ 0.3° と 0.1°) による規格化されたストークス・パラメータ測定への影響は 0.0005 未満であるため、A/D 変換器の電気ノイズによる誤差よりも小さいので考慮しない。偏光計の測定速度は、6 個のシリコン PIN フォトダイオードで使用される A/D 変換器の速度 (16 ビット、 10^6 サンプル/秒) によって決まります。

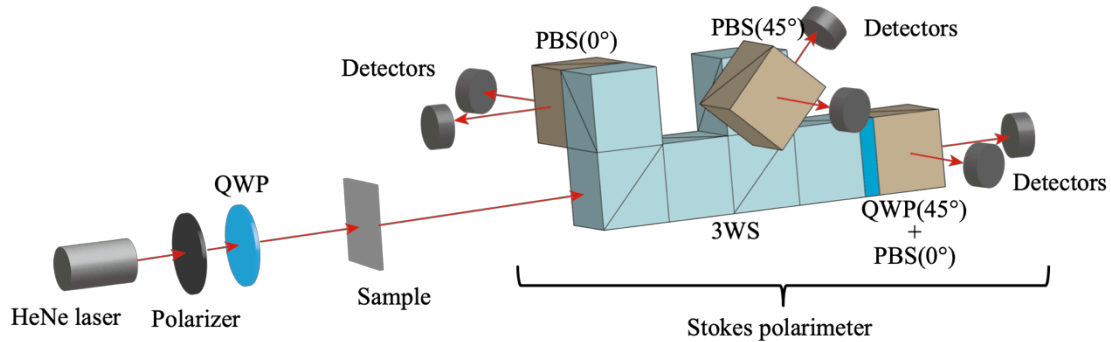


Fig. 3.6. Measurement setup.

提案する偏光計の性能を評価するために、回転する 1/4 波長板 (図 3.7 (a)) と回転偏光子 (図 3.7 (c)) によって生成された入力偏光状態のストークス・パラメータを測定する。この測定では、式 (3.2) で求めた校正パラメータ ($g_1 = 1.25$ 、 $g_2 = 0.89$ 、 $g_3 = 1.07$) を使用して測定する。結果は、3WS の残留複屈折位相差および直線二色性によって引き起こされる小さな誤差がある (図 3.7 (b)、(d) の曲線を参照)。これらの残留値を式 (5) で校正し、補正後の誤差を 0 に近づいた (図 3.11 (b)、(d) のドットを参照)。

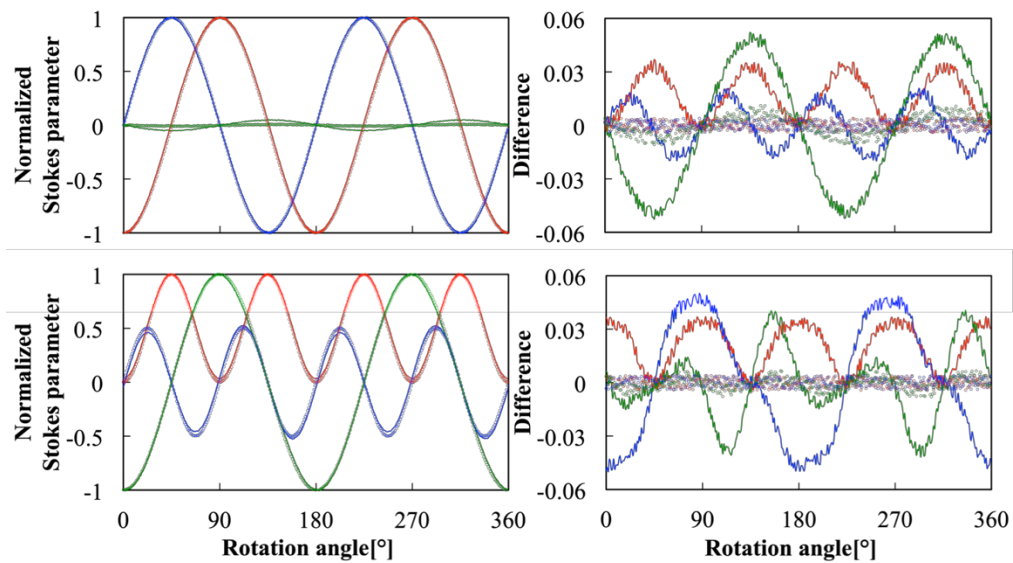


Fig. 3.7. The measured normalized Stokes parameters of (a) a rotating analyzer and (c) a rotating quarter wave plate. (b) and (d) are differences between measured and ideal normalized Stokes parameters. The circles are corrected measurement by Eq.(5), while curve are uncorrected measurement by Eq.(4). The colors indicate red for s_1 , blue for s_2 , and green for s_3 , respectively.

第4章 高精度・高速イメージング部分偏光計 偏光カメラを用いた部分ストークス偏光計

現在，偏光子の消光比の低い場合、光を消光することができないため、偏光計や干渉計の計測精度に問題がある．特に図 4.1 に示すような画素ごとに方位が異なった偏光板が組み込まれた偏光カメラの消光比は，従来のワイヤーグリッド偏光子やフィルム性の偏光板に比べて遥かに低い．現在，この偏光カメラの偏光板はフォトニクス結晶のナノ周期構造もしくはアルミワイヤーのナノ周期構造によって実現している^{1,2)}．

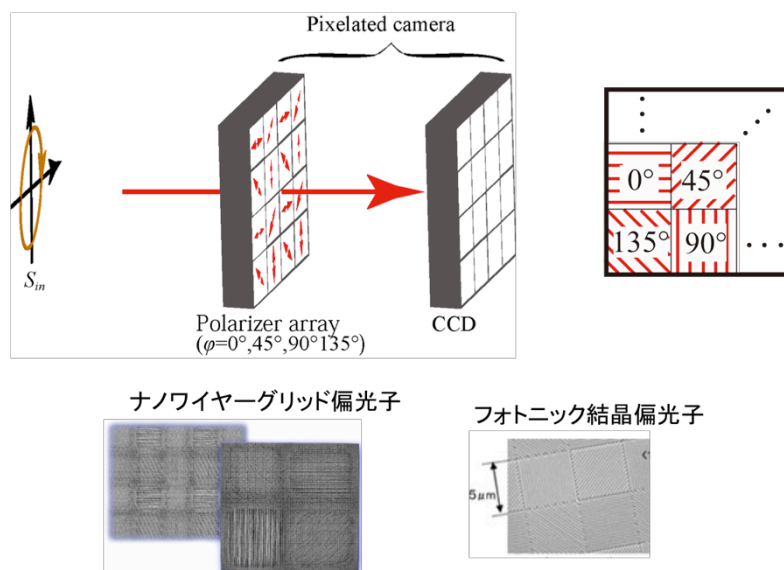


Fig.4.1 Polarization camera

偏光板が画素ごとに配置されているため，一つ一つの画素にナノ周期構造のエッジが画素の4辺に存在するという意味になり，検出されるべき直線偏光と混在してエッジの部分で起こる散乱や異なった偏光状態が検出され，偏光度が下がって CCD に露光されてしまうためであると考えられる．また，各画素でわずかに消光比が異なるという問題が上がっている．このわずかな誤差が干渉計や偏光計の計測精度に影響される．図 4.2 に消光比の誤差が生じるときに振幅と位相を解析したときのシミュレーション結果を示す．図 2(a)に示すように振幅解析では実際の振幅より低く計測され，図 2(b)に示すように位相解析には位相に2周期の正弦誤差が生じることがわかる．

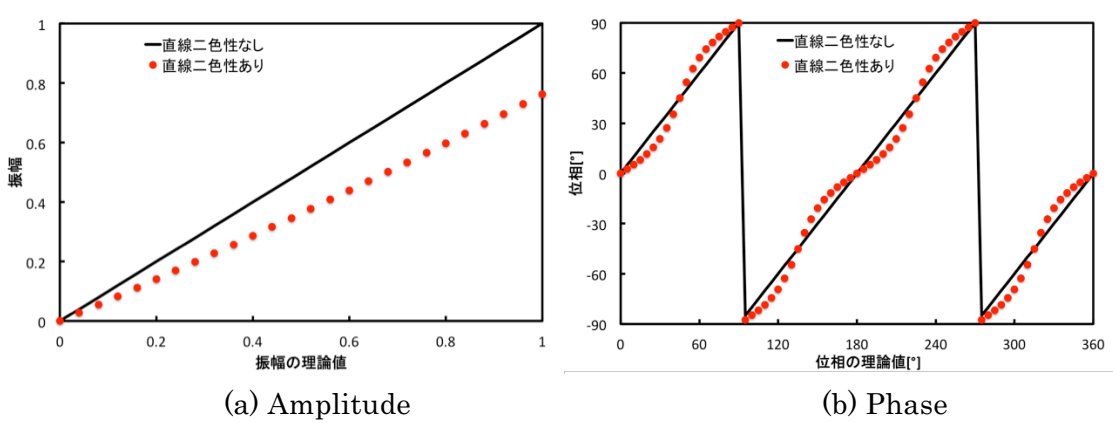


Fig 4.2 Simulation result by 4 steps phase shift method if polarization camera has not enough extinction ratio.

図 4.2 直線二色性を含むときに与えるときの振幅や位相のシミュレーション結果
以上の課題を鑑みて、本発明の目的としては各画素で異なる消光比のキャリブレーションを行うことによって干渉計や偏光計の計測精度を向上することである。

解決する方法としては、偏光カメラの偏光子を部分偏光子と考える。部分ミューラー行列は、

$$\frac{1}{2} \begin{bmatrix} p_\varphi^2 + q_\varphi^2 & (p_\varphi^2 - q_\varphi^2) \cos 2\varphi & (p_\varphi^2 - q_\varphi^2) \sin 2\varphi & 0 \\ (p_\varphi^2 - q_\varphi^2) \cos 2\varphi & 2p_\varphi q_\varphi \sin^2 2\varphi + (p_\varphi^2 + q_\varphi^2) \cos^2 2\varphi & (p_\varphi - q_\varphi)^2 \sin 2\varphi \cos 2\varphi & 0 \\ (p_\varphi^2 - q_\varphi^2) \sin 2\varphi & (p_\varphi - q_\varphi)^2 \sin 2\varphi \cos 2\varphi & (p_\varphi^2 + q_\varphi^2) \sin^2 2\varphi + 2p_\varphi q_\varphi \cos^2 2\varphi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2p_\varphi q_\varphi \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

となる。ここで、 p_φ 、 q_φ はそれぞれ透過率、 φ は偏光子の方位を表す。 φ は $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$ である。

任意の偏光状態 $[s_0, s_1, s_2, s_3]$ を検出する光強度 $I(\varphi)$ は、

$$\begin{aligned} I(\varphi) &= \left\{ (p_\varphi^2 + q_\varphi^2) s_0 + (p_\varphi^2 - q_\varphi^2) (s_1 \cos 2\varphi + s_2 \sin 2\varphi) \right\} \\ &= (p_\varphi^2 + q_\varphi^2) s_0 \left\{ 1 + \frac{p_\varphi^2 - q_\varphi^2}{p_\varphi^2 + q_\varphi^2} \cdot \frac{\sqrt{s_1^2 + s_2^2}}{s_0} \cos \left(2\varphi - \tan^{-1} \left(\frac{s_2}{s_1} \right) \right) \right\} \end{aligned} \quad (4.2)$$

となる。

直線二色性 D_φ 、直線偏光度 $LDOP$ 、入射偏光状態の方位 α は、

$$D_\varphi = \frac{p_\varphi^2 - q_\varphi^2}{p_\varphi^2 + q_\varphi^2} \quad (4.3)$$

$$LDOP = \frac{\sqrt{s_1^2 + s_2^2}}{s_0} \quad (4.4)$$

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{s_2}{s_1} \right) \quad (4.5)$$

式(3)~(5)を式(2)に代入すると,

$$I(\varphi) = (p_\varphi^2 + q_\varphi^2) s_0 \{1 + D_\varphi \cdot LDOP \cos 2(\varphi - \alpha)\} \quad (4.6)$$

となる.

偏光カメラの消光比は p_φ , q_φ が関係するパラメータであり, 直線二色性 D_φ をあらかじめ測定しておくことで消光比のキャリブレーションを可能にさせる.

入射偏光を直線偏光と考えると, 直線偏光度 $LDOP$ は 1 となるため光強度は,

$$I(\alpha) = (p_\varphi^2 + q_\varphi^2) s_0 \{1 + D_\varphi \cos 2(\varphi - \alpha)\} \quad (4.7)$$

となる.

入射直線偏光を回転させ一周させ, フーリエ変換しフーリエ振幅 a_0, a_2, b_2 からバイアスと直線二色性は,

$$(p_\varphi^2 + q_\varphi^2) s_0 = \frac{1}{2} a_0(\varphi) \quad (4.8)$$

$$D_\varphi = \sqrt{a_2^2(\varphi) + b_2^2(\varphi)} \quad (4.9)$$

となる.

偏光カメラの方位 ϕ が $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$ のため, 光強度 $I(\varphi)$ は,

$$I(0) = (p_0^2 + q_0^2) s_0 (1 + D_0 \cdot LDOP \cos 2\alpha) \quad (4.10)$$

$$I(45) = (p_{45}^2 + q_{45}^2) s_0 (1 + D_{45} \cdot LDOP \sin 2\alpha) \quad (4.11)$$

$$I(90) = (p_{90}^2 + q_{90}^2) s_0 (1 - D_{90} \cdot LDOP \cos 2\alpha) \quad (4.12)$$

$$I(135) = (p_{135}^2 + q_{135}^2) s_0 (1 - D_0 \cdot LDOP \sin 2\alpha) \quad (4.13)$$

となる。

式(8)から、光強度 $I(\varphi)$ は、

$$I'(0) = \frac{2I(0)}{a_0(0)} = 1 + D_0 \cdot LDOP \cos 2\alpha \quad (4.14)$$

$$I'(45) = \frac{2I(45)}{a_0(45)} = 1 + D_{45} \cdot LDOP \sin 2\alpha \quad (4.15)$$

$$I'(90) = \frac{2I(90)}{a_0(90)} = 1 - D_{90} \cdot LDOP \cos 2\alpha \quad (4.16)$$

$$I'(135) = \frac{2I(135)}{a_0(135)} = 1 - D_{135} \cdot LDOP \sin 2\alpha \quad (4.17)$$

となる。

直線偏光度 $LDOP$ と入射偏光方位 α は、

$$LDOP = \sqrt{\left\{ \frac{I'(0) - I'(90)}{\sqrt{a_2^2(0) + b_2^2(0)} + \sqrt{a_2^2(90) + b_2^2(90)}} \right\}^2 + \left\{ \frac{I'(45) - I'(135)}{\sqrt{a_2^2(45) + b_2^2(45)} + \sqrt{a_2^2(135) + b_2^2(135)}} \right\}^2} \quad (4.18)$$

$$\alpha = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left\{ \frac{\sqrt{a_2^2(0) + b_2^2(0)} + \sqrt{a_2^2(90) + b_2^2(90)}}{\sqrt{a_2^2(135) + b_2^2(135)} + \sqrt{a_2^2(45) + b_2^2(45)}} \cdot \frac{I'(45) - I'(135)}{I'(0) - I'(90)} \right\} \quad (4.19)$$

となる。

図 4.3 に実験光学系を示す。光源から出射された光が平行光にし偏光板と 1/4 波長板で円偏光にし、サンプルに入射させ直線偏光度が偏光カメラで検出する。

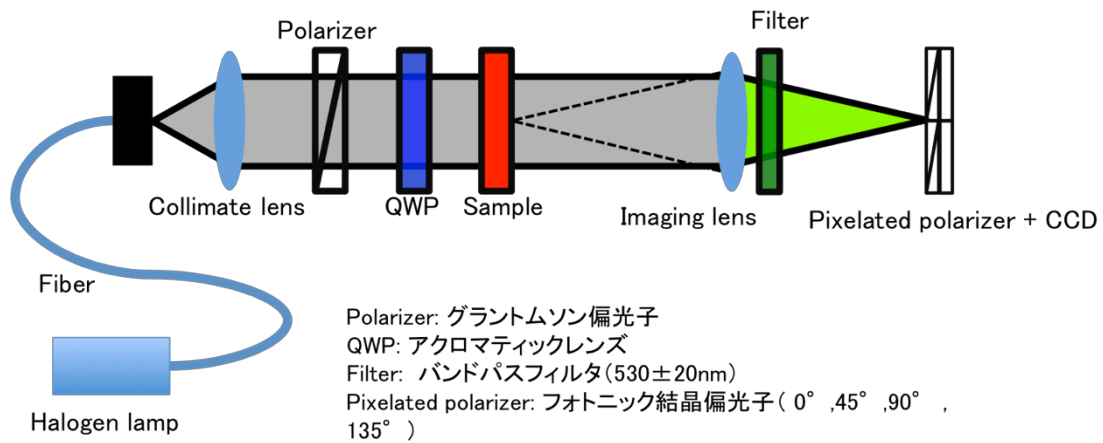


Fig4.3 Optical setup of linear diattenuation measurement

偏光カメラのキャリブレーション値を得るときは、サンプルの位置に偏光板を設置し、自動回転モータで一周し、光強度を検出し、フーリエ変換し、式(8)および(9)でバイアスおよび直線二色性 D_ϕ を求める。

図 4.4 に偏光カメラの直線二色性の測定結果を示す。結果から 方位によって二色性が異なることがわかる。

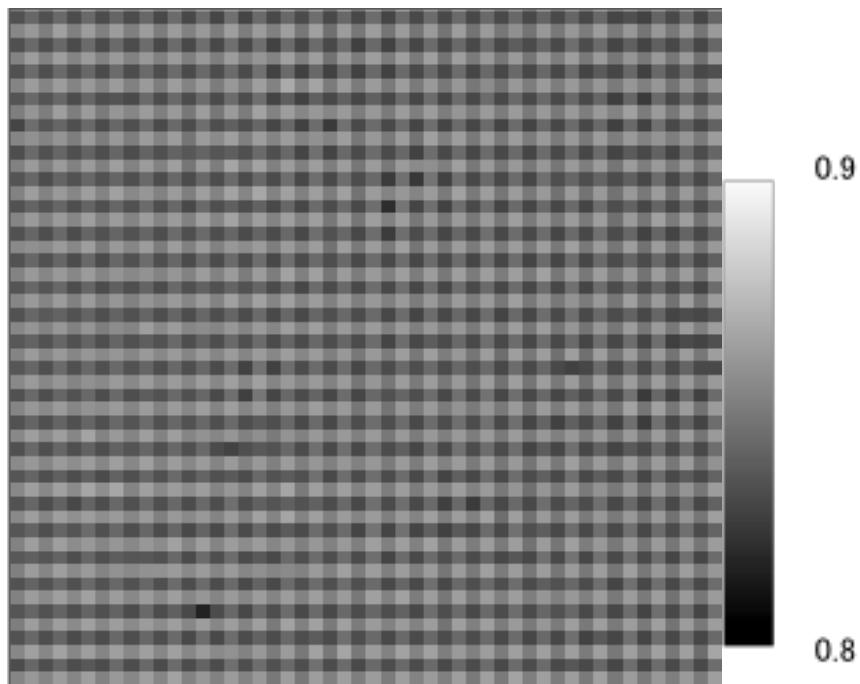


Fig. 4.4 Linear diattenuation of pixelated polarization camera

サンプル透過後の直線偏光度 LDOP と入射偏光方位 α を測定するときは、サンプルを設置し、測定する。

また、フーリエ変換法とは違い、位相シフト法にも試みた。入射方位を 0° , 45° , 90° , 135° の 4 つの光強度を検出することで測定する。これは膨大な光強度を検出する必要がないため、少ない計算量で算出できる。

$$D = \sqrt{(I_{0^\circ} - I_{90^\circ})^2 + (I_{45^\circ} - I_{135^\circ})^2} / (I_{0^\circ} + I_{45^\circ} + I_{90^\circ} + I_{135^\circ}) \quad (4.20)$$

$$\varepsilon = 0.5 \tan^{-1} (I_{0^\circ} - I_{90^\circ}) / (I_{45^\circ} - I_{135^\circ}) \quad (4.21)$$

図 4.5 に求めた直線二色性および偏光子の方位を示す。方位によって二色性、方位誤差が異なることがわかる。また、3種類の偏光カメラの違いが顕著あった。

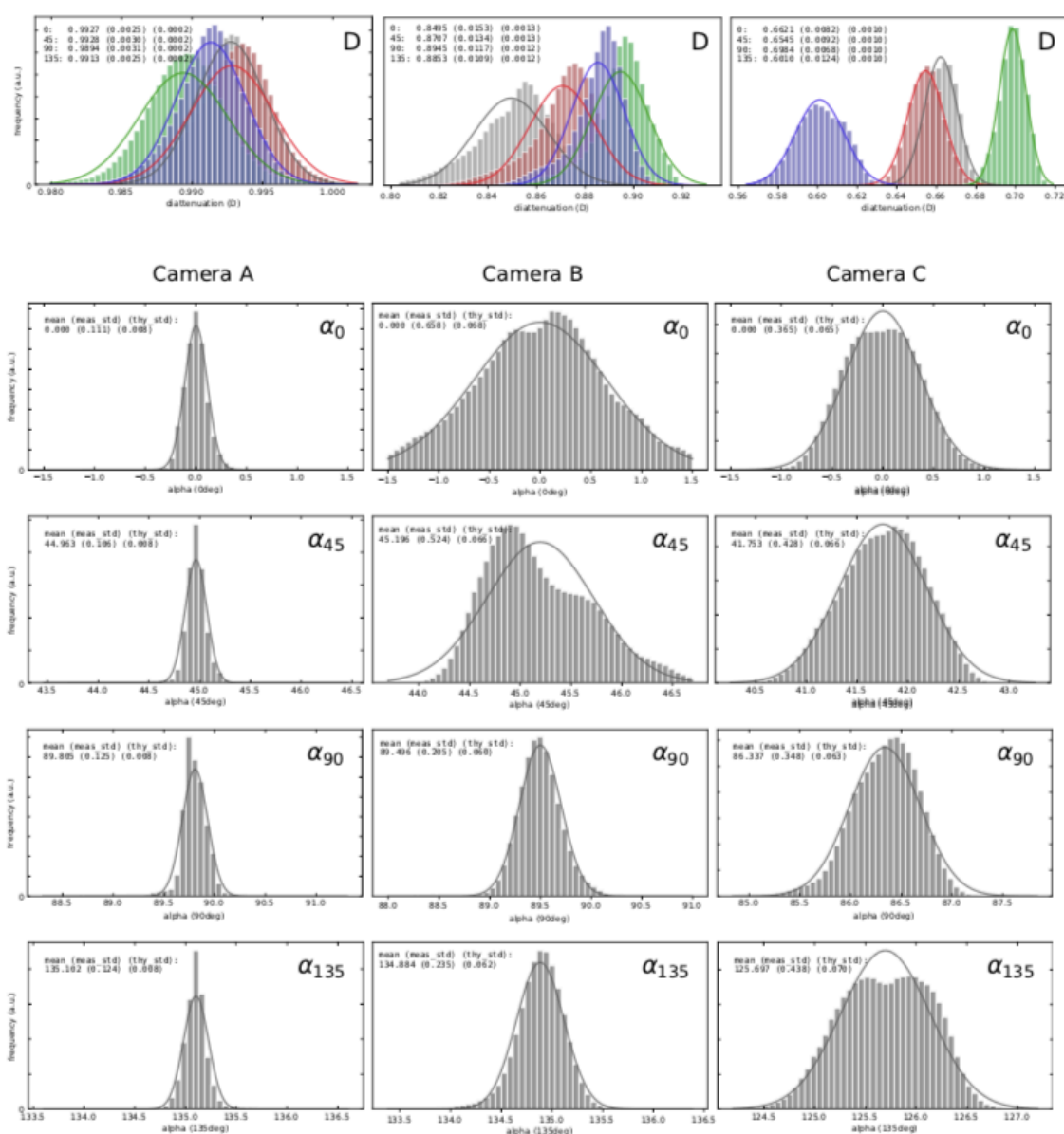
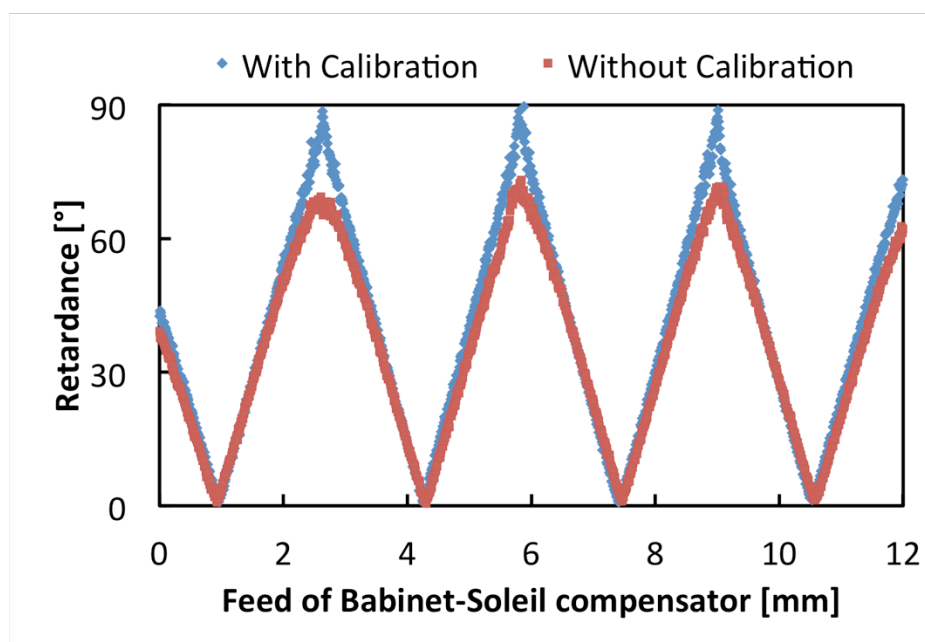
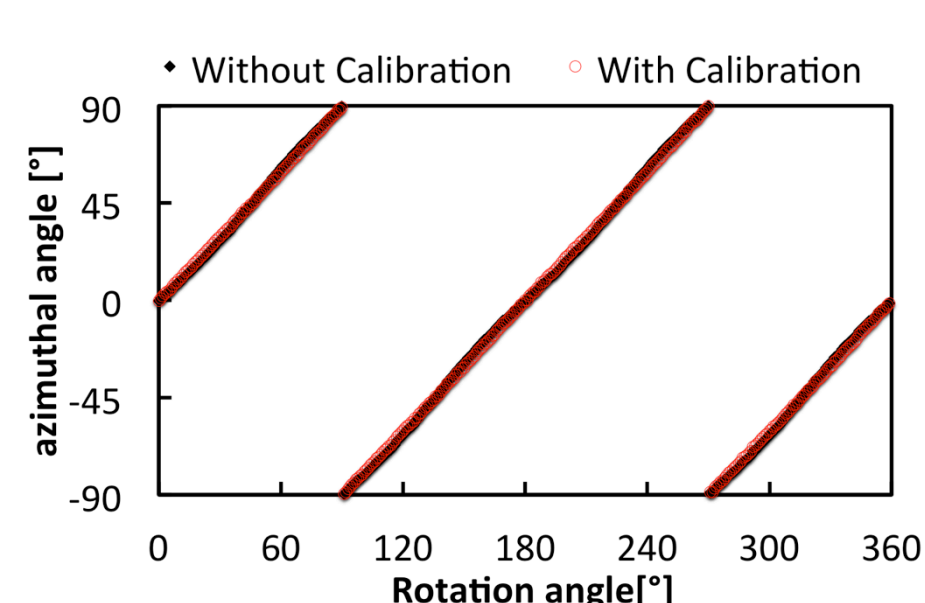


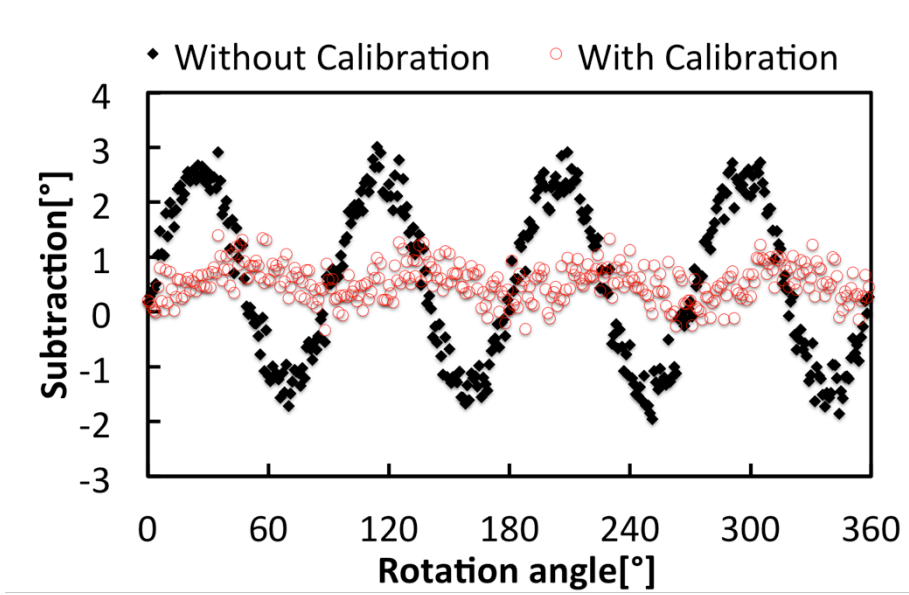
図 4.5 に偏光カメラの直線二色性をキャリブレーションされているかどうか検証するために、サンプルに自動バビネ・ソレイユ補償器と 1/4 波長板を自動回転させることで、複屈折位相差（振幅）と 1/4 波長板の(方位)位相を測定した結果を示す。図(c)は結果からは区別が困難なので、理論値から測定値を引いた結果を示している。結果を見るとキャリブレーションしないとありでは明らかに精度が向上していることがわかった。



(a) Retardance (Amplitude)



(b) Azimuthal angle (Phase)



(c) Subtraction

Fig. 4.5 Result of proposed method

第5章 高精度・高速イメージング偏光計 偏光カメラによるフルストークス・パラメータ測定原理

5.1 偏光カメラによる2ショットストークス・パラメータ測定法

図5.1に偏光カメラによる2ショットストークス・パラメータ測定法の光学系を示す。未知の入射偏光状態が複屈折位相差 δ_2 ，方位 ξ の位相子を透過し偏光カメラで検出する。

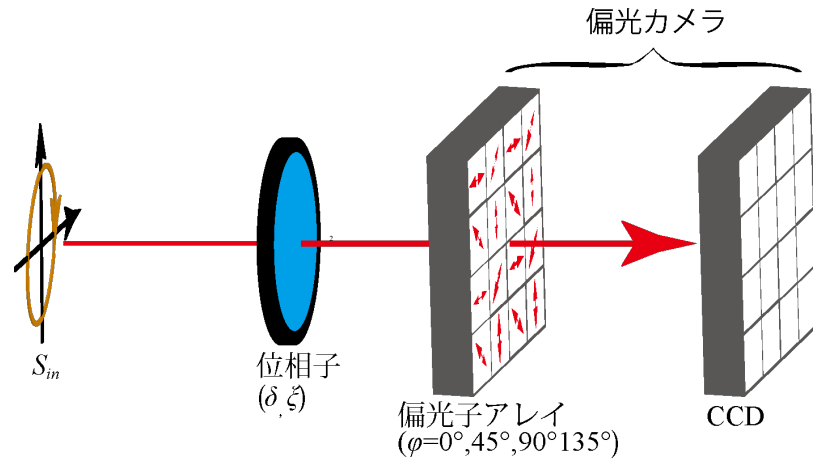


Fig5.1 Optical setup of full Stokes parameters measurement by polarization camera

CCD センサーで検出されるストークス・パラメータ S_{out} と入射光の未知のストークス・パラメータ S_{in} と複屈折位相差 δ ，方位 ξ の位相子 $R(\delta, \xi)$ ，方位 φ の偏光子アレイ $A(\varphi)$ のミュラー行列を用いると，

$$S_{out} = A(\varphi) \cdot R(\delta_2, \xi) \cdot S_{in}$$

$$\begin{bmatrix} s'_0 \\ s'_1 \\ s'_2 \\ s'_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \cos 2\varphi & \sin 2\varphi & 0 \\ \cos 2\varphi & \cos^2 2\varphi & \cos 2\varphi \sin 2\varphi & 0 \\ \sin 2\varphi & \cos 2\varphi \sin 2\varphi & \sin^2 2\varphi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 - (1 - \cos \delta_2) \sin^2 2\xi & (1 - \cos \delta_2) \sin 2\xi \cos 2\xi & -\sin \delta_2 \sin 2\xi \\ 0 & (1 - \cos \delta_2) \sin 2\xi \cos 2\xi & 1 - (1 - \cos \delta_2) \cos^2 2\xi & \sin \delta_2 \cos 2\xi \\ 0 & \sin \delta_2 \sin 2\xi & -\sin \delta_2 \cos 2\xi & \cos \delta_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_0 \\ s_1 \\ s_2 \\ s_3 \end{bmatrix} \quad (5.1)$$

となる。

CCD センサーに検出される光強度 I は，

$$I = \frac{1}{2} \left[s_0 + \left[s_1 \{ 1 - (1 - \cos \delta_2) \sin^2 2\xi \} + s_2 (1 - \cos \delta_2) \sin 2\xi \cos 2\xi - s_3 \sin \delta_2 \sin 2\xi \right] \cos 2\varphi \right. \\ \left. + \left[s_1 (1 - \cos \delta_2) \sin 2\xi \cos 2\xi + s_2 \{ 1 - (1 - \cos \delta_2) \cos^2 2\xi \} + s_3 \sin \delta_2 \cos 2\xi \right] \sin 2\varphi \right] \quad (5.2)$$

となる。

位相子の方位を 0° ， 90° もしくは 45° ， 135° に変化させ測定する。位相子の方位 0° ， 45° ， 90° ， 135° のそれぞれの光強度は，

$$I_{0^\circ} = \frac{1}{2} \left\{ s_0 + s_1 \cos 2\varphi + (s_2 \cos \delta_2 + s_3 \sin \delta_2) \sin 2\varphi \right\}$$

$$\begin{aligned}
I_{45^\circ} &= \frac{1}{2} \{s_0 + (s_1 \cos \delta_2 - s_3 \sin \delta_2) \cos 2\varphi + s_2 \sin 2\varphi\} \\
I_{90^\circ} &= \frac{1}{2} \{s_0 + s_1 \cos 2\varphi + (s_2 \cos \delta_2 - s_3 \sin \delta_2) \sin 2\varphi\} \\
I_{135^\circ} &= \frac{1}{2} \{s_0 + (s_1 \cos \delta_2 + s_3 \sin \delta_2) \cos 2\varphi + s_2 \sin 2\varphi\}
\end{aligned} \tag{5.3}$$

となる.

偏光子アレイの方位 φ が 0° , 45° , 90° , 135° であるため, 式(5.3)に代入し足し引きすると, 入射光のストークス・パラメータ S_{in} は,

$$S_{in} = \begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ \frac{I_0 - I_2}{I_0 + I_2} \\ \frac{I_1 - I_3 + I_9 - I_{11}}{2(I_0 + I_2) \cos \delta_2} \\ \frac{I_1 - I_3 - I_9 + I_{11}}{2(I_0 + I_2) \sin \delta_2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ \frac{I_4 - I_6 + I_{12} - I_{14}}{2(I_5 + I_7) \cos \delta_2} \\ \frac{I_5 - I_7}{I_5 + I_7} \\ \frac{I_4 + I_6 + I_{12} - I_{14}}{2(I_5 + I_7) \sin \delta_2} \end{bmatrix} \tag{5.4}$$

となる.

ここで, $I_0 \sim I_3$, $I_4 \sim I_7$, $I_8 \sim I_{11}$, $I_{12} \sim I_{15}$ はそれぞれ位相子の方位 0° , 45° , 90° , 135° のそれぞれに偏光子アレイの方位 0° , 45° , 90° , 135° に対応する光強度である.

したがって, 位相子の方位 0° , 90° もしくは 45° , 135° で検出することで偏光カメラによる 2 ショットですべてストークス・パラメータを測定可能になる. この手法ではあらかじめ, 45° 直線偏光を測定し, 位相子の複屈折位相差 δ_2 を測定しておく必要がある.

$$\delta_2 = \cos^{-1} \left\{ \frac{I_1 - I_3 + I_9 - I_{11}}{1(I_0 + I_2)} \right\} \tag{5.4}$$

5.2 偏光カメラによる 3 ショットストークス・パラメータ測定法

5.1 で述べた偏光カメラによる 2 ショットストークス・パラメータ測定法は位相子の複屈折位相差を求めておくために, あらかじめ既存の入射偏光状態を測定しておく必要があった. 同様の光学系を用いて位相子の複屈折位相差を自己キャリブレーションできるアルゴリズムを紹介する.

位相子の方位 0° , 45° , 90° に変化させて同時に入射光のストークス・パラメータと位相子の複屈折位相差を同時に測定する. 式(2.56)から入射光のストークス・パラメータ S_{in} と位相子の複屈折位相差 δ_2 は,

$$S_{in} = \begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ \frac{I_0 - I_2}{I_0 + I_2} \\ \frac{I_5 - I_7}{I_5 + I_7} \\ \frac{I_1 - I_3 - I_9 + I_{11}}{2(I_0 + I_2) \sin \delta_2} \end{bmatrix} \quad (5.5)$$

$$\delta_2 = \cos^{-1} \left\{ \frac{I_1 - I_3 + I_9 - I_{11}}{2(I_5 - I_7)} \right\} \quad (5.6)$$

となる.

位相子の複屈折位相差 δ_2 の値を代入することで, 位相子の複屈折位相差の自己キャリブレーション可能になる.

図 5.2 に示す光源は白色光源を用い, ファイバーに入れ, レンズにより平行光にしている. 中心波長 510nm から 550nm まで 10nm 刻みのバンドパスフィルタにより波長を制限し, このバンドパスフィルタの切り替えにより分光計測を行っている. サンプルの方位に依存させないために方位 0° の偏光子と 45° の $1/4$ 波長板により右円偏光をサンプルに入射させ, 回転位相子を通しズームレンズによってサンプルにフォーカスを合わせ偏光カメラで光強度を検出する. 位相子の回転モータはエンコーダ情報から偏光カメラと同期させ, 動的なストークス・パラメータを測定している. 表 5.1 に偏光カメラによるストークス・パラメータ測定法に用いた実験装置を示す.

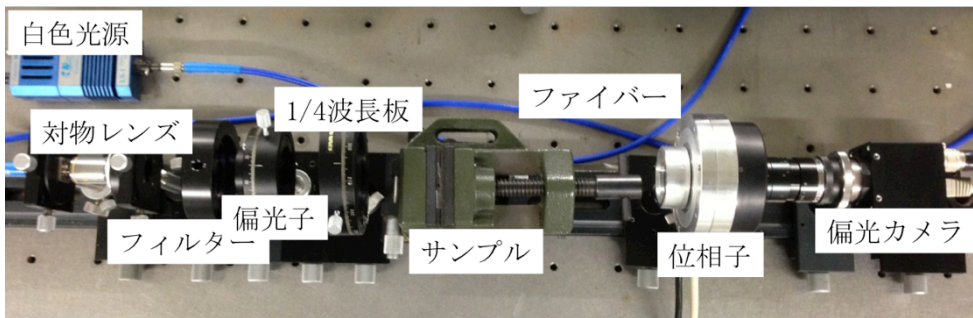


Fig5.2 Experimental optical setup of Stokes parameters measurement by polarization camera

Table5.1 Experimental devices of Stokes parameters measurement by polarization camera

名称	メーカー	仕様
白色光源	Ocean Optics	<ul style="list-style-type: none"> 波長範囲: 300~1050nm パワー出力 6.5W
ファイバー	Ocean Optics	<ul style="list-style-type: none"> 波長範囲: 300~1100nm コア系: $400 \pm 8 \mu\text{m}$
対物レンズ	Edmund Optics	<ul style="list-style-type: none"> 倍率: 10 倍 NA: 0.25
バンドパスフィルタ	Andover Corporation	<ul style="list-style-type: none"> 中心波: 510, 520, 530, 540,

		550nm ・ 半値幅：10nm ・ 素子サイズ：
グラントムソン偏光子		・ 素子サイズ：10×10mm
1/4 波長板	(株)ルケオ	・ 波長：520nm ・ ゼロオーダー ・ 素子サイズ：φ50mm
1/4 波長板	ユニオプト(株)	・ 波長：633nm ・ ゼロオーダー ・ 素子サイズ：10×10mm
偏光子ホルダー	ツクモ工学(株)	・ 適応径：φ30
中空回転モータ	テクノハンズ (株)	・ 貫通径：φ22.5mm ・ 最大回転数：3000rpm ・ エンコーダ：2000P/R
中空回転モータのコントローラ (Whistle)	Elmo	・ 制御方式：TTL 信号 or アナログ ・ 電流，速度，位置制御可能
中空回転モータの電源	TRACO POWER	・ 出力：12V，5V
ズームレンズ		・ 焦点距離：0.5m~3m ・ 素子径：25.5mm
偏光カメラ	(株)フォトリテック	・ 撮影速度：20fps(フル解像度) ・ 解像度：1120×868pixels ・ 画素サイズ：4.65μm ・ センサー：1/2CCD ・ A/D：8，12bit
PC	Dell	・ 制御言語：Labview2011

偏光カメラによる 2 ショットストークス・パラメータ測定では位相子の複屈折位相差の誤差がストークス・パラメータの精度に大きく影響する．そこで，位相子が 1/8 波長板($\delta_2=45^\circ$)を用いたと仮定し誤差が $\pm 5^\circ$ ， $\pm 10^\circ$ ， $\pm 15^\circ$ 与えたときのストークス・パラメータのアルゴリズムを適応させ算出した．表 5.2 に算出したストークス・パラメータは水平直線偏光， 45° 直線偏光，右円偏光の結果を示す．この結果から位相子の複屈折位相差のキャリブレーションが必要だとわかった．

Table4.2 Simulation results of Stokes parameters influencing retardance error of rotating retarder

偏光状態	理論値	位相子の複屈折位相差[°]						
		30	35	40	45	50	55	60
水平直線偏光	$\begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1.00 \\ 1.00 \\ 0.00 \\ 0.00 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1.00 \\ 1.00 \\ 0.00 \\ 0.00 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1.00 \\ 1.00 \\ 0.00 \\ 0.00 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1.00 \\ 1.00 \\ 0.00 \\ 0.00 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1.00 \\ 1.00 \\ 0.00 \\ 0.00 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1.00 \\ 1.00 \\ 0.00 \\ 0.00 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1.00 \\ 1.00 \\ 0.00 \\ 0.00 \end{bmatrix}$

45° 直線 偏光	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1.00 \\ 0.00 \\ 1.22 \\ 0.00 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1.00 \\ 0.00 \\ 1.16 \\ 0.00 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1.00 \\ 0.00 \\ 1.08 \\ 0.00 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1.00 \\ 0.00 \\ 1.00 \\ 0.00 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1.00 \\ 0.00 \\ 0.91 \\ 0.00 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1.00 \\ 0.00 \\ 0.81 \\ 0.00 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1.00 \\ 0.00 \\ 0.71 \\ 0.00 \end{bmatrix}$
右円偏光	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1.00 \\ 0.00 \\ 0.00 \\ 0.71 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1.00 \\ 0.00 \\ 0.00 \\ 0.81 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1.00 \\ 0.00 \\ 0.00 \\ 0.91 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1.00 \\ 0.00 \\ 0.00 \\ 1.00 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1.00 \\ 0.00 \\ 0.00 \\ 1.08 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1.00 \\ 0.00 \\ 0.00 \\ 1.16 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1.00 \\ 0.00 \\ 0.00 \\ 1.22 \end{bmatrix}$

キャリブレーションのアルゴリズムが適応可能かどうか検証した。比較するために用いた測定装置は AXOMETRICS 社の AxoScan ミュラー行列・ポラリメータである。表 5.3 に波長 520nm の光を用いてキャリブレーションのアルゴリズムで測定した複屈折位相差と AxoScan ミュラー行列・ポラリメータで測定した結果を示す。1 日 1 回計測し計 5 回の計測から算出している。表 5.3 からこの位相子の複屈折位相差のキャリブレーションが有効であるとわかる。

Table5.3 Comparison result of retardance measurements

	AxoScan	2ショットアルゴリズム		3ショットアルゴリズム	
		平均値	標準偏差	平均値	標準偏差
複屈折位相差[°]	136.6	135.2	±0.67	136.1	±0.78

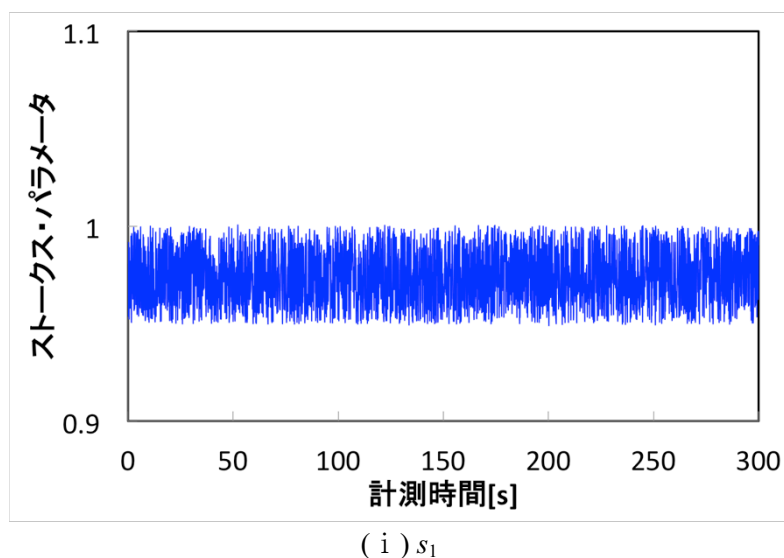
偏光カメラによるストークス・パラメータ測定の精度検証を代表する偏光状態の水平直線偏光，-45°直線偏光，右円偏光を行った。グラントムソン偏光子によって水平直線偏光，-45°直線偏光，グラントムソン偏光子と 1/4 波長板を用いて右円偏光を作っている。表 5.2 に偏光カメラによるストークス・パラメータ測定の精度検証結果を示す。平均値は有効エリアの平均，標準偏差はその有効エリアの標準偏差を意味している。1 日 1 回計測し計 5 回の計測から算出している。表 5.4 から精度は 4/100 得られており，精度よくストークス・パラメータを計測できていることがわかった。

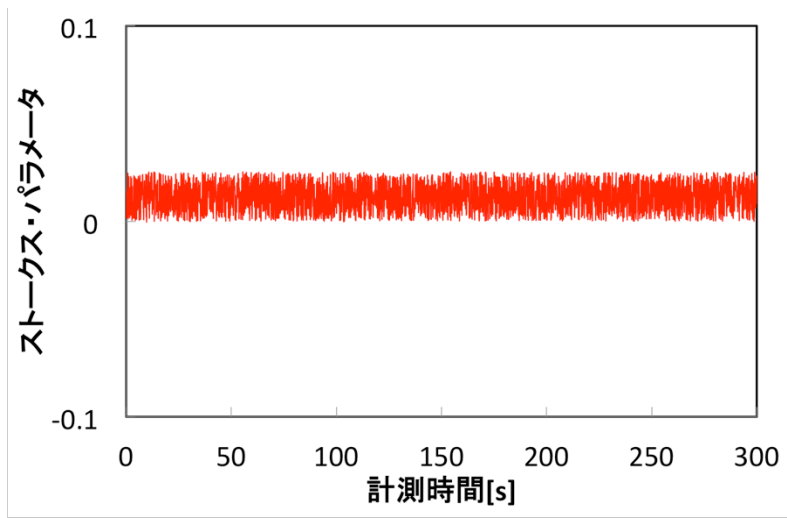
Table5.4 Accuracy results of Stokes parameters measurements by polarization camera

	理論値	実験結果			
		2ショットアルゴリズム		3ショットアルゴリズム	
		平均値	標準偏差	平均値	標準偏差
水平直線 偏光	$\begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0.96 \\ 0.01 \\ 0.00 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 \\ 0.03 \\ 0.01 \\ 0.01 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0.98 \\ 0.03 \\ 0.02 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 \\ 0.02 \\ 0.03 \\ 0.02 \end{bmatrix}$

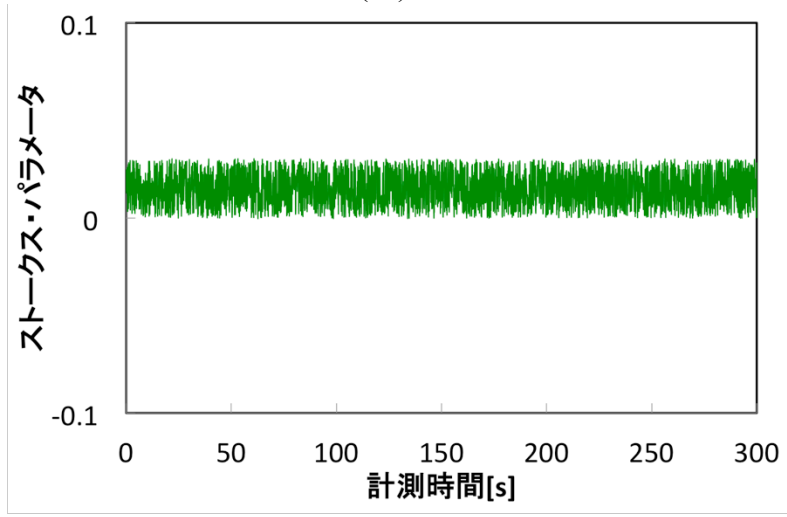
-45°直線 偏光	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ -1 \\ 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0.08 \\ -0.94 \\ 0.01 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 \\ 0.01 \\ 0.04 \\ 0.02 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0.05 \\ -0.98 \\ 0.03 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 \\ 0.01 \\ 0.03 \\ 0.02 \end{bmatrix}$
右円偏光	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0.07 \\ -0.09 \\ 1.09 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 \\ 0.02 \\ 0.02 \\ 0.03 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0.00 \\ -0.03 \\ 0.98 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 \\ 0.01 \\ 0.01 \\ 0.03 \end{bmatrix}$

次に、ストークス・パラメータ測定的时间安定性について考える。図 5.3 に精度検証と同様にグラントムソン偏光子により水平直線偏光、-45° 直線偏光とグラントムソン偏光子と 1/4 波長板により作られた右円偏光のストークス・パラメータをそれぞれ 5 分間計測した結果を示す。時間分解能は 0.1s である。今回は精度を安定させるために白色光源を 1 時間前から点灯させ、回転位相子の回転モータを 10 分前から動かして測定した。図 4.2 から 5 分間の時間安定性はあるということがわかった。



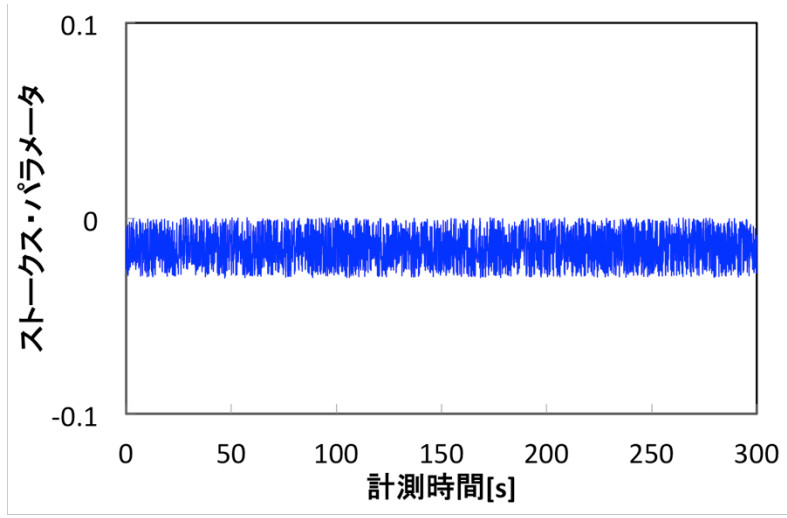


(ii) s_2

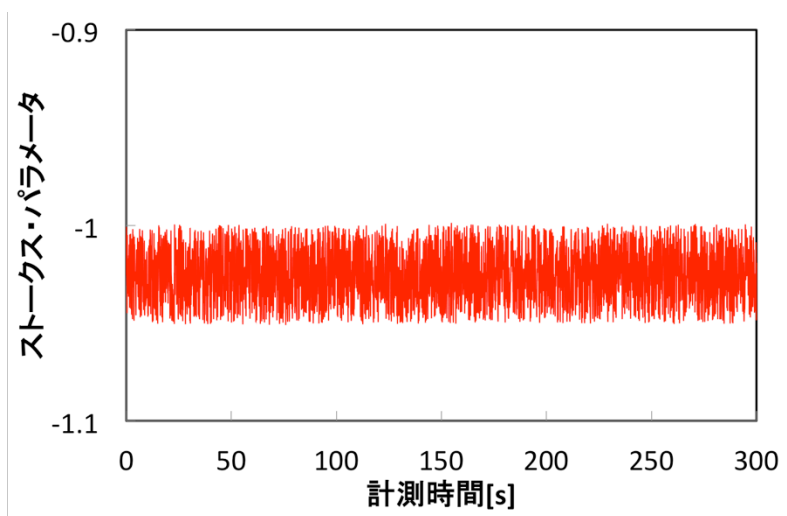


(iii) s_3

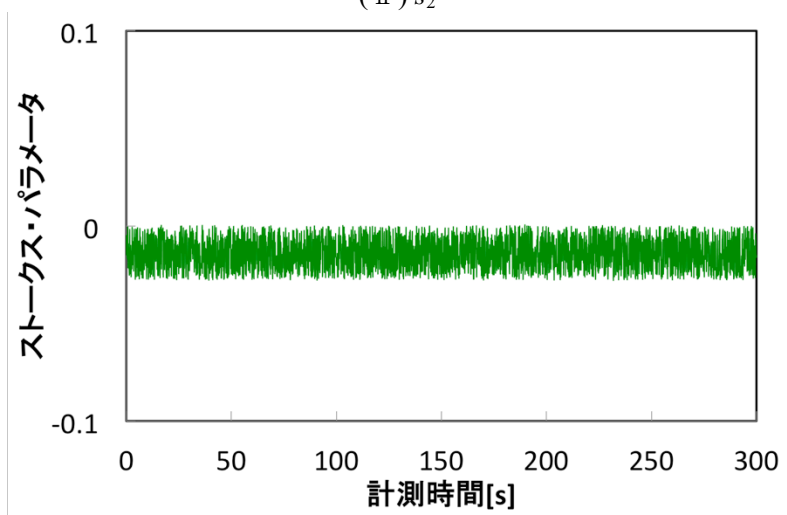
(a) Horizontal Linearly polarization



(i) s_1

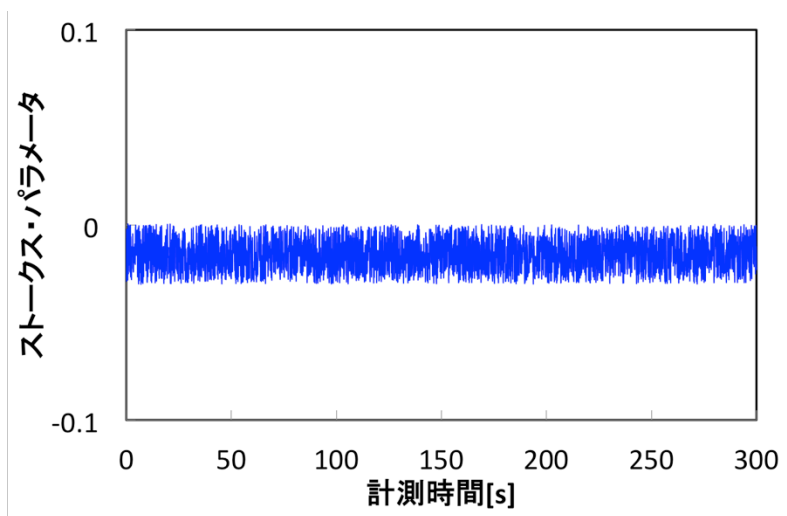


(ii) s_2

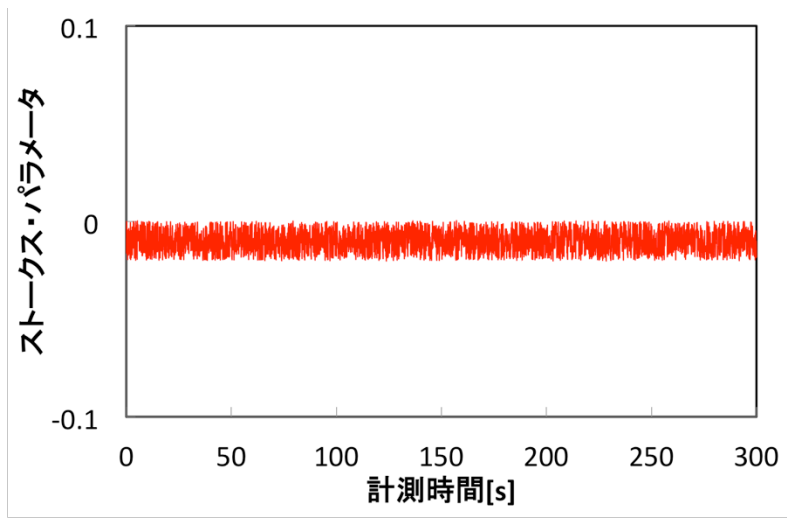


(iii) s_3

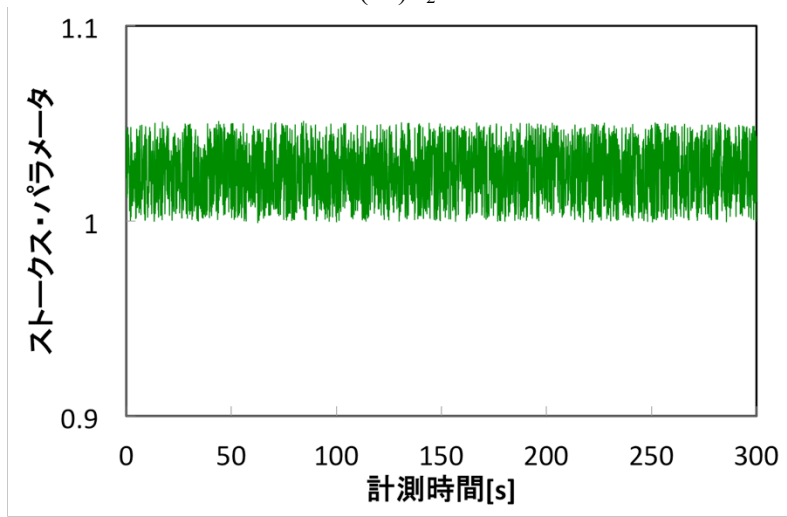
(b) -45° Linearly polarization



(i) s_1



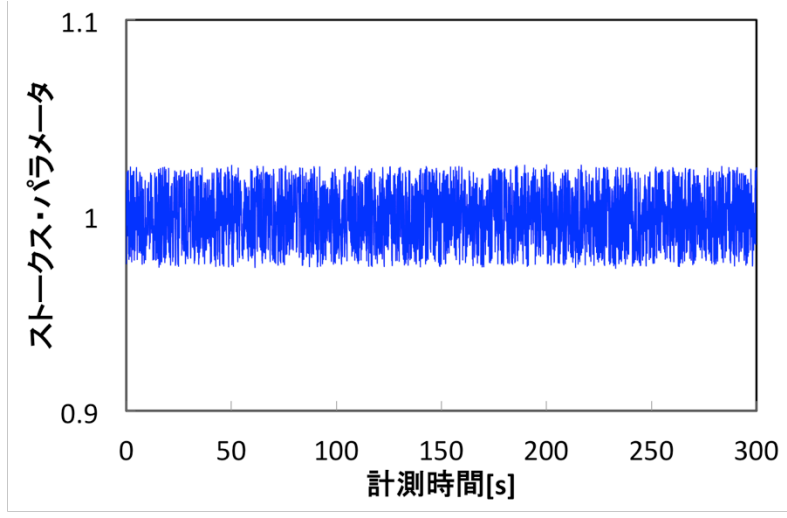
(ii) s_2

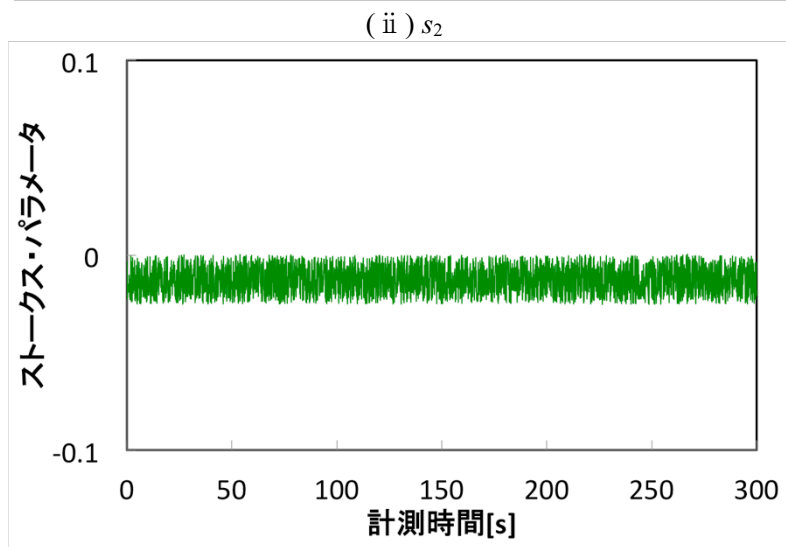
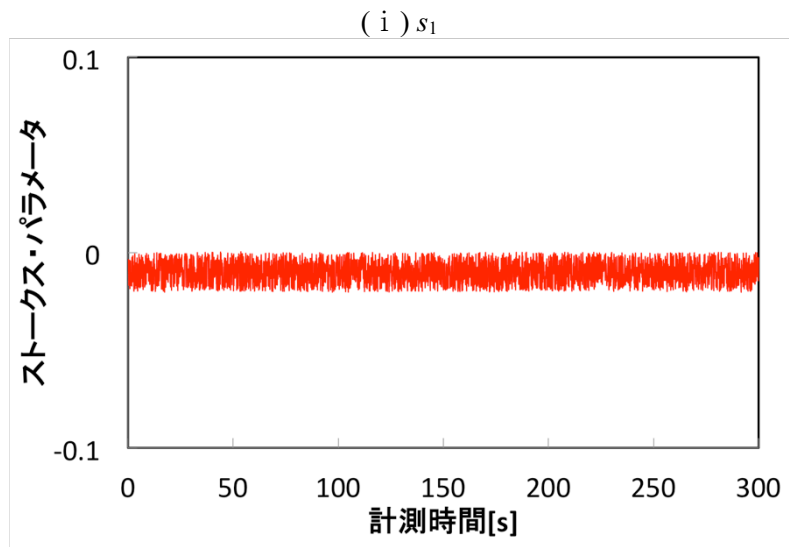


(iii) s_3

(c) Right circular polarization

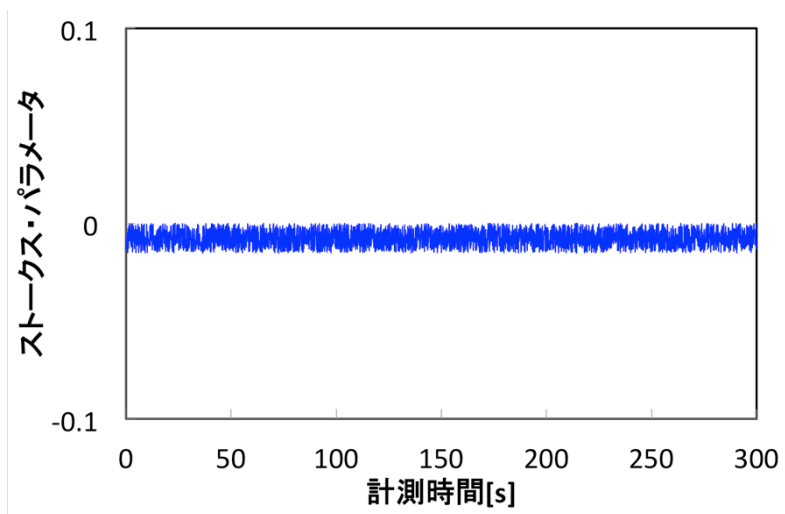
(1) Stokes parameters measurement by polarization camera capturing two images



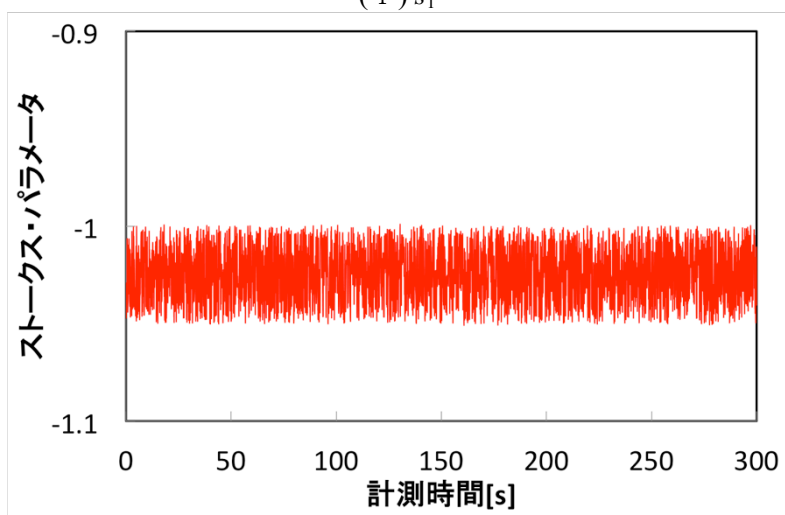


(iii) s_3

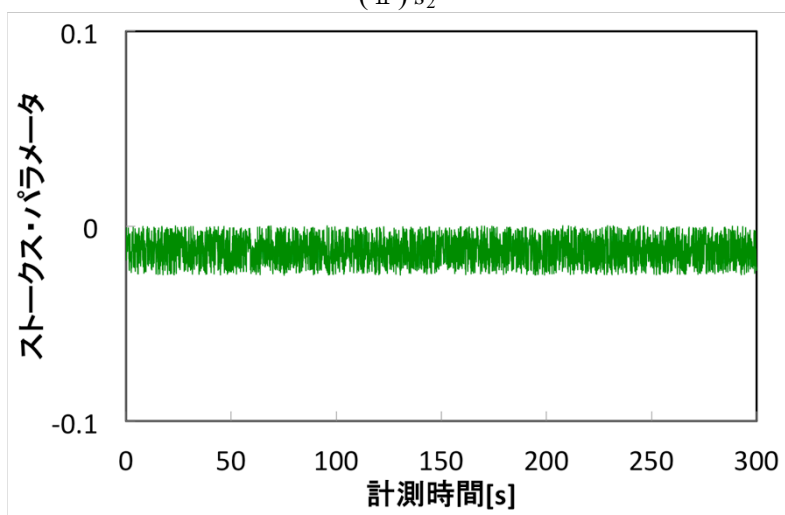
(a) Horizontal Linearly polarization



(i) s_1

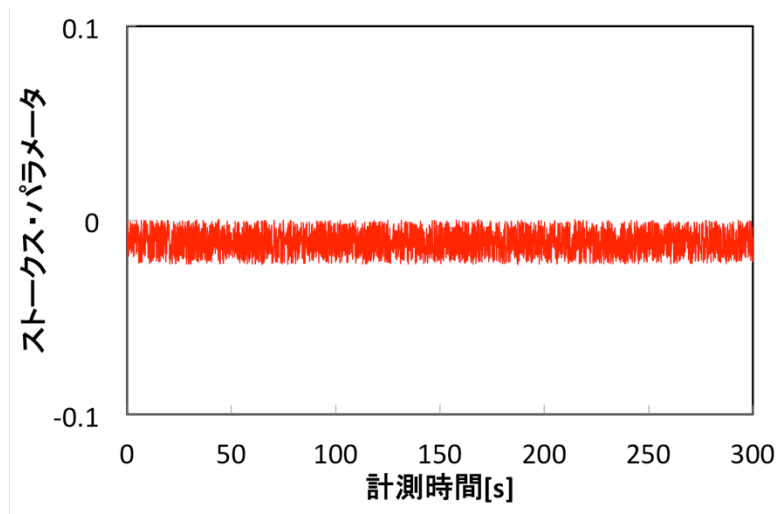


(ii) s_2

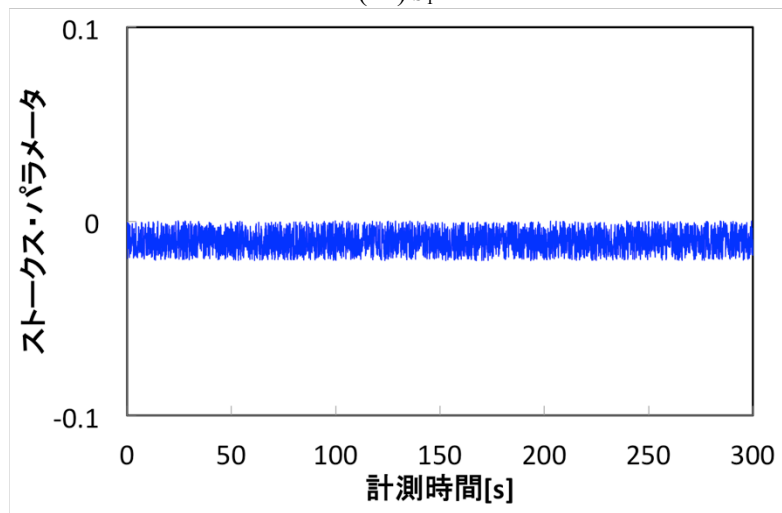


(iii) s_3

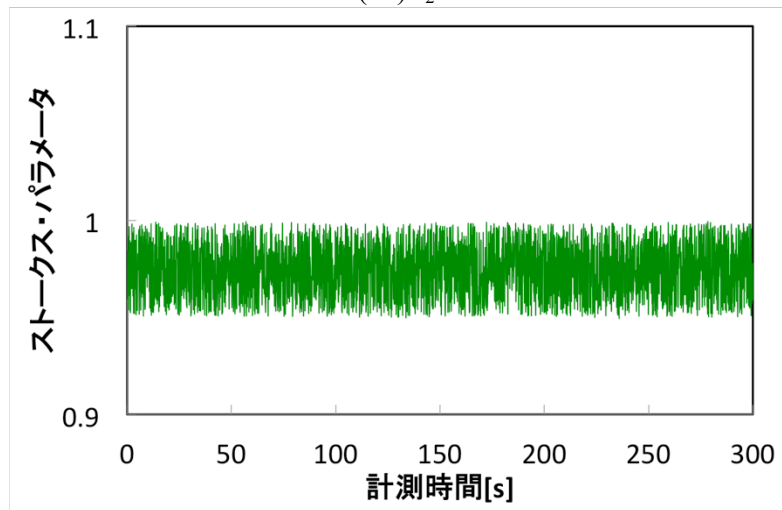
(b) -45° Linearly polarization



(i) s_1



(ii) s_2



(iii) s_3

(c) Right circular polarization

(2) Stokes parameters measurement by polarization camera capturing three images
Fig5.3 Time stability of Stokes parameters measurement by polarization camera

図 5.4 に緑コガネムシを右円偏光板と左円偏光板で観察したときの結果を示す。右円偏光板で観察すると緑コガネムシが黒色観察される。

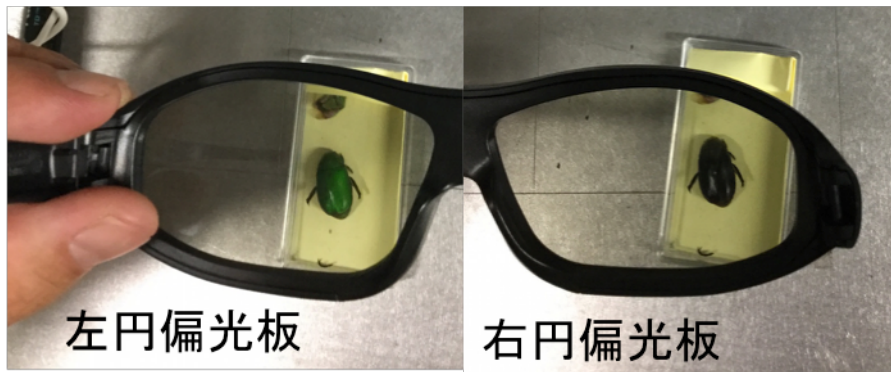


Fig 5.4 Scarab photograms passing right or left circular polarizer

コガネムシの表皮は多層構造になっており，分子が螺旋構造になっており，この構造により円偏光が得られる²⁹⁾。

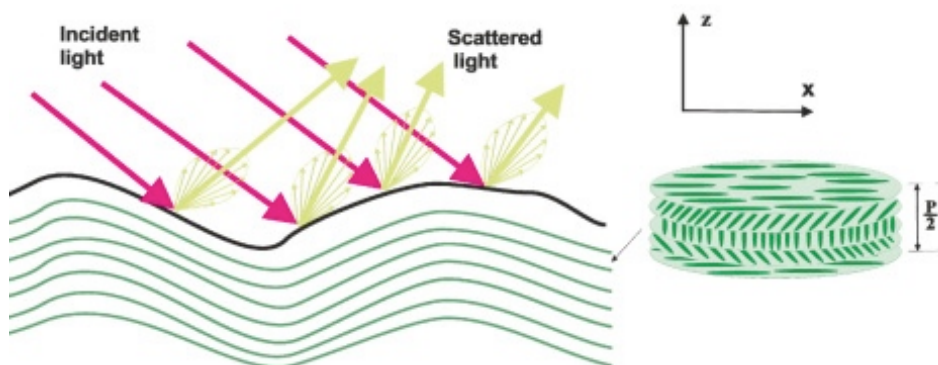


Fig 5.5 Structure of the scarab

図 5.6 にコガネムシの分光偏光二次元分布を計測した結果を示す。分光計測は入射光にバンドパスフィルタの切り替え(450nm から 800nm)で実現している。また入射角度は 20° でコガネムシを入れ，垂直（検出角度 0° ）で測定している。結果から構造色で得られる波長で高い楕円率が得られた。黒色のコガネムシは偏光特性が得られなかった。

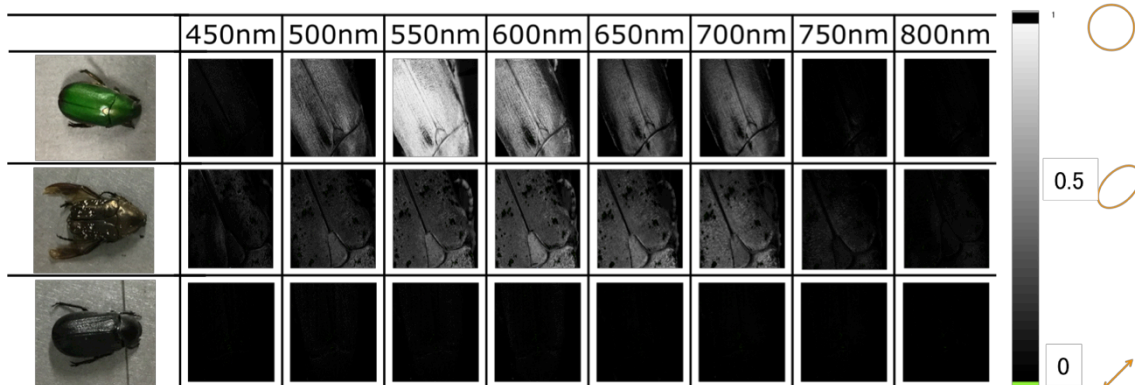


Fig 5.6 Spectroscopic polarization image of the scarab

図 5.6 に検出角度を垂直(検出角度が 0°)から 20° 刻みで 60° まで測定した結果を示す. 入射角度は 20° および波長は 550nm で測定した. ベストフォーカス面に注目すると水平に近づく(検出角度が大きい)と円偏光が小さくなっていくことがわかる.

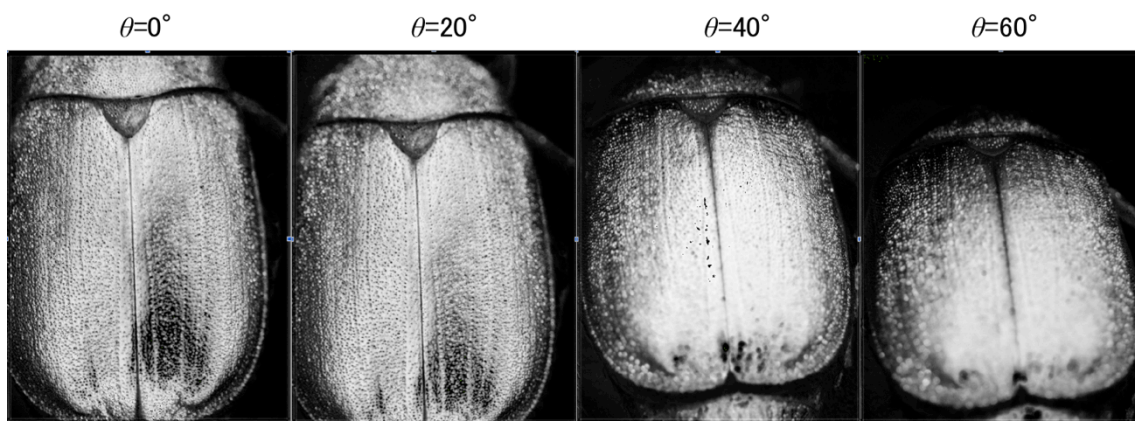
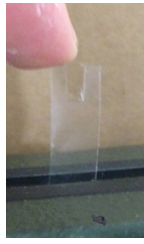


Fig 5.6 Polarization image of the scarab changing angle of Stokes polarimeter

次に 2 種類のサンプルで動的な偏光カメラによるストークス・パラメータのマッピングを行った. Polyethylene Terephthalate(PET)を図 5.7(a)に示すように U 字型にカットし, U 字の端を指で左右の力を加えている状態と図 5.7(b)に示すようにフィルムをねじっている状態のストークス・パラメータの計測した. 今回, 位相子を回転し動的なストークス・パラメータのマッピングを試みた. 今回, 偏光子と $1/4$ 波長板もより右円偏光をフィルムに入射させ偏光カメラの撮影速度 40fps , 計測時間 10fps , 計測時間 10 秒間計測した.



(a) PET film of U shape applying stress by finger



(b) PET film twisting by fingers

Fig5.7 Samples of Stokes parameters measurement by polarization camera dynamically

図 5.8 に U 字型フィルムに力を加えたときのストークス・パラメータの結果を示す。図 5.8 から U 字型フィルムに力を加えたときフィルム内の複屈折が変化し、その複屈折に応じてストークス・パラメータが変化していることがわかった。位相子をモータで高速回転することで動的なストークス・パラメータが測定可能であることがわかった。

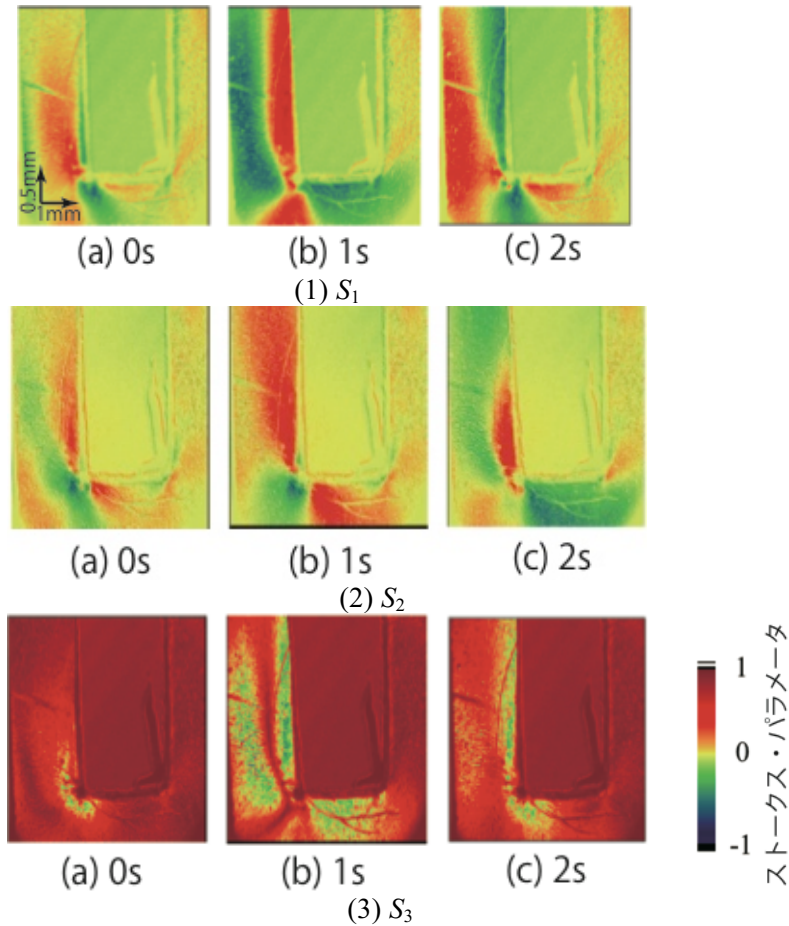


Fig5.8 Results of Stokes parameters mapping of film applying stress by polarization camera dynamically

図 5.9 にフィルムの指でねじったときのストークス・パラメータの結果を示す。図

5.9 からねじったとき力を加えたときフィルム内の複屈折が変化し、その複屈折に応じてストークス・パラメータが変化していることがわかった。しかし、ねじると光軸方向の力も加わっている。この偏光カメラによるストークス・パラメータ測定は光軸方向の偏光状態は計測できないため、正確に偏光状態を計測できていない可能性がある。

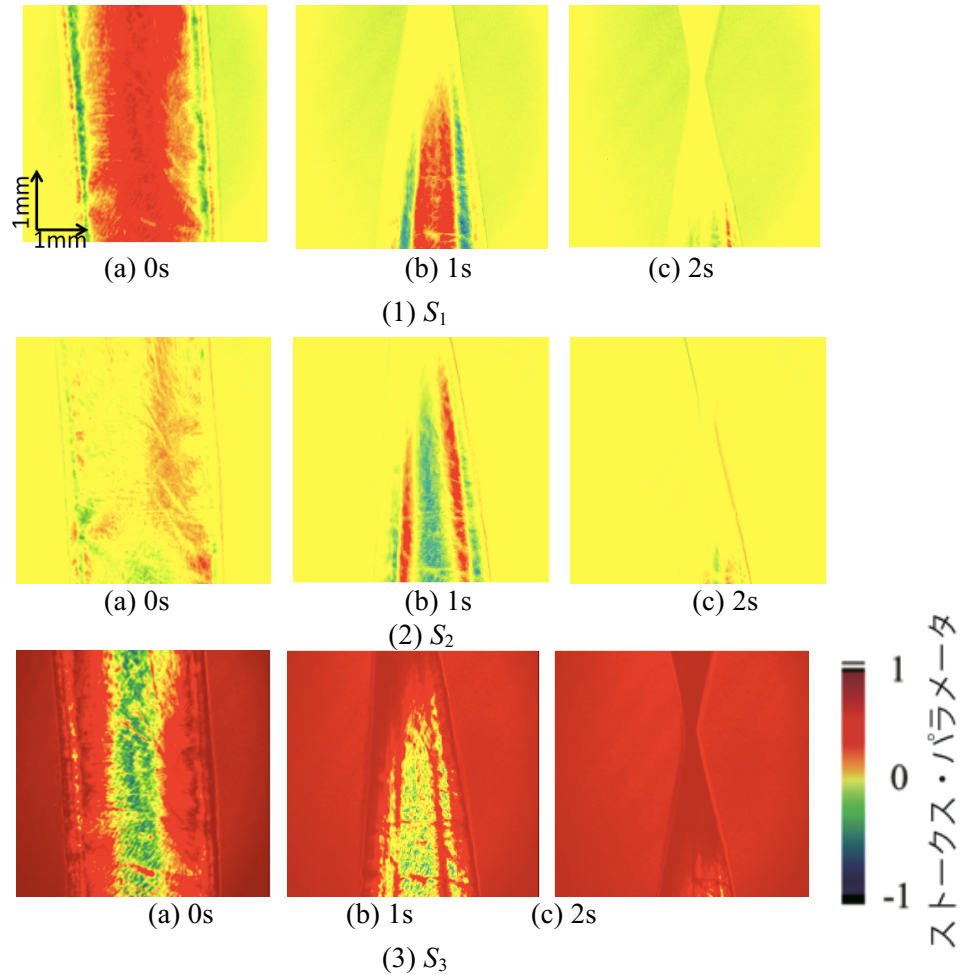


Fig5.9 Results of Stokes parameters mapping using film twisting by polarization camera dynamically

第 6 章 ストークス・パラメータの応用計測

6.1 偏光カメラによる複屈折測定原理

図 6.1 に偏光カメラによる 2 ショット複屈折測定的光学系を示す．光源から出射された光は偏光子と 1/4 波長板により右円偏光をサンプルに入射させ、回転された 1/4 波長板を透過させ、偏光カメラで検出する．1/4 波長板を方位 0° 、 45° を変化させ複屈折を測定する．

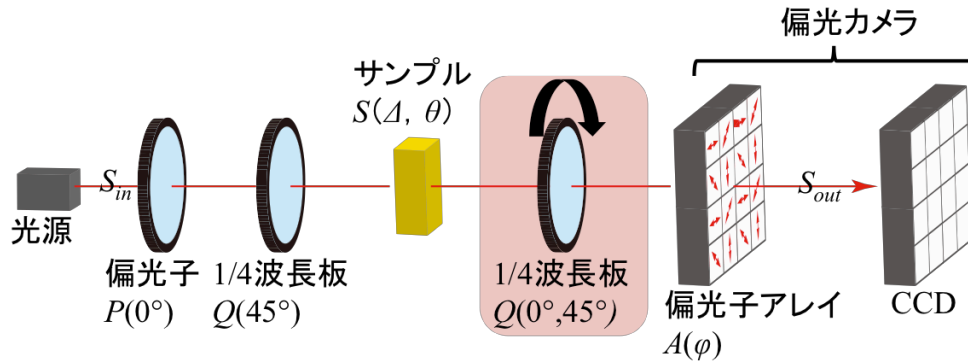


Fig6.1 Optical setup of birefringence measurement by polarization camera capturing two images

S_{in} と S_{out} は入出射光のストークス・パラメータ、 $P(0^\circ)$ 、 $Q(45^\circ)$ 、 $R(\Delta, \theta)$ 、 $Q(0^\circ, 45^\circ)$ 、 $A(\varphi)$ はそれぞれ方位 0° の偏光子、方位 45° の 1/4 波長板、複屈折位相差 Δ をもつ方位 θ のサンプル、 $Q(0^\circ, 45^\circ)$ は方位 0° または 45° の 1/4 波長板、方位 φ の偏光アレイのミュラー行列を表す．ただし、 φ は $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$ である．

以上の図 6.1 の光学系からストークス・パラメータとミュラー行列を用いると、

$$S_{out} = A(\varphi) \cdot Q(0^\circ, 45^\circ) \cdot S(\Delta, \theta) \cdot Q(45^\circ) \cdot P(0^\circ) \cdot S_{in} \quad (6.1)$$

となる．

ここで 1/4 波長板主軸方位 0° の場合は式(6.1)、主軸方位 45° の場合は式(2.48)に示す．

$$\begin{bmatrix} s_0 \\ s_1 \\ s_2 \\ s_3 \end{bmatrix} = \frac{1}{2} I' \begin{bmatrix} 1 & \cos 2\varphi & \sin 2\varphi & 0 \\ \cos 2\varphi & \cos^2 2\varphi & \cos 2\varphi \sin 2\varphi & 0 \\ \sin 2\varphi & \cos 2\varphi \sin 2\varphi & \sin^2 2\varphi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 - (\cos \Delta) \sin^2 2\theta & (1 - \cos \Delta) \sin 2\theta \cos 2\theta & -\sin \Delta \sin 2\theta \\ 0 & (1 - \cos \Delta) \sin 2\theta \cos 2\theta & 1 - (1 - \cos \Delta) \cos^2 2\theta & \sin \Delta \cos 2\theta \\ 0 & \sin \Delta \sin 2\theta & -\sin \Delta \cos 2\theta & \cos \Delta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (6.2)$$

$$\begin{aligned}
\begin{bmatrix} s_0 \\ s_1 \\ s_2 \\ s_3 \end{bmatrix} &= \frac{1}{2} I' \begin{bmatrix} 1 & \cos 2\varphi & \sin 2\varphi & 0 \\ \cos 2\varphi & \cos^2 2\varphi & \cos 2\varphi \sin 2\varphi & 0 \\ \sin 2\varphi & \cos 2\varphi \sin 2\varphi & \sin^2 2\varphi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\
&\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1-(1-\cos\Delta)\sin^2 2\theta & (1-\cos\Delta)\sin 2\theta \cos 2\theta & -\sin\Delta \sin 2\theta \\ 0 & (1-\cos\Delta)\sin 2\theta \cos 2\theta & 1-(1-\cos\Delta)\cos^2 2\theta & \sin\Delta \cos 2\theta \\ 0 & \sin\Delta \sin 2\theta & -\sin\Delta \cos 2\theta & \cos\Delta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (6.3)
\end{aligned}$$

となる．ここで I' は入射強度である．

以上を計算するとそれぞれ求まる光強度はストークス・パラメータの s_0 成分であるので次式で表せる．

$$\begin{aligned}
I_{0^\circ} = s_0 &= \frac{1}{4} I' (1 + \sin\Delta \sin 2\theta \cos 2\varphi + \cos\Delta \sin 2\varphi) \\
&= \frac{1}{4} I' \{1 + A \sin(2\varphi + \alpha)\} \quad (6.4)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
I_{45^\circ} = s_0 &= \frac{1}{4} I' (1 + \cos\Delta \cos 2\varphi - \sin\Delta \cos 2\theta \sin 2\varphi) \\
&= \frac{1}{4} I' \{1 + B \cos(2\varphi + \beta)\} \quad (6.5)
\end{aligned}$$

ただし，

$$\begin{aligned}
A &= \sqrt{\sin^2 \Delta \sin^2 2\theta + \cos^2 \Delta} \\
\alpha &= \tan^{-1} \left(\frac{\sin \Delta \sin 2\theta}{\cos \Delta} \right) \\
B &= \sqrt{\cos^2 \Delta + \sin^2 \Delta \cos^2 2\theta} \\
\beta &= \tan^{-1} \left(\frac{\sin \Delta \cos 2\theta}{\cos \Delta} \right) \quad (6.6)
\end{aligned}$$

ここで I_0, I_{45° は 1/4 波長板の方位が 0° の場合と 45° の場合の光強度, A, B は 1/4 波長板の方位が 0° の場合と 45° の場合の振幅 α, β は 1/4 波長板の方位が 0° の場合と 45° の場合の位相を表す．

4 ステップ位相シフト法を適用して, 偏光子アレイの方位 φ を 45° 間隔でシフトすると,

$$\left. \begin{aligned}
I_0 &= \frac{1}{4} I' (1 + \sin\Delta \sin 2\theta) = \frac{1}{4} I' (1 + A \sin \alpha) \\
I_1 &= \frac{1}{4} I' (1 + \cos\Delta) = \frac{1}{4} I' (1 + A \cos \alpha) \\
I_2 &= \frac{1}{4} I' (1 - \sin\Delta \sin 2\theta) = \frac{1}{4} I' (1 - A \sin \alpha) \\
I_3 &= \frac{1}{4} I' (1 - \cos\Delta) = \frac{1}{4} I' (1 - A \cos \alpha)
\end{aligned} \right\} \quad (6.7)$$

$$\left. \begin{cases} I_4 = \frac{1}{4} I' (1 + \cos \Delta) = \frac{1}{4} I' (1 + B \cos \beta) \\ I_5 = \frac{1}{4} I' (1 - \sin \Delta \cos 2\theta) = \frac{1}{4} I' (1 + B \sin \beta) \\ I_6 = \frac{1}{4} I' (1 - \cos \Delta) = \frac{1}{4} I' (1 - B \cos \beta) \\ I_7 = \frac{1}{4} I' (1 + \sin \Delta \cos 2\theta) = \frac{1}{4} I' (1 - B \sin \beta) \end{cases} \right\} \quad (6.8)$$

となる.

ここで $I_0 \sim I_3$ は 1/4 波長板の方位が 0° のときの偏光アレイの方位がそれぞれ $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$ の光強度を表し, $I_4 \sim I_7$ は 1/4 波長板の主軸方位が 45° のときの偏光アレイの方位がそれぞれ $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$ の光強度を表す. I_1 と I_4 は同じ式となり, I_3 と I_6 も同じ式となる.

式(2.52),(2.53)から位相 α, β を求めると,

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{I_0 - I_2}{I_1 - I_3} \right) \quad (6.9)$$

$$\beta = \tan^{-1} \left(\frac{I_5 - I_7}{I_4 - I_6} \right) \quad (6.10)$$

となる.

ここで式(2.51)からサンプルの複屈折位相差 Δ と方位 θ を求めると,

$$\Delta = \tan^{-1} \frac{\sqrt{\tan^2 \alpha + \tan^2 \beta}}{I_1 - I_3} = \tan^{-1} \frac{\sqrt{(I_0 - I_1)^2 + (I_5 - I_7)^2}}{I_1 - I_3} \quad (6.11)$$

$$\theta = \tan^{-1} \frac{\tan \alpha}{\tan \beta} = \tan^{-1} \frac{I_0 - I_2}{I_5 - I_7} \quad (6.12)$$

となる.

以上によりサンプルの複屈折位相差と方位が測定可能である. したがって, このアルゴリズムから 2 ショットで複屈折位相差のダイナミックレンジが 180° まで拡張した複屈折測定が可能になる.

今までのアルゴリズムでは 1/4 波長板の複屈折位相差のキャリブレーションができないため, 高精度な測定が困難である. そこで, サンプル後の 1/4 波長板の複屈折位相差のキャリブレーションを可能にしたアルゴリズムについて提案する.

図 2.11 に偏光カメラによる 3 ショット複屈折測定法の光学系を示す. 偏光子と 1/4 波長板により右円偏光をサンプルに入射させ, 複屈折位相差 δ_2 , 方位 ζ の位相子を透過させ, 偏光カメラで検出する.

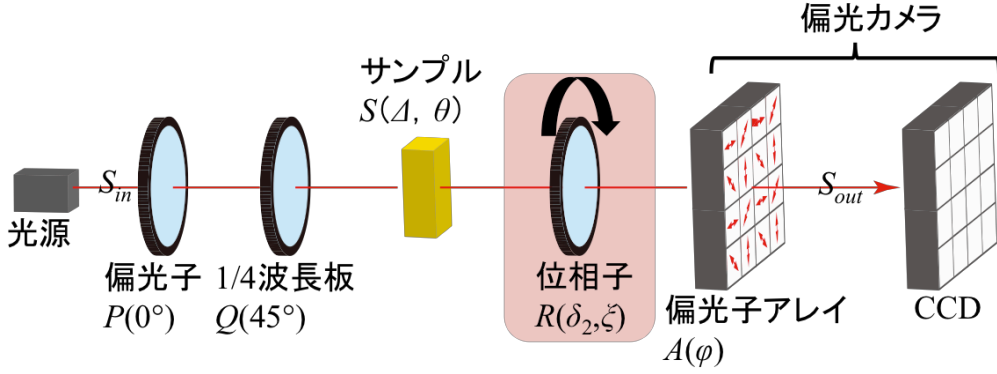


Fig6.2 Optical setup of birefringence measurement by polarization camera capturing three images

S_{in} と S_{out} は入射光のストークス・パラメータ, $P(0^\circ)$, $Q(45^\circ)$, $S(\Delta, \theta)$, $R(\delta_2, \xi)$, $A(\varphi)$ はそれぞれ方位 0° の偏光子, 方位 45° の $1/4$ 波長板, 複屈折位相差 Δ をもつ方位 θ のサンプル, $R(\delta_2, \xi)$ は複屈折位相差 δ_2 , 方位 ξ の位相子, 方位 φ の偏光アレイのミューラー行列を表す. ただし, φ は $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$ である.

以上の図 6.2 の光学系からストークス・パラメータとミューラー行列を用いると,

$$S_{out} = A(\varphi) \cdot R(\delta_2, \xi) \cdot S(\Delta, \theta) \cdot Q(45^\circ) \cdot P(0^\circ) \cdot S_{in} \quad (6.13)$$

$$\begin{bmatrix} s_0 \\ s_1 \\ s_2 \\ s_3 \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & \cos 2\varphi & \sin 2\varphi & 0 \\ \cos 2\varphi & \cos^2 2\varphi & \cos 2\varphi \sin 2\varphi & 0 \\ \sin 2\varphi & \cos 2\varphi \sin 2\varphi & \sin^2 2\varphi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 - (1 - \cos \delta_2) \sin^2 2\xi & (1 - \cos \delta_2) \sin 2\xi \cos 2\xi & -\sin \delta_2 \sin 2\xi \\ 0 & (1 - \cos \delta_2) \sin 2\xi \cos 2\xi & 1 - (1 - \cos \delta_2) \cos^2 2\xi & \sin \delta_2 \cos 2\xi \\ 0 & \sin \delta_2 \sin 2\xi & -\sin \delta_2 \cos 2\xi & \cos \delta_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 - (1 - \cos \Delta) \sin^2 2\theta & (1 - \cos \Delta) \sin 2\theta \cos 2\theta & -\sin \Delta \sin 2\theta \\ 0 & (1 - \cos \Delta) \sin 2\theta \cos 2\theta & 1 - (1 - \cos \Delta) \cos^2 2\theta & \sin \Delta \cos 2\theta \\ 0 & \sin \Delta \sin 2\theta & -\sin \Delta \cos 2\theta & \cos \Delta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (6.14)$$

となる.

以上を計算すると光強度はストークス・パラメータの s_0 成分であるので,

$$I = \frac{I'}{4} \left[1 + \left[-\sin \Delta \sin 2\theta \left\{ 1 - (1 - \cos \delta_2) \sin^2 2\xi \right\} + \sin \Delta \cos 2\theta (1 - \cos \delta_2) \sin 2\xi \cos 2\xi - \cos \Delta \sin \delta_2 \sin 2\xi \right] \cos 2\varphi \right. \\ \left. + \left[-\sin \Delta \sin 2\theta (1 - \cos \delta_2) \sin 2\xi \cos 2\xi + \sin \Delta \cos 2\theta \left\{ 1 - (1 - \cos \delta_2) \cos^2 2\xi \right\} + \cos \Delta \sin \delta_2 \cos 2\xi \right] \sin 2\varphi \right] \quad (6.15)$$

となる.

位相子の方位を $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ のときの光強度を取得し, 複屈折を測定する. 各々の方位および光強度は,

$$\left. \begin{aligned} I_{0^\circ} &= \frac{I'}{4} \left\{ 1 - \sin \Delta \sin 2\theta \cos 2\varphi + (\sin \Delta \cos 2\theta \cos \delta_2 + \cos \Delta \sin \delta_2) \sin 2\varphi \right\} \\ I_{45^\circ} &= \frac{I'}{4} \left\{ 1 + (-\sin \Delta \sin 2\theta \cos \delta_2 - \cos \Delta \sin \delta_2) \cos 2\varphi + \sin \Delta \cos 2\theta \sin 2\varphi \right\} \\ I_{90^\circ} &= \frac{I'}{4} \left\{ 1 - \sin \Delta \sin 2\theta \cos 2\varphi + (\sin \Delta \cos 2\theta \cos \delta_2 - \cos \Delta \sin \delta_2) \sin 2\varphi \right\} \end{aligned} \right\} \quad (6.16)$$

となる.

偏光子アレイの方位 $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$ を代入すると,

$$\left\{ \begin{array}{l} I_8 = \frac{I'}{4}(1 - \sin \Delta \sin 2\theta) \\ I_9 = \frac{I'}{4}\{1 + (\sin \Delta \cos 2\theta \cos \delta_2 - \cos \Delta \sin \delta_2)\} \\ I_{10} = \frac{I'}{4}(1 + \sin \Delta \sin 2\theta) \\ I_{11} = \frac{I'}{4}\{1 - (\sin \Delta \cos 2\theta \cos \delta_2 - \cos \Delta \sin \delta_2)\} \end{array} \right. \quad (6.17)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} I_0 = \frac{I'}{4}(1 - \sin \Delta \sin 2\theta) \\ I_1 = \frac{I'}{4}\{1 + (\sin \Delta \cos 2\theta \cos \delta_2 + \cos \Delta \sin \delta_2)\} \\ I_2 = \frac{I'}{4}(1 + \sin \Delta \sin 2\theta) \\ I_3 = \frac{I'}{4}\{1 - (\sin \Delta \cos 2\theta \cos \delta_2 + \cos \Delta \sin \delta_2)\} \\ I_4 = \frac{I'}{4}\{1 - (\sin \Delta \sin 2\theta \cos \delta_2 + \cos \Delta \sin \delta_2)\} \\ I_5 = \frac{I'}{4}(1 + \sin \Delta \cos 2\theta) \\ I_6 = \frac{I'}{4}\{1 + (\sin \Delta \sin 2\theta \cos \delta_2 + \cos \Delta \sin \delta_2)\} \\ I_7 = \frac{I'}{4}(1 - \sin \Delta \cos 2\theta) \end{array} \right. \quad (6.18)$$

となる.

したがって, これらを組み合わせると,

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta = \tan^{-1} \frac{2 \sin \delta \sqrt{(I_2 - I_0)^2 + (I_5 - I_7)^2}}{I_1 - I_3 - I_8 + I_{10}} \\ \theta = \tan^{-1} \frac{I_2 - I_0}{I_5 - I_7} \end{array} \right. \quad (6.19)$$

となる.

また, 位相子の複屈折位相差は

$$\delta_2 = \cos \left\{ \frac{I_1 - I_3 + I_9 - I_{11}}{2(I_5 - I_7)} \right\} \quad (6.20)$$

となり, この位相子の複屈折位相差を式(2.65)に代入することで, 位相子の複屈折位相差のキャリブレーションが可能となり, 複屈折位相差のダイナミックレンジを維持しつつ高精度な複屈折測定が可能となる.

サンプル後の位相子の複屈折位相差のキャリブレーションを可能にしたが, サンプル前の $1/4$ 波長板の複屈折位相差のキャリブレーションする必要がある. そこで, サンプル前後の位相子の複屈折位相差をキャリブレーションするアルゴリズムを提案する.

$$s' = \begin{bmatrix} s'_0 \\ s'_1 \\ s'_2 \\ s'_3 \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 \\ \{1 - (1 - \cos \Delta) \sin^2 2\theta\} \cos \delta_1 - \sin \Delta \sin 2\theta \sin \delta_1 \\ (1 - \cos \Delta) \sin 2\theta \cos 2\theta \cos \delta_1 + \sin \Delta \cos 2\theta \sin \delta_1 \\ \sin \Delta \sin 2\theta \cos \delta_1 + \cos \Delta \sin \delta_1 \end{bmatrix} \quad (6.22)$$

となり，左回りの偏光を入射したときのサンプル後のストークス・パラメータ s'' は，

$$s'' = \begin{bmatrix} s''_0 \\ s''_1 \\ s''_2 \\ s''_3 \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 \\ \{1 - (1 - \cos \Delta) \sin^2 2\theta\} \cos \delta_1 + \sin \Delta \sin 2\theta \sin \delta_1 \\ (1 - \cos \Delta) \sin 2\theta \cos 2\theta \cos \delta_1 - \sin \Delta \cos 2\theta \sin \delta_1 \\ \sin \Delta \sin 2\theta \cos \delta_1 - \cos \Delta \sin \delta_1 \end{bmatrix} \quad (6.23)$$

となる．

偏光カメラによる2ショットストークス・パラメータ測定のアлゴリズムを適応させると，サンプル後のストークス・パラメータはそれぞれ，

$$s' = \begin{bmatrix} s'_0 \\ s'_1 \\ s'_2 \\ s'_3 \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 \\ \{1 - (1 - \cos \Delta) \sin^2 2\theta\} \cos \delta_1 - \sin \Delta \sin 2\theta \sin \delta_1 \\ (1 - \cos \Delta) \sin 2\theta \cos 2\theta \cos \delta_1 + \sin \Delta \cos 2\theta \sin \delta_1 \\ \sin \Delta \sin 2\theta \cos \delta_1 + \cos \Delta \sin \delta_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ \frac{I_0 - I_2}{I_0 + I_2} \\ \frac{I_1 - I_3 + I_9 - I_{11}}{2(I_0 + I_2) \cos \delta_2} \\ \frac{I_1 + I_3 + I_9 - I_{11}}{2(I_0 + I_2) \sin \delta_2} \end{bmatrix} \quad (6.24)$$

$$s'' = \begin{bmatrix} s''_0 \\ s''_1 \\ s''_2 \\ s''_3 \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 \\ \{1 - (1 - \cos \Delta) \sin^2 2\theta\} \cos \delta_1 + \sin \Delta \sin 2\theta \sin \delta_1 \\ (1 - \cos \Delta) \sin 2\theta \cos 2\theta \cos \delta_1 - \sin \Delta \cos 2\theta \sin \delta_1 \\ \sin \Delta \sin 2\theta \cos \delta_1 - \cos \Delta \sin \delta_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ \frac{I_4 - I_6 + I_{12} - I_{14}}{2(I_5 + I_7) \cos \delta_2} \\ \frac{I_5 - I_7}{I_5 + I_7} \\ \frac{I_4 + I_6 + I_{12} - I_{14}}{2(I_5 + I_7) \sin \delta_2} \end{bmatrix} \quad (6.25)$$

となる．

式(2.71)から式(2.72)で引くと，

$$\begin{aligned} s_0 - s'_0 &= 0 \\ s_1 - s'_1 &= -\frac{1}{2} \sin \Delta \sin 2\theta \sin \delta_1 = \frac{I_0 - I_2}{I_0 + I_2} - \frac{I_4 - I_6 + I_{12} - I_{14}}{2(I_5 + I_7) \cos \delta_2} \\ s_2 - s'_2 &= \frac{1}{2} \sin \Delta \cos 2\theta \sin \delta_1 = \frac{I_1 - I_3 + I_9 - I_{11}}{2(I_0 + I_2) \cos \delta_2} - \frac{I_5 - I_7}{I_5 + I_7} \\ s_3 - s'_3 &= \frac{1}{2} \cos \Delta \sin \delta_1 = \frac{I_1 - I_3 - I_9 + I_{11}}{2(I_0 + I_2) \sin \delta_2} - \frac{I_4 + I_6 + I_{12} - I_{14}}{2(I_5 + I_7) \sin \delta_2} \end{aligned} \quad (6.26)$$

となる．

したがって，サンプルの複屈折位相差 Δ ，方位 θ は，

$$\begin{aligned} \Delta &= \tan^{-1} \frac{\sqrt{(s_1 - s'_1)^2 + (s_2 - s'_2)^2}}{s_3 - s'_3} \\ &= \tan^{-1} \frac{\tan \delta_2 \sqrt{\{I_1 - I_3 + I_9 - I_{12} - 2 \cos \delta_2 (I_5 - I_7)\}^2 + \{I_4 - I_6 + I_{12} - I_{14} - 2 \cos \delta_2 (I_0 - I_2)\}^2}}{I_1 - I_3 - I_9 + I_{11} - I_4 + I_6 + I_{12} - I_{14}} \end{aligned} \quad (6.27)$$

$$\theta = \frac{1}{2} \tan^{-1} \frac{s'_1 - s_1}{s_2 - s'_2} = \frac{1}{2} \tan^{-1} \frac{I_4 - I_6 + I_{12} - I_{14} - 2 \cos \delta_2 (I_0 - I_2)}{I_1 - I_3 + I_9 - I_{11} - 2 \cos \delta_2 (I_5 - I_7)} \quad (6.28)$$

となる。

このアルゴリズムを用いるとサンプル前に位相子の複屈折位相差が打ち消し合い、キャリブレーションできる。ただし、サンプル後の位相子の複屈折位相差はあらかじめ測定しておく必要がある。位相子複屈折位相差を測定するために、サンプルなしの状態と同様にサンプル前後の位相子を 2:1 の回転比率で回転させ測定する。

$$\delta_1 = \sin^{-1} \frac{I_1 - I_2}{I_1 + I_2} \quad (6.29)$$

$$\delta_2 = \cos^{-1} \frac{1}{2} \cdot \frac{I_2 - I_4 + I_{10} - I_{12} - I_{13} + I_{15} - I_5 - I_7}{I_6 - I_8 - I_9 + I_{11}} \quad (6.30)$$

このアルゴリズムにより複屈折位相差のダイナミックレンジを拡張、かつ、すべての位相子の複屈折位相差のキャリブレーションが可能になり、高精度な測定が可能となる。また、この手法は 2.3.1 で述べたストークス・パラメータ測定のアプローチを適応させているため、サンプル前後の偏光状態と複屈折位相差が同時に測定可能となる。

光源は白色光源を用い、ファイバーに入れ、レンズにより平行光にしている。中心波長 510nm から 550nm まで 10nm 刻みのバンドパスフィルタにより波長を制限し、このバンドパスフィルタの切り替えにより分光計測を行っている。右回り左回りの楕円偏光をサンプルに入射させるために偏光子、回転位相子で制御し、サンプル透過後、回転位相子を透過させズームレンズによってサンプルにフォーカスを合わせ偏光カメラで光強度を検出する。2つの回転位相子のエンコーダ情報と偏光カメラを同期させ、動的な複屈折測定を可能にしている。表 6.1 に偏光カメラによるストークス・パラメータ測定法に用いた実験装置を示す。

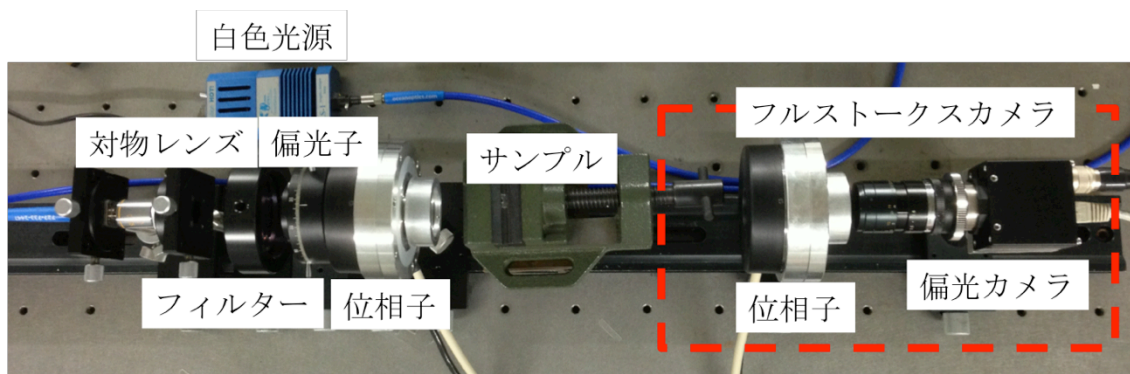


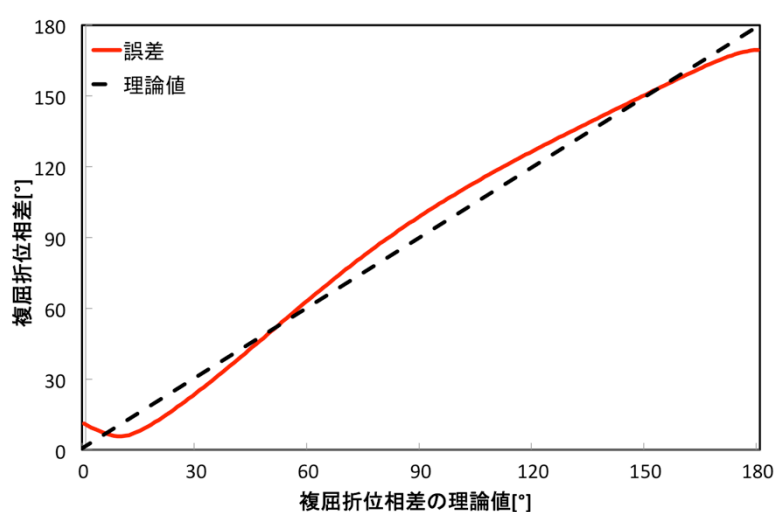
Fig6.3 Experimental optical setup of birefringence measurement by polarization camera

Table6.1 Experimental devices of birefringence measurement by polarization camera

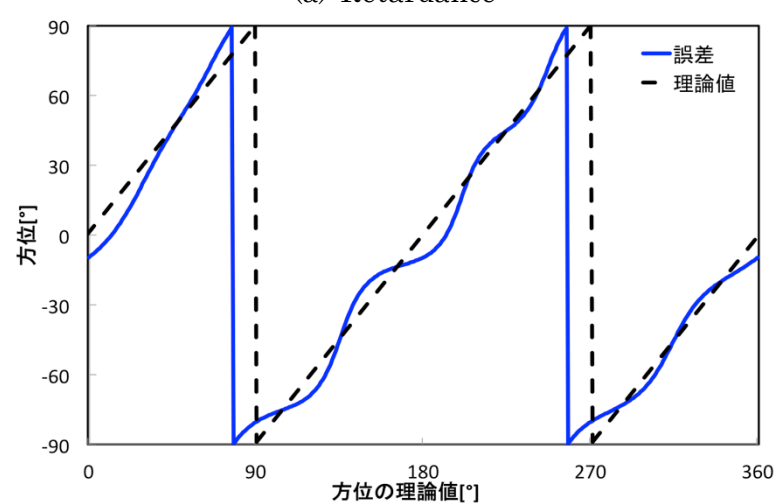
名称	メーカー	仕様
白色光源	Ocean Optics	<ul style="list-style-type: none"> ・ 波長範囲：300~1050nm ・ パワー出力 6.5W
ファイバー	Ocean Optics	<ul style="list-style-type: none"> ・ 波長範囲：300~1100nm ・ コア系：400±8μm
対物レンズ	Edmund Optics	<ul style="list-style-type: none"> ・ 倍率：10 倍 ・ NA：0.25
バンドパスフィルタ	Andover Corporation	<ul style="list-style-type: none"> ・ 中心波：510, 520, 530, 540, 550nm ・ 半値幅：10nm ・ 素子サイズ：
グラントムソン偏光子		<ul style="list-style-type: none"> ・ 素子サイズ：10×10mm
1/4 波長板	ユニオプト(株)	<ul style="list-style-type: none"> ・ 波長：633nm ・ ゼロオーダー ・ 素子サイズ：φ20mm
1/4 波長板	ユニオプト(株)	<ul style="list-style-type: none"> ・ 波長：633nm ・ ゼロオーダー ・ 素子サイズ：10×10mm
偏光子ホルダー	ツクモ工学(株)	<ul style="list-style-type: none"> ・ 適応径：φ30, φ50mm
中空回転モータ	テクノハンズ (株)	<ul style="list-style-type: none"> ・ 貫通径：φ22.5mm ・ 最大回転数：3000rpm ・ エンコーダ：2000P/R
中空回転モータのコントローラ (Whistle)	Elmo	<ul style="list-style-type: none"> ・ 制御方式:TTL 信号 or アナログ ・ 電流, 速度, 位置制御可能
中空回転モータの電源	TRACO POWER	<ul style="list-style-type: none"> ・ 出力電圧：12V, 5V
ズームレンズ		<ul style="list-style-type: none"> ・ 焦点距離：0.5m~3m ・ 素子径：25.5mm
偏光カメラ	(株)フォトニクラテイス	<ul style="list-style-type: none"> ・ 撮影速度:20fps(フル解像度) ・ 解像度：1120×868pixels ・ 画素サイズ：4.65μm ・ センサー：1/2CCD ・ A/D：8, 12bit
PC	Dell	<ul style="list-style-type: none"> ・ 制御言語：Labview2011

ストークス・パラメータ測定と同様に複屈折測定の場合でも、位相子の複屈折位相

差の誤差が複屈折測定に大きく影響する。そこで、サンプル前後の位相子が 1/4 波長板($\delta_1, \delta_2=90^\circ$)を用いたと仮定し誤差が $\pm 5^\circ$, $\pm 10^\circ$ 与えたときの複屈折を算出した。図 6.4(1)にサンプル前の 1/4 波長板に -10° の誤差, 図 6.4(2) に -5° , 図 6.4 (3) に 5° 図 6.4 (4) に 10° , 図 6.4 (5)にサンプル後の 1/4 波長板に -10° の誤差, 図 6.4 (6) に -5° , 図 6.4 (7) に 5° 図 6.4 (8) に 10° の誤差を与えたときの複屈折測定の結果を示す。今回、この結果からサンプル前の位相子の複屈折位相差の誤差はサンプルの複屈折位相差と方位は非線形誤差起きることがわかり、特に方位はサンプル前の位相子の複屈折位相差の誤差に影響することがわかった。サンプル後の複屈折位相差の誤差はサンプルの複屈折位相差のみに影響することがわかった。よって位相子の複屈折位相差のキャリブレーションが必要は重要であることがわかった。

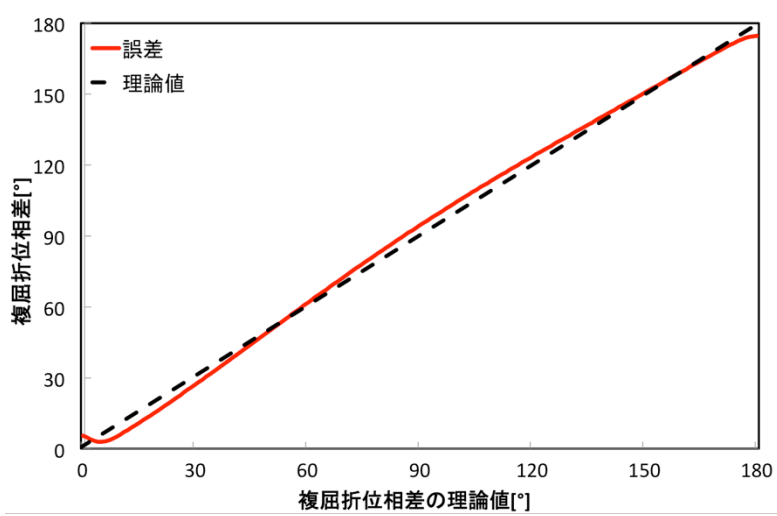


(a) Retardance

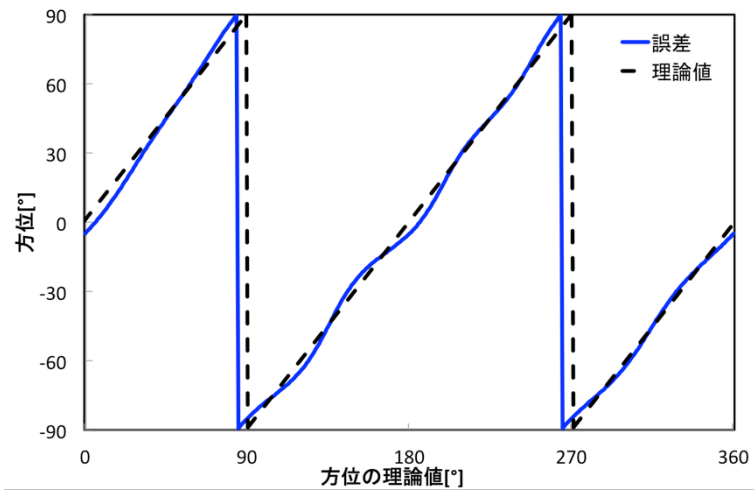


(b) Azimuthal direction

(1) Retardance of QWP before sample has error of -10°

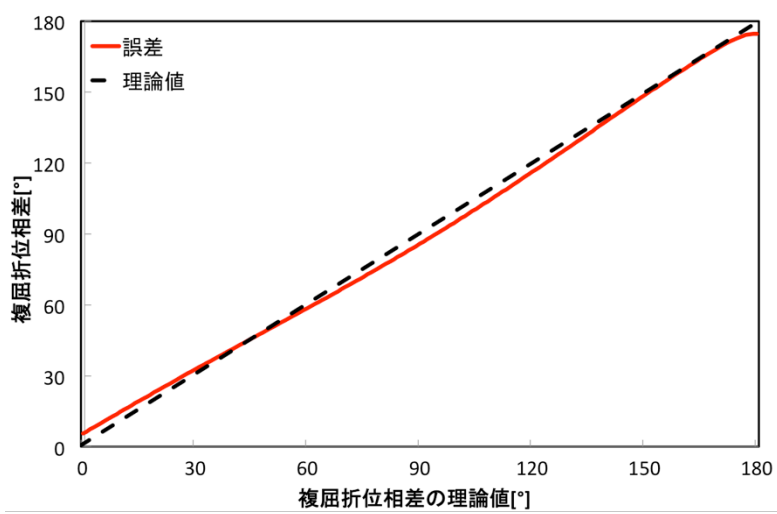


(a) Retardance

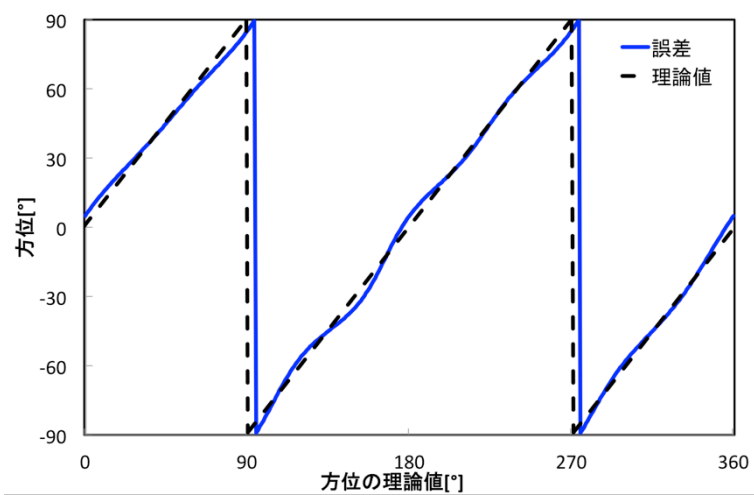


(b) Azimuthal direction

(2) Retardance of QWP before sample has error of -5°

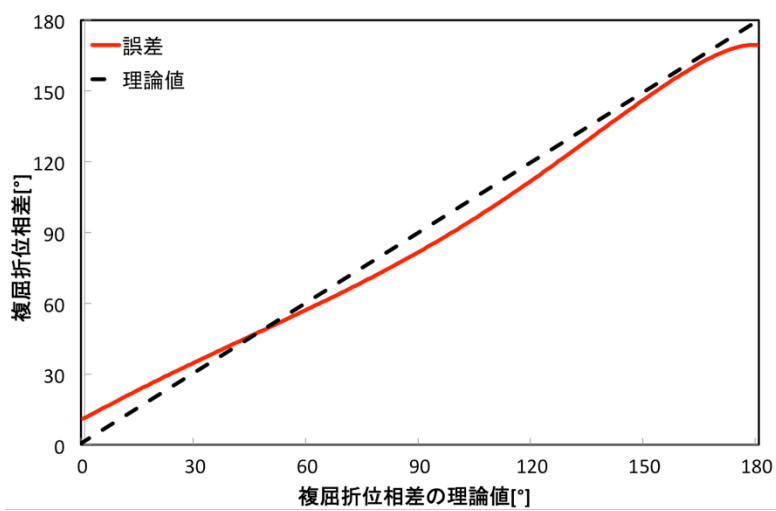


(a) Retardance

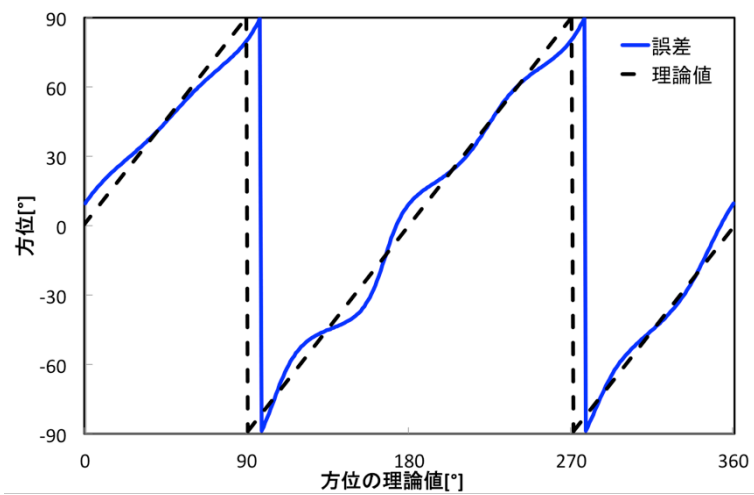


(b) Azimuthal direction

(3) Retardance of QWP before sample has error of 5°

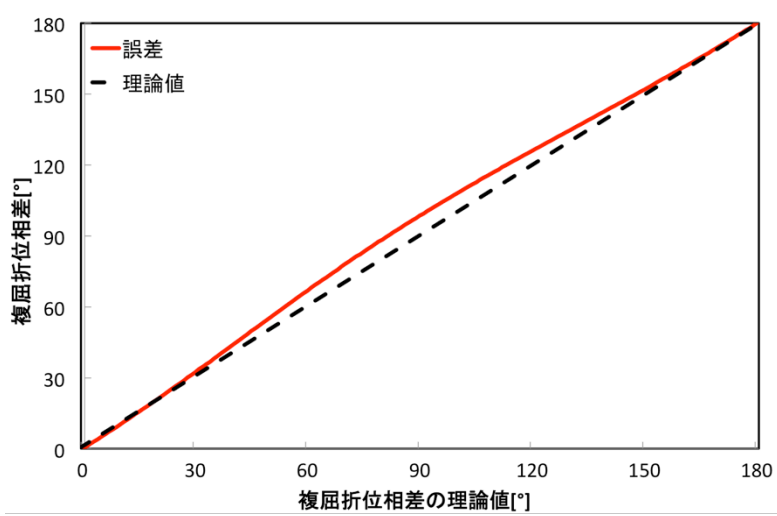


(a) Retardance

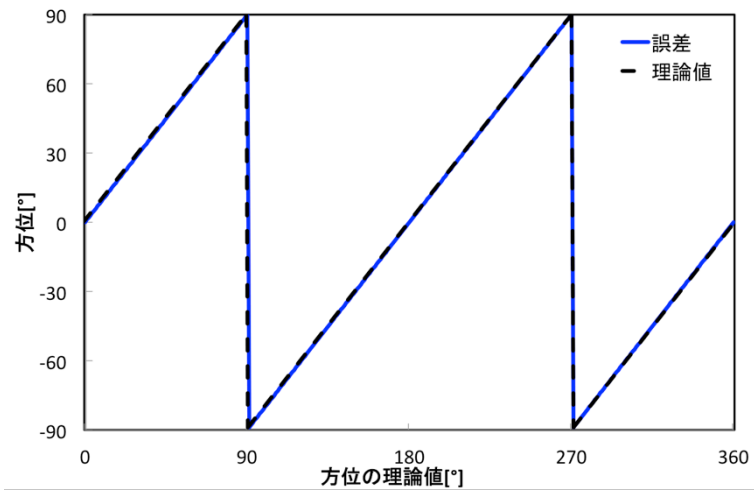


(b) Azimuthal direction

(4) Retardance of QWP before sample has error of 10°

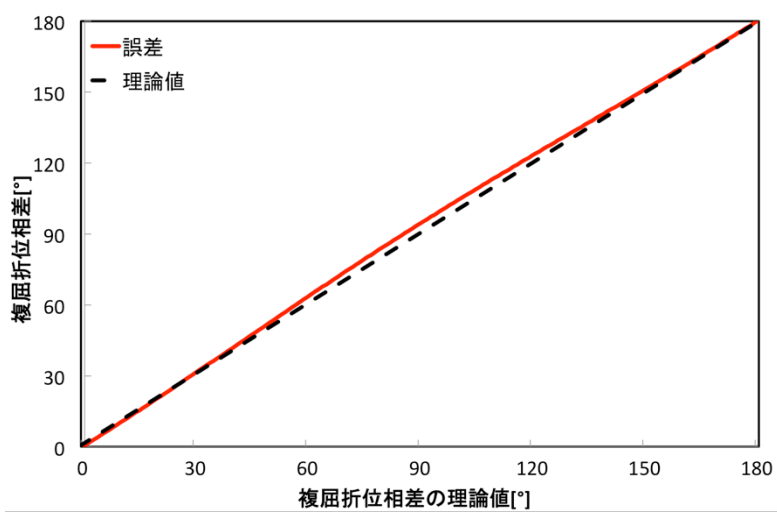


(a) Retardance

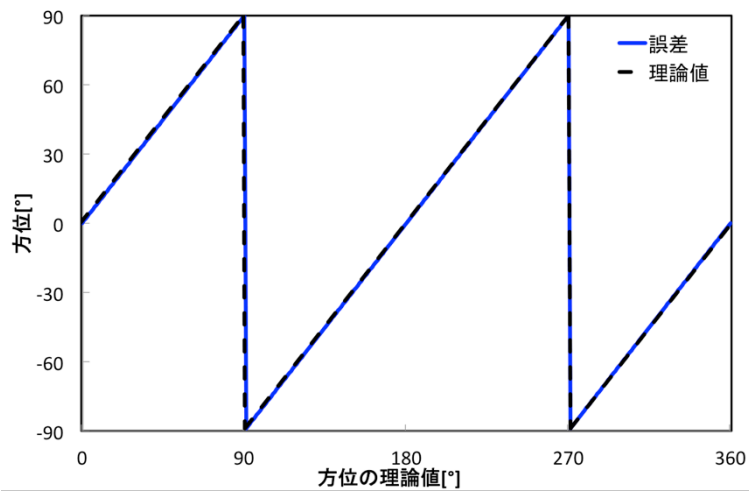


(b) Azimuthal direction

(5) Retardance of QWP after sample has error of -10°

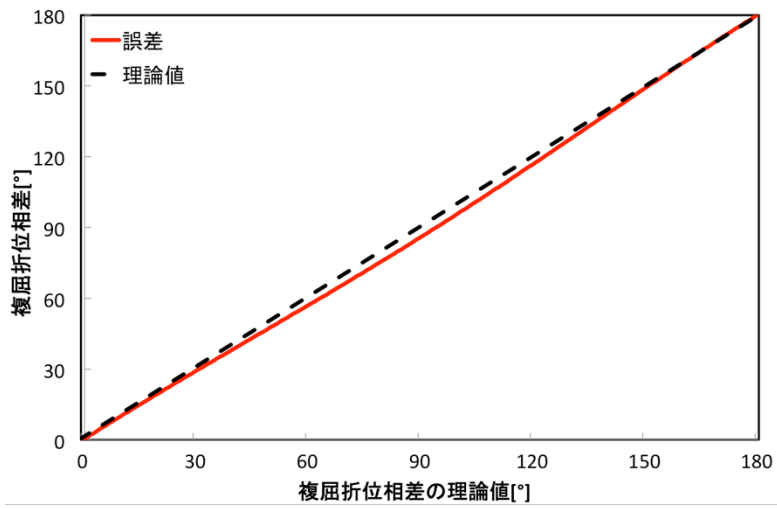


(a) Retardance

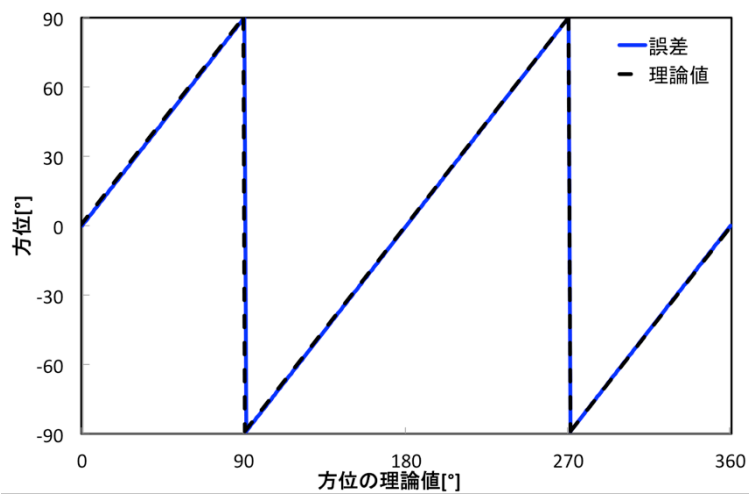


(b) Azimuthal direction

(6) Retardance of QWP after sample has error of -5°

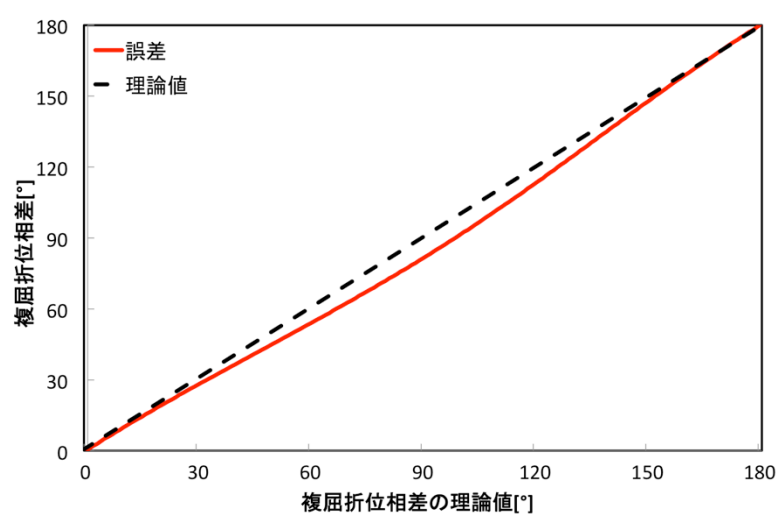


(a) Retardance

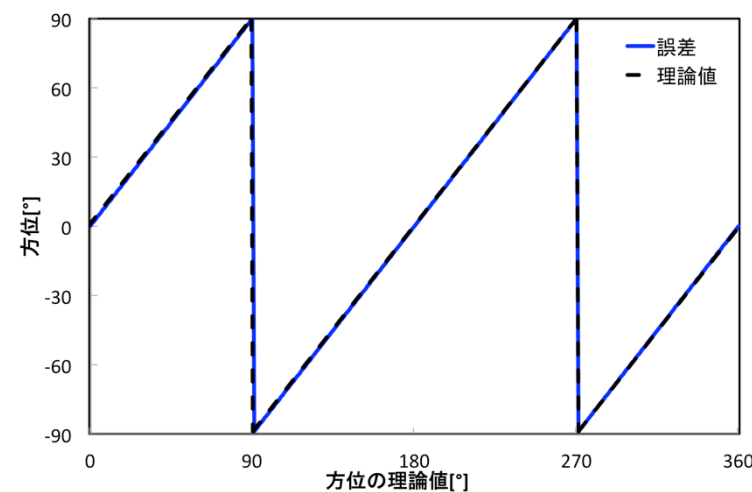


(b) Azimuthal direction

(7) Retardance of QWP after sample has error of 5°



(a) Retardance



(b) Azimuthal direction

(8) Retardance of QWP after sample has error of 10°

Fig6.4 Simulation results of birefringence influencing retardance error of rotating retarder

キャリブレーションのアルゴリズムが適応可能かどうか検証した。比較するため測定装置は AxoScan ミュラー行列・ポラリメータに用いた。表 6.2 に波長 520nm の光を用いてキャリブレーションのアルゴリズムで測定した複屈折位相差と AxoScan ミュラー行列・ポラリメータで測定した結果を示す。偏光カメラによる 3 ショット複屈折測定はサンプル後の位相子の複屈折位相差のみのキャリブレーション法であるため、サンプル後の位相子の複屈折位相差はない。表 6.2 からキャリブレーション法どちらもこれらの位相子の複屈折位相差のキャリブレーションが有効であるとわかる。

Table6.2 Comparison result of retardance measurements

		AxoScan	3ショットアルゴリズム		4ショットアルゴリズム	
			平均値	標準偏差	平均値	標準偏差
複屈折位相差 [°]]	サンプル前の位相子	105.4	/		104.8	±0.56
	サンプル後の位相子	136.6			135.2	±0.67

偏光カメラによる複屈折測定 of 精度検証を行った。複屈折位相差の精度検証には図 6.5 に示す複屈折位相差が任意に変化できるバビネ・ソレイユ補償器を用いた。バビネ・ソレイユ補償器とはくさび形の複屈折性結晶と複屈折性結晶板を重ね合わせたものである。2枚のくさび形の結晶の光学軸が同じ方向に成っている。そして、2枚のそれらとは直交している結晶板を重ねて一定量の位相差を打ち消している。したがって、2枚のくさび形の結晶の厚さともう1枚の厚さの差に相当する位相差が得られる。一つのくさび形の結晶をマイクロメータで送ることにより任意に複屈折位相差が得られ、複屈折位相差はマイクロメータの送り量に対して線形的に変化する。図 6.5(a)は厚さが同じであるので複屈折位相差はない。また図 6.5 (b)は厚さが異なるので複屈折位相差を得る。今回は PI 社のサーボモータによりマイクロメータを送り、自動で複屈折位相差が変調できるバビネ・ソレイユで測定した。また、方位の精度検証は 633nm の 1/4 波長板を自動回転モータで回転させ測定した。

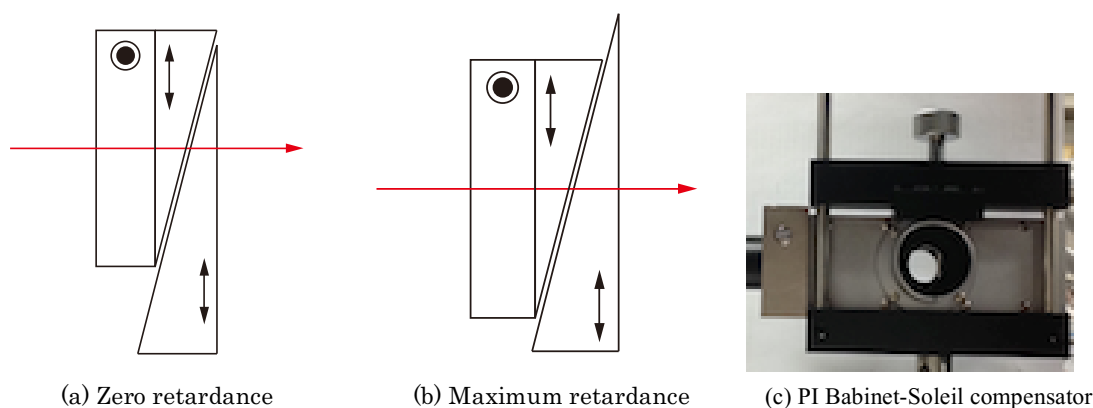
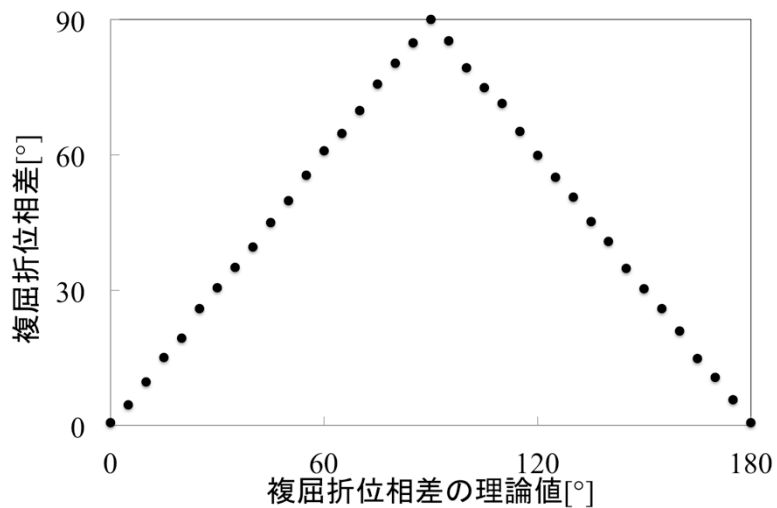


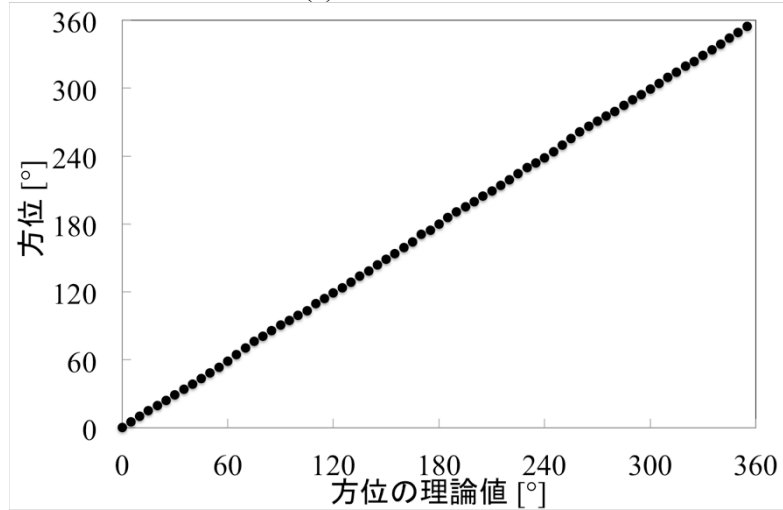
Fig6.5 Babinet-Soleil compensator

図 6.6 に複屈折測定の結果を示す。図 6.6 (a)は、複屈折位相差、図 6.6 (b)は方位での結果となる。表 6.3 に標準偏差で求めた精度結果を示す。図 6.6 (1)に示す。従来の 1 ショット複屈折測定では、90°で折り曲がってしまい、ダイナミックレンジが狭い。図 6.6 (2)に示す 2 ショット複屈折測定は、複屈折位相差のダイナミックレンジが 180°

まで拡張することに成功したが、位相子のキャリブレーションを行っていないため、精度が低下している。図 6.6 (3)に示す述べた 3 ショット複屈折測定は、サンプル後方の位相子のキャリブレーションをしたため複屈折位相差の精度が向上した。しかし、サンプル前の位相子のキャリブレーションが行えていないため、方位の精度が非常に悪い。図 6.6 (4)に示す 4 ショット複屈折測定は、2つの位相子のキャリブレーションを可能にしたため、複屈折位相差、方位ともに精度向上していることがわかる。

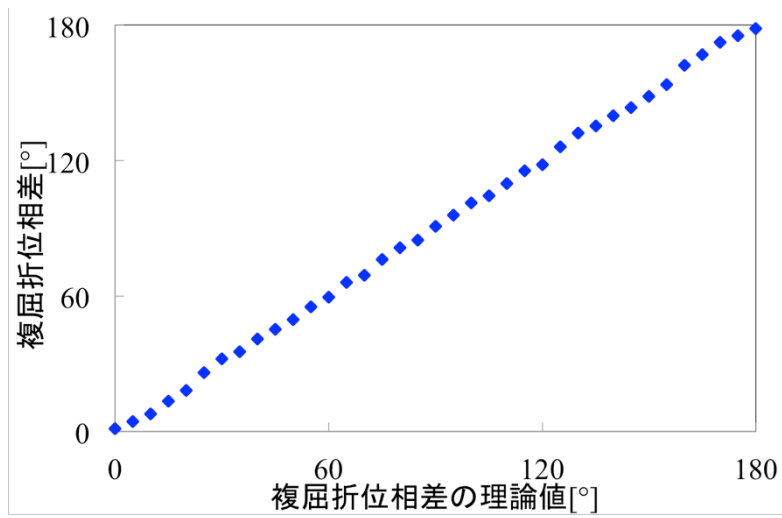


(a) Retardance

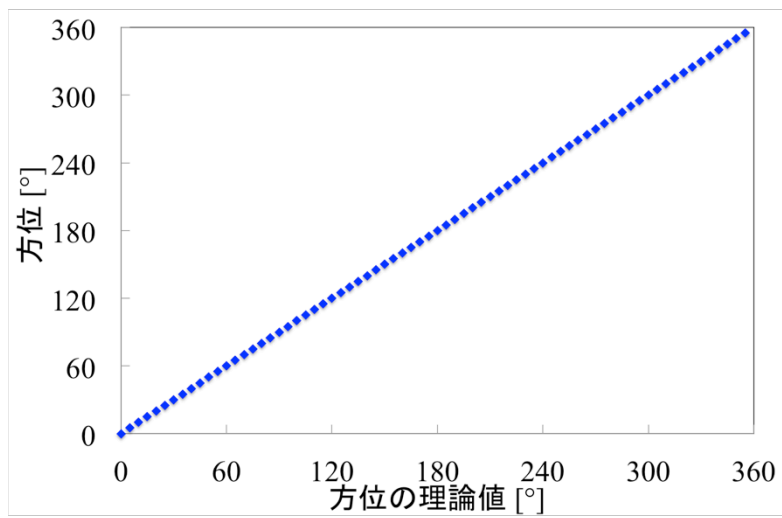


(b) Azimuthal direction

(1) Traditional birefringence measurement by polarization camera

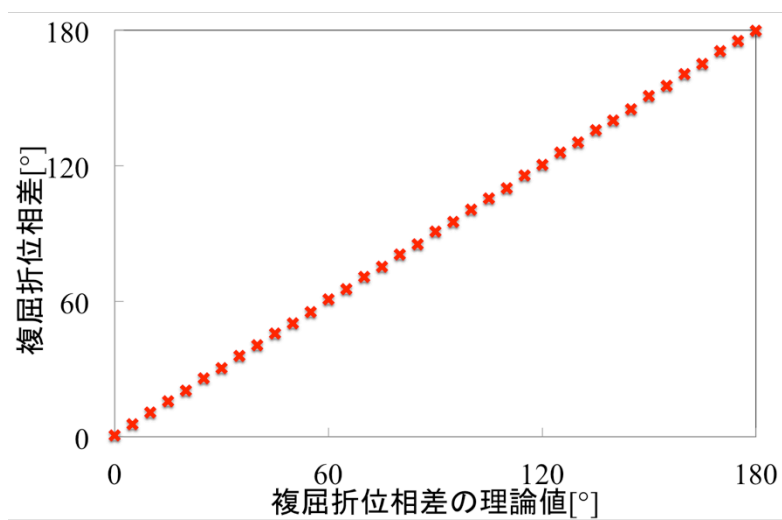


(a) Retardance

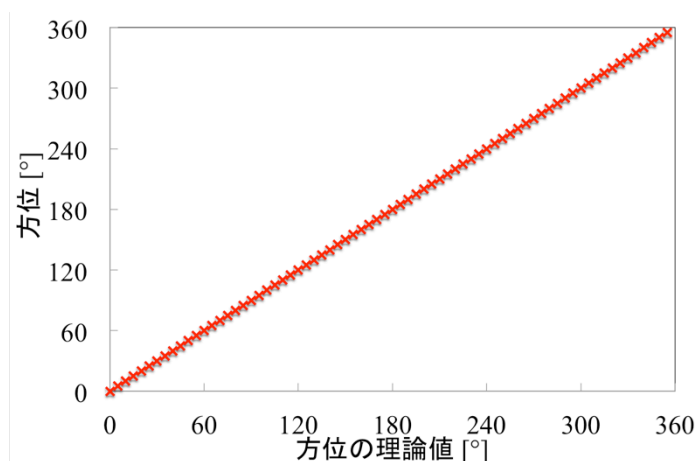


(b) Azimuthal direction

(2) Birefringence measurement using two-shot algorithm

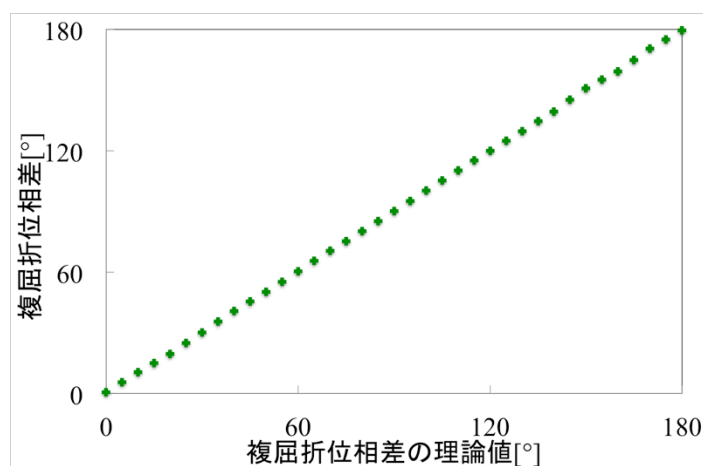


(a) Retardance

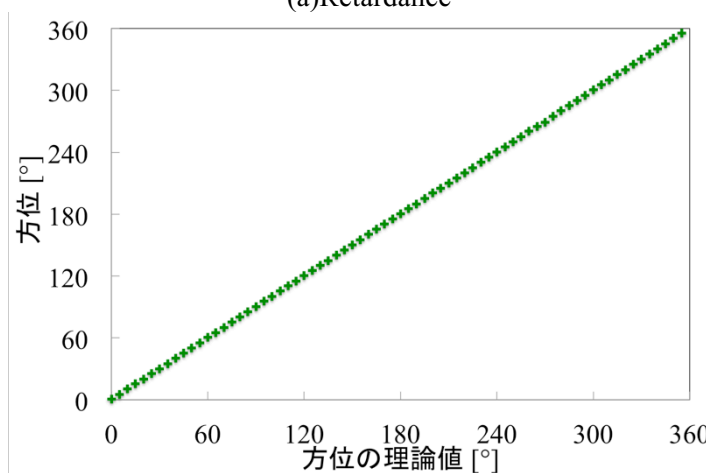


(b) Azimuthal direction

(3) Birefringence measurement using three-shot algorithm



(a) Retardance



(b) Azimuthal direction

(4) Birefringence measurement using four-shot algorithm

Fig6.6 Results of birefringence measurement as checking accuracy of birefringence measurement

Table6.3 Accuracy results of birefringence measurement by polarization camera

測定法	複屈折位相差	方位	ダイナミックレンジ
1ショット	$\pm 0.6^\circ$	$\pm 1.4^\circ$	90°
2ショット	$\pm 1.0^\circ$	$\pm 1.6^\circ$	180°
3ショット	$\pm 0.5^\circ$	$\pm 1.6^\circ$	180°
4ショット	$\pm 0.45^\circ$	$\pm 0.75^\circ$	180°

次に、複屈折測定の時安定性について考える。図 6.7 に 1/4 波長板の複屈折を 5 分間計測した結果を示す。時間分解能は 0.1s である。精度を安定させるために白色光源を 1 時間前から点灯させ、回転位相子の回転モータを 10 分前から動かして測定した。図 6.7 から 5 分間の時間安定性はあるということがわかった。

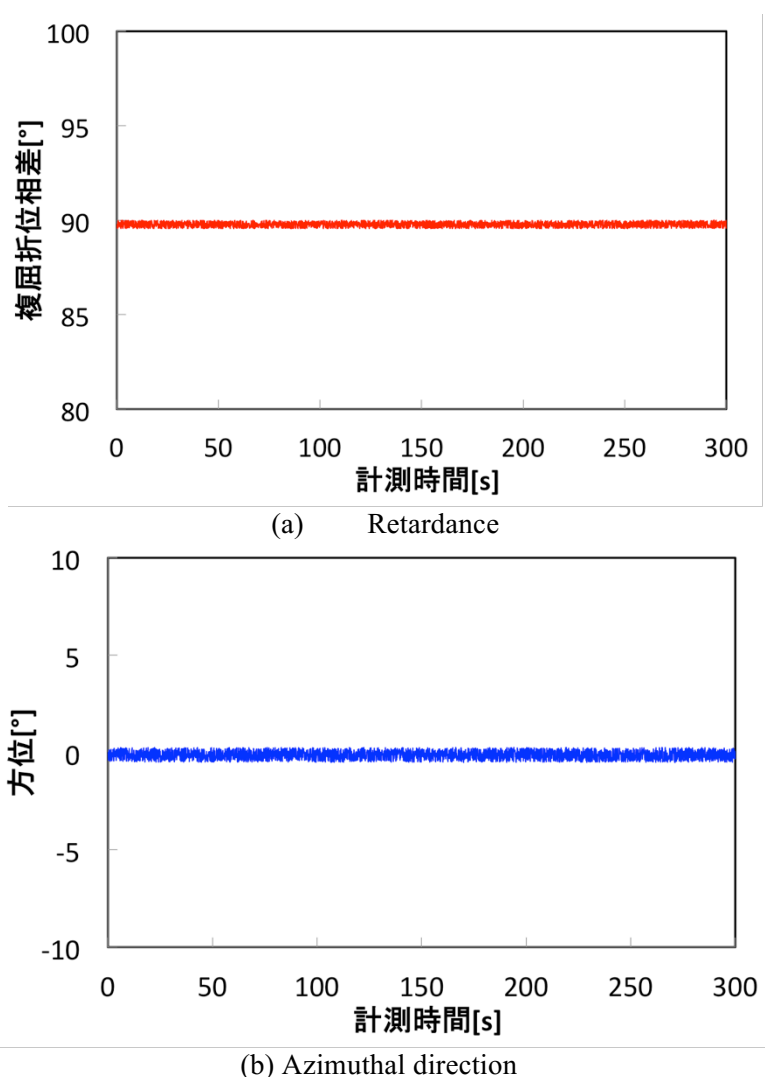


Fig6.7 Time stability of birefringence measurement by polarization camera

すべての位相子の複屈折位相差はキャリブレーションが可能となったため、位相子の波長分散の影響を受けず、複屈折測定が可能となった。したがって、分光複屈折計測が

可能となるので試みた。まず、偏光カメラはフォトニック結晶で偏光子アレイが波長依存性を持ち、また偏光アレイにはバンドパスフィルタが組み込まれているため、波長可変光源を用いて偏光カメラがどの波長領域まで使用できるかを確認した。用いた光源はAXOMETRICS社のキセノンランプでグレイティングを通し単波長光源である。そして、このグレイティングをスキャンし波長を制御している。今回、5nm ずつ変化させ、偏光子によって垂直直線偏光を入射させ、波長依存性を測定した。その結果を図 4.10 に示す。図 6.8 からこの偏光カメラで測定できる波長は 505 から 560nm であることがわかった。

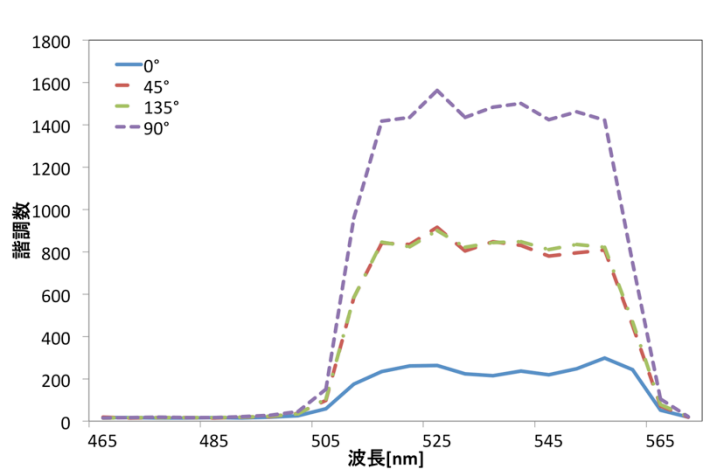


Fig6.8 Wavelength dependence result of polarizer array using tunable visible sources

光源には波長制御として用いていた異なる 5 種類のバンドパスフィルタを切り替えて波長を制御し単波長の光にしている。中心波長が 510, 520, 530, 540, 550nm, 半値幅 10nm のバンドパスフィルタを用いた。そして、4.2.3 で複屈折測定 of 精度検証実験で用いた自動バビネ・ソレイユ補償器を用いて、各波長の精度検証実験と同様にバビネ・ソレイユ補償器のマイクロメータを送り、複屈折を測定した。その結果を図 4.11 に示す。図 6.9 からバビネ・ソレイユ補償器の波長分散に応じて複屈折位相差が変化していることがわかり、分光複屈折計測が可能であることがわかった。

今後は各送り量の波長分散値からフィッティングを行い、すべての波長域の波長分散結果を測定する。また、各送り量の波長分散値の幅から複屈折位相差の次数が計測でき、次数から干渉計測で用いられているアンラップ処理をすることで、更なる複屈折位相差のダイナミックレンジの拡張に取り組んでいく。

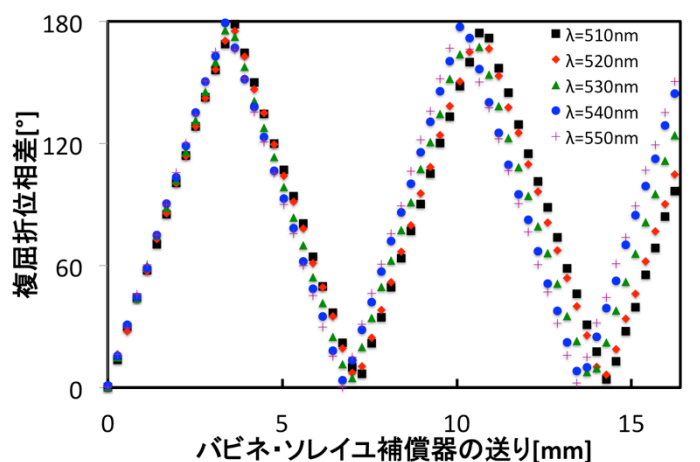
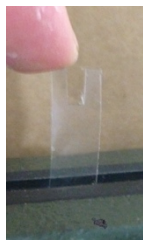


Fig6.9 Result of Spectroscopic birefringence measurement by polarization camera

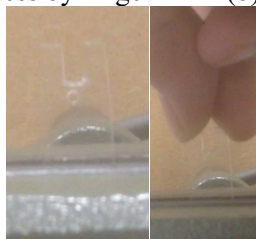
次に3種類のサンプルで動的な偏光カメラによる複屈折のマッピングを行った。PETを図6.10(a)に示すようにU字型にカットし、U字の端を指で左右の力を加えている状態と図6.10(b)に示すようにフィルムをねじっている状態と図6.10(c)に示すようにU字型フィルムの中心に穴をあけ、U字型フィルムの両端を指で中央に向けて力を加えている状態の複屈折の計測を行った。



(a) U shape film applying stress by finger



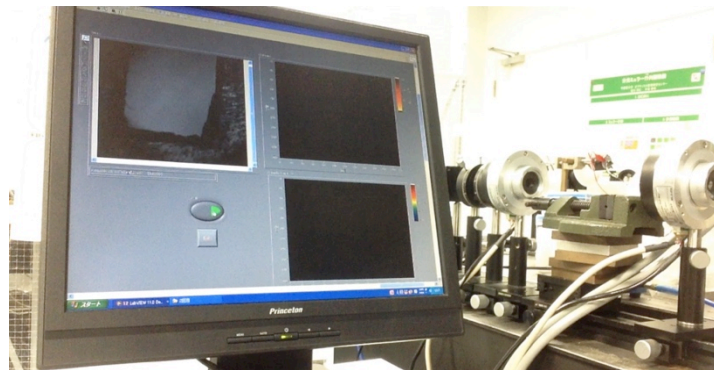
(b) PET film twisting by fingers



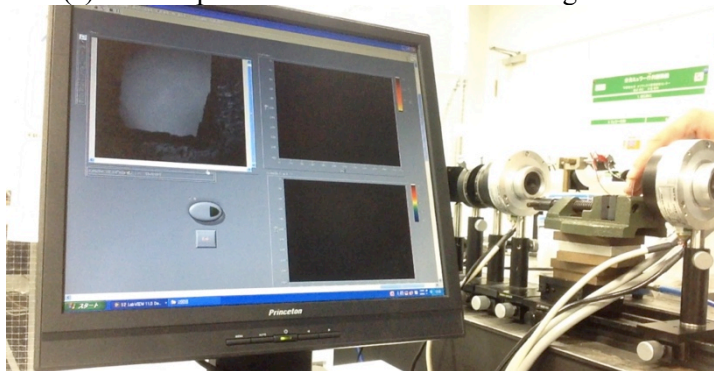
(c) Fenestrated U shape film applying stress by fingers

Fig6.10 Samples of birefringence measurement by polarization camera dynamically

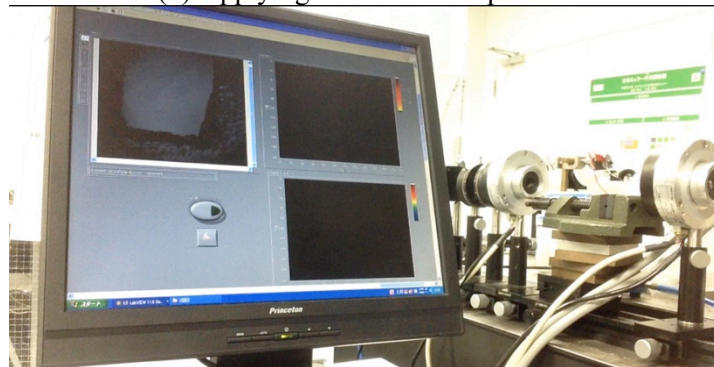
図6.11に偏光カメラの複屈折測定実験の様子を示す。計測条件は偏光カメラの撮影速度40fps、計測時間10fps、計測時間10秒間でU字型フィルムの端に力を左右交互に加えたときの状態を計測した。始めに、図6.11(a)のように偏光カメラと回転モータを起動させ、モータ速度が一定になるまで数秒待ち、計測を開始させる。そして、図6.11(b)のようにU字フィルムに力を加え、計測を終え、図6.11(c)中に2.4.3で述べたアルゴリズムで解析し、最後に図6.11(d)で複屈折を表示させる。



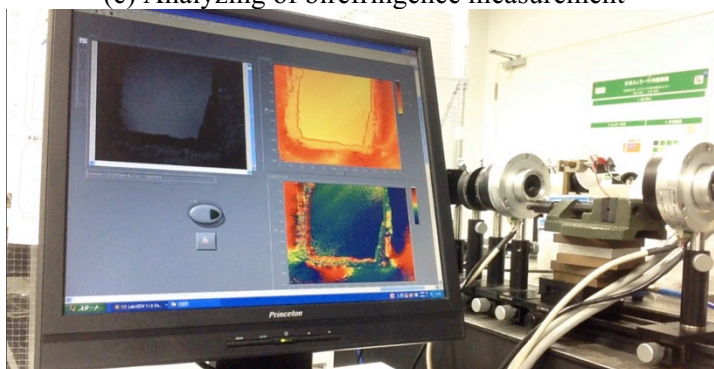
(a) Start of polarization camera and rotating motors



(b) Applying stress to U shape film



(c) Analyzing of birefringence measurement



(d) Showing of birefringence result

Fig6.11 Experimental scenes of birefringence measurement by polarization camera

図 6.12 に U 字型フィルムの端に左右交互に力を加えたとき複屈折測定の結果を示す。今回は 520nm のバンドパスフィルタを用いて計測を行った。図 6.12 から U 字型フィ

フィルムに力を加えたときフィルム内の複屈折が変化していることがわかった。応力場が動的にマッピングできていることがわかった。

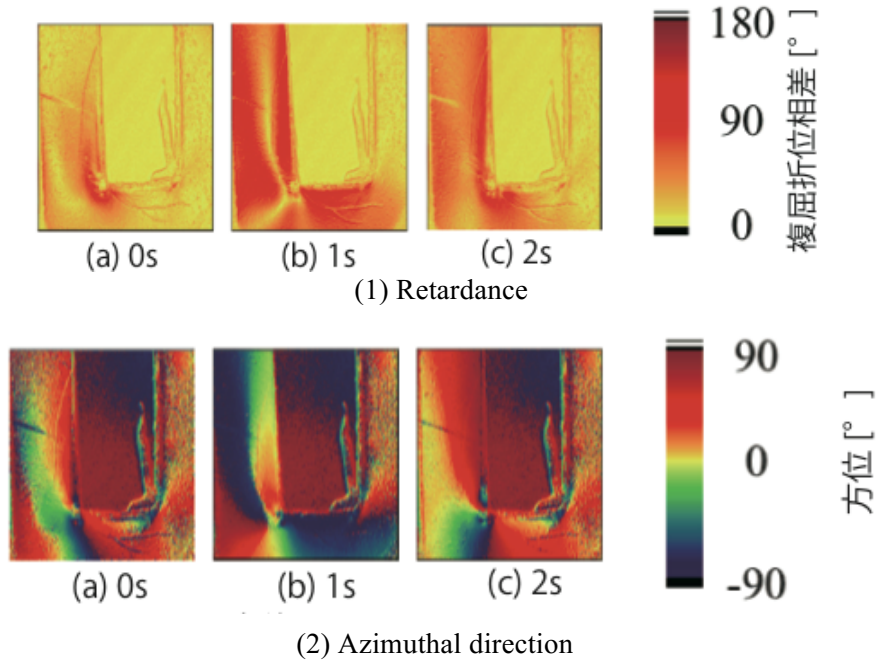
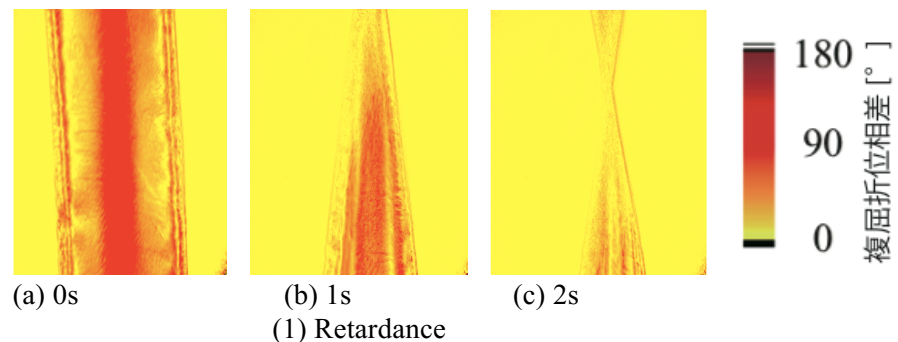


Fig6.12 Result of Birefringence mapping of U shape film applying stress by finger

図 6.13 にフィルムの指でねじったときの複屈折の結果を示す。520nm のバンドパスフィルタを用いて計測を行った。図 4.15 からねじったとき力を加えたときフィルム内の複屈折が変化していることがわかった。ねじると光軸方向の力も加わるため、正確に複屈折計測できていない可能性がある。



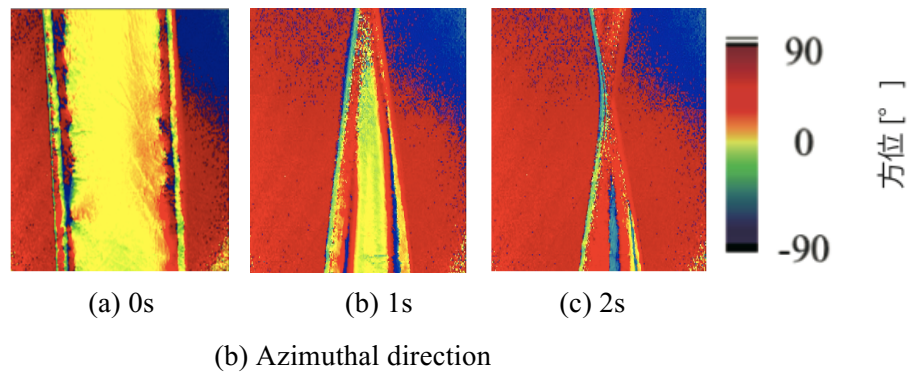


Fig6.13 Result of Birefringence mapping of film twisting by fingers

図 6.14 に穴の空いた U 字型フィルムの両端に中央に力を加えたとき複屈折測定の結果を示す. 今回は 550nm のバンドパスフィルタを用いて計測を行った. 図 6.14 から穴の空いた U 字型フィルムに両端に力を加えたとき, フィルム内の複屈折が変化していることがわかる. 特に穴が空いているため, 穴の付近が特に複屈折位相差が大きく, 応力が集中していることがわかった.

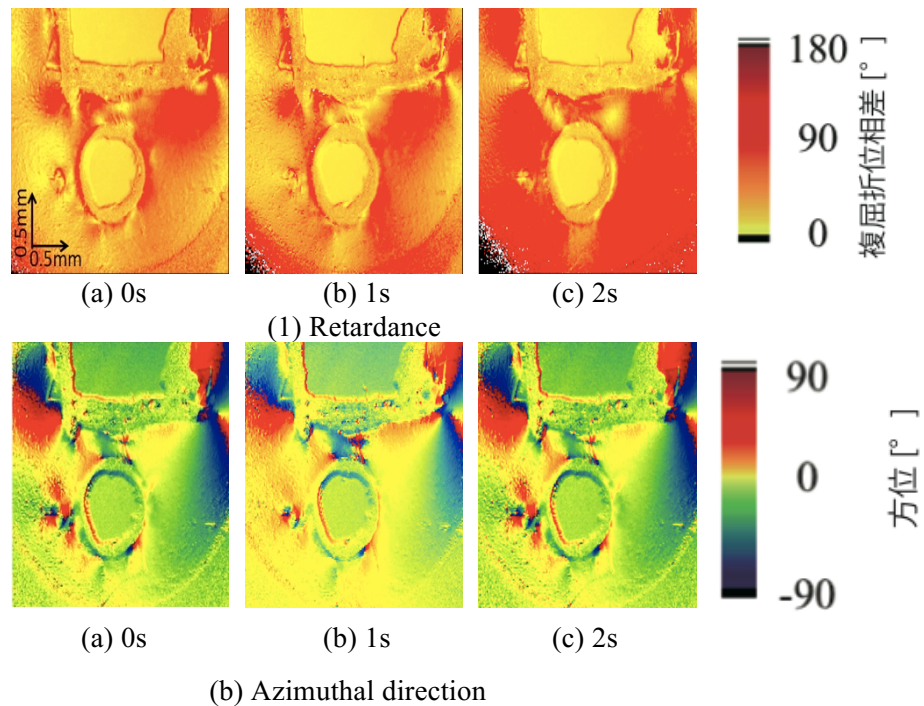


Fig6.14 Result of Birefringence mapping of film twisting by fingers

これらの結果から偏光カメラによる動的なストークスマッピングと分光複屈折マッピングが可能であることがわかった.

6.2 微分干渉顕微鏡による位相解析

現在、生体を可視化するためにある特定のところに染色⁵⁴⁾させているが、この染色作業や染色色素が生体に侵襲するのではないかと問題になっている。染色せず生体を可視化する要求がある。微分干渉顕微鏡⁵⁵⁾は生体材料などのコントラストを高めて可視化させ観察する有力な方法として知られている。現在まで観察物体の定量化を提案されている。従来の方法は異なった複数枚を用いて試料の三次元形状⁵⁶⁻⁵⁷⁾試料表面の勾配分布に関して報告されている⁵⁸⁻⁶⁰⁾。しかし、この方法では物体表面の微細構造による回折され、微細構造を精度よく定量化することが困難なる。これらの問題を解決した部分的コヒーレント結像理論を用いて位相変調型微分干渉顕微鏡を開発し試料表面の微細構造を定量的に計測することが報告されている⁶¹⁻⁶²⁾。現在の要求において微分干渉顕微鏡は高感度化、高解像力およびリアルタイム計測が挙げられている。近年、リアルタイム計測のアプローチとして画素ごとに偏光板が組み込まれた偏光カメラが提案されている⁶³⁾。この方法は2枚の微分位相画像から位相に変えているため、リアルタイム計測ではない。

我々は偏光カメラを用いて微分干渉顕微鏡を用いてリアルタイムで位相計測を可能にさせたので報告する。

DIC 顕微鏡によって撮像された純粋な位相物体からなる単純な1次元モデルから始め、検出器平面で強度分布 $I(x)$ を生成する。図 6.15 に示すように顕微鏡は、光源、照明光学系、位相物体、結像光学系、および検出器アレイからなる。

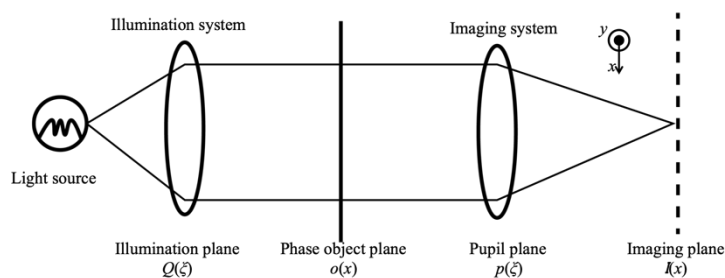


Fig. 6.15 Simple model of a transmission microscope

Hopkins の理論⁶⁴⁾と顕微鏡の部分コヒーレンス理論⁶⁵⁾によれば、検出器アレイ上の像強度分布 $I(x)$ は、

$$I(x) = \int \int_{-\infty}^{\infty} R(f_x, f'_x) O(f_x) O^*(f'_x) \exp\{-2\pi i(f_x - f'_x)x\} df_x df'_x, \quad (6.31)$$

ここで、 $O(f_x)$ は、位相物体 $o(x)$ のフーリエ変換であり、transmission cross-coefficient (TCC) の $R(f_x, f'_x)$ は、複素値の以下の式で与えられる。

$$R(f_x, f'_x) = \int_{-\infty}^{\infty} Q(\xi) p(\xi + f_x) p^*(\xi + f'_x) d\xi, \quad (6.32)$$

照明系の強度分布を $Q(\xi)$ 、複素値瞳関数を $p(\xi)$ とする。

DIC 顕微鏡は、2つのノマルスキープリズムによって生成された2つの直交偏光ビーム間の横方向せん断干渉を利用し、ビームは試料のわずかに異なる領域（せん断距離 Δ ）を通過する。その後、2つのビームは、せん断をキャンセルする第2の対のノマルスキープリズムによって一緒に戻される。画像平面で観察される得られたインターフェログラムは、剪断方向に沿った対象相の空間勾配を符号化する。

図 6.16 は、偏光カメラを用いた DIC 顕微鏡の提案された光学レイアウトを示す。DIC 顕微鏡は、2つのノマルスキープリズム間のせん断軸に沿ってリターデーションの $\pi/2$ を発生するように設定されています。これは、微細構造相がこの設定で最も強調されるためです。偏光カメラは、1枚の画像で偏光方位角 (0° 、 45° 、 90° 、 135°) ごとに4種類の強度を検出できます。マイクロ偏光子アレイの 0° および 90° に配向されたピクセルを用いて検出された強度は、これらの軸がせん断方向に整列しているため干渉を生じない。したがって、 45° および 135° の方向のピクセルを使用して検出された2つの強度のみを使用し、 0° および 90° のデータは無視します。

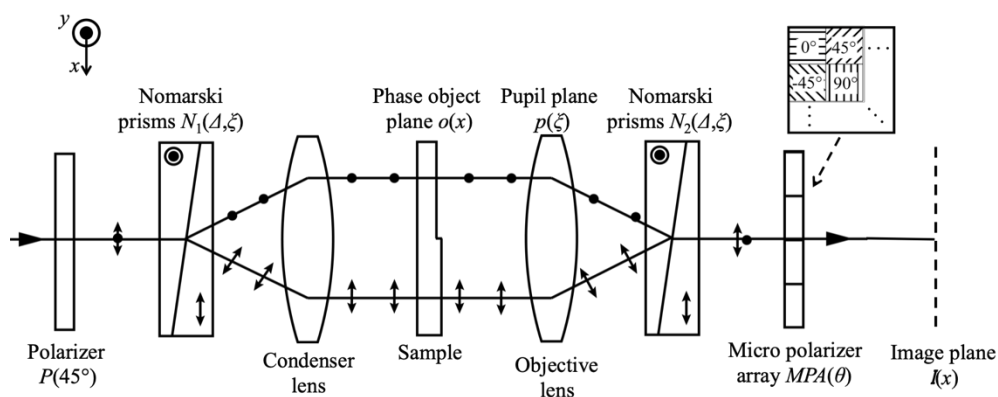


Fig. 6.16. The optical setup of the DIC microscope using a polarization camera.

偏光要素は、以下のジョーンズ行列で定義されます。

$$P(45^\circ) = \begin{bmatrix} \sqrt{2} & 0 \\ 0 & \sqrt{2} \end{bmatrix}, \quad MPA(\pm 45^\circ) = \begin{bmatrix} \pm\sqrt{2} & 0 \\ 0 & \sqrt{2} \end{bmatrix}, \quad (6.33)$$

$$N_1(\Delta, \xi) = \begin{bmatrix} \exp\{i\pi(\xi\Delta+1)/2\} & \exp(-i\pi\xi\Delta/2) \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad N_2(\Delta, \xi) = \begin{bmatrix} \exp(-i\pi\xi\Delta/2) & \exp(i\pi\xi\Delta/2) \\ 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

ここで、 $P(45^\circ)$ および $MPA(\theta)$ は、 $\theta=0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, -45^\circ$ に配向された偏光子およびマイクロ偏光子アレイのジョーンズ行列であり、 $N(\Delta, \xi)$ は、Nomarski プリズムのジョーンズ行列を表す。

偏光カメラの場合の TCC $R(f_x, f'_x)$ は次のように書き直される。

$$R(f_x, f'_x) = \int_{-\infty}^{\infty} Q(\xi) A p(\xi + f_x) A^* p^*(\xi + f'_x) d\xi, \quad (6.34)$$

ここで、

$$A = MPA(\pm 45^\circ) N_1(\Delta, \xi) N_2(\Delta, \xi) P(45^\circ). \quad (6.34)$$

Ishiwata の理論⁶²⁻⁶³⁾によれば、位相値の小さい位相物体 $o(x)$ は、

$$o(x) = C \exp\{i\phi(x)\} \approx C \exp(i\phi_0) \{1 + i\phi(x) - \phi(x)^2\}, \quad (6.35)$$

位相物体 $o(x)$ のフーリエ変換は、次のように表すことができる。

$$O(f_x) = C \exp(i\phi_0) \left\{ \delta(f_x) + i\Phi(f_x) - \frac{1}{2} \Phi(f_x) \otimes \Phi^*(f_x) \right\}. \quad (6.36)$$

ここで、 $\delta(f_x)$ はディラックデルタ関数であり、 $\Phi(f_x)$ は位相分布 $\phi(x)$ のフーリエ変換である。ここに \otimes は畳み込み演算子である。瞳孔が偏光と無関係であると仮定すると、強度分布 $I(x, \theta)$ は、

$$I(x, \pm 45^\circ) = \frac{C}{2} \left[\begin{aligned} & M(0) - \int_{-\infty}^{\infty} \cos(\pi f_x \Delta) M(f_x) \Phi(f_x) \otimes \Phi^*(f_x) \exp(-2\pi i f_x x) df_x \\ & + \int_{-\infty}^{\infty} \{1 + \sin(2\pi f_x \Delta)\} m_0(f_x) \Phi(f_x) \Phi^*(f_x) df_x \\ & \pm 2i \int_{-\infty}^{\infty} \sin(\pi f_x \Delta) M(f_x) \Phi(f_x) \exp(-2\pi i f_x x) df_x \\ & \pm \int_{-\infty}^{\infty} \cos(2\pi f_x \Delta) m_d(f_x) \Phi(f_x) \Phi^*(-f_x) \exp(-4\pi i f_x x) df_x \end{aligned} \right] \quad (6.37)$$

ここで、

$$M(0) = \int \int_{-\infty}^{\infty} Q(\xi) p(\xi) p^*(\xi) d\xi, \quad M(f_x) = \int \int_{-\infty}^{\infty} Q(\xi) p(\xi + f_x) p^*(\xi) d\xi, \quad (6.38)$$

$$m_0(f_x) = \int \int_{-\infty}^{\infty} Q(\xi) p(\xi + f_x) p^*(\xi + f_x) d\xi, \quad m_d(f_x) = \int \int_{-\infty}^{\infty} Q(\xi) p(\xi + f_x) p^*(\xi - f_x) d\xi.$$

ここで、 $M(0)$ 、 $M(f_x)$ 、 $m_0(f_x)$ 、および $m_d(f_x)$ は、サンプルを照明する2つの剪断ビームに関する照明プロファイルを記述する。強度分布 $I(x, \theta)$ は、3つ

の成分 (a)、(b)、および (c) を含む 5 つの項を有することが分かる。背景成分 (a) は、 $M(0)$ と、定数として評価される積分値（これらは一緒になって照明と物体透過の DC 部分を表します）およびせん断された照明ビームのペアによる照明プロファイルを表す積分からなります。間隔 Δ によって。2 番目の要素 (b) は、関心のある主要要素、つまり、オブジェクト位相の 2 つのシフトされたバージョン間の差をとることによって与えられるオブジェクト位相勾配です。差分演算は、正弦関数のフーリエ変換が反対符号の一对のディラックデルタ関数であることによる。最後に、第 3 の成分 (c) は、二乗物体位相に依存する透過強度プロファイルである。物体が弱い位相変動を有すると近似すると、畳み込み位相、絶対値、および物体の自乗位相はすべてほぼゼロになる。結果として、偏光カメラによって捕捉された強度画像（式 (8)）は、背景 $M(0)$ の DC 部分および物体位相勾配成分 (b) のみに依存する。したがって、弱い位相変動近似では、

$$I(x, \pm 45^\circ) = \frac{C}{2} \left[M(0) \pm 2i \int_{-\infty}^{\infty} \sin(\pi f_x \Delta) M(f_x) \Phi(f_x) \exp(-2\pi i f_x x) df_x \right]. \quad (6.39)$$

物体位相勾配（微分位相分布）は

$$\begin{aligned} \frac{I(x, +45^\circ) - I(x, -45^\circ)}{I(x, +45^\circ) + I(x, -45^\circ)} &= \frac{2i}{M(0)} \int_{-\infty}^{\infty} \sin(\pi f_x \Delta) M(f_x) \Phi(f_x) \exp(-2\pi i f_x x) df_x \\ &= 2i \int_{-\infty}^{\infty} MTF(f_x) \Phi(f_x) \exp(-2\pi i f_x x) df_x, \end{aligned} \quad (6.40)$$

ここで、MTF (Modulation Transfer Function) は、

$$MTF(f_x) = \frac{\sin(\pi f_x \Delta) M(f_x)}{M(0)} \quad (6.41)$$

である。

観察対象物の位相分布 $\phi(x)$ は、DIC 顕微鏡の MTF (f_x) を用いて得ることができる。

$$\phi(x) = \frac{1}{2i} \mathcal{S}^{-1} \left[\frac{1}{MTF(f_x)} \mathcal{S} \left\{ \frac{I(x, +45^\circ) - I(x, -45^\circ)}{I(x, +45^\circ) + I(x, -45^\circ)} \right\} \right], \quad (6.42)$$

ここで、 $\mathcal{S}0$ はフーリエ変換、 $\mathcal{S}^{-1}0$ は逆フーリエ変換を示す。

4D Technology PolarCam (V モデル) 偏光カメラを使用した DIC 顕微鏡 (Olympus IX70) を図 6.17 に示します。ハロゲンランプからの光は 650 ± 25 nm バンドパスフィルターを通して DIC ユニットに送られます。偏光カメラは、可視スペクトル範囲にわたって ~ 30 の画素消光比を示し、画素サイズは $7.5 \times 7.5 \mu\text{m}$ 、全画素数は 648×460 、最大カメラフレームレートは 135 Hz である。

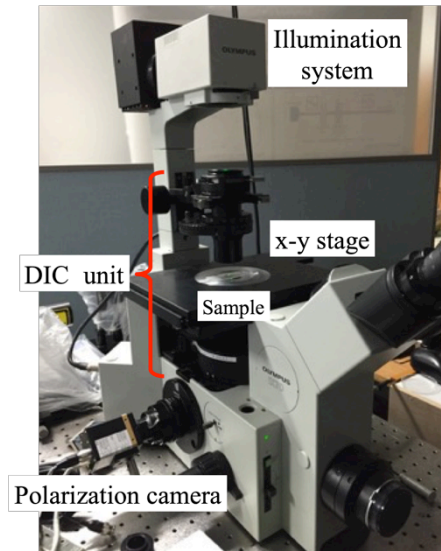


Fig. 6.17 The DIC microscope using a polarization camera.

位相計測では、式 6.41 で計算された $MTF(f_x)$ を使います。対物レンズの照明開口、波長、切断距離 Δ 、NA および倍率を使用して式 (1 2) を使用し、次にウィナーフィルタを使用して $1 / MTF(f_x)$ を計算する。図 6.18 は、我々のシステムの逆 MTF を示しています。このシステムは、 $0.5\mu\text{m}$ 付近の空間周波数を維持しながら、低および中の空間周波数 (20 倍レンズでは $f_x < 0.4\mu\text{m}^{-1}$ および $f_x > 0.6\mu\text{m}^{-1}$) を抑制します。

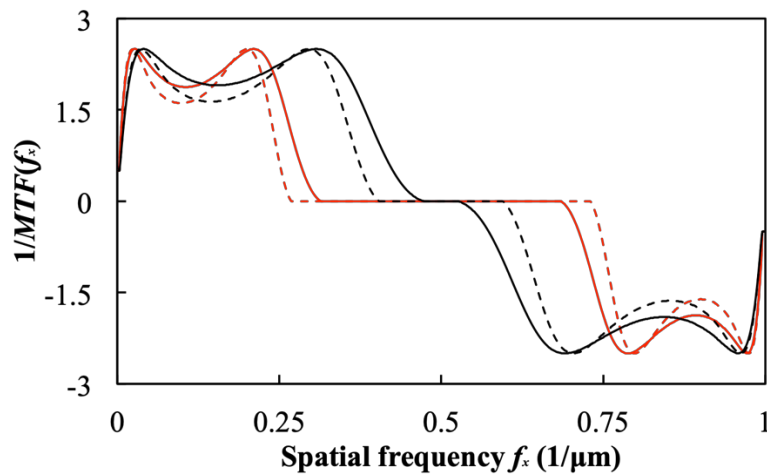
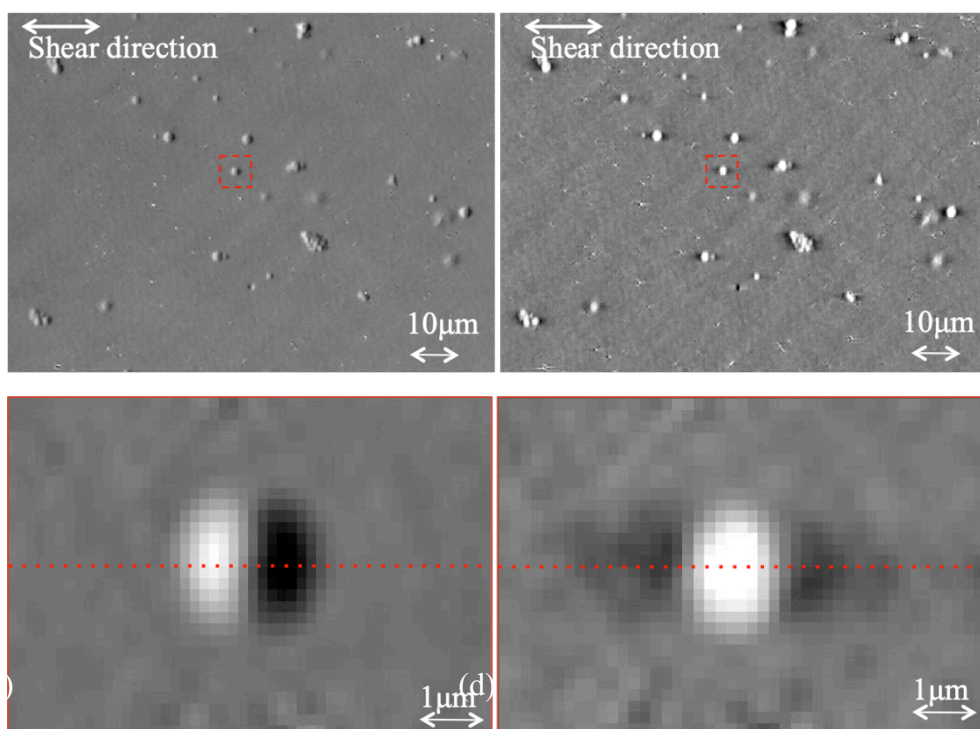


Fig. 6.18. The reciprocal $MTF(f_x)$ of our DIC microscope. The red curves are for our $30\times$ objective lens ($NA = 0.40$), while the black curves are for our $20\times$ objective lens ($NA = 0.40$). The solid curve is the MTF at maximum aperture, while the dashed curve is the MTF at half aperture.

我々のアプローチを定量的にテストするために、ラッカー媒体（屈折率 $n_2 = 1.54$ ）に埋め込まれたガラスビーズ（屈折率 $n_1 = 1.56$ ）の位相プロファイルを測定し、提案された分析を用いてシステムが定量的位相をどれほどうまく推定できるかを決定する。ガラスビーズの直径 d は $2\mu\text{m}$ である。図 6.19 に、逆フーリエ変換前のサンプル領域の微分位相と逆フーリエ変換後の定量位相の測定結果を示します。 $0.25\mu\text{m}/\text{ピクセル}$ でサンプリングされています

ガラスビーズの両側に、負の位相値で示される、よく知られたハローアーチファクトが見られます。理論曲線は、屈折率の差 ($n_1 - n_2 = 0.02$)、ビーズ直径 ($d = 2\mu\text{m}$)、および波長 (650nm) から計算される。

図 6.19 (f) に見られるハローアーチファクトは、照明システムの不十分な空間的コヒーレンスによって引き起こされる。 Nguyen et al. 彼らは外部干渉計ユニットを使ってアーティファクトをうまく取り除くことができたことを示した[17]が、我々のシステムは現在ハローの除去を可能にする同様のハードウェアセットアップを持っていない。ハローアーチファクトのないガラスビーズ領域で、我々の測定曲線と理論曲線との間に 0.05 ラジアン の絶対最大位相差が得られる。



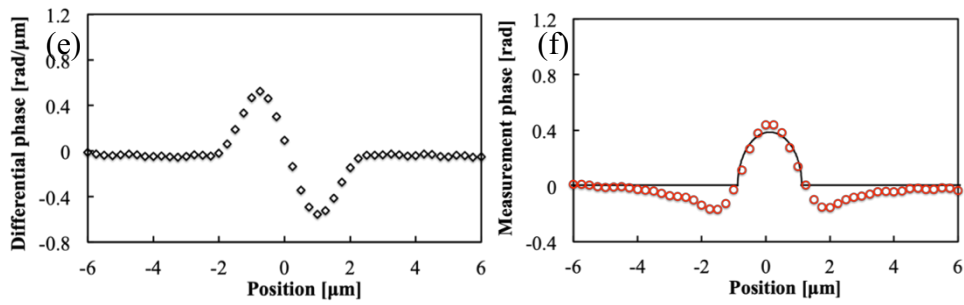


Fig. 6.19. The measurement results of the glass beads ($n_1 = 1.56$) embedded in lacquer ($n_2 = 1.54$). We use an NA = 0.4 objective lens, (a), (c) and (e) are the differential phase results, while (b), (d), and (f) are the quantitative phase results. (c) and (d) are the enlarged images of red square of (a) and (b), respectively. (e) and (f) are cross-sections taken at the center of the glass beads (red dashed lines of (c) and (d)). The black line of (f) is the calculated theoretical value.

生物学では、ゼブラフィッシュとメダカは、組織形成過程の調査や異常で健康な細胞の観察によく使用されます。したがって、ビデオレートの定量的位相測定を実証するために、我々は生きたメダカの卵（産卵後 5~6 日）を測定する（図 6.20 参照）。図 6.21 は、メダカの心臓のポンピングと血流の 20 Hz ビデオ測定です。この測定では、空間サンプリングは $0.25 \mu\text{m}$ /ピクセルである。定量的位相測定（ビデオレート測定ではない）の従来の方法は速い動きのために詳細な位相画像を撮ることができないが、偏光カメラを用いる我々の方法（ビデオレート測定）は心房間の作業弁の鮮明な位相画像を得ることができる。心臓のポンプ作用の間でさえ、そして心室、そして赤血球の動き。

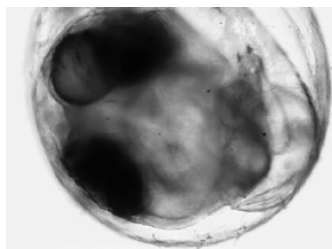


Fig. 6.20. A living *medaka* egg as sample for video-rate measurement.

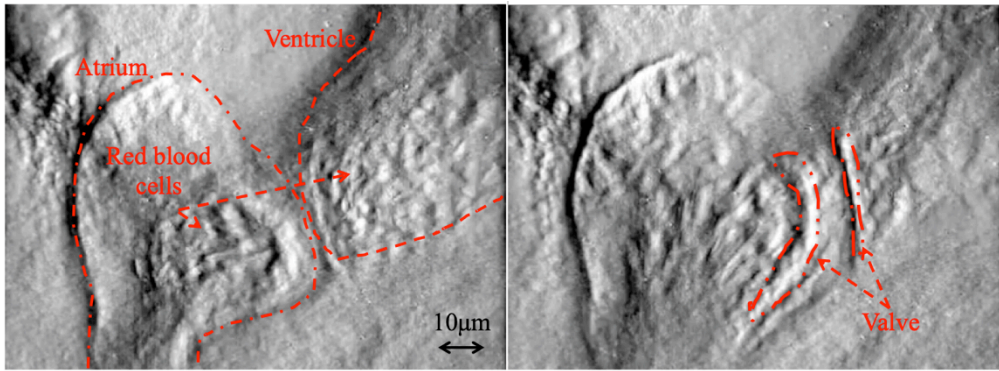


Fig. 6.21. Two frames from a quantitative phase video of the pumping of a *medaka* heart, captured at a 20 Hz frame rate.

6.3 偏光カメラを用いた同軸三次元形状計測

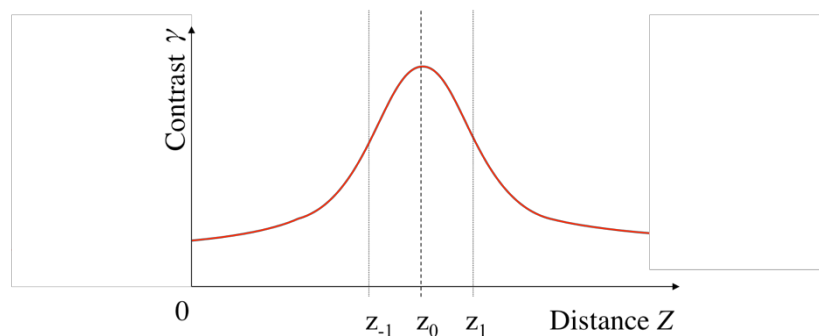
近年, 3D プリンタ用の 3 次元データ取得や工業製品の製造評価のために非接触三次元形状計測の要求は高い. 光を用いた計測法は非接触、非破壊および短時間で計測可能なため、接触により変形してしまう生体試料、動的な試料の評価への需要がある. 光三次元形状計測は、モアレ、三角測定法、格子投影、光切断法とったステレオ法が提案されている¹⁾. これらの方法は投影系軸と撮影系軸が異なるため、急な段差や深穴といったものはオクルージョンの問題で計測が困難である. これらの問題を解決させるため投影系と撮影系が同軸のフォーカス法が提案されている²⁻⁷⁾. 一般的な縞投影法⁸⁾との主な違いの 1 つは、同軸法では高さの変化による位相変調が得られないことである. フォーカス法は、試料に投影されたパターンのコントラスト分布は、その高さ変動に沿って、合焦位置にピークが得られる. 異なる高さでコントラスト分布の変化を検索することによって、試料の三次元情報の測定値を取り出すことができる. Wilsom のグループは、顕微鏡を用いた位相シフト法を提案した²⁾. 吉澤らは大面積の測定のために液晶を用いた計測法⁴⁻⁶⁾、武田はフーリエ解析を用いた方法を提案した³⁾. しかしながら、これらの手法は近年求められている実時間性に対応しにくいという問題があった.

リアルタイム計測において注目されている偏光カメラがある. このカメラは各画素の方位が異なる偏光板が組み込まれたカメラである. この偏光カメラを用いることでリアルタイムの干渉計⁹⁻¹⁰⁾、ホログラム¹¹⁻¹²⁾および複屈折計測¹³⁾が提案されている. また, B. Salahieh は偏光カメラを用いた三次元形状計測を提案している¹⁴⁾. しかし, 三次元座標の変異はコントラスト変化を利用せず, また, 実時間計測は実現していない.

我々はフォーカス法の原理を用いながら高精度なリアルタイム三次元形状計測を行うことを目標として, 直線偏光パターンをサンプルに投影し, 偏光カメラで検出する方法を考案したので報告する.

フォーカス法は格子パターンを試料に投影させてカメラで観察する. 一般的なステレオ法では試料の凹凸によって格子パターンの位相が変化する. しかし, 同軸であるフォーカス法は位相が変調しない. 図 1 にレンズからの距離 Z に対するコントラストを示す. 図 6.22(a) に示すようなコントラスト分布は光軸に沿って得られる. 図 6.22 (b) に示すような格子パターンの白黒の差であるコントラスト変調を利用する. このコントラスト分布は投影系と撮影系の開口数 (NA) に依存しており, レンズ系を変化させない限り, コントラスト分布は変化しない. したがって, コントラストを得ることで, 高さに変換するこ

とができ三次元形状計測を可能にさせている.



- a) Contrast distribution along optics axis, γ is contrast parameter and Z is distance (height) along optical axis.



Defocus at z_{-1} Best focus at z_0 Defocus at z_1

- b) Comparing photographs of best focus and out of focus points.

Fig.6.22. Contrast distribution along optics axis.

コントラスト γ は格子パターンの初期位相を変調させ複数枚撮影し位相シフト法によって求める. ここで, 初期位相を 0° , 90° , 180° , 270° と変化させたときの光強度を I_{0° , I_{90° , I_{180° , I_{270° とする.

$$\gamma = \frac{2\sqrt{(I_{0^\circ} - I_{180^\circ})^2 + (I_{90^\circ} - I_{270^\circ})^2}}{I_{0^\circ} + I_{90^\circ} + I_{180^\circ} + I_{270^\circ}} \quad (6.43)$$

図 6.23 にフォーカス法の解析フローチャートを示す. あらかじめ図 2(a)に示すように変位計を用いて本手法のコントラスト分布キャリブレーション値として得ておく必要がある. キャリブレーション値を得る方法はいくつかある. このコントラスト分布を全て細かく測定するか, もしくは3点から7点ほど測定し, ガウスフィッティングや sinc 関数フィッティングをすればよい. 図 2(b)に示すように次に高さ試料のコントラストを位相シフト法で測定し, 図 2(a)のキャリブレーション値と図 2(b)の測定値から試料のコントラスト分から高さに変換する.

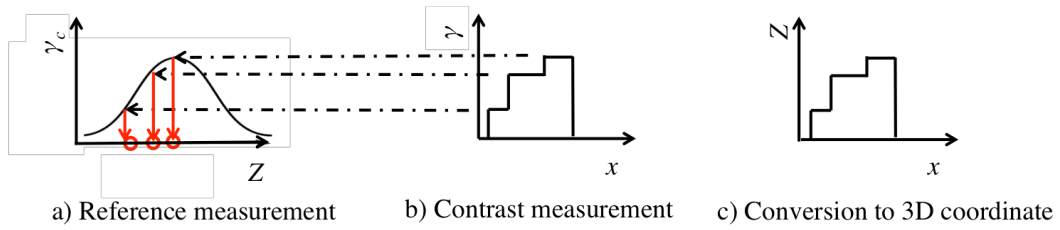


Fig.6.23. Flowchart of focus method. a) Calibration values of contrast, γ_c is contrast parameter of reference. b) Contrast measurement value of sample. x is space. c) Height Z is changed from contrast.

フォーカス法はコントラストをリアルタイムで計測することで、リアルタイム三次元形状計測できる。ここで、図 6.24 に示す偏光カメラを用いる。偏光カメラは CCD 面上に方位が異なる偏光板アレイが組み込まれている。偏光板アレイの方位は図 6.24(b)に示すように 0° , 45° , 90° , 135° の 4 画素が縦横に配列されている。したがって、1 枚撮影すると 4 種類の光強度が得られる。

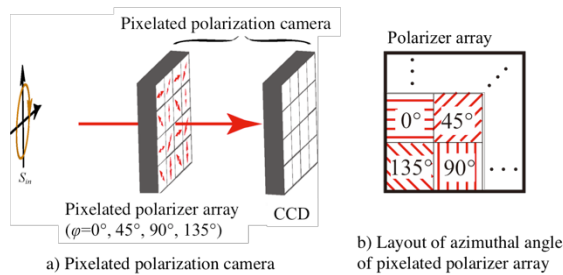


Fig. 6.24 Pixelated polarization camera.

図 6.25 は直線偏光パターンを試料に投影したときの概略図である、偏光カメラでコントラストを得るためには図 6.25(a)に示すように空間的に方位が回転する直線偏光パターンを投影する必要がある。図 6.25 (b)に示すようにこの直線偏光パターンを投影させると偏光カメラ上では位相が 90° シフトした光強度が得られる。4 ステップ位相シフト法を適用することができる。

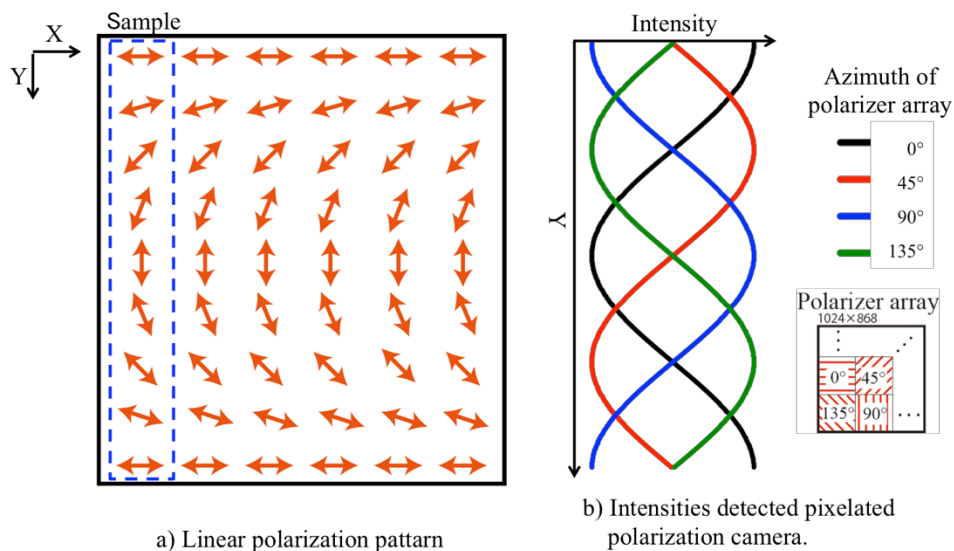


Fig. 6.25 a) Linear polarization pattern . b) Intensities detected pixelated polarization camera.

図 6.26 に直線偏光パターンを生成する光学系を示す. 方位 0° の偏光板(LP)を透過させ, 無偏光ビームスプリッタ(NPBS)により反射させる. 方位 45° の $1/4$ 波長板(QWP)を透過することで円偏光となる. 方位 0° の複屈折相変調器により位相変調した光は再度, 方位 -45° の $1/4$ 波長板を透過させると直線偏光パターンが生成される.

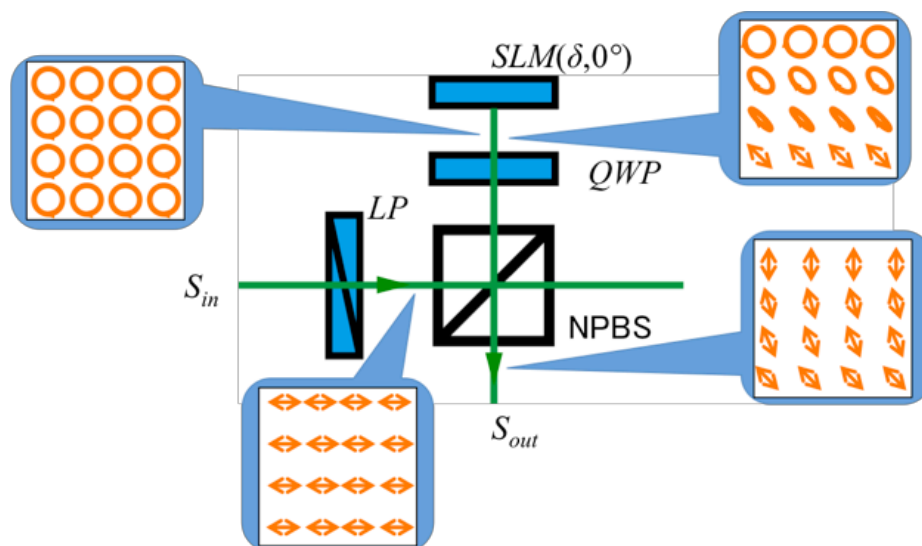


Fig. 6.26 Optical setup of projecting linear polarization pattern.

理論的には偏光状態を表すストークス・パラメータと各素子の偏光特性を表すミューラ一行列の関係性から導き出せる.

$$\begin{aligned}
S_{out} &= QWP(-45^\circ) \cdot SLM(\delta, 0^\circ) \cdot QWP(45^\circ) \cdot LP(0^\circ) \cdot S_{in} \\
&= \begin{bmatrix} 1 \\ \cos \delta \\ \sin \delta \\ 0 \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{6.44}$$

ここで、 S_{in} 、 S_{out} は入射光のストークス・パラメータ、 QWP 、 SLM 、 LP は1/4波長板、空間光変調器および偏光板のミューラー行列を表す。

式(6.44)の出射光のストークス・パラメータ S_{out} は空間光変調器の複屈折位相差 δ に依存した方位の直線偏光が生成できる。したがって、図 6.26 の直線偏光パターンを得るためには空間的に線形な複屈折位相差 δ を与えることで得ることが可能になる。

図 6.27 に直線偏光パターン投影によるリアルタイム三次元形状計測の光学系を示す。Nd:YAG レーザの第二次高調波である 532nm のレーザ光を対物レンズと平凸レンズによりビーム系を拡大させる。焦点位置に設置した回転拡散板を用いてコヒーレンスを低下させ、スペックルノイズを減少させている。直線偏光パターンを生成させる光学系を経て、投影レンズにより試料に投影する。試料から反射光はイメージングレンズで偏光カメラ上に結像させている。

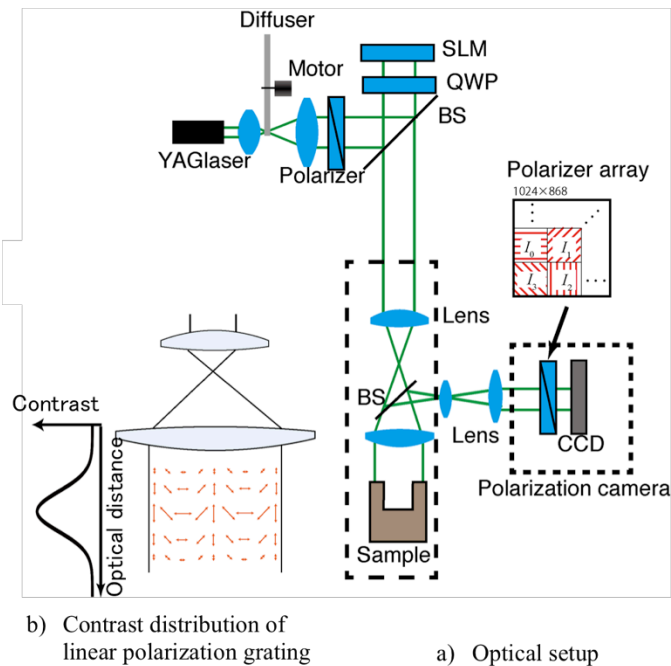


Fig. 6.27. Optical setup of real-time 3D profilometry by projecting linear polarization pattern detected the pixelated polarization camera.

直線偏光パターンが正しく生成されているか検証する。偏光カメラではなく一般的なカメラを用い、図 7 はカメラの前に回転可能な偏光板で光強度を検出した結果である。

図 6.28(a)は CCD で撮影された画像，図 6.28 (b) は中央の矢印部分の縦方向の断面に於ける光強度の結果を示す．これは正弦状の格子パターンが得られていることから直線偏光パターンが投影されていることがわかった．また，回転偏光板により格子パターンが位相シフトしている．以上より直線偏光パターンの偏光主軸方位が空間的に回転されたパターンとして投影されている．

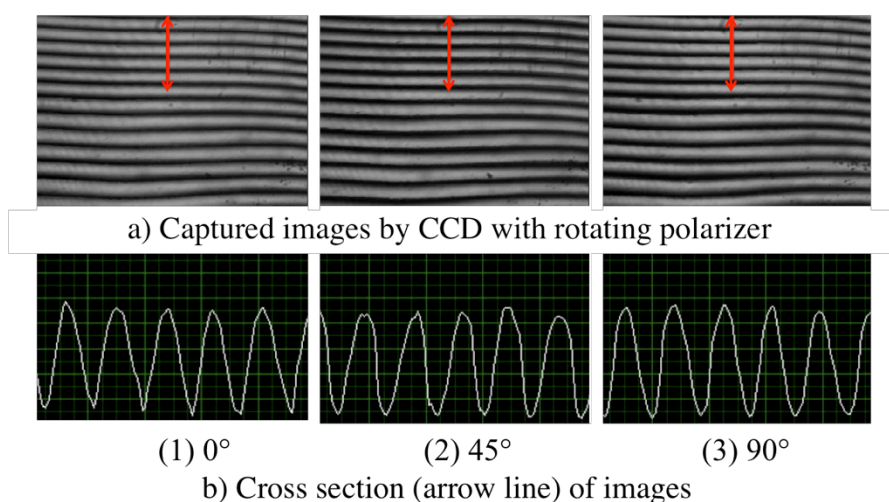


Fig. 6.28 Result of intensity detected during rotating polarizer

図 6.29 は偏光カメラによって，各方位 0° ， 45° ， 90° ， 135° の光強度を集めた画像である．図 6.29 (a)は一般的なカラーカメラで撮影した画像である．これは偏光パターンなため，人間の目には投影光のパターンは見えない．しかし，図 6.29 (b)に示すように偏光カメラで観察するとパターンが現れる．また，異なる方位の画像からパターンの位相がずれていることがわかる．これは直線偏光パターン投影の一つの特徴である．

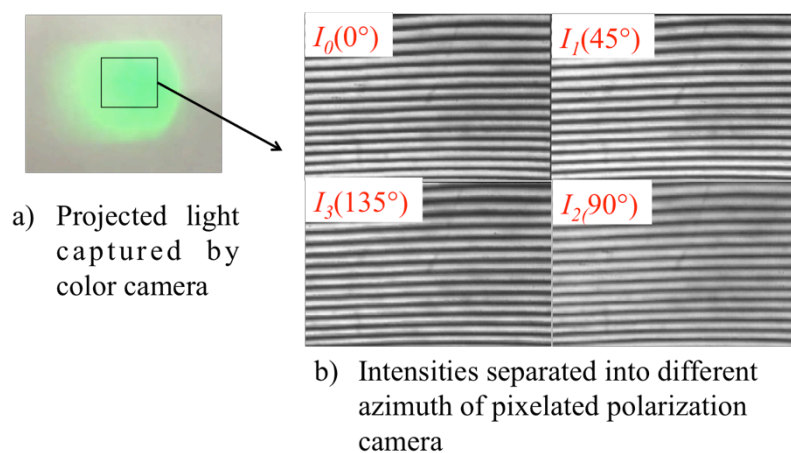


Fig. 6.29 Captured images by the pixelated polarization camera.

キャリブレーションのためにコントラスト分布を測定した。このデータをリファレンスとして形状測定を行った。今回のファレンス測定はフラットな表面サンプルを 1mm ずつステージで移動させ各高さでコントラストを測定した。そのコントラスト分布からガウスフィッティングを用いて、コントラストから高さへ変換した。図 6.30 にコントラスト分布の測定結果を点で示す。ガウスフィッティングをした結果を実線で示す。結果から測定点とフィッティング線がよく一致したので、キャリブレーションが住人であると言える。

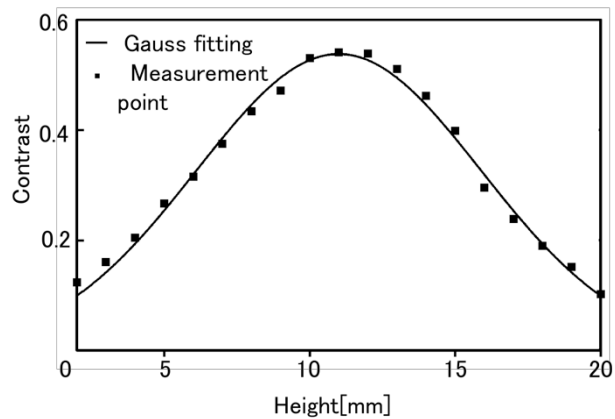


Fig. 6.30 Reference measurement of contrast along height

リファレンス測定で得られたコントラスト分布を用いて高さ測定を行った。図 6.31 はフラット平面をサンプルとしてステージに設置して 20mm まで 1mm 刻み移動させながら測定した結果である。結果から高さが 3mm まで、および 19mm 以降は高さが測定できていない。また、10.5mm で折り返して測定される。これはフォーカス前後の対称性による。しかし、3mm から 10mm までは精度よく計測されている。3mm から 10mm までの測定点から最小二乗法によって計算された精度は 100 μ m となった。

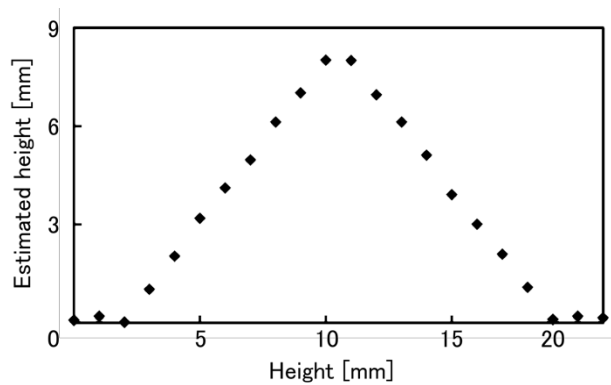


Fig. 6.31 Measured result of different height by moving reference plate.

図 6.32 に RMS 誤差を測定した結果を示す. 高さ 5mm の位置に置いて画素数 250×250pixels で撮影枚数 500 枚の条件下で測定したときの RMS 誤差を測定した. 結果から 120 μ m の結果が得られた. このばらつきの要因は光源のばらつき, カメラのばらつきである.

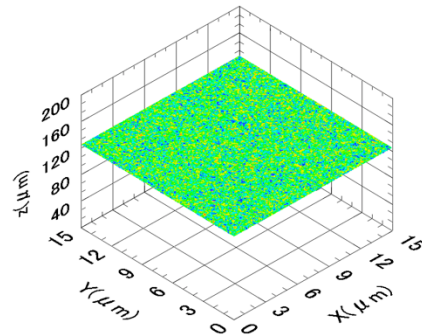
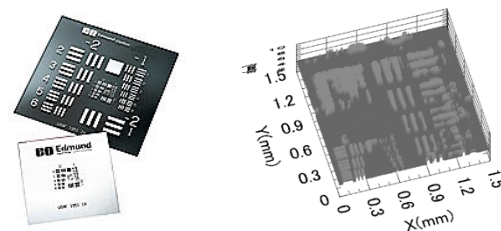


Fig. 6.32 RMS error of the flat target

デモンストレーションとして図 6.33 に平面ミラーの上に 1951USAF テストターゲットを置いたものを計測した結果を示す. しかし, まだ平面上のところに誤差が生じている.

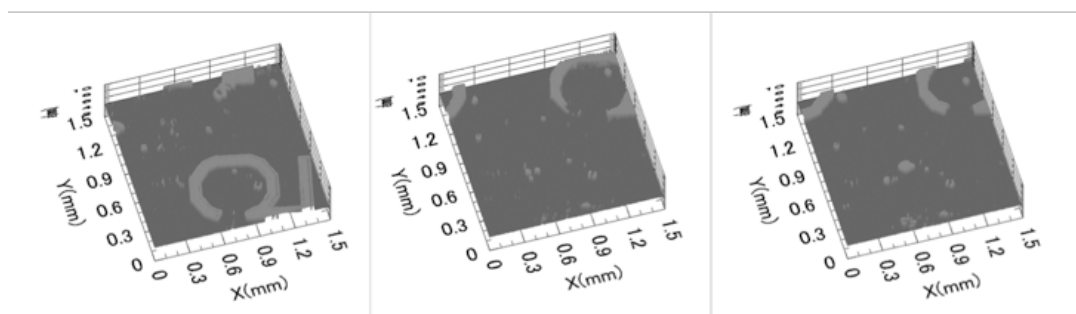


(a) 1951USA test target

(b) 3D profile

Fig. 6.33 3D profile result of 1951USA test target.

図 6.34 に 1951USAF テストターゲットを水平移動させた状態の 3 次元形状計測した結果を示す. 測定速度は 40fps である. 結果からリアルタイム三次元三次元形状計測が可能であることがわかった.



(a) 0s

(b) 0.025s

(c) 0.050s

Fig. 6.34 Real time 3D profile measurement

空間光変調器 SLM を用いて空間的に偏光を制御すること で空間的に直線偏光の方位が回転するユニークな偏光パターンを形状サンプルに投影させ、また反射光を偏光カメラで検出することで実時間同軸三次元形状計測を可能にした。直線偏光パターンの特徴として人間の目および一般的なカメラではパターンを観察することは不可能である。しかし、偏光カメラでは格子パターンを観察することができる。フォーカス法の原理を用いてコントラストからは三次元座標に変換させた。フラット平面サンプルを用いて制度検証を行った。最小二乗法によって計算された精度は $100\mu\text{m}$ および RMS 誤差は $120\mu\text{m}$ となった。最後に 1951USAF テストターゲットの三次元形状計測し、水平移動中の形状計測を行いリアルタイム計測（測定速度は 40fps）が可能であると示した。

第7章 結論

本論文は様々なストークス・パラメータの測定法を提案し、点計測、イメージング、リアルタイム計測に発展させ、最後に提案した測定法を微分干渉顕微鏡および三次元形状計測に発展させた。まず、位相子と偏光板を二重回転させストークス・パラメータを測定する方法を提案する。また、計測誤差要因である位相子の直線二色性と複屈折位相差をキャリブレーションし、高精度な計測を可能にさせている。しかし、計測時間が非常にかかるため、動的な計測が不向きである。そこで、偏光保存ビームスプリッタを作成し、3つに光線をわけて3つの偏光ビームスプリッタですべてのストークス・パラメータを測定する手法を提案した。この計測法はリアルタイム計測が可能である。しかし、二次元分布のストークス・パラメータを得るには困難である。まず静的な二次元分布ストークス・パラメータをカメラと位相子と偏光子を用いて二重回転ストークス偏光計を提案した。しかし、リアルタイム計測が困難である。そこで回転位相子と偏光アレイ型偏光カメラを用いて動的にすべてのストークス・パラメータを測定し、かつ回転位相子の複屈折位相差のキャリブレーションを可能にした。回転位相子の方位 0° , 45° , 90° の検出することで回転位相子の複屈折位相差の自己キャリブレーションが可能となるアルゴリズムを提案する。このストークスイメージング偏光計を用いて、動的な複屈折イメージング偏光計に応用した。偏光子と $1/4$ 波長板により右円偏光をサンプルに入射させ回転 $1/4$ 波長板の方位を 0° , 45° のとき検出することで従来法の複屈折位相差のダイナミックレンジを拡張した複屈折測定アルゴリズムを提案する。しかし、このアルゴリズムは $1/4$ 波長板の複屈折位相差がキャリブレーションできない。そこで、シミュレーションによりサンプル前後の $1/4$ 波長板に誤差が複屈折測定に影響するか確認する。そして、回転 $1/4$ 波長板の方位 0° , 45° , 90° の検出することで回転 $1/4$ 波長板の複屈折位相差の自己キャリブレーションが可能となるアルゴリズムを提案する。このアルゴリズムは右円偏光をサンプルに入射させる $1/4$ 波長板に誤差があるときは精度が低下してしまう。そこで、サンプル前後の位相子を 2:1 の回転比率で回転させることで2つの位相子の複屈折位相差のキャリブレーションが可能となるアルゴリズムを提案する。波長可変光源によってフォトニック結晶偏光子アレイ型偏光カメラの波長特性を確認する。最後に波長依存性をもつすべての位相子の複屈折位相差のキャリブレーションが可能となったため異なるバンドパスフィルタを用いて分光複屈折計測を提案する。最後にこの偏光カメラを用いたストークス偏光計を用いて微分干渉顕微鏡とフォーカス法の原理を用いた同軸三次元形状

計測に発展させた。従来の微分干渉顕微鏡は微分画像しか得られずエッジ強調しかできなかった。また、近年入射の位相を変調させ、位相微分画像を積分させ位相画像を得る手法が提案された。しかし、リアルタイム性に問題があった。そこでこの提案したストークス偏光計を導入し、リアルタイムで微分画像から積分させ位相のリアルタイム計測を可能にさせた。めだかの卵をサンプルさせ、血流の赤血球の形および流れを可視化させた。また、心臓の鼓動などを可視化させた。また、偏光カメラを用いたストークス偏光計を三次元形状計測に導入させた。これはピントボケ情報のコントラストを計測することで三次元形状計測を行う手法で、このコントラストを得るために格子パターンを統制させ位相をずらしていたが、こちらもリアルタイム性に乏しいため、偏光カメラを導入させ、リアルタイムでコントラスト計測を得る。しかし、格子パターンでは偏光カメラで検出できないため、空間光変調器 SLM を用いて直線偏光を空間的に回転させた直線偏光パターンを投影させ偏光カメラで検出させている。あらかじめ各高さに応じたコントラストをリファレンスとして得ておき、測定資料のコントラストを比較することで高さ情報を得ることができる。したがって、偏光カメラを用いてリアルタイム同軸三次元形状計測を可能にさせた。

参考文献

1. E. B. McDaniel, S. C. McClain, J. W. O. Hsu, "Nanometer scale polarimetry studies using a near-field scanning optical microscope", *Applied Optics*, **37**, 1, 84-92 (1998).
2. L. S. Goldner, M. J. Fasolka, S. Nougier, H. Nguyen, G. W. Bryant, J. Hwang, K. D. Weston, K. L. Beers, A. Urbas, E. L. Thomas, "Fourier analysis near-field polarimetry for measurement of local optical properties of thin films", *Applied Optics*, **42**, 19, 3864-3881 (2003).
3. K. Oka, T. Takeda, Y. Ohtsuka, "Optical Heterodyne Polarimeter for Studying Space-and Time-dependent State of Polarization of Light", *Journal of Modern Optics*, **38**, 8, 1567-1580 (1991).
4. King, H. J., Chou, C., & Lu, S. T., "Optical heterodyne polarimeter for measuring the chiral parameter and the circular refraction indices of optical activity". *Optics Letters*, **18**, 22, 1970-1972, (1993)
5. M. Tanaka, Y. Nakashima, H. Amamiya, M. Chujo, and Y. Otani, "Spectroscopic Stokes polarimeter with dual rotating retarder and analyzer for optical rotation measurement," *Proc. SPIE* **7461**, 1-11 (2009).
6. B. Wang, J. List, and R. R. Rockwell. "A Stokes polarimeter using two photoelastic modulators." *Proc. SPIE*, **4819**, 1-8 (2002).
7. R. M. A. Azzam, "Arrangement of four photodetectors for measuring the state of polarization of light,," *Opt. Lett.*, **10**, 309-311 (1985).
8. S. Kawabata, "Modified transmission type four-detector polarimeter", *Proc. SPIE.*, **5524**, 337-344 (2004).
9. Rothen, A. , "The Ellipsometer, an Apparatus to Measure Thicknesses of Thin Surface Films. *Review of Scientific Instruments*", **16**, 2, 26-30(1945).
10. Boher, P., Bignon, T., & Leroux, T., "Angle of view polarization characterization of liquid crystal displays and their components. *Journal of Information Display*, **8**, 4, 10-14, (2007).
11. Morgan, R. J., & Treloar, L. R. G., "Photoelastic studies of polymers and

- copolymers in the rubbery state”, *Polymer Physics*, **10**,1, 51–69, (1972).
12. Tsukiji, M., Kowa, H., Muraki, K., Umeda, N., Imoto, K., Kanasaki, M., Tajitsu, Y. “Measurement System for Very Small Photoelastic Constant of Polymer Films. *Macromolecular Symposia*”, 242(1), 235–240,(2006).
 13. 浅間英夫, 長谷川富市, 鳴海敬倫 : 隙間を通過する流体の複屈折観察, 日本機械学会 2002 年度年次大会講演論文集, 3(2002)21-22.
 14. 海老沢瑞枝, 大谷幸利, 佐久間淳 : ゼラチンの 2 軸応力下における複屈折による挙動観察, 日本機械学会第 18 回計算力学講演会講演論文集, (2005)497-498.
 15. Ryota Mizutani, Yukitoshi Otani, Tomoharu Ishikawa, Miyoshi Ayama : “Imaging Stokes polarimeter by dual rotating retarder and analyzer and its application of evaluation of Japanese lacquer”, *Photonics Asia - Optical Metrology and Inspection for Industrial Applications II Paper 8563-13*, Beijing China (2012).
 16. Hudnut, A. W., Babaei, B., Liu, S., Larson, B. K., Mumenthaler, S. M., & Armani, A. M., ”Characterization of the mechanical properties of resected porcine organ tissue using optical fiber photoelastic polarimetry”, *Biomedical Optics Express*, 8(10), 4663-4669,(2017).
 17. Michelson, A. A. ,”LXI. On metallic colouring in birds and insects”. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, **21**,124, 554–567, (1911).
 18. V.Sharma, M. Crne, J. O. Park,, Srinivasarao, M.,”Structural Origin of Circularly Polarized Iridescence in Jeweled Beetles. *Science*”, **325**,5939, 449–451,(2009)..
 19. 谷田貝豊彦, 桑山哲郎, 柴田清孝, 畑田豊彦, 藤原裕文, 渡邊順次, ”光の百科事典, 丸善出版, (2011).
 20. G. G. Stokes, ”On the Composition and Resolution of Streams of Polarized Light from different Sources”, *Mathematical and Physical Papers*, 233–258,(1852). 1
 21. R. C. Jones, “A New Calculus for the Treatment of Optical Systems”, *Journal of the Optical Society of America*, **31**,7, 500-503, (1941).
 22. R. C. Jones, “A New Calculus for the Treatment of Optical Systems IV”,

- Journal of the Optical Society of America, **32**,8, 486-493, (1942)..
23. H. Mueller, “Memorandum on the polarization optics of the photo-elastic shutter”, NDRC project OEMsr-576, Tech. Rep. 2 (National Defence Research Committee, (1943).
 24. E. Wolf, “Coherence properties of partially polarized electromagnetic radiation”, *Il Nuovo Cimento*, **13**,6,, 1165–1181, (1959).
 25. D. H. Goldstein, *Polarized Light*, Third Edition (CRC, 2011).
 26. K. Kim, L. Mandel, E. Wolf, “Relationship between Jones and Mueller matrices for random media”. *Journal of the Optical Society of America*, **4**, 3, 433-437, (1987).
 27. 藤原 裕之, ”分光エリプソメトリー”,丸善株式会社, (2003).
 28. 大谷幸利, 島田卓也, 吉澤徹, 梅田倫弘 : 位相シフト法による 2次元複屈折分布測定, *光学* 21, 10(1992)682-687.
 29. 野口正人, 石川 剛 : 複屈折空間分布測定法, *光技術コンタクト*, 31(1992) 682-687.
 30. Michael W. Kudenov, Michael J. Escuti, Eustace L. Dereniak, Kazuhiko Oka : “White-light channeled imaging polarimeter using broadband polarization gratings”, *Applied optics*, 50(2011)2283-2293.
 31. Michael Descour, Eustace Dereniak : “Computed-tomography imaging spectrometer: experimental calibration and reconstruction results”, *Applied optics*, 34(1995)4817-4826.
 32. 米山聡, 水原直樹, 菊田久雄, 森脇耕介 : マイクロ波長アレイを有する CCD カメラを用いた位相シフト縞画像の同時撮影, *実験力学* 6(2006)275-281.
 33. 川上彰二郎 : フォトニック結晶偏光子を用いた偏光イメージングカメラの開発, *電子情報通信学会誌*, J90-C(2007)17-24.
 34. Viktor Gruev,* Rob Perkins, Timothy York : “CCD polarization imaging sensor with aluminum nanowire optical filters “, *Optics express*, 18(2010)19087-19094.
 35. Y. Maruyama, T. Terada, T. Yamazaki, Y. Uesaka, M. Nakamura, Y. Matoba, T. Ezaki, “3.2-MP Back-Illuminated Polarization Image Sensor With Four-Directional Air-Gap Wire Grid and 2.5- μ m Pixels” *IEEE Trans. Elect. Dev.*, **65**, 6, 2544–2551(2018).

36. 大沼隼志, 大谷幸利 : サブミリ秒の時間分解能をもつ動的 2 次元複屈折計測装置の開発, 精密工学会誌, 78(2012) 1082-1086.
37. Takashi Onuma, Yukitshi Otani : “A development of two-dimensional birefringence distribution measurement system with a sampling rate of 1.3 MHz”, Optics Communications, 315(2014)69-73.
38. Pelizzari, S., Rovati, L., & De Angelis, C. (2001). Rotating polarizer and rotating retarder plate polarimeters: comparison of performances. Testing, Reliability, and Applications of Optoelectronic Devices.
39. Williams, P. A., Rose, A. H., & Wang, C. M. (1997). Rotating-polarizer polarimeter for accurate retardance measurement. Applied Optics, 36(25), 6466.
40. Nathan J. Pust and Joseph A. Shaw, "Dual-field imaging polarimeter using liquid crystal variable retarders," Appl. Opt. **45**, 5470-5478 (2006).
41. B. B. Wang, J. List, and R. R. Rockwell. "A Stokes polarimeter using two photoelastic modulators." Proc. SPIE, **4819**, 1-8 (2002).
42. Song, H., Qi, X., Zou, W., Zhong, Z., & Burns, S. A. (2010). Dual electro-optical modulator polarimeter based on adaptive optics scanning laser ophthalmoscope. Optics Express, 18(21), 21892-21904.
43. Oka, K., Takeda, T., & Ohtsuka, Y. (1991). Optical Heterodyne Polarimeter for Studying Space-and Time-dependent State of Polarization of Light. Journal of Modern Optics, 38(8), 1567–1580.
44. Kazuhiko Oka and Takayuki Kato, "Spectroscopic polarimetry with a channeled spectrum," Opt. Lett. **24**, 1475-1477 (1999).
45. R. M. A. Azzam, “Arrangement of four photodetectors for measuring the state of polarization of light,” Opt. Lett. **10**, 309-311 (1985).
46. S. Kawabata, “Modified transmission type four-detector polarimeter”, Proc. SPIE., **5524**, 337-344 (2004).
47. 辻内順平, 光学概論 I - 基礎と幾何光学 -, 朝倉書店, (2002)3-23.
48. 高崎宏, 結晶光学, 森北出版, (1975)102-163.
49. 大谷幸利, ～光学の苦手な技術者・研究者のための～偏光・複屈折の基礎

- 講座 第 II 講, 技術情報協会, 4-17.
50. 大谷幸利, ～光学の苦手な技術者・研究者のための～偏光・複屈折の基礎
講座 第 I 講, 技術情報協会, 13-14.
51. Dennis Goldstein : “Polarized light”, Marcel Dekker inc., (2003)21-86
52. 辻内順平, 清原順子, 成相恭二, 光学実験・測定法 II, アドコム・メディア
株式会社, (2010)106-213.
53. Axometrics, Inc: www.axometrics.com
54. Malte Renz, “Fluorescence Microscopy2A Historical and Technical
Perspective,” Cytometry Part A, **83**(9) 767–779 (2013).
55. G. Nomarski, “Differential microinterferometer with polarized waves,”
J. Phys. Radium **16**(9) (1955).
56. M. R. Arnison, K. G. Larkin, C. J. R. Sheppard, N. I. Smith, and C. J.
Cogswell, “Linear phase imaging using differential interference
contrast microscopy,” J. Microscopy **214**(1), 7–12 (2004).
57. S. V. King, A. Libertun, R. Piestun, C. J. Cogswell, and C. Preza,
“Quantitative phase microscopy through differential interference
imaging,” J. Biomed. Opt. **13**(2) (2008).
58. D. L. Lessor, J. S. Hartman, and R. L. Gordon, “Quantitative surface
topography determination by Nomarski reflection microscopy. I.
Theory,” JOSA **69**(2), 357-366 (1979).
59. J. S. Hartman, R. L. Gordon, and D. L. Lessor, “Quantitative surface
topography determination by Nomarski reflection microscopy. 2:
Microscope modification, calibration, and planar sample experiments,”
Appl. Opt. **19**(17), 2998-3009 (1980).
60. J. S. Hartman, R. L. Gordon, and D. L. Lessor, “Nomarski differential
interference contrast microscopy for surface slope measurements: an
examination of techniques,” Appl. Opt. **20**(15), 2665-2669 (1981).
61. H. Ishiwata, M. Itoh, and T. Yatagai, “Retardation modulated
differential interference microscope and its application to 3-D shape

- measurement,” *Proc. SPIE* **2873**, 21–24 (1996).
62. H. Ishiwata, M. Itoh, and T. Yatagai, “A new method of three-dimensional measurement by differential interference contrast microscope,” *Opt. Comm.* **260**(1), 117–126 (2006).
 63. L. Fabre, Y. Inoue, T. Aoki, and S. Kawakami, “Differential interference contrast microscope using photonic crystals for phase imaging and three-dimensional shape reconstruction,” *App. Opt.* **48**(7), 1347-1357 (2009).
 64. H. H. Hopkins, “On the diffraction theory of optical images,” *Proc. of Roy. Soc.* A217, 408-432 (1953).
 65. R. S. Sirohi, and G. S. Bhatnagar, “Effect of partial coherence on the resolution of a microscope,” *Optica Acta* **17**(11), 839–842 (1970).
 66. J. S. Tyo, C. F. LaCasse, and B. M. Ratliff, “Total elimination of sampling errors in polarization imagery obtained with integrated microgrid polarimeters,” *Opt. Lett.* **34**(20), 3187-3189, (2009).
 67. T. H. Nguyen, M. Kandel, H. M. Shakir, C. B. Popescu, J. Arikath, M. N. Do, and G. Popescu, “Halo-free phase contrast microscopy”, *Scientific Reports* **7**(1), (2017).

業績

投稿論文

1. Robust full Stokes imaging polarimeter with dynamic calibration

Shuhei Shibata, Nathan Hagen, Yukitoshi Otani, *Optics Letters*, **44**, 4(2019).

2. Video-rate phase analysis by a DIC microscope using a polarization camera

Shuhei Shibata, Wataru Takano, Nathan Hagen, Masaru Matsuda, Yukitoshi Otani, *Bio medical Optics Express* (アクセプト済み)

3. Calibration and performance assessment of microgrid polarization cameras

Nathan Hagen, Shuhei Shibata, Yukitoshi Otani, *Optical Engineering* (アクセプト済み)

査読付き予稿

1. Microscopic type of real-time uniaxial 3D profilometry by polarization camera

Shuhei Shibata, Fumio Kobayashi, Daisuke Barada, Yukitoshi Otani, *proc. of SPIE*, 920311 (2014).

特許

(名称) 光学機器のキャリブレーション法

(発明者) 大谷幸利, 柴田秀平

(登録番号) 2018-44865

(登録日) 平成30年3月22日

謝辞

この修士論文に書くにあたってご指導頂いたオプティクス教育研究センター長谷田貝豊彦教授，大谷幸利教授，早崎芳夫教授，尾崎功一教授，湯上登教授，山本裕紹准教授，黒田和男教授，武田光夫教授，茨田大輔助教授には感謝を申し上げます。

特に指導教員である大谷幸利先生には光学，研究また言葉遣いまでご指導いただきありがとうございました。そして国際学会含める様々な学会や展示会や懇親会に参加させていただき貴重な体験できました。小林富美男特認研究員には様々な豊富な知識と経験ではお世話になり感謝を申し上げます。特に偏光カメラによるユニアクシス三次元計測の結像系について教えていただきありがとうございます。大沼隼志さんは偏光カメラのこと，光学，社会人の心構え，人生相談まで助言いただきありがとうございました。先輩の水谷亮太さん，石田章伍さんには偏光や Labview の基礎的なことから教えていただきありがとうございました。同期の佐竹唯さん，金森雄一さん 2 年間お世話になり，3 人で行ったパリ，ロンドンでは楽しいとき過ぎさせていただき，とてもよい記憶として残っています。また，研究についての助言や飲み会で盛り上げていただきありがとうございました。後輩の皆さんには研究や光学についての意見や質問をされて自分がわかっていない分野が多いことを気づかせていただき感謝をしています。また，David, Geliztle, Kaustav には光学，英語，スペイン語，SPIE Student chapter 創設について教えていただきとても感謝をしています。大谷研究室の皆さんおかげでとても充実した一年でした。

谷田貝研究室，早崎研究室の皆さん飲み会でお世話になりました。特に佐藤聡さんには大学 1 年から勉学の助言を頂きありがとうございました。また喜入朋宏さん，杉坂純一郎さんには光学，プログラミングといった様々な分野について教えていただきありがとうございます。株式会社フォトニククラティス様には偏光カメラを借用させていただき感謝を申し上げます。茨田大輔助教授には SLM を借用させていただき感謝を申し上げます。

アリゾナ大学の Russell A. Chipman 教授をはじめ，大阪大学の水谷康弘講師，埼玉医科大学の若山俊隆准教授には学会，交流会，展示会では様々な議論をさせていただき，とても勉強なり，この経験がこれからの研究生生活の財産になると思います。この場を借りて感謝を申し上げます。最後に，すばらしい研究環境を提供していただき CORE と CORE に携わっている皆様には感謝を申し上げます。また，家族や友人の皆さん大学院生活を支えていただき感謝を申し上げます。