

博士学位論文

偏光パターン投影による瞬間三次元形状計測

国立大学法人宇都宮大学 大学院工学系研究科
システム創成工学専攻

187180H

前田 勇樹

目次

第1章 序論.....	5
1.1 本研究の背景.....	5
1.2 非接触三次元計測手法.....	5
1.2.1 レンズ焦点法.....	6
1.2.2 両眼視差法.....	7
1.2.3 光切断法.....	7
1.2.4 モアレトポグラフィ.....	8
1.2.5 格子パターン投影法.....	9
1.2.6 Time-of-Flight (TOF).....	9
1.2.7 光干渉法.....	10
1.2.8 共焦点顕微鏡法.....	11
1.2.9 格子パターン投影によるフォーカス法.....	12
1.3 本研究の目的と論文の構成.....	14
第2章 偏光パターン投影による形状計測の原理.....	15
2.1 偏光.....	15
2.1.1 Maxwell 方程式.....	15
2.1.2 光の偏光状態.....	17
2.1.3 ストークスパラメータ.....	18
2.1.4 ミュラー行列.....	20
2.2 偏光カメラによる形状計測の原理.....	23
2.2.1 偏光カメラ.....	24

2.2.2	直線偏光パターン	24
2.2.3	コントラスト傾斜による方法.....	29
2.3	フルストークスカメラによる形状計測の原理.....	30
2.3.1	フルストークスカメラ.....	31
2.3.2	偏光度 (DOP) とコントラスト.....	31
2.4	カラー偏光カメラによる形状計測の原理.....	33
2.4.1	カラー偏光カメラ	34
2.4.2	ダイナミックレンジ拡大手法.....	34
第3章	直線偏光度による形状計測	38
3.1	はじめに	38
3.2	測定装置	39
3.3	直線偏光パターン照明光.....	44
3.4	コントラスト分布の測定結果	50
3.4.1	ミラーのコントラスト分布	50
3.4.2	表面の違いによるコントラスト分布.....	52
3.5	三次元計測の結果.....	54
3.6	まとめ	58
第4章	偏光度による形状計測.....	59
4.1	はじめに	59
4.2	測定装置	59
4.3	フルストークスカメラの位相補償.....	62
4.4	平面サンプルの三次元計測.....	66
4.5	コントラスト分布の測定結果	69

4.6	三次元計測の結果.....	71
4.7	まとめ.....	78
第5章	軸上色収差を用いた形状計測.....	79
5.1	はじめに.....	79
5.2	測定装置.....	79
5.3	NPBS の位相補償.....	85
5.4	コントラスト分布の測定結果.....	90
5.5	三次元計測の結果.....	93
5.6	まとめ.....	98
第6章	結論.....	99

第1章 序論

1.1 本研究の背景

非接触で物体の形状を高精度で高速に計測する技術は、製造業では部品の検査装置として重要な役割を果たしてきた[1]。また、近年、製造業では自動化が進み、高度なロボットが製造されるようになり、ロボットビジョンとしての三次元計測が一層重要になっている[2]。自動車業界では自動車の自動運転化に向けて、各社がしのぎを削って技術開発を進めており、自動車の目としての三次元計測の重要性が非常に高まっている[3]。さらに、近年では3Dプリンタやヴァーチャルリアリティが注目されるにつれて、三次元座標のデジタイザとして三次元計測が利用されている[4]。その他にも以下のような用途で三次元計測が活用されている。

- ・橋やトンネル等の大型構造物の検査[5]
- ・美術品・工芸品・出土品の複製やデータベース化[6]
- ・半導体ウェハや集積回路パターンの検査[7]
- ・健康管理や美容を目的とした人体や歯型の測定[8]

このように非接触の三次元計測は、多くの分野から高い関心が寄せられており、今後、更に三次元計測への要望が高まることが予測される。

1.2 非接触三次元計測手法

三次元計測の手法は大きく分けると接触式と非接触式がある。接触式は、機械的な接触式プローブを用いて、物体上の一点ごとにプローブを当てながら表面上の各点の三次元座標値を得ていく手法である。接触式は、一点一点の測定精度が高く、測定対象物の色合い、光沢、反射率などを気にすることなく測定できるといった特徴がある。しかしながら、計測点が増えると多くの時間と労力がかかることや、プローブの寿命による性能劣化や、接触による測定物に損傷などの欠点がある。

一方、非接触式は、主に光学的手法によるものであるが、測定物に損傷を与えることなく、高精度で高速に計測することができるため、近年、特に産業分野を

中心に、光学的手法のうちの一つである光による三次元計測へのニーズが高まっている [9-12]。なお、三次元計測以外にも光学的手法による応力やひずみ、変形の解析も盛んに行われている [13]。

光による三次元計測は、光パターンを照明しないパッシブ方式と照明するアクティブ方式に大きく分類することができる。図 1.1 に光による三次元計測の主要な手法についてまとめたツリー図を示す。以下に各手法の特徴並びに利点及び欠点について説明する。

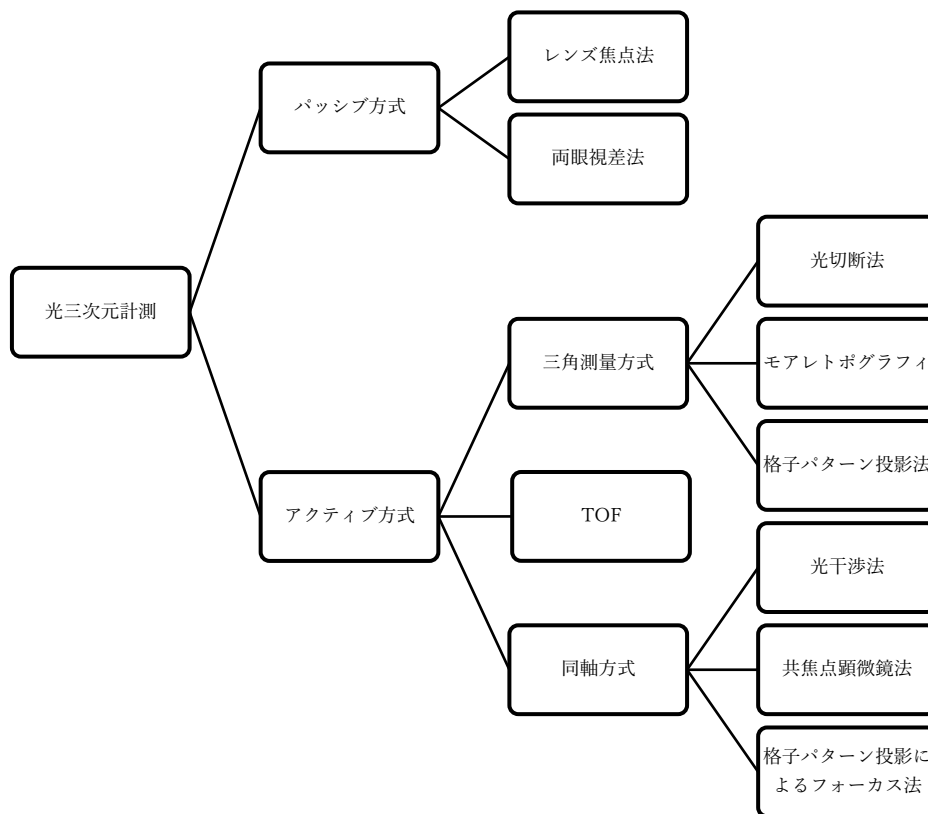


図 1.1 非接触式の三次元計測手法

1.2.1 レンズ焦点法

レンズ焦点法 (Shape from Focus) は、カメラのフォーカス制御に基づいた距離計測手法である。カメラのフォーカス変化に伴って発生する画像のぼけを解析することによって、合焦フォーカス位置を求め、それから対象までの三次元距離を計算するものである [14,15]。光パターンの照射を必要としないため多様な光環境下で距離を計測することが可能ではあるが、合焦フォーカス位置を求めるために複数の画像が必要になり、リアルタイム計測には向いていない。また、

この方法で距離画像を得ようとする場合、合焦フォーカス位置を自動検出する処理が必要になり高精度な測定が困難である。

また、ぼけ量の変化から奥行方向の距離を解析する Depth from Defocus 法がある[16,17]。この手法では、ぼけの生成過程をモデル化して距離情報を求める。レンズ焦点法と同様に、距離情報を求めるために複数の画像が必要になるためリアルタイム計測には向いていない。

1.2.2 両眼視差法

両眼視差法は、人間の両眼視差と同じく三角測量の原理に基づくステレオ方式の三次元計測であり、図 1.2 に原理図を示すように測定物を複数の視点から撮影した 2 枚以上の画像により距離を計測する手法である[18]。測定物の点 P を正確に検出できる場合には、装置が簡単に構成でき、広範囲の計測が可能であるという利点がある。しかしながら、多視点画像から測定物のある点 P に対応する点 P1、P2 を探索する必要があるため、色変化が少ない画像やコントラストが低い画像の測定が困難である。また、三角測量方式に基づいているため、溝や穴の計測が困難というオクルージョンの問題もある。

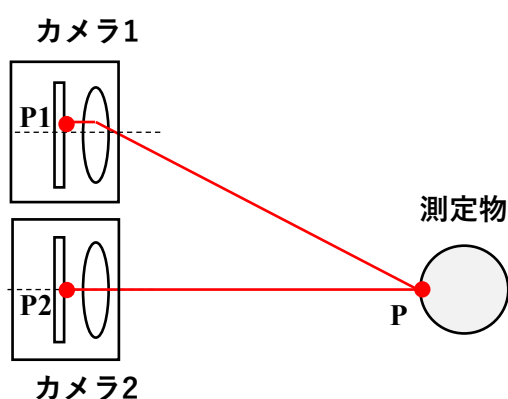


図 1.2 両眼視差法

1.2.3 光切断法

光切断法は、図 1.3 に示すようにライン状の光を測定物に投影し、このライン状の光が測定物の表面形状に応じて変化した様子を投影方向とは異なる方向か

ら観察することで三次元計測する手法である[19-21]。測定物上の点 P までの距離 Z は、

$$Z = \frac{\tan \alpha \tan \beta}{\tan \alpha + \tan \beta} L \quad (1.1)$$

となる。

測定原理が単純明快なため簡単に装置を構成できる利点はあるが、精度を向上させるために基線長 L を長くする必要があり、装置が大型化する。ライン状の計測になるため高速で三次元計測することが困難である。また、三角測量方式に基づいているためオクルージョンの問題もある。

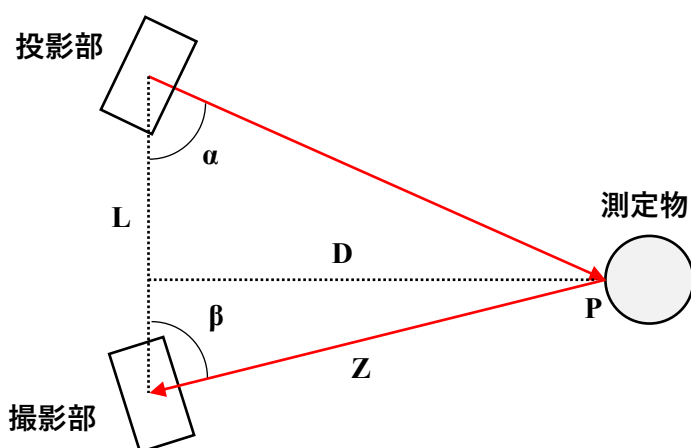


図 1.3 光切断法

1.2.4 モアレトポグラフィ

点列や線などを重ね合わせたときに発生する縞模様のことをモアレといい、このモアレ現象を三次元計測に応用した手法がモアレトポグラフィである[22-24]。モアレトポグラフィは、格子パターンを測定物に照明し、格子マスクを通してイメージセンサー（CCD 等）で撮影したときに観察されるモアレ縞を解析し、カメラからの距離を等高線図で得ることにより測定物の三次元形状を計測する手法である。応用例としては、人体の計測や飛行機の模型の計測がある[25]。モアレ画像解析するには、複数回撮影が必要な位相シフト法や周波数変調法を使う必要があるため、リアルタイム測定が困難である。また、三角測量方式に基

づいているためオクルージョンの問題もある。

1.2.5 格子パターン投影法

格子パターン投影法は、図 1.4 に示すようにプロジェクタ等から格子パターン（余弦波、矩形波）を測定物に投影し、投影された格子パターンを異なる角度からカメラで撮影し、測定物の形状に応じて歪んだ格子模様から測定物の形状を計測する手法である[26-33]。投影した格子パターンを輝度分布の波と見なし、位相シフト法（一般的には、4ステップ位相シフト法）により位相解析をして測定物の形状を計測する手法である。プロジェクタやカメラのレンズを変えることで幅広いレンジの形状計測に対応できる利点がある。一方、三角測量方式に基づいているためオクルージョンの問題が発生し、溝や穴は計測が困難という欠点がある。また、格子パターンの位相をシフトさせた複数の画像から位相解析する必要があるため、リアルタイム計測が困難という欠点もある。

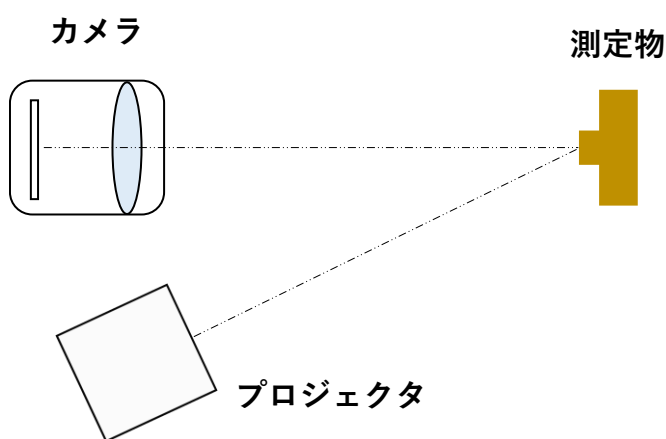


図 1.4 格子パターン投影法

1.2.6 Time-of-Flight (TOF)

Time-of-Flight (TOF) は、光源から放射された光が測定物で反射し、カメラに戻ってくるまでの時間（飛行時間）を計測し、既知である光の速度を元に距離を算出する手法である[34-37]。TOF カメラは、カメラに同期した光源を備えている。この光源は正弦波あるいはパルスで発光させて利用するため、半導体レーザーや LED が用いられ、波長としては 850 nm 付近の近赤外光が多く用いられて

いる。なお、飛行時間 t 、光の速度 c とすると、距離 L は、

$$L = \frac{c}{2}t \quad (1.2)$$

となる。この飛行時間 t を計測する手法は、直接 TOF 法と間接 TOF 法の 2 つに大きく分類される。直接 TOF 法は、発光の時刻と検出器に到来した時刻をストップウォッチのような時間計測器でそのまま測定する手法である。このため、短いパルス幅（100ps～数 ns）の光パルスを用いられる。間接 TOF 法は、光源に同期した複数の時間窓（クロック）を用いてロックイン検出を行うことで、発射光と反射光の位相差を求め、位相差から時間を計測する手法である。

TOF は、リアルタイム計測が可能であり、メートルオーダーの広い測定範囲を計測できる。一方、高解像度化が難しく、近距離の測定やミリメートルオーダーの測定物では高精度に計測することが難しい。

1.2.7 光干渉法

光干渉法は、ニュートンリングやマイケルソン干渉計に代表されるように、測定面からの反射光と参照面からの反射光を干渉させたときに、波長の半分の光路差ごとに明暗の縞が観測されることを利用した手法である[38-40]。代表的な測定手法として、位相シフト法と垂直走査法がある。

■位相シフト法

位相シフト法は、照明光として波長 λ の単色光を用い、測定面から反射された反射光と、参照面から反射光の位相差を求めることで、参照面を基準とした測定対象物の高さを計測する手法である。位相差 ϕ から測定面の高さ h は、

$$h = \left(\frac{\lambda}{4}\right)\phi \quad (1.3)$$

となる。

参照面をピエゾ素子により駆動し、光路差を既知の量だけ変化させたときに得られる複数の干渉画像から位相差を求める。一般的には 4 ステップ位相シフ

ト法が用いられ、位相シフト量の単位を $\pi/2$ とし、4枚の画像の強度分布から各画素の位相差を得る。位相差 ϕ は、

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{I_{\pi/2} - I_{3\pi/2}}{I_{\pi} - I_0} \right) \quad (1.4)$$

となる。ここで、 I_x は位相シフト量 x のときの強度を表す。位相シフト法は、サブナノメートルの高さ分解能があり、測定物の反射率の変化と無関係に測定できる利点がある。一方、複数回の撮影が必要であり、測定物が平滑面に限定される欠点がある。

■垂直走査法

垂直走査法（低コヒーレンス干渉、白色干渉法とも呼ばれる）は、位相シフト法における平滑面限定という制約がなく、測定面に段差があっても測定可能な手法である。測定に用いられる光学系は位相シフト法と同じである。照明光にある程度の帯域をもつ白色光を用いて、測定面と参照面の光路差を連続的に変化させると、測定面と参照面との光路差が零となる箇所でコントラスト最大の干渉画像が得られる。従って、コントラストのピーク位置から測定物の高さを計測することができる。垂直走査法は、ナノメートルの高さ分解能があり、測定物の凹凸に無関係に測定できる利点がある。一方、位相シフト法で必要とされる回数以上の撮影が必要であるという欠点がある。

1.2.8 共焦点顕微鏡法

共焦点顕微鏡法は、対物レンズの焦点位置と共役な位置（象位置）に円形の開口をもつピンホールを配置することで、焦点のあった位置のみ光を検出することができる[41,42]。共焦点顕微鏡法の共焦点光学系を図 1.5 に示す。通常の光学顕微鏡では、決められた領域を均一に照明することが重要になるが、共焦点光学系においては点光源から射出した光は、対物レンズにより測定物の一点に集光するように照明する。点光源として、一般的にはレーザー光が用いられる。この共焦点光学系では、焦点以外からの反射光は、ほとんどがピンホールでカット

され、焦点位置のみ情報を得ることができるため、光軸方向に対してコントラストの高い画像を得ることが可能である。しかしながら、光軸方向の情報しか得られないため、測定物の三次元形状を得るためには光軸方向と直行する方向に二次元走査する必要があり、リアルタイム計測が困難である。

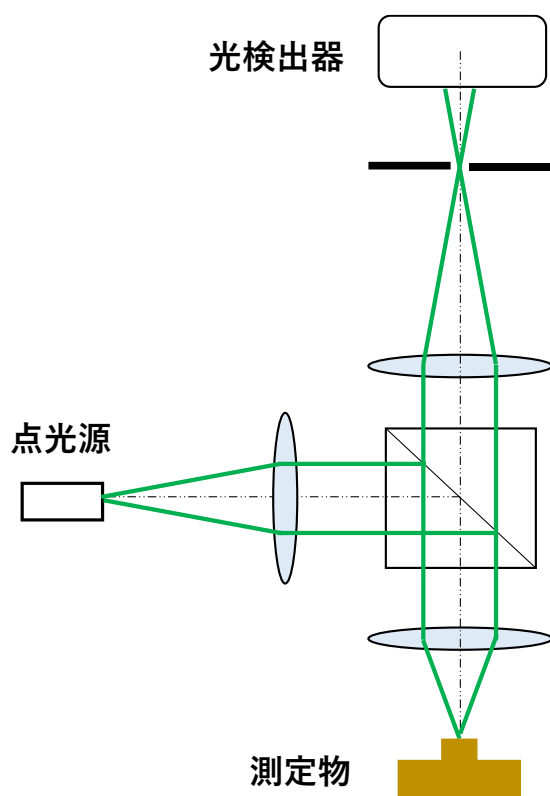


図 1.5 共焦点顕微鏡法

1.2.9 格子パターン投影によるフォーカス法

格子パターン投影によるフォーカス法は、格子パターンを測定物に投影して、格子パターンのコントラストから三次元計測する手法である[43-45]。格子パターン投影によるフォーカス法の光学系を図 1.6 に示す。コントラストを計測するためには、位相シフト法が用いられる。一般的には4ステップ位相シフト法が用いられ、位相シフト量の単位を $\pi/2$ とし、4枚の画像の強度分布から各画素のコントラスト γ は、

$$\gamma = \frac{2\sqrt{(I_0 - I_\pi)^2 + (I_{\pi/2} - I_{3\pi/2})^2}}{I_0 + I_{\pi/2} + I_\pi + I_{3\pi/2}} \quad (1.5)$$

となる。ここで、 I_x は位相シフト量 x のときの強度を表す。物体が投影レンズの焦点位置にある場合には投影された格子パターンとのコントラストは最大になり、焦点位置から前後にずれることによりコントラストは低下する。一般的にコントラスト分布はベッセル関数になることが知られている。コントラスト分布の変化が緩やかであれば、フォーカスを変化させたときのコントラスト値からピーク値を求め、測定物の形状を計測することができる。投影系と撮像素子が同軸に配置されているため、高い段差や深い穴といった形状の計測である。しかしながら、複数回にわたって格子パターンを投影する必要があるため、リアルタイム測定が困難である。

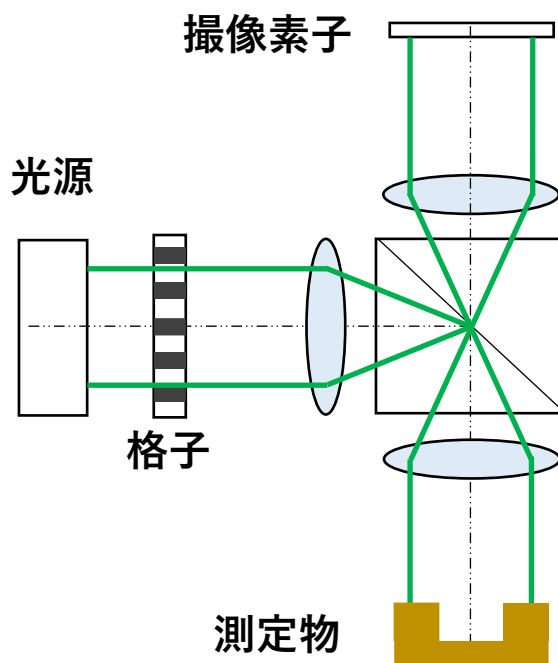


図 1.6 格子パターン投影によるフォーカス法

1.3 本研究の目的と論文の構成

従来の三次元計測法では、ミリメートルオーダーの高い段差や深い穴の測定物（ヒートシンク、銅ピラーなど）をリアルタイムに計測することができない。そこで、本研究の目的は、オクルージョンが発生しないリアルタイムの三次元計測法の実現である。これを実現するために、直線偏光パターン照明と偏光カメラを用いた三次元計測を提案した。

本論文は本章を含めて6章から構成されており、以下の通りである。

第1章 緒言

本研究の研究背景および従来行われてきた研究成果を概観し、本研究の目的について述べる。

第2章 偏光パターン投影による形状計測の原理

偏光およびストークスベクトル、並びに直線偏光パターン照明光の生成原理および三次元計測の原理について述べる。

第3章 直線偏光度による形状計測

直線偏光パターン照明と偏光カメラを用いた瞬間三次元計測装置および測定結果について述べる。

第4章 偏光度による形状計測

フルストークスカメラを用いて、直線偏光パターン照明の位相変化を補償可能な瞬間三次元計測装置および測定結果について述べる。

第5章 軸上色収差を用いた形状計測

軸上色収差を活用した直線偏光パターン照明とカラー偏光カメラを用いた瞬間三次元計測装置および測定結果について述べる。

第6章 結論

本論文のまとめを述べる。

第2章 偏光パターン投影による形状計測の原理

2.1 偏光

2.1.1 Maxwell 方程式

電荷が空間に及ぼす励起状態は、電磁場 (electromagnetic field) と呼ばれ、電界 (electric vector) \mathbf{E} と磁気誘導 (magnetic induction) \mathbf{B} によって記述される。物質に対して場の影響を記述するためには、電流密度 (electric current density) \mathbf{j} 、電気変位 (electric displacement) \mathbf{D} 、磁界 (magnetic vector) \mathbf{H} を導入する必要がある。これらのベクトルは、以下に示す Maxwell の方程式を満たす。

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

$$\text{div } \mathbf{D} = \rho \quad (2.2)$$

$$\text{rot } \mathbf{H} = \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} + \mathbf{j} \quad (2.3)$$

$$\text{div } \mathbf{B} = 0 \quad (2.4)$$

ここで、 t は時間、 ρ は電荷密度 (specific conductivity) を表す [46-48]。

次に、電流や電荷が存在しない ($\mathbf{j} = 0$ 、 $\rho = 0$) 空間を考える。Maxwell の方程式は、

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

$$\text{div } \mathbf{D} = 0 \quad (2.6)$$

$$\text{rot } \mathbf{H} = \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (2.7)$$

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

となる。物質が等方的であるなら、以下の関係を満たす。

$$\mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E} \quad (2.9)$$

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (2.10)$$

ここで、 ε は誘電率 (dielectric constant)、 μ は透磁率 (magnetic permeability) である。式(2.5)、式(2.7)、式(2.9)、式(2.10)から、

$$\nabla^2 \mathbf{E} = -\varepsilon \mu \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} \quad (2.11)$$

$$\nabla^2 \mathbf{H} = -\varepsilon \mu \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial t^2} \quad (2.12)$$

となる。ここで、以下の関係式を使用した。

$$\text{rot}(u\mathbf{A}) = u \cdot (\text{rot } \mathbf{A}) + (\text{grad } u) \times \mathbf{A} \quad (2.13)$$

$$\text{rot}(\text{rot } \mathbf{A}) = \text{grad}(\text{div } \mathbf{A}) - \nabla^2 \mathbf{A} \quad (2.14)$$

式(2.11)と式(2.12)は波動方程式であるため、 z 方向に進行する平面波を仮定すると、

$$\mathbf{E} = \mathbf{A} \cdot \exp[i(kz - \omega t + \phi)] \quad (2.15)$$

$$\mathbf{H} = \mathbf{B} \cdot \exp[i(kz - \omega t + \phi)] \quad (2.16)$$

となる。ここで、 z は進行方向の位置、 \mathbf{A} と \mathbf{B} は振幅、 i は虚数、 k は波数、 ω は角周波数、 ϕ は位相を表す。電界 \mathbf{E} および磁界 \mathbf{H} を表すベクトルが伝播方向 (z 方向) に直行する面内に存在する。電界 \mathbf{E} を x と y 成分に分けて表すと、

$$E_x = A_x \cdot \exp[i(kz - \omega t + \phi_x)] \quad (2.17)$$

$$E_y = A_y \cdot \exp[i(kz - \omega t + \phi_y)] \quad (2.18)$$

となる。 E_x と E_y の位相差 δ は、次の式で表される。

$$\delta = \phi_y - \phi_x \quad (2.19)$$

2.1.2 光の偏光状態

光（電磁波）の電場振動が特定方向に偏った光を偏光と呼ぶ。進行方向に垂直な面を振動面と呼び、振動面での電界の x と 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、式(2.17)～式(2.19)の電界の振幅 A_x 、 A_y と位相差 δ によって決定される。

位相差 $\delta = 0$ の場合、式(2.17)と式(2.18)は、

$$E_x = A_x \cdot \exp[i(kz - \omega t)] \quad (2.20)$$

$$E_y = A_y \cdot \exp[i(kz - \omega t)] \quad (2.21)$$

となり、 x と y 成分の電界の位相が揃うため、電界の合成ベクトルは振動面を直線上に移動する。この偏光状態を直線偏光と呼び、図 2.1(a)に示す。直線偏光の方位は振幅 A_x と A_y により決まる。

次に、位相差 $\delta = \pi/2$ の場合を考える。式(2.17)と式(2.18)は、

$$E_x = A_x \cdot \exp[i(kz - \omega t)] \quad (2.22)$$

$$E_y = A_y \cdot \exp\left[i\left(kz - \omega t + \frac{\pi}{2}\right)\right] \quad (2.23)$$

となり、電界の合成ベクトルは振動面を円周上に回転する。この偏光状態を円偏光と呼ぶ。 E_x の位相が E_y の位相に対して $\pi/2$ 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呼び、図 2.1(b)に示す。 E_x の位相が E_y の位相に対して $\pi/2$ 遅れているときは反時計回りに回転し、この偏光状態を左円偏光と呼ぶ。

そして、前述の位相差を除く一般的な位相差 δ の場合、式(2.17)と式(2.18)は、

$$E_x = A_x \cdot \exp[i(kz - \omega t)] \quad (2.24)$$

$$E_y = A_y \cdot \exp[i(kz - \omega t + \delta)] \quad (2.25)$$

となり、この偏光状態を楕円偏光と呼び、図 2.1(c)に示す。

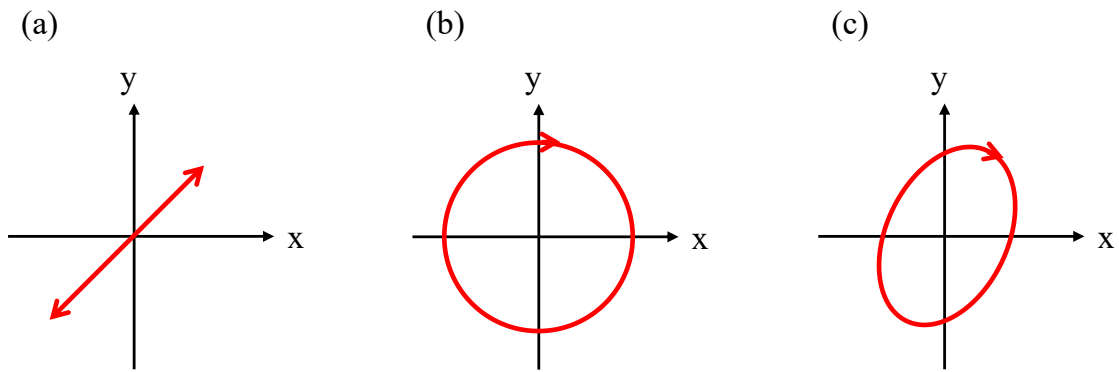


図 2.1 偏光：(a)直線偏光、(b)右円偏光、(c)楕円偏光

2.1.3 ストークスパラメータ

一般に、光の偏光状態は、直線偏光、円偏光などの完全偏光に加えて、部分偏光や非偏光（ランダム偏光）が存在する。これらの偏光状態は、ストークスパラメータとして表現でき、偏光状態は4個のパラメータで表すことができる[49]。ストークスパラメータ s は以下の式で定義される。

$$s = \begin{bmatrix} s_0 \\ s_1 \\ s_2 \\ s_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_x \cdot E_x^* + E_y \cdot E_y^* \\ E_x \cdot E_x^* - E_y \cdot E_y^* \\ E_x \cdot E_y^* + E_x^* \cdot E_y \\ i(E_x \cdot E_y^* - E_x^* \cdot E_y) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_x^2 + A_y^2 \\ A_x^2 - A_y^2 \\ 2A_x A_y \cos \delta \\ 2A_x A_y \sin \delta \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

ストークスパラメータを実測可能な光強度で記述すると、

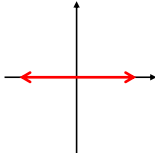
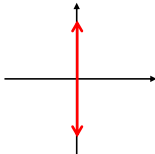
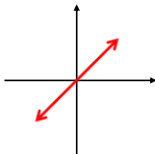
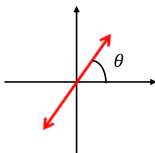
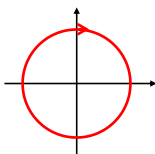
$$s = \begin{bmatrix} s_0 \\ s_1 \\ s_2 \\ s_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{0^\circ} + I_{90^\circ} \\ I_{0^\circ} - I_{90^\circ} \\ I_{45^\circ} - I_{135^\circ} \\ I_R - I_L \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

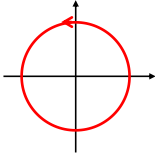
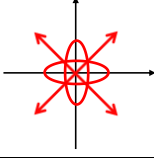
となる。ここで、 I_{0° 、 I_{45° 、 I_{90° 、 I_{135° 、 I_R 、 I_L は、それぞれ方位 0° 直線偏光成分、方位 45° 直線偏光成分、方位 90° 直線偏光成分、方位 135° 直線偏光成分、右回り円偏光、左回り円偏光の光強度である。光の偏光特性は、表 2.1 のように定義される。表 2.2 に代表的な偏光状態とストークスパラメータの関係を示す。

表 2.1 光の偏光特性

Degree of polarization (DOP)	$DOP = \frac{\sqrt{s_1^2 + s_2^2 + s_3^2}}{s_0}$
Degree of linear polarization (DOLP)	$DOLP = \frac{\sqrt{s_1^2 + s_2^2}}{s_0}$
Degree of circular polarization (DOCP)	$DOCP = \frac{s_3}{s_0}$
Ellipticity	$e = \frac{s_3}{s_0 + \sqrt{s_1^2 + s_2^2}}$
Orientation of major axis, azimuth	$\eta = \tan^{-1} \frac{s_2}{s_1}$

表 2.2 代表的な偏光状態とストークスパラメータ

Polarization State	Figure	Stokes parameters
Horizontal linear polarization		$\begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$
Vertical linear polarization		$\begin{bmatrix} 1 \\ -1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$
Linear polarization (Axis 45°)		$\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}$
Linear polarization (Axis θ)		$\begin{bmatrix} 1 \\ \cos 2\theta \\ \sin 2\theta \\ 0 \end{bmatrix}$
Right circular polarization		$\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$

Left circular polarization		$\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix}$
Random polarization		$\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$

2.1.4 ミュラー行列

光学特性には、複屈折や二色性のほかに偏光解消が存在する。これらは、ミュラー行列として取り扱うことができ、透過又は物体表面で反射する光に与える偏光の変化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 [50]。図 2.2 に示すように、入射光のストークスパラメータを S 、出射光のストークスパラメータを S' 、サンプルのミュラー行列を M とすると、次のように表される。

$$s' = M \cdot s$$

$$\begin{bmatrix} s'_0 \\ s'_1 \\ s'_2 \\ s'_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{00} & M_{01} & M_{02} & M_{03} \\ M_{10} & M_{11} & M_{12} & M_{13} \\ M_{20} & M_{21} & M_{22} & M_{23} \\ M_{30} & M_{31} & M_{32} & M_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_0 \\ s_1 \\ s_2 \\ s_3 \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

表 2.3 に代表的な光学素子のミュラー行列を示す。

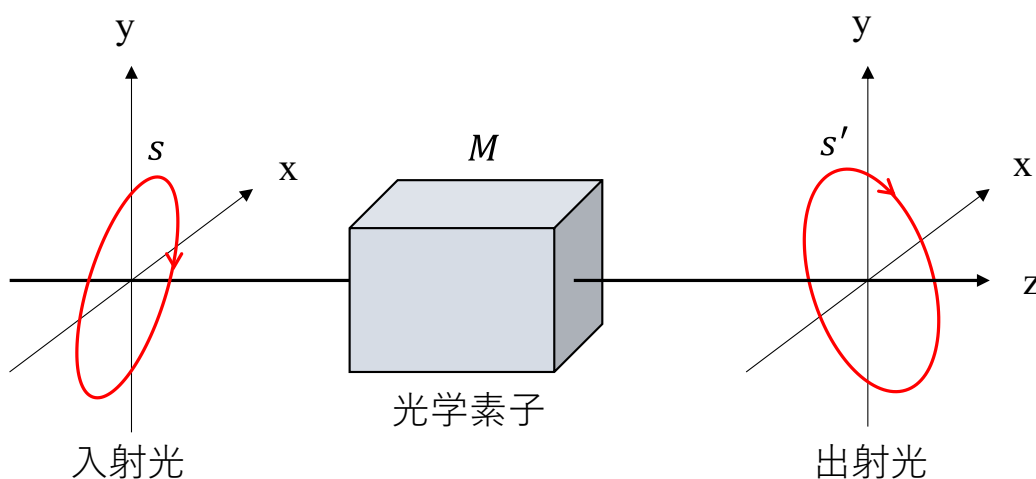


図 2.2 入射光と出射光の偏光状態の関係

表 2.3 代表的な光学素子とミュラー行列

Polarization elements	Mueller Matrix
Nonpolarizing element	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$
Linear polarizer transmission axis 0°	$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$
Linear polarizer transmission axis θ	$\frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & \cos 2\theta & \sin 2\theta & 0 \\ \cos 2\theta & \cos^2 2\theta & \sin 2\theta \cdot \cos 2\theta & 0 \\ \sin 2\theta & \sin 2\theta \cdot \cos 2\theta & \sin^2 2\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$
Quarter wave plate fast axis θ	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos^2 2\theta & \sin 2\theta \cdot \cos 2\theta & -\sin 2\theta \\ 0 & \sin 2\theta \cdot \cos 2\theta & \sin^2 2\theta & \cos 2\theta \\ 0 & \sin 2\theta & -\cos 2\theta & 0 \end{bmatrix}$
Half wave plate fast axis θ	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos 4\theta & \sin 4\theta & 0 \\ 0 & \sin 4\theta & -\cos 4\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}$
Retarder fast axis θ retardation δ	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos^2 2\theta + \sin^2 2\theta \cdot \cos \delta & \sin 2\theta \cdot \cos 2\theta (1 - \cos \delta) & -\sin 2\theta \cdot \sin \delta \\ 0 & \sin 2\theta \cdot \cos 2\theta (1 - \cos \delta) & \sin^2 2\theta + \cos^2 2\theta \cdot \cos \delta & \cos 2\theta \cdot \sin \delta \\ 0 & \sin 2\theta \cdot \sin \delta & -\cos 2\theta \cdot \sin \delta & \cos \delta \end{bmatrix}$
Ideal depolarizer	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$

ミュラー行列 M を持つ偏光要素が、入射角が変わらないように角度だけ光線周りに ϕ 回転すると、得られるミュラー行列 $M(\phi)$ は、

$$M(\phi) = R(\phi) \cdot M \cdot R(-\phi) \quad (2.29)$$

$$R(\phi) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos 2\phi & -\sin 2\phi & 0 \\ 0 & \sin 2\phi & \cos 2\phi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.30)$$

となる。 $R(\phi)$ は、ストークスペクトルとミュラー行列のための回転行列である。この回転行列を用いることで、任意の座標系でストークスペクトルとミュラー行列を用いた偏光状態の計算ができる。

2.2 偏光カメラによる形状計測の原理

縞パターン投影に基づいた従来の三次元計測システムは、一般的には位相シフト量の単位を $\pi/2$ とし、4枚の縞パターンを投影する必要があるため、スナップショットによる測定が困難という課題がある。この課題を解消するため、偏光カメラと直線偏光パターンを用いたスナップショットによる三次元計測を提案したので、その原理について説明する[51,52]。本システムの光学配置図を図 2.3 に示す。LP は Linear Polarizer (直線偏光子)、QWP は Quarter Wavelength Plate ($\lambda/4$ 波長板)、SLM は Spatial Light Modulator (空間光変調器)、NPBS は Non-Polarising Beam Splitter (非偏光ビームスプリッタ) を表す。

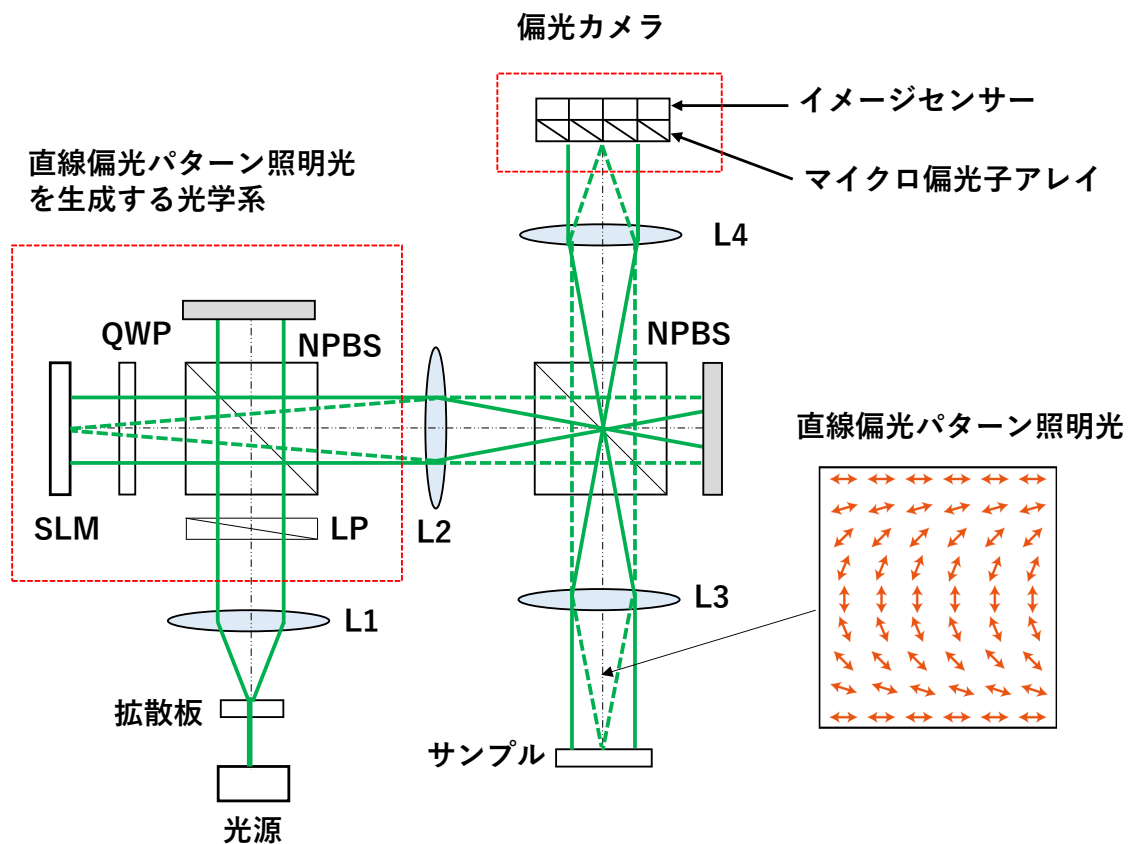


図 2.3 光学配置図

2.2.1 偏光カメラ

偏光カメラは、図 2.4 に示すように画素毎に方位の異なるマイクロ偏光子アレイとイメージセンサー（CMOS や CCD 等）が一体となったカメラである[53-55]。偏光子アレイは、方位角 0° 、 45° 、 90° 、 135° のマイクロ偏光子が縦横に配置されている。従って、各偏光子の方位角に対応した 4 種類の強度を同時に取得することができる。この偏光子アレイ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されている。

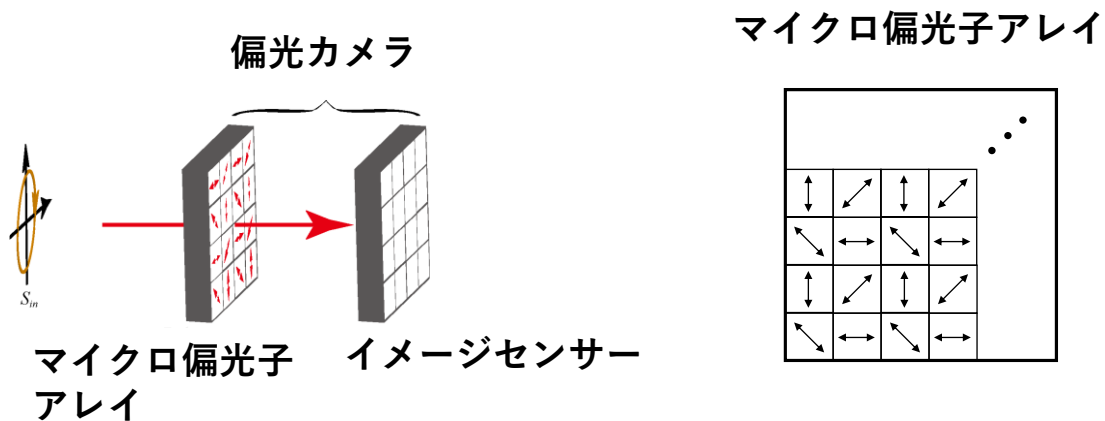


図 2.4 偏光カメラの構成

2.2.2 直線偏光パターン

図 2.5 を用いて直線偏光パターン照明光を生成する原理について説明する。光源からの光は、直線偏光子（LP）で直線偏光に偏光が揃えられる（Step 1）。この直線偏光光は、無偏光ビームスプリッター（NPBS）で反射され、 $\lambda/4$ 波長板（QWP）で円偏光に偏光変換される（Step 2）。この円偏光光は、SLM で位置に比例する位相差を与えられ、位置に応じて楕円率が変わる楕円偏光に偏光変換される（Step 3）。この楕円偏光光は、 $\lambda/4$ 波長板（QWP）を再度通過して、位置に応じて偏光の方位角が変化する直線偏光パターンが生成される（Step 4）。

ストークスベクトルとミューラー行列を使用して、前述の直線偏光パターンを定量的に特徴付けることができる。偏光カメラのイメージセンサー表面の座標を (x, y) とすると、光源（無偏光と仮定）からの入力ストークスベクトル s_{in} を各光学素子に通すと、サンプルに投影される出力ストークスベクトル s_{out} は、

$$\begin{aligned}
s_{\text{out}}(x, y) &= \text{QWP}(-45^\circ) \cdot \text{SLM}(\phi(x, y), 0^\circ) \cdot \text{QWP}(45^\circ) \cdot \text{LP}(0^\circ) \cdot s_{\text{in}} \\
&= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_s + r_p & r_s - r_p & 0 & 0 \\ r_s - r_p & r_s + r_p & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2\sqrt{r_s r_p} \cos\{\phi(x, y)\} & 2\sqrt{r_s r_p} \sin\{\phi(x, y)\} \\ 0 & 0 & -2\sqrt{r_s r_p} \sin\{\phi(x, y)\} & 2\sqrt{r_s r_p} \cos\{\phi(x, y)\} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \\
&= \frac{1}{2} \begin{bmatrix} r_s + r_p \\ 2\sqrt{r_s r_p} \cos\{\phi(x, y)\} \\ 2\sqrt{r_s r_p} \sin\{\phi(x, y)\} \\ r_s - r_p \end{bmatrix} \tag{2.31}
\end{aligned}$$

となる。ここで、 $\phi(x, y)$ 、 r_s と r_p は、SLMのリターダンス、SLMのs偏光の反射率とp偏光の反射率を表す。式に $r_s = r_p = 1$ を代入すると、 s_{out} は、

$$s_{\text{out}} = \begin{bmatrix} 1 \\ \cos\{\phi(x, y)\} \\ \sin\{\phi(x, y)\} \\ 0 \end{bmatrix} \tag{2.32}$$

となる。式(2.32)と表 2.2 から、方位角 $\phi(x, y)/2$ の偏光光であることが分かる。従って、SLMのリターダンス $\phi(x, y)$ を位置に対して線形に変化させることで、直線偏光パターンが得られる。

次に、照明系とサンプルの間に位相要素がない場合を考える。検出器で測定されるストークスベクトル s_{img} は、

$$s_{\text{img}} = \begin{bmatrix} s_0 \\ s_1 \\ s_2 \\ s_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & A(x, y) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & A(x, y) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & A(x, y) \end{bmatrix} s_{\text{out}} = \begin{bmatrix} 1 \\ A(x, y) \cos\{\phi(x, y)\} \\ A(x, y) \sin\{\phi(x, y)\} \\ 0 \end{bmatrix} \tag{2.33}$$

となる。ここで、 $A(x, y)$ はコントラストを表す。

コントラストは、位相シフト法をから計算される。式(2.33)から、 $\tan^{-1}(s_2/s_1)$ で与えられる直線偏光の方位角は、SLMのリターダンス $\phi(x, y)$ に等しいことが分かる。つまり、空間的に変化する偏光の方位角は、SLMのリターダンス $\phi(x, y)$ を調整するだけで制御できる。

偏光カメラによって検出された光強度 $I(x, y, \psi)$ は、

$$\begin{aligned}
I(x, y, \psi) &= \mathbf{d}^T P(\psi) \cdot s_{\text{img}} \\
&= \frac{1}{2} [1 \ 0 \ 0 \ 0] \begin{bmatrix} 1 & \cos(2\psi) & \sin(2\psi) & 0 \\ \cos(2\psi) & \cos^2(2\psi) & \cos(2\psi)\sin(2\psi) & 0 \\ \sin(2\psi) & \cos(2\psi)\sin(2\psi) & \sin^2(2\psi) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ A(x, y)\cos\{\phi(x, y)\} \\ A(x, y)\sin\{\phi(x, y)\} \\ 0 \end{bmatrix} \\
&= \frac{1}{2} \{1 + A(x, y) \cos(\phi(x, y) - 2\psi)\} \tag{2.34}
\end{aligned}$$

となる。ここで、 $P(\psi)$ は角度 $\psi \in \{0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ\}$ で方向づけられたマイクロ偏光子のミュラー行列であり、 \mathbf{d} は検出ベクトルである。SLMのリターダンスをy軸方向に線形に変化させた場合の直線偏光パターンと偏光カメラで撮影される光強度の概略図を図 2.6 に示す。偏光カメラと直線偏光パターンを使うことで、縞パターンの位相が 90° シフトした 4 種類の縞パターンを同時に取得することができる。

式(2.34)に 4 ステップ位相シフト法を適用すると、コントラスト $A(x, y)$ と位相 $\phi(x, y)$ は、

$$A(x, y) = \frac{2\sqrt{(I_0 - I_{90})^2 + (I_{45} - I_{135})^2}}{I_0 + I_{45} + I_{90} + I_{135}} = \frac{\sqrt{s_1^2 + s_2^2}}{s_0} \tag{2.35}$$

$$\phi(x, y) = \tan^{-1}\left(\frac{I_{45} - I_{135}}{I_0 - I_{90}}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{s_2}{s_1}\right) \tag{2.36}$$

$$I_0 = I(x, y, 0^\circ), I_{45} = I(x, y, 45^\circ), I_{90} = I(x, y, 90^\circ), I_{135} = I(x, y, 135^\circ)$$

となる。式(2.35)から、偏光不変のサンプル（すなわち、対角ミュラー行列）の場合、位相シフト法のコントラストは、直線偏光パターン照明の直線偏光度（DOLP）に等しい。従って、4 つの偏光画像($I_0, I_{45}, I_{90}, I_{135}$)を使用して、偏光カメラの各ピクセルで DOLP を計算することで、シングルショットでコントラスト $A(x, y)$ と位相 $\phi(x, y)$ を測定できる。

コントラスト $A(x, y)$ は、サンプル表面からの距離の関数として表すことができる。サンプルの三次元座標は、

$$Z(X, Y) = f(A(X, Y)) = f(A(x, y)) \tag{2.37}$$

となる。ここで、 (X, Y, Z) はサンプル表面での三次元座標を表す。もし、光学系がテレセントリック光学系であるなら、任意の Z で $X \propto x$ & $Y \propto y$ である。

次に、理論的な高さ方向の測定範囲について計算する。縞パターン投影の光学伝達関数 (Optical transfer function) $H(Z)$ は、ベッセル関数を用いて次のように表すことができる[56]。

$$H(Z) = \frac{2 \cdot J_1(\pi \cdot Z \cdot N/F)}{\pi \cdot Z \cdot N/F} \quad (2.38)$$

ここで、 J_1 は第1種ベッセル関数 (Bessel function of the first kind)、 N は1mm当たりの縞パターンの数、 F は光学系のFナンバーを表す。距離 Z はデフォーカス量に対応する量である。但し、フォーカス位置 (ベストピント位置) を $Z = 0$ としている。従って、理想的な光学系でのコントラストは

$$A(x, y) = H(Z) \quad (2.39)$$

となる。

理論的な高さ方向の測定範囲は、ベストピント位置から第1種ベッセル関数 J_1 が最初に0になる距離である。従って、理論的な高さの測定範囲は、次のように表せる。

$$0 \leq Z \leq \frac{M \cdot F}{\pi \cdot N} \quad (Z \geq 0) \quad \text{or} \quad -\frac{M \cdot F}{\pi \cdot N} \leq Z \leq 0 \quad (Z \leq 0) \quad (2.40)$$

ここで、 $M (=3.832\cdots)$ は第1種ベッセル関数の最初のゼロ点である。

一般的には、計算を簡単化するため、コントラスト $A(x, y)$ をガウス関数でフィッティングすることが多い。本研究でも測定されたコントラストをガウス関数でフィッティングした。

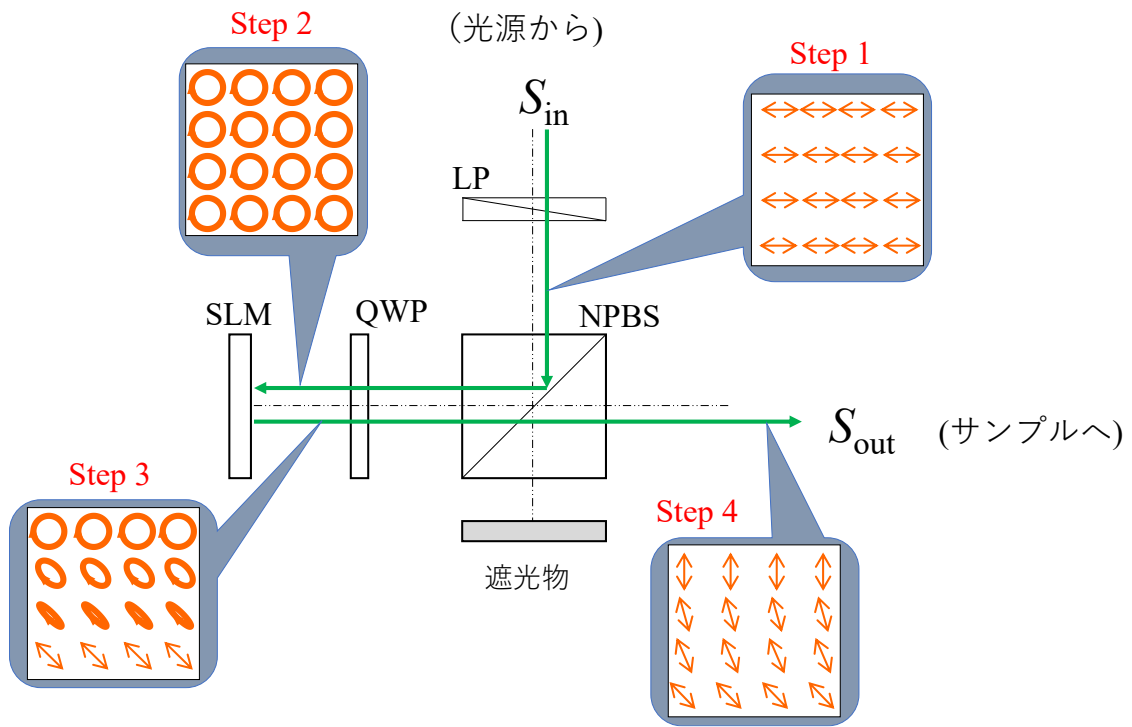


図 2.5 直線偏光パターン照明光の生成原理

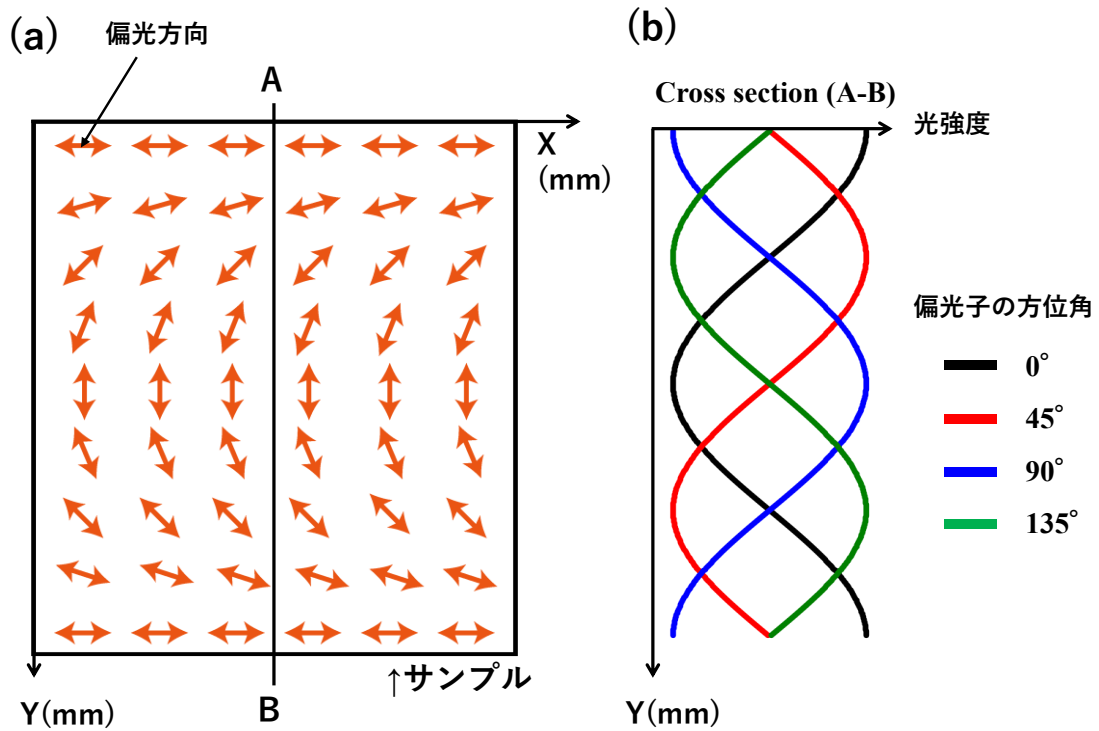


図 2.6 (a) 直線偏光パターン (b) 偏光カメラの各偏光子で検出される強度

2.2.3 コントラスト傾斜による方法

コントラスト傾斜による方法の解析フローチャートを図 2.7 に示す[44]。この手法に基づいて三次元計測するにはサンプルと同じ表面を有するリファレンスサンプル（例、平面ミラー）を用いてコントラスト分布（図 2.7(a)）を計測する必要がある。このコントラスト分布を得るためには、高さを細かく走査してコントラストを測定するか、10～20点程度コントラストを測定して、任意のフィテイング関数を利用するかである。フィテイング関数としてガウス関数が多く用いられる。

次に、測定物のコントラストを測定し（図 2.7(b)）、この測定されたコントラストをリファレンスサンプルのコントラスト分布を用いて高さに変換する（図 2.7(c)）。コントラスト傾斜による方法を用いることで、コントラストと高さが一対一に対応するため、本システムを用いてコントラストを測定すれば、リアルタイムな三次元計測ができる。但し、リファレンスサンプルのコントラスト分布のピーク位置より高さが低い側（左側）またはピーク位置より高さが高い側（右側）の範囲しか使えないため、コントラスト分布のピーク位置を跨った測定範囲の測定はできない。

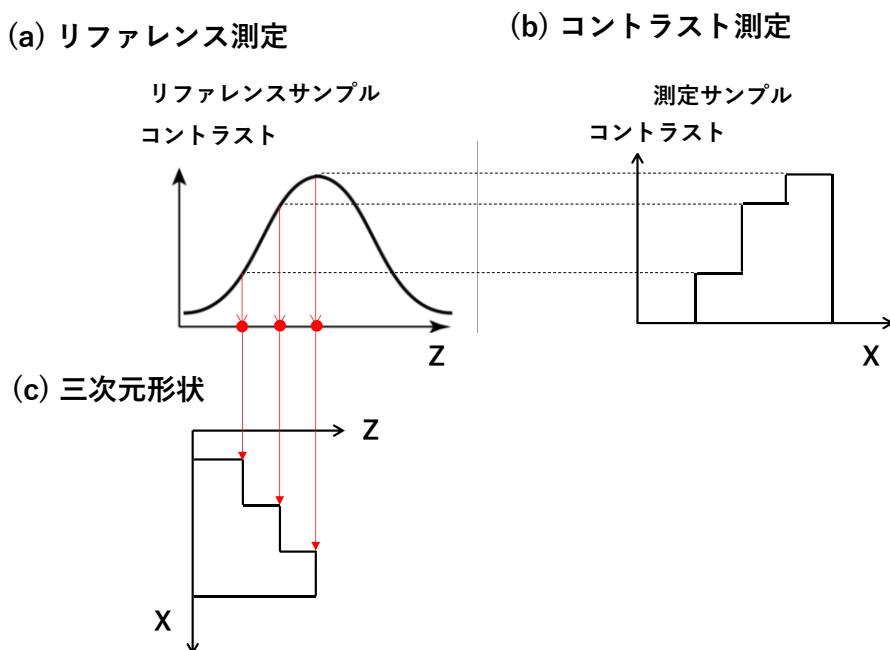


図 2.7 測定方法の概略図

2.3 フルストークスカメラによる形状計測の原理

偏光カメラを用いた手法では、照明系とサンプルの間に直線偏光パターン照明の偏光の位相を変化させる素子(例、波長板、アクリル板、保護フィルムなど)がある場合には、正確に三次元形状を計測できないという課題がある。フルストークスカメラを用いることで正確な計測を実現したので、その計測原理について説明する。図 2.8 に本システムの光学配置図を示す。本システムと図 2.3 との相違点は、偏光カメラがフルストークスカメラ[57,58]に置き換わっている点である。

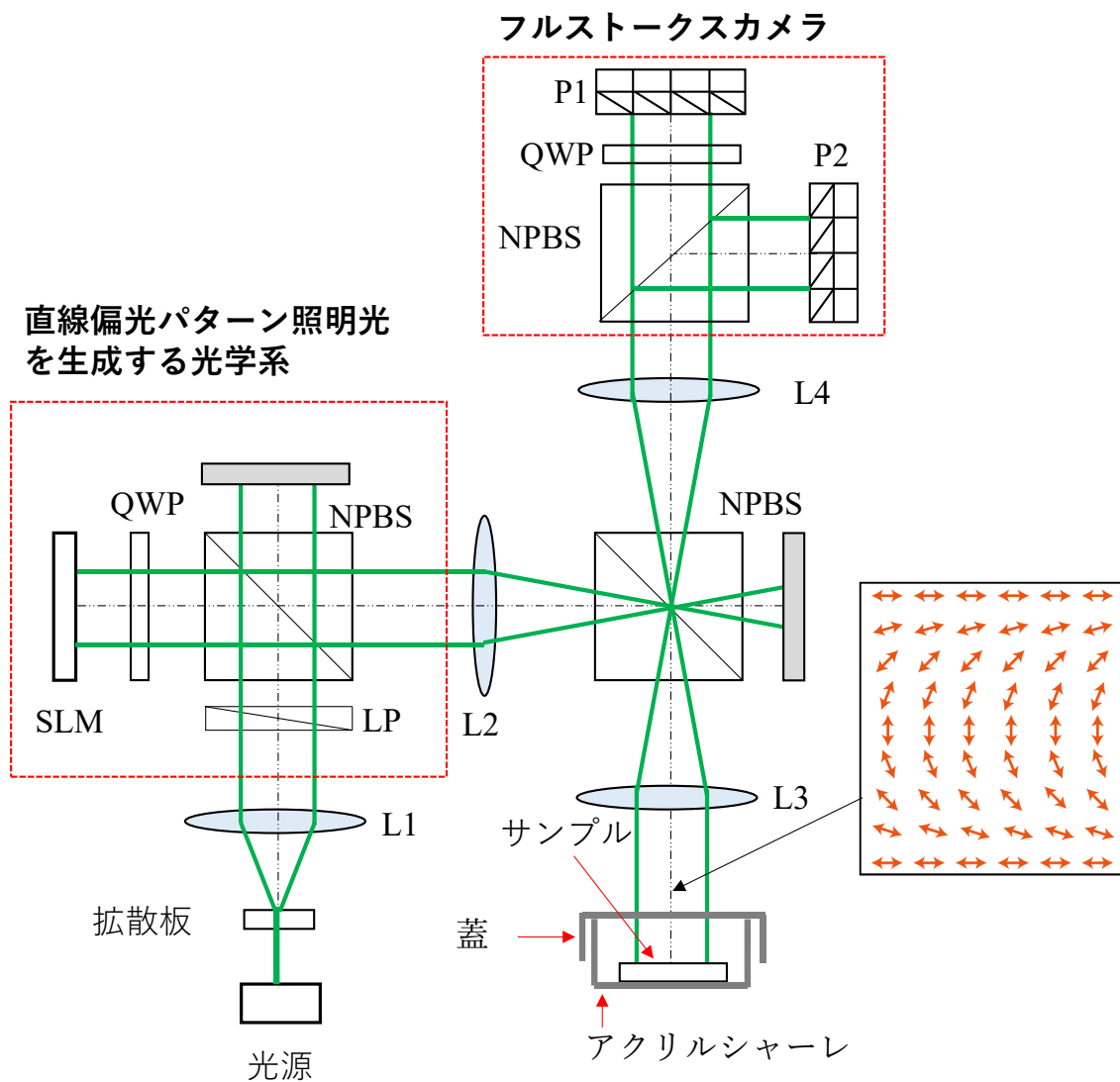


図 2.8 光学配置図

2.3.1 フルストークスカメラ

フルストークスカメラは、図 2.8 に示すように NPBS、QWP、第 1 の偏光カメラ (P1)、第 2 の偏光カメラ (P2) から構成され、スナップショットでフルストークスベクトル $s = [s_0, s_1, s_2, s_3]^T$ を測定することができるシステムである。QWP の進相軸 (first axis) は 45° である。第 1 の偏光カメラで撮影されるマイクロ偏光子の方位角 ($0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$) に対応した 4 つの偏光画像を (I_0, I_1, I_2, I_3) とし、第 2 の偏光カメラで撮影されるマイクロ偏光子の方位角 ($0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$) に対応した 4 つの偏光画像を (I_4, I_5, I_6, I_7) とする。NPBS および QWP の特性が理想的な場合、フルストークスベクトルは、次の式により計算される。

$$s = \begin{bmatrix} s_0 \\ s_1 \\ s_2 \\ s_3 \end{bmatrix} = \frac{1}{4} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 2 & 0 & -2 & 0 & 2 & 0 & -2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -4 & 0 & 4 \\ 0 & 4 & 0 & -4 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 \\ I_6 \\ I_7 \end{bmatrix} \quad (2.41)$$

2.3.2 偏光度 (DOP) とコントラスト

照明系と測定物の間に直線偏光パターン照明の偏光の位相を変化させる素子がある場合のコントラストを測定する方法について説明する。図 2.9 に示すように直線偏光パターン照明光が、位相子を通過し、サンプルで反射され、再度位相子を通過し、フルストークスカメラで撮影される場合について考える。式(2.33)からフルストークスカメラで検出されるストークスベクトル s'_{img} は、

$$s'_{\text{img}} = \begin{bmatrix} s'_0 \\ s'_1 \\ s'_2 \\ s'_3 \end{bmatrix} = \text{PE}(\pi - \alpha, \beta) \cdot \text{PE}(\alpha, \beta) \cdot s_{\text{img}} \quad (2.42)$$

$$\text{PE}(\alpha, \beta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos^2 2\alpha + \sin^2 2\alpha \cdot \cos \beta & \sin 2\alpha \cdot \cos 2\alpha (1 - \cos \beta) & -\sin 2\alpha \sin \beta \\ 0 & \sin 2\alpha \cdot \cos 2\alpha (1 - \cos \beta) & \sin^2 2\alpha + \cos^2 2\alpha \cdot \cos \beta & \cos 2\alpha \sin \beta \\ 0 & \sin 2\alpha \sin \beta & -\cos 2\alpha \sin \beta & \cos \beta \end{bmatrix}$$

(α : fast axis, β : retardance)

となる。ここで、 $PE(\alpha, \beta)$ は位相子のミュラー行列である。

式(2.42)から直線偏光度 (DOLP) を計算すると、

$$DOLP = \frac{\sqrt{s_1'^2 + s_2'^2}}{s_0'} = A(x, y) \cdot g(\alpha, \beta, \delta(x, y)) \quad (2.43)$$

となる。従って、DOLP がコントラスト $A(x, y)$ に一致しないため、DOLP しか測定できない偏光カメラを使った手法ではコントラストを正確に測定できないことが分かる。

次に式(2.42)から DOP を計算すると、

$$DOP = \frac{\sqrt{s_1'^2 + s_2'^2 + s_3'^2}}{s_0'} = A(x, y) \quad (2.44)$$

となる。DOP がコントラスト $A(x, y)$ と等しいため、DOP を測定することで正確にコントラストを測定することができる。従って、フルストークスカメラを用いることで、スナップショットでコントラストを測定ができる。

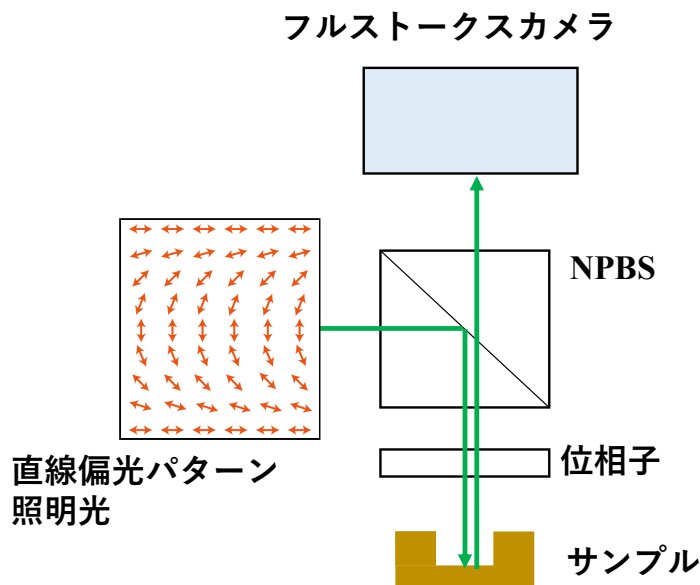


図 2.9 計算モデルの模式図

2.4 カラー偏光カメラによる形状計測の原理

2.2 節と 2.3 節のシステムで単純に測定範囲を拡大すると、測定精度が低下するという課題があった。偏光パターンの投影系 (L1 と L2) の軸上色収差と、カラー偏光カメラ[58,59]を用いることでダイナミックレンジを約 2 倍に拡大することを可能したので、その計測原理について説明する。図 2.10 に本システムの光学配置図を示す。偏光パターンの投影系の軸上色収差を大きく発生させるために、L1 に分散の大きい正レンズと分散の小さい負レンズの 2 枚のレンズで構成した。また、狭帯域のスペクトルを実現するために、白色光源の後にマルチバンドパスフィルターを配置した。

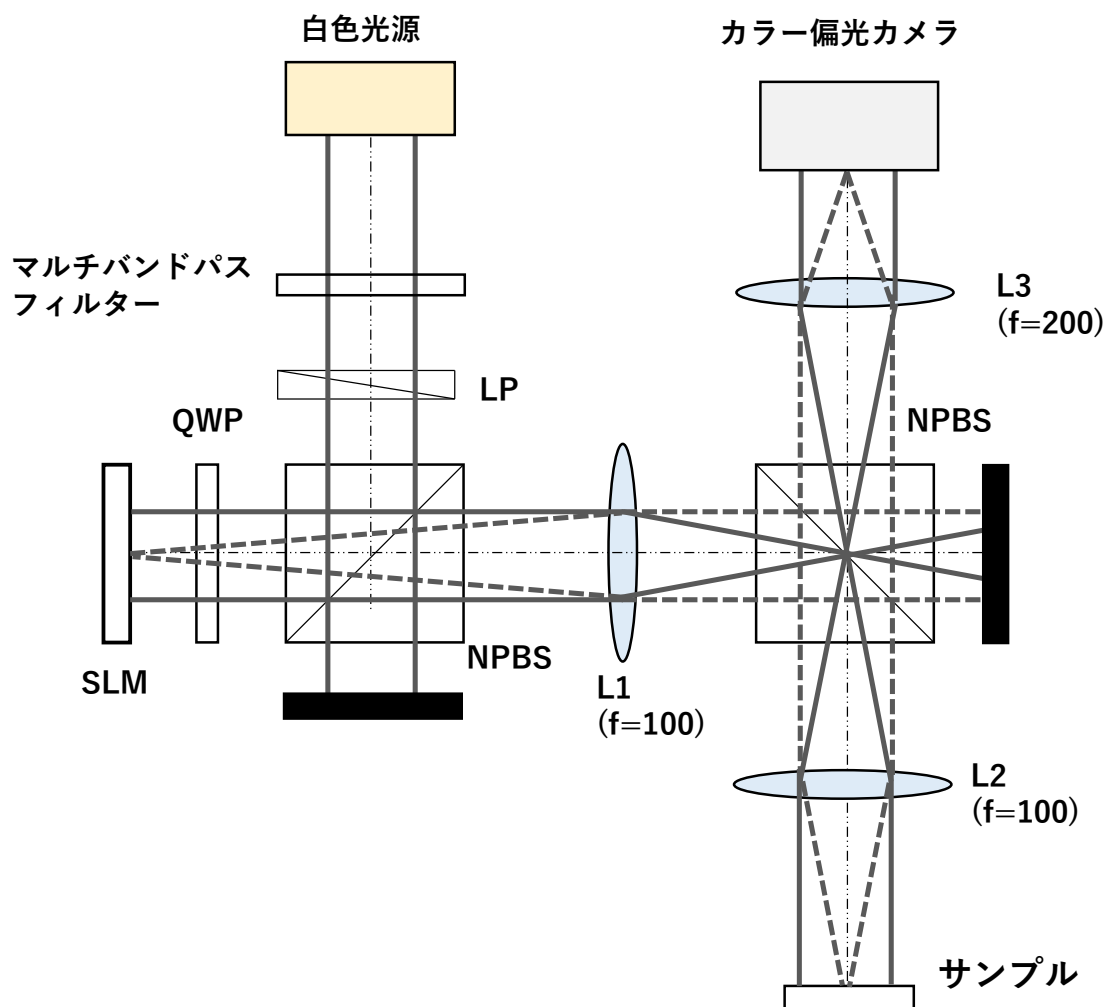


図 2.10 光学配置図

2.4.1 カラー偏光カメラ

カラー偏光カメラ[59]は、方位角 0° 、 45° 、 90° 、 135° のマイクロ偏光子で構成される偏光子アレイとカラーフィルターが一体になったカメラであり、(R, G, B) の輝度と偏光情報を同時に取得可能である。カラー偏光カメラの概略構成を図 2.11 に示す。

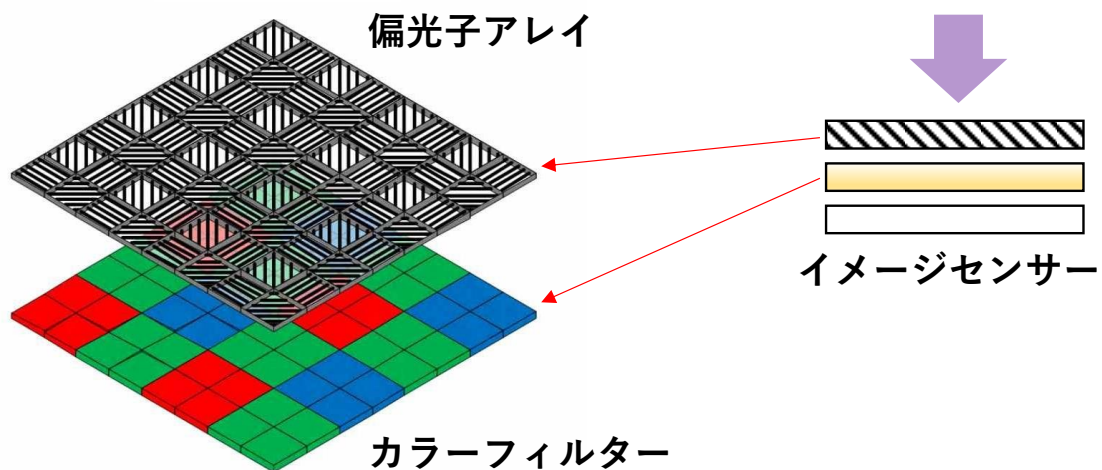


図 2.11 カラー偏光カメラ

2.4.2 ダイナミックレンジ拡大手法

液晶を使った SLM のリターダンス ϕ は、次のように表される。

$$\phi = \frac{\Delta n \cdot d}{\lambda} \quad (2.45)$$

ここで、 Δn 、 d 、 λ は、 x 方向と y 方向の屈折率の差、液晶の厚さ、光の波長を表す。SLM のリターダンスは、波長に反比例する。つまり、1mm 当たりの縞パターン数は波長に反比例するので、理論的な高さの測定範囲は波長に比例する。簡単にするため、計測システムに軸上色収差がない場合を考える。コントラスト分布をガウス分布で近似すると、高さ $z(x, y)$ のコントラスト $A(x, y, \lambda)$ は、

$$A(x, y, \lambda) = C \cdot \exp \left[- \left(\frac{z(x, y)}{\sigma(\lambda)} \right)^2 \right] \quad (2.46)$$

$$\sigma(\lambda) \propto \lambda$$

となる。ここで、 C は、定数である。高さ $z(x, y)$ は、

$$z(x, y) = \pm \sigma(\lambda) \sqrt{2 \ln \left(\frac{C}{A(x, y, \lambda)} \right)} \quad (2.47)$$

となる。従って、波長に依らずコントラスト $A(x, y, \lambda)$ は、 $z(x, y) = 0$ で対称であるため、測定されたコントラストが、 $z(x, y) > 0$ または $z(x, y) < 0$ の領域のコントラストであるか識別することはできない。

次に、軸上色収差がある場合について考える。コントラスト $A(x, y, \lambda)$ は、

$$A(x, y, \lambda) = C \cdot \exp \left[- \left(\frac{z(x, y) - d(\lambda - \lambda_0)}{\sigma(\lambda)} \right)^2 \right] \quad (2.48)$$

となる。ここで、 $d(\lambda - \lambda_0)$ は、基準波長 λ_0 に対する波長 λ の軸上色収差を表す。高さ $z(x, y)$ は、

$$z(x, y) = d(\lambda - \lambda_0) \pm \sigma(\lambda) \sqrt{2 \ln \left(\frac{C}{A(x, y, \lambda)} \right)} \quad (2.49)$$

となる。基準波長 λ_0 と任意の波長 λ_1 を考えると、コントラストは、

$$A(x, y, \lambda_0) = C \cdot \exp \left[- \left(\frac{z(x, y)}{\sigma(\lambda_0)} \right)^2 \right] \quad (2.50)$$

$$A(x, y, \lambda_1) = C \cdot \exp \left[- \left(\frac{z(x, y) - d(\lambda_1 - \lambda_0)}{\sigma(\lambda_1)} \right)^2 \right] \quad (2.51)$$

となる。コントラスト $A(x, y, \lambda_0)$ は、 $A(x, y, \lambda_1)$ を使うことで $z(x, y) > 0$ または $z(x, y) < 0$ の領域のコントラストであるか識別可能である。従って、偏光パターン照明系の軸上色収差と2色のコントラストを用いることでダイナミックレンジを2倍に拡大することができる。

具体例を示すために、以下の条件の場合について考える。

$$C = 1$$

$$\lambda_0 = 460 \text{ (nm)}$$

$$\lambda_1 = 640 \text{ (nm)}$$

$$d(\lambda_1 - \lambda_0) = 1.0 \text{ (mm)}$$

$$\sigma(\lambda_0) = 4.6 \text{ (mm)}$$

$$\sigma(\lambda_1) = 6.4 \text{ (mm)}$$

式(2.50)と式(2.51)からコントラストは、

$$A(\lambda_0) = \exp\left[-\left(\frac{z}{4.6}\right)^2\right] \quad (2.52)$$

$$A(\lambda_1) = \exp\left[-\left(\frac{z+1}{6.4}\right)^2\right] \quad (2.53)$$

となる。図 2.12 に青光（波長 λ_0 ）と赤光（波長 λ_1 ）のコントラスト分布のグラフを示す。赤光のコントラストを使うことで、青光のコントラストが青光のコントラスト分布のピーク（ $z=0$ mm）より高い側の領域（ $z>0$ ）または低い側（ $z<0$ ）の領域のコントラストであるか判別することが可能である。式(2.52)と式(2.53)を用いて、 $z=4$ と $z=-4$ の場合のコントラストの具体例を以下に示す。

$$z=4 \quad A(\lambda_0) = 0.469 \quad A(\lambda_1) = 0.543$$

$$z=-4 \quad A(\lambda_0) = 0.469 \quad A(\lambda_1) = 0.803$$

従って、軸上色収差と 2 色のコントラストを用いることでダイナミックレンジを 2 倍に拡大することができる。本論文は、軸上色収差の発生量が大きい赤光と青光の例を示したが、緑光と赤光または青光と緑光のコントラストを用いても良い。

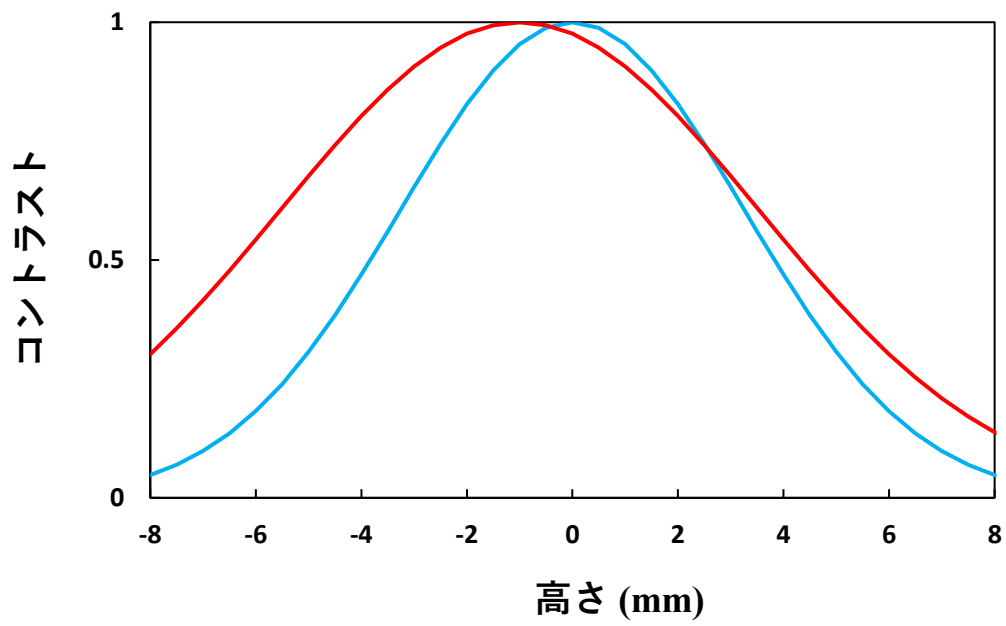


図 2.12 コントラスト分布の具体例 青線：青光（波長 λ_0 ）のコントラスト分布、赤線：赤光（波長 λ_1 ）のコントラスト分布

第3章 直線偏光度による形状計測

3.1 はじめに

光による3次元計測法は、非接触かつ非破壊であるため、工業検査や医療検査、ロボットビジョンなど幅広い分野で利用されている。古くから提案されている光による3次元計測は、主にステレオ法である。これらは、光切断法やモアレトポグラフィ、格子パターン投影法などである。これらの手法は、投影系軸と撮影系軸が異なるため、オクリュージョンの問題により急な段差や深い穴といったものは計測が困難である。これらの問題を解決させるためには、投影系と撮影系が同軸のフォーカス法が有効である。

フォーカス法は、投影されたランダムパターンまたは規則的なパターンのボケ度合い（コントラスト）から3次元座標を求めるものである。予め高さとコントラストの関係を測定することによって、サンプルの3次元情報を求めることができる。Wilsonらは、顕微鏡下で投影パターンのコントラストが共焦点効果を示すことを報告した[60]。武田はフーリエ解析を用いて焦点のコントラスト依存性を使用することを提案し[56]、石原らや吉澤らは格子パターン投影法によるフォーカス法を提案している[61,62]。格子パターン投影法によるフォーカス法は、位相シフト法でコントラストを求めるので、リアルタイム計測ができないという課題がある。スナップショットの計測手法として、カラーカメラと3色(R,G,B)の縞パターンを使った計測手法が提案されているが、空間的に色が変わるサンプルは、測定値にアーティファクトを引き起こすという課題がある[63]。これらの課題を解決するために、偏光パターン照明と偏光カメラを用いた3次元計測システムを提案した[64]。以下に、このシステムの測定装置および測定物のリアルタイムの測定結果を示す。

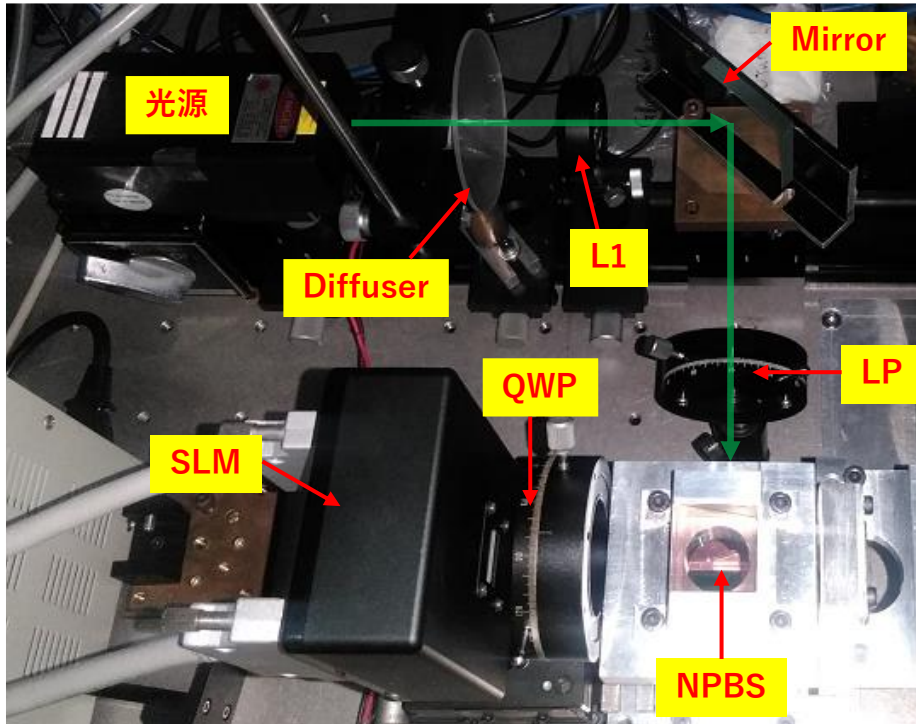
3.2 測定装置

測定装置および光学レイアウトを図 3.1 に示す。光源に Nd-YAG レーザーの第 2 高調波(532 nm)、SLM に浜松ホトニクス社の反射型液晶パネル「X10468」、偏光カメラにソニー社の偏光カメラ(画素数 2064×1560、ピクセルサイズ 2.5 μm)を使用した。Diffuser は、レーザーのスペckル低減させるために拡散板を回転させている。光源からのレーザー光は Diffuser で拡散され、レンズ(L1)でコリメートされる。L1 でコリメートされた光は、直線偏光子(LP)、無偏光ビームスプリッタ(NPBS)、λ/4 波長板(QWP)、SLM を介して、直線偏光パターン照明光が生成される(2.2.2 参照)。直線偏光パターン照明光は、レンズ(L2)、NPBS およびレンズ(L3)を介してサンプルに照明される。サンプルの表面で反射した光は、L3、NPBS およびレンズ(L4)を介して偏光カメラに導かれる。直線偏光パターン照明光の位相変化を抑制するため、NPBS は 532 nm のレーザー用の無偏光ビームスプリッタを採用した。

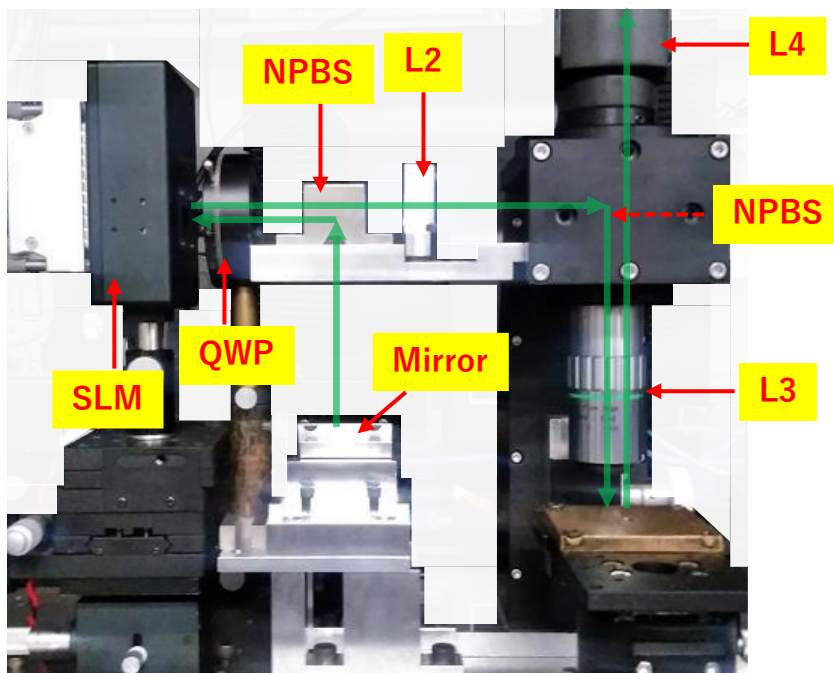
測定装置のレンズとして、L1 に焦点距離 30 mm の正レンズ、L2 に焦点距離 100 mm の正レンズ、L3 は焦点距離 20 mm のミットヨ社の対物レンズ「M-PLAN APO 10X」、L4 に焦点距離 200 mm のミットヨ社の結像レンズを使用した。L1 の焦点距離は、コリメート光が SLM の有効領域にマッチするように決められ、L2 の焦点距離は SLM とレンズの距離で光をコリメートするように決められる。L3 と L4 の焦点距離はサンプル位置の視野から決められ、視野とイメージサイズの比は L3 と L4 の焦点距離の比に等しい。本システムの F ナンバーはおおよそ $f/15$ である。

照明光学系(L2 & L3)と撮影光学系(L3 & L4)のフォーカス位置を合わせる必要があるため、SLM の位置の調整方法のフローチャートを図 3.2 に示す。測定サンプルの形状が既知の場合、測定精度向上のため照明光学系のフォーカス位置を多少ずらしても良い。本測定装置の測定手順のフローチャートを図 3.3 に示す。

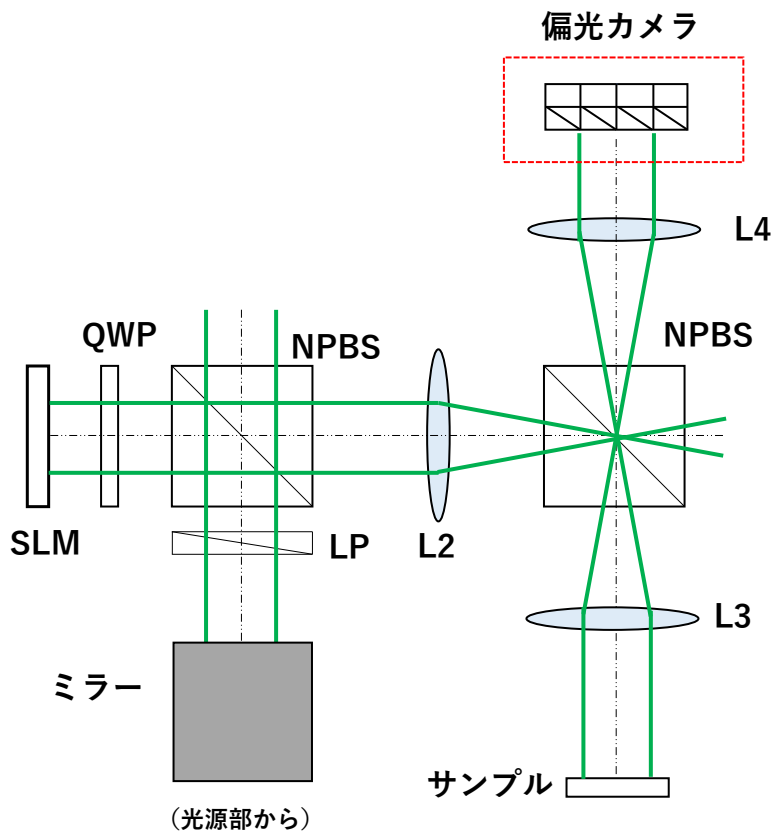
(a)



(b)



(c) 測定装置の光学配置 (側面図)



(d) 光源部の光学配置 (上面図)

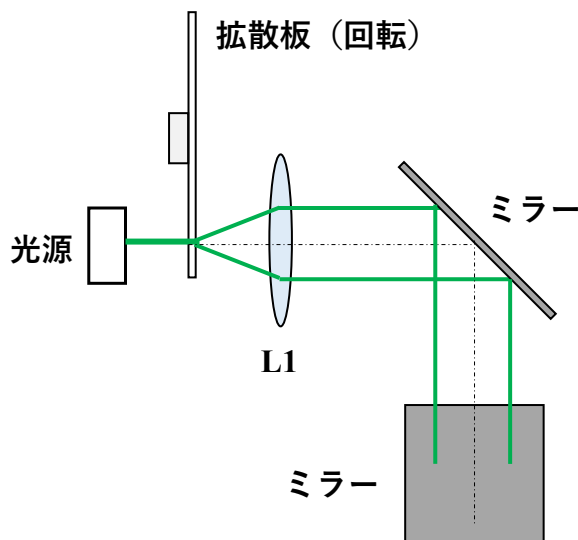


図 3.1 (a)測定装置外観 (上面) (b)測定装置外観 (側面) (c)測定装置の光学配置 (側面図)
(d)光源部の光学配置 (上面図)

SLMの位置の調整方法

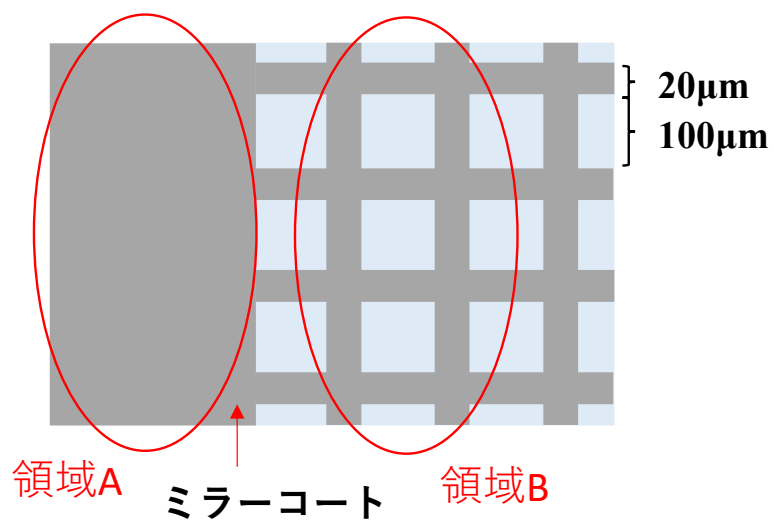
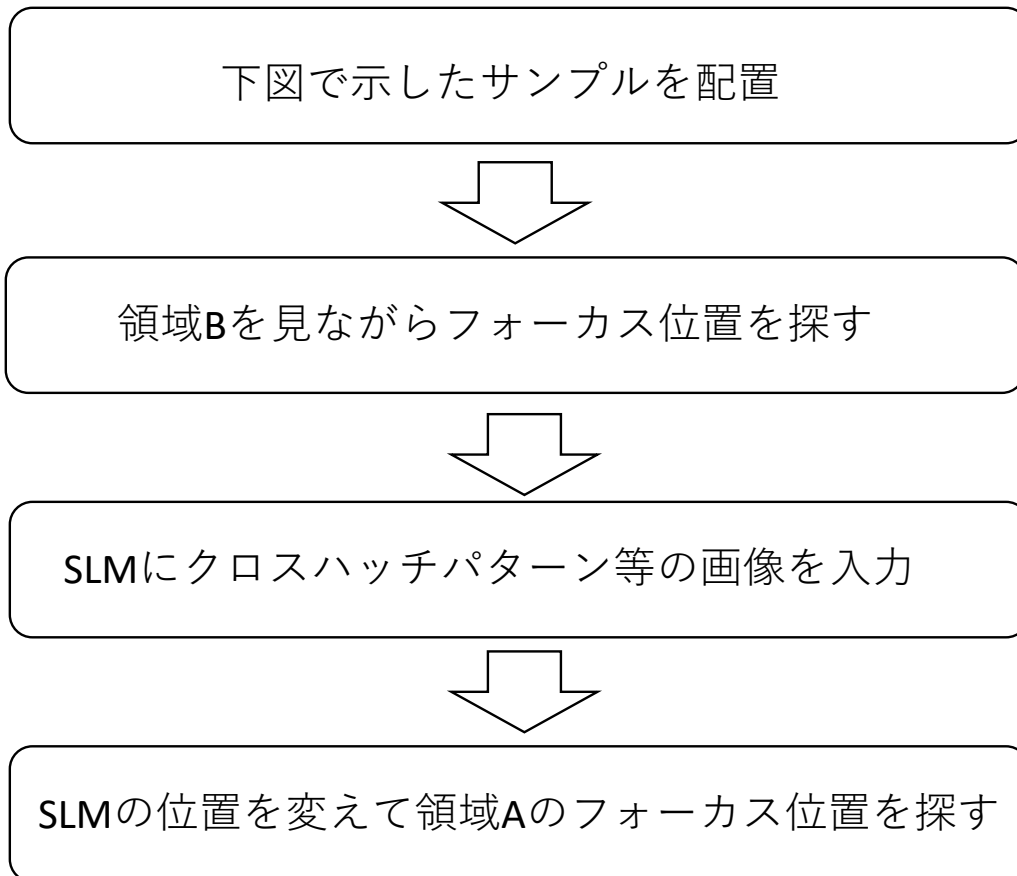


図 3.2 SLM の位置の調整方法のフローチャート

測定手順

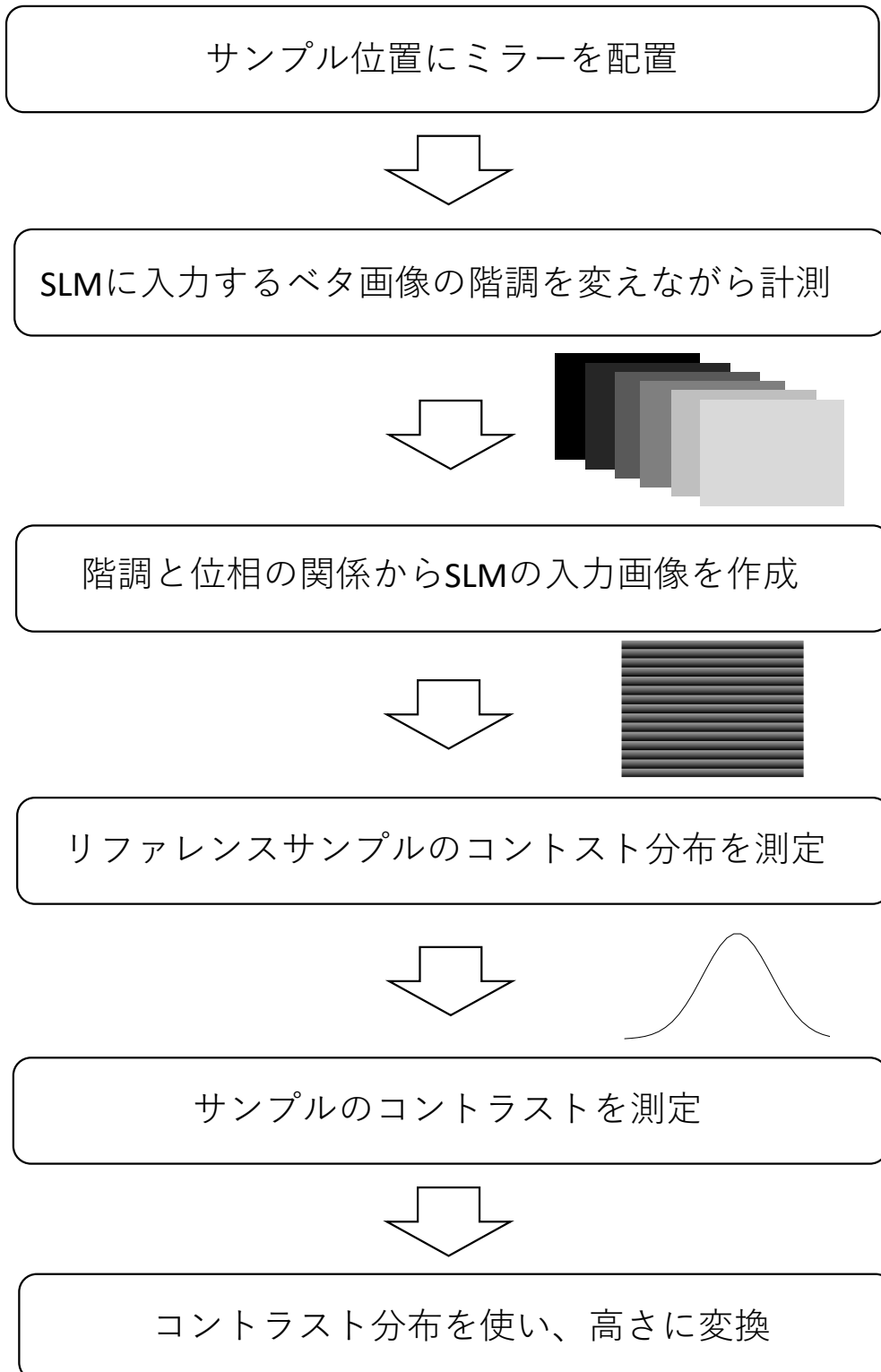
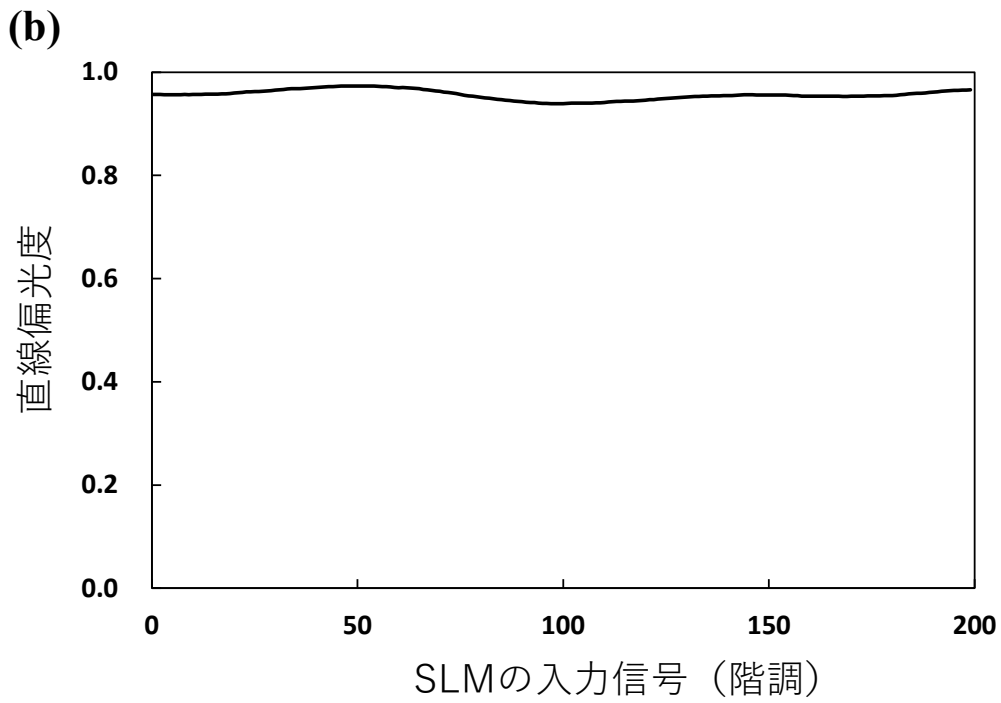
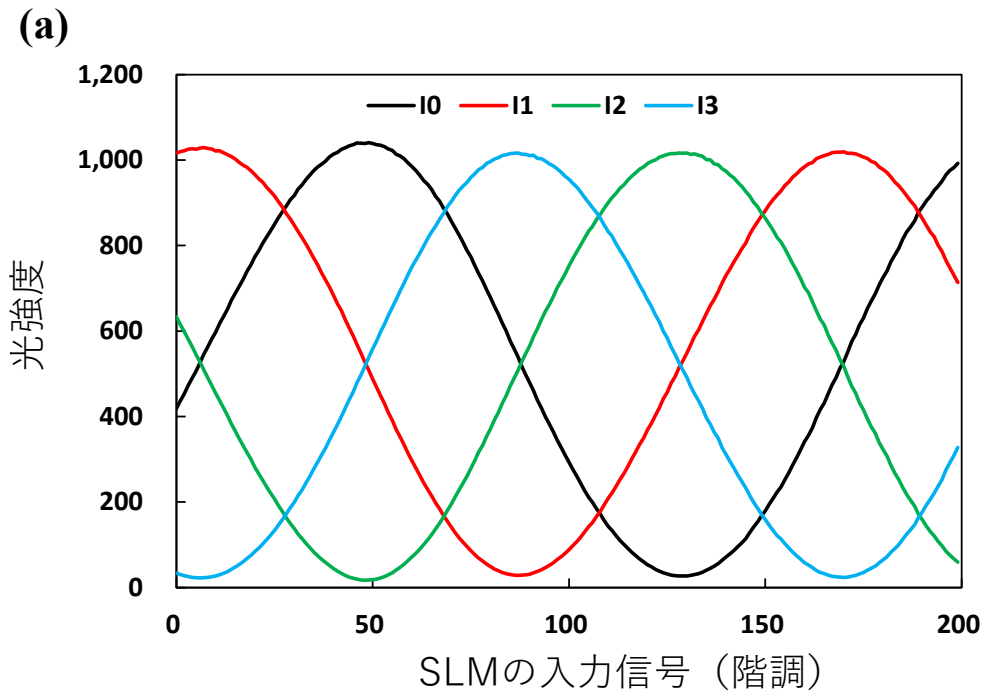


図 3.3 測定手順のフローチャート

3.3 直線偏光パターン照明光

まず、測定装置の性能を評価するために、サンプル位置にミラー（リファレンスサンプル）を配置して、SLM への入力画像として、全画素同じ階調のグレーの画像を 0～199 階調（最大 255 階調）まで 1 階調刻みで SLM に入力しながら（SLM のリターダンスを変えながら）、偏光カメラで光強度を測定した。その結果を図 3.4(a)に示す。図 3.4(a)から計算された直線偏光度の結果を図 3.4(b)、直線偏光の方位角を図 3.5(c)に示す。図 3.4(b)から、SLM の入力信号（階調）に対して、94%以上の直線偏光度であることが確認された。また、図 3.4(c)から、SLM の入力信号（階調）に対して、直線偏光の方位角が略線形に変化していることが確認された。図 3.4(b)で直線偏光度が一定になっていない理由は、NPBS のリターダンスの影響であると考えられる。

次に、直線偏光パターン照明光を生成して、ミラーからの反射光を偏光カメラで測定した。図 3.5 に SLM に入力した画像を示す。図 3.6 に偏光カメラで測定された各偏光子の強度を示す。図 3.7 に偏光カメラで測定された位相マップ（式 2.36 を参照）を示す。図 3.6 と図 3.7 の結果から位相がシフトした縞パターンが得られていることが確認された。参考までに、直線偏光パターン照明光を一般のカメラで撮影した結果を図 3.8 に示す。偏光子を介して撮影すると縞パターンが得られる。



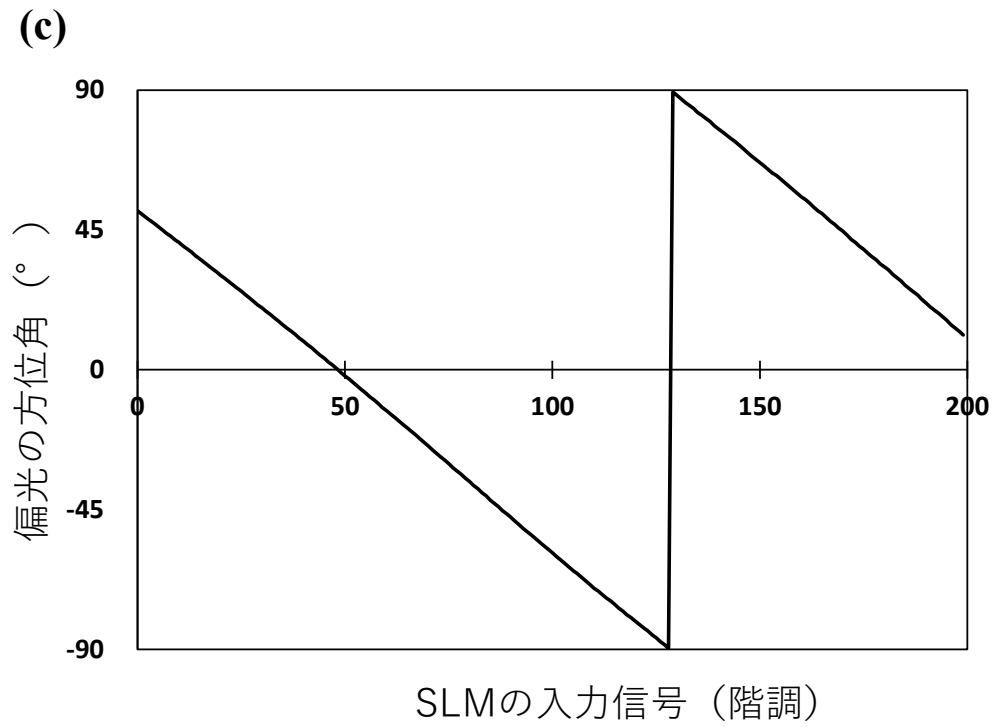
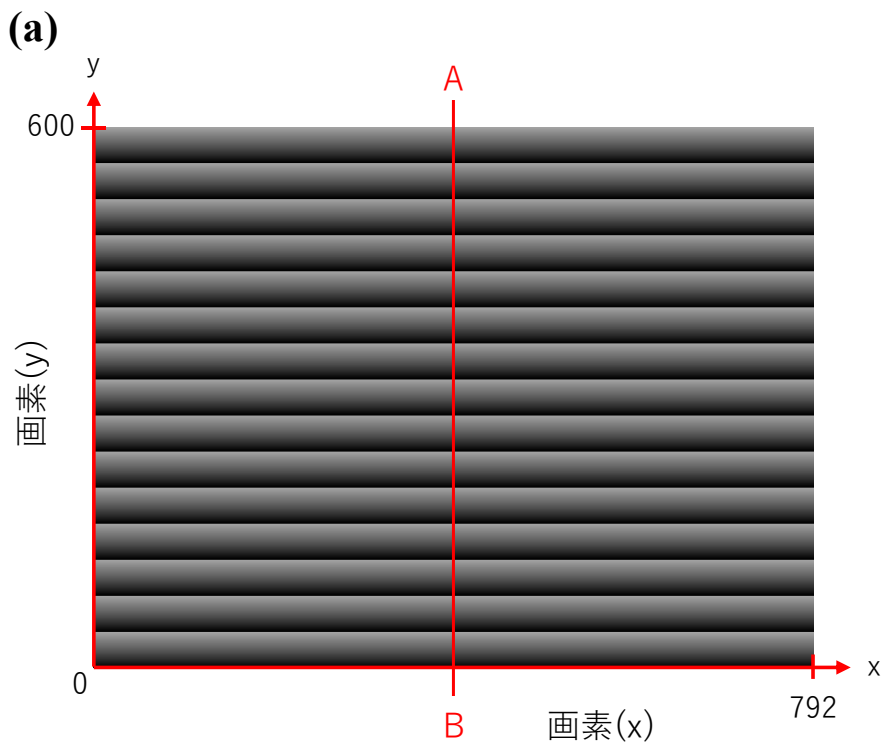


図 3.4 (a) 階調に対する各偏光の光強度。 I_0, I_1, I_2, I_3 は、 $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$ の偏光子の光強度。 (b) 階調に対する直線偏光度 (c) 階調に対する検出される偏光の方位角



(b)

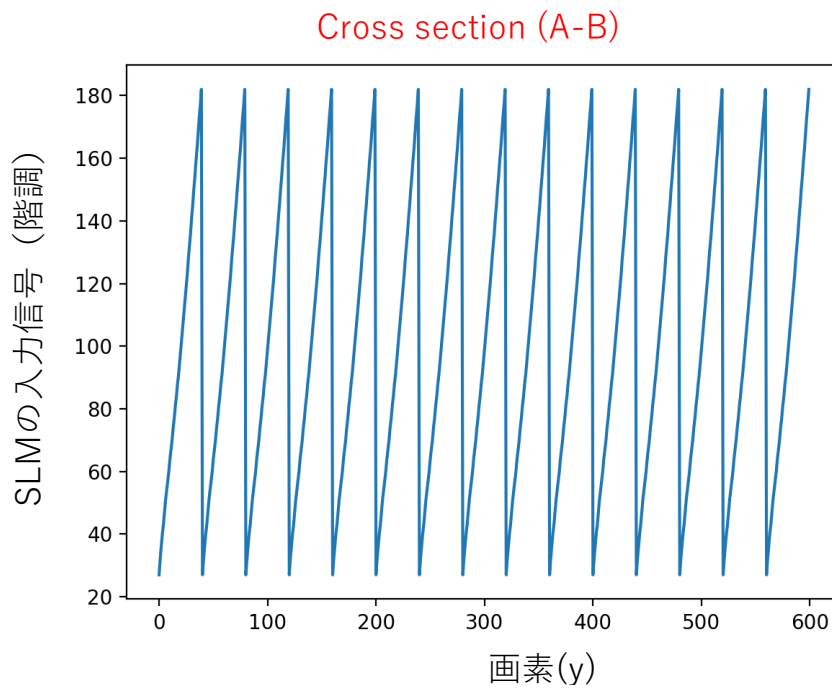
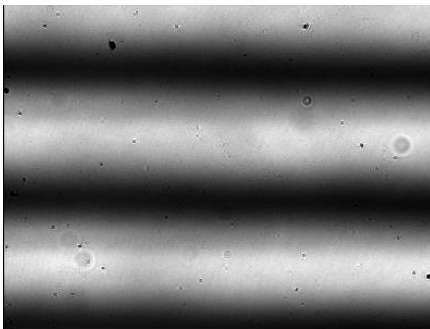
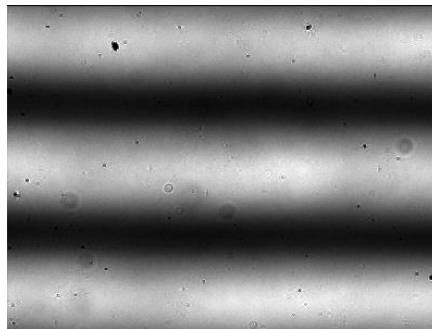


図 3.5 (a) SLM に入力した画像 (b) Cross section (A-B) の SLM の階調

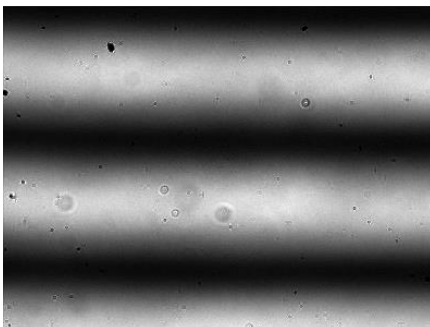
(a) I_0



(b) I_{45}



(c) I_{90}



(d) I_{135}

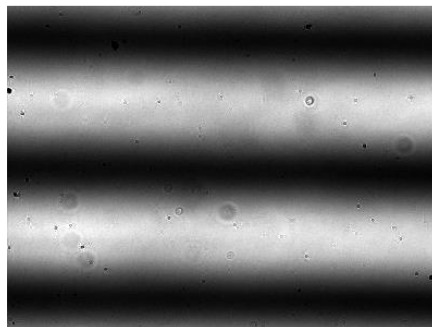


図 3.6 偏光子の角度 (a) 0° , (b) 45° , (c) 90° , (d) 135° の画像

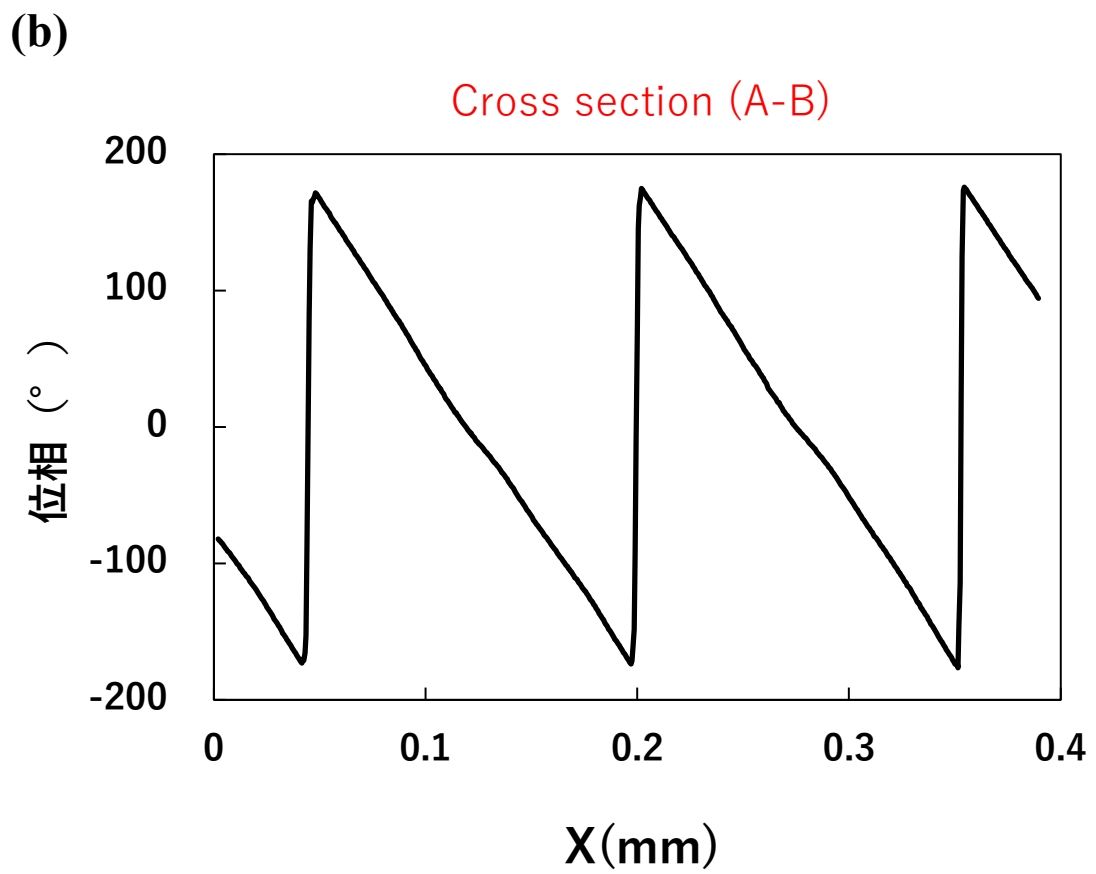
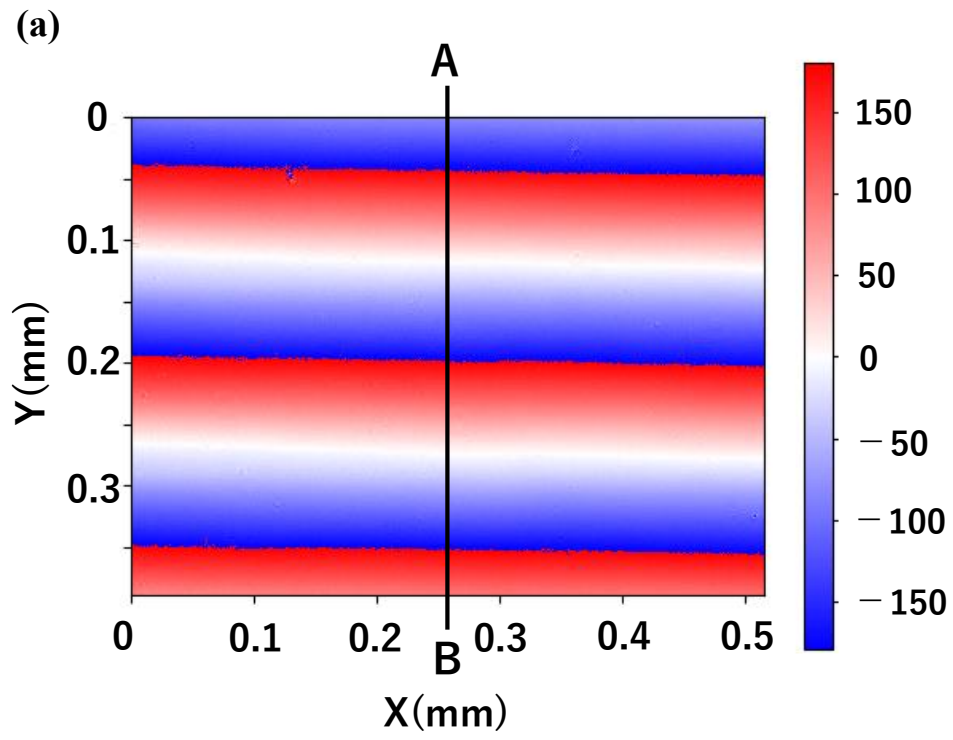


図 3.7 (a) 偏光カメラで測定された位相マップ (b) 位相マップの断面図

(a)



(b)



図 3.8 (a) カメラで撮影した投影像. (b) 偏光板を介してカメラで撮影した投影像.

3.4 コントラスト分布の測定結果

3.4.1 ミラーのコントラスト分布

サンプル位置にリファレンスサンプルとしてミラーを配置して、高さを変えながらコントラストを測定した結果を図 3.9 に示す。SLM の入力画像は、図 3.5 に示した画像を用いた。コントラスト分布のピークサンプル高さが正の領域またはサンプル高さが負の領域を使うことで、コントラスト傾斜による方法 (2.2.3 参照) で三次元計測が可能である。測定高さとサンプル高さの関係を図 3.10(a) に示す。繰り返し精度を確認するため、撮影された画像の中心かつ高さ 0.5 mm の位置で 30 回測定した結果を図 3.10(b) に示す。本研究では、誤差の少ないサンプル高さ 0.3 mm から 1.8 mm の範囲を用いて三次元測定を行った。従って、システムの深度範囲は 1.5 mm で、高さ方向の解像力 (the number of resolvable elements) は、 $1.8 \text{ mm} / 0.005 \text{ mm} = 360$ である。

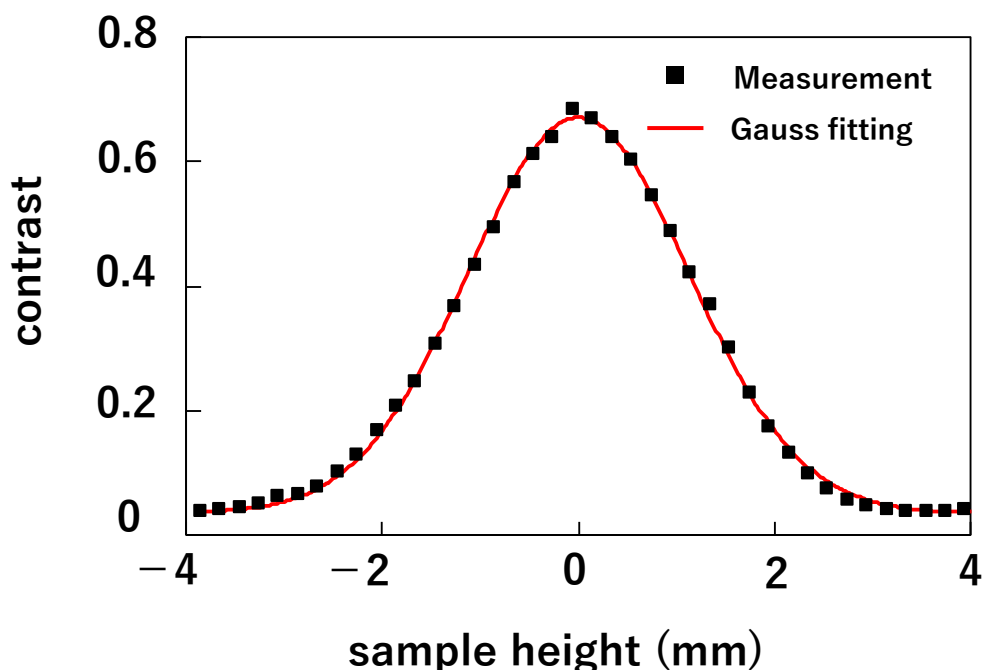


図 3.9 コントラスト分布の測定結果

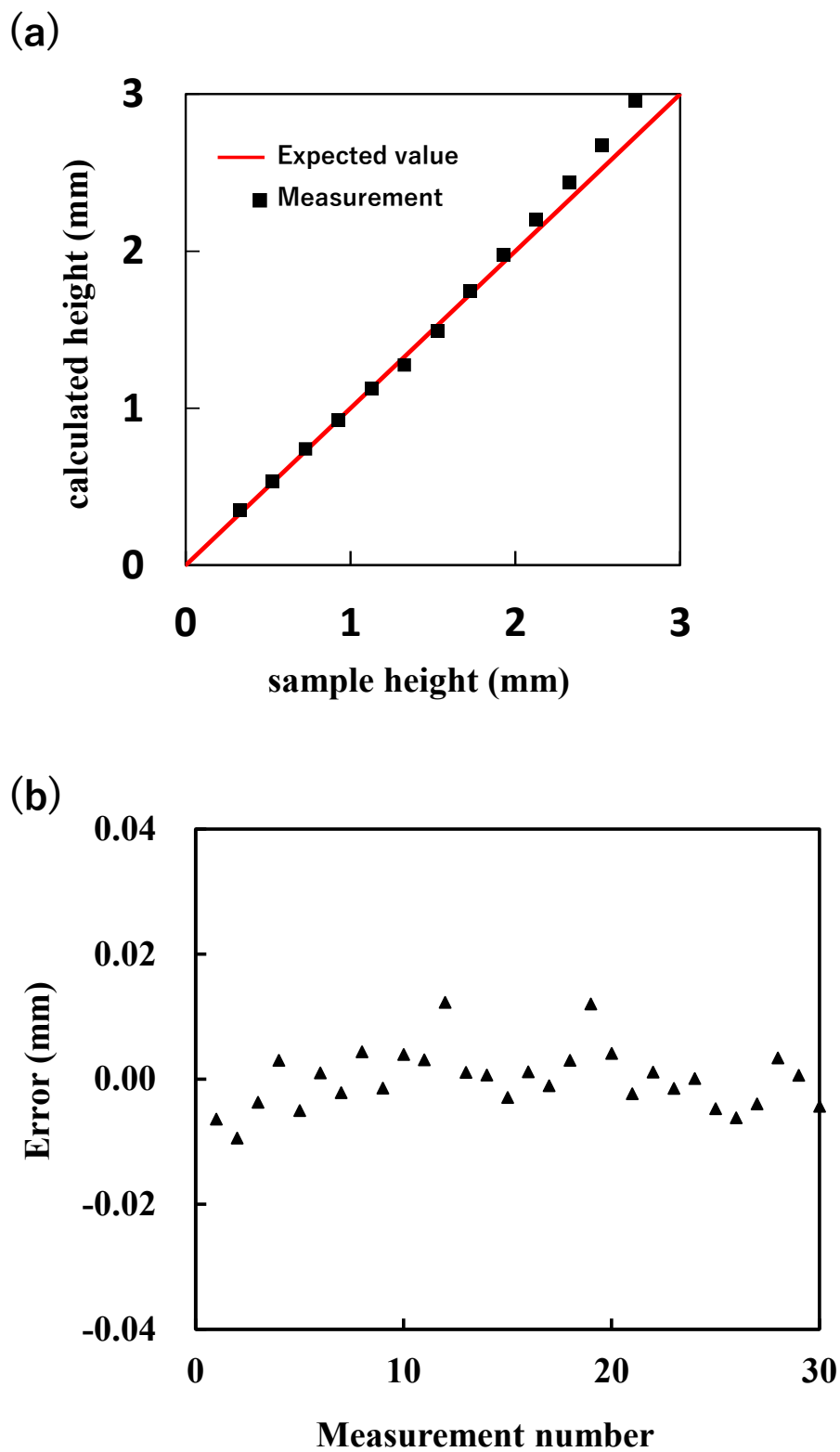


図 3.10 (a) サンプル高さとガウス関数でフィッティングした高さの関係 (b) 高さ 1.0mm で誤差を 30 回繰り返し測定した結果

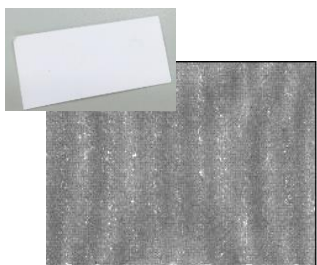
3.4.2 表面の違いによるコントラスト分布

同じ測定条件で測定物の表面の違いによるコントラスト分布への影響を確認するために、ミラー、アルミニウム、セラミック、紙の4種類のコントラスト分布を測定した。サンプルの写真およびコントラスト分布の測定結果を図 3.11 に示す。散乱のないミラーでは高いコントラストが得られているが、散乱の多い紙ではコントラストが大きく低下している。この理由は、散乱により直線偏光パターン照明光の偏光度が低下しているためである。図 3.11(a)の縞パターンから分かるように、ミラーの縞パターンの明暗がはっきりしているが、紙の縞パターンの明暗があまりない。

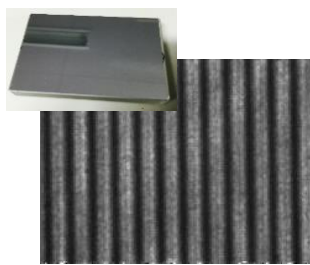
従って、本手法ではコントラストから高さに変換するため、言い換えれば、コントラストから表面の違いを検出することができないため、測定物に異なる表面（例えば、鏡面と粗面）があると計測できない。しかしながら、コントラストのピーク位置は測定物の表面に依存しないため、ピーク検出による三次元計測は可能である。

(a)

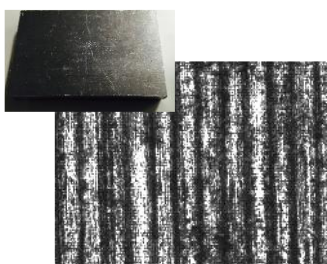
Paper



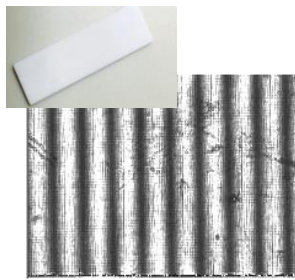
Mirror



Aluminium



Ceramics



(b)

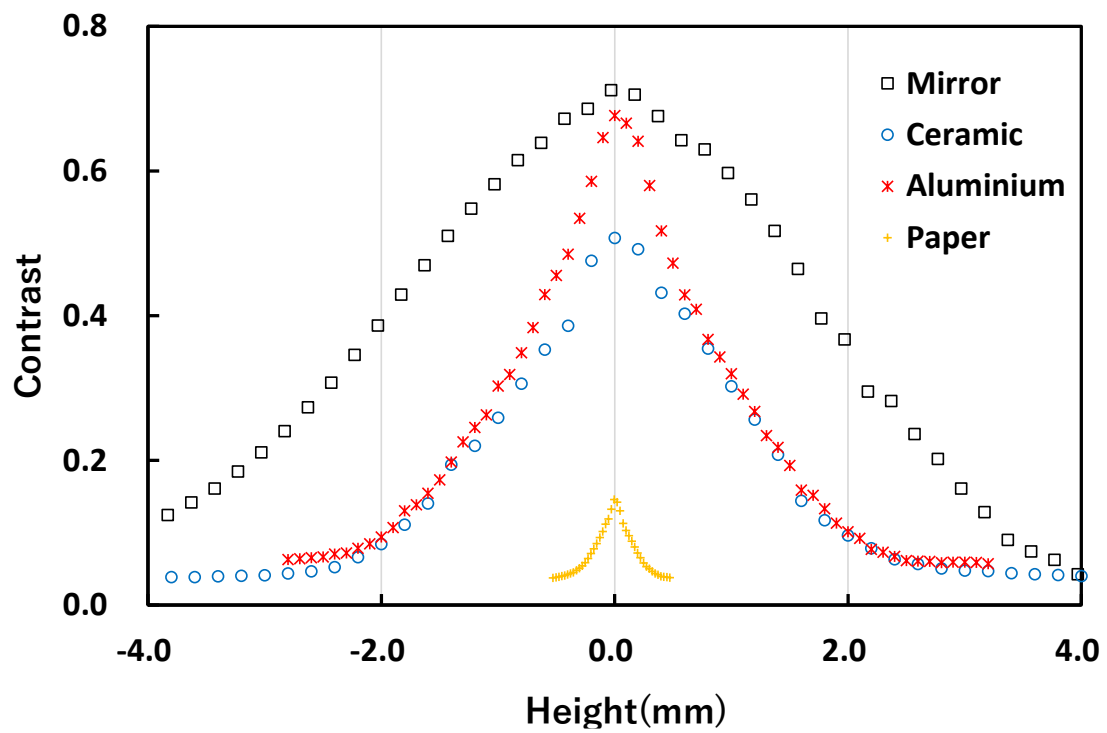


図 3.11 (a) サンプルの写真と縞パターンの様子 (b)コントラスト分布

3.5 三次元計測の結果

図 3.12 に示す厚さ 1.0 mm のミラー 2 枚で構成されるステップサンプルを用いて、リアルタイム三次元計測を実施した。ステップサンプルをマイクロステージで x 方向に動かしながら三次元計測した結果を図 3.13 に示す。リファレンスサンプルのコントラスト分布は、図 3.9 に示したガウスフィッティングしたコントラスト分布を用いた。偏光カメラのフレームレートは 30 fps である。この結果からサンプルの動いている様子が確認できるため、リアルタイム計測できていることが確認できた。図 3.13 の測定結果から、本システムは、高い段差を有するサンプルのリアルタイム計測に有効である。

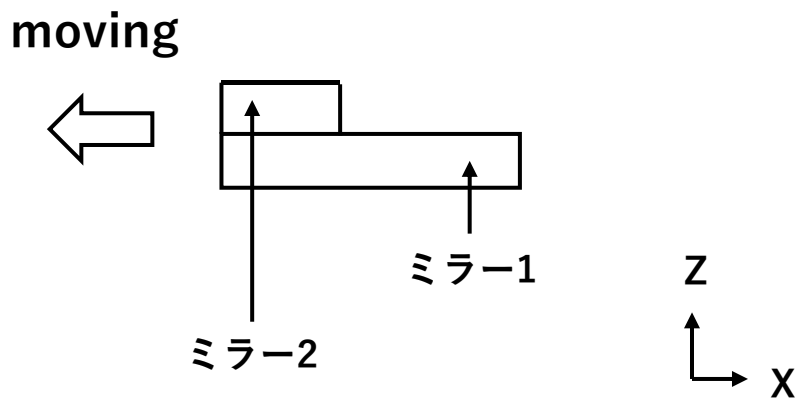
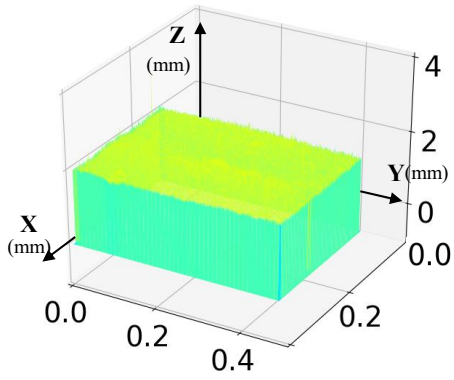
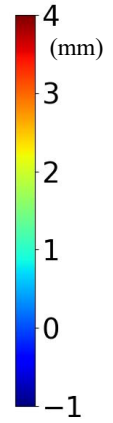
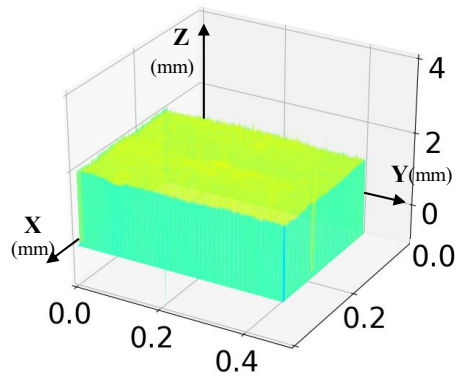


図 3.12 ステップサンプルの構成

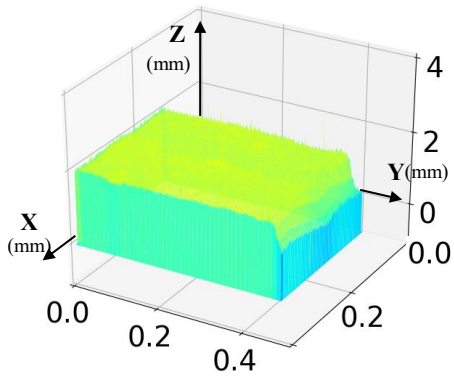
0 ms



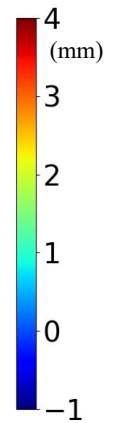
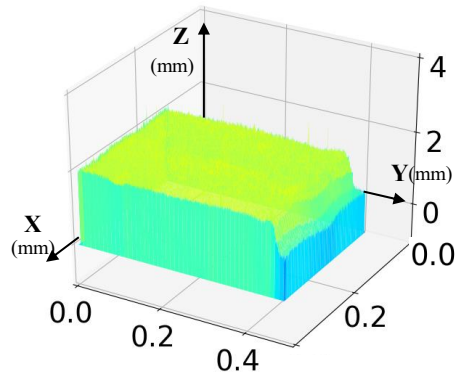
33 ms



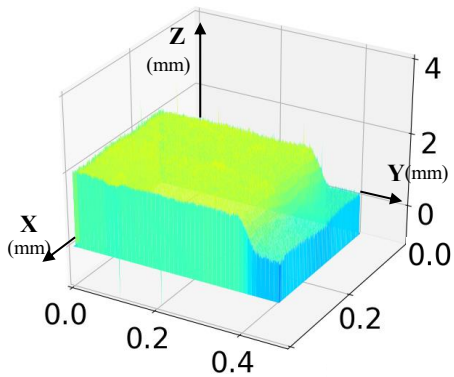
67 ms



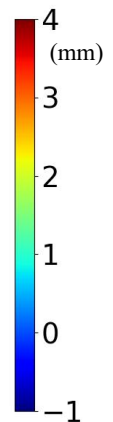
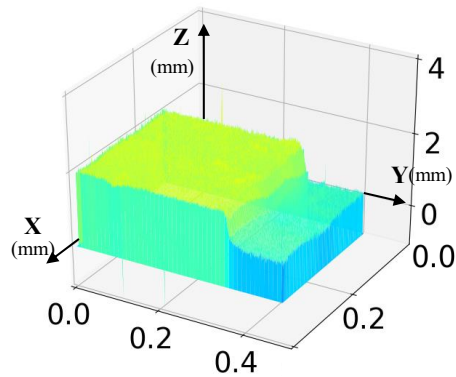
100 ms



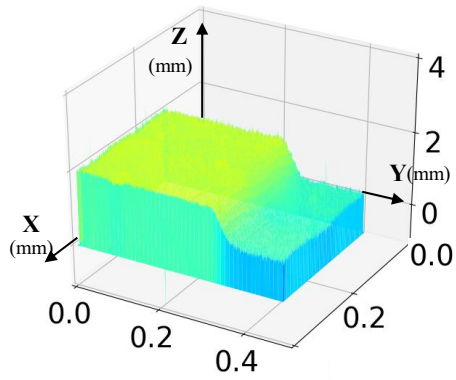
133 ms



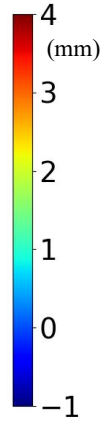
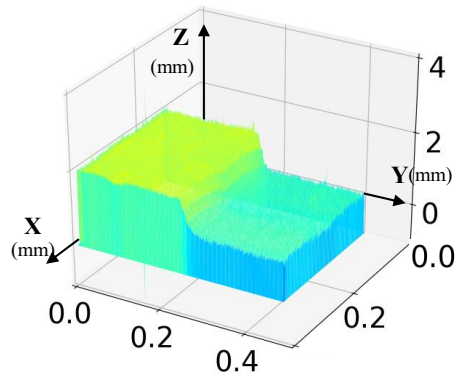
167 ms



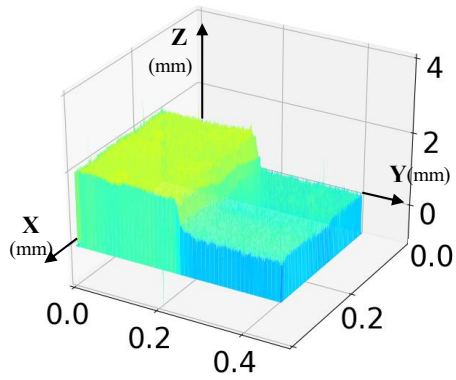
200 ms



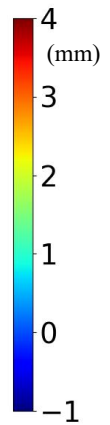
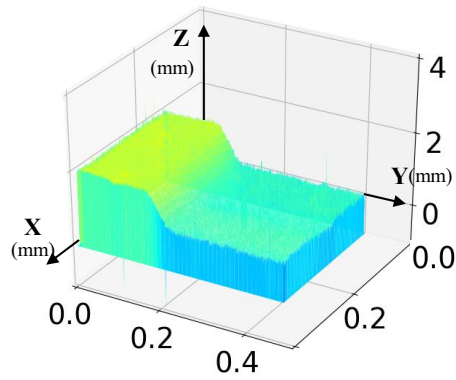
233 ms



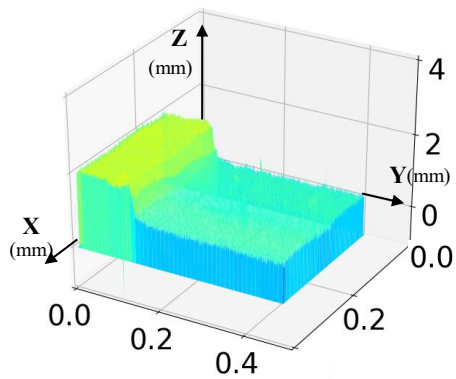
267 ms



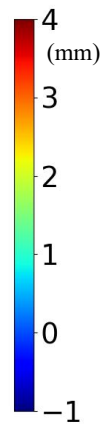
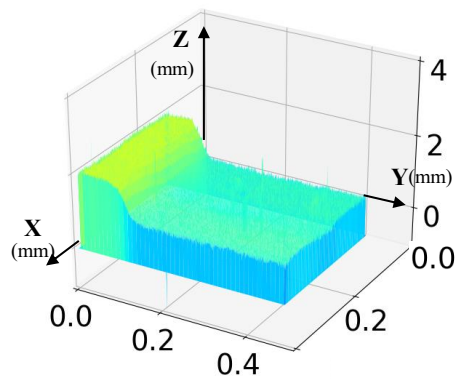
300 ms



333 ms



367 ms



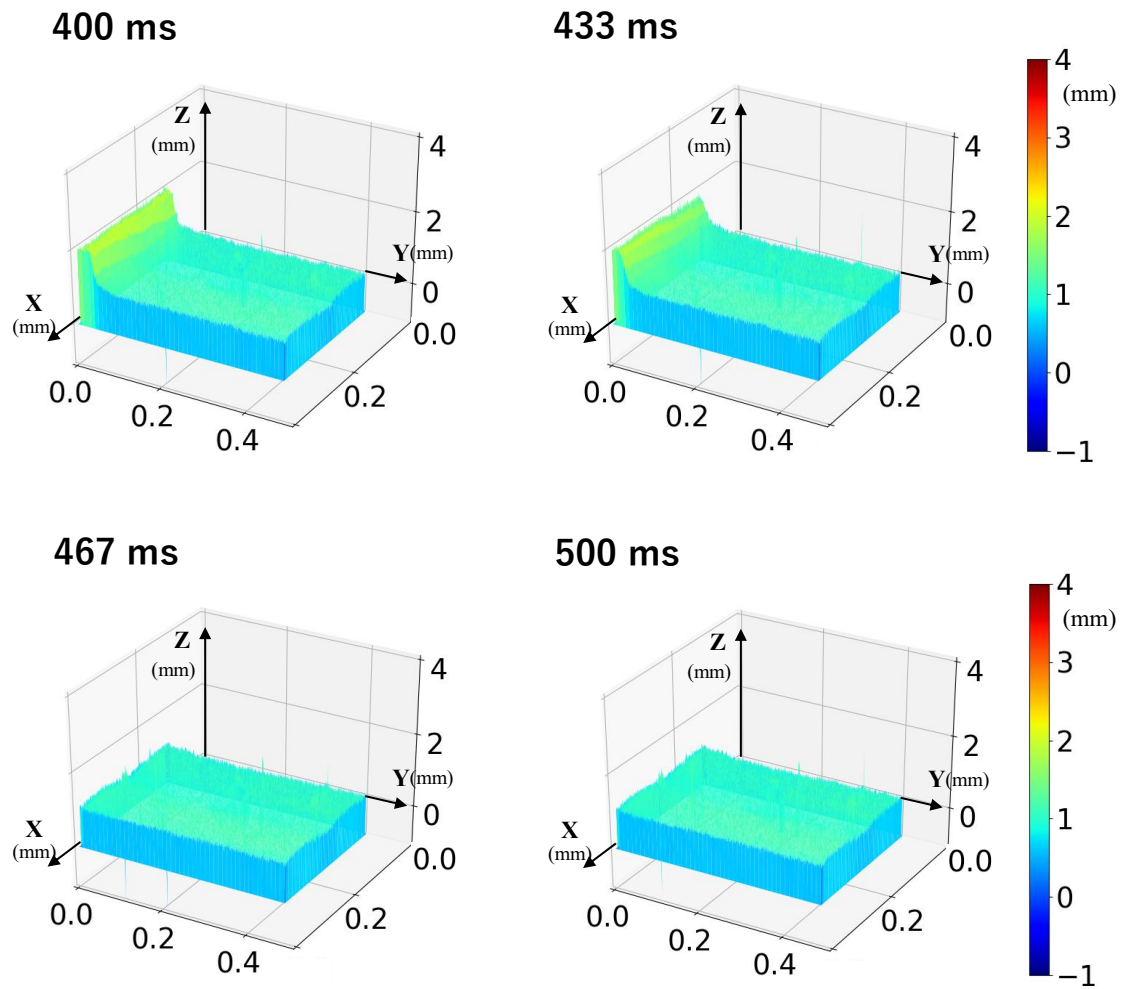


図 3.13 リアルタイム測定の結果

3.6 まとめ

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直線偏光パターンを測定物に投影させ、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、図 3.8 が示すように、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が、偏光カメラでは格子パターンを観察することが可能である。次に、コントラスト傾斜による手法を用いてコントラストから三次元座標に変換した。最後に、ステップサンプル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 30 fps）が可能であると示した。

本システムは、アーティファクトを発生させることなく測定が可能であり、空間的に均一な偏光特性を持つサンプルに対して有効であり、ステレオ投影システムで測定が難しい高い段差や深い穴を持つサンプルの測定に有利である。

本システムは、ミリメートルオーダーの高さの変動があるサンプルに適しているが、より大きな投影光学系を使用してより大きな高さに、またはより高い開口数の対物レンズを使用してより小さな高さに調整することができる。ただし、本システムの課題は、コントラストが偏光解消に依存するため、偏光解消が異なる材料で構成されるサンプルを測定できないことである。

第4章 偏光度による形状計測

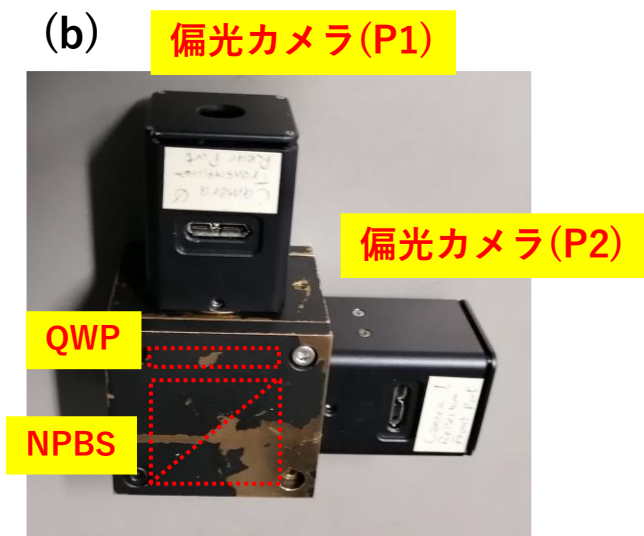
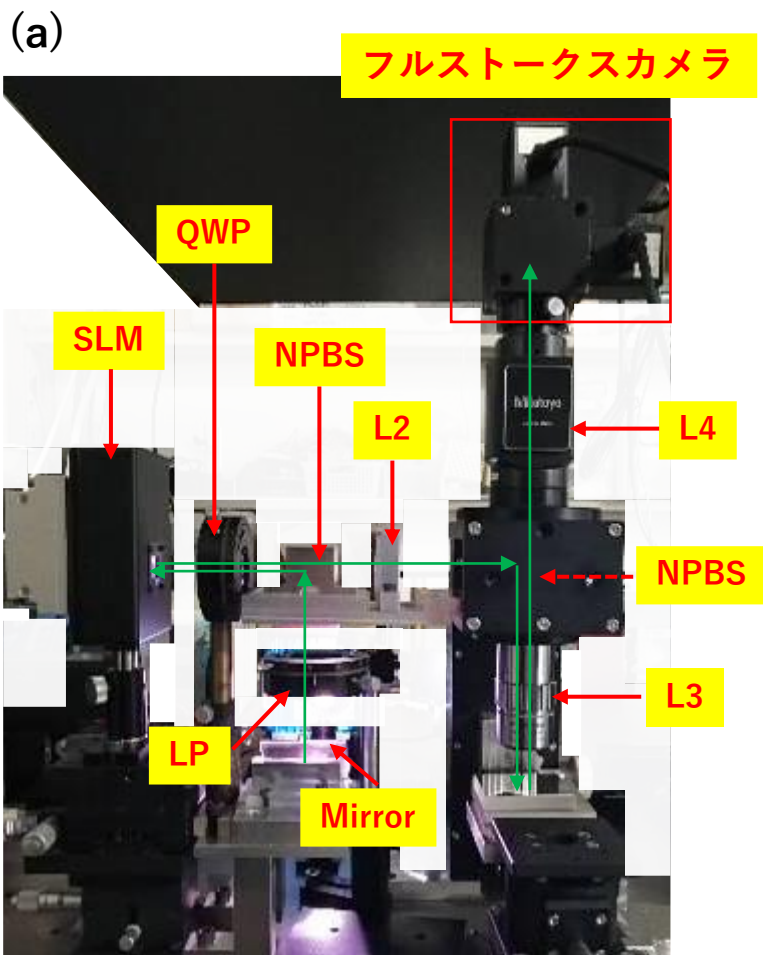
4.1 はじめに

非接触・非破壊で三次元計測するためには、測定物が保護された環境で測定することが求められている。例えば、保護フィルム付きのサンプルやアクリルケースに納められた製品などである。第3章でスナップショットによる三次元計測が可能であることを示した。しかしながら、偏光パターンの位相を変化させる位相素子がある場合には測定物の形状を正確に測定できないという課題があった。そのため、測定物を汚すことなく安全に測定することが困難であった。

これらの課題に対応するために、2台の偏光カメラで構成されるフルストークスカメラを採用した。[65]このシステムは、照明系と測定中のサンプルの間の複屈折層を補正することができるため、偏光パターンの位相変化を補正することができる。以下に、このシステムの測定装置および測定物のリアルタイム測定結果を示す。

4.2 測定装置

測定装置および光学レイアウトを図4.1に示す。本測定装置の撮影系は、偏光カメラの代わりに採用したフルストークスカメラである。フルストークスカメラは、無偏光ビームスプリッタ (NPBS)、 $\lambda/4$ 波長板 (QWP)、第1の偏光カメラ (P1)、第2の偏光カメラ (P2) から構成される。QWPの進相軸 (first axis) は 45° である。偏光カメラには、ソニー社の偏光カメラ (画素数 2064×1560 、ピクセルサイズ $2.5\mu\text{m}$) を2台使用した。撮影系以外は、第3章で説明した測定装置と同じ光学構成である。本測定装置を使った測定では、直線偏光パターン照明光の位相変化が補償できることを示すために、測定物をアクリルシャーレ内に入れて、三次元計測を実施した。



(c)

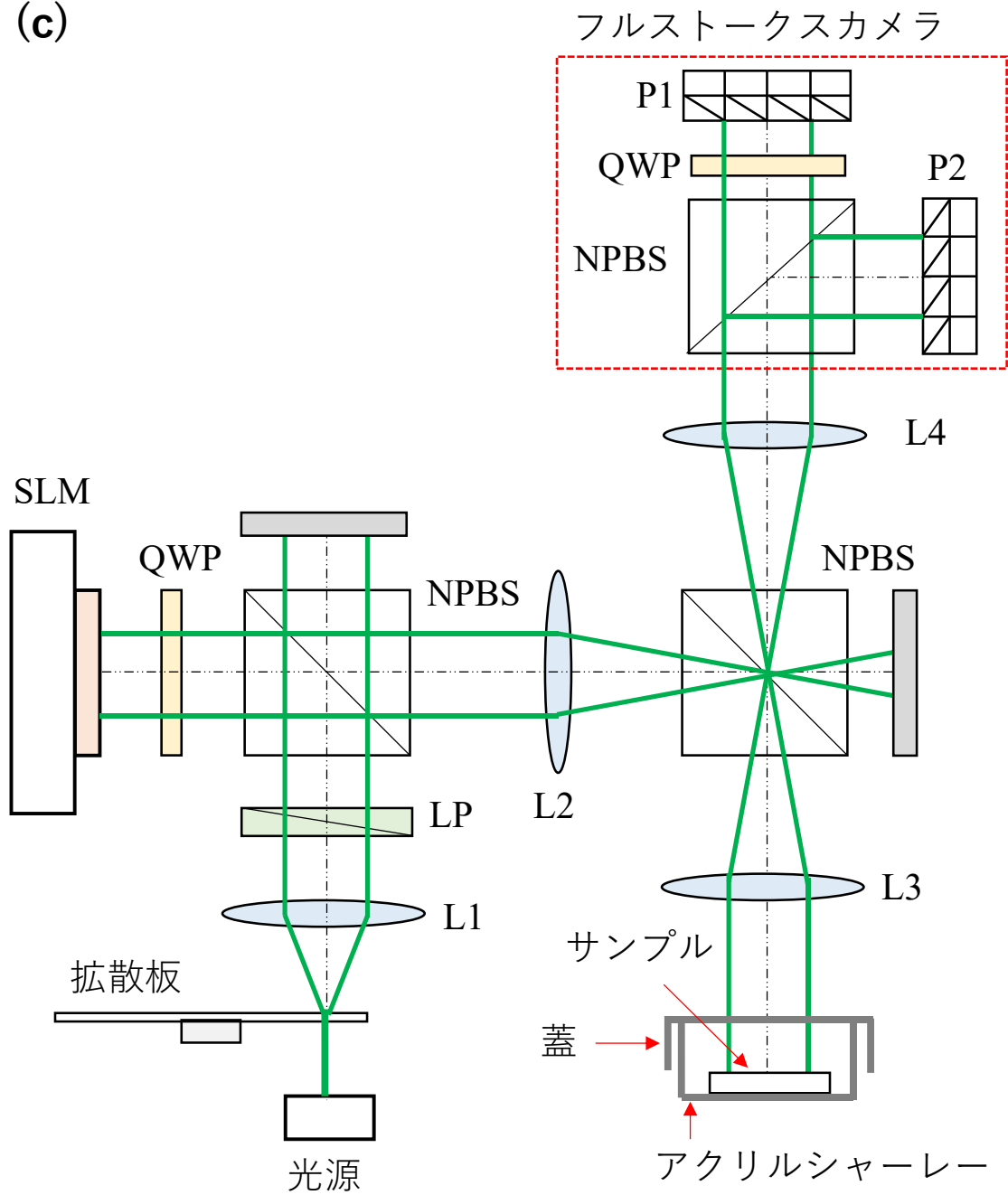


図 4.1 (a) 測定装置外観 (b) フルストークスカメラ外観 (c) 測定装置の光学配置図

4.3 フルストークスカメラの位相補償

本測定装置に採用したフルストークスカメラの NPBS は白色用のビームスプリッタであるため、多少なりとも位相変化が生じる。従って、高い精度で偏光計測するためには位相補償する必要がある。透過および反射の吸収率性 (diattenuation) を D_T および D_R 、透過および反射のリターダンス (retardance) を δ_T および δ_R とすると、補正されたストークスパラメータ s は次のように書ける。

$$s = \begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} = \frac{1}{16} \begin{bmatrix} a_{00} & a_{01} & a_{02} & a_{03} & a_{04} & a_{05} & a_{06} & a_{07} \\ a_{10} & a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} & a_{15} & a_{16} & a_{17} \\ a_{20} & a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} & a_{25} & a_{26} & a_{27} \\ a_{30} & a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} & a_{35} & a_{36} & a_{37} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 \\ I_6 \\ I_7 \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

$$a_{00} = -3D_R - D_T + 2$$

$$a_{01} = a_{03} = a_{05} = a_{07} = 2$$

$$a_{02} = 3D_R + D_T + 2$$

$$a_{04} = -D_R - 3D_T + 2$$

$$a_{06} = D_R + 3D_T + 2$$

$$a_{10} = -3D_R + D_T + 4$$

$$a_{11} = a_{13} = -3D_R + D_T$$

$$a_{12} = -3D_R + D_T - 4$$

$$a_{14} = D_R - 3D_T + 4$$

$$a_{15} = a_{17} = D_R - 3D_T$$

$$a_{16} = D_R - 3D_T - 4$$

$$a_{20} = a_{22} = a_{24} = a_{26} = a_{30} = a_{32} = a_{34} = a_{36} = 0$$

$$a_{21} = -a_{23} = -\frac{8 \sin \delta_R}{(D_T - 1) \sin(\delta_R - \delta_T)}$$

$$a_{25} = -a_{27} = -\frac{8 \sin \delta_T}{(D_T - 1) \sin(\delta_R - \delta_T)}$$

$$a_{31} = -a_{33} = \frac{8 \cos \delta_R}{(D_T - 1) \sin(\delta_R - \delta_T)}$$

$$a_{35} = -a_{37} = \frac{8 \cos \delta_T}{(D_T - 1) \sin(\delta_R - \delta_T)}$$

$$D_T = \frac{I_{0^\circ L0} - I_{90^\circ L2}}{I_{0^\circ L0} + I_{90^\circ L2}}$$

$$D_R = \frac{I_{0^\circ L4} - I_{90^\circ L6}}{I_{0^\circ L4} + I_{90^\circ L6}}$$

$$\delta_T = \tan^{-1} \frac{(I_{RC1} - I_{RC3})(I_{45^\circ L1} + I_{45^\circ L3})}{(I_{RC1} + I_{RC3})(I_{45^\circ L1} - I_{45^\circ L3})}$$

$$\delta_R = \tan^{-1} \frac{(I_{RC5} - I_{RC7})(I_{45^\circ L5} + I_{45^\circ L7})}{(I_{RC5} + I_{RC7})(I_{45^\circ L5} - I_{45^\circ L7})}$$

ここで、 D_T と D_R は十分に小さい ($D_T^2 \approx 0, D_R^2 \approx 0$) と仮定している。 I_{AB} は、偏光カメラの強度を表し、添え字 A はフルストークスカメラに入射させる偏光状態を表し、 $0^\circ L$ は 0° 方向（水平方向）の直線偏光、 $90^\circ L$ は 90° 方向（垂直方向）の直線偏光、 $45^\circ L$ は 45° 方向（水平方向）の直線偏光、 RC は右回り円偏光を表す。マイクロ偏光子の方位角($0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$)に対応した第1の偏光カメラ (P1) の4つの偏光画像を($I_{A0}, I_{A1}, I_{A2}, I_{A3}$)とし、第2の偏光カメラ (P2) の4つの偏光画像を($I_{A4}, I_{A5}, I_{A6}, I_{A7}$)としている。前述の直線偏光および円偏光をフルストークスカメラに入射させる測定系の光学配置図を図 4.2 に示す。これらのパラメータの測定結果を以下に示す。

$$D_T = 0.00$$

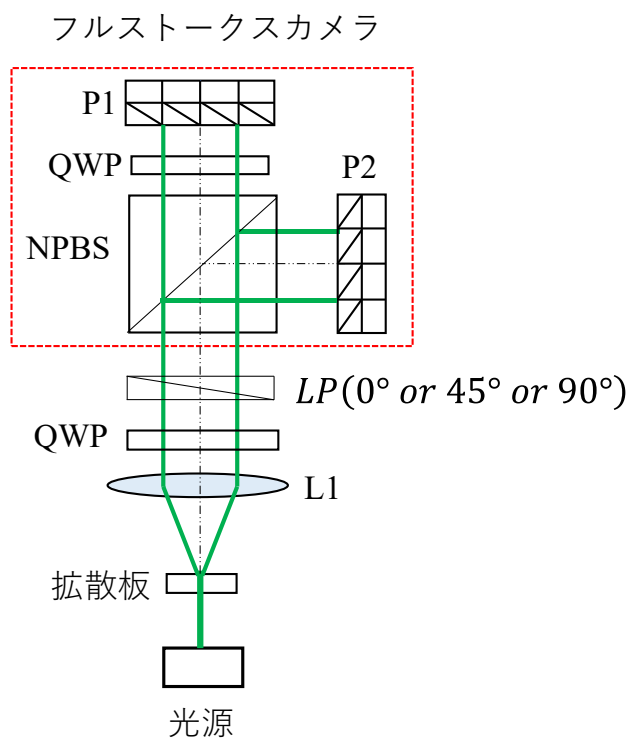
$$D_R = 0.00$$

$$\delta_T = 94.8^\circ$$

$$\delta_R = -4.35^\circ$$

アクリルシャーレー内にミラーを配置して、直線偏光パターン照明光をフルストークスカメラで撮影した結果を図 4.3 に示す。位相補償することで DOP の面内分布がほぼフラットになっている。

(a)



(b)

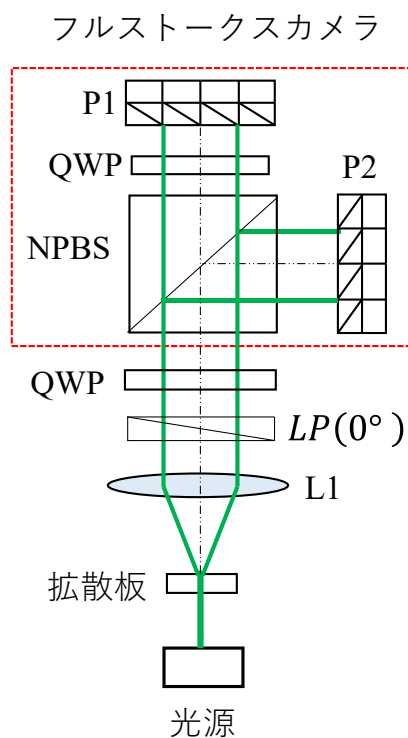
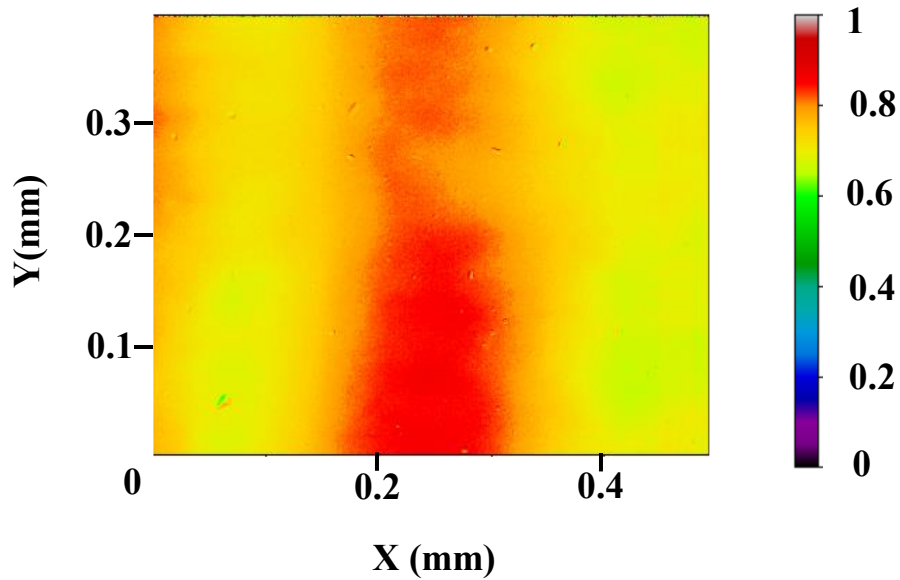


図 4.2 (a) 直線偏光をフルストークスカメラに入射させる測定系 (b) 円偏光をフルストークスカメラに入射させる測定系

(a)



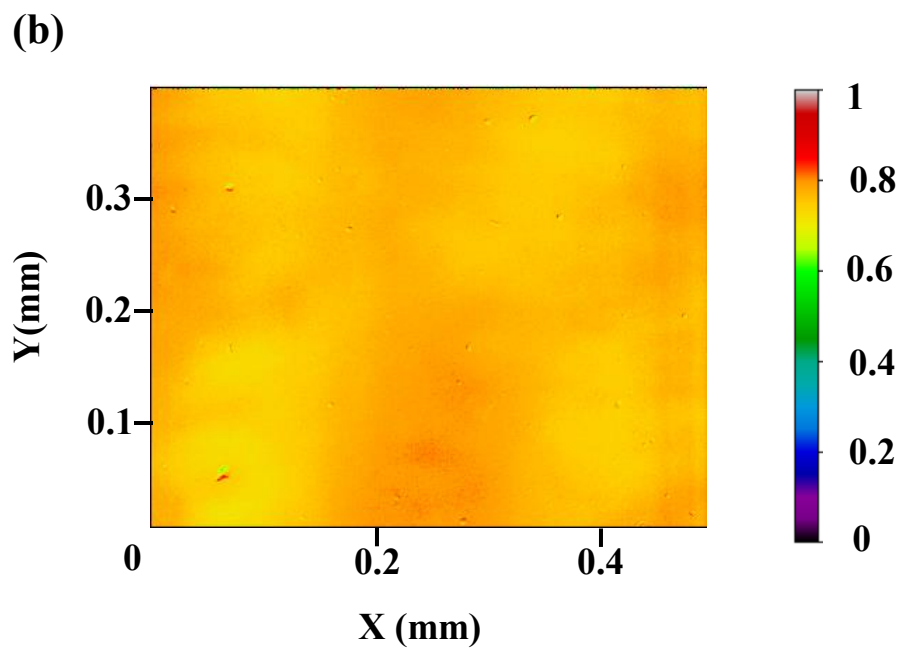


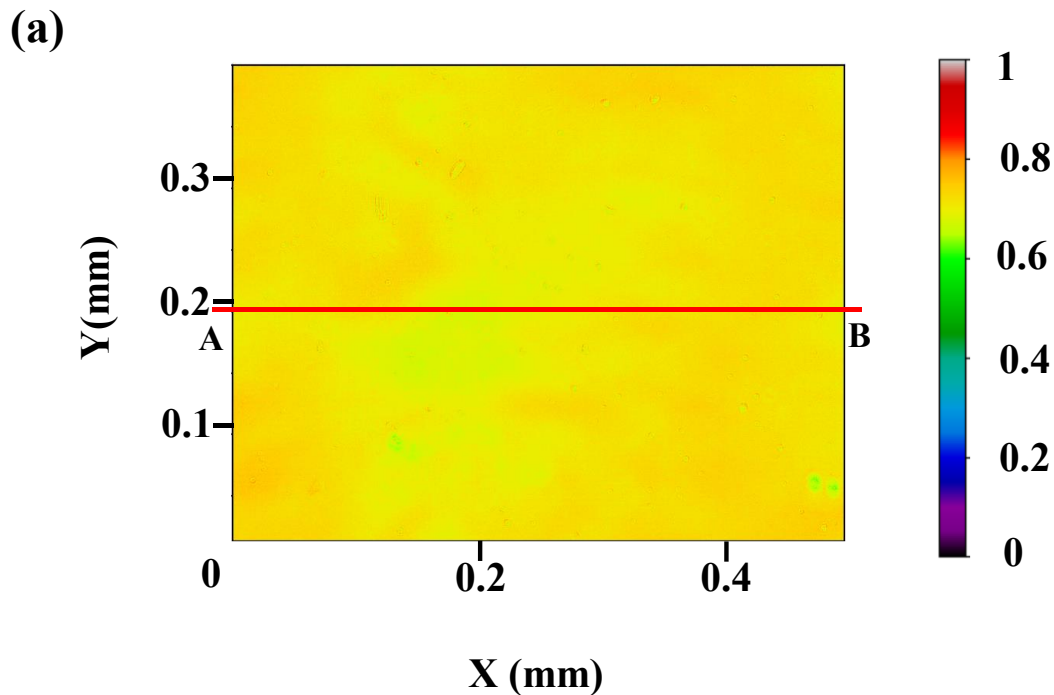
図 4.3 (a) 位相補償なし(式 2.41)の DOP 分布 (b) 位相補償あり(式 4.1)の DOP 分布

4.4 平面サンプルの三次元計測

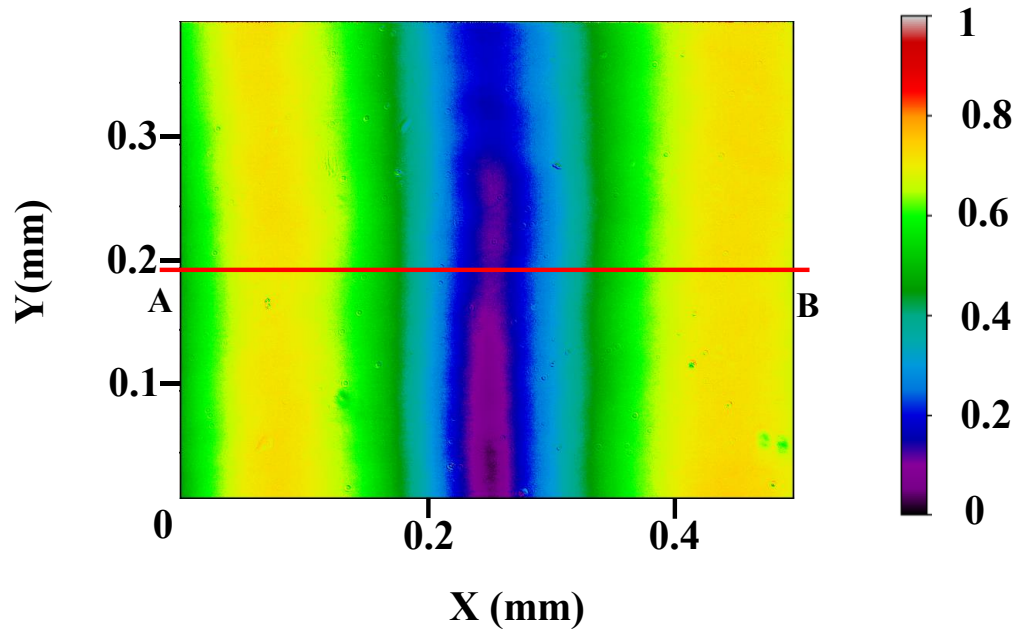
アクリルシャーレー内の平面ミラーを、偏光カメラでコントラスト (DOLP) を測定した結果と、フルストークスカメラでコントラスト (DOP) を測定した結果を図 4.4 に示す。フルストークスカメラで測定したコントラスト (DOP) は面内でほぼ一定であるが、偏光カメラで測定したコントラスト (DOLP) は位置に依存して変化していることが分かる。

次に、アクリルシャーレー内の平面ミラーを三次元計測した結果を図 4.5 に示す。フルストークスカメラを用いた場合、図 4.5(a)の結果から高精度に測定できていることが確認された。しかしながら、偏光カメラを使った手法では図 4.5(b)の測定結果から正しく形状が測定できていない。特に、図 4.4(b)の DOLP が大きく低下しているところで形状測定が上手く出来ていないことが分かる。

以上の結果からフルストークスカメラを用いることで、直線偏光パターン照明の位相を変化させる素子 (例、アクリル板や保護フィルム) がある場合でも正しく形状を測定できることが確認できた。



(b)



(c)

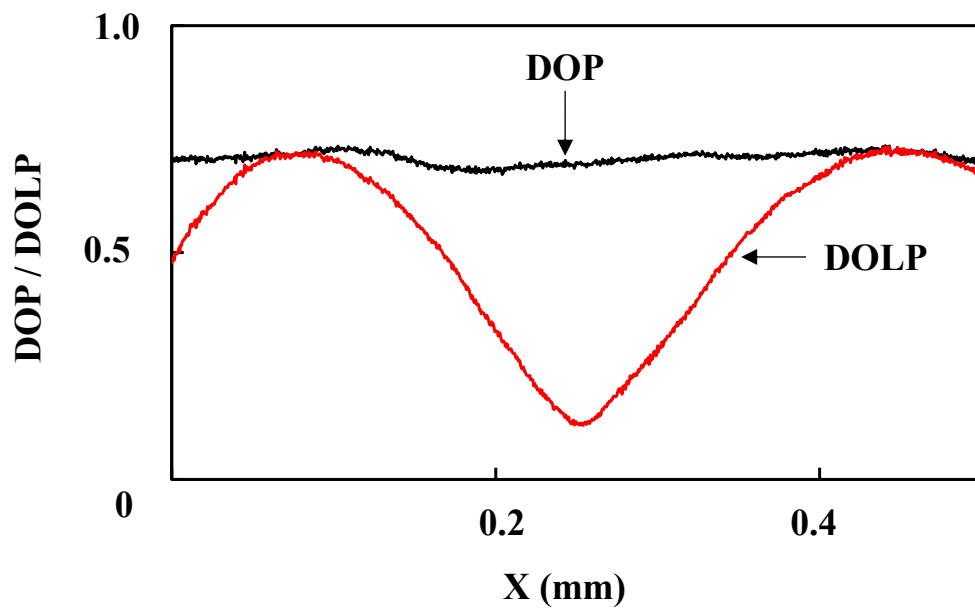


図 4.4 (a) DOP の面内分布 (b) DOLP の面内分布 (c) 断面図(A-B)

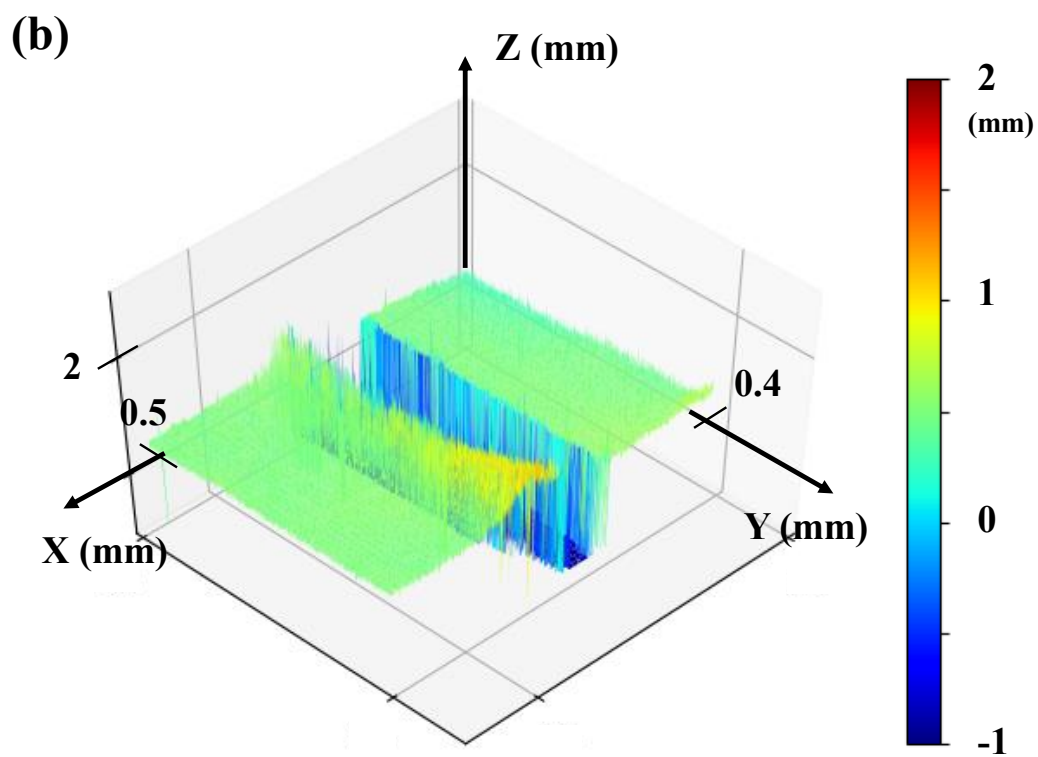
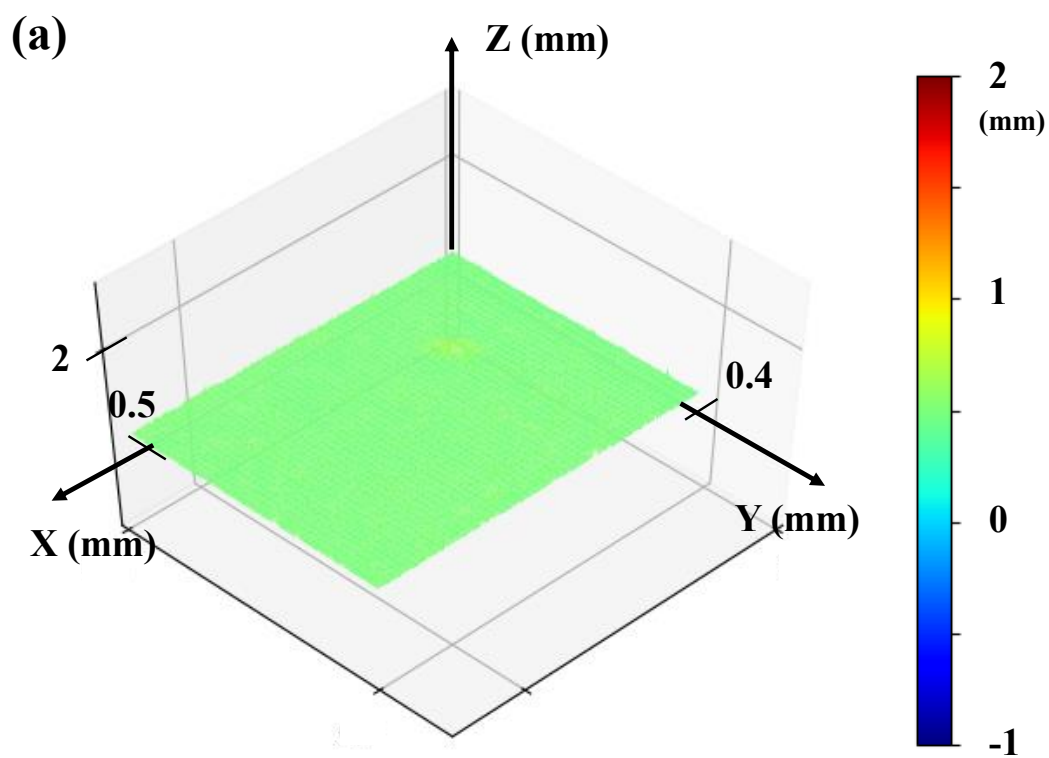


図 4.5 (a) DOP から測定した三次元形状 (b) DOLP から測定した三次元形状

4.5 コントラスト分布の測定結果

アクリルシャーレー内の平面ミラーの高さを変えながらコントラスト分布 (DOP) を測定した結果を図 4.6 に示す。コントラスト分布のピークサンプル高さが正の領域またはサンプル高さが負の領域を使うことで、コントラスト傾斜による方法 (2.2.3 参照) で三次元計測が可能である。繰り返し精度を確認するため、撮影された画像の中心かつ高さ 0.5 mm の位置で 30 回測定した結果を図 4.7 に示す。シングルフレームの測定精度の標準偏差は、0.005 mm である。本研究では、高さ 0.3 mm から 1.8 mm の範囲を用いて三次元測定を行った。従って、システムの深度範囲は 1.5 mm で、高さ方向の解像力 (the number of resolvable elements) は、 $1.5 \text{ mm} / 0.005 \text{ mm} = 300$ である。

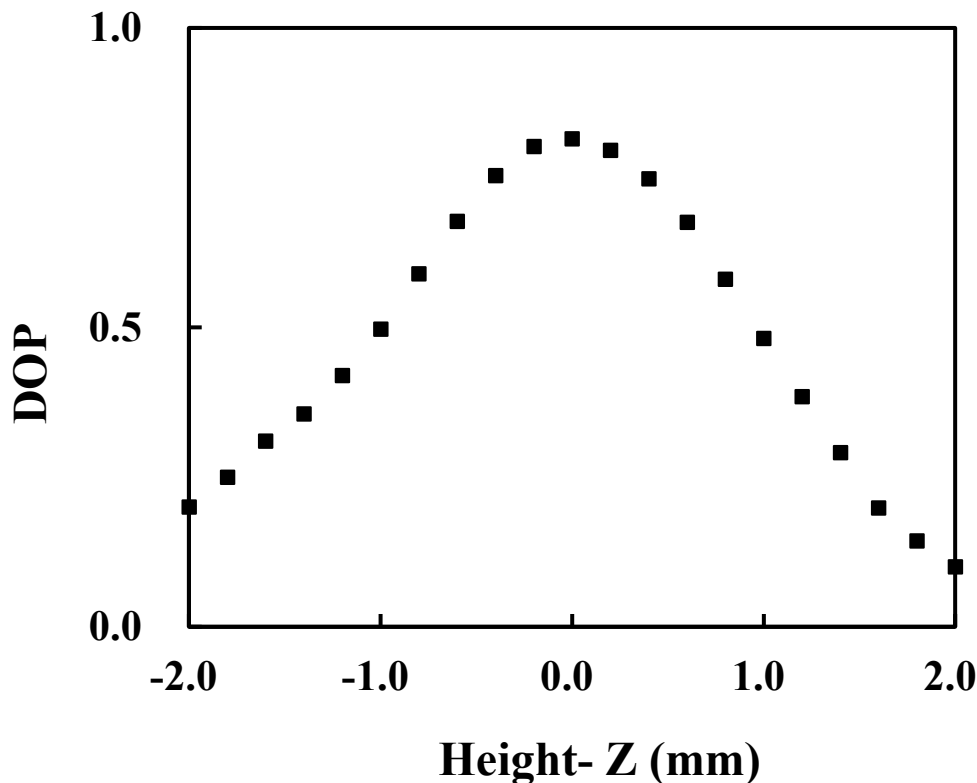


図 4.6 コントラスト分布 (DOP)

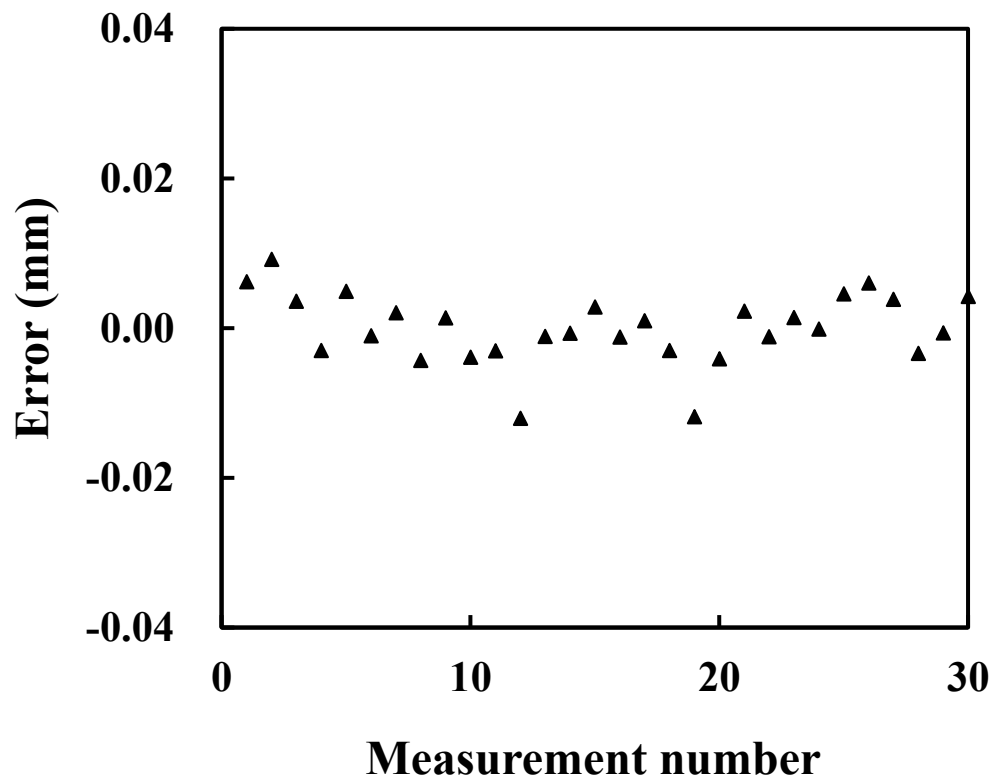


図 4.7 測定高さの誤差

4.6 三次元計測の結果

図 4.8 に示す厚さ 1.0 mm のミラー 2 枚で構成されるステップサンプルをアクリルシャーレ内に入れて、リアルタイム三次元計測を実施した。サンプルをマイクロステージで x 方向に動かしながら三次元計測した結果を図 4.9 に示す。リファレンスサンプルのコントラスト分布は、図 4.6 に示したコントラスト分布を用いた。偏光カメラのフレームレートは 30 fps である。この結果から、高い段差のサンプルの形状計測がリアルタイムにできることが確認できた。

次に、図 4.10 に示す厚さ 1.03 mm のガラス基板にクロスハッチパターン of ミラーを蒸着したサンプルをアクリルシャーレ内に入れて、リアルタイム三次元計測を実施した。前述の測定と同じ測定条件でサンプルをマイクロステージで x 方向に動かしながら三次元計測した結果を図 4.11 に示す。この結果から、深い穴のサンプルの形状計測がリアルタイムにできることが確認できた。

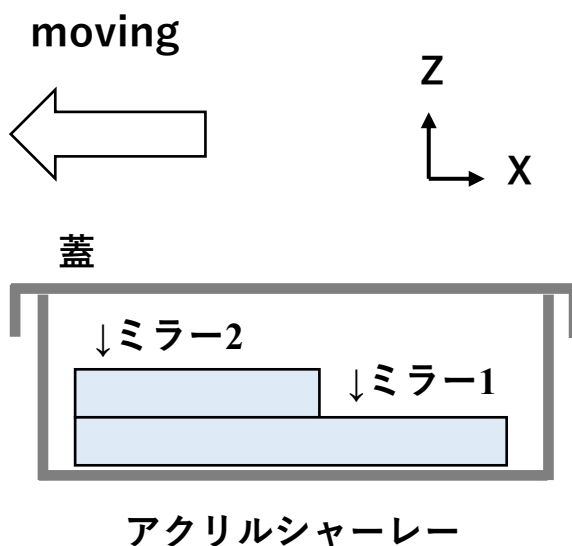
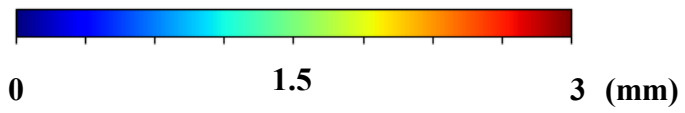
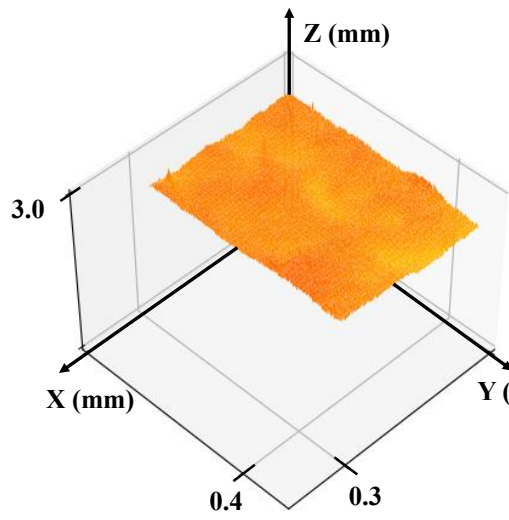


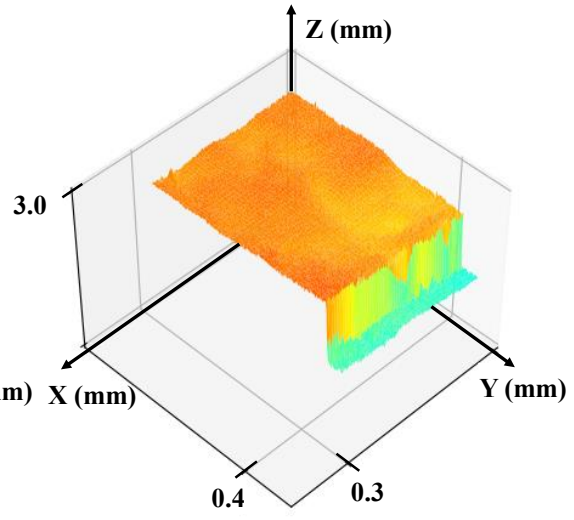
図 4.8 サンプル構成 (ステップサンプル)



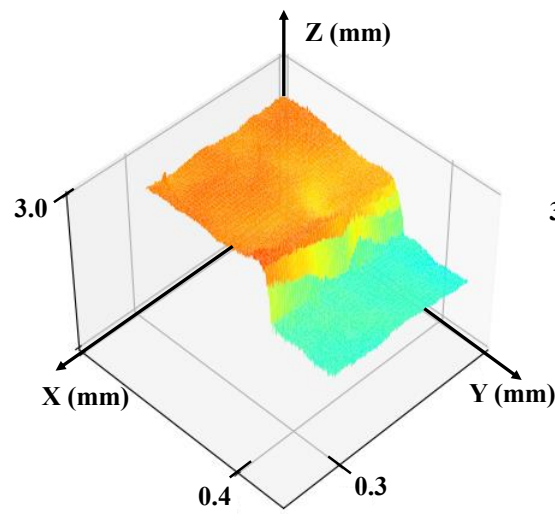
T0: 0ms



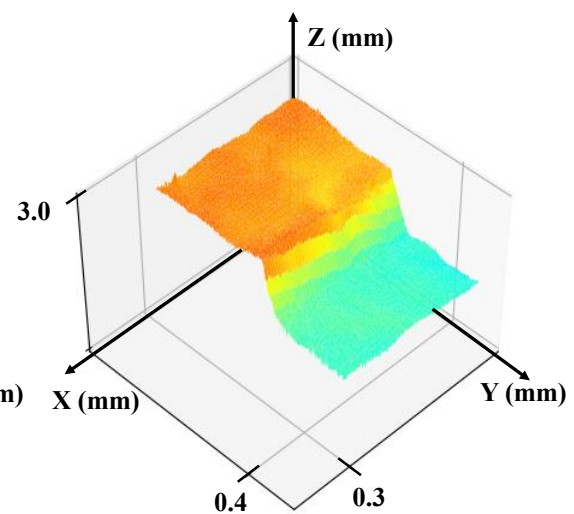
T1: 300ms

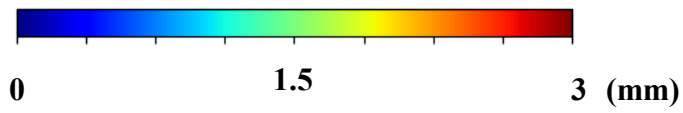


T2: 767ms

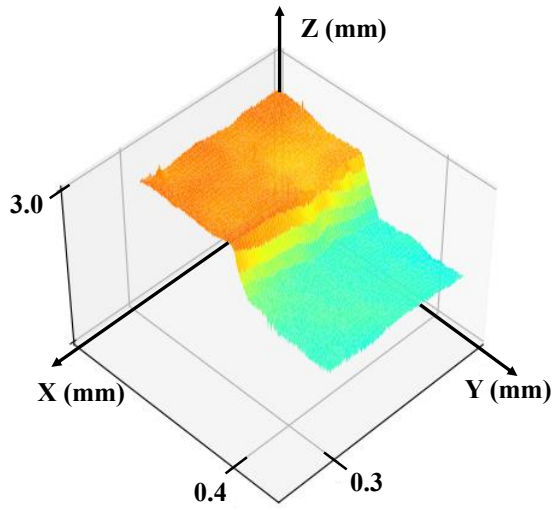


T3: 800ms

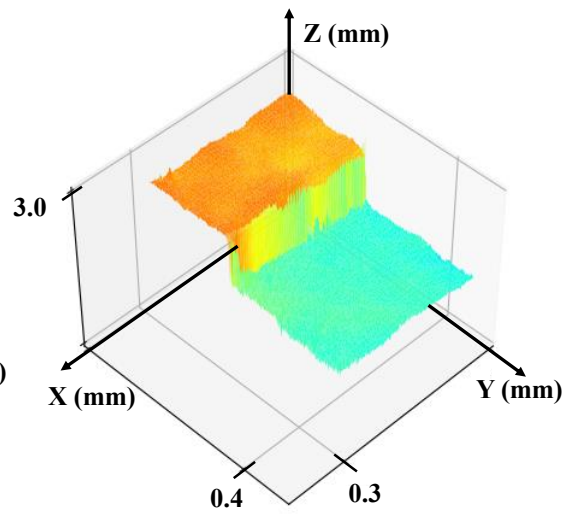




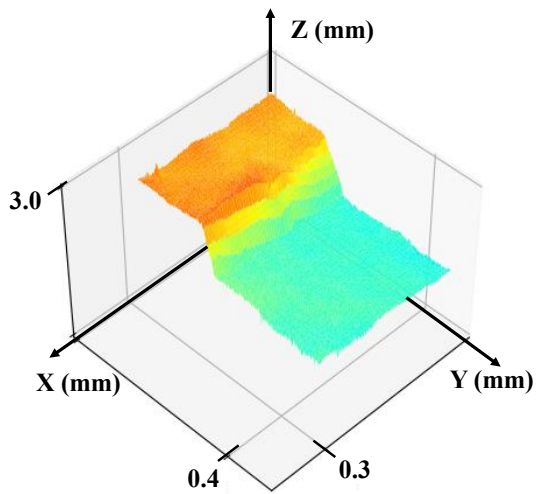
T4: 833ms



T5: 1033ms



T6: 1067ms



T7: 1700ms

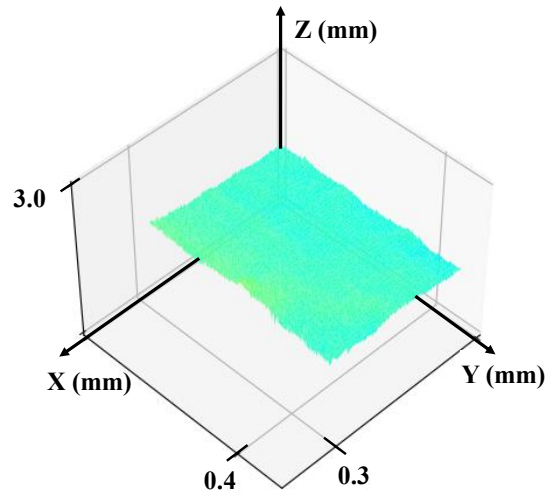
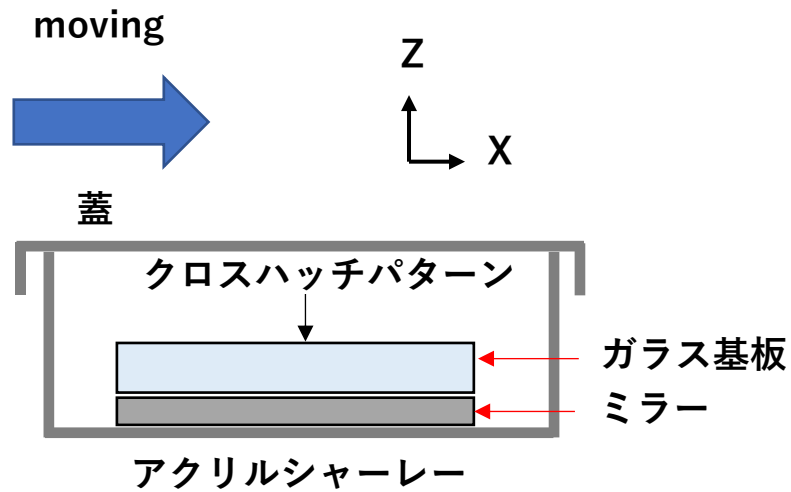


図 4.9 リアルタイム測定結果 (ステップサンプル)

(a) サンプル構成



(b) クロスハッチパターン

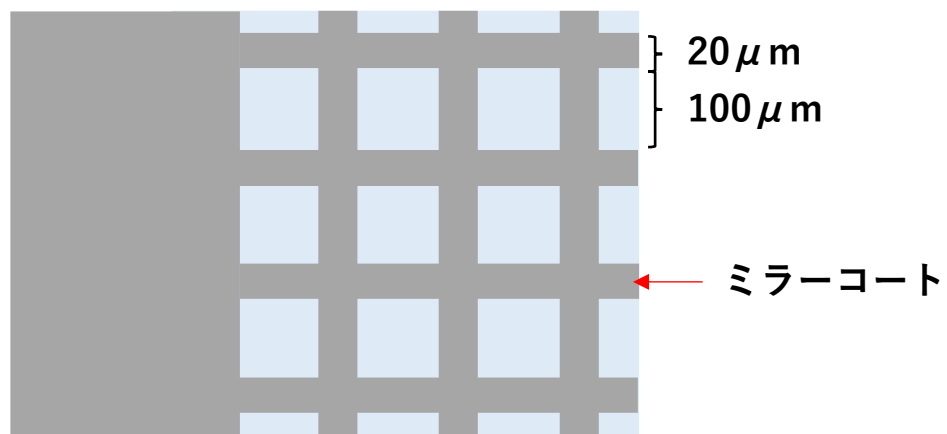
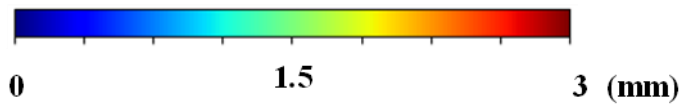
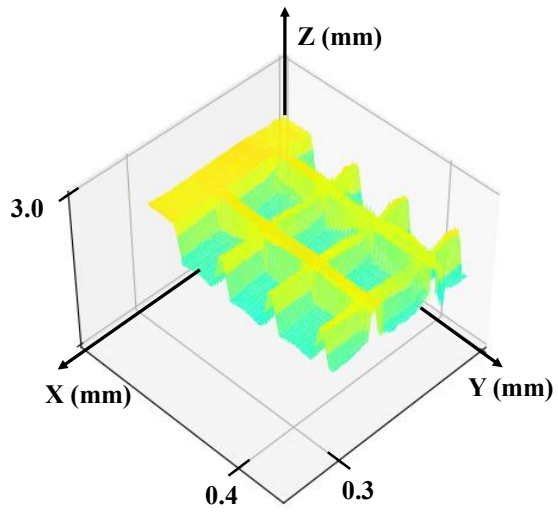


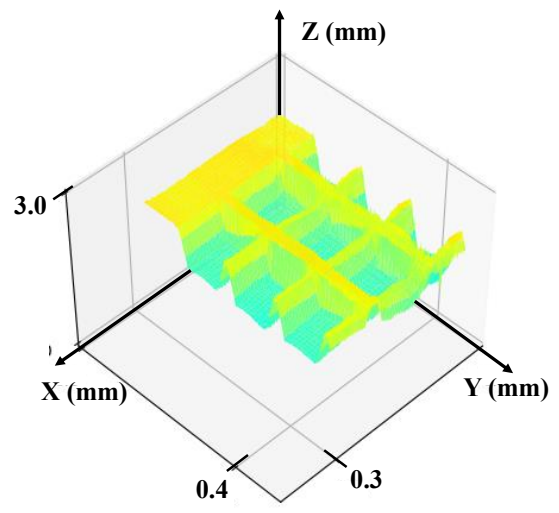
図 4.10 (a) サンプル構成 (クロスハッチパターンを蒸着したサンプル) (b) クロスハッチパターンの概略図



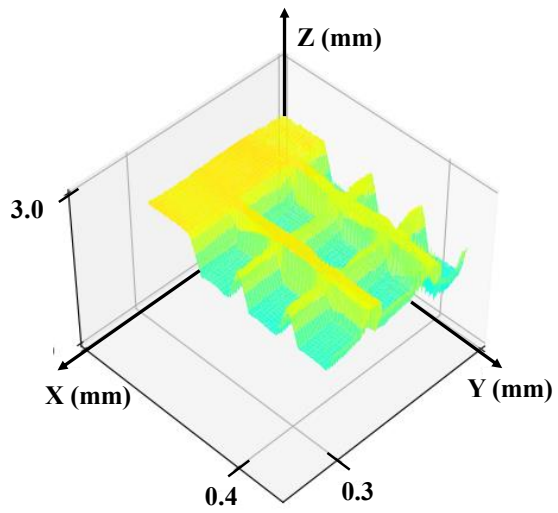
T0: 0ms



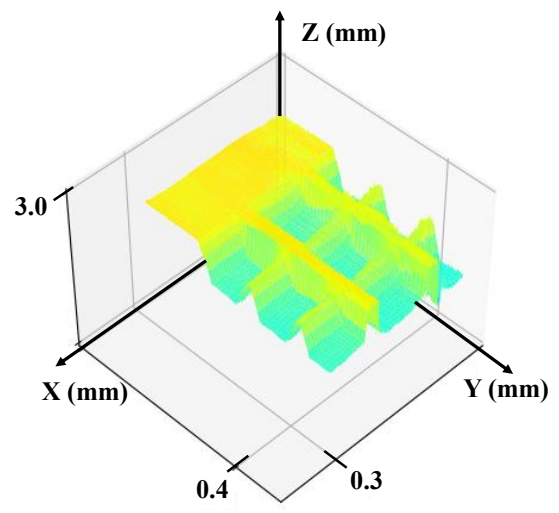
T1: 33ms

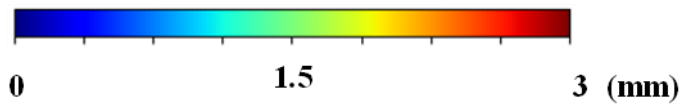


T2: 67ms

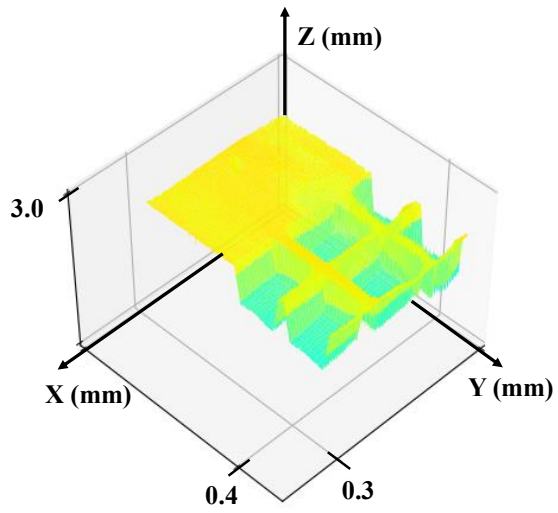


T3: 100ms

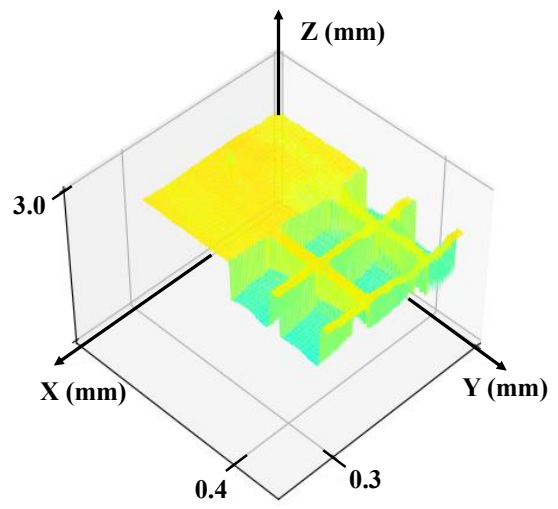




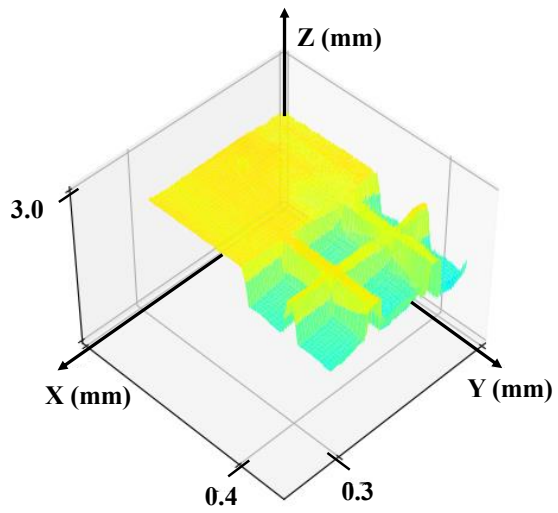
T4: 400ms



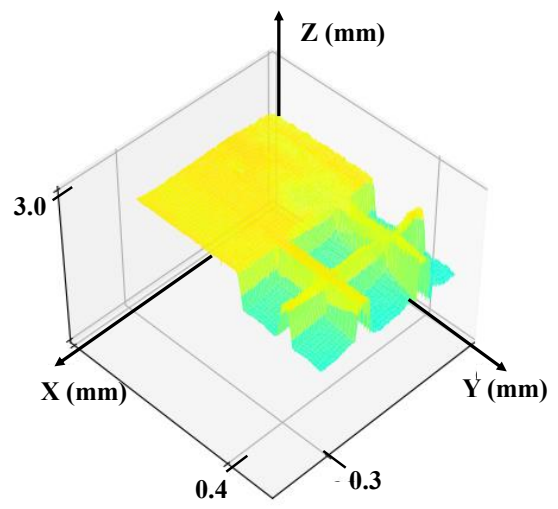
T5: 433ms

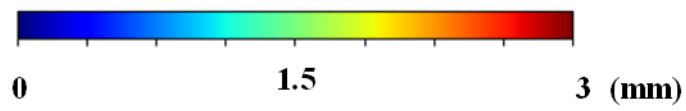


T6: 467ms

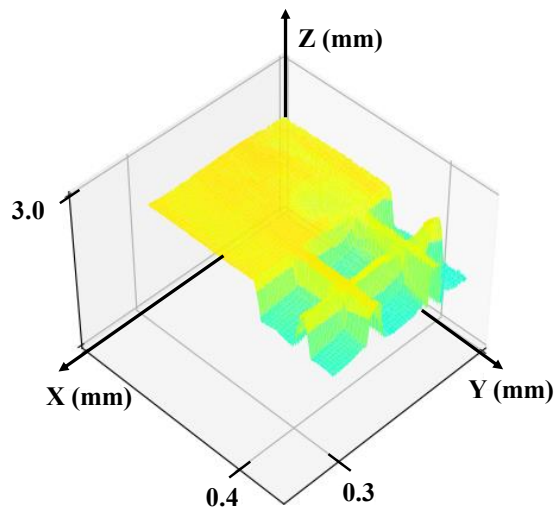


T7: 500ms

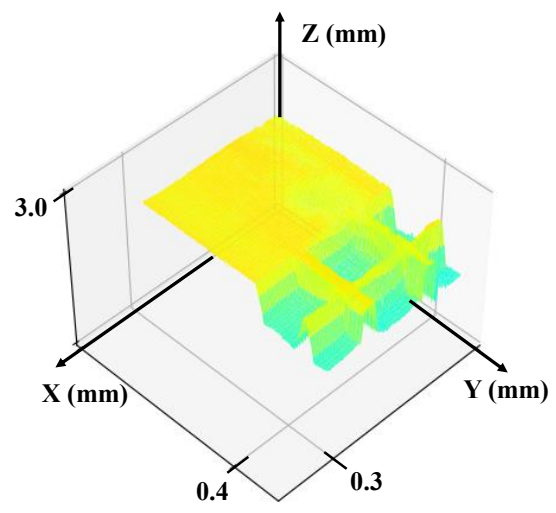




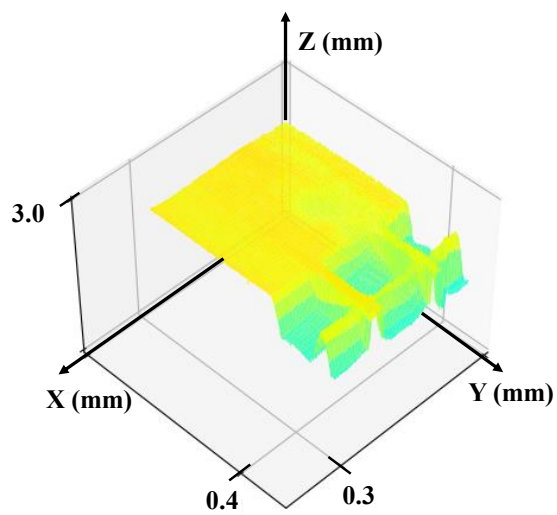
T8: 533ms



T9: 567ms



T10: 600ms



T11: 633ms

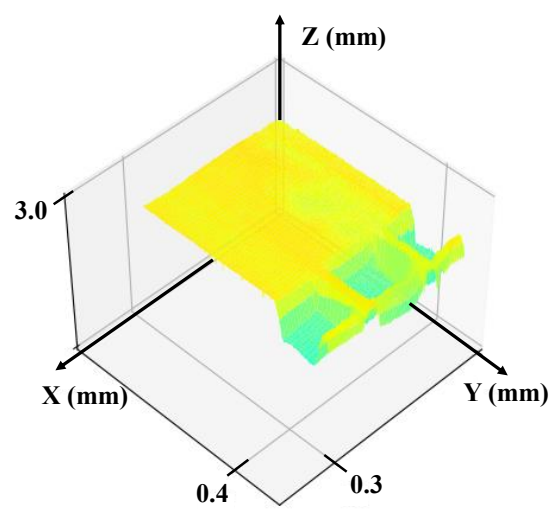


図 4.11 リアルタイム測定 (クロスハッチパターンサンプル)

4.7 まとめ

第3章の偏光カメラを使った三次元計測では偏光パターンの位相を変化させる位相素子がある場合には測定物の形状を正確に測定できないという課題があったが、フルストークスカメラで測定される偏光度を使うことで位相素子がある場合でも三次元計測可能であることを示した。また、アクリルシャーレー内のステップサンプルおよびクロスハッチパターンが蒸着されたサンプルのリアルタイム測定が可能であることを示した。

ここで示したリアルタイムの同軸の三次元計測システムは、測定物の三次元形状の高精度、高速、高解像度に測定するというニーズを満たし、測定物が保護された環境で測定することが可能である。そのため、測定物を汚すことなく安全に測定することが可能である。

本システムは、第3章のシステムと同様にアーティファクトを発生させることなく測定が可能であり、空間的に均一な偏光特性を持つ差サンプルに対して有効であり、ステレオ投影システムでは測定が難しい高い段差や深い穴のサンプルの測定に有利である。

第5章 軸上色収差を用いた形状計測

5.1 はじめに

スナップショットで形状計測を実現するために、偏光パターン照明と偏光カメラを用いた三次元計測システムを提案した。しかしながら、前述の計測システムは、コントラスト分布のピーク位置より高さが高い側の領域または低い側の領域のコントラストであるかを識別することができないため、コントラスト分布の全領域で形状計測ができないという課題があった。つまり、測定範囲を広げるためにコントラスト分布を広げる必要があるが、そうすると測定精度が低下するという課題があった。

そこで、カラー偏光カメラを用いて、直線偏光パターンの投影系に軸上色収差が大きいレンズ系を配置し、2色のコントラスト分布（例えば、赤と青）のピーク位置が異なることを利用した計測システムを提案した。このシステムにより、コントラスト分布のピーク位置より高さが高い側または低い側の領域のコントラストであるかを判別することが可能になり、ダイナミックレンジを約2倍に拡大することができる。以下に、このシステムの測定装置および測定物のリアルタイム測定結果を示す。

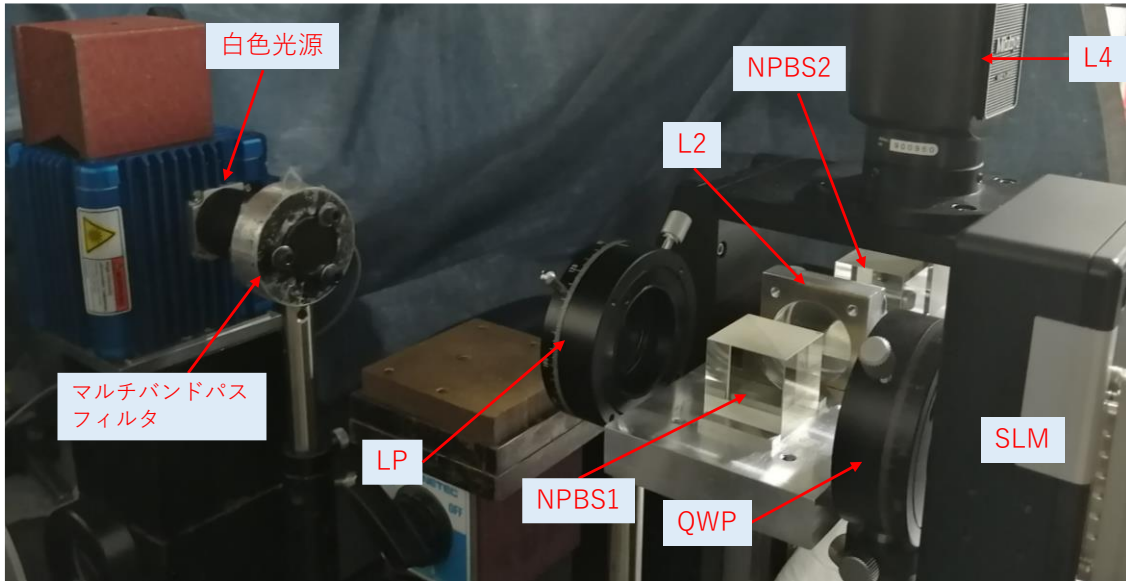
5.2 測定装置

測定装置および光学レイアウトを図5.1に示す。光源（Light Source）からの白色光は、マルチバンドフィルター（MBF）で所定のスペクトル幅の赤光、緑光、青光が生成される（図5.2）。MBFは、Edmund社の「蛍光用マルチバンドフィルター3波長（型番：#87-245）」を採用した。青光、緑光、赤光の波長は、 $457\text{ nm} \pm 11\text{ nm}$ 、 $530\text{ nm} \pm 10\text{ nm}$ 、 $628\text{ nm} \pm 14\text{ nm}$ である。MBFを透過した光は、直線偏光子（LP）、無偏光ビームスプリッタ（NPBS1）、 $\lambda/4$ 波長板（QWP）、SLMを介して、直線偏光パターン照明光が生成される[64]。直線偏光パターン照明光は、レンズ（L1）、NPBS2、NPBS3およびレンズ（L2）を介してサンプルに照明される。サンプルの表面で反射した光は、L2、NPBS3およびレンズ（L3）を介してカラー偏光カメラ（CPC）に導かれる。CPCは、イメー

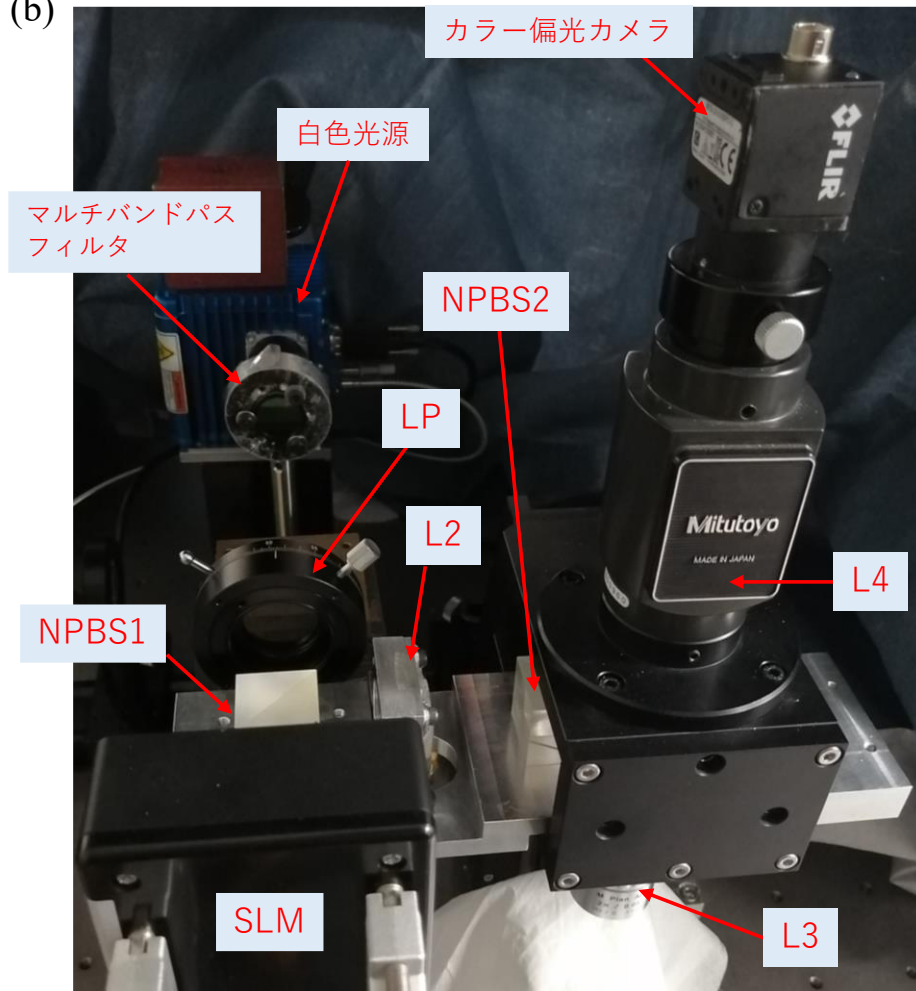
ジセンサーの上にカラーフィルターが配置され、その上に偏光子アレイが配置されている。CPC は、FLIR 社のカメラ（画素数 2448×2048、ピクセルサイズ 3.45 μm 、型番：BFS-U3-51S5PC-C）を使用した。直線偏光パターン照明光の赤光、緑光、青光のサンプル位置でのベストフォーカス（BP）位置を変えるため、軸上色収差を発生させている。図 5.3 および表 5.1 にレンズ構成、図 5.4 に軸上色収差図を示す。図 5.4 の軸上色収差のグラフから、青光(457nm)と赤光(628nm)の軸上色収差は、5.6 mm である。本研究では、BP 位置の差が大きい赤光と青光で計測を実施した。NPBS が直線偏光パターン照明光に位相変化を与えるため、位相変化を打ち消すように NPBS1 と NPBS2 に対して NPBS3 を直行させて配置している [66]。

L1 に焦点距離 100 mm のレンズ、L2 は焦点距離 100 mm のミットヨ社のレンズ「M-PLAN APO 2X」、L3 に焦点距離 200 mm のレンズを使用した。L1 の焦点距離は SLM とレンズの距離で光をコリメートするように決められる。L2 と L3 の焦点距離はサンプル位置の視野から決められ、視野とイメージサイズの比は L2 と L3 の焦点距離の比に等しい。本システムの F ナンバーはおおよそ $f/10$ である。NPBS は Edmund 社の「キューブ型無偏光 B/S (型番：#47-009)」を採用した。

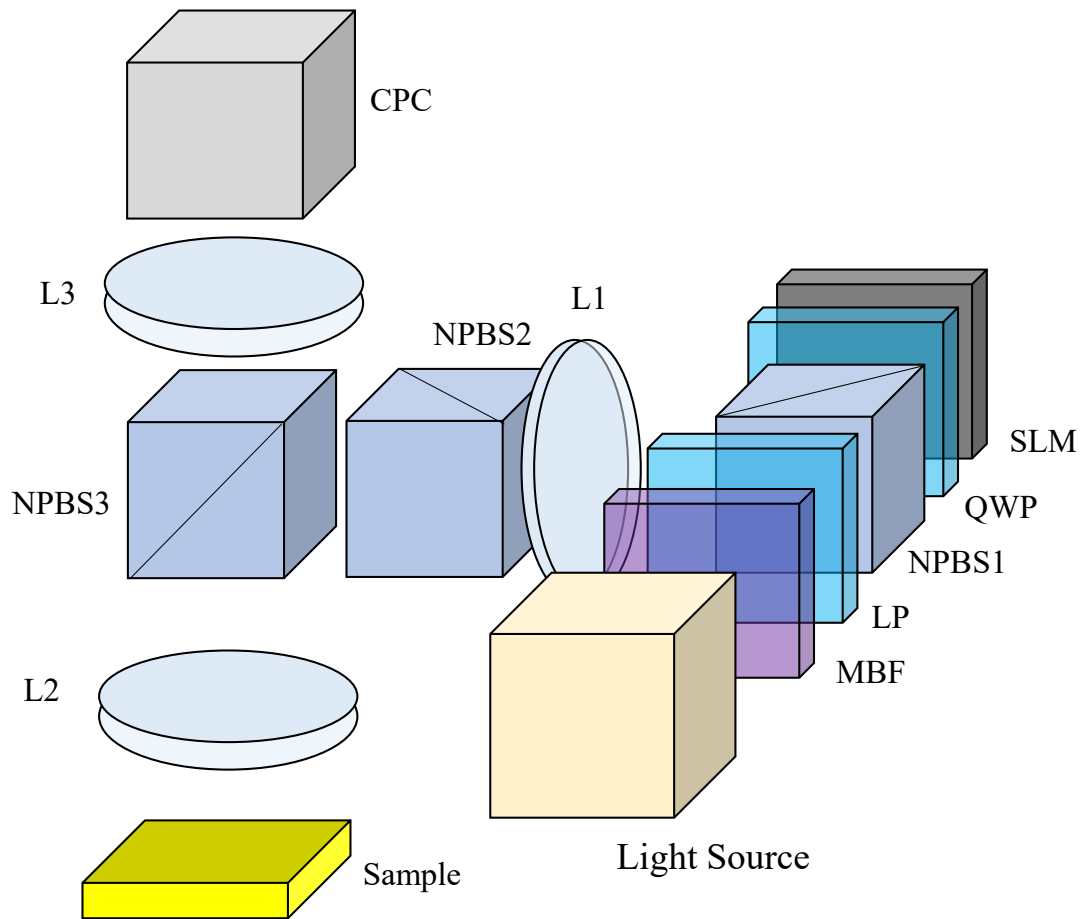
(a)



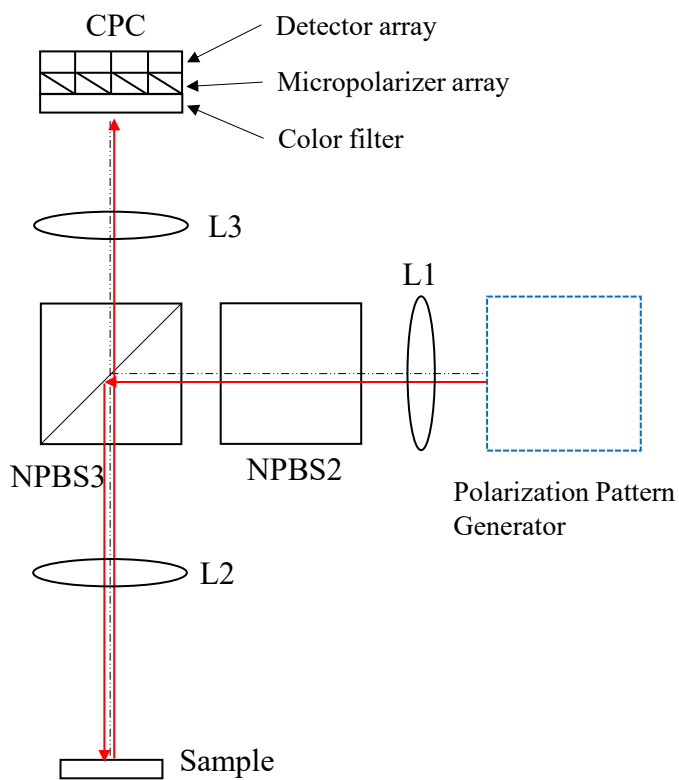
(b)



(c) Perspective view



(d) Side view



(e) Top view

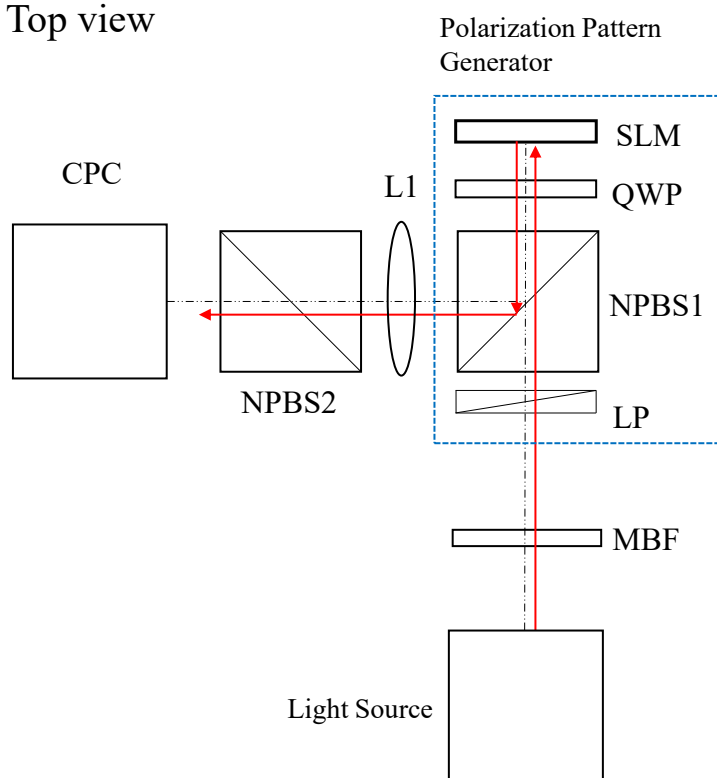


图 5.1 測定配置 (a)外觀 1、(b)外觀 2、(c)斜視図、(d)側面図、(e)上面図

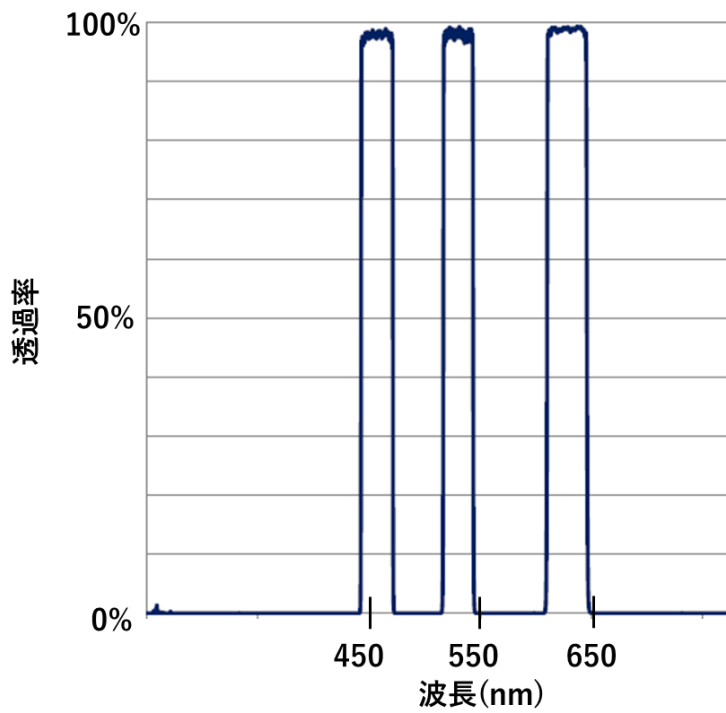


図 5.2 マルチバンドパスフィルターの特性

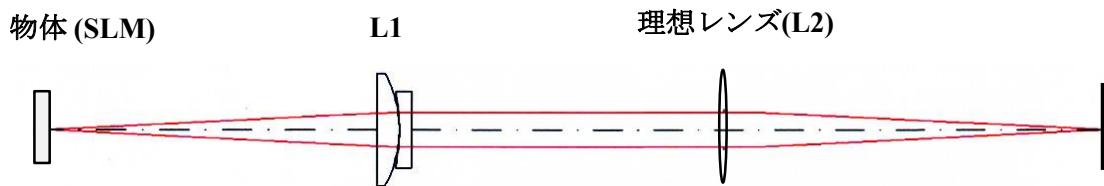


図 5.3 レンズ構成

表 5.1

	r	d	n	v	glass
Object		95.0			
1		6.35	1.6727	32.25	N-SF5
2	-33.63	0			
3	-51.68	4.85	1.5168	64.17	N-BK7
4		90.0			
5	f=100mm	100.0			Ideal Lens

Image

r:曲率半径(mm)、d:間隔(mm)、n:d線の屈折率、v:d線のアッベ数

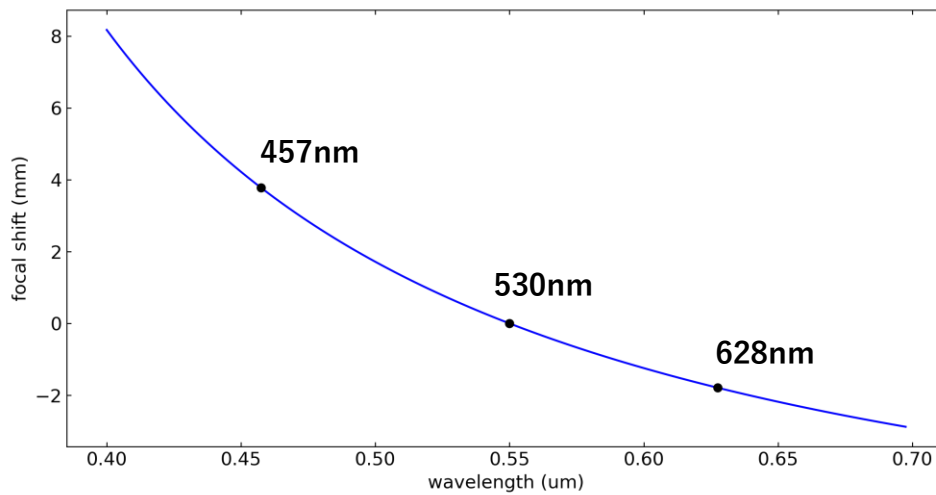


図 5.4 軸上色収差図

5.3 NPBS の位相補償

本測定装置に採用した NPBS は、白色用のビームスプリッタであるため、多少なりとも位相変化が生じる。従って、高い精度で偏光計測するためには位相補償する必要がある。図 5.1 に示すように NPBS1 と NPBS2 に対して光軸周りに 90° 回転させて NPBS3 を配置することで、NPBS の吸収率性 (diattenuation) とリターダンス (retardance) を補償している。カラー偏光カメラに入射する直線偏光パターンのストークスベクトル s' は、式(2.31)より、

$$s' = N_{TV} \cdot M \cdot N_{RV} \cdot N_{TH} \cdot N_{RH} \cdot \text{QWP}(-45^\circ) \cdot \text{SLM}(\phi, 0^\circ) \cdot \text{QWP}(45^\circ) \cdot N_{TH} \cdot \text{LP}(0^\circ) \cdot s \quad (5.1)$$

ここで、 M と N は、ミラー (サンプル) と NPBS のミュラー行列を表す。ミュラー行列 N の添え字 T と R は透過と反射を表し、添え字 H と V は進相軸 0° と 90° を表す。ミラーおよび NPBS のミュラー行列は、

$$M = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (5.2)$$

$$N_{TH} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} p_T + s_T & p_T - s_T & 0 & 0 \\ p_T - s_T & p_T + s_T & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2\sqrt{p_T \cdot s_T} \cdot \cos \delta_T & 2\sqrt{p_T \cdot s_T} \cdot \sin \delta_T \\ 0 & 0 & -2\sqrt{p_T \cdot s_T} \cdot \sin \delta_T & 2\sqrt{p_T \cdot s_T} \cdot \cos \delta_T \end{bmatrix} \quad (5.3)$$

$$N_{TV} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} s_T + p_T & s_T - p_T & 0 & 0 \\ s_T - p_T & s_T + p_T & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2\sqrt{p_T \cdot s_T} \cdot \cos \delta_T & -2\sqrt{p_T \cdot s_T} \cdot \sin \delta_T \\ 0 & 0 & 2\sqrt{p_T \cdot s_T} \cdot \sin \delta_T & 2\sqrt{p_T \cdot s_T} \cdot \cos \delta_T \end{bmatrix} \quad (5.4)$$

$$N_{RH} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} p_R + s_R & p_R - s_R & 0 & 0 \\ p_R - s_R & p_R + s_R & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2\sqrt{p_R \cdot s_R} \cdot \cos \delta_R & 2\sqrt{p_R \cdot s_R} \cdot \sin \delta_R \\ 0 & 0 & -2\sqrt{p_R \cdot s_R} \cdot \sin \delta_R & 2\sqrt{p_R \cdot s_R} \cdot \cos \delta_R \end{bmatrix} \quad (5.5)$$

$$N_{RV} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} s_R + p_R & s_R - p_R & 0 & 0 \\ s_R - p_R & s_R + p_R & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2\sqrt{p_R \cdot s_R} \cdot \cos \delta_R & -2\sqrt{p_R \cdot s_R} \cdot \sin \delta_R \\ 0 & 0 & 2\sqrt{p_R \cdot s_R} \cdot \sin \delta_R & 2\sqrt{p_R \cdot s_R} \cdot \cos \delta_R \end{bmatrix} \quad (5.6)$$

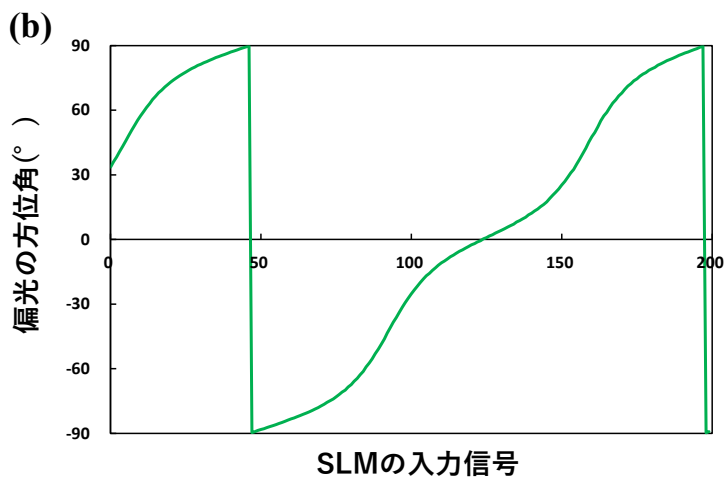
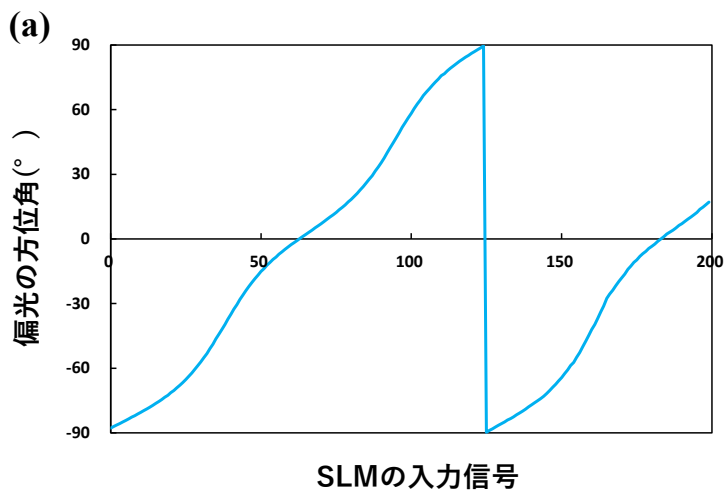
と書ける。ここで、 p_T 、 s_T 、 p_R 、 s_R 、 δ_T 、 δ_R は、P 偏光の透過率、S 偏光の透過率、P 偏光の反射率、S 偏光の反射率、透過のリターダンス、反射のリターダンスを表す。式(5.2)-(5.6)を使って、式(5.1)を計算すると、

$$s' \propto M \cdot \text{QWP}(-45^\circ) \cdot \text{SLM}(\phi, 0^\circ) \cdot \text{QWP}(45^\circ) \cdot \text{LP}(0^\circ) \cdot s \quad (5.7)$$

となる。従って、NPBS の吸収率性とリターダンスを補償できることが分かる。

次に、NPBS を位相補償する前と後の測定結果を示す。カラー偏光カメラではなく、カラーフィルター（赤、緑、青）と偏光カメラの構成で測定した。位相補償前（NPBS2 無）の構成で、SLM に入力する階調に対する各色（赤、緑、青）の偏光の方位角（ $^\circ$ ）のグラフを図 5.5 に示す。SLM 階調に対して偏光の方位角が線形になっていないことが分かる。次に、NPBS の位相補償した場合の構成（本測定装置の構成）で、SLM に入力する階調に対する各色（赤、緑、青）の偏光の方位角のグラフを図 5.6 に示す。SLM の階調に対して偏光の方位角が略

線形になっていることが分かる。しかしながら、図 5.7 に示すように SLM の入力信号に対するコントラストが一定になっていない。この理由は、NPBS の吸収率性とリターダンスが製造誤差によりばらつき、式(5.7)を理想的には実現することができないためである。サンプルがミラー以外の場合、直線偏光パターン照明光がサンプルの表面で散乱するため偏光解消が生じる。例えば、拡散板や金属表面などである。この場合、式(5.1)の NPBS の吸収率性の項 (p_T と s_T) が残るため、より厳密に膜設計された NPBS を選択する必要がある。



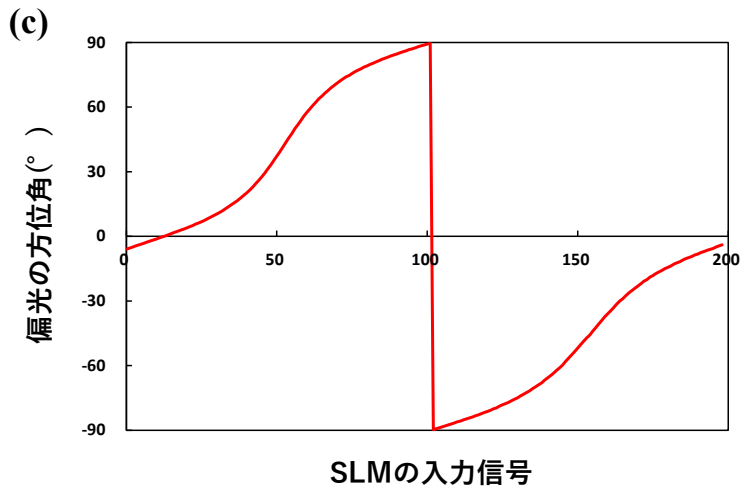
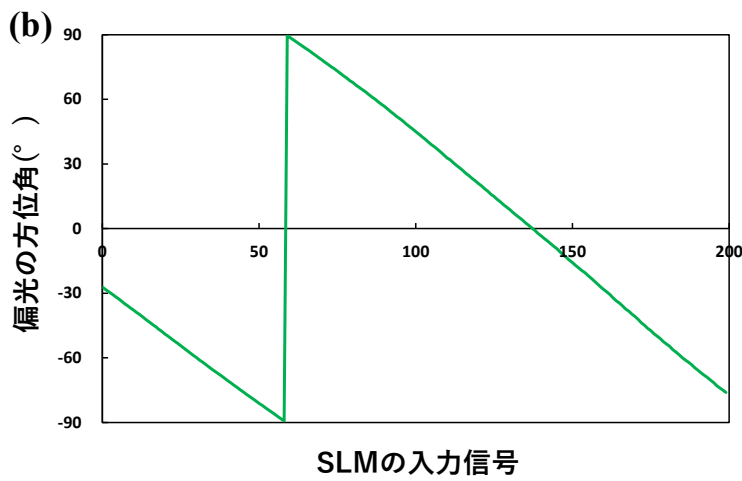
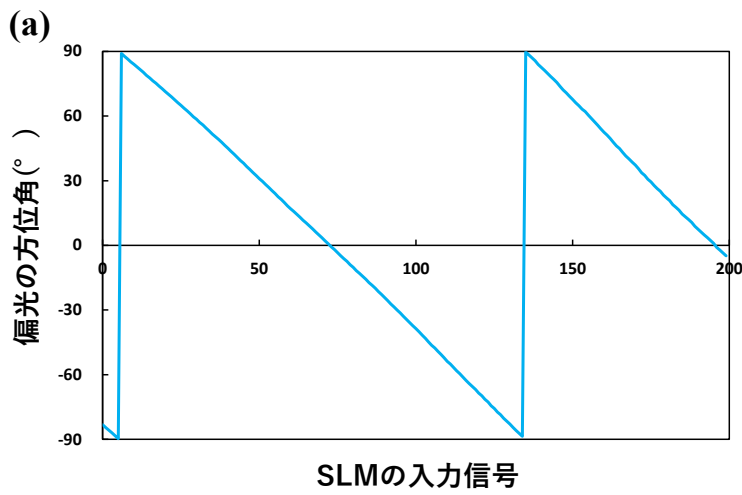


図 5.5 位相補償前の階調に対する偏光の方位角(°)



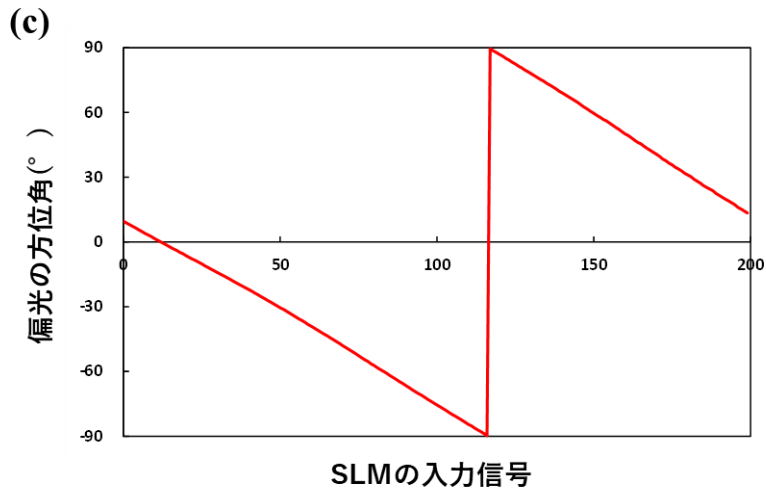


図 5.6 位相補償後の階調に対する偏光の方位角(°)

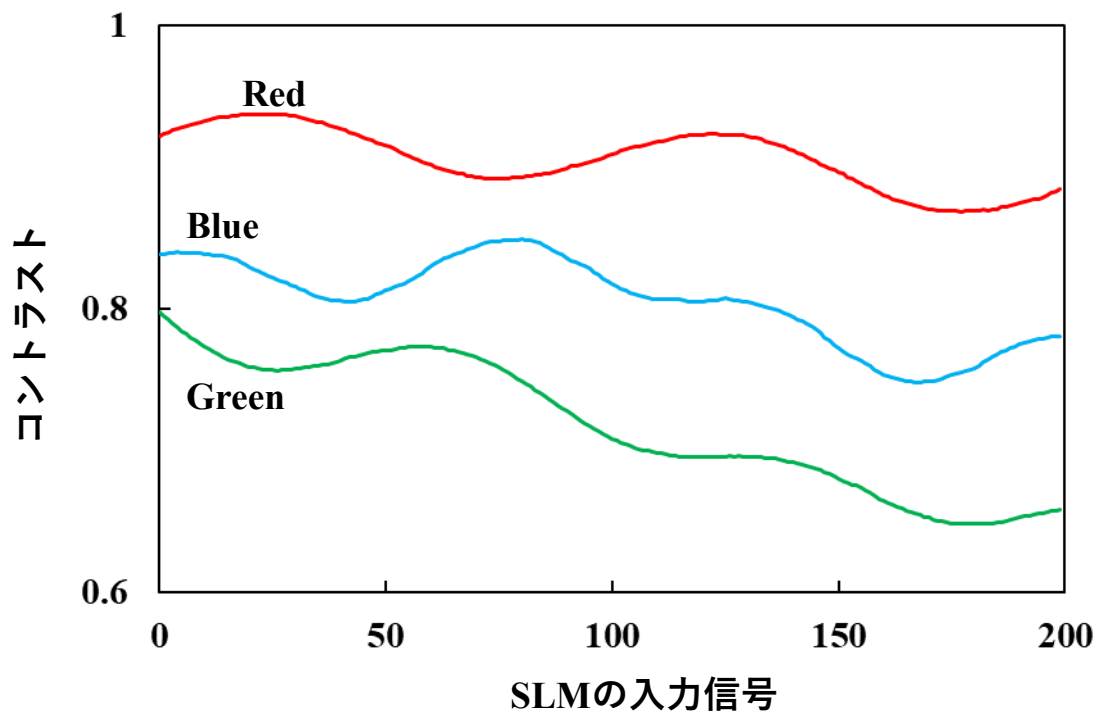


図 5.7 コントラストと SLM の入力信号

5.4 コントラスト分布の測定結果

本測定は、ピント位置の差が大きい青光と赤光を用いた。SLM の入力画像として、図 5.8 に示す入力画像を用いた。なぜなら、式(2.45)より SLM の位相差が波長に依存するため、図 3.5 に示すような位相差 2π で折り返しができないからである。

図 5.6 の結果に基づいて SLM の位置に比例する入力信号を SLM に与えて、直線偏光パターンを生成し、偏光カメラで撮影した結果を図 5.9 に示す。図 5.9 の結果より、青光と赤光が共に Y 方向の位置に対して略線形に偏光の方位角が変化していることから、青光と赤光が共に直線偏光パターンが生成できていることが確認された。

リファレンスのコントラスト分布を測定するため、サンプル位置に平面ミラーを配置して、高さを変えながら測定した結果を図 5.10 に示す。図 5.10 の結果から、青光と赤光のコントラスト分布のピーク位置の高さの差が 2.8 mm あることが確認された。サンプルが平面ミラーであることから、青光と赤光のコントラスト分布のピーク位置の距離は、高さの差 2.8 mm の倍になるため、本システムの軸上色収差は 5.6 mm である。この値は、5.3 節で示した設計値と一致している。繰り返し精度を確認するため、撮影された画像の中心かつ高さ 0.0 mm の位置で 40 回測定した結果を図 5.11 に示す

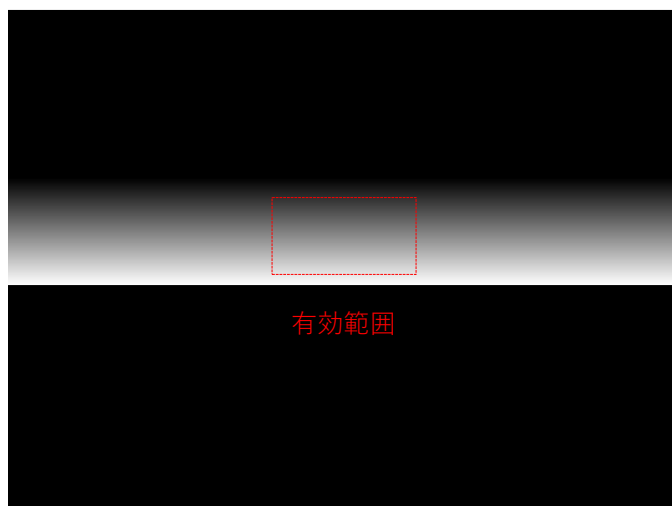


図 5.8 SLM の入力画像

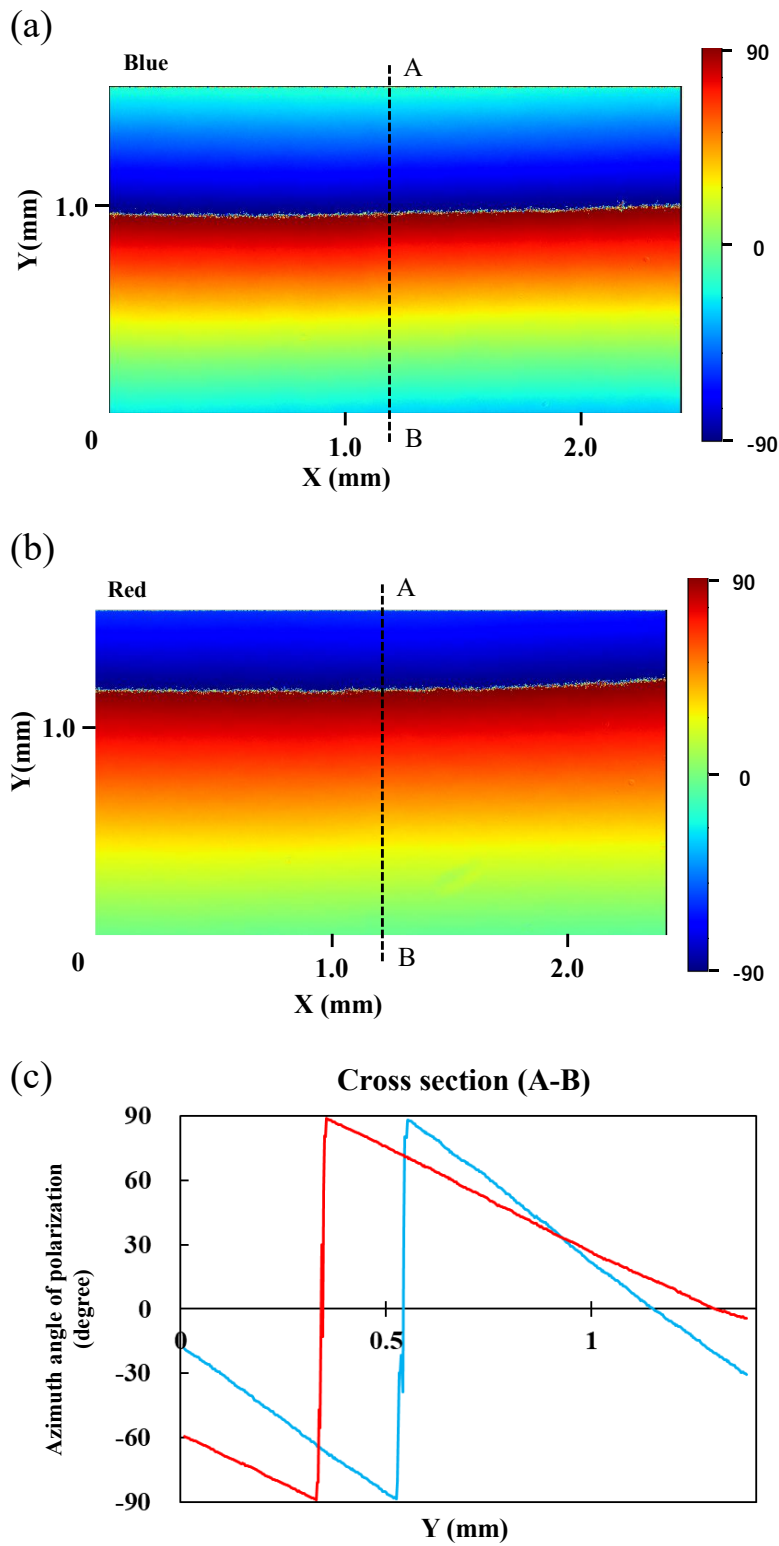


図 5.9 (a) 青光の偏光方位角の分布 (b) 赤光の偏光方位角の分布 (c) 断面図 (A-B)

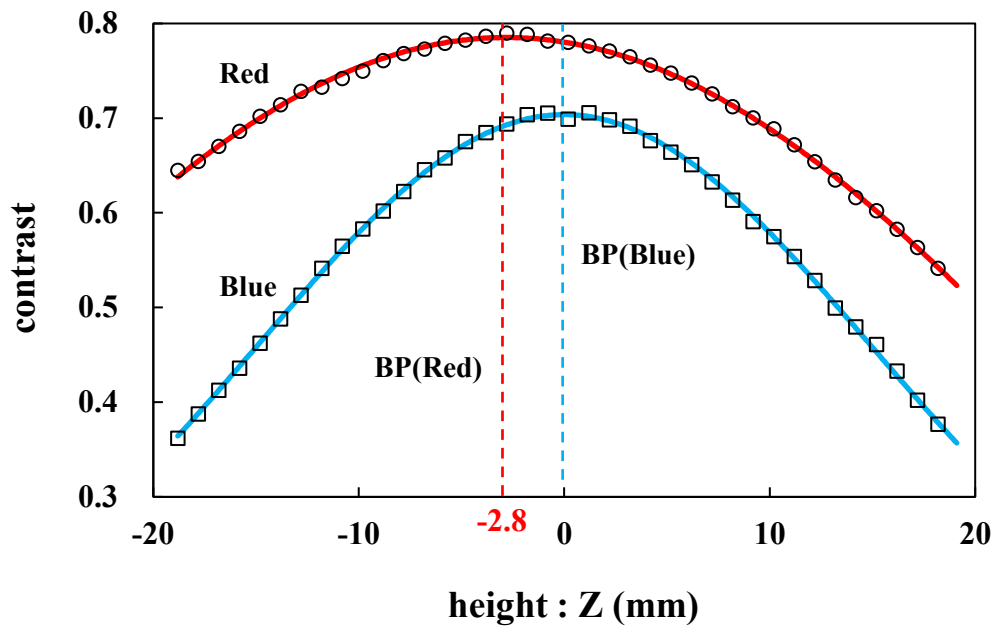


図 5.10 青光と赤光のコントラスト分布 青の実線：青光のコントラストをガウス分布近似した曲線 赤の実線：青光のコントラストをガウス近似した曲線 BP：ガウス近似した曲線のピーク位置（青光のコントラスト分布のピーク位置を高さ 0 mm としている）

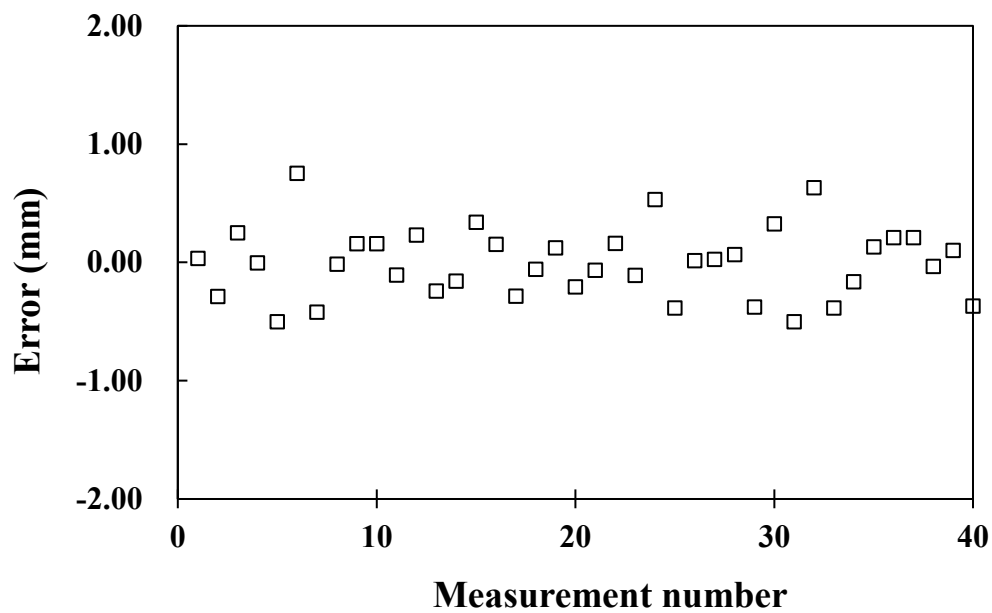


図 5.11 測定高さの誤差

5.5 三次元計測の結果

本測定システムの原理を確認するため、図 5.12 に示すステップサンプルを用いて形状を計測した。ステップサンプルの Mirror-2 と Spacer の間が $Z=0$ (青のベストピント位置) になるように配置した。図 5.13 の測定結果からコントラスト分布のピークを跨ぐ配置でも形状計測できていることが確認された。しかしながら、直線偏光パターン照明光の位相を完全に補償出来ていないため、面内の高さの標準偏差は 0.9 mm であり、Y 方向の高さムラが発生している。これは、NPBS の製造誤差の影響がある (図 5.7 参照)。

次に、図 5.14 に示すサンプルを用いて 10 fps でリアルタイム形状計測した結果を図 5.15 に示す。カラー偏光カメラは、サンプルでのイメージサイズ 3.5 mm×1.5 mm かつ 10 fps でデータを取得した。10 fps とした理由は、白色光から所定のバンド幅のスペクトルを取り出していることにより、高速計測に必要な光量を確保することができなかつたためである。狭帯域のレーザー光源や LED 光源を使うことで高速計測は可能である。図 5.15 から、直径 2.0 mm の穴に対して 10mm 以上の非常に深い穴を持つサンプルをリアルタイム計測できていることが分かる。しかしながら、ミラーは穴の奥深くにあり、照明の一部は穴の端の近くで遮られるため、図 5.16 の概念図に示すように、コントラストと測定物の高さの間のキャリブレーション関係が変化する。言い換えれば、コントラストに対する高さのキャリブレーション測定を個別に行わないと、測定された高さは穴のエッジ付近で誤差が発生する。

(a) Stepped sample

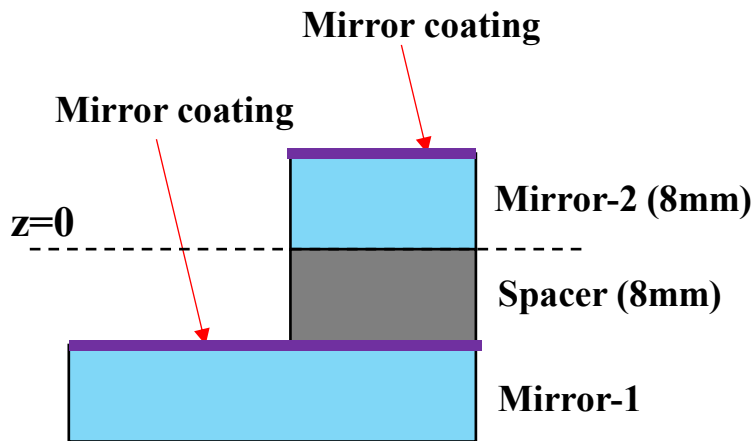
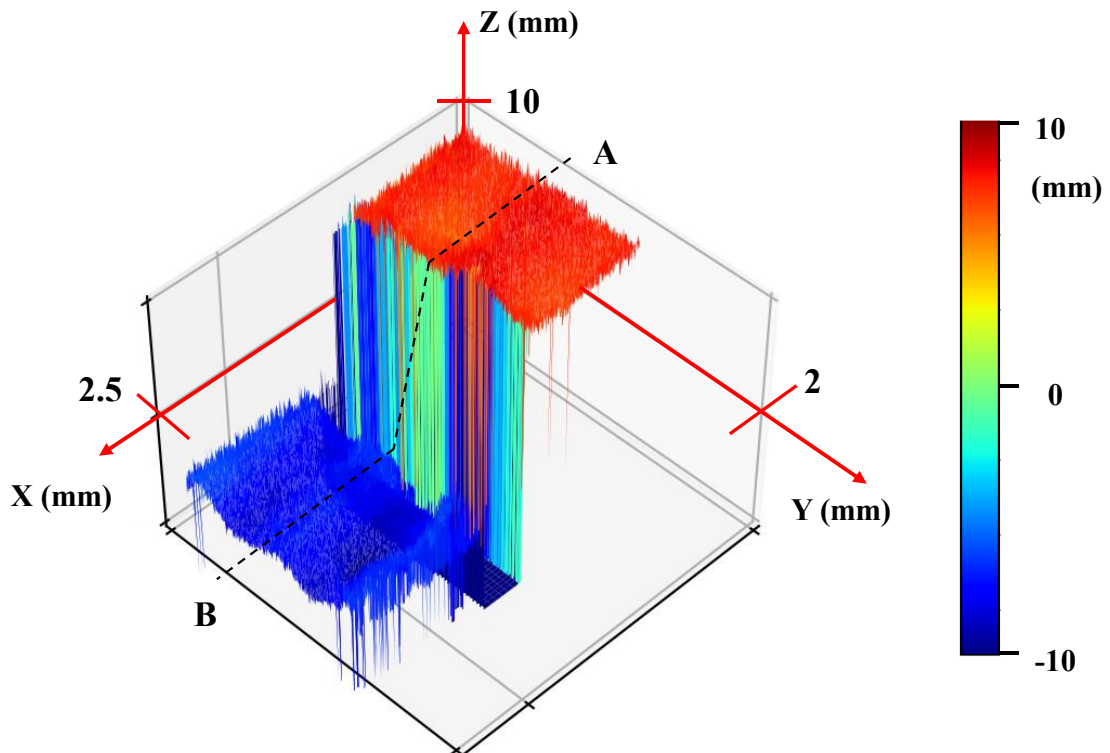


図 5.12 サンプル構成

(a) 3D profile



(b) Cross section (A-B)

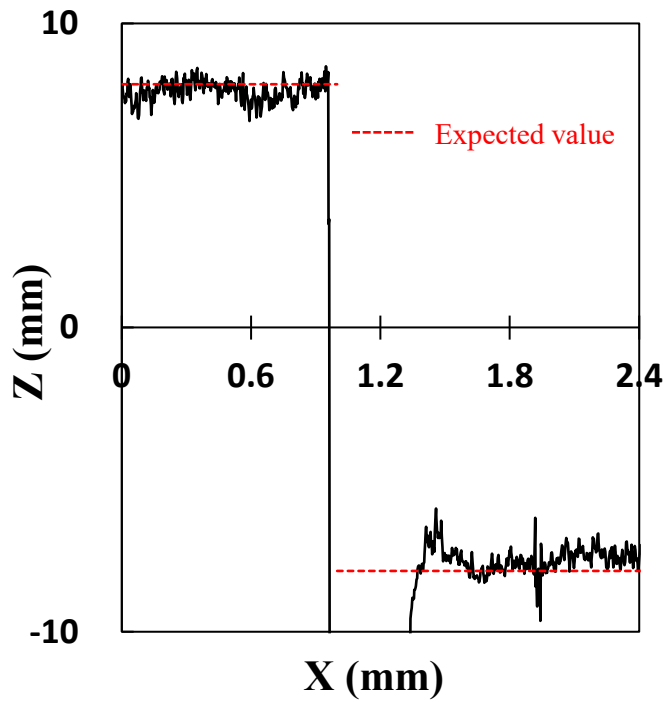
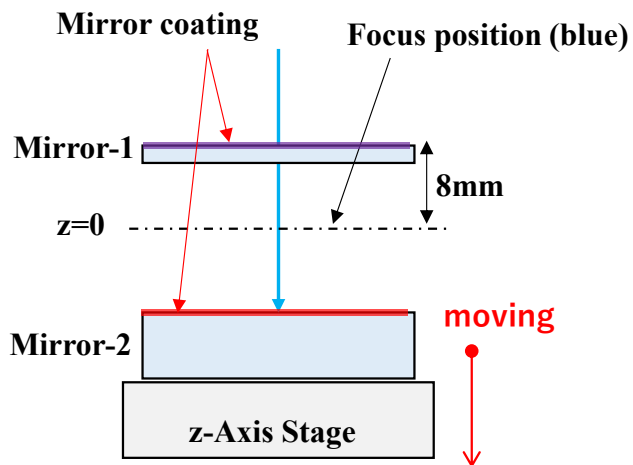


図 5.13 形状計測の結果 (a) 3D プロファイル (b) 断面図 (A-B)

Side view



Top view

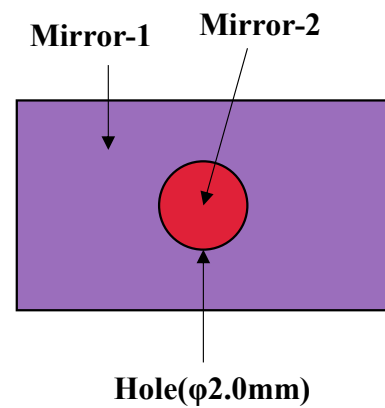
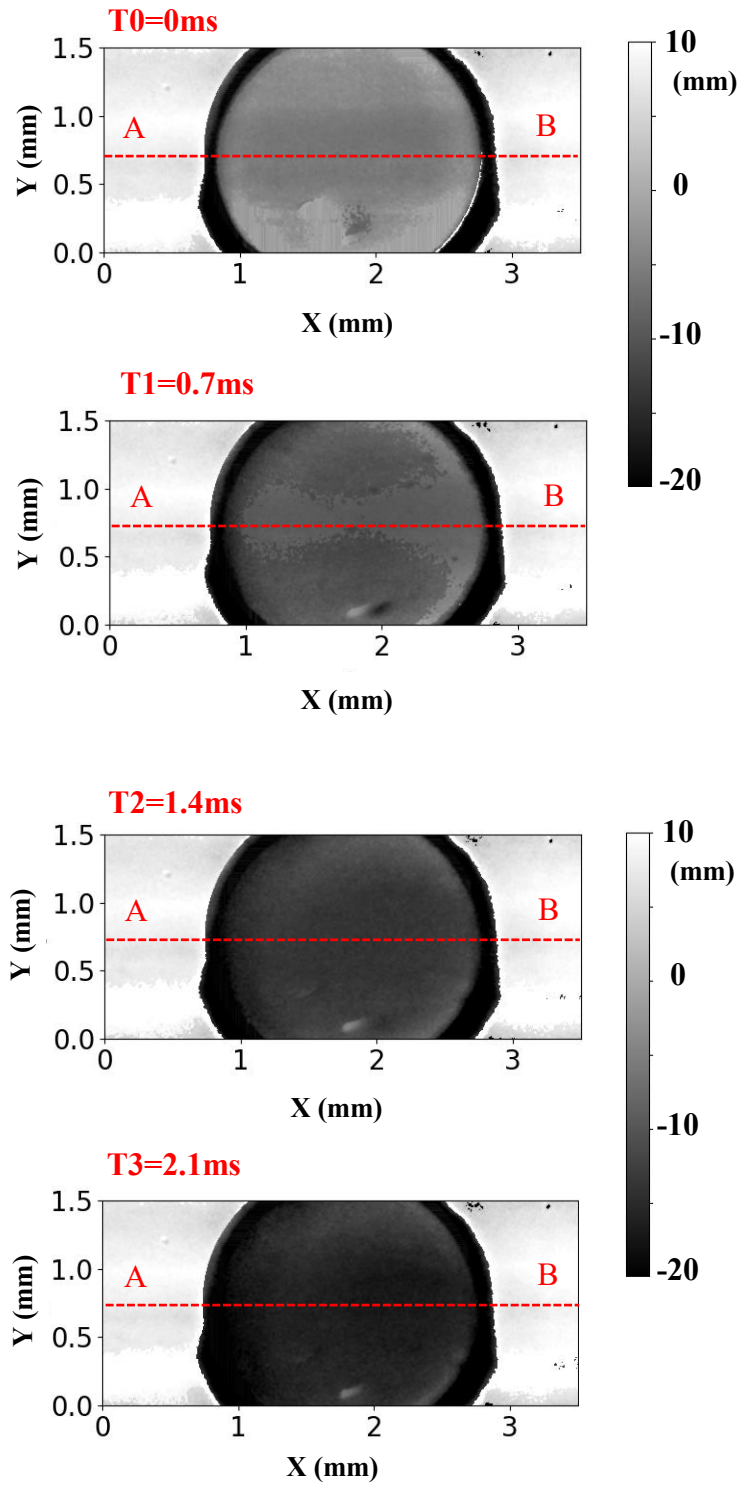


図 5.14 サンプル構成

(a) 3D profile



(b) Cross section (A-B)

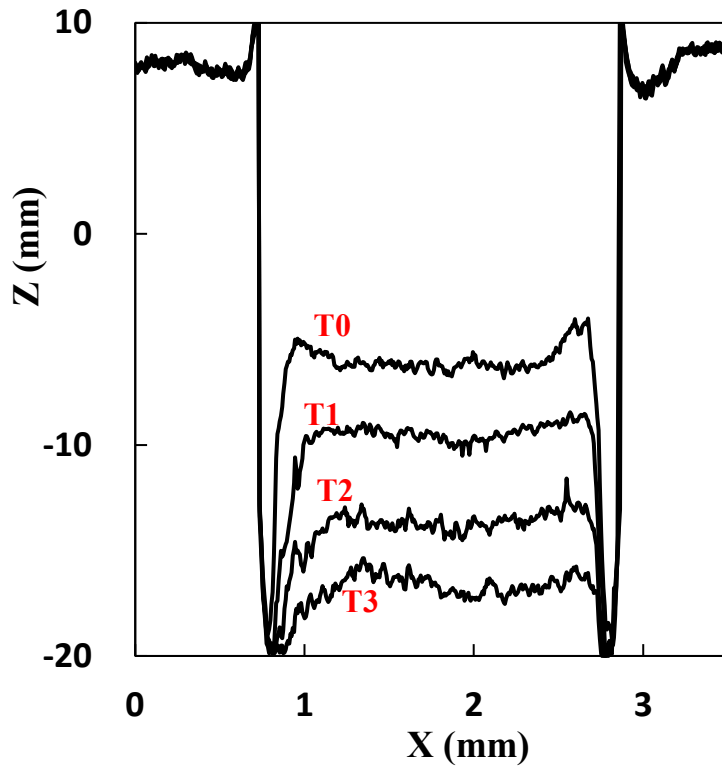


図 5.15 (a) リアルタイム三次元測定の結果 (b) 断面図 (A-B)

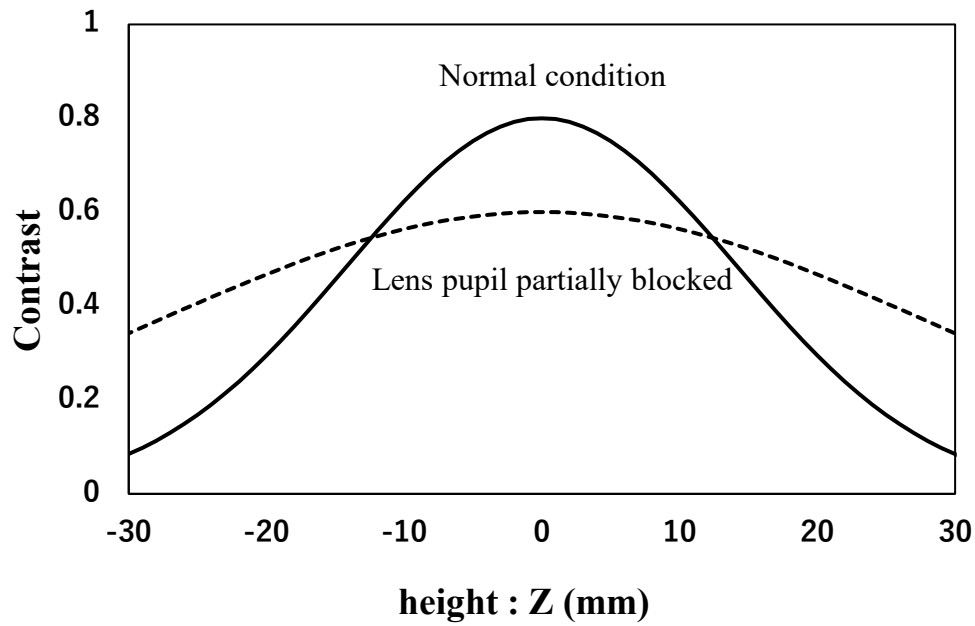


図 5.16 コントラスト分布の概念図

5.6 まとめ

第3章の偏光カメラを使った三次元計測では、コントラスト分布のピーク位置より高さが高い側の領域または低い側の領域のコントラストであるか識別することができないため、コントラスト分布の全領域で形状計測ができないという課題があった。この課題を解決するため、カラー偏光カメラと軸上色収差を用いて、2色のコントラスト分布（例えば、赤と青）のピーク位置が異なることを利用した計測システムを提案した。

本システムを用いることで測定ダイナミックレンジを2倍に拡大することができることを示した。本システムは、高速に深い穴や大きなステップのサンプルを測定するのに利点を提供する。特に、このシステムは、ヒートシンクのようなかなり深い段差を有するサンプルの測定に効果を発揮する。

本システムは、第3章のシステムと同様にアーティファクトを発生させることなく測定が可能であり、空間的に均一な偏光特性を持つサンプルに対して有効であり、ステレオ投影システムでは測定が難しい高い段差や深い穴のサンプルの測定に有利である。

第6章 結論

格子パターン投影によるフォーカス法は、オクルージョンが発生しないという利点があるが、一般的には位相が 90° シフトした縞パターンを4回投影する必要があるため、リアルタイム測定が困難という課題があった。この課題を解決するため、直線偏光パターン照明と偏光カメラを用いることで、縞パターンの位相が 90° シフトした4種類の縞パターンを同時計測することができるシステムを提案し、リアルタイム三次元計測を実現した。

本論文の第2章で前述のシステムの測定原理を示し、原理的にリアルタイム計測が可能であることを示した。第3章では、測定原理の根拠となる測定結果を示し、ステップサンプルを用いてリアルタイムによる三次元計測結果を示した。第4章では、位相変化が生じるアクリルシャーレー内のサンプルや保護フィルムが貼られたサンプルの三次元計測を実現するため、フルストークスカメラを用いたシステムを提案し、二種類のサンプルでリアルタイムによる三次元計測結果を示した。第5章では、測定ダイナミックレンジを拡大するため、照明光学系の軸上色収差とカラー偏光カメラを用いた計測システムを提案した。ステップサンプルを用いてコントラスト分布のピーク位置を跨いだ配置で三次元計測可能なことを示し、測定範囲を約2倍に拡大できることを示した。

本システムは、異なる表面形状、例えば、鏡面と粗面などの表面が混在する場合には測定できないという課題はあるが、オクルージョンが発生しないという利点とリアルタイム計測できるという利点があるため、工場の検査装置への応用が期待できる。また、深い穴や高い段差を有するサンプルを高速に形状計測することができるため、特に、ヒートシンク、半導体バンプのマスクや銅ピラーの高速計測に応用できる。

References

1. Graebbling, P., Lallement, A., Zhou, D. and Hirsch, E., "Optical High-precision Three-dimensional Vision-based Quality Control of Manufactured Parts by Use of Synthetic Images and Knowledge for Image-data Evaluation and Interpretation," *Applied Optics*, 41-14, 2627–2643 (2002).
2. 谷内田正彦, "ロボットビジョンの概要と今後の展望," *日本ロボット学会誌*, Vol 10, No2, pp. 140-145 (1992)
3. 須田義大, 青木啓二, "自動運転技術の開発動向と技術課題," *情報管理* 57 (11), 809-817 (2005).
4. Sitnik, R. and Kujawińska, M., "From Cloud-of-point Coordinates to Three-dimensional Virtual Environment: the Data Conversion System," *Optical Engineering*, 41-2, 416–427 (2002).
5. 秋本圭一, 服部進, 大西有三, 三浦悟, "画像計測法のトンネル内空形状計測への応用," *土木学会論文集 No. 687/III-56*, 289-301 (2001)
6. 原田孝仁, 阿部芳久, 矢橋暁, "画像を用いた3次元形状計測技術とその応用," *日本写真学会誌*, 67 巻 5 号, 486-4 (2004)
7. 木津良祐, "三次元ナノ構造の寸法・形状計測技術に関する調査研究," *産総研計量標準報告 Vol.9, No.4* (2018)
8. 吉澤徹, "人体形状の非接触三次元計測," *人間工学*, Vol.30, No.3 (1994)
9. 大谷幸利, "3次元計測技術," *日本画像学会誌*, 53-2, 128-135 (2014).
10. 吉澤徹編著, "最新光三次元計測," 朝倉書店 (2006).
11. Chen, F., Brown, G. M. and Song, M., "Overview of Three-dimensional Shape Measurement using Optical Methods," *Optical Engineering*, 39-1, 10–22 (2000).
12. 野村俊, "光による形状計測," *精密工学会誌*, Vol. 69, No. 9 (2003)
13. 高橋賞監修, "フォトメカニクス (光学的手法による応力・ひずみならびに変形の解析)," 山海堂(1997).
14. 松山隆司・竹村岳, "多重フォーカス画像を用いた実時間3次元距離計測," *情報処理学会論文誌*, 39-7, 2149–2158 (1998).
15. Nayar, S. K., "Shape from Focus System," *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 302–308 (1992).

16. J. Ens, P. Lawrence, "A matrix based method for determining depth from focus," Proceedings. 1991 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition
17. Murali Subbarao, Gopal Surya, "Depth from defocus: A spatial domain approach," International Journal of Computer Vision volume 13, pages271–294 (1994)
18. 徐剛, 辻三郎著, "3次元ビジョン," 共立出版 (1998).
19. Ozeki, O., Nakano, T. and Yamamoto, S., "Real-time Range Measurement Device for Three-dimensional Object Recognition," IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, PAMI-8-4, 550–554 (1986).
20. Marc Rioux, G. Bechthold, D. Taylor, and M. Duggan, "Design of a large depth of view three-dimensional camera for robot vision," Optical Engineering, 26 (12), 261245 (1987).
21. H. Gao, G. Qingyi, T. Takaki, and I. Ishii, "A self-projected light-section method for fast three-dimensional shape inspection," International Journal of Optomechatronics, 6, 289-303 (2013).
22. Livnat, A., Kafri, O. and Erez, G., "Hills and Valleys Analysis in Optical Mapping and Its Application to Moir'e Contouring," Applied Optics, 19-19, 3396–3400 (1980).
23. Gasvik, K. J., "Moir'e Technique by Means of Digital Image Processing," Applied Optics, 22-23, 3543–3548 (1983).
24. F. Kobayashi, Y. Otani, and T. Yoshizawa, "Projection type of moiré topography with frequency modulation technique using liquid crystal digital gratings," Opt. Review, 19: 54-158 (2012).
25. Meadows, D. M., Johnson, W. O. and Allen, J. B., "Generation of Surface Contours by Moir'e Patterns," Applied Optics, 9-4, 942–947 (1970).
26. S. S. Gorthi and P. Rastogi, "Fringe projection techniques: Whither we are?" Optics and Lasers in Engineering 48: 133-140 (2010).
27. 小松原良平, 吉澤徹, "縞走査を導入した格子パターン投影法," JPSE-55-10, '89-10-1817
28. 井上学, 和田俊和, "信念伝搬型位相シフト法による三次元形状計測," 画像の認識・理解シンポジウム(MIRU2011), IS3-59 : 1279-1285 (2011/07)
29. P. Kühmstedt, C. Munckelt, M. Heinze, C. Bräuer-Burchardt, and G. Notni, "3D shape measurement with phase correlation based fringe projection," Proc. SPIE, 66160B (2007).
30. Y. Xu and S. Zhang, "Uniaxial three-dimensional shape measurement with projector defocusing," Opt. Eng. 51: 023604 (2012).

31. Song Zhang, Daniel Van Der Weide, James Oliver, "Superfast phase-shifting method for 3-D shape measurement," *Optics Express* Vol. 18, Issue 9, pp. 9684-9689 (2010)
32. Yong Li, Cuifang Zhao, Yixian Qian, Hui Wang, Hongzhen Jin, "High-speed and dense three-dimensional surface acquisition using defocused binary patterns for spatially isolated objects," *Optics Express* Vol. 18, Issue 21, pp. 21628-21635 (2010)
33. Jae-Sang Hyun, George T.-C. Chiu, Song Zhang, "High-speed and high-accuracy 3D surface measurement using a mechanical projector," *Optics Express* Vol. 26, Issue 2, pp. 1474-1487 (2018)
34. 安富啓太, 川人祥二, "Time-of-Flight カメラ," *映像情報メディア学会誌*, Vol. 70, No. 6, pp. 880~885 (2016)
35. T. Spirig et al., "The lock-in CCD-two-dimensional synchronous detection of light", *IEEE J. Quantum Electron.*, 31, 9, pp.1705-1708 (1995)
36. R. Lange et al., "Solid-state time-of-flight range camera", *IEEE J. Quantum Electron.*, 37, 3, pp.390-397 (2001)
37. C.L. Niclass et al., " Design and characterization of a CMOS 3-D image sensor based on single photon avalanche diodes ", *Solid-State Circuits, IEEE J.*, 40, 9, pp.1847-1854 (2005)
38. 谷田貝豊彦, "光干渉計測法の最近の進歩," *JSPE-51-04*, 85-04-695
39. 北川克一, "光干渉法による三次元計測, 計測と制御," 第 50 卷, 第 2 号, 2011 年 2 月号
40. J. H. Bruning et al., "Digital Wavefront Measuring Interferometer for Testing Optical Surfaces and Lenses," *Appl. Opt.*, 13, 2693, (1974).
41. G. Kino: *Confocal Scanning Optical Microscopy and Related Imaging Systems*, Academic Press (1996)
42. T. Wilson and A. R. Carlini, "Size of the detector in confocal Imaging systems," *Optics Letters*, Vol.12, No.4, pp. 227~229 (1987)
43. 水谷康弘, 桑野亮一, 大谷幸利, 梅田倫弘, 吉澤徹, "可変焦点レンズを用いたフォーカス法による三次元形状計測," *精密工学会誌*, Vol. 72, No. 9 (2006)
44. Geliztle A. Parra Escamilla, Fumio Kobayashi, Yukitoshi Otani, "Three-Dimensional Surface Measurement based on the Projected Defocused Pattern Technique Using Imaging Fiber Optics," *Opt. Comm.*, 390, 57-60 (2017)

45. Yasuhiro Mizutani, Ryoichi Kuwano, Yukitoshi Otani, Norihiro Umeda, Toru Yoshizawa, "Three-dimensional shape measurement using focus method by using liquid crystal grating and liquid varifocus lens," Proc. SPIE 6000, Two- and Three-Dimensional Methods for Inspection and Metrology III, 60000J (7 November 2005)
46. 砂川重信, "電磁気学 (物理テキストシリーズ 4)," 岩波書店 (1987)
47. Max Born and Emil Wolf 著, 草川徹 訳, "光学の原理," 東海大学出版会 (2005)
48. 左貝潤一, 光学の基礎, コロナ社 (1997)
49. Dennis Goldstein, "Polarized Light Second Edition, Revised and Expanded," CRC Press (2003)
50. Michael Bass , "Handbook of Optics, Volume 2, Chapter 22" , McGraw-Hill (1994)
51. 柴田秀平, 小林富美男, 茨田大輔, 大谷幸利, "偏光パターン投影による同軸三次元形状計測," 2014 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, 109-110 (2014)
52. 大谷幸利, 前田勇樹, 柴田秀平, ネイザン・ヘーガン, "偏光パターン投影による三次元形状計測," 光技術コンタクト, 58 巻 6 号, p32-39 (2020)
53. David Rebhan, Maik Rosenberger, Gunther Notni, "Principle investigations on polarization image sensors", Proceedings Volume 11144, Photonics and Education in Measurement Science 2019
54. Lawrence B. Wolff, "Applications of Polarization Camera Technology," IEEE Intelligent Systems, vol. 10, pp. 30-38, October 1995
55. Viktor Gruev, Rob Perkins, and Timothy York, "CCD polarization imaging sensor with aluminum nanowire optical filters," Optics Express Vol. 18, Issue 18, pp. 19087-19094 (2010)
56. M. Takeda, T. Aoki, Y. Miyamoto, H. Tanaka, R. Gu, and Z. Zhang, "Absolute three-dimensional shape measurements using coaxial and coimage plane optical systems and Fourier fringe analysis for focus detection," Optical Engineering 39: 61-68 (2000)
57. S. Shibata, M. Suzuki, N. Hagen, and Y. Otani, "Video-rate full-Stokes imaging polarimeter using two polarization cameras," Optical Engineering, 58(10), 103103 (2019)
58. X. Tu, O. J. Spires, X. Tian, N. Brock, R. Liang, and S. Pau, "Division of amplitude RGB full-Stokes camera using micro-polarizer arrays," Optics Express, 25(26), 33160-33175 (2017)
59. Missael Garcia, Christopher Edmiston, Radoslav Marinov, Alexander Vail, and Viktor Gruev, "Bio-inspired color-polarization imager for real-time in situ imaging," Optica Vol. 4, Issue 10, pp. 1263-1271 (2017)

60. M. A. A. Neil, R. Juskaitis, and T. Wilson, "Method of obtaining optical sectioning by using structured light in a conventional microscope," *Optics Letters*, 22, 1905-1907 (1997).
61. Mitsuhiro Ishihara, Yasuo Nakazato, Hiromi Sasaki, Masahito Tonooka, Masayuki Yamamoto, Yukitoshi Otani, Toru Yoshizawa," Three-dimensional surface measurement using grating projection method by detecting phase and contrast," *Optical Engineering for Sensing and Nanotechnology (ICOSN '99)*, Proceedings Volume 3740 (1999).
62. T. Yoshizawa, T. Shinoda, and Y. Otani, "Uniaxial rangefinder using contrast detection of a projected pattern," *Proceedings of SPIE*, 4190, 115-122 (2001).
63. J. L. Flores, J. A. Ferrari, G. García Torales, R. Legarda-Saenz, and A. Silva, "Color-fringe pattern profilometry using a generalized phase-shifting algorithm," *Appl. Opt.* 54: 8827–8834 (2015).
64. Y. Maeda, S. Shibata, N. Hagen, and Y. Otani, "Single shot 3D profilometry polarization pattern projection," *Applied Optics*, 59(6), 1654-1659 (2020)
65. Y. Maeda, S. Shibata, N. Hagen, and Y. Otani, "Birefringence compensation for single-shot 3D profilometry using a full-Stokes imaging polarimeter," *Optical Review*, 28, 425-433 (2021).
66. Shuhei Shibata, Nathan Hagen, Shuichi Kawabata, and Yukitoshi Otani, "Compact and high-speed Stokes polarimeter using three-way polarization-preserving beam splitters," *Applied Optics*, 58(21), 5644-5649 (2019)

謝辞

本研究は国立大学法人宇都宮大学オプティクス教育研究センターにおいて、指導教官である大谷幸利教授の指導の下で行われました。

本研究の遂行と本論文の作成にあたり、3年にわたり研究の考え方、進め方をご教授頂き、また研究遂行を導いて下さった指導教官の大谷幸利教授に深く感謝申し上げます。研究の遂行や論文の執筆にあたり、様々な視点からご助言を頂きましたネイザン・ヘーガン准教授に深く感謝申し上げます。ご多忙の中、本論文の審査と貴重なご助言を賜りました早崎芳夫教授、山本裕紹教授、藤村隆史准教授に深く感謝申し上げます。学位取得にあたり、副専門分野のご指導を賜りました阿山よしみ教授に深く感謝申し上げます。実験のサポートだけでなく、研究の方向性に関する貴重なご助言を頂いた柴田秀平さんに深く感謝申し上げます。研究活動に関し、種々のご協力を頂いた大谷研究室の修了生・卒業生・在学生および関係者の皆様方に深く感謝申し上げます。大谷研究室の皆様のおかげで、社会人でありながら楽しい学生生活を送ることができました。

研究が山場を越えた時や学会発表が終わったときに、食事に連れて行って頂き、色々な助言や心構えをご教授して頂いた柳道寿主幹研究員（キャノン株式会社）に深く感謝申し上げます。博士課程進学を後押しして頂いた石部芳浩氏（元キャノン株式会社）や猪子和宏室長（キャノン株式会社）を始めとするキャノン株式会社の関係者の皆様方に深く感謝申し上げます。

博士課程進学を応援して下さった友人、親族の皆様には深く感謝申し上げます。最後に、忙しいときでも陰からサポートしてくれた妻に深く感謝申し上げます。

研究業績

原著論文

1. Y. Maeda, S. Shibata, N. Hagen, and Y. Otani, “Single shot 3D profilometry by polarization pattern projection,” *Applied Optics*, 59(6), 1654-1659 (2020).
2. Y. Maeda, S. Shibata, N. Hagen, and Y. Otani, “Birefringence compensation for single-shot 3D profilometry using a full-Stokes imaging polarimeter,” *Optical Review*, 28, 425-433 (2021).
3. Y. Maeda, S. Shibata, N. Hagen, and Y. Otani, “Single-shot 3D profilometry using color polarization imaging polarimeter,” *Optical Engineering*. (投稿中)

国際学会発表 * 発表者

1. Y. Maeda*, S. Shibata, N. Hagen, and Y. Otani, “Single shot 3D profilometry by projecting polarization pattern,” *Optical Technology and Measurement for Industrial Applications Conference* (April 2019).

国内学会発表 * 発表者

1. 前田勇樹*, 柴田秀平, 小林富美男, ネイザン・ヘーガン, 大谷幸利, “偏光パターン投影によるスナップショット三次元形状計測,” 第 62 回光波センシング技術研究会, 2018 年 12 月
2. 前田勇樹*, 柴田秀平, ネイザン・ヘーガン, 大谷幸利, “偏光パターン投影による三次元形状計測,” 日本光学会年次学術講演会, *Optics & Photonics Japan 2019*, 2019 年 12 月
3. 前田勇樹*, 柴田秀平, ネイザン・ヘーガン, 大谷幸利, “フルストークスカメラによる瞬間三次元形状計測,” 日本光学会年次学術講演会, *Optics & Photonics Japan 2020*, 2020 年 11 月
4. 前田勇樹*, 柴田秀平, ネイザン・ヘーガン, 大谷幸利, “カラー偏光カメラによる瞬間三次元計測,” 第 68 回応用物理学会春季学術講演会, 2021 年 3 月
5. 前田勇樹*, 柴田秀平, ネイザン・ヘーガン, 大谷幸利, “カラー偏光カメラによる瞬間三次元計測,” 第 82 回応用物理学会秋季学術講演会, 2021 年 9 月

その他

1. 大谷幸利, 前田勇樹, 柴田秀平, ネイザン・ヘーガン, “偏光パターン投影による瞬間三次元形状計測,” *光技術コンタクト*, 58 巻 6 号, p32-39 (2020)