

博士學位論文

近接する2波長を用いたデジタルホログラフィによる
はんだバンプの瞬時撮像3次元形状計測

Instant imaging of solder bumps by digital holography
using two close wavelengths 3D shape measurement

国立大学法人宇都宮大学 大学院工学研究科
システム創生工学専攻

157102Y

石垣裕之

目次

第1章 序論.....	4
1.1 研究背景.....	4
1.2 研究目的.....	5
1.2.1 バンプの3次元計測に要求される条件.....	5
1.2.2 マイクロバンプの3次元計測の課題.....	6
1.2.3 課題の解決方法.....	10
1.3 本論文の構成.....	11
第2章 デジタルホログラフィによる形状計測法.....	12
2.1 デジタルホログラフィの基本原理.....	12
2.1.1 ホログラフィ.....	12
2.1.2 デジタルホログラフィ.....	14
2.2 干渉像記録プロセス.....	14
2.3 ホログラム生成プロセス.....	15
2.3.1 フーリエ変換法.....	15
2.3.2 位相シフト法.....	16
2.3.3 単一露光によるホログラムの生成.....	18
2.3.4 ホログラム生成手法の比較.....	19
2.4 ホログラム再生プロセス.....	20
2.4.1 フレネル回折計算.....	20
2.4.2 角スペクトル伝播計算.....	22
2.4.3 光伝搬計算の離散表現.....	22
2.5 物体情報取得プロセス.....	23
2.5.1 物体の形状計測.....	23
2.5.2 2波長法による物体形状計測.....	24
第3章 近接2波長を用いた瞬時撮像デジタルホログラフィ.....	26
3.1 テスト装置の構成.....	26
3.2 カメラアライメント.....	28
3.2.1 水平方向 (X-Y 方向) アライメント.....	29
3.2.2 光軸方向 (Z 方向) アライメント.....	32
3.3 平面計測.....	33
3.4 波長を超える高さ計測の検証.....	35
第4章 近接2波長を用いた瞬時撮像並列位相シフトデジタルホログラフィ.....	37
4.1 並列位相シフトデジタルホログラフィ.....	37
4.1.1 偏光マイケルソン干渉計.....	37

4.2 偏光イメージセンサを用いた並列位相シフト法	38
4.2.1 偏光イメージセンサの構成	38
4.2.2 偏光イメージセンサのキャリブレーション	41
4.3 テスト装置の構成	46
4.4 バンプ計測の結果	48
第5章 完全対向設置	54
5.1 完全対向設置（マイケルソンタイプ）	54
5.2 完全対向設置（マッハ・ツェンダータイプ）	58
5.3 テスト装置の構成	60
5.4 段差ミラーの計測結果	62
第6章 結論	65
謝辞	67
参考文献	68
研究業績	72
査読付き学术论文（国際誌）	72
国際会議発表	72
国内会議発表	72
研究業績（予定）	73
査読付き学术论文（国際誌）	73

第1章 序論

1.1 研究背景

近年、高度な自動化やAIが急速に発展し、私たちの日常生活への浸透が進んでいる。このため、日常的に使用する電子機器端末（スマートフォンやカーナビゲーションシステム等）に対し、複雑で膨大な量の計算を高速に処理する要求が高まっている。この要求を満足するため、演算を担う半導体デバイスに対して小型化、高性能化の要求が増大している。しかし、半導体デバイスの心臓部である半導体チップの小型化、高性能化は多大な時間とコストを要するため、図 1.1 のように複数種類の半導体チップをシリコンインターポーザに搭載することで高性能化を図るケースが増えている。

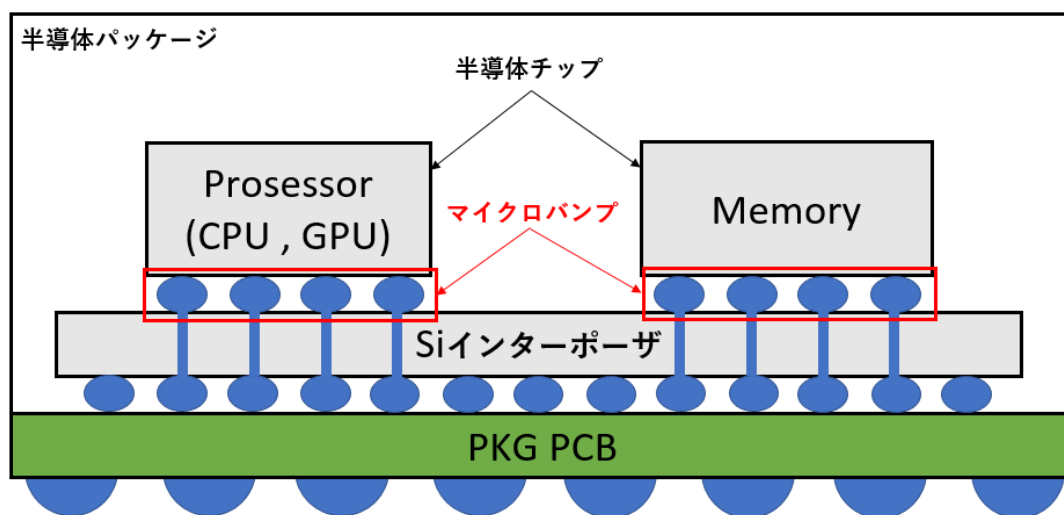


図 1.1 半導体パッケージの例

半導体チップとシリコンインターポーザを接合するのは、はんだバンプ（はんだバンプの中でも直径が $20\mu\text{m}$ 程度以下の微細なものをマイクロバンプと呼ぶことがあるが、以下では単にバンプと呼ぶ）と呼ばれる表面が鏡面の半球状の金属突起である。半導体チップまたはシリコンインターポーザのどちらか、または両方の面に数十 μm ピッチで多数配置され、両者を接合する（図 1.2）。そのため、数ミリ角の半導体チップであっても数万個のバンプがシリコンインターポーザとの間に形成される。ここで、半導体チップとシリコンインターポーザは共に平面であるため、接合前のバンプの高さの均一性が重要となる。従って、バンプの高さを高速に計測できることは半導体デバイスの製造過程において非常に重要なプロセスである。

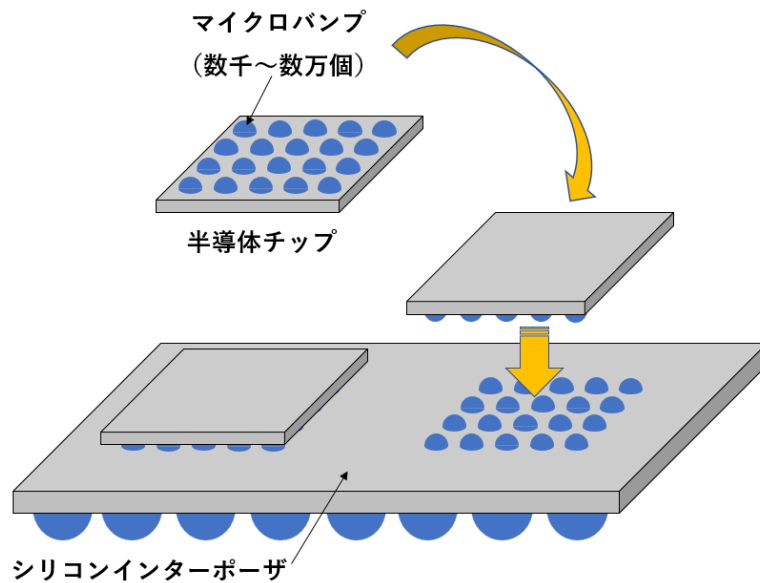


図 1.2 バンプによる接合の様子

1.2 研究目的

今後ますます需要の拡大が予想される半導体産業において、その製造プロセスで重要な役割を担うバンプ検査は 2 次元検査が主流である。高さ方向を含めた 3 次元による全数検査は行われておらず、抜き取り検査が行われているのが現状である。その理由の一つは生産速度に対応可能なインライン検査装置が市場に無いからである。このような背景を鑑み、本研究はバンプを高速、且つ高精度に検査するシステムを構築することを目的とした。以下に、バンプの計測に要求される条件を示し、バンプ計測に要求される条件から一般的な計測システムが直面する課題を明確にし、その解決方法について述べる。

1.2.1 バンプの 3 次元計測に要求される条件

1 つ目の条件として、鏡面計測が可能であることが挙げられる。バンプの形成方法は種々あるが、メッキ処理や溶融処理を経るため、表面は鏡面となっていることが一般的である。このため、一般的な 3 次元計測、すなわち、計測対象の表面に能動的に投影されたパターン光や、周囲環境から照射される光による拡散反射光を撮像し、三角測量の原理で高さを求める方法は、鏡面の拡散光を得ることが困難なため、実現が難しい。従って、鏡面計測に適した計測方法が必要である。

2 つ目の条件は検査速度である。生産現場では生産性を重視するため、高速な計測が要求

される。現時点での生産速度は目安として 100WPH (WPH : 1 時間当たりの 300mm ウェーハの生産可能枚数) であるが、この生産速度に間に合い、全てのバンプの高さを検査可能な検査装置は、現時点では市場に存在しない。従って、現在バンプの高さ検査は、抜き取りによる検査が行われているが、全数検査可能な計測速度が要求として存在する。

3 つ目の条件は、耐振動性である。生産現場は実験室の環境とは異なり、外的要因による振動が存在する。このため、複数回撮像するシステムや長い露光時間を要するシステムは振動の多い環境では、撮像間に計測対象の状態が変わる可能性があるため、瞬時撮像が望ましい。

1.2.2 マイクロバンプの 3 次元計測の課題

前節で述べた 3 つの要求事項を以下に示す。

- ・鏡面計測可能なシステムであること
- ・高速検査が可能であること
- ・耐振動性が高いこと

これらの要求事項を満たすための課題は以下の 3 点である。

- ・干渉計測 (デジタルホログラフィ) を基本とすること
- ・ダイナミックレンジがバンプの高さ以上 (30 μ m 程度) あること
- ・複数回の撮像を行わない瞬時撮像システムであること

これらの課題に至る理由について以下に述べる。

図 1.3 は画像処理を使った非接触 3 次元計測の分類を示したものである [1,2].

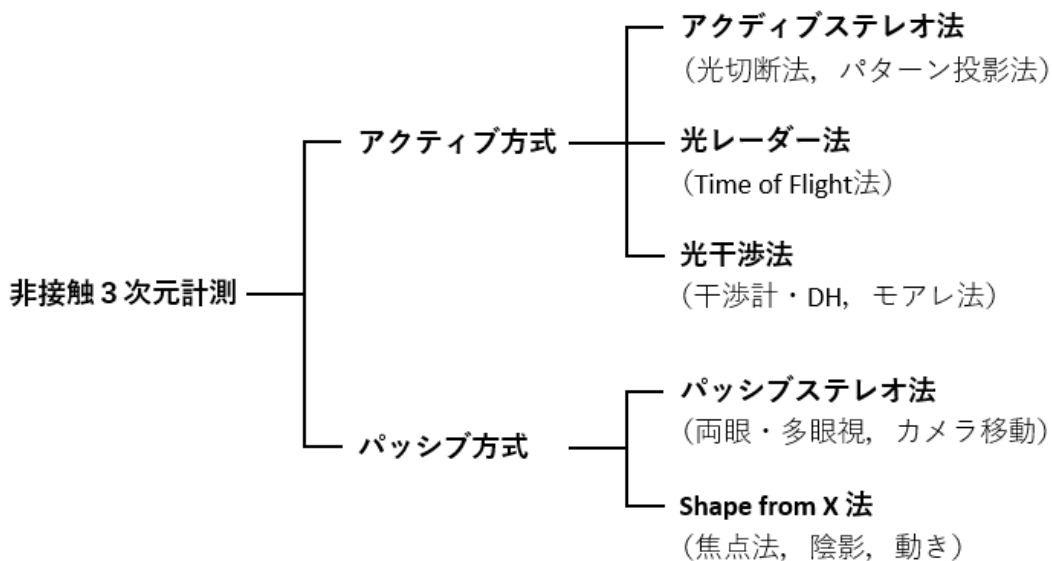


図 1.3 非接触 3 次元計測の分類

非接触 3 次元計測は大きく次の 2 つに分けられる。

- ・アクティブ方式：計測装置から対象物に電磁波などのエネルギーを照射し，対象物の反応から位置や形状を計測する手法。
- ・パッシブ方式：計測装置は計測対象から得られる光などのエネルギーだけを受けて対象物の位置や形状を計測する手法。

アクティブ方式は計測環境と計測対象が限定されることが多いが，高速，高精度の計測が可能である。

一方パッシブ方式は計測対象に対して計測器から影響を与えることが無く，画像データを取得できれば計測可能である。特別な光源は不要だが，周囲環境の影響を受けやすく，計測精度が低いという課題がある。パッシブ方式の代表的な手法としてステレオ法[3,4]が挙げられる。ステレオ法は複数台のカメラにより，同一の計測対象を撮像し，得られた複数枚の画像間で対応する点を検出し，カメラの位置と対応する点の位置関係から 3 次元的位置を求め，3 次元形状を取得する手法である。この手法は対応する点を探すプロセスが困難であり，計測対象が特徴の無い平面などの場合は計測が不可能となる。一方，アクティブ方式の一つであるパターン投影法は特殊な光源を用いて能動的にパターンを作り出すため，前述の問題を解決することができる。しかし，いずれの場合も計測物表面で拡散反射する光を撮像して計測する手法であるため，拡散反射が期待できない鏡面は安定した計測が困難である。

そこで、鏡面や透明な計測物に対応でき、高速、高精度な 3 次元計測が可能な手法として光干渉法を使ったデジタルホログラフィ[5-8]がある。干渉縞から得られるホログラムに対して光伝搬計算を行うことで、光軸方向の任意の位置の光波を再生できるので、バンプ頂点部と素地部の光波を再生することで高さを計測することが可能である。しかし、バンプ頂点部と素地部の位置（高さ）がそもそも不明である。バンプを横方向から観察することで、単一の波長で使用する波長を超える高さを 1 回の撮像で計測する方法が提案されているが[9]、この手法は複数のバンプを同時に計測することが困難である。また、計測対象の表面が滑らかであれば、位相連結[10,11]によりダイナミックレンジを超える高さを計測することが可能だが、図 1.4 に示すように半球状の突起であるバンプを計測する場合、バンプ周辺部に近づくにつれバンプ表面の傾斜角度が大きくなり、物体光を撮像することが困難となる。このため、バンプ高さを計測するためにはバンプ中央部と素地部との間で段差計測が必須となる。従って、バンプの高さを超えるダイナミックレンジを持つ干渉計測が必要となる。

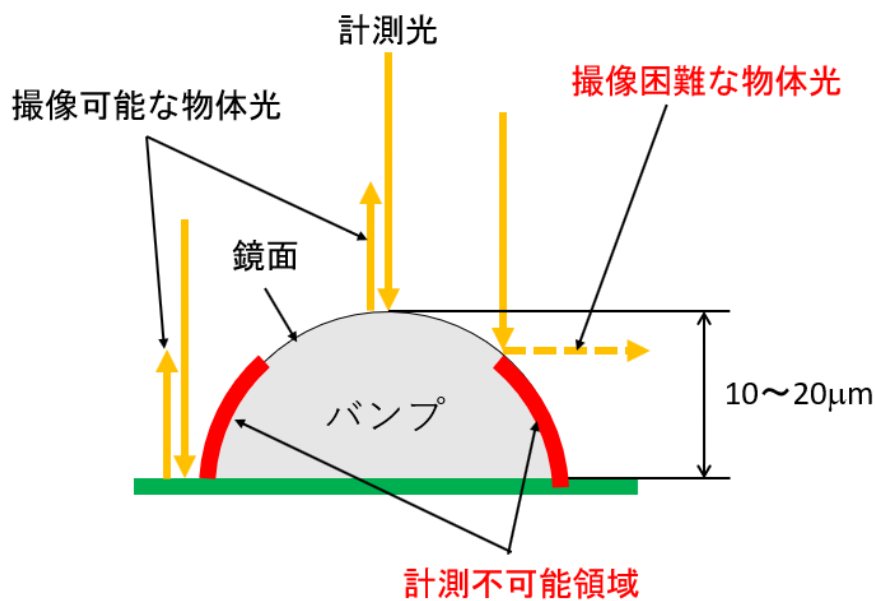


図 1.4 バンプ周辺部の計測光

干渉計測のダイナミックレンジを拡大する方法として 2 波長法がある[12-15]。2 波長法によれば、使用する 2 つの波長を合成し、1 つの大きな波長（合成波長）を作り出すことができる。元になる 2 つの波長を λ_1, λ_2 ($\lambda_1 < \lambda_2$) とすると、合成波長 Λ は次式で表される。

$$\Lambda = \lambda_1 \lambda_2 / (\lambda_2 - \lambda_1). \quad (1.1)$$

上式から分かるように合成波長は使用する 2 つの波長の差に大きく影響を受ける。30 μm のダイナミックレンジを確保する場合、計測光に可視光線を使用した反射型の干渉計の場合

合、波長差は2~4nmにする必要がある。ここで、2波長法の構成について検討する。図1.5は2波長法の一般的な構成を示した図である。

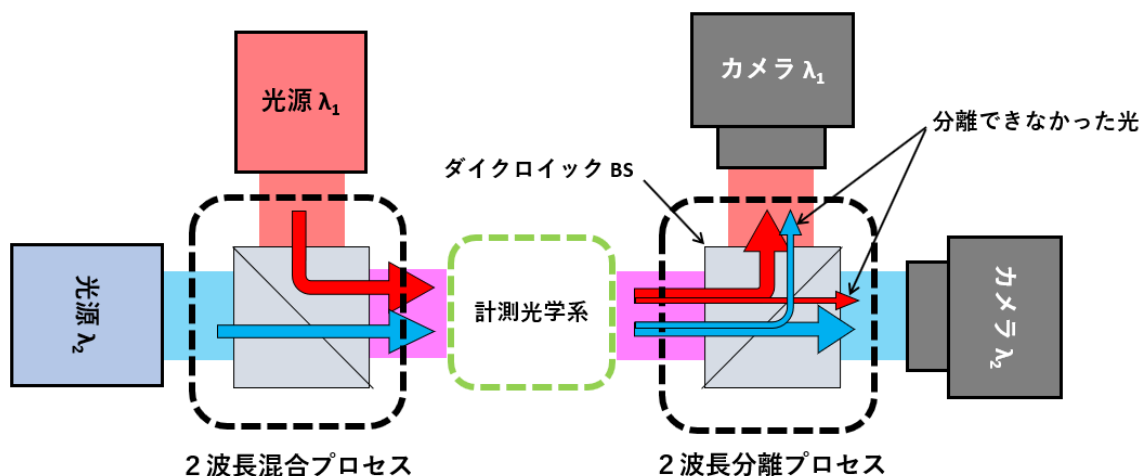


図 1.5 2波長法の構成例

2波長計測におけるプロセスの概要は下記の通りである。

- ・2つの光源からの光を混合する
- ・混合した光を計測光学系（干渉光学系）へ入射する
- ・計測物からの戻り光（計測光）が計測光学系から出射される
- ・計測光を2つの波長に分離する
- ・分離した光を別々の撮像装置で撮像する
- ・それぞれの波長の計測結果から2波長合成の計測結果を得る

上記のプロセスにおいて、2つの波長の分離プロセスに問題がある。理由は、波長分離プロセスの波長選択性はダイクロイックBSなどの光学部品の性能に依存するため、波長差が小さくなると波長選択性が悪化するためである。一般的な光学フィルタでは本研究で使用する2~4nmの波長差の光を高い選択性を持って分離することができない。短時間で光源の波長をわずかに変化させ、2回撮像する手法も提案されている[16,17]。しかし、図1.6に示すように、複数回撮像するシステムでは撮像間に計測対象の状態が変化する恐れがあり、実験室環境とは異なる生産現場では精度悪化の要因になり得る。

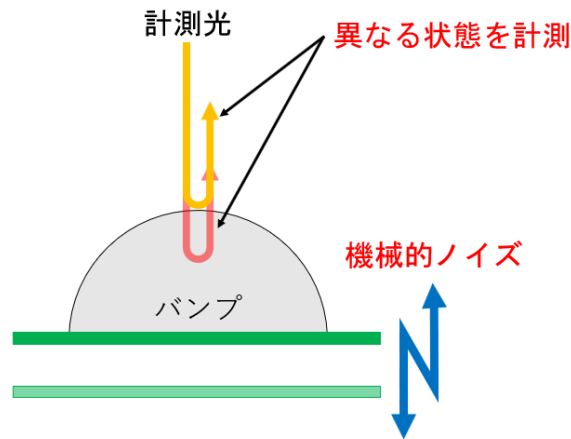


図 1.6 複数回撮像時の問題点

以上の点から、バンプ計測に必要な 3 つの条件を満たす計測方法は前述の 3 点を同時に満たすシステムである必要がある。

1.2.3 課題の解決方法

前述の課題を解決する方法として、図 1.7 の光学系を提案する。

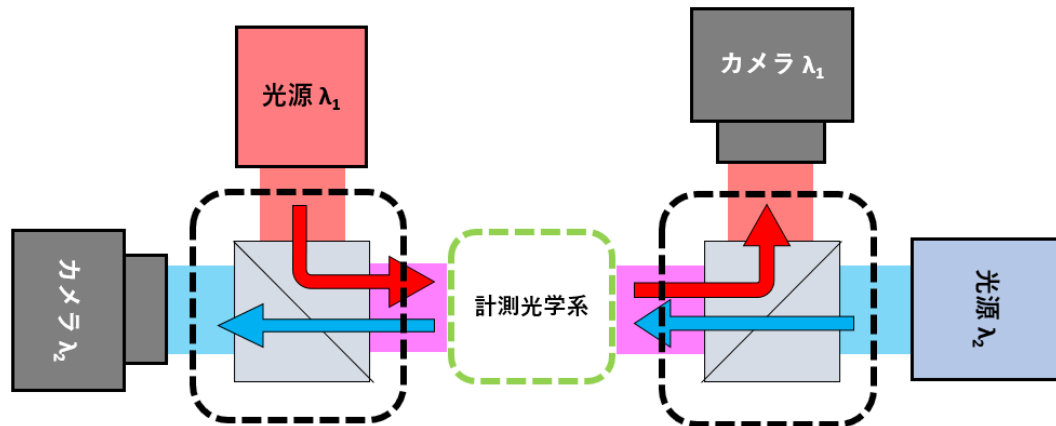


図 1.7 提案の光学系

図 1.5 (一般的な 2 波長の構成) と異なる点は、 λ_2 のカメラと光源の位置が逆になっている点である。こうすることでシステムの中で 2 つの波長を直接的に混合・分離するプロセス自体が無くなるため、どのような波長差であっても波長選択性が悪化しない。また、このシステムは特殊な光学部品を使わないため、システム全体を安価に構築することが可能である。このことは工業的な利用を考えた際、非常に有利な点である。以降、本論文において、この光学系を対向設置と呼ぶ。

1.3 本論文の構成

第1章では研究背景とその目的を述べ、バンプ計測における課題を明らかにし、課題を解決するための新規光学系を示した。第2章では提案の光学系と組み合わせるデジタルホログラフィの基本プロセスの説明と、デジタルホログラフィを用いた3次元計測の方法について説明する。第3章では提案の光学系と瞬時撮像デジタルホログラフィによるテスト装置を示し、基本的な性能評価のテスト結果について述べる。第4章では偏光イメージセンサを用いる並列位相シフトデジタルホログラフィについて述べ、これを実装したテスト装置によるバンプ計測結果を示す。第5章では偏光を利用しない対向設置の光学系を新たに提案し、その基本性能の評価結果について示す。第6章に結論を示す。

第2章 デジタルホログラフィによる形状計測法

2.1 デジタルホログラフィの基本原理

デジタルホログラフィによる3次元形状計測法とは、ホログラフィの原理を利用した3次元形状計測法である。ホログラムとして記録された物体からの光（物体光）を数値的に再生することで、物体光の振幅と位相を得ることができる。この位相情報から物体の3次元形状を知ることができる。

ホログラフィという言葉は広い意味を持っているが、ここではD.Gaborによって発明された光学研究者が考えるホログラフィ指している。まず、元来のホログラフィについて説明する。

2.1.1 ホログラフィ

ホログラフィ[18]には図2.1に示すように記録, 現像, 再生という3つのプロセスがある。物体からの光を記録媒体に記録するという広い意味では写真と同じだが、写真は物体からの光がフィルムに照射された際、光の強度しか記録することができない。しかし、ホログラフィは物体からの光の振幅と位相を再生可能な状態で記録できる点が大きく異なる。以下に各プロセスについて説明する。

①記録プロセス

レーザーから出射された光をハーフミラー等で分割し、一方を記録したい物体に照射し、物体からの反射、散乱、透過してきた物体光を得る。分割したもう一方の光を参照光として、物体光と共に記録媒体に照射すると、記録媒体に物体光と参照光の干渉縞（ホログラム）が記録される。

②現像プロセス

記録したホログラムを化学的な処理によって固定化する。

③再生プロセス

記録媒体に記録されたホログラムに参照光と同じ光を照射することで、ホログラムから物体光と同じ波面が再生される。

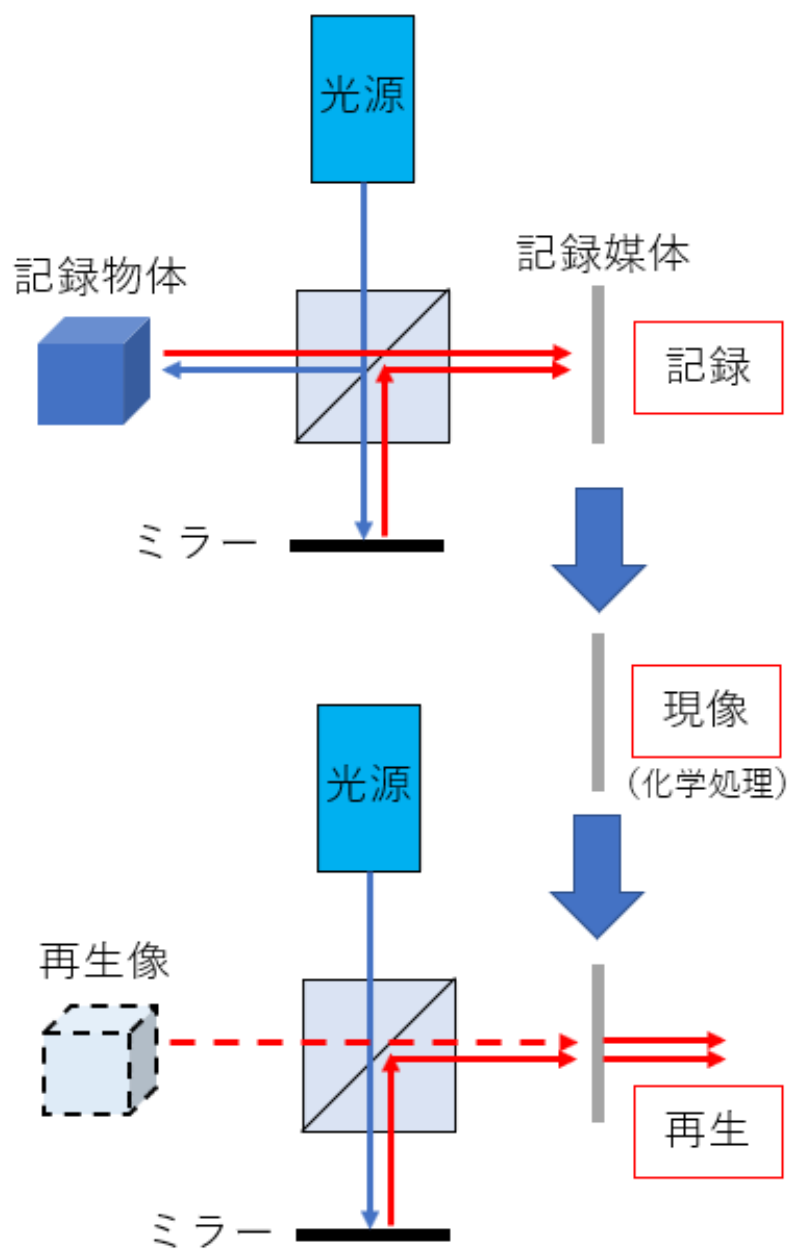


図 2.1 ホログラフィの記録，現像，再生

以上のプロセスを経て，物体光を再生することができる。ただし，ここでの再生とは実際に物体光がホログラムから発せられることであり，このままではそこに物体があったときと状況は変わらない。3次元形状計測を行うためには以下で説明するデジタルホログラフィによって，物体光を数値データとして取得することが必要である。

2.1.2 デジタルホログラフィ

デジタルホログラフィは前述した元来のホログラフィと基本的には同じプロセスを持っているが、最大の違いは記録媒体として CCD や CMOS イメージセンサが使われる点である。物体光と参照光の干渉によってイメージセンサ面上に生じた干渉像は、イメージセンサにより光電変換され、電気信号としてコンピュータの記憶装置や各種メディアに記録されることになる。このことはホログラムを得ることを容易にし、時間的に変化するホログラムを連続的に得ることも可能としている。もう一つの相違点は再生像の位相や振幅データから物体の情報を取得することができることである。これを新たなプロセスと考えると、デジタルホログラフィは図 2.2 のように干渉像記録プロセス、ホログラム生成プロセス、ホログラム再生プロセス、物体情報取得プロセスの 4 つのプロセスから構成されると言える。次項で各プロセスについて説明する。

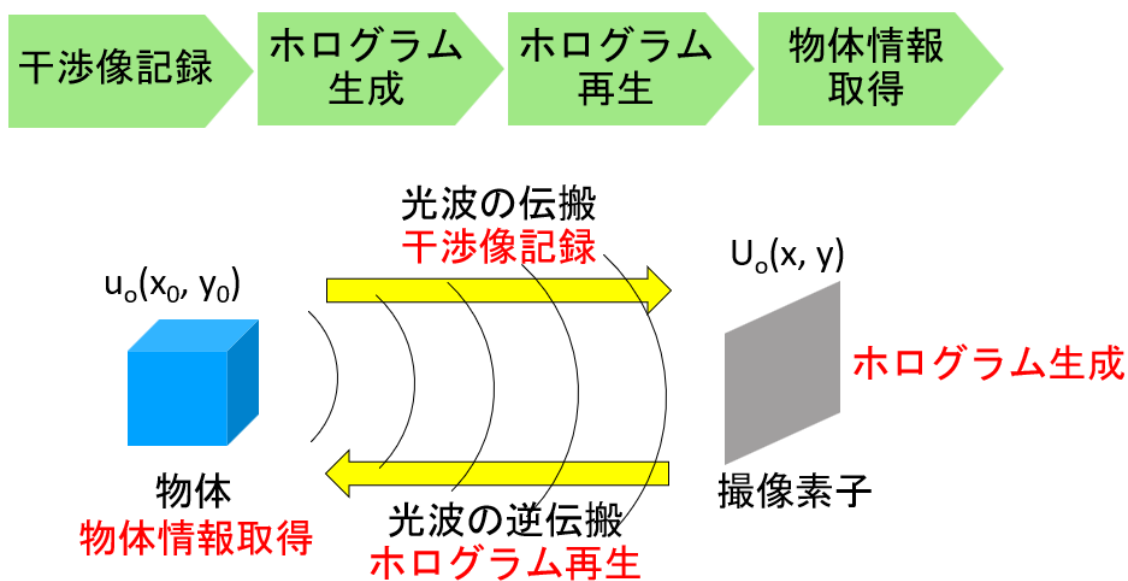


図 2.2 デジタルホログラフィのプロセス

2.2 干渉像記録プロセス

光源からの光をハーフミラー等で分割し、一方を物体に照射する。そこからの反射・透過・散乱光と、分割したもう一方の光（参照光）をイメージセンサに照射し、干渉像をイメージセンサ上に生成する。イメージセンサの 1 ピクセルごとの輝度を干渉像の強度として数値化し、コンピュータのハードディスクやメモリ、各種記録メディアに保存する。物体光と参

照光の干渉像を記録するため、光源にはコヒーレンスの高いレーザーなどが使用されることが多いが、ハロゲンランプや発光ダイオード等の低コヒーレンス光源も利用されており、多様な方式が考案されている。また、詳細は省くが、光源と物体の配置によってガボール型、インライン型、フレネル型、フーリエ型、イメージプレーン型等に分類できる。

ここで、イメージセンサ上での物体光と参照光の複素振幅分布を $U_o(x, y)$ 、 $U_r(x, y)$ とすると、それぞれ以下のように表される。

$$U_o(x, y) = a_o(x, y) \exp[i\phi_o(x, y)], \quad (2.1)$$

$$U_r(x, y) = a_r(x, y) \exp[i\phi_r(x, y)]. \quad (2.2)$$

ここで、 $a_o(x, y)$ と $a_r(x, y)$ はイメージセンサ上での物体光と参照光の振幅分布を、 $\phi_o(x, y)$ と $\phi_r(x, y)$ は位相分布を表している。イメージセンサ上でこれらが干渉しその時得られる干渉縞 $I(x, y)$ は次式のように表される。

$$\begin{aligned} I(x, y) &= |U_o(x, y) + U_r(x, y)|^2 \\ &= |U_o(x, y)|^2 + |U_r(x, y)|^2 + U_o^*(x, y)U_r(x, y) + U_o(x, y)U_r^*(x, y). \end{aligned} \quad (2.3)$$

式(2.3)に式(2.1)と式(2.2)を代入すると、

$$\begin{aligned} I(x, y) &= a_o^2(x, y) + a_r^2(x, y) \\ &\quad + 2a_o(x, y)a_r(x, y) \cos(\phi_o(x, y) - \phi_r(x, y)), \end{aligned} \quad (2.4)$$

となる。第1項及び第2項は干渉縞の平均的な強度を表し、直流成分と呼ばれるものである。特に、第1項は物体光のみがイメージセンサに到達したときの強度に等しく、通常の写真撮影の際の輝度分布と考えることができる。第3項が干渉縞に相当する部分で、物体光の振幅と位相を含んでいる。

2.3 ホログラム生成プロセス

干渉像記録プロセスにより保存された干渉像からイメージセンサ面上の物体光の複素振幅像（ホログラム）を算出するプロセスである。物体光と参照光の照射の方法によりホログラムの生成方法は干渉像記録プロセスと合わせて、以下のような方法がある。

2.3.1 フーリエ変換法

図 2.3 はフーリエ変換法[19–21]によるホログラムの生成を表したものである。物体光に

対して参照光の光軸を傾ける **off-axis** 型の配置では、空間的な搬送周波数が重畳された状態で干渉縞画像 $I(x, y)$ がイメージセンサに記録される。搬送波の周波数は使用する光源の波長と、参照光と物体からの光の進行方向のなす角度によって決まる。

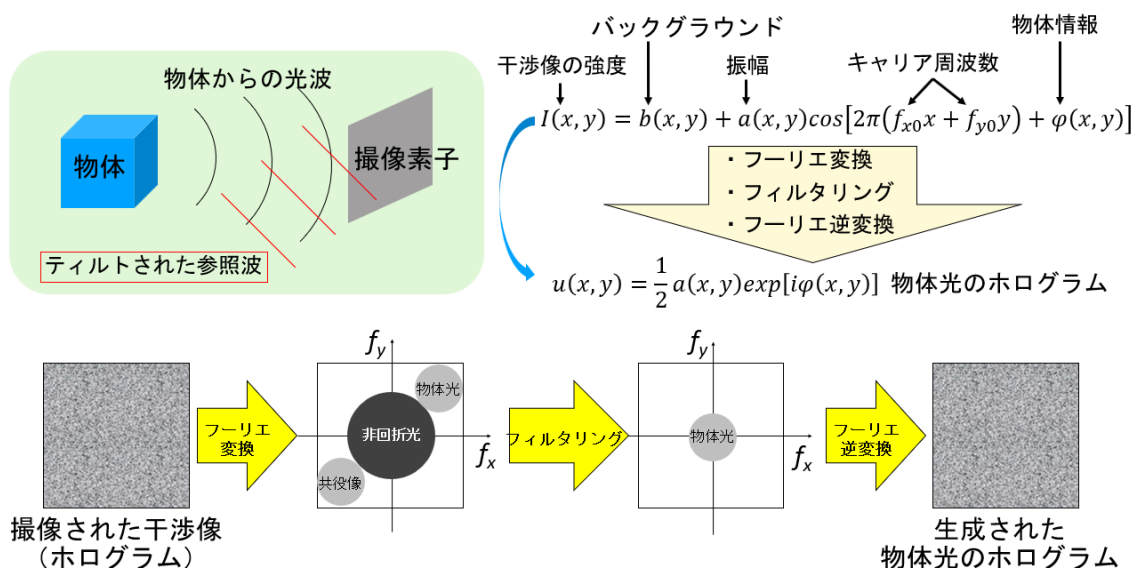


図 2.3 フーリエ変換法の概要

得られた干渉縞画像に対して 2 次元フーリエ変換を行うと、非回折光、物体光、共役像の 3 つの空間スペクトルが現れる。この 3 つのスペクトルは搬送波の周波数に応じて周波数空間において離れて現れる。従って、物体光と参照光のなす角度を大きくすると周波数空間上で分離することができる。通常、物体光をイメージセンサに対して垂直に入射させ、参照光については参照ミラーを傾斜させることで斜めに入射させる。3 つのスペクトルは周波数空間上で重なりを持つが、物体光波の帯域を制限し、参照光の角度を十分大きくすることで完全に分離することが可能となる。分離された物体光のみが残るようにフィルタリングし、周波数空間上で物体光を中央にシフトし、搬送波周波数成分を除去した後、逆フーリエ変換を行うと、物体光のみの複素振幅を得ることができる。off-axis 型の配置であるため、画質が劣化する問題があるが、近年では記録可能な空間周波数帯域を拡張する試みが報告されている [22,23].

2.3.2 位相シフト法

フーリエ変換法は周波数空間で不要な像をフィルタリングし、物体光を得るため、記録できる物体のサイズと物体のサイズと物体の最大空間周波数の積である空間帯域積が狭くなるという問題がある。位相シフト法は物体光が変化しない間に、参照光の位相を複数回シフ

トさせたホログラムを記録し、記録された複数のホログラムから物体光のみの複素振幅分布を算出する手法である。図 2.4 に位相シフトデジタルホログラフィの光学系の例を示す。

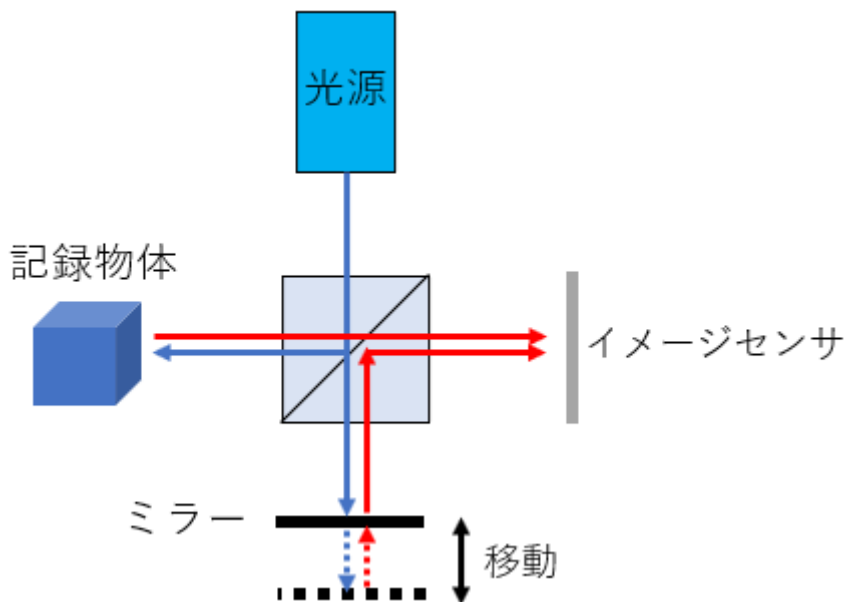


図 2.4 位相シフトデジタルホログラフィの光学系の例

図 2.4 は参照ミラーの位置を微動させて、参照光の位相を変化させる方法である[24]。他に波長板を回転させる方法[25]や、電気光学結晶に与える電圧を変化させる方法[26]などがある。ピエゾ素子や波長板を回転させる方法は装置を安価にすることができるが、機械的な動作が必要となるため、必要なホログラムを全て記録する時間が長くなるという欠点がある。参照光の位相は最低 2 回変化させ、全部で 3 枚の干渉縞画像が必要である。これを 3 バケット法と呼ぶ。ただし、参照光の強度分布をあらかじめ測定、記録しておき、測定中にこれが変化しないと仮定することで 2 バケットの位相シフトで位相を求める手法も提案されている[27]。位相を変化させる回数は多い方が誤差は少なくなるが、トータルの撮像時間と位相変化のしやすさから、工業的には位相を 90 度ずつ変化させる 4 バケット法がしばしば用いられる。物体光の複素振幅分布、強度分布、位相分布を $u_o(x, y), a_o(x, y), \phi_o(x, y)$ 、参照光の複素振幅分布、強度分布、位相分布を $u_r(x, y), a_r(x, y), \phi_r(x, y)$ とすると、それぞれの複素振幅は下記のように表される。

$$u_r(x, y) = a_r(x, y) \exp[i\phi_r(x, y)], \quad (2.5)$$

$$u_o(x, y) = a_o(x, y) \exp[i\phi_o(x, y)]. \quad (2.6)$$

参照光の位相を δ シフトさせて記録したホログラムを $I(x, y; \delta)$ とすると、次式のように

表される.

$$\begin{aligned}
 I(x, y; \delta) &= |u_r(x, y) \exp(i\delta) + u_o(x, y)|^2 \\
 &= |u_r(x, y)|^2 + |u_o(x, y)|^2 \\
 &\quad + u_r(x, y)^* u_o(x, y) \exp(-i\delta) + u_r(x, y) u_o(x, y)^* \exp(i\delta).
 \end{aligned} \tag{2.7}$$

4バケット法の場合 90 度ずつ参照光の位相をシフトさせ, 合計 4 回のホログラムを記録する. その時記録されたホログラムを $I_0(x, y), I_1(x, y), I_2(x, y), I_3(x, y)$ とする. このとき, 初期位相を 0 とすると,

$$u_o(x, y) = \frac{1}{4u_r^*} \{ [I_0(x, y) - I_2(x, y)] + i[I_1(x, y) - I_3(x, y)] \}, \tag{2.8}$$

となる. ここで参照光 $u_r(x, y)$ が平面波であった場合, 物体光の複素振幅は次式により得ることができる.

$$u_o(x, y) = \frac{1}{4} \{ [I_0(x, y) - I_2(x, y)] + i[I_1(x, y) - I_3(x, y)] \}. \tag{2.9}$$

2.3.3 単一露光によるホログラムの生成

位相シフト法は参照光の位相をずらした複数のホログラムが必要であるため, 撮像よりも計測物体が高速に動く場合には適さないという課題がある. この課題を解決するために複数のホログラムを一度に記録する方法が提案されている. その方法の一つに, 複数台のカメラを使う方法がある[28-31]. 図 2.5 はこの方法の一例を示したものである. マイケルソン干渉計から射出された光を, BS を使ってカメラの数に合わせて分岐する. 参照光の位相を変化させるために偏光を利用していることも特徴の一つである. 参照光の位相はカメラ直前に設置された偏光板の角度により変わる.

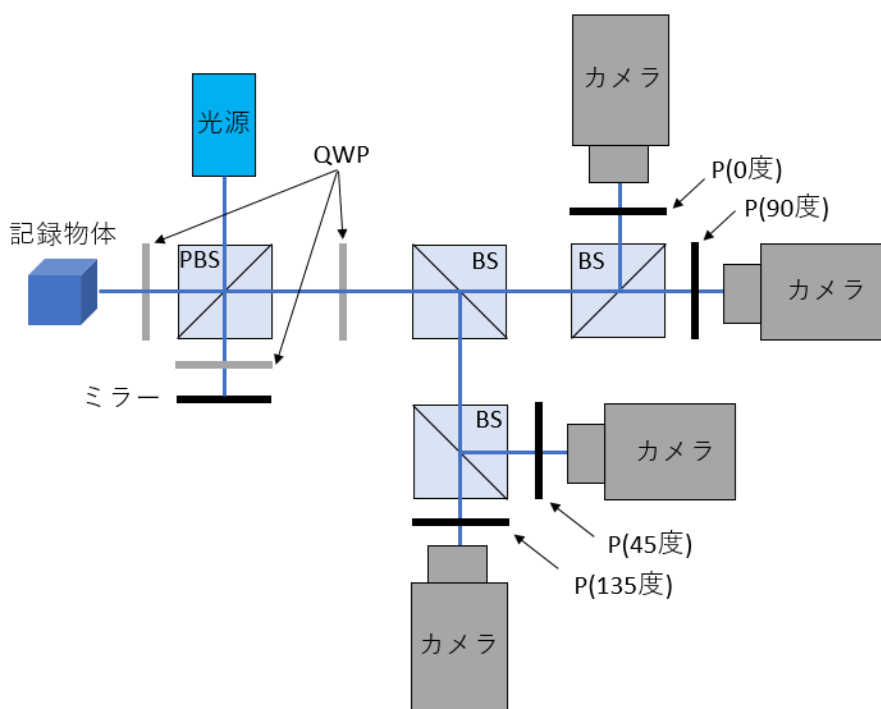


図 2.5 複数台カメラによる単一露光システム

このシステムは複数台のカメラを使用するため全体が大型化する。また、カメラ間のアライメントも正確に調整する必要があるため、工業的な利用には向いていないと言える。

これとは別に、複数のホログラムを空間的に分割多重化して記録し、そこから補間処理 [32,33] や隣接する画素を用いて [34,35] 複数のホログラムを生成する手法が提案されている。この手法は特殊なカメラを用いるが、カメラが 1 台で、かつ、1 回の撮像で必要なホログラムの記録が完結するため、工業的な利用を目的としている本研究に沿うシステムであると言える。この手法については 4 章で詳しく述べる。

2.3.4 ホログラム生成手法の比較

表 2.1 にこれまで述べたホログラム生成法の比較を示す。本システムは工業的な利用を考慮し、耐振動性があること、装置の簡易さが重要である。表 2.1 において、動く物体への適用性は耐振動性と言い換えることができるので、表より、フーリエ変換法と並列位相シフト法が適していることが分かる。ここで、並列位相シフト法は特殊なセンサを必要とするため、工業的な利用に向いていない面もあるが、近年、偏光イメージセンサが安価に入手可能となり、これを必要とする並列位相シフト法もシステムを安価に構成することが可能となった。その点を考慮すると、フーリエ変換法より解像度が高いため、工業的な利用にも適している

と言える。従って、本研究ではフーリエ変換法と並列位相シフト法を検討することとした。

表 2.1 ホログラム生成方法の比較

	フーリエ 変換法	位相シフト法	単一露光位相シフト法	
			複数カメラ	並列 位相シフト法
動く物体への適用性	○	✕	○	○
光学系調整の 簡便さ	○	○	✕	○
特殊素子	不要	不要	不要	必要
システムサイズ	○	○	✕	○
構成の簡易さ	○	△	✕	○
解像度	✕	○	○	△

2.4 ホログラム再生プロセス

デジタルホログラフィはイメージセンサから光波の逆伝搬計算を行うことで任意の距離での光波の分布を得る（再生する）ことができる。主な光伝搬計算の方法としてフレネル回折計算と、角スペクトル伝搬計算がある。

2.4.1 フレネル回折計算

フレネル回折計算はホイヘンスの原理をもとにした回折理論である、フレネル-キルヒホッフの回折理論に基づいた計算方法である。ホイヘンスの原理は、波面上の各点が 2 次波と呼ばれる球面波の発生源となり、2 次波の包絡線が最初の波面の次の瞬間の波面を形成するという考えに基づいている。図 2.6 に示す座標系で z 軸に垂直な 2 平面間の光波の伝搬を考える。

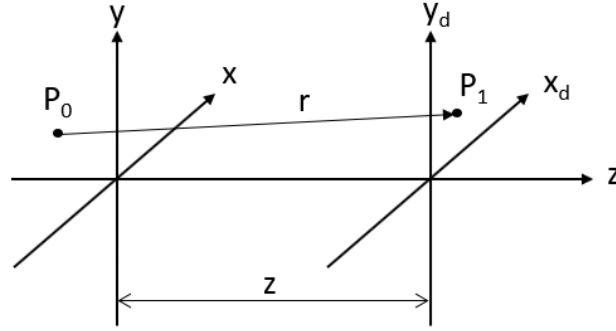


図 2.6 フレネル回折

図 2.6 の xy 平面はホログラム面, $x_d y_d$ 平面は再生面を表している. フレネル・キルヒホッフの回折理論より, 距離 z 離れた位置にある平面における波長 λ , 波数 k の光波の複素振幅は次式で表される.

$$u(x_d, y_d; z) = \frac{z}{i\lambda} \iint u(x, y; 0) \frac{\exp(ikr)}{r^2} dx dy. \quad (2.10)$$

ここで, r は次式で表される.

$$r = \sqrt{(x_d - x)^2 + (y_d - y)^2 + z^2}. \quad (2.11)$$

光波の伝搬が z 軸方向であり, z 軸近傍にのみ光波が存在する近軸近似を考えると, r は次式のように近似できる.

$$\begin{aligned} r &= \sqrt{z^2 + (x_d - x)^2 + (y_d - y)^2} \\ &= z \left\{ 1 + \frac{(x_d - x)^2 + (y_d - y)^2}{z^2} \right\}^{1/2} \\ &= z + \frac{z}{2} \left\{ \frac{(x_d - x)^2 + (y_d - y)^2}{z^2} \right\} - \frac{z}{8} \left\{ \frac{(x_d - x)^2 + (y_d - y)^2}{z^2} \right\}^2 + \dots \end{aligned} \quad (2.12)$$

上式の右辺第 2 項までを取り入れたものがフレネル回折と呼ばれ, (2.10)式が次式のように表される.

$$\begin{aligned} u(x_d, y_d; z) &= \frac{\exp(ikr)}{i\lambda z} \iint u(x, y; 0) \exp \left\{ ik \frac{1}{2z} [(x_d - x)^2 + (y_d - y)^2] \right\} dx dy \\ &= \frac{\exp(ikr)}{i\lambda z} \left\{ u(x, y; 0) \otimes \exp \left[i \frac{\pi}{\lambda z} (x_d^2 + y_d^2) \right] \right\}. \end{aligned} \quad (2.13)$$

尚, \otimes は畳み込み積分 (コンボリューション) を表す演算子である. (2.13)式を解く方法は 2種類の計算方法がある. 畳み込みを, フーリエ変換を用いて行うコンボリューション法と, (2.13)式を展開し, 1回のフーリエ変換で行うフーリエ変換法である.

2.4.2 角スペクトル伝播計算

光伝搬計算のもう一つの計算方法に角スペクトル伝搬計算[18]がある. フレネル回折とは異なり, 近軸近似を用いないため, 広角の光波に対しても計算を行うことが可能である. 波長 λ の単色光波は次式で表されるヘルムホルツ方程式に従う.

$$\nabla^2 u(x, y; z) + \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2 u(x, y; z) = 0. \quad (2.14)$$

ここで, $u(x, y; z)$ の2次元フーリエ変換を $U(f_x, f_y; z)$ とおくと, 次式が成り立つ.

$$U(f_x, f_y; z) = \iint u(x, y; z) \exp[-i2\pi(xf_x + yf_y)] dx dy, \quad (2.15)$$

$$u(x, y; z) = \iint U(f_x, f_y; z) \exp[i2\pi(xf_x + yf_y)] df_x df_y. \quad (2.16)$$

(2.16)式を(2.14)式に代入し, $U(f_x, f_y; z)$ について解くと, 一般解が次式で得られる.

$$U(f_x, f_y; z) = U(f_x, f_y; 0) \exp\left[i\frac{2\pi}{\lambda} z \sqrt{1 - (\lambda f_x)^2 - (\lambda f_y)^2}\right]. \quad (2.17)$$

2.4.3 光伝搬計算の離散表現

これまで連続系に関する光伝搬計算について示したが, デジタルホログラフィはイメージセンサを用いて光波をデジタルデータに変換して光伝搬計算を行う. イメージセンサは受光部となるフォトディテクタが敷き詰められており, その大きさは $1\sim 5\mu\text{m}$ 程度である. このため, 取り扱うデータが離散化するので, これまで示した式を離散データに対応させる必要がある.

イメージセンサの画素ピッチ (ホログラム面のサンプリング間隔) を $\Delta x, \Delta y$, フーリエ変換面でのサンプリング間隔を $\Delta f_x, \Delta f_y$, イメージセンサの画素数 (x, y) を M, N , 離散化されたホログラムデータを $u(n, m; 0) = u(n\Delta x, m\Delta y; 0)$, 伝搬距離 z の位置での再生面における光波の複素振幅分布を $u(l, p; 0) = u(l\Delta x_d, p\Delta y_d; 0)$ とすると, これまで示した 3種類の計算方法の離散表現は表 2.2 のようになる.

表 2.2 光伝搬計算の離散表現のまとめ

計算法		計算式	適用距離 Z の条件	伝搬後の画素ピッチ
フレネル回折	コンボリューション法	$u(l, p; z) = \text{IDFT} \left[\text{DFT}[u(n, m; 0)] \times \exp \left[-i\lambda\pi z \left(\frac{l^2}{N^2\Delta x^2} + \frac{p^2}{M^2\Delta y^2} \right) \right] \right]$	$z < \frac{N\Delta x^2}{\lambda}$	$\Delta x_d = \Delta x$
	1回フーリエ変換法	$u(l, p; z) = \text{DFT} \left[u(n, m; 0) \exp \left[-i\frac{\pi}{\lambda z} (n^2\Delta x^2 + m^2\Delta y^2) \right] \right]$	$z > \frac{N\Delta x^2}{\lambda}$	$\Delta x_d = \frac{\lambda z}{N\Delta x}$
角スペクトル法		$u(l, p; z) = \text{IDFT}[U(u, v; z)]$ $U(u, v; z) = U(u, v; 0) \exp \left[i\frac{2\pi z}{\lambda} \sqrt{1 - \left(\frac{u\lambda}{N\Delta x} \right)^2 - \left(\frac{v\lambda}{M\Delta y} \right)^2} \right]$	条件なし	$\Delta x_d = \Delta x$

ここで、DFT は離散フーリエ変換、IDFT は離散逆フーリエ変換を表している。注意すべき点は、フレネル回折には適用距離の条件があるということと、フレネル回折のフーリエ変換による計算方法においては、伝搬後の画素ピッチが伝搬距離により変化することである。これは、再生距離を大きくとると、再生できる面が大きくなるが、同時に再生面のサンプリング間隔が大きくなるため、像が縮小されることを意味している。本研究では全ての光伝搬計算は、再生距離に制限が無く、近軸近似も行われないう角スペクトル法を採用した。

2.5 物体情報取得プロセス

2.5.1 物体の形状計測

位相のそろった光を計測物体に照射すると、その反射光の位相は物体の形状によって変化する。図 2.7 はその様子を示したものである。

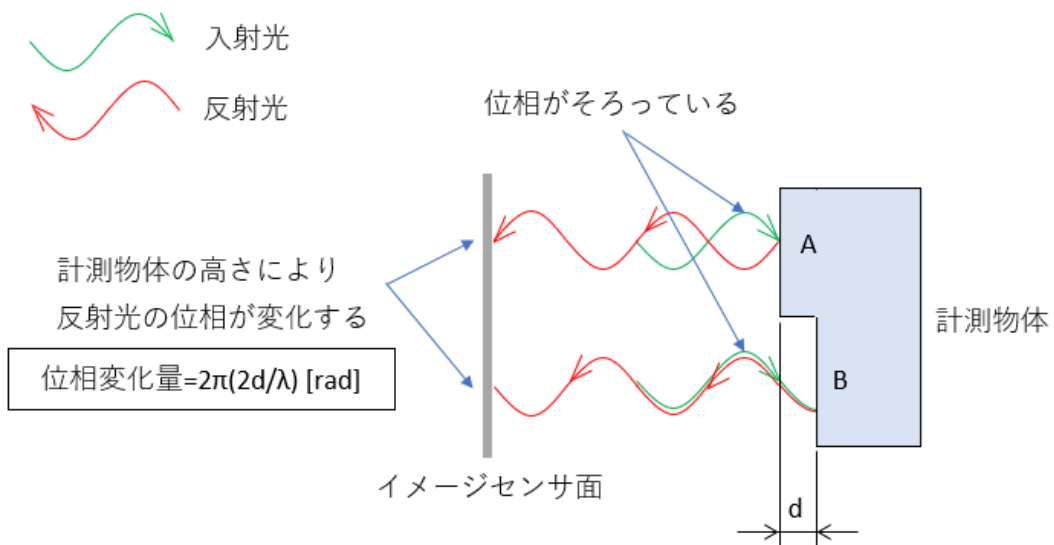


図 2.7 物体形状と位相の関係

入射光が計測物体で反射すると地点 A と B の高さの差 d の 2 倍に相当する距離が光路差として生じる。従ってイメージセンサ面で受ける反射光には $2\pi(2d/\lambda)[\text{rad}]$ の位相差が生じる。通常のイメージセンサでは位相の瞬時値を取得することができないが、干渉計を用いることでこの位相差をイメージセンサの強度データとして取得することが可能となる。また、 d が光の $1/2$ 波長を超えると位相差は再び 0 に戻る（位相が $0\sim 2\pi$ にラップされる）ため、 d は $1/2$ 波長を超える計測は不可能である。しかし、デジタルホログラフィは取得したホログラムから任意の位置の光波を再生することが可能なので、計測物体から反射した光をホログラムとして記録できれば、任意の位置の物体光波を再生し、その位相情報から、高精度に計測物体の 3 次元形状を求めることが可能である。

2.5.2 2 波長法による物体形状計測

デジタルホログラフィによって得られる位相情報を基に 3 次元計測を行う場合、物体の高さ情報は再生した光波の位相に現れることは 2.5 節で述べたとおりである。しかし、高さ（参照光と物体光の光路差）に基づく位相情報は $0\sim 2\pi$ の間にラップされるため、計測可能な高さは使用する光の波長の半分になる。1 波長による計測のダイナミックレンジは、使用する波長が可視光線の場合約 250nm であるため、バンプを計測するためにはこれを拡大する必要がある。その方法の一つに 2 波長法がある。2 波長法によれば使用する 2 つの光の波長を λ_1, λ_2 とすると図 2.8 で表されるように、二つの波長を超えるダイナミックレンジを得ることができる。

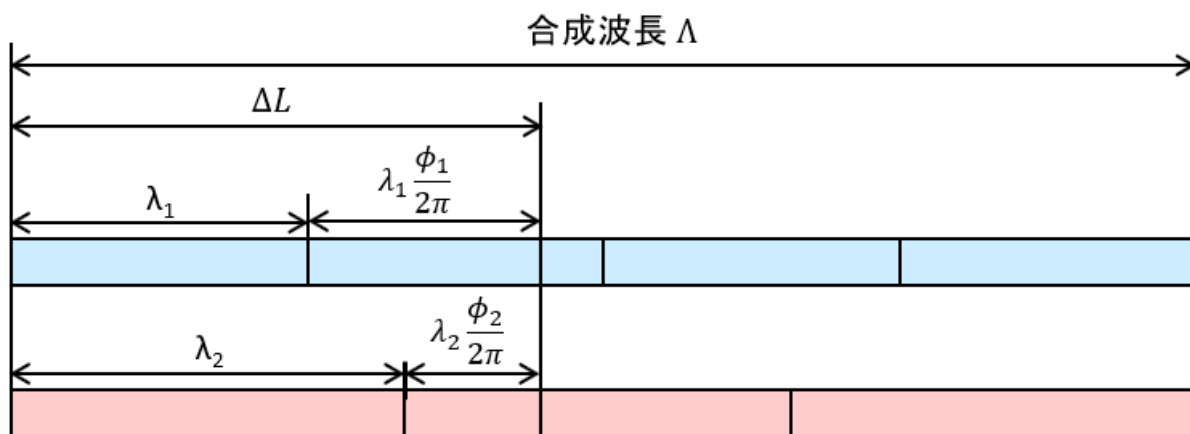


図 2.8 2 波長法のイメージ図

ここで、二つの光源（波長 λ_1 と λ_2 ）により得られた物体光の光波 $u_1(x, y), u_2(x, y)$ は

$$u_1(x, y) = a_1(x, y) \exp[i\phi_1(x, y)], \quad (2.18)$$

$$u_2(x, y) = a_2(x, y) \exp[i\phi_2(x, y)], \quad (2.19)$$

と表される. ΔL を求める高さとするとき $|\Delta L(x, y)| < \Lambda/2$ のとき次式であらわされる[36].

$$\Delta L(x, y) = \Lambda \frac{\phi_1(x, y) - \phi_2(x, y) + 2\pi p}{2\pi}, \quad (2.20)$$

$$\text{ただし, } \begin{cases} p = 0 & \phi_1(x, y) - \phi_2(x, y) \geq 0 \\ p = 1 & \text{else} \end{cases} .$$

第3章 近接2波長を用いた瞬時撮像デジタルホログラフィ

これまで、システムを構築するための基本原理について述べてきた。この章では近接した2つの波長の光を高い波長選択性を持つ対向設置の光学系と、単一露光で物体光のみのホログラムを取得することができるフーリエ変換法を組み合わせることにより構成される、近接2波長を用いた瞬時撮像システムの構成と性能評価について述べる。

3.1 テスト装置の構成

このテスト装置は近接する2波長を瞬時撮像可能な光学システムとして提案した対向設置の基本的な動作を確認するための構成である。システム全体がシンプルになるように単一カメラでホログラムの生成が可能なフーリエ変換法を採用した。また、スペックルノイズの影響を低減するため、光源にLEDを用いた。図3.1にテスト装置の光学系を示す。

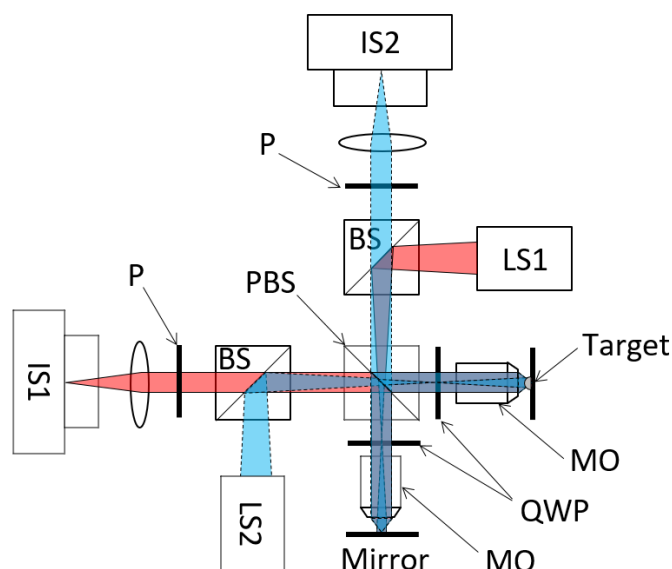


図 3.1 フーリエ変換法を用いた光学系システム

IS1 および IS2 は撮像装置 (CIS, VCC-GC60FR11CL MC) を示している。BS は無偏光キューブビームスプリッタ (シグマ光機, HBCH-20-550), PBS は偏光ビームスプリッタ (シグマ光機, PBSW-20-550), QWP は 1/4 波長板 (シグマ光機, WPQ-4579-4M), P は偏光フィルタ (シグマ光機, SPF-30C-32), MO は対物レンズ (シグマ光機, OBL-10-A) である。LS1 と LS2 は光源を示している。図 3.2 は光源の内部を示したものである。

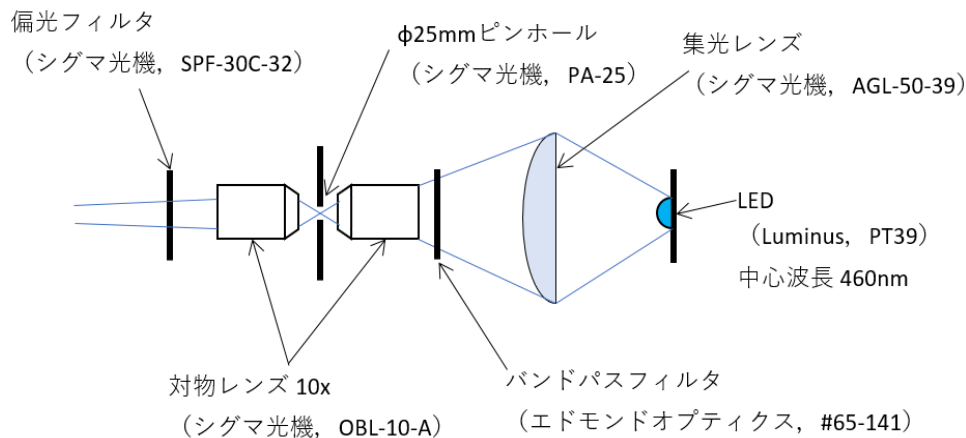


図 3.2 LS1 の内部構造

光源には中心波長 460nm の LED(Luminus, PT39)を使用し、その後方に、LS1 は中心波長 455nm 半値全幅±5nm のバンドパスフィルタ (エドモンドオプティクス, #65-141) を、LS2 は中心波長 458nm 半値全幅±5nm のバンドパスフィルタ (エドモンドオプティクス, #65-142) を設置することで、近接する 2 波長を生成した。

ここで、QWP の仕様波長は 457.9nm であるため、第一波長、第二波長共に完全な円偏光にはならず、楕円偏光になる。よって、戻り光発生し、本来 LS1 (LS2) による干渉像は IS1 (IS2) のみに到達するはずが、IS2 (IS1) に迷光として到達してしまい、IS2 にとってはノイズとなる。従って、装置を組み立てる際、LS1 のみを点灯した際の IS2 で確認されるノイズと、LS2 のみを点灯した際に IS1 で確認されるノイズが等しく最小となるように QWP の設置角を調整した。

LS1, LS2 の波長による合成波長は $69.5\mu\text{m}$ となるので、2 波長法による計測可能な高さは $34.75\mu\text{m}$ となる。従って、光源のコヒーレンス長が $69.5\mu\text{m}$ を超えていることが望ましい。図 3.3 はこのシステムで平面を撮像した画面である。

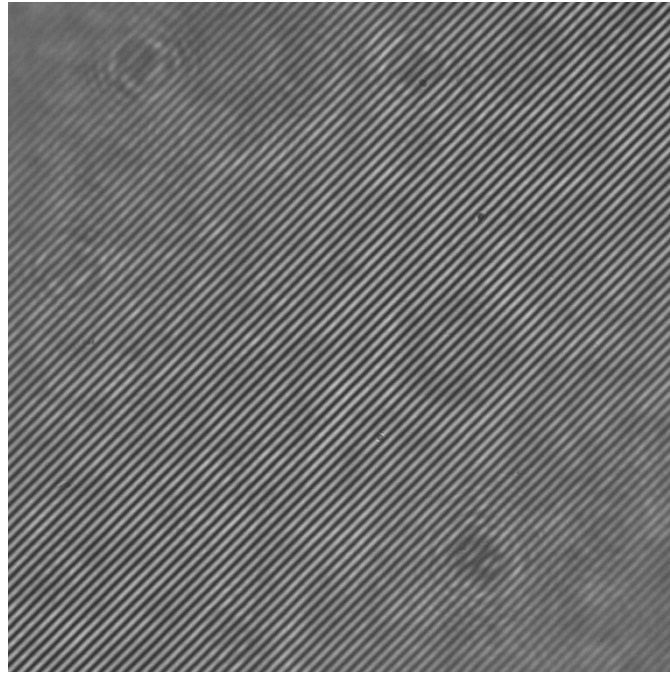


図 3.3 LED 光源を用いた干渉縞

キャリア縞のコントラストは画面中央から右下、および、左上方向に向かって徐々に低下していることが確認できる。これは、参照面を傾けているため、光路差が大きくなるためである。本計測は画面中央付近のみを使用するので問題ないが、計測可能な領域を更に拡大する場合は対策が必要である。

また、IS1 および IS2 から出射されるビームはコリメート光ではなく、対物レンズ（図 3.1 の MO）の後ろ側焦点に向けてビームを集光する必要がある。このため、スペイシャルフィルタを構成する向かい合わせになった 2 つの対物レンズのうち、干渉計側にあるものについては、コリメート光を出射可能となる位置から、わずかに光軸方向に平行移動させ、MO の後ろ側焦点にビームが収束する位置に調整し、固定した。LS1 および LS2 はバンドパスフィルタによる時間コヒーレンスとスペイシャルフィルタによる空間コヒーレンスを向上させたため、光源の明るさは低下し、約 2.7 秒の露光時間を要した。

3.2 カメラアライメント

単一露光で 2 波長法を実現する際、通常は 2 台のカメラを使用する。複数台のカメラから得られた画像を処理する際、画像の同一座標に計測対象の同一箇所の情報があることが望ましい。そのため、カメラの位置と角度は空間的に一致していることが望ましい。通常はカメラの物理的な位置を調整するなどして、撮像された画像の同一画素が同一座標を表示

するように調整が行われる。しかし、微細な計測対象を観察するような光学系ではレンズ倍率が高く、カメラの位置をミクロン単位で調整する必要が生じ、困難である。従って画像処理によって画像を平行移動や回転、場合によっては拡大・縮小し、計測対象がカメラの同一箇所に重なるように調整したり、2台のカメラの画像のずれをパラメータとして保持しておき、計算時にオフセットをかけて補正したりすることで調整を行う。本論文でも後者の方法を採用する。これらは2次元的なアライメントだが、3次元計測を行う場合はカメラのアライメントも3次元的に調整することが望ましい。以下に、本システムにおけるカメラの水平方向（X-Y方向）のアライメント調整方法と光軸方向（Z方向）のアライメント調整方法について述べる。

3.2.1 水平方向（X-Y方向）アライメント

水平方向（X-Y方向）アライメントの調整は、複数のカメラによって撮像された同一物体の画像間オフセットを把握することだが、同一物体を見つけ出し、厳密にオフセットを把握することは画像処理において困難である。理由として、同一のターゲットを撮像したとしてもわずかな明るさの違い等が原因で、マッチングが正しく行われないケースがあるからである。そこで、本研究では2台のカメラの水平方向のアライメント調整方法として、位相限定相関法[37–40]を実施した。位相限定相関法は画像のマッチング技術の一つであり、輪郭形状をフーリエ変換を用いて抽出することで、明るさに影響されない形状比較を行う手法である。その概念を図3.4に示した。図に沿って実際の画像を用いて説明する。

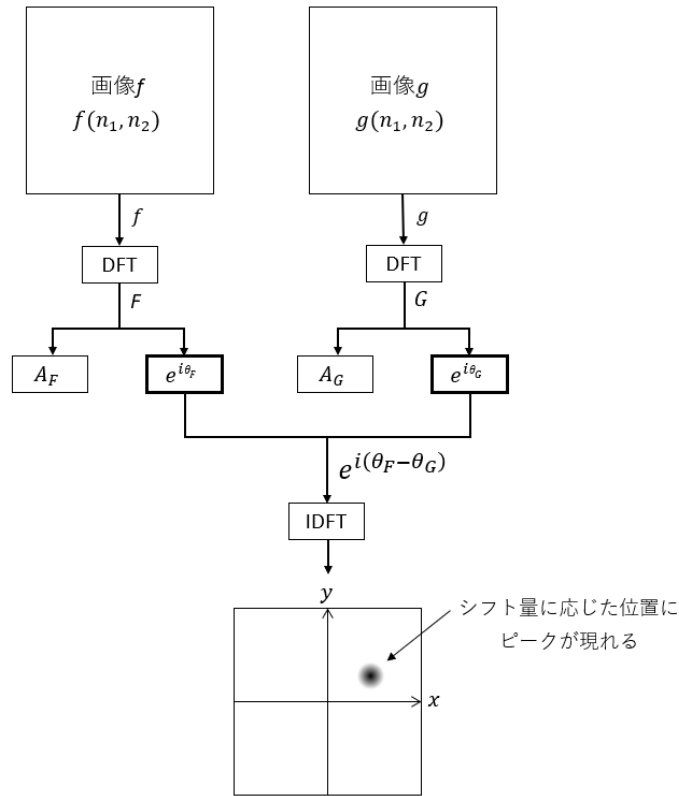


図 3.4 位相限定相関法

図 3.5 は 2 波長干渉計測のシステムにおいて、参照面を遮光することで得られた 2 枚の画像である。撮像対象は十字にケガキ線をつけた平面ミラーである。(a)は 455nm, (b)は 458nm を中心波長とする光源によるものである。

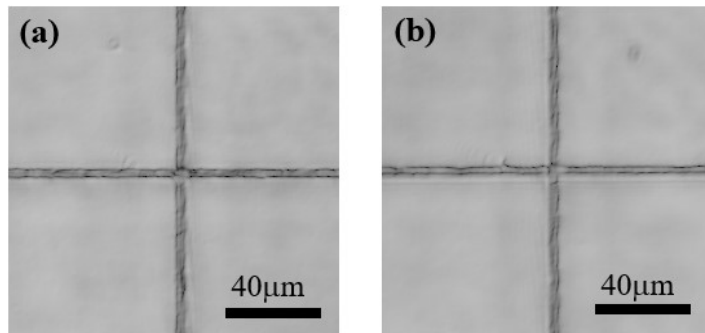


図 3.5 ケガキミラーを撮像した画像(a)455nm, (b)458nm

これら 2 つの画像をフーリエ変換すると、振幅(濃淡データ)と位相(像の輪郭データ)に分解される。このうち、形状の情報が含まれない振幅情報は使わずに、位相情報のみを用いて相関を求める手法である。ここで、画像サイズが $N_1 \times N_2$ の画像 $f(n_1, n_2), g(n_1, n_2)$ で与えられたとする。 $n_1 = -M_1, \dots, M_1$ および、 $n_2 = -M_2, \dots, M_2$ とする。ただし、 M_1, M_2 は正の整数であり、 $N_1 = 2M_1 + 1, N_2 = 2M_2 + 1$ である。

画像 $f(n_1, n_2), g(n_1, n_2)$ のフーリエ変換を次式で定義する.

$$\begin{aligned} F(k_1, k_2) &= \sum_{n_1=-M_1}^{M_1} \sum_{n_2=-M_2}^{M_2} f(n_1, n_2) W_{N_1}^{k_1 n_1} W_{N_2}^{k_2 n_2} \\ &= A_F(k_1, k_2) e^{i\theta_F(k_1, k_2)}. \end{aligned} \quad (3.1)$$

$$\begin{aligned} G(k_1, k_2) &= \sum_{n_1=-M_1}^{M_1} \sum_{n_2=-M_2}^{M_2} g(n_1, n_2) W_{N_1}^{k_1 n_1} W_{N_2}^{k_2 n_2} \\ &= A_G(k_1, k_2) e^{i\theta_G(k_1, k_2)}. \end{aligned} \quad (3.2)$$

ここで $k_1 = -M_1, \dots, M_1$ および $k_2 = -M_2, \dots, M_2$ は離散周波数インデックス(整数)であり, 回転因子を $W_{N_1} = e^{-i\frac{2\pi}{N_1}}$ および $W_{N_2} = e^{-i\frac{2\pi}{N_2}}$ と定義する. $A_F(k_1, k_2)$ および $A_G(k_1, k_2)$ は振幅スペクトルであり, $\theta_F(k_1, k_2)$ および $\theta_G(k_1, k_2)$ は位相スペクトルを表す. このとき, $F(k_1, k_2), G(k_1, k_2)$ の正規化相互パワースペクトルを次式で表す.

$$\begin{aligned} R(k_1, k_2) &= \frac{F(k_1, k_2)G^*(k_1, k_2)}{|F(k_1, k_2)G^*(k_1, k_2)|} \\ &= \theta^{i\{\theta_F(k_1, k_2) - \theta_G(k_1, k_2)\}}. \end{aligned} \quad (3.3)$$

ここで, $G^*(k_1, k_2)$ は $G(k_1, k_2)$ の複素共役を表す. また, $\theta_F(k_1, k_2) - \theta_G(k_1, k_2)$ は二つの画像の位相差スペクトルである. この $R(k_1, k_2)$ を逆フーリエ変換することで, マッチングを表すPOC (Phase Only Correlation) 関数を得ることができる. 図3.6は図3.5の(a),(b)の画像より求めたPOC関数を画像化したものである. 中心部に強く明るく見える部分がPOC関数のピーク値である. このピーク値と画像中央との差が2つの画像位置ずれ量を表す. また, POC関数のピーク値そのものは2つの画像の一致度を表す.

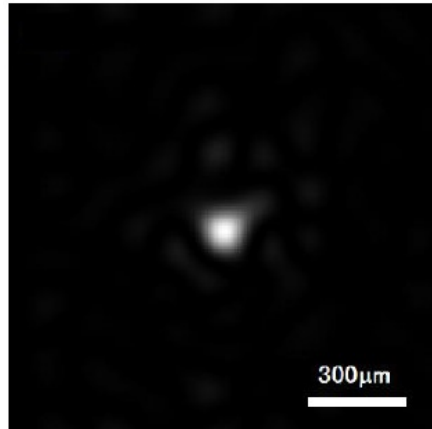


図 3.6 POC 関数

本研究では λ_1 の画像を基準画像とし、 λ_2 の画像が基準画像からどれだけずれているかを POC 関数より求め、 ± 0.5 画素以下となるように画像を平行移動させることでアライメント調整を行った。

3.2.2 光軸方向 (Z 方向) アライメント

光軸方向 (Z 方向) のずれは物体の計測高さに影響を与える。光軸方向アライメントは平面を計測した際に得られる複素振幅を保持しておき、計測物を計測した際に得られる複素振幅に以下の処理を行うことで調整が可能である。

波長番号を n とすると平面を計測して得られる複素振幅データ $u_n^{(C)}(x, y)$ は次式で表される。

$$u_n^{(C)}(x, y) = a_n^{(C)}(x, y) \exp [i \phi_n^{(C)}(x, y)] \quad (n = 1 \text{ or } 2). \quad (3.4)$$

ここで、 $a_n^{(C)}(x, y)$ は振幅、 $\phi_n^{(C)}(x, y)$ は位相である。保持するデータは $u_n^{(C)}(x, y)$ である。計測物体を Target 位置にセットしたときに得られる複素振幅を $u_n^{(T)}(x, y)$ 、Z 方向アライメント調整後の複素振幅を $u_n(x, y)$ とすると、補正後の複素振幅は次式により得られる。

$$u_n(x, y) = u_n^{(T)}(x, y) / u_n^{(C)}(x, y) \quad (n = 1 \text{ or } 2). \quad (3.5)$$

Z 方向アライメント調整は光学系にある歪みの除去も兼ねる。光学系の歪みは波面に歪みを生じさせ、正確な計測を妨げる要因となる。図 3.7 は Z 方向アライメント調整前後の位相画像の比較である。Z 方向アライメント調整を行ったことにより、平面ミラーに現れていた位相の揺らぎが低減され、画面内で位相値が均一になったことが確認できる。

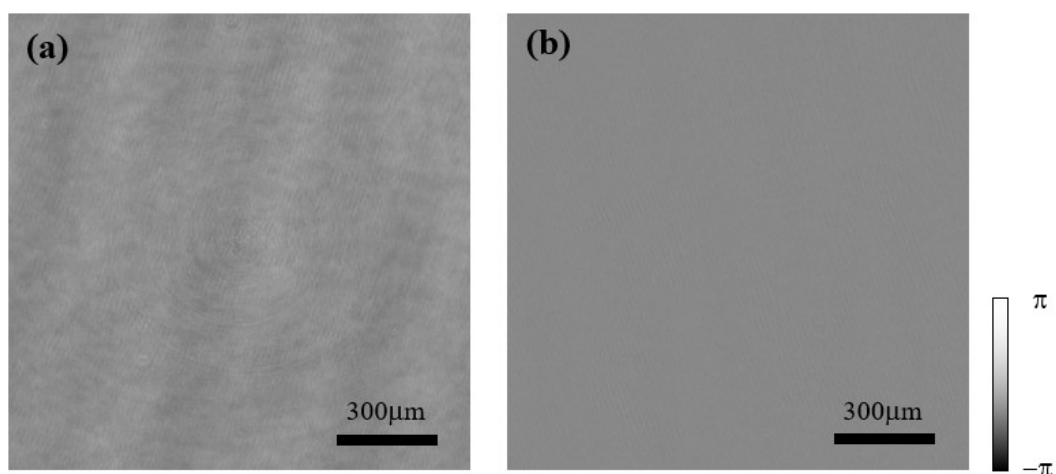


図 3.7 Z 方向補正の効果 (a)補正前の位相画像 (b)補正後の位相画像

3.3 平面計測

ここでは本システムを用いて平面を計測した結果を示す。図 3.8(a),(b)は波長 455nm, 458nm による干渉像, (c),(d)は波長 455nm,458nm における再生した振幅画像, (e),(f)は波長 455nm,458nm における再生した位相画像である。

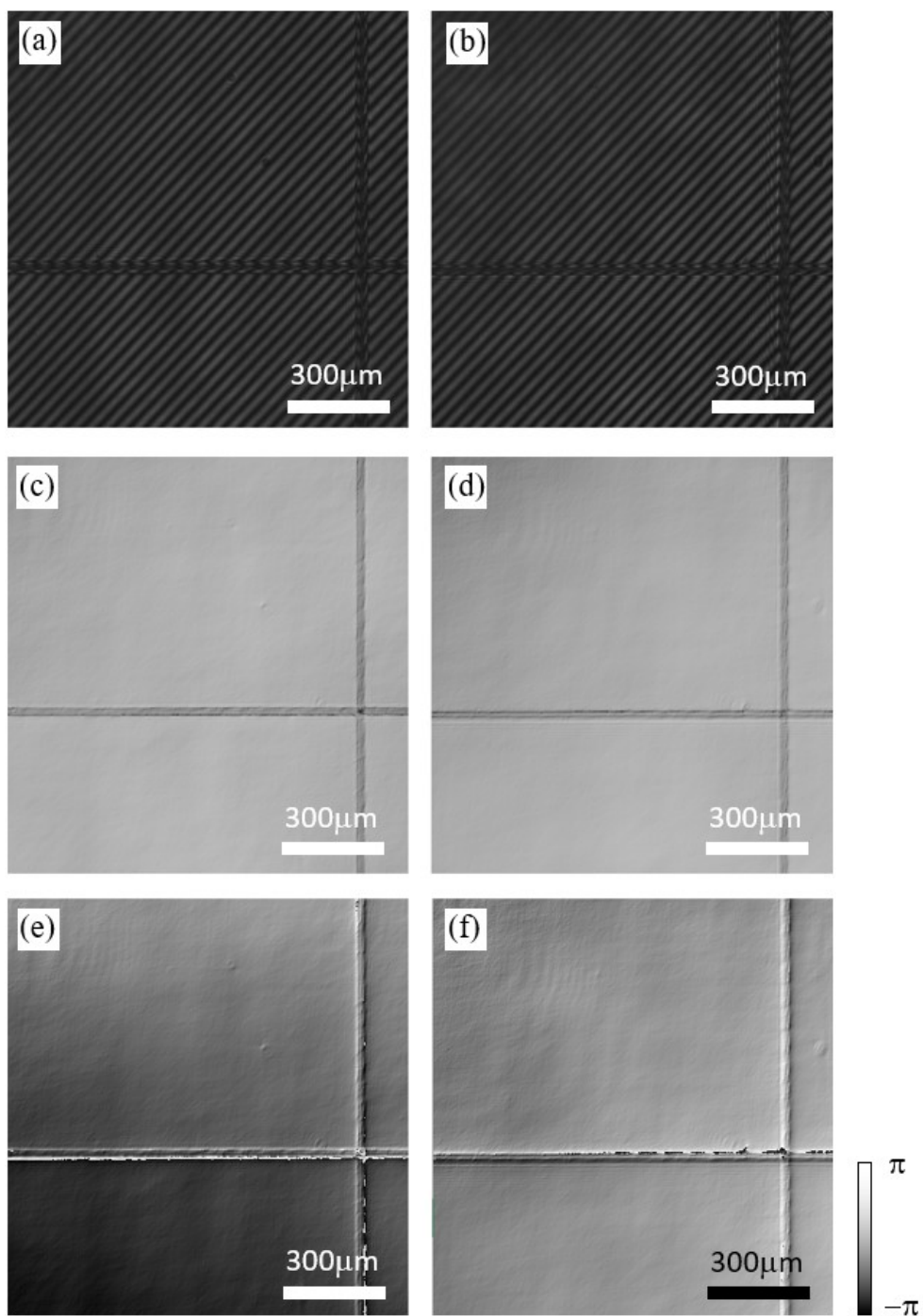


図 3.8 (a),(b)平面計測時の干渉像, (c),(d)再生した振幅画像, (e),(f)再生した位相画像,
 $\lambda_1=455\text{nm}$, $\lambda_2 = 458\text{nm}$

図 3.9 は位相画像内に記した白色の直線部について、1 波長ごとの高さ計測結果の断面プロフィールである。

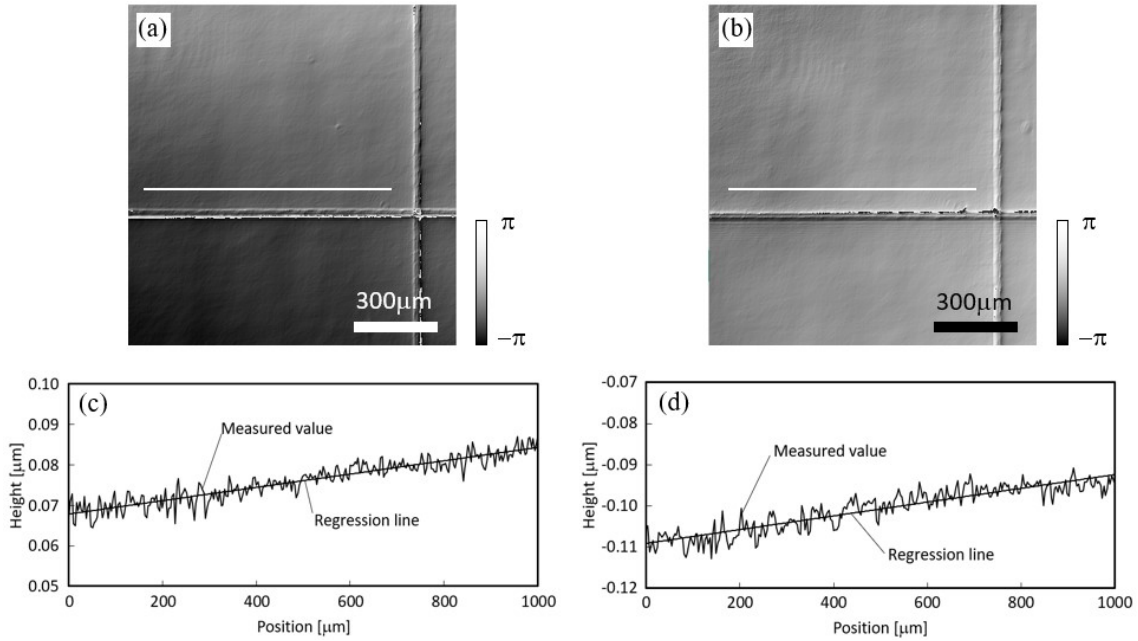


図 3.9(a),(b)位相画像 (c),(d)1 波長による高さ計測結果

高さは λ_1, λ_2 ともに画面右側へ向かうにつれて増加していることがわかる。図 3.8(e),(f)から位相がラップされている様子はないことがわかる。従って、このグラフの示す高さもラップされていないと考えられる。それぞれの波長において、回帰直線との RMS 誤差は、 $\lambda_1/237$ と $\lambda_2/211$ であった。

次に、 λ_1, λ_2 の位相値から(2.20)式から合成波長による高さ計測値を求め、図 3.10 に高さプロフィールを示した。

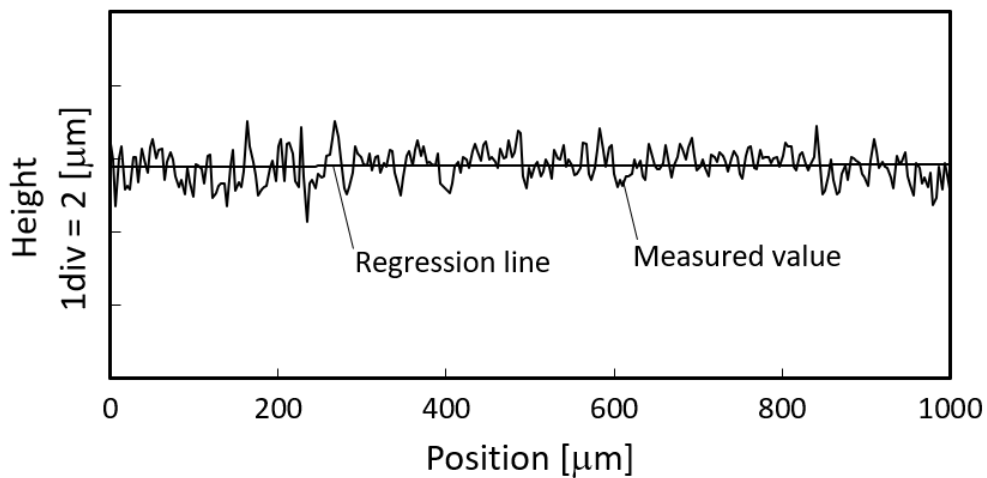


図 3.10 2 波長合成による高さプロフィール

1 波長の時と同様に回帰直線との RMS 誤差を求めると $\lambda/156$ となった。2 波長の計測システムとして十分な精度が確保できたと言える。

3.4 波長を超える高さ計測の検証

平面の計測精度は十分な結果が得られたので、1 波長計測では計測できないダイナミックレンジが 2 波長計測により確保できているかを確認するテストを行った。図 3.11 はそのための実験装置を示した光学系の図である。

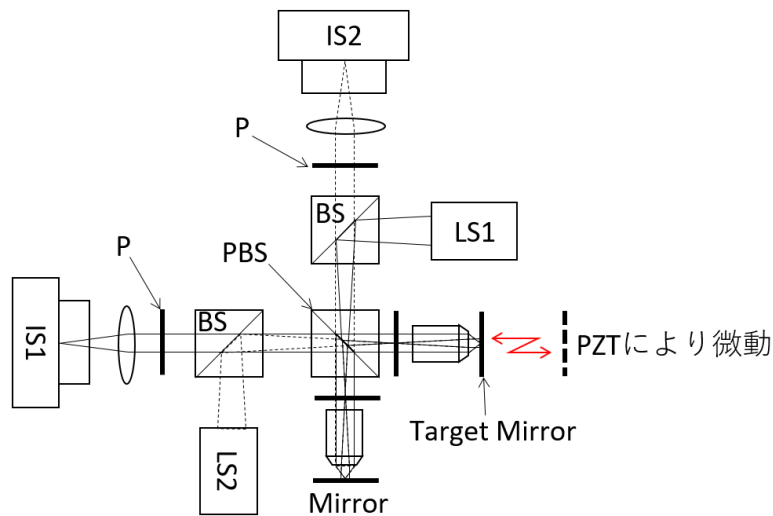


図 3.11 高さ計測検証のテスト装置

ここで、PZT とは piezo 素子を用いた微動ステージを表している。計測対象は平面ミラーである。ただし、平面ミラーは piezo ステージにより、光軸方向への微動が可能な構成になっている。piezo ステージにより、ミラーの位置を $1\mu\text{m}$ 動かした後、ステージ停止後の振動が完全に収まることを目的とし、ステージ停止後、5 秒待ってから撮像を行った。このようにして得られた 2 波長計測の結果を図 3.12 にプロットした。

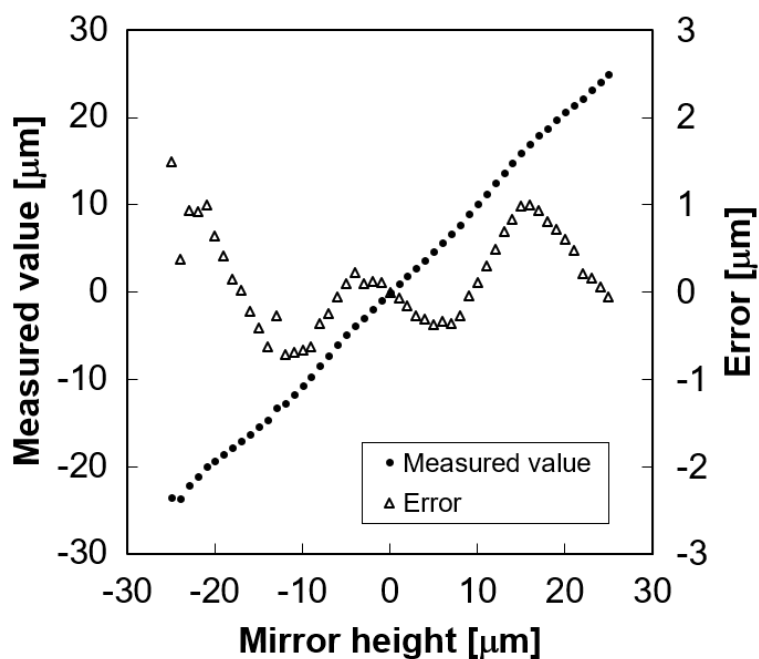


図 3.12 高さ検証のグラフ

グラフの横軸はピエゾ素子に指定した高さの値であり，縦軸（第 1 軸）は 2 波長計測による高さ計測値を示している．縦軸（第 2 軸）は Error（ピエゾステージに出力した値との差）を示した．高さ計測値は $-25 \leq \Delta L \leq 25 \mu\text{m}$ の範囲で回帰直線との RMS 誤差は $\lambda/175$ となった．ただし， $-10 \leq \Delta L \leq 10 \mu\text{m}$ の範囲では $\lambda/325$ となり， $10 \mu\text{m}$ 程度の高さのものであれば，より高い精度で計測可能であることが確認できた．

Error については，高さ 0 の地点を中心として全体で 2 周期の変動が確認できる．これは光源のバンド幅が広いことと，2 波長法による位相の減算による位相シフトエラーの影響である．本研究では未実施だが，この Error を含めたキャリブレーションを実施することで対策が可能である．

第4章 近接2波長を用いた瞬時撮像並列位相シフトデジタルホログラフィ

4.1 並列位相シフトデジタルホログラフィ

ホログラム生成法の一つである位相シフト法は、ホログラムから物体光のみを取得する有効な手段であるが、参照光の位相を複数回変化させた複数のホログラムを必要とするため、撮像に時間がかかるという課題がある。この課題を解決する方法として、参照光をチルトさせる、参照光チルト単一露光位相シフトデジタルホログラフィ[41,42]や、微小偏光子アレイが撮像素子に集積された実装形態の並列位相シフトデジタルホログラフィ[43–46]がある。微小偏光子アレイを用いる方法はシステムが小型化できるため、応用の幅が広く、RGBのカラー画像に応用したものや[47]、高フレームレートのホログラムの記録が報告されている[48–51]。この章では、シンプルな構成でありながら off-axis 法よりも高い解像度が得られる、微小偏光子アレイを用いた並列位相シフトデジタルホログラフィを検討する。この方法は干渉計測に偏光を利用することが必要である。次に、偏光を利用した干渉計について説明する。

4.1.1 偏光マイケルソン干渉計

図 4.1 は偏光を利用したマイケルソン干渉計の光学系を示している。

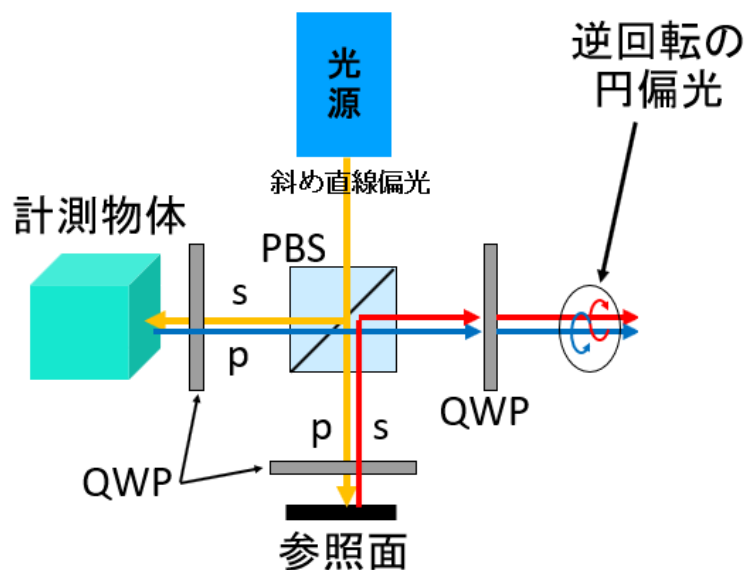


図 4.1 偏光を利用したマイケルソン干渉計

光源から射出された直線偏光のビームは、偏光ビームスプリッタ (PBS) により p 偏光と s 偏光に分離される。この時、PBS を透過する光は p 偏光、反射する光路を進む光は s 偏光である。p 偏光は PBS を透過した後参照面に向かい、途中 1/4 波長板 (QWP) を通過し、円偏光になる。参照面で反射された光は再び QWP を通過し直線偏光に戻るが、往復で QWP を 2 回通過するため、その偏光の方向は PBS により分離された時の偏光方向から 90 度回転し、s 偏光となる。従って、PBS に入射すると光源に戻らず、イメージセンサの方向へ反射される。同様にして、計測物体へ向かった s 偏光は p 偏光となって PBS へ戻り、イメージセンサへ向かう。PBS から出射される p 偏光と s 偏光はその後にある QWP で再び円偏光になる。これらは互いに回転方向が逆になる。この後光軸周りに角度の異なる偏光板を通すことで、位相の異なる干渉縞画像を得ることができる。従って、偏光板を 0 度、45 度、90 度、135 度の角度に設定して 4 回撮像することで、参照光の位相をシフトさせた干渉縞画像 4 枚を取得することができる。

4.2 偏光イメージセンサを用いた並列位相シフト法

並列位相シフト法の基本的な概念は、複数のホログラムを空間分割多重化し、単一のイメージセンサに記録し、再生することである。前述の偏光を利用した干渉計と偏光イメージセンサを組み合わせることで、空間分割多重のホログラムを単一のイメージセンサで取得することができる。

4.2.1 偏光イメージセンサの構成

図 4.2 に偏光イメージセンサの構造を示す。通常のイメージセンサの各画素の受光部 (フォトディテクタ) の手前に 0 度、45 度、90 度、135 度度の偏光子が一定のパターンで形成されている。

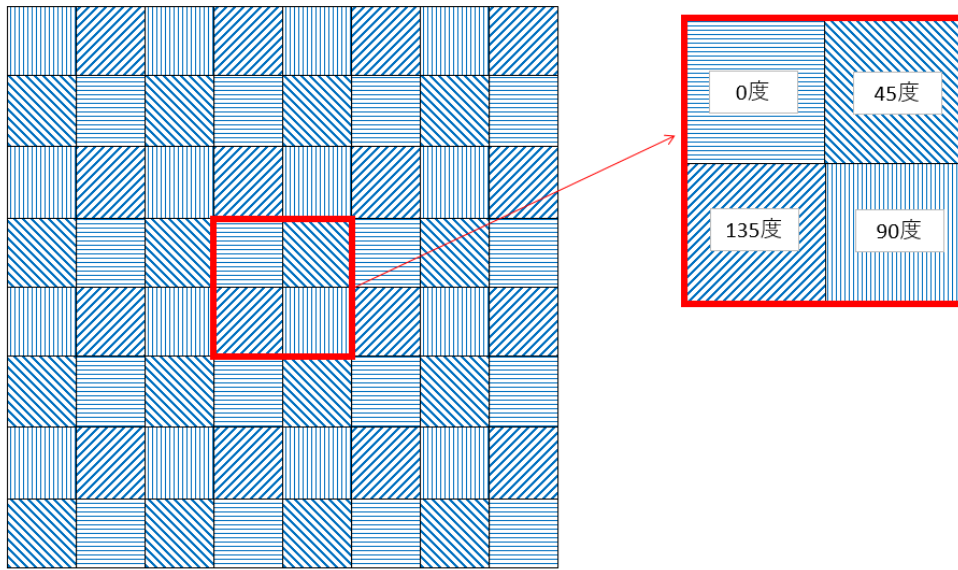


図 4.2 偏光イメージセンサ

偏光を利用した干渉計と偏光イメージセンサを使うことで、各画素で異なる位相の干渉縞の輝度を取得することが可能となる。このイメージセンサを使った並列位相シフト法は数多く提案されており、複数のホログラムを補間処理によって得るホログラム間位相シフト法(図 4.3)や、隣接する画素間で位相シフト計算を行う近傍画素間位相シフト法(図 4.4)などがある。

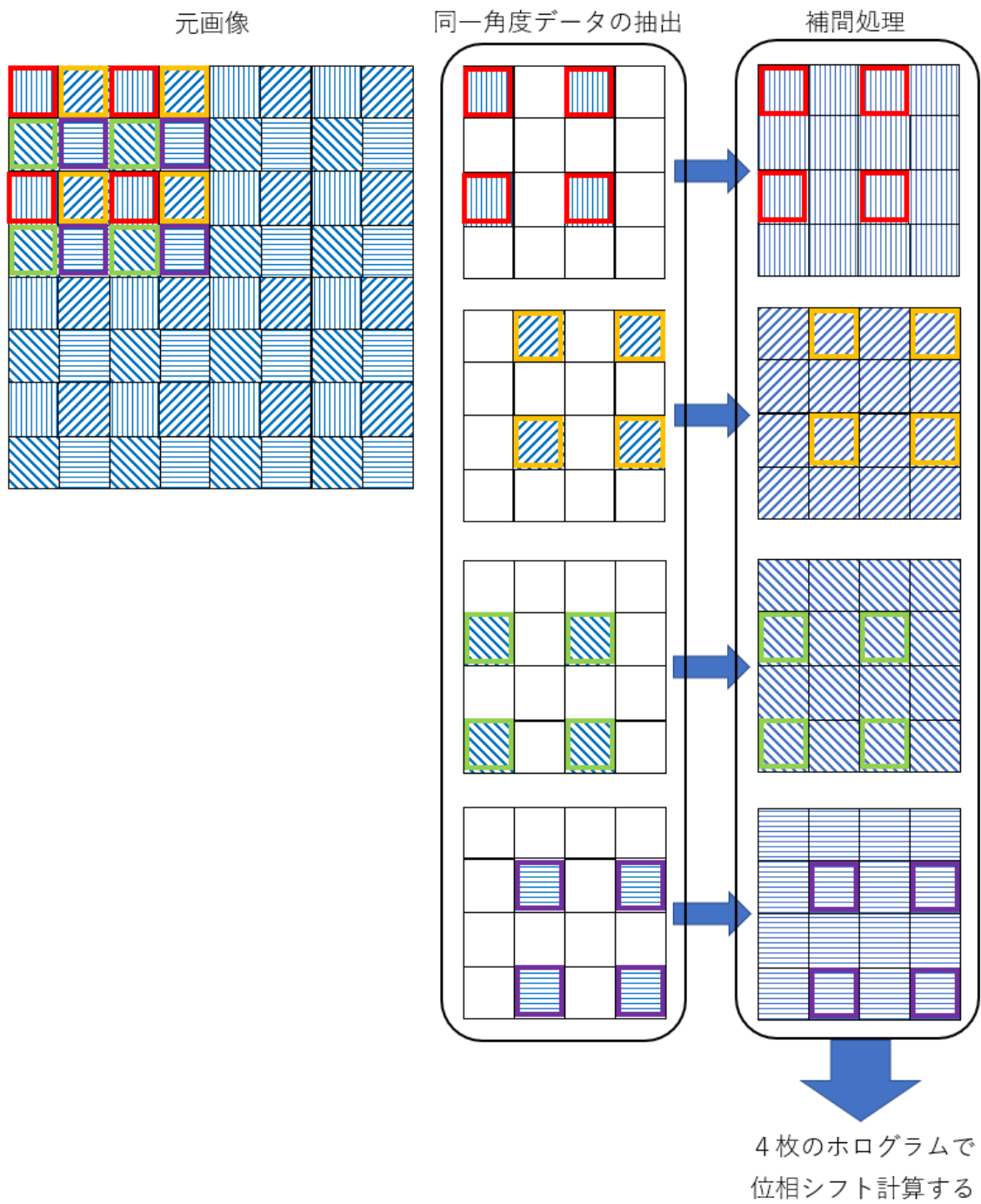


図 4.3 ホログラム間位相シフト

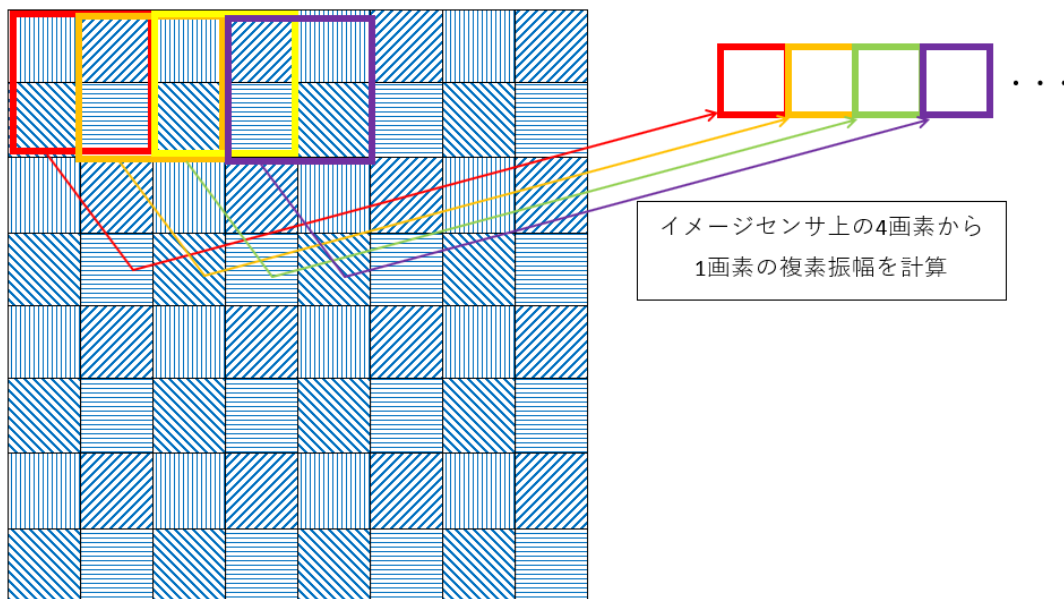


図 4.4 近傍画素間位相シフト

ホログラム間位相シフト法は4つのホログラムを補間計算により求めるため、計算時間と、作成したホログラムを保持するメモリが必要となる。処理部となる PC を小型化することができるため、この章では近傍画素間位相シフト法を採用する。

近傍画素間位相シフト法において、計測対象の形状の変化が緩やかで、イメージセンサに投影された物体の高さが、イメージセンサ上の 2×2 画素にわたり一定の場合を考える。この場合、イメージセンサ上の任意の 2×2 の4画素は同一高さの平面からの反射光が照射されると考えられる。このとき、4つの画素による4ステップの位相シフト法が適用できるので、物体光の複素振幅は式(2.9)で表される。よって、その位相は次式で得られる。

$$\phi = \tan^{-1} \frac{I_1 - I_3}{I_0 - I_2} \quad (4.1)$$

ここで、 I_0, I_1, I_2, I_3 は注目する 2×2 画素の中にある、偏光子の角度が 0 度、45 度、90 度、135 度の画素で取得された輝度値である。

4.2.2 偏光イメージセンサのキャリブレーション

偏光イメージセンサの製造はいくつかの方法が存在する。例として、画素ごとの受光素子（フォトディテクタ）の手前に偏光子を半導体製造プロセスによって形成する方法や、あらかじめ画素ピッチに合わせて製作した偏光子のパターンが印刷されたシートを、ズレが無いようにイメージセンサに添付する方法などがある。すなわち、元となるのは一般的なイメ

ージセンサであり、その上に偏光子が設置されている構造となっている。このため、一般的なカメラに対して行われるゲイン補正が必要であり、有効であることが分かる。

また、偏光子を製造する際、偏光子の角度には必ず設計値とは異なる製造上の誤差が生じると考えられる。この角度誤差は位相シフト計算において正確な位相の計算にエラーを生じさせる原因となる。また、透過率についても、位相シフト計算に用いる4画素内で大きく異なる場合、位相シフト計算にエラーを生じる。しかし、透過率に関しては、ゲイン補正に含めることが可能である。以上より、本研究では偏光イメージセンサのキャリブレーションとして、カメラのゲイン補正と、偏光子の角度補正を行うこととした。以下で、それぞれについて説明する。

【ゲイン補正】

一般的なイメージセンサと同様に、ゲイン補正を行う。ただし、通常のイメージセンサと異なり、イメージセンサの手前に、画素ごとに角度の異なる偏光子が設置されているため、光源の偏光状態に依存する。偏光に依存しないゲイン補正を行うために、ランダム偏光（非偏光）か、完全な円偏光が必要となる。ランダム偏光は太陽光やハロゲンランプ等が代表的な光源である。一方、完全な円偏光を作り出すには、直線偏光を1/4波長板で円偏光にする方法が考えられるが、1/4波長板の仕様の波長と、光源の波長を一致させることは困難であり、1/4波長板の設置角（方位角）の正確さも要求されるため、本研究では前者を選択した。図4.5はゲイン調整のための光学系を示したものである。

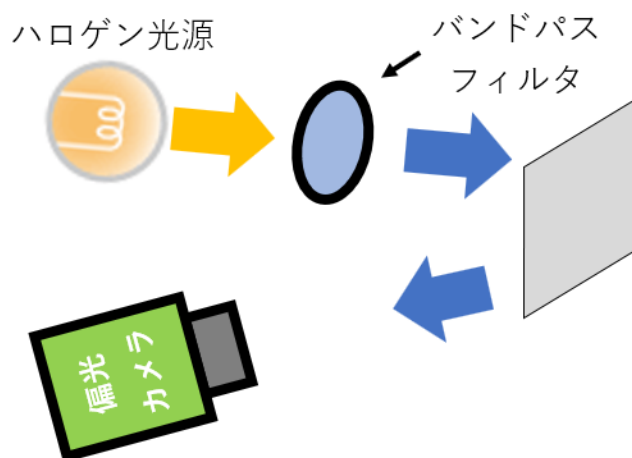


図 4.5 ゲイン補正の光学系

光源にはハロゲンランプを使用した。ハロゲンランプはスペクトル幅が広いので、偏光イ

イメージセンサの受光感度の波長特性に偏りがあると、ゲイン調整時と実際の計測時のゲイン特性に差が生じる。このため、実際に使用する波長に近づける目的で、光源の直後に半値幅±5nm のバンドパスフィルタを挿入した。また、カメラで直接光源を観察すると、光源がイメージセンサに対して小さいため、ほぼ、イメージセンサに垂直に光が入射することになる。この状態では入射光の入射角度に偏りがあるデータになってしまうため、光源の光をスクリーンや積分球に入射し、その反射光や出射光を光源とした。

上記の方法で撮像した画像からゲインを補正する方法は多数あるが、本研究では最大輝度の75%付近となるように光源の明るさを調整し、全画素の中で最も明るい値を示す画素の輝度値を基準輝度とし、全画素の輝度値が全て基準輝度になるように、各画素に比例定数(ゲイン1.0以上)を設定した。全画素のうちの最大輝度を基準とした理由は、仮に最も暗い値を基準値とするとすべてのゲインが1以下となり、カメラのアウトプットが最大値を示しても、ゲイン補正により最大値より小さな値に補正され、最大輝度が各画素で異なってしまう、サチレーションを起こしているかの判定が複雑になることと、使用可能なデータの帯域が減少するからである。

【偏光子の角度補正】

偏光イメージセンサ上の任意の2×2画素で取得される輝度を(4.1)式に代入すると、この2×2画素における物体光の位相を取得することができる。しかし、得られる位相は偏光子の角度が設計値と等しい場合の値である。偏光子の角度が設計値通りの値になっていない場合、どの程度計測に影響するか検討する。

計測対象の形状変化は緩やかで、注目している2×2画素に入射している物体光の位相が同一であると仮定すると、各画素が取得できる輝度は次式で表される[52]。

$$I = \frac{1}{2} [I_r + I_o + 2\sqrt{I_r I_o} \cos(\phi + 2\theta)] \quad (4.2)$$

ここで、 I_r は参照光の強度、 I_o は物体光の強度、 ϕ は物体光の位相、 θ は偏光子の角度である。4画素のうちの一つの画素の偏光子角度に製造上の誤差があり、その誤差が $\Delta\theta$ であったと仮定すると、(4.1)式と(4.2)式より、得られる物体光の位相の誤差 $\Delta\phi$ は次式で表される。

$$\Delta\phi = \phi - \tan^{-1} \left[\frac{\sin\phi + \sin(\phi + 2\Delta\theta)}{2\cos\phi} \right] \quad (4.3)$$

上式より、 $\Delta\phi$ が最大となるのは $\phi = 0$ のときで、 $\Delta\phi = 2\Delta\theta$ となることが分かる。2波長計測において、この差はそれぞれの波長において独立して起こり得る。第二波長においても同

じ角度ずれが逆方向に生じた場合、(2.20)式より計測高さに与える影響は次式で表される。

$$\Delta L = \Lambda \frac{\Delta\theta}{\pi} \quad (4.4)$$

例として、 $\Delta\theta$ が 1° 、 $\lambda_1 = 488\text{nm}$ 、 $\lambda_2 = 491\text{nm}$ であるとする、 $\Delta L = 0.44\mu\text{m}$ となり、 $10\mu\text{m}$ のバンプの4.4%の高さに相当する誤差を生じることが分かる。以下に、偏光子の角度補正の方法について示す。

偏光子の角度補正を行うために、イメージセンサの各画素の偏光子角度の実測値を必要とする。偏光子の角度を調査する光学系として、図4.6の光学系を使用した。

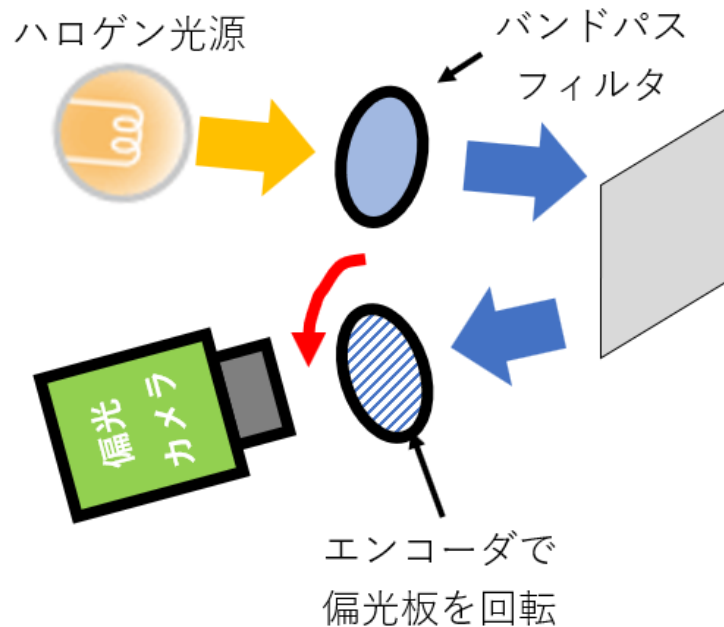


図 4.6 偏光子の角度調査の光学系

光源は、ゲイン補正時と同様の物を使用することが望ましい。従って、光学系はゲイン補正時に使用した構成を流用し、スクリーンとカメラの間に、カメラの光軸周りに回転可能な偏光板を挿入したものを使用した。この偏光板を5度単位で回転させ、その都度画素ごとの輝度値を記録したデータを基にして偏光子の角度を求める。図4.7はこのようにして得られた画面中央の実際の輝度データである。注目する画素の輝度値の変化は偏光板の回転角度を横軸とすると正弦波を描くので、正弦波の最も輝度値が高い時の偏光板の角度が注目画素の偏光子の角度であると言える。

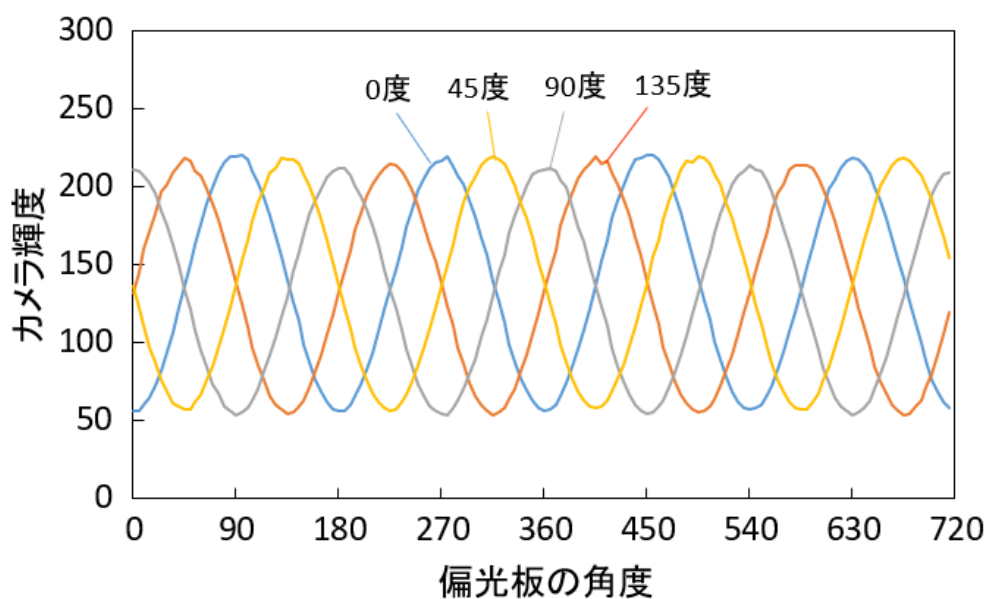


図 4.7 偏光板の角度と輝度値の関係

グラフを見てわかるように輝度は正弦波を描いている。しかし、その最大値や最小値は滑らかではなく、いびつな形をしている箇所が多い。このため、最大値や最小値から直接偏光子の角度を求めることは好ましくない。この輝度グラフに正弦波をフィッティングさせ、最もよく一致する初期位相角を偏光子の角度とした。フィッティングする際のパラメータのうち、周期は既知である。これ以外のパラメータである、振幅とオフセットと初期位相をフィッティングにより求めた。図 4.8 は使用した偏光カメラの偏光子の角度を調査した結果である。横軸は設計値に対するずれを角度 $^{\circ}$]で示している。縦軸は画素数である。

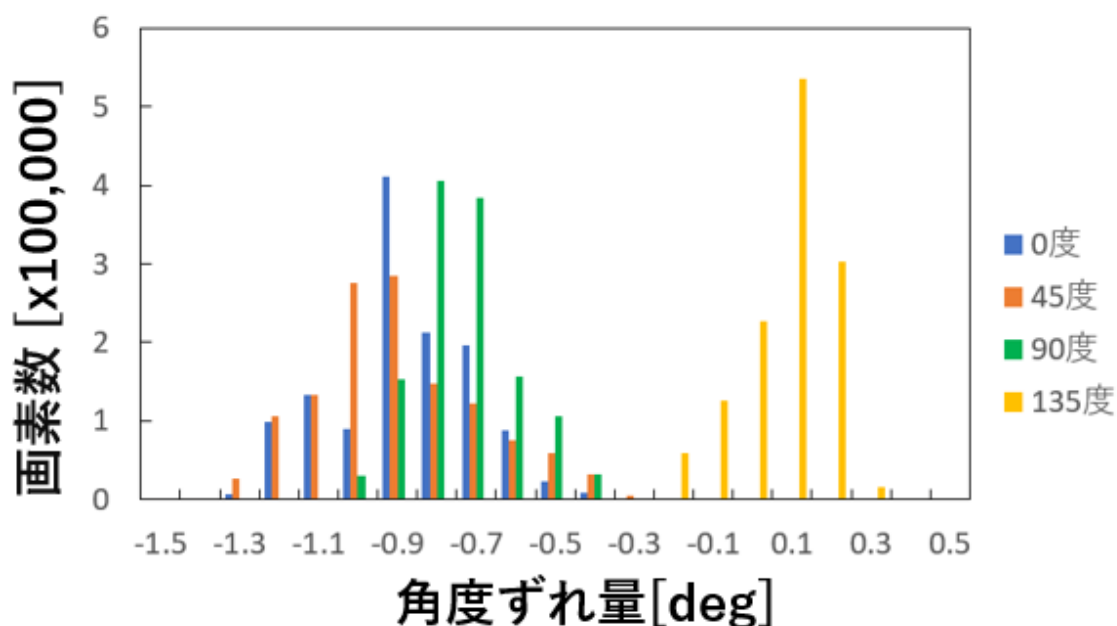


図 4.8 偏光子の角度誤差

このグラフから分かることは、いずれの角度の偏光子も、0.5 度程度のばらつきを持っているということである。また、135 度の偏光子においては、0 度、45 度、90 度の偏光子とずれ量の分布の中心が 1 度程異なっていることが分かる。このことから、最大 1.5 度の角度誤差が含まれる可能性があることが分かる。これは、(4.4)式によれば、10 μ m バンプの 6.67% の高さに相当することが分かる。

次に、位相シフトの式(4.1)を角度誤差が含まれる形に拡張する。各画素の取得輝度は(4.2)式により求められる。この時、偏光子の角度 θ に誤差が含まれているとすると、(4.2)式は次式のように表される。

$$I_0 = \frac{1}{2} [I_r + I_o + 2\sqrt{I_r I_o} \cos(\phi + 2\theta_0)] \quad (4.5)$$

$$I_{\pi/4} = \frac{1}{2} [I_r + I_o + 2\sqrt{I_r I_o} \cos(\phi + 2\theta_{\pi/4})] \quad (4.6)$$

$$I_{\pi/2} = \frac{1}{2} [I_r + I_o + 2\sqrt{I_r I_o} \cos(\phi + 2\theta_{\pi/2})] \quad (4.7)$$

$$I_{3\pi/4} = \frac{1}{2} [I_r + I_o + 2\sqrt{I_r I_o} \cos(\phi + 2\theta_{3\pi/4})] \quad (4.8)$$

(4.5)~(4.8)式を ϕ について解くと次式が得られる。

$$\phi = \tan^{-1} \frac{-(I_{\pi/4} - I_{3\pi/4})(\sin 2\theta_0 - \sin 2\theta_{\pi/2}) + (I_0 - I_{\pi/2})(\sin 2\theta_{\pi/4} - \sin 2\theta_{3\pi/4})}{(I_{\pi/4} - I_{3\pi/4})(\cos 2\theta_0 - \cos 2\theta_{\pi/2}) - (I_0 - I_{\pi/2})(\cos 2\theta_{\pi/4} - \cos 2\theta_{3\pi/4})} \quad (4.9)$$

したがって、各画素の偏光子の角度を保持しておき、計測した画素の輝度と、偏光子の角度を(4.9)式に代入することで、偏光子の角度ずれが考慮された位相 ϕ を得ることができる。本研究では並列位相シフト法に(4.9)式の補正を導入する。

4.3 テスト装置の構成

図 4.9 は近接 2 波長による対向設置と偏光イメージセンサを用いて並列位相シフトデジタルホログラフィを実装した光学系の構成図と実際の装置写真である。3.1 節の LED を使用したシステムの光学系と比較し、以下の相違点がある。

- ・光源 (LED → レーザー)
- ・ホログラム生成手段 (フーリエ変換法 → 並列位相シフト法)

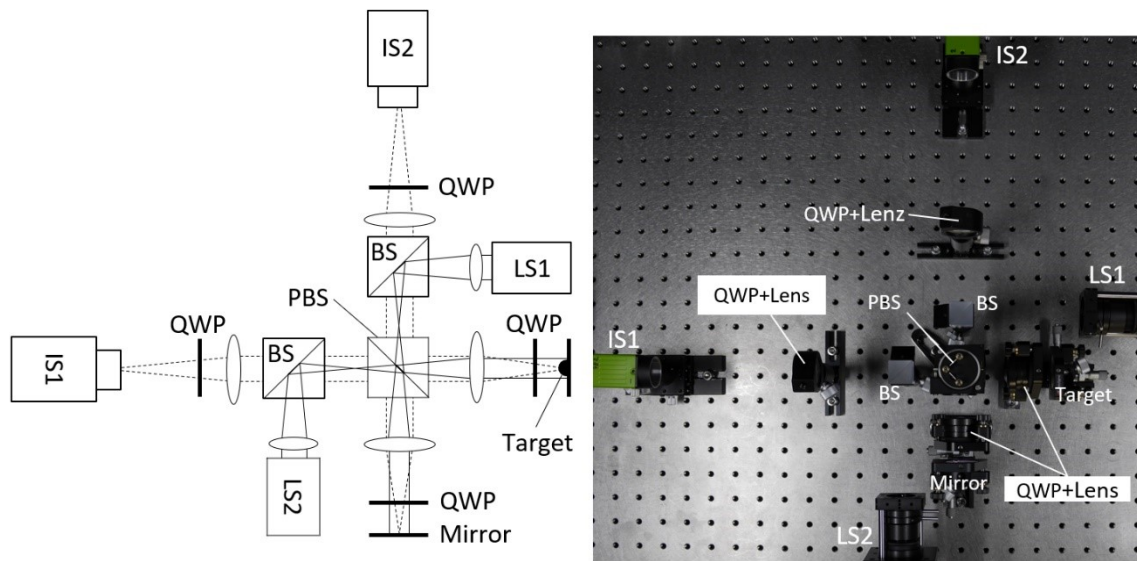


図 4.9 レーザー+並列位相シフト法の光学系

IS1, IS2 は撮像装置 (JAI, GO-5100MP-USB) を使用した. LS1 (Coherent, Sapphire 488.2nm) と LS2 (Cobolt, Calypso 491.8nm) はレーザー光源である. その他の構成は, QWP は 1/4 波長版 (シグマ光機, WPQ-4880-4M), BS は無偏向キューブビームスプリッタ (シグマ光機, HBCH-20-550), PBS は広帯域偏光ビームスプリッタ (シグマ光機, PBSW-20-550) である. ビームスプリッタと 1/4 波長版, および使用したレンズはスペックルノイズを抑えるために AR コート (490nm) を施した.

ホログラム生成手段についてはフーリエ変換法から偏光イメージセンサを用いた並列位相シフト法に変えることで解像度が向上した. 参照波の傾斜角度等によるが, 一般的に, フーリエ変換法は解像度が画素ピッチの 1/3 程度に低下する. 一方, 偏光イメージセンサを用いた並列位相シフト法では画素ピッチの 1/2 の解像度が得られるためである.

LED を光源とした光学系は, 光源のコヒーレンスを向上させるために, バンドパスフィルタやスペイシャルフィルタを用いた. そのため光源の明るさが低下し, 計測に必要な輝度を得るために, 2.7 秒の露光時間が必要であった. 2 つの波長の露光のタイミングは同時だが, 露光時間が長く産業的な利用には不利である. 本システムは光源にレーザーを用いることで, 露光時間を 7ms まで短縮することができた. 露光時間を短くすることで, 撮像時間を短縮し, 結果として計測時間を短縮することができる. 撮像時間短縮の利点はこれだけではない. 特に産業的な利用においては, 撮像時間が短い場合, 計測対象を停止させることなく, 移動しながら連続計測が可能となるため, 移動→停止→撮像→移動を繰り返すシステム

よりはるかに高速に検査が可能となる。また、停止後に撮像するシステムでは、計測ヘッドや計測対象が完全に停止するまで待つ必要がある。完全に停止するのは非常に時間がかかるため、通常は、計測ヘッドが目標地点に到達した後、ある範囲内に一定時間収まったら停止したものとみなして計測を行う。このため、計測ヘッドの振動が完全に収まらず、計測精度を悪化させる。また、この振動は毎回同じ動きをすることは限らないため、装置の繰り返し精度を悪化させる要因にもなるのである。

これらの点から、本システムは工業的な利用に対して非常に適したシステムであると言える。

4.4 バンプ計測の結果

本システムにてバンプサンプルを計測した結果を示す。計測に用いたバンプは高さ $10\mu\text{m}$ 、直径 $20\mu\text{m}$ を狙って設計し、製作されたものである。図 4.10 にバンプの構造とその設計値を示す。また、図 4.11 にウェーハとバンプの外観写真を示す。

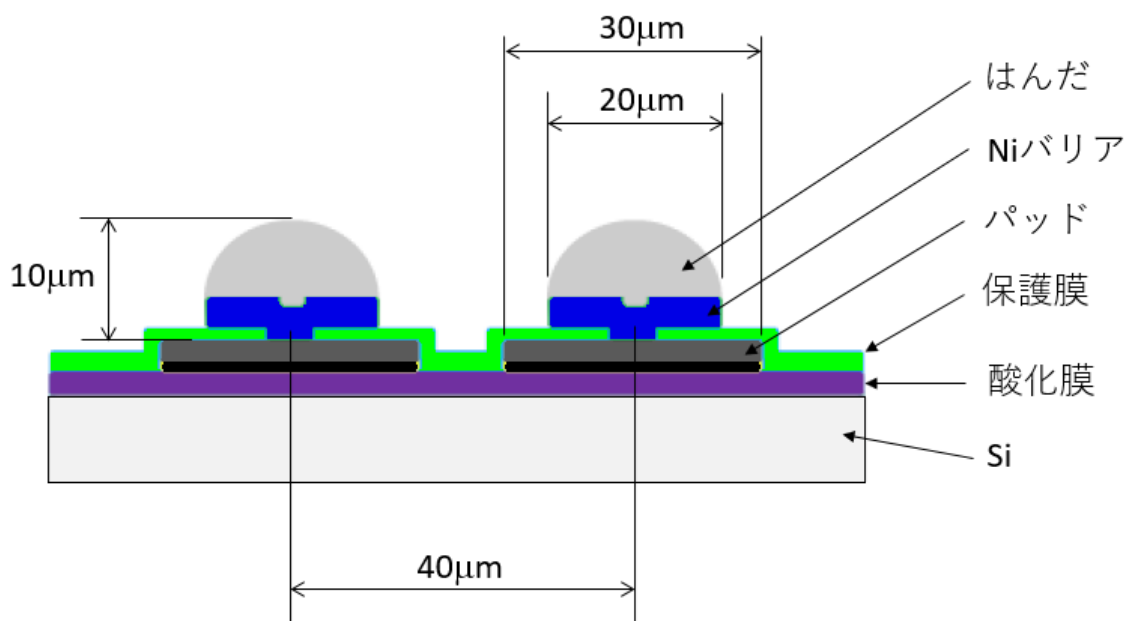
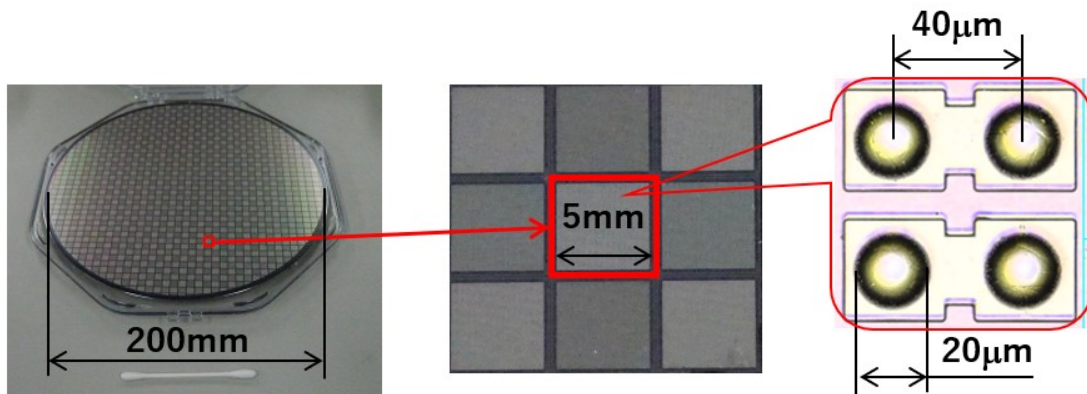


図 4.10 バンプ構造



8インチウェーハ 半導体チップ マイクロバンプ

図 4.11 ウェーハおよびバンプ写真

図 4.12 の(a),(b)は偏光イメージセンサで撮像した干渉像, (c),(d)は再生した振幅画像, (e),(f)は再生した位相画像である. 尚, レーザーの出力は 100mW, 撮像時間は 7ms である.

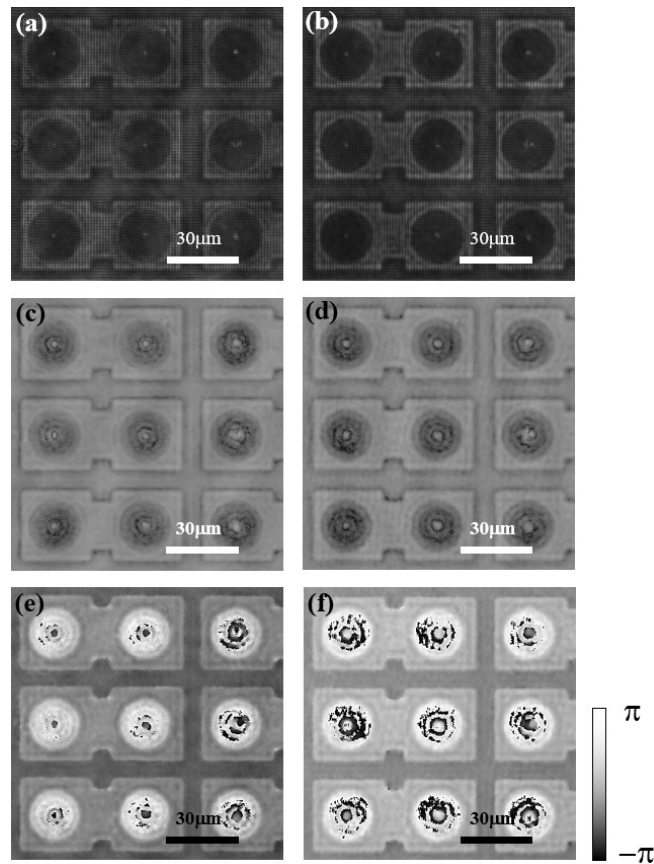


図 4.12 (a),(b) λ_1, λ_2 の偏光イメージセンサの干渉像, (c),(d) λ_1, λ_2 の再生した振幅画像, (e),(f) λ_1, λ_2 の再生した位相画像 ($\lambda_1=488.2\text{nm}$, $\lambda_2=491.8\text{nm}$)

干渉像は偏光イメージセンサの元画像である。平面部が細かい市松模様のようになるのは 2×2 画素において異なる 4 種類の偏光子のパターンが繰り返されるためである。干渉像、振幅画像、位相画像のいずれも、バンプの丸い形状が確認できる。位相画像を確認すると、バンプ表面に位相情報が現れているため、形状計測できているように思われる。しかし、振幅画像を確認すると、バンプ上で十分な明るさが確認できている場所は頂点部分のわずかな領域だけである。従って、高さ計測値を使うのはバンプ上で十分な光量が得られた領域だけとし、それ以外は計測から除外する。以下に、計測可能領域と除外領域の切り分け方について説明する。

撮像した干渉像より得られる物体光の複素振幅は(3.5)式で表された。この複素振幅情報から強度情報を得ることで、次式のマスク情報を作成する。

$$M_n(x, y) = \begin{cases} 1 & (|u_n(x, y)|^2 \geq k) \\ 0 & \text{(no data) else} \end{cases}. \quad (4.10)$$

ここで、 k は強度の閾値である。この閾値の決め方は下記の通りである。

$|u_n(x, y)|^2$ は $u_n^{(C)}(x, y)$ により規格化された $u_n^{(T)}(x, y)$ の強度であり、その振幅は干渉縞のコントラストに比例する。 $u_n^{(C)}(x, y)$ を計測した際の干渉縞のコントラストが、カメラの諧調で I_c であったと仮定すると、 $u_n^{(T)}(x, y)$ の干渉縞のコントラストは $k \times I_c$ となる。一方、システムに要求する高さ分解能を Z_{min} とすると、反射光学系なので、光路差 ΔL は $2 \times Z_{min}$ の差を識別できることが必要である。その位相差は(2.20)式より次式で表される。

$$\phi_1 - \phi_2 = 4\pi Z_{min} / \Lambda. \quad (4.11)$$

1 画素で上式の位相差を検知するためには、諧調は $2\pi / (\phi_1 - \phi_2)$ 必要となるが、位相シフト法は 4 画素の輝度を使用するので、そのいずれかが輝度変化を検知できれば良い。

従って、次式が成り立つ。

$$4kI_c > 2\pi / (\phi_1 - \phi_2). \quad (4.12)$$

上式に(4.4)式を代入し k について解くと次式が得られる。

$$k > \frac{\Lambda}{8I_c Z_{min}}. \quad (4.13)$$

本実験ではカメラ画像の出力ビットは 8bit であるため、平面ミラー計測時の干渉縞コントラスト I_c は 200 程度であった。また、システムに要求する Z 軸方向への分解能 Z_{min} を $0.1\mu\text{m}$ とすると $k > 0.208$ となる。この値を用いて作成したマスク画像が図 4.13 である。

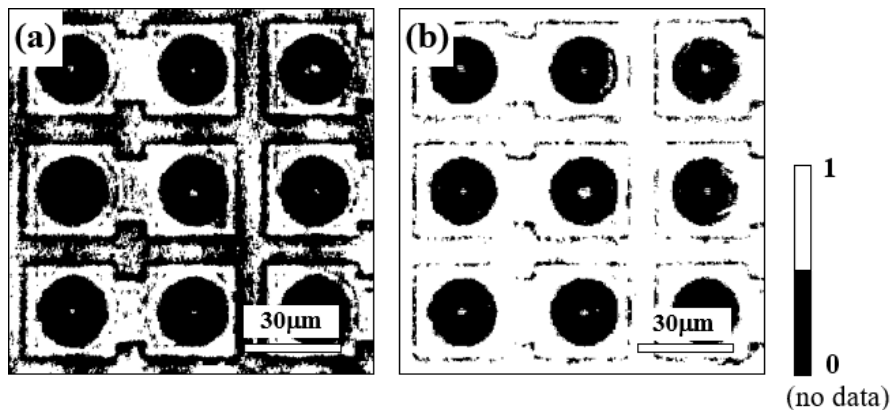


図 4.13 (a),(b) λ_1, λ_2 の強度画像から作成したマスク画像

はんだ頂点部は計測可能のエリアとなっていることが確認できる。 λ_1 と λ_2 の位相画像にマスク画像に基づくマスク処理を施したものを図 4.14 に示す。

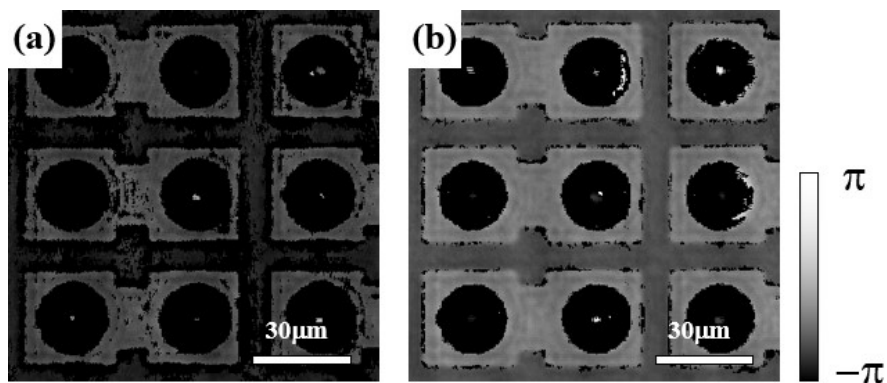


図 4.14 (a),(b) λ_1, λ_2 のマスク処理された位相画像

マスク処理された λ_1 と λ_2 の位相画像から、両波長の位相データが得られた画素において (2.20) 式より 2 波長計測による高さを得ることができる。図 4.15 は得られた画面中央のバンプの計測結果である。

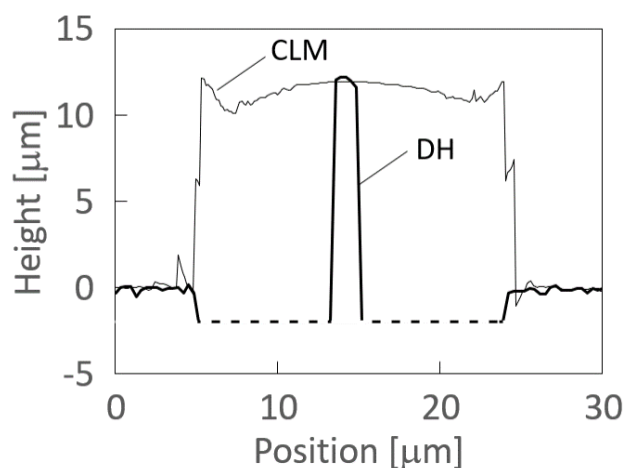


図 4.15 バンプの断面グラフ

DH は本システムにより計測した結果の断面プロファイル，CLM（Confocal Laser Microscope）は共焦点レーザー顕微鏡 VK-100（キーエンス製）による断面プロファイルである．DH の破線部はマスク処理により計測を除外した部分を示している．このグラフより，バンプ頂点部分の高さは，CLM とよく一致していることが確認できる．表 4.1 に本システムと CLM の比較を示した．また，4.1 節で示した LED+フーリエ変換法による計測結果も示した．

表 4.1 デジタルホログラフィと共焦点レーザー顕微鏡の比較

	計測エリア	画素ピッチ (物体面上)	撮像時間	高さ誤差
LED+ フーリエ変換法	1.19×1.19mm	0.58μm	2.7s	2.5%
レーザー+ 並列位相シフト法	0.68×0.68mm	0.33μm	7ms	1.8%
VK-100	0.277×0.207mm	0.13μm	20s	—

表 4.1 より，本システムは VK-100 と比較し，計測エリアは約 8 倍，1 画面の撮像時間は 1/2857 である．また，LED+フーリエ変換のシステムと比較して，計測エリアは 1/3.06 に減少したが，撮像時間が 1/386 に短縮されたため，単位時間当たりの計測面積は 126 倍に向上した．本システムに採用したカメラは，7ms の露光時間で使用すると 74fps の撮像が可能であるため，単位時間当たりの計測面積は 34.2mm²/s となる．これは約 1.75WPH（1 時間当たりの 300mm ウェーハの検査枚数）に相当する検査速度である．本テスト装置のレ

レンズ倍率は 10.45 倍と高いため、計測エリアが小さくなり、目標の 100WPH には到達していない。しかし、以下の点を改善することで計測速度の向上が見込める。まず、偏光イメージセンサは 4096×3000pix のものもラインナップされているので、これを利用することで計測エリアを拡大可能である。また、レンズ倍率の見直しが可能である。計測対象を直径 20 μm バンプと想定すると、物体面上での画素ピッチはその 1/10 である 2 μm は必要であるが、少し余裕を持たせ、1.5 μm とする。これらの変更を加えると、本システムで 104WPH の検査速度が達成可能である。100WPH を目指すにあたり、現状の精度を維持したまま、物体面上での画素ピッチを 1.5 μm まで変更することが課題となる。

第5章 完全対向設置

これまで示した計測システムは偏光を利用した干渉計をベースにしたシステムである。このシステムには 1/4 波長板が偏光の方向を変える目的で設置されている。しかし、波長板による偏光方向の変化は、波長のわずかな変化や、波長板の仕様、設置角度などにより p 偏光と s 偏光を完全に切り替えることは困難である。この問題を解決する方法として偏向を利用しない方法を提案する。具体的には、第一波長と第二波長のビームが計測物体に入射する際、わずかに光路の角度をずらすことで、出射光を別々の場所に導くのである。このような構成とすることで波長板を使わずに近接 2 波長の同時露光が可能となる。本研究ではこの配置を完全対向設置と呼ぶ。この光学系にすることで波長選択性はさらに向上するため、計測時における精度の更なる向上が期待できる。以下に、2 波長対向設置のマイケルソン干渉計を例に説明する。

5.1 完全対向設置（マイケルソンタイプ）

図 5.1 は偏光を利用したマイケルソン干渉計の偏光の様子を併記した光路図である。記入した光線は同一光源からの光を表しており、Mirror へ向かう光と Target へ向かう光をそれぞれ青色と赤色の矢印で表示した。

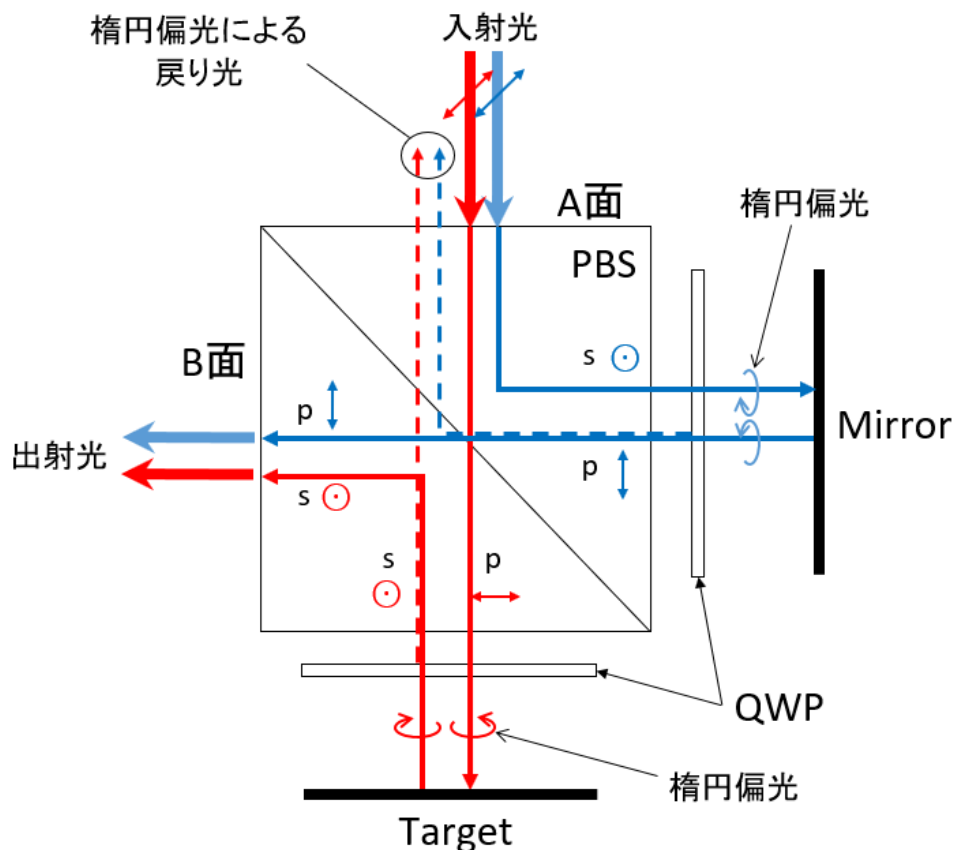


図 5.1 偏光マイケルソン干渉計の偏光の様子 (1 波長)

偏光を利用したマイケルソン干渉計は、PBS の A 面から入射した光が Mirror と Target に向かう間の QWP を通過することで円偏光になり、Mirror と Target から反射した光が再び QWP を通過することで円偏光が直線偏光に戻る。この一連の流れで p 偏光は s 偏光に、s 偏光は p 偏光に偏光の方向が変わり、全ての光は B 面から出射する。しかし、これは QWP による直線偏光と円偏光の変換が理想的に行われた場合に限り、QWP の仕様の波長とビームの波長にずれがあったり、波長板の方位角が 45 度からずれていたり、光軸が合っていない等により、円偏光が楕円偏光になり、図中の破線の光線が発生し、一部が A 面に戻る。1 波長の計測では戻り光は撮像に影響を与えないが、本研究で提案した対向設置では戻り光の行く先に第 2 波長を撮像するカメラがあるため、問題となる。

この問題を解決するため、本研究では光源の光軸をわずかにずらした光路を提案する。まず、1 つの波長について光軸をずらした光路図を図 5.2 に示す。

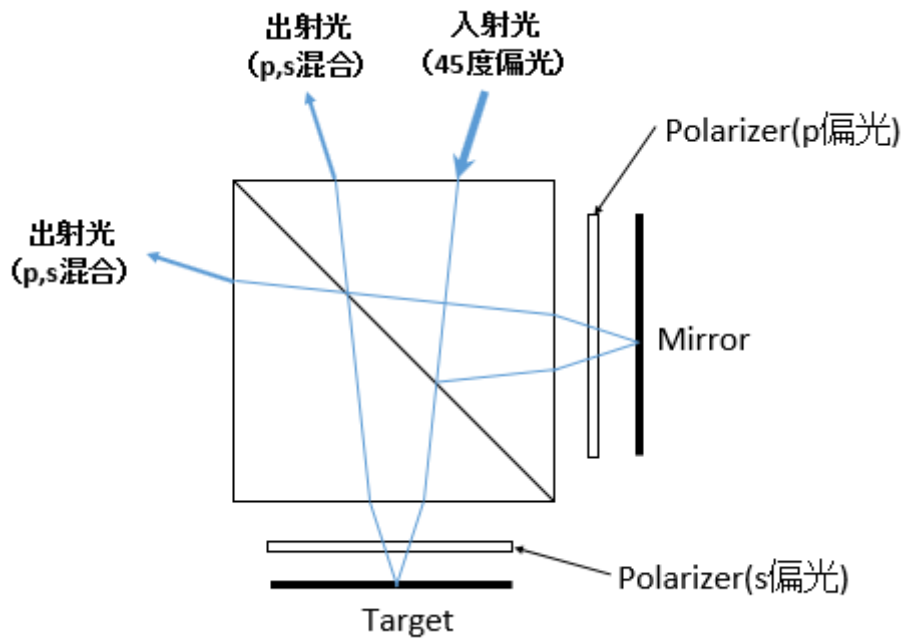
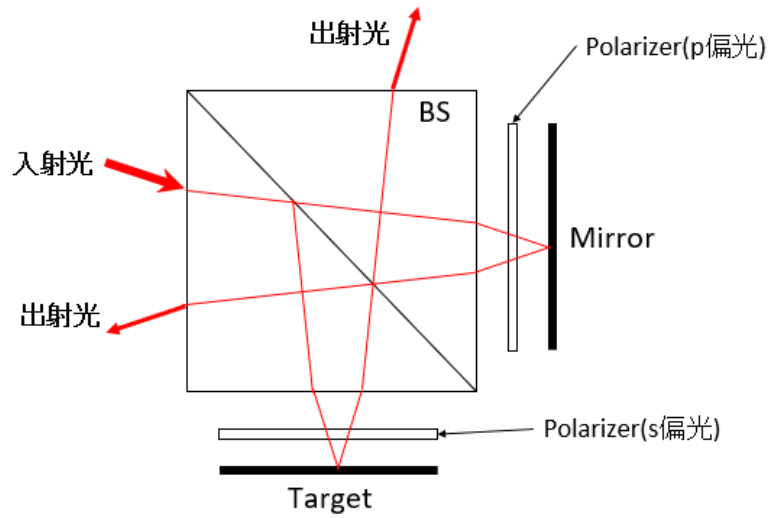


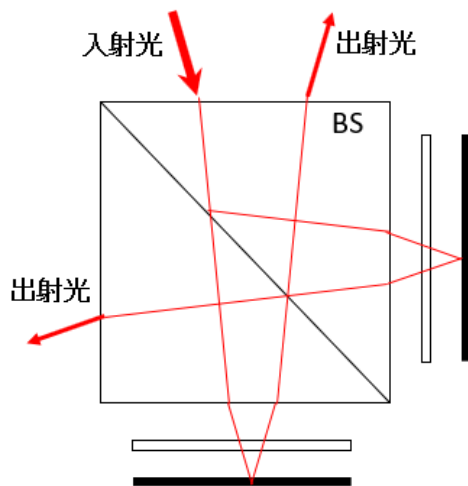
図 5.2 光軸をずらしたマイケルソン干渉計の光路

入射光の光軸の角度をわずかにずらしたことで、ビームスプリッタのある1つの面に入射した光が、Mirror と Target に反射し、入射した場所とは異なる別の2か所から射出される。もう一方の波長についても同様のことが起こる。ここで、第二波長の3つの配置方法を図 5.3 に示す。

第二波長の光路①



第二波長の光路②



第二波長の光路③

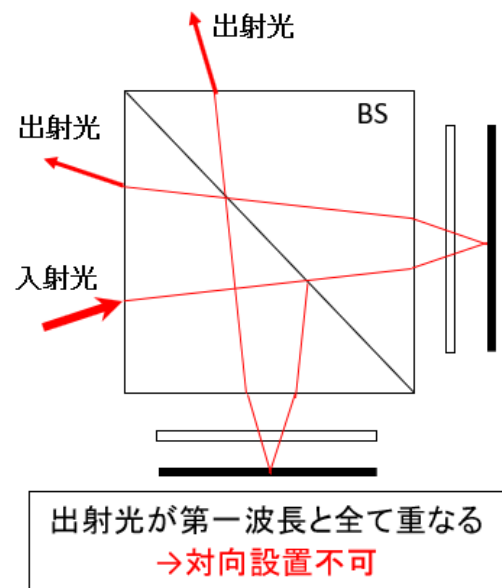
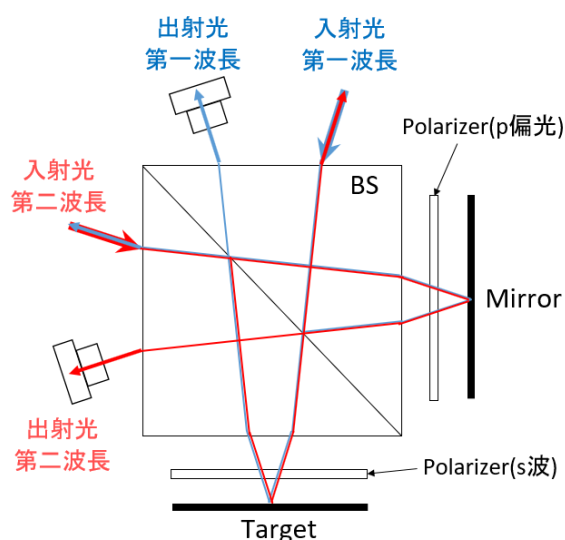


図 5.3 第二波長の配置方法

①～③のうち、③については第一波長の 2 つの出射光と第二波長の 2 つの出射光がともに重なってしまうため、対向設置はできない。従って、①の配置と②の配置が対向設置可能である。第一波長と第二波長①、②とを組み合わせた場合の光路図を図 5.4 に示す。

完全対向設置1



完全対向設置2

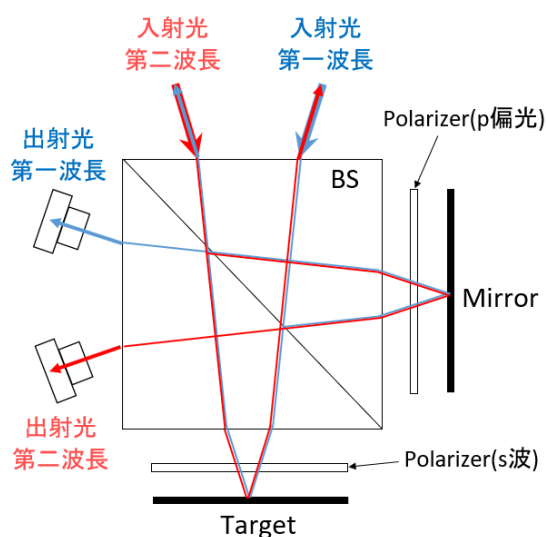


図 5.4 完全対向設置の光学系

いずれの構成も偏光を利用せず、対向設置可能だが、偏光イメージセンサを用いた並列位相シフトデジタルホログラフィに対応できるように、Target と Mirror の前に偏光板を設置した。これらはそれぞれ光学軸が 90 度異なる方向である。完全対向設置 1 は光源がビームスプリッタの異なる面に配置される構成、完全対向設置 2 は 2 つの光源がビームスプリッタの同一面に配置される構成である。これらはこれまでの対向設置と異なり、光源の直後の BS も不要となるため、構成がシンプルで、使用する光学部品点数の削減も可能である。通常、カメラは第一波長と第二波長において同一のものを使用するため、光源の大きさが第一波長と第二波長でほぼ変わらない大きさであれば、光源とカメラを組み合わせで同一面に配置した方がシステムを小型にできる。本章の後半で完全対向設置 1 の配置にて評価テストを行い、計測の結果を示す。

5.2 完全対向設置 (マッハ・ツェンダータイプ)

本研究では計測対象が反射物体であるため、これまでマイケルソン干渉計を基本構成としたが、対向設置はマイケルソン干渉計に限らず、他の干渉計においても応用することが可能である。その一例としてマッハ・ツェンダー干渉計に応用した場合について述べる。

図 5.5 はマッハ・ツェンダー干渉計を完全対向設置の構成にした際の光路図である。

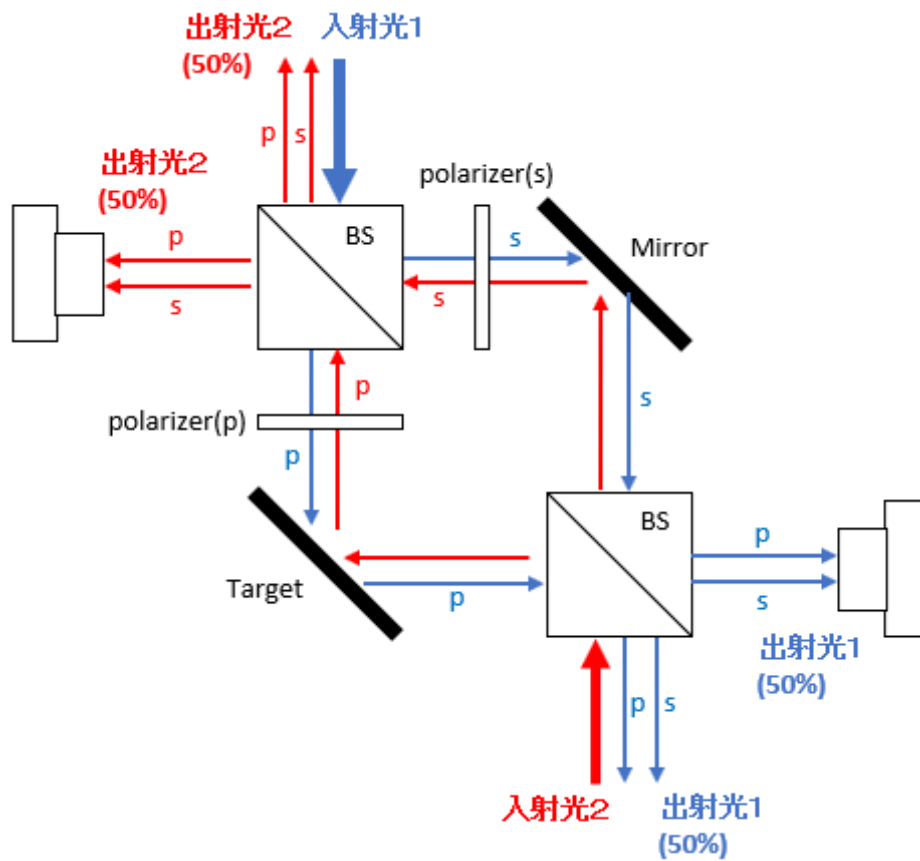


図 5.5 完全対向設置 (反射マッハ・ツェンダータイプ)

カメラに偏光イメージセンサを用いることで並列位相シフトデジタルホログラフィが実装可能となるように、光路の途中に偏光板を設置した。第一波長は計測物体に照射する前に偏光板を通過することになり、第二波長は計測物体に反射した後の光が偏光板を通過することになるので、両者で条件が異なる。この差をなくすために Work と Mirror を挟むように偏光板を設置しても良い。

この配置では光源のビームが BS の面に垂直に入射しているため、Work に対し、斜め 45° からビームが照射され、撮像においても Work を斜め 45° から撮像することになる。しかし、検査では検査対象を真上から観察することが好まれる。図 5.6 はそのような要求に対応するために変形した光学系である。

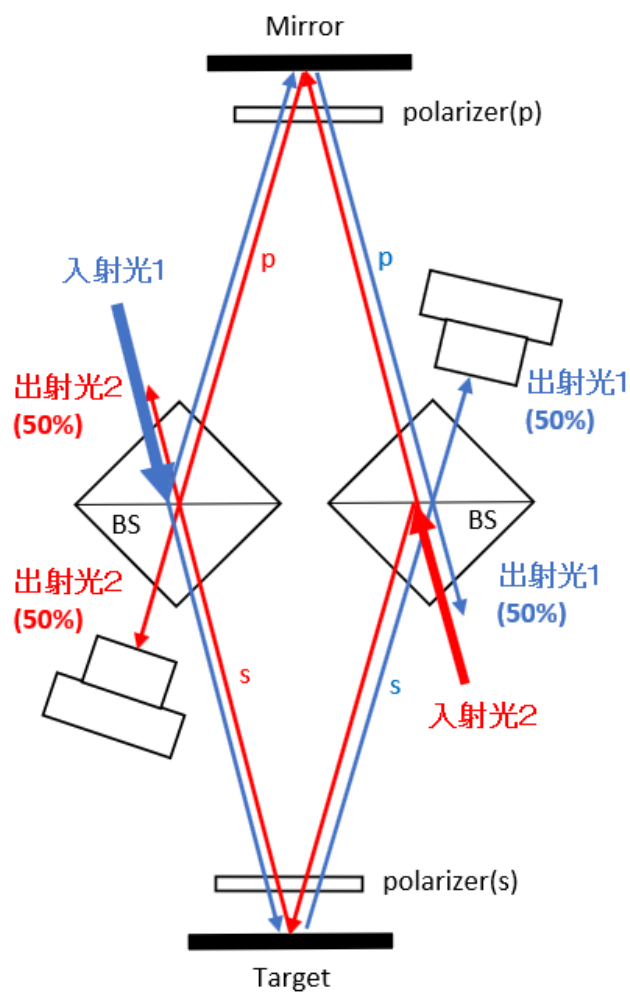


図 5.6 変形した完全対向設置 (マッハ・ツェンダー干渉計)

このような配置とすることで、Work に対して検査用のビームがほぼ垂直に照射され、撮像もほぼ垂直方向からの撮像が可能となる。

これらの光路図は反射計測を行う光学系であるが、Work を Mirror にすることで、透過型の干渉計にも応用可能である。

5.3 テスト装置の構成

図 5.7 はテスト装置の光学系の図である。

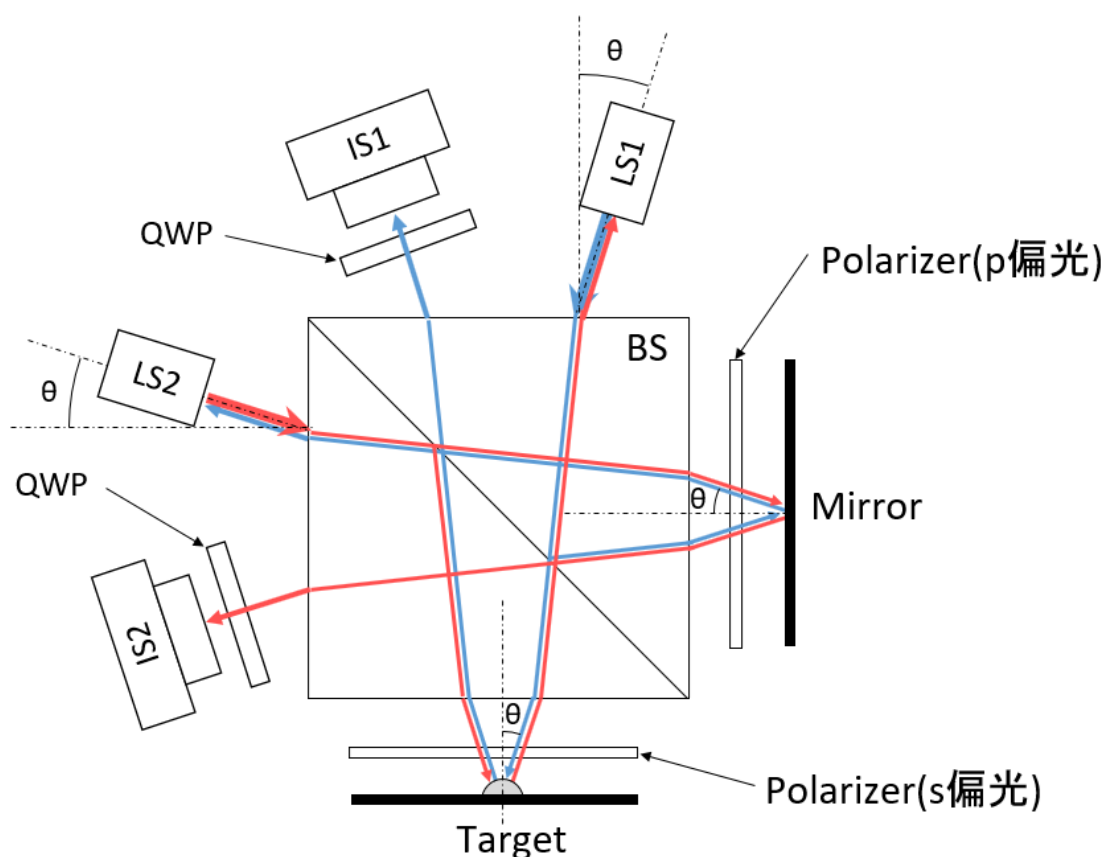


図 5.7 完全対向設置テスト装置の光学系

IS1, IS2 はカメラ (JAI, GO-5100MP-USB) である. LS1 (Coherent, Sapphire 488.2nm) と LS2 (Cobolt, Calypso 491.8nm) はレーザー光源である. その他の構成は, QWP は 1/4 波長版 (シグマ光機, WPQ-4880-4M), BS は無偏向キューブビームスプリッタ (エドモンドオプティクス, #49-006), Polarizer は偏光フィルタ (エドモンドオプティクス, #43-787) である. 中央のビームスプリッタは斜めに入射する光と出射する光が同一の面に存在するため, 大型のものを選ぶ必要がある. 本研究では図 5.8 の写真に示すように 1 辺の長さが 50mm のものを使用した. また, 光線の角度 θ は 5.2° となるように設置した. 本システムによって計測される高さは, 第一波長と第二波長により得られた位相分布を $\phi_1(x, y)$, $\phi_2(x, y)$, 光線の Target に入射する角度を θ とすると, (2.20) 式より次式のように表される.

$$\Delta L(x, y) = \Lambda \frac{\phi_1(x, y) - \phi_2(x, y) + 2\pi p}{2\pi} \cos \theta. \quad (5.1)$$

$$\text{ただし, } \begin{cases} p = 0 & \phi_1(x, y) - \phi_2(x, y) \geq 0 \\ p = 1 & \text{else} \end{cases}.$$

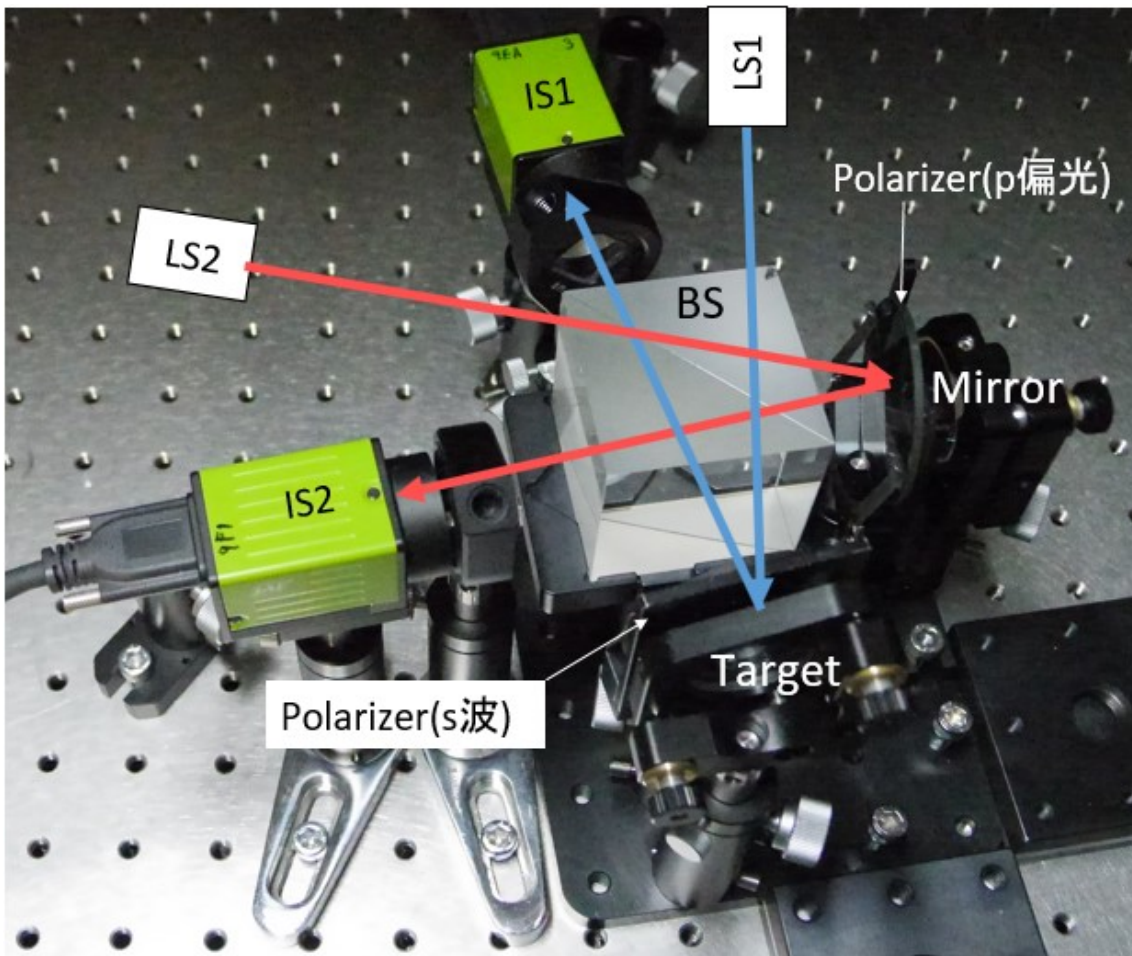


図 5.8 完全対向設置テスト装置写真

5.4 段差ミラーの計測結果

本テスト装置にて、 $11.86\mu\text{m}$ の段差のあるミラーを計測した。図 5.8(a),(b)は第一波長と第二波長の干渉像, (c),(d)は第一波長と第二波長における物体面で再生した強度画像, (e),(f)は第一波長と第二波長の物体面における位相画像である。本システムはレンズを用いないため、干渉像はピントが合っていない画像となるが、再生距離 120mm の位置ではピントの合った強度画像と位相画像が得られていることが確認できる。

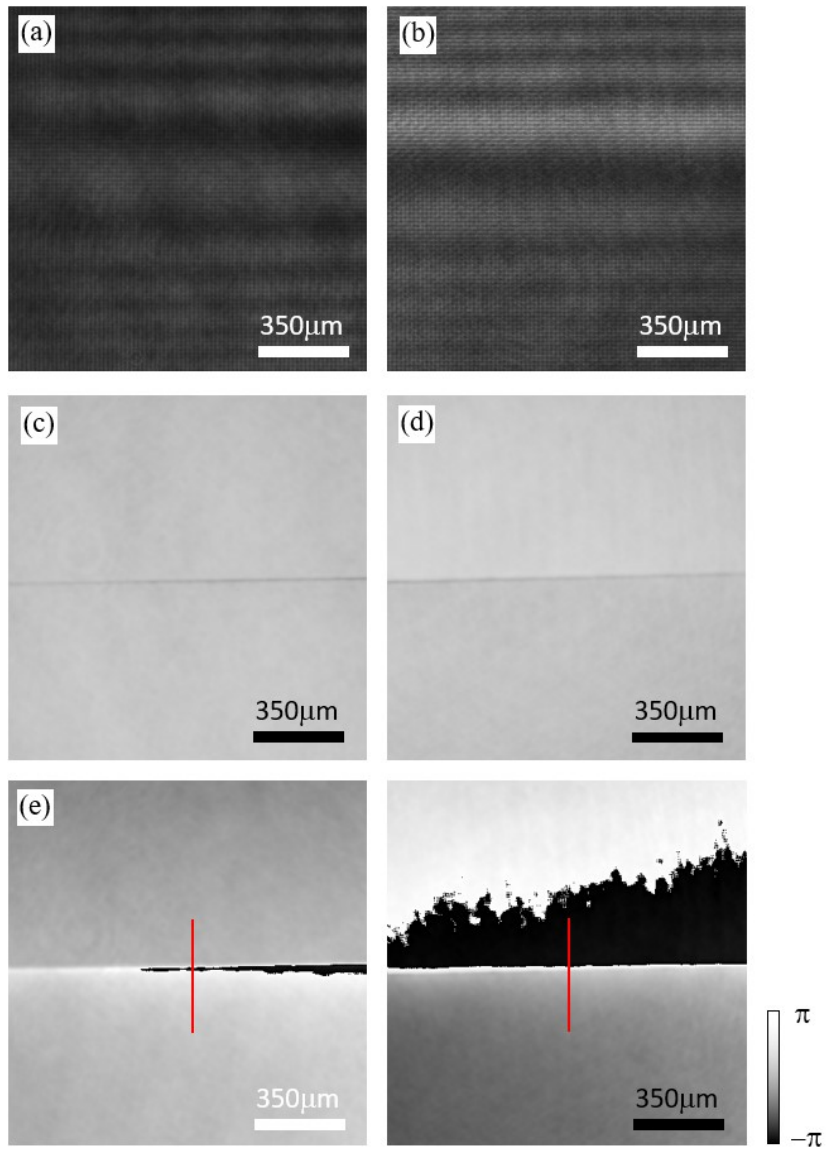


図 5.8 (a),(b) λ_1, λ_2 の偏光イメージセンサの干渉像, (c),(d) λ_1, λ_2 の再生した振幅画像, (e),(f) λ_1, λ_2 の再生した位相画像 ($\lambda_1=488.2\text{nm}$, $\lambda_2=491.8\text{nm}$)

図 5.9 は図 5.8(e),(f)の赤線部の高さ計測結果の断面図である.

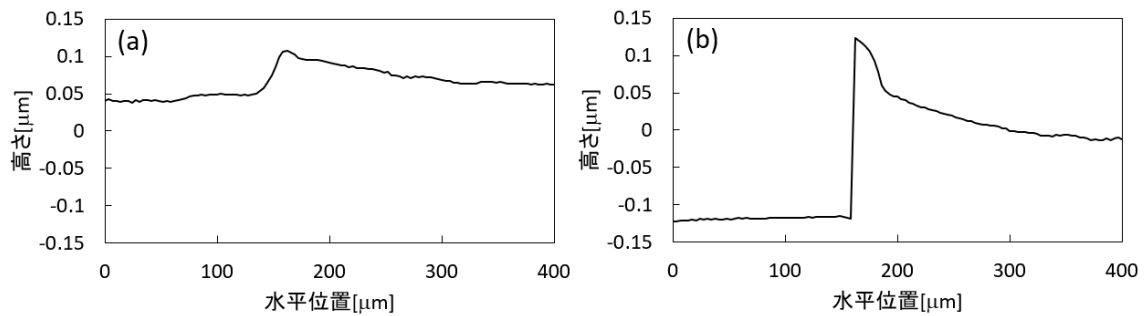


図 5.9 段差ミラー高さ計測結果 (a) $\lambda_1=488.2\text{nm}$ (b) $\lambda_2=491.8\text{nm}$

段差は $11.86\mu\text{m}$ であるため、1 波長による計測は不可能である。図 5.10 は 2 波長合成による高さ計測結果の断面グラフである。

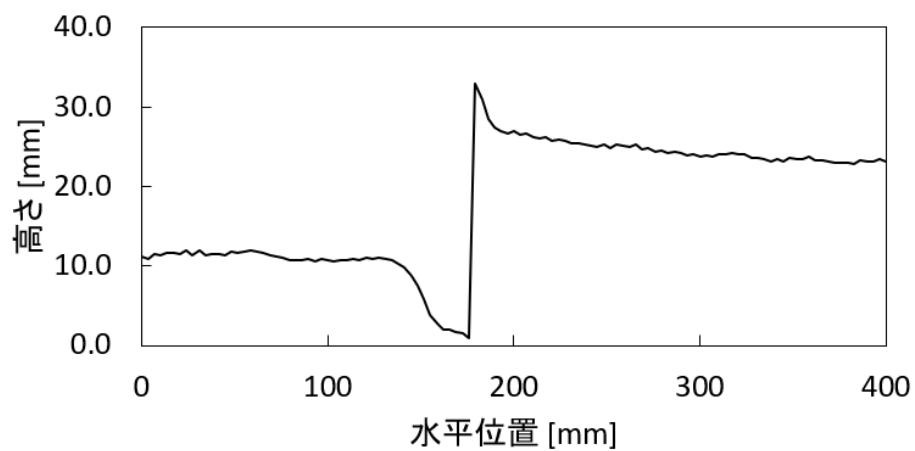


図 5.10 2 波長合成による高さ計測結果

2 波長合成による段差計測結果は $11.55\mu\text{m}$ であり、誤差は $0.31\mu\text{m}$ となった。ダイナミックレンジを拡大した計測は問題なくできていると判断可能である。

第6章 結論

光の波長を超える高さを持つ鏡面物体の3次元計測の手法として、近接した2波長による、2波長同時撮像可能な光学系を提案し、有効性を確認した。本システムで使用する2つの波長は、数十 μm の計測対象を計測可能なダイナミックレンジを確保するため、波長差が2~4nm以下であることが必要であり、一般的な光学フィルタではこのわずかな波長差を十分な波長選択性を確保して分離することが困難である。この課題に対し、偏向を利用したマイケルソン干渉計の物体光路と参照光路を共通とする2つの干渉計を、光源が対向するように重ね合わせた光学系を提案することで、特殊な光学部品を使用せず、高い波長選択性を持つ光学系を構築した。

光源にLEDを用い、ホログラム生成方法にフーリエ変換法を用いたシステムを構築し、近接する2波長を用いた2波長法において、それぞれの波長の画像を同時撮像するための提案の光学系（対向設置）の有効性を確認した。まず平面ミラーの計測を行い、計測精度を確認した。回帰直線とのRMS誤差はそれぞれの波長において $\lambda_1/237$ と $\lambda_2/211$ となり、2波長合成による回帰直線とのRMS誤差は $\Lambda/156$ となった。このとき、波長 $\lambda_1=455\text{nm}$ 、 $\lambda_2=458\text{nm}$ であり、合成波長 $69.5\mu\text{m}$ であった。また、光の波長を超える高さの鏡面物体の計測精度を確認するため、計測対象となる鏡面の高さをピエゾステージで変化させ、その計測値を確認した。計測対象となる鏡面の位置を基準位置から $-25\mu\text{m}$ ~ $25\mu\text{m}$ の範囲で変化させた際の、ピエゾステージへの指令値とのRMS誤差は $\Lambda/175$ となった。 $-10\mu\text{m}$ から $10\mu\text{m}$ の範囲では、同RMS誤差は $\Lambda/325$ となり、 $10\mu\text{m}$ の計測対象の計測には十分な精度であった。

光源にレーザーを用い、偏光イメージセンサにより並列位相シフトデジタルホログラフィを実装した計測システムを提案し、LED+フーリエ変換法のシステムより高速化・高解像度化したシステムを構築した。偏向イメージセンサについて、偏光子の角度ずれ量を調査する方法を示した。また、隣接画素間位相シフト法における4ステップ位相シフト計算式について、4つの隣接画素の偏光子が任意の角度であっても正確な位相を算出可能な式を導出することで、計測精度を向上させることができた。このシステムでは光源にレーザーを使用したため、露光時間はLEDを用いたシステムに対して $1/3800$ に短縮でき、 74fps の繰り返し撮像が可能なシステムであることが分かった。このシステムで実際にバンプを計測し、レーザー共焦点顕微鏡と計測した高さを比較した結果、 1.8% の誤差であった。バンプは表面が半球状の鏡面であるため、垂直方向から計測光を照射した場合、バンプ中心から離れるにつれ、その反射光はカメラで得ることが困難となる。この結果、バンプの周辺部は十

分な反射光が得られないため、再生画像の強度が十分高い画素を計測が安定している場所と判断し、計測する手法を提案し、その有効性を示した。強度が不十分な画素は干渉縞のコントラストが低下し、計測システムの高さ方向の分解能に影響することを示し、システムに要求される高さ方向分解能から強度マスクの閾値を設定する方法を示した。本システムでは光学系の歪みを除去するために平面鏡のホログラムをあらかじめ取得しておき、計測物体を計測する際、取得しておいた平面鏡のホログラムを用いて補正する手法を採用しているので、強度マスクの閾値を求める方法はこの点も考慮した。カメラからの画像出力が 8bit であり、平面鏡を撮像した際の干渉縞のコントラストが 200, $0.1\mu\text{m}$ の高さ分解能をシステムに要求する場合、強度マスクの閾値は 0.208 になることを示した。

対向設置は偏光ビームスプリッタを使用したマイケルソン干渉計において、計測する光が $1/4$ 波長板を往復することで、p 偏光と s 偏光をそれぞれ s 偏光と p 偏光に変換することで成立するが、光源の光軸をわずかにずらすことでこの変換を必要としない光学系を提案した。入射する光源の位置と撮像の位置の組み合わせにより 2 つのケースが可能であることを示した。そのうちの 1 つの光学系を用いて $11.86\mu\text{m}$ の段差計測を行い、1 波長のダイナミックレンジを超える 3 次元計測が可能であることを示した。

本研究を通して、近接 2 波長による瞬時撮像並列位相シフトデジタルホログラフィの高速、高精度 3 次元形状計測の有効性が示された。この時の単位時間当たりの計測面積は $34.2\text{mm}^2/\text{s}$ であり、生産速度の 100WPH ($1963\text{mm}^2/\text{s}$) には到達していない。しかし、以下の対策を行うことで 104WPH が達成可能である。

- ・ 偏光イメージセンサを高画素のものに変更する（画素数約 2.9 倍）
- ・ レンズ倍率を 10.5 から 2.3 倍へ変更する（検査面積約 20.7 倍）

これらの変更により産業的な利用に十分耐えうるシステムとなることが期待できる。

謝辞

本研究は宇都宮大学オプティクス教育研究センターにおいて、指導教員である早崎芳夫教授の下で行われました。

本研究の遂行、および、本論文の作成にあたり、学術的な内容のご指導やご助言だけでなく、研究者としての思想の教示、更には学会誌への論文投稿や学会での発表に関する手ほどき等に至るまで、ご多忙の中、常に親身になってご指導いただきました宇都宮大学 オプティクス教育研究センター 早崎芳夫教授に感謝の意を表します。

本論文を作成するにあたり、偏光に関する貴重なご助言を賜りました副指導教員でもある宇都宮大学 大谷幸利教授に深く感謝の意を表します。

学位取得に向け、ご多忙の中、専門分野を超えた幅広い教えを賜りました副指導教員の宇都宮大学 杉原興浩教授、副専門指導教員の宇都宮大学 湯上登教授、同 山本裕紹教授に深く感謝申し上げます。

学位取得に向け丁寧にご対応くださいました熊谷助教に深く感謝申し上げます。

社会人である小生を明るく受け入れてくださり、研究室では常に親切に接してくださいました早崎研究室の皆様に深く感謝申し上げます。

レンズに関する基本的な事柄から専門的な内容に至るまで、多くのご助言や貴重なご意見を賜りました有限会社フィット 代表取締役 長岡暢様、デジタルカメラに関しまして多くのご助言を賜りました株式会社アイジュール 代表取締役 川村久雄様に深く感謝申し上げます。

社会人ドクターとして学位を取得するという大変貴重な機会を与えてくださいましたCKD 株式会社 フェロー 西尾竜也様、CKD 株式会社 野田尚彦様、学位取得に向け常に叱咤激励とご助言を賜りました職場における恩師である、同 間宮高弘様、業務遂行と学位取得の両面からご助力をいただきました、同 二村伊久雄様、光学系のテストにご助力くださいました、同 岡田点様に深く感謝申し上げます。

また、遠方より常に気をかけてくださいました両親と兄弟に深く感謝申し上げます。

最後に、在学期間中、これまでに経験したことのない covid-19 の影響による生活環境の大きな変化の中にあっても、常に小生の体調面と精神面を献身的に支えていただきました妻、由香に、心より感謝の意を表します。

最後に、今までお世話になりました全ての方々に深く感謝申し上げます。ありがとうございます。

参考文献

1. 日本光学測定機工業会（編）, "光計測ポケットブック," 朝倉書店（2010）.
2. 吉澤徹（編）, "最新 光三次元計測," 朝倉書店（2006）.
3. Y. Geng, Y. Zhao, and H. Chen, "Stereo matching based on adaptive support-weight approach in RGB vector space," *Appl. Opt.* **51**, 3538–3545 (2012).
4. 小田倉聡司, 阿部亨, 木下哲男, "遮蔽に頑健な多眼ステレオ法," 電子情報通信学会技術研究報告. PRMU, パターン認識・メディア理解 **105**, 37–42 (2005).
5. 早崎芳夫（編）, "デジタルホログラフィ," 朝倉書店（2016）.
6. U. Schnars and W. Jüptner, "Digital Holography," Springer (Berlin), (2015) Chap. 3.
7. L. Onural and P. D. Scott, "Digital Decoding Of In-Line Holograms," *Opt. Eng.* **26**, 261124 (1987).
8. U. Schnars and W. Jüptner, "Direct recording of holograms by a CCD target and numerical reconstruction," *Appl. Opt.* **33**, 179–181 (1994).
9. T. Thong-on, T. Prakobsang, W. Pethsanthad, C. Boonsri, S. Plaipichit, P. Buranasiri, and K. Yoshimori, "The investigation of thermal effect on dynamical shape changing of solder paste by using double-view digital holography," *Proc. SPIE* **9659**, 965912 (2015)
10. M. Servin, J. L. Marroquin, D. Malacara, and F. J. Cuevas, "Phase unwrapping with a regularized phase-tracking system," *Appl. Opt.* **37**, 1917–1923 (1998).
11. H. S. Abdul-Rahman, M. A. Gdeisat, D. R. Burton, M. J. Lalor, F. Lilley, and C. J. Moore, "Fast and robust three-dimensional best path phase unwrapping algorithm," *Appl. Opt.* **46**, 6623–6635 (2007).
12. P. Lam, J. D. Gaskill, and J. C. Wyant, "Two-wavelength holographic interferometer," *Appl. Opt.* **23**, 3079–3081 (1984).
13. O. Sasaki, H. Sasazaki, and T. Suzuki, "Two-wavelength sinusoidal phase/modulating laser-diode interferometer insensitive to external disturbances," *Appl. Opt.* **30**, 4040–4045 (1991).
14. U. P. Kumar, B. Bhaduri, M. P. Kothiyal, and N. K. Mohan, "Two-wavelength micro-interferometry for 3-D surface profiling," *Opt. Lasers Eng.* **47**, 223–229 (2009).
15. S. Jeon, J. Cho, J. Jin, N.-C. Park, and Y.-P. Park, "Dual-wavelength digital holography with a single low-coherence light source," *Opt. Express* **24**, 18408–18416 (2016).
16. M. Yonemura, "Wavelength-change characteristics of semiconductor lasers and their application to holographic contouring," *Opt. Lett.* **10**, 1–3 (1985).
17. W. Nadeborn, P. Andrä, and W. Osten, "A robust procedure for absolute phase

- measurement," *Opt. Lasers Eng.* **24**, 245–260 (1996).
18. Joseph W. Goodman, “フーリエ光学第3版,” 尾崎義治・朝倉利光訳, 森北出版株式会社 (2012).
 19. M. Takeda, H. Ina, and S. Kobayashi, "Fourier-transform method of fringe-pattern analysis for computer-based topography and interferometry," *J. Opt. Soc. Am.* **72**, 156–160 (1982).
 20. M. Takeda and K. Mutoh, "Fourier transform profilometry for the automatic measurement of 3-D object shapes," *Appl. Opt.* **22**, 3977–3982 (1983).
 21. E. CuChe, P. Marquet, and C. Depeursinge, "Spatial filtering for zero-order and twin-image elimination in digital off-axis holography," *Appl. Opt.* **39**, 4070–4075 (2000).
 22. N. Pavillon, C. S. Seelamantula, J. Kühn, M. Unser, and C. Depeursinge, "Suppression of the zero-order term in off-axis digital holography through nonlinear filtering," *Appl. Opt.* **48**, H186–H195 (2009).
 23. T. Tahara, Y. Awatsuji, K. Nishio, S. Ura, O. Matoba, and T. Kubota, "Space-Bandwidth Capacity-Enhanced Digital Holography," *Appl. Phys. Express* **6**, 022502 (2013).
 24. I. Yamaguchi and T. Zhang, "Phase-shifting digital holography," *Opt. Lett.* **22**, 1268–1270 (1997).
 25. Y. Awatsuji, T. Tahara, A. Kaneko, T. Koyama, K. Nishio, S. Ura, T. Kubota, and O. Matoba, "Parallel two-step phase-shifting digital holography," *Appl. Opt.* **47**, D183–D189 (2008).
 26. O. Matoba, K. Hosoi, K. Nitta, and T. Yoshimura, "Fast acquisition system for digital holograms and image processing for three-dimensional display with data manipulation," *Appl. Opt.* **45**, 8945–8950 (2006).
 27. X. F. Meng, L. Z. Cai, X. F. Xu, X. L. Yang, X. X. Shen, G. Y. Dong, and Y. R. Wang, "Two-step phase-shifting interferometry and its application in image encryption," *Opt. Lett.* **31**, 1414–1416 (2006).
 28. C. L. Koliopoulos, "Simultaneous phase-shift interferometer," *Proc. SPIE* **1531**, 119–127 (1992).
 29. S. Nakadate and M. Isshiki, "Real-time fringe pattern processing and its applications," *Proc. SPIE* **2544**, 74–86 (1995).
 30. B. K. A. Ngoi, K. Venkatakrisnan, N. R. Sivakumar, and T. Bo, "Instantaneous phase shifting arrangement for microsurface profiling of flat surfaces," *Opt. Commun.* **190**, 109–116 (2001).
 31. J. Zhang, Y. Xie, G. Li, Y. Ye, and B. E. Saleh, "Single-shot phase-shifting digital holography," *Opt. Eng.* **53**, 112316 (2014).

32. Y. Awatsuji, M. Sasada, and T. Kubota, "Parallel quasi-phase-shifting digital holography," *Appl. Phys. Lett.* **85**, 1069–1071 (2004).
33. P. Xia, T. Tahara, T. Kakue, Y. Awatsuji, K. Nishio, S. Ura, T. Kubota, and O. Matoba, "Performance comparison of bilinear interpolation, bicubic interpolation, and B-spline interpolation in parallel phase-shifting digital holography," *Opt. Rev.* **20**, 193–197 (2013).
34. Y. Awatsuji, M. Sasada, A. Fujii, and T. Kubota, "Scheme to improve the reconstructed image in parallel quasi-phase-shifting digital holography," *Appl. Opt.* **45**, 968–974 (2006).
35. T. Tahara, Y. Shimozato, T. Kakue, M. Fujii, X. Peng, Y. Awatsuji, S. Ura, K. Nishio, T. Kubota, and O. Matoba, "Comparative evaluation of the image-reconstruction algorithms of single-shot phase-shifting digital holography," *JEI* **21**, 013021 (2012).
36. S. Tamano, M. Otaka, and Y. Hayasaki, "Two-Wavelength Phase-Shifting Low-Coherence Digital Holography," *Jpn. J. Appl. Phys.* **47**, 8844–8847 (2008).
37. C. D. KUGLIN, "The phase correlation image alignment method," *Proc. Int. Conf. on Cybernetics and Society* **1975**, 163–165 (1975).
38. Qin-Sheng Chen, M. Defrise, and F. Deconinck, "Symmetric phase-only matched filtering of Fourier-Mellin transforms for image registration and recognition," *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* **16**, 1156–1168 (1994).
39. H. Foroosh, J. B. Zerubia, and M. Berthod, "Extension of phase correlation to subpixel registration," *IEEE Transactions on Image Processing* **11**, 188–200 (2002).
40. M. Druckmüller, "PHASE CORRELATION METHOD FOR THE ALIGNMENT OF TOTAL SOLAR ECLIPSE IMAGES," *ApJ* **706**, 1605–1608 (2009).
41. L. Mertz, "Real-time fringe-pattern analysis," *Appl. Opt.* **22**, 1535–1539 (1983).
42. H. Toge, H. Fujiwara, and K. Sato, "One-shot digital holography for recording color 3-D images," *Proc. SPIE* **6912**, 69120U (2008).
43. J. E. Millerd, N. J. Brock, J. B. Hayes, M. B. North-Morris, M. Novak, and J. C. Wyant, "Pixelated phase-mask dynamic interferometer," *Proc. SPIE* **5531**, 304–314 (2004).
44. S. Yoneyama, H. Kikuta, and K. Moriwaki, "Instantaneous phase-stepping interferometry using polarization imaging with a micro-retarder array," *Experimental Mechanics* **45**, 451–456 (2005).
45. T. Kakue, Y. Moritani, K. Ito, Y. Shimozato, Y. Awatsuji, K. Nishio, S. Ura, T. Kubota, and O. Matoba, "Image quality improvement of parallel four-step phase-shifting digital holography by using the algorithm of parallel two-step phase-shifting digital holography," *Opt. Express* **18**, 9555–9560 (2010).

46. T. Tahara, K. Ito, M. Fujii, T. Kakue, Y. Shimozato, Y. Awatsuji, K. Nishio, S. Ura, T. Kubota, and O. Matoba, "Experimental demonstration of parallel two-step phase-shifting digital holography," *Opt. Express* **18**, 18975–18980 (2010).
47. T. Kakue, T. Tahara, K. Ito, Y. Shimozato, Y. Awatsuji, K. Nishio, S. Ura, T. Kubota, and O. Matoba, "Parallel phase-shifting color digital holography using two phase shifts," *Appl. Opt.* **48**, H244–H250 (2009).
48. M. Fujii, T. Kakue, K. Ito, T. Tahara, Y. Shimozato, Y. Awatsuji, S. Ura, K. Nishio, T. Kubota, and O. Matoba, "Construction of a portable parallel phase-shifting digital holography system," *Opt. Eng.* **50**, 091304 (2011).
49. T. Kakue, S. Itoh, P. Xia, T. Tahara, Y. Awatsuji, K. Nishio, S. Ura, T. Kubota, and O. Matoba, "Single-shot femtosecond-pulsed phase-shifting digital holography," *Opt. Express* **20**, 20286–20291 (2012).
50. T. Kakue, J. Yuasa, M. Fujii, P. Xia, T. Tahara, Y. Awatsuji, K. Nishio, S. Ura, T. Kubota, and O. Matoba, "Light-in-Flight Recording by Parallel Phase-Shifting Digital Holography," *Appl. Phys. Express* **6**, 092501 (2013).
51. P. Xia, Y. Awatsuji, K. Nishio, and O. Matoba, "One million fps digital holography," *Electron. Lett.* **50**, 1693–1695 (2014).
52. M. P. Kothiyal and C. Delisle, "Shearing interferometer for phase shifting interferometry with polarization phase shifter," *Appl. Opt.* **24**, 4439–4442 (1985).

研究業績

査読付き学術論文（国際誌）

1. H. Ishigaki, T. Mamiya, Y. Hayasaki, “Digital holography with a set of two close wavelength for height measurement of solder bumps,” *Jap. J. Appl. Phys.*, **59**, SOOE03 (2020)
2. H. Ishigaki, I. Futamura, T. Okada, T. Mamiya, Y. Hayasaki, “Height measurement of solder bumps using two-wavelength parallel four-step phase shifting digital holography,” *Appl. Opt.*, **60**, B8-B13 (2021).

国際会議発表

1. H. Ishigaki, T. Mamiya, I. Futamura, Y. Hayasaki, “Shape measurement using digital holography with a close set of two wavelengths,” *Information Photonics on Optics and Photonics International Congress 2019*, pp.133-134, Yokohama, April 24-26 (2019)
2. H. Ishigaki, T. Mamiya, I. Futamura, Y. Hayasaki, “Object shape measurement by digital holography with a close set of two wavelengths,” *Micro Optics Conference 2019*, pp.227-228, Toyama, November 17-20 (2019)
3. H. Ishigaki, T. Mamiya, I. Futamura, Y. Hayasaki, “Digital holographic microscope with a close set of two wavelengths,” *Optical Technology and Measurement for Industrial Applications on Optics and Photonics International Congress 2020*, pp.122-123, Yokohama, April 20-24(2020)

国内会議発表

1. 石垣 裕之, 間宮 高弘, 二村 伊久雄, 早崎 芳夫, “近接した2波長を用いたデジタルホログラフィによる物体形状計測”, 日本光学会年次学術講演会 Optics and Photonics Japan 2018, 講演予稿集 pp.708-709, Tokyo, October 30- November 2, (2018)

2. 石垣 裕之, 間宮 高弘, 二村 伊久雄, 早崎 芳夫, “近接する2つの波長での並列位相シフトデジタルホログラフィーを用いたはんだバンプの高さ計測,” 第 81 回応用物理学会秋季学術講演会, オンライン, September 8-11, (2020),
3. 石垣 裕之, 二村 伊久雄, 岡田 点, 間宮 高弘, 早崎 芳夫, “近接する2つの波長での並列位相シフトデジタルホログラフィを用いたはんだバンプの高さ計測,” 日本光学会年次学術講演会 Optics and Photonics Japan 2020, 講演予稿集 pp.398 , Hamamatsu, November 14-17, (2020),

研究業績（予定）

査読付き学術論文（国際誌）

1. H. Ishigaki, I. Futamura, T. Okada, T. Okada, T. Mamiya, Y. Hayasaki, “A set of two close wavelength instantaneous imaging that does not depend on polarized light 3D shape measurement by digital holography,” Appl. Opt., (執筆中) .