

位相信頼性評価値と DMD カメラを用いた三次元形状計測

李 志遠

目次

第 1 章 緒言	1
1.1 はじめに	1
1.2 非接触式形状計測手法	2
1.2.1 レンズ焦点法	2
1.2.2 Depth from Defocus	3
1.2.3 ステレオ法	3
1.2.4 タイム・オブ・フライト	4
1.2.5 照度差ステレオ法	4
1.2.6 モアレトポグラフィ法	4
1.2.7 光切断法	5
1.2.8 パターン投影法	5
1.3 投影格子位相解析法による三次元形状計測	6
1.3.1 位相解析を用いた格子投影法	6
1.3.2 計測対象物	6
1.3.3 投影格子位相解析法の問題点	7
1.3.4 新しい光学素子 DMD	7
1.4 本研究の目的	8
1.5 本論文の構成	8
1.6 本論文について	10
第 2 章 投影格子位相解析法による三次元形状計測法の原理	11
2.1 はじめに	11
2.2 位相解析の原理	11
2.2.1 格子画像の位相解析	12
2.2.2 1 枚の格子から位相値を求める方法	12
2.2.3 位相シフト法	13
2.2.4 フーリエ変換位相シフト法	14
2.2.5 位相接続	14
2.2.6 位相分布から三次元座標への変換	17

2.3	基準面を用いたレンズ収差の影響を受けない形状計測手法	17
第3章	位相信頼性評価値	25
3.1	はじめに	25
3.2	位相信頼性評価値の提案	25
3.2.1	格子の振幅を用いた評価	25
3.2.2	相関係数を用いた評価	26
3.2.3	フーリエスペクトルを用いた評価	26
3.3	フーリエ変換位相シフト法における位相信頼性評価値の提案	27
3.3.1	フーリエ変換位相シフト法の原理	27
3.3.2	フーリエ変換位相シフト法における位相信頼性評価値	29
3.4	シミュレーション	31
3.4.1	ランダムノイズによる位相値の誤差と位相信頼性評価値の関係	31
3.4.2	輝度のサチュレーションによる位相値の誤差と位相信頼性評価値の関係	32
3.4.3	輝度非線形性による位相値の誤差と位相信頼性評価値の関係	35
3.5	位相シフト法とフーリエ変換位相シフト法の精度比較	37
3.6	まとめ	38
第4章	位相信頼性評価値を用いた形状合成手法	41
4.1	はじめに	41
4.2	広ダイナミックレンジの形状合成手法	43
4.2.1	はじめに	43
4.2.2	奥行きのある物体の形状合成計測法	43
4.2.3	再サンプリングのアルゴリズム	43
4.2.4	奥行きのある深い段差状試料の計測実験	45
4.2.5	結果および考察	45
4.2.6	自動車模型の形状計測例	47
4.2.7	まとめ	48
4.3	鏡面反射成分の影響を避ける形状合成手法	52
4.3.1	はじめに	52
4.3.2	鏡面反射成分を避ける形状合成手法	52
4.3.3	円柱状の金属試料の形状計測	53
4.3.4	ディスク状の金属試料の形状計測	55
4.3.5	まとめ	55
4.4	広輝度レンジの形状合成手法	62

4.4.1	はじめに	62
4.4.2	広輝度レンジの形状合成手法の原理	62
4.4.3	実験	63
4.4.4	まとめ	65
4.5	全周囲の形状合成手法	66
4.5.1	はじめに	66
4.5.2	全周形状計測法の原理	67
4.5.3	全周形状計測の実験	71
4.5.4	結果および考察	72
4.5.5	まとめ	72
4.6	本章のまとめ	74
第5章	DMD カメラの開発	79
5.1	はじめに	79
5.2	DMD 反射式 CCD カメラ (DMD カメラ)	80
5.2.1	DMD の構造と動作	80
5.2.2	DMD カメラの構成	81
5.2.3	DMD カメラの特徴	82
5.2.4	DMD カメラの問題点	85
5.3	DMD カメラ装置の実装	86
5.3.1	最適な結像レンズ選び	86
5.3.2	DMD ALP ボードによる DMD の高速コントロール	87
5.4	モアレパターンを用いた簡単な画素対応の調整手法	93
5.4.1	モアレ現象とは	93
5.4.2	調整方法の原理	93
5.4.3	シミュレーション	95
5.4.4	モアレパターンと位置ずれの関係	99
5.4.5	調整実験結果および考察	102
5.5	位相シフトモアレ法を用いた画素対応の調整手法	104
5.5.1	位相シフトモアレ法の原理	104
5.5.2	位相分布を用いた調整方法	106
5.5.3	調整実験結果および考察	106
5.6	DMD カメラを用いた画像処理の例	107
5.6.1	リアルタイム画像処理	107
5.6.2	広輝度レンジ画像の撮影	110

5.6.3	視差のついた画像の取得	110
5.7	まとめ	112
第6章	DMDカメラを用いた位相解析・形状計測手法	115
6.1	はじめに	115
6.2	DMD 積分型相関位相シフト法による位相解析手法	116
6.2.1	積分型相関位相シフト法の原理	116
6.2.2	DMD 積分型相関位相シフト法の原理	119
6.2.3	積分型相関位相シフト法における位相信頼性評価値の提案	120
6.2.4	画像補間方法	121
6.2.5	DMD, CCD と格子投影の同期	122
6.2.6	2枚の基準面を用いた形状計測手法への適用	124
6.2.7	高速位相シフト法への応用	124
6.3	実験	126
6.3.1	実験方法	126
6.3.2	結果および考察	126
6.4	DMDカメラを用いた広輝度レンジの形状計測手法	130
6.4.1	計測原理	130
6.4.2	予備実験	131
6.4.3	実験結果および考察	132
6.5	まとめ	134
第7章	結論	137
7.1	総括	137
7.2	今後の課題	138
7.3	今後の展望	140
付録A	アルゴリズム	141
A.1	2次元位相から画面内座標を求める手法	141
A.2	2直線の交点座標の算出方法	142
A.3	Mixed Radix Fast Fourier Transform (MR-FFT)	144
A.4	Box-Muller法による白色ガウスノイズの発生	145
A.5	最小二乗法による平面の式の決定	146
参考文献		149
謝辞		167

第1章 緒言

1.1 はじめに

近年、物体の三次元形状を精度良く高速に計測する技術は多くの分野から高い関心が寄せられている。特に、製造業の分野では自動生産技術の発展にともない、物体の表面形状を非接触・高速・高精度に検査する手法の必要性が高まっている。例えば、生産工程において、製品の三次元形状を非接触で高速かつ高精度に計測することができれば、製品の欠陥を常時検査することができるため、製造効率の大幅な改善につながり、多くの利益を生み出すことができる。また、デザイナーが木材や粘土等で製作したモデルの形状をもとに製品を製作する、いわゆるリバースエンジニアリングにおいて、高速かつ高精度な形状計測技術は、モデルの形状を忠実にCAD及びCAMデータに変換するために必要不可欠である [1]。さらに、ガスタンクやトンネルなどのような大型構造物の形状及び変形の常時検査に応用することで、これら大型構造物の安全性を向上し、社会システムの安定化にもつながる。製造業以外でも、医療・福祉業及び服飾業などにおいて、人体の形状を計測する手段として利用できる。例えば服飾業 [2] では、人体の採寸を自動的に行うことによって、オーダーメイドの衣類を製作できるようになる。近年成長が著しい情報産業においても、将来的に多くの活用が考えられる。例えば顔の三次元形状データを個人の識別に応用すれば信頼度の高いセキュリティシステムとして幅広い分野での応用が期待できる。製品の形状及び表面色の情報をデジタル化し、三次元カタログとしてWeb上で公開すれば、消費者はより多くの商品情報を得ることができ、購買意欲の促進につながる。

そのほかの三次元形状計測の主な用途として

- 実物の3D デジタル化
- 医療分野での整形・歯形などのデータベース化
- 貴重な美術品・工芸品・出土品の立体形状データ保存 [3]
- 知能ロボットのコントロール [4]
- 無人作業輸送車の障害物の回避
- 金型の寸法測定
- 加工された部品の品質管理 [5]
- 車ボディの欠陥やへこみの検出

などが挙げられる。

以上で述べるように、様々な分野で形状計測を高精度かつ高速に行う技術が求められている。しかし、これらの目的を達成するための計測装置はいくつか実用化されているが、十分な精度を満たしているシステムはまだ実現していない。

1.2 非接触式形状計測手法

三次元形状計測には大きく分けると接触式と非接触式の手法がある。接触式では機械的な接触式プローブを持ち、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。市販されている装置として株式会社ミットヨの三次元計測器がその代表である。一点一点の測定精度が高く、繰り返しによるデータのばらつきも少ない。しかし、欠点としては、装置が非常に高価である。また計測点が増えると多くの時間と労力がかかること、複雑な凹凸のある物体の形状の測定や、接触できないもしくは接触することが望ましくない物体の測定ができないことが挙げられる。

これに対して、近年特に産業分野を中心に、従来少ない計測点で大まかな検査が行われていた部品においても、自由曲面を含むものが多くなり、非接触で高速・高精度に物体の形状を測定したいというニーズが高まっている。そこで、光技術による非接触式の三次元形状計測手法 [6, 7] が非常に注目されている。三次元形状計測以外に光学的手法による応力・ひずみ、さらに変形の解析も盛んに行われている [8]。

光学的な計測手法には、計測の際になんらかの光パターンを物体に照射しないものと照射するものに大きく分けることができ、それぞれ受動型 (Passive) 計測と能動型 (Active) 計測と呼ばれている [9]。図 1.1 はこれまでに開発された様々な三次元形状計測手法についてまとめたものである。以下に各手法の特徴と利点及び欠点について説明する。

1.2.1 レンズ焦点法

レンズ焦点法 (Shape from focus) は、レンズと物体がピントが合う位置にある関係から距離を求める手法 [10, 11] である。カメラのフォーカスリングを回して対象物体にピントを合わせ、そのレンズの距離目盛を読むことで距離が計測できる。すなわち、画像のぼけの程度を判定する機能と、レンズの繰り出し機能を用意することで、奥行きを計測することができる。正確な位置を計測するには、ぼけを大きくする必要があり、そのために焦点深度を浅くすることが求められる。この方法を自動化して距離画像を得ようとする場合、焦点の合っている部分を自動検出する処理が困難であり、精度にも限界がある。物理的駆動が介在するため実時間計測に向かない手法である。また測定深度に限界があるため、現状では顕微鏡での実装がほとんどであり、大きな対象物や奥行きが深い物体への適用は困難である。

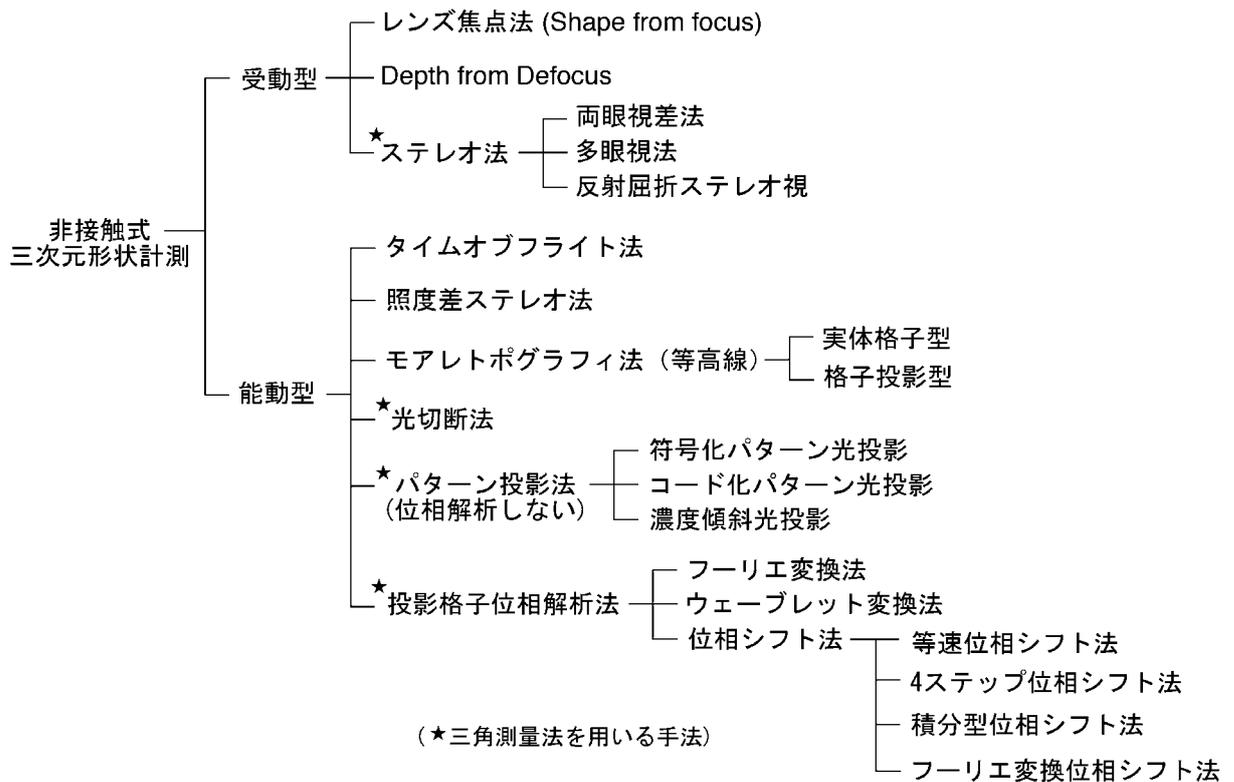


Figure 1.1 Classification of various optical 3-D shape measurement methods

1.2.2 Depth from Defocus

Shape from focus 法と逆の考え方でぼけ量の変化から奥行き方向の情報を解析する Depth from Defocus 法がある [12,13]. Shape from focus 法では多数枚の画像から合焦画像が得られるフォーカス位置を探索する問題であったのに対して, Depth from Defocus ではぼけの生成過程をモデル化し, その逆問題を解くことによってシーンの距離情報を求めている. 2枚以上の異なるパラメータで得た画像から距離を計算 (Relative blurring analysis) するためには多重フォーカスカメラが必要になる. 日浦らはカラーカメラを改造し, RGB の各素子を 1 mm ずつ光軸方向にずらすことで同時に多重の画像を取得している [14].

この手法では少ない枚数で解析可能のため, 実時間計測に向いている. また, 機械的駆動部がないため, 小型・軽量の計測装置の実現の可能性が大きい. しかし, 距離計測の安定性が低く, 高品質なノイズの少ない画像が必要である.

1.2.3 ステレオ法

ステレオ法 [15] とはステレオ視の原理に基づく三次元形状計測がある. これは, 物体を複数の視点から撮影した多視点画像から, 同一の点を撮影したと考えられる対応点を探索し, 三角測量の原理に基づいて物体の三次元形状を計測する手法である. 対応点を見つけるためには, 事前に

対象物に複数のターゲットを貼っている方法と物体の特徴点を抽出する方法がある。この手法の利点として、装置が簡単であることや広い範囲の計測が可能である。測定できる点の数は基本的にターゲットの数に依存する。

徐剛 [16] は高解像のデジタルカメラを用いた形状計測を行っている。最近の報告によると、市販されている装置である 3DM-FotoMetrics [17] では、10 m サイズの物体の対して 0.1 mm の精度で計測している。しかし、ステレオ計測において多視点画像を撮影する際、レンズの特性やガンマ値、および分光感度特性などのカメラパラメータの補正や、撮影の同期がカメラ間で必要となる。カメラ 1 台と鏡を用いて、一回の撮影で多視点画像を得る反射屈折ステレオ視系 [18, 19] も提案されている。

1.2.4 タイム・オブ・フライト

タイムオブフライト (Time of flight) 法は、レーザ光を計測対象物に照射し、その光が物体表面に反射して計測機器に戻るまでの時間から、物体表面までの距離を計測する手法である [20]。実際に物体との距離をレーザ光で計測するため、高精度な三次元形状を得られる。この手法では三角測量法に比べ、オクルージョン¹の発生が少ない。また広い測定範囲を行えるという特徴をもっている。Yang らの研究 [21] によれば、20 m の測定範囲に対して 0.5 mm 以上の精度で距離計測ができる。しかし、密な測量には莫大な時間がかかると価格が非常に高いのが欠点である。また対象物の色情報を同時に得ることもできない。

1.2.5 照度差ステレオ法

まず、反射率分布が既知である対象物に、複数の照明用光源により光を照射し、同じ視点からそれぞれの光源に対応する画像を撮影する。このときの各画素の明度変化は対象物面の傾き方向によって決まる。この現象を利用して面の傾きをすべての画素に対して求めることより、対象物の立体形状を求める方法が照度差ステレオ法 [3] である。この手法は、画像の濃淡情報を直接的に利用するため、各種のテクスチャ (模様) があって表面の反射係数が未知または不均一な物体や、光沢を有する物体の再構成は難しいという欠点を持つ。また、光源の位置と対象物の形状によっては、直接表面に光が当たらないために計測できない部分も生じる。

1.2.6 モアレトポグラフィ法

2つの規則的な格子状パターンが合成された時に生じる空間周波数のうなり現象をモアレといい、このとき現れる新たな縞をモアレ縞という。2枚のうち1枚が完全に平行等間隔のとき、現れ

¹視差を利用して三角測量の原理で立体形状を計測する手法を用いる場合、対象物の形状によっては、一方の視点からは見えているのに他方からは見えない不可視領域が存在する。この領域は原理上計測が不可能であり、このような領域をオクルージョンという。

るモアレ縞はもう1枚の格子の変形を表わしている。この原理を応用し、格子状パターンを被計測物に照射し、格子マスクを通して被計測物をCCDカメラで撮影した時に観測されるモアレ縞を解析し、対象物体の凹凸を計測することにより、カメラからの距離を等高線図の形で得る方法がモアレトポグラフィ法 [22,23] である。Meadowsらはモアレトポグラフィを用いて飛行機の模型の計測を行った [24]。また、高崎は本手法を人体の計測などに適用した [25]。一方、格子の影を利用したシャドーモアレによる等高線・形状計測の研究もなされた [26,27]。

モアレトポグラフィ法は比較的におクルージョンの影響を受けにくいという利点があるが、環境光の影響を受けやすいため、屋外における計測は困難である。また面単位の測定になるので、不連続な凹凸部分の多い対象の計測には不向きである。

1.2.7 光切断法

対象物体にレーザースリット光を照射し、カメラとスリットの位置関係から三角測量の原理で形状を計測する光切断法は完成度の高い形状計測法 [28-31] として知られ、服飾など、すでに幾つかの分野で応用されている。製品例として株式会社ミノルタのVIVID 910やVIVID9i [32] が挙げられる。しかしながら、1回の計測ごとに物体表面をレーザースリットが走査するための時間を必要とする。また、奥行き方向の計測精度がカメラの画素数によって決定される。以上の理由から、高速かつ高精度な計測を実現するためには非常に特殊な撮影装置を必要とする。

1.2.8 パターン投影法

パターン投影法とは、2次元パターンを投影することによって、空間をコード化する方法である。コンピュータビジョンの分野ではアクティブステレオ法と呼ぶこともある。コード化された空間内の物体表面を撮影した画像上において、そのパターンの特徴点の位置から距離または空間座標を求めることができる。投影するパターンとして、ドットパターンや複数のコード化されたパターン、符号化されたパターン、格子パターン、さらに濃度傾斜光などがある。

符号化パターン光投影では、投影パターンを小領域ごとに区切ってそれぞれ異なるパターンを投影する。コード化パターン光投影では、空間を分割して2進符号を割り当てたパターンを投影する。濃度傾斜パターン光投影では、一定の割合で変化するマスクパターンを投影して対象物体上の濃度値から距離を算出する。コード化パターン光投影を発展させた手法として、交番2進符号を用いることによってコード化の誤りを少なくするグレーコード法も開発された [33-36]。

一般のパターン投影法の場合の分解能は基本的に画素単位であるため計測精度はそれほど高くない。また、パターン内で特徴のある部分だけが位置情報を得ることができるので、手法によって情報が得られない画素が存在する場合もある。空間コード化法の場合は、すべての画素でコード化された値を得ることができるが、空間にコード化される値が整数値であるために分解能は高くない。しかし、投影格子の位相を解析する手法は、すべての画素において格子の位相値が実数値

として得られるために精度の高い計測が可能となる。本論文では位相を解析しない方法をパターン投影法と呼び、位相解析を用いる方法をとくに投影格子位相解析法と呼ぶことにする。次節で詳しく述べる。

1.3 投影格子位相解析法による三次元形状計測

1.3.1 位相解析を用いた格子投影法

非接触で空間座標の分布を求めるための方法として、格子投影法がよく用いられる。格子投影法とは、プロジェクタから物体に投影された格子を異なる角度からカメラで撮影し、物体の形状に応じて歪んだ格子模様から物体の形状を求める手法である。

投影した余弦波格子の輝度分布を波と見なし、その位相を解析する位相シフト法が開発され、広く用いられるようになった。特に位相解析により、カメラの画素数に影響されずに精度のよい形状計測が実現できる方法として知られている。また、光切断法などに比べて一般に普及している安価な装置の組み合わせで実現できるため、実用性の高い形状計測手法であるといえる。本研究では投影格子位相解析法を基本原理として用いている。

先行研究として、Srinivasanらはレーザー干渉縞を格子投影として用いることで、電子部品の形状を $10\ \mu\text{m}$ の精度で計測した [37]。Lehmannらは数メートルの大物体に干渉縞を投影して、 $5.5\ \text{m} \times 3.4\ \text{m}$ サイズの高速道路の橋梁を計測した [38]。Liらは大型の計測対象を部分的に計測した結果をつなぎ合わせることで、 $9\ \text{m} \times 5\ \text{m}$ サイズの物体全体の三次元形状を計測した [39]。Asundiらは物体を回転させることで全周囲の形状計測を行った [40, 41]。ほかにもいくつかの全周囲形状計測の手法が提案されている [42–44]。

一方、形状計測を高速化する手法についても幾つか開発されており、Huangらはカラーカメラとカラー格子による高速形状計測法を開発した [45]。位相が $2\pi/3$ ずつシフトされたカラー格子を投影し、カラーカメラで撮影することで、同時に3枚の位相シフトされた画像を得ることができる。Coggraveらはパイプライン処理を用いて高速に位相解析を行う装置を開発した [46]。森本らは二値格子を滑らかに動かすことによってビデオカメラのフレームレートで連続的に計測結果を出力する装置を開発し、人体の計測等に適用した [47]。

1.3.2 計測対象物

形状計測が必要とされる対象物は、工業製品や人体、巨大構造物、電子部品のような微小物体など多岐にわたる。物体の片面だけでよい場合と全周の形状計測を行う必要がある場合がある。このように計測対象物によって計測手法を選択する必要がある。本研究は大きさが $100\ \text{mm} \times 100\ \text{mm} \times 100\ \text{mm}$ 程度の物体を対象にしている。

1.3.3 投影格子位相解析法の問題点

先行研究においては、ほとんどが比較的計測しやすい物体（白く塗装された平たい物体）のみを対象としている。筆者が所属する光波画像計測研究室では、これまでに多くの企業から測定依頼を受けて、車の部品や彫刻物などの様々な試料の形状・そり・平面度を精度よく計測してほしいという要望があった。

計測を行う際に、以下の問題点が挙げられる。

(1) 測定範囲

投影格子位相解析法では、一般的に測定範囲が大きくなるにつれて誤差が大きくなる。また格子を投影するプロジェクタや画像を撮影するカメラにもピントの合う被写界深度があり、それよりも広い場合、画像がぼけてしまい、誤差が増えるという問題点がある。測定できるダイナミックレンジ（奥行き）をできるだけ広くし、かつ精度を保つことのできる計測手法が必要である。

(2) 金属部品の鏡面反射

金型や加工された金属部品の形状に対して表面加工せずに計測したいケースが多い。しかし、金属試料の場合、鏡面反射（ハレーション）が起こる部分が生じ、その部分では計測不能になるまたは誤差が非常に大きくなる。精度よく計測したい場合、試料に対して鏡面反射が起こらないように白く塗装してから計測を行うのが一般的である。しかしながら、塗装することはその目的に反することである。これ以外に、塗装膜による厚さの増加やむらが生じ、この分だけ計測誤差となる。このように、表面を白色塗布をせずそのまま計測できる手法が必要になる。

(3) 測定物体の反射率

測定対象物は場所によりかなり異なる反射率を持つものがある。このような物体では一回の計測では精度よく全エリアの形状を得ることが難しく、物体の輝度値に合わせてカメラの露光もしくは光源の光量を変えた画像を多数撮影して解析する必要がある。

(4) 全周の形状データ

格子投影法では、投影された格子パターンをカメラで撮影して位相解析を行うため、1回の測定では影部分や物体の裏の情報を得ることができない。物体の片面だけでなく、全周の形状を得られる手法が必要である。さらに複数の方向から測定されたデータをひとつのグローバル座標系に座標変換する（ただ重ねて表示する）だけでなく、合成された全周データを必要とする。同じ場所に複数のデータが存在した場合に、どのように誤差の少ないデータを採用するのが重要になり、画素ごとに精度よく合成する形状合成手法を開発する必要がある。

1.3.4 新しい光学素子 DMD

Digital Micro-mirror Device (DMD) とは、1987 年米国のテキサスインスツルメンツ (TI) 社の Larry J. Hornbeck 氏によって開発された新しい光学素子 [96, 97] である。DMD は最近よく研究されている Microelectromechanical systems (MEMS) の一種である。DMD は主に DLP 式の

プロジェクタに使われている。今では液晶プロジェクタと並ぶ勢いである。

この素子では1チップ上に数十万個～百万個の微小ミラーが並んでいる。それぞれのミラーは独立かつ高速にその反射方向を制御することができる。この特徴を利用して、CCDとDMDを組み合わせた新しいタイプのカメラ（DMDカメラ）を開発すれば、従来ではできないような画像を撮影することができ、新たな位相解析・形状計測手法を開発することが可能になる。

1.4 本研究の目的

以上の研究背景を受けて、前節で述べた問題点を解決できるように、位相信頼性評価値を用いる形状合成手法とDMDカメラを用いた三次元形状計測という2つのアプローチを行う。

本研究では、まずフーリエ変換位相シフト法において新たに位相信頼性評価値を提案する。この評価値を指標に様々な計測条件を変えて測定した複数のデータを合成することで問題点を解決する。具体的に(1)広ダイナミックレンジの高精度形状計測法、(2)鏡面反射を避ける形状計測法、(3)広輝度レンジの形状計測法、(4)高精度全周形状計測法の4つの形状合成手法を開発する。

第4章第4.4節で述べる「広輝度レンジの形状計測法」では複数回計測する必要がある。測定時間が大幅に増えてしまうという問題点がある。そこで、本論文の後半では、最近の新しい光学素子であるDMDに注目し、位相解析や形状計測向けのDMD反射式CCDカメラ（DMDカメラ）の開発を行う。さらにDMDカメラを用いた新たな位相解析・形状計測手法を開発する。その際に、DMDの各ミラーの高速制御とDMDの各ミラーとCCDの各素子の正確な画素対応が大きな課題であった。これらの課題に対して、専用高速制御ボードの導入と簡単かつ精度よく画素対応できる調整手法を開発する。開発したDMDカメラを用いて、高速に位相分布が得られる手法の開発を行うと同時にDMDの特徴を生かした新しい広輝度レンジの計測手法を開発する。この手法では1回の測定で計測が行えるため、測定時間が増加しないという利点がある。

1.5 本論文の構成

本論文の構成は以下の通りである。

第一章「緒言」

本章では、歴史的な研究背景について述べ、従来行われてきた研究成果を概観し、問題点を明らかにするとともに、本研究の目的および目指すべき目標を述べる。

第二章「格子投影法による三次元形状計測手法の原理」

本章では、フーリエ変換位相シフト法による位相解析、格子投影法を用いた三次元形状計測の基本原則および液晶基準面を用いて位相分布から空間座標への算出方法について具体的に述べる。

第三章「フーリエ変換位相シフト法における位相信頼性評価値の提案」

本章では、位相解析で用いるフーリエ変換位相シフト法において、解析した位相値の信頼性を正しく評価できる方法、いわゆる位相信頼性評価値を提案する。ランダムノイズ、輝度のサチュレーション、輝度非線形性による位相値の誤差と提案する位相評価値の関係についてコンピュータシミュレーションにより調べ、その有効性を検証する。

第四章「位相信頼性評価値を用いた形状合成手法」

前章で開発した位相信頼性評価値を以下の形状合成手法に適用する。実験よりそれぞれの有効性を確認する。

1. 広ダイナミックレンジの形状合成手法
2. 鏡面反射成分を避ける形状合成手法
3. 広輝度レンジの形状合成手法
4. 高精度全周形状合成手法

第五章「DMD カメラの開発」

本章では、新しい光学素子である DMD (Digital Micro-mirror Device) と CCD カメラを組み合わせ、画素ごとに露光時間を制御できる DMD カメラの開発を行う。DMD の各ミラーを高速に制御できるように、DMD ALP ボードの導入を行う。また DMD カメラにおいて、正確に CCD の各画素と DMD の各ミラーを 1 対 1 に対応させることが重要であるが、実際に調整を行うのは非常に難しい。これを解決するために、簡単な目視によるモアレパターンを用いた調整手法とモアレパターンの位相を解析する精度の高い調整手法をそれぞれ開発する。

第六章「DMD カメラを用いた位相解析・形状計測手法」

前章で開発した DMD カメラを用いて、投影格子位相解析法による形状計測へ応用する。

まず、1 枚の画像から位相分布を求められる「DMD 積分型相関位相シフト法」を開発する。この手法を用いることで、比較的高速に動いている物体でも位相解析を行うことができる。

さらに DMD カメラの特徴を生かして、物体の反射率に合わせて画素ごとに露光時間を調整することで、計測時間を増やすことなく広輝度レンジで計測できる手法を開発する。

第七章「結論」

本章では、本研究の成果を総括した後、今後の課題・展望について議論する。

1.6 本論文について

本論文の第3章は、国際会議 ICEM12 (2004) で発表した論文 [C.4] とその拡張である *Optical Engineering* 誌に掲載された論文 [A.2] を基にしている。この内容について、特許 [E.1] になっている。

4.3 節と 4.5 節は、それぞれ国際会議 SEM (2006) の学生コンクールで発表した論文 [C.11] と *Key Engineering Materials* 誌 [A.1] に掲載された論文を基に書かれている。

5.2 節と 5.3 節は、国際会議 ISOT (2005) で発表した論文 [C.8] とその拡張である *Journal of Robotics and Mechatronics* 誌に掲載された論文 [A.6] を基にしている。

5.4 節は国際会議 SEM (2005) で発表した論文 [C.6] とその拡張である実験力学誌 [A.3] および *Experimental Mechanics* 誌 [A.4] に掲載された論文を基に書かれている。この内容について、特許 [E.2] に出願している。

5.5 節は、国際会議 SEM (2005) の学生コンクールで発表した論文 [C.7] と、その発展である *Applied Optics* 誌に掲載された論文 [A.5] を基にしている。

そして、6.3 節は、国際会議 SEM (2006) で発表した論文 [C.10] を基に書かれている。

第2章 投影格子位相解析法による三次元形状計測法の原理

2.1 はじめに

非接触で空間座標の分布を求めるための方法として、格子投影法がよく用いられる [48–50]. 格子投影法とは、プロジェクタから物体に投影された格子を異なる角度からカメラで撮影し、物体の形状に応じてゆがんだ格子模様から物体の形状を求める手法である.

空間座標を求めるために、従来の手法では光学系パラメータとしてカメラとプロジェクタのレンズの中心位置と光軸の向きなどが用いられてきた [51–53]. しかしこれらの手法はレンズ収差がないという仮定の上で成り立っている. 従来は計測精度がそれほど高くなかったのでその影響は無視できたが、位相解析手法が進歩して高精度な位相解析が可能となり計測精度が向上すると、相対的にレンズ収差による影響が大きくなり無視できなくなってきた.

収差によるゆがみの影響を低減する方法として、補正式を用いて画像を補正する方法が研究されている [54–58]. しかし、完全にレンズの収差による影響を取り除くことはできない.

筆者が所属する研究室では、カメラおよびプロジェクタのレンズの中心位置と光軸の向きなどの光学系パラメータを求めずに、計測物体近傍に設置した基準平面から得られる情報だけを座標計算に用いることによって、レンズ収差による影響を受けない計測法を開発した [61–63]. レンズの中心を用いる従来の手法と比較して精度よく計測することができる.

本章では、まず2.2節で位相解析に関する基礎原理について述べたうえで、2.3節で液晶基準面を用いたレンズ収差によるゆがみの影響を受けない形状計測手法の原理について述べる.

2.2 位相解析の原理

格子投影法では、物体の表面上に余弦波状の輝度分布を持つ格子パターンを投影する. これを異なる方向からカメラによって撮影する. 撮影された画像は物体の形状に応じてゆがむため、このゆがみ具合を精度よく解析できれば、その三次元形状を精度よく得ることができる. この格子のゆがみを解析するために位相解析という手法を用いる. 本節では位相解析の基礎原理について述べる.

2.2.1 格子画像の位相解析

格子の中心線を抽出し、その線上の各点の座標を求める手法が初期の手法であった。1本1本の格子には順番に整数の格子番号がつけられており、求めた点列の座標上にその格子番号が対応する結果が得られる。しかし、この方法では、格子の位置を画素単位でしか求めることができず、格子線と格子線の間部分は測定データが得られないという致命的な短所がある。補間することによって、格子の位置をサブピクセルの分解能で求める手法もあるが、基本的には精度の悪い解析しか行うことはできない。

近年コンピュータの発展に伴い、格子の位相を解析する手法がもはや一般的になった。投影した格子パターンの輝度分布を波（余弦波または正弦波）と見なし、その位相を求める手法である。位相値は格子番号に 2π をかけた値である。これより、小数の格子番号が表現できることになる。図 2.1 に格子番号と位相の関係を示す。図 2.1 では、(a) に示す輝度分布を持つ格子の位相分布は (b) のようになる。このように位相値を求めることによって、画像内の各点における格子番号を実数値として求めることができ、精度のよい解析が行えるようになる。

位相解析手法としてはいくつかの手法が開発されている。それぞれが特徴を持っており、目的に最も適した手法を用いることで良好な測定結果を得ることができる。位相解析手法は、1枚の格子画像から格子の位相値を解析する手法と、位相シフトされた複数の格子画像から位相を求める位相シフト法に分類することができる。前者については 2.2.2 節で、後者について 2.2.3 節および 2.2.4 節でそれぞれ詳しく述べる。位相解析によって得られる位相分布は、格子 1 本ごとに $0\sim 2\pi$ の位相値の繰り返しとして得られる。本来の位相値は位相接続と呼ばれる処理を行うことによって得ることができる。位相接続については 2.2.5 節で述べる。

2.2.2 1枚の格子から位相値を求める方法

まず、1枚の格子画像から格子の位相値を求める方法としてフーリエ変換を用いる方法がある。格子画像をフーリエ変換し、得られたスペクトルから一次調和波を抽出し、逆変換することで、実部と虚部の位相が $\pi/2$ ずれた複素格子が得られる。その逆正接を計算することで、各点の位相値を求めることができる。またフーリエ変換した後のスペクトルの一次調和波の成分のみを抽出し、原点方向へ格子のピッチに相当する分だけ移動させ、それを逆フーリエ変換することによって、格子の変形を表すモアレ縞を簡単に得ることができる。武田らはこの手法を Fourier Transform Profilometry (FTP) [51] と呼んでいる。

フーリエ変換法は1枚の格子画像から位相を解析できる有効な手法ではあるが、格子のピッチが大きく変化するような場合には、1次調和波と高次の調和波が重なり、1次調和波の抽出が正確にできなくなる。そこで、ガボール関数を窓関数にすることによってピッチの変化を小さくし、1次調和波を精度よく分離する手法が考えられている。この手法はガボール変換格子法と呼ばれている [65]。この手法は、1次調和波の分離精度はよいが、計算時間が長くなる。

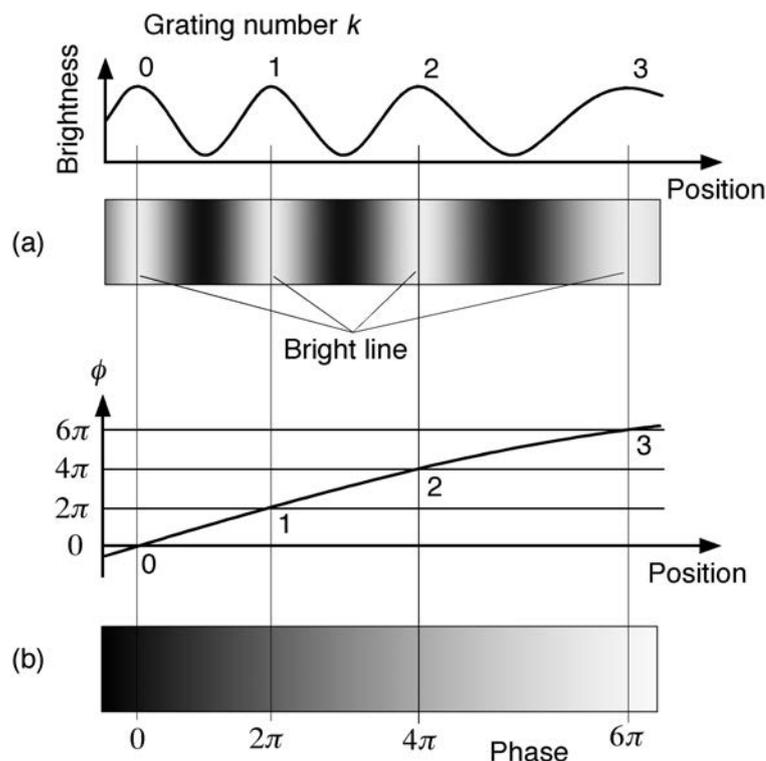


Figure 2.1 Relationship between grating and phase value: (a) brightness of grating; (b) phase distribution of grating

このほか、フーリエ変換を用いずに1枚の格子画像から位相解析を行う手法として、ウェーブレット変換格子法が開発されている。格子画像に対してウェーブレット変換を行うことにより、各画素ごとの周波数スペクトルを得ることができる。これより、画素ごとに1次調和波を抽出することが可能となり、格子ピッチが急変するような場合でも位相解析が可能になる。しかし、この手法も計算時間がかかるという欠点がある。

2.2.3 位相シフト法

位相シフト法は、格子の位相を1周期分だけ変化させながら複数枚の格子画像を撮影し、得られた複数の画像から位相分布を求める手法である。すべての画素において輝度は1周期分変化するため、その輝度変化から各点ごとに独立して、すなわち周囲の画素の輝度変化の情報を使わずに位相値を求めることができる。そのため、段差や不連続部のある物体の形状計測に有効な手法と言える。

$$I(x, y) = a(x, y) \cos[\theta(x, y) + \alpha] + b(x, y) \quad (2.1)$$

式(2.1)に示すように、振幅 $a(x, y)$ とバイアス $b(x, y)$ 、初期位相 $\theta(x, y)$ という3つの未知数を

求めればよいので、最低3枚の位相シフトされた画像を撮影すればよい。

3枚の場合は、式(2.2)に示すように解析すれば、位相を求めることができ、Wrantらによって提案されている [66].

$$\tan \theta(x, y) = \frac{\sqrt{3}\{I_2(x, y) - I_1(x, y)\}}{2I_0(x, y) - I_1(x, y) - I_2(x, y)} \quad (2.2)$$

位相シフト法では、位相を $\pi/2$ ずつシフトさせた4つの輝度から位相を求める4ステップの手法 [67] が最もよく用いられている。式(2.3)に示すように簡単な計算で位相を求めることができる。さらに枚数を増やして、Grootによる5ステップ [68] や Hariharan による6ステップ [69], 7ステップ [70] の位相シフト法も提案されている。枚数が多いほどノイズに対する誤差の影響を受けにくくなるが、撮影時間が増えるという問題点が生じる。

$$\tan \theta(x, y) = \frac{I_3(x, y) - I_1(x, y)}{I_0(x, y) - I_2(x, y)} \quad (2.3)$$

位相シフト法では、よく正弦波もしくは余弦波の輝度分布をもつ格子を用いることが多いが、白黒のバイナリ矩形波格子を連続的に位相シフトさせ、時間積分することで位相分布を求める積分型位相シフト法も提案されている [47, 71]. 余弦波の格子の作製が困難な場合に有効な手法である。

2.2.4 フーリエ変換位相シフト法

Bruningら [72] は干渉縞の位相解析を行うためにフーリエ変換を用いる手法を開発している。これは複数枚の位相シフト格子画像を1周期分撮影し、位相シフト方向にフーリエ変換し、周波数1の成分からその点の位相値を求める手法である。この手法はフーリエ変換により基本周波数以外のノイズ成分を除去することができるため、高精度に位相値を得ることができる。武田はこの手法をフリンジ走査法 [73] と呼んでいる。筆者が所属する研究室では、この手法をフーリエ変換位相シフト法 [74] と呼んでいる。

本研究では、このフーリエ変換位相シフト法を用いて位相解析を行っている。その原理については第3章で詳しく述べることにする。

2.2.5 位相接続

前節で述べた位相解析では、得られた位相値は $0 \sim 2\pi$ または $-\pi \sim \pi$ の繰り返しとして得られる。このような位相値を位相接続前の位相分布またはラップされた位相値 (wrapped phase) と呼ぶ。また本来の位相値からラップされた位相値を得る処理を位相のラッピング (phase wrapping) という。

格子や干渉縞にその位相が 2π 進むごとに1ずつ増えていくような番号を付ける。このように付けられた番号を格子番号またはしま次数と呼ぶ。図 2.2 に格子番号と位相接続後の位相の関係を示す。

図 2.2(a) に余弦波状の輝度分布を持つ格子画像を示し、その輝度分布を図 2.2(b) に示す。図 2.2(a) では、左端の輝度の高い部分を格子番号 0 とし、右に 1 本分進むごとに 1 ずつ増やされた格子番号が付けられている。図 2.2(c) に、位相の範囲が $-\pi \sim \pi$ の位相接続前の位相値 θ の分布を示す。図 2.2(d) に格子番号の分布を示す。格子番号 k は整数値をとり、連続している位相値の範囲では同一の値を持つ。位相接続前の位相値 θ と格子番号 k から式 (2.4) の計算を行った結果として得られた値 ϕ の分布を図 2.2(e) に示す。図 2.2(e) は、図 2.2(c) における不連続のない位相分布となっている。

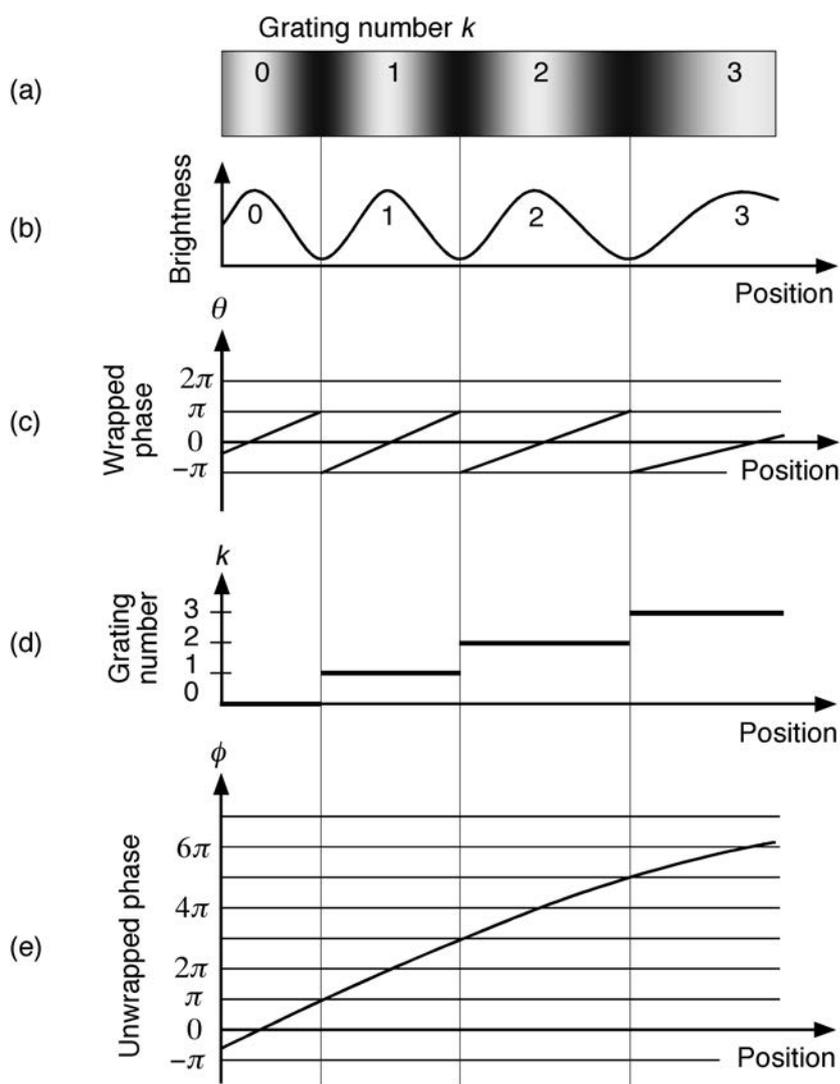


Figure 2.2 Relationship between grating number k and unwrapped phase ϕ : (a) grating image; (b) brightness of grating; (c) wrapped phase θ ; (d) grating number k ; and (e) unwrapped phase ϕ

$$\phi(x, y) = \theta(x, y) + 2\pi k(x, y) \quad (2.4)$$

このように、位相解析によって得られた位相値に対して格子番号の 2π 倍を加えることにより本来の位相値を得ることができる。このような位相値を位相接続後の位相値またはアンラップ (unwrap) された位相値と呼ぶ。この処理を位相接続またはアンラッピング (phase unwrapping) という。

位相接続を行う手法としては、近傍の画素の位相値から位相接続後の位相値を空間的に求めるスペイシャル位相接続法と、時間的に求めるテンポラル位相接続法がある。さらに同一画素における複数個の位相情報から位相接続後の位相値を求める異なるピッチの格子を用いる手法もある。以下にそれぞれの手法について紹介する。

スペイシャル位相接続法 (Spatial phase unwrapping)

スペイシャル位相接続法において最も簡単な手法として、隣の画素の位相値と比較して、その差が π より小さくなるように $2\pi N$ (N は整数)を加えるというものである。

この手法はアルゴリズムは単純であるが、非常にノイズに弱い手法である。例えば、ある一点にノイズがあれば、それ以降に位相接続を行う点はすべて間違った位相値となる。また、不連続な領域の位相接続を行うことができない。

Huntley と Saldner の研究 [75] によって詳しく述べられている。ノイズの影響を少なくするために、周囲の8画素の位相情報を用いる手法 [76] や領域分けを行う手法 [77, 78] などが考えられており、それぞれ適用範囲を限れば有効な手法である。ただし、手法によって位相接続を行うスタート点から空間的に位相接続を行うため、時間がかかるという欠点もある。しかし、最近の研究によれば、リアルタイムで空間的位相接続が行える手法も提案されている [79]。

テンポラル位相接続法 (Temporal phase unwrapping)

テンポラル位相接続法とは、格子のピッチを時間とともに増加させていき、各画素における位相の時間変化からその点の位相接続後の位相値を求める手法であり、Huntley らによって提案された [80, 81]。Saldner と Huntley は、この手法を不連続物体の形状計測や干渉縞解析に適用している [82]。

異なるピッチの格子を用いる手法

同一画素における複数個の位相情報から位相接続後の位相値を求める異なるピッチの格子を用いた手法では、2種類の異なるピッチの格子の位相をそれぞれ求めておき、そこから縞次数を求める手法である。画素ごとに位相接続を行うため、不連続な物体でも正しく位相接続を行うことができる。

格内と岩田らは、液晶プロジェクタを用いて投影する格子のピッチを2通りに変えることで、段差のある物体の形状計測を行っている [83]。Gushov と Solodkin も複数ピッチの位相接続アルゴリズムを構築し、干渉縞解析に用いている [84]。

本研究では、不連続の物体を含んだ三次元物体の形状計測を行うため、この手法を用いている。キャリブレーションでの格子表示では、液晶パネル（基準面）を用いることで、ピッチの異なる数種類の格子を表示させることができる。格子投影では、液晶プロジェクタを用いて異なるピッチをもつ数種類の格子パターンを投影している。実験ではピッチが16, 15, 14画素である3種類の正弦波格子を用いた。この場合、16, 15, 14の最小公倍数である1680の画素数まで一意に位相接続を行うことができる。そのため、格子表示と格子投影どちらも自動的に位相接続を行うことができる。

2.2.6 位相分布から三次元座標への変換

位相と高さの関係をキャリブレーションしておくことで、1次式 [85] もしくは2次式 [39] にあてはめ最小二乗法より求めた。しかし、高さ分布を求められるが、XY座標を求めておらず三次元座標に至っていない。ほとんどの研究ではレンズ収差の影響を考慮していない。一部レンズ収差を補正する研究 [56, 58, 59] も行っているが、完全に除去することができない。

2.3 基準面を用いたレンズ収差の影響を受けない形状計測手法

藤垣と森本は基準面を用いたレンズ収差の影響を受けない形状計測手法を開発した [61–63]。物体を計測する前に、2枚の基準となる平面（液晶パネル）上に表示される格子の位相を解析することで、レンズ中心などの光学パラメータを用いずに三次元座標を算出することができる。これより、中央部のみならず周囲もゆがみことなく精度のよい計測ができるようになった。本研究はこの手法を用いて実験を行っている。

図2.3に示すように液晶プロジェクタから2次元格子を物体に投影する。プロジェクタと異なる方向に設置されたCCDカメラにより投影格子を撮影する。撮影された画像は、物体の形状に応じたゆがみとプロジェクタおよびカメラのレンズ収差によるゆがみを持った2次元格子画像となり、それを解析することによって物体の形状を求めることができる。格子のゆがみはその位相を求めることにより精度よく解析することができる。ここでは、ノイズの影響を受けにくいフーリエ変換位相シフト法を用いて位相解析を行う。フーリエ変換位相シフト法では、格子の位相を0から 2π までわずかずつシフトさせながら連続的に画像を撮影し、それらの画像を奥行き方向に重ねることで、3次元画像を得ることができる。各点において格子の位相をシフトしたときの輝度変化に対して、周波数1のスペクトル成分の位相を解析する手法である。なお、フーリエ変換位相シフト法の詳細は第3章で述べることにする。

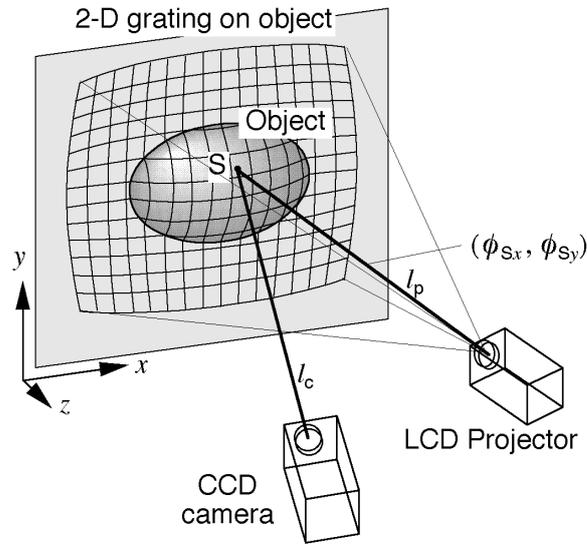


Figure 2.3 Shape measurement by 2-D fringe projection method

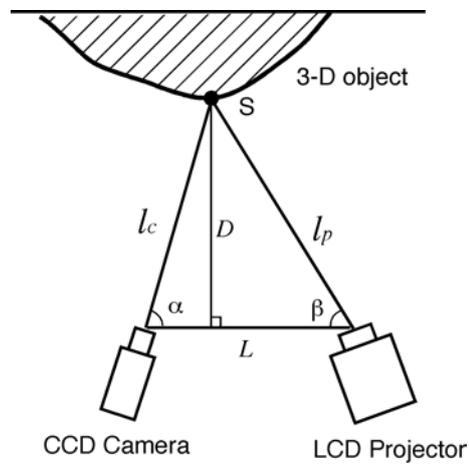


Figure 2.4 Shape measurement by triangulation method

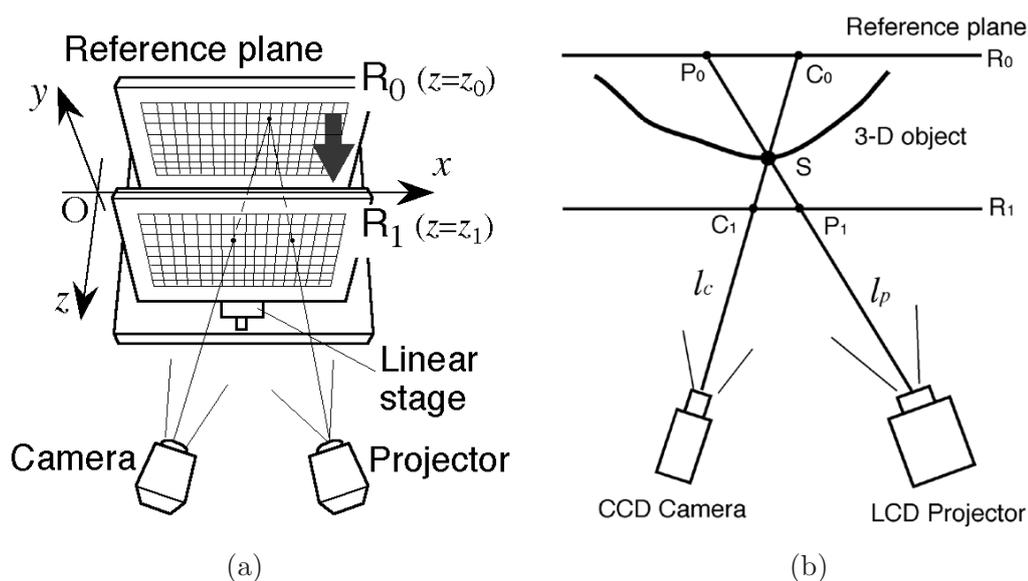


Figure 2.5 Principle of 3-D shape calculation using LCD reference plane: (a) arrangement of reference plane, camera, and projector; (b) arrangement of object, camera, and projector

格子投影法において従来の三角測量法による形状計測法（図 2.4）を用いる場合，式 (2.5) に示すように，計測物体表面の 1 点の空間座標を計算するために，カメラとプロジェクタのレンズ中心の空間座標と物体に対してカメラとプロジェクタがなす角度 α , β が計測物体の空間座標を求めるのに必要なパラメータである。

$$D = L \frac{\sin \alpha \cdot \sin \beta}{\sin(\alpha + \beta)} \quad (2.5)$$

ここで， D はカメラとプロジェクタから物体までの距離， L はカメラとプロジェクタの間隔である。

しかし，これは CCD カメラの各画素に入る光線 l_c とプロジェクタの各画素から出る光線 l_p がそれぞれレンズ中心を通ることが前提で成り立つが，実際にはレンズ収差の影響によってこれらの光線はレンズ中心を通るとは限らない。このレンズ収差の影響より得られる形状計測結果にもゆがみが生じる。とくに周辺部では顕著に見られ，中心付近の精度がよくても周辺部では精度が落ちてしまう。

そこで，本研究では図 2.5 に示すような z 方向の任意の位置に基準面を設置し，あらかじめその基準面の位置における位相分布を精度よく求めておき，その位相分布と実際の空間座標を対応させることにより，レンズ収差の影響を受けない基準面上の 4 点 C_0 , C_1 , P_0 , P_1 から $\overline{C_0C_1}$ と $\overline{P_0P_1}$ の交点として計測物体表面の空間座標を求める。この手法を用いればレンズ収差の影響を受けず高精度な形状計測を行うことが可能となる。

図 2.3 において、物体上のある点 S に投影されている光の通る直線 l_p と、点 S が撮影されているカメラの画素に到達する光の通る直線 l_c の交点として点 S の空間座標を求めることができる。ただし投影格子の 2 次元位相値とその位相値を持つ光線が通る直線の関係、およびカメラの画素とその画素に到達する光の通る直線の間をあらかじめ求めておく必要がある。図 2.6 にピッチが既知で等間隔の 2 次元格子が表示できる基準面とその 2 次元位相値の関係を示す。

2 次元格子のピッチは、 x 方向および y 方向にそれぞれ p_x と p_y とする。2 次元格子の位相を (ψ_x, ψ_y) と表わす。基準面 R_n 上の空間座標 (x, y, z) は、2 次元位相 (ψ_{nx}, ψ_{ny}) を用いて式 (2.6) のように求めることができる。

$$\begin{aligned} x &= \frac{p_x \psi_{nx}(i, j)}{2\pi} + x_0 \\ y &= \frac{p_y \psi_{ny}(i, j)}{2\pi} + y_0 \\ z &= z_n \end{aligned} \quad (2.6)$$

ここで、 x_0 と y_0 はそれぞれ基準面上での位相値 (ψ_x, ψ_y) が $(0, 0)$ となる点の空間座標の x 成分および y 成分である。

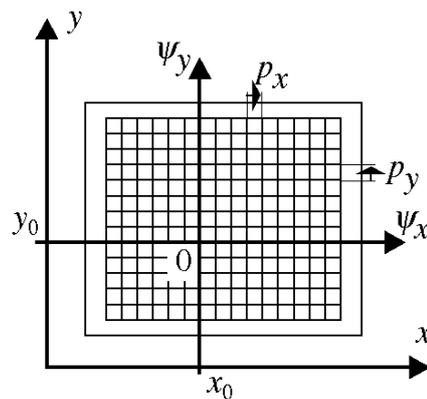


Figure 2.6 2-D grating displayed on LCD reference plane

物体の形状計測を行う前に、 $z = z_n$ ($n = 0, 1$) の 2ヶ所のそれぞれの位置において、基準面の表示される 2 次元格子とプロジェクタから投影された 2 次元格子を CCD カメラで撮影する。基準面に表示された 2 次元格子の位相解析を行うことで、カメラの撮像面のすべての画素において撮影している点の空間座標を精度よく求めることができる。また、プロジェクタから基準面に投影された 2 次元格子をカメラで撮影し、その位相値を解析することによって、プロジェクタで投影する 2 次元格子の 2 次元位相値とその位相値を持つ光線が通る基準面上での空間座標の関係を精度よく求めることができる。格子の 2 次元位相はフーリエ変換位相シフト法によって解析される。2 次元格子を x 方向と y 方向に同時に位相シフトしながら撮影してもよいが、より精度よく解析す

るために、実験では x 方向の格子と y 方向の格子を別々に位相シフトさせている。また位相接続も自動で行えるように、異なる3種類のピッチの格子 (16:15:14) を用いている。例えば、ピッチ間隔が16画素の場合、1画素ずつ位相シフトした計16枚の画像を撮影する。15画素と14画素の格子も同様に1画素ずつ位相シフトするため、 x 方向では全部で計45枚の画像を撮影する。同様に y 方向の画像を加えると、一回の計測では計90枚の画像を撮影することになる。

次に、基準面 R_0 と R_1 の間に置かれた試料物体とカメラ、プロジェクタの配置を図2.5(b)に示す。点 S を撮影しているカメラの画素が基準面 R_0 と R_1 上を撮影する点をそれぞれ点 C_0 と C_1 とする。また、点 S にプロジェクタから投影されている格子の2次元位相値と同じ2次元位相値が投影されている基準面 R_0 と R_1 上の空間座標をそれぞれ点 P_0 と P_1 とする。直線 l_c と l_p は、直線 $\overline{C_0C_1}$ と直線 $\overline{P_0P_1}$ としてそれぞれ求めることができ、点 S の空間座標は、直線 l_c と l_p の交点として求めることができる。この計算方法の詳細を付録A.2に示す。

このようにすることで、試料の計測領域近傍の基準面の座標のみを用いて計測試料表面上の点の座標を求めることができ、従来のレンズ中心を用いる手法に比べて、レンズ収差によるゆがみの影響を受けずに形状計測を行うことができる。

図2.7に物体の計測例を示す。まず x 方向と y 方向から計90枚の位相シフトされた画像を撮影する。それぞれの画像に対してフーリエ変換位相シフト法によって位相解析を行い、得られた3種類の位相分布をもとに位相接続を行う。このようにして、物体に投影された連続的な2次元の位相分布を得ることができる。この位相接続後の位相分布とキャリブレーションで得られた位相分布からその物体の三次元座標を求めることができる。図2.8に得られた形状結果を三次元表示したものを示す。

なお、640画素×480画素の画像に対して、Intel Celeron, 1.7GHzのパソコンを用いた場合、一回の計測では撮影時間(90枚画像取得)は約30秒、位相解析・位相接続・三次元形状の算出のトータル解析時間は約15~20秒程度である。したがって、1分以内に30万点以上の測定データが得られることになる。測定視野は130mm×100mmであり、測定できる奥行きは50~100mmである。既知の位置にある平面を計測したところ、全体の平均誤差が0.010mm、標準偏差が0.015mm、10回の繰り返し精度が0.002mmであった。

平板の形状計測の結果を図2.9(a)および図2.9(b)に示す。基準面を $z = 0.0$ mm および $z = 20.0$ mm とした場合の $z = 5.0$ mm の位置に設置された平板をカメラとプロジェクタのレンズ中心座標を試料表面の空間座標の計算に用いる従来手法で解析した結果と、本手法で解析した結果である。計測領域は400画素×400画素(試料表面上では91mm×89mm)である。従来手法を用いた場合は、 z 座標の平均値は5.032mmで標準偏差は0.037mmであった。本手法を用いた場合は、 z 座標の平均値は5.012mmで標準偏差は0.009mmであった。従来手法と比較して本手法で解析した方がゆがみなく精度よく形状を計測できていることがわかる。

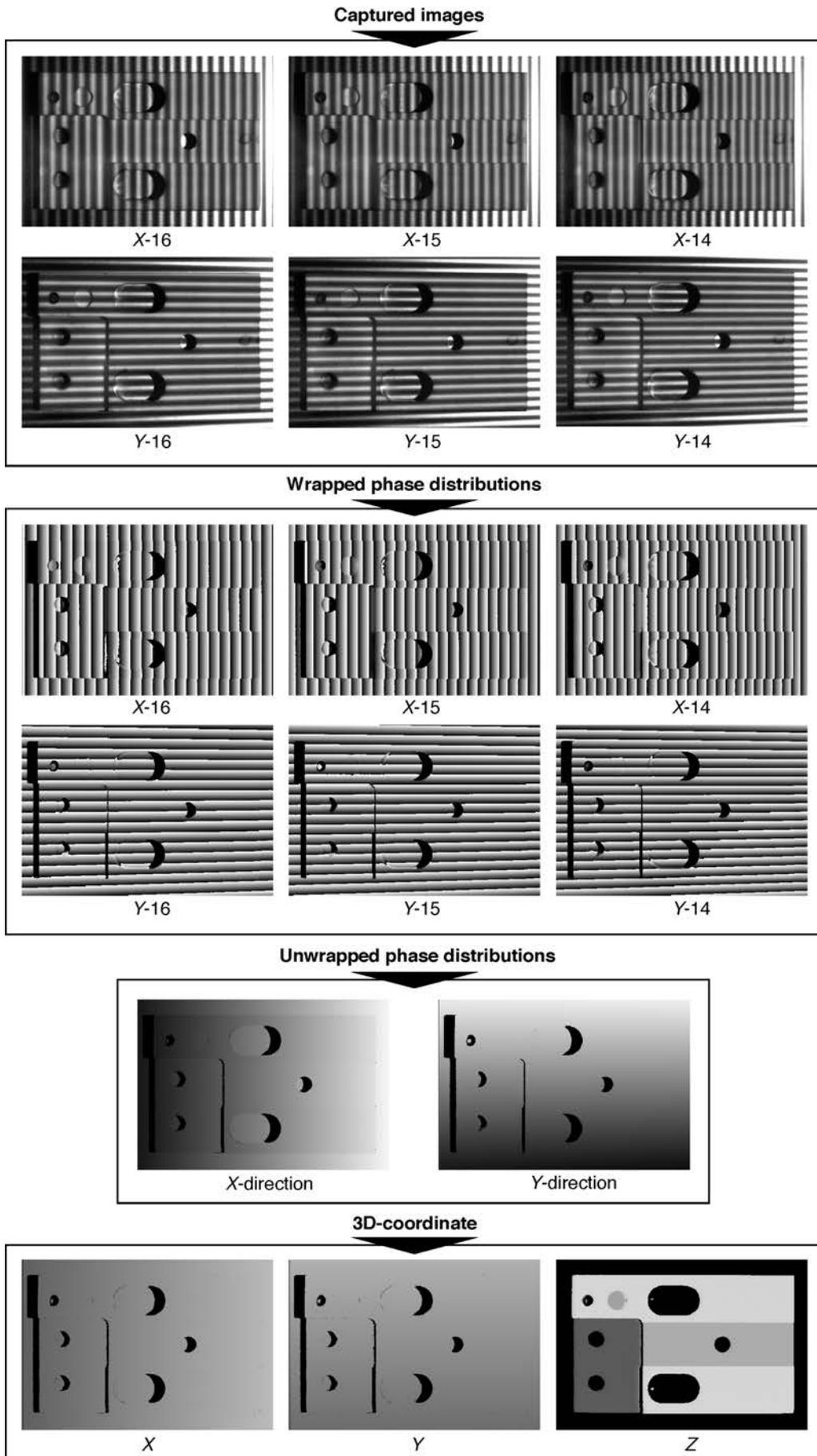


Figure 2.7 Procedure of 3D analysis

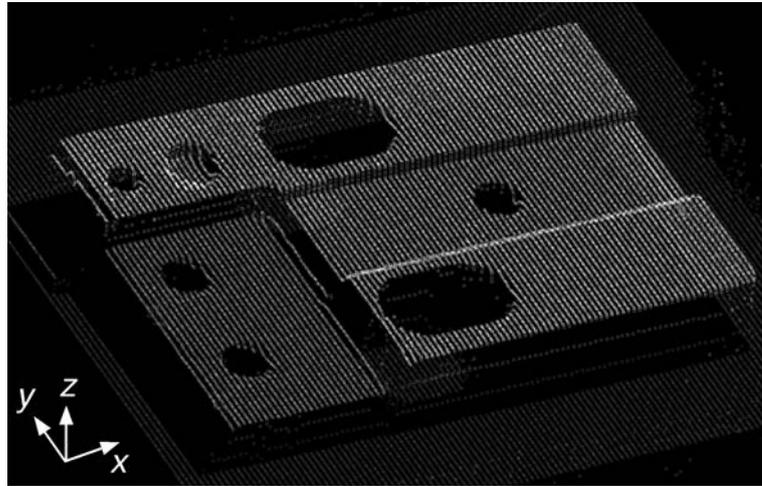


Figure 2.8 3D representation of specimen

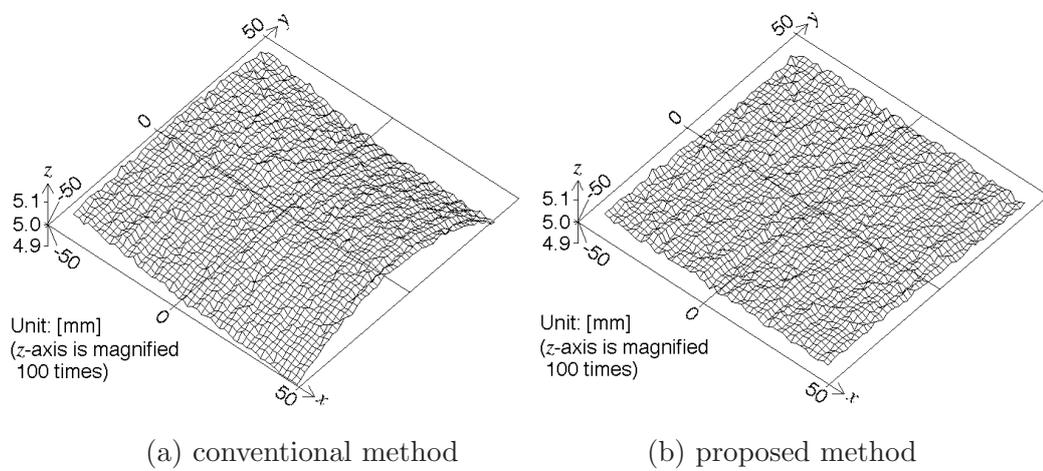


Figure 2.9 Experimental results of a flat plane ($z = 5.00$ mm)

第3章 位相信頼性評価値

3.1 はじめに

格子投影法では、投影した格子パターンをカメラで撮影して位相解析を行うため、1回の測定では影部分や物体の裏の情報を得ることができない。また様々な物体に対しても表面を塗装することなく、精度よく計測できるような形状合成手法の開発を行う必要がある。とくに複数枚の結果データに対して、同じ場所に複数のデータが存在した場合に、どのように誤差の少ないデータを採用するのが重要になる。

本章では、合成を行う際に同じ位置に対して、複数の計測データが存在する場合、最も精度よく計測できた点を選択できるように、各画素ごとに位相の信頼性を評価する値として位相信頼性評価値 [Phase Reliability Evaluation Value (PREV)] を提案する。コンピュータシミュレーションにより、位相誤差と位相信頼性評価値の関係について調べ、その有効性を検証する。

3.2 位相信頼性評価値の提案

図3.1に示すように、位相シフトされる1周期分の輝度データから、画素ごとに位相信頼性評価値を決める。 n 回位相シフトして連続的に得られる画像の輝度値を I_1, I_2, \dots, I_n とすると、位相信頼性評価値は式(3.1)の評価関数として表すことができる。

$$R(i, j) = f\{I_1(i, j), I_2(i, j), \dots, I_n(i, j)\} \quad (3.1)$$

ここでの (i, j) は撮影するカメラの横 i 番目、縦 j 番目の画素を表している。 $R(i, j)$ は (i, j) 番の画素における位相信頼性評価値である。

3.2.1 格子の振幅を用いた評価

格子の振幅を用いる場合、提案する位相信頼性評価値は以下のように定義する。

$$R(i, j) = \begin{cases} 2a(i, j) & \text{if } I_{min} < \forall I_n(i, j) < I_{max} \\ 0 & \text{if } \exists I_n(i, j) < I_{min}, \text{ or } \exists I_n(i, j) > I_{max} \end{cases} \quad (3.2)$$

ここで、 n 回位相シフトして連続的に得られる画像の輝度値を I_1, I_2, \dots, I_n とする。 I_{max} と I_{min} はそれぞれカメラの撮影できる最大輝度値と最小輝度値を表す。撮影される n 枚の輝度デー

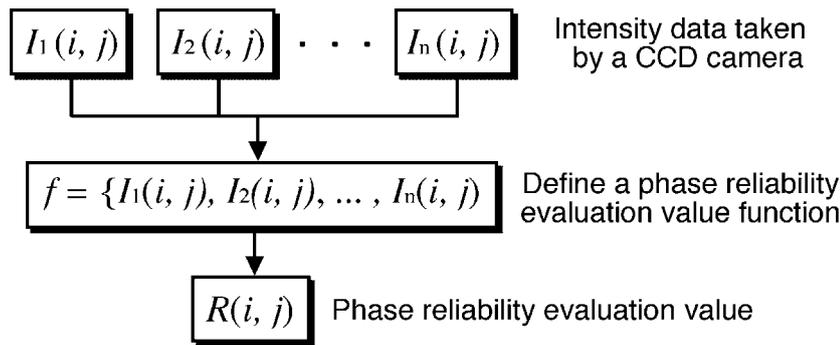


Figure 3.1 Define the function of phase reliability evaluation value (PREV)

タの中, I_{max} と同じ輝度値がある場合, 位相信頼性評価値を 0 とする. そうでない場合, 位相信頼性評価値を投影した格子の各点における輝度振幅である $a(i, j)$ の倍とする.

格子の振幅によって定義される位相信頼性評価値は, 位相シフト法において適用することができる. 輝度のサチュレーションが起これると, 誤差が大きく生じるため, 位相信頼性評価値を 0 とする. また, 同等のノイズレベルに対して振幅の高いほうがノイズによる影響を受けにくいと考えられるので, 格子の振幅が高いものは位相信頼性評価値が高くなっている. しかし, 格子の振幅だけでは実際の計測において, 輝度のサチュレーションの具合やプロジェクタの輝度非線形性による影響を正しく評価することはできない. 格子の振幅で評価する場合は, カメラやプロジェクタの輝度非線形性を補正することが必要である.

3.2.2 相関係数を用いた評価

第 6 章で述べる積分型相関位相シフト法において, 従来の余弦波の輝度分布格子を用いる位相シフト法と異なり, 矩形波でも CCD カメラの素子に輝度値を積分することより得られる相関係数から位相分布を得ることができる. このとき, 投影格子の振幅を求めることができないが, 式 (3.3) に示すように相関係数を用いて評価することができる. これは格子の振幅に相当するものである. なお, 積分型相関位相シフト法の詳しい原理について第 6 章 2 節を参照していただきたい.

$$R(i, j) = |S_0(i, j)| + |S_1(i, j)| \quad (3.3)$$

3.2.3 フーリエスペクトルを用いた評価

フーリエ変換位相シフト法では, 画素ごとに位相値を計算するために, 図 3.2 に示すように周波数 1 のスペクトルのみを抽出し, 虚部と実部の比の逆正接の計算から求められている. その際にノイズなどのような位相値を求めるのに不要な成分を除去することができる. 従来の位相シフト法よりも精度よく位相を求めることができる.

理論上、高次周波数のノイズが入っても、フーリエ変換位相シフト法によって完全に排除することができる。しかし、実際はカメラで撮影される M 枚の輝度画像から位相解析を行うため、いわば離散的フーリエ変換を行っている。例えば、15枚の輝度画像から得られる周波数は0次の直流成分、1次の基本周波数成分と2～7次の高調波成分である。

ランダムノイズの場合は、各周波数成分にほぼ同程度のパワースペクトルとして表されるので、高次周波数成分が増えると、誤差が生じやすくなると考えられるために、本研究では周波数1のパワースペクトルと高次周波数のパワースペクトルの総和の平均の比を位相信頼性評価値とする。詳しい原理について次節に述べることにする。

3.3 フーリエ変換位相シフト法における位相信頼性評価値の提案

3.3.1 フーリエ変換位相シフト法の原理

投影格子や干渉縞などのように縞の位相値を任意に変化させることができる場合、位相のずれである α を0から 2π までわずかずつシフトさせながら連続的に画像を撮影し、それらの画像を奥行き方向に重ねることで、図3.2(a)に示すような3次元画像を得ることができる。このとき、格子の輝度分布は式(3.4)のように表される。

$$f(X, Y, k) = a(X, Y) \cos[\phi(X, Y) + k\alpha] + b(X, Y) \quad (3.4)$$

ここで、点 (X, Y) は撮影された3次元画像内の一点で、 α は位相シフト量を表し、 $f(X, Y, k)$ は輝度値、 $a(X, Y)$ と $b(X, Y)$ 、 $\phi(X, Y)$ はそれぞれ輝度振幅と背景輝度、 $\alpha=0$ における縞の位相値を表す。 x 方向の1ラインにおける輝度分布の模式図を図3.2(b)に示す。

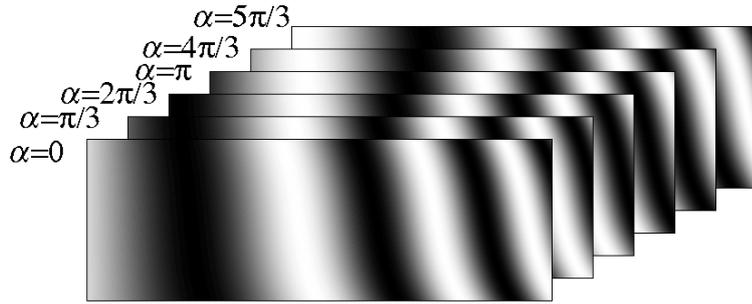
式(3.4)を複素数表示で表すと、式(3.5)のようになる。

$$f(X, Y, k) = \frac{a(X, Y)}{2} \exp\{j[\phi(X, Y) + k\alpha]\} + \frac{a(X, Y)}{2} \exp\{-j[\phi(X, Y) + k\alpha]\} + b(X, Y) \quad (3.5)$$

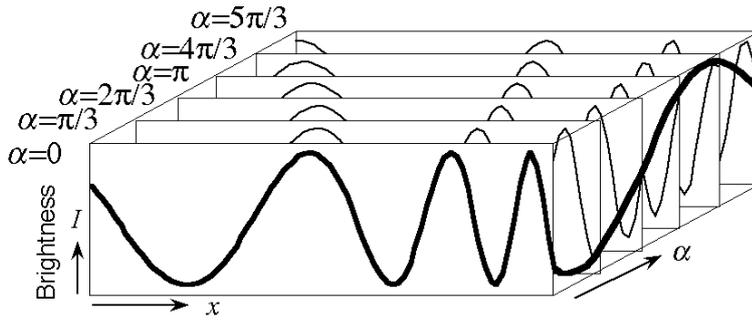
式(3.5)をフーリエ変換すると式(3.6)に示すようなスペクトルが得られ、それぞれのフーリエスペクトルの大きさは式(3.7)のようになる。

$$F(X, Y, \omega) = \sum_{k=0}^{M-1} f(X, Y, k) \exp(-jk\alpha\omega) \quad (3.6)$$

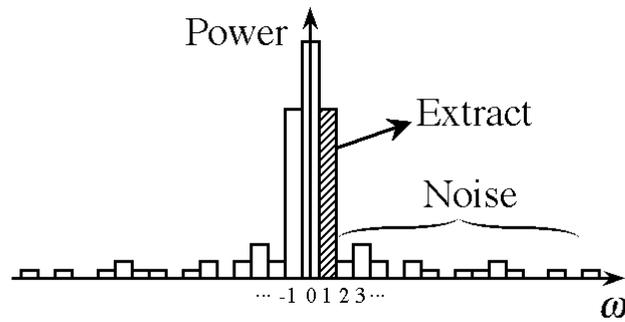
$$|F(X, Y, \omega)| = \{\text{Re}[F(X, Y, \omega)]^2 + \text{Im}[F(X, Y, \omega)]^2\}^{1/2} \quad (3.7)$$



(a) 3-D image consisting of sequential two-dimensional images obtained by phase shifting



(b) X-directional brightness distribution of phase-shifted fringe patterns of a 3-D image



(c) Fourier spectrum at a point



(d) phase distribution

Figure 3.2 Principle of phase-shifting method using Fourier transform (PSM/FT)

ここで、 ω は周波数であり、 M は得られるスペクトルの数を表す。式 (3.5) からは、理想の正弦波であれば、 $\omega = -1, 0, +1$ だけの値をもつが、測定時のノイズやプロジェクタの輝度非線形性などにより他の周波数成分も現れる。図 3.2(c) に示すように周波数 1 の成分は位相シフトにより得られた輝度変化の 1 次成分を表し、ノイズなどのような位相値を求めるのに不要な成分は、ほとんどが 1 以外の周波数として得られる。したがって、次のように周波数 1 のスペクトルのみを抽出し、虚部と実部の比の逆正接を計算すると、きわめて精度よくその画素における位相値を求めることができる。式 (3.6) から周波数 1 の成分だけ抽出すると式 (3.8) のようになる。

$$F(X, Y, 1) = \sum_{k=0}^{M-1} f(X, Y, k) \exp(-jk\alpha) = \frac{M}{2} a(X, Y) \exp[j\phi(X, Y)] \quad (3.8)$$

したがって、位相 ϕ は、 $F(X, Y, 1)$ の実部と虚部の値から式 (3.9) のように求めることができる。

$$\tan \phi(X, Y) = \frac{\text{Im}[F(X, Y, 1)]}{\text{Re}[F(X, Y, 1)]} \quad (3.9)$$

以上の計算を全画素について同様に行うことによって、全画素における位相分布を得ることができる。図 3.2(a) に示す位相シフト三次元画像に対してこの操作を行った結果得られた位相分布を図 3.2(d) に示す。

フーリエ変換のアルゴリズムとして、FFT の他に MR-FFT (Mixed Radix Fast Fourier Transform) と呼ばれるアルゴリズムが考案されている [86]。MR-FFT は解析可能な画素数が 2 のべき乗以外にも多くあるため、フーリエ変換位相シフト法に適している (付録 A.3)。

3.3.2 フーリエ変換位相シフト法における位相信頼性評価値

物体の反射率の低い部分では得られる振幅も低く信頼性が低いため、一般的には投影格子の振幅を信頼性のパラメータとして用いることが多い。

しかし、振幅のみを用いる場合、格子画像上に存在するランダムノイズや、カメラのサチュレーション、プロジェクタの輝度非線形性による誤差などの影響を正しく評価することができない。

そこで、本節ではフーリエ変換位相シフト法における新たな位相信頼性評価値を提案する。ノイズ成分である $n(X, Y, k)$ を理想とする元の画像に加えると、得られる画像 \hat{f} は次式のようなになる。

$$\hat{f}(X, Y, k) = f(X, Y, k) + n(X, Y, k) \quad (3.10)$$

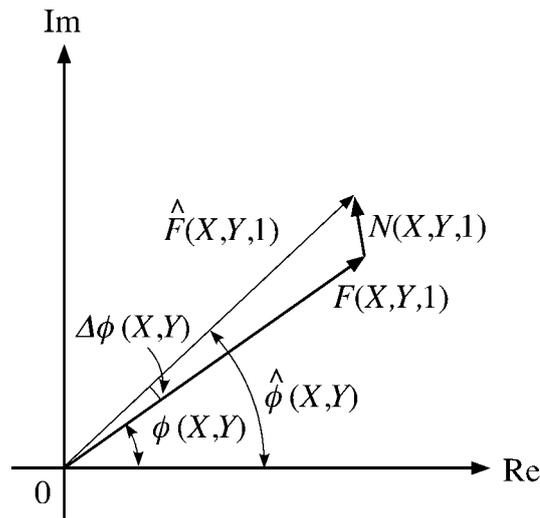


Figure 3.3 Phase error $\Delta\phi(X, Y)$ caused by the noise spectrum

したがって、基本周波数である1の成分は元の基本周波数1のスペクトル成分に周波数が1であるノイズ成分の和として得られ、式(3.11)のように表される。

$$\hat{F}(X, Y, 1) = F(X, Y, 1) + N(X, Y, 1) \quad (3.11)$$

ここで、

$$N(X, Y, 1) = \sum_{k=0}^{M-1} n(X, Y, k) \exp(-jk\alpha) \quad (3.12)$$

ランダムノイズによる位相誤差の増加をフェーズベクトルで表したものを図3.3に示す。元のフーリエスペクトル成分である $F(X, Y, 1)$ にノイズのフーリエスペクトル成分である $N(X, Y, 1)$ が加えると少しだけずれて $\hat{F}(X, Y, 1)$ になる、よって、得られる位相値 $\hat{\phi}(X, Y)$ は正しい位相値 $\phi(X, Y)$ から $\Delta\phi(X, Y)$ だけずれていることがわかる。ノイズの成分が大きければ大きいほど、位相値の誤差が増えることがわかる。

したがって、このノイズ成分 $N(X, Y, 1)$ と $F(X, Y, 1)$ の比をとれば解析した位相値を正確に評価できる。しかし、実際に得られるのは両者の和であり、ノイズ成分のみを取り出すことができない。

そこで、式(3.13)で示すように、基本周波数である1次のスペクトルとそれ以外の高次周波数のスペクトルの和の平均と比例していることを想定すると、位相信頼性評価値は式(3.14)のように定義することができる。一般的に高次周波数が増えれば1次周波数におけるノイズ成分もほぼ比例して増えると言える。また1次周波数のノイズ成分 $N(X, Y, 1)$ は $F(X, Y, 1)$ に比べてはるかに小さいため、 $\hat{F}(X, Y, 1)$ と $F(X, Y, 1)$ はほぼ同等な値である。よって、式(3.14)はフーリエスペクトルの視点から見てS/N比に相当する値と言える。

$$N(X, Y, 1) \propto \frac{1}{L-1} \sum_{\omega=2}^L \hat{F}(X, Y, \omega) \quad (3.13)$$

L はフーリエ変換位相シフト法 (MR-FFT) によって得られる最大周波数である。

$$R(X, Y) = \frac{|F(X, Y, 1)|}{|N(X, Y, 1)|} \approx \frac{|\hat{F}(X, Y, 1)|}{|N(X, Y, 1)|} = \frac{|\hat{F}(X, Y, 1)|}{(1/L-1) \sum_{\omega=2}^L |\hat{F}(X, Y, \omega)|} \quad (3.14)$$

本研究では、フーリエ変換位相シフト法を用いて位相解析を行うため、次章以降に用いる位相信頼性評価値は式 (3.14) で計算している。

3.4 シミュレーション

本節では、位相信頼性評価値と位相誤差の関係をランダムノイズ、輝度のサチュレーション、輝度非線形性について、それぞれシミュレーションにより調べる。

シミュレーションとして、計算機内ではピッチが 60 画素で各点が順に $2\pi/15$ ずつ異なる位相を持つ余弦波の格子画像を 15 回位相シフトして得られる格子の三次元画像を作成する。 K を格子のピッチ、 i を画面内座標とすると、ある画素が持つ理論的位相値 $\phi_{i,theory}$ は、式 (3.15) のように表される。

$$\phi_{i,theory} = \frac{2\pi i}{K} \quad (3.15)$$

一方、シミュレーションによって得られた位相値 $\phi_{i,simu}$ は、それぞれのシミュレーション条件によって算出される。ここでの位相平均誤差を式 (3.16) に示すように定義する。

$$E_{ave} = \frac{\frac{1}{K} \sum_{i=0}^{K-1} |\phi_{i,simu} - \phi_{i,theory}|}{2\pi} \quad (3.16)$$

3.4.1 ランダムノイズによる位相値の誤差と位相信頼性評価値の関係

ここでは、ランダムノイズによる位相値の誤差と位相信頼性評価値の関係を調べるために、形状計測で用いるカメラとプロジェクタに発生するランダムノイズが位相解析に与える影響をコンピュータシミュレーションによって評価する。ここで述べるランダムノイズとは、発生確率が正規分布に従う白色雑音 (付録 A.4) である。このようなノイズは CCD カメラなどで電氣的に発生する。

シミュレーション方法

シミュレーションでは、格子の振幅が100である余弦波の格子画像に対して、標準偏差が0～5の振幅をもつランダムノイズをそれぞれ付加して位相平均誤差と位相信頼性評価値の関係を調べる。

結果および考察

シミュレーション結果を表3.1に示す。これは標準偏差が0～5の振幅をもつランダムノイズを加えた場合の位相平均誤差、周波数1のスペクトル成分、周波数1以外の高次周波数の和の平均と位相信頼性評価値をまとめたものである。

図3.4に標準偏差が1, 3と5のランダムノイズを加えたときに得られるフーリエスペクトルを示す。高次周波数について注目すると、ランダムノイズの増加に伴い、高次周波数のフーリエスペクトルは大きくなっていることがわかる。

図3.5は表3.1をグラフ化したものである。ランダムノイズの増加に伴って位相平均誤差が大きくなるにつれて位相信頼性評価値が低くなることを確認できた。図3.6に振幅を用いて評価する場合の結果を示す。誤差が大きくなるにもかかわらず振幅はほとんど変わらないことから、正しく評価できていないことがわかる。したがって、フーリエスペクトルで評価する手法が有効であることはシミュレーションより確認できた。

Table 3.1 Average phase error and PREV when random noise is added

Standard deviation	Phase error [%]	$ F(1) $	$\frac{1}{L-1} \sum F(\omega_n) $	PREV
0	0.004	749.28	1.12	678.40
1	0.048	750.01	3.57	220.44
2	0.094	750.02	6.94	113.47
3	0.140	750.05	10.35	76.09
4	0.186	750.08	13.77	57.19
5	0.232	750.10	17.19	45.79

3.4.2 輝度のサチュレーションによる位相値の誤差と位相信頼性評価値の関係

本節では、カメラの撮影輝度範囲を超えることを輝度のサチュレーションと表現する。ここでは、一般の8ビット256段階のグレースケールのCCDカメラにおいて、輝度が255より大きくなる場合、輝度出力値が255になることを指す。輝度のサチュレーションによる位相値の誤差と位相信頼性評価値の関係を調べるために、輝度のサチュレーションが位相解析に与える影響をコンピュータシミュレーションによって評価する。ここで述べる輝度のサチュレーションは特に鏡面

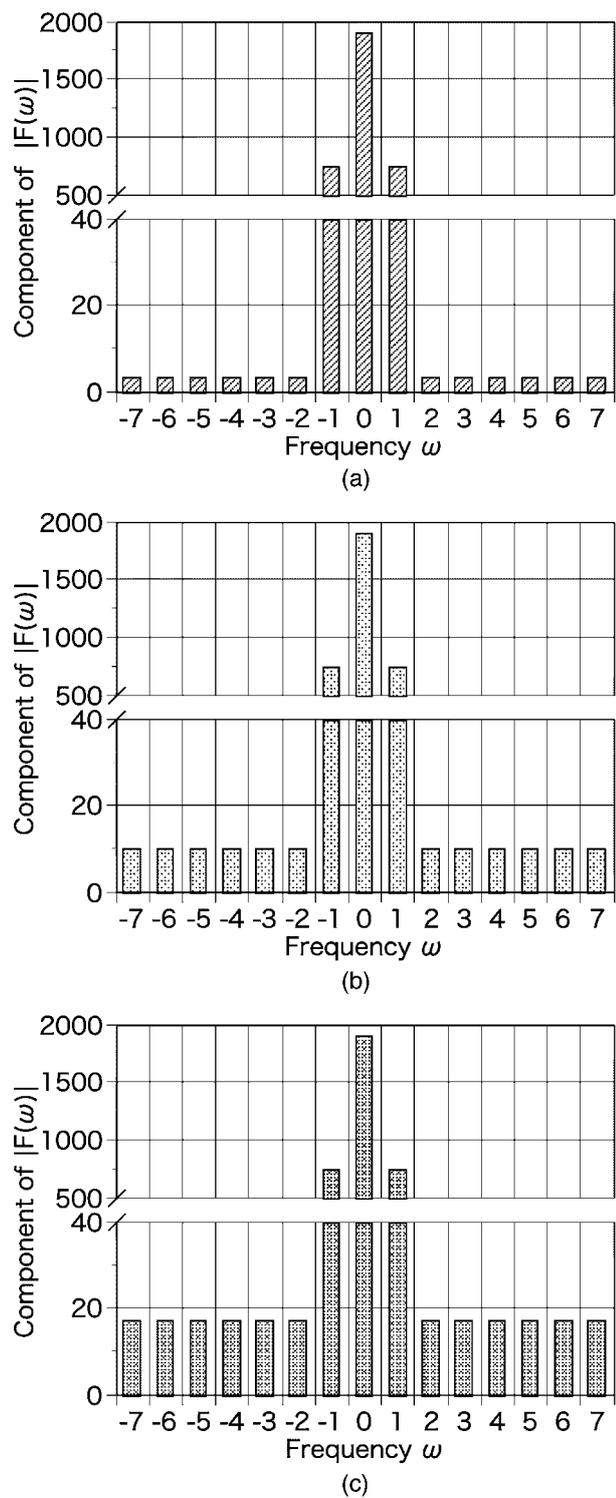


Figure 3.4 Average Fourier spectrum at each frequency when standard deviation of random noise is changed to (a) 1, (b) 3, and (c) 5

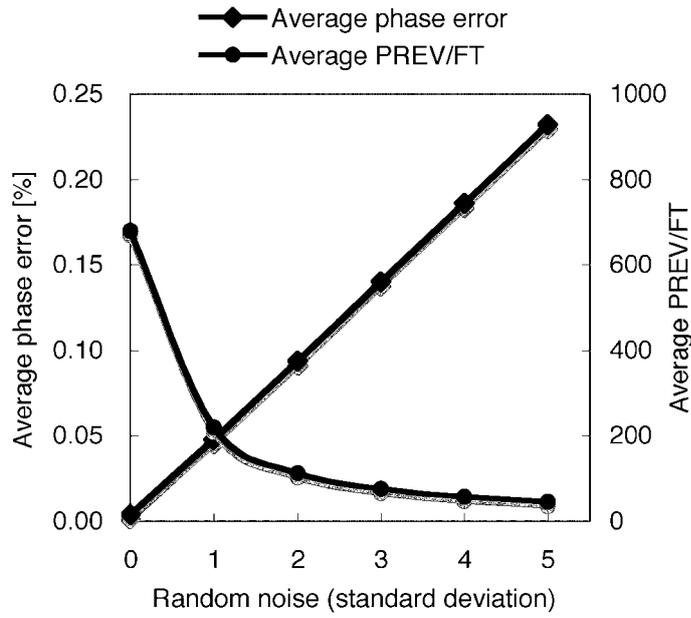


Figure 3.5 Relationship between average phase error and average phase reliability evaluation value when standard deviation of random noise is changed

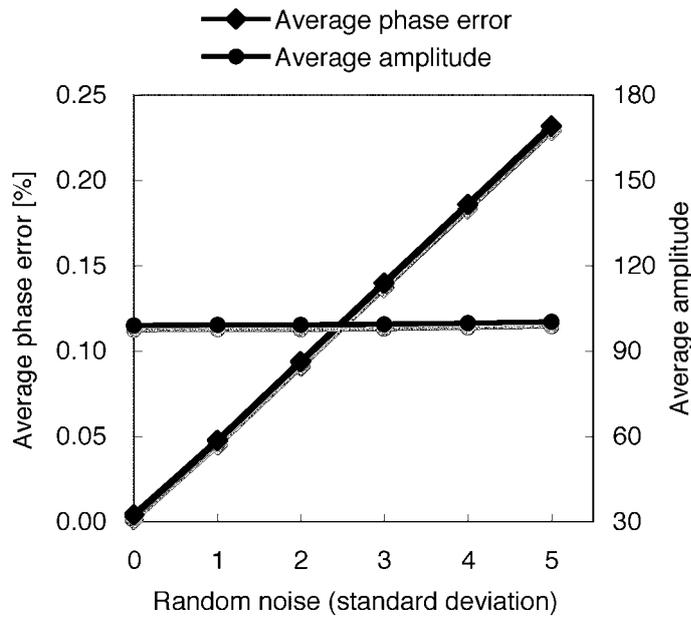


Figure 3.6 Relationship between average phase error and average amplitude when standard deviation of random noise is changed

反射する物体を計測する場合によく生じるものである。

シミュレーション方法

シミュレーションでは、振幅が 128、バイアスが 128 の格子画像に対して、バイアス成分だけ 10 ずつ増やしていき、輝度 0 ～ 50 のサチュレーションが生じた場合の位相平均誤差と位相信頼性評価値の関係について調べる。

結果および考察

シミュレーション結果を表 3.2 に示す。これは輝度のサチュレーションを変えた場合の位相平均誤差、周波数 1 の成分、周波数 1 以外の高次周波数の和の平均値と位相信頼性評価値をまとめたものである。

図 3.7 は表 3.2 をもとにしてグラフ化したものである。この結果より、輝度のサチュレーションが大きくなるにつれて、位相平均誤差は大きくなると同時に、位相信頼性評価値は小さくなる傾向を示した。ここで、ランダムノイズと比べると、位相誤差は全体的に小さい値である。これによりフーリエ変換位相シフトは輝度のサチュレーションに対して強いということがわかった。

Table 3.2 Average phase error and PREV when bias is changed

Saturation level	Phase error [%]	$ F(1) $	$\frac{1}{L-1} \sum F(\omega_n) $	PREV
0	0.004	959.46	1.10	873.72
10	0.005	945.75	9.01	104.94
20	0.016	924.54	18.27	50.64
30	0.047	896.50	25.98	34.50
40	0.073	862.16	31.31	27.54
50	0.079	826.71	37.61	21.96

3.4.3 輝度非線形性による位相値の誤差と位相信頼性評価値の関係

ここでは、輝度非線形による位相値の誤差と位相信頼性評価値の関係を調べるために、形状計測で用いるカメラとプロジェクタの特性による非線形性が位相解析に与える影響をコンピュータシミュレーションによって評価する。輝度非線形性を再現するために、式 (3.17) で示されるガンマ曲線を用いて輝度を変換する。

$$I' = (I/I_{MAX})^{1/\gamma} \times I_{MAX}, \quad (0 \leq I \leq I_{MAX}) \quad (3.17)$$

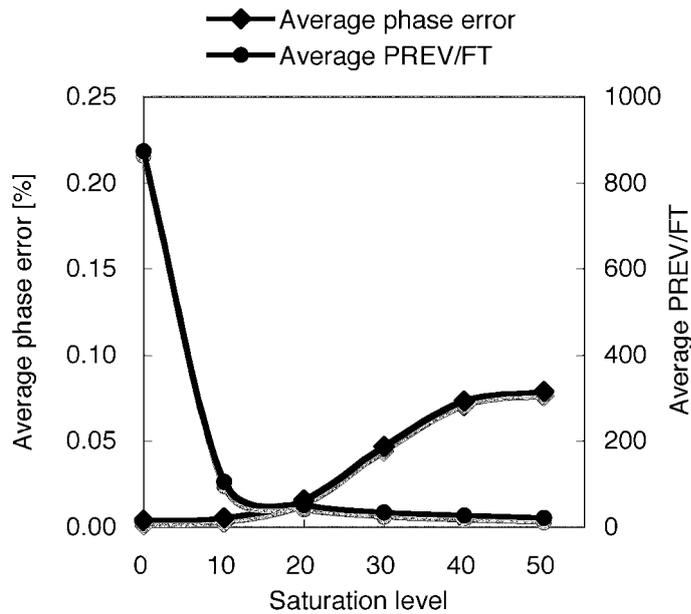


Figure 3.7 Relationship between average phase error and average phase reliability evaluation value when saturation level is changed

式 (3.17) において, I, I' は変換前後の輝度分布を表し, I_{MAX} は輝度の最大値を表す. シミュレーションでは $I_{MAX} = 255$ とした.

シミュレーション方法

まず, 1 周期の余弦波を 15 回シフトした輝度変換しない格子画像を用いてフーリエ変換位相シフト法より位相解析を行い位相分布を求める. 次にそれぞれの格子画像に対して, $\gamma = 1 \sim 2.5$ で表されるガンマ曲線を用いて変換した画像を使って位相分布を求める. これら二種類の位相分布の差に現れる平均誤差を用いて, 輝度非線形性の影響による位相の誤差と位相信頼性評価値の関係について調べる.

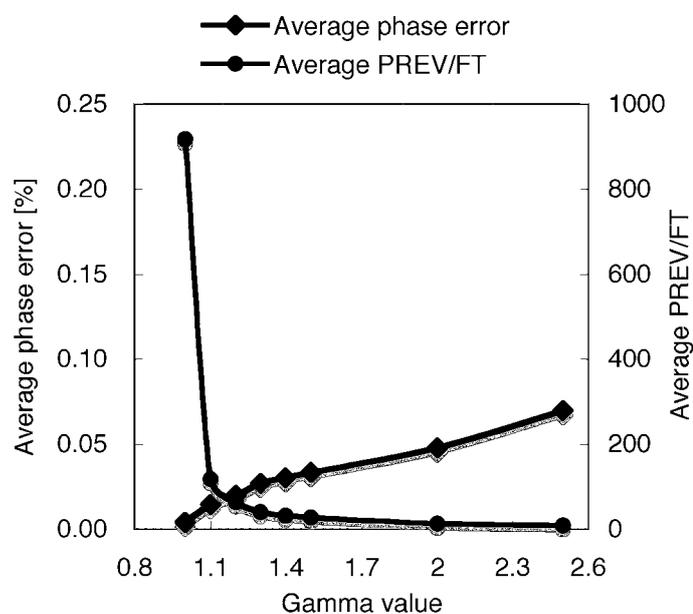
結果および考察

図 3.8 にシミュレーション結果を示し, γ 値を変えた場合の位相平均誤差, 周波数 1 の成分, 周波数 1 以外の高次周波数の和の平均と位相信頼性評価値をまとめたものを表 3.3 に示す.

この結果より, 位相誤差が大きく生じるにつれて位相評価値が低くなることを確認できた. また輝度のサチュレーションによるシミュレーション結果と同様に, ランダムノイズと比べると, 位相誤差は全体的に小さい値である. これはフーリエ変換位相シフトは輝度非線形性に対して強いということの意味する.

Table 3.3 Average phase error and PREV when γ value is changed

γ value	Phase error [%]	$ F(1) $	$\frac{1}{L-1} \sum F(\omega_n) $	PREV
1.0	0.004	954.71	1.04	917.95
1.1	0.014	944.93	7.97	118.62
1.2	0.020	933.95	14.62	63.90
1.3	0.027	952.19	22.78	40.38
1.4	0.030	903.92	29.02	31.14
1.5	0.033	890.28	32.04	27.78
2.0	0.048	821.74	65.06	12.66
2.5	0.070	765.96	88.37	8.64

Figure 3.8 Relationship between average phase error and average phase reliability evaluation value when γ value is changed

3.5 位相シフト法とフーリエ変換位相シフト法の精度比較

フーリエ変換位相シフト法は高次周波数成分に生じるノイズを取り除くことができるため、一般的な位相シフト法より精度良く位相解析ができると言われているが、実際に数値的に評価することはまだ報告されていない。本節では、位相シフト法とフーリエ変換位相シフト法の精度についての比較も行った。

シミュレーション方法

ここでは最も撮影回数が少ない3枚の位相シフト法と15枚のフーリエ変換位相シフト法を用いて精度の比較を行った。前節に述べたランダムノイズ、輝度のサチュレーション、輝度非線形性について、それぞれの精度比較を行った。その結果を図3.9に示す。なお、3枚の位相シフト法を用いる場合の位相は式(3.18)によって計算される。

$$\tan \phi = \frac{\sqrt{3}(I_C - I_B)}{2I_A - I_B - I_C} \quad (3.18)$$

ここで、 I_A, I_B, I_C は格子の位相を $2\pi/3$ ずつシフトして撮影される画像である。

結果および考察

図3.9より、フーリエ変換位相シフト法は位相シフト法に対してランダムノイズによる誤差が1/2、サチュレーションによる誤差が1/15～1/25、輝度非線形性による誤差が1/30～1/75になることがわかった。位相シフト法では、式(3.18)に示すように、輝度データをそのまま用いて位相を計算するために、輝度データに誤差が生じると、解析した位相値は大きな誤差を生じることになる。一方、フーリエ変換位相シフト法では、周波数1の成分のみを抽出するため、ほとんど輝度のサチュレーションや輝度非線形性に対する影響を受けないことがわかる。

3.6 まとめ

本章では、各画素ごとに位相解析した位相値の信頼性を評価する位相信頼性評価値を提案した。これは形状合成を行うための、同じ位置に対して複数の計測データが存在する場合に、誤差の少ないデータを採用するための指標である。ランダムノイズ、輝度のサチュレーション、輝度非線形性による位相値の誤差と位相信頼性評価値の関係についてそれぞれコンピュータシミュレーションにより調べた。その結果、ともに位相誤差が大きくなるにつれて位相信頼性評価値は低くなることがわかった。

次章ではこの位相信頼性評価値を用いたいくつかの形状合成手法について述べる。

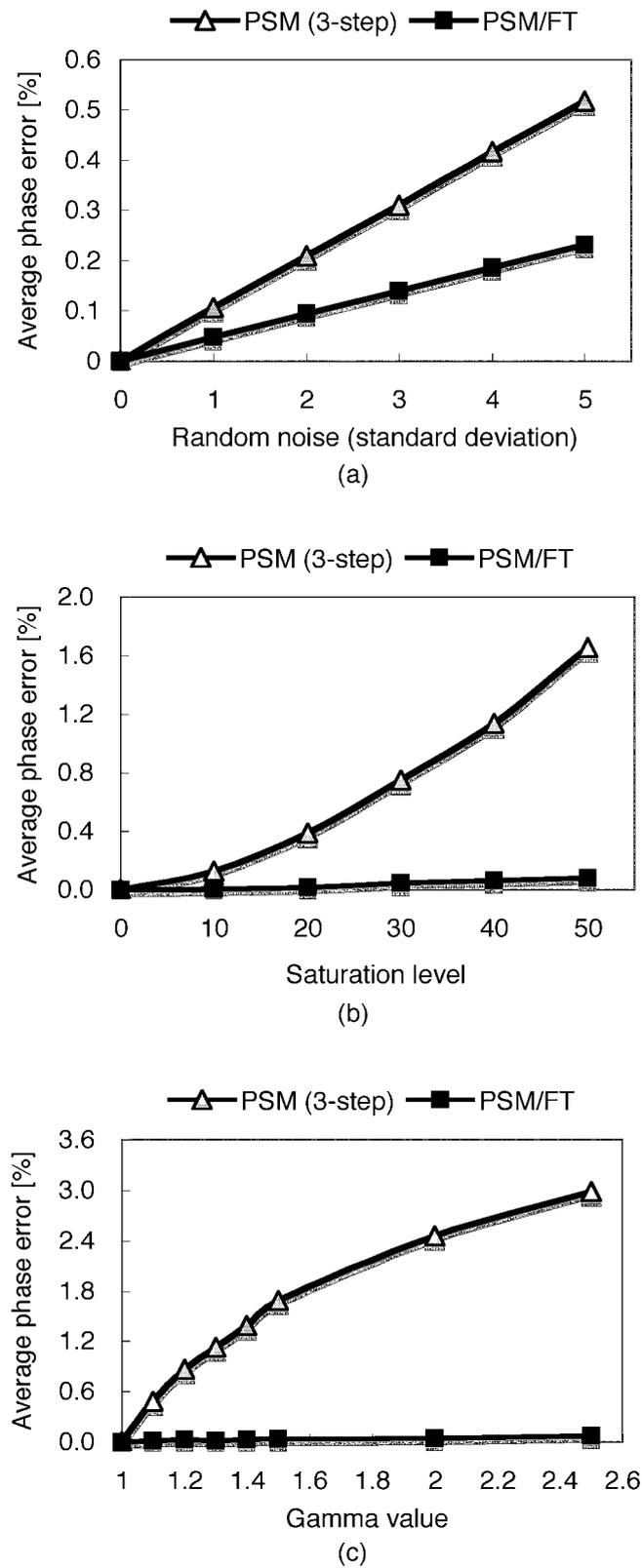


Figure 3.9 Accuracy comparison between PSM (3-step) and PSM/FT: in case of (a) random noise; (b) saturation; and (c) nonlinearity

第4章 位相信頼性評価値を用いた形状合成手法

4.1 はじめに

格子投影法では、格子パターンを投影してカメラで撮影して位相解析を行うため、1回の測定では影部分や物体の裏の情報を得ることができない。また様々な物体に対しても表面を塗装することなく、精度よく計測できるような形状合成手法の開発を行う必要がある。そこで、本章では前章で提案した位相信頼性評価値を用いたいくつかの形状合成手法を開発する。計測条件を変えて得られる複数のデータに対して、位相信頼性評価値の大きいほうを採用するもしくは位相信頼性評価値を重み係数として合成を行う。

複数の撮影（計測）条件を用いて得られる多重情報から、単一情報の不足を補うだけでなく情報の質（精度）の向上に利用することが可能である。このような考え方をを用いる先行研究として、浅田らの研究では、カメラの絞りを連続的に変化させて撮影した多重絞りカラー画像から信頼性の高い色度、明度情報を高精度に獲得する方法 [87] を提案した。多重絞りカラー画像から求めた色度および明度情報は、単一絞りカラー画像から得られる情報と比べて安定で信頼性が高いことを実験より実証している。また浅田らはフォーカスを変えながら撮影した複数枚の画像を用いてエッジ検出や距離計測を行う研究 [88] もなされている。これより、高精度に合焦フォーカス位置を求めることができる。

このように、多重画像から信頼性の高い情報を抽出する考え方と本研究で計測条件を変えて形状合成することでより良い結果を得ようという考え方はほぼ同じである。言い換えると、この考え方は三次元形状計測にも適用できる。もちろん二次元画像と本研究で扱う立体データへのアプローチは異なるし、画素ごとにさらに投影格子の位相の信頼性を評価する位相信頼性評価値を提案する点は本研究の特徴である。この位相信頼性評価値を用いることで、測定誤差の大きいデータは排除され、信頼できるデータを得ることができる。

図 4.1 に合成する手順を示す。複数の測定データに対して、設定した閾値 T より大きい場合、位相信頼性評価値を重み係数として合成する。逆に閾値 T より小さい場合、そのデータを採用しない。これにより、計測条件が悪く、誤差になりやすい部分の計測データは採用されず、精度よく計測できた点のみを簡単に選択することができる。また、複数の精度よく計測できた点の重み付け平均を取ることで、更なる精度の向上が期待できる。なお、図 4.1 では2つのデータの場合についての合成手順を示しているが、複数の計測データの場合も同様である。また位相信頼性評価値は 10 より大きい場合、ほぼ信頼できると考えられるため、閾値 T の値は本研究では 10 としている。

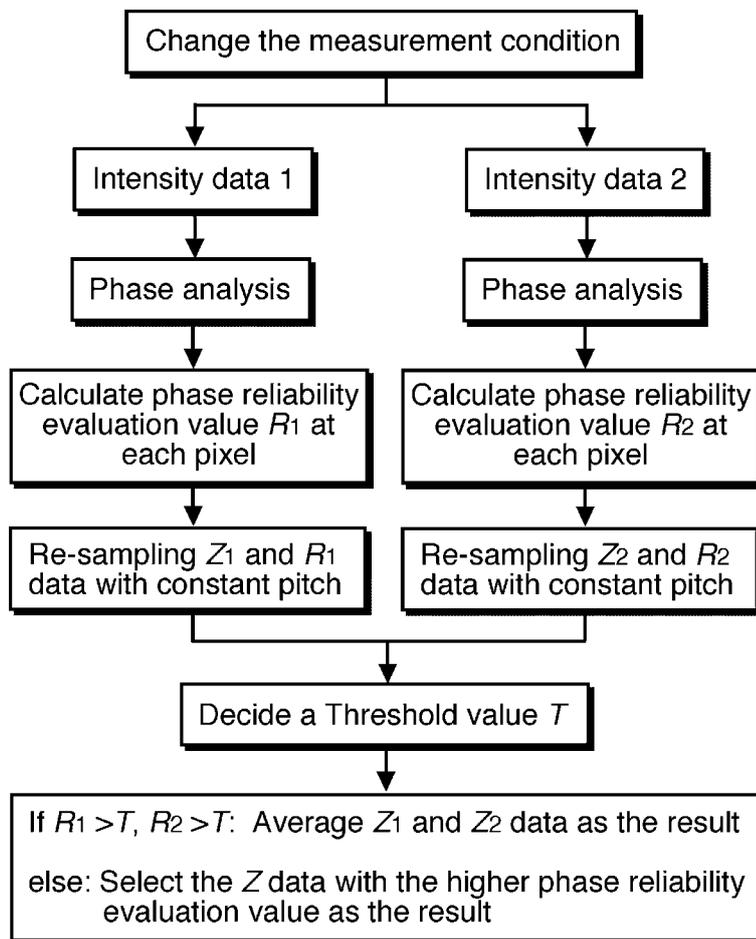


Figure 4.1 Flowchart of merge procedure using PREV

4.2 広ダイナミックレンジの形状合成手法

4.2.1 はじめに

2枚の基準面を用いて形状を計測する際に、カメラのフォーカスが合う範囲には制限があるために、奥行きが深い物体を計測することが困難な場合が多い。工業界では広ダイナミックレンジで高精度に計測できる手法が求められている。

本節では奥行きが深い三次元計測物体を平行移動させて計測し常にフォーカスが合っている2枚の基準面内のデータのみを用いて、複数の位置での計測結果を合成する手法を提案する。その計測方法の原理と実験例を示す。

4.2.2 奥行きのある物体の形状合成計測法

奥行きのある物体を奥行き方向 (z 方向) に対して平行移動させて複数の位置で計測した結果を各位置における2枚の基準面内にある点のみを用いて合成する。2枚の基準面の間隔である z_m ずつ物体を移動させて計測し得られた複数枚の異なる位置での三次元データを等間隔になるように再サンプリングした後、ピントの合う2枚の基準面内のデータのみを用いて合成する。再サンプリングについては次節に記す。

図4.2にその合成を行う方法を示す。 z 方向に対して z_m だけ移動しているため、式(4.1)のように、移動させた距離分だけ戻すことで同じ座標系になる。ただし、物体は移動しているため、カメラに写る(見た目の)物体の大きさは変化する。そのまま合成すると境界部分では段差ができるため不自然になる。そこで、 x, y 座標に対してあらかじめ等間隔になるように再サンプリングした後、 z 方向のデータだけを合成することで広ダイナミックレンジの物体全体の計測データを合成することができる。

$$z_g = z_s - nz_m \quad (4.1)$$

ここで、 z_s は再サンプリングを行った後のローカルの z 座標であり、 z_m は基準面間の距離(移動距離)、 n は移動回数を表わす。 z_g は最終的に合成したグローバルの z 座標である。また最終的に合成したグローバルの x, y 座標は再サンプリングした点群の座標となる。

4.2.3 再サンプリングのアルゴリズム

形状計測結果はカメラの画素が撮影する点の座標分布として求められるため、 x, y 平面に対して等間隔ではない座標として得られる。しかし、データを合成する際には、 x, y 座標に対して等間隔の空間座標が得られる必要がある。そこで形状計測結果を等間隔の形状計測結果に変換した後にデータの合成を行う。

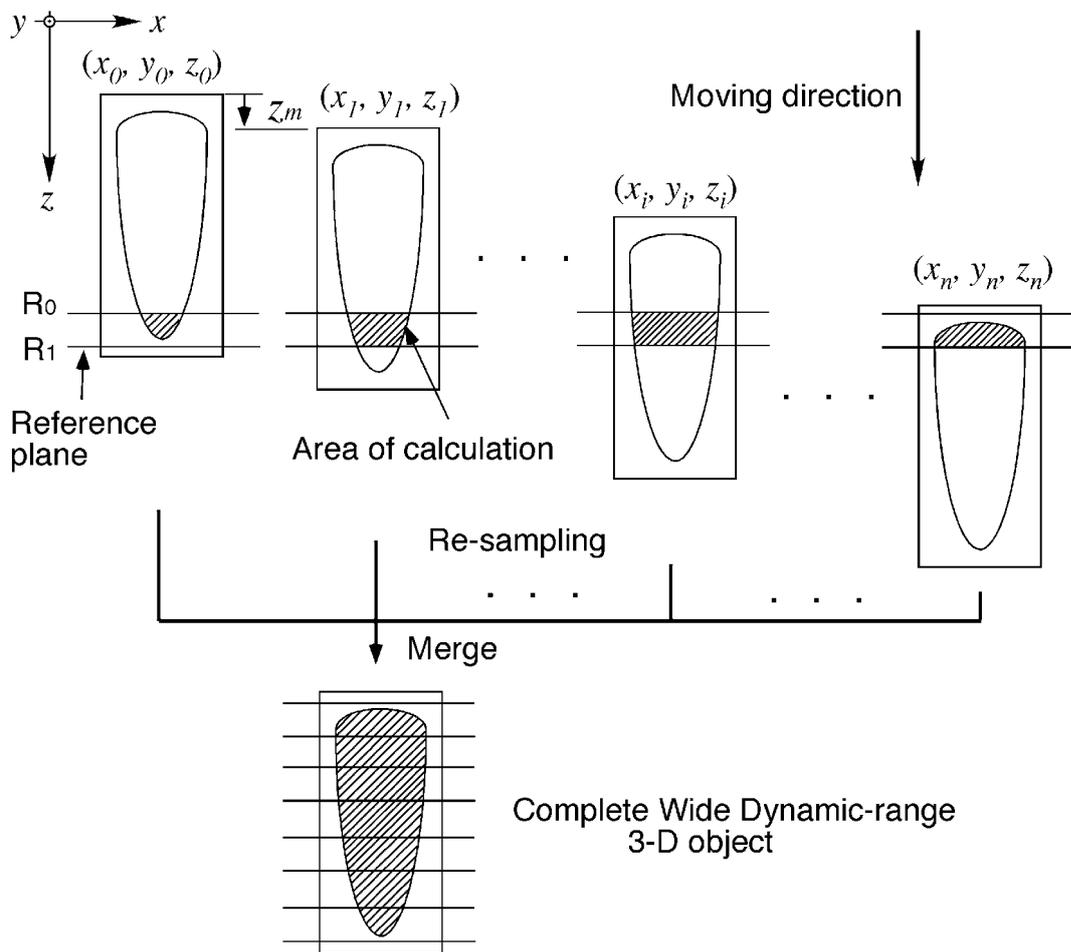


Figure 4.2 3D reconstruction by wide dynamic-range shape measurement

まず知りたい点 P の座標 (x, y) に最も近い 3 つの計測された点 $P_a(x_a, y_a, z_a)$, $P_b(x_b, y_b, z_b)$, $P_c(x_c, y_c, z_c)$ を探し出し, この 3 点を通る平面上の座標 (x, y) を持つ点として高さデータを求めることができる。

4.2.4 奥行きのある深い段差状試料の計測実験

実験装置を図 4.3 に示す。格子パターンを投影するための LCD プロジェクタと画像を撮影するための CCD カメラを用いる。基準板には 2 次元格子を表示できる液晶ディスプレイを用いる。精度よく平行移動できるように $0.1 \mu\text{m}$ の精度で位置決めができる 1 軸の移動ステージ上に基準板を設置する。本実験装置の場合、計測できる物体の大きさは横幅 100 mm × 縦長 100 mm × 奥行 200 mm である。

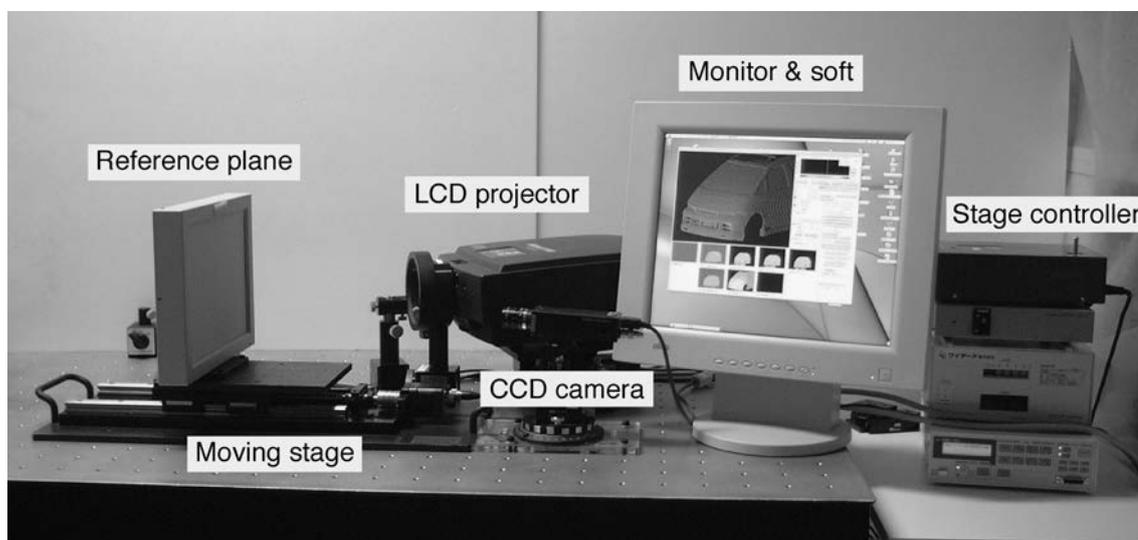
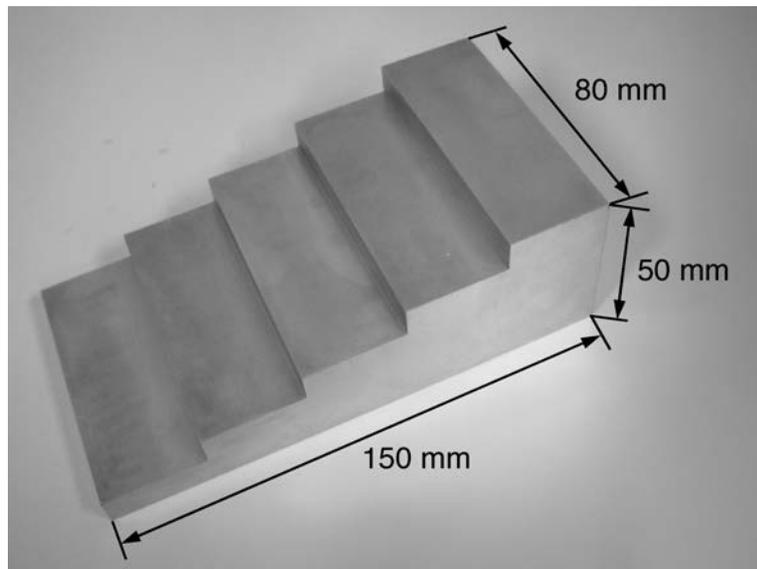


Figure 4.3 Experimental setup

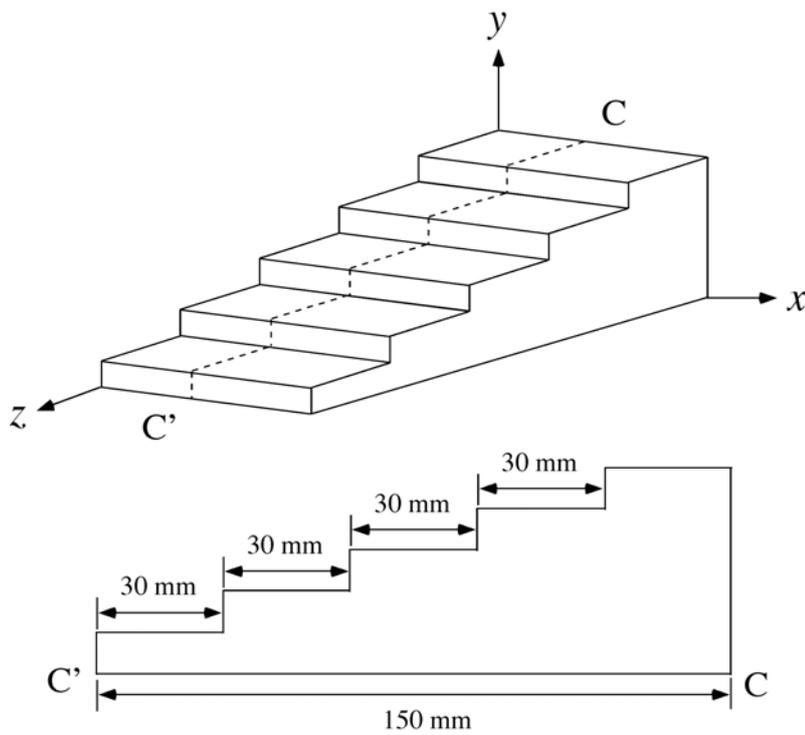
本手法の奥行き方法の計測精度を確認するため、図 4.4 に示す 5 つの段差のある奥行きのある深い試料を z 軸方向に 30 mm ずつ計 5 回移動して計測した。2 枚の基準面の間隔は 20 mm であり、再サンプリング間隔は x, y 方向ともに 0.15 mm である。各段差の高さは $2.4 \mu\text{m}$ の精度の接触式計測機を用いて測定した値を理論値とした。

4.2.5 結果および考察

図 4.5(a)~(e) に各位置での投影格子の様子を示す。これらの図からわかるように、物体の奥行きがかなり深く、カメラの被写界深度よりも大きい場合、投影格子を撮影することができず、このようなエリアでは計測することすらできない。図 4.5(f) は本手法によって得られた高さ分布で



(a) photography



(b) size

Figure 4.4 Step specimen

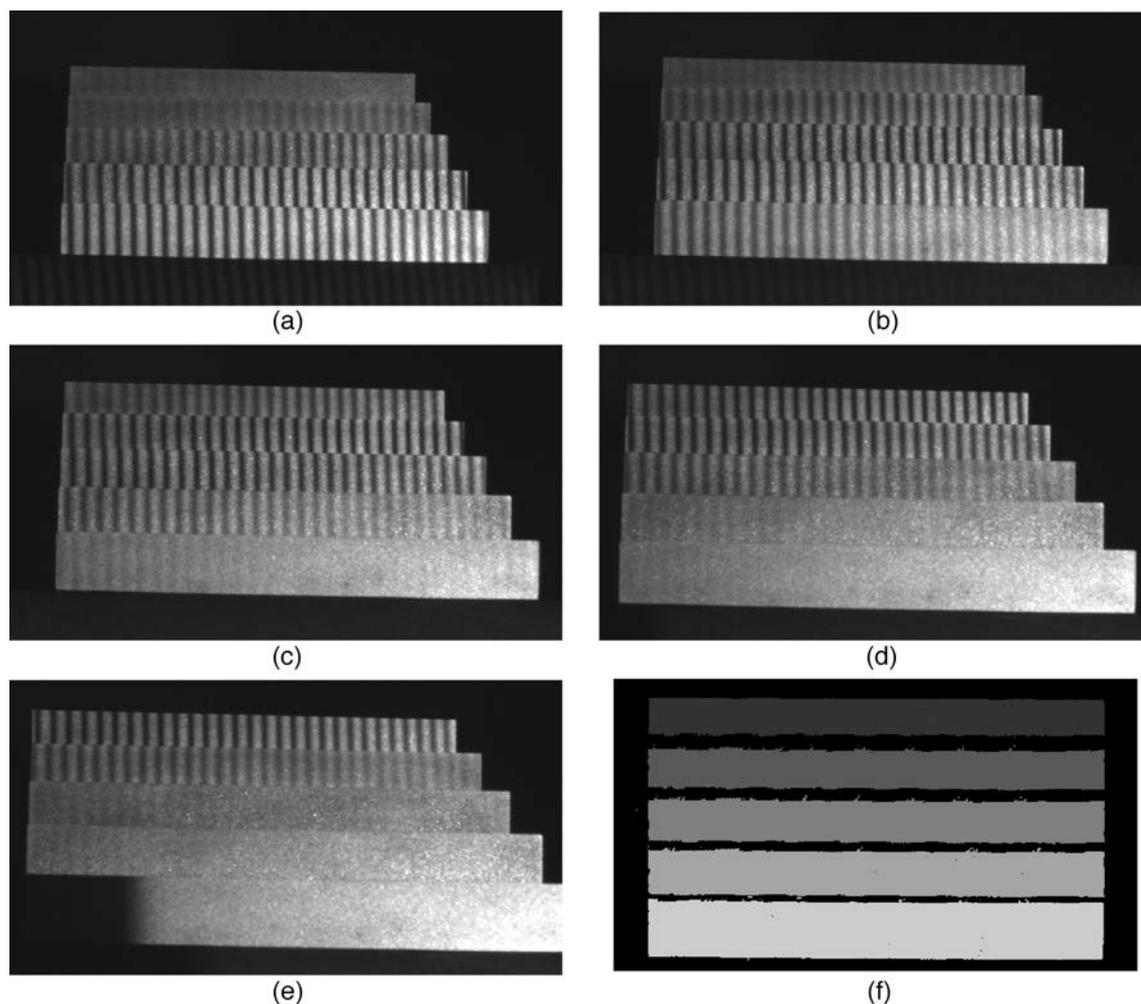


Figure 4.5 Projected grating at (a) $z = 0$ mm; (b) $z = 30$ mm; (c) $z = 60$ mm; (d) $z = 90$ mm; (e) $z = 120$ mm; and (f) height distribution after merged

ある。全体の形状を得ることができている。さらに図 4.5(f) の縦中央 1 ラインの断面データ CC' (図 4.4(b)) を図 4.6 に示す。図 4.7 は各段差において計測した点の値を示している。それぞれの約 40 点の平均値と標準偏差および接触式一点計測法で測定したデータを比較した値について表 4.1 にまとめた。実験結果より計測範囲 150 mm に対して、 $18 \mu\text{m}$ 以下の精度で広ダイナミックレンジ物体の形状を計測することができ、本手法の有効性を確認することができた。

4.2.6 自動車模型の形状計測例

本手法による奥行きのある物体の計測例として、図 4.8 に示す奥行き 200 mm の自動車模型の計測を行った。自動車模型は 1/24 スケールのもを用いた。実験では、自動車模型を移動ステージに乗せ、基準面の間隔である 20 mm ずつ 9 回移動させて、それぞれ計測した 9 枚のデータを

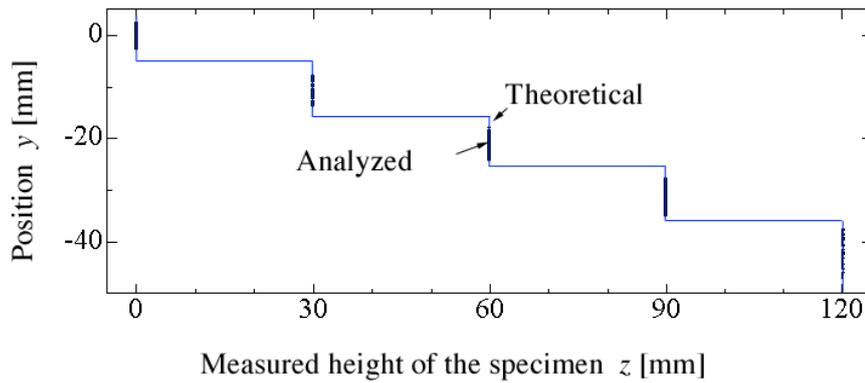


Figure 4.6 Cross-section of CC'

Table 4.1 Error at each step

Position (mm)	Average (mm)	Sd (μm)	Error (μm)
0.001	0.004	8	3
29.899	29.910	11	11
59.894	59.896	14	2
89.899	89.916	12	17
120.130	120.148	13	18

図 4.9 に示す。図 4.9 の測定データに対して式 (4.1) に示すように z 方向の移動量だけを減算し、等間隔に再サンプリングした後、合成した結果の高さ分布を図 4.10 に示す。なお、再サンプリングした x, y の間隔はともに 0.2 mm である。図 4.11 は合成した結果を三次元表示したものである。このように、従来全体計測することが難しかった奥行き深い物体でも、広ダイナミックレンジで高精度な形状計測が実現できる。

4.2.7 まとめ

奥行き深い三次元計測物体を平行移動させて計測し常にフォーカスが合っている 2 枚の基準面内のデータのみを用いて、複数の位置での計測結果を合成する手法を開発した。これによって、広ダイナミックレンジで高精度に三次元物体の形状を計測することができる。段差状の精度検定用試料を計測した実験では、奥行き方向の計測範囲 150 mm に対し、平均誤差 0.010 mm 、標準偏差 0.012 mm の精度が得られ、本手法の有効性が示された。

本手法を大物体計測に適用すれば、実際の車の形状計測も可能となる。

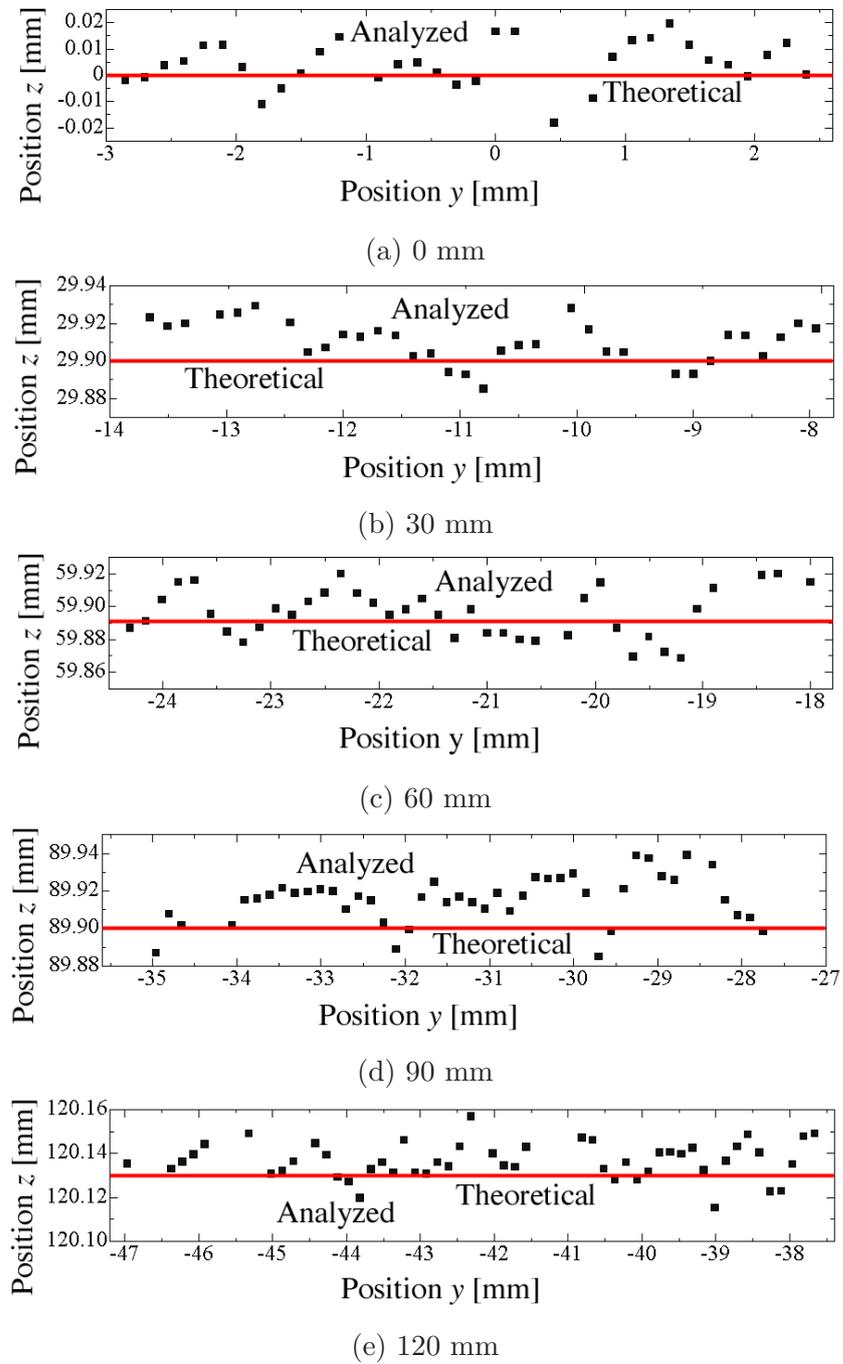


Figure 4.7 Cross-section at each step

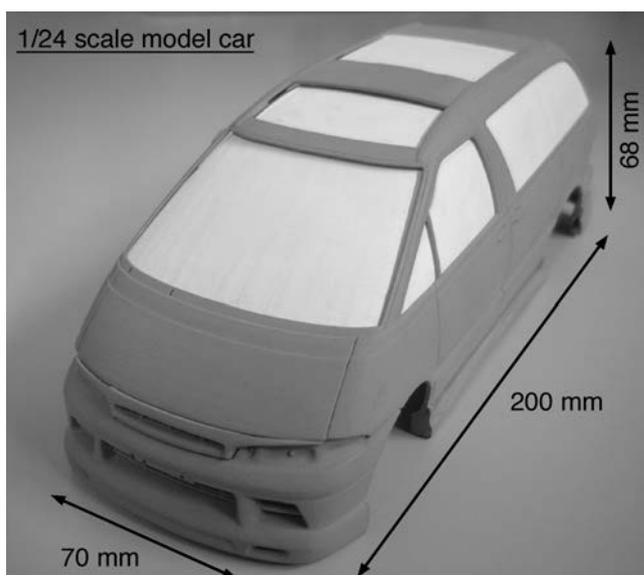


Figure 4.8 Measured object: model car

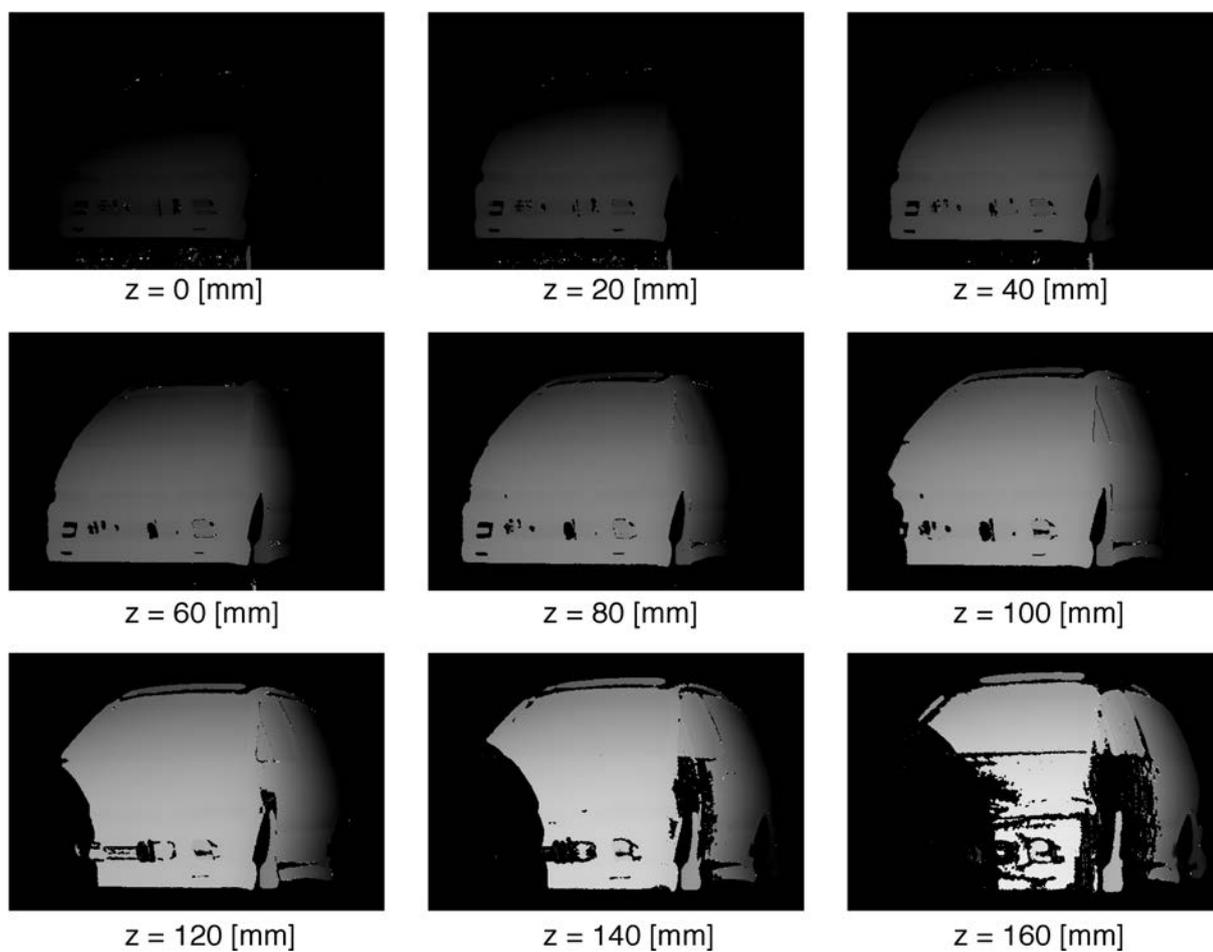


Figure 4.9 Height distributions at each position

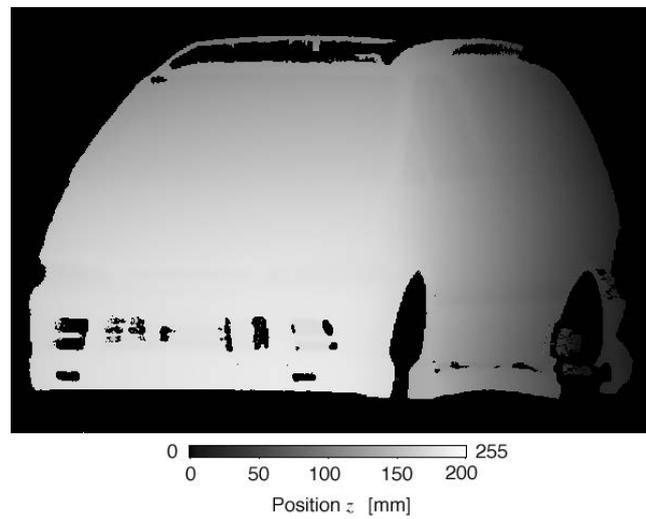


Figure 4.10 Final height distribution after merged

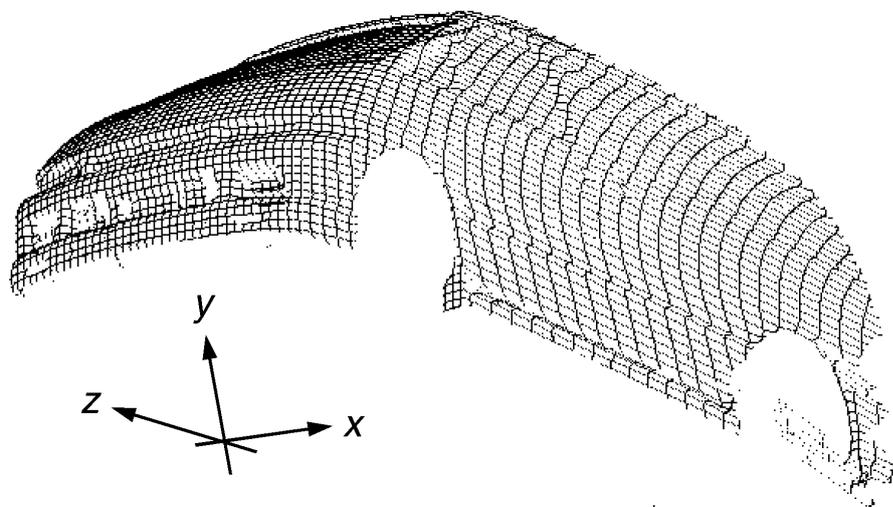


Figure 4.11 3D representation of model car

4.3 鏡面反射成分の影響を避ける形状合成手法

4.3.1 はじめに

格子投影法では、計測に光を利用するため鏡面反射する物体の計測が困難であった。鏡面反射成分による影響を抑えるために、一般的には被測定物につや消し白塗料を塗布して計測を行う。

しかし、接触式三次元形状測定機による計測に関する研究報告 [89] から、塗装の程度とむらにもよるが、表面の塗装膜の厚さは 0.02~0.05 mm あると想定されている。より高い精度で計測を行う場合、被測定物につや消し塗料などを塗布して計測することは望ましくない。製造過程では計測のために塗装をすることができず、計測試料の表面に塗装せずに形状を計測できる手法が望まれる。

鏡面反射成分の影響を実験的に除去する例はこれまで報告されていない。そこで、本節では、複数のカメラを用いて異なる角度から試料を計測した結果を合成し、鏡面反射成分による影響を避ける形状合成手法を提案する。旋盤加工された金属試料およびディスク状の試験片を塗装せずに計測した実験結果を示す。

4.3.2 鏡面反射成分を避ける形状合成手法

一般に、物質の表面がざらざらしていると、光はあらゆる方向に反射する。このタイプの反射を拡散反射と呼ぶ。たとえば、ペンキを塗った壁は典型的な拡散反射表面である。逆に物質の表面が滑らかだと、光は一つの方向に反射する。反射する角度は、物質表面の入射角と同じである。このタイプの反射を鏡面反射と呼ぶ。鏡は完全な鏡面反射表面である。投影格子位相解析法は基本的に拡散反射を想定している。鏡面反射が起こった場合、一般に画像はサチュレーションを起こしている。そのため、誤差は大きくなり、位相信頼性評価値は低くなる。

平面金属試料の計測において、鏡面反射が起こらないようにするためには、試料を置く際に角度をつけて調整することでほぼ解決できるが、円筒状のような金属試料を計測する場合、格子パターンを投影して CCD カメラで撮影すると、円筒状のために、かならず鏡面反射が起こる場所が生じる。鏡面反射がある場所では正確に計測できない。そこで複数台のカメラを用いて異なる方向から計測を行い、得られる多方向の計測データを合成する。異なる多方向から計測を行った場合、鏡面反射が起こる場所が各々変わるため、各画素について多方向の計測データのうち正確に計測できた方のデータを位相信頼性評価値を比較することにより採用することで、結果的に鏡面反射成分による影響を避けることができる。

図 4.12 に提案する手法の光学系を示す。カメラ 1 および異なる角度で置かれたカメラ 2 によって計測物体をそれぞれ異なった方向から撮影し、それぞれ計測した結果に対して高さ分布と位相評価値を等間隔に再サンプリングし、位相信頼性評価値を用いて画素ごとに高さを合成する。

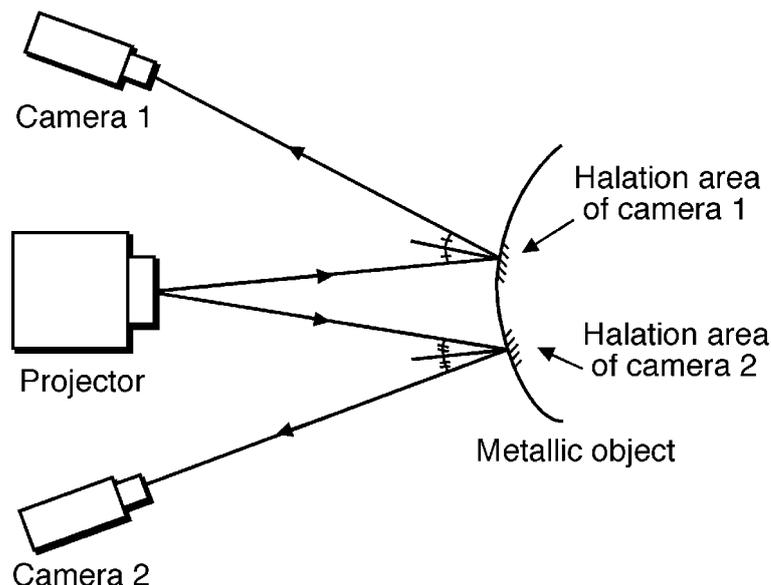


Figure 4.12 Relationship between halation effects and arrangement of a projector and cameras

4.3.3 円柱状の金属試料の形状計測

実験装置を図 4.13 に示す。格子パターンを投影するための LCD プロジェクタと格子画像を撮影するための CCD カメラ 1 と CCD カメラ 2 を用いる。実験では、CCD カメラ 1 および CCD カメラ 2 はともに焦点距離が 12 mm のレンズを付けた SONY 製の XCD-X700 を用いる。カメラとプロジェクタから基準面までの距離はともに 400 mm であり、カメラ 1 およびカメラ 2 とプロジェクタのなす角度は約 20 度である。2 枚の基準面間隔は 20 mm である。

図 4.14 に実験で用いた金属試料を示す。これは旋盤によって加工されたアルミニウム材質の金属試料である。図 4.14(a) は試料の写真、図 4.14(b) は試料の各部の寸法を示す斜視図である。実験では、この試料を 2 台の CCD カメラで異なる 2 方向から計測を行った。

図 4.15 はそれぞれカメラ 1 及びカメラ 2 によって撮影して得られた輝度データである。図 4.16、図 4.17 はそれぞれカメラ 1 およびカメラ 2 で計測して解析した高さ分布と位相信頼性評価値分布である。わかりやすくするために輝度振幅が 10 以下のデータを黒くマスクしている。図 4.18、図 4.19 はそれぞれ図 4.16、図 4.17 に対して、 x, y 方向ともに 0.2 mm 間隔に再サンプリングした後の高さ分布と位相信頼性評価値分布である。図 4.20(b) は画素ごとに高い方の位相評価値を選択して得られた位相信頼性評価値分布であり、この位相評価値分布を重み係数として合成して得られた高さ分布を図 4.20(a) に示す。図 4.20(a) の AA' ラインに沿ってとった断面データのグラフを図 4.21 に示す。図 4.21(a), (b) はそれぞれカメラ 1 とカメラ 2 から得られた断面形状、図 4.21(c) は重ねたときの断面形状、図 4.21(d) は合成した断面形状である。図 4.22 は図 4.21 に対応して断面形状を曲率半径に変換した値と位相信頼性評価値の図である。図 4.18、図 4.19 で見られる鏡面反

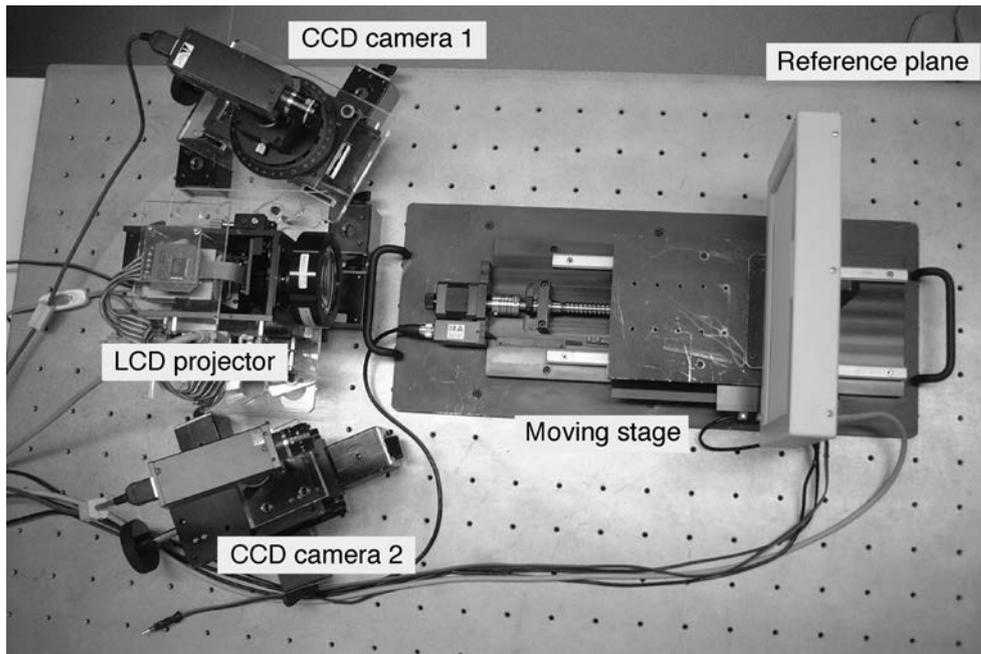


Figure 4.13 Experimental setup

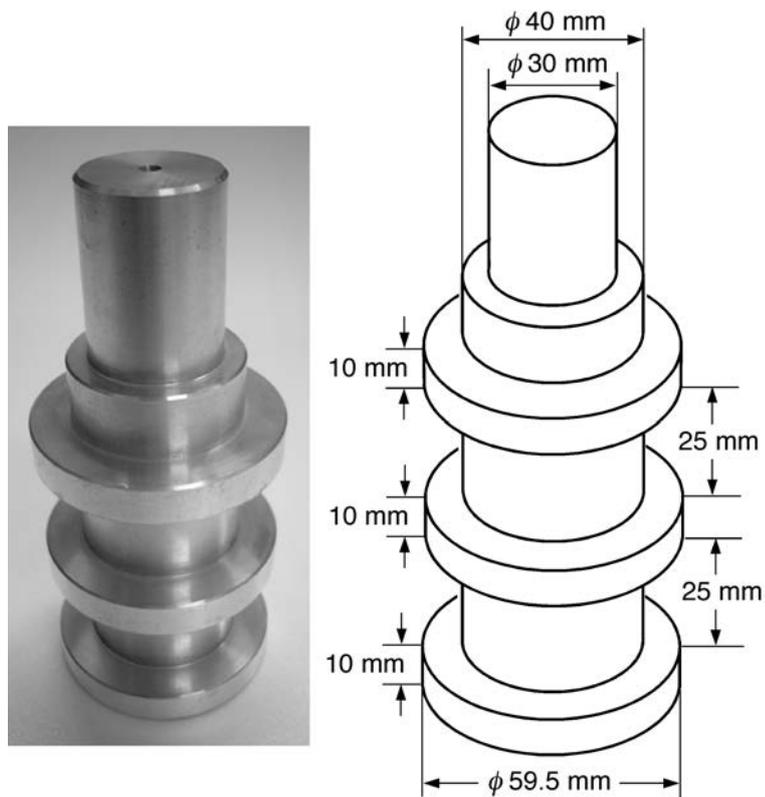


Figure 4.14 Cylindrical specimen

射や影の影響で計測されなかった部分が、図 4.20 においては見られない。鏡面反射する部分の近傍に誤差が大きく生じた場所では位相信頼性評価値が下がってくるのがわかる。このときの平均誤差と標準偏差はそれぞれ 0.015 mm と 0.038 mm であった。したがって、提案する位相信頼性評価値を用いた合成手法によって、鏡面反射の影響を取り除くことができたことがわかる。塗料を塗布することなく金属物体の形状を計測ことができ、本手法の有効性を確認することができた。

4.3.4 ディスク状の金属試料の形状計測

実験装置を図 4.23 に示す。実験では、CCD カメラ 1 および CCD カメラ 2 はともに焦点距離が 16 mm のレンズを付けた SONY 製の XCD-X700 を用いた。格子パターンを投影するための LCD プロジェクタは 2 台の CCD カメラの横に置かれている。2 台のカメラとプロジェクタから基準面までの距離はそれぞれ 830 mm と 630 mm であり、試料に対して、CCD カメラ 1 (上) は下向きに 16 度、CCD カメラ 2 (下) は上向きに 6.5 度傾いている。鏡面反射の生じる場所を変えるために異なる角度をつけた。この時の測定視野は約 200 mm×200 mm であり、キャリブレーション時の 2 枚の基準面間隔は 20 mm であった。

図 4.24(a) と図 4.24(b) はそれぞれカメラ 1 及びカメラ 2 によって撮影して得られた輝度データである。対象物は直径 175 mm の凹面をもつディスク状の金属試料である。鏡面反射が生じる場所が変わっていることがわかる。

図 4.25 に実験結果を示す。図 4.25(a) と図 4.25(b) はそれぞれカメラ 1 で計測し再サンプリングした後の高さ分布と位相信頼性評価値分布である。図 4.25(c) と図 4.25(d) はそれぞれカメラ 2 で計測し再サンプリングした後の高さ分布と位相信頼性評価値分布である。再サンプリング間隔は x, y ともに 0.375 mm である。また輝度変化が 10 以下のデータは黒くマスクし、合成時では用いないことにした。図 4.25(e) と図 4.25(f) は図 4.25(b) と図 4.25(d) に示すような位相信頼性評価値を重み係数として平均をとることにより形状合成した高さ分布と位相信頼性評価値分布である。全体の形状を得ることができた。また全体の測定データの信頼性も向上した。

今回の実験では、1 台のプロジェクタと複数台の CCD カメラで測定したが、もちろん、1 台の CCD カメラと複数台のプロジェクタでも可能である。この場合は 1 台のカメラで常の同じ視野を撮影しているため、再サンプリングの必要がない。

4.3.5 まとめ

本章では、金属部品計測における鏡面反射成分を避ける形状合成手法を提案した。実験では、異なる 2 方向から計測したデータに対して、位相信頼性評価値を用いて形状合成を行った結果、鏡面反射成分による影響を避けることができた。

格子を投影するプロジェクタと複数台のカメラの撮影するタイミングを同期させ、複数台のカメラを平行で制御できれば、同じ計測時間で物体の形状を計測することも可能である。

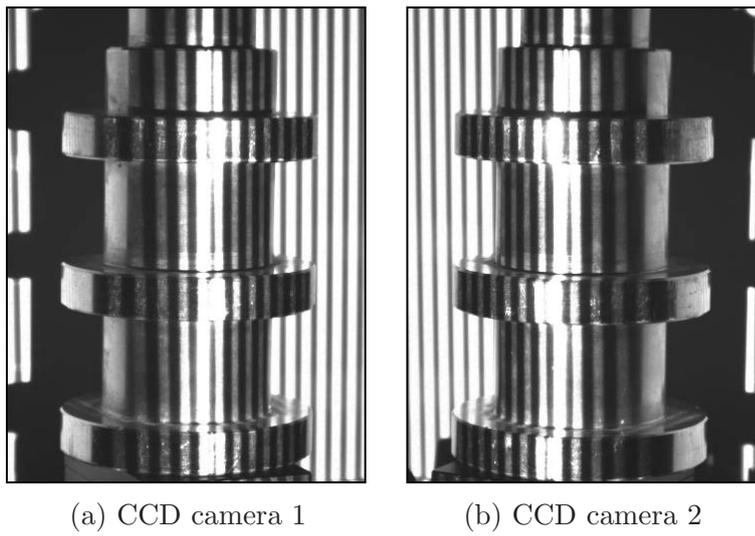


Figure 4.15 Projected grating images

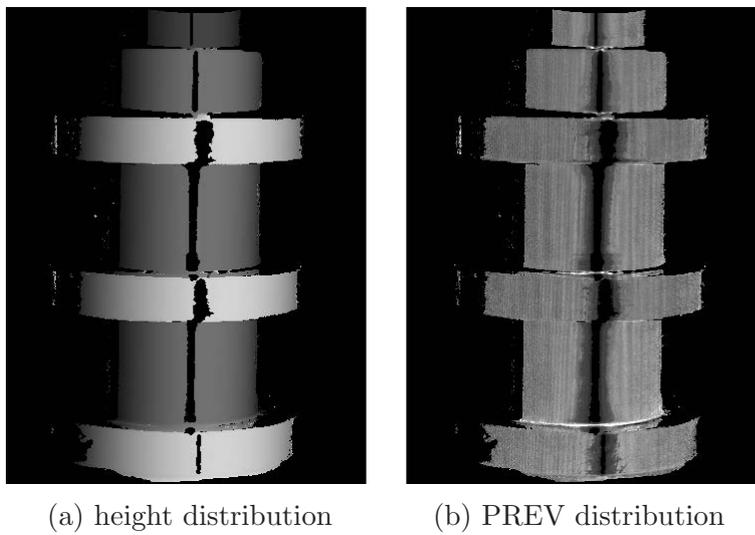


Figure 4.16 CCD camera 1 (before resampling)

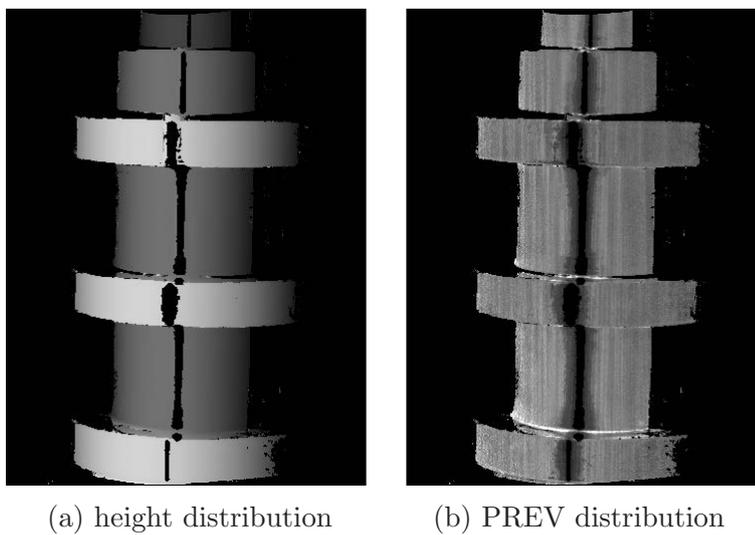


Figure 4.17 CCD camera 2 (before resampling)

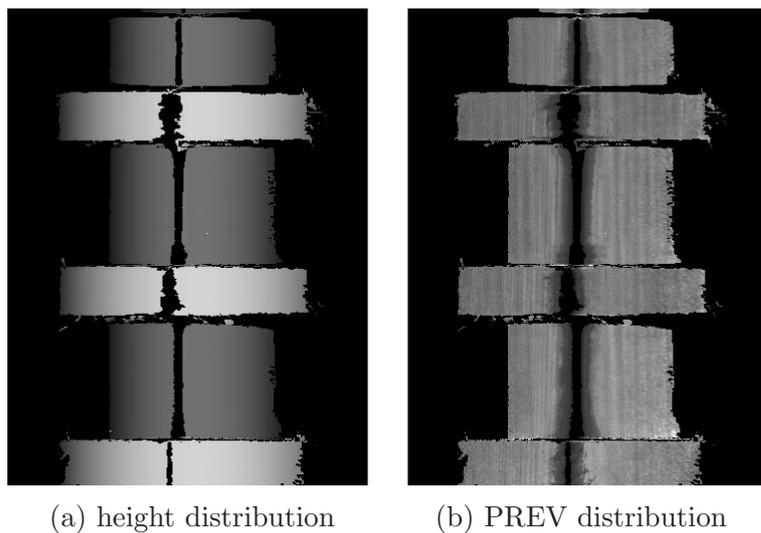


Figure 4.18 CCD camera 1 (after resampling)

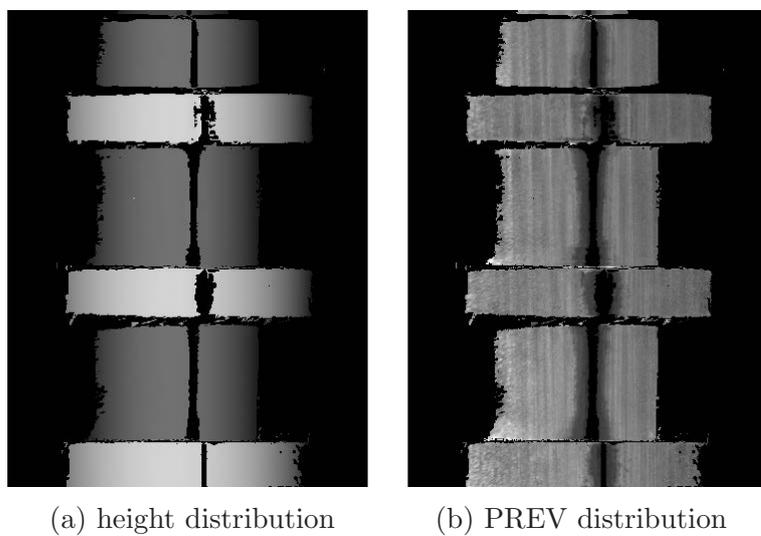


Figure 4.19 CCD camera 2 (after resampling)

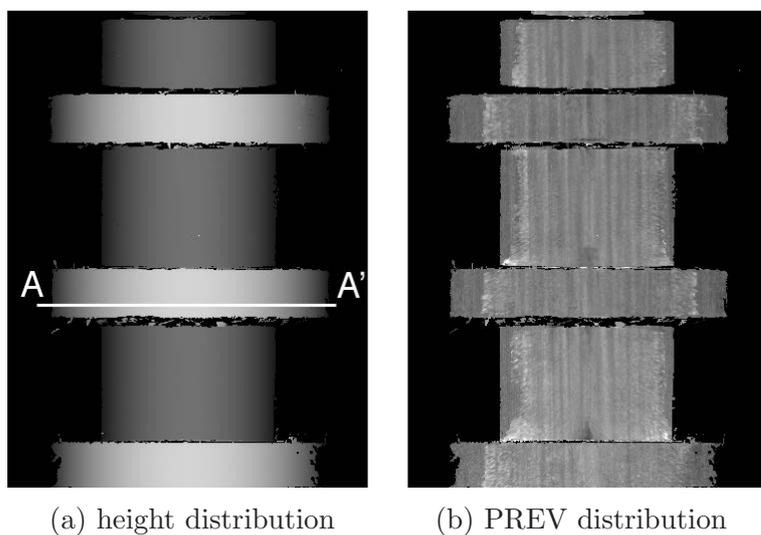


Figure 4.20 Final result by merge Fig. 4.18 and Fig. 4.19

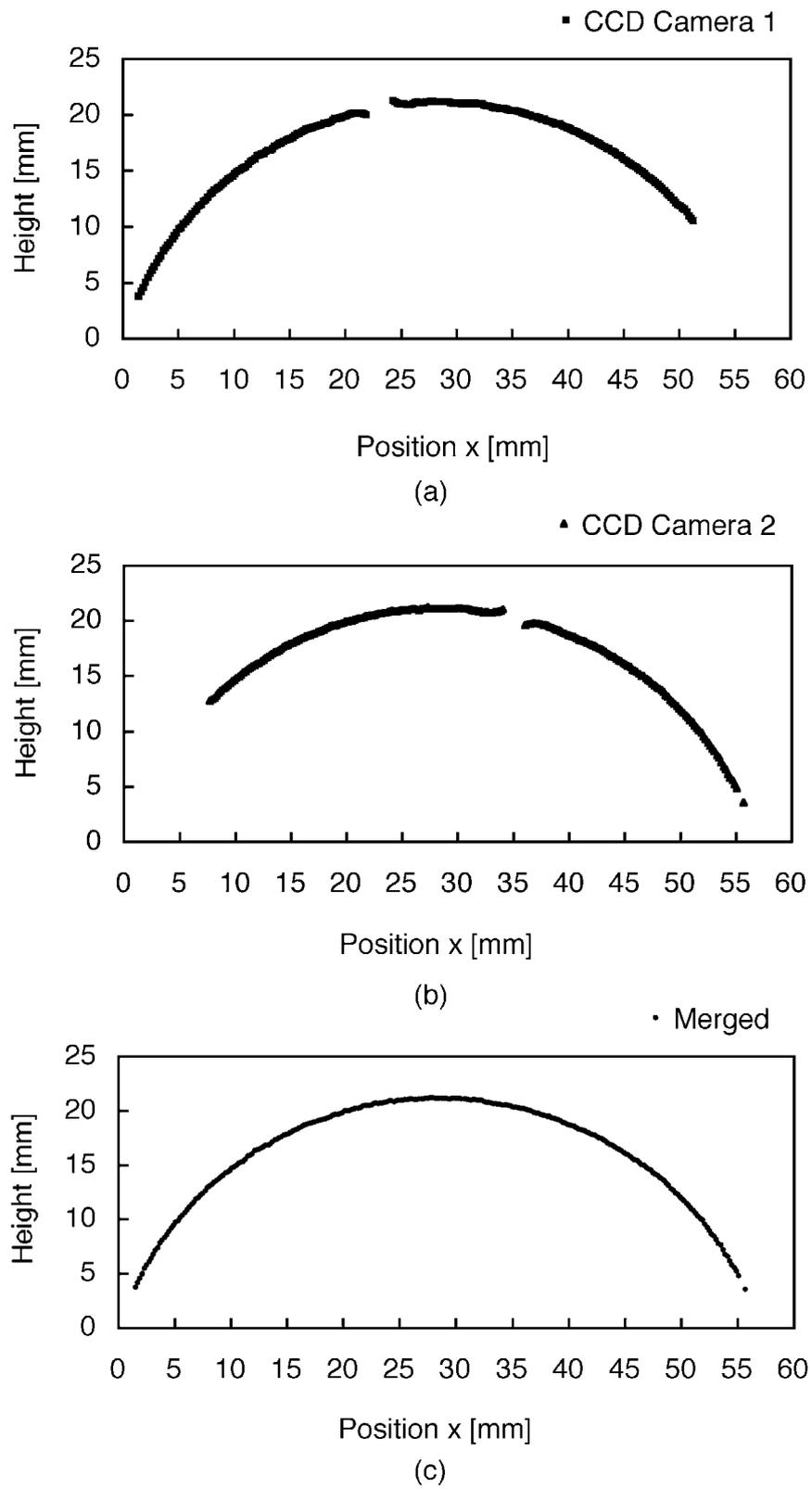


Figure 4.21 Cross-section

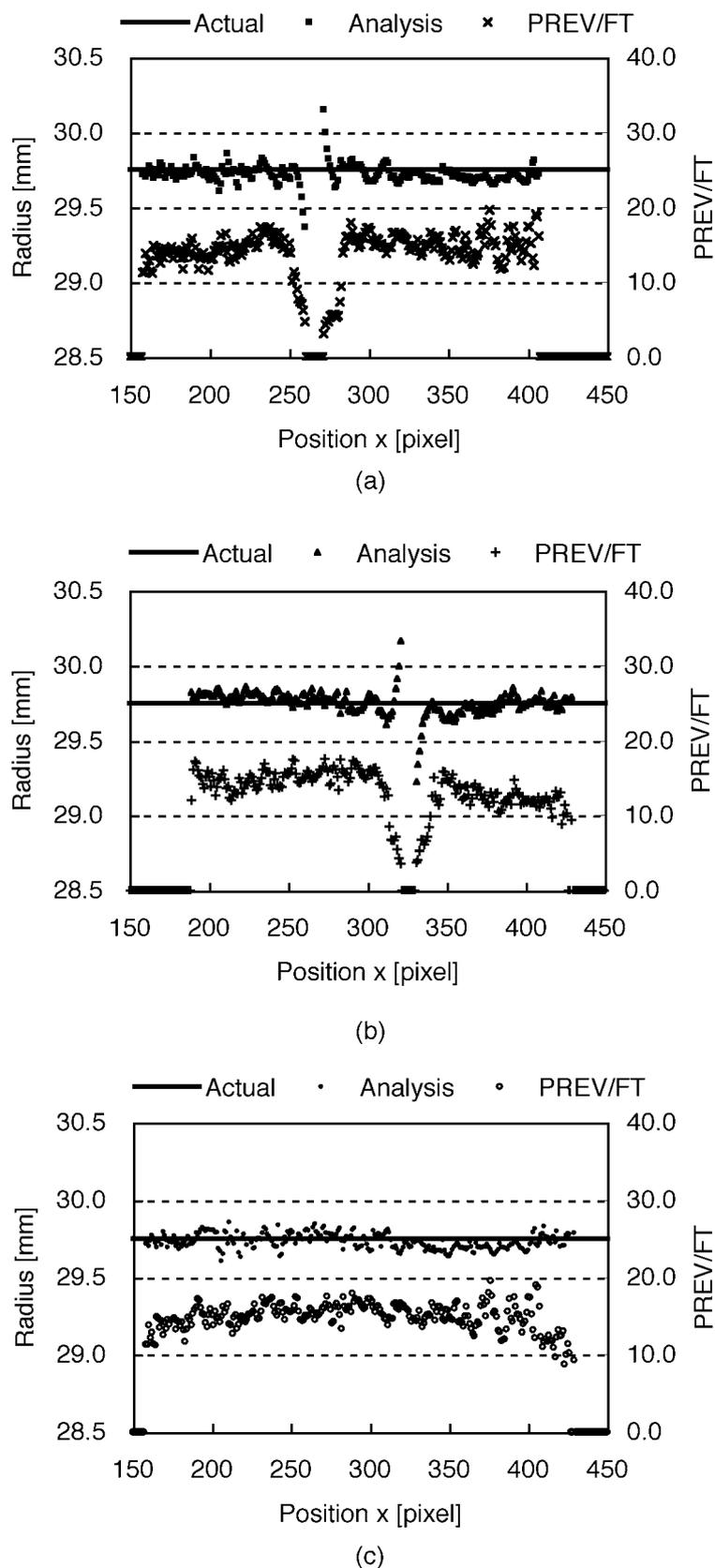


Figure 4.22 Radius value and PREV/FT along line AA': (a) CCD camera 1; (b) CCD camera 2; and (c) merged

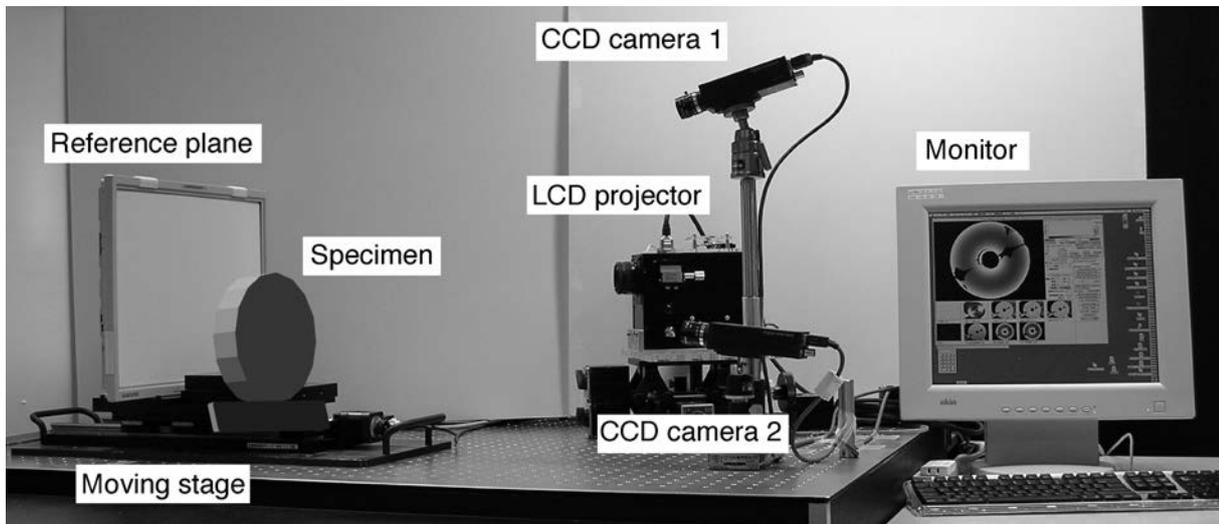


Figure 4.23 Experimental setup

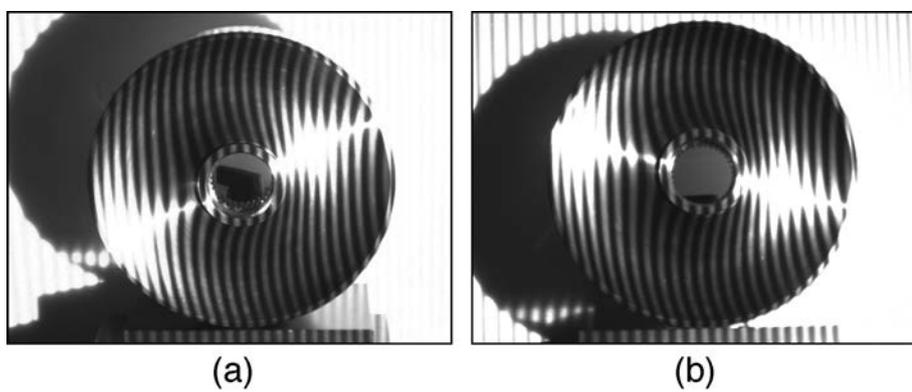


Figure 4.24 Projected grating images on the disc specimen: (a) CCD camera 1 and (b) CCD camera 2

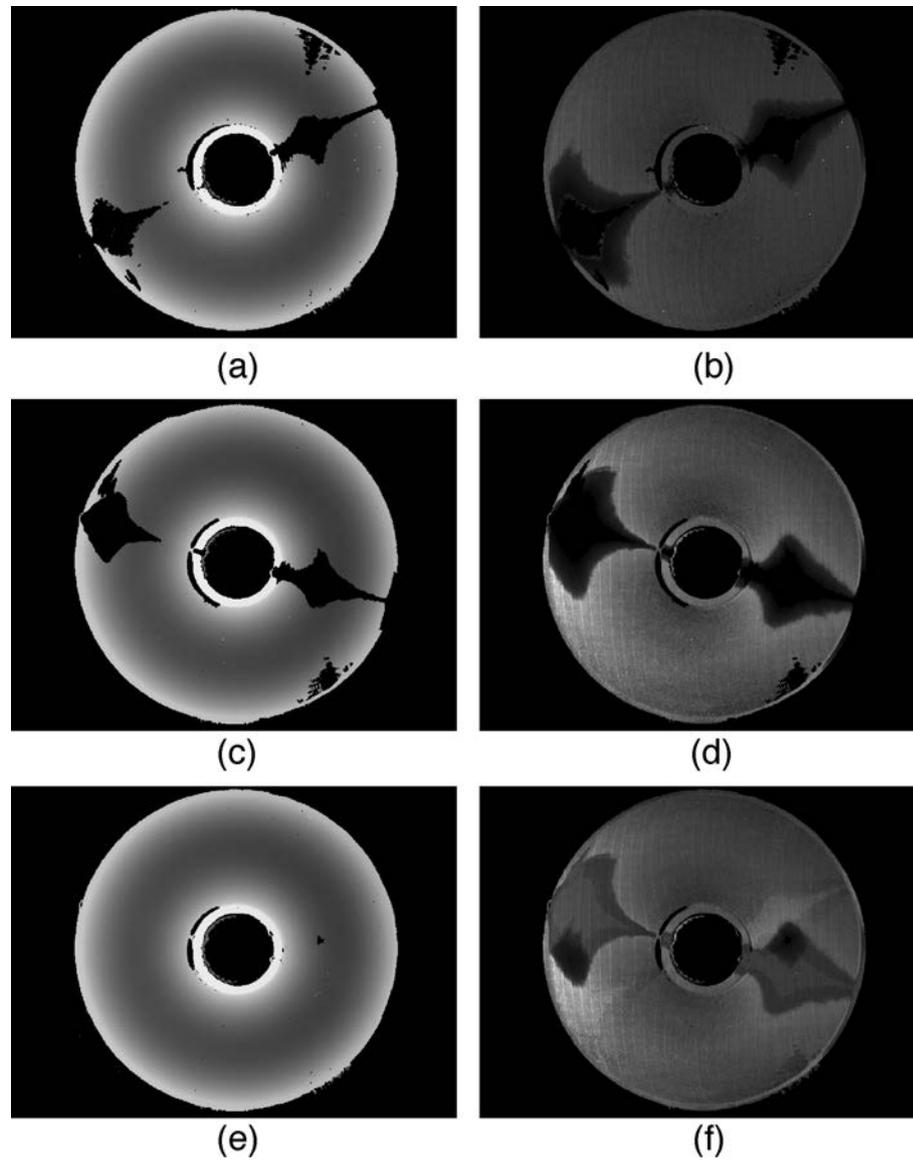


Figure 4.25 Experimental results: (a) height and (b) PREV/FT distributions obtained by CCD camera 1; (c) height and (d) PREV/FT distributions obtained by CCD camera 2; (e) height and (f) PREV/FT distributions obtained by the proposed method. Whole area of the specimen can be measured except minor shadow area

4.4 広輝度レンジの形状合成手法

4.4.1 はじめに

格子投影法では、格子の位相解析を行うことで精度よく形状計測ができる。物体上に格子を投影し、その格子パターンを CCD カメラで撮影さえできれば位相解析を行うことができる。しかし、物体の反射率と撮影するシャッター速度の設定によって、露光量が変わり、きちんと投影した格子を CCD カメラで撮影できない場合がある。CCD カメラのシャッター速度やレンズの絞りの設定によって、明るすぎる場合はカメラの撮影できる輝度範囲を超えてしまう。また計測物体に投影した格子パターンの輝度変化が極端に小さくなると、元の画像と格子をシフトした画像の違いを区別できなくなり、精度よく位相解析できず、形状を計測することができない。このように実際に計測する際に、一回の計測だけでは、様々な反射率のある物体において反射率の低い部分と高い部分を同時に計測することは難しい。

そこで、撮影する CCD カメラの露光時間（シャッター速度）を変えることで、反射率の低い部分において明るめに撮影し、反射率の高い部分において暗めに撮影する。輝度の異なる複数の計測結果に対して、位相信頼性評価値を用いて精度よく計測できたデータのみを画素ごとに合成する計測手法を提案する。

4.4.2 広輝度レンジの形状合成手法の原理

異なる輝度レベルの画像を得るためには、撮影するカメラの絞りを変える。投影するプロジェクタの光の明るさを変える。カメラのシャッター速度を変えるとといった方法が考えられる。カメラの絞りを変えると、被写界深度が変わるため、計測するとき誤差が生じる。プロジェクタの明るさを変えることは容易ではない。一方、カメラのシャッター速度をコントロールすることは安定かつ容易であるため、本研究では、異なる輝度レベルの画像を得るために、カメラのシャッター速度を変えることにする。本研究で用いる SONY 製の XCD-X700 シリーズの CCD カメラでは、1/100,000 秒～2 秒のシャッター速度を変えることができる。

異なる数種類のシャッター速度 n ($n = 1, 2, \dots$) について、振幅とバイアスをそれぞれ a_n, b_n とすると、CCD カメラによって撮影される輝度は以下に示す式で表される。

$$I_n(x, y) = a_n(x, y) \cos[\phi(x, y) + \alpha] + b_n(x, y) \quad (4.2)$$

撮影されたそれぞれの輝度データから、画素ごとに空間座標を計算するとともに、第3章で述べた位相信頼性評価値を計算し、 n 個の計測結果に対して、位相信頼性評価値を用いて合成を行う。

4.4.3 実験

反射率の違いが大きい物体を計測する場合、明るい部分と暗い部分を同時に計測することが難しい。そこで、カメラのシャッター速度を2種類に変えて計測し、得られた計測結果を位相信頼性評価値より合成する。

図 4.26(a) と図 4.26(b) はそれぞれカメラのシャッター速度を 1/15 秒と 1/2 秒に変えた場合に撮影された物体の明るさ画像である。試料サイズは 65 mm×38 mm である。図 4.26(c) と図 4.26(d) はそれぞれカメラのシャッター速度を 1/15 秒と 1/2 秒に変えた場合に撮影された投影格子画像である。シャッター速度が 1/15 秒で撮影した場合、左の明るい部分において投影した格子のコントラストがよい。一方、シャッター速度が 1/2 秒で撮影した場合、右の暗い部分において投影した格子のコントラストがよい。

本手法による実験結果を図 4.27 に示す。図 4.27(a) と図 4.27(b) はそれぞれシャッター速度 1/15 秒で計測し、得られた高さ分布と位相信頼性評価値分布である。図 4.27(c) と図 4.27(d) はそれぞれシャッター速度 1/2 秒で計測し、得られた高さ分布と位相信頼性評価値分布である。図 4.27(e) と図 4.27(f) はそれぞれ合成した高さ分布と位相信頼性評価値分布である。図 4.27(a) に示すように、右の暗い部分において計測できていない部分が生じている。一方、図 4.27(c) に示すように、左の明るい部分において計測できていない部分が生じている。しかし図 4.27(e) に示すように、合成することで、明るい部分と暗い部分両方の高さ分布を得ることができる。実験結果から、本手法は有効であるといえる。

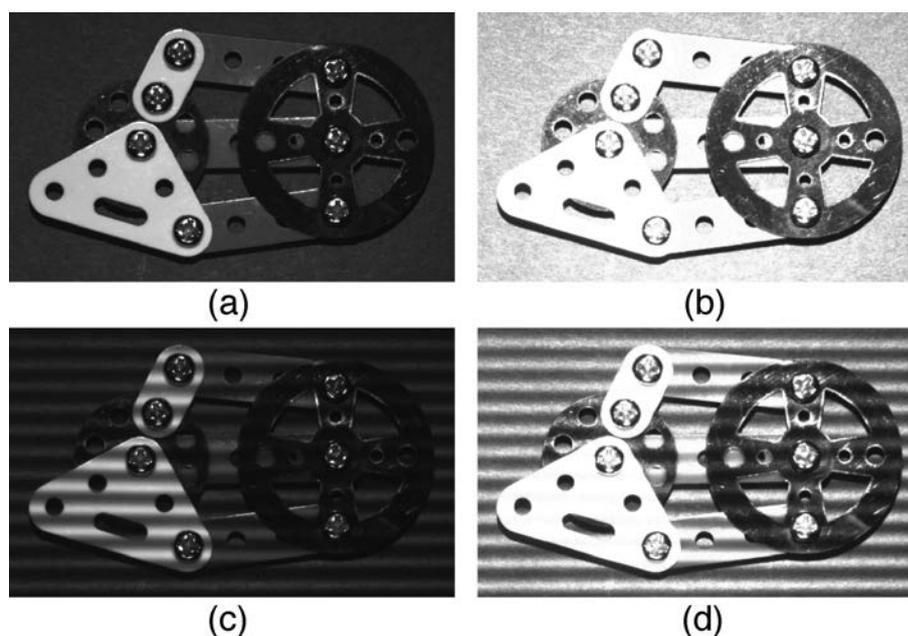


Figure 4.26 Images captured at shutter speed (a) 1/15 seconds and (b) 1/2 seconds; projected grating images captured at shutter speed (c) 1/15 seconds and (d) 1/2 seconds

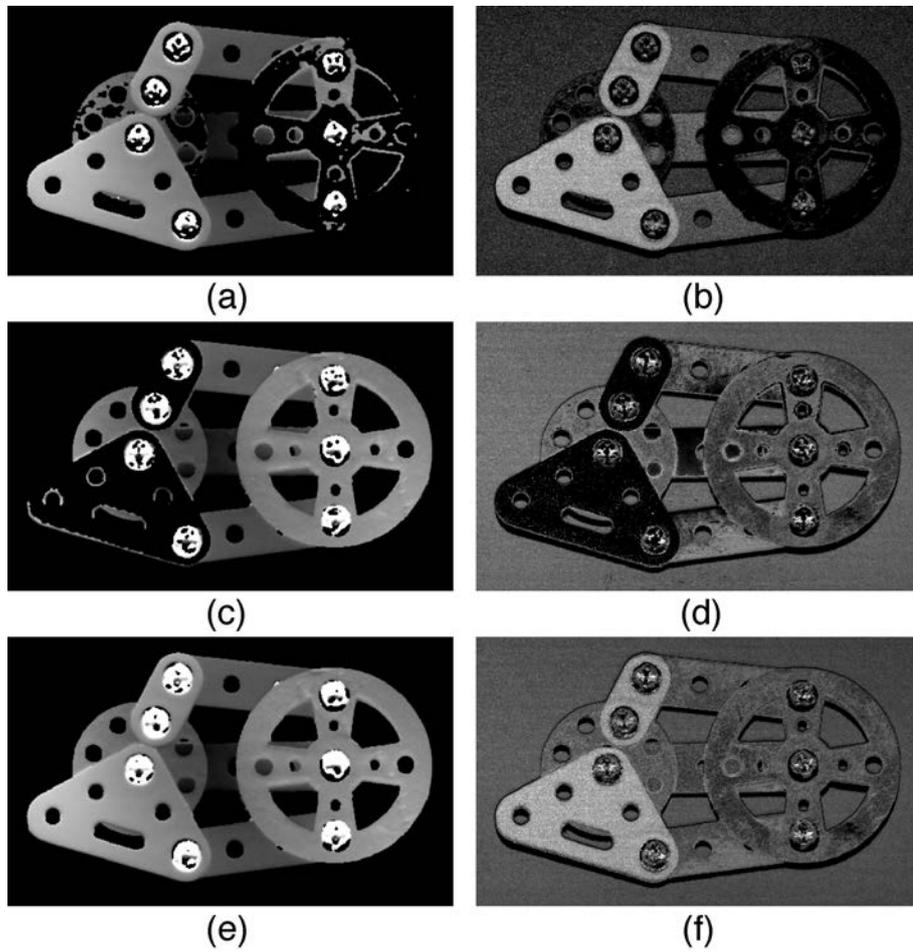


Figure 4.27 Experimental results: (a) height and (b) PREV/FT distributions obtained at shutter speed 1/15 seconds; (c) height and (d) PREV/FT distributions obtained at shutter speed 1/2 seconds; (e) height and (f) PREV/FT distributions obtained by the proposed method. Whole area of the specimen can be measured

本手法では、シャッター速度を変えて、異なる輝度レベルの画像を撮影するため、撮影回数に比例して計測時間も増えるという問題点が必然と生じる。この問題点の解決策として、図 4.28 に示すように三板式カメラを利用することで解決できる。三板式カメラでは物体から入ってくる光は、ダイクロイックプリズムによってそれぞれ RGB 成分用イメージセンサに記録される。そこで、RGB 成分用イメージセンサの前にそれぞれ透過率の異なる 3 種類のフィルターを置くことで、異なる 3 種類の明るさの画像が同時に得られる。こうすることで、多重露光することなく、一回の撮影で異なる 3 種類の明るさの画像を得ることができ、従来と同じ計測時間で計測することができると考えられる。得られる 3 種類の計測結果から、位相信頼性評価値を用いて合成することで、計測することが困難であった明るい場所と暗い場所を同時に計測することができる。しかし、この手法では専用のカメラを必要とし、通過率は調整できない。

本研究では、第 5 章で述べる DMD カメラを用いて、画素ごとに最適な露光時間を調整させることで、この問題を解決することができる。その原理や実験結果について第 6 章の 4 節で詳しく述べる。

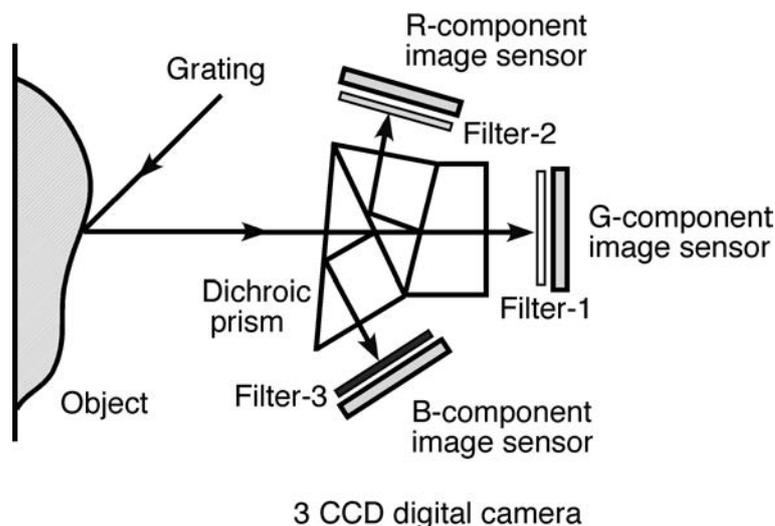


Figure 4.28 Image capture by using a 3CCD camera

4.4.4 まとめ

カメラのシャッター速度を変えることで、撮影輝度を数段階に変化させて数回の計測を行い、それぞれの計測結果のうちで精度よく計測できた部分を合成する手法を開発した。実験では、撮影するカメラのシャッター速度を変えることにより、撮影輝度を 2 段階に変化させて 2 回計測を行い、それぞれの計測結果のうちで精度よく計測できた部分を合成した。こうすることによって、反射輝度が低い部分と高い部分の両方を精度よく計測することができるようになった。

4.5 全周囲の形状合成手法

4.5.1 はじめに

格子投影法では、計測物体に投影した格子パターンをカメラで撮影し、得られた画像から位相解析して形状を計算するため、一般に物体の側面と背面が死角になり、全周の形状を計測することができない。計測する物体を回転させていくつかの方向から計測した結果を合成することによって、物体の全周の形状計測が可能になる。本節では、第3章で述べた位相信頼性評価値による合成手法を全周の形状計測に適用する。

これまでに多くの全周計測手法が提案されている。受動的計測手法の一つである視体積交差法 [90,91] は、複数の視点から物体を撮影し、それぞれの視体積の共通部分（視覚包: Visual Hull）を物体の三次元形状とする手法である。物体の概形が高速に得られるため、視体積交差法は実時間での三次元形状計測に適している。また、物体の輪郭情報のみを用いて形状を計測するため、物体の輪郭情報が正しく得られれば、求められるモデルは照明などの変化に対して頑健である。一方で、物体の計測精度を向上するには多くの画像を必要とするため、カメラの台数や撮影回数が増えてシステムが複雑化する。この問題を解決するため、平面鏡の反射を利用した手法 [92] が提案されているが、カメラ配置を最適化しても、視体積交差法は理論的に物体の凸閉包しか得られないため、物体表面に存在する窪みなどの形状を再現できないという問題点がある。

任意の形状の物体に適用可能でどのような特徴量も必要としない手法に、Besl [93] らの提案した ICP (Iterative Closest Point) アルゴリズムがある。これは、2つのデータ間において一方のデータ内の各点を他方のデータ内でユークリッド距離の最も近い点（最近点）への仮の対応付けを行い、この操作を繰り返すことによって変換パラメータを求める手法である。一方のデータが他方にすべて含まれる場合には頑強である。しかし、異なる視点から計測されたデータ間において隠蔽などによってそのような仮定が成立しないことが多いため、ICP アルゴリズムをもとのまま利用することができない。また、与える初期値が真値から大きく外れている場合には、局部解に陥って正確な剛体変換を求められない可能性がある。

能動型の手法では、回転ステージ上に置かれる計測物体を回転させて、計測する方向を変えながら異なる角度から計測を行い、複数枚の形状データを得ることができる [94]。これらの形状データはそれぞれ死角の位置が異なることから、それぞれの形状データの有効領域を抽出し、互いに貼り合わせることによって、死角を減らすことと後側の形状を計測することができる。しかし、有効領域の判断が難しいという問題点があり、画素ごとに合成することはできない。物体の周りに複数のカメラとプロジェクタから格子を投影して全周形状を求める手法も提案されている [95]。しかし、得られる各方向の計測データはレンズ収差の影響によってゆがんだ形になっているために、合成することは容易ではないといった問題点が挙げられる。

本研究で用いる形状計測手法では、基準面を用いてカメラとプロジェクタのすべての視線を求めており、レンズ収差による影響を受けないため、合成するには有利な手法である。また合成す

る際に、同じ位置に対して複数の計測データが存在する場合、提案した位相信頼性評価値を用いることで容易に画素ごとに合成することができ、精度の良い全周の形状計測が可能になる。以下に合成手法の原理を述べ、その実験結果を示す。

4.5.2 全周形状計測法の原理

本研究では、図 4.29 に示す光学系を用いて、回転ステージの上に置かれる計測物体を回転させて、異なる角度の計測データを用いて、一つのグローバル座標系に合成するという手法を用いる。合成する手順を以下に示す。

1. 計測物体を回転させて、異なる角度の計測データを得る。
2. 回転ステージの回転軸を求める。
3. 求めた回転軸をもとに、各角度の計測データに対して同じ方向になるように座標変換（回転軸まわりの回転）を行う。
4. 合成しやすいように、直交座標系を円筒座標系に変換する。
5. 多方向のそれぞれの円筒座標系データに対して、高さと位相信頼性評価値データを等間隔に再サンプリングする。
6. 再サンプリング後のデータに対して、位相信頼性評価値を重み係数として合成する。

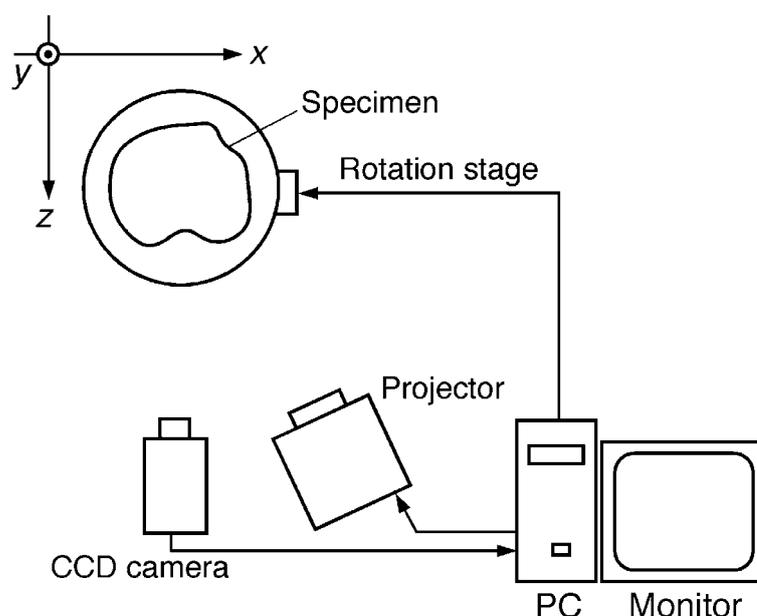


Figure 4.29 360-deg shape measurement system

回転軸を求める

一般に、回転軸の座標を直接得ることはできないため、ここでは平面を用いて間接的に回転軸を求めるアルゴリズムを用いる [94].

まず、回転ステージ上に置かれた平板の表面を平面 A_1 とする。平面 A_1 を異なる2つの角度だけ回転した平面をそれぞれ A_2 および A_3 とすると、 A_1 と A_2 の2面から等距離にある中間の面 B_{12} および A_1 と A_3 の2面から等距離にある中間の面 B_{13} は求まる。平面の式は式 (4.3) によって表すことができる。式 (4.3) において、係数 a_i, b_i, c_i は計測点を用いて最小二乗法より求めることができる。計算方法については付録 A.5 に示す。実際の実験では、平板を計測し、約10万～30万点の計測点を用いて A_1, A_2, A_3 の平面の式を求めている。

$$z_i = a_i x + b_i y + d_i \quad (i = 1, 2, 3) \quad (4.3)$$

回転ステージの回転軸は平面 B_{12} と B_{13} の交線として求められる。求めた回転軸（直線）の式は式 (4.4) に示すようになる。

$$\frac{x - x_0}{x'} = \frac{y - y_0}{y'} = \frac{z - z_0}{z'} \quad (4.4)$$

ここで、 x_0, y_0, z_0 は原点からの距離を表し、 x', y', z' はそれぞれの軸の方向ベクトルを表す。

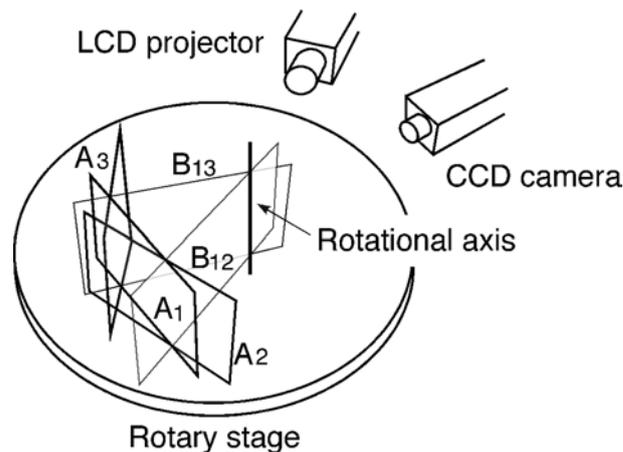


Figure 4.30 Scheme of calculating rotational axis

回転軸まわりの回転

図 4.31 に空間内の点の回転軸まわりの回転の模式図を示す。回転を行う前に、まず点 $O'(x_0, y_0, z_0)$ が原点 O にくるように平行移動した後、回転軸まわりに回転した角度の回転を行う。原点を通る任意軸まわりの回転を表す行列は、回転軸の方向ベクトルを (x', y', z') (ただし、 $x'^2 + y'^2 + z'^2 = 1$) とすると、式 (4.5) のようになる。

$$\mathbf{R} = R_{x(\beta)} R_{z(\alpha)} R_{y(\theta)} R_{z(\alpha)}^{-1} R_{x(\beta)}^{-1} \quad (4.5)$$

ここで、 $R_{z(\alpha)}$ と $R_{x(\beta)}$ はそれぞれ z 軸と x 軸まわりの角度 α と角度 β の回転を表す行列である。 α と β は回転後に回転軸の方向ベクトルの z 成分と x 成分がそれぞれ 0 となるような角度である。

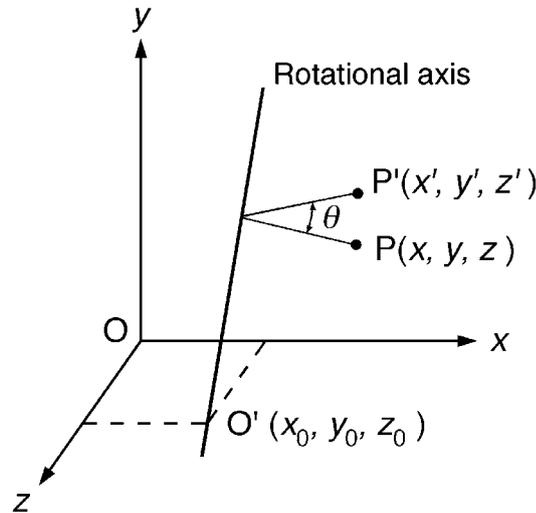


Figure 4.31 Rotation around arbitrary axis

座標変換

求めた回転軸の式をもとに、各方向から得られる計測データに対して、同じ方向になるように座標変換を行う。式 (4.6) より、 n 枚の測定データ $P_n(x_n, y_n, z_n)$ は一つのグローバル座標系 $P_w(x_w, y_w, z_w)$ に変換される。

$$P_w = \mathbf{R} (P_n - \mathbf{T}) \quad (4.6)$$

ここでの \mathbf{R} と \mathbf{T} は以下の通りである。

$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} c + tx'^2 & tx'y' + sz' & tx'z' - sy' \\ cx'y' - sz' & c + ty'^2 & ty'z' + sx' \\ tx'z' + sy' & ty'z' - sx' & c + tz'^2 \end{pmatrix} \quad (4.7)$$

$$\mathbf{T} = \begin{pmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{pmatrix} \quad (4.8)$$

ここで、 T は回転軸の位置が原点になるような平行移動行列であり、 R は回転軸まわりの回転行列、 $c = \cos \theta$, $s = \sin \theta$, $t = 1 - \cos \theta$ である。

直交座標系から円筒座標系への変換

全周計測において、貼り合わせる前のデータは、各方向の計測データはほぼ x 座標に対して等ピッチに並んでいるが、貼り合わせ後は y 軸回りに回転されているために、不等ピッチになってしまう。このままでは測定データを一価の関数で表現できないため、輪郭データを直交座標系から円筒座標系に変換する。なお、ここで述べる円筒座標系とは、1 ラインのデータを回転角度 (θ) と中心からの距離 (r) で表現したものである。

座標変換を行った計測データに対して、式 (4.9) を用いて直交座標系 (x, y, z) から円筒座標系 (θ, Y, r) に変換することができる。回転角度 θ を等間隔に再サンプリングすれば、図 4.32 に示すような 2 次元格子データとなり、容易に合成することができる。また式 (4.10) を用いれば、円筒座標系 (θ, Y, r) から直交座標系 (x, y, z) に変換することができる。

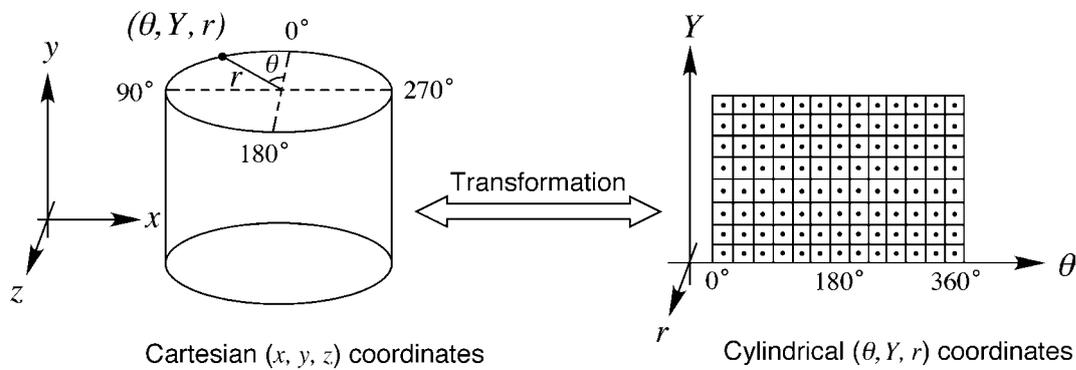


Figure 4.32 Cartesian coordinates and cylindrical coordinates

$$\begin{aligned} \theta &= \tan^{-1}\left(\frac{x}{z}\right) \frac{180}{\pi} + 180 \\ Y &= y \end{aligned} \quad (4.9)$$

$$r = \sqrt{x^2 + z^2}$$

$$\begin{aligned} x &= -r \cos\left(\frac{\theta\pi}{180}\right) \\ y &= Y \\ z &= r \sin\left(\frac{\theta\pi}{180}\right) \end{aligned} \quad (4.10)$$

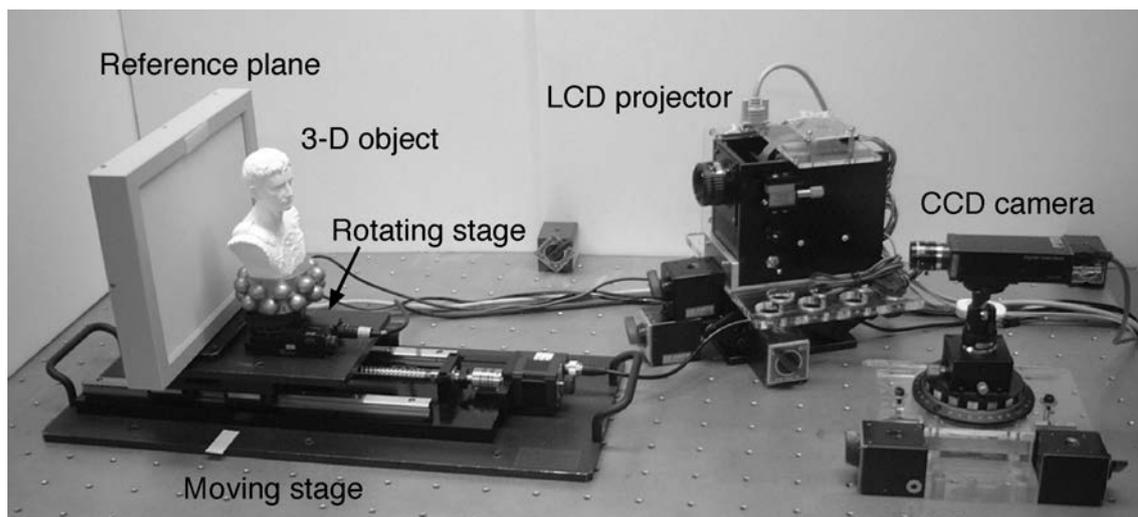


Figure 4.33 Experimental setup

三次元計測データの合成

多方向のそれぞれの計測データに対して、4.2.3節で述べた方法を用いて、円柱座標系の高さと位相信頼性評価値を等間隔に再サンプリングする。再サンプリングを行った後のデータに対して、位相信頼性評価値を重み係数として合成する。

4.5.3 全周形状計測の実験

全周計測を行う実験装置を図 4.33 に示す。格子パターンを投影するための LCD プロジェクタと画像を撮影するための CCD カメラ (SONY 製, XCD-X700) を用いる。精度よく平行移動できるように $0.1 \mu\text{m}$ の精度で位置決めができる 1 軸の移動ステージ上に基準板を設置する。計測物体を回転させるために、回転分解能が 0.01 度の回転ステージ (シグマ (株) 製, MINI-60 θz) を用いる。

実験条件は次の通りである。2 枚の基準面間隔は 60 mm であり、カメラとプロジェクタから基準面までの距離はそれぞれ 720 mm と 540 mm である。カメラとプロジェクタのなす角度は約 30 度である。計測範囲は約 $220 \times 165 \text{ mm}$ である。図 4.34 に示す石膏肖像および図 4.39 に示す試料の計測を行う。計測データは θ 方向に 0.6 度ずつ、 Y 方向に 0.25 mm 間隔で再サンプリングを行う。

4.5.4 結果および考察

本手法による計測例として、図 4.34 に示す計測物体を回転ステージ上に設置し、反時計まわりに 60 度ずつ回転させて計 6 方向から計測を行った。



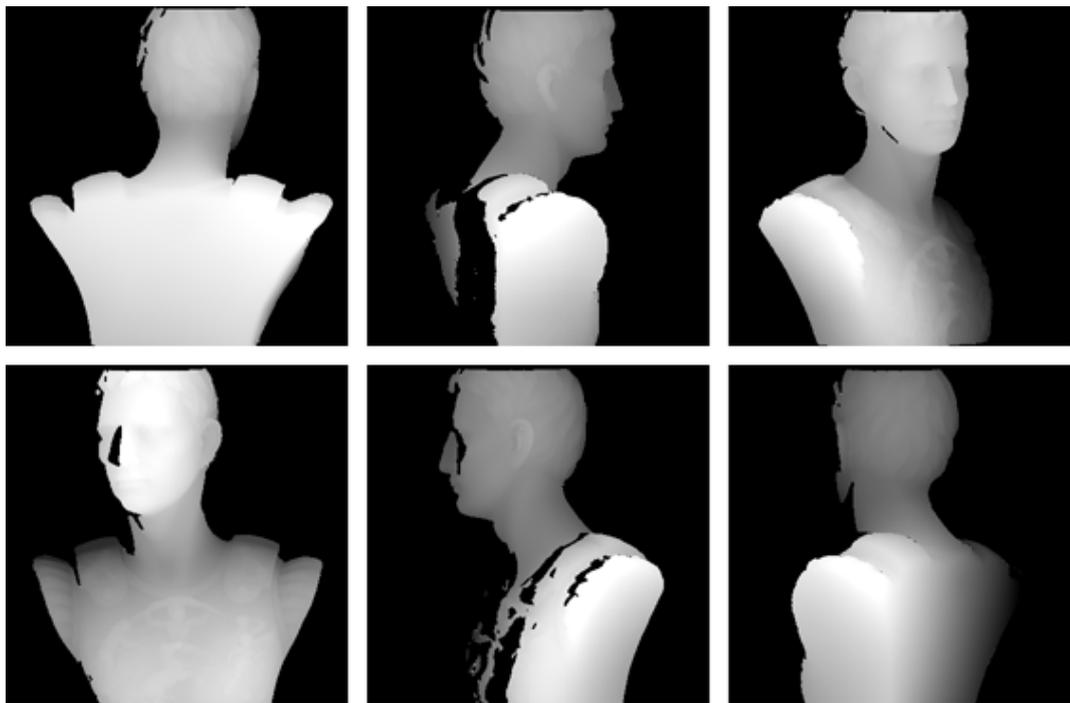
Figure 4.34 Specimen: a plaster figure [110 mm (W)×65 mm (D)×135 mm (H)]

図 4.35 に 60 度ずつ回転しながら 6 方向からそれぞれ計測した結果を示す。図 4.35(a) は計測された物体の高さ分布であり、図 4.35(b) は位相信頼性評価値分布である。図 4.36 は図 4.35 に対して、再サンプリングした高さ分布（円筒座標系）である。図 4.37 は、図 4.36 に示す 6 方向の計測データを合成した結果を示す。図 4.37(a) は合成後の高さ分布（円筒座標系）であり、図 4.37(b) は合成後の位相信頼性評価値分布である。図 4.38 は合成後に最終的に得られた形状を三次元表示したものである。位相信頼性評価値を用いることで、精度よく全周の形状を計測することができた。

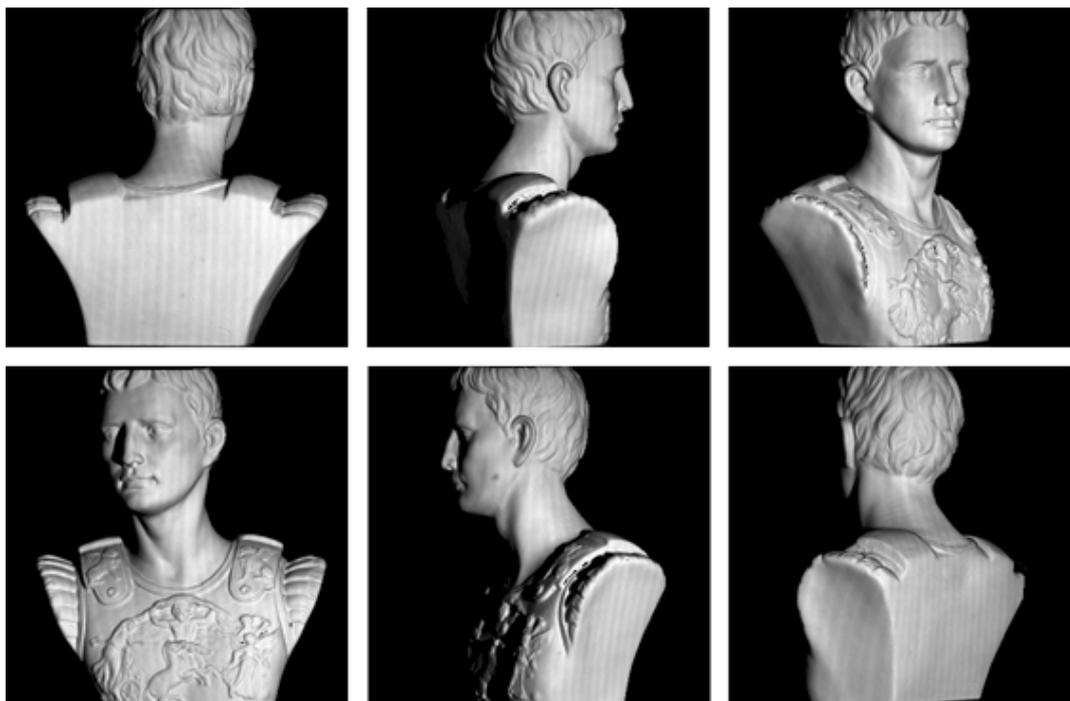
精度を確認するために、図 4.39 に示すような円筒試料の計測を行った。合成した中央横 1 ラインの断面データを図 4.40 に示す。図 4.40 の断面データに対して曲率半径で求めた断面グラフを図 4.41 に示す。その結果、平均誤差は 0.032 mm、標準偏差は 0.023 mm であった。計測誤差の大きな原因としては、回転ステージの回転精度の影響が大きい。より高精度な形状計測を行うためには、軸ぶれや偏心の少ない回転ステージを用いることが望ましい。

4.5.5 まとめ

位相評価値を用いた高精度全周形状計測法を提案した。計測物体を回転させて計測し、得られた多方向の計測データを位相評価値より合成する。本手法の利点は計測にはレンズ収差による影響を受けないために、合成しやすいという点である。また、位相信頼性評価値を用いることで、精度よく画素ごとに合成できる。計測例として石膏肖像を計測し、全周での形状計測を行うことができた。円柱試料の計測では、平均誤差は 0.032 mm、標準偏差は 0.023 mm の結果が得られた。今後、更なる精度の向上やシステムの自動化が課題である。



(a) height distributions



(b) PREV distributions

Figure 4.35 Experimental results from six different directions

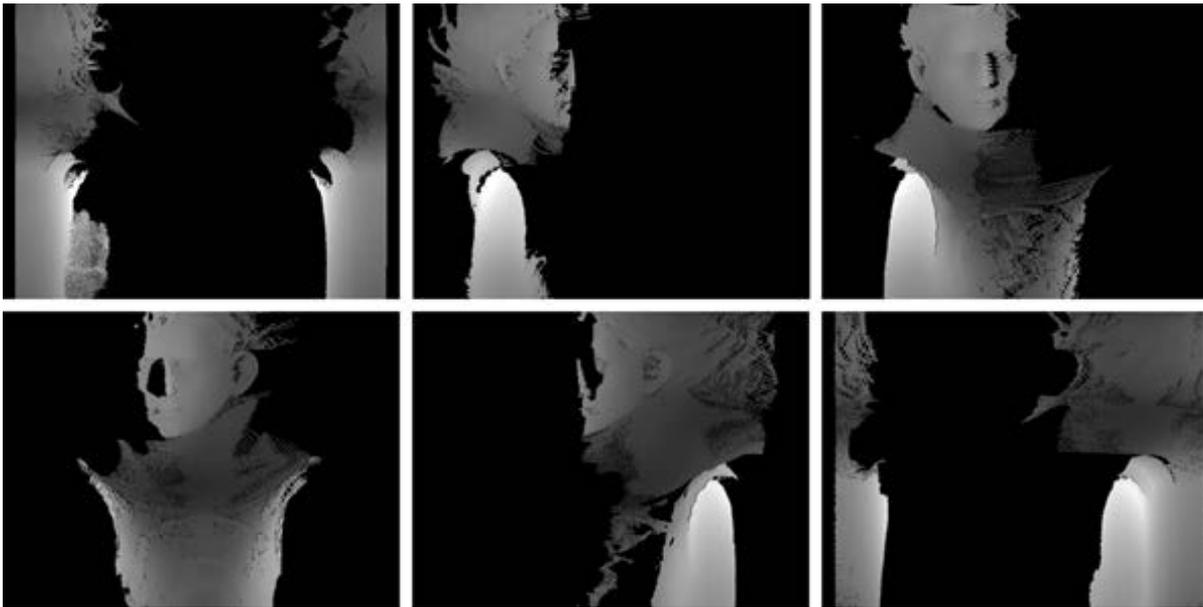


Figure 4.36 Re-sampled partial point-clouds from six directions (r -component distribution)

4.6 本章のまとめ

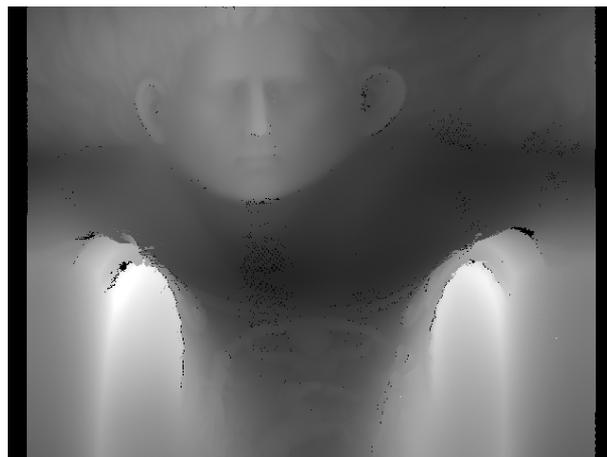
本章では格子投影法による高精度形状計測法を実用化するうえでの問題を解決するために、条件を変えて計測して得られた複数枚のデータを合成する手法をいくつか提案した。さらに実験によりそれぞれの形状合成手法の有効性について検討した。特に位相信頼性評価値を用いることで、合成を行う際に同じ位置に対して複数の計測データが存在する場合に、各画素ごとに信頼性の高い測定データを採用することができる。計測条件が悪く、誤差が生じやすい部分の計測データを採用せず、精度よく計測できた点のみを用いて合成することができる。

以下に各節で得られた結果をまとめる。

第2節「広ダイナミックレンジの高精度形状計測法」では、奥行きが深い三次元計測物体を平行移動させて計測し、常にフォーカスが合っている2枚の基準面内のデータのみを用いて、複数の位置での計測結果を合成する手法を開発した。この手法によって、広ダイナミックレンジで高精度に三次元物体の形状を計測することができた。

第3節「金属部品計測における鏡面反射の影響を避ける形状計測法」では、複数台のカメラを異なる角度から計測したデータを合成することで金属のような鏡面反射が起こる物体も計測することができた。

第4節「異なる輝度レベルで得られた結果を合成する形状計測法」では、カメラのシャッター速度を変えることで、撮影輝度を数段階に変化させて数回の計測を行い、それぞれの計測結果のうちで精度よく計測できた部分を合成する手法を開発した。反射率が低い部分と高い部分の両方を精度よく計測することができた。



(a) height distribution



(b) PREV distribution

Figure 4.37 Final result after merged partial point-clouds from six directions

第5節「高精度全周形状計測法」では、得られた複数枚の多方向のデータを合成する全周形状計測法を開発した。この手法によって、従来1方向だけでは、影となる部分や裏側の部分を計測することができた。直径60.04 mmの円柱試料を計測したところ、平均誤差は0.032 mm、標準偏差は0.023 mmの結果が得られた。

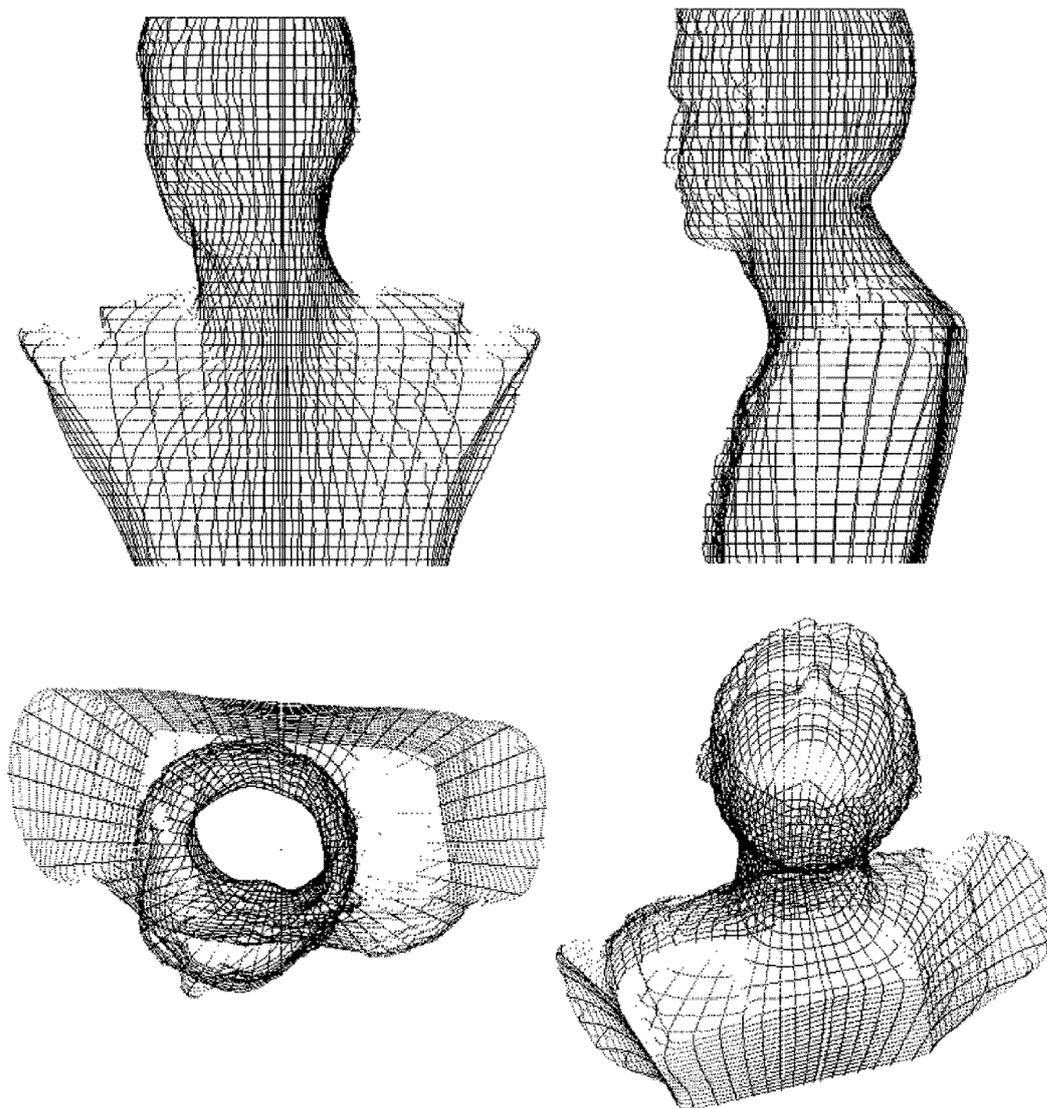


Figure 4.38 Several views of 360-deg shape of plaster figure

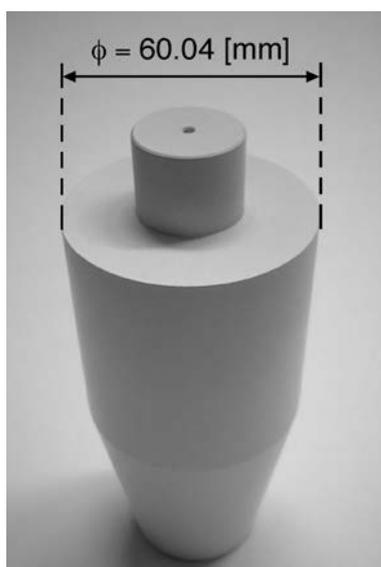


Figure 4.39 Cylindrical specimen

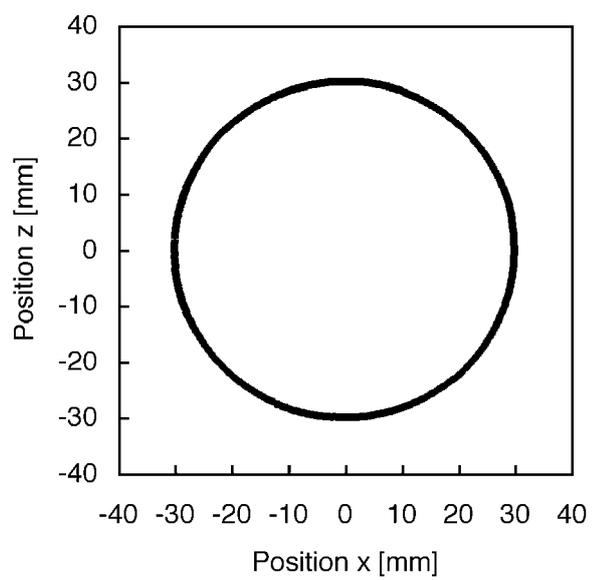


Figure 4.40 Cross-section after merged

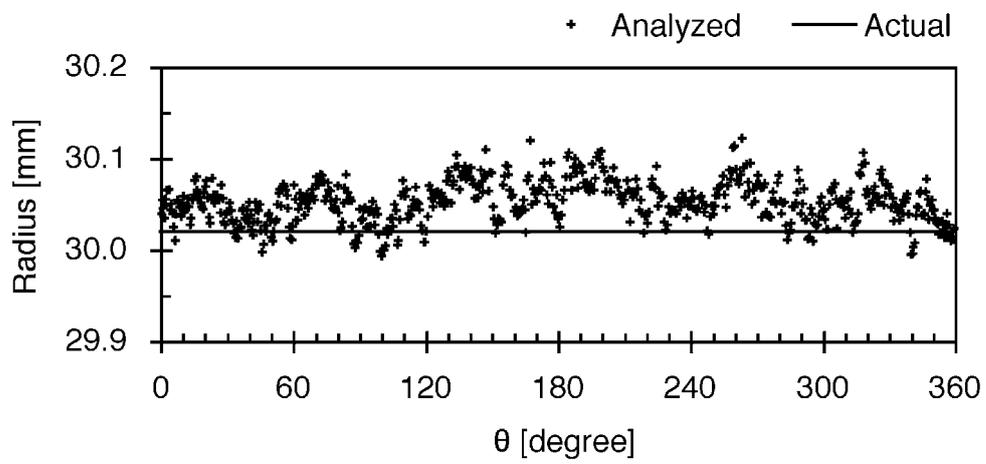


Figure 4.41 Comparison of analyzed value and theoretical value

第5章 DMDカメラの開発

5.1 はじめに

近年、マイクロマシニング技術により開発された Digital Micro-mirror Device (DMD) [96–99] は、1辺 $16\ \mu\text{m}$ の正方形の鏡が数十万個～百万個ワンチップに集積されている光学素子で、各鏡の傾きすなわち光の反射方向をサブミリ秒オーダーの時間で高速に変えることができる。

DMD は DLP (Digital Light Processing) プロジェクタ [100–104] に広く用いられる。その主な理由として

1. 反射型であるため光利用効率が高く高輝度である。
2. 1個のミラーが1画素に対応し、なおかつ半導体技術を応用した微細構造により細密なピクセルが配置でき、高品質な画像が得られる。
3. ミラーは高速応答に優れ、動画再生に適している。

それ以外に、次のようなアプリケーションが実現可能であり、現在研究されている。

- 天体撮影 [105]
- プリント基板、印刷製版その他への直接データ書き込みを実現するパターンニング・アプリケーション [106]
- 3次元ディスプレイなどの特殊ディスプレイ
- 分光器 [107]、顕微鏡 [108, 109]、内視鏡イメージングなど科学および医療向け機器 [110]
- ホログラフィック・データ・ストレージ、記録 [111] および再生 [112]
- 光学ネットワーク [113]
- 形状計測用の格子投影 [114–116]

DMD 素子はそれぞれのミラーの反射方向を独立かつ高速に制御することができる。この特徴を利用して、CCD と DMD を組み合わせた新しいタイプのカメラを開発すれば、従来ではできなかったような画像を撮影することができ、新たな位相解析・形状計測手法を開発することが可能になる。

先行研究として、筆者が所属する研究室ではすでに数年前から DMD と CCD カメラを組み合わせた DMD 反射式 CCD カメラ (DMD カメラ) の開発に取り込んでいる [117–120]。基本的な原

理や準静的な実験により、その有効性が確認された。しかし、まだ解決すべき大きな課題が残ったままである。

そこで、本章では DMD カメラの装置の開発を行い、DMD カメラを用いて位相解析や形状計測の光学的計測へ応用する。5.2 節では、DMD カメラの構成と特徴さらに問題点について述べる。5.3 節では、DMD カメラ装置の実装について述べる。ここでは、MTF を指標として DMD カメラの最適のレンズ選びと各ミラーを高速に制御できるボードの導入を行う。5.4 節では、モアレパターンを用いた簡単な画素対応の調整手法について述べる。5.5 節では、位相シフトモアレ法を用いた精密な画素対応の調整手法について述べる。5.6 節では、構築した DMD カメラを用いていくつかの画像処理の例を示す。最後に 5.7 節に本章のまとめを記す。

5.2 DMD 反射式 CCD カメラ (DMD カメラ)

5.2.1 DMD の構造と動作

DMD [96] は、1987 年米 TI (Texas Instruments) 社の Larry J. Hornbeck 氏が開発したもので、CMOS 半導体デバイス上に縦横に微小な平面ミラーが並べられた構造をしている。画素数は縦横にそれぞれ数百～1 千画素程度のもので作られている。図 5.1 の右の写真は DMD 素子をデジタル顕微鏡で 2000 倍を拡大したものである。

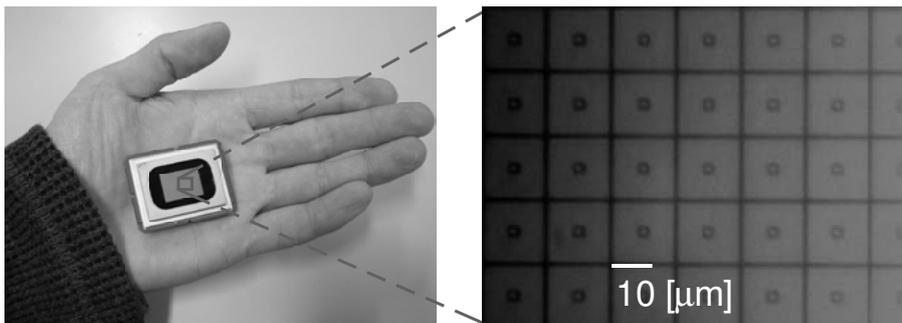


Figure 5.1 Digital Micro-mirror Device (DMD): right image is captured by a digital microscope with 2000x magnification

図 5.2 に DMD の 1 画素の基本構造の模式図を示す。上部には可動式のミラーが取り付けられている。ミラーは図 5.2 においてねじりばねを介して固定部分と接合されている。最下部には 1 ビットの CMOS メモリーがあり、メモリーが 1 か 0 のどちらかの値をもつかによって、2 つの電極のどちらかの電位が高くなる。一方、ミラーの電位は安定して動作するような一定値に保たれている。その結果、電位の高い電極とミラーとの間に静電力が発生し、その方向にミラーが引き寄せられる。ミラーの角度は ± 12 度以上に移動しないような構造となっているためにメモリーに記憶する値により ± 12 度の角度をつけることができる。ミラーの向きの切り替えに要する時間はサブ

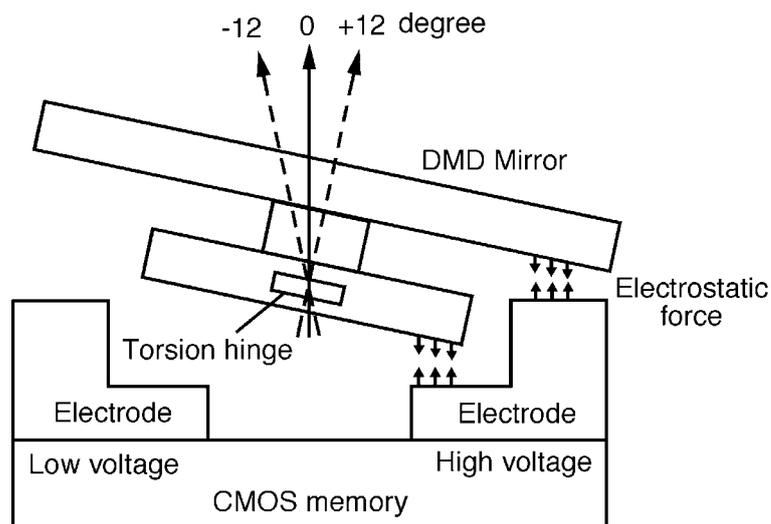


Figure 5.2 Structure of the DMD

ミリ秒オーダーである。

DMDは、その種類によって、ミラーの大きさは $13.7\sim 17.00\ \mu\text{m}$ 、画素（ピクセル）数は $800\times 600\sim 1280\times 1024$ までである。最近ではシネマ向けのもっと大きいサイズのDMDも開発されている。DMDのミラーの傾きは製品によって ± 10 度と ± 12 度がある。ここでは、ドイツViALUX社製のDiscovery 1100シリーズの0.7インチ、 1024×768 (XGA)、 ± 12 度のDMDを例として説明する。

図5.3にDMD素子を側面から見た図を模式的に示す。各DMDのミラーは、入力されるon-off信号に応じて、onの時は下向き角度12度でoffの時は上向き角度12度となるように向きを変える。下方向24度から入射した光は、DMDのミラーの向きに応じて、offのミラーで上方向-48度、onのミラーではDMDの正面方向にそれぞれ反射される。したがって、入射光のうち、一部分だけをon-offパターン信号によって取り出すことができる。

5.2.2 DMD カメラの構成

図5.4にDMD反射式CCDカメラの構成とタイプを示す。基本構成として、図5.4(a)もしくは図5.4(b)に示すように、まず撮影対象物体の像をレンズ1によってDMD素子表面に結像させる。このとき、DMDとレンズ1のレンズ面はお互いに平行になるように配置する。このとき、レンズ1は24度のあおり角となるようになる。こうすることで、DMD表面の各DMDのミラーには、結像の位置関係となる対象物体表面の1点から出た光が到達することになる。次に、DMD表面とCCD表面が結像の位置関係となるようにレンズ2を配置する。このように配置することによって、onの信号を受けているDMD画素に到達した光は、CCD方向に反射され、レンズ2によってCCDの対応する画素に結像する。すなわち、DMD画素の方向の切り替え時間はCCDの撮影時間と比べて約 $1/1000$ であるから、CCDの画素ごとに独立して高速に制御できるシャッター

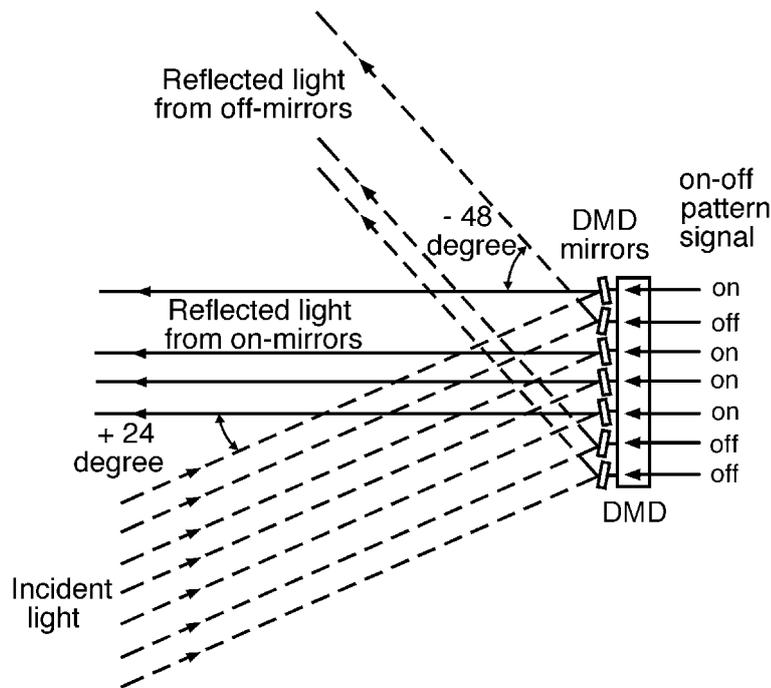


Figure 5.3 Directions reflected by the DMD

機能を持たせることになる。

さらに応用として、図 5.4(c) で示すように CCD カメラを 2 つ有するタイプや図 5.4(d) で示すように対象物を 2 つ同時に撮影できるタイプがある。CCD カメラの数と DMD との結像の配置関係から図 5.4(a)～図 5.4(d) をそれぞれ単眼直行タイプ、単眼傾斜タイプ、双眼傾斜タイプ、双眼直行タイプと呼ぶことにする。実際の単眼直行タイプと単眼傾斜タイプの DMD カメラ装置の写真を図 5.5 に示す。

本研究では、デジタルインターフェイスのソニー製 XCD-X700 の CCD カメラを用いた。画像数は 1024 画素 × 768 画素であるが、本研究では、中央の 640 画素 × 480 画素のみを使用している。画素サイズは $6.45 \mu\text{m} \times 6.45 \mu\text{m}$ である。また、DMD の各ミラーと CCD の各画素を画素対応できるように 3 軸平行移動できる精密な xyz ステージと 3 軸傾き調整できる精密な $\alpha\beta\theta$ ステージに取り付けられている。DMD は Discovery 1100 シリーズのものを用いた。ミラーの反射角度は ± 12 度であり、画素数は 1024 画素 × 768 画素である。DMD も同様に中央の 640 画素 × 480 画素のみを使用している。ミラーサイズは $13.8 \mu\text{m} \times 13.8 \mu\text{m}$ である。結像レンズはすべてニコンの引伸しレンズを用いた。

5.2.3 DMD カメラの特徴

図 5.6 に、撮影対象が図 5.6(a) に示すようなパターンの場合の DMD の on-off パターンと撮影される画像の関係をわかりやすくイラストで例示する。まず、DMD の各ミラーがすべて on の場

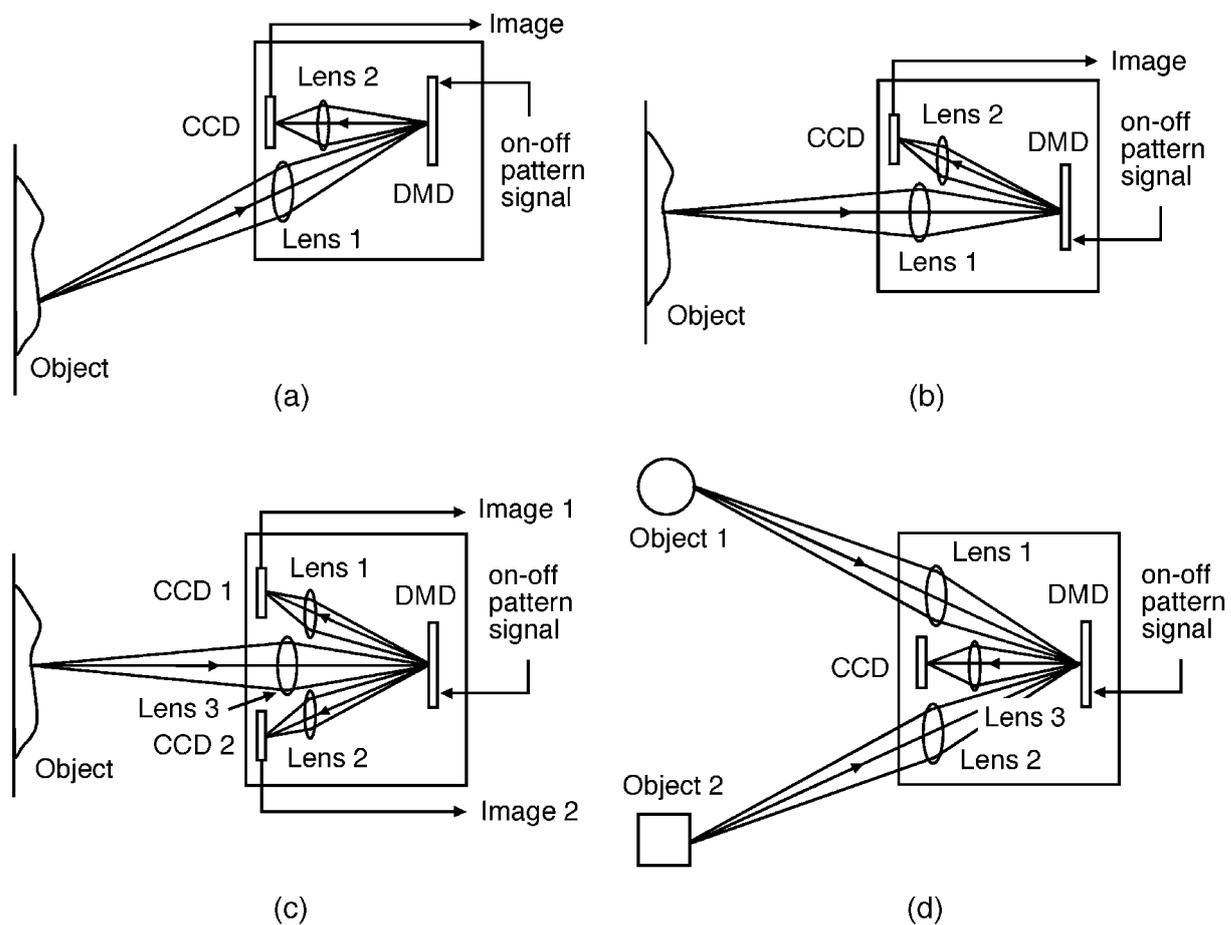
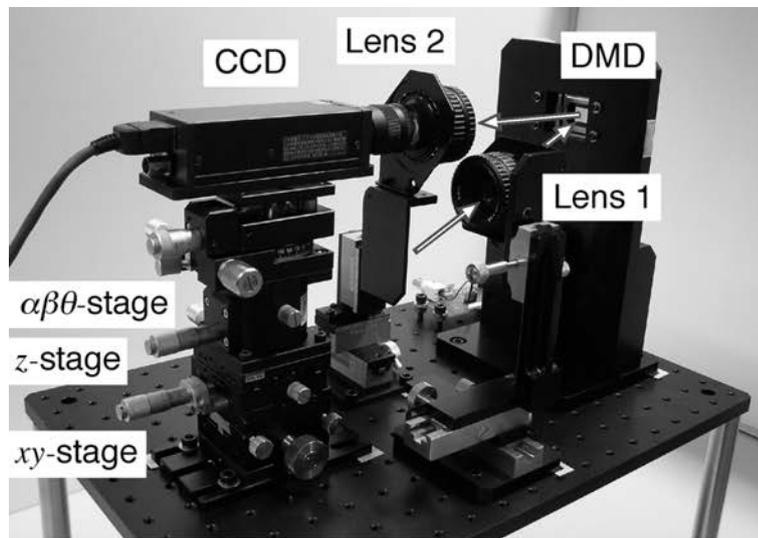
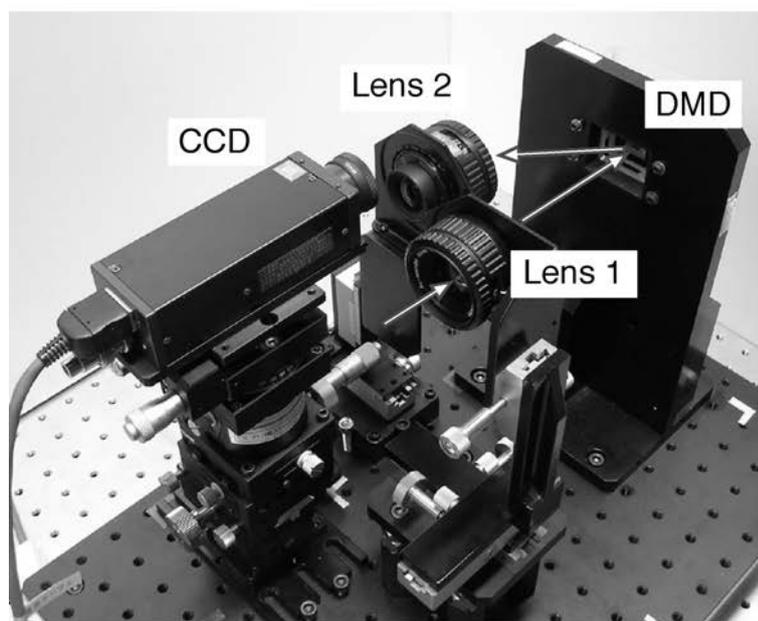


Figure 5.4 DMD Reflection-type CCD camera: (a) single straight CCD type, (b) single angle CCD type, (c) double angle CCD type, and (d) gemini-scene straight CCD type



(a)



(b)

Figure 5.5 Photography of the DMD camera: (a) single straight CCD type, and (b) single angle CCD type

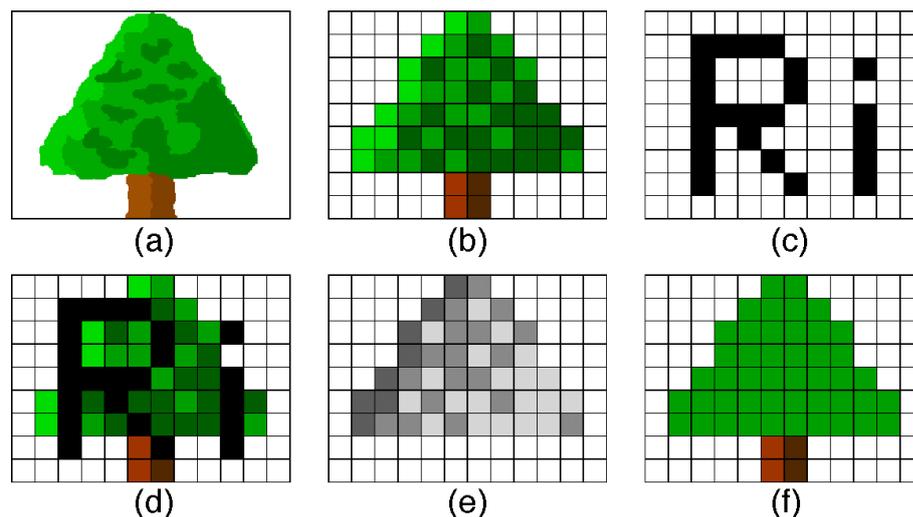


Figure 5.6 Relationship between DMD on-off patterns and captured images by DMD camera as an illustration: (a) original image; (b) image taken by CCD; (c) on-off pattern (□:on, ■:off); (d) image taken by CCD when DMD pixels pattern are set at (c); (e) DMD pattern; (f) image taken by CCD when DMD pixels pattern are set as (e)

合は、図 5.6(b) に示すように撮影対象の像がそのまま CCD で撮影される。次に、図 5.6(c) に示すように一部の DMD の画素が off の場合は、on の画素だけ図 5.6(d) のように撮影されることになる。また、図 5.6(e) に示すように DMD のある部分の画素の露光時間を調整したパターンを表示すれば、図 5.6(f) のように、木の部分だけを一樣な明るさになるように撮影することもできる。

このように、DMD カメラを用いることで、CCD の各画素ごとに独立してサブミリ秒オーダーの速度で動作する高速なシャッターが取り付けられている状態になり、様々な用途に利用できる。また、DMD の on-off の切り換える時間を制御することで、画素ごとに露光時間を調整させることもできる。

5.2.4 DMD カメラの問題点

以上で述べたように、CCD と DMD をうまく組み合わせることにより、CCD の各画素ごとに独立して制御できるようになる。

しかし、DMD カメラの開発は決して容易なものではない。主な問題点として、(1) DMD の高速制御と (2) DMD と CCD の正確な画素対応が挙げられる。

(1) について、DMD を開発した TI 社は DMD に関する情報を完全に公開しなかったため、DMD を制御するボードを開発することができない。初期の実験段階では、市販の DLP 式 프로젝タを分解して、その内部に入っている DMD と駆動回路を用いて実験を行ってきた。

(2) について、DMD 及び CCD のどちらの光学素子でも 1 画素が非常に小さいため、正確な画素対応の調整が非常に難しい。先行研究では 3 画素 × 3 画素の平均を大きな 1 画素と見なして実験

を行った。しかし、これでは空間分解能を著しく低下させてしまう。また画素対応ができたかどうかの保証もなく、勘に頼るしかないため、簡単かつ正確に画素対応ができる手法が必要不可欠である。

次節以降では、ここで述べた問題点を中心に解決する方法について述べる。

5.3 DMD カメラ装置の実装

5.3.1 最適な結像レンズ選び

DMD カメラの光学系で用いるレンズは極力レンズ収差の少ないものや解像力の高いものが良い。また光学系の配置上の関係より、あまり焦点距離が短いレンズではレンズ1とレンズ2が物理的にぶつかってしまう。逆に焦点距離が長過ぎると、CCDに届く光量が減ってしまうため、DMDとCCDの画素ピッチの大きさから焦点距離 f が 40 mm から 50 mm のレンズが適している。

このような仕様を満たしているいくつかの市販されているレンズから最適のものを選ぶために、変調伝達関数である Modulation Transfer Function (MTF) を用いて評価を行った。

MTF [121] とは、線形光学システムで入力された画像に対してどの程度出力されるのかを表す定量的な評価パラメータである。式 (5.1) によって求められる。

$$M = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}}. \quad (5.1)$$

ここでは、 I_{max} と I_{min} はそれぞれ格子の最大輝度値と最小輝度値である。

求められた MTF は 0 から 1 までの値で、1 に近いほど結像力が高いことを意味している。そこで、実験では画素対応した後、図 5.7(a) に示すような DMD の on-off パターンを表示させて CCD で図 5.7(b) のような画像を撮影した。図 5.7(a) において、上から DMD の 2 画素、4 画素、8 画素、16 画素、32 画素、64 画素ピッチの順のパターンを表示している。これはそれぞれ空間周波数 35.7, 17.9, 8.9, 4.5, 2.2, 1.1 (lines pair/mm) に相当する。図 5.7(b) において、それぞれのピッチを持つ領域での最大輝度値と最小輝度値を用いて式 (5.1) より MTF を求めた。

実験では、以下のような 4 種類 5 つのレンズについてそれぞれの MTF を調べた。

1. 平凸単レンズ ($f = 50$ mm, Dia. = 50 mm, Edmund)
2. アクロマティックレンズ ($f = 40$ mm, Dia. = 25 mm, Edmund)
3. 一眼レフカメラレンズ (Ai Nikkor) ($f = 50$ mm, F1.4–F16, Nikon)
4. 現像用引伸しレンズ ($f = 40$ mm, F4–F22 と $f = 50$ mm, F2.8–F16, Nikon)

図 5.8(a) と図 5.8(b) はそれぞれ単眼直行タイプの場合と単眼傾斜タイプの場合の MTF の測定結果を示す。

図 5.8(a) からニコンの一眼レフレンズと引伸しレンズはすべての空間周波数において平凸単レンズやアクロマティックレンズより高い解像力を持つことがわかる。アクロマティックレンズは平凸単レンズよりやや高いものの、解像力はそれほど改善されていない。この 4 種類の中で引伸しレンズが最も良い MTF を得られたため、本研究では、ニコンの引伸しレンズを選択した。ニコンの引伸しレンズ ($f = 50 \text{ mm}$) を用いた場合、単眼直行タイプでは低い空間周波数 (8.9 lines pair/mm) において 85% のコントラスト、高い空間周波数 (35.7 lines pair/mm) において 24% のコントラストが得られた。

一方単眼傾斜タイプは単眼直行タイプと比べて画像全体がかなりぼやける。これはレンズ 2 は DMD に対して光軸から大きくずれ (24 度)、レンズ収差 (主にコマ収差) が著しく生じるためである。図 5.8(b) からわかるように、どちらの引伸しレンズ ($f = 50 \text{ mm}$ と $f = 40 \text{ mm}$) でも、F ナンバーの大きいほう (F16) が F ナンバーの小さいほう (F4) より高い MTF を得られた。これは絞りを絞ることでレンズ収差の影響を少なくしているためである。しかし、画像が暗くなる。単眼傾斜タイプでは、一般的に市販されている平凸レンズやアクロマティックレンズを用いて画素対応を行うことが不可能であった。ニコンの引伸しレンズ ($f = 40 \text{ mm}$) を用いて最小絞りとした場合、空間周波数 (17.9 lines pair/mm) において 18% のコントラストが得られたが、空間周波数 (35.7 lines pair/mm) では 1 割にも満たず白黒の区別がほとんど付かない状態であった。したがって、単眼傾斜タイプでは空間分解能は 2 画素にとどまっている。単眼傾斜タイプで良い画像を得るには、専用設計されたレンズ収差の少ない非球面レンズなどを用いる必要がある。

図 5.9 と図 5.10 にそれぞれ単眼直行タイプと単眼傾斜タイプの画素対応時の撮影画像を示す。画像サイズはすべて 300 画素 \times 115 画素である。

この実験より、以下の結果が得られた。

1. 一般的に市販されている平凸レンズやアクロマティックレンズではコントラストの高い画像を得ることが困難である。
2. ニコンの引伸しレンズが最もよい画像が得られた。
3. 単眼直行タイプでは、低い空間周波数において 85% のコントラスト、高い空間周波数において 24% のコントラストが得られた。
4. 単眼傾斜タイプでは、画像がぼやけて空間分解能は 2 画素にとどまる。

5.3.2 DMD ALP ボードによる DMD の高速コントロール

現在市販されている DLP 式のプロジェクタで使用されている DMD と駆動回路はプロジェクタ用として設計されているため、任意のパターンを高速に切り替えて表示することはできない。そのため、これまでは準静的な実験しかできなかった。

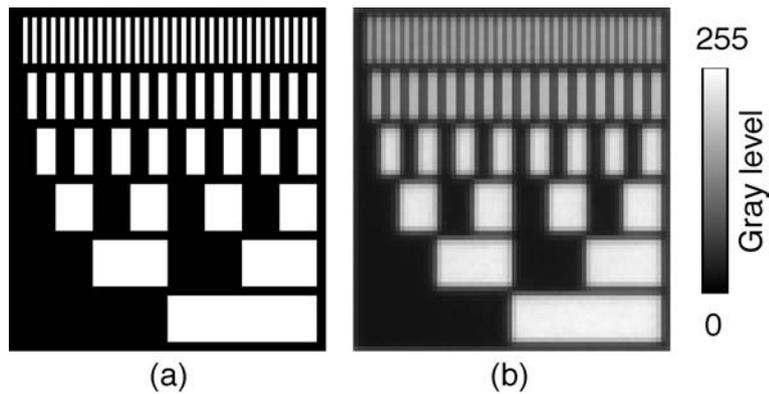
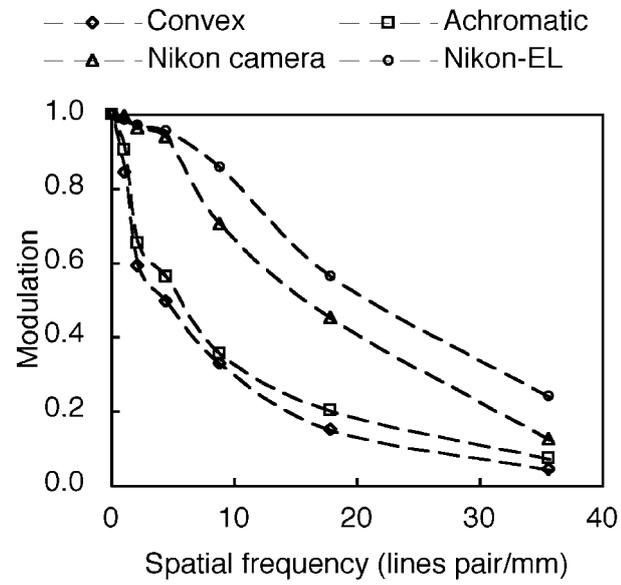


Figure 5.7 Test MTF chart with stripes for different spatial frequencies: (a) DMD on-off pattern, and (b) image captured by the DMD camera

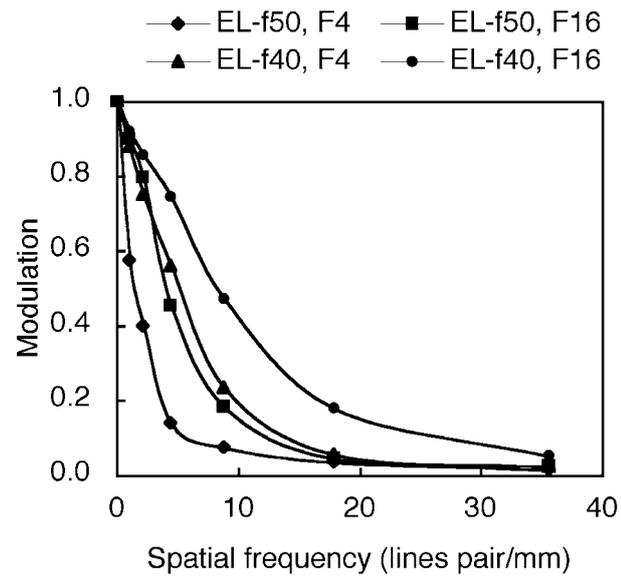
しかし、つい最近、TIは「DMD DiscoveryTM」汎用製品ファミリを発売した。この製品は、米国のPSI (Productivity System, Inc) 社から供給されるもので、0.7インチのXGA(1,024画素×768画素)分解能のDMDのほかに、Discoveryコントローラ、サポートICが含まれる。日本では、株式会社丸文 (MARUBUN CORPORATION) がDMD Discovery 1100 Starter Kitを販売している。またドイツのViALUX社はDMDアプリケーション開発キットの機能拡張用アクセサリであるAccessory Light modulator Package(ALP) [122-124]を販売している。こちらはVC++のプログラムでDMDを制御することができ、使いやすい仕様になっているため、本研究ではこのDMD ALPを導入して実験を行っている。図5.11にそれぞれDMD ALPボードの写真とインターフェイスのブロック図を示す。

このボードでは、外部トリガー機能 (BNC 端子より信号入力) があり、リニアPWM (Pulse Wide Modulation) を使用して1~8ビットのグレーパターンを表示できる。パソコンからの画像はUSBを介してDMD ALPのメモリーであるSDRAMに転送される。1ビットでは6918回/s、8ビットでは162回/s切り替えられる仕様になっている。最近では、DMD DiscoveryTM3000のStarter Kitの種類も現われ、さらにALP-3 (high-speed) を用いれば13,000 frames/sの速度でDMDの切替を行える [125]。

本研究では、ソフトウェアを改良して画像撮影、位相シフト、ステージの移動及びDMDのパターン作成・制御を、すべてWindows上で行えるようにした。



(a)



(b)

Figure 5.8 Measured MTFs: (a) single straight CCD type, and (b) single angle CCD type

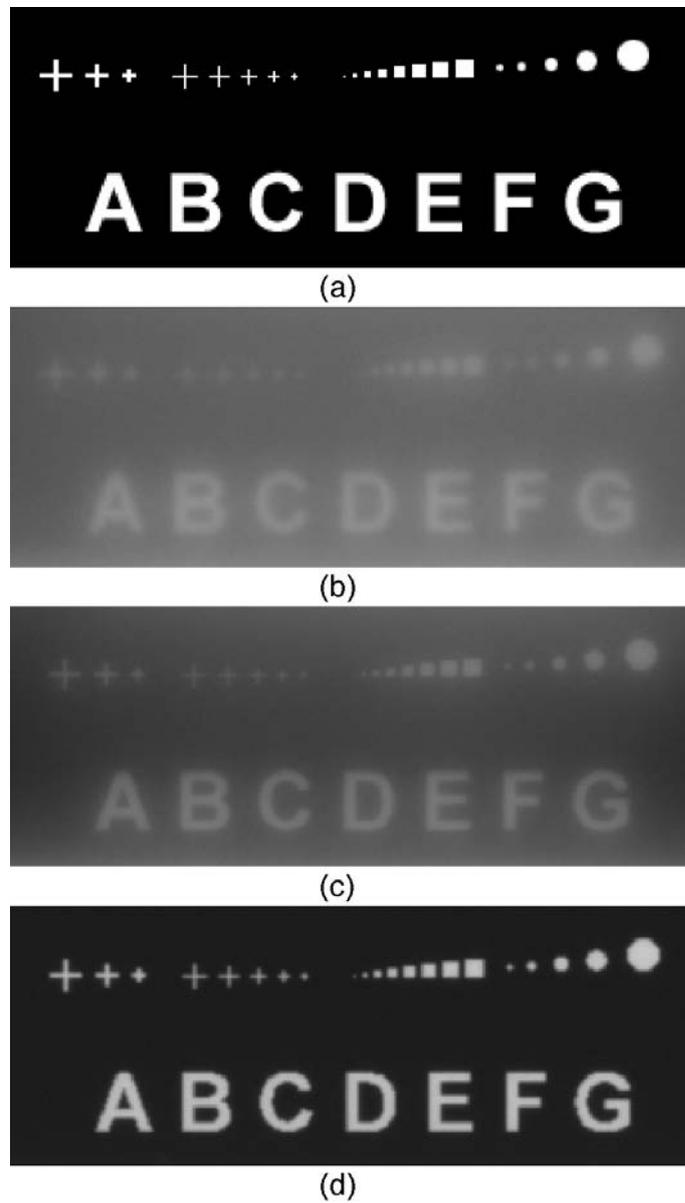


Figure 5.9 Pixel-to-pixel correspondence image for single straight CCD type: (a) ideal; (b) convex lens ($f = 50$ mm); (c) achromatic lens ($f = 40$ mm); and (d) Nikon EL lens ($f = 50$ mm).

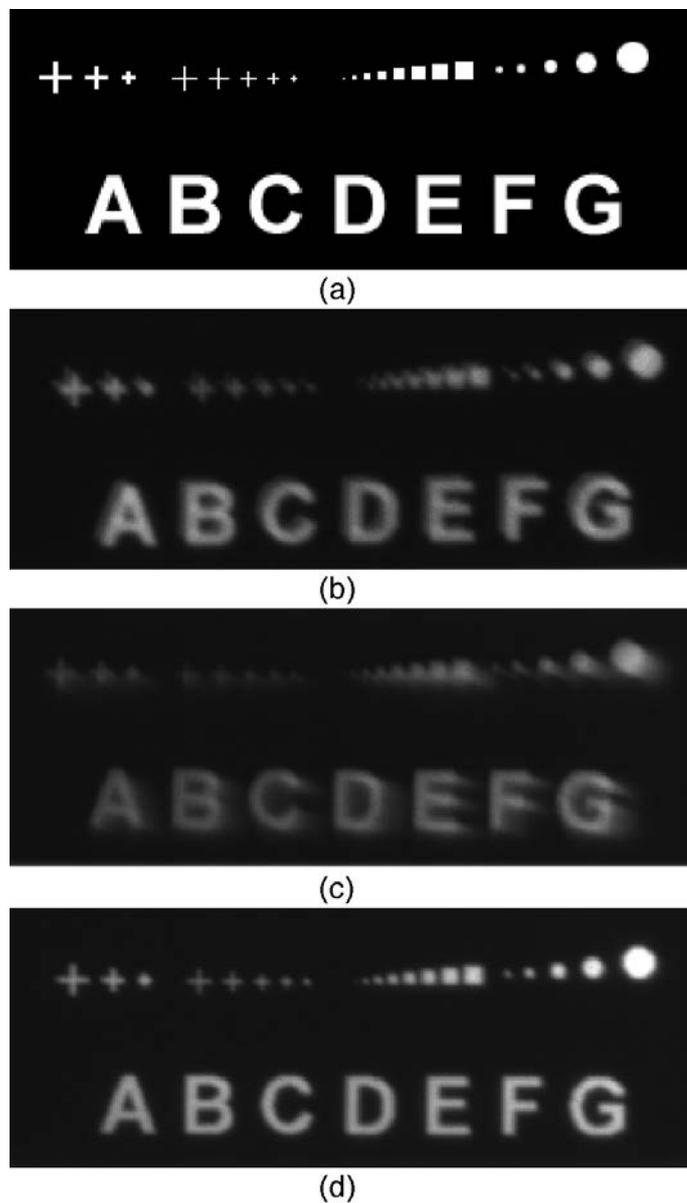
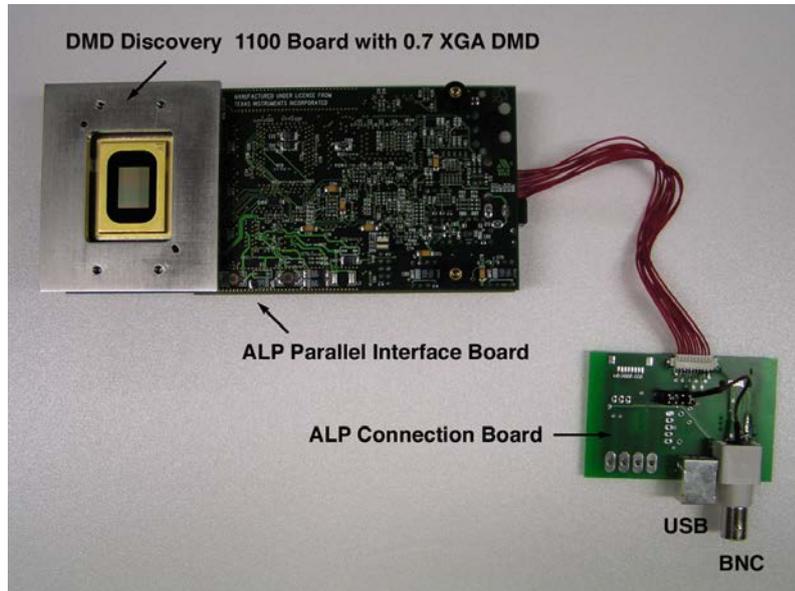
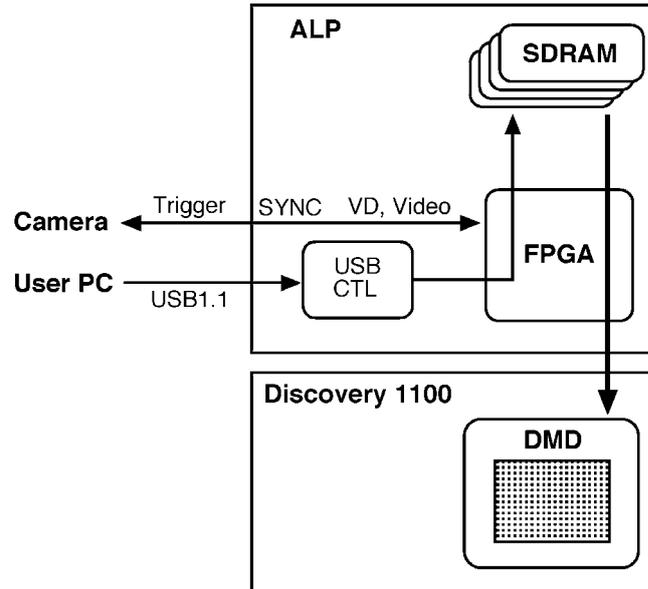


Figure 5.10 Pixel-to-pixel correspondence image for single angle CCD type: (a) ideal; (b) Nikon EL lens ($f = 50$ mm, F16); (c) Nikon EL lens ($f = 40$ mm, F4); and (d) Nikon EL lens ($f = 40$ mm, F16)



(a) photo



(b) interface

Figure 5.11 DMD Accessory Light modulator Package (ALP) board

5.4 モアレパターンを用いた簡単な画素対応の調整手法

5.4.1 モアレ現象とは

すでに第5.2.4節で述べたように、DMDカメラの光学系（図5.12）において、DMDの各ミラーとCCDの各画素を正確に画素対応させることが非常に重要である。しかし、DMDとCCDのどちらの光学素子も非常に小さいため、正確な画素対応を行うことが簡易ではない。そこで、本節では新たにモアレパターンを用いた簡単な画素対応調整手法を提案する。

モアレ (moiré) とはもともとフランス語の“木目をつけた”や“波模様”という意味から由来している。図5.13に示すように、ほぼ等間隔に並んだ模様を二つ重ね合わせると、元の模様と異なる模様が現われる現象 [126–128] である。例えば、2つ近い空間周波数である f_A と f_B のパターンが存在した場合、これを重ね合わせることで、空間周波数 $|f_A - f_B|$ のモアレパターンを観察することができる。よくテレビで細かいストライプのものを映したとき見かける変な縞模様はこのモアレである。

本節および次節では、一般的に嫌われるこのモアレ現象を逆にうまく利用して正確に画素対応を行う。

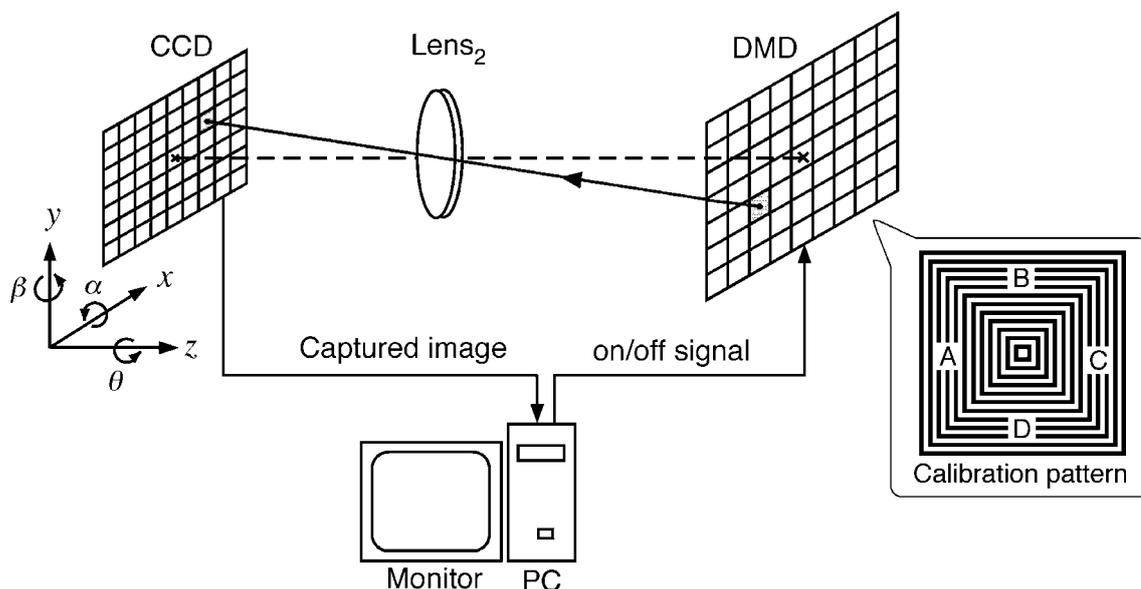


Figure 5.12 DMD camera configuration

5.4.2 調整方法の原理

ここでは、DMDカメラの光学系の調整にDMDとCCDの画素の空間周波数の違いにより生じるモアレ縞を用いることで正確に調整できる手法について説明する。この手法により簡単にDMDとCCDの画素を1対1に対応することができる。

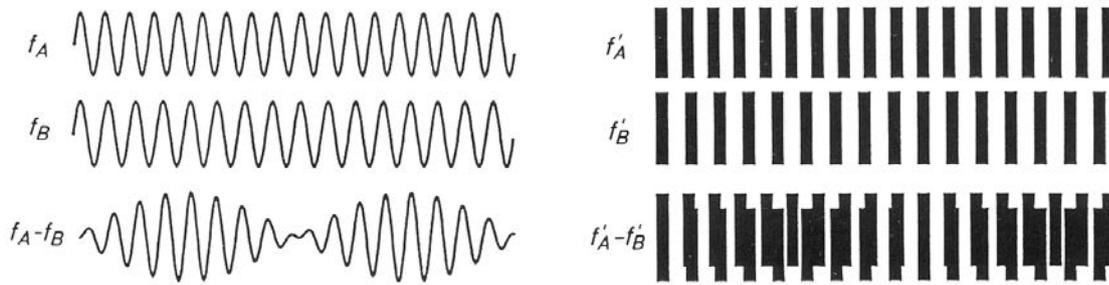


Figure 5.13 Moiré phenomenon

まず、DMD に図 5.14(c) に示すような 1 ピッチが 2 画素の矩形波格子のパターンを表示させる。これは DMD に図 5.14(a) と DMD に図 5.14(b) を組み合わせたパターンである。これより、1 枚の画像から横方向と縦方向に生じるモアレを同時に検出できる。次に CCD とレンズ 2 をおおよそ結像の関係を満たす位置に設置する。このとき、CCD 面が DMD 面と平行でない場合や CCD の大きさと CCD に結像する DMD の像の大きさが一致しない場合、すなわち DMD の各ミラーと CCD の各画素が 1 対 1 に対応できていない状態では図 5.15(a) に示すようなモアレ縞が現れる。

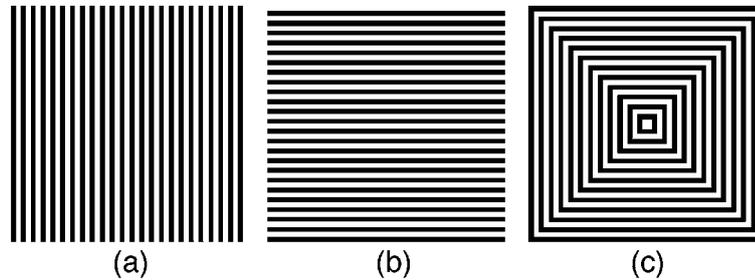
Figure 5.14 Calibration pattern of the periodic binary line-gratings with 2-pixel pitch: (a) x -directional; (b) y -directional; (c) both x - and y -directional

図 5.15(a) をよく考察すると、モアレが発生していることが分かる。しかし、元の画像とモアレ縞が混在しているため、非常に見づらいものになっている。

2 画素おきに間引くことによって得られる従来のモアレパターン [129] を図 5.15(b) に示す。図 5.15(a) に比べて、モアレ縞が見やすくなっている。

本論文では、さらにモアレパターンを観察しやすくするために、CCD カメラで撮影された画像に対して、式 (5.2) で示すような画像処理を行うことで、より明確なモアレパターンを観察することができる。提案手法によって得られるモアレパターンを図 5.15(c) に示す。図 5.15(c) からわかるように、従来の手法に比べてモアレ縞の本数（感度）は 2 倍になる。またモアレ縞の全体のコントラストも高い。

$$I_{(i,j)} = |I_{(i,j)} - I_{(i-1,j)}| + |I_{(i,j)} - I_{(i,j-1)}| + |I_{(i,j)} - I_{(i+1,j)}| + |I_{(i,j)} - I_{(i,j+1)}| \quad (5.2)$$

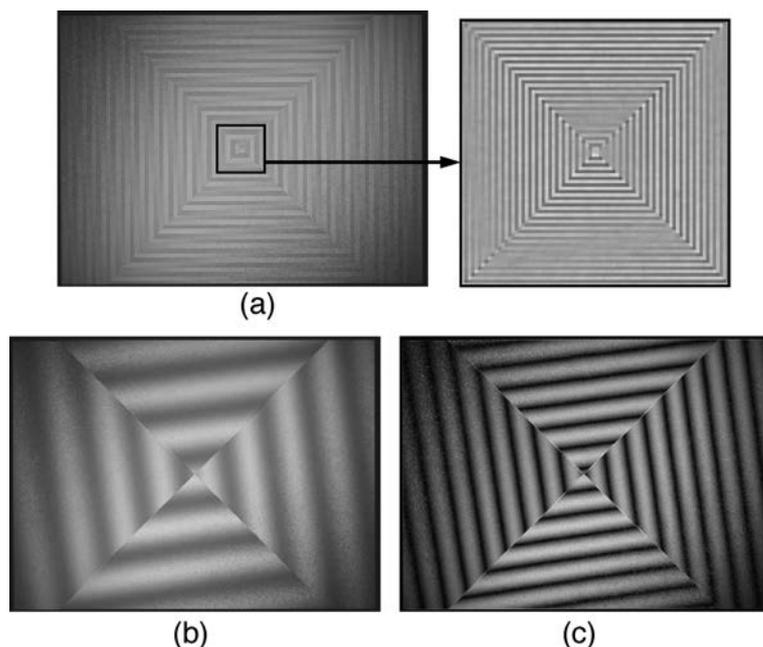


Figure 5.15 Images when CCD and DMD has mismatch and misalignment: (a) captured image; (b) after thinned out 2-pixel; (c) after image processing by Equation (5.2)

ここでは、 i, j はそれぞれ CCD カメラによって撮影される画像の横と縦の画素番号である。 $I_{i,j}$ は横 i 、縦 j 番目の画素の輝度値を意味する。

図 5.16 に図 5.15(a) と図 5.15(c) の横中央の 1 ライン上の 150 画素から 300 画素までの輝度値のグラフを示す。式 (5.2) で示すような画像処理を行うことで、モアレ縞のみを感度よく検出することができる。また式 (5.2) は非常にシンプルな画像処理であるため、リアルタイムで行うことができる。

このモアレ縞 (図 5.15(c)) は CCD カメラの位置や傾きなどにより規則的に変化するため、モアレ縞のパターンから画素対応における光学系のずれを知ることができる。ずれが大きくなればなるほど縞の本数が増えるので、モアレ縞の間隔が広くなるように各素子の移動ステージを動かして調整し、最終的にこのモアレ縞を発生させないようにすれば、DMD の各ミラーと CCD の各画素が 1 対 1 に対応することになる。

5.4.3 シミュレーション

DMD カメラの光学系において画素対応を行うためには、 x, y, z の 3 軸の位置調整とそれぞれの軸に対する回転調整計 6 つの自由度の調整を行う必要がある。そこで、まずそれぞれの軸がずれた場合にどのようなモアレパターンが発生するのかを確認するために、以下のコンピュータシミュレーションを行った。

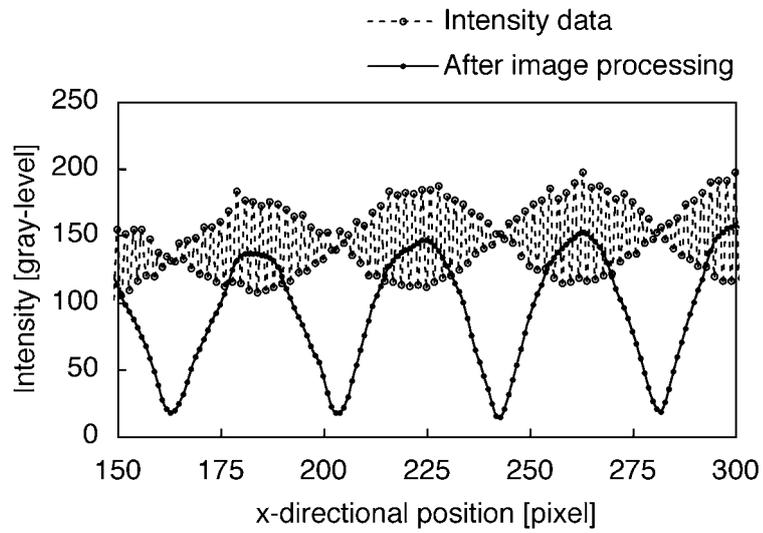


Figure 5.16 Intensity values of center x -directional sections in Figs. 5.15(a) and 5.15(c)

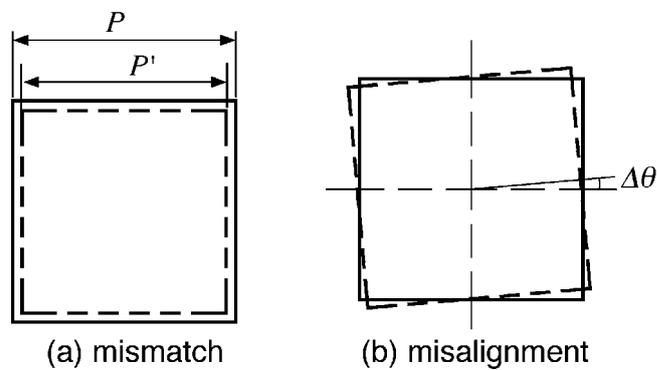


Figure 5.17 Schematic representation of (a) mismatch and (b) misalignment

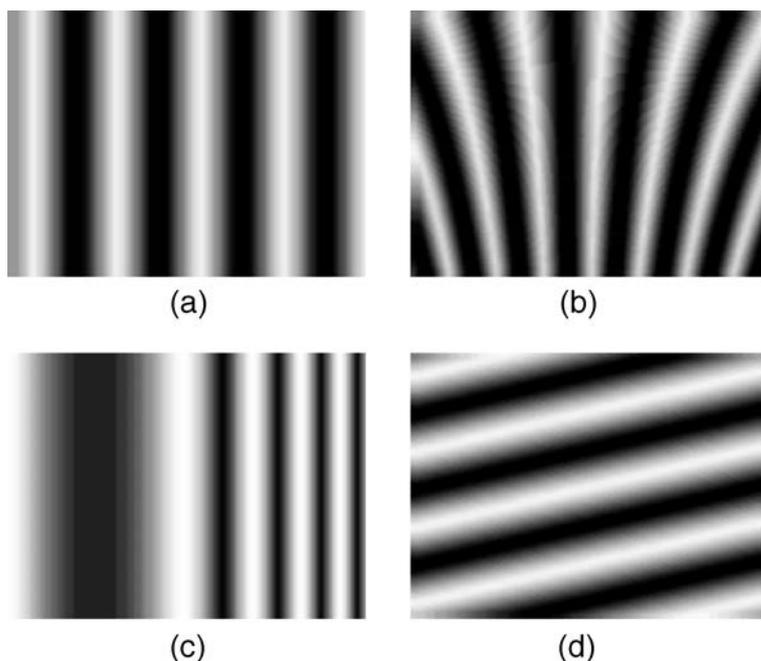


Figure 5.18 Example of simulated images of the moiré pattern using x -directional calibration pattern in case of (a) by z -directional translation; (b) by tilting around the x -axis; (c) by tilting around the y -axis; (d) by tilting around the z -axis

ここでは、ミスマッチとミスアライメントによって発生するモアレについて考察する。図 5.17 に示すように、ミスマッチとは2つの格子パターンの間隔（空間周波数）が異なる場合によって生じるモアレ、ミスアライメントとは同じ間隔（空間周波数）の2つの格子パターンがある角度を持つことによって生じるモアレをいう。

図 5.18 にそれぞれ図 5.14(a) のパターンを表示させたときの z 方向の位置のずれによる結像倍率を変えた場合とさらに x, y, z 軸まわりにわずかに傾いた場合に現れるモアレパターンのシミュレーション結果を示す。

図 5.19 にそれぞれ図 5.14(b) のパターンを表示させたときの z 方向の位置のずれによる結像倍率を変えた場合とさらに x, y, z 軸まわりにわずかに傾いた場合に現れるモアレパターンのシミュレーション結果を示す。

シミュレーション結果より、CCD に結像される像の倍率が異なるだけで CCD カメラの傾きがない場合は図 5.18(a) のように水平方向に直線的なモアレ縞が現れるが、CCD カメラが傾いている場合は図 5.18(b),(c),(d) に示すようにモアレ縞が曲線になったり傾いたりすることがわかった。

次に図 5.14(c) に示すようなキャリブレーションパターンを用いてミスマッチ（1.015 倍のピッチずれ）とミスアライメント（0.5 度の回転ずれ）だけが存在する場合のシミュレーションを行った。ミスマッチだけずれた場合は図 5.20(a) のようになり、正方形の形になっている。一方、ミスアライメントだけずれた場合は図 5.20(b) のようになり、十字架の形になっている。このよう

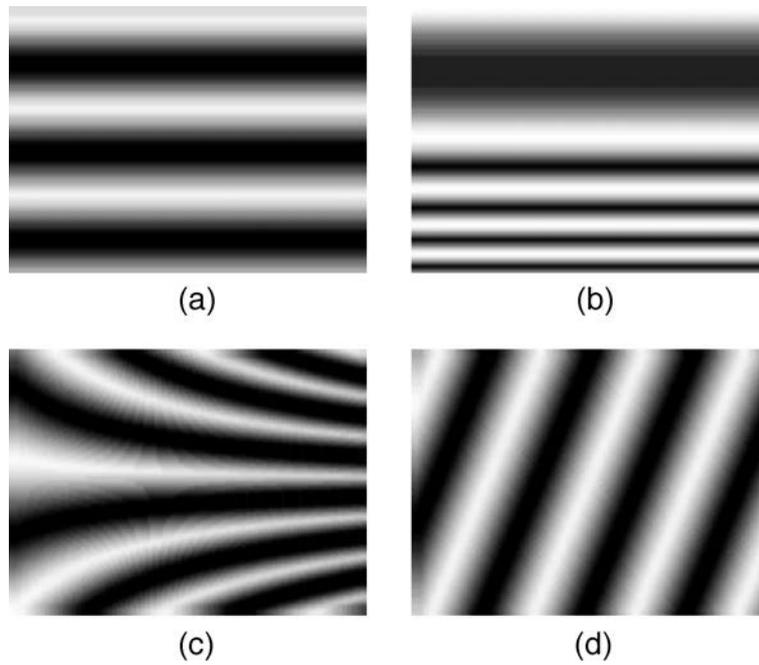


Figure 5.19 Example of simulated images of the moiré pattern using y -directional calibration pattern in case of (a) by z -directional translation; (b) by tilting around the x -axis; (c) by tilting around the y -axis; (d) by tilting around the z -axis

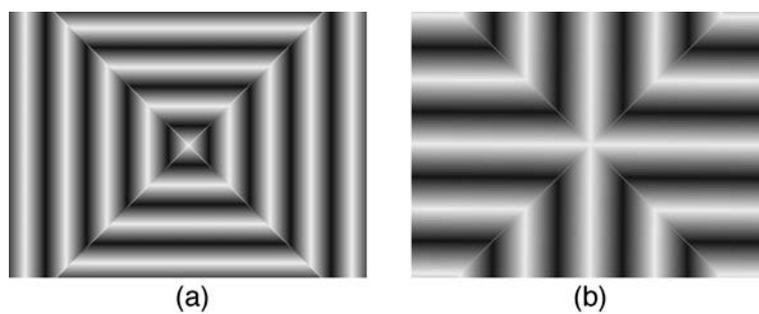


Figure 5.20 Example of simulated images of the moiré pattern using composed binary pattern in case of (a) only mismatch and (b) only misalignment

に、ミスマッチとミスアライメントだけの場合、モアレが現れる向きはちょうど反対になることが図 5.20 よりわかる。

5.4.4 モアレパターンと位置ずれの関係

図 5.21 を用いて、ミスマッチとミスアライメントが同時に存在する場合、どの位置にモアレ縞ができるのかを説明する。

図 5.21 に示すように正確に x 方向に等間隔にある y 方向に平行な格子線がある。これが本調整手法の場合、CCD カメラの縦方向の走査ラインに相当する。このときの格子線の座標は以下の式で表すことができる。

$$x = lp \tag{5.3}$$

l は整数の格子番号を表し、 p は基準格子のピッチである。これはちょうど CCD カメラの画素ピッチに相当する。

一方、図 5.21 中の回転した格子線の座標は以下の式になる。これは本調整手法ではレンズで結像された DMD 上のバイナリ格子のピッチに相当する。

$$x \cos \theta + y \sin \theta = mq \tag{5.4}$$

m は整数の格子番号を表し、 q は DMD の結像格子のピッチである。

図 5.21 中の太線となっている 1 本のモアレ縞の上では、DMD の結像格子の格子番号 m から CCD の格子番号 l を引くと一定になる。このモアレ縞を作る各格子番号の差である N をモアレ縞の縞次数といい、以下の関係が成り立つ。

$$m - l = N \tag{5.5}$$

式 (5.3) と式 (5.4) を式 (5.5) に代入すると、

$$\frac{(p \cos \theta - q)x + py \sin \theta}{pq} = N \tag{5.6}$$

これよりピッチおよび回転角度からモアレ縞の縞次数を得ることができる。回転角度である θ は微小の場合、以下のように近似することができる。

$$\frac{(p-q)}{p}x + \theta y = Nq \quad (5.7)$$

$(p-q)/p = M$ とすると、式 (5.7) は式 (5.8) のようになる。

$$Mx + \theta y = Nq \quad (5.8)$$

M は z 方向の位置によって生じる倍率のずれ（ミスマッチ）を表し、 θ は回転角度のずれ（ミスマライメント）を表す。

もし、回転角度のずれがない場合（ $\theta = 0$ ），結像倍率によるずれとモアレ縞の関係は以下の式のようになる。

$$M = q \frac{N}{x} \approx p \frac{N}{x} \quad (5.9)$$

反対に結像倍率によるずれがない場合（ $p = q$ ），回転角度のずれとモアレ縞の関係は以下の式のようになる。

$$\theta = q \frac{N}{y} = p \frac{N}{y} \quad (5.10)$$

この式からわかるように、モアレ縞の縞次数が増えれば増えるほど光学系がずれていることを意味し、倍率が一致しない場合、キャリブレーションパターンと同じ方向にモアレ縞が発生する。回転ずれが生じると、キャリブレーションパターンと垂直方向にモアレ縞が発生する。両方存在する場合、モアレ縞が斜めになって現れることになる。

したがって、DMD カメラの画素対応における調整手順は

1. モアレ縞が直線的になるように $\alpha\beta\theta$ ステージを用いて CCD カメラを回転させて調整を行う。
2. モアレ縞の数を減らしながら z ステージを用いて CCD カメラとレンズ 2 の位置を調整し、最終的にモアレ縞が無くなるまで行う。
3. DMD パターンの表示範囲と CCD の撮影範囲の四隅が対応するように、 xy ステージを用いて調整する。

これより、DMD の各ミラーと CCD の各画素を簡単に正確に対応させることができる。

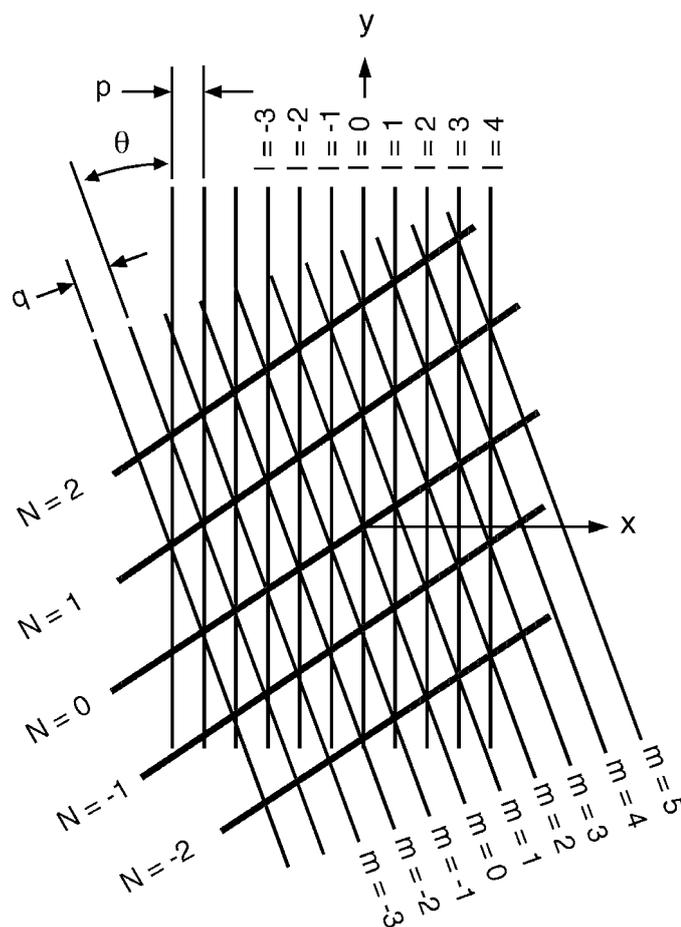


Figure 5.21 Detail of moiré formation between two parallel line gratings set at an angle θ .

5.4.5 調整実験結果および考察

実際に DMD カメラの画素を対応させた場合の実験結果例を以下に示す。図 5.14 に示すような上下領域では横方向、左右領域では縦方向にそれぞれ 1 ピッチが 2 画素の矩形波格子を DMD に表示させたときに、調整実験で得られるモアレパターンの例を図 5.22 に示す。このキャリブレーションパターンを用いれば、 x および y 方向のモアレパターンを同時に観察することができる。

図 5.22(a) は正しい結像位置からずれたために 12 画素ほどの大きさがずれた場合のモアレパターンであり、図 5.22(b) は正しい結像位置から 10 画素ほどずれた場合のモアレパターンである。結像倍率によるずれが小さいほどモアレ縞の本数が少ないことがわかる。図 5.22(c)~(h) は図 5.12 に示すように結像倍率が合っていない（ミスマッチも存在する）状態で z 軸まわりの回転角度 θ を徐々に変えて得られるモアレパターンである。回転角度 θ のわずかなずれにより、大きく回転したモアレ縞が観察できる。ここでは、できるだけモアレ縞が回転しない正方形の形になるように調整する。図 5.22(i), (j) は y 軸まわりの回転角度 β によって生じるモアレパターンである。回転角度 α がわずかにあると正方形のモアレ縞にならず、対角線上でずれた形になる。図 5.22(k) は $\beta = 0$ のときのモアレパターンであり、正方形のモアレ縞になる。図 5.22(l) は x 軸まわりの回転角度 α によって生じるモアレパターンである。回転角度 α がわずかにあると、 x 方向と y 方向のモアレ縞のピッチが大きく異なることがわかる。図 5.22(m) は $\alpha = 0$ のときのモアレパターンであり、 x および y 方向のモアレ縞が同じ間隔になる。図 5.22(n) は画素対応がわずかにずれた状態のモアレパターンである。最終的に一致したときのモアレパターンを図 5.22(o) に示す。図 5.22(o) の周辺では少し暗くなっているのはレンズの性質（ケラレ現象）によるもので、ずれによるものではない。

このようにして、モアレパターンからどの軸がどの程度ずれているのかりアルタイムで視覚的に見ることができ、簡単に画素オーダーの精度で画像対応の調整を行うことができる。

しかし、この手法では基本的にモアレパターンの画像のみを用いるため、保証できる精度は半画素程度までである。より高精度に調整したい場合は難しく、サブピクセル以上の精度で定量的に評価することはできない。この問題点を解決するため、次節で述べるモアレ縞の位相を解析することで、サブピクセル以上の精度で画素対応できる手法を提案する。

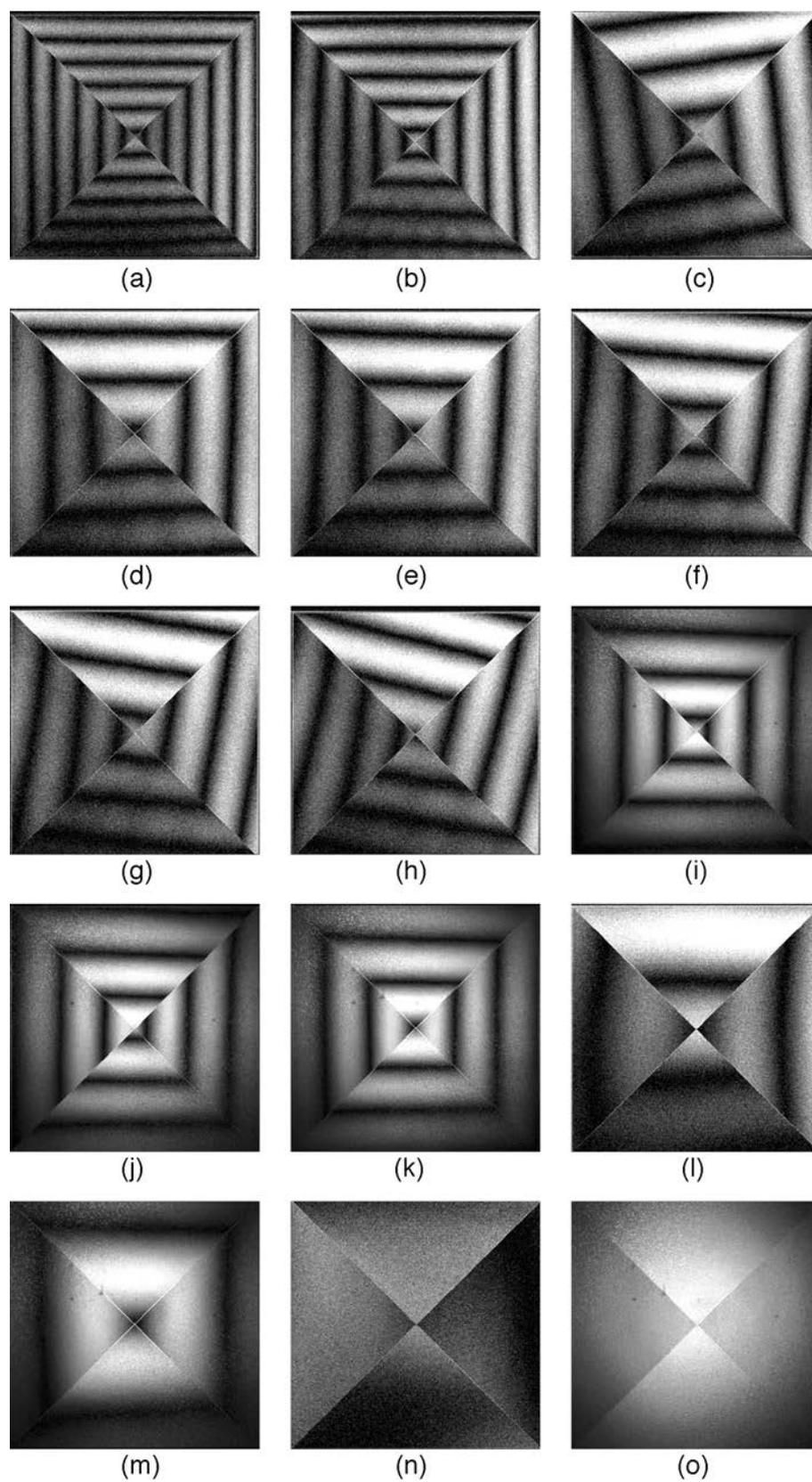


Figure 5.22 Experimental results of moiré pattern captured images by DMD camera using composed grating pattern shown in Figure 5.14(c): (a), (b) z -directional translation; (c)–(h) tilting around z -axis; (i)–(k) tilting around y -axis; (l), (m) tilting around x -axis; (n) slightly mismatch; and (o) optimum position

5.5 位相シフトモアレ法を用いた画素対応の調整手法

5.5.1 位相シフトモアレ法の原理

モアレパターンを用いる手法では、目視による簡単な調整手法ではあるが、1, 2画素程度のずれになると、モアレ縞を判別することが難しくなる。また環境光による明暗の影響で生じた明るさ分布との区別もしにくい。1画素以下での評価は難しくなる。これに対して、以下にサブピクセルオーダー以上の精度の光学系のずれを定量的に評価できる位相シフトモアレ法を新たに提案し、精度のよい画素対応の調整手法を開発する。

モアレパターンの手法ではピッチが2画素の格子パターンを用いたが、位相シフトモアレ法では、4画素ピッチのバイナリ格子パターンを用いる。

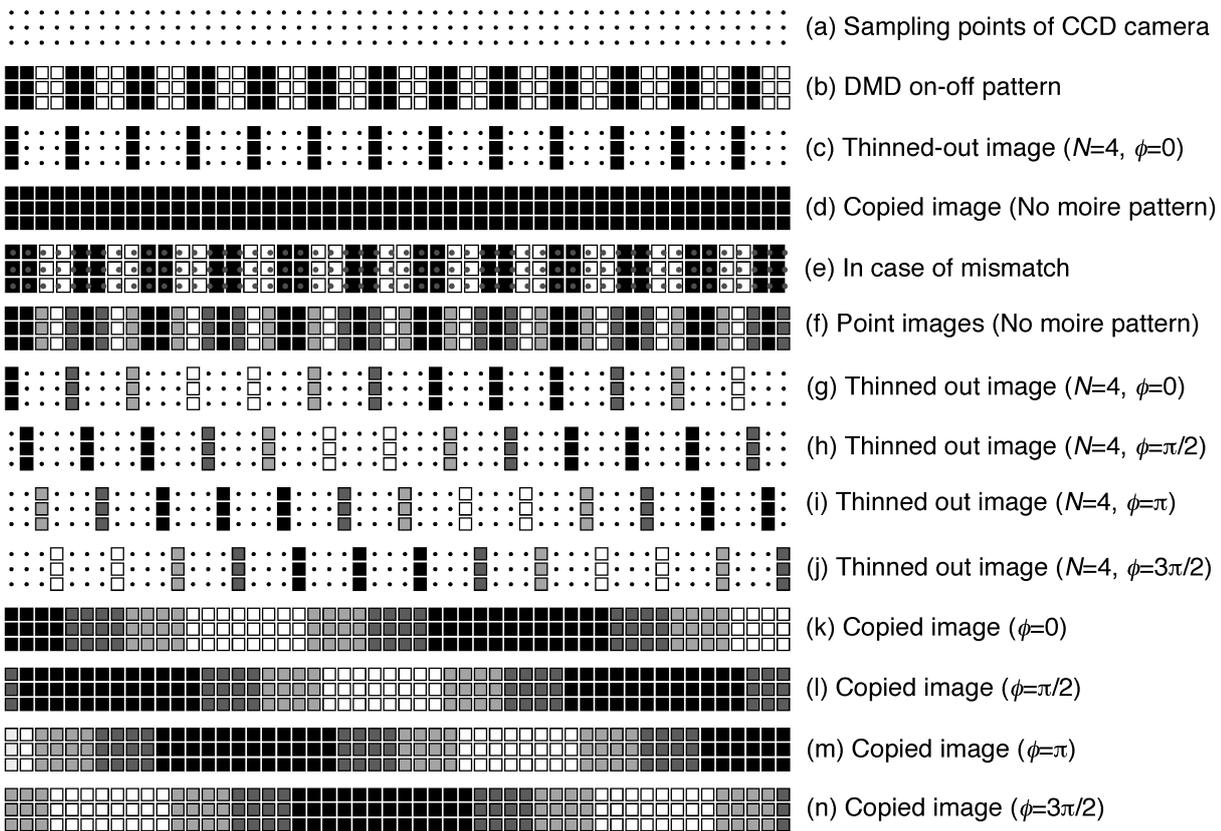


Figure 5.23 Appearance of the moiré pattern generated by the phase-shifting moiré method. Thinned-out images show phase-shifted moiré fringe patterns according to the thinning-out index N and the phase ϕ

位相シフトモアレ法は、図 5.12 で示すような 4 画素ピッチのバイナリ格子パターンを DMD で表示させたのち、CCD カメラでその画像を 1 枚撮影するだけで解析できる。得られた画像をもとに 4 枚の位相シフトされたモアレパターンを生成し、さらにその位相分布を求める。

図 5.23 に位相シフトモアレ法の原理を示す。図 5.23(a) における黒点は CCD カメラのサン

プリングの中心点を示し、図 5.23(b) に 4 画素ピッチの DMD の on-off パターンを示す。このとき、ちょうど DMD の各ミラーと CCD の各画素が 1 対 1 に対応している状態である。図 5.23(c) は図 5.23(b) の状態（画素対応できたとき）で 4 画素おきに間引くことによって得られる画像である。このままではピッチごとに残りの 3 画素は何もデータがないので、図 5.23(d) に示すように残りの 3 画素の輝度値は 1 番初めの画素の輝度値のデータを複製する。こうすることで、画像サイズは間引いた分だけ小さくならず、よりモアレ縞が観察しやすくなる。

次に、DMD の各ミラーと CCD の各画素がわずかだけずれた場合（ミスマッチの場合）を考える。図 5.23(e) にミスマッチの場合の DMD の on-off パターンを CCD のサンプリング関係を示す。図 5.23(f) はこのとき CCD カメラによって撮影される画像を示す。カメラでは画素ピッチの正方形の面積に入ってくる光の量を時間積分するため、白黒以外に灰色のデータが存在することがわかる。この段階ではモアレ縞を観察することはできないが、ピッチである 4 画素おきに間引き処理を行うと、図 5.23(g)～図 5.23(j) のようにモアレ縞を見ることができる。図 5.23(g) は左から 1 番目のサンプリング点から 4 画素おきに間引くのに対して、図 5.23(h)～図 5.23(j) はそれぞれ 2 番目、3 番目、4 番目のサンプリング点から間引いている。1 ピッチが 4 画素の格子に対して 1 画素ずつ間引く場所を変えることはちょうど位相で $\pi/2$ でシフトした状態になる。この処理はすなわち位相シフトに相当する。図 5.23(d) と同様な複製処理を行うと、図 5.23(k)～図 5.23(n) のような画像が得られる。このように、1 枚の画像（図 5.23(f)）から $\pi/2$ ずつ位相シフトさせた 4 枚のモアレパターン画像を得ることができる。

本手法は正弦波のパターンではなく、2 値のバイナリ格子を用いるため、得られるモアレ縞の輝度分布は厳密には正弦波の輝度変化になっていない。しかし、得られた各 4 枚の位相シフトされたモアレパターン画像に対して 5 画素 \times 5 画素の平滑化の画像処理を行うことで、モアレ縞は近似的に余弦波の輝度分布をもっているとみなすことができ、以下の式で表される。平滑化を行うと、元のモアレ縞の輝度振幅はわずかに変化するが、位相そのものは変わらない。

$$I_0(x, y) = I_b(x, y) + I_a(x, y) \cos\{\phi(x, y)\} \quad (5.11)$$

$$I_1(x, y) = I_b(x, y) + I_a(x, y) \cos\{\phi(x, y) + \pi/2\} \quad (5.12)$$

$$I_2(x, y) = I_b(x, y) + I_a(x, y) \cos\{\phi(x, y) + \pi\} \quad (5.13)$$

$$I_3(x, y) = I_b(x, y) + I_a(x, y) \cos\{\phi(x, y) + 3\pi/2\} \quad (5.14)$$

$I_b(x, y)$ は背景輝度であり、 $I_a(x, y)$ はモアレ縞の振幅である。 $\phi(x, y)$ はモアレ縞の初期位相である。最も一般的に用いられる 4 つの輝度値から位相を求める 4 ステップの位相シフト法を用いて以下の式によってモアレ縞パターンの位相値を得ることができる。

$$\tan \phi(x, y) = \frac{I_3(x, y) - I_1(x, y)}{I_0(x, y) - I_2(x, y)} \quad (5.15)$$

y 方向も同様に縦方向にピッチが4画素の白黒矩形波格子を表示させれば、 y 方向のモアレパターンの位相値を得ることができる。この手法では、4画素ずれると位相値 2π に相当するので、解析範囲の両端では $\pi/2$ の位相差があると1画素ずれていることになる。したがって、ミスマッチ量 m と x 方向の両端の位相差 $\Delta\phi_x$ は以下の関係が成り立つ。

$$m = \frac{p\Delta\phi_x}{2\pi} \quad (5.16)$$

m は図 5.12 においての z 方向の CCD カメラとレンズ 2 の位置（結像倍率）によって変わるパラメータである。 p はキャリブレーションパターンのピッチであり、この場合 4 である。また、ミスマライメント量 θ と y 方向の両端の位相差 $\Delta\phi_y$ は以下の関係が成り立つ。

$$\theta = \frac{p\Delta\phi_y}{2\pi} \quad (5.17)$$

式 (5.16) と式 (5.17) より解析したモアレパターンの画像の両端の位相値を解析すれば、精度よく画素対応のずれ量を知ることができる。

以上に述べた提案手法を用いると、CCD と DMD の空間位置のずれによって生じるモアレパターンの 2次元の位相分布を得ることができ、より正確に CCD と DMD の画素対応を行うことができる。また、2次元の位相分布のデータを用いて、倍率、傾き角度などのずれ量を求めることにより、光学系の自動調整を行うことも可能となる。

5.5.2 位相分布を用いた調整方法

5.5.3 調整実験結果および考察

図 5.24 に画素対応の調整時の実験結果の一例を示す。図 5.24(a) は DMD に 4画素ピッチのバイナリ格子を表示させてから CCD カメラによって撮影された画像である。図 5.24(b) は図 5.24(a) に対して、左から最初のサンプリング点から 4画素おきに間引いてからさらに複製して得られた画像である。同様に図 5.24(b)～図 5.24(e) は左から 2番目、3番目、4番目のサンプリング点から 4画素おきに間引いてからさらに複製して得られた画像である。このとき、左右方向のエリア A とエリア C の部分に対して x 方向、上下方向のエリア B とエリア D の部分に対して y 方向同時に間引いている。それぞれの画像では位相が $\pi/2$ ずつシフトしていることが確認できる。なお、図 5.24(b)～図 5.24(e) の 4枚の画像に対して、5画素 \times 5画素の平滑化も同時に行った。平滑化を行うことで、ぎざぎざの画像を滑らかにし、ノイズの少ない位相分布を求めることができる。元の画像の輝度値（振幅）が平滑化を行うことで変化するが、位相はずれることがなく、かえって

分解能が増す。図 5.24(b)～図 5.24(e) の 4 枚の画像を用いて、式 (5.15) より求めた位相分布を図 5.24(f) に示す。

次に調整途中の実験結果を図 5.25 に示す。図 5.25(a)～図 5.25(d) はそのときのモアレパターン ($\phi = 0$) であり、図 5.25(e)～図 5.25(h) は図 5.25(a)～図 5.25(d) のそれぞれの位相分布である。このようにモアレ縞の数 (位相差) を減らしながら調整を行い、最終的に図 5.25(h) のようなモアレ縞 (位相差) のない画像までに調整すれば画素対応ができる。このとき、 x 方向と y 方向の両端の位相差がそれぞれ 0.061 (rad) と 0.043 (rad) であり、これは理想値 0 に対して 1/25 画素と 1/37 画素の調整誤差に相当する。精度良く画素対応を行うことができたといえる。

図 5.26 に画素対応結果を示す。図 5.26(a) は DMD の on-off パターンを示す。全体で 14 画素 \times 9 画素の画像であり、1 ブロックは DMD の 1 画素である。図 5.26(b) はわずかにミスマッチが残っている状態で撮影された画像であり、図 5.26(c) は画素対応ができたときに撮影された画像である。元の画像を再現しており、画素対応ができていることがわかる。

5.6 DMD カメラを用いた画像処理の例

ここでは、DMD カメラを用いたいくつかの画像処理の例を示す。

5.6.1 リアルタイム画像処理

まず、単眼直行型タイプの光学系で様々な DMD の on-off パターンを表示させたときに撮影される画像を図 5.27 に示す。図 5.27(a) と図 5.27(f) はそれぞれ DMD のすべてのミラーが on のときの DMD パターンと撮影された画像である。従来の CCD と同じ画像が撮影されている。反対に、図 5.27(b) と図 5.27(g) はそれぞれ DMD のすべてのミラーが off のときの DMD パターンと撮影される画像であり、何も写らない状態である。図 5.27(c) と図 5.27(h) はそれぞれ DMD の一部が on のときの DMD パターンと撮影される画像である。DMD パターンが on の部分だけ画像が撮影されることになる。同様に、図 5.27(d) と図 5.27(i) もそれぞれ DMD の一部が on のときの DMD パターンと撮影される画像である。このように映ってほしくない部分はマスクをかけることができる。図 5.27(e) と図 5.27(j) はそれぞれグレースケールの DMD パターンと撮影される画像である。DMD は on-off の時間を調整することでグレースケールを表示させることができる。これを利用すれば、DMD カメラにおいて CCD の画素ごとの露光時間を調整することができる。

次に図 5.29 に双眼直行タイプでのリアルタイムの画像処理例を示す。実験で用いた光学系を図 5.28 に示す。図 5.29(a) は DMD のすべてのミラーを on (輝度値が 255) にした場合に撮影される画像である。このとき、物体 1 を撮影することができる。逆に図 5.29(b) は DMD のすべてのミラーを off (輝度値が 0) にした場合に撮影される画像である。このとき、物体 2 を撮影することができる。このように、DMD の on-off を切り換えることで、左と右の画像を個別に撮影すること

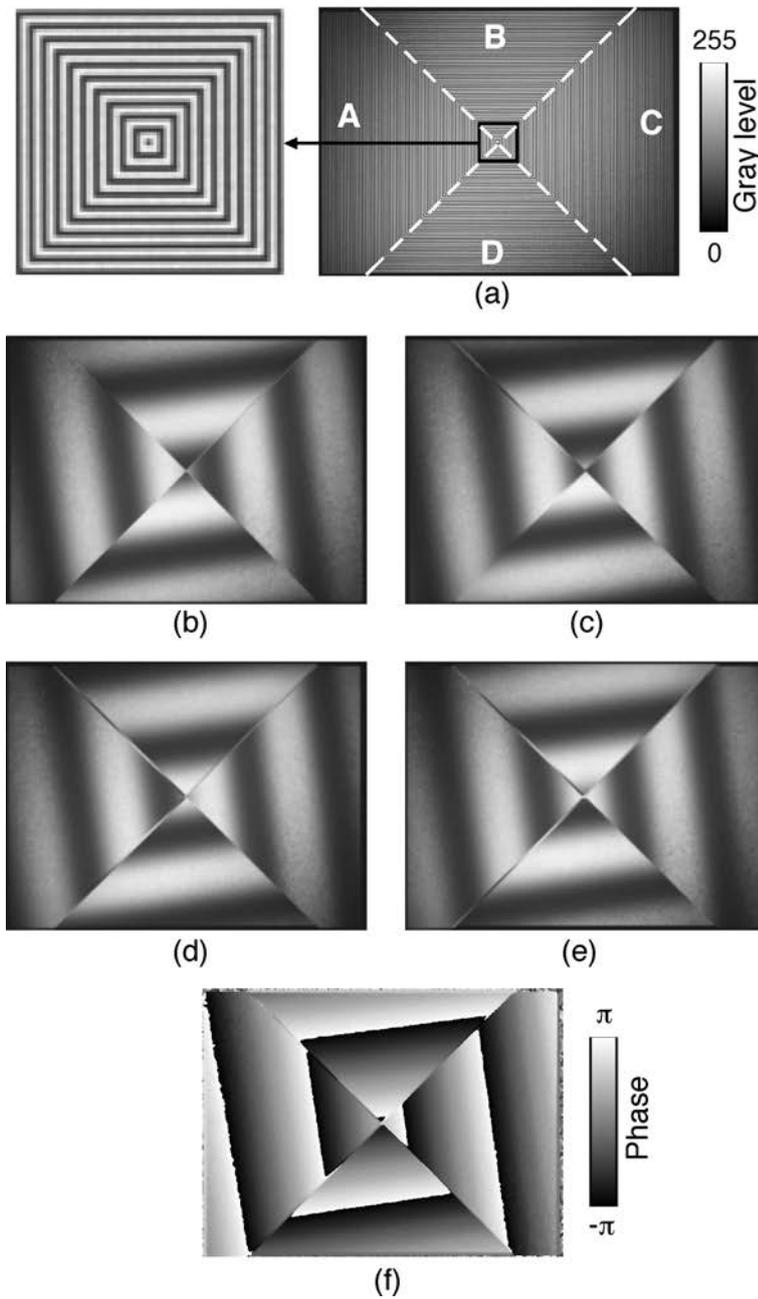


Figure 5.24 Phase analysis of the moiré fringe pattern obtained by the phase-shifting moiré method: (a) image taken by the DMD camera, phase-shifting images (b) $\alpha = 0$, (c) $\alpha = \pi/2$, (d) $\alpha = \pi$, (e) $\alpha = 3\pi/2$, which thinned out at every four pixels, and (f) the phase distribution

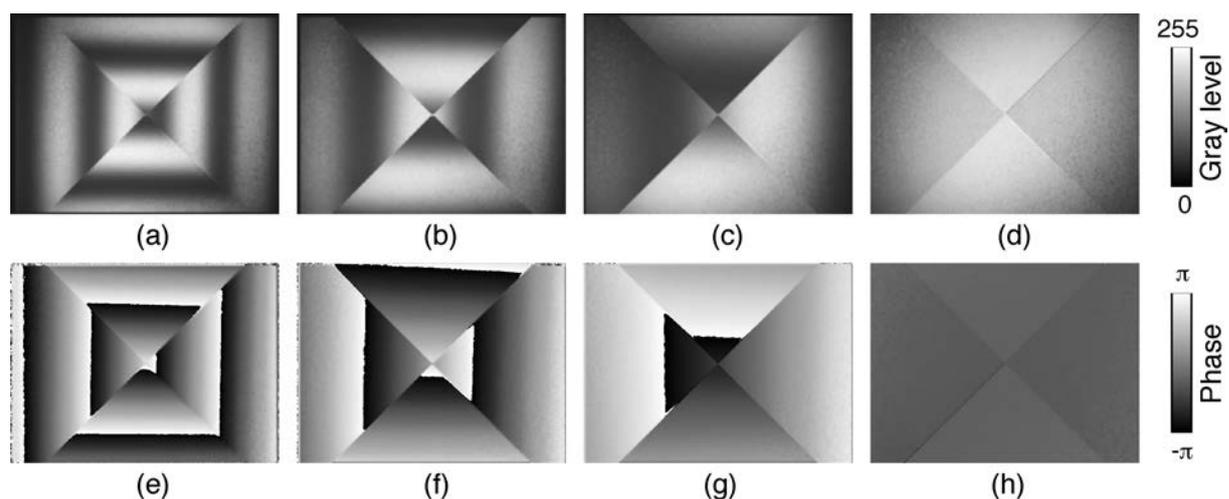


Figure 5.25 Experimental results of the phase distribution of moiré patterns by using the composed grating pattern: (a)–(d) moiré patterns, and (e)–(h) the phase distributions.

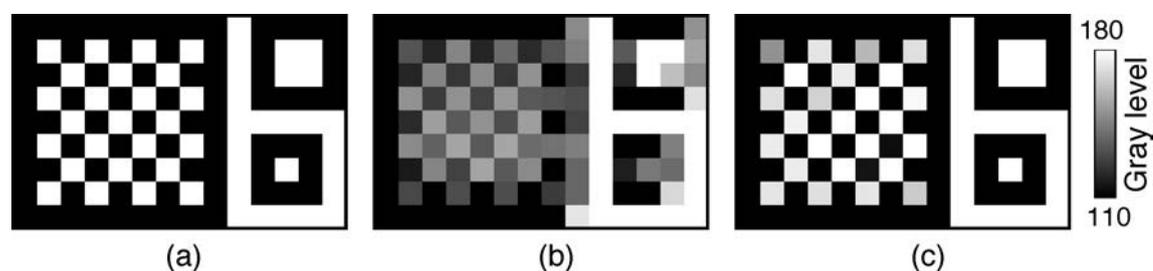


Figure 5.26 Experimental results of pixel-to-pixel correspondence taken by the DMD camera (each block is one pixel and the size is $6.25 \mu\text{m} \times 6.25 \mu\text{m}$): (a) ideal; (b) with small mismatch and misalignment; (c) without mismatch and misalignment

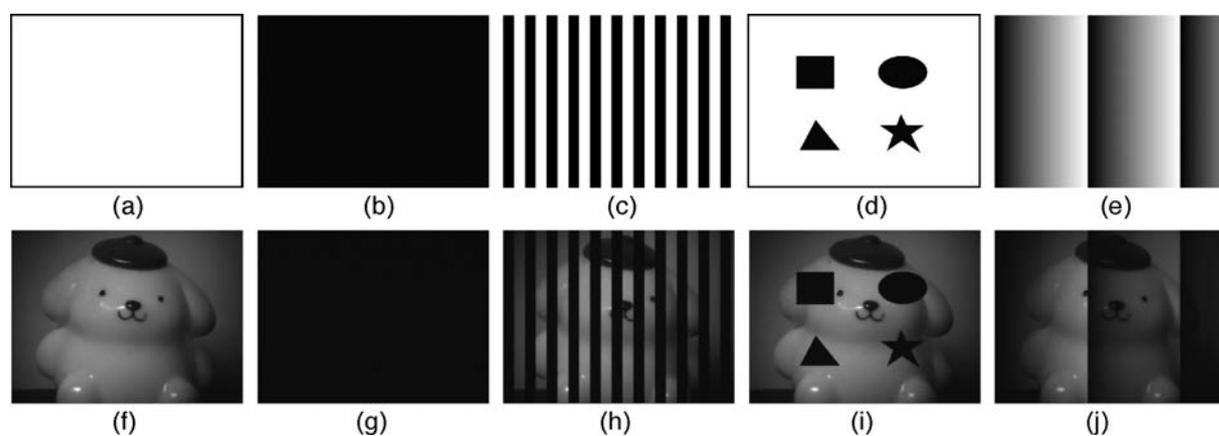


Figure 5.27 Experimental images (f)–(j) taken by the DMD camera when DMD pixel on-off patterns are set to (a)–(e), respectively.

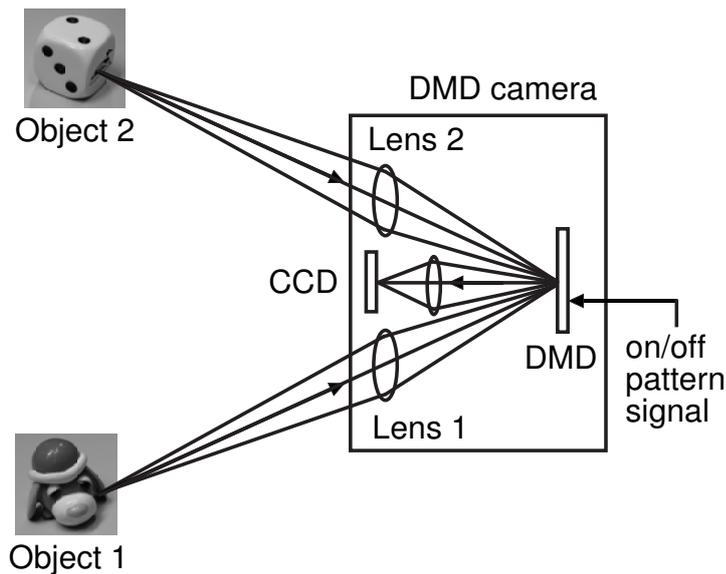


Figure 5.28 Experimental setup

が容易にできる。図 5.29(c) は、8 ビットのグレースケールの場合 DMD の表示パターンの輝度値が 128 (表示時間の半分は on, 半分は off) のときに撮影される画像である。一般的な画像処理で行う透かしの効果に相当する。図 5.29(d) は縦方向に 80 画素ピッチの矩形波格子を DMD パターンとして表示した場合に撮影される画像である。図 5.29(a) の画像と図 5.29(b) の画像を縦 80 画素分だけ交互に入れ替えた画像になっている。

このように、DMD カメラを用いることで、種々の画像処理がリアルタイムで行える。

5.6.2 広輝度レンジ画像の撮影

図 5.30 に広輝度レンジ画像を撮影した場合の一例を示す。縦ラインごとに DMD の輝度値が 255 (e_0), 64 (e_1), 16 (e_2) のパターンを表示させて CCD カメラで画像を撮影する。こうすることで、ラインごとに異なる露光時間の画像が得られることになる。1 次補間を行えば、同時に 3 つの異なる露光時間の画像を得ることができる。補間によって得られた e_0 と e_2 の画像をそれぞれ図 5.31(a) と図 5.31(b) に示す。この方法では、画像の空間分解能は低下するが、あまり高い解像度を必要せず大きく環境光が変わる場合の人物の識別や追跡などのアプリケーションに利用できる。

5.6.3 視差のついた画像の取得

立体感を高めるために、一般的に 2 台のカメラで物体の左右から撮影し、得られた視差のついた 2 枚の画像から立体画像を再生するディスプレイがある。この場合、2 台の CCD カメラを必要とするが、図 5.32 に示すような DMD を用いた光学系では 1 台のカメラで DMD の on-off パターンを切り換えることで左右から視差のついた画像を得ることができる。物体から反射された光は

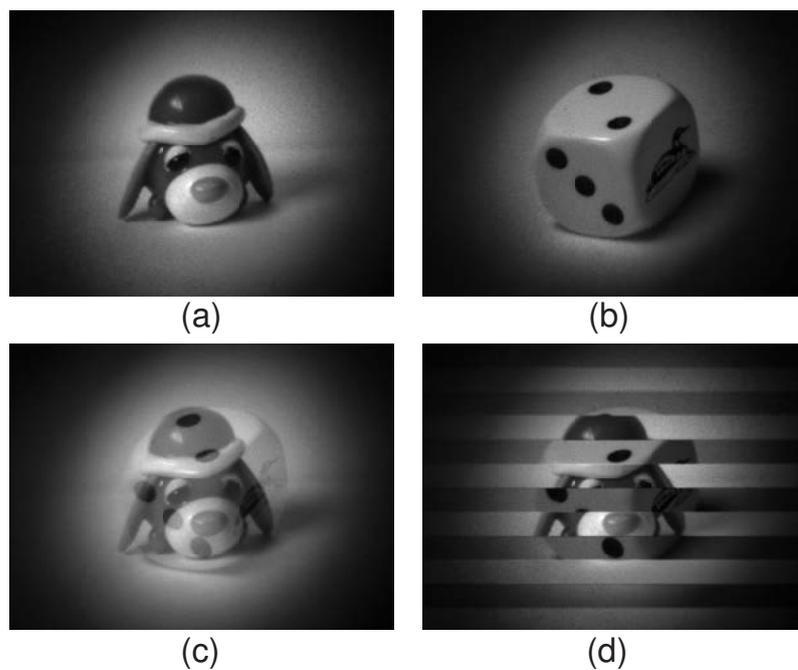


Figure 5.29 Experimental images captured by the gemini-scene straight type DMD camera when DMD on-off patterns are set to (a) on (grayscale 255), (b) off (grayscale 0), and (c) 50% on, 50% off (grayscale 128), (d) 80 pixels Ronchi grating in horizontal direction

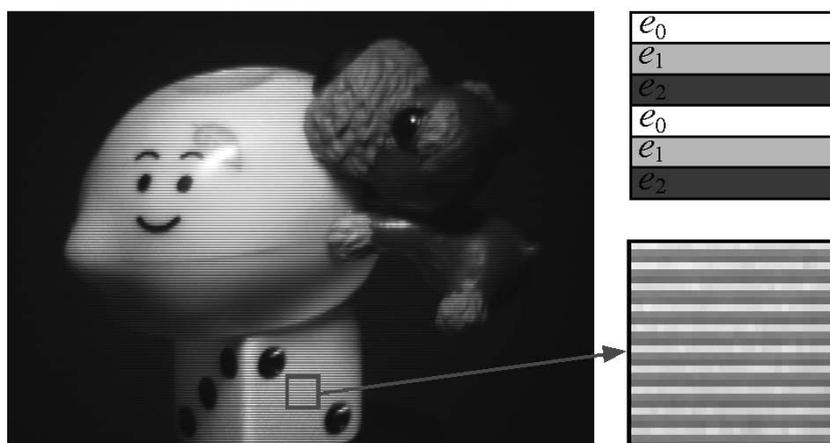


Figure 5.30 Experimental image captured by the DMD camera

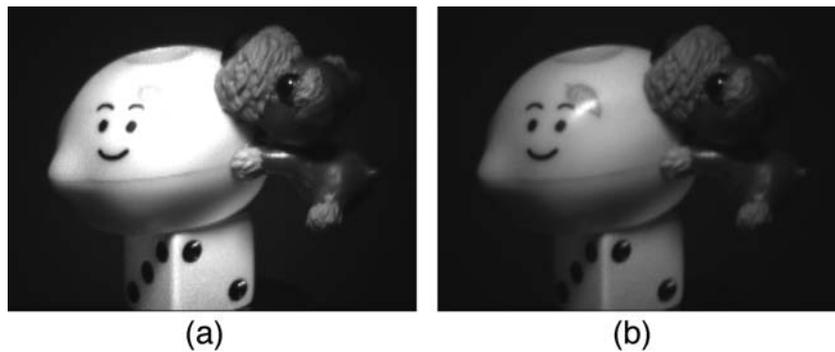


Figure 5.31 Images (a) e_0 and (b) e_2 after linear interpolated from Fig. 5.30

反射ミラー1と反射ミラー2によってそれぞれレンズ1を通してDMDの表面に結像し、レンズ2によって再びCCDに結像される。DMDのパターンはonのとき右から見た画像が写り、offのとき左から見た画像が写ることになる。図5.33(a)と図5.33(b)にそれぞれDMDカメラによって得られた視差のついた画像を示す。図5.33(c)は図5.33(a)と図5.33(b)を重ね合わせて表示した画像である。

5.7 まとめ

本章では、DMD反射式CCDカメラ(DMDカメラ)の開発を行った。Modulation transfer function(MTF)を指標としてDMDカメラの最適なレンズ選びと各ミラーを高速に制御できるDMD accessory light modulator package(ALP)ボードの導入を行った。

DMDカメラの厳密な画素対応を可能とする2つの調整方法を開発した。1つはモアレパターンを用いた調整手法であり、もう1つは位相解析を用いた調整手法である。モアレパターンを用いた調整手法は、リアルタイムで視覚的に光学系のずれを知ることができ、CCDの画素オーダーの精度で容易に調整を行うことができる。一方、位相解析を用いた調整手法では、1枚の画像により得られた画像データから光学系のずれを示すモアレパターンの位相分布を得ることが可能になった。その結果、従来DMDカメラにおいて非常に困難だった画素対応を画素オーダー以上の精度(実験では1/25画素)で調整を行うことができ、DMDとCCDの正確な画素対応が可能になった。最後に構築したDMDカメラを用いていくつかの画像処理の例を示し、その有効性を確認した。DMDカメラを用いればリアルタイムで種々の画像処理を行うことができる。

次章では、DMDカメラの特徴を利用して、格子投影法による位相解析・形状計測への応用を行い、新しい位相解析・形状計測手法を開発する。

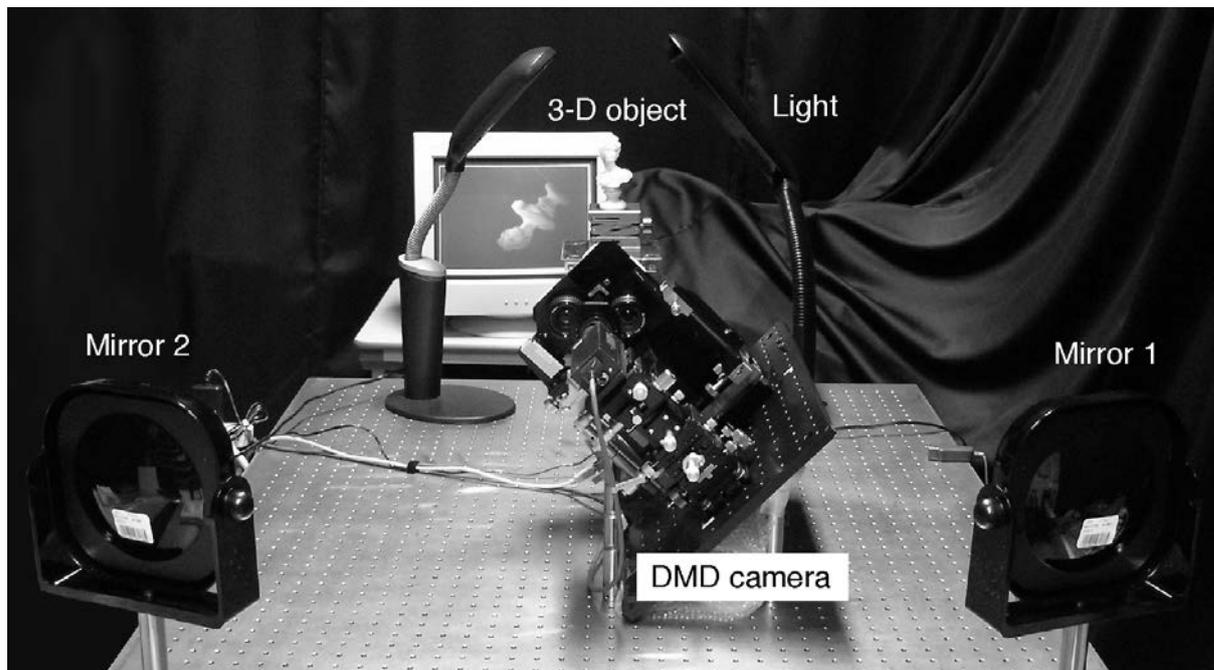


Figure 5.32 Experimental setup

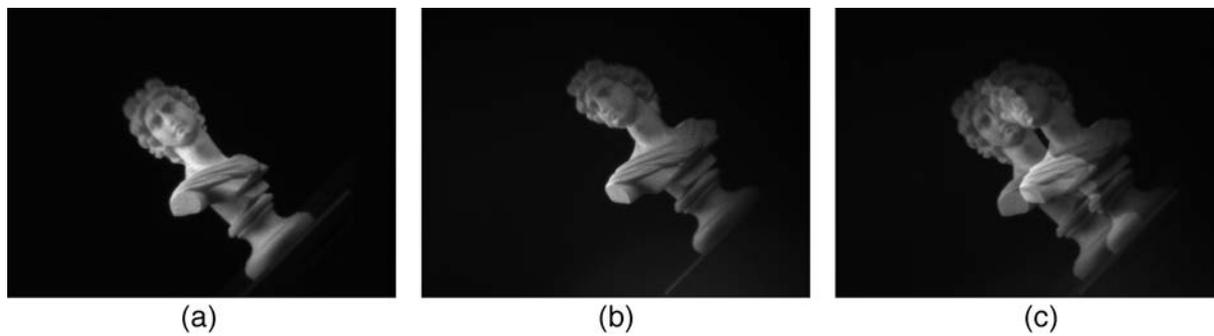


Figure 5.33 Experimental images captured by the DMD camera when DMD on-off patterns are set to (a) on, (b) off, and (c) 50% on, 50% off

第6章 DMDカメラを用いた位相解析・形状計測手法

6.1 はじめに

高い空間分解能が得られる手法として位相シフトされた複数枚のしま画像から位相分布を求める位相シフト法が広く用いられている。しかし従来の位相シフト法では、位相をシフトした後、格子の動きをいったん停止させてから撮影することを繰り返して複数枚の画像を撮影するため、高速化が困難である。一方、実時間で位相分布を求める手法として、低周波フィルタを用いて1枚のしま画像から位相シフトされた複数枚のモアレパターンを作成し、それらの画像から位相を求める方法が形状計測へ応用されている [130]。しかしこの手法は、空間的分解能が低くなる短所がある。

筆者が所属する研究室もこれまでに等高線の位相分布を実時間で求める手法として、位相シフト走査モアレ法 [131] や相関位相シフト法と積分型位相シフト法 [47,71] を開発してきた。しかし、これらの手法は投影格子の位相をシフトしながら複数枚の画像を撮影する必要があり、時間とともに形状が変化する物体に対しては誤差が大きくなるという問題がある。そこで、カメラの撮影時間である1/30秒間で位相分布を得ることのできるDMD積分型相関位相シフト法を開発した。従来の積分型相関位相シフト法では複数枚の画像を撮影する必要があるが、本手法を用いればDMDカメラのシャッター機能を利用することによって、一枚の画像で物体の位相分布を求めることができる。しかし、先行研究ではDMDの高速制御と画素対応ができていなかったため、準静的な実験でその原理のみを確認した。動的での計測まで至っていない。

また格子投影法で問題となるのは、様々な反射率をもつ物体では極端に暗いもしくは明るい部分は計測しにくいことが多い。金属のような物体ではかならず鏡面反射が起こる部分が生じ、その部分は一回の計測で全解析エリアを精度よく計測できないといった問題点がある。計測時間を増やすことなく広輝度レンジの形状計測手法が求められる。

輝度レンジを広げる目的として、これまでの行われた先行研究を以下に挙げる。

Prollら [132] はカラーカメラのRGB成分（チャンネル1，チャンネル2，チャンネル3に相当する）を利用して、一回の撮影で同時に異なる3つの輝度値を得ることで、従来の白黒カメラに比べて、輝度レンジを5.26倍まで広げることができた。この手法は致命的な欠点はないが、広げられる輝度レンジが約5倍程度にとどまる。

Nayarら [133] は、画像処理の分野において、CCDカメラの前に置かれた液晶パネルの明るさ（光の通過率）を制御することで広輝度レンジのカメラを構築した。これより逆光のシーンでもサ

チレーションすることなく撮影することができた。しかし、CCD 素子の前面に液晶があるため、得られる画像はかなりぼやけるといった決定的な欠点があった。そのため、位相解析や形状計測分野には不向きであった。

さらに Nayar ら [134, 135] は DMD (Digital Micro-mirror Device) 素子を用いた広輝度レンジの手法も提案し、コンピュータビジョンの分野で利用している。この手法で用いる光学系が本研究と非常に似ているが、画素対応がきちんとできていないため、画素ごとに露光時間を調整することはできていない。位相解析や形状計測の分野には使われていない。

著者らも第4章第4節で述べたように形状合成手法としてフーリエ変換位相シフト法における位相解析の位相値の信頼性を評価する位相信頼性評価値を提案した。露光時間を変えて複数回計測を行い、位相信頼性評価値を重み係数として合成することで、著しい反射率の差がある物体でも計測することができた。しかし、問題点として計測時間が計測回数にほぼ比例して増加してしまうことと各画素の輝度変化が必ずしも最適な露光時間になっていないことが挙げられる。

以上で述べたこれらの問題点を解決するために、本章では第5章で開発した DMD カメラを用いて、DMD 積分型相関位相シフト法における動の実験での位相解析手法と広輝度レンジの形状計測手法を提案する。6.2 節では、DMD 積分型相関位相シフト法の原理について述べる。6.3 節では、静的および動の実験での実験結果を示す。6.4 節では、広輝度レンジの形状計測手法の原理と実験結果を述べる。DMD カメラを用いることで、画素ごとに位相解析にとって最も振幅が高くなるような露光時間に調整することができ、広輝度レンジの位相解析が実現できる。最後に 6.5 節では、得られた成果をまとめる。

6.2 DMD 積分型相関位相シフト法による位相解析手法

6.2.1 積分型相関位相シフト法の原理

本手法では矩形波状の光強度分布を持つ格子を用いる。図 6.1(a) に、撮影対象物体上にある 1 点における投影格子の位相シフト量 α と光強度の関係を示す。これは格子の初期位相が ϕ の場合の光強度変化である。

場所に対して矩形波状に輝度に変化する格子について、座標 x における矩形波を表す関数 $R(x)$ を式 (6.1) のように定義する。

$$R(x) = \begin{cases} 1 & (\cos(\alpha) \geq 0) \\ -1 & (\cos(\alpha) < 0) \end{cases} \quad (6.1)$$

初期位相を ϕ とすれば、格子の位相をシフトすることにより、1 点における輝度の変化 $I(\alpha, \phi)$ は式 (6.2) のように表すことができる。

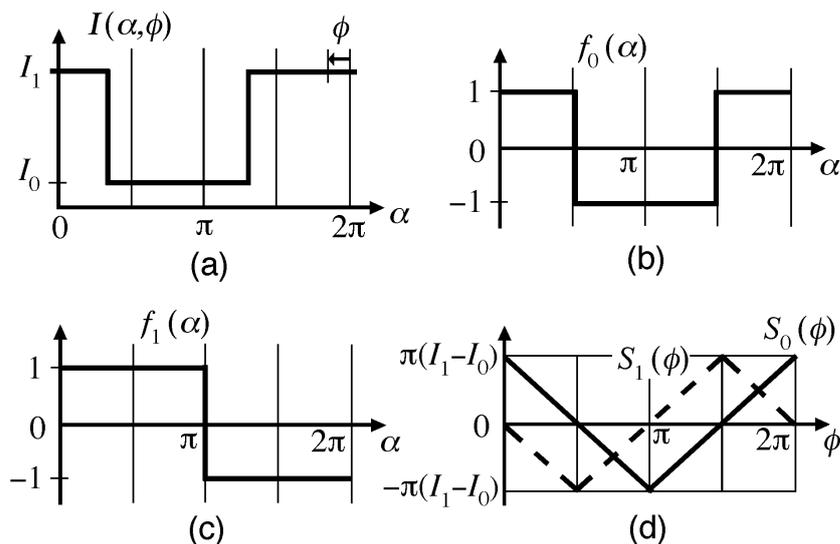


Figure 6.1 DMD integrated phase-shifting method using correlation: (a) brightness distribution of projected grating; (b) weight function $f_0(\alpha)$; (c) weight function $f_1(\alpha)$; and (d) integration values $S_0(\phi)$ and $S_1(\phi)$

$$I(\alpha, \phi) = \frac{I_1 - I_0}{2} \cdot R(\alpha + \phi) + \frac{I_1 + I_0}{2} \quad (6.2)$$

ここで、 I_0 と I_1 は、それぞれ矩形波格子の最小輝度値と最大輝度値である。さらに、二つの重み関数 $f_0(\alpha)$ と $f_1(\alpha)$ をそれぞれ式 (6.3) と (6.4) のように定義する。

$$f_0(\alpha) = \begin{cases} +1 & (\cos(\alpha) \geq 0) \\ -1 & (\cos(\alpha) < 0) \end{cases} \quad (6.3)$$

$$f_1(\alpha) = \begin{cases} +1 & (\sin(\alpha) \geq 0) \\ -1 & (\sin(\alpha) < 0) \end{cases} \quad (6.4)$$

図 6.1(a) に示す光強度変化に図 6.1(b) と図 6.1(c) にそれぞれ示す重み関数 $f_0(\alpha)$ と $f_1(\alpha)$ を掛け、式 (6.5) と式 (6.6) に示す積分を行うことにより、相関係数 $S_0(\alpha)$ と $S_1(\alpha)$ を得る。

$$\begin{aligned}
S_0(\phi) &= \int_0^{2\pi} I(\alpha, \phi) \cdot f_0(\alpha) d\alpha \\
&= \int_0^{\pi/2} I(\alpha, \phi) d\alpha - \int_{\pi/2}^{3\pi/2} I(\alpha, \phi) d\alpha + \int_{3\pi/2}^{2\pi} I(\alpha, \phi) d\alpha
\end{aligned} \tag{6.5}$$

$$\begin{aligned}
S_1(\phi) &= \int_0^{2\pi} I(\alpha, \phi) \cdot f_1(\alpha) d\alpha \\
&= \int_0^{\pi} I(\alpha, \phi) d\alpha - \int_{\pi}^{2\pi} I(\alpha, \phi) d\alpha
\end{aligned} \tag{6.6}$$

このようにして得られた $S_0(\phi)$ と $S_1(\phi)$ (以降略して S_0 と S_1 と表示する) および格子の初期位相 ϕ との関係はそれぞれ式 (6.7) と式 (6.8) のようになる.

$$S_0 = \begin{cases} (-2\phi + \pi)(I_1 - I_0) & (0 \leq \phi < \pi) \\ (2\phi - 3\pi)(I_1 - I_0) & (\pi \leq \phi < 2\pi) \end{cases} \tag{6.7}$$

$$S_1 = \begin{cases} (-2\phi)(I_1 - I_0) & (0 \leq \phi < \pi/2) \\ (2\phi - 2\pi)(I_1 - I_0) & (\pi/2 \leq \phi < 3\pi/2) \\ (-2\phi + 4\pi)(I_1 - I_0) & (3\pi/2 \leq \phi < 2\pi) \end{cases} \tag{6.8}$$

式 (6.7) と式 (6.8) を図示すると, 図 6.1(d) のようになる. 式 (6.7) と式 (6.8) から ϕ を求めると, 式 (6.9) が得られる.

$$\phi = \begin{cases} \frac{-S_1}{S_0 - S_1} \cdot \frac{\pi}{2} & (0 \leq \phi < \pi/2) \\ \frac{2S_0 + S_1}{S_0 + S_1} \cdot \frac{\pi}{2} & (\pi/2 \leq \phi < \pi) \\ \frac{2S_0 - 3S_1}{S_0 - S_1} \cdot \frac{\pi}{2} & (\pi \leq \phi < 3\pi/2) \\ \frac{4S_0 + 3S_1}{S_0 + S_1} \cdot \frac{\pi}{2} & (3\pi/2 \leq \phi < 2\pi) \end{cases} \tag{6.9}$$

$$\begin{cases} S_0 = |S_0|, & -S_1 = |S_1| & (0 \leq \phi < \pi/2) \\ -S_0 = |S_0|, & -S_1 = |S_1| & (\pi/2 \leq \phi < \pi) \\ -S_0 = |S_0|, & S_1 = |S_1| & (\pi \leq \phi < 3\pi/2) \\ S_0 = |S_0|, & S_1 = |S_1| & (3\pi/2 \leq \phi < 2\pi) \end{cases} \tag{6.10}$$

式 (6.9) と式 (6.10) から式 (6.11) のように $0 \leq \phi < 2\pi$ の範囲で場合分けしない形にまとめることができる.

$$\phi = \left\{ 2 + \frac{S_1}{|S_1|} + \frac{S_1 \cdot S_0}{|S_1| \cdot (|S_0| + |S_1|)} \right\} \cdot \frac{\pi}{2} \quad (0 \leq \phi < 2\pi) \tag{6.11}$$

したがって S_0 と S_1 を求めれば、式 (6.11) により図 6.1(a) における格子の初期位相 ϕ を求めることができる。

6.2.2 DMD 積分型相関位相シフト法の原理

相関係数 S_0 と S_1 を得るため、式 (6.5) と式 (6.6) を積分範囲が $\pi/2$ ずつになるように書き直すと、それぞれ式 (6.12) と式 (6.13) のようになる。

$$S_0 = \int_0^{\pi/2} I(\alpha, \phi) d\alpha - \int_{\pi/2}^{\pi} I(\alpha, \phi) d\alpha - \int_{\pi}^{3\pi/2} I(\alpha, \phi) d\alpha + \int_{3\pi/2}^{2\pi} I(\alpha, \phi) d\alpha \quad (6.12)$$

$$S_1 = \int_0^{\pi/2} I(\alpha, \phi) d\alpha + \int_{\pi/2}^{\pi} I(\alpha, \phi) d\alpha - \int_{\pi}^{3\pi/2} I(\alpha, \phi) d\alpha - \int_{3\pi/2}^{2\pi} I(\alpha, \phi) d\alpha \quad (6.13)$$

I_A, I_B, I_C, I_D をそれぞれ式 (6.14) のように定義する。

$$\begin{cases} I_A = \int_0^{\pi/2} I(\alpha, \phi) d\alpha \\ I_B = \int_{\pi/2}^{\pi} I(\alpha, \phi) d\alpha \\ I_C = \int_{\pi}^{3\pi/2} I(\alpha, \phi) d\alpha \\ I_D = \int_{3\pi/2}^{2\pi} I(\alpha, \phi) d\alpha \end{cases} \quad (6.14)$$

I_A, I_B, I_C, I_D はそれぞれ位相シフト量 $0 \sim \pi/2$, $\pi/2 \sim \pi$, $\pi \sim 3\pi/2$, $3\pi/2 \sim 2\pi$ における光強度の積分値を意味している。これらによって、 S_0 と S_1 は式 (6.15) のようになり、 I_A, I_B, I_C, I_D の値を求めることによって、初期位相 ϕ を求めることができる。

$$\begin{cases} S_0 = I_A - I_B - I_C + I_D \\ S_1 = I_A + I_B - I_C - I_D \end{cases} \quad (6.15)$$

第 5 章で述べたように、DMD カメラでは、CCD の画素ごとに高速に制御できるシャッター機能を持つため、CCD カメラの各画素の輝度値をシャッターが開いている時間の光強度の時間積分値として得ることができる。CCD の各画素とそれぞれに対応する DMD 画素を図 6.2(b) または図 6.2(c) に示すような配列で A, B, C, D の 4 組に分ける。投影格子の位相シフトを連続的に行うとき、A の画素には $0 \sim \pi/2$, B には $\pi/2 \sim \pi$, C には $\pi \sim 3\pi/2$, D には $3\pi/2 \sim 2\pi$ の位相シフト量のときだけシャッターを開いて光強度の時間積分を行うようにする。このようにすることによって、対応する CCD の画素の組 A, B, C, D にはそれぞれ式 (6.14) に示すような輝度値 I_A, I_B, I_C, I_D が得られることになる。

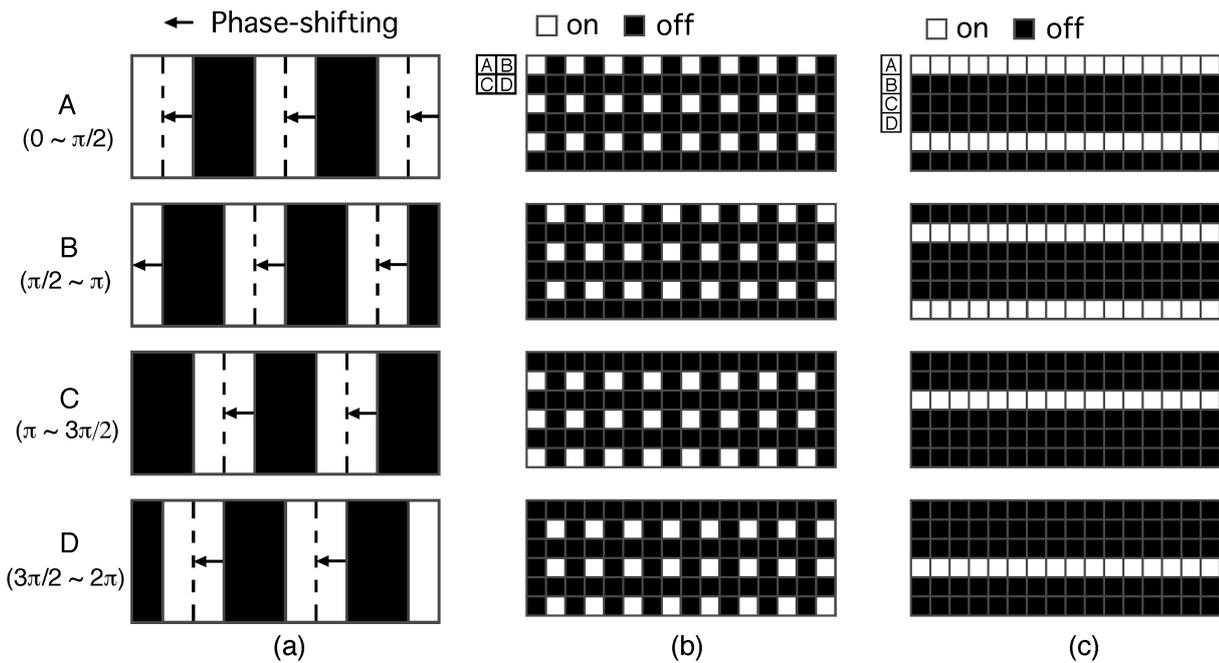


Figure 6.2 Projected gratings and on-off patterns transferred to DMD to obtain phase distribution by integrated phase-shifting method using correlation: (a) projected grating patterns; (b) DMD on-off patterns (checkboard arrangement); and (c) DMD on-off patterns (stripe arrangement)

この手法を用いれば、CCD カメラの1フレームで撮影された画像から、画素ごとの位相値を求めることができる。従来の複数枚の画像を用いた方法と比べて、物体の動きによる誤差が大きく軽減される。

6.2.3 積分型相関位相シフト法における位相信頼性評価値の提案

位相シフト法では、投影格子の振幅が大きいほどノイズに対するSN比が高く、得られる位相値の信頼性が高いと考えられる。しかし、積分型相関位相シフト法では位相を求めるのに、得られるのは相関係数の S_0 と S_1 のみである。投影した矩形波状の格子の振幅に相当する値がない。そこで、相関係数である S_0 と S_1 の関係について注目し、新たに積分型相関位相シフト法における位相信頼性評価値 (PREV/COR) を提案する。その値を式 (6.16) に示す。相関係数 S_0 と S_1 のそれぞれの絶対値の和を求めることで物体に投影する格子の振幅に相当する値が得られる。これより、信頼性の高い位相値から低い位相値への位相接続が可能になり、位相アンラッピング処理における位相接続のミスを最小限に止めることができる。

$$R(i, j) = |S_0(i, j)| + |S_1(i, j)| \quad (6.16)$$

6.2.4 画像補間方法

ここでは、画像補間方法について説明する。図 6.3 にその方法を示す。DMD 積分型相関位相シフト法では、撮影される画像の配置は図 6.3(a) もしくは図 6.3(b) のようになる。

図 6.3(a) において、2 画素 × 2 画素の正方形の配置の場合の輝度値 I_A, I_B, I_C, I_D を画素ごとに求める手法を示す。ここでは、4 画素 × 4 画素の拡大図を示している。A グループに注目すると、ある 1 画素（座標 (i, j) ）における輝度値 I_B, I_C, I_D の値はその周辺の 8 画素の輝度値から式 (6.17) に示すような 1 次補間によって求めることができる。同様の計算式で全ての画素について輝度値 I_A, I_B, I_C, I_D を求めることができる。このようにして得られた I_A, I_B, I_C, I_D を用いて式 (6.11) と式 (6.15) により、初期位相 ϕ を求めることができる。

$$\begin{aligned}
 I_{A(i,j)} &= I_{A(i,j)} \\
 I_{B(i,j)} &= \{I_{B(i-1,j)} + I_{B(i+1,j)}\}/2 \\
 I_{C(i,j)} &= \{I_{C(i-1,j-1)} + I_{C(i+1,j-1)} + I_{C(i-1,j+1)} + I_{C(i+1,j+1)}\}/4 \\
 I_{D(i,j)} &= \{I_{D(i,j-1)} + I_{D(i,j+1)}\}/2
 \end{aligned} \tag{6.17}$$

次に図 6.3(b) において、横ストライプ状の配置の場合の輝度値 I_A, I_B, I_C, I_D を画素ごとに求める手法を示す。ここでは、5 画素 × 6 画素の拡大図を示している。同様に A グループに注目すると、ある 1 画素（座標 (i, j) ）における輝度値 I_B, I_C, I_D の値はその上下の 3 画素の輝度値から式 (6.18) に示すような 1 次補間によって求めることができる。初期位相 ϕ を求める手順は正方形の配置の場合と同様である。

$$\begin{aligned}
 I_{A(i,j)} &= I_{A(i,j)} \\
 I_{B(i,j)} &= \{I_{B(i,j-3)} + 3 \times I_{B(i,j+1)}\}/4 \\
 I_{C(i,j)} &= \{I_{C(i,j-2)} + I_{C(i,j+2)}\}/2 \\
 I_{D(i,j)} &= \{3 \times I_{D(i,j-1)} + I_{D(i,j+3)}\}/4
 \end{aligned} \tag{6.18}$$

横ストライプ状の配置の場合は正方形の配置の場合より以下の利点が挙げられる。

1. 横方向（位相シフト方向）の解像度が向上する
2. 隣り合う画素からの光量漏れの影響はほとんど受けない
3. 光学系のずれに対する影響が小さい

正方形の配置の場合では2画素×2画素、横ストライプ状の配置の場合では1画素×4画素を大きな一つの画素とみなすことができる。正方形の配置に比べて横方向の解像度が2倍になる。横ストライプ状の配置での投影格子の移動方向は横方向であるので、横方向の解像度の増加により位相解析の精度が向上する。

また隣り合う画素の輝度が混じりあう現象によるそれぞれのパターンで撮影される画像の輝度の変化を考える。正方形のパターンでは八方を取り囲むすべての画素が他のパターンにより撮影された画素になるので、隣接する画素による位相解析結果への影響が大きい。

一方、横ストライプ状の配置の場合では、同じパターンで撮影される画素は横一列にならんでいるので、隣接する画素で他のパターンにより撮影された画素は上下の3画素のみとなる。各パターンで撮影された画素の上下に位置するパターンで撮影された画素では、格子の位相シフト量がちょうど π がずれているため、互いの光量漏れを打ち消す形になる。このことから横ストライプ状の配置の場合では隣接する画素からの輝度の混合による位相解析結果への影響が少ないことがわかる。

さらに、正方形の配置の場合ではDMDとCCDの画素を1対1に対応させる際に、縦、横ともに完全に画素が一致していなければならないが、横ストライプ状の配置の場合ではonの画素が横一列に並んでいるために横方向が多少ずれていても問題がない。そのため光学系のずれに対する影響が小さいと言える。このような理由から、次節で述べる実験は横ストライプ状の配置で行った。

6.2.5 DMD, CCD と格子投影の同期

動的な実験を行うためには、CCDカメラの撮影タイミングとDMDのon-offパターンの切り換えタイミング、さらに格子移動を同期させる必要がある。

同期させるためには、まずCCDカメラをトリガーモードに設定し、外部からのパルスによって撮影されるタイミングを制御する。次にDMDではスレーブモードに設定し、図5.11のBNC端子にパルス信号入力すれば即座に事前にロードされているDMDパターンを切り換えることができる。最後に投影格子はステップモータに送るパルスによって移動させている。本研究で用いるステップモータと格子のピッチの関係より100パルスの信号を送ることでちょうど1周期位相シフトさせることができる。

図6.4にDMD, CCDと格子投影の同期チャートを示す。1フレームの間CCDカメラには1パルス、DMDには4パルス、ステップモータには100パルスの信号をタイミング合わせて同時に送ることで、各デバイスの同期をとることができるようになる。H8マイコンでこの同期回路を作製して実験で用いる。

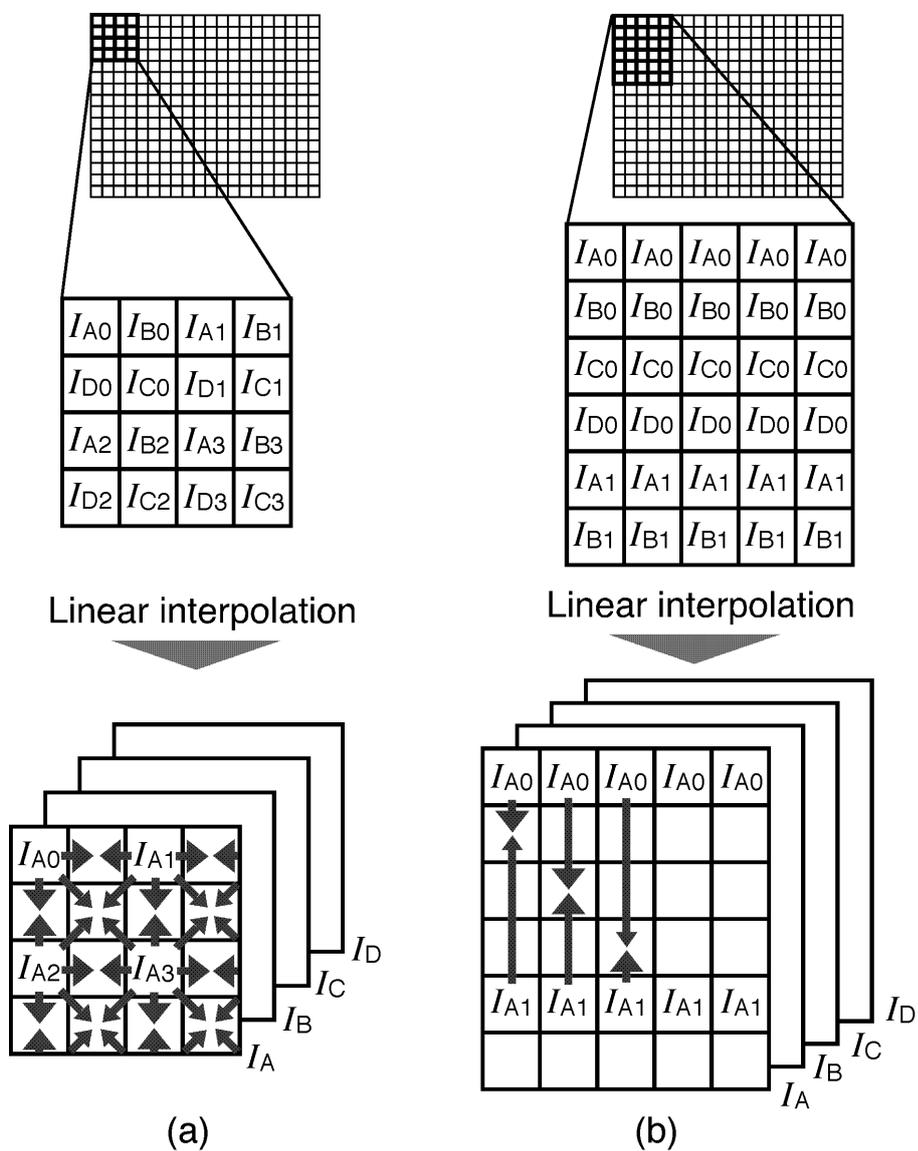


Figure 6.3 Interpolate method: (a) checkboard arrangement and (b) stripe arrangement

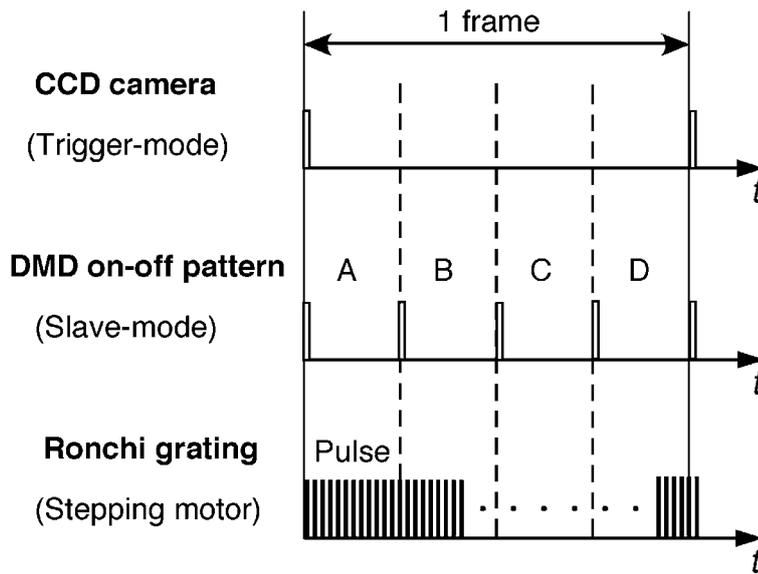


Figure 6.4 Synchronization timing chart of DMD, CCD trigger, and phase-shifting

6.2.6 2枚の基準面を用いた形状計測手法への適用

これまでに述べた方法で1フレームで物体の高さを表す位相分布を得ることができる。ここでは、2枚の基準面を用いて位相分布から高さ分布を求めることのできる手法について述べる。

図 6.5 において、 $\triangle KLM$ と $\triangle ONM$ は相似関係にあるので、2枚の基準面における格子の位相値と高さの関係は式 (6.19) となる。

$$(z_1 - z_0) : (z - z_0) = (\phi_1 - \phi_0) : (\phi - \phi_0) \quad (6.19)$$

これを求めたい高さである z について解くと、式 (6.20) が得られ、物体の高さを得ることができる。

$$z = \frac{(z_1 - z_0)(\phi - \phi_0)}{\phi_1 - \phi_0} + z_0 \quad (6.20)$$

6.2.7 高速位相シフト法への応用

DMD 積分型相関位相シフト法を用いれば1フレームの撮影時間中に DMD の4種類の on-off パターンを表示することで、高さ分布画像を得ることができる。図 6.6 に示すように1フレームの撮影時間 (1/30 秒) のうちの 1/7500 秒間に、DMD に表示するパターンを4回 A, B, C, D と切り換えれば、1/7500 秒間で位相シフトが行われた画像を撮影することができる。この手法を用いることで、これまでに高速度カメラを利用しなければ不可能であった高速現象の形状や変形計測が可能となる。

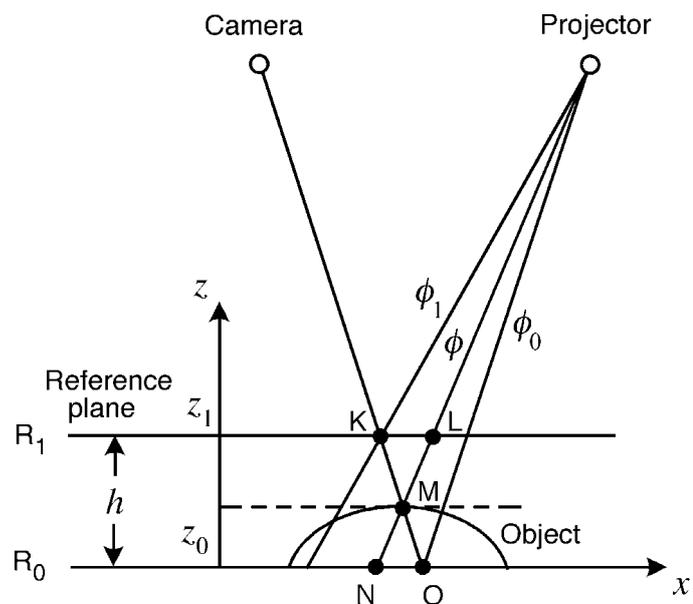


Figure 6.5 Relationship between phase and height

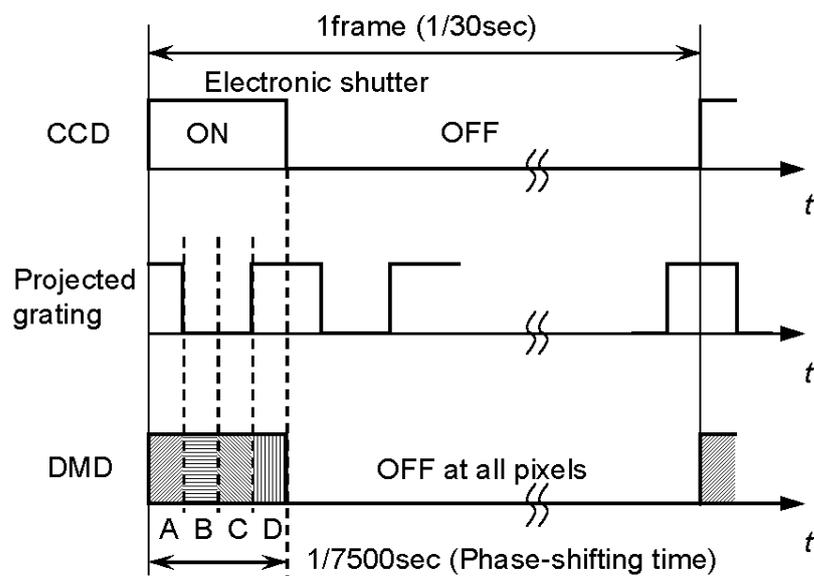


Figure 6.6 High-speed phase-shifting method using a DMD camera

6.3 実験

6.3.1 実験方法

画素対応の調整を行ったのちに、図 6.7(a) に示すような光学系で実験を行う。矩形波格子はプロジェクタから物体の表面に投影され、反射された光は DMD カメラに記録される。撮影された画像はパソコンのソフトウェア上に保存される。DMD の on-off パターンはソフトウェアによって作成され DMD ALP ボードに転送される。転送されたパターン画像は DMD ボードのメモリーに保存されるため、測定前に一度読み込めばよい。CCD カメラのトリガーと DMD の A, B, C, D パターンの切り換えタイミングと格子の移動の同期はすべて H8 マイコンから発信されるパルス信号によって制御される。測定回数と間隔を指定すれば、パソコンから RS-232C を通じて H8 マイコンにそのコマンドが送られ、測定が開始される。

図 6.7(b) に光学系の写真を示す。このとき、プロジェクタから物体までの距離は 720 mm であり、DMD カメラから物体までの距離は 1380 mm である。プロジェクタと DMD カメラのなす角度は 24 度である。測定できる視野は約 100 mm×75 mm である。

実験ではまず、パソコンのマウスの形状計測を行って、形状が測定できるかどうかを確認する。さらに同じ状態で平面を測定し、静的な状態での精度を確認する。次に手が握る瞬間の動きを計測する。これより、動的な状態でも形状が得られるかどうかを確認する。実験では、CCD のシャッタースピードは 66.7 ms、DMD の A, B, C, D パターンのそれぞれの表示時間を 16.6 ms に設定している。さらに平面の基準面を移動ステージを用いて一定のスピードで動かし、動的な状態での精度を確認し、本手法の有効性を確認する。

6.3.2 結果および考察

まず、静的な状態でマウスの形状計測の実験結果を図 6.8 に示す。図 6.8(a) は投影格子の様子であり、図 6.8(b) は DMD カメラによって撮影されたワンショットの画像である。わかりやすいように右ウィンドウに一部の画像の拡大図を示す。図 6.8(c) は画像図 6.8(b) から補間より求めた 4 枚の位相シフトされたうちの 1 枚の画像 I_A (初期位相 $\alpha = 0$) である。図 6.8(d) は図 6.8(c) などの 4 枚の位相シフト画像から求めた位相分布であり、図 6.8(e) は基準面との位相差より求めた高さ分布である。このように、DMD カメラを用いることで 1 枚の画像を撮影するだけで物体の高さ分布を得ることができる。同じ状態で $z = 0$ mm の位置にある平面を測定したところ、中央部の 135 画素 × 120 画素の計 16,200 点の平均値と理想値の平均誤差は 0.09 mm、標準偏差は 0.15 mm であり、本手法の有効性が示された。

応用例として図 6.9 に手を握る瞬間の動きを計測した結果を示す。図 6.9(a)～図 6.9(c) はそれぞれ $t = 0$ 秒、 $t = 2/15$ 秒、 $t = 4/15$ 秒のときに計測された位相差分布結果である。動的な状態でも形状が得られることが確認できた。このように身体や筋肉の動きなどを計測することができ、

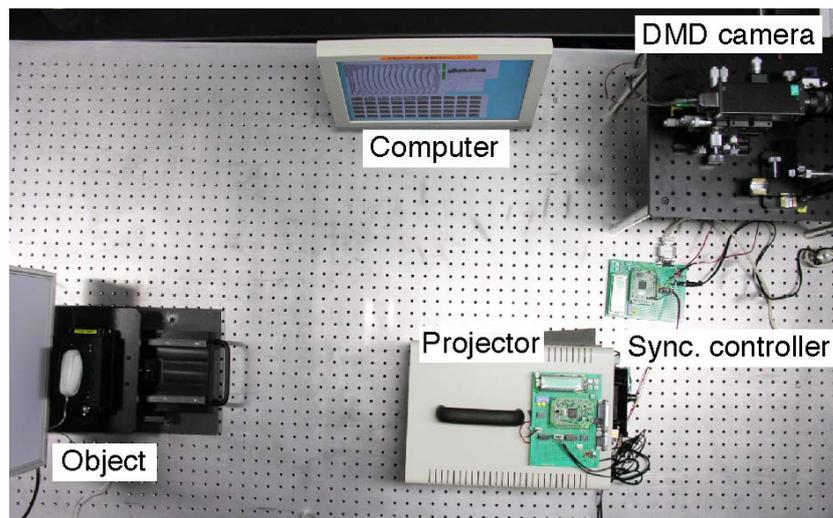
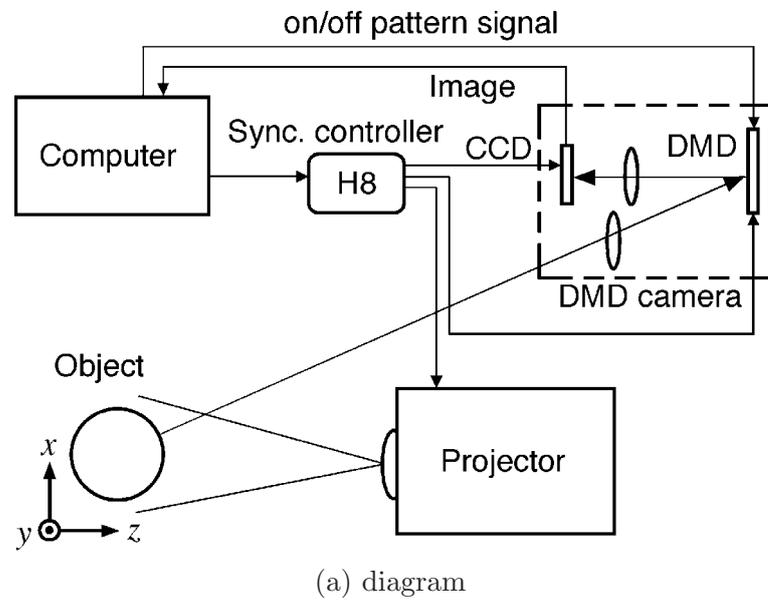


Figure 6.7 Experimental setup

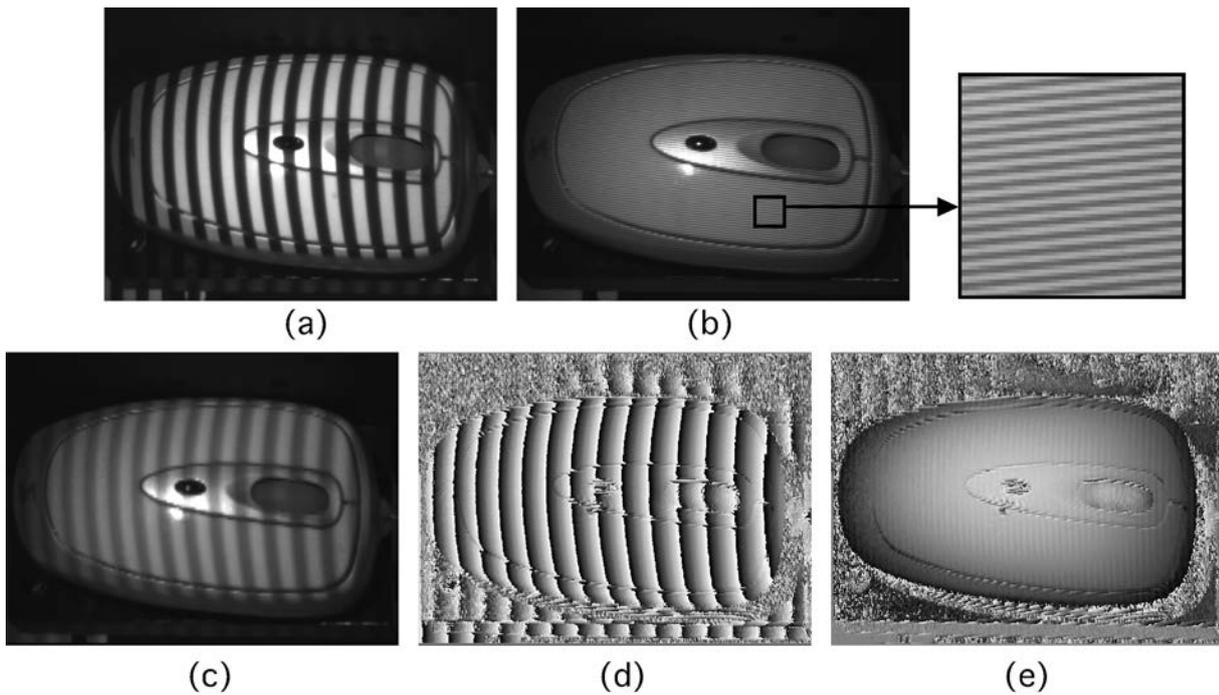


Figure 6.8 Experimental results by DMD-type integrated phase-shifting method using correlations: (a) Ronchi grating projected onto the specimen (a computer mouse); (b) image captured with one shot by the DMD camera. Small image window on the right side shows further details; (c) one of four phase-shifted grating images I_A ($\alpha = 0$) produced from (b); (d) phase distribution; and (e) height distribution

スポーツや医療の分野に応用できる。

次に平面の基準面を移動ステージを用いて一定のスピード (10 mm/s) で動かし、動的な状態での10回の計測を行った。このとき、画像取り込みの間隔は0.142 mmである。よって理想的に隣り合う2フレームの基準面の位置の差は1.42 mmである。図6.10に10回で計測された平均高さ分布 (中央150画素×150画素) を用いて、隣り合う2フレームの差を求めた結果である。理想値に対して、平均誤差と標準偏差はそれぞれ0.09 mmと0.16 mmであった。動的な状態でも静的な状態とほぼ同程度の精度で計測することができた。

本手法では、高速に位相解析を行える反面、空間分解能を犠牲している。そのため、凹凸の勾配が大きい物体の測定が難しい。しかし、近年光学素子の進歩が目覚ましいもので、カメラとDMDの画素数がともに大きくなる一方である。画素数の多い光学素子を用いることで、空間分解能低下の問題を十分解決できると考えられる。

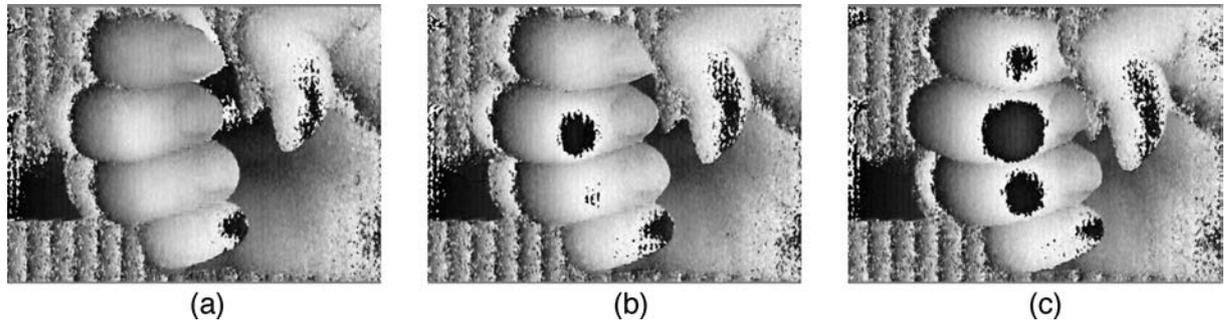


Figure 6.9 Phase analysis results under dynamic conditions: phase difference distribution at (a) $t = 0$ second, (b) $t = 2/15$ seconds, and (c) $t = 4/15$ seconds

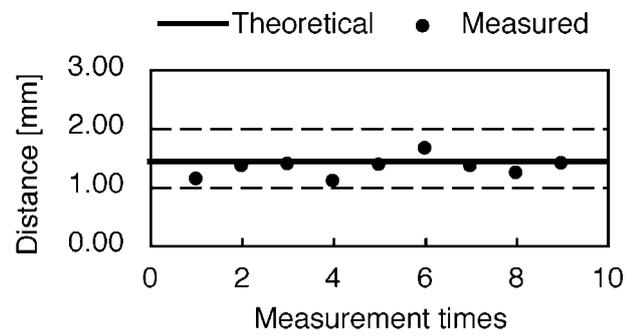


Figure 6.10 Measured distance of adjacent frames at a constant 10 mm/s. The interval of capture is 0.142 mm

6.4 DMDカメラを用いた広輝度レンジの形状計測手法

6.4.1 計測原理

提案する手法の光学系を図 6.11 に示す。CCD カメラのかわりに DMD カメラに置き換えている。プロジェクタから投影された格子が計測物体の形状に応じてゆがみ、そのゆがんだ格子を DMD カメラで撮影する。撮影された画像をもとに物体の反射率と反比例の画像パターンを計算し、DMD に表示させることで、画素ごとの光量をコントロールすることができる。その結果、広輝度レンジの位相解析が行えるようになる。

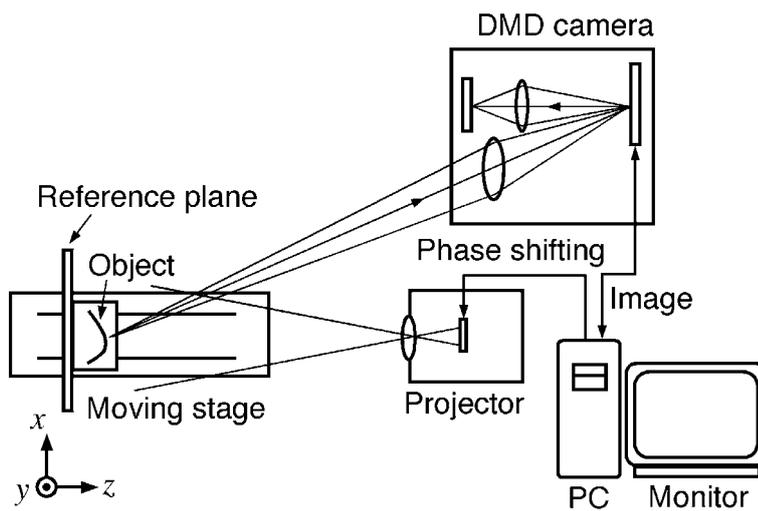


Figure 6.11 System setup using a DMD camera

DMD による最適な露光時間を決定する方法を以下に述べる。ここで述べた最適な露光時間とは、位相解析で用いる位相シフトした画像の輝度変化にとって、最も大きい振幅になるような露光時間である。8ビットのカメラの場合、理想として最も明るい輝度値は 255 になるような露光時間である。実際の計測時は 255 よりわずかに小さく設定されている。

まず DMD に一様な明るさのパターン I_{ideal} を表示させて一度カメラで撮影する。式 (6.21) に示すように撮影された画像の輝度値 $I_{ex}(i, j)$ が I_{ideal} となるように表示する DMD のパターン $I_{DMD}(i, j)$ を決定する。

$$I_{DMD}(i, j) = I_{ideal} \cdot \frac{I_{ideal}}{I_{ex}(i, j)} \quad (6.21)$$

ここで、 i, j は DMD カメラの横縦の画素の番号である。

しかし、実際は一般的な CCD カメラでは暗電流成分（ダークノイズ）が存在するため、式 (6.21) のように計算したパターンを表示しても最適な露光時間にはならない。

そこで、この CCD カメラの暗電流成分を考慮して、式 (6.22) に示すように DMD のパターン $I_{DMD}(i, j)$ を決定する.

$$I_{DMD}(i, j) = I_{ideal} \cdot \frac{I_{ideal} - I_{dark}}{I_{ex}(i, j) - I_{dark}} \quad (6.22)$$

I_{dark} はカメラの暗電流成分である.

本手法より画素ごとに最適な露光時間を制御できるため、カメラの輝度サチレーションや露光不足による計測精度の低下を防ぎ、計測時間を増やすことなく精度よく位相解析を行うことができる.

6.4.2 予備実験

まず、式 (6.22) によって最適の露光時間になっているかどうかを確認するために、表示する DMD の輝度値及び露光時間と実際に CCD カメラで撮影される輝度値の関係を調べた. まず、DMD のすべてのパターンの輝度値を 0 となる画像を表示し、露光時間を 1/120, 1/60, 1/30, 1/15, 1/5, 1/3, 8/15, 2/3, 4/5, 1 秒の順に変えて撮影し、そのときの中央 10×10 画素の輝度値の平均値を求めた. 同様な手順で DMD のすべてのパターンの輝度値を 32, 64, 128, 255 と変えて撮影した. その実験結果をもとめたグラフを図 6.12 に示す. 図 6.12 の中の凡例 DMD:255 とは DMD で表示するすべての輝度値が 255 であることを意味する. 露光時間と CCD カメラで撮影される輝度値に注目すると、露光時間の増加に比例して撮影される輝度値は大きくなることがわかる. また DMD のパターンの輝度値と撮影される輝度値を注目すると、DMD のすべてのミラーが off の場合 (輝度値が 0) では 10 程度の暗電流成分が存在することがわかる. 暗電流成分は実験で用いる CCD カメラの性質によって決まる. 予備実験からわかるように本研究で用いたソニーのカメラでは輝度値 10 程度の暗電流成分が存在しているため、実験では DMD のパターンは以下の式によって計算される. I_{ideal} は輝度値が 31 の一様なパターンを DMD で表示させた. このとき、計算された DMD のパターンの輝度値が 255 よりも大きい場合は 255 とした.

$$I_{DMD}(i, j) = I_{ideal} \cdot \frac{I_{ideal} - 10}{I_{ex}(i, j) - 10} \quad (6.23)$$

Table 6.1 Comparison result

Ideal ratio	2	4	8
Without considering dark noise	1.81	2.94	4.46
With considering dark noise	2.02	3.91	8.07

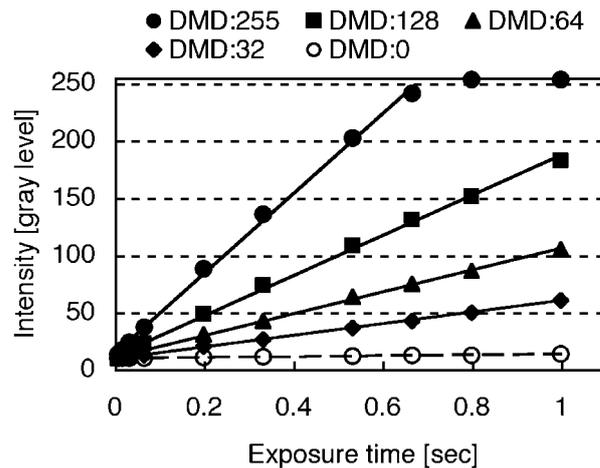


Figure 6.12 Relationship of captured intensities between DMD patterns and exposure times

表 6.1 に露光時間が 0.2 秒の時 CCD カメラの暗電流成分を考量した場合としない場合を比較した結果を示す。DMD のパターンの輝度値が 32 の時と輝度値が 64, 128, 255 の時に比べて、理想の比率としてそれぞれ 2 倍, 4 倍, 8 倍の輝度値になる。しかし、式 (6.21) の方法では理想値と大きくずれていることがわかる。しかし、暗電流成分を考慮した式 (6.23) では、理想とよく一致することが確認できた。中央付近のみならず、画像全体の領域においても同様な結果が得られた。これより、画素ごとに最適な露光時間を調整することができることを確認した。

6.4.3 実験結果および考察

図 6.13 に実験で用いた光学系の写真を示す。すでに提案した正確な画素対応を行える調整手法を用いて、完全に CCD の各画素と DMD の各ミラーを 1 対 1 に画素対応した状態で実験を行った。物体から DMD カメラと液晶プロジェクタのレンズまでの距離はそれぞれ 1470 mm と 465 mm である。DMD カメラとプロジェクタのなす角度は 24 度である。

図 6.14 に広輝度レンジの位相解析手法による実験過程の結果の一例を示す。図 6.14(a) に DMD のすべての輝度値が 31 のときに撮影された画像を示す。図 6.14(b) は図 6.14(a) を用いて式 (6.23) で示す方法より計算した DMD パターンの画像 $I_{DMD}(i, j)$ である。計測物体の反射率に反比例したパターン画像になっている。図 6.14(c) は DMD で露光時間を調整後に CCD カメラによって撮影した画像である。物体の反射率と関係なく、全体的にほぼ一定の輝度値になった。物体の背景の暗い部分は影によるものである。人形の髪と目ではまだ暗くなっている。これはほとんどの光を反射しないためである。このようなほとんど拡散反射をしない部分では DMD カメラを用いてもコントラストの高い輝度変化を得ることが難しい。

図 6.15 に実験結果を示す。図 6.15(a) と図 6.15(d) にそれぞれ従来手法と提案手法によって得られた格子投影画像を示す。図 6.15(a) において、反射率の低い部分では格子パターンを識別す

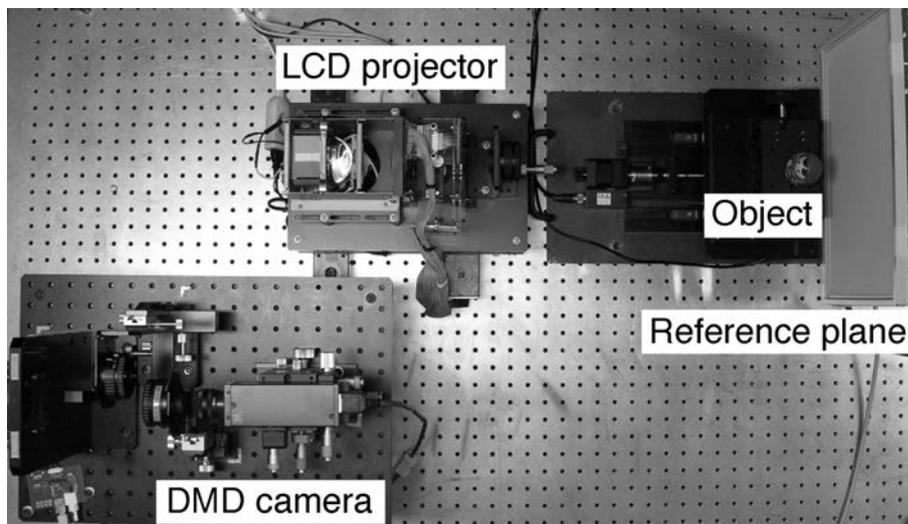
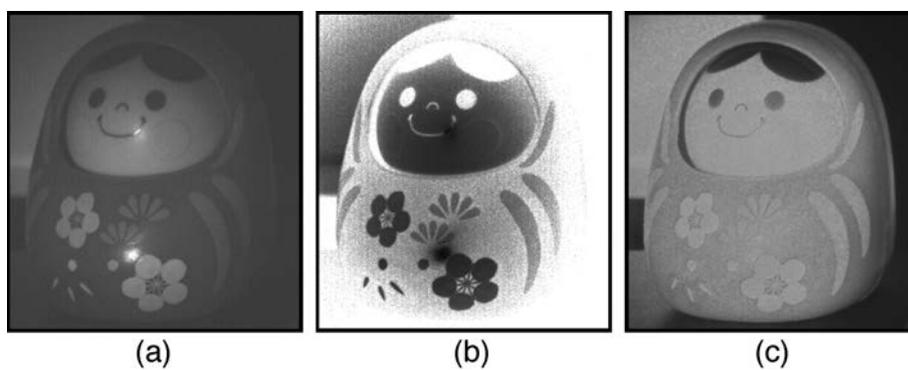


Figure 6.13 Experimental setup (general view)

Figure 6.14 Experimental results of wide-intensity-range method: distribution of (a) $I_{ex}(i, j)$, (b) $I_{DMD}(i, j)$, and (c) $I_{CCD}(i, j)$

ることが困難であり、投影している正弦波のコントラストが極めて低い。これに対して、提案手法では全体のコントラストが向上していることがわかる。その効果は歴然である。図 6.15(b) と図 6.15(e) にそれぞれ従来の手法と本手法によって得られた位相分布を示す。解析結果に対して輝度振幅が 10 以下の部分ではマスクをかけ、黒く表示されている。このような部分ではほとんど計測をすることはできない。図 6.15(c) と図 6.15(f) にそれぞれ従来の手法と本手法によって得られた高さ分布を示す。影以外の部分では形状を得ることができた。提案手法では、多反射率をもつ物体でも全体の部分を精度よく位相解析を行うことができ、本手法の有効性を示した。同じ条件で基準面（平板）を計測したところ、中央 420 点 × 300 点の計 126,000 点の平均誤差と標準偏差はそれぞれ 9 μm と 16 μm であった。

この手法では、DMD と CCD の画素対応が 1 画素でもずれるとエンボス効果を生み出し、測定結果に悪い影響を及ぼすため、正確な画素対応を行う必要がある。また、極めて高反射率の被写体が存在し、CCD の特性よりスミア現象が生じた部分では正しく調整することはできない。この場合は適切な露光時間を調整する必要がある。

6.5 まとめ

本章では、第 5 章で開発した DMD カメラを用いて、(1) 高速位相シフト法と (2) 広輝度レンジの形状計測の手法を開発した。

手法 (1) により時々刻々と変動する物体の場合でも位相解析を行うことが可能になった。手法 (2) は画素ごとに位相解析に最適な露光時間を調整することができた。その結果、従来の CCD カメラでは実現できなかった広輝度レンジの位相解析が行えるようになった。この手法は複数回の計測に伴う測定時間の増加という問題点を克服した手法である。

これまでの先行研究と比べて、提案した手法の利点は以下である。

1. 複数台の CCD カメラを用いていない。
2. 計測時間を増やすことなく計測できる。
3. 画素ごとに最適な露光時間を調整できる。

実験では、多反射率をもつ物体に対しても全体的な部分を精度よく位相解析を行うことができ、本手法の有効性を示した。応用分野としてカラフルな美術品や油絵の筆跡の計測に利用できる。

今後の展望として、DMD カメラを用いて格子投影法による形状計測のみならず、モアレトポグラフィや光弾性などの他の光学的手法にも適用できる。

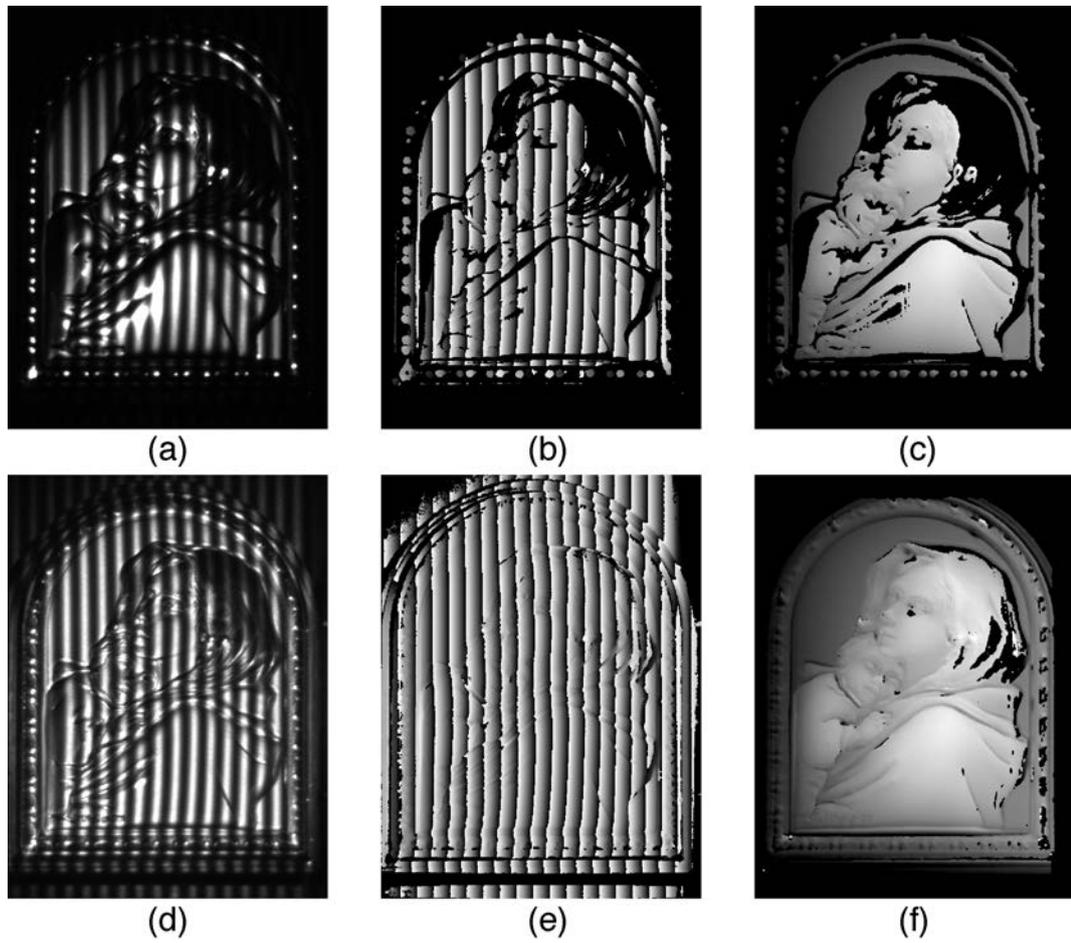


Figure 6.15 Experiment result of a metallic art: (a) projected grating, (b) phase distribution, and (c) height distribution obtained by the conventional method; (d) projected grating, (e) phase distribution, and (f) height distribution obtained by the proposed method

第7章 結論

7.1 総括

本論文では、投影格子位相解析法において様々な問題を解決するために、種々の形状計測合成手法およびDMDカメラを用いた三次元計測手法の開発を行った。本論文の前半ではフーリエ変換位相シフト法における位相信頼性評価値を提案した。さらに位相信頼性評価値を用いたいくつかの形状合成手法を開発した。後半では、画素ごとに制御できるDMDカメラの開発を行った。DMDカメラの画素対応において、モアレパターンを用いた簡易な調整手法とそのモアレパターンの位相を解析できる位相シフトモアレ法を用いた厳密な調整手法をそれぞれ開発した。さらにDMDカメラを用いた高速位相シフト法と広輝度レンジの形状計測手法を開発した。

以下に各章で得られた結果をまとめる。

第3章では、フーリエ変換位相シフト法における位相信頼性評価値を提案した。これは基本周波数である1次のスペクトルとそれ以外の高次周波数のスペクトルの和の平均の比とし、フーリエスペクトルの視点から見たS/N比に相当する値といえる。特に位相信頼性評価値を用いることで、合成を行う際に同じ位置に対して複数の計測データが存在する場合に、各画素ごとに信頼性の高い測定データを採用することができる。計測条件が悪く、誤差が生じやすい部分の計測データを採用せず、精度よく計測できた点のみを用いて合成することができる。

コンピュータシミュレーションにより、ランダムノイズ、輝度のサチュレーション、輝度非線形性による位相誤差と位相信頼性評価値の関係について調べて、さらにその有効性を検討した。

第4章では、格子投影法による高精度形状計測法を実用化するうえでの問題を解決するために、条件を変えて計測して得られた複数枚のデータを合成する手法をいくつか提案した。さらに実験によりそれぞれの形状合成手法の有効性について検討した。

以下に各手法で得られた結果を要約する。

「広ダイナミックレンジの形状合成手法」では、奥行きが深い三次元物体を平行移動させて計測を行い、2枚の基準面間の常にフォーカスが合っているデータのみを用いて、複数の位置での計測結果を合成する手法を開発した。この手法によって、広ダイナミックレンジで高精度に三次元物体の形状を計測することができた。段差状の精度検定用試料を計測した実験では、奥行き方向の計測範囲150 mmに対し、平均誤差0.010 mm、標準偏差0.012 mmの精度が得られ、本手法の有効性が示された。

「鏡面反射成分の影響を避ける形状合成手法」では、複数台のカメラを異なる角度から計測したデータを合成することで金属のような鏡面反射が起こる物体も計測することができた。円柱状試料を測定したところ、平均誤差と標準偏差はそれぞれ 0.015 mm と 0.038 mm であった。

「広輝度レンジの形状合成手法」では、カメラのシャッター速度を変えることで、撮影輝度を数段階に変化させて数回の計測を行い、それぞれの計測結果のうちで精度よく計測できた部分を合成する手法を開発した。反射率が低い部分と高い部分の両方を精度よく計測することができた。

「全周囲の形状合成手法」では、得られた複数枚の多方向のデータを合成する全周形状計測法を開発した。この手法によって、1方向だけでは影となる部分や裏側の部分も計測することができた。直径 60.04 mm の円柱試料を計測したところ、平均誤差は 0.032 mm、標準偏差は 0.023 mm の結果が得られた。

第5章では、最近の新しい光学素子である DMD に注目し、位相解析や形状計測向けの DMD カメラの開発を行った。まず、DMD の専用高速制御ボードを導入することで DMD の各ミラーの高速制御が行えるようになった。次にモアレパターンを用いて簡単かつ精度よく DMD と CCD の画素対応ができる調整手法を開発した。この手法ではリアルタイムで6軸のずれ量をモアレ縞として観察することができ、容易に目視による調整が行える。さらにモアレパターンの位相を解析することによって、より高精度に調整できる「位相シフトモアレ法」を開発した。これよりサブ・ピクセル以上の精度で調整できるようになった。実験では 1/25 画素の精度が得られている。その結果、画素ごとに (1) 高速シャッター機能 (2) 露光時間調整機能を持つカメラができた。この DMD カメラを用いればリアルタイムで種々の画像処理を行うことができる。

第6章では、開発した DMD カメラを用いて、(1) 高速位相シフト法と (2) 広輝度レンジの形状計測の手法を開発した。手法 (1) は時々刻々と変動する物体の場合でも位相解析を行うことが可能になった。この手法は複数回の計測に伴う測定誤差の増加という問題点を克服した手法である。手法 (2) は画素ごとに位相解析にとって最適な露光時間を調整することができた。その結果、測定時間を増やすことなく従来の CCD カメラでは実現できなかった広輝度レンジの位相解析ができるようになった。

7.2 今後の課題

本研究により明らかになったことを踏まえ、以下に今後の課題を示す。

本形状計測装置が実用化されるに至るまでに、さらなる精度の向上が必要である。精度を上げるためには、絶対精度の向上と測定データのばらつきの低減が必要になる。まず、絶対的な精度の誤差としてステージの移動量による誤差と基準面（液晶パネル）の平面度の精度が考えられる。移動量について現在 0.1 μm の移動分解能のフィードバック付き移動ステージを使用しており、かなり高い精度で位置決めを行うことができる。しかし、液晶基準面では完全にフラットな平面で

あることを仮定して計算している。実際基準面そのものが反っている可能性があり、精度の高い平板（平面度 $1\ \mu\text{m}$ 以下）をさらに一回計測して平面補正を行う必要がある。

つぎに測定データのばらつきの原因として、主に光学デバイスの安定性と液晶の精度が影響を及ぼすと考えられる。撮影素子である CCD カメラの場合、電氣的に生じるノイズが主な誤差となる。このランダムなノイズを減らすためには、ノイズの少ない冷却タイプのカメラを使用することが望ましい。しかし、かなり高価になる。一般的に市販されている CCD カメラの場合、同じ格子画像を連続的に撮影し、それらの画像の平均をとることで、ノイズを低減することができる。測定時間が多少に増えても問題にならない場合、有効な手法である。それに加えてより画素数の多いカメラを使用することで、 x と y の分解能を上げるとともに装置全体のパフォーマンスも向上できると考えられる。一方、投影素子であるプロジェクタは主に光源と液晶の性能に左右される。光源ではハロゲンランプのかわりに LED 光源 [136, 137] に変更することで、振動・熱の問題をなくすことができ、より安定した光源に置き換えることで解決できる。ただし、LED 光源の場合、光量を上げる工夫が要求される。近年形状計測向けの 1 次元液晶 [138] が市販され、ドットタイプの液晶に比べて開口率がよく、転送速度も速い。原段階では 2~7 ビットの階調でグレースケールの格子を投影することができる [139, 140]。今後 1 次元液晶デバイスの性能がさらに改善され、8 ビット以上の格子を作り出すことができれば、より精度のよい形状計測が行えるようになる。

本装置では三角測量を用いて形状を算出するため、カメラとプロジェクタの角度を大きくすることで精度を上げることもできる。ただし、その場合測定できる範囲が狭くなり、測定対象物の大きさと奥行きに応じてセッティングの工夫が必要である。

鏡面反射成分を避ける形状合成手法では、鏡面反射成分による影響をほぼなくすことができた。しかしながら、複雑な鏡面物体の場合、鏡面反射以外に二次反射も生じる。本研究では、二次反射を判断することがまだできていないため、今後二次反射の影響を低減できる手法が求められる。

全周形状計測の手法において、物体を回転させて異なる方向から得られたデータを合成させる方法を開発したが、全方位の形状計測に至っていない。今後の研究で全周のデータに加えて上面および下面のデータも含めた全方位の形状計測手法の開発が望まれる。その際にキャリブレーションの仕方や合成するデータのフォーマットを考慮する必要がある。

一方、DMD カメラにおいての問題点は、斜め下からの画像撮影になるため、得られる像は真っ正面に向いていない。一般的なカメラと同じような感覚で画像を撮影するためには、DMD に対してあおりをつけて CCD と画素対応させる必要がある。しかし、光軸からかなりずれるため、レンズ収差によってぼやけた画像しか得られていない。今後、専用設計された非球面レンズなどを用いて装置を改良する余地がある。また、DMD カメラの画素対応を行う際に手動で調整している。今後モアレパターンの位相分布データを用いて全自動で画素対応が行えるシステムの開発が望まれる。

7.3 今後の展望

本研究の成果より、物体の形状計測において生じているいくつかの問題を解決することができ、より広い範囲で精度のよい形状計測が可能になった。意匠設計における三次元 CAD 入力装置や、医療分野での義歯などの形状計測、あるいは美術品や工芸品の形状計測など、さまざまな分野への応用が期待できる。

今後、この高精度形状計測法が更なる発展を遂げ、微小物体や大構造物の計測に適用され、近年まで利用されてきた接触式高精度形状測定機に代わり、様々な現場で活躍できることを願う。

付 録 A アルゴリズム

A.1 2次元位相から画面内座標を求める手法

第2章第3節で述べた2次元位相分布は、整数の画面内座標について求められている。しかし、精度よく3次元座標を求めるためには、ある2次元位相を持つ実数値の画面内座標を見つける必要がある。ここでは、2次元位相からその位相を持つ画面内座標を求めるアルゴリズムについて述べる。

2次元位相分布から2次元位相 (ϕ_x, ϕ_y) を持つ点を見つけ、その画面内座標を求める場合を考える。図 A.1 に画面内座標と2次元位相分布の関係を示す。図 A.1(a) では縦横の直線は座標値が整数の位置を示し、それらの交点が整数の画面内座標を持つ点を表す。2次元位相の値は、これらの交点上だけで求められている。曲線 l_x と l_y は、それぞれ x 方向および y 方向の位相値 ϕ_x および ϕ_y を持つ位置を結んだ線である。これらの交点を W とすると、点 W が2次元位相 (ϕ_x, ϕ_y) を持つ点となる。

次に点 W の画面内座標を求めるアルゴリズムを示す。まず、点 W に最も近く、 x 方向と y 方向の位相値がそれぞれ ϕ_x と ϕ_y を超えない整数の座標値を持つ点 A を見つける。まず、点 A を見つける方法について述べる。点 A の画面内座標を (i_0, j_0) とする。点 A と点 W の近傍の拡大図を図 A.1(b) に示す。図 A.1(b) に示すように、画面内座標が $(i_0 + 1, j_0)$, $(i_0 + 1, j_0 - 1)$, $(i_0, j_0 - 1)$ の点をそれぞれ点 B , 点 C , 点 D とする。点 A , 点 B , 点 C , 点 D が持つ2次元位相をそれぞれ (ϕ_{Ax}, ϕ_{Ay}) , (ϕ_{Bx}, ϕ_{By}) , (ϕ_{Cx}, ϕ_{Cy}) , (ϕ_{Dx}, ϕ_{Dy}) とする。曲線 l_x と直線 AB と直線 CD との交点をそれぞれ点 E と点 G とし、曲線 l_y と直線 BC と直線 AD との交点をそれぞれ点 F と点 H とする。線分 AB と線分 BC , 線分 CD , 線分 DA 上では、位相値は座標値に対して比例して変化すると仮定すると、点 E と点 F , 点 G , 点 H の画面内座標はそれぞれ式 (A.1) に示すような値となる。

$$\begin{aligned} E\left(i_0 + \frac{\phi_x - \phi_{Ax}}{\phi_{Bx} - \phi_{Ax}}, j_0\right), \quad F\left(i_0 + 1, j_0 - \frac{\phi_y - \phi_{By}}{\phi_{Cy} - \phi_{By}}\right), \\ G\left(i_0 + \frac{\phi_x - \phi_{Dx}}{\phi_{Cx} - \phi_{Dx}}, j_0 - 1\right), \quad H\left(i_0, j_0 - \frac{\phi_y - \phi_{Ay}}{\phi_{Dy} - \phi_{Ay}}\right) \end{aligned} \quad (\text{A.1})$$

直線 EG と直線 FH の交点 W' は、式 (A.1) の4点の画面内座標から求めることができる。本研究では近似的にこの値を点 W の画面内座標として用いる。

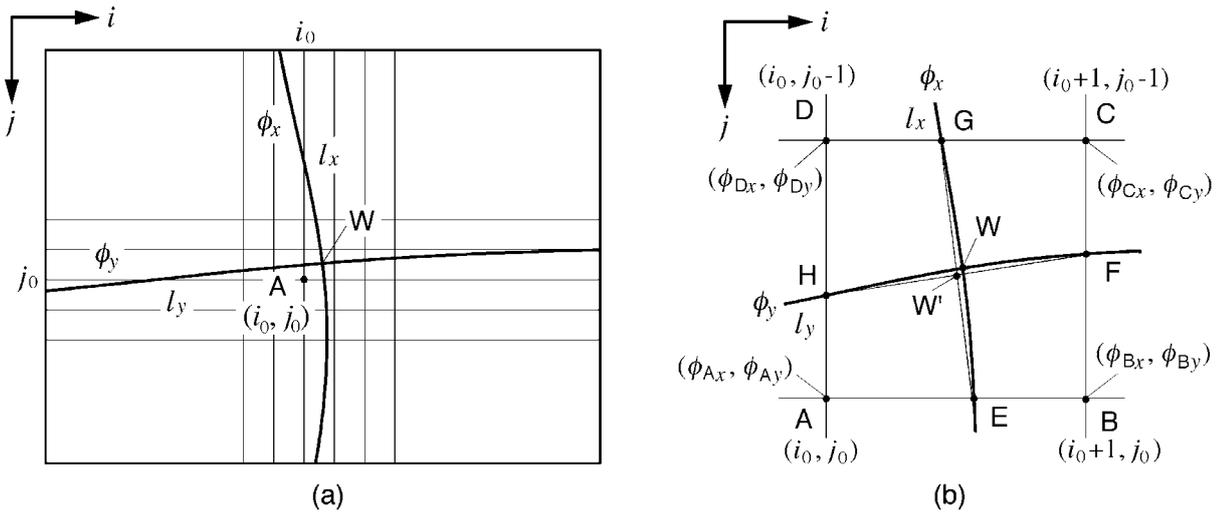


Figure A.1 Relationship between coordinates and two-dimensional phase distribution: (a) coordinates (b) enlargement around points A and W

A.2 2直線の交点座標の算出方法

第2章第3節で述べた形状計測原理の形状算出アルゴリズムでは、最終的に空間内のカメラの視線 l_c とプロジェクタの視線である l_p の2直線の交点として物体表面上の点の空間座標を求めると記述されている。本来これらの2直線は交わるはずである。しかし、解析途中で得られるこれらの2直線は、計測誤差や計算機内での実数表現の丸め誤差の影響のために、一般にはねじれの位置にある。そこで、ねじれの位置にある2直線において、それぞれの直線上でもう一方の直線に最も接近する点同士の中点を求める計算式を示す。

図 A.2 に示すように、2直線をそれぞれ直線 l_c と直線 l_p とする。直線 l_c は点 C_0 および点 C_1 を通る直線とし、直線 l_p は点 P_0 および点 P_1 を通る直線とする。点 M_c は直線 l_p に最も近い直線 l_c 上の点であり、点 M_p は直線 l_c に最も近い直線 l_p 上の点である。

原点を点 O とすると、 $\overrightarrow{OM_c}$ と $\overrightarrow{OM_p}$ は、パラメータ t_c および t_p を用いてそれぞれ式 (A.2) のように表すことができる。

$$\begin{aligned}\overrightarrow{OM_c} &= \overrightarrow{OC_0} + t_c \overrightarrow{C_1C_0} \\ \overrightarrow{OM_p} &= \overrightarrow{OP_0} + t_p \overrightarrow{P_1P_0}\end{aligned}\quad (\text{A.2})$$

これより、

$$\overrightarrow{M_pM_c} = \left(\overrightarrow{OP_0} - \overrightarrow{OC_0} \right) + \left(t_p \overrightarrow{P_1P_0} - t_c \overrightarrow{C_1C_0} \right) \quad (\text{A.3})$$

となる。直線 M_cM_p は、直線 l_c と直線 l_p の双方に垂直となることを式で表すと式 (A.4) のように

なる。

$$\begin{aligned}\overrightarrow{M_p M_c} \cdot \overrightarrow{C_1 C_0} &= 0 \\ \overrightarrow{M_p M_c} \cdot \overrightarrow{P_1 P_0} &= 0\end{aligned}\tag{A.4}$$

式 (A.3) を式 (A.4) に代入して移項すると、式 (A.5) になる。

$$\begin{aligned}(t_c \overrightarrow{C_1 C_0} - t_p \overrightarrow{P_1 P_0}) \cdot \overrightarrow{C_1 C_0} &= (\overrightarrow{OP_0} - \overrightarrow{OC_0}) \cdot \overrightarrow{C_1 C_0} \\ (t_c \overrightarrow{C_1 C_0} - t_p \overrightarrow{P_1 P_0}) \cdot \overrightarrow{P_1 P_0} &= (\overrightarrow{OP_0} - \overrightarrow{OC_0}) \cdot \overrightarrow{P_1 P_0}\end{aligned}\tag{A.5}$$

これを行列で表すと、式 (A.6) のようになる。

$$\begin{pmatrix} \overrightarrow{C_1 C_0} \cdot \overrightarrow{C_1 C_0} & -\overrightarrow{P_1 P_0} \cdot \overrightarrow{C_1 C_0} \\ \overrightarrow{C_1 C_0} \cdot \overrightarrow{P_1 P_0} & -\overrightarrow{P_1 P_0} \cdot \overrightarrow{P_1 P_0} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} t_c \\ t_p \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (\overrightarrow{OP_0} - \overrightarrow{OC_0}) \cdot \overrightarrow{C_1 C_0} \\ (\overrightarrow{OP_0} - \overrightarrow{OC_0}) \cdot \overrightarrow{P_1 P_0} \end{pmatrix}\tag{A.6}$$

これより式 (A.7) のように t_c および t_p を求めることができ、これらの値から式 (A.2) を用いて点 M_c と点 M_p の空間座標を求めることができる。

$$\begin{pmatrix} t_c \\ t_p \end{pmatrix} = \frac{1}{-\left(\overrightarrow{C_1 C_0} \cdot \overrightarrow{C_1 C_0}\right)\left(\overrightarrow{P_1 P_0} \cdot \overrightarrow{P_1 P_0}\right) + \left(\overrightarrow{C_1 C_0} \cdot \overrightarrow{P_1 P_0}\right)^2} \begin{pmatrix} -\overrightarrow{P_1 P_0} \cdot \overrightarrow{P_1 P_0} & \overrightarrow{P_1 P_0} \cdot \overrightarrow{C_1 C_0} \\ -\overrightarrow{C_1 C_0} \cdot \overrightarrow{P_1 P_0} & \overrightarrow{C_1 C_0} \cdot \overrightarrow{C_1 C_0} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} (\overrightarrow{OP_0} - \overrightarrow{OC_0}) \cdot \overrightarrow{C_1 C_0} \\ (\overrightarrow{OP_0} - \overrightarrow{OC_0}) \cdot \overrightarrow{P_1 P_0} \end{pmatrix}\tag{A.7}$$

点 S の空間座標は点 M_c と点 M_p の中点とし、式 (A.8) によって求めることができる、

$$\overrightarrow{OS} = \frac{1}{2}(\overrightarrow{OM_c} + \overrightarrow{OM_p})\tag{A.8}$$

以上の計算方法を用いれば、点 C_0 および点 C_1 、点 P_0 、点 P_1 の4点の空間座標から、直線 $C_0 C_1$ と直線 $P_0 P_1$ において、片方の直線上にあり、もう一方の直線に最も接近する点同士を中心を求めることができる。

Table A.2 MR-FFT error (Singleton 1969)

Number of data	rms Error ($\times 10^{-13}$)
512	1.1
1024	1.2
2048	1.4
4096	1.5
2187	1.6
3125	2.3
2401	2.6
1331	2.5
2197	3.5
289	2.5
361	3.2
529	3.5
1000	1.6
2000	1.7

A.4 Box-Muller 法による白色ガウスノイズの発生

第3章第4.1節で述べた CCD カメラなどで発生する電子ノイズは発生確率が正規分布（ガウス分布）に従うランダムパターンである。このランダムノイズをシミュレーションするために、数値的に正規分布をもつランダムノイズパターンを作成する方法として Box-Muller 法を用いた。Box-Muller 法では、一様な分布をもつランダム変数 x を用いて、以下の式より発生確率が正規分布に従うランダムパターン E に変換できる。

$$E = \sqrt{-2\sigma^2 \log_e x} \sin(2\pi x) \quad (\text{A.9})$$

もしくは

$$E = \sqrt{-2\sigma^2 \log_e x} \cos(2\pi x) \quad (\text{A.10})$$

ここで σ はランダムパターン E の標準偏差である。すなわち、Box-Muller 法を用いることで、任意の標準偏差をもつ白色ガウスノイズをシミュレートすることができる。本研究ではランダム変数 x として C 言語の標準数学ライブラリである `rand()` 関数を使用した。

A.5 最小二乗法による平面の式の決定

ここでは、第4章第5.2節で述べた測定点から平面式を求める方法について述べる。

一般的には同一平面上の3点の座標値が分かれば平面の式を求めることができる。しかし、計測結果には必ず誤差が含まれる。平面の式を計算するのに、選ぶ点によって大きく誤差が生じる場合があるため、多数の計測点を用いて最小二乗法による平面の式を決定することにした。そのアルゴリズムを以下に示す。

平面の方程式は式 (A.11) で表される。

$$z(x, y) = ax + by + c \quad (\text{A.11})$$

ここで、 a , b はそれぞれ法線の x 成分, y 成分である。平面である条件は法線の z 成分は 0 ではない。求める平面の z と計測点の z_i との誤差を e_i とすると、 e_i は式 (A.12) のようになる。

$$\begin{aligned} e_i &= z(x_i, y_i) - z_i \\ &= ax_i + by_i + c - z_i \end{aligned} \quad (\text{A.12})$$

全計測点の z_i と求める平面の z の誤差の和の二乗を ε とすると、 ε は式 (A.13) のようになる。

$$\varepsilon = \sum_{i=0}^n e_i^2 \quad (\text{A.13})$$

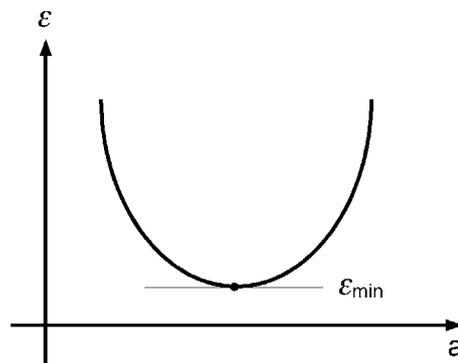


Figure A.3 Relationship between ε and a

a に注目すると、 ε は a の二次関数であるため、図 A.3 に示すように誤差は微分係数が 0 であるとき最小となる。 b , c も同様に考えると、次式が得られる。

$$\begin{aligned}
\frac{\partial \varepsilon}{\partial a} &= \sum_{i=1}^n (2e_i \frac{\partial e_i}{\partial a}) = \sum_{i=1}^n \{(ax_i + by_i + c - z_i)x_i\} = 0 \\
\frac{\partial \varepsilon}{\partial b} &= \sum_{i=1}^n (2e_i \frac{\partial e_i}{\partial b}) = \sum_{i=1}^n \{(ax_i + by_i + c - z_i)y_i\} = 0 \\
\frac{\partial \varepsilon}{\partial c} &= \sum_{i=1}^n (2e_i \frac{\partial e_i}{\partial c}) = \sum_{i=1}^n (ax_i + by_i + c - z_i) = 0
\end{aligned} \tag{A.14}$$

展開すると、式 (A.15) のようになる。なお、簡単にするため、以後 $\sum_{i=1}^n$ を単に \sum と省略する。

$$\begin{aligned}
a \sum x_i^2 + b \sum x_i y_i + c \sum x_i - \sum x_i z_i &= 0 \\
a \sum x_i y_i + b \sum y_i^2 + c \sum y_i - \sum y_i z_i &= 0 \\
a \sum x_i + b \sum y_i + c \sum 1 - \sum z_i &= 0
\end{aligned} \tag{A.15}$$

式 (A.15) を行列表示すると、式 (A.16) となる。

$$[\mathbf{X}][\mathbf{A}] = [\mathbf{Y}] \tag{A.16}$$

ここで、それぞれの行列は以下の通りである。

$$[\mathbf{X}] = \begin{pmatrix} \sum x_i^2 & \sum x_i y_i & \sum x_i \\ \sum x_i y_i & \sum y_i^2 & \sum y_i \\ \sum x_i & \sum y_i & \sum 1 \end{pmatrix} \tag{A.17}$$

$$[\mathbf{A}] = \begin{pmatrix} a \\ b \\ c \end{pmatrix} \tag{A.18}$$

$$[\mathbf{Y}] = \begin{pmatrix} \sum x_i z_i \\ \sum y_i z_i \\ \sum z_i \end{pmatrix} \tag{A.19}$$

式 (A.20) に示すように、最小二乗法により a , b , c の値を求めることができる。

$$[\mathbf{A}] = [\mathbf{X}]^{-1}[\mathbf{Y}] \tag{A.20}$$

このように、多数の計測点から安定して平面の式を決定することができる。

参考文献

- [1] 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).
- [2] 吉澤徹・鈴木賢策, 格子パターン投影による三次元形状の自動測定, 精密工学会誌, **53-3**, 422–426 (1987).
- [3] 結城宏和・宝珍輝尚・郡司達夫, 照度差ステレオ法を用いた遺物の表裏3次元形状の計測, 情報考古学, **6-1**, 28–35 (2000).
- [4] Sujana, V. A. and Dubowsky, S., “Design and Implementation of a 3-D Mapping System for Highly Irregular Shaped Objects with Application to Semiconductor Manufacturing,” *Optical Engineering*, **41-6**, 1406–1417 (2002).
- [5] Graebler, P., Lallemand, 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).
- [6] Chen, F., Brown, G. M. and Song, M., “Overview of Three-dimensional Shape Measurement using Optical Methods,” *Optical Engineering*, **39-1**, 10–22 (2000).
- [7] 吉澤徹, 光三次元計測 (三次元工学 1), 吉澤徹編, 新技術コミュニケーション (1993).
- [8] 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).
- [9] 井口征士・佐藤宏介, 三次元画像計測, 昭晃堂, 13–14 (1990).
- [10] 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).
- [11] Nayar, S. K., “Shape from Focus System,” *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 302–308 (1992).

- [12] Subbarao, M., "Parallel Depth Recovery by Changing Camera Parameters," *Int. Conf. Computer Vision*, 149–155 (1988).
- [13] Liu, Z. and Shi, G., "Depth Measurement from Defocusing Image," *Proceeding of Robotics and Applications*, Track No. 498-097 (2005).
- [14] 日浦慎作・松山隆司, 構造化瞳をもつ多重フォーカス距離画像センサ, 電子情報通信学会論文誌, Vol. J82-D-II, No.11, 1912–1920 (1999).
- [15] Klette, R., Schlüns, K. and Koschan, A., "Computer Vision: Three-Dimensional Data from Images," Springer-Verlag Singapore (1998).
- [16] 徐剛・辻三郎著, 3次元ビジョン, 共立出版 (1998).
- [17] <http://www.3dmedia.co.jp/jp/product/fotometrics/>
- [18] Baker, S. and Nayar, S. K., "A Theory of Catadioptric Image Formation," *Proceedings of Sixth International Conference on Computer Vision*, 35–42 (1998).
- [19] Gluckman, J. and Nayar, S. K., "Rectified Catadioptric Stereo Sensors," *Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2380–2387 (2000).
- [20] Massa, J. S., Buller, G. S., Walker, A. C., Cova, S., Umasuthan, M. and Wallace, A. M., "Time-of-flight Optical Ranging System based on Time-correlated Single-photon Counting," *Applied Optics*, **37**-31, 7298–7304 (1998).
- [21] Yang, C., Huo, Y., Chen, Q., Qin, L. and Zhao, D., "Time-of-flight Measurement in Self-triggering Pulsed Laser Ranging," *Optical Engineering*, **44**-3, 034201 (2005).
- [22] Livnat, A., Kafri, O. and Erez, G., "Hills and Valleys Analysis in Optical Mapping and Its Application to Moiré Contouring," *Applied Optics*, **19**-19, 3396–3400 (1980).
- [23] Gasvik, K. J., "Moiré Technique by Means of Digital Image Processing," *Applied Optics*, **22**-23, 3543–3548 (1983).
- [24] Meadows, D. M., Johnson, W. O. and Allen, J. B., "Generation of Surface Contours by Moiré Patterns," *Applied Optics*, **9**-4, 942–947 (1970).
- [25] Takasaki, H., "Moiré Topography," *Applied Optics*, **9**-6, 1467–1472 (1970).
- [26] Jin, L., Kodera, Y., Yoshizawa, T. and Otani, Y., "Shadow Moiré Profilometry using the Phase-shifting Method," *Optical Engineering*, **39**-8, 2119–2123 (2000).

- [27] Han, C. and Han, B., "Contrast of Shadow Moiré at High-order Talbot Distances," *Optical Engineering*, **44-2**, 028002 (2005).
- [28] 小関修・中野倫明・山本新, 光切断法を用いた実時間距離検出装置, 電子通信学会論文誌, **J68-D-5**, 1141–1148 (1985).
- [29] 荒木和男・田中伸宜・藤野智浩・佐藤幸男, 高速 3 次元形状計測装置の試作, 電子通信学会論文誌, **J71-D-10**, 2059–2068 (1988).
- [30] 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).
- [31] Saint-Mark, P., Jezouin, J. and Medioni, G., "A Versatil PC-based Range Finding System," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, **7-2**, 250–256 (1991).
- [32] <http://konicaminolta.jp/products/industrial/instrument/3d/index.html>
- [33] Müller, E., "Fast Three-dimensional Form Measurement System," *Optical Engineering*, **34-9**, 2754–2756 (1995).
- [34] Sansoi, S., Corini, S., Lazzari, S., Rodella, R. and Docchio, F., "3-D Imaging of Surfaces for Industrial Applications: Integration of Structured Light Projection, Gray Code Projection and Projector-camera Calibration for Improved performance," *Proc. SPIE* **2661**, 88–96 (1996).
- [35] Sansoi, S., Corini, S., Lazzari, S., Rodella, R. and Docchio, F., "Three-dimensional Imaging Based on Gray-code Light Projection: Characterization of the Measuring Algorithm and Development of a Measuring System for Industrial Applications," *Applied Optics*, **36-19**, 4463–4472 (1997).
- [36] Valkenburg, R. J. and Mcivor, A. M., "Accurate 3D Measurement using a Structured Light System," *Proc. SPIE* **2909**, 68–80 (1997).
- [37] Srinivasan, V., Liu, H. C. and Halioua, M., "Automated Phase-measuring Profilometry of 3-D Diffuse Objects," *Applied Optics*, **23-18**, 3105–3108 (1984).
- [38] Lehmann, M., Jacquot, P. and Facchini, M., "Shape Measurements on Large Surfaces by Fringe Projection," *Experimental Technique*, **23-2**, 31–35 (1999).

- [39] Li, W., Su, X. and Liu, Z., “Large-scale Three-dimensional Object Measurement: a Practical Coordinate Mapping and Image data-patching Method,” *Applied Optics*, **40-20**, 3326–3333 (2001).
- [40] Asundi, A., Chan, C. S. and Sajan, M. R., “360-deg Profilometry: New Techniques For Display and Acquisition,” *Optical Engineering*, **33-8**, 2760–2769 (1994).
- [41] Asundi, A. and Zhou, W., “Mapping Algorithm for 360-deg Profilometry with Time Delayed Intergration Imaging,” *Optical Engineering*, **38-2**, 339–344 (1999).
- [42] Halioua, M., Krishnamurthy, R. S., Liu, H. C. and Chiang, F. P., “Automated 360° Profilometry of 3-D Diffuse Objects,” *Applied Optics*, **24-14**, 2193–2196 (1985).
- [43] Cheng, X., Su, X. and Guo, L., “Automated Measurement Method for 360° Profilometry of 3-D Diffuse Objects,” *Applied Optics*, **30-10**, 1274–1278 (1991).
- [44] Ohara, H., Konno, H., Sasaki, M., Suzuki, M. and Murata, K., “Automated 360° Profilometry of a Three-dimensional Diffuse Object and Its Reconstruction by Use of the Shading Model,” *Applied Optics*, **35-22**, 4476–4480 (1996).
- [45] Huang, P. S., Hu, Q., Jin, F. and Chiang, F., “Color-encoded Digital Fringe Projection Technique for High-speed Three-dimensional Surface Contouring,” *Optical Engineering*, **38-6**, 1065–1071 (1999).
- [46] Coggrave, C. R. and Huntley, J. M., “High-speed Surface Profilometer Based on a Spatial Light Modulator and Pipeline Image Processor,” *Optical Engineering*, **38-9**, 1573–1581 (1999).
- [47] Morimoto, Y., Fujigaki, M. and Toda, H., “Real-time Shape Measurement by Integrated Phase-Shifting Method,” *Proc. SPIE* **3744**, 118–125 (1999).
- [48] Huntley, J. M., “Automated Fringe Pattern Analysis in Experimental Mechanics: a Review,” *Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, **33-2**, 105–125 (1998).
- [49] Kakunai, S., Sakamoto, T. and Iwata, K., “Profile Measurement Taken with Liquid-crystal Grating,” *Applied Optics*, **38-13**, 2824–2828 (1999).
- [50] Reich, C., Ritter, R. and Thesing, J., “3-D Shape Measurement of Complex Objects by Combining Photogrammetry and Fringe Projection,” *Optical Engineering*, **39-1**, 224–231 (2000).

- [51] Takeda, M. and Mutoh, K., “Fourier Transform Profilometry for the Automatic Measurement of 3-D Object Shapes,” *Applied Optics*, **22-24**, 3977–3982 (1983).
- [52] Gu, R., Yoshizawa, T. and Otani, Y., “One-step Phase Shift 3-D Surface Profilometry with Grating Projection,” *Optics and Lasers in Engineering*, **21**, 61–75 (1994).
- [53] Saldner, H. O. and Huntley, J. M., “Profilometry Using Temporal Phase Unwrapping and a Spatial Light Modulator-based Fringe Projector,” *Optical Engineering*, **36-2**, 610–615 (1997).
- [54] Asundi, A. and Zhou, W., “Unified Calibration Technique and Its Applications in Optical Triangular Profilometry,” *Applied optics*, **38-16**, 3556–3561 (1999).
- [55] Habib, A. F. and Morgan, M. F., “Automatic Calibration of Low-cost Digital Cameras,” *Optical Engineering*, **42-4**, 948–955 (2003).
- [56] Weng, J., Cohen, P. and Herniou, M., “Camera Calibration with Distortion Models and Accuracy Evaluation,” *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, **14-10**, 965–980 (1992).
- [57] Wei, G. and Ma, S., “Implicit and Explicit Camera Calibration: Theory and Experiments,” *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, **16-5**, 469–480 (1994).
- [58] Takahashi, A., Ishii, I., Makino, H. and Nakashizuka, M., “A Camera Calibration Method Using Parallelogramatic Grid Points,” *IEICE Transactions on Information and Systems*, **E79-D-11**, 1579–1587 (1996).
- [59] Brakhage, P., Notni, G. and Kowarschik, R., “Image Aberrations in Optical Three-dimensional Measurement Systems with Fringe Projection,” *Applied Optics*, **43-16**, 3217–3223 (2004).
- [60] 藤垣元治・森本吉春, フーリエ変換位相シフト法を用いた形状計測における位相接続法, 第19回 NCP 研究会・機械の強度と形態研究懇談会シンポジウム論文集, 9–12 (1995).
- [61] 藤垣元治・森本吉春, フーリエ変換位相シフト法を用いたレンズ収差の影響のない高精度非接触形状計測, 日本非破壊検査協会平成 8 年度春季大会講演概要集, 141–144 (1996).
- [62] Fujigaki, M. and Morimoto, Y., “Shape Measurement by Grid Projection Method without Influence of Aberration of Lenses,” *Post Conference Proc. of the VIII International Congress on Experimental Mechanics*, SEM, 167–172 (1996).

- [63] 藤垣元治, 高精度高速形状変形計測法の研究, 博士論文 (2001年2月).
- [64] Fujigaki, M. and Morimoto, Y., "Accurate Shape Measurement for Cylindrical Object by Phase-Shifting Method Using Fourier Transform," *Post Conference Proc. of the VIII International Congress on Experimental Mechanics*, SEM, 167–172 (1996).
- [65] Fujigaki, M., Inoue, H. and Morimoto, Y., "Application of Gabor Transform to 3-D Shape Analysis Using Grating Pattern Projection Method," *Proc. ATEM'95*, JSME, 67–72 (1995).
- [66] Wyant, J. C., "Interferometry Optical Metrology: Basic Principles and New Systems," *Laser Focus*, 65–71 (1982).
- [67] Wyant, J. C., Koliopoulos, C. L., Bhushan, B. and George, O. E., "An Optical Profilometry for Surface Characterization of Magnetic Media," *ASLE Trans.*, **27**, 101–113 (1983).
- [68] Groot, P. D., "Derivation of Algorithms for Phase-shifting Interferometry using the Concept of a Data-sampling Window," *Applied Optics*, **34-22**, 4723–4730 (1995).
- [69] Hariharan, P., "Phase-shifting Interferometry: Minimization of Systematic Errors," *Optical Engineering*, **39-4**, 967–969 (2000).
- [70] Hariharan, P., Oreb, B. F. and Eiju, T., "Digital Phase-shifting Interferometry: a Simple Error-compensating Phase Calculation Algorithm," *Applied Optics*, **26-13**, 2504–2506 (1987).
- [71] Fujigaki, M., Morimoto, Y. and Yabe, M., "Real-Time Measurement of Nanometer Displacement Distribution by Integrated Phase-Shifting Method," *JSME International Journal (Series A)*, **45-3**, 448–452 (2002).
- [72] Bruning, J. H., Herriott, D. R., Gallagher, J. E., Rosenfeld, D. P., White, A. D. and Brangaccio, D. J., "Digital Wavefront Measuring Interferometer for Testing Optical Surfaces and Lenses," *Applied Optics*, **13-11**, 2693–2703 (1974).
- [73] 武田光夫, サブフリンジ干渉計測基礎論, 光学, **13-1**, 55–65 (1984).
- [74] Morimoto, Y. and Fujisawa, M., "Fringe Pattern Analysis by a Phase-shifting Method using Fourier Transform," *Optical Engineering*, **33-11**, 224–231 (1994).
- [75] Huntley, J. M. and Coggrave, C. R., "Progress in Phase Unwrapping," *Proc. SPIE* **3407**, 86–93, (1998).

- [76] Spik, A and Robinson, D. W., "Investigation of the Cellular Automate Method for Phase Unwrapping and its Implementation on an Array Processor," *Optical and Lasers in Engineering*, **14-1**, 25–37 (1991).
- [77] Herráez, M. A., Burton, D. R., Lalor, M. J. and Gdeisat, M. A., "Fast Two-dimensional Phase-unwrapping Algorithm based on Sorting by Reliability Following a Noncontinuous Path," *Applied Optics*, **41-35**, 7437–7444 (2002).
- [78] Herráez, M. A., Gdeisat, M. A., Burton, D. R. and Lalor, M. J., "Robust, Fast, and Effective Two-dimensional Automatic Phase Unwrapping Algorithm based on Image Decomposition," *Applied Optics*, **41-35**, 7445–7455 (2002).
- [79] Zhang, S., Li, X. and Yau, S., "Multilevel quality-guided phase unwrapping algorithm for real-time three-dimensional shape reconstruction," *Applied Optics*, **46-1**, 50–57 (2007).
- [80] Huntley, J. M. and Saldner, H., "Temporal Phase-unwrapping Algorithm for Automated Interferogram Analysis," *Applied Optics*, **32-17**, 3047–3052 (1993).
- [81] Saldner, H. O. and Huntley, J. M., "Profilometry Using Temporal Phase Unwrapping and a Spatial Light Modulator-based Fringe Projector," *Optical Engineering*, **36-2**, 610–615 (1997).
- [82] Saldner, H. O. and Huntley, J. M., "Temporal Phase unwrapping: Application to Surface Profiling of Discontinuous Objects," *Applied Optics*, **36-13**, 2770–2775 (1997).
- [83] 格内敏・中本邦博・坂本亨・岩田耕一, プロジェクタを用いた三次元形状計測, 精密工学会誌, **62-11**, 1592–1596 (1996).
- [84] Gushov, V. I. and Solodkin, Y. N., "Automatic Processing of Fringe Patterns in Integer Interferometers," *Optics and Lasers in Engineering*, **14**, 311–324 (1991).
- [85] Zhou, W.-S. and Su, X.-Y., "A Direct Mapping Algorithm for Phase-measuring Profilometry," *Journal of Modern Optics*, **41**, 89–94 (1994).
- [86] Richard C. Singleton, "An Algorithm for Computing the Mixed Radix Fast Fourier Transform," *IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics*, **AU-17**, No. 2, 93–103 (1969).
- [87] 浅田尚紀・松山隆司・望月孝俊, 多重絞りカラー画像の解析, 情報処理学会論文誌, **32-10**, 1338–1348 (1991).
- [88] 浅田尚紀・藤原久永・松山隆司, 多重フォーカス画像を用いたエッジ検出と距離計測, 電子情報通信学会論文誌, **J77-D-II**, 1048–1058 (1994).

- [89] 倉本丈久・竹保義博・門藤至宏・廣川勝久, 高精度光応用計測技術の開発 (第1報) 光切断法による3次元計測, 広島県立東部工業技術センター研究報告, 第15号, 1-4 (2002).
- [90] Laurentini, A., "The Visual Hull Concept for Silhouette-based Image Understanding," *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, **16-2**, 150-162 (1994).
- [91] Laurentini, A., "How Far 3D Shapes Can Be Understood From 2D Silhouettes," *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, **17-2**, 188-195 (1995).
- [92] Forbes, K., Voigt, A. and Bodika, N., "Visual Hulls From Single Uncalibrated Snapshots Using Two Planar Mirrors," *Proceedings of the 15th Annual Symposium of the Pattern Recognition Association of South Africa* (2004).
- [93] Besl, P. J. and McKay, N. D., "A Method for Registration of 3-D Shapes," *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, **14-2**, 239-256 (1992).
- [94] Sitnik, R., Kujawinska, M. and Woznicki, J., "Digital Fringe Projection System for Large-volume 360-deg Shape Measurement," *Optical Engineering*, **41-2**, 443-449 (2002).
- [95] Schreiber, W. and Notni, G., "Theory and Arrangements of Self-calibrating Whole-body Three-dimensional Measurement Systems using Fringe Projection Technique," *Optical Engineering*, **39-1**, 159-169 (2000).
- [96] Hornbeck, L. J., "Deformable-mirror Spatial Light Modulators," *SPIE Critical Reviews Series*, **1150**, 86-102 (1989).
- [97] Sampsel, J. B., "An Overview of the Digital Micromirror Device (DMD) and its Application to Projection displays," in *Society for Information Display International Symposium Digest of Technical Paper*, **24**, 1012-1015 (1993).
- [98] Hornbeck, L. J., "Digital Light Processing Update: Status and Future Applications," *Proc. SPIE* **3634**, 158-170 (1999).
- [99] DMDのマイクロマシン特許100, ネオテクノロジー発行 (2004).
- [100] Pape, D. R. and Carter, J. A., "Digital Mirror Device Infrared Scene Projector," *Proc. SPIE* **2223**, 75-86 (1994).
- [101] Younse, J. M., "Projection Display Systems Based on the Digital Micromirror DeviceTM(DMDTM)," *Proc. SPIE* **2641**, 64-75, (1995).

- [102] Florence, J. M. and Yoder, L. A., "Display System Architectures for Digital Micromirror Device (DMDTM) Based Projectors," *Proc. SPIE* **2650**, 193–208 (1996).
- [103] Hornbeck, L. J., "Digital Light Processing for High-Brightness, High-Resolution Applications," *Proc. SPIE* **3013**, 27–40 (1997).
- [104] Chang, C.-M. and Shieh, H.-P. D., "Design of Illumination and Projection Optics for Projectors with Single Digital Micromirror Devices," *Applied Optics*, **39-19**, 3202–3208 (2000).
- [105] Malbet, F., Yu, J. W. and Shao, M., "High Dynamic Range Imaging Using a Deformable Mirror for Space Coronagraphy," *Publications of the Astronomical Society of the Pacific (PASP)*, **107**, 386 (1995).
- [106] Douglass, M. R. and Kozuch, D. M., "DMD Reliability Assessment for Large-area Displays," *Society for Information Display International Symposium Digest of Technical Paper*, **26**, 49–52 (1995).
- [107] Kearney, K. J. and Ninkov, Z., "Characterization of a Digital Micromirror Device for Use as an Optical Mask in Imaging and Spectroscopy," *Proc. SPIE* **3292**, 81–92 (1998).
- [108] Macaulay, C. E. and Dlugan, A. L. P., "Use of Digital Micromirror Devices in Quantitative Microscopy," *Proc. SPIE* **3260**, 201–206 (1998).
- [109] Dlugan, A. L. P., Macaulay, C. E. and Lane, P. M., "Improvements to Quantitative Microscopy Through the Use of Digital Micromirror Devices," *Proc. SPIE* **3921**, 6–11 (2000).
- [110] Fukano, T. and Miyawaki, A., "Whole-field Fluorescence Microscope with Digital Micromirror Device: Imaging of Biological Samples," *Applied Optics*, **42-19**, 4119–4124 (2003).
- [111] Nesbitt, R. S., Smith, S. L., Molnar, R. A. and Benton, S. A., "Holographic Recording Using a Digital Micromirror Device," *Proc. SPIE* **3637**, 12–20 (1999).
- [112] Kreis, T., Aswendt, P. and Höfling, R., "Hologram Reconstruction Using a Digital Micromirror Device," *Optical Engineering*, **40-6**, 926–933 (2001).
- [113] Yoder, L. A., Duncan, W. M., Koontz, E. M., So, J., Bartlett, T. A., Lee, B. L., Sawyers, B. D., Powell, D. and Rancuret, P., "DLP Technology: Applications in Optical Networking," *Proc. SPIE* **4457**, 54–61 (2001).
- [114] Zhang, C., Huang, P. S. and Chiang, F.-P., "Microscopic Phase-shifting Profilometry based on Digital Micromirror Device Technology," *Applied Optics*, **41-28**, 5896–5904 (2002).

- [115] Cao, Y., Su, X., Xiang, L., Chen, W. and Zhang, Q., “Numerical Simulation Effect of DMD Spatio-temporal Characteristic on Phase Measuring Profilometry,” *Proc. SPIE* **5852**, 162–168 (2005).
- [116] Rodrigo, P. J., Rerch-Nielsen, I. R. and Gluckstad, J., “High-speed Phase Modulation Using the RPC Method with a Digital Micromirror-array Device,” *Optics Express*, **14**-12, 5588–5593 (2006).
- [117] 藤垣元治・森本吉春・高騫, デジタルマイクロミラーデバイスを用いた位相シフト走査モアレ法による形状計測, *実験力学*, **2**-1, 50–54 (2002).
- [118] Fujigaki, M., Morimoto, Y. and Gao, Q., “Shape and Displacement by Phase-shifting Scanning Moiré Method Using Digital Micro-mirror Device, *Proc. SPIE*, **4537**, 362–365 (2002).
- [119] Gao, Q., Fujigaki, M. and Morimoto, Y., “Application of Digital Micro-Mirror Device to Deformation Measurement,” *Key Engineering Materials*, **243-244**, 189–194 (2003).
- [120] 高騫・藤垣元治・森本吉春, デジタルマイクロミラーデバイスを用いた投影格子の位相解析手法, *実験力学*, **3**-2, 47–52 (2003).
- [121] Hu, J., Song, M., Sun, Y. and Li, Y., “Measurement of Modulation Transfer Function of Charge-coupled Devices Using Frequency Variable Sine Grating Patterns,” *Optical Engineering*, **38**-7, 1200–1204 (1999).
- [122] ViALUX GmbH, ALP Product Sheet, Chemnitz (2003).
- [123] Osten, W., Haist, T. and Körner, K., “Active Approaches in Optical Metrology,” *Proc. of Intl. Conf. on Laser Applications and Optical Metrology (ICLAOM-03)*, 9–19 (2003).
- [124] Höfling, R. and Ahl, E., “ALP: Universal DMD Controller for Metrology and Testing,” *Proc. SPIE* **5289**, 322–329 (2004).
- [125] <http://www.vialux.de/>
- [126] Amidror, I., “The Theory of the Moiré Phenomenon,” *Computational Imaging and Vision*, Vol. 15, Kluwer Academic Publishers (2000).
- [127] Kobayashi, A. S., “Geometric Moiré, Chapter 6. In: Handbook on Experiment Mechanics, 2nd edition,” *Society for Experimental Mechanics*, New York, 267–296 (1993).

- [128] Cloud, G., “Geometric Moiré Phenomena and Simulations,” *Experimental Techniques*, **29-4**, 15–18 (2005).
- [129] Kobayashi, A. S., “Digital Image Processing, Chapter 21. In: Handbook on Experiment Mechanics, 2nd edition,” *Society for Experimental Mechanics*, New York, 1018–1026 (1993).
- [130] Kato, J., Yamaguchi, I., Nakamura, T. and Kuwashima, S., “Video-rate Fringe Analyzer based on Phase-shifting Electronic Moiré Patterns,” *Applied Optics*, **36-32**, 8403–8412 (1997).
- [131] 藤垣元治・森本吉春・金汪根, 位相シフト走査モアレ法による実時間等高線・等変位線表示装置の開発, 精密工学会誌, **66-8**, 1221–1225 (2000).
- [132] Proll, K.-P., Nivet, J.-M., Volland, C. and Tiziani, H. J., “Enhancement of the Dynamic Range of the Detected Intensity in an Optical Measurement System by a Three-Channel Technique,” *Applied Optics*, **41-1**, 130–135 (2002).
- [133] Nayar, S. K. and Branzoi, V., “Adaptive Dynamic Range Imaging: Optical Control of Pixel Exposures Over Space and Time,” *Proc. of the Ninth IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV)*, 2-Volume Set, 1–8 (2003).
- [134] Nayar, S. K., Branzoi, V. and Boulton, T. E., “Programmable Imaging using a Digital Micromirror Array,” *Proc. of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 436–443 (2004).
- [135] Nayar, S. K., Branzoi, V. and Boulton, T. E., “Programmable Imaging: Towards a Flexible Camera,” *Int. Journal of Computer Vision*, **70-1**, 7–22 (2006).
- [136] LED 照明推進協議会編, LED 照明ハンドブック, オーム社, 160 (2006).
- [137] <http://www.ccs-inc.co.jp/top.html>
- [138] <http://www.citizen.co.jp/cactive/3d-lcg/>
- [139] Yoshizawa, T., Fujita, H., Otani, Y. and Yamamoto, M., “Three-dimensional Imaging using Liquid Crystal Grating Projection,” *Proc. SPIE* **5202**, 30–37 (2003).
- [140] Yoshizawa, T. and Fujita, H., “Liquid Crystal Grating for Profilometry using Structured Light,” *Proc. SPIE* **6000**, 60000H (2005).

本研究に関する研究業績

A. 学術論文

1. Ri, S., Fujigaki, M. and Morimoto, Y., “360-deg Profilometry of 3-D Object by Multi-reference-planes Method,” *Key Engineering Materials*, **270-273**, Trans Tech Publications, Switzerland, 736–743 (2004).
2. Ri, S., Fujigaki, M. and Morimoto, Y., “Phase Reliability Evaluation in Phase-shifting Method Using Fourier Transform for Shape Measurement,” *Optical Engineering*, **44-8**, 083601-1–8 (2005).
3. 李志遠・藤垣元治・松井徹・森本吉春, DMD 反射式 CCD カメラにおけるモアレパターンを用いた画素対応の調整手法, *実験力学*, **5-4**, 37–42 (2005).
4. Ri, S., Fujigaki, M., Matui, T. and Morimoto, Y., “Pixel-to-pixel Correspondence Adjustment in DMD Camera by Moiré Methodology,” *Experimental Mechanics*, **46-1**, 67–75 (2006).
5. Ri, S., Fujigaki, M., Matui, T. and Morimoto, Y., “Accurate Pixel-to-pixel Correspondence Adjustment in a Digital Micromirror Device Camera by Using the Phase-shifting Moiré Method,” *Applied Optics*, **45-27**, 6940–6946 (2006).
6. Ri, S., Matsunaga, Y., Fujigaki, M., Matui, T. and Morimoto, Y., “Development of DMD Reflection-type CCD Camera for Phase Analysis and Shape Measurement,” *Journal of Robotics and Mechatronics*, Special Issue on Optomechatronics, **18-6**, 728–737 (2006).

B. 解説論文

1. 森本吉春・松井徹・藤垣元治・山本裕子・李志遠, 高精度位相解析法の光学計測への応用, 非破壊検査, **54-3**, 120–126 (2005).

C. 国際会議

(3 番以外すべて査読あり)

1. Ri, S., Fujigaki, M. and Morimoto, Y., “360-deg Profilometry of 3-D Object by Multi-reference-planes Method,” *11th Asia-Pacific Conference on Non-Destructive Testing (APC-NDT)*, Korea (Jeju island), (2003).
2. Fujigaki, M., Morimoto, Y. and Ri, S., “Elimination of Halation Effect on Metallic Object in Profilometry Using Multi-reference-planes Method,” *Proc. of Intl. Conf. on Laser Applications and Optical Metrology (ICLAOM-03)*, India (New Delhi), 345–349 (2003).
3. Morimoto, Y., Fujigaki, M. and Ri, S., “Accurate Three-dimensional Surface Profilometry by Grating Projection Method,” *The American Society for Nondestructive Testing 13th Annual Research Symposium (ASNT2004)*, USA (NY), (2004). (Abstract only)
4. Ri, S., Fujigaki, M. and Morimoto, Y., “Phase Reliability Evaluation in Phase-shifting Method using Fourier Transform for Shape Measurement,” *12th International Conference on Experimental Mechanics (ICEM)*, Italy (Bari), 534–535 (2004).
5. Fujigaki, M., Morimoto, Y. and Ri, S., “Improvement of Accuracy of Shape Measurement Using DMD Reflection-type CCD Camera,” *The 3rd International Conference on Experimental Mechanics (ICEM)*, Singapore, *Proc. SPIE* **5852**, 552–558 (2004).
6. Ri, S., Fujigaki, M., Matui, T. and Morimoto, Y., “Pixel-to-pixel Correspondence Adjustment Method Using Moiré for DMD Camera,” *2005 SEM Annual Conference & Exposition on Experimental and Applied Mechanics (SEM)*, USA (Portland), #44–137 (2005).
7. Ri, S., “Accurate Adjustment Method using Phase-shifting Moiré Method for DMD camera,” *2005 SEM Annual Conference & Exposition on Experimental and Applied Mechanics (SEM)*, USA (Portland), International Student Paper Competition, #25–403 (2005).
8. Ri, S., Matsunaga, Y., Fujigaki, M., Matui, T. and Morimoto, Y., “Development of DMD Reflection-type CCD Camera for Phase Analysis and Shape Measurement,” *SPIE International Symposium on Optomechatronic Technologies*, Japan (Sapporo), *Proc. SPIE*, **6049**, 60490I-1–12, (2005).
9. Matui, T., Ri, S., Fujigaki, M. and Morimoto, Y., “Omnidirectional Shape Measurement Using Reliability Evaluation Value in Fourier Transform,” *SPIE International Symposium on Optomechatronic Technologies*, Japan (Sapporo), *Proc. SPIE*, **6049**, 60490F-1–12 (2005).

10. Ri, S., Fujigaki, M., Matui, T. and Morimoto, Y., "Shape Measurement Method Using DMD Camera for Wide-reflectance Objects," *2006 SEM Annual Conference & Exposition on Experimental and Applied Mechanics (SEM)*, USA (Saint Louis), #46-146 (2006).
11. Ri, S., "Removal of Halation Effects in Shape Measurement Using Phase Reliability Evaluation Value," *2006 SEM Annual Conference & Exposition on Experimental and Applied Mechanics (SEM)*, USA (Saint Louis), International Student Paper Competition, #17-426 (2006).

D. 国内会議

1. 李志遠・藤垣元治・森本吉春, 格子投影法による高精度全周形状計測, 日本機械学会 第 25 回 NCP 研究会・機械の強度と形態研究懇話会シンポジウム論文集, 49-52 (2002).
2. 李志遠・藤垣元治・森本吉春, 二枚の基準面を用いた広ダイナミックレンジの高精度形状計測法, 日本実験力学会 2003 年度年次講演会, 日本実験力学会講演論文集, **3**, 7-11 (2003).
3. 李志遠・藤垣元治・森本吉春, 二枚の基準面を用いた鏡面反射を避ける形状計測手法, 日本機械学会 第 26 回 NCP 研究会・機械の強度と形態研究懇話会シンポジウム論文集, 37-38 (2003).
4. 藤垣元治・森本吉春・李志遠・高橋功, 画像計測における誤差低減手法, 日本機械学会 2004 年度関西支部講演会, **044-1**, 2-25,26 (2004).
5. 李志遠・藤垣元治・森本吉春, マルチカメラシステムを用いた格子投影法による高精度形状計測手法, 日本実験力学会 2004 年度年次講演会, 日本実験力学会講演論文集, **4-2**, 120-125 (2004).
6. 李志遠・松永康寛・藤垣元治・松井徹・森本吉春, デジタルマイクロミラー (DMD) の光学的計測への応用, 合同ワークショップ 2004, 日本実験力学会講演論文集, **4-3**, 25-30 (2004).
7. 李志遠・松永康寛・藤垣元治・松井徹・森本吉春, DMD 積分型相関位相シフト法による位相解析・形状計測手法, 日本機械学会 第 1 回 NCP フォーラム, 機械の強度と形態研究懇話会シンポジウム (2005).
8. 李志遠・藤垣元治・松井徹・森本吉春, DMD 反射式 CCD カメラにおけるモアレパターンを用いた画素対応の調整手法, 日本実験力学会 2005 年度年次講演会, 日本実験力学会講演論文集, **5**, 140-145 (2005).

9. 松永康寛・森本吉春・藤垣元治・松井徹・李志遠, モアレパターンを用いた DMD 反射式 CCD カメラの調整手法, 日本機械学会関西学生会学生員卒業研究発表講演会講演前刷集, 6-14 (2005).
10. 松永康寛・森本吉春・藤垣元治・松井徹・李志遠, DMD 反射式 CCD カメラを用いた 3 次元形状計測の精度評価, 精密工学会, 第 10 回知能メカトロニクスワークショップ講演論文集, 142-146 (2005).
11. 李志遠・藤垣元治・松井徹・森本吉春, DMD カメラを用いた広輝度レンジの位相解析手法, 日本実験力学会 2006 年度年次講演会, 日本実験力学会講演論文集, 6, 25-30 (2006).
12. 松井徹・森本吉春・藤垣元治・李志遠・横貫翔一・宮本昌幸, 全方位形状計測におけるリメッシュ手法, 日本実験力学会 2006 年度年次講演会, 日本実験力学会講演論文集, 6, 301-303 (2006).

E. 特許出願

1. 藤垣元治・森本吉春・李志遠, 評価値を用いる縞画像計測データ合成方法, 特開: 2005-164294, 公開日: 2005 年 6 月 23 日, 特許第 3837565 号.
2. 藤垣元治, 森本吉春, 松井徹, 李志遠, モアレ縞を用いたずれ, パターンの回転, ゆがみ, 位置ずれ検出方法, 特願: 2005-260836, 出願日: 2005 年 9 月 8 日

F. 受賞

1. 平成 17 年 6 月 7 日 2005 年度米国実験力学会国際学生コンクール発表 (参加賞)
2. 平成 18 年 6 月 5 日 2006 年度米国実験力学会国際学生コンクール発表 (参加賞)

G. 学会報告

1. 李志遠, 2004 年実験力学国際会議 ICEM12 参加報告, 実験力学, 4-4, 67 (2004).
2. 李志遠, 2006 年度米国実験力学会参加報告, 実験力学, 6-3, 123 (2006).

H. 技術講習会・展示会

1. 森本吉春・藤垣元治・李志遠, 位相解析による高速高精度形状変形計測, 日本実験力学会 2004 年度年次講演会, デモ付講演, 仙台市戦災復興記念館 (2004.7.25).

2. 李志遠・松永康寛・藤垣元治・松井徹・森本吉春, デジタルマイクロミラー (DMD) の光学的計測への応用, 合同ワークショップ 2004「実験力学における計測・データ処理の問題点・ノウハウ・工夫」デモ付講演, 群馬 (2004.11.26).
3. 森本吉春・藤垣元治・米山聡・李志遠・喜多俊行, 光学的全視野計測法の基礎と応用～位相シフトデジタルホログラフィによる変位分布・ひずみ分布計測～, 実験力学学会主催「第1回技術講習会」, 東京・青山学院大学 (2005.11.8).
4. 李志遠・竹迫涼一, 和歌山大学・高精度三次元形状計測装置の展示 (日本技術センターとの共同研究), インターモールド 2006/金型展 2006, インテックス大阪 (2006.4.12-15).

I. 新聞記事

1. 日刊工業新聞, 2006年4月19日掲載 (第6面)
「精密成形品のそり・歪み5マイクロメートルの精度で測定」
(株式会社日本技術センターとの共同研究で行っている3次元測定装置に関する記事)

謝辞

本論文の作成にあたり，論文審査委員として御指導を仰ぎ懇切なる御教示を賜りました和歌山大学森本吉春理事（教授併任），戸田裕己教授，和田俊和教授並びに貴重なご支援を頂いた同大学の関係者に深く感謝致します。

本研究は，和歌山大学大学院システム工学研究科博士後期課程知的計測クラスタ在学中に光波画像計測研究室において，森本吉春教授，藤垣元治助教授ならびに松井徹助教授の御指導のもとに行ったものである。森本吉春教授の寛大なご指導で，研究に関して多いにご教示を賜ったのみならず，国内・国際会議での学会発表など数多くの好機を頂きました。また国際会議や論文投稿の英文原稿作成にあたって，多くのアドバイスを頂きました。藤垣元治助教授に教えていただいたC言語のプログラムをはじめ実用的な数多くの技術は，研究を進めるうえでこの上ない力となりました。特に実験における様々なアドバイスにより，本研究をスムーズに進めることができました。平素の研究活動を通じて，研究成果発表の際に松井徹助教授からの的確な助言を賜りました。終わりに臨み，終始懇切丁寧なる御指導賜りました森本吉春理事，藤垣元治助教授並びに松井徹助教授に深く感謝致します。

本研究の一部は日本学術振興会の科学研究費補助金（特別研究員奨励費）を受けて研究を行いました。ここで感謝の意を表します。共同研究である株式会社日本技術センターの多くの方に感謝します。特に展示会や多くの打ち合わせで討論してくれた竹迫涼一氏に心より感謝します。各種の国際会議や国内会議を通じ，御助言，激励を頂いた多くの先生方に心より感謝致します。特に学会などでお世話になった青山学院大学の隆雅久教授や大阪府立大学の米山聡講師に深く感謝します。以前同じ研究室に所属していた野村孝徳助教授からの的確な助言を多く賜わり，ここで感謝します。

平素の研究活動に関し，種々の御協力を頂いた光波画像計測研究室の修了生・卒業生・在学生および関係者の皆様方に心よりお礼申し上げます。特に和歌山大学大学院在学中から，先輩として暖かいご教示をいただいた博士後期課程の山本裕子氏，池田泰行氏（現株式会社オムロン），中原徳雄氏（現株式会社ニッケ機械製作所），良き同輩であった高橋功氏（現株式会社 NEC ビューテクノロジー）に感謝致します。博士前期課程2年生の松永康之氏に DMD の制御に関するプログラムの作成や実験などの協力を感謝します。

最後に，著者に博士前期課程から博士後期課程までの5年間の研究を続ける機会を与え，様々な形で支えてくれた両親に心の底から感謝の意を表します。