

Title	高精度高速形状変形計測法の研究
Author(s)	藤垣, 元治
Citation	大阪大学, 2001, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/1910
rights	
Note	

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

Osaka University

高精度高速形状変形計測法の研究

2001年2月

藤垣元治

概要

研究の目的

本研究では、三次元物体の非接触形状計測の高精度化および高速化を行うための新しい手法を開発する。高精度化としては、従来の手法では一般に無視されてきたレンズ収差によるゆがみの影響をなくす手法を開発する。高速化としては、実時間でナノメートルオーダーの微小な変形から数メートル程度の物体の形状および変形の分布を計測するシステムを開発する。そのために、連続的に位相シフトされた格子画像から位相値を高速に求めることができる新たな位相シフト法を開発する。

研究の背景

三次元物体の形状を非接触で計測する技術は、製造業だけではなく土木、医療、情報通信、衣料などさまざまな分野からその高精度化と高速化が求められている。

形状計測手法としては、計測対象物の持つ特徴だけを用いる受動型計測と計測対象物に格子パターンなどを投影してそのパターンの持つ特徴を用いる能動型計測がある。能動型計測のひとつに格子投影法があり、格子の位相を解析することにより高精度な形状計測を行うことができる。また、高速化も容易である。

高精度に空間座標を算出するためには、位相を精度よく求めることと、キャリブレーションを精度よく行うことの2点が重要である。従来からキャリブレーションを行う手法として、実測するのではなく、カメラで撮影した画像からカメラとプロジェクタのレンズ中心座標を算出する手法などが考案されている。また、レンズ収差によるゆがみの影響を小さくするために、補正式を用いて空間座標計算を行う手法も開発されているが、完全に影響をなくすことはできていない。

高速に形状計測を行うためには、空間座標の計算に要する時間を省く工夫が必要となる。モアレトポグラフィの手法を用いて等高線画像を得、その等高線の位相を求めることができれば、空間座標の計算をすることなしに物体の高さ分布画像（距離画像）を得ることができ、高速な形状計測が可能となる。従来からモアレトポグラフィの手法を利用して高さ分布画像を実時間で出力する研究が行われているが、特殊なセンサーが必要であったり、装置が複雑であったり、分解能が低いなどの問題がある。

研究の内容

図1に本研究の流れを図式化したものを示す。

形状計測の高精度化として、新たにレンズ収差による歪みの影響のない形状計測手法を提案する。この原理を確認し、さらに高精度化・全自動化を行い100mm程度のサイズの物体の場合、マイクロメートルオーダーの精度で形状計測が可能な形状計測システムの開発をめざす。まず、原理について述べ、その原理の有効性を実験により確認する。次に誤差要因とその対策について検討する。基準面に液晶ディスプレイを用いることと基準面を複数枚化する手法を提案し、さらなる高精度化をめざす。最後に本手法の適用例として板金加工製品の平面度計測と曲面を持つ金属部品、ニホンオオカミの頭蓋骨模型の形状計測結果を示す。また、回転物体に適用する手法について試みた結果を示す。

形状変形計測の高速化として、高さ分布と変位分布を実時間で求める方法を提案する。まず、モアレトポグラフィの手法を用いて実時間で等高線および等変位線を表示するシステムを開発する。次に、等高線および等変位線を位相表示する手法を開発して高精度化を行う。その手法のひとつとして、連続的に位相シフトされた格子のCCDの各画素における光の強度の時間変化を1フレームの撮影時間だけ時間積分することによって得られた輝度値から位相値を求める積分型位相シフト法を新たに提案する。これを用いて、ナノメートルからマイクロメートルオーダーの微小変形計測、マイクロメートルからミリメートルオーダーの物体の形状変形計測、ミリメートルからメートルオーダーの物体の形状変形計測をそれぞれ実時間で行う手法および装置を開発し、実際に計測実験を行うことで有効性を示す。計測実験としては、具体的には次のことを行う。トワイマン・グリーン干渉計による干渉縞位相解析に適用することによって、マイ

クロマシ技術で作成された物体のナノメートルオーダーの変形分布を計測する。マイクロメートルオーダーの高さを持つ物体の形状や微小な変形を干渉縞投影を用いて計測する。格子投影法によりメートルからミリメートルオーダーの高さを持つ人体などの物体の高さを計測する。

研究の成果として、形状計測の高精度化では、提案手法によりマイクロメートルオーダーの精度の形状計測が行うことが可能であることが確認できた。形状変形計測の高速化では、実時間で物体の形状および変形を求めるシステムを開発することができた。

今後の課題と発展

形状計測の高精度化では、格子投影においてマイクロメートルオーダーの形状計測をめざしたが、現状での精度は $10\mu\text{m}$ より少しよい程度である。本手法は原理的には非常に高精度であるが、高精度になると今まで無視できていた機器の温度変化による熱変形や液晶プロジェクタの画素間のすき間などが問題となってくる。これらの問題を解決すれば、さらに高精度の形状計測が可能となる。また、基準面の位相解析を全自動化することによって、基準面の枚数を手作業では行えない程多くすることが可能になり、極めて高精度に形状計測をおこなうことができると期待している。今後はこれらの問題の解決と全自動化を行い、現状より1桁精度を高め、 $1\mu\text{m}$ の精度の実現をめざす。

形状変形計測の高速化については、位相接続を行うことによって、連続化された高さ分布や変位分布を得ることのできる手法をハードウェア化して実時間で行えるようにする。この研究成果を発展させて、ラインセンサを用いた形状計測手法の開発を行っている。ラインセンサを用いて形状計測や変形計測を高速に行えるようになれば、連続物体の実時間形状変形計測が可能となる。これは、工場ラインでの鋼板やパイプ、織物、紙、レトルトパック、などのような連続的に生産される加工物の検査などへ適用できる。また、トンネルや線路、道路のような巨大構造物の変形計測を高速に行うことが可能となる。

将来は、本研究成果である高精度化手法と高速化手法を融合させることにより高精度かつ高速な形状変形計測システムを構築していく。同時に、これまでの研究で得た成果を実用化することにも取り組んでいく。

本論文の構成

本論文は全4章で構成されている。第1章は緒論で、研究の背景として非接触形状計測のニーズと手法および、位相解析が有効な手段であること、従来の形状計測手法について述べる。さらに研究の目的と本論文の構成について述べる。

第2章では、形状計測の高精度化として、新たにレンズ収差によるゆがみの影響のない形状計測手法を開発する。この原理を確認し、さらに高精度化・全自動化を行い100mm程度のサイズの物体の場合、マイクロメートルオーダーの精度で形状計測が可能システムの開発をめざす。

第3章では、形状変形計測の高速化として、高さ分布を表す等高線と変位分布を表す等変位線をそれぞれ位相で表現することにより実時間で高さ分布・変位分布を求めるシステムを開発する。ミリメートルからメートルオーダーの物体の形状変形計測、マイクロメートルからミリメートルオーダーの物体の形状変形計測、ナノメートルからマイクロメートルオーダーの微小変形計測をそれぞれ実時間で行う手法および装置を開発し、実際に計測することで有効性を示す。

第4章では、本論文の内容を総括して述べる。

高精度高速形状変形計測法の研究

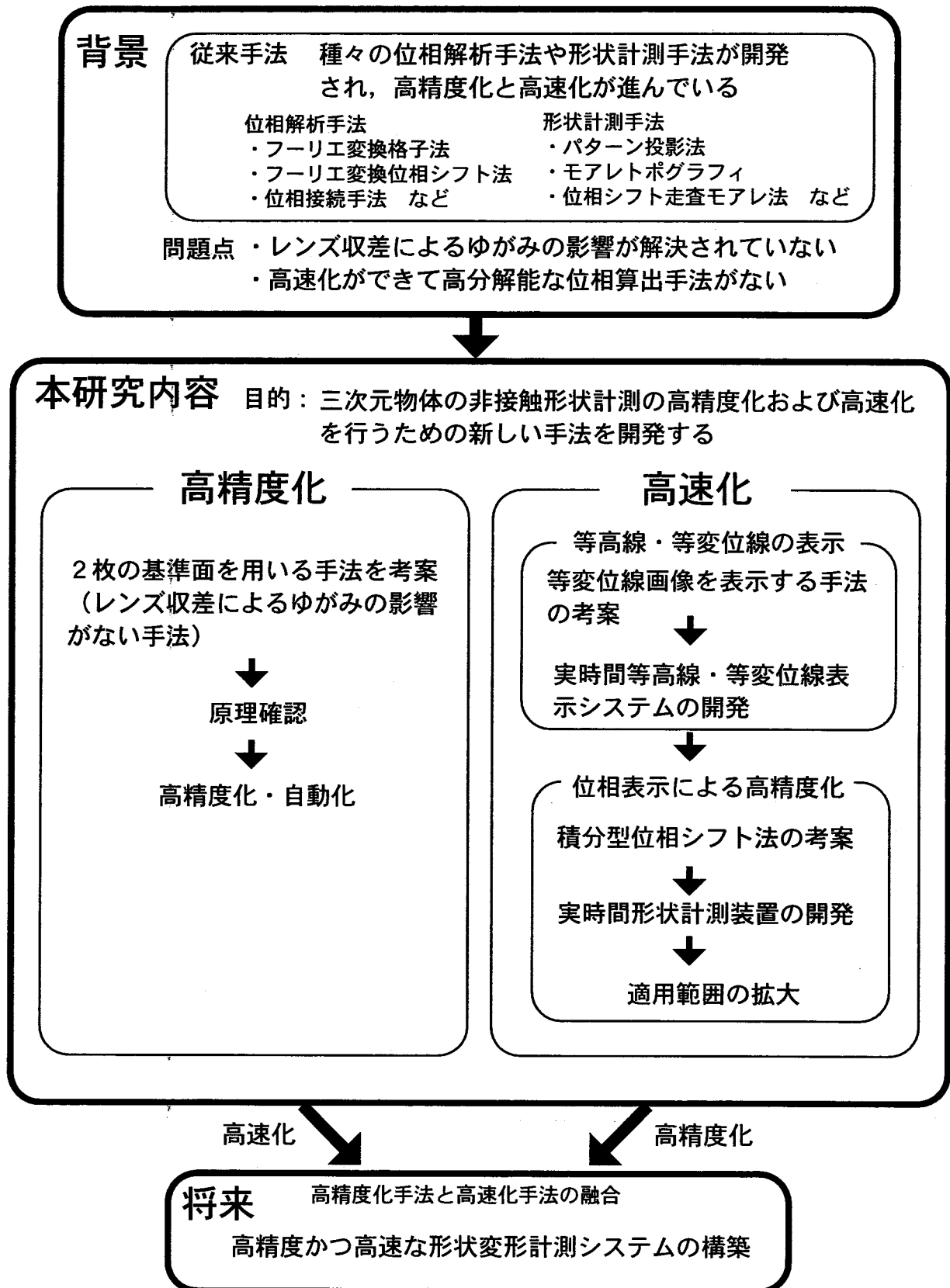


図1 研究の流れ

目 次

第 1 章 緒論	1
1-1 はじめに	1
1-2 研究の背景	1
1-2.1 非接触形状計測のニーズ	2
1-2.2 非接触形状計測	3
1-2.2.1 受動型計測と能動型計測	3
1-2.2.2 光切断法	4
1-2.2.3 2次元パターン投影法	5
1-2.2.4 格子投影法	5
1-2.2.5 計測対象物	6
1-2.3 位相解析	7
1-2.3.1 格子画像の位相解析	7
1-2.3.2 1枚の格子画像から格子の位相値を求める方法	7
1-2.3.3 位相シフト法	9
1-2.3.4 位相接続	11
1-2.4 従来の高精度形状計測手法	13
1-2.4.1 空間座標算出の高精度化	13
1-2.4.2 キャリブレーション	13
1-2.4.3 従来の手法の問題点	14
1-2.5 従来の実時間形状計測手法	15
1-2.5.1 実時間形状計測	15
1-2.5.2 モアレトポグラフィ	15
1-2.5.3 位相解析による高精度化・自動化・高速化	17
1-2.5.4 従来の手法の問題点	18
1-3 研究の目的	18
1-4 本論文の構成	19
第 2 章 形状計測の高精度化	21
2-1 はじめに	21
2-2 形状計測原理	23
2-2.1 2次元格子番号と2次元位相	23
2-2.2 2次元格子投影による形状計測	25
2-2.3 基準面を用いた形状計測原理	26

2-3 形状計測原理の確認実験	29
2-3.1 計測装置	29
2-3.2 基準板の位相解析	30
2-3.3 平板の形状計測	32
2-3.4 3次元物体への適用	34
2-4 高精度化・自動化	37
2-4.1 誤差要因と対策	37
2-4.2 複数のピッチの異なる格子を用いる位相接続手法の開発	38
2-4.2.1 2通りのピッチの格子を用いる場合	38
2-4.2.2 複数のピッチの格子を用いる場合	40
2-4.3 解析ソフトウェアの開発	41
2-4.3.1 動作環境	42
2-4.3.2 特徴	42
2-4.3.3 フーリエ変換位相シフト法による全自動位相解析	43
2-4.4 液晶ディスプレイを用いた基準板	45
2-4.4.1 基本構造	46
2-4.4.2 基準面の全自動位相解析	47
2-4.5 基準面の複数枚化	49
2-5 適用例	51
2-5.1 板金加工品の平面度計測	51
2-5.2 金属曲面部品の形状計測	54
2-5.3 ニホンオオカミ頭がい骨模型の形状計測	56
2-5.4 円筒状物体への適用	57
2-5.4.1 円筒状物体の計測原理	57
2-5.4.2 計測実験システム	57
2-5.4.3 計測実験結果	59
2-6 おわりに	61
2-6.1 レンズ収差によるゆがみの影響のない形状計測手法	61
2-6.2 高精度化と自動化	61
2-6.3 種々の3次元物体への適用	61
2-6.4 今後の課題と発展	61
第3章 形状変形計測の高速化	63
3-1 はじめに	63
3-2 等高線・等変位線表示システム	65
3-2.1 位相シフト走査モアレ法による等変位線表示原理	65
3-2.2 装置構成	65
3-2.3 カメラレンズの倍率と位置の調整	67

3-2.4	形状変形計測実験	68
3-3	実時間等高線・等変位線表示システムの開発	70
3-3.1	装置構成	70
3-3.2	等高線等変位線計測実験	71
3-4	等高線・等変位線の位相表示による高精度化	72
3-4.1	等高線・等変位線の位相表示	72
3-4.1.1	等高線の位相表示の原理	72
3-4.1.2	等変位線の位相表示の原理	72
3-4.2	相関位相シフト法	74
3-4.2.1	位相算出原理	74
3-4.2.2	ソフトウェアによる動作確認実験	77
3-4.2.3	精度の検討	80
3-4.3	積分型位相シフト法の原理	83
3-4.3.1	位相算出原理（矩形波格子）	83
3-4.3.2	位相算出原理（コサイン波格子）	85
3-5	積分型位相シフト法による実時間形状計測装置の開発	87
3-5.1	実時間位相解析ボードの開発	87
3-5.2	実時間形状計測装置の開発	88
3-5.3	形状計測実験	89
3-5.3.1	平板の形状計測	89
3-5.3.2	人体形状計測への適用	91
3-6	計測結果投影装置の開発	92
3-6.1	原理と装置構成	92
3-6.2	動作試験	93
3-7	カラー格子を用いた位相接続	96
3-7.1	白黒比1:2の矩形波格子を用いた積分型位相シフト法	96
3-7.2	2通りのピッチの格子を用いた位相接続方法	100
3-7.3	実時間位相接続回路	101
3-7.4	カラーの格子を用いた位相の連続化実験	101
3-8	高速度カメラへの適用	104
3-8.1	計測装置と計測対象	104
3-8.2	計測結果	104
3-9	積分型位相シフト法のマイクロメータオーダー微小変形計測への適用	106
3-9.1	干渉縞投影装置を用いた微小形状変形計測システム	106
3-9.2	片持ち梁の微小変形計測実験	107
3-10	積分型位相シフト法のナノメータオーダー微小変形計測への適用	109
3-10.1	トワイマン・グリーン干渉計による微小変形計測の原理	109

3-10.2	平面ミラーの実時間変形計測	110
3-10.2.1	計測装置	110
3-10.2.2	計測結果	111
3-10.3	加速度センサーの熱変形計測	112
3-10.3.1	実験方法	112
3-10.3.2	計測結果	114
3-11	おわりに	115
3-11.1	等高線・等変位線の実時間表示と高精度化	115
3-11.2	積分型位相シフト法による実時間形状変形計測	115
3-11.3	実時間位相解析ボードの微小変形計測への適用	116
3-11.4	今後の課題と発展	116

第4章 結論 117

4-1	本研究のまとめ	117
4-1.1	形状計測の高精度化	117
4-1.2	形状変形計測の高速化	117
4-2	今後の課題と発展	118

付 録 120

A1	位相シフト法による位相の算出方法	120
A2	2次元位相から画面内座標を求める手法	122
A3	2直線の交点を求める方法	123
A4	フーリエ変換格子法	125
A5	フーリエ変換位相シフト法	129
A6	周囲の画素の位相値を参照する位相接続方法	131
A7	位相接続における格子ピッチの組み合わせ例	132
A8	Mixed Radix Fast Fourier Transform (MR-FFT)	133
A9	レンズ中心座標を用いた形状計測アルゴリズム	134
A9-1	最小二乗法によるレンズ中心座標の求め方	134
A9-2	レンズ中心座標を用いた座標算出方法	136
A10	位相シフト走査モアレ法による等高線表示原理	138
A10-1	等高線画像作成原理	138
A10-2	走査モアレ法の原理	139
A10-3	位相シフト走査モアレ法の原理	140

参考文献.....	141
研究業績.....	146
関連特許出願.....	150
謝辞.....	151

第1章 緒論

1-1 はじめに

本研究では、非接触で三次元物体の形状を計測する手法の高精度化および高速化を行う。高精度化としては、従来の手法では一般に無視されてきたレンズ収差によるゆがみの影響をなくし、計測範囲全面で同じ精度で計測できる手法を開発する。さらに高精度化する手法の開発と、この手法を容易に用いることができるように全自動化することをめざす。高速化としては、実時間でナノメートルオーダーの微小な変形から数メートル程度の物体の形状および変形の分布を計測するシステムを開発する。そのために、連続的に位相シフトされた格子画像から位相値を高速に求めることができる新たな位相シフト法を開発する。

緒論では、まず研究の背景について述べ、その後研究の目的と本論文の構成を述べる。研究の背景としては、まず、非接触形状計測のニーズについて述べ、これまでに研究されてきた非接触形状計測手法を紹介する。その後、近年の形状計測で多く用いられている格子パターンの解析手法である位相解析について述べる。最後に、これまで研究が行われてきた従来の高精度形状計測手法と従来の実時間形状計測手法について述べる。

1-2 研究の背景

三次元物体の形状を非接触で計測する技術は、製造業からだけではなく土木、医療、情報通信、衣料などさまざまな分野からその高精度化と高速化が求められている。高精度化することによって、例えば、工場で作られた部品や金型、義歯など、さまざまな加工物の形状検査と製作プロセスの効率向上が期待できる。高速化することによって、人体のように動いている物体の形状計測が可能となる。また、実時間で連続的に形状計測結果を出力すれば、例えば、ガスタンクや橋梁、トンネルなど巨大な構造物の変形監視装置などが実現できる。また、形状を計測しながら加工することによって加工精度を向上させる加工システムの構築なども期待できる。その他、自動車や車椅子、視覚障害者のための障害物検知装置への応用や、対象物までの距離や形を判断するロボットの目への応用などが可能となる。

形状計測手法としては、計測対象物の持つ特徴だけを用いる受動型計測と計測対象物に格子パターンなどを投影してそのパターンの持つ特徴を用いる能動型計測が従来から研究されてきている。受動型計測ではデータが得られない部分が出てくる可能性が高いため、能動型計測の方が有利である。これまでに研究されてきた能動型計測には、光切断法や2次元パターン投影法がある。2次元パターン投影法の中に格子投影法があり、その位相を解析することにより高精度な形状計測を行うことができる。また、位相解析を用いることによって、物体の形状に応じてゆがんだ格子の位置を高速に求めることができる。そのため近年、形状計測手法として格子投影法がよく用いられるようになってきた。

位相解析手法としては、1枚の格子画像から格子の位相値を求める方法や複数枚の画像から位相を求める位相シフト法の研究が行われている。また、一般に格子の位相は、格子1本ごとに0から 2π の繰り返しとして得られるために異なる格子の識別を行うことができない。そこで、0から 2π の繰り返しの位相に格子の番号の 2π 倍を加えることによって、位相値を連続化する位相接続を行う必要がある。位相接続を行うことによって、複数本数の格子を識別することができるようになる。

高精度に形状計測を行うために、連続化された位相値から空間座標を計算することによって物体の形状を求めることができる。ただし空間座標の計算を行うためには、カメラや格子投影用のプロジェクタの位

位置関係を知っておく必要がある。この位置関係のパラメータを求めることをキャリブレーションと呼ぶ。高精度に空間座標を算出するためには、位相を精度よく求めることと、キャリブレーションを精度よく行うことの2点が重要である。従来からキャリブレーションを行う手法として、実測するのではなく、カメラで撮影した画像から算出する手法などが考案されている。また、レンズ収差によるゆがみの影響を小さくするために、補正式を用いて空間座標計算を行う手法も開発されているが、完全に影響をなくすことはできていない。

高速に形状計測を行うためには、空間座標の計算に要する時間を省く工夫が必要となる。モアレトポグラフィの手法は、カメラと格子投影プロジェクタの配置がある条件を満たす場合に物体の形状を表す等高線画像を得ることができる。等高線の位相を求めることができれば、空間座標の計算をすることなしに物体の高さ分布画像（距離画像）を得ることができ、高速な形状計測が可能となる。高速に形状計測を行い、連続的に出力することで、実時間形状計測となる。従来からモアレトポグラフィの手法を利用して高さ分布画像を実時間で出力する研究が行われているが、特殊なセンサーが必要であったり、装置が複雑であったり、分解能が低いなどの問題がある。

このような背景を踏まえて本研究を進める。以下、背景の詳細を述べる。

1-2.1 非接触形状計測のニーズ

構造物の形状や変形の状態を高精度かつ高速に計測する要求は強い。たとえば、金型の寸法検査はマイクロメートルオーダの精度が必要である。現在は高価な接触型の三次元形状計測装置を用いて1点ずつ時間をかけて座標計測が行われている。そのため作業効率が悪く、高速な計測法の開発が求められている。また、人体の形状計測は、光切断法を用いて非接触で行われており、医療福祉や服飾衣料の分野で使われているものの精度が数ミリ程度とそれほどよくない。とくに歯科医療の分野では、義歯作製を効率的に行うために、より高精度な計測機器の開発が求められている。また服飾の分野でも人間の動作時の人体形状の解析を行うために、形状計測の高速化が求められている。原子炉容器やガスタンクや橋梁や建物などの大構造物の形状やひずみ計測は一点ごとの計測が行われているが、全面の分布を計測することはほとんど行われていない。大震災などに備えて、普段からの強度チェックや常時監視装置が必要である。また今後マイクロマシンのような微小物体や種子などの形状検査と形状による分類などが盛んになると思われるが、これらの微小物体の形状や変形を計測できる装置の開発が必要である。

非接触形状計測の対象物には、工業製品、人体、巨大構造物、微小構造物などさまざまな物がある。工業製品に用いる場合は、設計通りに加工ができているかどうかを検査することや、熱や荷重による変形検査などへの利用が考えられる。工業製品の場合は、計測対象物によっては多少時間が必要でも高精度に計測したい場合や、高速に時系列の形状変化を計測したい場合など、さまざまなニーズがある。

人体の形状計測は、福祉機器の開発に応用できる。例えば、義足のソケットの製作時に足の断端部の形状計測を行い、自動化された装置でソケットの型を加工することで製作時間を大幅に短縮することができる（藤垣 1996）。ただし、人体は長時間静止し続けることは難しいので、高速な形状計測装置が必要とされる。また、近年のCG技術の発達により、モーションキャプチャとして人体の実時間形状計測の需要が多くある。

ロボットの目として応用する場合、対象物までの距離や形を高速に計測することができれば、最適にアームの移動等を行うことや周囲の状況や障害物を認識することができるようになり、生産性や安全性が向上する。そのため、ロボットの目へ応用するための高速な形状計測手法の開発が求められている。周囲の状況や障害物を認識する技術は、自動車や車椅子、視覚障害者のための障害物検知装置として用いることもできる。

巨大構造物には、ビルなどの建物や、橋梁、トンネル、線路、道路などがある。橋梁の荷重試験では、現在、変位計を多数取り付けて変形を計測することが一般に行われているが、サンプル点が少ないことと費用が多くかかる問題がある。非接触で全面を計測することができれば、計測点が飛躍的に多くなることによって解析精度が向上し、試験費用も安くなることが期待できる。橋梁も含めてトンネルや道路などの巨大構造物の形状や変形を計測するよい手法はまだ実用化されていない。

機械加工を行う場合、ドリルなどの工具の摩耗により実際の加工寸法が設計寸法と合わなくなる場合がある。そこで、加工を行いながら同時に加工された部分の形状を計測してフィードバックすることにより加工精度を向上させる技術の確立が求められている。

その手法は微小物体の加工にも適用することができる。微小構造物の代表的なものにマイクロマシンがあり、近年マイクロマシンの製造方法の研究開発が活発に進められている（東京大学マイクロマシン研究共同体 1993）。マイクロマシンの製作方法には、半導体加工技術を用いたものや光造形法を用いたもの（川上ら 1998）が主に研究されている。加工最中に造形物の形状計測を行うことができれば、加工形状をフィードバックすることによってより高精度な光造形を行うことができる。そのためには、微小物体の形状を非接触で高速に計測できる装置が必要となる。

以上述べたように、さまざまな分野で形状計測を高精度または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装置はいくつか実用化されているが、十分な精度や高速性を満たしている安価な使いやすいシステムはまだない。また、種々の形状や変形を調べる検査装置においても、二次元・三次元の分布を求める装置の規格はほとんどない。この理由はこの目的を達成する安価で使いやすい高精度な計測装置がないからである。このような装置が開発されれば、製造ライン上での非破壊検査や三次元計測や加工の分野およびその応用分野の産業技術は飛躍的に伸びると思われる。

1-2.2 非接触形状計測

1-2.2.1 受動型計測と能動型計測

物体の形状を非接触で計測するためには、光学的な方法が有効である。光学的な手法には、計測の際に光のパターンなどのようになんらかの光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、それぞれ受動型計測と能動型計測と呼ばれている（井口、佐藤 1990a）。受動型計測としては、2台のカメラを用いて物体表面の特徴的な部分を利用して対応付けを行い、幾何学的関係から空間座標を求めるステレオ画像法が代表的なものである。受動型計測としては、スポット光やスリット光、格子などの二次元パターンを投影し、それをカメラで撮影し、画像内での位置から距離や空間座標を求める手法が代表的なものである（井口 1986）（井口 1995）。三次元形状計測の中で、物体までの距離の分布を求めるものをとくにレンジファインダと呼ぶ。受動型計測と能動型計測のどちらも長短があり、用途に応じて使い分けて用いられる。

受動型計測としてのステレオ画像法では、2つのカメラで撮影された画像における物体の対応点（物体上の同一点を撮影している画面内での座標）を求める必要がある。これは対応点決定と呼ばれる処理である。対応点決定には、物体の持つランダムなパターンを相関を用いることによって画像内で対応付けを行う方法や、物体のエッジなどの特徴点を使う方法などが用いられている。これらの方法は、対応点を探し出す計算に非常に時間がかかることや、精度がそれほどよくないなどの問題がある。

物体表面上の面内変位を計測するためには、後述する能動型計測では不可能で、物体表面上につけられた印を用いて対応付けを行う受動型計測を用いる必要がある。この研究として、以前に我々は二次元格子パターンを物体表面上に貼り付けて、その格子を目印にステレオ画像法による形状計測を行い、変形前後

の形状変化から物体表面上の面内変位および面内ひずみ分布の計測を行う研究を発表している (Morimoto and Fujigaki 1993) (Fujigaki et al. 1996).

一方、能動型計測には、光レーダー法、光切断法、パターン光投影法などがある (井口 1995). 光レーダー法とは、物体表面で反射されて戻ってくる光の飛行時間から物体までの距離を求める手法である (Nitzan et al. 1977). 2次元的にスキャンすることによって、三次元物体の形状計測を行うことができる. しかし、計測精度はそれほどよくないという欠点がある. 光切断法とは、物体に向けて投影するスポット光やスリット光をスキャンすることによって、物体表面全体の形状を得る手法である. スキャンに要する分の計測時間が必要となる. パターン光投影法は2次元パターンを投影する手法であり、2次元パターン投影法とも呼ばれる. 本研究と関係が深い光切断法と2次元パターン投影法については次節以降に述べる.

1-2.2.2 光切断法

光切断法とは、物体に向けてスポット光やスリット光を投影する手法である. 物体を移動させるかスリット光を移動することによって、物体表面全体の形状を求めることができる. 投影された物体を異なる角度から撮影すると、スポット光の場合は物体の形状に応じて画面内での点の位置が変化し、スリット光の場合は物体の形状に応じてゆがんだスリット光が撮影される. この位置の変化やスリットのゆがみから物体の形状を求めることができる. 図1.1にスリット光投影による形状計測の原理を示す. 投影するスポット光やスリット光をスキャンすることによって、物体表面全体の形状を得ることができるが、スキャンに要する分の計測時間が必要となる. また、2次元カメラを用いて物体に投影されたスリット光を撮影する場合には、撮影された画像内でのスリット光の位置を画素単位で求めることになるために、後述する位相解析法ほど高精度の形状計測結果は期待できない.

高速に距離画像を得る方法として、スリット光を高速にスキャンする手法が研究されている. 荒木らは、スリット光が通過した時刻を記録するメモリを持ったフォトセンサを2次元状に配置された撮像素子を試作し、高速な形状計測に適用した (荒木ら 1988). 通過時刻を記録することで、画素ごとに位置を検出する従来の方法よりも高精度に形状を得ることができる. 横山らは、スリット光が通過した時刻をさらに精度よく知るために、1画素に2つのフォトダイオードを隣接して配置し (相補型フォトダイオードペアと呼ぶ)、それらのフォトダイオードの光電流の大小が逆転した時刻を記憶する方式を考案し、専用の撮像素子SRF (Silicon Range Finder) を開発した (横山ら 1996). SRFは、実時間で距離画像を得るために開発された専用撮像素子である. これを用いた、実時間形状計測システムが開発されている. 画素数

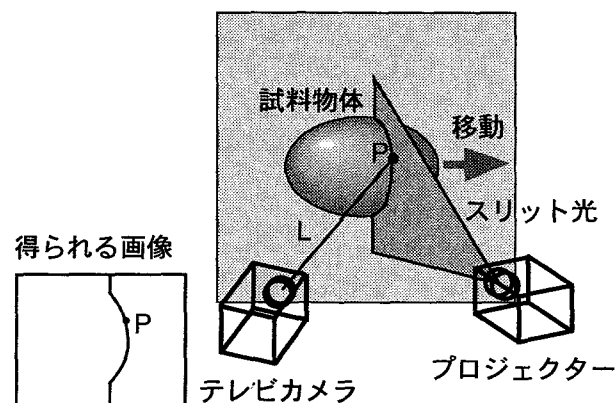


図1.1 スリット光走査による形状計測

が少ないことと特殊なカメラを用いることが短所であるが、実時間形状計測システムとしての完成度は高い。

1-2.2.3 2次元パターン投影法

2次元パターン投影法とは、空間コード化パターン光投影法(井口, 佐藤 1990b)とも呼ばれるように、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その特徴点までの距離または空間座標を求めることができる。投影する2次元パターンには、ドットパターンや複数のコード化されたパターン、格子パターンなどがある。格子パターンを投影する方法としては、その精度を向上させることや計測時間を短縮する方法など数多くの研究が行われてきている。

時間とともに変化させた複数のパターンを投影する手法は多重コード化パターン投影法と呼ばれている。代表的なものとして空間コード化法がある。それを発展させた手法として、交番2進符合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が開発され(Sato and Inokuchi 1985)、この手法を用いた形状計測装置がいくつか報告されている(佐藤, 井口 1988)(Sansori et al. 1997)。また、1-2.3.3節で後述するが、投影格子の位相を複数段階に分けて1周期分投影する位相シフト法もこの多重コード化パターン投影法の一つである。

一般の2次元パターン投影法の場合は、分解能は画素単位であるため計測精度はそれほどよくない。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、手法によっては情報が得られない画素がある場合もある。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はない。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。

1-2.2.4 格子投影法

上述したようにパターン光投影法の一つとして格子投影法がある。図1.2に格子投影法による形状計測の原理を示す。スリット光投影法と同様に、一本一本の格子線は物体の形状に応じてゆがんだ線としてテレビカメラに撮影される。格子投影法はスリット光を走査する代わりに多くのスリット光を等間隔で同時

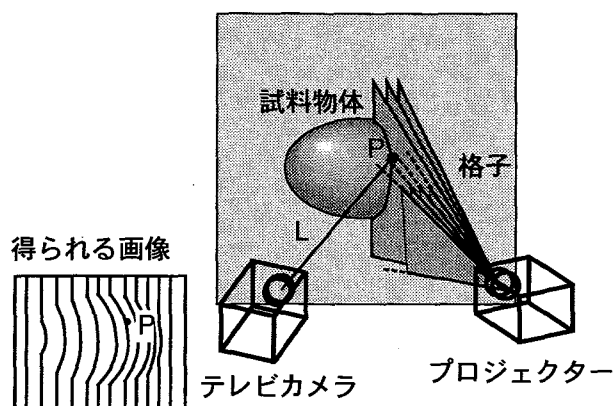


図1.2 格子投影法による形状計測

に投影したものととも考えることができる。そのため1枚の格子画像からでも形状計測を行うことが可能である。

格子投影法によって得られた格子画像から物体の形状を求める手法のひとつにモアレトポグラフィがある。変形のない等間隔の格子とそれが変形した格子を重ねると、変形量に応じたモアレじまが得られる。このモアレじまは同じ変形量を持つ点が同じ濃さに見えるしま模様である。この原理を物体の形状計測に応用したものがモアレトポグラフィと呼ばれている (Meadows et al. 1970) (Takasaki 1970)。モアレトポグラフィには、シャドーモアレ型と格子投影型があり、投影格子型のモアレトポグラフィを用いた方法が高速に計測結果が得られる形状計測の手法としてよく用いられている。モアレトポグラフィを用いた形状計測の研究については、1-2.5.2節で詳細を述べる。

また、格子画像に位相解析手法を用いることにより、高精度に形状計測を行うことができる。格子画像の位相解析手法については1-2.3節で述べる。1枚の格子画像から格子の位相分布を得る方法では、周囲の画素の輝度値の変化からその画素の位相値を算出する。したがって、段差や不連続部分では大きな誤差が発生することになる。一方、投影格子の位相を複数段階に分けて1周期分投影する位相シフト法を用いることによって、各画素ごとに位相解析を行うことができる。そのため、段差や不連続部分があっても解析ができる利点を持つ。このように、形状計測の高速化および高精度化に適した手法である。これまでに行われてきた高精度形状計測については1-2.4節で述べる。

1-2.2.5 計測対象物

形状計測が必要とされる対象物は、1-2.1節で述べたように、工業製品や人体、巨大構造物、種子のような微小物体など多岐にわたる。工業製品の検査などで用いられる場合、工場ラインで高速に流れている製品の検査には高速性が求められる。また、多少時間がかかっても精度が必要な場合もある。計測範囲についても、物体の片面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。

物体表面の空間座標分布を高精度に計測する対象としては、工業製品の形状検査、種子などの形状による分類、美術品や考古物の形状による記録などがある。工業製品の形状検査のうち、とくに金型の検査には1 μ mの計測精度が必要と言われているが、非接触で空間座標の分布を得る形状計測方法ではまだ実現されていない。また、工業製品や美術品の場合は、物体の片面だけでなくその全周の形状計測が必要な場合が多い。物体全周の形状計測については、多くの研究が行われている (Halioua et al. 1985) (Asundi and Zhou 1999)。

高速に形状計測を行う対象としては、人体の形状計測や運動解析、大構造物の振動時の形状変形計測、工場ラインでの製造物の形状変形計測、熱変形の実時間計測など、時系列で高速現象の形状計測を行う場合である。実時間で形状を計測する手法もさまざまな分野で求められている。工場ラインで連続的に製造されたものの形状検査を行う場合は、実時間で計測結果を出力する必要がある。さらに、高速現象の形状の変化を時系列で計測するような場合は、高速度カメラを用いた形状計測を行う必要がある。この場合は、実時間で結果を出力する必要はないが、高速に格子投影と撮影を行う必要がある。

人体形状計測の場合は、人体は長時間静止していることが困難なために高速に計測を行う必要がある。歩行時の足の動作を形状データから評価する場合に、1フレーム1/30秒の一般のカメラでは遅すぎて必要な情報が得られない場合がある。そこで、人体の動作時の形状を連続的に計測する場合は高速度カメラを用いた形状計測が望まれる。人体形状が高速に計測できるようになれば、モーションキャプチャの入力装置としての需要が多くある。

1-2.3 位相解析

1-2.3.1 格子画像の位相解析

画像内で格子の位置を求める手法としては、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かつては一般的であった。1本1本の格子には順番に格子番号がつけられているとすると、このようにして求めた点列の座標上にその格子番号が対応しているという結果が得られる。しかし、このやり方では、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は答えが得られないという短所がある。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などもあるが、基本的には精度の悪い解析しか行うことはできない。

近年は、格子の位相解析を行う手法が普及している。位相値は格子番号に 2π をかけた値である。図1.3に格子番号と位相の関係を示す。格子の明暗がコサイン波状に変化するとして、格子番号に 2π をかけた値に各点のコサイン波の位相を足した値を格子の位相とする。図1.3では、(a)に示す輝度分布を持つ格子の位相分布は(b)に示すようになる。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求める方法と、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1-2.3.2節で、後者については1-2.3.3節で述べる。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操作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1-2.3.4節で述べる。なお、干渉じまの場合も、しま次数に 2π をかけた値が位相値となり、格子の場合と同様にその位相を解析することができる。

1-2.3.2 1枚の格子画像から格子の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についてであるが、その一つに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

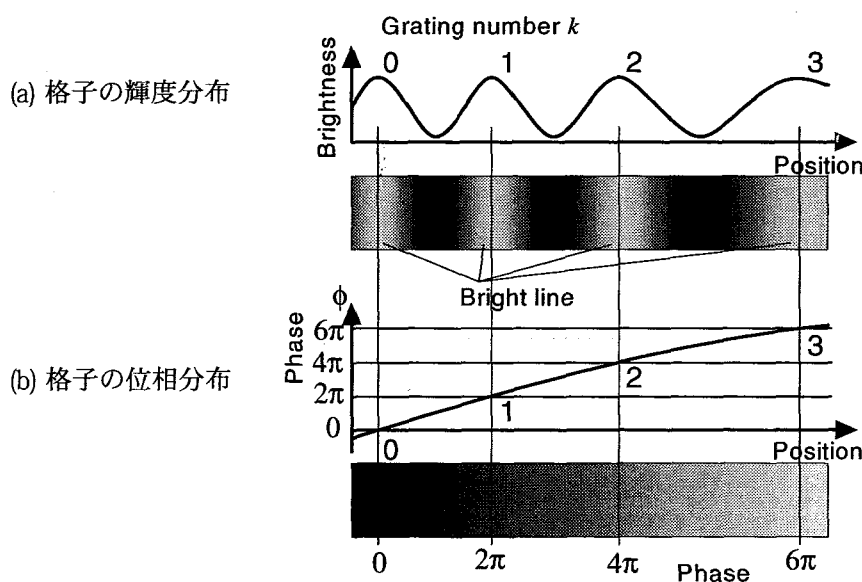


図 1.3 格子と位相値の関係

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、各点の位相値を得ることができる。また、フーリエ変換した後のスペクトルで、一次調和波の成分を抽出し、原点方向へ格子のピッチに相当する分だけ移動し、それを逆変換することによって、格子の変形を表すモアレじまを簡単に得ることができる。武田らはこの手法を干渉じま解析に適用した (Takeda et al. 1982)。この手法は、FTP (Fourier Transform Profilometry) と呼ばれている。形状計測への適用としては、1-2.5.2節で述べるモアレトポグラフィに応用して、格子画像から等高線を求める手法として用いられている (Takeda and Mutoh 1983) (Suganuma and Yoshizawa 1991)。森本らはこの手法を発展させ、得られた位相分布を微分することによりひずみ分布の計測を行った (Morimoto et al. 1988) (森本ら 1988)。

この手法を2次元格子の位相解析に応用すると、方向別の位相分布を容易に得ることができるため、重なった格子の方向ごとの分離に適している。2次元格子が貼り付けられた試料の方向別の変形分布やひずみ分布を簡単に求めることができる。森本らはこの手法を用いて、方向別のひずみ分布解析を行った (森本ら 1989)。また、ステレオ法による形状計測への応用も行われている。物体表面に貼り付けられた2次元格子を2台のカメラで異なる方向から撮影し、格子の位相によって左右の2台のカメラで撮影された画像の対応付けを行う手法により、物体の形状と変形時の表面ひずみの計測が行われている (Morimoto and Fujigaki 1993) (Fujigaki et al. 1996)。この実験例を図1.4に示す。曲率を持った鋼板の中央部分に変位を加えていく時の鋼板の形状を連続的に計測したものである。また最近ではTakedaらによって、投影された2次元格子を方向別に位相解析を行うことによって不連続物体の形状計測を行う手法の研究に、2次元格子のフーリエ変換が用いられている (Takeda et al. 1997)。

このように、フーリエ変換法は格子画像の位相解析に有効な手法ではあるが、格子のピッチが大きく変

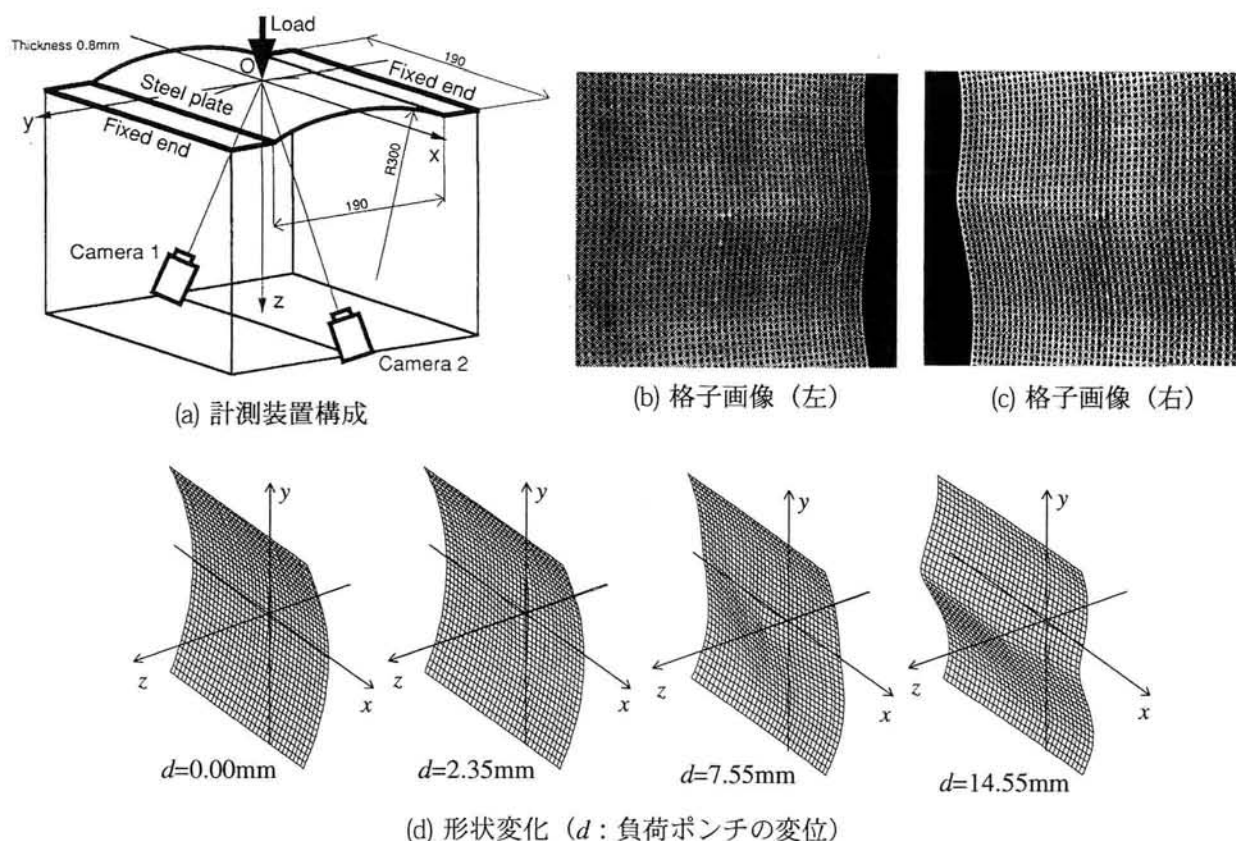


図1.4 2次元格子画像を用いたステレオ法による鋼板の形状計測 (Morimoto and Fujigaki 1993)

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 (Fujigaki et al. 1995)。この方法は、1次調和波の分離精度はよいが、計算時間が長くなる。

フーリエ変換を計算機で行う場合、高速フーリエ変換 (FFT ; Fast Fourier Transform) と呼ばれる計算アルゴリズムがよく用いられている (Cooley and Tukey 1965)。しかし一般に FFT は計算できる画素数が2のべき乗に限られる。画像計測によく用いられている画面のサイズは縦が640画素、横が480画素であり、FFTが実行できるサイズにはなっていない。そのため、撮影領域から例えば256画素×256画素のような2のべき乗画素数のサイズを切り出して、解析領域とするようなことが行われている。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 (Singleton 1969)。この手法は解析可能な画素数が多く、640画素や480画素でも高速にフーリエ変換が可能である。MR-FFTで計算できる画素数の一覧表を付録A4に示す。

また、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の一つとして、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。この手法を用いれば、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あっても位相解析が可能となる。ウェーブレット変換は、面内変形・ひずみ計測に応用した研究 (Morimoto and Imamoto 1995) や光弾性じまの解析に応用した研究 (森本, 今本 1995) に用いられている。

1-2.3.3 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、段差や不連続のある物体の形状計測に有効な手法と言える。

位相シフト法では、 $\pi/2$ ずつ位相シフトされた4つの輝度から位相を求める手法が最もよく用いられている。以下その原理を示す。

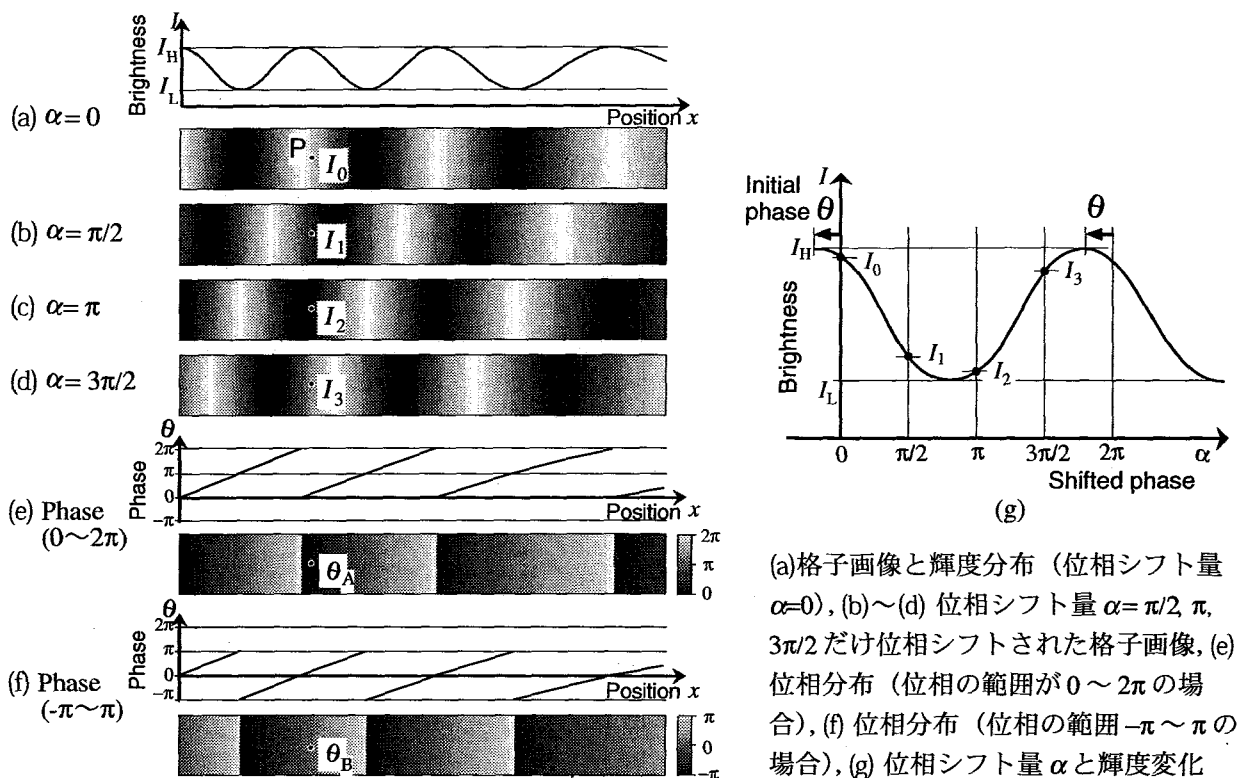
図1.5(a)に位相シフト量 $\alpha=0$ における格子とその輝度分布を示す。格子の輝度はコサイン波状の輝度分布を持ち、その最大値と最小値をそれぞれ I_H と I_L とする。図1.5(b)~(d)はそれぞれ位相が $\pi/2$, π , $3\pi/2$ だけ位相シフトされた格子である。位相シフト量 $\alpha=0$ における格子の位相を初期位相と呼ぶ。図1.5(a)~(d)の各画像において点Pの輝度を順に I_0 , I_1 , I_2 , I_3 とし、点Pの初期位相を θ とする。位相シフト量 α と点Pにおける輝度変化の関係を図1.5(g)に示す。

点Pにおける輝度 I_0 , I_1 , I_2 , I_3 と初期位相 θ は、式(1.1)に示すような関係となる。なお、式(1.1)の導出方法および式(1.2)で使われている関数 $\arg(x, y)$ の定義とそれを用いた位相算出方法の詳細を付録A1に記す。

$$\frac{I_3 - I_1}{I_2 - I_0} = -\tan \theta \quad (1.1)$$

ここで、 x - y 平面において、原点と点 (x, y) を結ぶ直線と x 軸の正の方向とのなす角を $\arg(x, y)$ と定義すれば、初期位相 θ は式(1.2)のように求めることができる。

$$\theta = \arg \left(-(I_2 - I_0), I_3 - I_1 \right) \quad (1.2)$$



(a)格子画像と輝度分布 (位相シフト量 $\alpha=0$), (b)~(d) 位相シフト量 $\alpha=\pi/2, \pi, 3\pi/2$ だけ位相シフトされた格子画像, (e) 位相分布 (位相の範囲が $0\sim 2\pi$ の場合), (f) 位相分布 (位相の範囲 $-\pi\sim\pi$ の場合), (g) 位相シフト量 α と輝度変化

図 1.5 位相シフトされた格子画像と位相分布

このようにして得られた初期位相の分布を図 1.5(e)と(f)に示す. なお, 1 周期の位相値の範囲は, 一般に, $0\sim 2\pi$ で表現される場合と $-\pi\sim\pi$ で表現される場合のどちらかが用いられている. それぞれの表現で得られる位相値を θ_A と θ_B とすれば, それらは式(1.3)に示す関係となる.

$$\theta_B = \begin{cases} \theta_A & (0 \leq \theta_A < \pi) \\ \theta_A - 2\pi & (\pi \leq \theta_A < 2\pi) \end{cases} \quad (1.3)$$

図 1.5(e)は 1 周期の位相値の範囲を $0\sim 2\pi$ で表現した場合であり, 式(1.2)で得られた初期位相 θ を初期位相 θ_A としたものである. 図 1.5(f)は 1 周期の位相値の範囲を $-\pi\sim\pi$ で表現した場合であり, 式(1.3)によって初期位相 θ_A から求められた位相値である. 本研究では, 各章それぞれで説明しやすい方の表現を用いる. どちらの場合も, 次節で述べる位相接続を行うことによって, 結局は同じ位相値となる.

次に, 上述の位相シフト法以外の手法を次に紹介する. 森本らは, 画像計測において, ある物理量を変化させた時に, 各画素についてある特徴 (例えば輝度が最大となることなど) となる場合を判断基準として, その画素に対応するメモリーに変化させた方の物理量を記録する手法を考案した. この手法は特徴量抽出法と呼ばれている. これをしま画像の位相解析に適用したものが特徴量抽出位相シフト法である (Morimoto and Fujisawa 1996). 格子の位相を 1 周期分シフトさせ, 各画素それぞれにおいて輝度が最大となる時の格子の位相シフト量をその画素の初期位相値とすることによって位相分布を高速に求めることができる.

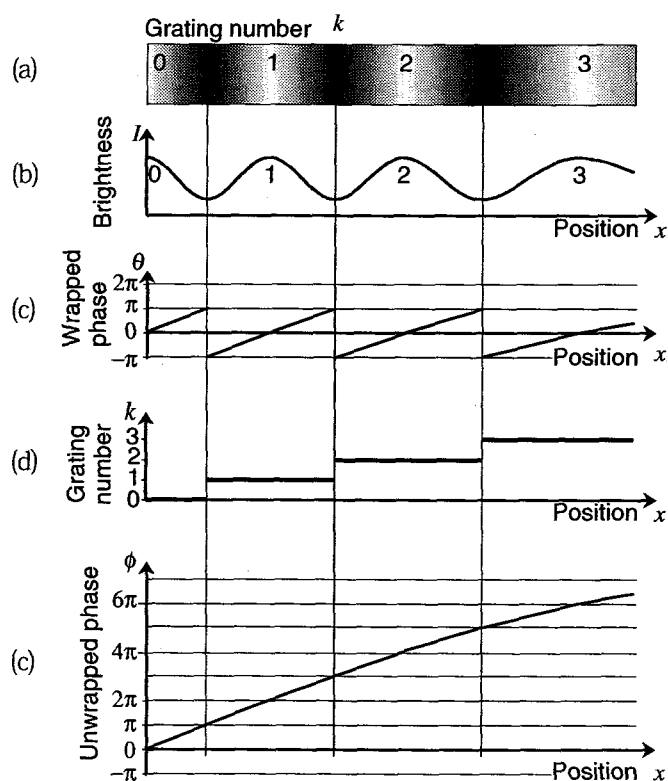
Bruningらは干渉じまの位相解析を行うためにフーリエ変換を用いる手法を開発している (Bruning et al. 1974). これは複数枚の位相シフト格子画像を 1 周期分撮影し, 位相シフト方向にフーリエ変換し, 周波

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ために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と呼んでいる(武田1984)。また森本らは同様の手法をフーリエ変換位相シフト法と呼び、微小面外変形計測や光弾性じま位相解析など、高精度な手法として位相解析を用いた画像計測に広く適用している(Morimoto and Fujisawa 1994)(Morimoto et al. 1994)。

1-2.3.4 位相接続

前節までに述べた位相解析では、本来の位相値を 2π で割り算したあまりとして、図1.5(e)と(f)に示すように $0 \sim 2\pi$ 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位相連続化前の位相値、ラップ(wrap)された位相値と呼ぶ。また本来の位相値からラップされた位相値を得る操作をラッピング(phase wrapping)という。

格子や干渉じまにその位相(ラップされていない本来の位相)が1本分進むごとに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1.6に格子番号と位相接続後の位相の関係を示す。図1.6(a)にコサイン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1.6(b)に示す。図1.6(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1.6(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1.6(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とする。位相接続前の位相値 θ と格子番号 k から式(1.4)の計算を行った結果として得られ



(a)格子画像, (b)格子輝度分布, (c)位相接続前の位相分布,
(d)格子番号, (e)位相接続後の位相分布

図1.6 格子番号と位相接続後の位相の関係

た値 ϕ の分布を図 1.6(e)に示す. 図 1.6(e)は, 図 1.6(c)における不連続部のない位相分布となっている.

$$\phi = \theta + 2k\pi \tag{1.4}$$

このように, 位相解析によって得られる位相値の範囲が $-\pi \sim \pi$ の場合に, 格子番号またはしま次数の 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. 位相の範囲が $0 \sim 2\pi$ の場合は, 式(1.3)の変換を行ってから同様に格子番号またはしま次数の 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位相連続化後の位相値, アンラップ (unwrap) された位相値と呼ぶ. この操作を位相接続または位相の連続化, アンラップ (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求める方法と, 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方法の2通りある. 前者のうち最も基本的な方法は, 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 $2N\pi$ (N は整数)を加えるというものである. 例えば, 図 1.7(a)において(1)と(2)の境界部分では, 位相の差が 2π 近くになるため, (2)の領域に 2π を加えることによって(1)と(2)の部分の位相を連続化することができる. 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正しくない位相値となる. また, 不連続な領域の位相接続を行うことができない. このことについては Huntley と Saldner によって詳しく述べられている (Huntley and Saldner 1993). 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 (Spik and Robinson 1991) や, 領域分けを行う手法 (Bremmand 1994) (Herraez et al. 1996) が考案されており, それぞれ適用範囲を限れば有効な手法である.

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方法についてであるが, 大きく2種類に分けることができる. 一つは, 2種類の近接した波長を用いることにより, その数倍の長い波長を合成する方法である. Wyantはこの手法を開発し, レンズの形状検査に用いた (Wyant 1971). その後その手法を位相解析にも適用し, 2種類または3種類の波長のレーザーを用いることにより干渉じまのピッチを2通りまたは3通りに変え, それぞれの位相値から位相接続する手法を用いて凹面鏡の形状検査を

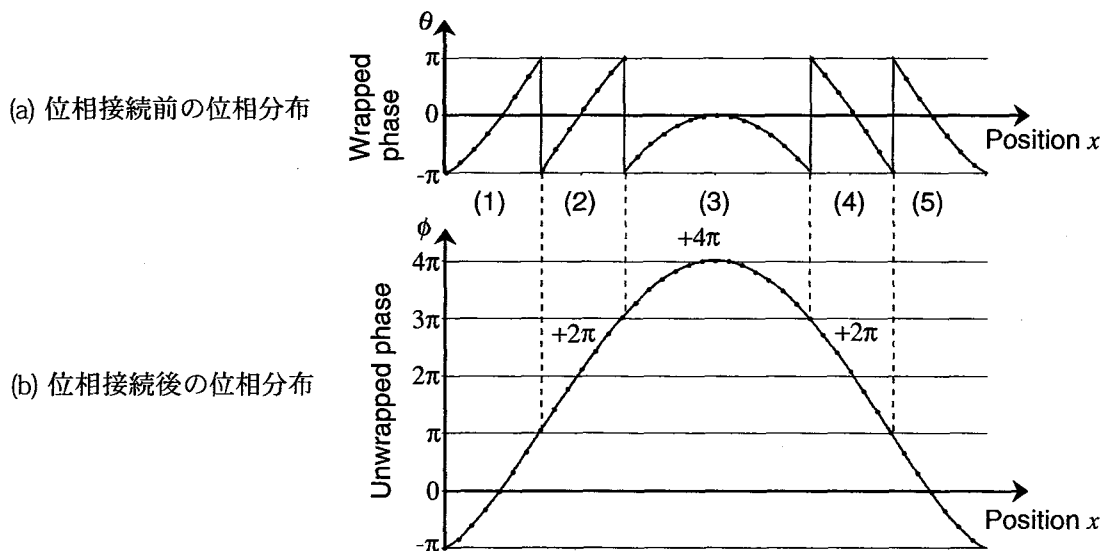


図 1.7 位相接続前後の位相値

行った (Cheng and Wyant 1984) (Cheng and Wyant 1985). もう一つは, 2種のピッチの格子の位相値をそれぞれ求めておいて, そこからしま次数を求める手法である. 西川と岩田らは, 2種類の近接した波長からその数倍の長い波長を合成する方法と2種のピッチの格子の位相値からしま次数を求める手法をそれぞれ光波干渉型の微細表面形状計測に適用し, 精度的には後者の方がよい結果が得られることを示した (西川ら 1991). さらに格内と岩田らは, 液晶プロジェクタを用いて投影する格子のピッチを2通りに変化させることによって, 段差のある物体の形状計測を行っている (格内ら 1996). GushovとSolodkinも複数ピッチの位相接続アルゴリズムを構築し, 干渉じま解析に用いている (Gushov and Solodkin 1991). 武田らは, 物体に2次元格子を投影し, 得られた2次元格子画像をフーリエ変換によりそれぞれの成分に分けてGushovとSolodkinの位相接続アルゴリズムを用いて位相接続を行い形状を求める手法を研究している (Takeda et al. 1997).

その他の手法として, 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をHuntleyが提案し, Temporal phase-unwrappingと呼んでいる (Huntley and Saldner 1993). SaldnerとHuntleyは, この手法を不連続物体の形状計測や干渉じま解析に適用している (Saldner and Huntley 1997) (Huntley 2000). また, 盧と井口らは, 投影格子に強度変化を持たせることによってしま次数を決定して位相接続を行う手法を開発している (盧ら 1998). このように, 位相接続の手法には, 計測対象によって適した手法が考えられている. 本研究の場合は, 不連続物体を含んだ三次元物体の形状計測を行うため, 各画素独立に位相接続を行える方がよい.

1-2.4 従来の高精度形状計測手法

1-2.4.1 空間座標算出の高精度化

本研究で高精度形状計測とは, 物体表面各点での空間座標を高精度に計測することをさす. 単に距離画像を得るだけでなく, 試料物体表面上の各計測点の空間座標を求めることである. 空間座標を求める手法には, 主に光切断法を用いるものとパターン投影法を用いるものがある. 光切断法は前述のように高精度の形状計測結果を得ることはそれほど期待できない. 高精度に形状計測結果を得る方法としては, 投影格子の位相解析を行う手法が期待できる. 投影格子の位相を解析する手法において空間座標を高精度に求めるためには, 格子の位相を精度よく求めることと位相から空間座標への変換を精度よく行うことの2点が必要となる. 前者については, 前節までに述べたように多くの位相解析法に関する研究が行われており, 近年は位相解析精度が向上してきている. 後者については, 次節で述べるキャリブレーションに関する研究が行われてきている.

1-2.4.2 キャリブレーション

空間座標を精度よく求めるためには, カメラとプロジェクタのパラメータを精度よく知っておく必要がある. カメラとプロジェクタのパラメータとは, 物体表面上の点の空間座標を算出するのに必要とされる光学系の位置関係を表すパラメータのことである. そのため光学系パラメータとも呼ばれる. 具体的には, カメラとプロジェクタの光軸の向きとレンズの中心点の空間座標, レンズの焦点距離などであり, また, それらを一般化して座標変換用の行列としている場合もある (井口, 佐藤 1990c).

ここで問題となることは, レンズの中心点の空間座標が実測できないことである. そこで, 基準となる物体を用いて, それを撮影した画像からカメラのパラメータを算出する手法がよく用いられている. プロジェクタのパラメータもカメラの場合と同様に, 基準物体に格子のように形状の分かったパターンを投影し, それを撮影した画像からパラメータを求めることができる. 基準物体としては, 立方体状の物体を用

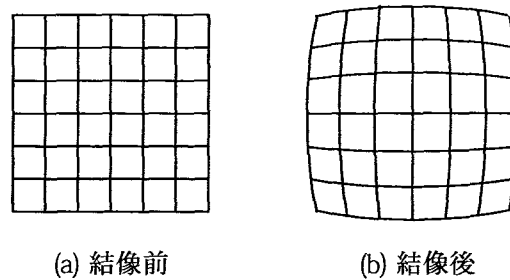


図 1.8 歪曲収差模式図

いる研究(越後, 谷内田 1985) や2次元格子が描かれた平板を用いる研究(Morimoto and Fujigaki 1993)(Helm et al. 1994) などが報告されている。

キャリブレーションに関しては, さらに問題となることがある。上記のパラメータを用いた空間座標の算出は, カメラの撮像面に到達する光はすべてカメラのレンズの中心点を通り, プロジェクタから投影される光はすべてプロジェクタのレンズの中心点を通るという理想的なレンズを用いる仮定の下で成り立っている。しかし実際のレンズは多少なりとも収差があるためにこの仮定は厳密には成り立たない。単色におけるレンズの収差は, 球面収差, コマ収差, 非点収差, 像面湾曲, 歪曲収差に分類されておりザイデルの5収差と呼ばれている(山口 1998)。図1.8に歪曲収差の模式図を示す。これらのうち, 歪曲収差は像の結像位置を移動させて像をゆがませる作用を持つため, 形状計測に用いる場合に計測結果にゆがみが生じることになる。コマ収差についても, 平均的な結像の位置は移動するため計測結果の誤差の要因となる。

従来は, 投影格子の解析精度がよくなかったため形状計測の精度がよくなり, 収差の影響はそれほど問題とならなかった。しかし近年になってとくに, 投影格子の位相解析の精度が向上すると形状計測の精度も向上し, レンズ収差の影響による計測誤差が目立つようになってきている。歪曲収差を補正する方法についての研究はいくつか報告されている(Weng et al. 1992)(Wei and Ma 1994)(Takahashi et al. 1996)。

1-2.4.3 従来の手法の問題点

従来の高精度形状計測の精度は, 100mm角程度の大きさの物体を計測した場合, よくて20 μ m程度である。ただしこれは画面撮影範囲で最も精度がよかった部分の計測データである。市販されている形状計測システムでも, 最も精度がよい場合の値がスペックとして書かれているようである。

近年キャリブレーション方法が進歩して精度よく光学系パラメータを求めることができるようになってきている。しかし, レンズ中心点を用いているのでレンズ収差によるゆがみの影響は無視されている。実際のレンズはすべて収差を持っているために, レンズの中心点を基点とした三角測量の原理を用いて空間座標の算出を行うと必ずゆがみの影響が表れることになる。そのために, 画面の中央部分では精度はよいが, 周辺部では精度がよくないという現象が発生する。また, レンズ収差によるゆがみの影響を小さくするために, 補正式を用いて空間座標計算を行う手法も開発されているが, 完全に影響をなくすことはできない。

物体の全周の形状計測を行う場合や, 計測範囲より大きな物体の形状計測を行う場合に, 複数回に分けて形状計測を行い空間座標の分布をそれぞれ求め, 合成することで全周または全体の形状を求める手法がある。しかし, レンズ収差によるゆがみのせいで計測範囲の端部での計測精度がよくないため, 同一物体の異なる方向からの計測データを用いて空間座標の合成を行う場合に接続領域が滑らかにならず, 段差を持つような結果が得られることがある。

1-2.5 従来の実時間形状計測手法

1-2.5.1 実時間形状計測

実時間形状計測に求められるものは高速に距離画像を得ることである。本研究においては、実時間とはビデオ周期 (1/30秒) ごとに計測結果が得られることを言う。これが実現できる手法としては、スリット光投影法とモアレトポグラフィに大別できる。スリット光投影法は、スリット光を高速に走査しながら物体に照射し、スリット光が照射される角度を計測することにより距離を測定する光切断法の一つである。モアレトポグラフィは、等間隔の格子スリットを通して点光源の照明を物体に照射すると、光源と観察するカメラの位置関係がある条件を満たすときに物体の等高線が観察される現象を利用した等高線計測法の一つである。

スリット光投影法を用いた形状計測をビデオカメラを用いて行う場合、撮影枚数分の時間がかかるために実時間計測を行うことはできなかった。そこで、スリット光の通過する時間を計測する専用のセンサアレイを開発し、実時間計測に応用する研究が行われている (井口 1995)。そのひとつとして、横山らは距離画像 VLSI センサを新たに開発し、実時間距離画像計測に適用した (横山ら 1996)。これは、スリット光の通過時刻を自動的に高精度に計測する特殊なセンサ (24 × 24 画素) を利用して、高速にスリット光を走査することによって実時間の形状計測を可能としている。

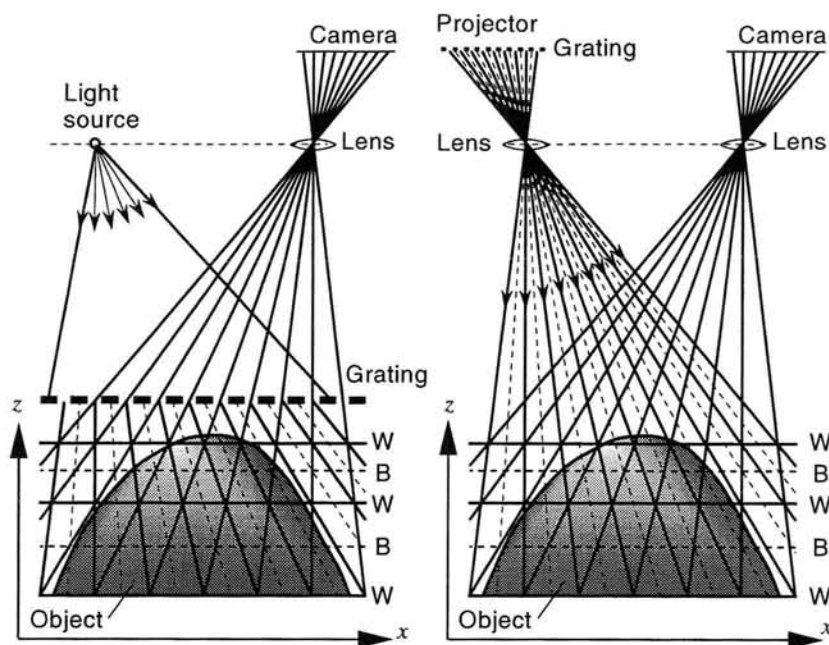
一方、モアレトポグラフィは、スリット光投影法と比較すると一般に普及している簡単な装置の組み合わせで実現できるため、安価で実用性の高い実時間形状計測法として有力である。そこで本研究では、モアレトポグラフィの原理を利用した精度のよい実時間形状計測システムの開発をめざす。以下、モアレトポグラフィの研究がどのように発展してきたかについて述べ、最後に現状の問題点について述べる。

1-2.5.2 モアレトポグラフィ

三次元物体の形状を等高線として表示する手法にモアレトポグラフィが古くから用いられてきている。図 1.9(a) に示すように等間隔の格子スリットを通して点光源の照明を物体に照射すると、格子の影が物体の形状に応じてゆがみを持って物体表面上に写される。これを同じ格子スリットを通して観察することによって得られるモアレじまは、光源および観察するカメラのレンズ中心点を結ぶ直線とカメラの撮像面、格子スリットが互いに平行であるときに等高線となる。この現象を利用して形状計測を行う手法がモアレトポグラフィと呼ばれている。一例としてマウスの等高線画像を図 1.10 に示す。Meadows らは航空機の模型の形状計測に適用し (Meadows et al. 1970)、高崎は細かいピッチの格子スリットを用いることによってコイン表面の形状をサブミリメートルの分解能で計測し、さらに人体の形状計測に適用した (Takasaki 1970)。

モアレトポグラフィは、簡単な光学系で実時間で等高線を観察できるため、人間が見て判断するには適した手法である。しかし、得られる結果が単なるモアレじまの写真であるために分解能が低いことや、凹凸の区別がつかないこと、数値的な高さ情報の分布が得られないことなどの短所があった。そこで以下に示すように、モアレじまの位相をシフトすることや画像処理を用いてモアレじまの位相を解析する手法が開発されてきている。光学系に関しては、格子を物体の近くに配置する従来の手法の他に、格子パターンや干渉じまを投影する手法が開発されている。

まず、光学系に関してであるが、図 1.9(a) に示すように格子を物体の近くに配置する実体格子型と図 1.9 (b) に示すように格子パターンを投影し、撮影カメラ内部の結像面に格子フィルムを設置して、従来のモアレトポグラフィと同様の効果を得る格子投影型のモアレトポグラフィが開発されている (山田、横関 1996)。実体格子型は、格子照射型またはシャドーモアレ型とも呼ばれており、物体の等高線を表すモア



(a)実体格子型

(b) 格子投影型

図 1.9 モアレトポグラフィの光学系

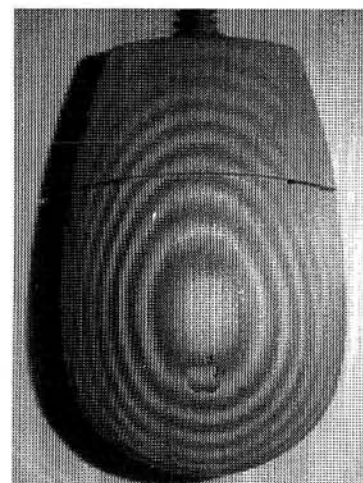


図 1.10 実体格子型モアレトポグラフィによるマウスの等高線画像

レジマが簡単な装置でカメラで直接撮影できるために、古くから人体形状計測等に应用されてきた。この方法は、等高線の写真を撮影するだけであり、また物体と同程度の大きさの格子を用いるために、大きな物体に適用することが困難である。

一方、図 1.9(b)に示す格子投影型のモアレトポグラフィが開発されており、広く用いられてきている。この方法は、投影側と撮影側に異なる格子を用いることができるので、容易に位相シフトを行うことができる。また、撮影側で、モアレではなく投影格子画像を撮影し、画像処理によって等高線を求めることも可能となる。この手法を用い、自動車の形状計測に適用する研究が報告されている(吉野 1972)。このように投影格子型の方が適用範囲が広いために、近年は大型物体だけでなく、比較的小さな物体や微小物体などの形状計測にも広く用いられている。微小物体の形状を計測するためには、投影する格子のピッチを容易に細かくすることができる干渉じまを投影する手法が有効であり、その適用例が報告されている(格内ら 1989)。

高速に等高線画像を得る方法として、テレビの走査線を利用してテレビカメラで撮影するだけで実時間で等高線を得ることができる。物体に投影された格子はカメラからは形状に応じてゆがんだ格子として観察される。格子画像をテレビカメラで撮影する際に、撮影される格子のピッチとテレビカメラの走査線のピッチを一致させることによって、走査線が参照格子と同様の働きをし、モアレじまが得られる。このようにして得られるモアレじまを走査モアレと呼ぶ(Idsawa et al. 1977)。

走査モアレを画像処理によって実現する手法も開発されている。テレビカメラで撮影された格子画像を基準のピッチで間引く画像処理を行うことにより、モアレじまを得ることができる。この手法も走査モアレと呼ばれている(森本, 白石 1984)。走査モアレを3次元形状計測に適用した研究も報告されている(Arai and Kurata 1988)。この画像処理部分をハードウェア化することによって、実時間で走査モアレじまを得ることができる装置も開発されており、変形やひずみ計測に应用されている。図 1.11 に2つの円孔

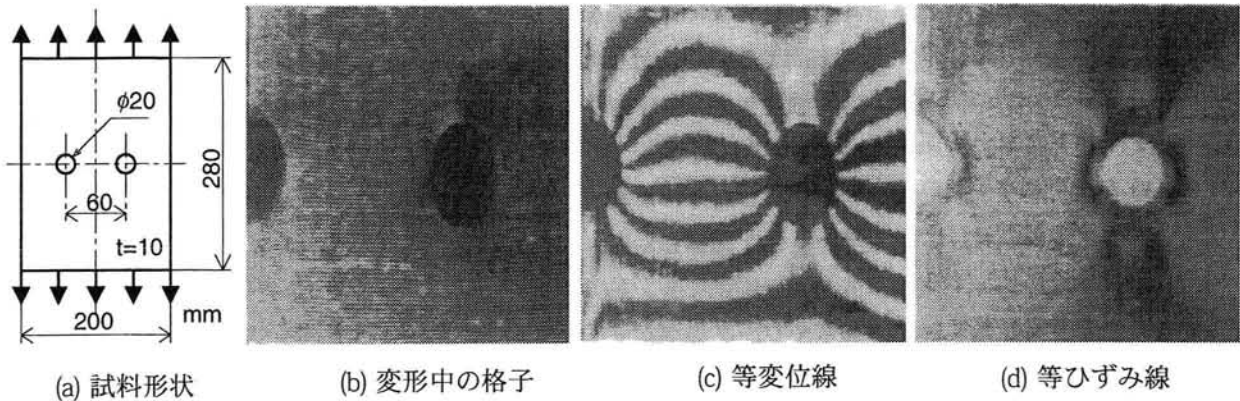


図 1.11 リアルタイム走査モアレ表示装置による2つの円孔を有するゴム板の引っ張り時の変位・ひずみ分布計測 (Morimoto et al. 1991)

を有するゴム板の引っ張り時の変位・ひずみ分布計測をリアルタイム走査モアレ表示装置を用いて計測した例を示す (Morimoto et al. 1991)。

次に、位相シフトを行う手法についてであるが、新井らは、位相を4段階に変えた1枚の格子フィルムを移動させていくことによって、部分的に位相シフトされたモアレじまが含まれた画像を得る手法を開発した (新井, 倉田 1989) (Arai et al. 1991)。Choiらは、部分ごとに観察側と投影側の格子の位相が4段階に変えられている観察側と投影側が一体の格子フィルムを移動させることによって、得られるモアレじまの位相が4段階に変化する構造を考案した (Choi and Kim 1998)。位相シフトを行う手法には他にもさまざまなものが開発されている。小寺らは、実体格子を微小に回転させて位相シフトを行う手法とその誤差について報告している (小寺ら 1999)。

位相シフトを凹凸の判定に用いる手法として、吉澤らは観察格子 (観察側のカメラ内に設置された格子) を移動させることによって等高線として得られるモアレじまの位相をシフトしてそのモアレじまの移動の方向から物体の凹凸を判断する手法を開発している (吉澤, 米村 1977)。位相シフトする代わりに異なる位相を持つ複数の色分けされた格子を用いて色の変化の方向から凹凸を判断する手法 (谷田貝, 出澤 1978) も考案されている。

1-2.5.3 位相解析による高精度化・自動化・高速化

計算機が普及するにつれて、画像処理を用いた手法が一般的になり、高精度化、自動化、高速化についての研究が行われてきている。高精度化のためには、位相を解析する手法が研究されている。自動化を行うためにしま次数の自動認識、すなわち位相の連続化を自動で行う手法が開発されてきている。高速化のためには、複数のカメラを用いて位相シフト画像を得る手法や画像処理をハードウェア化することによって高速に計測結果を得る手法が開発されている。

精度を向上させる手法としては、等高線を表すモアレじまの位相を求める手法が研究されており、位相を求めることで1本のモアレじまの数 \sim 数百分の1の分解能を得ることが可能となる。従来、モアレトポグラフィは一般にそれほど精度がよくないと言われていたが、位相を解析することにより高精度な手法として研究が進められてきている。位相を解析するための手法として、位相シフト法がよく用いられている。

等高線が位相分布として得られるということは、距離画像が得られることと同じである。ただし、等高

線のしま1本ごとに繰り返された位相値が得られる。このような繰り返しをなくして連続化すること、具体的にはしま次数 k のとき位相値に $2k\pi$ を加えることを位相接続または次数の決定問題と呼んでいる。その手法の研究は近年さかに行われており、モアレトポグラフィにおいて色分けされた光源を配置を変えことによって、色ごとにピッチの異なるモアレじまを撮影し、そこからしま次数を求める手法が報告されている (Yuk et al. 1994)。また、投影格子に強度変化を持たせることによってしま次数を決定する手法も研究されている (盧ら 1998)。

高速現象の形状計測を行う手法として、新井らは、異なる位置に設置された3台のカメラを用いて同時に撮影された画像から物体の高さ分布を求める手法を従来のモアレトポグラフィに適用し、パルス状の信号を加えたスピーカーコーンの形状の時間変化を計測した結果を報告している (Arai et al. 1995)。また、物体に投影された格子を撮影した1フレームの画像から位相値を計算し、実時間で距離画像を求める計測システムが開発されている (Kato et al. 1997)。これは、計算機内で作成された位相が3段階に異なる基準格子と撮影された1フレームの格子画像から位相シフトされた3枚のモアレじま画像を作製し、それらの3枚の画像から位相分布画像を作製する方法である。

1-2.5.4 従来の手法の問題点

以上のように、実時間形状計測手法としては、スリット光投影法とモアレトポグラフィがあるが、スリット光投影法は特殊なセンサアレイを必要とするため、簡単には実用化が困難である。一方、モアレトポグラフィの原理を用いる方式では、一般のビデオカメラやプロジェクタが利用できるために比較的実用化が容易である。モアレトポグラフィによる形状計測手法は30年程前から研究が進められている。近年は等高線の位相値を解析することによって、高精度に形状を得る手法が研究されてきており、高速化することによって実時間計測に適用する研究が行われてきている。実時間で形状計測結果が得られるシステムとしては、前節で述べた加藤らの開発した実時間形状計測システム (Kato 1997) が優れており、すでに商品化も行われている (桑島 1998) が、物体の形状に応じてゆがんだ格子と基準格子のモアレ画像を電子回路内で求め、そこからモアレの位相分布を求めるという処理を行っているために、結果の空間分解能が低くなるという問題がある。新井らの手法 (Arai et al. 1995) では、複数のカメラが必要であり実用化は難しい。また、3～4段階の位相シフトを行う手法が近年よく用いられているが、位相をシフトさせるたびに格子をいったん停止させる必要があるため、高速化には限界があり、高速度カメラを用いた高速現象の形状計測への適用は困難である。

1-3 研究の目的

以上で述べたように、従来の手法では、物体の表面上の空間座標を求める手法では、計測範囲の中央付近では精度がよくても中央部以外では精度が落ちるという問題がある。また、実時間で物体の高さ分布を計測する手法については、従来手法では画像の分解能がよくないことなどの問題点がある。そこで本研究では、非接触形状計測の高精度化および高速化を行うことを目的とする。

高精度化としては、従来の手法では一般に無視されてきたレンズ収差によるゆがみの影響をなくし、計測範囲全面で同じ精度で計測できる手法を開発する。さらに誤差の要因を検討し、その対策を行うことにより、さらに高精度化する手法の開発と、この手法を容易に用いることができるように自動化することをめざす。

高速化としては、実時間でナノメートルオーダーの微小な変形から数メートル程度の物体の形状および変形の分布を計測するシステムを開発する。そのために、連続的に位相シフトされた格子画像から位相値

を高速に求めることができる新たな位相シフト法を開発する。また、その手法を実現するために、ナノメートルオーダーの微小変形を計測するためのトワイマン・グリーン干渉計を用いた微小変形計測システムの構築、マイクロメートルオーダーの形状と変形を計測するための干渉じま投影装置の開発、ミリメートルからメートルオーダーの形状と変形を計測するための格子投影装置の開発を行う。

1-4 本論文の構成

本論文は全4章で構成されている。第1章は緒論で、研究の背景として非接触形状計測のニーズと手法および、位相解析が有効な手段であること、従来の形状計測手法について述べた。さらに研究の目的と本論文の構成について述べる。

第2章では、形状計測の高精度化として、新たにレンズ収差によるゆがみの影響のない形状計測手法を開発する。この原理を確認し、さらに高精度化・全自動化を行い100mm程度のサイズの物体の場合、マイクロメートルオーダーの精度で形状計測が可能なシステムの開発をめざす。

まず、2次元格子の位相解析による形状計測手法を示し、2枚の基準面を用いることによって、レンズ収差によるゆがみの影響のない形状計測を行うことができる原理を示す。次に、その原理に基づく形状計測装置を構築し、原理の有効性を確認する。さらに、誤差要因とその対策を検討し、基準面に液晶モニタを用いることと基準面を複数枚化することによってさらに高精度化を行えることを示す。最後に本手法の適用例として板金加工製品の平面度計測やニホンオオカミの頭蓋骨模型の形状計測を示す。また、回転物体に適用する手法について試みた結果を示す。

第3章では、形状変形計測の高速化として、高さ分布を表す等高線と変位分布を表す等変位線をそれぞれ位相で表現することにより実時間で高さ分布・変位分布を求めるシステムを開発する。ミリメートルからメートルオーダーの物体の形状変形計測、マイクロメートルからミリメートルオーダーの物体の形状変形計測、ナノメートルからマイクロメートルオーダーの微小変形計測をそれぞれ実時間で行う手法および装置を開発し、実際に計測することで有効性を示す。

まず新たに開発した物体の形状が変化する際の同一の変化量を持つ部分を結ぶ等変位線画像を表示する手法について述べる。次に、実際にそれらの手法を用いた等高線・等変位線表示システムを構築する。さらにアルゴリズムをハードウェア化することによって実時間で等高線および等変位線を表示することができる実時間等高線・等変位線表示システムの開発について述べる。

単なる等高線・等変位線ではなくその位相分布を求めれば、より高精度に物体の形状や変形量を計測することができる。そこで、等高線・等変位線の位相を表示する手法として開発した相関位相シフト法について述べる。この手法は矩形波状の位相シフトされた投影格子と矩形波状の基準格子との積分値から位相を求める方法である。この積分の計算をCCDカメラの各画素上での時間積分として行わせる方法として開発した積分型位相シフト法について述べる。この積分型位相シフト法のアルゴリズムをハードウェア化した実時間位相解析ボードを開発し、それを用いることによって、物体の形状や変形量を表す位相分布を実時間で表示する実時間形状変形計測装置について述べる。さらに、高速度カメラを用いて人体の動作時の形状変化を計測する適用例を示す。また、カラー格子を用いて位相接続を実時間で行うアルゴリズムについても述べる。

実時間形状変形計測装置の表示装置として、計測対象物の実物表面上に計測結果を表示する計測結果投影装置の開発についても述べる。また、実時間位相解析ボードを用いてマイクロメートルオーダーの高さを持つ物体の形状や変形を計測することのできる干渉じま投影による微小形状変形計測について述べる。さらに、トワイマン・グリーン干渉計による干渉じま位相解析に適用することによって、マイクロマシン

技術で作成された物体のナノメートルオーダーの変形分布を計測する方法について述べる。
第4章では、本論文の内容を総括して述べる。

第2章 形状計測の高精度化

2-1 はじめに

工業製品の形状や変形の検査を行うためには、試料物体表面上の多数のサンプル点の空間座標を精度よく計測する必要がある。サンプル点の数を増やしていけば、物体表面の形状が得られることになる。空間座標を求める方法としては、接触式の計測装置があり、マイクロメートルオーダーの精度での計測が可能であるが、1点ずつの計測であるため、サンプル点が多い場合には非常に多くの時間がかかる。一方、非接触で空間座標の分布を計測する画像処理を用いた方法がいくつか開発されており、実用化されている例もある。これには1点ずつ求める方法と全面の分布を一度に求める方法がある。1点ずつ求める方法は接触式と同様に計測に時間がかかる。全面の分布を一度に求める方法では、多数のサンプル点の空間座標を高速に求めることができる。しかし、これまでに開発されてきた方法では、0.1mm程度の分解能でしか計測を行うことができない。

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ている (Meadows et al. 1970) (Takasaki 1970) (Takeda and Mutoh 1983) (Suganuma and Yoshizawa 1991) (Gu et al. 1994) (Saldner and Huntley 1997)。格子投影法とは、プロジェクター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。投影される格子に端から順番に番号を付けておけば、どの番号の格子が画面内のどの点に写っているのかを調べることで格子のゆがみを解析することができる。プロジェクターとカメラに関する光学系パラメータ、すなわち、プロジェクターで投影している格子とその格子が投影されている空間の位置関係、およびカメラの画素とその画素が撮影している空間の位置関係がそれぞれわかっているならば、カメラの各画素に撮影されている物体表面各点の空間座標を計算することができる。

格子投影法によって得られた歪んだ格子模様の解析を行うためには、格子の位相を解析することが有効である。格子の位相は、格子模様を明暗の変化の波と見なすことによって、各画素において定義される。位相を求めればすべての画素において格子番号が実数値で得られることになり、撮影範囲の全画素に対応する空間座標を得ることができる。

格子投影法を用いて精度よく計測を行なうためには、各画素における格子の位相を精度よく求めること、および格子の位相から精度よく各サンプル点の空間座標を求める計算手法を確立することが必要となる。

位相を精度よく求めるために、これまでに多くの位相解析法が考案されてきた。格子画像の位相解析法として、フーリエ変換を用いて格子の位相を求める方法 (Takeda et al. 1982) (Takeda and Mutoh 1983) や、格子の位相をシフトして得られた複数枚の画像から位相を求める方法 (Bruning et al. 1974) などが開発されている。我々もフーリエ変換格子法 (FTGM: Fourier Transform Grid Method) (Morimoto et al. 1989, 1991) (Morimoto and Fujigaki 1993) (Fujigaki et al. 1996)、ガボール変換格子法 (GTGM: Gabor Transform Grid Method) (Fujigaki et al. 1995)、ウェーブレット変換格子法 (WTGM: Wavelet Transform Grid Method) (Morimoto and Imamoto 1995)、フーリエ変換位相シフト法 (PSM/FT: Phase Shifting Method using Fourier Transform) (Morimoto and Fujisawa 1994a)、特徴量抽出位相シフト法 (PSM/EC: Phase Shifting Method using Extraction of Characteristic) (Morimoto and Fujisawa 1996) などの位相解析法を開発し、形状や変形、ひずみ、応力の解析に適用してきた。とくにフーリエ変換格子法は2次元格子の位相を方向別に容易に分離することができ、フーリエ変換位相シフト法はノイズの影響がほとんど入らないた

めきわめて精度よく位相値が得られる有効な方法である。

空間座標を求める計算のために、従来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 (Takeda and Mutoh 1983) (Gu et al. 1994) (Saldner and Huntley 1997)。しかし、光学系パラメータとしてレンズ中心を用いることはレンズ収差がないという仮定の上で成り立ち、実際にはその影響が誤差として現れるが、計測精度自体がそれほど高くなかったのでその影響は無視できていた。ところが前述の位相解析手法が進歩して高精度に位相解析を行うことができるようになると、相対的にレンズ収差の影響が大きくなり無視できなくなる。そのため、得られた形状計測結果は一般に計測範囲の周辺部では誤差が大きくなり、平面を計測した場合でも歪んだ計測結果が得られることになる。

そこで本研究では、形状計測の高精度化を行うために、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の光学系パラメータを求めずに、試料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、レンズ収差によるゆがみが影響しない形状計測方法を新たに開発する (藤垣, 森本 1996) (Fujigaki and Morimoto 1996) (Fujigaki and Morimoto 1998)。

本章では、まず第2-2節でレンズ収差によるゆがみの影響のない形状計測手法として、基準平面を用いた形状計測手法の原理について述べる。次に、第2-3節でその原理の有効性を実験により確かめる。さらに、第2-4節で誤差要因とその対策によって高精度化・自動化する手法について述べ、その効果を示し、マイクロメートルオーダの形状計測が実際に可能なシステムを開発する。最後に適用例として第2-5節で板金加工品の平面度計測、金属部品の形状計測、ニホンオオカミの頭蓋骨模型の形状計測、回転物体の形状計測の例をそれぞれ示す。

2-2 形状計測原理

カメラとプロジェクターのレンズ収差によるゆがみの影響の入らない高精度形状計測手法の原理を述べる。本手法では、基準板に描かれている2次元格子の位相値分布とプロジェクターから投影された2次元格子の位相分布を用いて空間座標を求める。これらの2次元位相を精度よく求める手法および求められた2次元位相から空間座標を求める手法の2点が本計測原理の重要な要素である。

本節では、まず2次元格子と2次元位相の関係について述べ、次に2次元格子投影による形状計測方法について述べる。最後にレンズ収差によるゆがみの影響の入らない高精度形状計測手法について述べる。具体的な位相解析方法については、第2章2-3節で詳しく述べる。

2-2.1 2次元格子番号と2次元位相

格子を明るさ変化の波とみなすことによって、波の頂上だけでなくすべての位置で位相が定義できる。言い換えると、すべての位置における格子番号が整数値でなく実数値として得られるということである。

図2.1に、格子番号と位相値の関係を示す。図2.1(a)に格子画像とその明るさの変化を示す。格子の明るい線それぞれに整数の格子番号 k が左から順に付けられている。明るさの変化を波と見なすと、波の進行に応じてひとつの波ごとに $-\pi \sim \pi$ までの位相が定義できる。これを表したものが図2.1(b)に示す位相分布である。図2.1(b)では、位相の変化は連続的ではなく、格子1本ごとに分かれているが、波がひとつ進むごとに 2π ずつ加算する操作を行うことによって、位相の変化を連続的に接続することができる。この操作は、位相の連続化または位相接続と呼ばれる。図2.1(b)に示す位相値に対してこの操作を行った結果を図2.1(c)に示す。図2.1(c)では、位相の変化は単調増加となり、このようにして得られた位相分布から、すべての位置において位相値（すなわち実数の格子番号）を得ることができる。また逆に、位相分布を用い

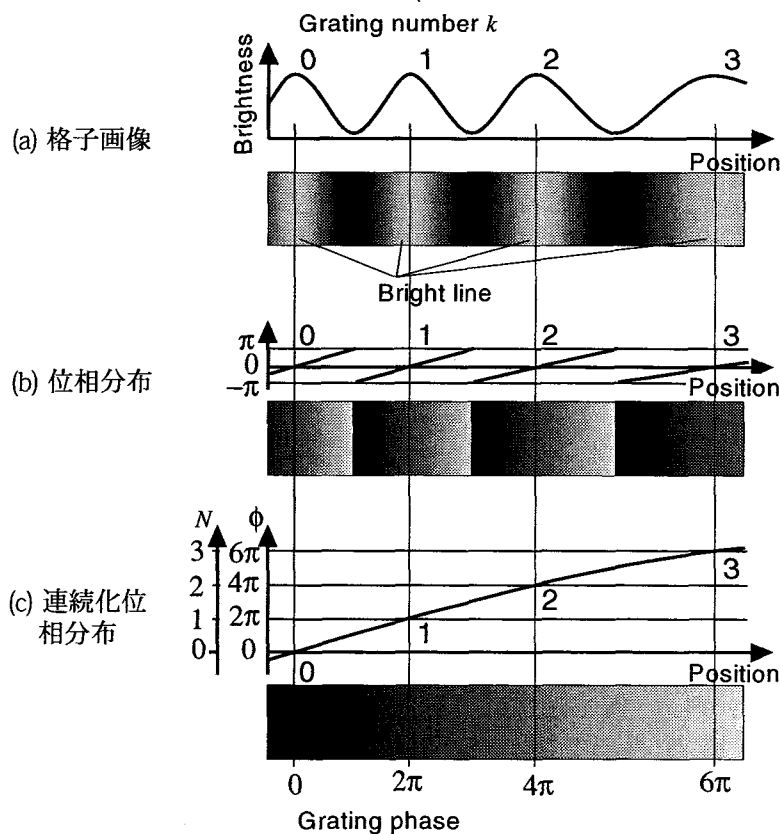


図2.1 格子番号と位相の関係

ばある位相値に対してその位相値を持つ位置を特定することができる。

図2.1(a)の格子画像から図2.1(b)の位相分布を精度よく得る方法として、フーリエ変換格子法 (FTGM) (Morimoto et al. 1989, 1991), ガボール変換格子法 (FTGM) (Fujigaki et al. 1995), ウェーブレット変換格子法 (WTGM) (Morimoto and Imamoto 1995), フーリエ変換位相シフト法 (PSM/FT) (Morimoto and Fujisawa 1994), 特徴量抽出位相シフト法 (PSM/EC) (Morimoto and Fujisawa 1996) などをこれまでに考案している。それぞれ特徴があり、場合に応じて最適な位相解析法を使うことで精度よく位相分布を求めることができる。

また、位相接続を行う方法としては、端から順に位相の変化を計算して行き、急変するところで $2k\pi$ (k は整数)を加える方法で位相接続を行う方法と数通りのピッチの異なる格子の位相値から各点ごと独立に接続後の位相値を算出する方法を本研究では用いている。その詳細については第2章2-3節で述べる。

図2.2に、2次元格子における格子番号と2次元位相の関係を示す。図2.2(a)は、変形した2次元格子画像である。図2.1の場合と同様に、明るい線について x 方向と y 方向のそれぞれに格子番号 k_x, k_y が付けられている。図2.2(a)と(b)は、それぞれ x 方向と y 方向の連続化された位相分布 $\phi_x(i, j)$ および $\phi_y(i, j)$ である。これらの位相分布 $\phi_x(i, j)$ および $\phi_y(i, j)$ より、画像内での座標 (i, j) が決まればその点における2次元位相 (ϕ_x, ϕ_y) を求めることができる。逆に、これらの位相分布 $\phi_x(i, j)$ および $\phi_y(i, j)$ を用いて、2次元位相 (ϕ_x, ϕ_y) を持つ点 (i, j) を求めることもできる。このように、2次元位相を用いれば、2次元格子の格子番号(2次元位相値)と画面内での座標に1対1の対応をつけることができる。(Fujigaki et al. 1996) (Morimoto and Fujigaki 1993)

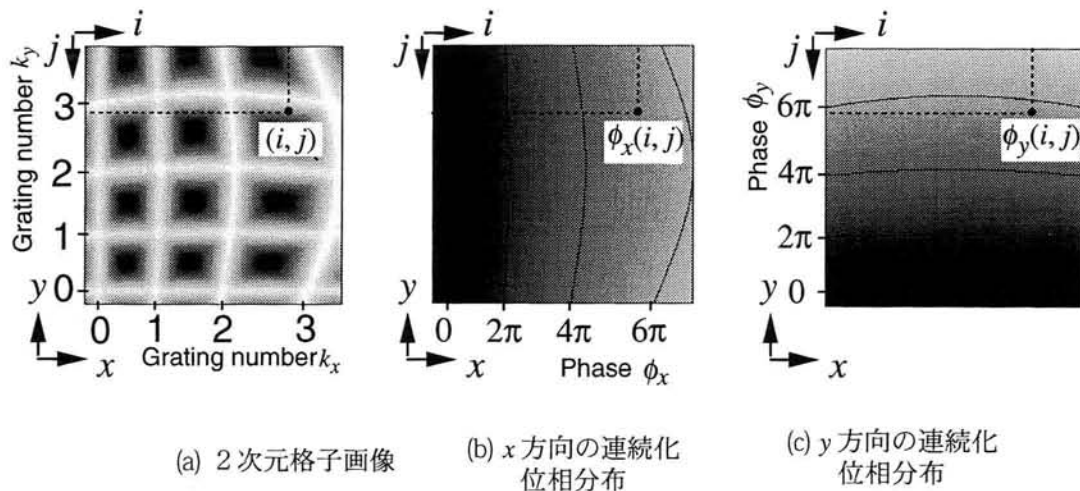


図2.2 2次元格子番号と2次元位相の関係

2-2.2 2次元格子投影による形状計測

本研究では、「投影線」と「視線」の意味を次のように定義して用いることにする。まず、図2.3(a)に示すように、液晶プロジェクタのある画素 P_p から発せられた投影光が通る道筋を画素 P_p の投影線と呼ぶことにする。また、図2.3(b)に示すように、カメラのある画素 P_c に到達する光が通る道筋を画素 P_c の視線と呼ぶことにする。さらにそれを拡張して、実数値の画面内座標に対して同様に投影線と視線を定義する。さらに液晶プロジェクタの投影画像が2次元格子の場合、格子の2次元位相値が投影画像の画面内座標

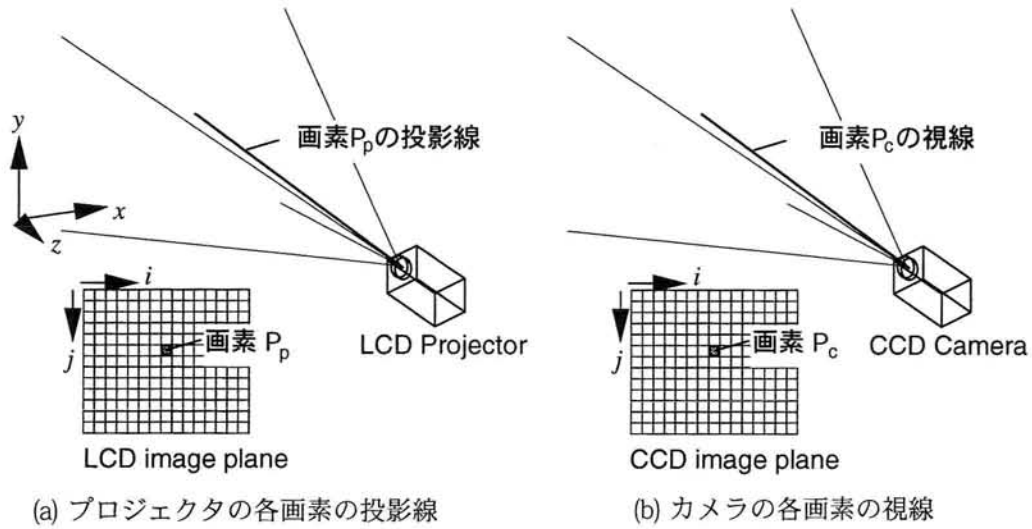


図 2.3 投影線と視線の定義

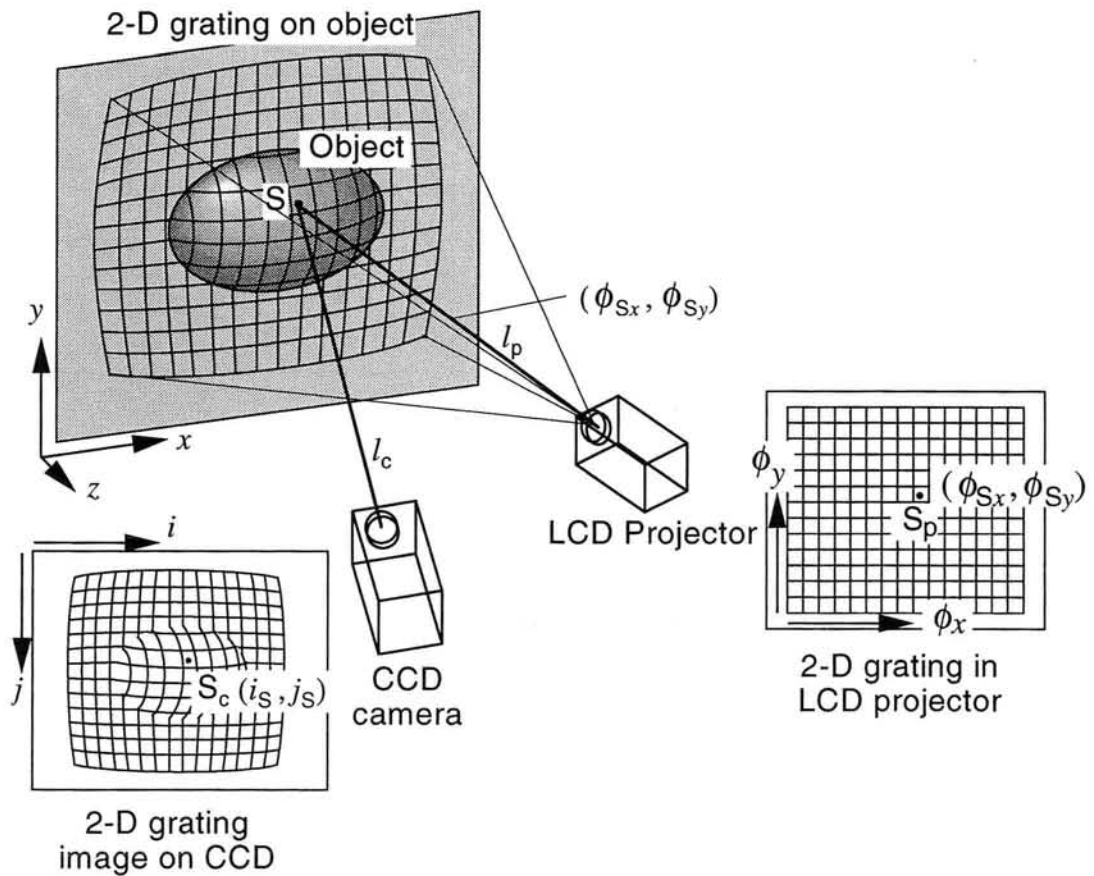


図 2.4 2次元格子投影による形状計測原理

と1対1で対応しているので、2次元位相値に対する投影線を画面内座標に対する投影線と同様に定義する。なお、厳密にはレンズの絞りが点ではなく広がりを持っているために、液晶プロジェクタの一つの画素から発せられた投影光が通る道筋およびカメラのひとつの画素に到達する光が通る道筋はそれぞれ直線にはならないが、それぞれピントの合っている範囲で直線とみなす。

図2.4に2次元格子投影による形状計測方法の原理を示す。液晶プロジェクタからは2次元格子が物体に投影される。物体に投影された2次元格子は、プロジェクタと異なる方向からCCDカメラによって撮影される。撮影された2次元格子は、物体の形状に応じたゆがみを持っており、その格子のゆがみから物体の形状を求めることができる。しかし、プロジェクタから投影された2次元格子はプロジェクタのレンズの収差の影響のために多少ゆがみを持っている。さらに、CCDカメラで撮影する際にも、カメラのレンズの収差の影響のためにさらに歪められて撮影される。撮影された2次元格子の位相を解析すれば、撮影された画像の各点の座標に対する2次元位相分布を得ることができる。すなわち、カメラの画面内座標とその各点に撮影されている投影格子の2次元位相との対応関係が得られることになる。

液晶プロジェクタからは2次元格子が投影されるので、液晶プロジェクタの投影画像上のすべての画面内座標はそれぞれ全て異なった2次元位相(ϕ_x, ϕ_y)を持ち、それらに対応するすべての投影線はそれぞれが全て異なった2次元位相(ϕ_x, ϕ_y)を持つと考えることができる。もし、画像内の各画素の画面内座標とその画素の視線の関係がわかっているならば、物体上のある1点Sについて、その点が写っている画面内座標 $S_c(i_s, j_s)$ から視線 l_c を求めることができる。また、プロジェクタで投影する2次元格子の2次元位相値と投影線の位置の関係がわかっているならば、その点における2次元位相値(ϕ_{Sx}, ϕ_{Sy})から、それを投影している投影線 l_p を求めることができる。物体上の点Sの空間座標は、カメラの視線 l_c とプロジェクタの投影線 l_p の交点として求めることができる。この手順を画像内の全ての画素について行うことによって、物体表面上の各点の空間座標を求めることができる。

2-2.3 基準面を用いた形状計測原理

(藤垣, 森本 1996) (Fujigaki and Morimoto 1996) (Fujigaki and Morimoto 1998)

従来の形状計測方法は、プロジェクタやカメラのレンズに収差がなく、全ての投影線と視線はレンズの中心点を通るという仮定を使っていた。そのため、従来の方法では、図2.4における直線 l_p と l_c がそれぞれプロジェクタとカメラのレンズ中心を通る直線として得られていた。しかし実際のレンズには多少なりとも収差があり、そのために形状計測結果にゆがみが出ることになる。

そこで我々は、レンズの中心を通るという仮定を使わずに、図2.4における直線 l_p と l_c を精度よく求められる新しい手法を提案する。図2.5に基準面を用いた高精度形状計測方法の原理を示す。この方法では、プロジェクタから投影する2次元格子の各位相に対する全ての投影線とカメラで撮影する画像の全ての画面内座標に対する視線を基準面を元に求めるため、基準板さえ精度よく作成しておけば、レンズ収差の影響によるゆがみが入ることなく高精度に形状を求めることができる。

図2.5(a)に、基準板とカメラ、プロジェクタの配置を示す。基準板は法線方向に移動することができるように1軸のリニアステージ上に設置されている。基準板の表面を基準面と呼び、図2.5(a)で R_n は位置が $z = z_n$ ($n=0, 1$) である基準面を表す。

図2.5(b)に、基準板に描かれた2次元格子とその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 および p_y とする。2次元格子の2次元位相を (ψ_x, ψ_y) と表す。基準面 R_n 上の空間座標 (x, y, z) は、2次元位相 (ψ_x, ψ_y) を用いて式(2.1)のように求めることができる。

$$\begin{cases} x = \frac{p_x \psi_x}{2\pi} + x_0 \\ y = \frac{p_y \psi_y}{2\pi} + y_0 \\ z = z_n \end{cases} \quad (2.1)$$

ここで、 x_0 と y_0 はそれぞれ基準板上で2次元位相値(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。

試料物体の形状計測を行う前に、 $z = z_n$ ($n=0, 1$)の2カ所のそれぞれの位置において、基準板に描かれた2次元格子とプロジェクタから投影された2次元格子をそれぞれCCDカメラで撮影する。画像内での座標(i, j)において、フーリエ変換格子法 (FTGM) を用いて2次元位相(ψ_x, ψ_y)を求めることができ、式(2.1)

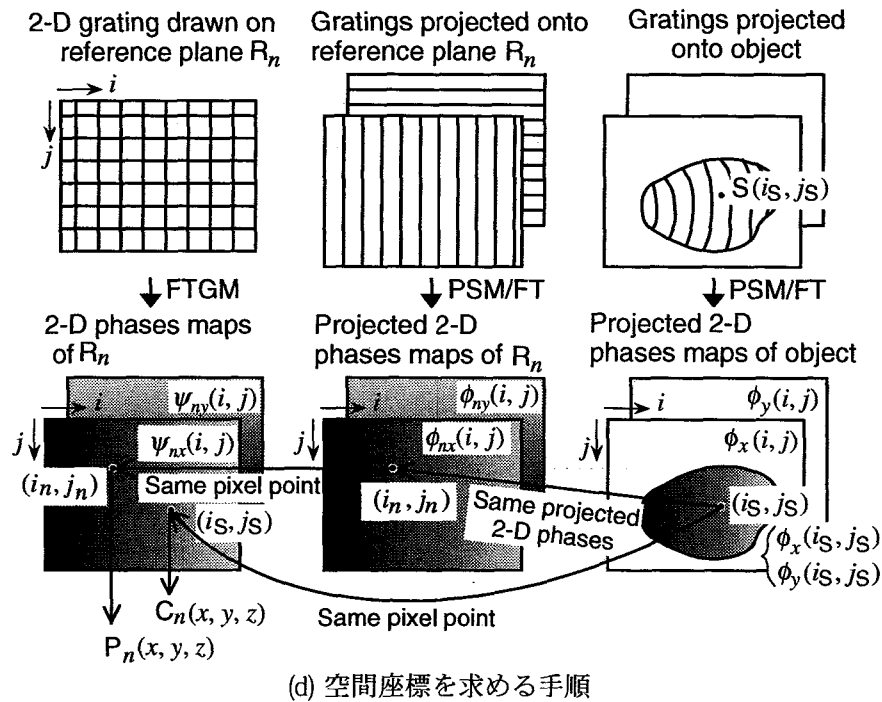
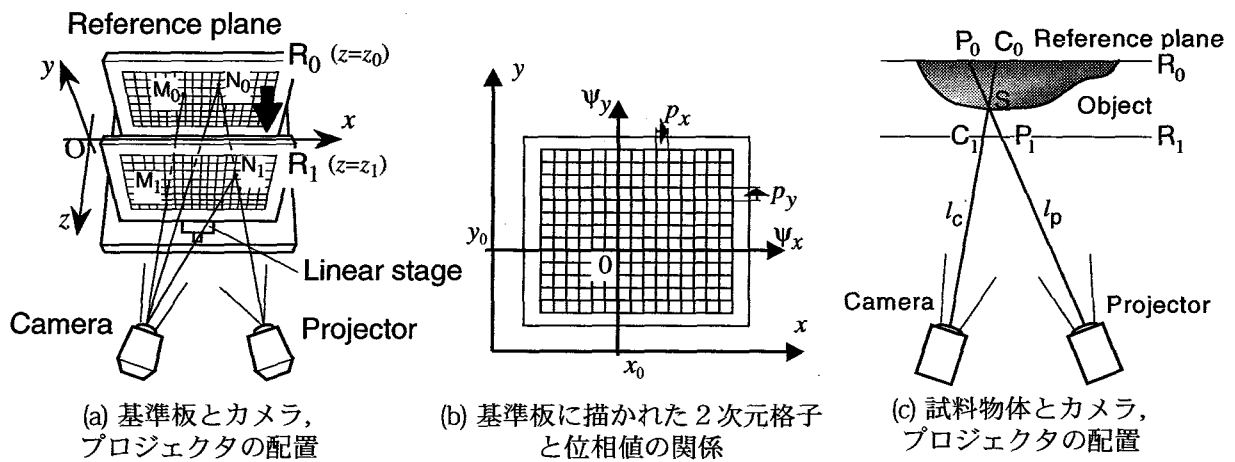


図2.5 基準板を用いた高精度形状計測の原理

は式(2.2)のように書き換えることができる。

$$\begin{cases} x = \frac{p_x \psi_{nx}(i, j)}{2\pi} + x_0 \\ y = \frac{p_y \psi_{ny}(i, j)}{2\pi} + y_0 \\ z = z_n \end{cases} \quad (2.2)$$

ここで $\psi_{nx}(i, j)$ と $\psi_{ny}(i, j)$ は、それぞれ基準面 R_n における画面内の座標 (i, j) での x 方向および y 方向の成分を持つ2次元位相である。

投影格子の2次元位相はフーリエ変換位相シフト法 (PSM/FT) によって求められる。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投影することは困難なので、 x 方向の格子と y 方向の格子を別々に位相シフトしながら投影して位相分布を求める。

図2.5(a)において、点 M_0 と M_1 は同一の画面内座標に写されている点である。点 M_n の空間座標は画面内座標から式(2.2)を用いて求めることができる。基準面 R_n と格子投影線との交点を点 N_n とするときに、点 N_0 と N_1 は同一の投影格子の2次元位相を持つことになる。点 N_n を写している画面内座標は、基準面 R_n における投影格子の2次元位相分布 $\phi_{nx}(i, j)$ と $\phi_{ny}(i, j)$ から見つけることができ、その画面内座標から式(2.2)を用いて点 N_n の空間座標を求めることができる。

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(c)に示す。物体表面上の点 S の空間座標は、直線 l_c と l_p の交点として求められる。点 C_n は基準面 R_n と直線 l_c の交点であり、点 P_n は基準面 R_n と直線 l_p の交点である。直線 l_c と l_p は、直線 C_0C_1 と直線 P_0P_1 として求めることができる。結果として、物体表面上の点 S の空間座標は、基準面 R_n 上の4点 C_n と P_n ($n=0, 1$) から得られることとなる。

基準面 R_n に描かれた2次元格子の2次元位相分布 $\psi_{nx}(i, j)$ と $\psi_{ny}(i, j)$ および基準面 R_n に投影された2次元格子の2次元位相分布 $\phi_{nx}(i, j)$ と $\phi_{ny}(i, j)$ から点 C_n と P_n の空間座標を求める手順を図2.5(d)に示す。物体表面上の点 S は画面内座標の点 (i_s, j_s) に写されているとする。まず、点 C_n の空間座標は画面内座標 (i_s, j_s) から式(2.2)によって得ることができる。次に点 P_n の空間座標の求め方を述べる。物体表面上の点 S に投影されている格子の2次元位相値を (ϕ_x, ϕ_y) とする。2次元位相分布 $\phi_{nx}(i, j)$ と $\phi_{ny}(i, j)$ において、点 S と同一の2次元位相 (ϕ_x, ϕ_y) を持つ点 (i_n, j_n) を見つける。本研究では付録A2に示す方法を用いることにより、実数値の座標として点 (i_n, j_n) を求める。その点 (i_n, j_n) から式(2.2)によって、点 P_n の空間座標を得ることができる。

以上の手法によって、点 C_n と P_n の空間座標をカメラとプロジェクタのレンズ中心の座標を用いずに求めることができる。そのため、物体表面上の点の空間座標を精度よく求めることができる。点 S の空間座標は、直線 C_0C_1 と直線 P_0P_1 の交点として求める。しかし、空間内の2直線は一般にはねじれの位置となり交点を持たない。そこで、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中点を求めて点 S とする。この計算方法の詳細を付録A3に示す。

2-3 形状計測原理の確認実験

これまでに述べた基準板を用いる高精度形状計測手法を実際の物体の形状計測に用いた場合に、理論どおりレンズ収差によるゆがみが発生せず高精度に形状計測が行うことができることを確認する。形状計測対象としては、平板および円錐台を用いる。平板についてはレンズ中心を用いる従来法による形状計測結果と比較する。

2-3.1 計測装置

図2.6に基準板を示す。基準板には2次元格子を描いたフィルムを表面に貼り付けたガラス板を用いる。ガラス板のサイズは300mm×210mmである。フィルムにはインクジェットプリンタ用のバックプリントフィルムを用い、インクジェットプリンタによって2次元格子を印刷する。2次元格子のピッチはx方向、y方向ともに2.54mmである。格子線は、格子線の上にプロジェクタから投影された格子が判別できる程度の濃さで描かれている。ガラス板はその法線方向に平行移動できるようにリニアステージに取り付けられている。リニアステージには、移動量が確認できるように、分解能が0.01mmのデジタルポジションメータが取り付けられている。基準板の移動量は20.00mmとする。

基準板表面におけるz座標の分布を接触式三次元測定器を用いて計測した結果を図2.6(b)に示す。図2.6(b)で計測点を黒点で示す。計測機として、0.001mmの精度で計測が可能な接触式三次元測定器(ミットヨ, マイクロコードFJ704)を用いた。また、基準板表面の粗さをサンプリングピッチ1.0 μm で計測した結果を図2.6(c)に示す。計測には表面粗さ測定器(ミットヨ, CS-701)を用いた。

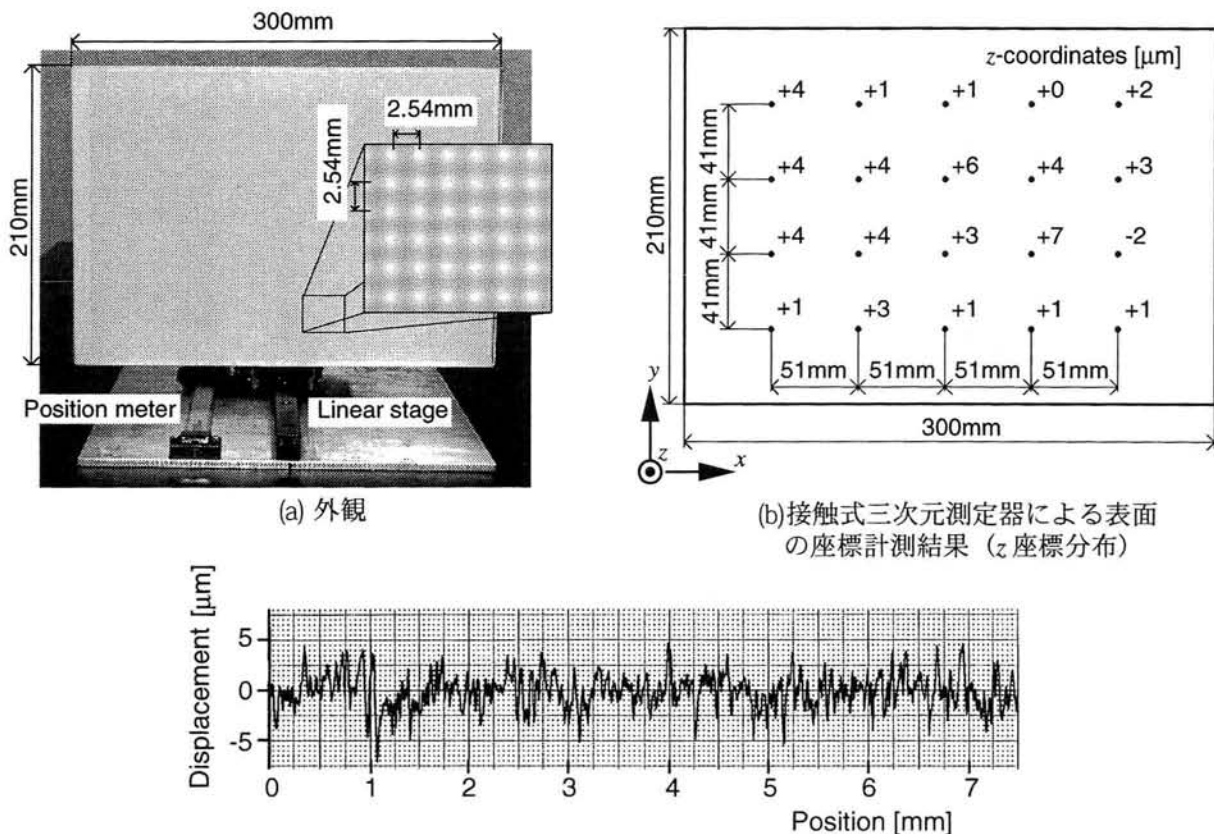


図2.6 基準板

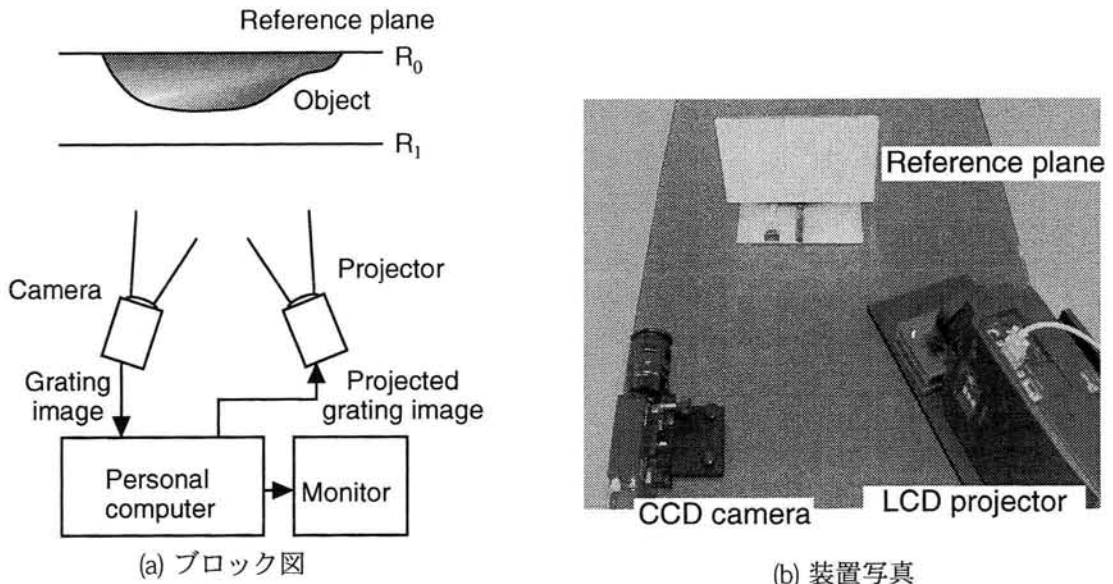


図 2.7 形状計測システム

図2.7に計測システムを示す。基準板に描かれた2次元格子はCCDカメラで撮影されてコンピュータに取り込まれる。また、液晶プロジェクタからは、コンピュータによって作成された格子画像が基準板表面または基準板の位置に設置された試料に投影される。基準板表面または試料表面に投影された格子画像はCCDカメラによって撮影される。撮影された画像はコンピュータのメモリーに取り込まれる。

2-3.2 基準板の位相解析

図2.8に基準板に描かれた2次元格子の位相解析結果を示す。2次元格子の位相解析にはフーリエ変換格子法 (FTGM) (付録A4参照) を用いる。フーリエ変換のアルゴリズムとしては、 640×480 画素の画像に対してフーリエ変換を行うことができる Mixed Radix Fast Fourier Transform (MR-FFT) (Singleton 1969) を用いる。図2.8(a)は、基準板を $z=0.00\text{mm}$ の位置に設置した場合の2次元格子画像である。これを2次元フーリエ変換して得られるパワースペクトル画像を図2.8(b)に示す。図2.8(b)に2次元格子の x 方向および y 方向の1次調和波成分を示す。これらの1次調和波成分を抽出し、逆フーリエ変換することによって、 x 方向および y 方向の位相分布を得ることができる。図2.8(c)に、このようにして得られた x 方向の位相分布を示す。これに対して位相接続 (付録A6参照) を行うことによって、図2.8(d)に示す連続化された位相分布を得ることができる。 y 方向についても同様に連続化された位相分布を得ることができる。

なお、ここではフーリエ変換格子法を用いたが、基準板を液晶ディスプレイとすることにより、フーリエ変換位相シフト法を用いることができ、より高精度となる。これについては、第2章2-5.3節で詳しく述べる。

基準板に投影された格子の位相解析を行った結果を図2.9に示す。投影格子の位相解析には、フーリエ変換位相シフト法 (PSM/FT) (付録A5参照) を用いる。図2.9(a)は、 $z=0.00\text{mm}$ の位置に設置した基準板表面に投影された格子画像 (x 方向, 位相シフト量 $\alpha=0$) である。投影格子の位相シフト回数は16回である。基準板表面上には2次元格子が描かれているため、描かれている2次元格子に重なった投影格子画像が得られることになる。しかし、フーリエ変換位相シフト法は各点の輝度の変化からその点の位相値を求めるため、描かれている2次元格子の影響はほとんどなく位相値を求めることができる。図2.9(b)にフーリエ変換位相シフト法によって得られた位相分布を示す。図2.9(c)に位相接続された位相分布を示す。 y 方向についても同様に位相接続された位相分布を得ることができる。

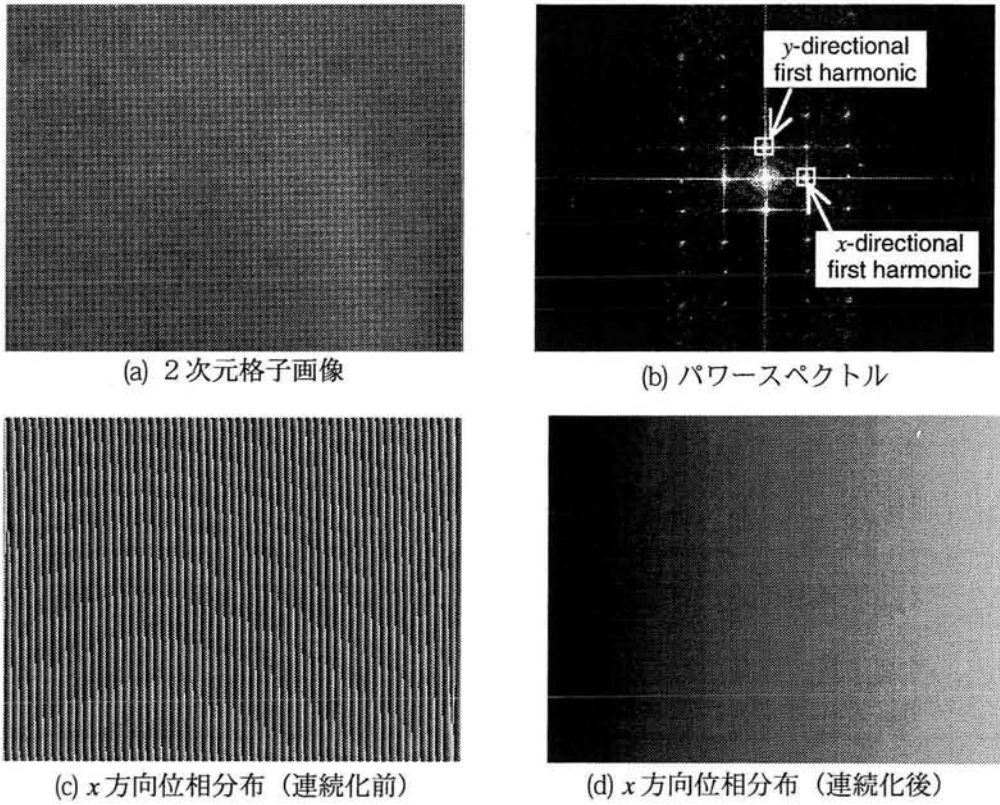


図 2.8 基準板に描かれている2次元格子の位相解析 (基準板の位置 0.00mm)

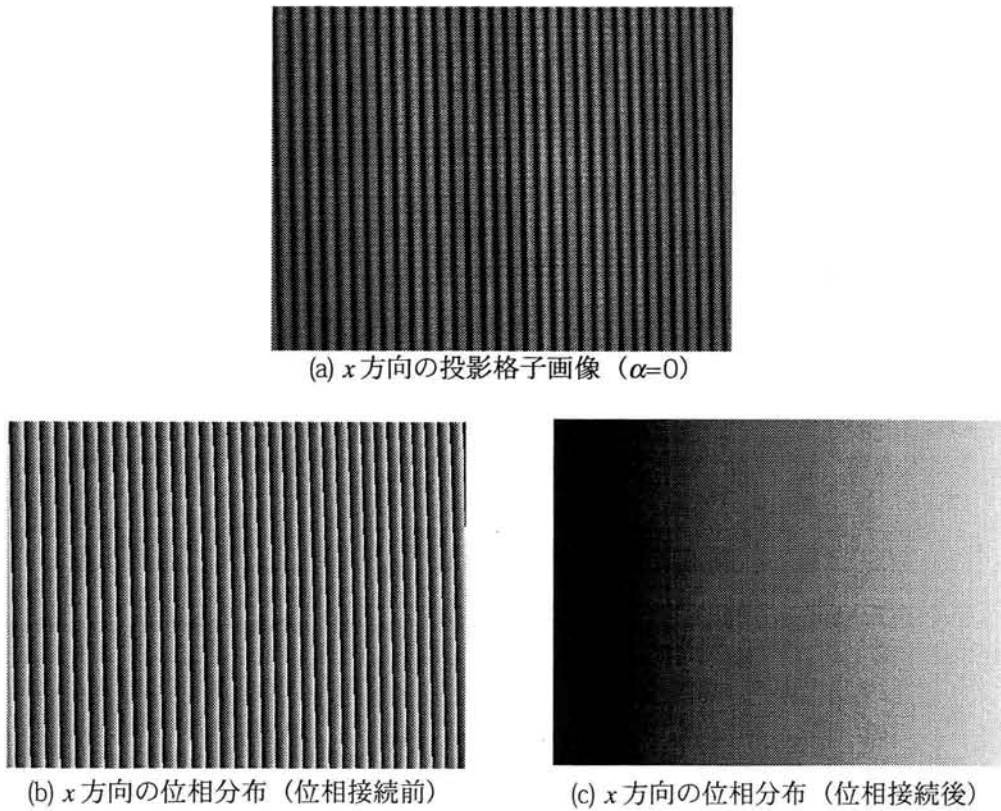
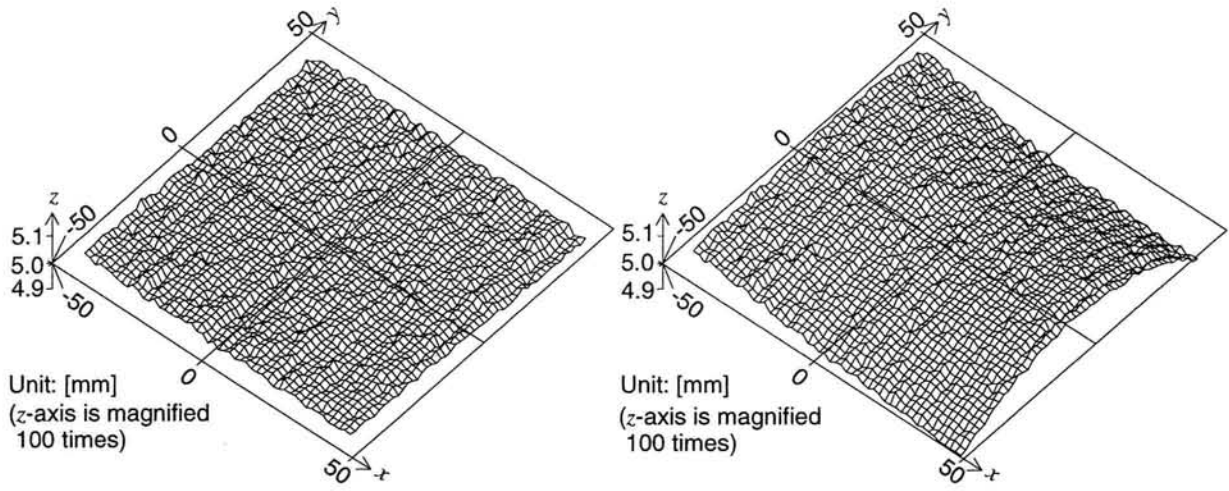


図 2.9 基準板へ投影された格子の位相解析 (基準板の位置 $z=0.00\text{mm}$)

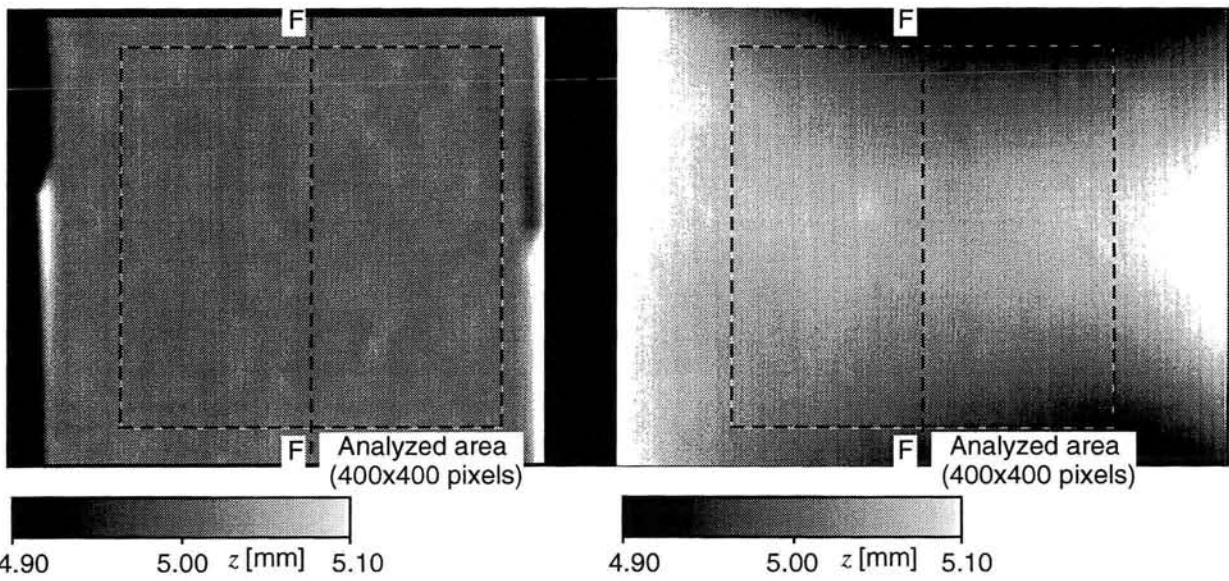
2-3.3 平板の形状計測

図2.10に平板の形状計測結果を示す。平板として、 $z=5.00\text{mm}$ の位置に移動した基準板を用いる。図2.10では、本章で提案した基準板を利用した形状計測法で解析した結果と、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法で解析した結果を比較する。図2.10(a)と(b)に、提案法と従来法で解析した平板の形状をそれぞれ示す。図2.10(c)と(d)に、提案法と従来法で解析した平板の z 座標分布をそれぞれ示す。図2.10(e)は、図2.10(c)と(d)におけるF-F断面の形状を示す。図2.10(c)と(d)に示す 400×400 画素の範囲（試料表面上では $91\text{mm} \times 89\text{mm}$ ）を解析領域とした場合、提案法を用いた場合は、 z 座標の平均値は 5.012mm で標準偏差は 0.009mm であった。一方、従来法を用いた場合は、 z 座標の平均値は 5.032mm で標準偏差は 0.037mm であった。前々節2-3.1の図2.6(b)と(c)で示したように、この平板のゆがみおよび表面粗さは $10\mu\text{m}$ 以下である。したがって従来法と比較して提案法で解析した方がゆがみがなく精度よく形状を計測できていると言える。



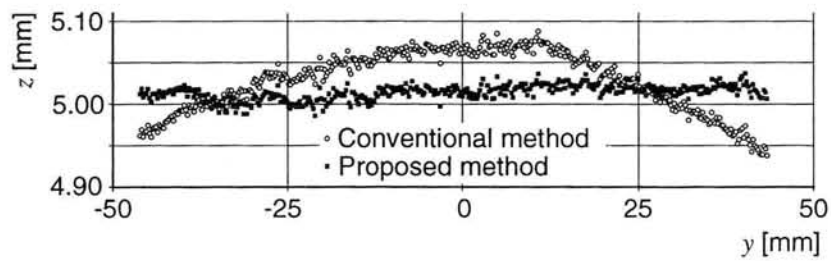
(a) 提案法による計測結果形状

(b) 従来法による計測結果形状



(c) 提案法による計測結果 (z 座標分布)

(d) 従来法による計測結果 (z 座標分布)



(e) F-F 断面形状

図 2.10 平面の形状計測結果 (平面設置位置 $z=5.00\text{mm}$)

2-3.4 3次元物体への適用

次に実際の3次元形状を持つ物体の形状計測に適用した例を示す。図2.11に試料として用いた円錐台形状の物体を示す。図2.11(a)および(b)に試料の形状および写真をそれぞれ示す。円錐台試料の高さは20.00mmであり、頂上部の直径は40mm、底部の直径は80mmである。試料の材質はアルミニウムで、表面を白色ラッカーで塗装している。

図2.12に試料に投影した格子の位相解析した結果を示す。図2.12(a)および(b)に、それぞれ x 方向および y 方向の投影格子画像（位相シフト量 $\alpha=0$ ）を示す。図2.12(c)および(d)に、フーリエ変換位相シフト法によって得られた x 方向および y 方向の投影格子の位相分布をそれぞれ示す。図2.12(e)および(f)に、図2.12(c)および(d)の位相分布を連続化することによって得られた連続化された位相分布を示す。

図2.13に提案法を用いて計測された円錐台試料の形状計測結果を示す。図2.13(a)に計測結果の形状を示す。形状計測結果として得られる試料表面の各点の空間座標に対して、図2.13(a)に示されている点 Q_0 および点 Q_1 、点 Q_2 の3点が $z=0$ 平面内に入るような座標変換を行う。この座標変換方法の詳細については、第2章2-5.1.2節で述べる。座標変換後のA-A断面形状を図2.13(b)に示し、A'-A'断面形状を図2.13(c)に示す。A'-A'断面における z 座標の平均値は20.013mmで標準偏差は0.013mmであるため計測精度は13 μm と言える。また、B-B断面形状を図2.13(d)に示す。図2.13(d)にB-B断面の形状を示す。B-B断面における z 座標の誤差の平均値は0.006mmで標準偏差は0.007mmである。

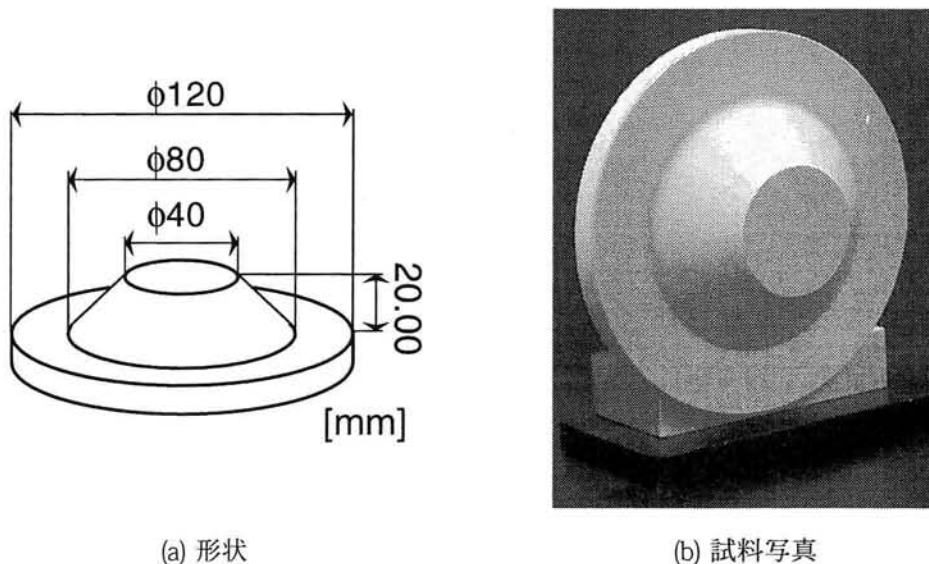
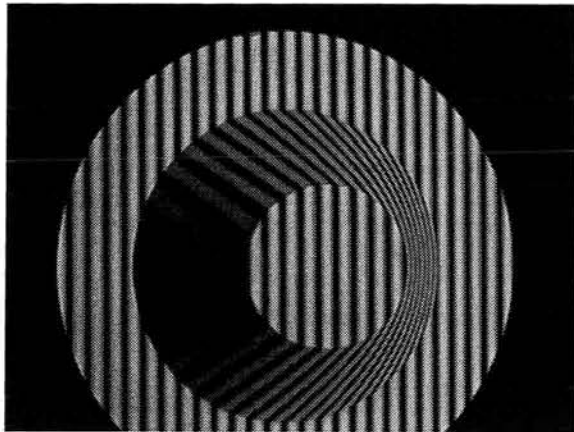
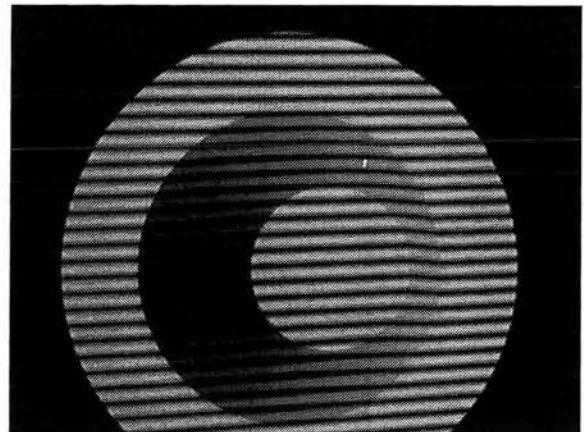


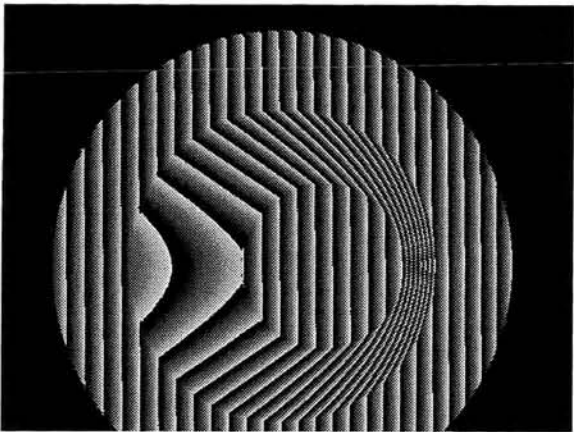
図2.11 試料物体



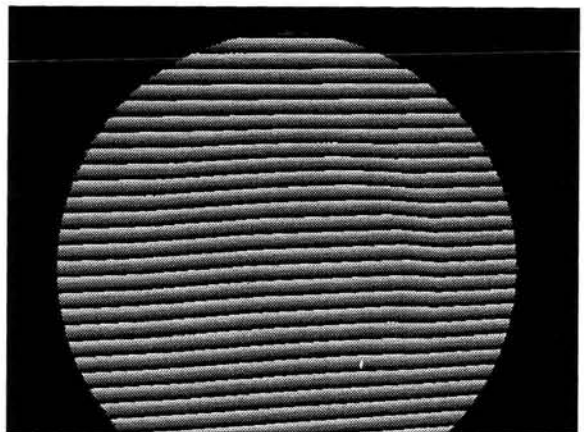
(a) x方向投影格子画像 ($\alpha=0$)



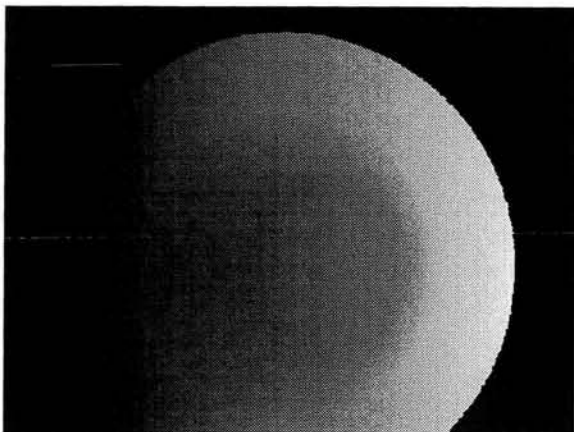
(b) y方向投影格子画像 ($\alpha=0$)



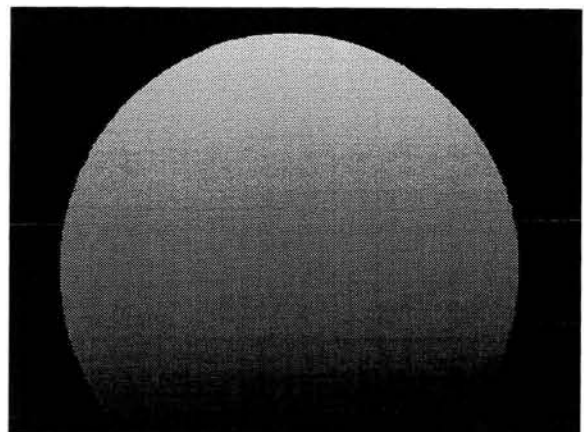
(c) x方向位相分布 (位相接続前)



(d) y方向位相分布 (位相接続前)

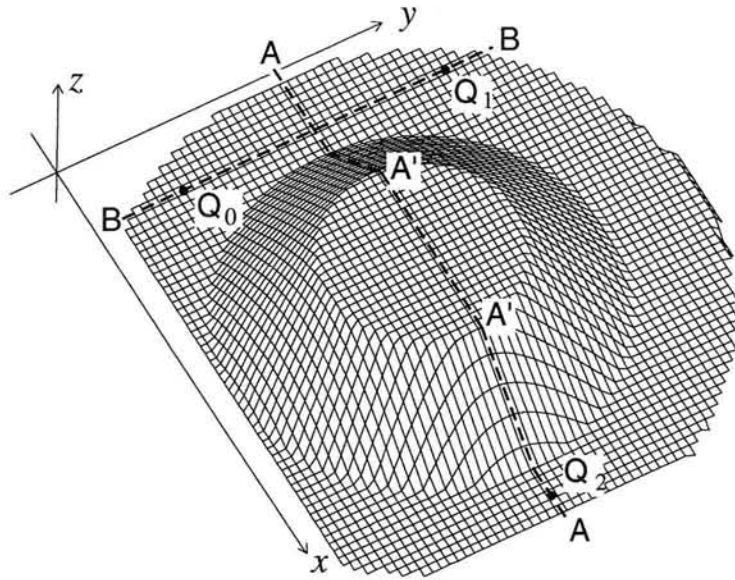


(e) x方向位相分布 (位相接続後)

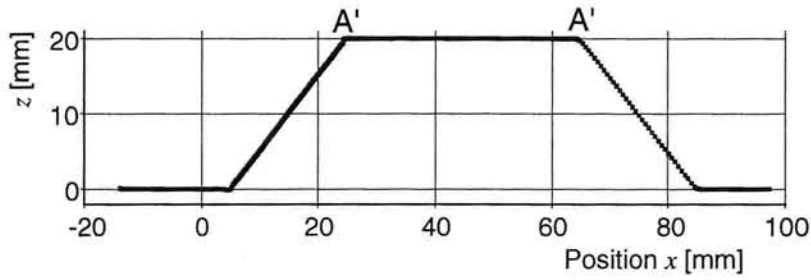


(f) y方向位相分布 (位相接続後)

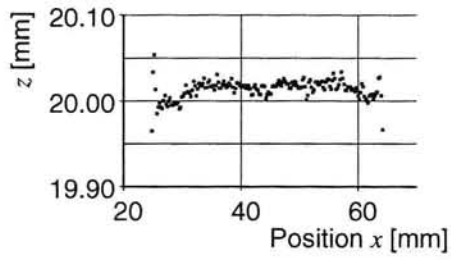
図 2.12 試料への投影格子画像とその位相解析



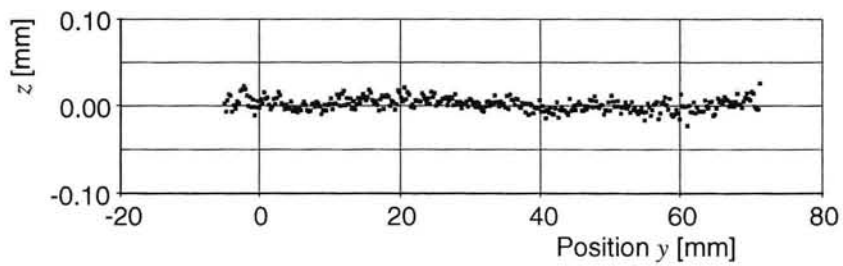
(a) 計測結果形状



(b) A-A 断面形状



(c) A'-A' 断面形状



(d) B-B 断面形状

図 2.13 円錐台試料の形状計測結果

2-4 高精度化・自動化

これまでに基準板を用いた高精度形状計測の原理を述べ、レンズ収差の影響によるゆがみが形状計測結果に入らないことを述べた。さらに原理確認実験を行うことによって実際にゆがみがない高精度な形状計測を行うことができることを示した。本計測方法を実用化するためには、本計測方法を高精度化・自動化・高速化する必要がある。ここでは、誤差要因を検討し、その対策を行うことにより高精度化を行う。

2-4.1 誤差要因と対策

これまでに述べた形状計測原理の高精度化を行うためには、誤差の原因と対策を考察する必要がある。誤差の原因としては次のようなものがある。

- ①基準面に描かれている2次元格子のインクの凹凸の影響
- ②基準面に描かれている格子模様が投影格子の位相解析精度に与える影響
- ③基準面に描かれている2次元格子をフーリエ変換格子法で解析するときの端部の誤差の影響
- ④基準面間でのピントの違いの影響
- ⑤基準板の平面度と表面粗さの影響
- ⑥装置の振動や熱変形の影響
- ⑦液晶プロジェクタの画素間の境界部分の影響
- ⑧物体表面の反射率の影響
- ⑨物体内部に吸収された投影光の乱反射成分の影響

①については、第2章2-3節で述べた原理確認実験で用いた基準板の場合は図2.6で示したように10 μm 以内に収まっているため影響はなかったが、計測精度1 μm 程度に高精度化を行う場合には影響すると考えられる。②については、表面に描かれている2次元格子のインクが濃い部分と薄い部分では投影格子の反射率が異なるために、投影格子の位相解析精度に違いが現れる影響がある。③については、フーリエ変換格子法には画像の端部近傍では位相解析精度が極端に下がるという性質があるため、端部近傍での計測精度が下がるという影響がある。④については、後ほど第2章2-4.4節で述べるが、基準面の近傍と比較すると2枚の基準面間の中央付近では誤差が大きくなる。この原因は、カメラによる撮影のピントおよびプロジェクターによる投影格子のピントが基準板近傍と基準板間の中央付近で異なるからと予想される。⑤については、目標とする計測精度以上の平面度と表面粗さが基準面には要求される。⑥については、計測装置内部の冷却ファンによる振動や内部で発生する熱による計測装置自体の変形が計測精度に影響する。⑧と⑨についてであるが、計測対象物体によっては表面の反射の状態が大きく異なる。例えば金属光沢を持つ物体の場合は全反射の成分が大きく乱反射成分が小さいために投影格子を撮影しにくくなるなどの問題がある。また、人体の皮膚のように一部を吸収して内部で乱反射するようないわゆる半透明な物体の場合は、計測結果として得られる座標値が皮膚表面の座標であるかどうか定かではないという問題がある。

上記①～④の対策として、基準板として液晶ディスプレイを用いる手法を提案する。基準面上の2次元格子は、基準板表面に描かれるのではなく液晶ディスプレイに格子パターンを表示することによって代用する。液晶ディスプレイ表面に光拡散板を貼り付けておくことにより、表示された格子パターンは光拡散板表面からの散乱光となって、カメラに撮影される。これによって、①の影響をなくすることができる。基準面に格子を投影するときには、液晶ディスプレイに格子を表示しないようにすれば、②の影響をなくすることができる。液晶ディスプレイに表示する格子を位相シフトすることで位相解析を行うようにすればフーリエ変換格子法を用いないため、③の影響をなくすることができる。また、基準面の枚数を複数に増やすことによって、全ての計測対象点を複数の基準面のうちのどれかの近傍とすることができ、④の影響を減らすことができる。

この提案手法を実現するためには、液晶ディスプレイに表示する格子の位相シフトに同期して画像入力を行うソフトウェアが必要になる。また、基準面を複数枚化するためには基準面の位相解析を自動化することが必要となる。そのためには位相接続を自動化する必要もある。そこで以下には、位相接続を自動化する手法と解析ソフトウェアの開発、液晶ディスプレイを用いた基準板、基準面の複数枚化について述べる。なお、⑤～⑨の対策については今後の研究課題とする。

2-4.2 複数のピッチの異なる格子を用いる位相接続手法の開発

フーリエ変換格子法やフーリエ変換位相シフト法によって得られる位相分布は、第2章2-2.1節で述べたように、その値が $-\pi \sim \pi$ の値の繰り返しとなり、格子1本ごとに不連続となる。本形状計測法では、連続化された単調増加の位相分布が必要となるため、位相接続を行うことによって位相を連続化させる必要がある。

周囲の画素の位相値を参照する位相接続方法（付録A6参照）では周囲の位相値と比較することによって位相接続を行っているため、不連続部では位相接続を行うことができず、各画素独立に位相値を求めることができるフーリエ変換位相シフト法（付録A5参照）の長所を十分に生かすことができない。そこで、各画素独立に位相値の連続化を行う方法を開発する。この方法では、ピッチの異なる複数の格子から得られる複数の位相値を用い、各点におけるそれぞれの位相値から位相接続後の位相値を算出する。まず、基本原理を2種のピッチの格子を用いる場合で説明する。次により多くのピッチを用いる場合の理論を述べる（Fujigaki and Morimoto 1998）。

2-4.2.1 2通りのピッチの格子を用いる場合

図2.14に2通りのピッチの格子を用いる場合の位相接続の原理を示す。図2.14(a)にピッチ p_1, p_2 の格子画像 G_1, G_2 をそれぞれ示す。ここで、 $p_1 < p_2$ とする。格子 G_1, G_2 の位相接続前の位相値をそれぞれ $\theta_1(x), \theta_2(x)$ 、位相接続後の位相値をそれぞれ $\phi_1(x), \phi_2(x)$ として図2.14(b)に示す。

位置 x における格子 G_1, G_2 の格子番号をそれぞれ $k_1(x), k_2(x)$ とすると、位相接続後の位相値 $\phi_1(x), \phi_2(x)$ は式(2.3)に示すように表すことができる。ここで、 $p_1 < p_2$ なので $\phi_1(x) > \phi_2(x)$ となる。図2.14(c)と(d)にそれぞれ位置 x と格子番号 k_1 と k_2 の関係を示す。

$$\begin{cases} \phi_1(x) = \theta_1(x) + 2\pi k_1(x) \\ \phi_2(x) = \theta_2(x) + 2\pi k_2(x) \end{cases} \quad (2.3)$$

$\phi_1(x)$ と $\phi_2(x)$ の差は式(2.4)のようになる。

$$\phi_1(x) - \phi_2(x) = \theta_1(x) - \theta_2(x) + 2\pi(k_1(x) - k_2(x)) \quad (2.4)$$

位相接続前の位相値は、図2.14(b)に示すように位置 x によって大小関係が変化する。 $k_1(x) - k_2(x)$ は式(2.5)のようになり、式(2.4)と式(2.5)より式(2.6)が得られる。

$$\begin{cases} k_1(x) - k_2(x) = 0 & (\theta_1(x) \geq \theta_2(x)) \\ k_1(x) - k_2(x) = 1 & (\theta_1(x) < \theta_2(x)) \end{cases} \quad (2.5)$$

$$\begin{cases} \phi_1(x) - \phi_2(x) = \theta_1(x) - \theta_2(x) & (\theta_1(x) \geq \theta_2(x)) \\ \phi_1(x) - \phi_2(x) = \theta_1(x) - \theta_2(x) + 2\pi & (\theta_1(x) < \theta_2(x)) \end{cases} \quad (2.6)$$

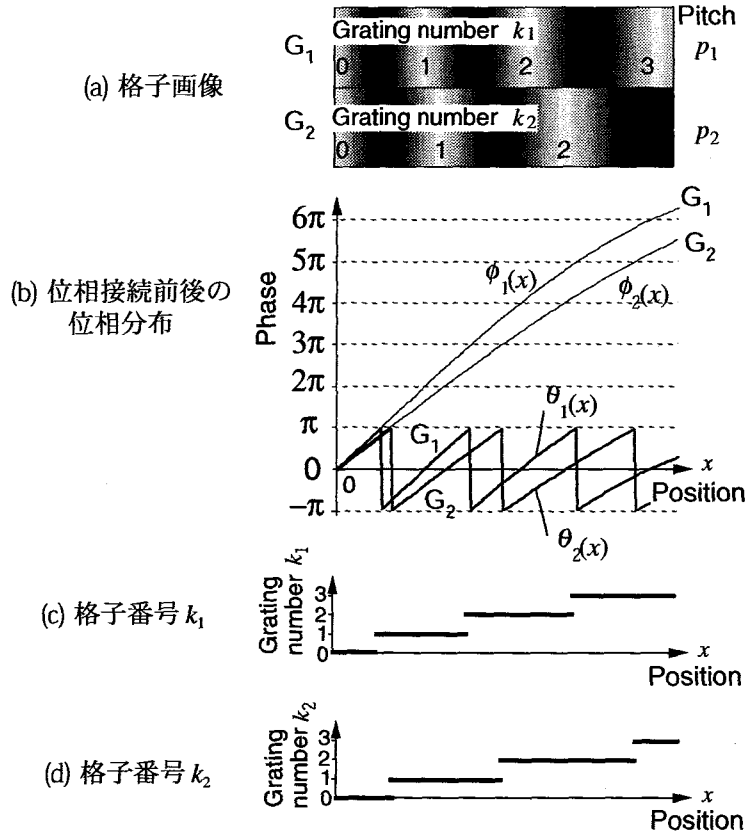


図 2.14 自動位相接続の原理図

また、2つの格子のピッチと位相接続後の位相値には式(2.27)に示す関係があるので、式(2.6)と式(2.7)より式(2.8)が得られる。

$$\phi_2(x) = \frac{p_1}{p_2} \cdot \phi_1(x) \tag{2.7}$$

$$\begin{cases} \phi_1(x) = \frac{p_2}{p_2 - p_1} (\theta_1(x) - \theta_2(x)) & (\theta_1(x) \geq \theta_2(x)) \\ \phi_1(x) = \frac{p_2}{p_2 - p_1} (\theta_1(x) - \theta_2(x) + 2\pi) & (\theta_1(x) < \theta_2(x)) \end{cases} \tag{2.8}$$

式(2.8)に示すように、ある点での位相接続後の位相値 $\phi_1(x)$ は、その点における位相接続前の位相値の値だけを使って求めることができる。そのため、段差や不連続部の有無にかかわらず位相接続を行うことができる。

ただし、位相接続を正しく行うことができるのは、 $\phi_1(x)$ が $0 \leq \phi_1(x) - \phi_2(x) < 2\pi$ を満たす場合であるので、式(2.7)より $\phi_1(x)$ が式(2.9)に示す範囲となる場合である。

$$0 \leq \phi_1(x) < \frac{p_2}{p_2 - p_1} \cdot 2\pi \tag{2.9}$$

2-4.2.2 複数のピッチの格子を用いる場合

前節で述べた2通りのピッチの格子を用いる場合、例えばピッチが15と16の時には、格子本数が16本までしか位相接続ができず、実際に形状計測に使用する際には格子本数が不足で実用的ではない。そこで本節では、前節の手法を拡張し、格子のピッチの種類が N 種類の場合での位相接続方法について述べる。

i 番目の格子のピッチを p_i ($p_i < p_{i+1}$)とする。位置 x における i 番目の格子の格子番号を $k_i(x)$ とし、位相接続前後の位相値をそれぞれ $\theta_i(x)$, $\phi_i(x)$ とする。 $\Theta(x)$ と $\Phi(x)$ をそれぞれ式(2.10)と式(2.11)に示すように定義する。ここで、 n_i は任意の整数とし、位相接続係数と呼ぶことにする。なお、後述の式(2.19)で示されるように位相接続係数と格子のピッチによって位相接続可能な範囲が決定される。

$$\Theta(x) = \sum_{i=1}^N n_i \theta_i(x) \quad (2.10)$$

$$\Phi(x) = \sum_{i=1}^N n_i \phi_i(x) \quad (2.11)$$

位相接続後の位相値 $\phi_i(x)$ は、位相接続前の位相値 $\theta_i(x)$ と格子番号 $k_i(x)$ を用いて式(2.12)のように表すことができる。

$$\phi_i(x) = \theta_i(x) + 2\pi k_i(x) \quad (2.12)$$

式(2.30)と式(2.11)、式(2.12)より、 $\Theta(x)$ と $\Phi(x)$ は式(2.13)に示す関係となる。

$$\begin{aligned} \Phi(x) &= \sum_{i=1}^N n_i (\theta_i(x) + 2\pi k_i(x)) \\ &= \sum_{i=1}^N n_i \theta_i(x) + \sum_{i=1}^N n_i \cdot 2\pi k_i(x) \\ &= \Theta(x) + 2\pi \sum_{i=1}^N n_i k_i(x) \end{aligned} \quad (2.13)$$

ここで $\Phi(x)$ が式(2.14)で示す条件を満たしているとする、式(2.13)における $\sum_{i=1}^N n_i k_i(x)$ は整数なので、 $\text{MOD}(\theta, 2\pi) = \theta - 2\pi \left\lfloor \frac{\theta}{2\pi} \right\rfloor$ ($\lfloor \cdot \rfloor$ はガウス記号) と定義すれば、 $\Phi(x)$ は式(2.15)のように表すことができる。

$$0 \leq \Phi(x) < 2\pi \quad (2.14)$$

$$\begin{aligned} \Phi(x) &= \text{MOD}(\Theta(x), 2\pi) \\ &= \text{MOD}\left(\sum_{i=1}^N n_i \theta_i(x), 2\pi\right) \end{aligned} \quad (2.15)$$

また、位相接続後の位相値 $\phi_i(x)$ と格子のピッチ p_i には、式(2.16)に示す関係があるので、式(2.11)と式(2.16)より式(2.17)が得られる。

$$\phi_i(x) = \frac{p_1}{p_i} \cdot \phi_1(x) \quad (2.16)$$

$$\begin{aligned}\Phi(x) &= \sum_{i=1}^N n_i \frac{p_1}{p_i} \phi_1(x) \\ &= p_1 \phi_1(x) \sum_{i=1}^N \frac{n_i}{p_i}\end{aligned}\quad (2.17)$$

したがって、式(2.15)と式(2.17)より、ピッチ p_1 の格子の位相接続後の位相値 $\phi_1(x)$ は式(2.18)のように、位相接続前の位相値 $\theta_i(x)$ から求めることができる。

$$\begin{aligned}\phi_1(x) &= \frac{\Phi(x)}{p_1 \sum_{i=1}^N \frac{n_i}{p_i}} \\ &= \frac{\text{MOD}\left(\sum_{i=1}^N n_i \theta_i(x), 2\pi\right)}{p_1 \sum_{i=1}^N \frac{n_i}{p_i}}\end{aligned}\quad (2.18)$$

次に、位相接続が可能な範囲について考える。位相接続を行うためには、式(2.14)で示す条件を満たしていることが必要なので、式(2.17)より式(2.19)に示す条件を満たす範囲で位相接続が可能となる。

$$0 \leq \phi_1(x) < \frac{2\pi}{p_1 \sum_{i=1}^N \frac{n_i}{p_i}}\quad (2.19)$$

ピッチ p_1 での位相接続可能な格子本数および画素数を K_1 および D_1 とそれぞれ表す。式(2.19)の範囲の上限値より、位相接続可能な格子本数 K_1 は、ガウス記号 $\lfloor \cdot \rfloor$ を用いて式(2.20)のように求めることができる。

$$K_1 = \left\lfloor \frac{1}{p_1 \sum_{i=1}^N \frac{n_i}{p_i}} \right\rfloor\quad (2.20)$$

位相接続可能な画素数 D_1 は式(2.21)として算出できる。

$$D_1 = K_1 p_1\quad (2.21)$$

以上に述べた多数のピッチの格子を用いる場合の位相接続手法において、実際に使えるようなピッチの組み合わせの例を付録A7に示す。なお、本研究では格子画素数を14, 15, 16画素の3通りのピッチの格子を用いる。この場合、位相接続可能な格子本数は120画素数は1680画素であり、実用上は十分な値となる。

2-4.3 解析ソフトウェアの開発

本形状計測方法では、基準板に描かれた2次元格子の位相解析、基準板へ投影された2次元格子の位相解析、物体へ投影された格子の位相解析、それらの位相データから形状の計算を行うというように煩雑な手順を経て結果を得る。投影格子の位相解析だけでも、位相シフトしながらの画像の撮影をピッチを変えながら行うため複雑であり、手作業で順次実行することは困難である。また、形状計測のための画像処理でよく使用される位相分布や形状計測結果が格納される実数型画像やフーリエスペクトルが格納される複素数画像を扱うことのできる市販のソフトウェアは無く、新規に開発する必要がある。そこで、本研究で

は、格子投影と画像撮影、基準板の位相解析、試料物体の形状計算を自動的に行うためのしま画像解析統合ソフトウェア「PhaseAnalyzer-f」を開発する。図 2.15 にその実行画面を示す。

2-4.3.1 動作環境

本ソフトウェアは次の環境で動作する。

- ・コンピュータ：Apple Power Macintosh 8500
- ・RAM 200M バイト以上

2-4.3.2 特徴

本ソフトウェアの特徴を次の (1) ~ (7) に示す。

(1) 形状計測処理の自動化

形状計測に必要な処理が自動化されている。従来煩雑な作業であったフーリエ変換格子法による位相解析やフーリエ変換位相シフト法による位相解析および位相接続を自動処理できる。位相分布が得られてから座標計算を行うまでの一連の作業も自動化されている。研究用として作成したソフトウェアであるため、一連の作業の途中経過の表示機能、データの保存機能、一時停止機能なども合わせ持っている。

(2) 実験の再現

計測実験で撮影された画像は解析に用いられると同時にファイルとして保存しておくことができる。そのファイルにセーブされた画像を実際にカメラから撮影される画像の代りとして入力することにより、実験および解析を再現することができる。

(3) 統合化

格子画像の投影、カメラからの画像の取り込み、位相解析、機器のコントロールを同一のソフトウェアに統合化することにより、上述の自動化や実験の再現が容易になる。

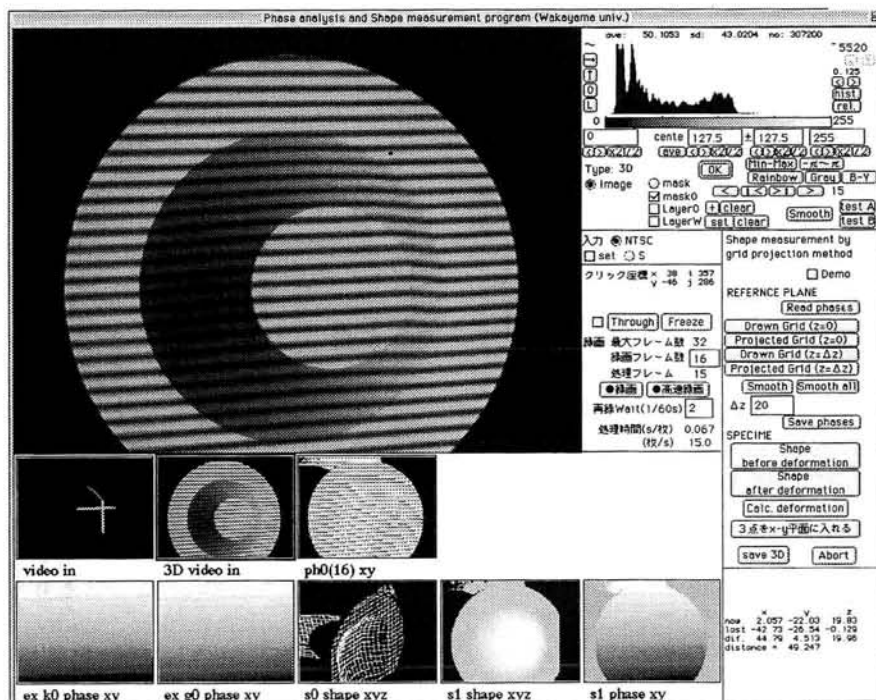


図 2.15 形状計測ソフトウェア実行画面

(4) 各種画像の表示

一般に画像データは256段階の輝度値を持つ画素の分布として扱われているが、このソフトウェアでは、計算過程で現れる実数データの分布や複素数の分布なども画像として表現することができる。ここではこれらを実数画像および複素数画像と呼ぶ。実数画像は実数値の任意の範囲を0～255の輝度値に割り当てることで濃淡画像として表現される。複素数画像は、実部、虚部、位相、パワーのそれぞれの値の任意の範囲を0～255の輝度値に割り当てることで濃淡画像として表現される。また、2次元ベクトルの分布や形状計測結果として得られる空間座標分布も画像として表示することができる。この機能によって、計算過程の途中経過を視覚的に確認しながら実験を進めることができる。

(5) ユーザーインターフェース

可能なかぎりキー入力部分を減らし、マウスのクリックで作業を行うことができるようにしている。図2.15の下端部に縮小表示されている画像は、計算過程で現れる実数画像や複素数画像、2次元位相分布、形状計測結果として得られる空間座標分布である。これらのひとつをマウスでクリックすると、その画像が選択されて実サイズで表示させることができる。表示する輝度は画面内のボタンを押すことによって任意に選択することができる。

(6) 座標変換機能

試料表面上の選択された3点の z 座標を0にするような回転を計測された全空間座標点について行う機能を持つ。試料の平面度を計測する場合、単に試料をカメラの前に設置して形状計測を行うだけでは、計測対象の平面状の部分を正確に z 座標が0の位置に設置することは実際にはまず不可能である。そこで、この機能を用いて、平面状の部分内の任意の3点を選択し、それらの3点の z 座標が0になるように座標回転を行えば、計測結果の z 座標の分布が平面度の分布として得られることになる。

(7) リアルタイム画像分析

図2.15の左上部に表示されている実サイズの画像に対してリアルタイムでヒストグラム、平均値、標準偏差を求めて表示する。画像内に矩形領域を設定しておけば、その設定領域内についてヒストグラム、平均値、標準偏差を求めることができる。

2-4.3.3 フーリエ変換位相シフト法による全自動位相解析

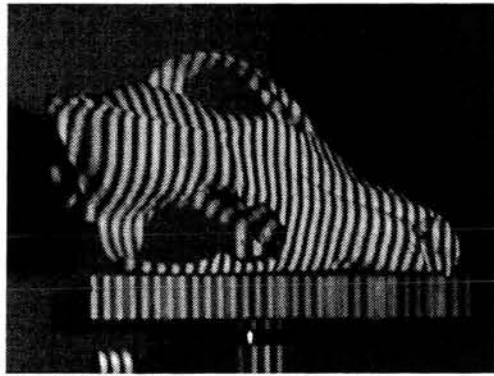
プロジェクタからの画像の投影とカメラからの画像の撮影を同期させて行うことができれば、位相シフト法を用いた位相解析の一連の手順を自動化することができる。また、第2章2-4.2節で述べた複数のピッチの異なる格子を用いる位相接続法を用いることで、位相接続も自動化することができる。本ソフトウェアでは、位相シフトした格子画像の作成、投影、撮影、位相解析、位相接続の一連の手順を全自動化する。

まず、フーリエ変換位相シフト法による位相解析を行うための手順を次に示す。

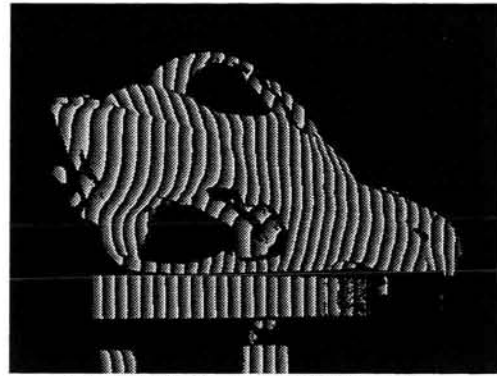
- (1) 投影格子画像を作成する。
- (2) プロジェクターから投影する。
- (3) カメラで撮影された画像を3次元画像メモリーに取り込む。
- (4) 上記(1)～(3)を位相シフトしながら1周期分(投影格子のピッチと同回数)繰返す。
- (5) 3次元画像メモリーに得られた位相シフト格子画像に対してフーリエ変換位相シフト法を用いて位相分布を得る。

次に、位相接続された位相分布画像を得る手順を示す。なお、ここでは投影する格子のピッチを3通り(14画素、15画素、16画素)とする場合について示す。

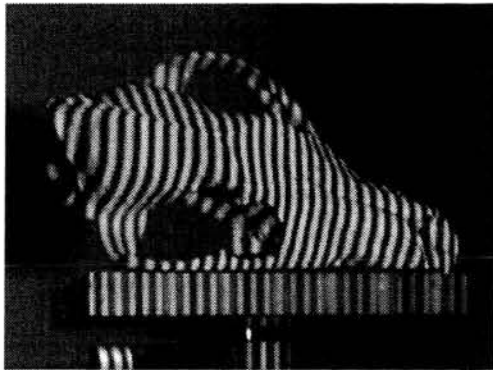
- (A) 14画素ピッチの格子について、上記手順で位相分布を得る。



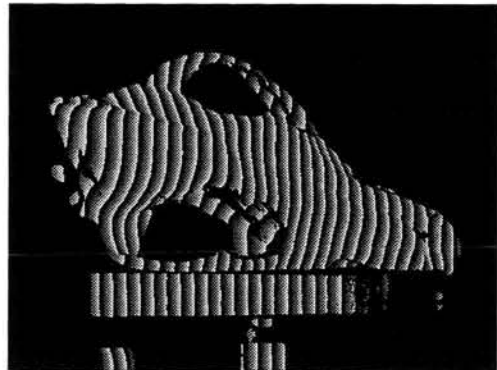
(a) 投影格子画像 (14画素ピッチ, $\alpha=0$)



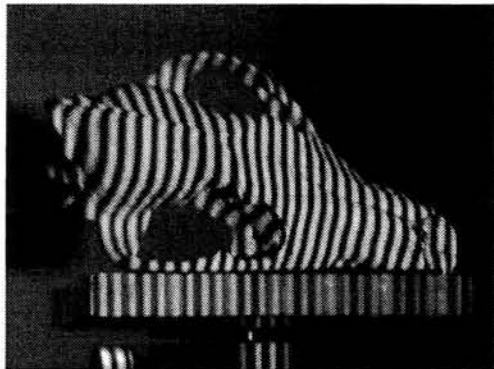
(d) 位相分布 (14画素ピッチ)



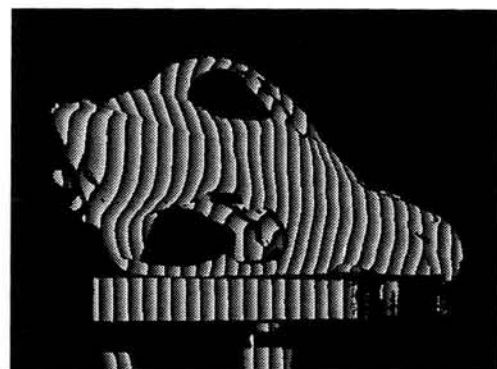
(b) 投影格子画像 (15画素ピッチ, $\alpha=0$)



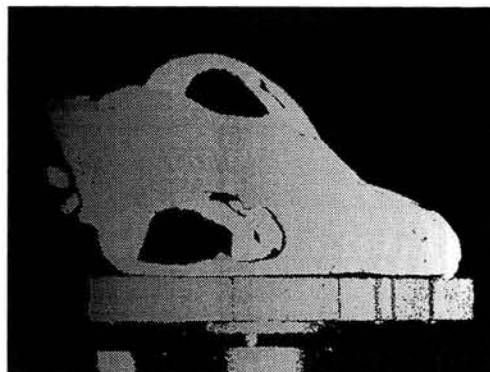
(e) 位相分布 (15画素ピッチ)



(c) 投影格子画像 (16画素ピッチ, $\alpha=0$)



(f) 位相分布 (16画素ピッチ)



(g) 位相接続後の位相分布

図 2.16 フーリエ変換位相シフト法による全自動位相解析例
(ニホンオオカミ頭がい骨模型)

- (B) 15画素ピッチの格子について、上記手順で位相分布を得る。
- (C) 16画素ピッチの格子について、上記手順で位相分布を得る。
- (D) 上記(A)～(D)で得られたそれぞれの位相分布から複数のピッチの異なる格子を用いる位相接続方法により位相接続を行う。

図2.16にフーリエ変換位相シフト法による全自動相解析の解析例を示す。ニホンオオカミの頭がい骨模様の格子を投影し、その位相解析を行う。投影する格子のピッチは、14画素、15画素、16画素の3通りとした。それぞれのピッチの画素数分位相シフトを行いながら投影し、撮影された画像から3次元画像を作成し、フーリエ変換位相シフト法により位相分布を求めた。図2.16(a)～(c)にそれぞれのピッチの投影格子画像（位相シフト量 $\alpha=0$ ）を示す。図2.16(d)～(e)にそれぞれの位相分布を示す。図2.16(g)に、図2.16(d)～(e)に示す位相分布から得られた位相接続後の位相分布を示す。不連続部分でも位相接続されていることがわかる。この一連の手順は、本ソフトウェアによって全自動で行われる。実際には、 x 方向と y 方向のそれぞれについて同様に位相解析を行う。

2-4.4 液晶ディスプレイを用いた基準板

本形状計測手法において基準板に求められる機能は次の(1)～(3)である。

- (1) 平面であること。
- (2) 基準面の表面上に固定された2次元格子の縦方向と横方向の位相分布をそれぞれ求めることができること。
- (3) 基準面の表面に投影された2次元格子の2次元位相分布を求めることができること。

第2章2-4節で行った形状計測実験の場合、上記(2)について、フーリエ変換格子法（付録A4参照）を用いて2次元格子の縦成分と横成分を分離してそれぞれの位相分布を求め、周囲の画素の位相値を参照する位相接続方法（付録A6参照）によって位相接続を行った。また、上記(3)については、基準面表面に描かれた2次元格子の上にプロジェクターから格子画像を投影し、フーリエ変換位相シフト法（付録A5参照）を用いて縦成分と横成分それぞれの位相分布を求め、周囲の画素の位相値を参照する位相接続方法によって位相接続を行った。

その時の問題点は、次のとおりである。

- (A) 基準面に描かれている2次元格子の基準となる点を手作業で示す必要があり、自動化が困難である。また、基準面にあらかじめ印を付けておく方法もあるが、位相分布を求めるときに印が誤差の原因になる。
- (B) フーリエ変換格子法で2次元格子の位相分布を求める場合、画像の端部近傍では位相値の誤差が大きくなる。
- (C) 本来基準面は平面であることが前提であるにもかかわらず、基準面上に格子模様を描いているため、その印刷インクなどの凹凸が誤差の原因となる。
- (D) 基準面表面に描かれた2次元格子の上にプロジェクターから格子画像を投影していたために、基準面に投影した格子を撮影した画像において、場所ごとにコントラストが異なり、投影格子の位相を算出する時の算出精度が場所ごとにばらつく結果となる。

そこで、基準板に求められている機能を持ち、しかも上記の問題点を解消するために液晶ディスプレイを基準板に用いることを新たに提案する。液晶ディスプレイは一般に表面が平面度の高いガラス板で作られており、上記(1)の機能を満たしている。また、下記で述べる方法により、(2)と(3)の機能を満足することができ、基準面の位相分布および基準面に投影された格子の位相分布を全自動で精度よく求めることが可能になる。

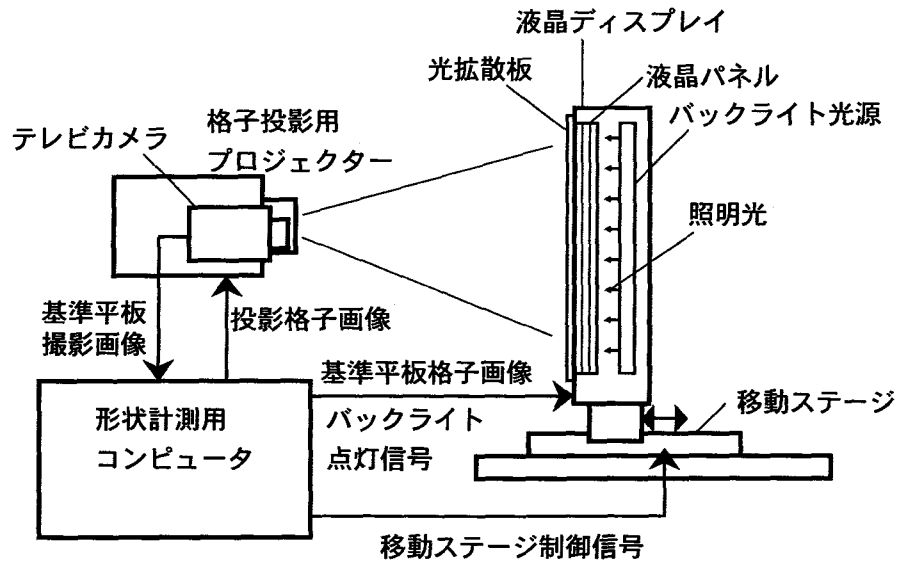
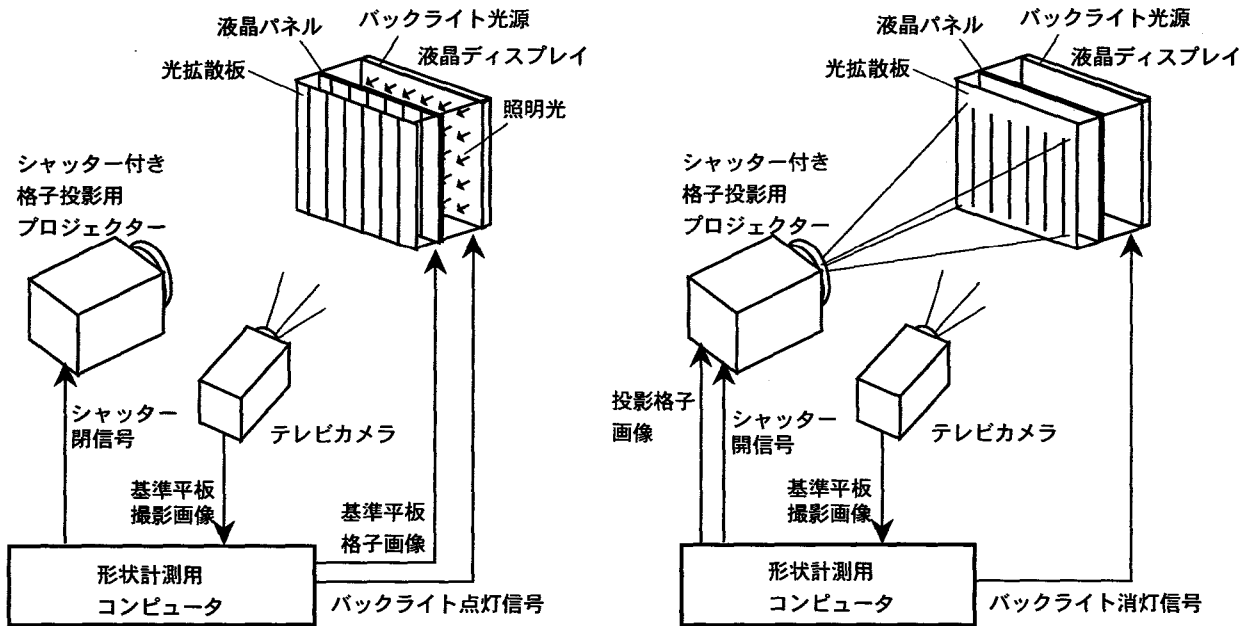


図 2.17 液晶ディスプレイを基準板に用いた形状計測システム



(a) 基準板に格子画像を表示する場合

(b) 基準板に格子画像を投影する場合

図 2.18 液晶ディスプレイの動作

2-4.4.1 基本構造

図2.17に液晶ディスプレイを用いた基準物体の基本構造を示す。液晶ディスプレイは一軸の移動ステージの上に取り付けられている。このステージは形状計測用のコンピュータと接続され、移動ステージ制御信号によって液晶ディスプレイの表示面の法線方向に移動させることができる。液晶ディスプレイに表示される画像は、形状計測用コンピュータで作成される。液晶ディスプレイのバックライトは形状計測用コンピュータからの信号により点灯・消灯させることができる。液晶パネルには表面に光拡散板が貼り付けられている。

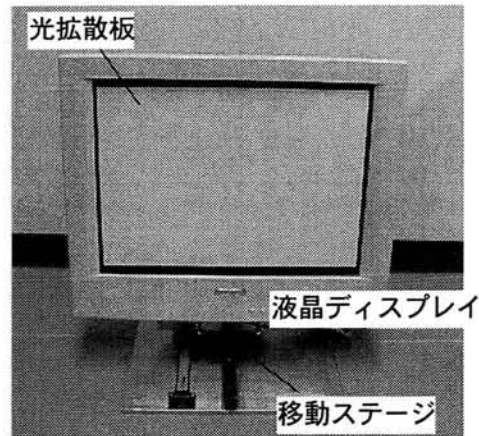


図 2.19 液晶ディスプレイを用いた基準板

図 2.18 に、液晶ディスプレイの動作を示す。図 2.18(a)は、基準板に格子画像を表示する場合の動作の様子を示している。液晶パネルに表示される格子画像は、バックライトからの光の影絵として光拡散板に裏（液晶パネル側）から映写される。光拡散板の裏に映写された格子画像は、光拡散板の表から散乱光として放射される。これをカメラ側から見ると、光拡散板の表面に格子画像が写されているように見える。なおこの時、光拡散板と液晶パネルの間に空間があるため、ある程度ピントのずれた像となる。しかし、表示されている格子が正弦波状の格子の場合は、ピントがずれたとしても平滑化された正弦波となるだけなので、影響はほとんどないと考えられる。

図 2.18(b)は、基準板に格子画像を投影する場合の動作の様子を示している。このとき液晶ディスプレイのバックライトは消灯されている。光拡散板には、プロジェクターから格子画像が投影され、それをカメラで撮影する。

以上のように、基準板に表示された格子画像を撮影する場合には、光拡散板はディスプレイの表面として機能する。また、プロジェクターの投影格子画像を撮影する場合には、格子投影用プロジェクターからの格子画像は光拡散板表面に投影され、この時、光拡散板はプロジェクターのスクリーンとして機能する。上記の機能を実現するために、光拡散板には、透過光も反射光もすべて散乱するような材質が求められる。

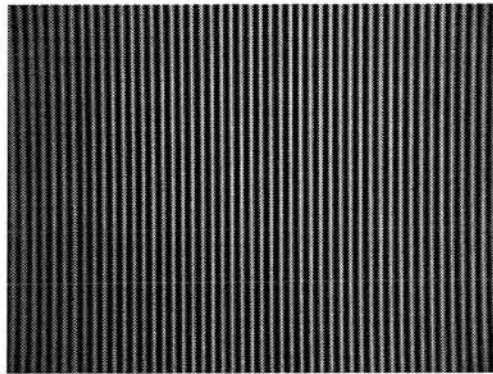
図 2.19 に、実際に作成した基準物体を示す。市販の液晶ディスプレイを移動ステージ上に取り付け、表面には、バブルジェットプリンタ用のバックプリントフィルムを貼り付けている。この構成で、上記 2-5.3 節で述べた (1) ~ (3) の機能を実現する基準物体となっている。

2-4.4.2 基準面の全自動位相解析

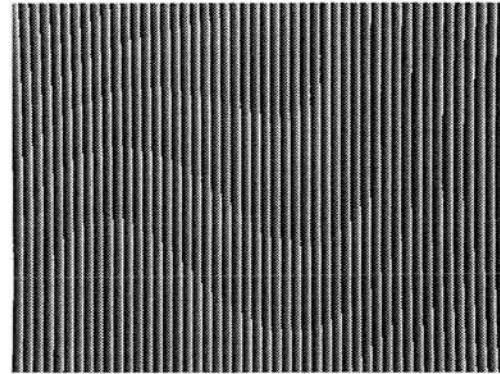
基準面を液晶ディスプレイにすることによって、従来では不可能であった複数の任意の画像を表示し、その位相をシフトすることができる。そのため、フーリエ変換位相シフト法による全自動位相解析を基準板に表示された格子の位相解析に適用できる。さらに、2-5.1 節で述べた位相接続方法を用いることができるため、全自動で位相接続された位相分布を得ることができる。

基準面を液晶ディスプレイにする利点をまとめると次のようになる。

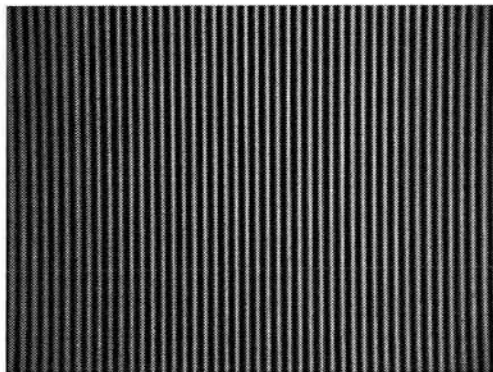
- (1) 基準となる点を手作業で示す必要がなくなり、解析の自動化を行うことができる。
- (2) フーリエ変換位相シフト法により格子の位相を求めるために、画像の端部でも精度よく位相が得られる。
- (3) 基準板表面に格子を描かないため、インクによる凹凸の影響がない。



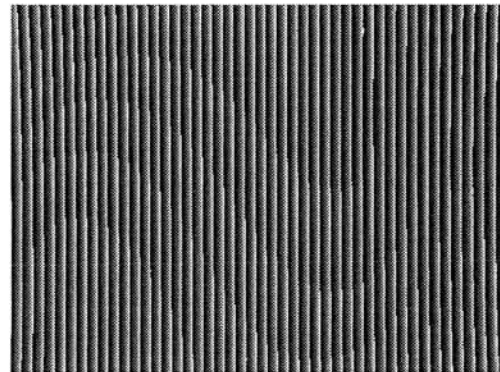
(a) 投影格子画像 (14 画素ピッチ, $\alpha=0$)



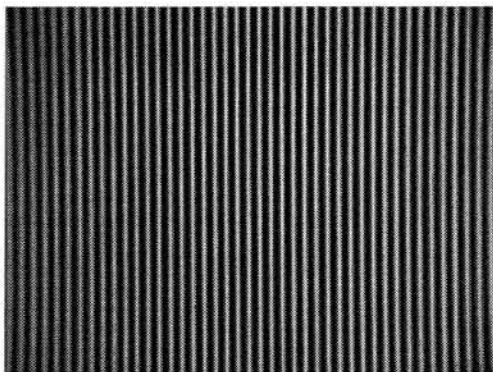
(d) 位相分布 (14 画素ピッチ)



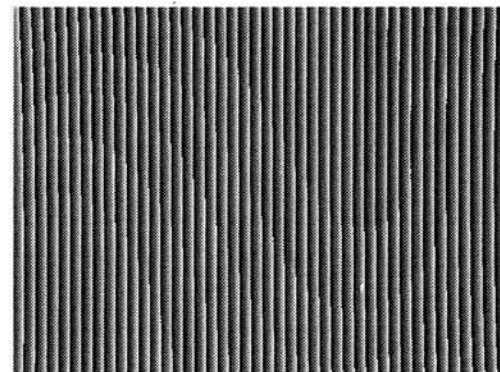
(b) 投影格子画像 (15 画素ピッチ, $\alpha=0$)



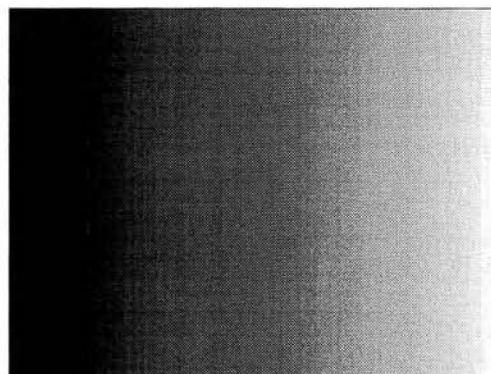
(e) 位相分布 (15 画素ピッチ)



(c) 投影格子画像 (16 画素ピッチ, $\alpha=0$)



(f) 位相分布 (16 画素ピッチ)



(g) 位相接続後の位相分布

図 2.20 フーリエ変換位相シフト法による基準面の全自動位相解析例

(4) プロジェクターから基準板に格子を投影する場合に、基準板表面が一様なため、場所ごとにコントラストが変化することはなく、均一の精度で投影格子の位相分布を得ることができる。

以上のように、基準面を液晶ディスプレイにすることによって、全自動で高精度の位相分布を得ることが可能になる。

図 2.20 に液晶ディスプレイを用いた基準面の位相解析例を示す。図 2.20(a)~(c)に液晶ディスプレイ上に表示された 14, 15, 16 画素ピッチの x 方向の格子をそれぞれ示す。これらをそれぞれ 1 周期分位相シフトさせて得られた 3 次元画像からフーリエ変換位相シフト法によって求めた位相分布を図 2.20(d)~(f)に示す。図 2.20(g)に位相接続後の位相分布を示す。

2-4.5 基準面の複数枚化

第 2 章 2-2 節で述べた本計測法の原理では、基準平板を 2 ヶ所に移動して、それぞれの基準平板上での描かれた 2 次元格子と投影された 2 次元格子の位相値を用いてその 2 枚の基準板の間に置かれた物体表面上の点の空間座標を求める。実際にこの方法で形状計測を行うと、レンズ収差によるゆがみの影響は現れないが、基準面の近傍と比較すると 2 枚の基準面間の中央付近では誤差が大きくなる。

基準板を平板の試料として 2 枚の基準面間の各位置における平面の形状計測結果の z 座標の誤差を図 2.21 に示す。この場合、基準板の間隔を 100mm とし、10mm 間隔で平行移動させて計測を行う。図 2.21 を見ると基準面の近傍と比較すると 2 枚の基準面間の中央付近では誤差が大きいのがわかる。この原因は、カメラによる撮影のピントおよびプロジェクターによる投影格子のピントが基準板近傍と基準板間の中央付近で異なるからと予想している。

この誤差を減少させるために、基準板を複数枚化する方法を提案する。基準板を複数枚にして、計測対象点の位置に応じて 2 枚の基準板を選択し、選択された 2 枚の基準面を用いてその点の空間座標を算出する。このようにすることによって、全ての点の座標はその近傍の基準面を用いて求められるため、基準面間の中央付近で現れる誤差を大きく減少させることができる。

必要な基準面の枚数は、基準面の近傍と見なせる距離によって決めることができるが、それを求めるための定量的な検討はまだ行っていない。許容できる誤差以下で座標値が得られる基準面からの距離をあらかじめ求めておいて、まずそれぞれの基準面の間隔がその距離の 2 倍以下になるような枚数とし、次に基準面間の誤差が許容誤差を越えるかどうかを改めて確認して基準面間の誤差が許容誤差を越える場合は、基準面を追加して全区間内で計測誤差を許容誤差以下に押える構成とすることは可能である。許容できる誤差以下で座標値が得られる基準面からの距離は、使用するカメラやプロジェクタおよびそれらの配置によって異なるために、2 枚の基準面を用いる形状計測手法を用いて基準面を微小間隔ごとに移動させながら形状計測を行うことによって求めることができる。

図 2.22 に基準面を N 枚とした場合の空間座標を求める手法を示す。物体上の点 S を撮影しているカメラの画素に対する視線と点 S に投影しているプロジェクタ画素に対する投影線をそれぞれ l_C と l_P とする。なお、視線と投影線の意味は第 2 章 2-2.2 節で述べた定義とする。基準面は $R_0 \sim R_{N-1}$ の N 枚用い、それぞれの z 座標を $z_1 (=0) \sim z_{N-1}$ とする。まず図 2.26(a)に示すように、 R_0 と R_{N-1} の基準面を用いて本計測法の原理どおり直線 C_0C_{N-1} と直線 P_0P_{N-1} の交点として点 S' の空間座標を計算する。点 S' の z 座標を $z_{S'}$ とする。次に最近傍の 2 枚の基準面を用いた空間座標の算出方法を図 2.28(b)に示す。得られた z 座標の値から、その値に最も近い 2 枚の基準面 R_i と R_{i+1} を選び出す。基準面 R_i と R_{i+1} における視線 l_C が通る点 C_i と点 C_{i+1} および投影線 l_P が通る点 P_i と点 P_{i+1} を求め、直線 C_iC_{i+1} と直線 P_iP_{i+1} の交点として点 S の空間座標を計算する。

この手法を用いて図 2.21 と同様の計測実験を行った場合の誤差を図 2.23 に示す。誤差が大きく減少し

ていることがわかる。この場合の誤差の平均は $8.1\mu\text{m}$ である。

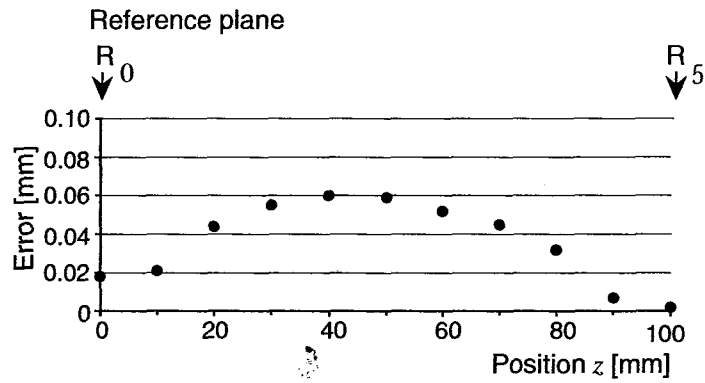
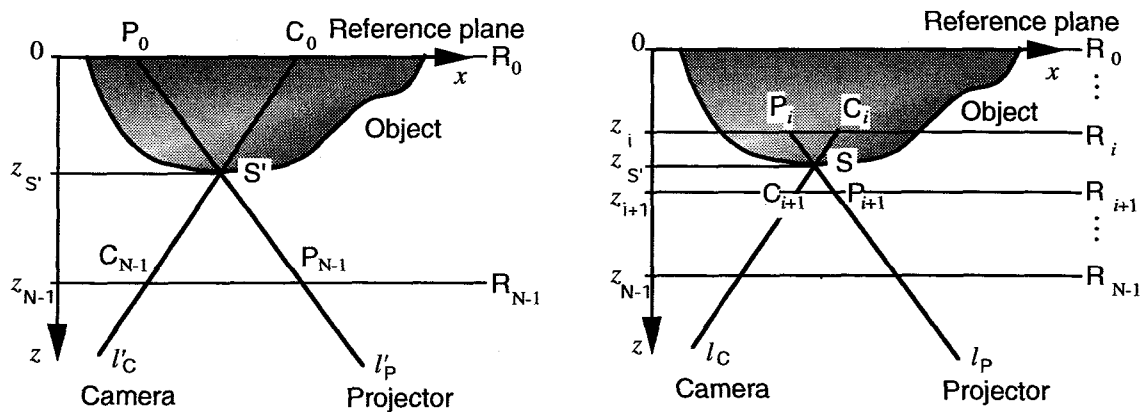


図 2.21 2枚の基準面を用いた場合の各位置における平面の形状計測誤差



(a) 両端の基準面を用いた z 座標の算出

(b) 最近傍の2枚の基準面を用いた空間座標の算出

図 2.22 複数枚の基準面を用いた空間座標の決定手法

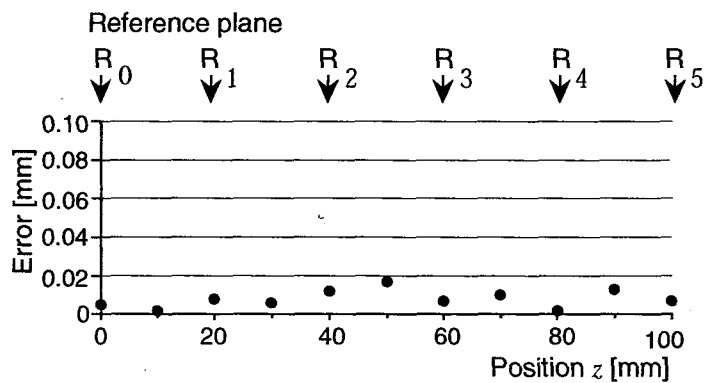


図 2.23 複数枚の基準面を用いた場合の各位置における平面の形状計測誤差

2-5 適用例

2-5.1 板金加工品の平面度計測

これまでに述べた高精度形状計測を板金加工品の平面度計測に適用した例を示す。図2.24に試料として用いた板金加工品の写真を示す。プレス加工や曲げ加工によって成形されている。

図2.25(a)~(c)にそれぞれ14, 15, 16画素の3通りのピッチを持つx方向の投影格子画像(位相シフト量 $\alpha=0$)を示し、図2.25(d)~(f)にフーリエ変換位相シフト法によって得られたそれぞれのピッチの格子の位相分布を示す。図2.25(g)に図2.25(d)~(f)から第2章2-4.2.2節で述べた位相接続手法によって得られた位相接続後の位相分布を示す。図2.26には、y方向について図2.31と同様の投影格子画像と位相分布、位相接続後の位相分布を示す。図2.27に形状計測結果を示す。

図2.27(a)と(b)に計測された結果得られた形状とz座標の分布をそれぞれ示す。試料は計測装置に対して特別な位置合わせをして設置したわけではないので、z座標の分布から分かるように表面がx-y面に対して2mm程度の傾きを持つ。そこで、第2章2-5.2.2節で述べた座標変換機能を用いて図2.27(b)における点Aおよび点B, 点Cがz=0平面内に入るように空間座標の変換を行う。座標変換後のz座標の分布を図2.28に示す。図2.28において点Aおよび点B, 点Cのz座標はすべて0となる。このようにすることによって、物体表面の平面度がz座標の分布として得られることになる。この試料の場合、プレス加工によって作られた円錐台部分周辺に±0.2mm程度の変形が生じていることがわかる。

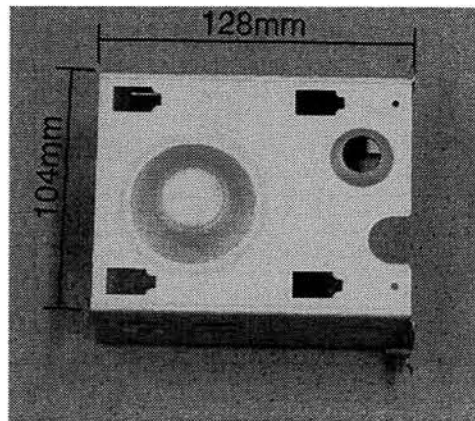
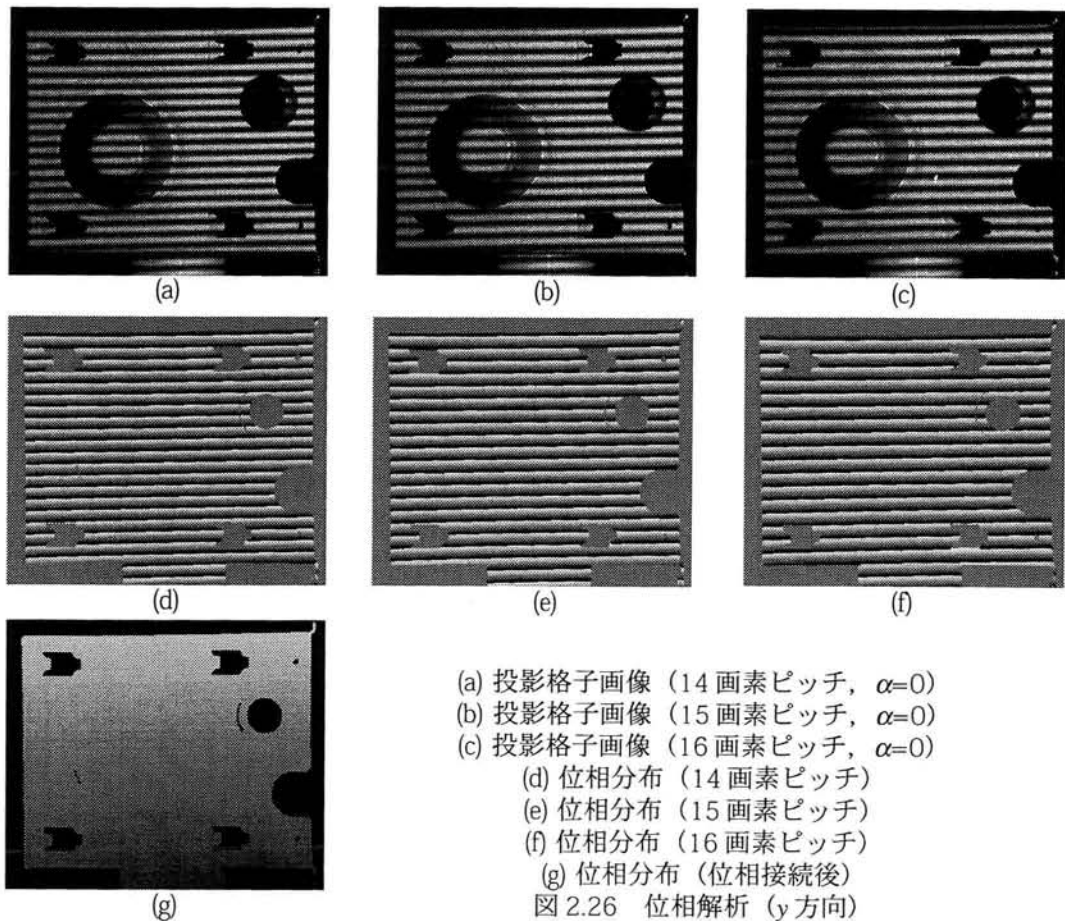
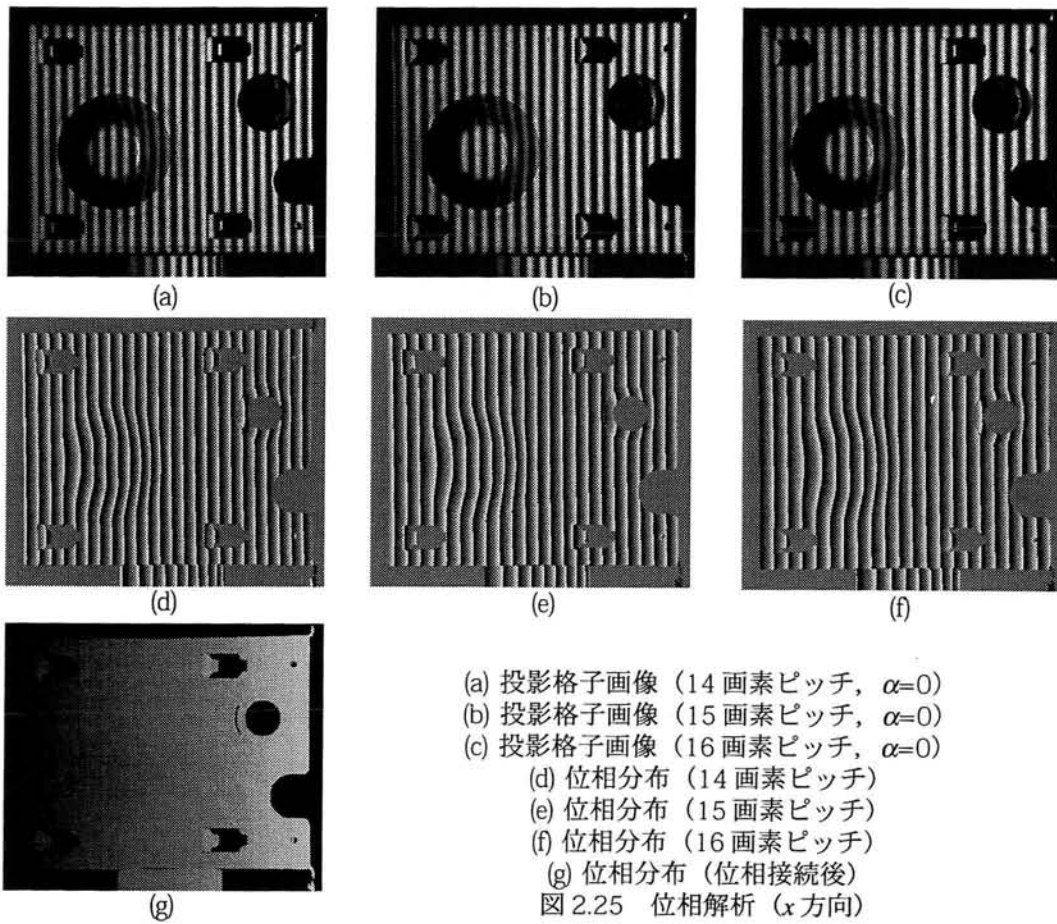
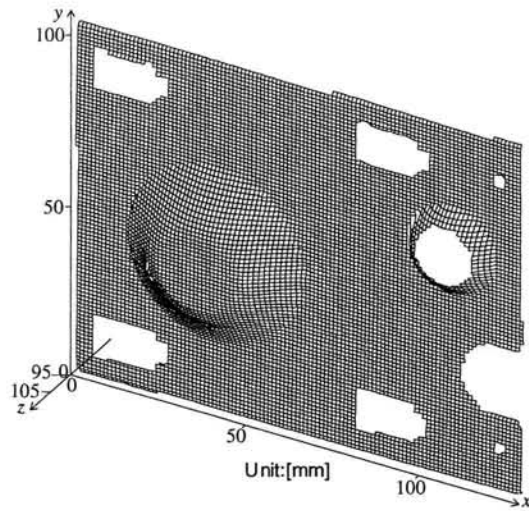
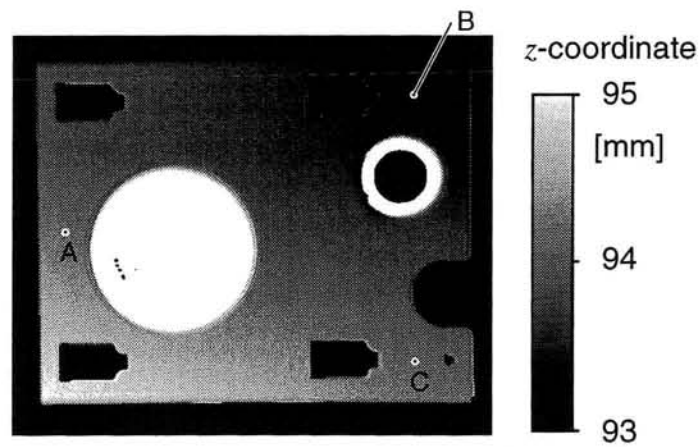


図2.24 板金加工品





(a) 計測結果形状



(b) z座標分布

図 2.27 形状計測結果 (z座標分布)

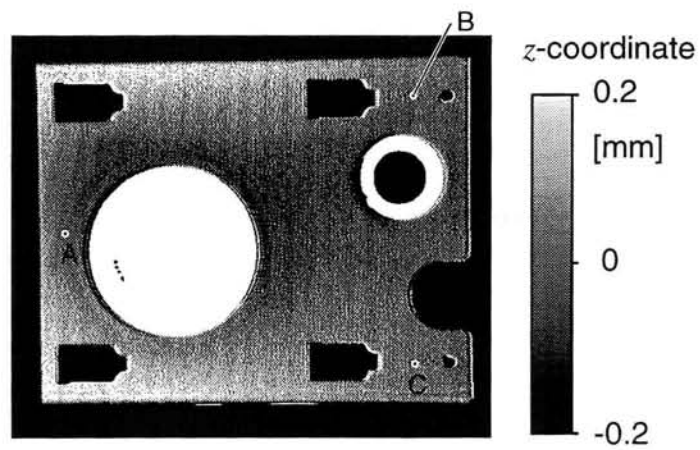


図 2.28 座標変換後のz座標分布

2-5.2 金属曲面部品の形状計測

複雑な形状を持つ物体への適用例として、流体用ポンプのスクリーンの形状計測例を示す。図2.29に試料の写真を示す。試料の外形は直径150mmで高さ80mmであり、約1周分の長さを持つ3枚の羽根が3重らせん状に配置されている。材質はステンレス製である。表面の乱反射成分を増やすために表面には薄く白色のラッカーが塗布されている。

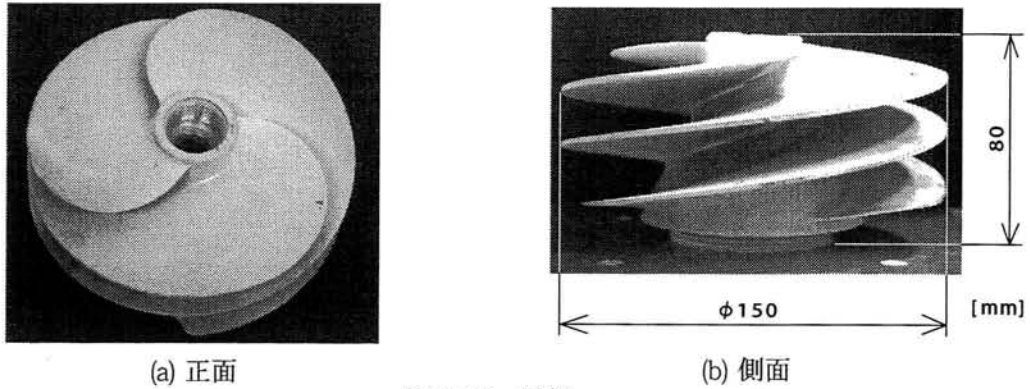


図 2.29 試料

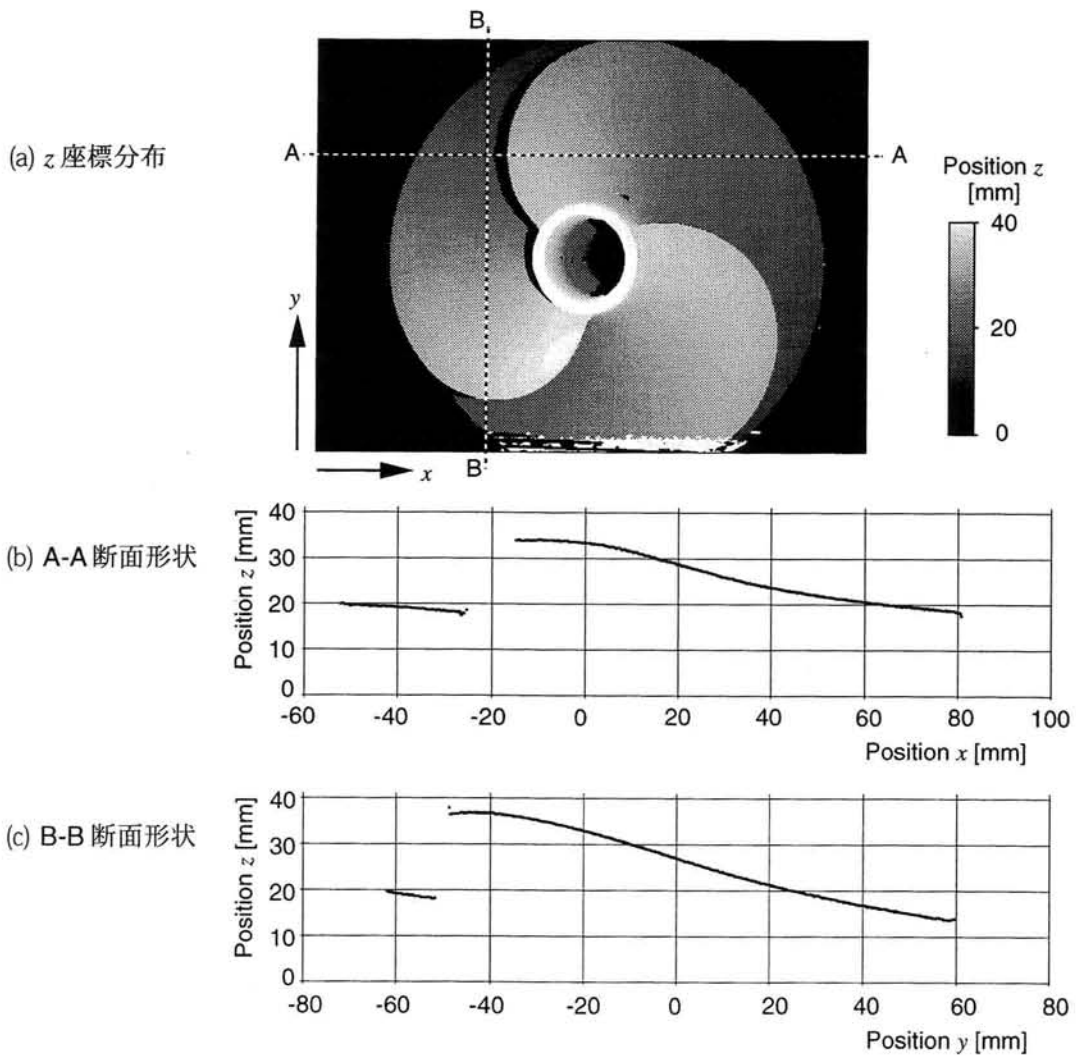
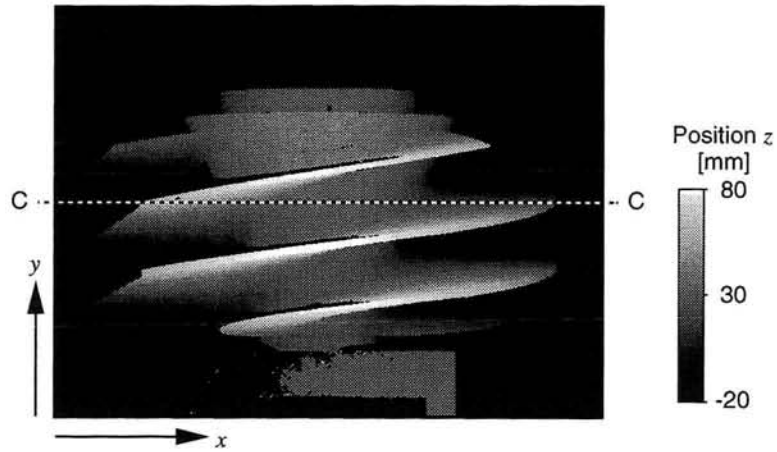


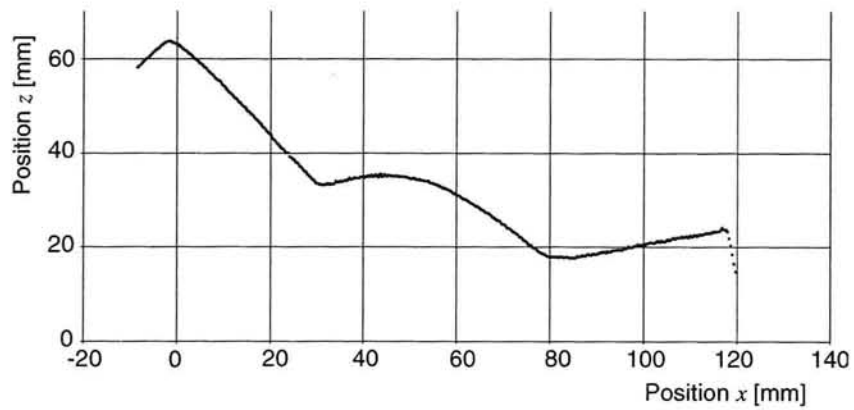
図 2.30 試料正面の形状計測結果

図2.30に試料正面の形状計測結果を示す。図2.30(a)は形状計測結果のカメラの画素に対する z 座標分布を濃淡で表現したものである。図2.30(b)と(c)にそれぞれ図2.30(a)におけるA-A断面およびB-B断面の形状を示す。

図2.31に試料側面の形状計測結果を示す。図2.31(a)は形状計測結果のカメラの画素に対する z 座標分布を濃淡で表現したものである。図2.31(b)に図2.31(a)におけるC-C断面の形状を示す。



(a) z 座標分布



(b) C-C断面形状

図 2.31 試料側面の形状計測結果

2-5.3 ニホンオオカミ頭がい骨模型の形状計測

複雑な形状を持つ物体への2つ目の適用例としてニホンオオカミ頭がい骨模型の形状計測結果を図2.32に示す。図2.32(a)は試料の写真である。試料への投影格子画像と得られた位相分布画像は、すでに第2章2-5.2.3節の図2.16に示されている。図2.32(b)は得られた形状計測結果をワイヤーフレーム表示したものである。

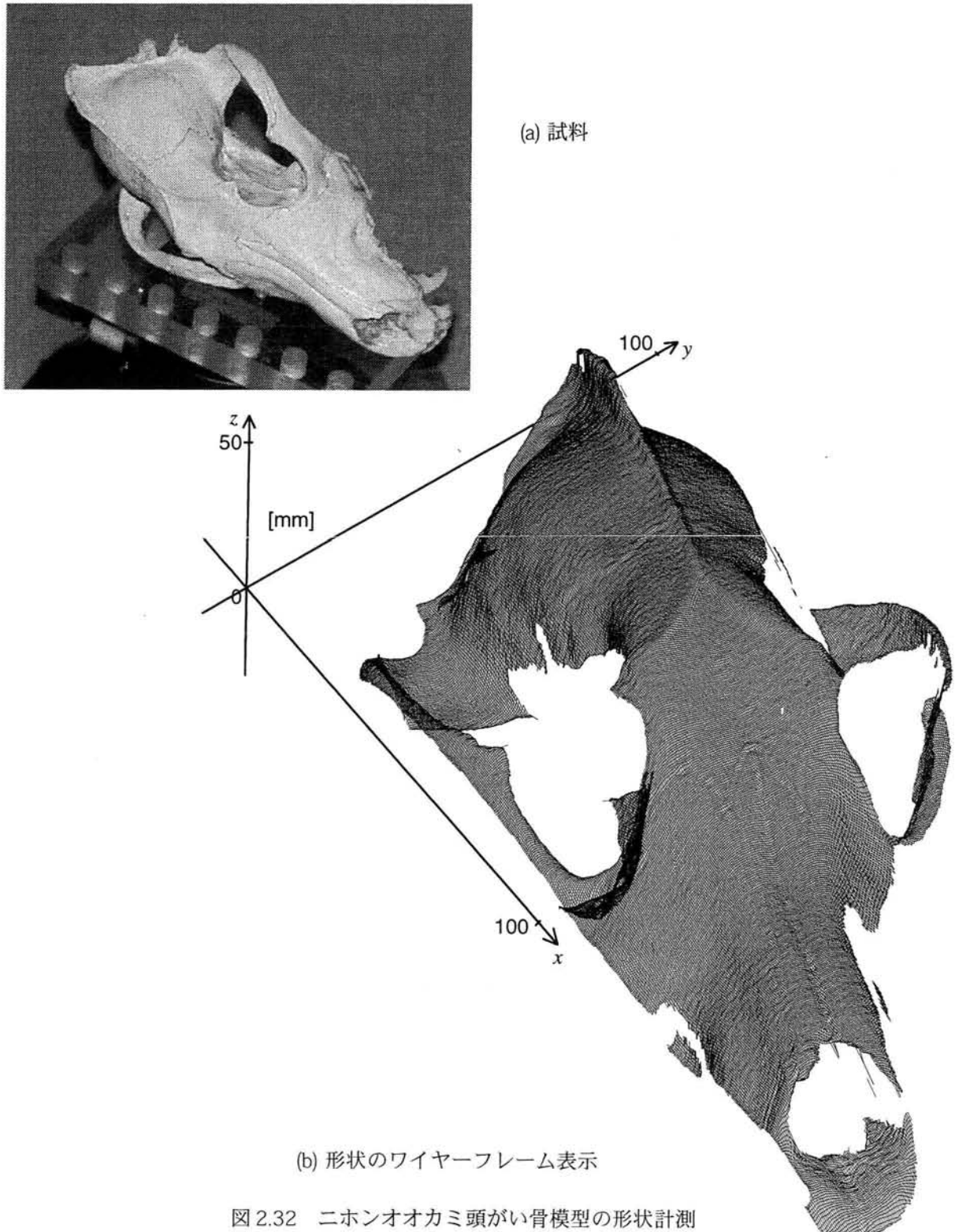


図2.32 ニホンオオカミ頭がい骨模型の形状計測

2-5.4 円筒状物体への適用

2-5.4.1 円筒状物体の計測原理

前節までに述べたレンズ収差の影響のない形状計測方法を回転物体に適用する方法を示す。図2.33に回転物体の形状計測原理図を示す。試料は回転テーブルの上に置かれる。撮影には2次元のカメラの代わりにラインセンサを用いる。

図2.33において物体上の点Sに注目すると、点Sを撮影している画素に到達する光線は、基準面R₀とR₁上ではそれぞれ点C₀と点C₁を通る。また、点Sに投影されている格子の2次元位相から、点Sに投影されている光線が基準面R₀とR₁上では、それぞれ点P₀と点P₁を通ることがわかる。これらの点の空間座標は、前節までに述べた方法と同様に求めることができ、点Sの空間座標は、直線C₀C₁と直線P₀P₁の交点として求めることができる。

回転テーブル上の回転軸l_Rはy軸と平行とする。任意の回転角γだけ回転させた試料については、ラインセンサで撮影される部分の空間座標を求めることができる。回転角γの場合に図2.33の点Sの空間座標を求めるとする。このとき回転角がγ=0の時の点Sの位置を点S₀とすると、点S₀の空間座標(x₀, y₀, z₀)は点Sの空間座標(x, y, z)と回転軸l_R、回転角γから式(2.22)により簡単に計算することができる。ここで、回転軸l_Rは点(x_R, 0, z_R)を通るy軸と平行な直線とする。

$$\begin{pmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \gamma & 0 & -\sin \gamma \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \gamma & 0 & \cos \gamma \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x - x_R \\ y \\ z_{sad} - z_R \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} x_R \\ 0 \\ z_R \end{pmatrix} \quad (2.22)$$

2-5.4.2 計測実験システム

図2.34に本手法を確認するために用いた形状計測システムの構成を示す。カメラには2次元のCCDカメラを用い、画像中央付近の縦の1ラインの画素値を抽出することでラインセンサの代用とする。プロジェクタには図2.35に示す位相シフト機構およびあおり機構付きのスライドプロジェクタを用いる。投影

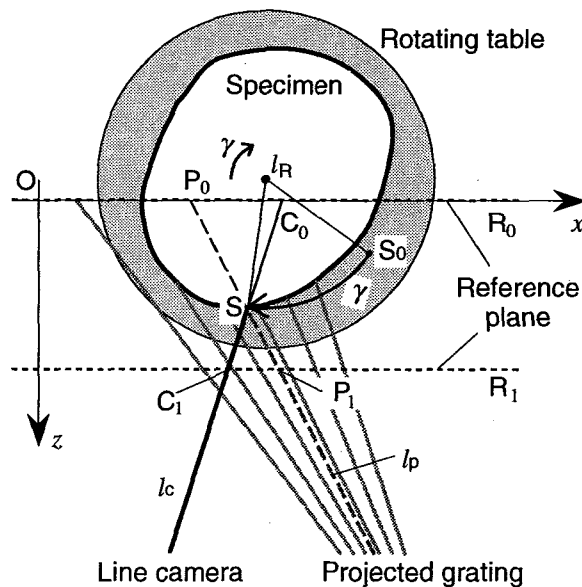


図 2.33 回転物体の形状計測原理

格子の位相シフトを行うために、フィルム面がx方向とy方向に微小に移動できるようにステッピングモーターが取り付けられている。さらに投影レンズとフィルム面がプロジェクタの光軸に対して任意の角度を持つことができる機構になっており、z軸に対して角度を持たせて投影しながらフィルム面の法線とレンズ光軸をz軸の方向にすることができる。この機構により、投影格子のピントの合う面を基準面と平行に調節することができる。フィルムにはx方向が赤色でy方向が青色の2次元格子が焼き付けられており、赤色と青色のカラーフィルタをプロジェクタ前に設置することで格子の投影方向を選択する。

試料を載せた回転テーブルと位相シフトを行うステッピングモーターは、コンピュータによってカメラの撮影と同期してコントロールされる。カメラで撮影された2次元画像は画像処理装置によってデジタル化され、1ラインの画像部分が抽出されてメモリー内に記録される。試料を回転させる角度を変えるたびに抽出された1ライン分の画像を並べて1枚の2次元画像を作成する。この操作をx方向とy方向それぞれ位相シフトの1周期分回数だけ行う。このようにして位相シフト1周期分のx方向とy方向の試料の全周における位相シフト3次元画像が得られることになる。その後、位相計算および空間座標の計算を画像処理装置で行う。

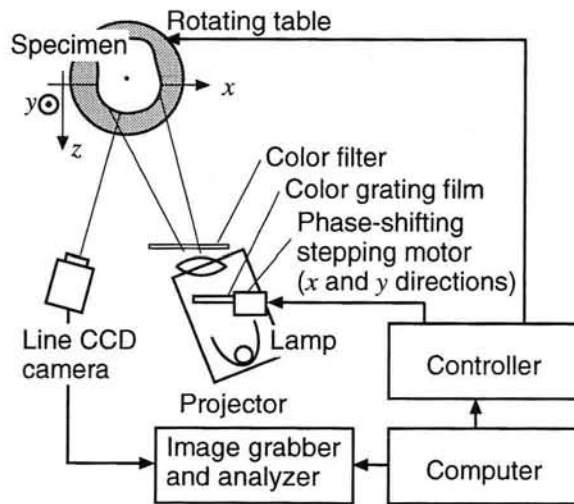


図 2.34 回転物体の形状計測システム構成

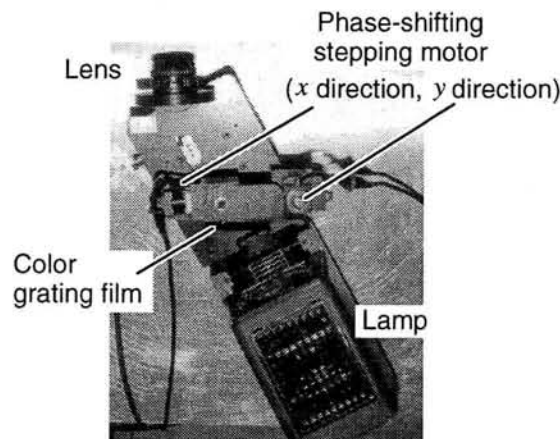


図 2.35 位相シフト機構およびあおり機構付きスライドプロジェクタ

2-5.4.3 計測実験結果

試料として図2.36に示す形状の回転体を用いる。この試料は円柱と円錐台を組み合わせた形状をしており、試料の中心軸が回転テーブルの回転軸からずれた位置になるように回転テーブル上に置かれている。試料はアルミ部材を旋盤加工により0.01mm以下の精度で製作したものであり、表面には白色ラッカーが塗布されている。

試料には x 方向の格子、 y 方向の格子をそれぞれ順に投影する。前節で述べた方法により、図2.37に示すような位相シフト3次元画像が得られる。図2.37で横方向は回転角度を表す。本実験では1周を512分割して回転させたので、横方向の1画素は $2\pi/512$ ラジアンを意味する。縦方向は、カメラの1ライン分の画像であり、本実験の場合は480画素である。奥行方向は位相シフト量を意味し、本実験では1周期を24分割している。

図2.38に、図2.37の画像からフーリエ変換位相シフト法によって求めた x 方向と y 方向の位相分布をそれぞれ示す。図2.37を見ると、 x 方向の格子と y 方向の格子が完全には分離されていない。しかし、位相シフト方向はそれぞれの格子の方向であるので、フーリエ変換位相シフト法によって得られる位相値は、図2.38に示すように格子の方向ごとに分離された値となる。

図2.39に計測結果を示す。図2.39(a)は、回転角 γ における z 座標分布である。図2.39(b)は形状をワイヤフレームで表現したものである。図2.39(c)は、試料上半部の円柱部分の中央付近における断面の試料の半径方向の計測誤差分布を示す。このとき、試料の回転中心軸は、計測した空間座標を元に最小二乗法によって求め、その回転軸からの距離をプロットした。断面形状において本実験では理論値(30.0mm)からの誤差の最大値は0.13mm、誤差の絶対値の平均は0.05mmであった。

本実験により、レンズ収差の影響のない形状計測方法が回転物体の形状計測に適用可能であることが確かめられた。

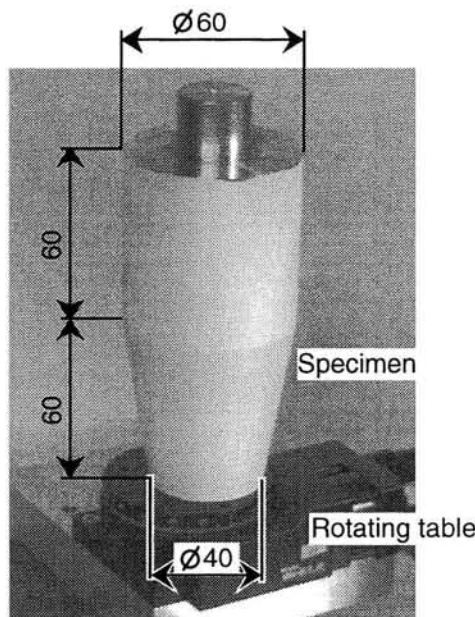


図 2.36 試料

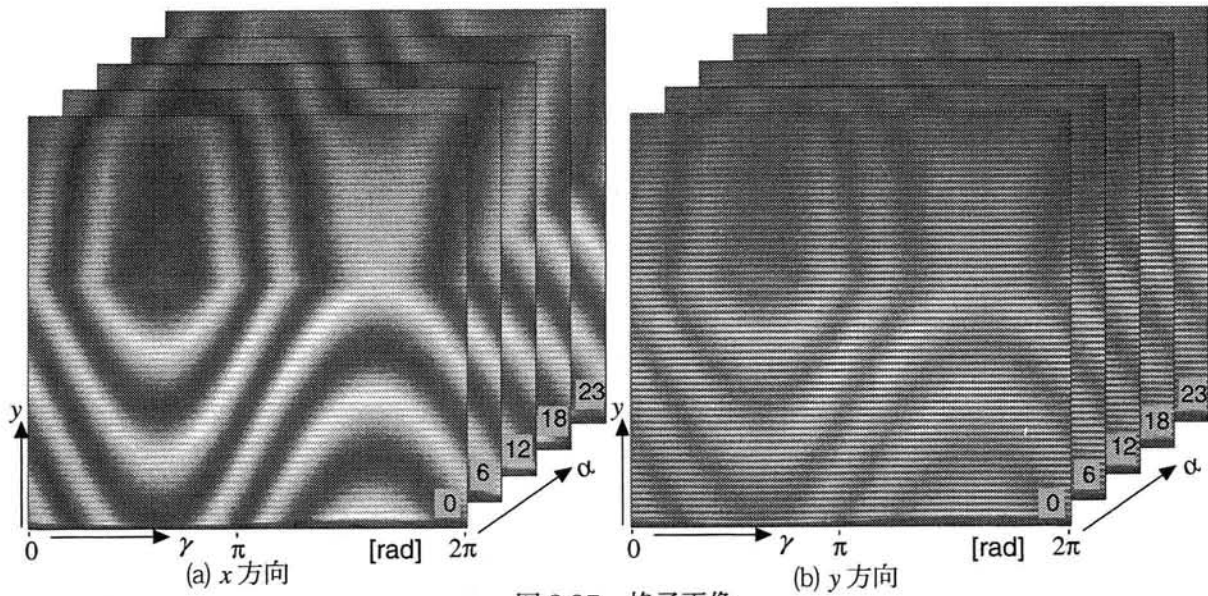


図 2.37 格子画像

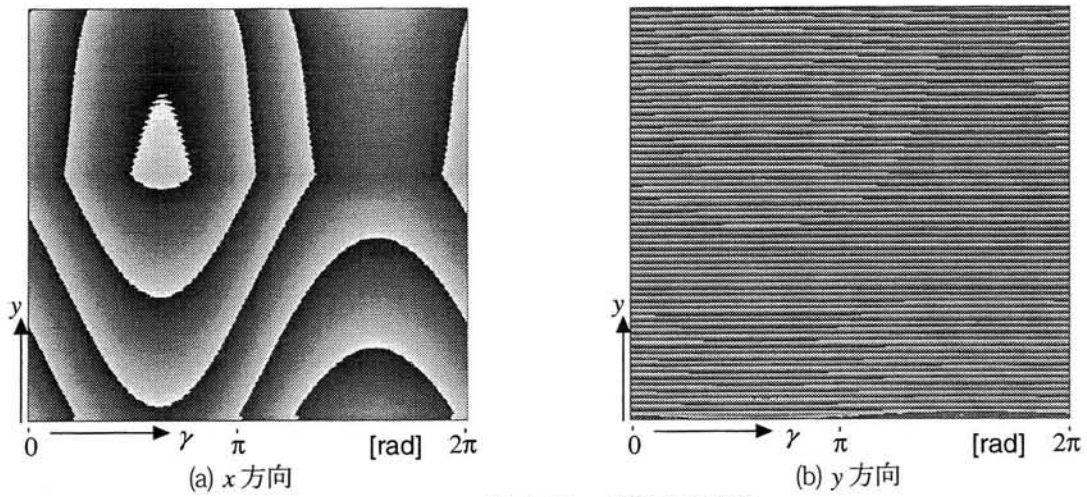


図 2.38 位相分布画像

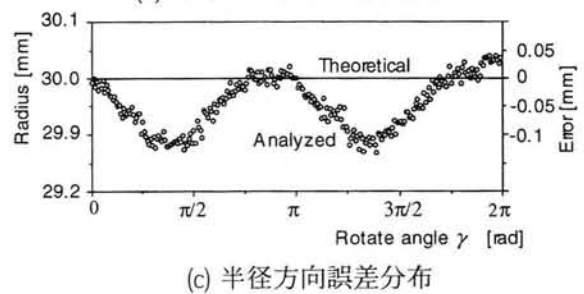
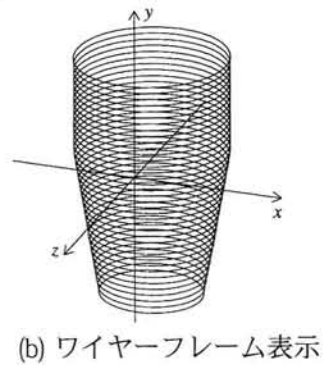
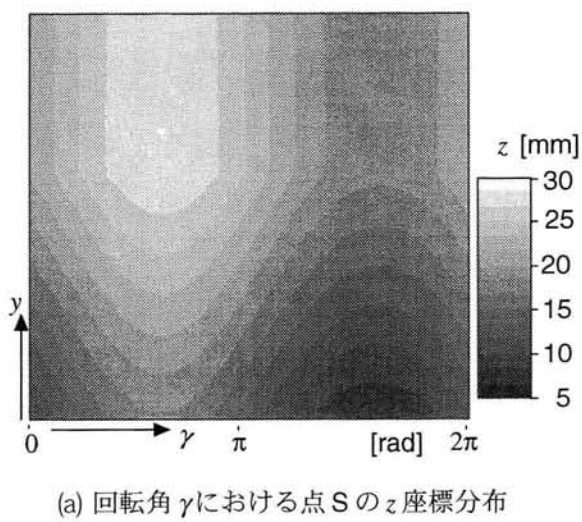


図 2.39 計測結果

2-6 おわりに

従来の形状計測手法を高精度化するために、新たに開発したレンズ収差によるゆがみの影響のない形状計測手法を提案した。その原理確認および従来の計測方法との比較を行った結果、本計測手法の場合、平板の形状計測で91mm×89mmの範囲において、従来方法では32 μ mの精度であるのに対して12 μ mの精度が得られた。また、円錐台状の物体を計測したところ、12 μ mの精度が得られた。これらの結果より、本計測方法は従来と比較して高精度な形状計測であることがわかった。

さらに高精度化を行うために、誤差要因と対策について述べた。誤差の対策方法の一つとして、液晶ディスプレイを用いた基準板の開発と基準面を複数枚にする方法を提案した。その方法を実現するために、複数ピッチの格子を用いる位相接続手法および専用の解析ソフトウェア開発による自動化を行った。これらの高精度化と自動化を行い、平面を計測する実験を行った結果、誤差の平均が8.1 μ mとなった。これにより基準面の複数枚化の有効性が実証され、マイクロメートルオーダーの精度の形状計測を行うことが可能であることが確認できた。以下その詳細を述べる。

なお、現段階での本計測装置はほぼ次のようなスペックを持つ。計測物体サイズ:(x)100mm×(y)100mm×(z)100mm, 計測精度(z方向):10 μ m, 分解能:(x,y)0.2mm, 有効計測点数:(x)550×(y)450画素。

2-6.1 レンズ収差によるゆがみの影響のない形状計測手法

まず、2枚の基準面を用いることによりレンズ収差によるゆがみの影響のない形状計測の原理を述べた。2枚の基準面を用いることでカメラの全ての画素に到達する光線の通る道筋およびプロジェクタの全ての画素から出た光線が通る道筋をそれぞれ求めることができる。試料の形状計測を行う際には、カメラとプロジェクタのレンズ中心座標を用いずに、あらかじめ基準面を用いて求めておいた光線の通る道筋を用いるために、レンズ収差によるゆがみの影響を受けることなく試料表面上各点の空間座標を求めることができる。この手法の有効性を確認するために、平板および円錐台状の物体の形状計測実験を行った。その結果、従来手法と比較してゆがみがなく高精度に形状計測が行えることを確認した。

2-6.2 高精度化と自動化

本計測方法を実用化するためには、本計測方法を高精度化・自動化・高速化する必要がある。そこでまず、誤差要因を検討した。いくつかある誤差の要因のうち次の①～④の対策として、基準板として液晶ディスプレイを用いる手法を提案した。

- ①基準面に描かれている2次元格子のインクの凹凸の影響
- ②基準面に描かれている格子模様が投影格子の位相解析精度に与える影響
- ③基準面に描かれている2次元格子をフーリエ変換格子法で解析するときの端部の誤差の影響
- ④基準面間でのピントの違いの影響

この提案手法を実現するためには、液晶ディスプレイに表示する格子の位相シフトに同期して画像入力を行うソフトウェアが必要になる。また、基準面を複数枚化するためには基準面の位相解析を自動化することが必要となる。そのためには位相接続を自動化する必要もある。そこで位相接続を自動化する手法と解析ソフトウェアの開発、液晶ディスプレイを用いた基準板、基準面の複数枚化と複数の基準面を用いる場合の座標算出アルゴリズムを提案した。この提案手法により誤差が大きく減少することが実験により確認できた。

2-6.3 種々の3次元物体への適用

本計測手法の適用例として、板金加工製品の平面度計測やニホンオオカミの頭蓋骨模型の形状計測、液

体ポンプのスクリーンの形状計測例を示した。板金加工製品の平面度計測では、プレス加工によって平面部分が受けた0.1mm程度の変形の分布を計測することができた。ニホンオオカミの頭蓋骨模型の形状計測と液体ポンプのスクリーンの形状計測を行うことによって、複雑な形状を持つ物体でも形状計測を行うことが可能であることを示すことができた。また、回転物体に適用する手法について試みた結果についても示した。以上のように種々の3次元物体に適用することにより、本計測法の有効性を確認することができた。

2-6.4 今後の課題と発展

これまでには触れていないが計測対象物によっては計測が困難なものがある。大きく形状的なものと表面の特性的なものに分けることができる。形状的な限界として次のものがある。この計測原理では、格子が投影されていてかつカメラに撮影できる部分のみが計測できる。そのため、深い凹部や切り立った壁の部分は計測できない。また、カメラの画素は実際には点ではなく一定の広がりを持つため、法線がカメラ方向から大きくずれている面の場合は1画素が撮影する試料表面の面積が z 方向に広がることになるために精度が下がることになる。表面の特性的なものとしては、表面の反射率や物体内部への透過光が内部で反射して再び表面に現れるような場合がある。また、金属光沢を持つ物体の場合は表面での散乱反射成分が小さくなりすぎることや、正反射成分が強くなりすぎることによって計測が困難になる場合がある。現状では金属光沢物体には表面にラッカーなどの塗装をしてから計測を行うことで対処しているが、塗装の分だけ計測精度が下がることになる。これらの計測限界の問題が今後の研究課題として残されている。

今後は、この形状計測の完全自動化を行う予定である。基準面の位相解析を全自動化することによって、基準面の枚数を手作業では行えない程に多く増やすことが可能になり、極めて高精度な形状計測が行えることを期待している。金型の検査を行うためには $1\mu\text{m}$ の精度が必要と言われている。次の目標は現状より1桁精度を高め、 $1\mu\text{m}$ の精度を実現することである。ただし、計測精度がミクロンメートルオーダーになると計測装置自体の振動や熱変形の問題が大きく影響することがわかっている。そのため、市販のプロジェクタ等を組み合わせるのではなく、振動や熱の対策が施された計測装置を開発する必要がある。基準板についても同様である。また、金型に適用する場合、金型に塗装をすることはできないため、先にも述べたように金属光沢を持つ物体に対する対策が必要となる。

現在これらの対策を行いさらに高精度化を行う研究に取り組んでいる。格子投影方法についても改良する余地が残されている。現状のように液晶プロジェクタを用いる場合は、画素間の境界部分の影響が多少なりとも現れる。そこで、レーザー干渉じまや格子フィルムを用い、しかも格子方向とピッチを変えることができる投影装置を今後新たに開発する。

また、精度を向上させることとは別に、計測対象物の適用範囲を拡大することを考えている。物体の全周を数方向から計測して、繋ぎあわせることで全周の形状計測を行う手法への適用の研究を進めている。本計測手法は、計測範囲周辺部でも従来の手法と比較して高精度に空間座標が得られる特徴を持っているので、従来の手法ほど繋ぎあわせる時に境界部分に段差が現れることはないと考えられる。他には、10メートル前後の大きさの大物体の形状計測への適用や、米粒程度の大きさの微小物体の形状計測への適用の研究を進めている。

第3章 形状変形計測の高速化

3-1 はじめに

人体の形状計測や物体の熱変形などのように時間とともに形状が変化するような物の形状や変形を計測する場合には、実時間で形状データを得る必要がある。また、接触することで状態が変化するような場合には非接触での計測が必要となる。トンネルや橋梁、大型タンク、パイプなど構造物の変形を連続して監視する場合にも実時間での計測が求められている。連続的に生産される鋼板、紙、織物、ビニールシート、縫製品などの検査工程でも、実時間の形状計測が求められている。その他、形状を検査しながら加工するインラインプロセスやバーチャルリアリティの入力装置など、さまざまな用途で実時間形状計測が必要とされている。また、実時間形状計測システムの用途の一つとして、設計した形状と製品の形状を比較してその差を変形量として表示することで製品の形状検査を行うことのできる装置が求められている。

非接触で3次元形状計測を行う方法として、物体に投影された格子のゆがみを解析する方法がよく用いられている。高精度に物体表面の空間座標分布を求める場合には、第2章で述べた方法が有効であるが、結果が得られるまでに1~2分程度の時間を要するため、実時間形状計測には適さない。一方、短時間で結果が得られる方法としてモアレトポグラフィ (Meadows et al. 1970) (Takasaki 1970) が開発されている。モアレトポグラフィは、簡単な画像処理で物体の等高線画像を得ることができる手法であり、実時間形状計測に適している。

モアレトポグラフィの一つに走査モアレ法 (谷田貝, 出澤 1978) (Morimoto et al. 1991) があり、これはテレビの走査線や画像処理を用いて格子画像を等ピッチごとに間引くことで等高線や変位分布を意味するモアレじまを得る方法である。この方法は単純な画像処理で実現できるため、非常に高速に結果を得ることができる反面、分解能の低い等高線画像となり、一般に物体の凹凸を判定することが困難である。そのためこれまでに、その分解能を上げるためや凹凸を判別するために位相シフトを利用した方法がいくつか報告されている (新井, 倉田 1989) (小寺ら 1999)。たとえば、滑らかな等高線画像を得るために投影格子スリットと同期して移動するスリットを通してカメラで撮影する方法 (Choi and Kim 1998) や、動的な計測を行うために複数のカメラで同時に撮影された複数の格子画像からモアレじまの位相値を算出する方法 (Arai et al. 1995)、1台のカメラで撮影した格子画像から低周波フィルターを用いることで位相の異なる複数のモアレじまを作成しそこから位相分布を求める手法 (Kato et al. 1997) などが開発されている。しかし、短時間で解析できないことや、複数台のカメラが必要なこと、空間の分解能が低いこと、変形量が得られないことなど、それぞれ短所がある。

そこで本研究では、形状変形計測を高速化するために、実時間で形状・変形を非接触で計測する手法を考案し、それを実現する計測システムを開発する。まず第3-2節で、同一の変位量を意味する滑らかな等変位線を実時間で表示することのできる位相シフト走査モアレ法の原理を示す。その原理に沿った等高線・等変位線表示システムを製作し、原理の確認を行う。さらに、モアレトポグラフィを用いた光学系を実際に構築するときに必要な光学系の位置調整をフーリエ変換格子法を用いて精度よく行う方法についても述べる。第3-3節では、確認した原理を用いて実時間で等高線・等変位線表示を行うことのできる画像処理ハードウェアの開発について述べる。第3-4節では、等高線・等変位線の位相分布を表示することによって高精度化する手法について述べる。まず相関位相シフト法について述べ、次にそれを発展させた積分型位相シフト法について述べる。第3-5節では、積分型位相シフト法による実時間形状計測装置を開発

し、実際の物体や人体の形状計測に適用する実験を行い、その有効性を示す。第3-6節では、計測結果を実物上に投影することによって、計測点と計測結果の対応が即座に認識できる計測結果投影装置の開発について述べる。第3-7節では、第2章2-4.2.1節で述べた2通りのピッチの格子を用いて位相接続を行う手法を応用して実時間で各画素ごとに位相接続を行うことができる手法を開発しその有効性を確認する。また、3フレームの画像から位相値を求める積分型位相シフト法の新しい手法として、白黒比が1:2の矩形波状の輝度分布を持つ格子を用いる手法を開発する。第3-8節では、積分型位相シフト法による形状計測の高速カメラへの適用例として、人体の運動時の形状変化の計測結果を示す。第3-9節では、積分型位相シフト法をマイクロメートルオーダーの微小変形計測に適用し、第3-5節で開発した実時間位相解析ボードをレーザー干渉計による形状計測装置に用いることにより、マイクロメートルオーダーの微小変形計測を実時間で行うことができることを示す。最後に、第3-10節では、トワイマン・グリーン干渉法に積分型位相シフト法を適用し、実時間でナノメートルオーダーの微小変形計測を行う原理と実験結果について述べる。

3-2 等高線・等変位線表示システム

(藤垣ら 2000)

従来のモアレトポグラフィ(付録A10参照)では物体の等高線を表示することしかできなかった。しかし、位相シフト走査モアレ法の原理(付録A10-3参照)を発展させることにより、物体の変形を表す等変位線を得ることができる。

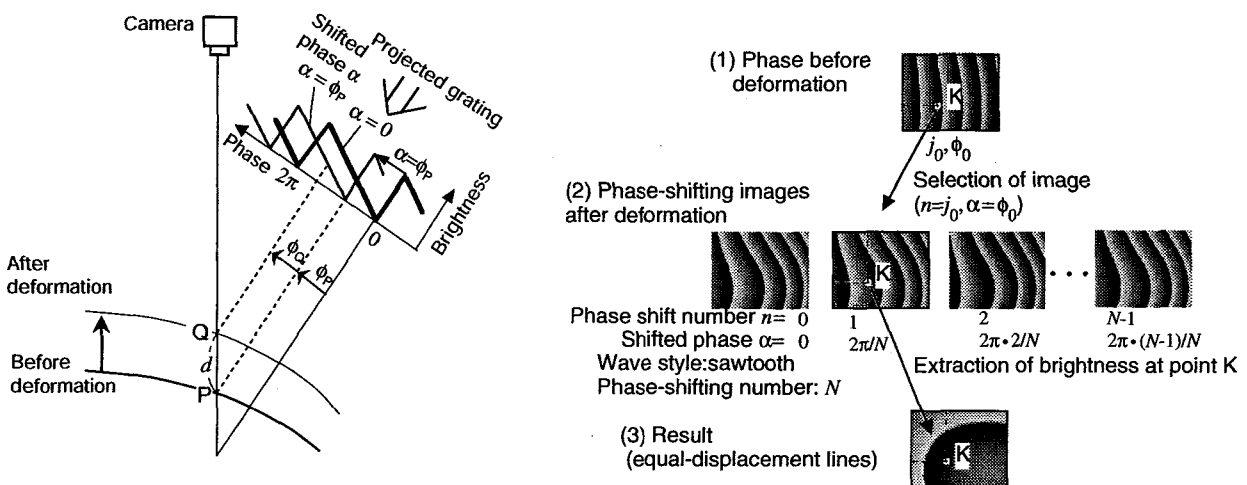
本節では、まず位相シフト走査モアレ法による等変位線表示原理を述べ、その原理を確認するために、等高線・等変位線表示システムを作成する。次に、実測で行うことが困難なプロジェクトのレンズとカメラのレンズの位置調整およびカメラレンズのズーム倍率を精度よく行う手法について述べる。最後に、実際の物体の形状計測および変形計測を行った結果を示し、本原理の有効性を確認する。

3-2.1 位相シフト走査モアレ法による等変位線表示原理

図3.1(a)に測定対象物の変位と投影格子の位相の関係を模式化した図を示す。初期状態($\alpha=0$)の格子を投影した場合、変形前の点Pの位相値は ϕ_p となる。投影格子を ϕ_p だけシフトすると、点Pの位相値は0となる。変形後、変形前に点Pを写していたカメラの撮像面の画素には点Qが写されている。 ϕ_p だけ位相シフトされた投影格子の点Qにおける位相値を ϕ_q とする。すると、位相値 ϕ_q は変形前の位相値 ϕ_p にかかわらず、変位量 d に応じて決まる値となる。すなわち、各画素ごとに変形前の位相値分だけシフトさせた格子における変形後の輝度は、変位量に応じた値となる。したがって、このようにして得られた画像は等変位線を表す画像となる。

変形前の投影格子の位相分布を求めるために、本研究では特徴量抽出法(Morimoto and Fujisawa 1996)を用いる。特徴量抽出法は、格子の位相を1周期分シフトさせ、各画素それぞれにおいて輝度が最大となる時の格子の位相シフト量をその点の位相値とする方法である。1周期の位相シフト回数から結果として得られる位相の段階数になる。変形後に位相シフトを行うときの1周期の分割数を変形前に特徴量抽出法によって行う位相シフトの回数と一致させることにより、特徴量抽出法で得られる位相値と同じ位相シフト量の位相シフト画像を撮影することができる。

図3.1(a)において変形前の表面上の点Pの位相値を求めるには、初期状態($\alpha=0$)から、投影格子の位相を $2\pi/N$ ずつ等間隔で N 回シフトさせながら撮影し、点Pにおいて、何回目に最大輝度になるかを求めればよい。この回数に $2\pi/N$ をかけることで点Pの位相値を求めることができる。撮影された画面内の各画素ご



(a) 等変位線画像作成原理図

(b) 等変位線画像作成アルゴリズム

図 3.1 等変位線画像作成原理とアルゴリズム

とにこの操作を行なうことにより容易に画面全体の位相分布を得ることができる。

変形後の等変位線画像の作成手順を図3.1(a)に示す。画像(1)は特徴量抽出法によって求めた変形前の位相分布である。画像(2)は変形前の場合と同様に投影格子の位相を等間隔で少しずつ $0 \sim 2\pi$ までシフトさせながら格子画像を複数枚撮影して得られた格子画像である。ここで画像内のある1点Kに注目する。まず、変形前の位相分布(1)から点Kにおける位相値 ϕ_0 を得る。複数枚の変形後の格子画像(2)からその位相値の画像を選択し、その画像内の点Kにおける輝度データを処理結果の画像(3)の点Kにおける輝度データとする。この操作を全画素について行なうと、処理結果の画像(3)は等変位線分布となる。なお、図3.1(b)の格子画像はノコギリ波状の輝度分布を持っている場合であるが、格子の輝度分布がノコギリ波状でなくても同様の結果が得られる。また、得られるモアレじまの輝度分布は投影した格子の輝度分布と一致するため、図3.1(b)のようにノコギリ波状の輝度分布を持つ格子を用いることによって、変形量の増減方向の判別のできる等変位線分布を得ることができる。

3-2.2 装置構成

前節で述べた原理を用いて開発した等高線・等変位線表示システムを図3.2に示す。格子投影装置には、スライドプロジェクターまたは液晶プロジェクターを用いる。スライドプロジェクターの場合は、コンピュータからの信号により一軸ステージに取り付けられた格子フィルムを移動させることにより位相シフトを行いながら格子を投影する。液晶プロジェクターの場合は、コンピュータによって作られた格子画像を位相シフトしながら投影する。カメラは液晶プロジェクター上方のリニアガイドの上に取り付けられて

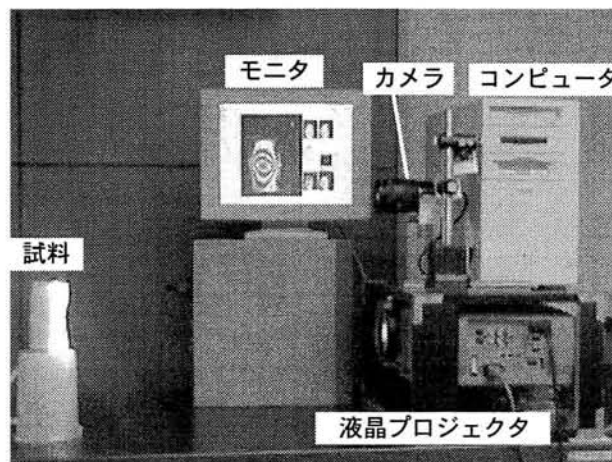
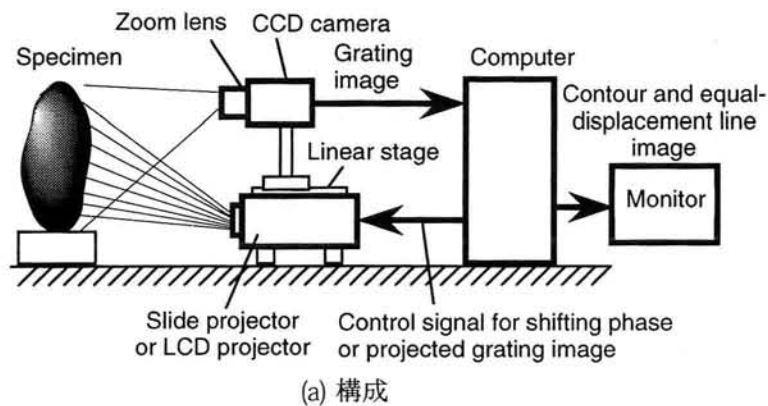


図3.2 等高線・等変位線表示システム

いる。カメラにはあおり量が調整可能なズームレンズが取り付けられている。試料に投影された格子はカメラによって撮影され、コンピュータ内のメモリに記録される。コンピュータは投影格子画像の位相シフト量と画像取り込みを同期させて行ない、処理結果の等高線・等変位線画像をモニタに表示する。

3-2.3 カメラレンズの倍率と位置の調整

カメラのズームレンズの倍率と位置の調整を精度よく行うことはモアレトポグラフィの光学系を作るうえで重要である。一般にズームレンズは、複数のレンズが組み合わされて作られているため、レンズ中心の位置を実測して位置を決めることは困難である。したがって、ここでは図3.3に示すように段差を持った2つの平行面（面 S_0 と面 S_1 ）を持つ基準物体を用いてズームレンズの倍率と位置の調整を精度よく行う方法を示す。

基準物体を基準面 S_0 と基準面 S_1 、 x - y 平面が互いに平行になるように設置する。このときプロジェクタのレンズとカメラのレンズ中心が z 方向に同じ高さになるように位置調整されている場合には、面 S_0 と面 S_1 に投影されてカメラで撮影された格子のピッチは一致する。この原理を用いて位置の調整を行う。また、位相シフト走査モアレ法を用いるためには格子のピッチを整数画素となるようにする必要があるため、ズームの倍率の調整を行う。レンズのズームを変えるとレンズの中心位置も変化するため、ズーム倍率の

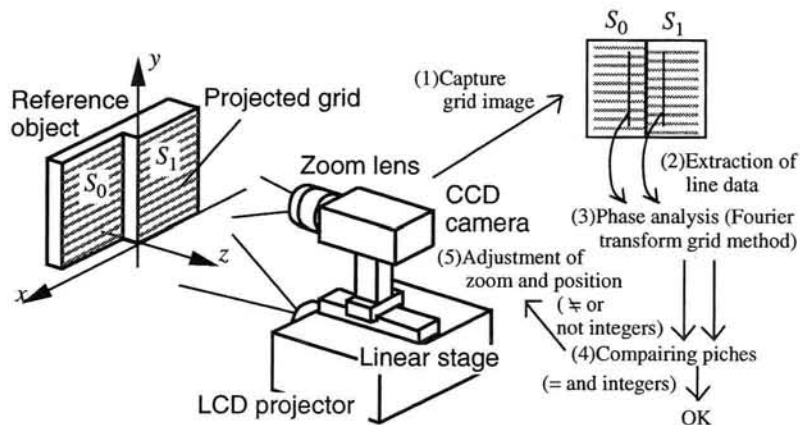
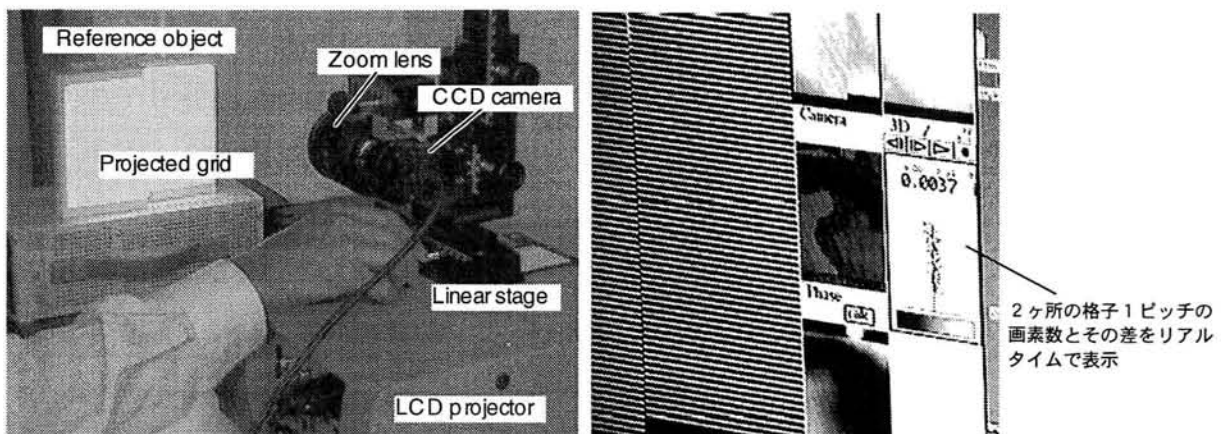


図 3.3 カメラ、プロジェクタ、基準板の位置関係および格子ピッチの算出手順



(a) 調整の様子

(b) 調整用ソフトウェアの画面

図 3.4 レンズ倍率と位置の調整

調整とカメラの位置の調整は同時に行う必要がある。

そこで、基準物体上の面 S_0 と面 S_1 に投影された格子のピッチを撮影された画像から求め、その値が整数でかつ一致するようにカメラのズームレンズの倍率とカメラの前後位置の調整を行う。図3.3にその手順を示す。(1)まず、基準物体に投影された格子パターンをカメラで撮影する。(2)次に面 S_0 と面 S_1 における各1ライン上の輝度分布を抽出し、(3)フーリエ変換格子法によりその位相分布を求める。(4)位相分布からピッチを算出して表示する。(5)その値が整数でかつ一致するまで、ズームとカメラの位置を再調整して(1)から(5)を繰り返す。この一連の操作は短時間で可能であり、短時間で精度よく微調節することができる。図3.4にレンズ倍率と位置の調整の様子を示す。

3-2.4 形状変形計測実験

石膏像の形状計測を行った結果を図3.5に示す。図3.5(a)に試料として用いた石膏像を示す。投影した格子の輝度分布は図3.5(b)に示すように、ノコギリ波状とした。図3.5(c)に本システムによって得られた等高線画像を示す。等高線の輝度の変化の向きによって物体表面の等高線の高さ増加方向を表現していることがわかる。この場合は、輝度が高い部分がカメラから遠く、輝度が低い部分がカメラから近いことを示している。

次に缶の変形計測を行った結果を図3.6に示す。ノコギリ波状の輝度分布を持つ格子を液晶プロジェクタを用いて投影した。図3.6(a)~(c)にそれぞれ変形前の格子画像と等高線、特徴量抽出法によって得られた位相分布を示す。缶の中央部を変形させたのち、本システムによって得られた格子画像、等高線、等変位線の画像をそれぞれ図3.6(d)~(f)に示す。さらに大きく変形させた場合の格子画像、等高線、等変位線の画像をそれぞれ図3.6(g)~(i)に示す。これらの結果より変形量に応じた等高線・等変位線が得られ、しかも輝度の変化方向により凹凸が判定できることがわかる。

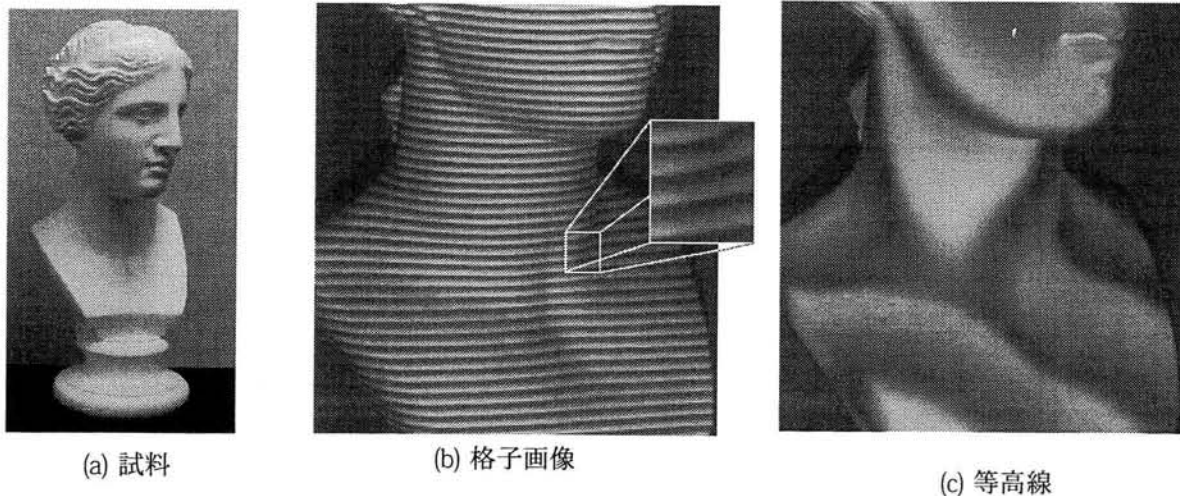
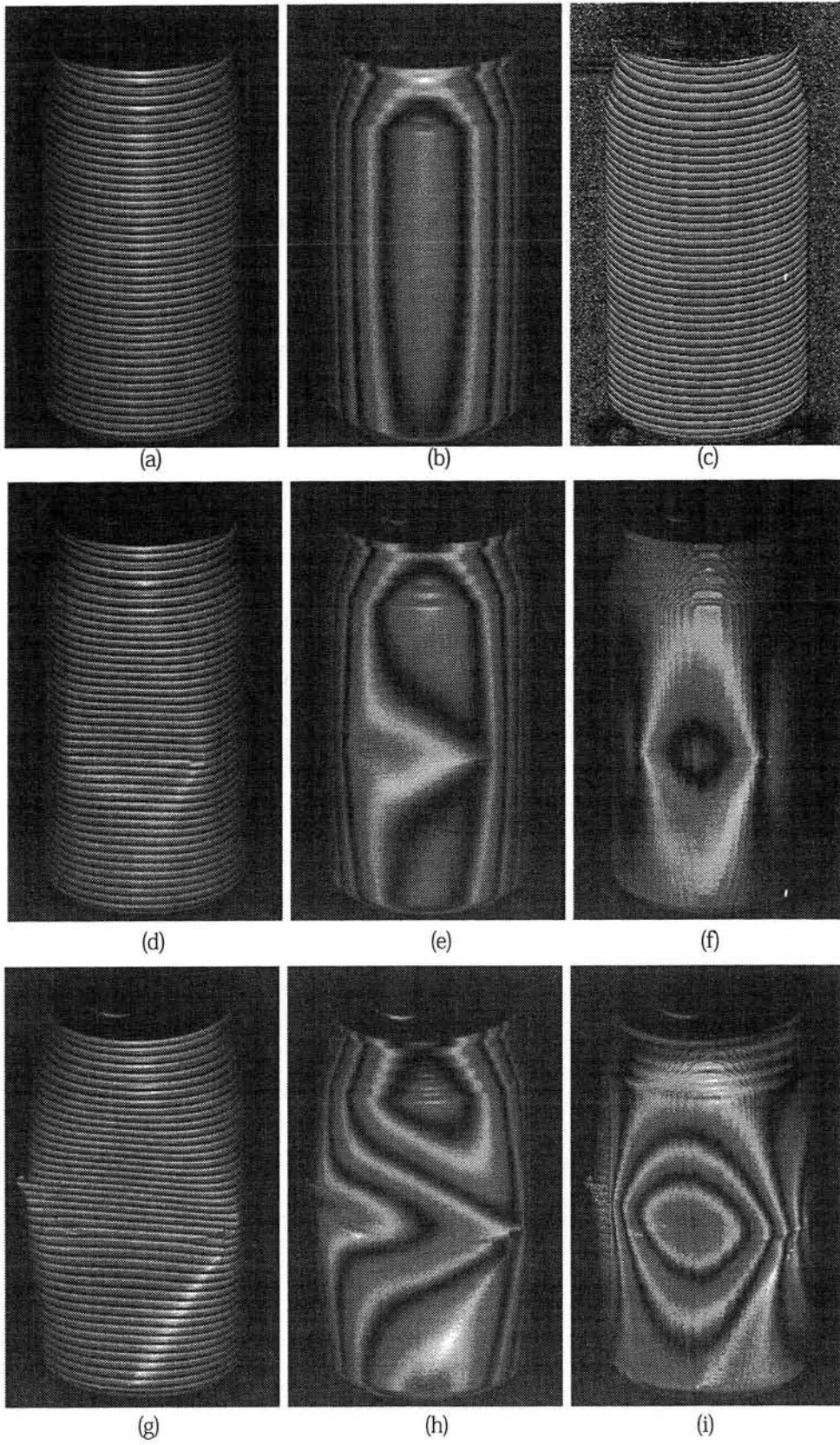


図 3.5 等変位線表示例



(a) 変形前格子画像 (b) 変形前等高線 (c) 変形前位相分布
 (d) 変形小格子画像 (e) 変形小等高線 (f) 変形小等変位線
 (g) 変形大格子画像 (h) 変形大等高線 (i) 変形大等変位線

図 3.6 等高線表示例

3-3 実時間等高線・等変位線表示システムの開発

(藤垣ら 2000)

前節で確認した等高線・等変位線表示原理を用いて実時間で形状計測を行うためには、ソフトウェアで等高線・等変位線表示処理を行うのではなく、専用のハードウェアを開発する必要がある。ここでは、まず開発したハードウェアについて構造と動作について示し、それを用いた等高線等変位線計測実験について述べる。

3-3.1 装置構成

上述の等高線および等変位線作成原理を実現するハードウェア（実時間等高線等変位線表示回路）を開発した。図3.7にそのブロック図を示す。

投影格子画像は実時間等高線等変位線表示装置内のメモリー内に位相シフトを行う回数分だけあらかじめ作成しておき、液晶プロジェクターから試料に順次投影される。試料に投影された格子はあおり付きのズームレンズが取り付けられているカメラによって撮影され、実時間等高線等変位線表示装置に入力される。処理結果の等高線画像および等変位線画像はビデオ信号として出力されモニタに表示される。

上述の原理では、等高線または等変位線画像を得るためには、位相シフト回数分の格子画像が必要であるが、本装置では、新しく1枚の格子画像が入力されるごとに、その格子画像から得られる等高線もしくは等変位線の必要部分だけを抽出して結果の画像を更新していく。すなわち、例えば1周期の位相シフト回数が8回の場合、結果の等高線または等変位線画像は過去の8/30秒分の格子画像から作成されるが、

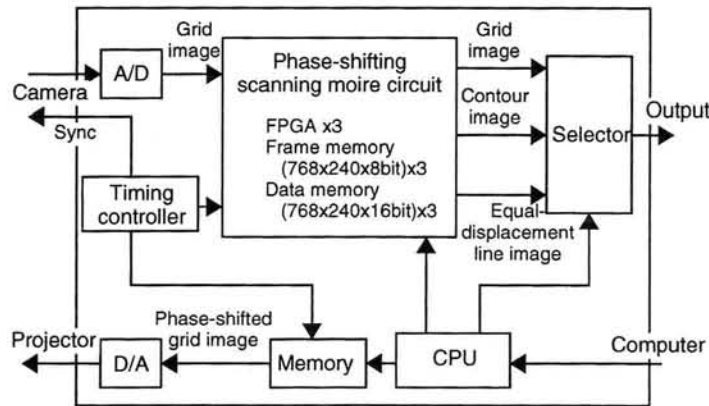


図 3.7 リアルタイム等高線等変位線表示装置ブロック図

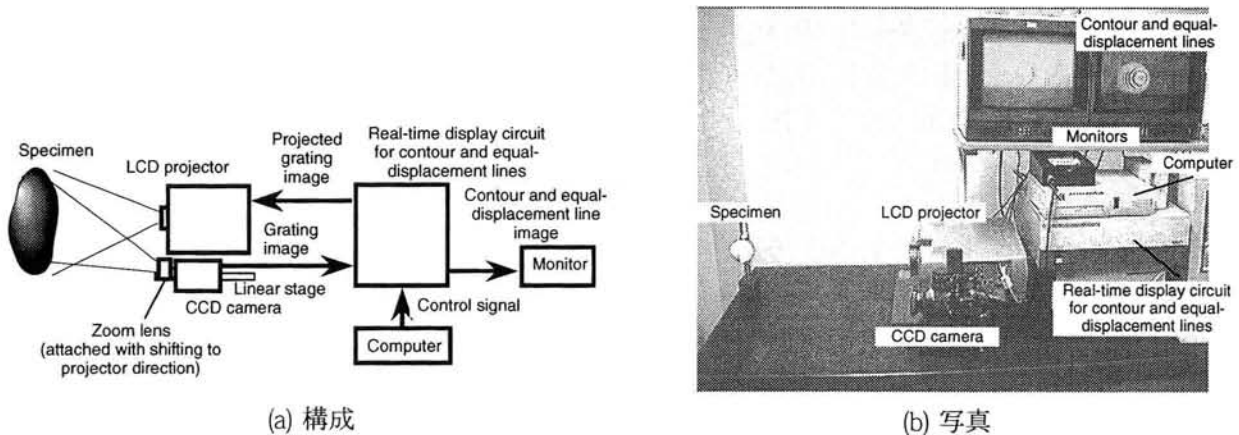


図 3.8 リアルタイム等高線等変位線表示システム

1/30秒ごとに全体の1/8ずつ更新されるために、得られる画像は1/30秒ごとに更新される動画として表示される。そのため、比較的低速な動きであれば実時間で等高線・等変位線を表示することができる。

このハードウェアを用いて実時間等高線・等変位線表示システムを構築した。図3.8(a)および(b)に全体のブロック図と写真を示す。

3-3.2 等高線等変位線計測実験

このシステムを用いて、動的な変化をする物体の等高線および等変位線の表示を行った結果を図3.9と図3.10に示す。図3.9は人体への適用例として、腕の等高線を表示している様子である。被験者の立っている後ろのスクリーンに結果として得られる等高線画像を別のプロジェクターで投影している。図3.10は軟式テニスボールを指で押さえて変形させていく場合の等変位線の変化を示している。指で押さえている点を中心に等変位線が広がって行く様子が見える。

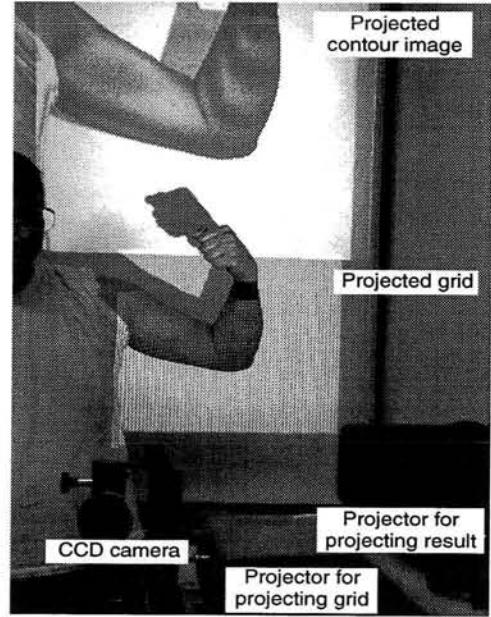


図3.9 腕の等高線計測の様子

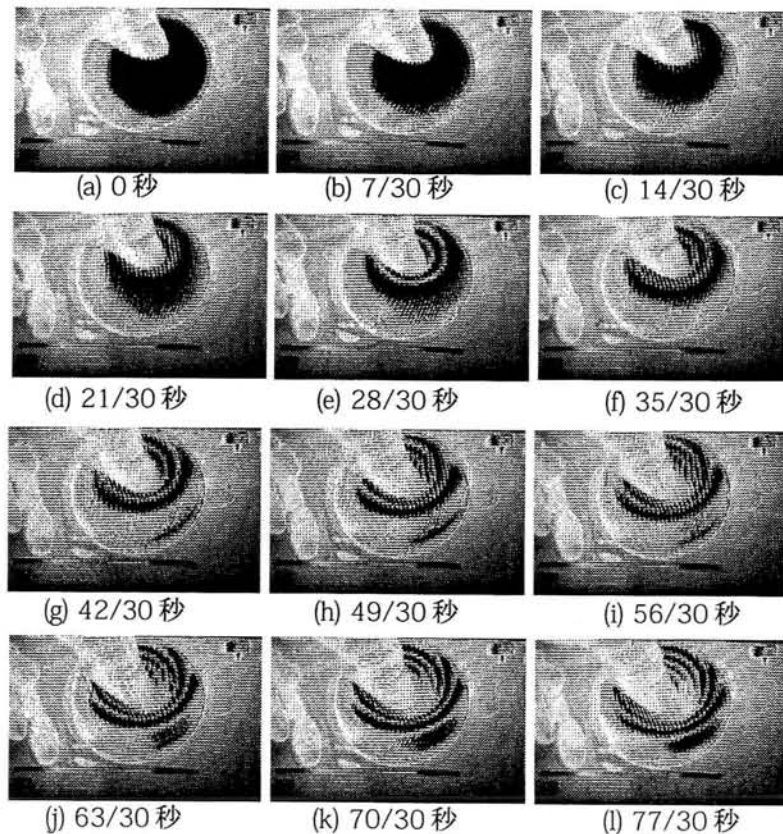


図3.10 テニスボール変形時の等変位線の変化

3-4 等高線・等変位線の位相表示による高精度化

第3章3-2節～3-3節で述べた等高線・等変位線表示方法では、得られた等高線・等変位線画像を見ることで物体の形状や変形を認識することができる。しかし、数値データとして定量的に高さ分布や変位量分布を得ることはできない。また、人間が濃淡を見て判別できるしまの分解能は、1/2本からせいぜい1/4本程度であるため精度がよいとは言えない。

等高線・等変位線を単なるしま模様として得るのではなく、等高線・等変位線の位相値を求めることができれば、その値はそれぞれ高さおよび変位に対応づけることができるため、高さ分布または変位分布が得られることになる。画面の全面素について等高線・等変位線の位相値を求めれば、しまの分解能が格段に上がり、人間がしまの濃淡を判別するときと比べて精度が向上すると言える。また、数値データとして位相値が得られると、そこから空間座標の計算を行うこともできる。

そこで本節では、等高線・等変位線を位相表示することによって高精度化する手法について述べる。まず、等高線・等変位線の位相表示について述べる。次に、矩形波状の格子を用いて比較的簡単なアルゴリズムで位相値が得られる相関位相シフト法について述べる。最後にそれを発展させて、短時間で位相分布を求めることのできる積分型位相シフト法について述べる。

3-4.1 等高線・等変位線の位相表示

3-4.1.1 等高線の位相表示の原理

図3.11に示す光学系を用いて等高線の位相表示の原理を説明する。点 L_p と L_c はそれぞれプロジェクターとカメラのレンズ中心点であり、双方とも $z=H$ の位置にあり、距離 d だけ離れているとする。基準平面は $z=0$ の位置にある。プロジェクターからは基準平面上でピッチ p となる等間隔の格子が投影されている。

試料表面上の点 S について考える。点 S には位相 ϕ_1 の格子が投影されているとする。カメラから点 S を通る視線 l_c と基準面との交点を X_0 とし、その x 座標を x_0 とする。点 X_0 における投影格子の位相を ϕ_0 とする。点 S を通る位相 ϕ_1 の格子が基準面に投影される点を X_1 とし、その x 座標を x_1 とする。

$\triangle SL_cL_p$ と $\triangle SX_0X_1$ は相似なので式(3.1)となる。

$$\frac{x_1 - x_0}{d} = \frac{h}{H - h} \tag{3.1}$$

また、基準面でのピッチは p なので、位相 ϕ_1 と ϕ_0 の差を位相差 $\Delta\phi = \phi_1 - \phi_0$ とすると式(3.2)となる。

$$x_1 - x_0 = \frac{\phi_1 - \phi_0}{2\pi} \cdot p = \frac{\Delta\phi}{2\pi} \cdot p \tag{3.2}$$

式(3.1)と式(3.2)より、式(3.3)が得られる。

$$hd = (H - h) \cdot \frac{p\Delta\phi}{2\pi} \tag{3.3}$$

これを h について解けば式(3.4)が得られ、 H が h に比べて十分大きい場合には、式(3.4')となる。

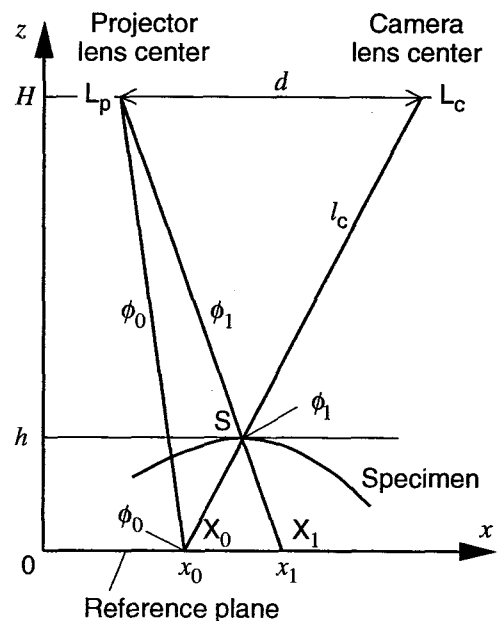


図3.11 格子位相値と高さの関係

$$h = \frac{H}{\frac{2\pi d}{p\Delta\phi} + 1} \tag{3.4}$$

$$\frac{pH}{2\pi d}\Delta\phi = \frac{Hh}{H-h} \doteq h \tag{3.4'}$$

式(3.4)と式(3.4')より、 H が h に比べて十分大きい場合には試料表面の z 座標と位相差 $\Delta\phi$ は比例関係があると言える。またそうでない場合には比例関係はないものの1対1の対応関係があり、位相差 $\Delta\phi$ から試料の z 座標が得られることがわかる。したがって、カメラで撮影される各画素について基準面を撮影して得られる位相と試料を撮影して得られる位相の差を求めれば、その位相差の分布は試料の高さ (z 座標)の分布となることがわかる。

3-4.1.2 等変位線の位相表示の原理

図3.12に示した光学系で、試料がカメラの方向に変位した場合を図3.12に示す。点 S を写していたカメラの視線と試料表面との交点を点 S' とする。点 S' と点 S の z 座標の差を Δh とする。ここでは、カメラの同一画素に撮影される試料表面の z 座標の変化を変位量とする。点 S' に投影されている格子の位相値を ϕ とする。点 S' を通る位相 ϕ の格子が基準面に投影される点を X' とし、その x 座標を x' とする。また、位相 ϕ の格子が $z=h$ 平面を横切る点を X_h とする。

$\Delta L_p X_1 X'$ と $\Delta L_p S X'_h$ は相似なので、 $z=h$ における投影格子のピッチ p_h は、式(3.5)のようになる。

$$p_h = \frac{H-h}{H} p \tag{3.5}$$

また、 $\Delta S' L_c L_p$ と $\Delta S' S X'_h$ は相似なので式(3.6)となる。ここで位相 ϕ と ϕ_1 の差を位相差 $\Delta\phi = \phi' - \phi_1$ とする。

$$\frac{p_h \Delta\phi}{d} = \frac{h' - h}{H - h'} \tag{3.6}$$

$\Delta h = h' - h$ なので、式(3.6)は式(3.7)となる。

$$\Delta h d = (H - h - \Delta h) \cdot \frac{p_h \Delta\phi}{2\pi} \tag{3.7}$$

これを Δh について解けば式(3.8)が得られ、 H が h および Δh に比べて十分大きい場合には、式(3.8')となる。

$$\Delta h = \frac{H}{\frac{2\pi d}{p\Delta\phi} + \left(1 - \frac{h}{H}\right)} \tag{3.8}$$

$$\frac{pH}{2\pi d}\Delta\phi = \frac{\frac{H^2}{H-h}\Delta h}{\frac{H^2}{H-h} - \Delta h} \doteq \Delta h \tag{3.8'}$$

式(3.8)を見ると、変位量 Δh は位相差 $\Delta\phi$ と変形前の高さ h

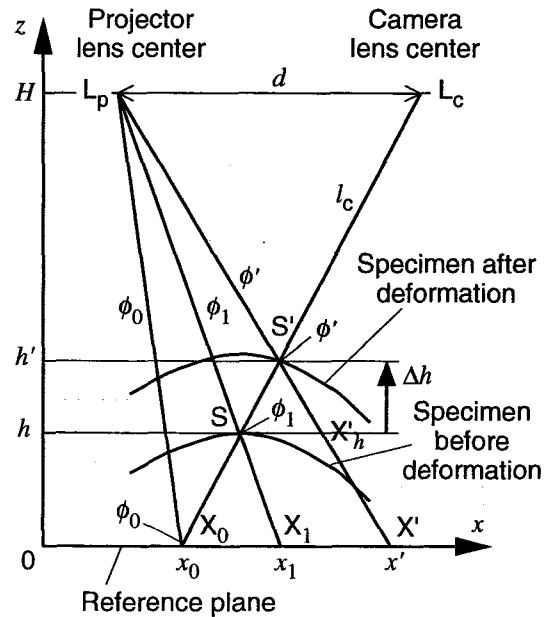


図3.12 試料変位時の格子位相値と高さの関係

の関数となることがわかる。HがhおよびΔhに比べて十分大きい場合には、変位量Δhと位相差Δφに比例関係があると言える。またそうでない場合でも1対1の対応関係があるわけではないが、Hに比べてhが十分小さい場合には、実用上使用することができる。

3-4.2 相関位相シフト法

(Morimoto and Fujigaki 1998)

3-4.2.1 位相算出原理

本手法では矩形波状の輝度分布を持つ格子を用いる。図3.13(a)と(b)に、ある1点における投影格子の位相シフト量と輝度の関係を示す。これらはそれぞれ格子の初期位相が0とθの場合の輝度変化である。この輝度変化に図3.13(c)と(d)に示すような位相が0とπ/2の重み関数f₀とf₁を掛け、それぞれ式(3.9)と式(3.10)に示す積分を行うことにより、相関係数S₀とS₁を得る。

$$S_0(\theta) = \int_0^{2\pi} f_0(\alpha) g(\theta + \alpha) d\alpha \tag{3.9}$$

$$S_1(\theta) = \int_0^{2\pi} f_1(\alpha) g(\theta + \alpha) d\alpha \tag{3.10}$$

このようにして得られたS₀とS₁と格子の初期位相θとの関係は式(3.11)のようになる。

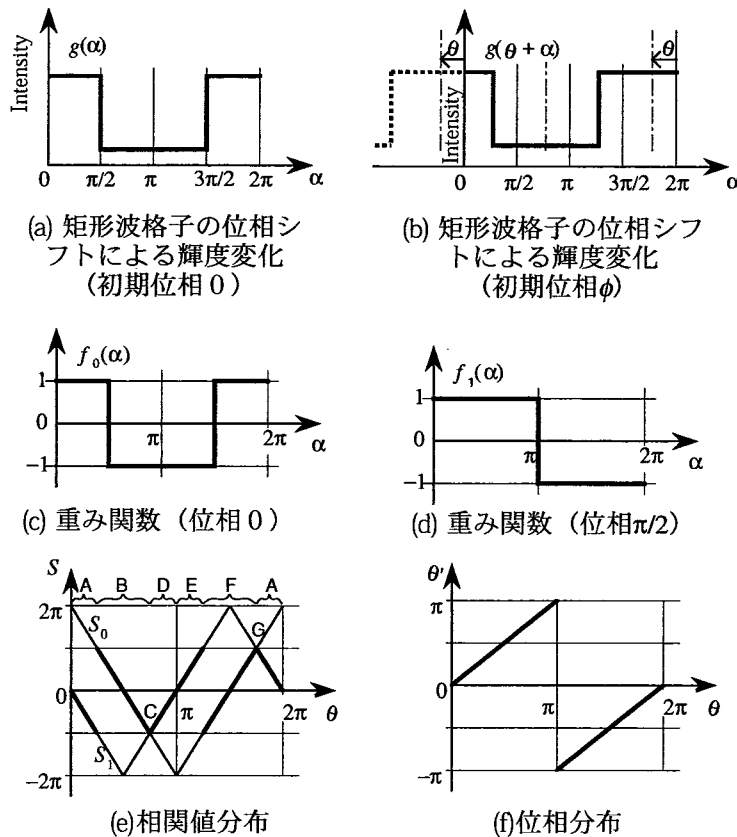


図 3.13 相関を利用した位相シフト走査モアレ法の原理

$$\begin{aligned}
 S_0 &= \begin{cases} -4\theta + 2\pi & (0 \leq \theta < \pi) \\ 4\theta - 6\pi & (\pi \leq \theta < 2\pi) \end{cases} \\
 S_1 &= \begin{cases} -4\theta & (0 \leq \theta < \frac{\pi}{2}) \\ 4\theta - 4\pi & (\frac{\pi}{2} \leq \theta < \frac{3\pi}{2}) \\ -4\theta + 8\pi & (\frac{3\pi}{2} \leq \theta < 2\pi) \end{cases} \quad (3.11)
 \end{aligned}$$

これをグラフに示したものを図 3.13(e)に示す。

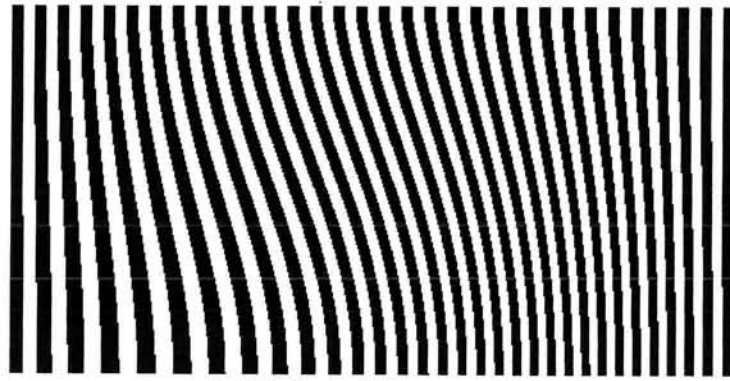
図 3.13(e)において、太線で示した部分 (A ~ G) を式(3.12)のような条件により抽出し、 θ' を計算したものを図 3.13(f)に示す。

$$\begin{aligned}
 \text{A: } \theta' &= -S_1/4 & (S_0 > S_1 \text{ and } |S_0| > |S_1|) \\
 \text{B: } \theta' &= -S_0/4 + \pi/2 & (S_0 > S_1 \text{ and } |S_0| < |S_1|) \\
 \text{C: } \theta' &= -S_0/4 + \pi/2 & (S_0 = S_1 \text{ and } S_1 < 0) \\
 \text{D: } \theta' &= S_1/4 + \pi & (S_0 < S_1, S_1 \leq 0 \text{ and } |S_0| > |S_1|) \\
 \text{E: } \theta' &= S_1/4 - \pi & (S_0 > S_1, S_1 > 0 \text{ and } |S_0| > |S_1|) \\
 \text{F: } \theta' &= S_0/4 - \pi/2 & (S_0 < S_1 \text{ and } |S_0| < |S_1|) \\
 \text{G: } \theta' &= S_0/4 - \pi/2 & (S_0 = S_1 \text{ and } S_1 > 0)
 \end{aligned} \quad (3.12)$$

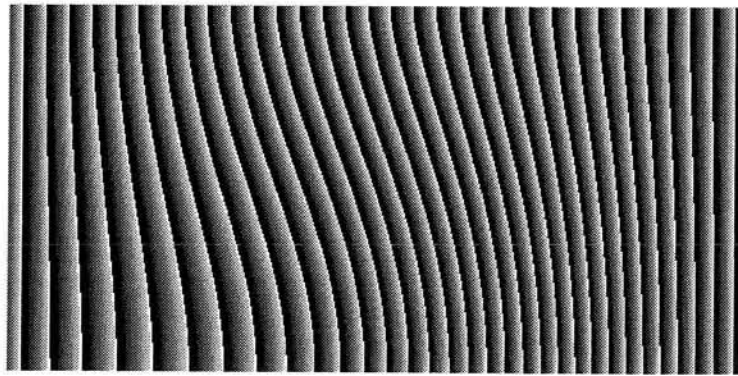
ここで、 θ' は図 3.13(a)と(b)における格子の初期位相 θ を $-\pi$ から π の範囲にラップ (n を整数として位相値から $2n\pi$ を引いて $-\pi$ から π の範囲に入る値とする操作) したものととなる。さらに得られた位相値 θ' から式(3.17)に示すように変形前の位相値 ϕ_0 を引くことにより、ラップされたモアレじまの位相値 θ_m を得ることができる。

$$\theta_m = \theta' - \theta_0 \quad (3.13)$$

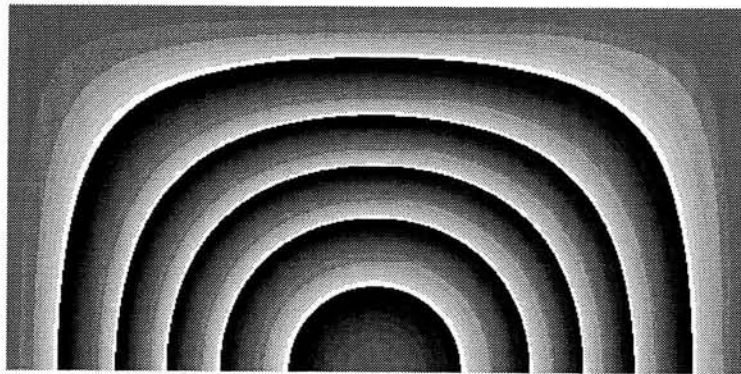
このような計算を各画素ごとに行うことによって、格子の位相分布およびモアレじまの位相分布 (位相差分布) を得ることができる。その例を図 3.14 に示す。図 3.14(a)は、矩形波状の格子に変形分布を与えて計算機内で作成した変形格子画像である。図 3.14(b)は、図 3.14(a)の変形格子の位相を 16 段階にシフトして得られた画像に対して相関位相シフト法を行った結果として得られた位相分布である。図 3.14(c)は、変形前の格子の位相分布と図 3.14(b)の位相分布との差をラップした位相差分布であり、モアレじまの位相すなわち変形量の分布を意味している。



(a) 変形格子 (位相シフト量 0)



(b) 位相分布



(c) 位相差分布

図 3.14 相関を利用した位相シフト走査モアレ法によって得られた位相分布

3-4.2.2 ソフトウェアによる動作確認実験

図3.15(a)と(b)に実験装置を示す。投影する格子画像はパーソナルコンピュータ (Apple PowerMac 8500) にて作成され、液晶プロジェクタから試料物体に投影される。CCDカメラは液晶プロジェクタの側方に、その光軸が液晶プロジェクタの光軸と平行になるように設置されている。CCDカメラのレンズは、プロジェクタ正面に置かれた試料を撮影することができるように、あおりを持たせて取り付けられている。試料物体に投影された格子パターンはCCDカメラで撮影され、コンピュータに取り込まれる。位相シフトされた格子の投影とCCDカメラからの画像取り込みは同期して行われ、取り込まれた画像はコンピュータ内のメモリに蓄えられる。1周期分の位相シフトが行われた後、相関を利用した位相シフト走査モアレ法によって処理された結果として得られる位相分布画像がモニタに表示される。

軟式テニスボールと金属スプーンに投影した格子の位相解析結果を図3.16に示す。図3.16(a)に試料への投影格子画像 (位相シフト量 $\alpha=0$) を示す。投影格子にはピッチ32画素の矩形波状格子を用いる。1周期を32分割して位相シフトさせながら格子画像をCCDカメラで取り込み、得られた32枚の位相シフト画像から式(3.9)および式(3.10)を用いて相関値 S_0 および S_1 の分布を求めた結果をそれぞれ図3.16(b)および(c)に示す。この相関値分布から式(3.12)によって位相値分布を求めた結果を図3.16(d)に示す。図3.16(e)に試料の位置に基準平板を設置して同様の方法で得た基準平板の位相分布を示す。図3.16(e)と図3.16(d)の差を図3.16(f)に示す。これは試料の高さ分布を表している。

次に、軟式テニスボールを掴んでいる人間の手の形状を計測した結果を図3.17に示す。投影格子の位相シフト量は8段階とした。図3.17(a)には試料の写真を示す。図3.17(b)と(c)に、投影格子画像 (位相シフト量 $\alpha=0$) と結果として得られた等高線を表す位相分布をそれぞれ示す。図3.17(c)を見ると、反射率の低い皮膚であっても反射率の高い軟式テニスボールであっても同様に等高線を表す位相分布が得られていることがわかる。

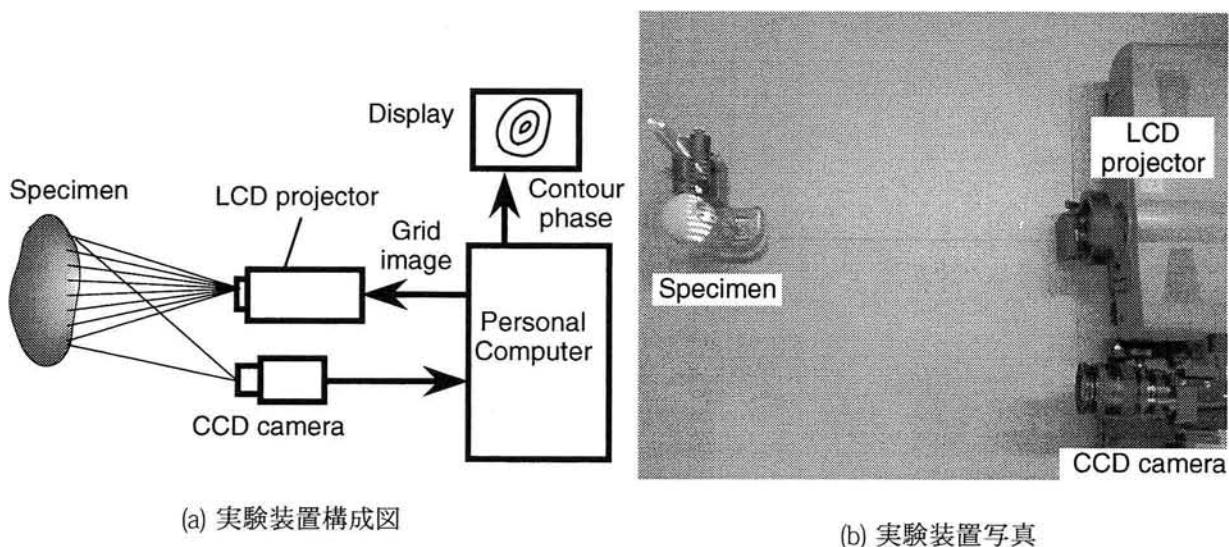


図3.15 実験装置と計測結果

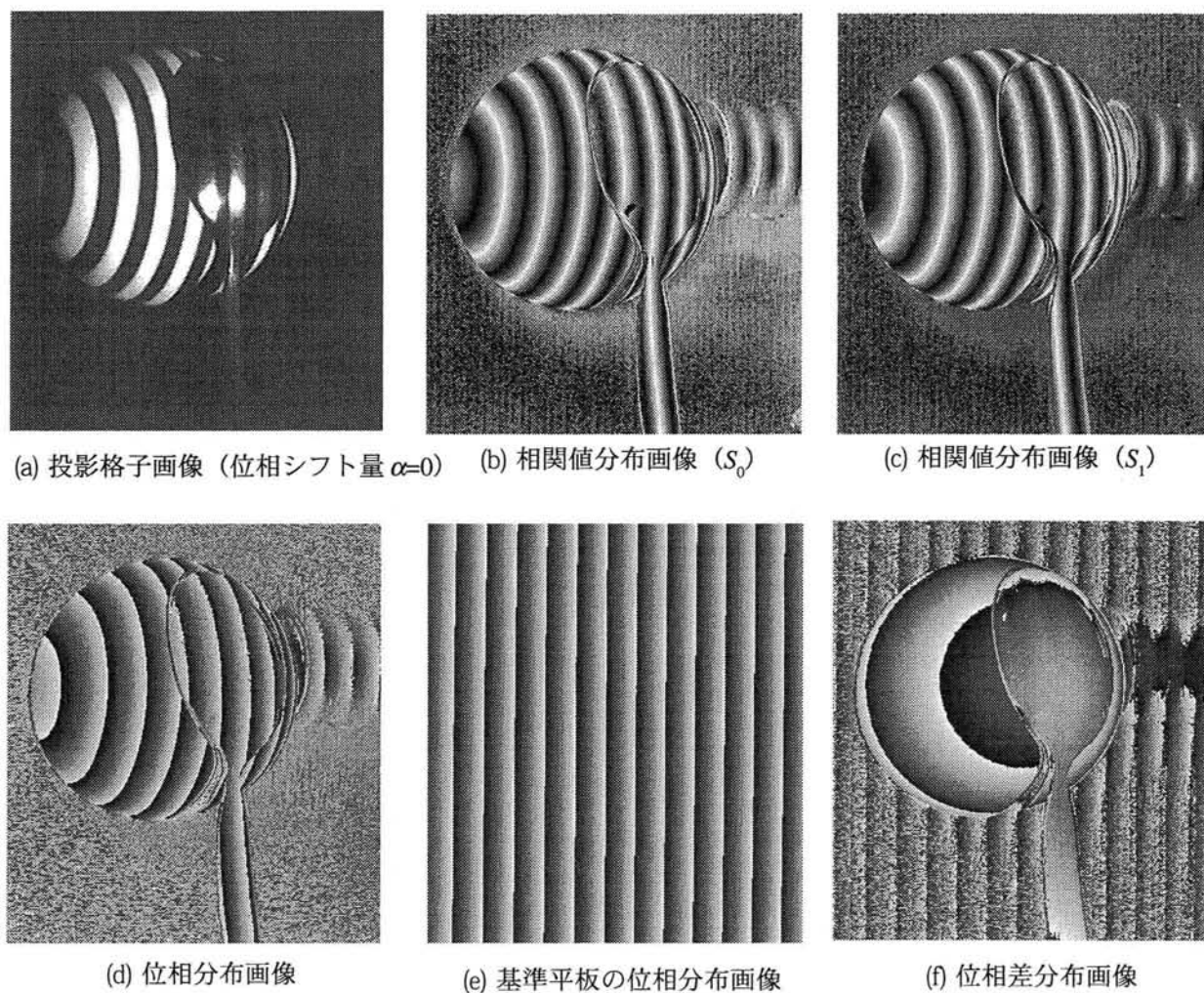
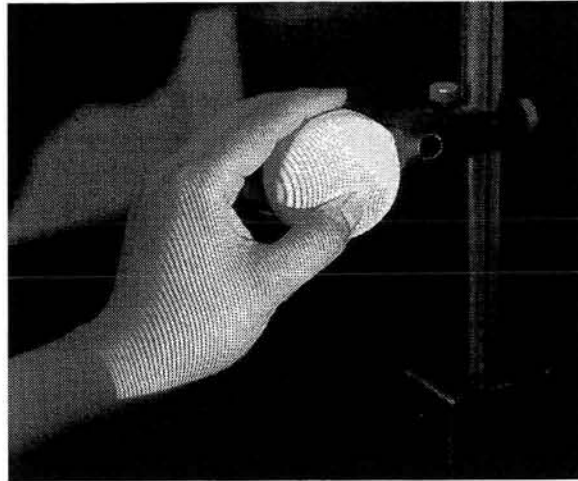
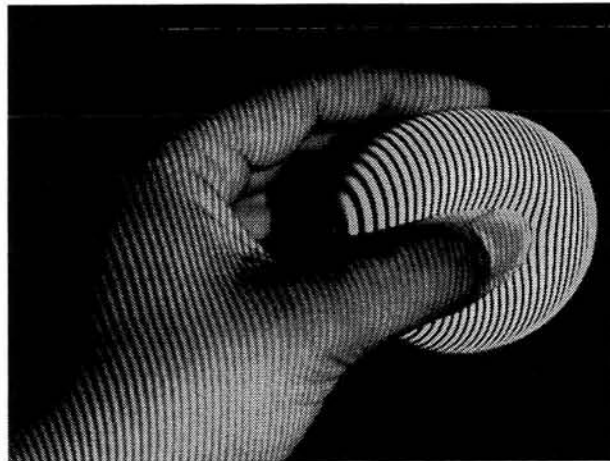


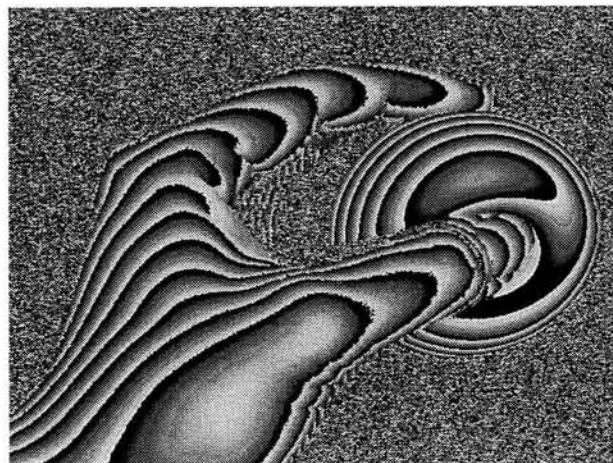
図 3.16 ゴムボール金属スプーンの位相解析例



(z) 試料写真



(b) 位相シフト投影格子三次元画像画像 (位相シフト量 $\alpha=0$)



(c) 等高線を表す位相分布

図3.17 実験装置と計測結果

3-4.2.3 精度の検討

(Fujigaki and Morimoto 2000)

相関位相シフト法を用いた位相解析の誤差をピントがずれた場合とCCDカメラの撮影輝度範囲を超えた場合、物体が移動する場合についてシミュレーションにより算出する。計算機内にピッチが32画素で各点が順に $\pi/16$ ずつ異なる位相を持つ格子画像を位相シフトして得られる格子の三次元画像を作成する。 N 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 $\phi_{i,th}$ は式(3.14)のように表される。

$$\phi_{i,th} = \frac{2\pi i}{N} \tag{3.14}$$

一方、シミュレーションによって求められる位相値 $\phi_{i,sim}$ 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。ここでは、平均誤差 E_{ave} と最大誤差 E_{max} を式(3.15)および式(3.16)に示すように定義する。

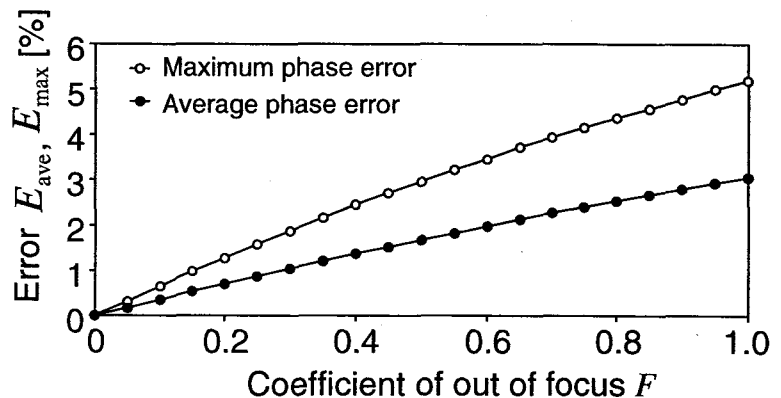
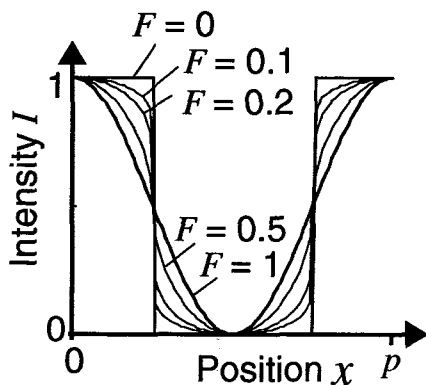
$$E_{ave} = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} \frac{|\phi_{i,th} - \phi_{i,sim}|}{2\pi} \tag{3.15}$$

$$E_{max} = \frac{\text{maximum}(|\phi_{i,th} - \phi_{i,sim}|)}{2\pi} \quad (i = 0 \text{ to } N - 1) \tag{3.16}$$

(1) ピントのずれの影響

ピントのずれた矩形波のかわりに、式(3.21)に示すような矩形波とコサイン波の中間の波形を用いる。

$$I(x, \alpha) = \begin{cases} \frac{1}{2} \left\{ 1 + \left(\cos\left(\frac{2\pi x}{P} + \alpha\right) \right)^F \right\} & \left(\text{when } \cos\left(\frac{2\pi x}{P} + \alpha\right) > 0 \right) \\ \frac{1}{2} & \left(\text{when } \cos\left(\frac{2\pi x}{P} + \alpha\right) = 0 \right) \\ \frac{1}{2} \left\{ 1 - \left(-\cos\left(\frac{2\pi x}{P} + \alpha\right) \right)^F \right\} & \left(\text{when } \cos\left(\frac{2\pi x}{P} + \alpha\right) < 0 \right) \end{cases} \tag{3.17}$$



(a) ピントのずれの係数 F と波形の関係

(b) ピントのずれの係数 F と誤差分布の関係

図 3.18 ピントのずれ時のシミュレーション

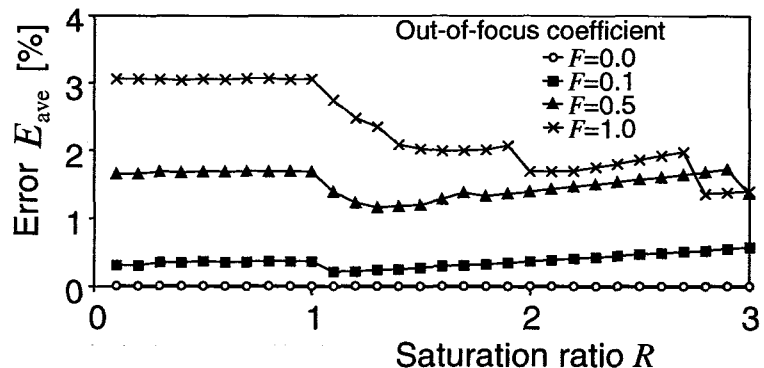
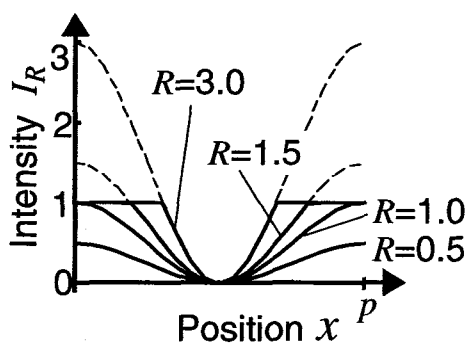
ここで、 x は位置を表し、 p は格子のピッチ、 α は位相シフト量である。また、 F はピントを表す係数で、 F が0から1まで変化するにつれて波形を矩形波からコサイン波まで連続的に変化させることができ、図3.18(a)に示すような波形が得られる。つまり、 $F=0$ はピントが最も合った状態を表し、 $F=1$ はピントが最も合っていない状態を表すとする。この式は厳密には実際のピントのずれを表す式とは異なる。実際には最もピントがずれた状態とは、完全に平滑化されて格子模様が見えない状態をいうのであるが、本研究では、波形がコサイン波に近くなるまで検討すれば十分なので、この式を用いることにする。シミュレーションの計算の容易さを考慮し、この式を用いることにする。図3.18(b)に F に対する平均誤差と最大誤差の分布のシミュレーション結果を示す。これより、ピントがずれた場合、ずれの大きさに応じて誤差が増えるが、最もピントが合っていない状態でも、平均誤差で3%、最大誤差で5%であることがわかる。

(2) 物体の反射率の影響

金属のように反射率が高い場合など、CCDカメラで撮影できる最大輝度を越える場合がある。撮影できる最大の輝度に対するその輝度の割合をオーバーフロー係数 R とすると、撮影される格子の輝度分布 $I_R(x, \alpha, R)$ は式(3.18)で表される波形となる。

$$I_R(x, \alpha, R) = \begin{cases} R \cdot I(x, \alpha) & (\text{when } R \cdot I(x, \alpha) \leq 1) \\ 1 & (\text{when } R \cdot I(x, \alpha) > 1) \end{cases} \quad (3.18)$$

格子画像がコサイン波の場合は、 R の値によって図3.19(a)に示すような波形が得られる。図3.19(b)は、ピントのずれがある場合に R の値によって平均誤差がどのように変化するかを示している。これによると、オーバーフロー係数 R の値が1より大きくなっても平均誤差は大きくならないことがわかる。このことより、本手法は試料の反射率の影響を受けにくい方法であると言える。



(a) オーバーフロー係数 R と波形の関係

(b) オーバーフロー係数 R と誤差分布の関係

図3.19 オーバーフロー時のシミュレーション

(3) 物体の移動速度の影響

物体がカメラ方向に移動する場合、物体の移動速度に比例して撮影される格子の位置が移動する。そのために、与えた位相シフト量と実際の位相シフト量にずれが生じる。このずれの大きさをここでは位相シフトずれ A で表す。位相シフトずれ A は、与えた位相シフト量に対する実際の位相シフト量の比とする。位置 x における格子の輝度値 $I_A(x, \alpha, A)$ は、位相シフトずれ A を用いて式(3.19)のように表すことができる。

$$I_A(x, \alpha, A) = I(x, (1+A)\alpha) \quad (3.19)$$

図3.20に、位相シフトずれ A と誤差の関係を示す。この結果より、物体の移動速度に比例して誤差が大きくなることがわかる。

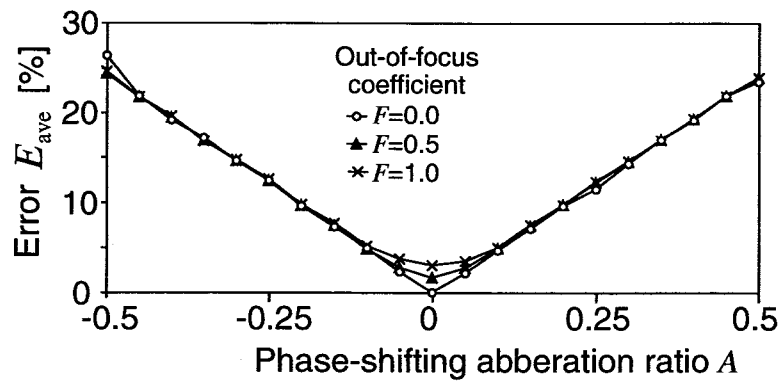


図3.20 位相シフトずれ A と誤差の関係

3-4.3 積分型位相シフト法の原理

(藤垣, 森本 1999) (Fujigaki et al. 1999) (Morimoto et al. 1999)

前節までに、矩形波を用いた相関位相シフト法について述べた。ここでは、相関位相シフト法で矩形波状の重み関数との相関を計算する代わりに、連続的に矩形波を位相シフトし、その輝度変化をCCDの画素上で時間積分する。このようにして得られた格子画像から位相分布を求める方法を積分型位相シフト法と呼ぶ。以下、その原理について述べる。

3-4.3.1 位相算出原理（矩形波格子）

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 $R(x)$ を次のように定義する。

$$R(x) = \begin{cases} 1 & (\cos x \geq 0) \\ -1 & (\cos x < 0) \end{cases} \quad (3.20)$$

初期位相（時刻 $t=0$ での位相）を θ 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

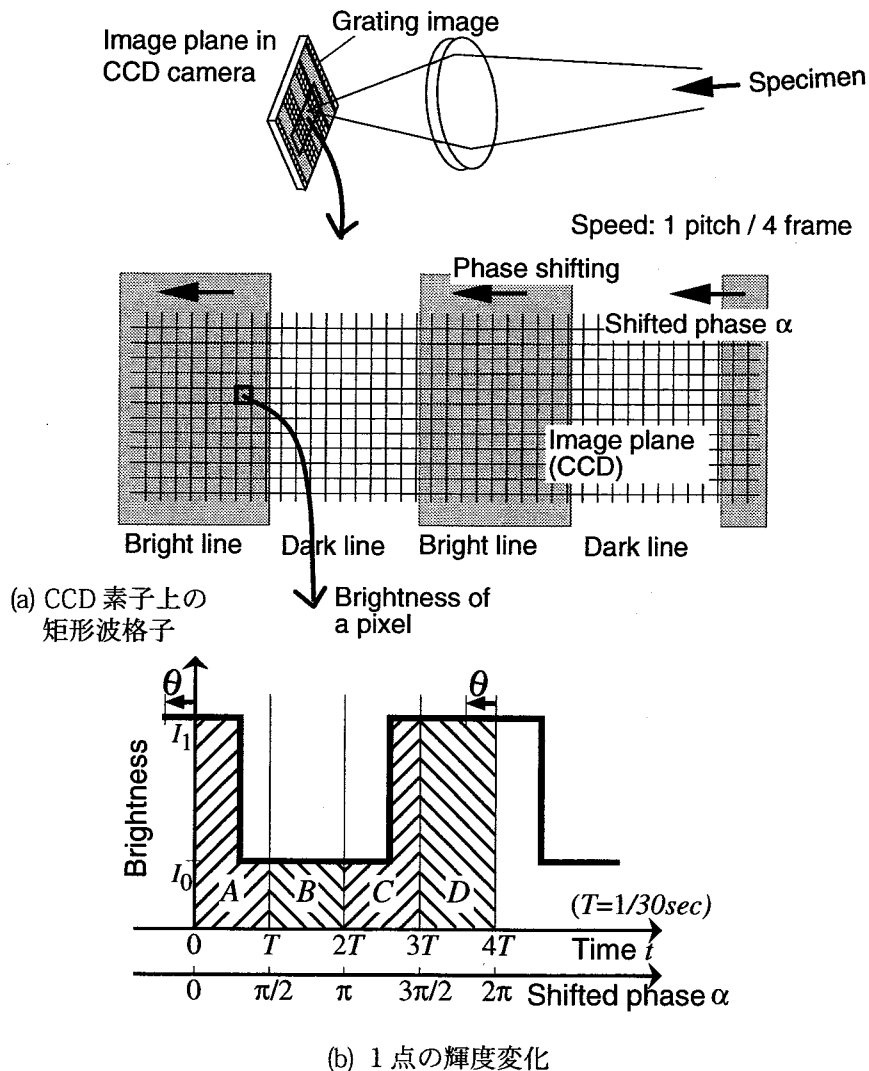


図 3.21 位相シフト時の撮像素子上の輝度変化（矩形波格子）

変化 $I(t, \theta)$ は次のように表すことができる。

$$I(t, \theta) = aR \left(\frac{2\pi}{4T}t + \theta \right) + b \quad (3.21)$$

$$a = \frac{I_1 - I_0}{2}, \quad b = \frac{I_1 + I_0}{2} \quad (3.22)$$

ここで、 I_0 と I_1 は、それぞれ矩形波格子の高輝度部と低輝度部の輝度である。

図3.21(a)はCCD素子上に結像している矩形波状格子の模式図を示す。図3.21(b)は、4フレームで1周期分の位相シフトを連続的に行う場合の撮像素子上のある1画素における輝度変化を示す。ここで T は、1フレームの撮影時間である。1フレーム目から4フレーム目までで得られる輝度は、格子の輝度の変化 $I(t, \theta)$ をそれぞれの撮影時間分だけ積分したものとなり、すなわち図3.21(b)における面積 $A \sim D$ の値となる。

$0 \leq \theta < \frac{\pi}{2}$ の場合、 $A \sim D$ の値は式(3.23)のようになり、 X と Y を式(3.24)のように定義すれば、 X と Y は式(3.25)のようになる。

$$\begin{aligned} A &= \int_0^T I(t, \theta) dt = T \left\{ I_0 + \frac{\pi/2 - \theta}{\pi/2} (I_1 - I_0) \right\} \\ B &= \int_T^{2T} I(t, \theta) dt = TI_0 \\ C &= \int_{2T}^{3T} I(t, \theta) dt = T \left\{ I_0 + \frac{\theta}{\pi/2} (I_1 - I_0) \right\} \\ D &= \int_{3T}^{4T} I(t, \theta) dt = TI_1 \end{aligned} \quad (3.23)$$

$$\begin{aligned} X &= A - C \\ Y &= D - B \end{aligned} \quad (3.24)$$

$$\begin{aligned} X &= T(I_1 - I_0) \left(1 - \frac{4}{\pi} \theta \right) \\ Y &= T(I_1 - I_0) \end{aligned} \quad (3.25)$$

ここで図3.22に示すように、 X を横軸、 Y を縦軸にとると、点 $P(X, Y)$ は初期位相 θ の値に応じて正方形

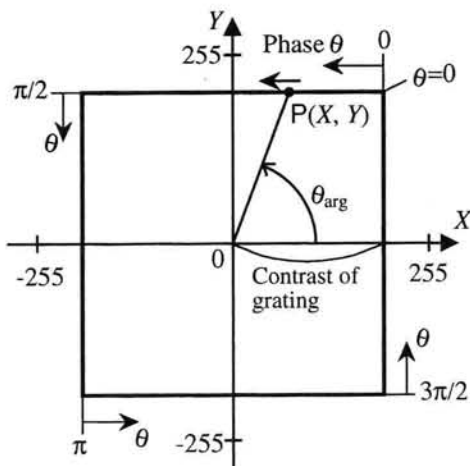


図 3.22 初期位相 θ とテーブル内の参照点の関係 (矩形波格子)

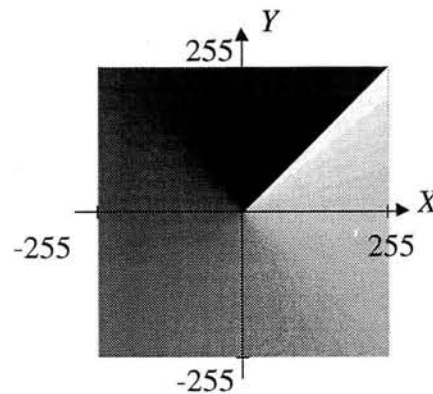


図 3.23 位相算出テーブル (矩形波格子)

状の軌跡を描く。このとき、軌跡の正方形の辺の長さは、その半分が格子画像のコントラストすなわち $I_1 - I_0$ となる。点PのX軸からの偏角を θ_{arg} とすると、初期位相 θ は θ_{arg} の関数として次のように求めることができる。

$$\begin{cases} \theta = \frac{\pi}{4} + \frac{\pi}{4} \tan\left(\theta_{arg} - \frac{\pi}{2}\right) & \left(\frac{\pi}{4} \leq \theta_{arg} < \frac{3\pi}{4}\right) \\ \theta = \frac{3\pi}{4} + \frac{\pi}{4} \tan\theta_{arg} & \left(\frac{3\pi}{4} \leq \theta_{arg} < \frac{5\pi}{4}\right) \\ \theta = \frac{5\pi}{4} + \frac{\pi}{4} \tan\left(\theta_{arg} - \frac{\pi}{2}\right) & \left(\frac{5\pi}{4} \leq \theta_{arg} < \frac{7\pi}{4}\right) \\ \theta = \frac{7\pi}{4} + \frac{\pi}{4} \tan\theta_{arg} & \left(0 \leq \theta_{arg} < \frac{\pi}{4}, \frac{7\pi}{4} \leq \theta_{arg} < 2\pi\right) \end{cases} \quad (3.26)$$

このようにして作成した矩形波用の位相変換テーブルを図3.23に示す。

3-4.3.2 位相算出原理（コサイン波格子）

初期位相（時刻 $t=0$ での位相）を θ 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 $I(t, \theta)$ は次のように表すことができる。

$$I(t, \theta) = a \cos\left(\frac{2\pi}{4T}t + \theta\right) + b \quad (3.27)$$

$$a = \frac{I_1 - I_0}{2}, b = \frac{I_1 + I_0}{2} \quad (3.28)$$

ここで、 I_0 と I_1 は、それぞれコサイン波格子の最大輝度と最低輝度である。

図3.24は、4フレームで1周期分の位相シフトを連続的に行う場合の撮像素子上のある1画素における輝度変化を示す。ここで T は、1フレームの撮影時間である。1フレームめから4フレームめまでで得られる輝度は、格子の輝度の変化 $I(t, \theta)$ をそれぞれの撮影時間分だけ積分したものとなり、すなわち図3.24における面積 $A \sim D$ の値となる。

$A \sim D$ の値は式(3.29)のようになり、 X と Y を式(3.30)のように定義すれば、 X と Y は式(3.31)のようになる。

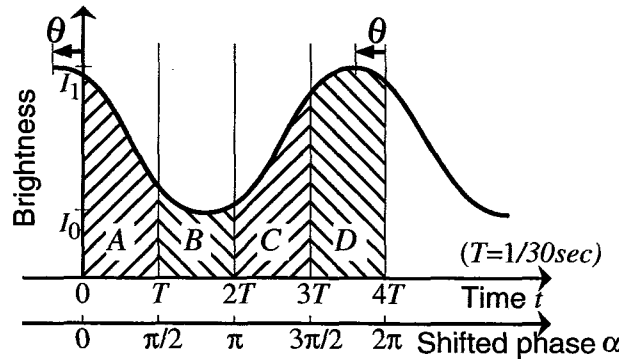


図3.24 位相シフト時の撮像素子上の輝度変化（コサイン波格子）

$$\begin{aligned}
 A &= \int_0^T I(t, \theta) dt = \int_0^T \left\{ a \cos \left(\frac{2\pi}{4T} t + \theta \right) + b \right\} dt \\
 &= \frac{2\sqrt{2}aT}{\pi} \cos \left(\theta + \frac{\pi}{4} \right) + bT \\
 B &= \int_T^{2T} I(t, \theta) dt = \frac{2\sqrt{2}aT}{\pi} \cos \left(\theta + \frac{3\pi}{4} \right) + bT \\
 C &= \int_{2T}^{3T} I(t, \theta) dt = \frac{2\sqrt{2}aT}{\pi} \cos \left(\theta + \frac{5\pi}{4} \right) + bT \\
 D &= \int_{3T}^{4T} I(t, \theta) dt = \frac{2\sqrt{2}aT}{\pi} \cos \left(\theta + \frac{7\pi}{4} \right) + bT
 \end{aligned} \tag{3.29}$$

$$\begin{aligned}
 X &= A - C \\
 Y &= D - B
 \end{aligned} \tag{3.30}$$

$$\begin{aligned}
 X &= \frac{4\sqrt{2}aT}{\pi} \cos \left(\theta + \frac{\pi}{4} \right) \\
 Y &= \frac{4\sqrt{2}aT}{\pi} \sin \left(\theta + \frac{\pi}{4} \right)
 \end{aligned} \tag{3.31}$$

ここで図3.25に示すように、 X を横軸、 Y を縦軸にとると、点 $P(X, Y)$ は初期位相 θ の値に応じた円形状の軌跡を描く。このとき、軌跡の半径は、格子画像のコントラストすなわち $I_1 - I_0$ となる。点 P の X 軸からの偏角を θ_{arg} とすると、初期位相 θ は θ_{arg} の関数として式(3.32)のように求めることができる。

$$\theta = \theta_{\text{arg}} - \frac{\pi}{4} \tag{3.32}$$

このようにして作成したコサイン波用の位相変換テーブルを図3.26に示す。

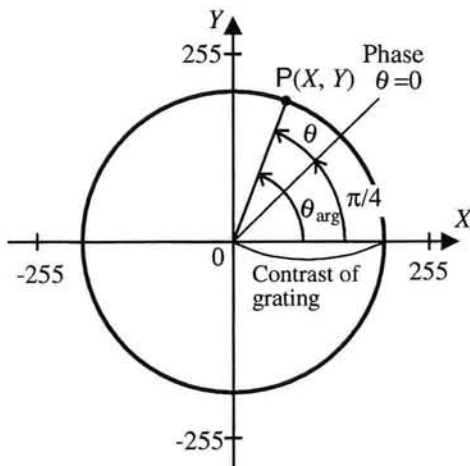


図 3.25 初期位相 θ とテーブル内の参照点の関係 (コサイン波格子)

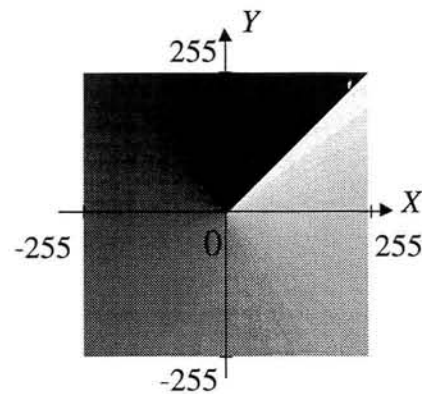


図 3.26 位相算出テーブル (コサイン波格子)

3-5 積分型位相シフト法による実時間形状計測装置の開発

前節では、等高線・等変位線の位相表示による高精度化を行うために、等高線・等変位線を位相値として求めるための位相解析方法を述べた。本節では、積分型位相シフト法を用いて等高線・等変位線の位相分布を実時間で表示するシステムを開発する。まず、積分型位相シフト法のアルゴリズムを実時間で実行するために開発した実時間位相解析ボードについて述べる。次に、積分型位相シフト法を用いて形状を計測するために開発した格子投影装置について述べる。最後に、開発した実時間形状計測装置を用いて実際の三次元物体に対して形状・変形計測を行った結果を示す。

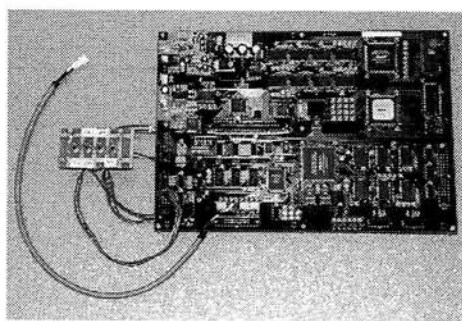
3-5.1 実時間位相解析ボードの開発

前節の計算を実時間で実行するために、図 3.27 に示す実時間位相解析ボードを開発した。図 3.27(a) に外観、(b) にブロック図を示す。CCDカメラから入力された画像はタイミングコントローラによって1フレームずつ順番にフレームメモリA～Dに格納される。これらの画像から輝度差 $X=A-C$ と $Y=D-B$ を求め、前節3-4.3の図3.22と図3.26で説明した位相算出テーブルを通すことによって位相値が即座に得られる。1フレームの画像が入力されるたびに、フレームメモリA～Dの一つが更新されるため、テーブルから出力される位相画像も1フレームごとに更新される。

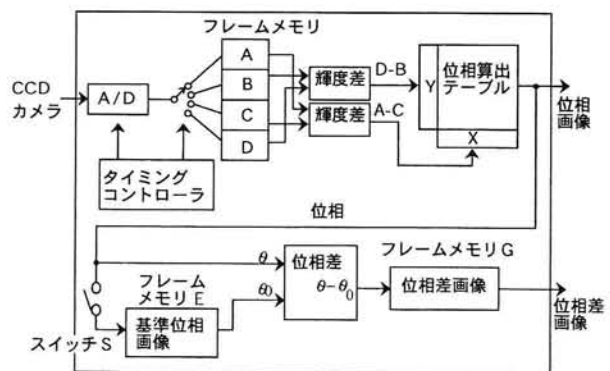
次に、位相差画像を出力する方法を述べる。初期状態の位相値と現在の位相値の差を計算することで、後述の格子投影による形状計測の場合は物体の高さ分布が得られ、レーザー干渉じまを用いた微小変形計測の場合には変位量分布を得ることができる。まず、初期状態でスイッチSを入れることによってフレームメモリEに初期状態での位相分布を格納する。次にスイッチSを切り、試料を撮影することによってフレームメモリGには位相差画像が記録され、実時間で出力することができる。

また、本解析ボードは、矩形波状の格子でなくレーザー干渉じまのようなコサイン波状の格子の位相解析にも適用できる。積分型位相シフト法では、コサイン波状の格子の位相値も前節と同様に求めることができる。本解析ボードでは、位相算出テーブルが記録されているROMをコサイン波用の位相算出テーブルが記録されているROMに変更するだけで簡単に干渉じまの位相解析にも適用できる。

さらに、出力される映像信号はカラーパレットを切り替えることによって、即座に、グレースケール、黄色→青色のグラデーション、青→緑→赤、赤紫→青→緑→赤→赤紫の4通りのカラー表示を切り替えることができる。この機能により、グレースケール表示だけでは画面上で判別しにくかった微小な変化もカラー表示することによって、容易に判別することが可能となる。



(a) 外観



(b) ブロック図

図 3.27 実時間位相解析ボード

3-5.2 実時間形状計測装置の開発

図3.28に実時間形状計測装置を示す。図3.28(a)は装置構成、図3.28(b)は装置の写真である。格子フィルムはステッピングモータによって連続的に4/30秒で1周期の速度で移動する。プロジェクタのレンズとスライドフィルム、カメラのレンズ受光面は互いに平行になるように配置する。プロジェクターとカメラが分離しているため、それらの間隔を調整することで任意のサイズの対象物の計測が可能である。

また、カメラとプロジェクター、格子移動機構を一体化した携帯型実時間形状計測装置を図3.29に示す。計測可能な対象物のサイズは固定されるものの、可搬性があり、毎回位置調整をする必要がなく実用的である。

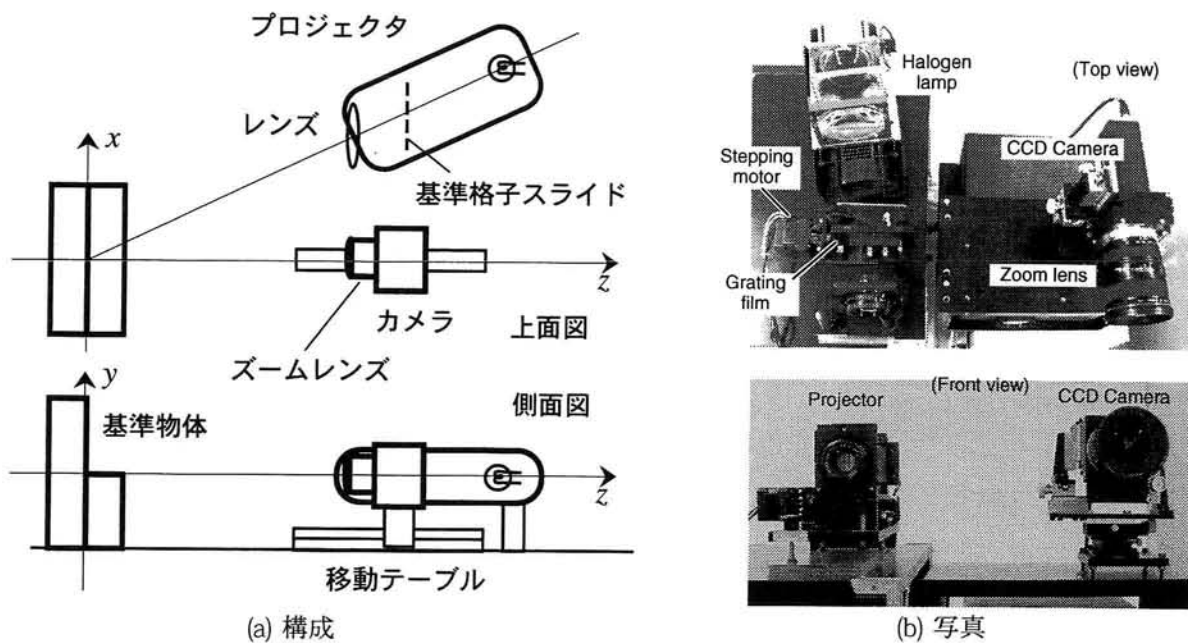


図 3.28 実時間形状計測装置

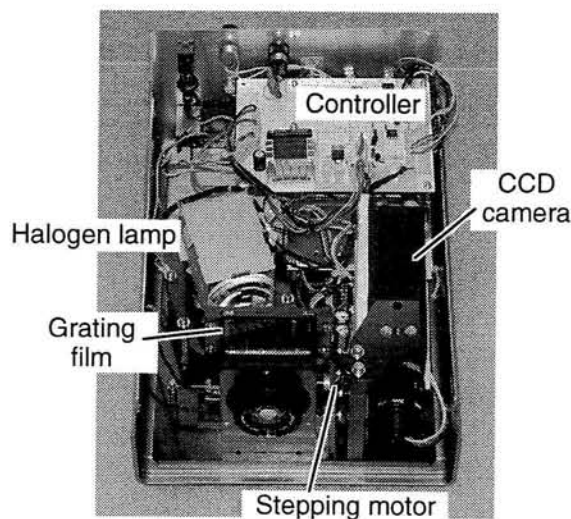


図 3.29 携帯型実時間形状計測装置

3-5.3 形状計測実験

3-5.3.1 平板の形状計測

携帯用実時間形状計測装置を用いて平板の形状計測を行う。図3.30に実験装置の構成を示す。試料平板は、図3.31に示すように回転ステージ上に設置されており、 x 軸に対して角度をつけることができる。携帯用実時間形状計測装置で撮影された格子画像は実時間位相解析ボードに入力される。位相差画像はNTSCアナログ映像信号として出力され、パーソナルコンピュータのビデオキャプチャー機能によりデジタル化される。試料平板表面には、図3.32に示すように5mmピッチの目盛りが付けられている。目盛りの0mmの縦線は回転ステージの回転軸と一致させる。

まず、試料平板の法線方向を z 軸方向となるようにし、試料平板の表面を基準平面として投影格子の位相分布を実時間位相解析ボードに記憶する。次に回転ステージを時計回りに30度回転させる。実時間位相解析ボードによって得られた位相差画像を図3.33に示す。目盛りの0mmの縦線の位置をしま次数0とし、位相の変わり目ごとに図3.33に示すようにしま次数 k を決める。

この輝度分布から図3.32に示した目盛り線ごとにサンプル線上の輝度値を抽出し、位相値に直したものを図3.34に示す。各抽出点の x 座標および z 座標の理論値は、目盛りの値 X と回転角 γ からそれぞれ式(3.33)および式(3.34)によって算出する。

$$x = X \cos \gamma \tag{3.33}$$

$$z = X \sin \gamma \tag{3.34}$$

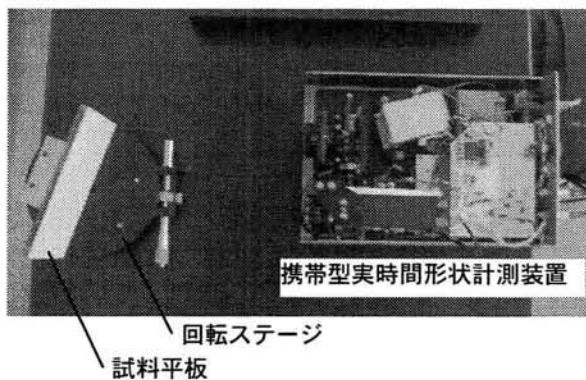


図 3.30 実験装置

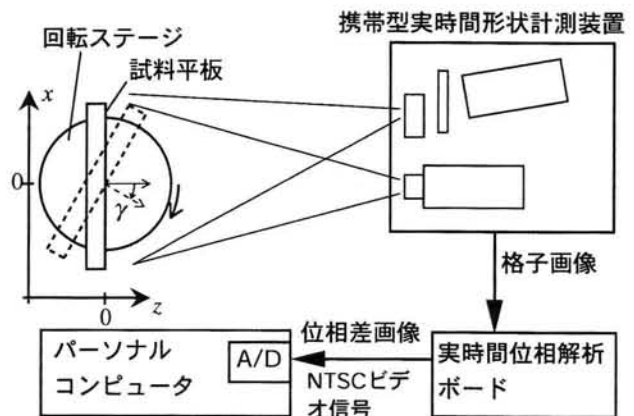


図 3.31 実験装置構成

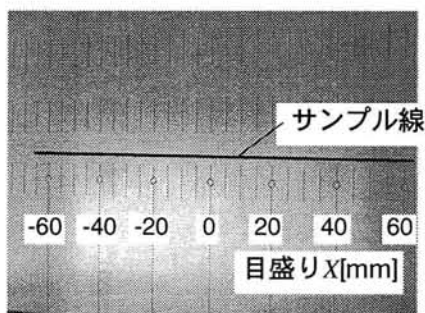


図 3.32 試料平板画像

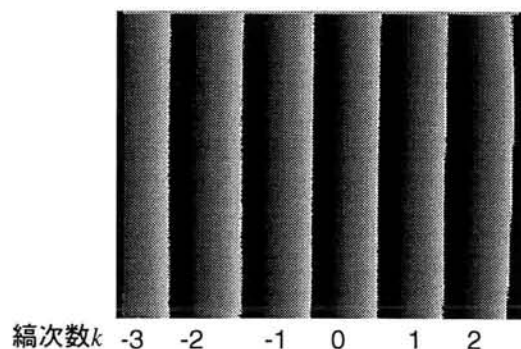


図 3.33 位相差画像

抽出された輝度値は0～255の繰り返しになる。そこで、図3.33に示す竊次数 k を用いて連続化を行い、式(3.35)によって位相差 $\Delta\phi$ を算出する。

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{256}(I(X) - I(0) + 256k) \quad (3.35)$$

ここで、 $I(X)$ は目盛り X の値における輝度とする。なお、実時間位相解析ボードからの位相差画像はデジタルデータであるが、このボードの場合はデジタル出力ポートがないためアナログ信号として出力されるので、正確にはパーソナルコンピュータでデジタル化できない。また、しま次数の変わり目では、輝度が急変するはずであるが、最終的に得られる画像では数画素の幅を持ってなだらかに変化しているために誤差が大きくなる。

次に、第3章3-4.1.1節で述べた式(3.4)を用いて各サンプル点の z 座標 h を求める。

$$h = \frac{H}{\frac{2\pi d}{p\Delta\phi} + 1} \quad (\text{再掲 3.4})$$

本実験の場合、 $z=0$ における格子のピッチ $p=3.0[\text{mm}]$ 、カメラとプロジェクタのレンズ光軸間距離 $d=95[\text{mm}]$ である。しかし、レンズ中心位置 H は実測できないため、式(3.35)で求めた位相差と式(3.34)で求めた z 座標の値を元に、最小二乗法によって H の値を求める。その値を用いて求めた各サンプル点の z 座標を図3.35に示す。図3.35で実線は式(3.38)で求めた理論値である。

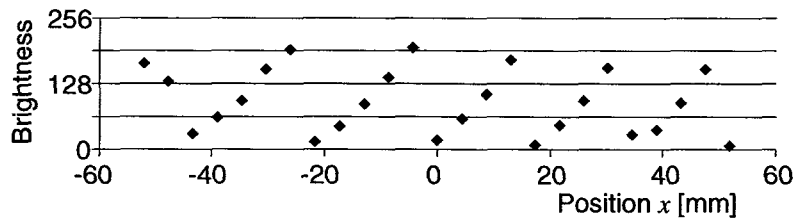


図 3.34 抽出点の輝度値

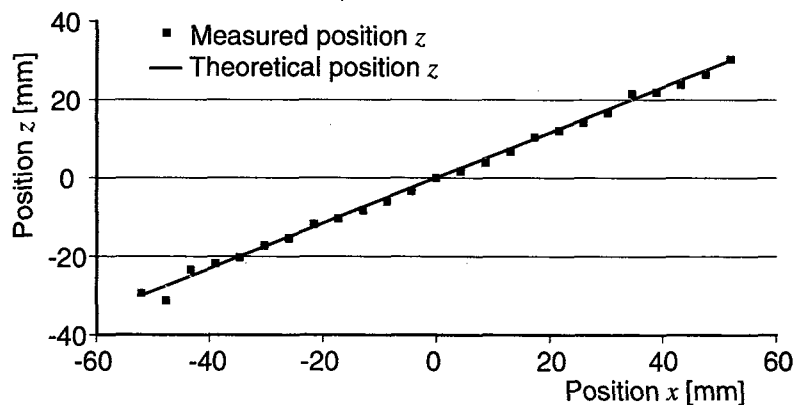


図 3.35 高さ分布

3-5.3.2 人体形状計測への適用

形状計測の適用例として、電球を持った手を試料とした場合の連続的に位相シフトしながら撮影した投影格子画像を図3.36に示す。図3.36(a)~(d)は、それぞれ $\pi/2$ ずつ位相シフトされた1フレームめから4フレームめの画像である。

図3.37(a)に図3.36の画像データから得られた位相分布の画像を示す。基準平板に格子を投影した場合の位相分布をあらかじめ同様の方法で求めておき、図3.37(a)の位相画像との差を求めた画像が図3.37(b)である。図3.37(b)の位相差画像は、試料の形状（あらかじめ位相分布を求めた平板からの距離分布）を表している。

この結果より、電球中央部のように撮影される輝度がオーバーフローしている点以外は解析できているのがわかる。

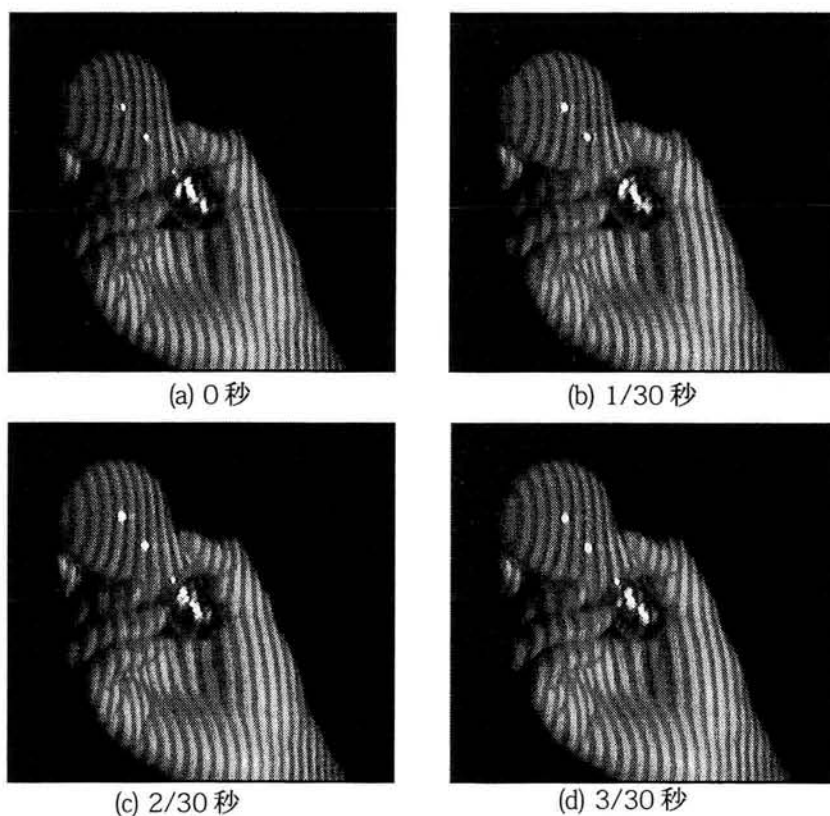


図 3.36 投影格子画像

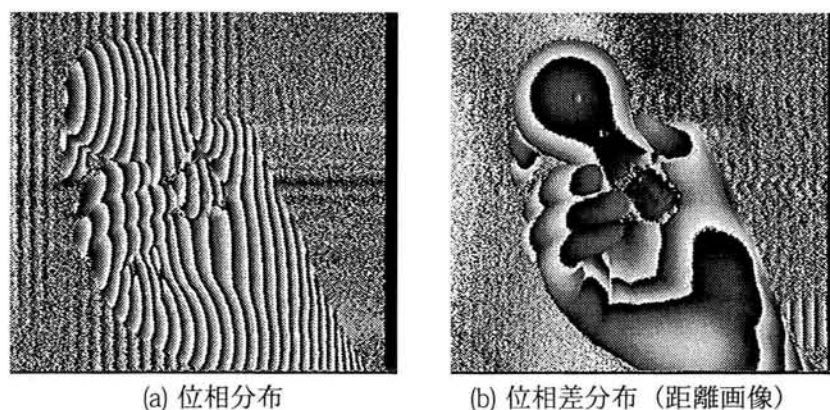


図 3.37 実時間形状計測結果

3-6 計測結果投影装置の開発

これまでに述べた実時間形状計測装置では、計測結果として得られた高さ分布画像はモニター上に表示される。しかし計測対象が、次の(1)~(4)のような場合にモニター上に表示された異常部分が実物上のどの部分にあたるかが作業者に容易に分かりにくいという問題がある。

- (1) 比較的大きな物体
- (2) 動きのある物体
- (3) モニター画面に写っている計測範囲で、試料に起伏や境界などの目印となる部分が少ない場合。たとえば、大きなタンクの一部分を計測範囲としている場合や、平面に広がっているシート状の試料、人間の皮膚の一部分を拡大して計測している場合。
- (4) 検査対象物が次々と流れてくるような工場内の検査場で、検査作業者がモニタ画面と試料の両方を監視することが困難な場合。

そこで本節では、測定物の表面に計測結果を投影することによって、作業者にとって計測結果と実物の場所の対応づけが容易に行える新たに開発した形状計測結果投影装置について述べる。本装置の特徴は、計測対象物体表面の計測点と同一の点に計測結果を投影する所にある。

3-6.1 原理と装置構成

図3.38に、計測結果投影装置を用いた形状計測結果投影システムの基本構成を示す。本システムは形状変形解析装置と格子投影用プロジェクタ、計測結果投影装置で構成される。形状変形解析装置は格子投影用プロジェクタに投影格子位相シフトのための制御信号を出力する。格子投影用プロジェクタには赤外線透過フィルター（可視光を透過しないフィルター）が取り付けられており、赤外線の格子が試料に投影される。試料に投影された格子は、計測結果投影装置のハーフミラーで反射してCCDカメラで撮影される。CCDカメラには、格子投影用プロジェクタに取り付けられている物と同じ赤外線透過フィルター（可視光

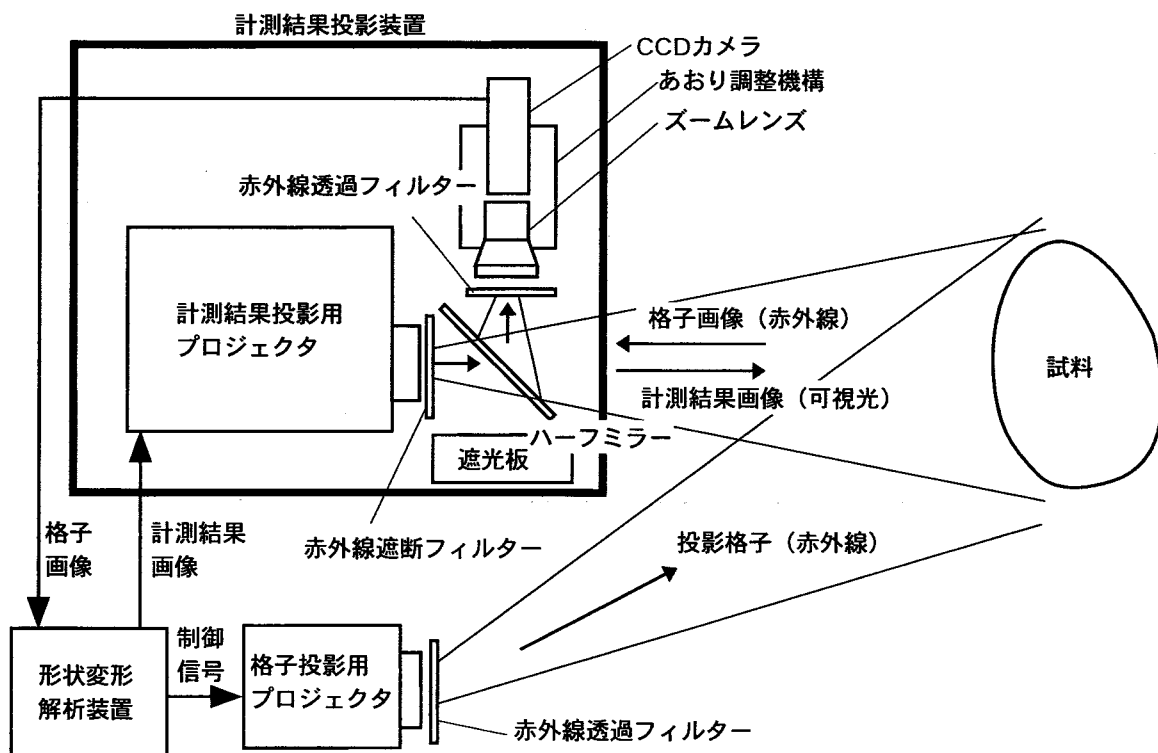


図 3.38 形状計測結果投影システムの基本構成

カットフィルター)が取り付けられており、赤外線の画像すなわち投影格子画像が撮影される。撮影された投影格子画像は、形状変形解析装置に入力され試料の形状または変形の解析が行われる。その結果として得られる計測結果画像は計測結果投影装置内の計測結果投影用プロジェクタから試料物体表面上に投影される。計測結果投影用プロジェクタには、赤外線遮断フィルター(可視光のみ透過するフィルター)が取り付けられており、計測結果を試料表面上に投影する。

カメラレンズ取り付け台には、あおりを調整する機構とカメラレンズの位置を調整する機構を持っている。CCDカメラとズームレンズの位置関係は、あおり調整機構によって、計測結果投影用プロジェクタに合わせて調整する。計測結果投影用プロジェクタで投影する視野とCCDカメラで撮影する視野をカメラ・レンズの位置の調整、およびレンズのズームの調整によって同一にする。このように調整することによって、CCDカメラの各画素に対応する視線と計測結果投影用プロジェクタの各画素に対応する投影線を一致させる。

計測結果投影用プロジェクタから投影された画像のうちハーフミラーで反射される成分を吸収し、また、外部からハーフミラーを透過してCCDカメラに入る光を遮断する黒色の遮光板をカメラからハーフミラーを挟んで反対側に設置する。また、計測結果投影用プロジェクタから投影された画像が遮光板にあたって反射する光がCCDカメラで撮影されないように、遮光板は、CCDカメラのレンズ面に対して角度を持たせて取り付ける。

このような装置にすることによって、形状計測用の格子は赤外線投影および撮影され、計測結果の画像は可視光で投影することができる。さらに、CCDカメラの各画素に対応する視線と計測結果投影用プロジェクタの各画素に対応する投影線が一致することにより、試料表面上の各計測点と同一の点に結果が投影されることになる。観察者は可視光しか見えないため、試料表面上に投影された格子は見えず、投影された計測結果だけを見ることができる。すなわち、試料表面上に計測結果が表示されることになる。

3-6.2 動作試験

図3.44に開発した計測結果投影装置を示す。格子投影用プロジェクタの光源にはハロゲンランプが使われており、可視光および近赤外光が出力される。格子投影用プロジェクタのレンズとカメラのズームレンズには、透過限界波長が760nmの赤外線透過フィルターを取り付ける。計測結果投影用プロジェクタには

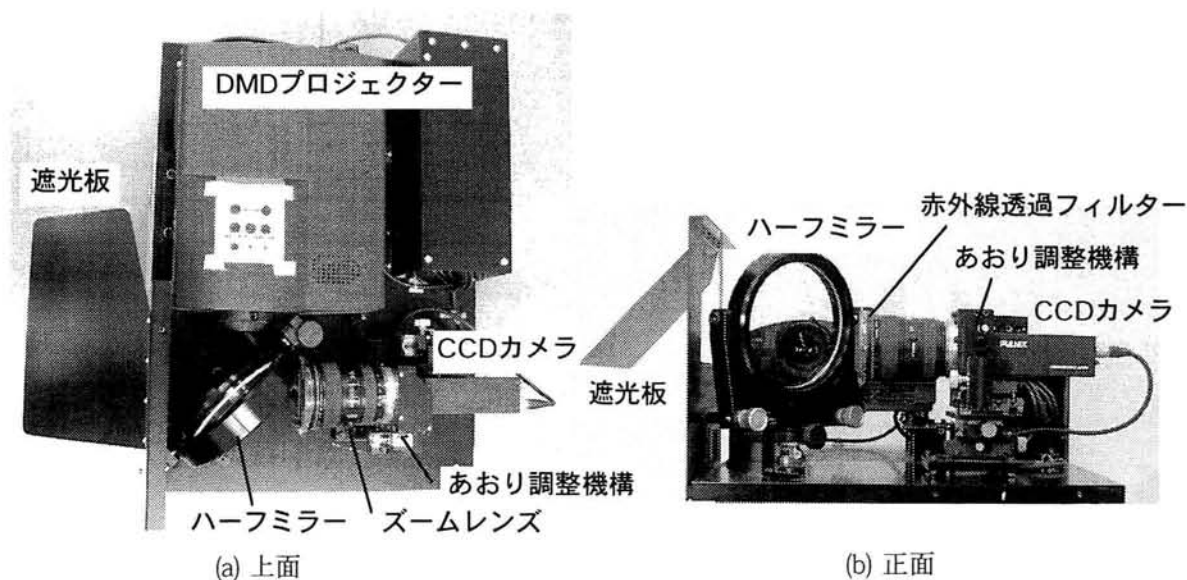


図 3.39 計測結果投影装置

DMD プロジェクターを用いる。このDMD プロジェクターは、内部でRGB フィルターが回転する構造となっており、可視光のみが投影されるために、赤外線遮断フィルターは取り付けの必要がない。ハーフミラーに厚さ 0.55mm の平板ガラスを用いる。

第3章3-5.2節で開発した実時間形状計測装置（図3.28）の格子投影用プロジェクターのレンズに赤外線透過フィルターを取り付け、カメラ部分を本装置と置き換えることによって動作試験を行う。格子投影装置から基準平板までの距離は3mとする。本実験では、赤外線フィルターおよび板ガラスによるハーフミラーによる光量低下のために CCD カメラに到達する光量が十分ではなかった。そのため、以下ではハーフミラーを用いずに、プロジェクターの上部にカメラを設置し、基準平板表面でプロジェクタの投影範囲とカメラの視野が一致するようにして実験を行う。このため、基準平板から距離が離れるにしたがって観測点と結果投影点の位置がずれる影響が出る。そこで試料はできるだけ基準平板の近くに設置することにする。

図3.40に石膏像の形状計測および計測結果の投影を行った結果を示す。図3.40(a)に格子が投影されている試料の写真を示す。この写真は、格子投影プロジェクタの赤外線透過フィルタを一時的に外して撮影した。図3.40(b)に計測結果の高さ分布画像が投影された試料の写真を示す。高さ分布が石膏像の形状に応じた位置に投影されていることがわかる。

次に、実時間形状計測および計測結果投影装置の人体形状計測への適用例を示す。図3.41(a)に、格子が投影されている人体上半身の写真を示す。図3.41(b)～(d)に、それぞれ上半身の正面と側面、背面の形状計測結果を実物上に投影した様子を示す。

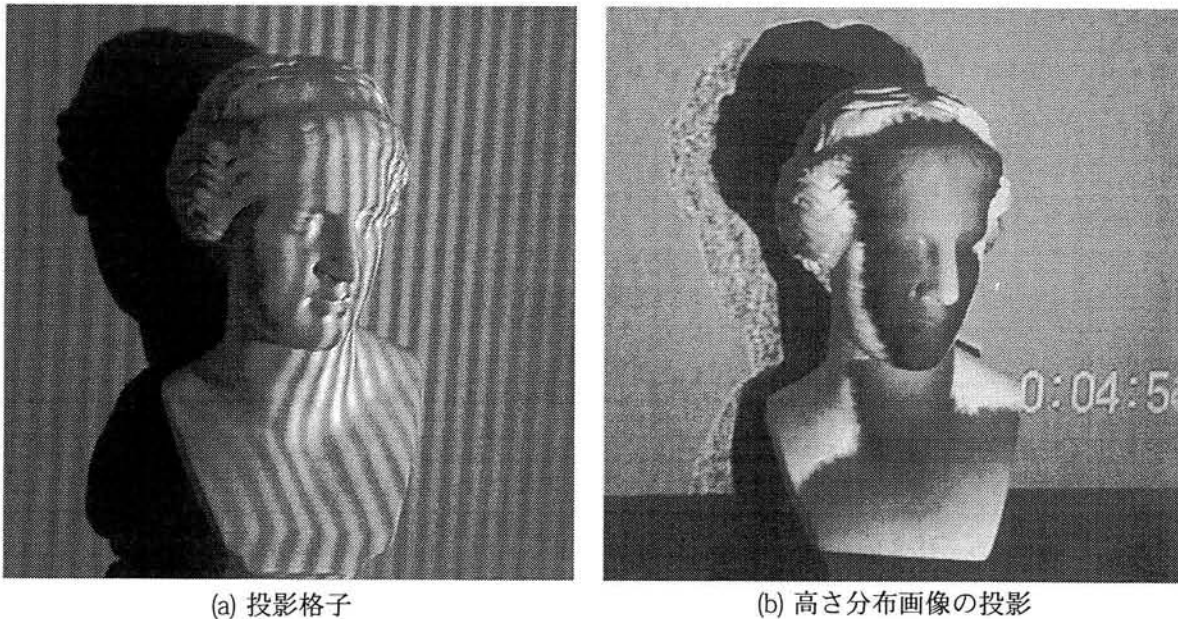
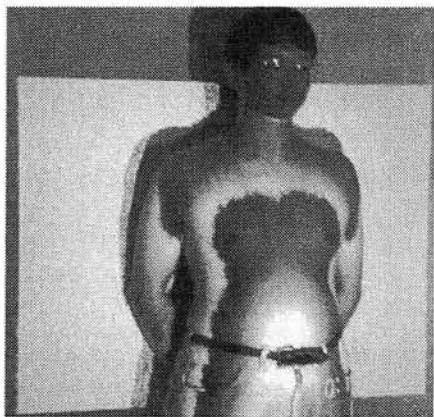


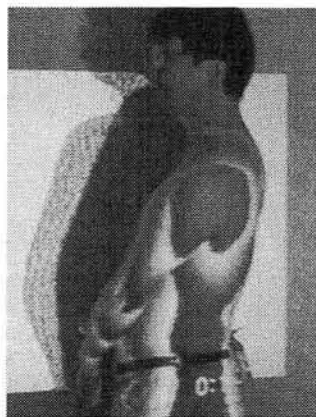
図3.40 計測結果投影装置の動作確認実験



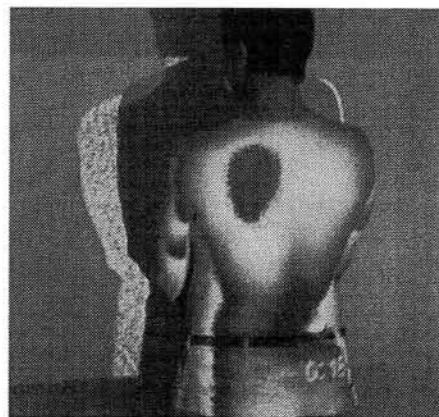
(a) 投影格子



(b) 高さ分布画像の投影
(上半身正面)



(c) 高さ分布画像の投影
(上半身側面)



(d) 高さ分布画像の投影
(上半身背面)

図 3.41 計測結果投影装置の人体形状計測への適用例

3-7 カラー格子を用いた位相接続

積分型位相シフト法を用いて形状計測を行う場合に得られる位相値は、等高線1本ごとに $0 \sim 2\pi$ の値の繰り返しとして得られる。したがって、複数本の等高線が得られる場合には、得られる位相値と物体の高さが1対1に対応しない。得られる位相分布に対して位相接続を行えば、位相値と高さに1対1の対応をつけることができる。

そこでここでは、第2章2-5.1.1節で述べた2通りのピッチの格子を用いて位相接続を行う手法を応用して実時間で各画素ごとに位相接続を行うことができる手法を開発し、その有効性を確認する。2通りのピッチの格子として、ピッチの比が3:4のものを用いる。これらをも色分けして同一フィルム面に作成し、同時に物体に投影すれば、前者を3フレームの撮影時間で1周期分位相シフトさせ、後者を4フレームの撮影時間で1周期分位相シフトさせることができる。本節では、3フレームの画像から位相値を求める積分型位相シフト法の新しい手法として、白黒比が1:2の矩形波状の輝度分布を持つ格子を用いる手法も新たに開発する。

3-7.1 白黒比1:2の矩形波格子を用いた積分型位相シフト法

投影する格子は、図3.42に示すように、1ピッチを白黒比1:2に分けた矩形波状の格子を用いる。ここで白の部分（高輝度部分）の中央を位相0の位置と定義する。

この格子を、1/30秒間（CCDカメラの1フレームの撮影時間）に1/3ピッチの速度で等速でシフトさせながら計測物体に投影する。その格子が投影された物体をCCDカメラで撮影する。CCDカメラは1/30秒間に受けた光の強度を電荷として貯え、それを輝度として画像に変換する。そのため得られる画像は画素毎に、1/30秒間シフトされた格子の輝度の積分値が得られる。図3.43に、CCD上のある1画素における時間に対する輝度の変化を示す。図3.43(a)~(d)にそれぞれ、初期位相 θ の値が $\theta=0$ 、 $0 \leq \theta < \pi/3$ または $5\pi/3 \leq \theta < 2\pi$ 、 $\pi/3 \leq \theta < \pi$ 、 $\pi \leq \theta < 5\pi/3$ における時間と輝度の関係を示す。ここで、初期位相とは、時刻 $t=0$ における格子の位相値のことであり、0から 2π の値を持つとする。

図3.43(b)~(d)におけるA, B, Cは、CCDカメラで撮影される画像1フレーム毎の輝度の時間積分値を表わす。ここで I_0 と I_1 は、それぞれ投影格子の最大輝度と最低輝度を表し、 θ は初期位相、 T は1フレー

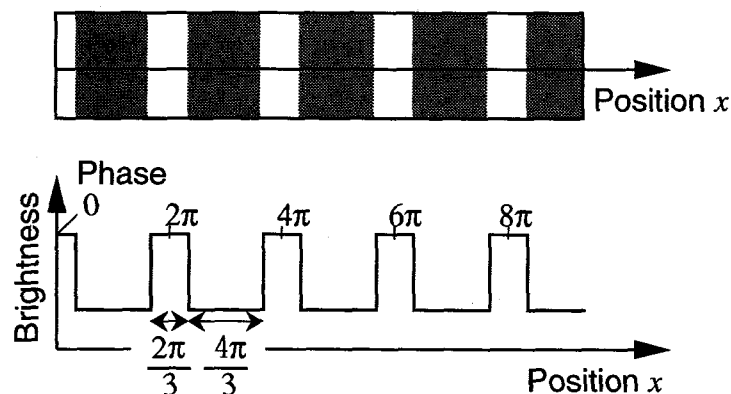
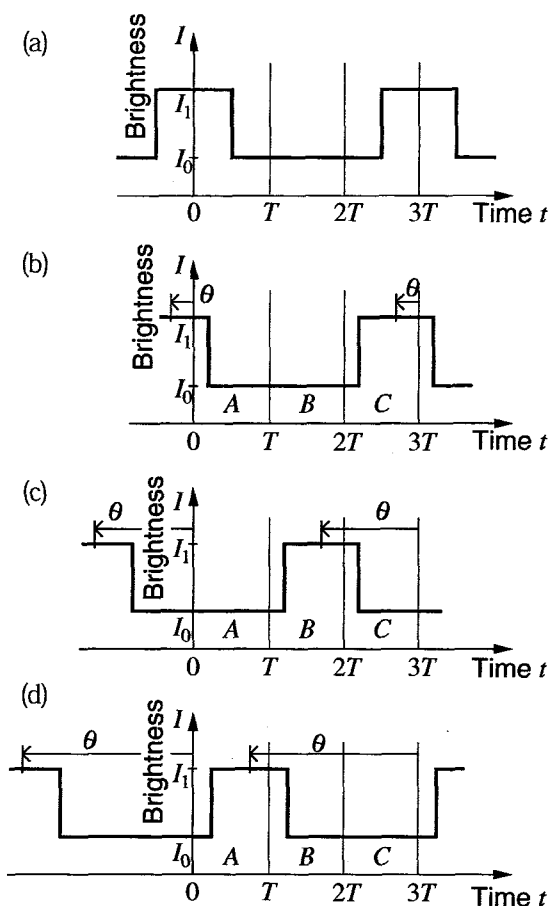


図3.42 白黒比1:2の矩形波状の格子の輝度分布



(a) $\theta=0$, (b) $0 \leq \theta < \pi/3$ または $5\pi/3 \leq \theta < 2\pi$ (c) $\pi/3 \leq \theta < \pi$ (d) $\pi \leq \theta < 5\pi/3$

図 3.43 CCD 上のある 1 画素における時間に対する輝度の変化

△撮影するのに要する時間を表す. A, B, C の値は, θ の値に応じてそれぞれ次式(3.36)~(3.38)のように得られる.

(1) $0 \leq \theta < \pi/3$ または $0 \leq \theta < \pi/3$ の場合 (B が最小の場合)

$$\begin{aligned} A &= I_0 T \\ B &= \frac{3T}{2\pi} \left(\theta - \frac{\pi}{3} \right) (I_1 - I_0) + I_0 T \\ C &= \frac{3T}{2\pi} \left(-\theta + \pi \right) (I_1 - I_0) + I_0 T \end{aligned} \quad (3.36)$$

(2) $\pi/3 \leq \theta < \pi$ の場合 (A が最小の場合)

$$\begin{aligned} A &= \frac{3T}{2\pi} \left(\theta - \pi \right) (I_1 - I_0) + I_0 T \\ B &= \frac{3T}{2\pi} \left(-\theta + \frac{5\pi}{3} \right) (I_1 - I_0) + I_0 T \\ C &= I_0 T \end{aligned} \quad (3.37)$$

(3) $\pi \leq \theta < 5\pi/3$ の場合 (C が最小の場合)

$$\begin{aligned} A &= \frac{3T}{2\pi} \left(-\theta + \frac{\pi}{3} \right) (I_1 - I_0) + I_0 T \\ B &= I_0 T \\ C &= \frac{3T}{2\pi} \left(\theta + \frac{\pi}{3} \right) (I_1 - I_0) + I_0 T \end{aligned} \quad (3.38)$$

これらの式より初期位相 θ は,

$$\begin{aligned}
 \theta &= \frac{\pi}{3} \cdot \frac{C-A}{C+A-2B} && (\text{when } B = \min(A, B, C)) \\
 \theta &= \frac{\pi}{3} \cdot \frac{B-C}{B+C-2A} + \frac{2\pi}{3} && (\text{when } A = \min(A, B, C)) \\
 \theta &= \frac{\pi}{3} \cdot \frac{A-B}{A+B-2C} + \frac{4\pi}{3} && (\text{when } C = \min(A, B, C))
 \end{aligned}
 \tag{3.39}$$

と求めることができる。

上記の式(3.39)を用いて位相値を高速に算出するためには、入力データ数3、出力データ数1の位相算出テーブルを作成すればよい。画像の1画素を表すビット数を8ビットとした場合の三次元位相算出テーブルを図3.44に示す。(A, B, C)の値の組み合わせごとに、式(3.43)をあらかじめ計算しておき、点(A, B, C)における値として位相算出テーブルを作成する。

図3.45に、白黒比1:2矩形波格子による積分型位相シフト法を用いた位相解析シミュレーション結果を示す。図3.45(a)~(c)は、それぞれ格子を連続的に位相シフトして撮影された1~3フレーム目の画像を表す。図3.45(d)は、図3.45(a)~(c)から式(3.43)を用いて得られた位相分布が像を表す。白黒比が1:2の矩形波を積分型位相シフト法により連続的に位相シフトさせながら撮影すれば、図3.45(a)~(c)に示すような輝度分布を持つ画像が得られる。このように、本手法で白黒比1:2矩形波格子の位相分布が得られることがわかる。

次に、白黒比1:2矩形波格子による積分型位相シフト法を用いた実際の物体の形状計測例を図3.46に示す。連続的に位相シフトさせながら撮影した連続する3フレームの画像を図3.46(a), (b), (c)に示す。これら

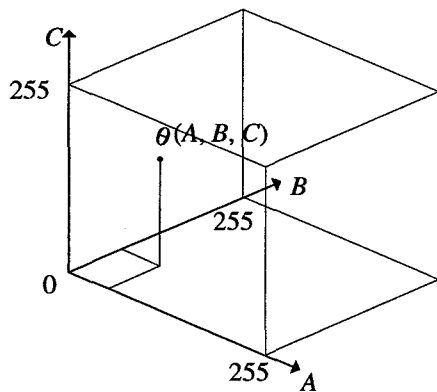


図 3.44 三次元位相算出テーブル

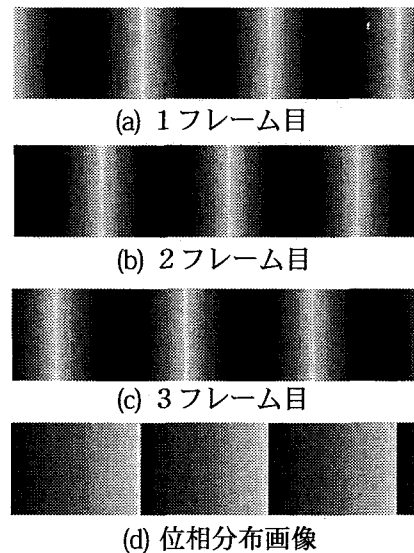


図 3.45 白黒比1 : 2 矩形波格子による積分型位相シフト法を用いた位相解析シミュレーション結果

の画像から求めた位相分布画像を図3.46(d)に示す。また、あらかじめ同じ方法により得ていた基準板(平板)の位相分布を図3.46(e)に示す。図3.46(d)の画像と図3.51(e)の画像から求めた位相差分布画像を図3.46(f)に示す。物体の高さ分布画像が得られることがわかる。ただしこの場合は位相接続を行っていないため、高さ分布を表す位相差分布画像は $0 \sim 2\pi$ の繰り返しとなる。

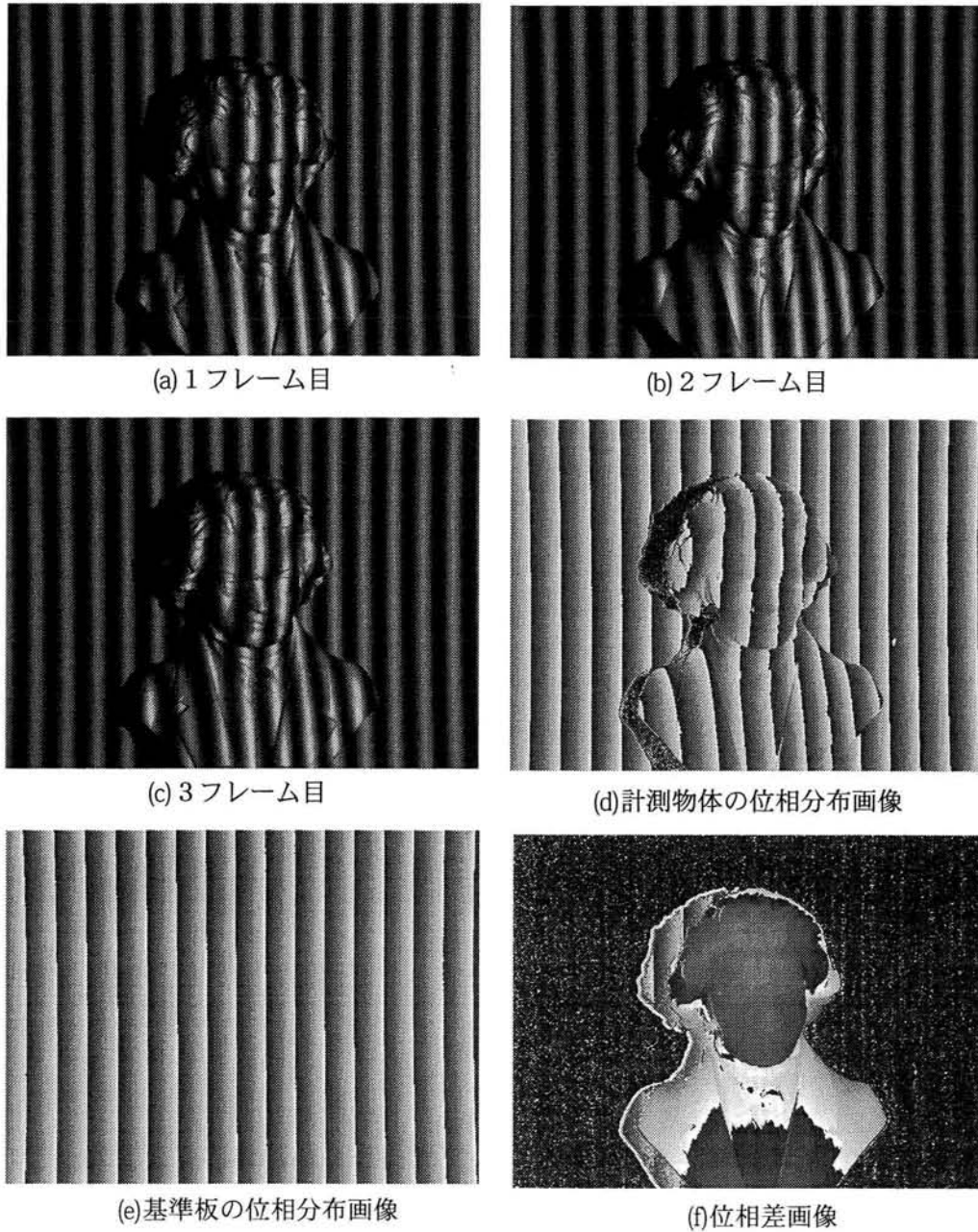


図 3.46 白黒比 1 : 2 矩形波格子による積分型位相シフト法を用いた物体の形状計測例

3-7.2 2通りのピッチの格子を用いた位相接続方法

図3.47に投影する2通りのピッチの格子の輝度分布を示す。2通りのピッチの格子をそれぞれ白黒比1:2の赤格子と、白黒比1:1の青格子とする。赤格子のピッチは青格子のピッチの3/4とする。これらの2色の格子を同一のフィルム上に記録することで同時に投影することができる。

白黒比1:2の赤格子の位相分布は、第3章3-7.1節で述べた位相解析手法により、3フレーム分の画像から得ることができる。白黒比1:1の青格子の位相分布は、第3章3-4.3.1節で述べた手法で4フレーム分の画像から求めることができる。

図3.48に赤格子の連続化前の位相分布 θ_1 と、青格子の連続化前の位相分布 θ_2 、赤格子の連続化後の位相分布 ϕ_c を示す。 $0 \leq \phi_c < 8\pi$ の範囲では、式(3.40)によって ϕ_c を求めることができる。

$$\begin{aligned} \phi_c &= 4(\theta_1 - \theta_2) && (\text{when } \theta_1 \geq \theta_2) \\ \phi_c &= 4(\theta_1 - \theta_2 + 2\pi) && (\text{when } \theta_1 < \theta_2) \end{aligned} \tag{3.40}$$

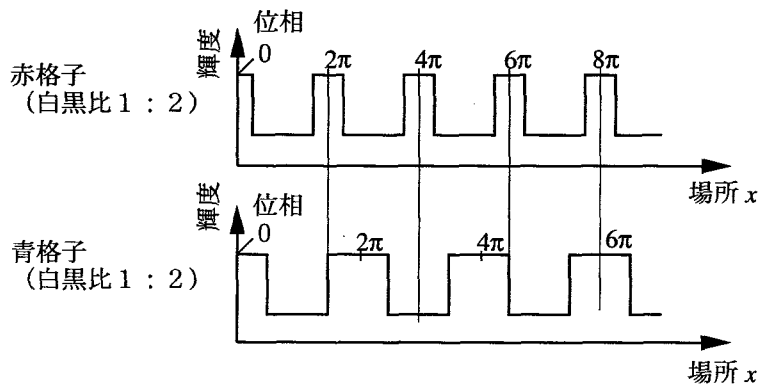


図 3.47 2通りのピッチの格子の輝度分布

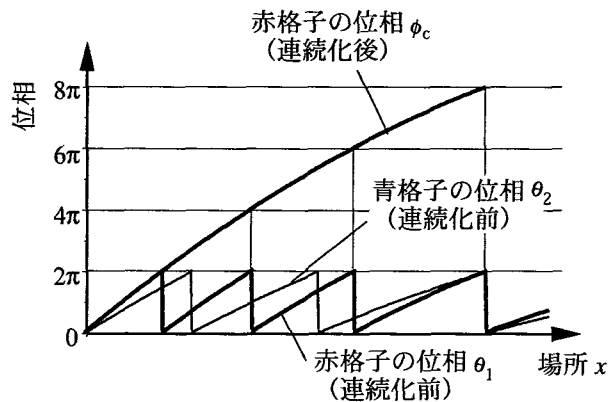


図 3.48 連続化前後の位相分布

3-7.3 実時間位相接続回路

前節で述べた2通りのピッチの格子を用いた位相接続方法を実時間で実現するためのリアルタイム位相接続回路のブロック図を図3.49に示す。図3.49(a)と(b)は、それぞれ白黒比1:2および白黒比1:1の矩形波格子による積分型位相シフト法位相解析回路部分である。図3.49(c)は、それらを組み合わせて連続化された位相差分布を出力するリアルタイム位相接続回路全体を示す。

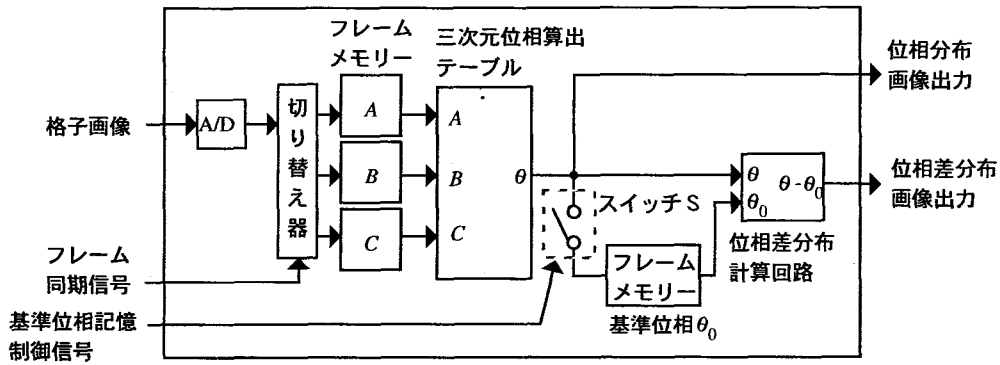
まず、図3.49(a)について説明する。これは第3章3-7.1節で述べた白黒比1:2の矩形波格子を用いた積分型位相シフト法の回路である。入力された格子画像はA/D変換された後、1フレーム撮影ごとに発生するフレーム同期信号によってフレームメモリーA～Cに順に格納される。フレームメモリーA～Cに格納された画像は、三次元位相算出テーブルによって、即座に位相値に変換され、位相分布画像として出力される。フレームメモリーA～Cは、1フレームごとに順次更新されるので、結果的に毎フレームごとに位相分布画像が出力されることになる。物体の形状または変形の計測の前には、まず、基準板(平面)の位相分布を求める。そのために、まず基準位相記憶制御信号によってスイッチSをONにし、その時点での位相分布画像をフレームメモリーに記憶する。次に計測物体を設置し、位相差分布算出回路により、毎フレームごとに位相分布画像と基準位相の差が算出されるので、結果的に毎フレームごとに位相差分布画像(すなわち高さ分布画像)が出力されることになる。

次に、図3.49(b)について説明する。これは白黒比が1:1の矩形波状格子をにより積分型位相シフト法を用いて位相差分布画像を求める位相解析回路である。これは、第3章3-5.1節の図3.27(b)で示した実時間位相解析ボードのブロック図と同じものである。この回路を用いれば、第3章3-5.1節で述べた動作と同様に毎フレームごとに位相分布画像および位相差分布画像が出力される。

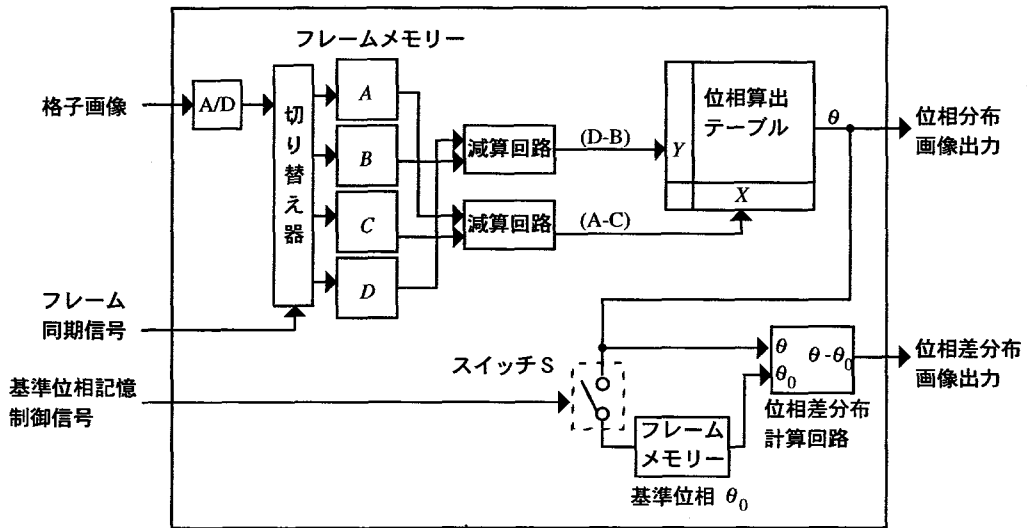
最後に、図3.49(c)について説明する。上記の2つの回路を組み合わせることによって実時間で位相接続画像が得られる回路のブロック図を示す。図3.49(a)と(b)で示した回路の出力をそれぞれ θ_1 と θ_2 とする。式(3.40)を求めるテーブルを作成し、 θ_1 と θ_2 を入力すれば、位相接続された値 ϕ_x を実時間で得ることができるようになる。したがって、図3.47に示すような2色のカラー格子を投影し、それを撮影した画像をこの回路に入力することによって、毎フレームごとに連続化された位相差分布画像が出力されることができ

3-7.4 カラーの格子を用いた位相の連続化実験

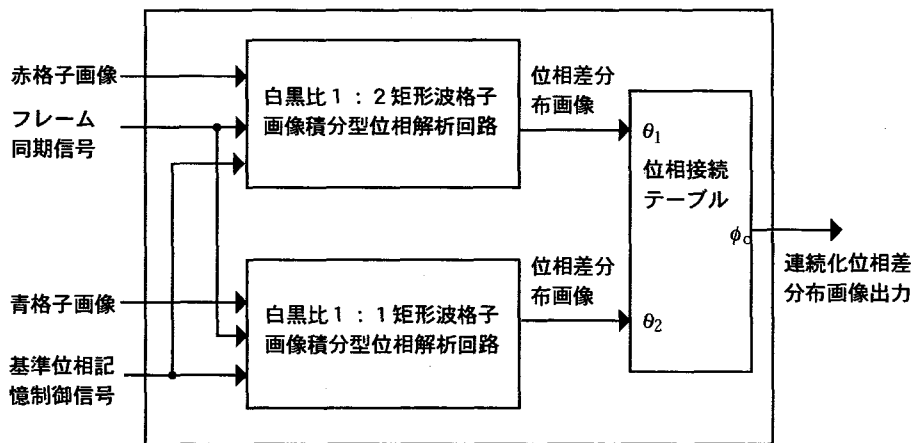
図3.50に、カラーの格子を用いて位相の連続化を行った実験結果を示す。矩形波状の白黒比1:2の格子と矩形波状の白黒比1:1の格子をそれぞれ青色と赤色にして同一のカラーフィルムに焼き付けて物体上に投影した。それぞれのピッチの比は、第3章3-7.3節で述べたように3:4とした。物体上に投影された青格子と赤格子をカラーCCDカメラで撮影し、それぞれの色成分ごとに分離した画像を図3.50(a)と(b)に示す。図3.50(c)と(d)には、それぞれの格子の位相値と基準板の位相値との差の分布画像(位相差分布画像)を示す。図3.50(c)と(d)にの2つの画像より、3-7.3節で述べた式(3.40)に示す方法によって位相の連続化を行った結果として得られた連続化後の位相分布画像を図3.50(e)に示す。図3.50(e)の連続化後の位相分布は、物体の高さ分布を表しており、連続化前の位相分布と比べて4倍の分解能を持つ。なお、第3章3-7.3節で述べた実時間位相接続回路は製作していないため、位相分布算出はコンピュータを用いて行った。



(a) 白黒比 1 : 2 矩形波格子による積分型位相シフト法位相解析回路部分

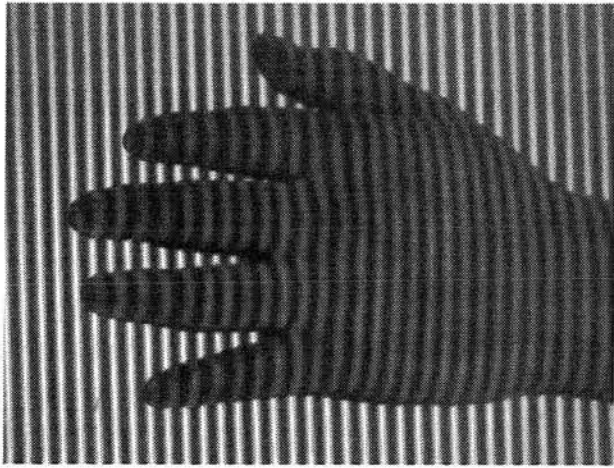


(b) 白黒比 1 : 1 矩形波格子による積分型位相シフト法位相解析回路部分

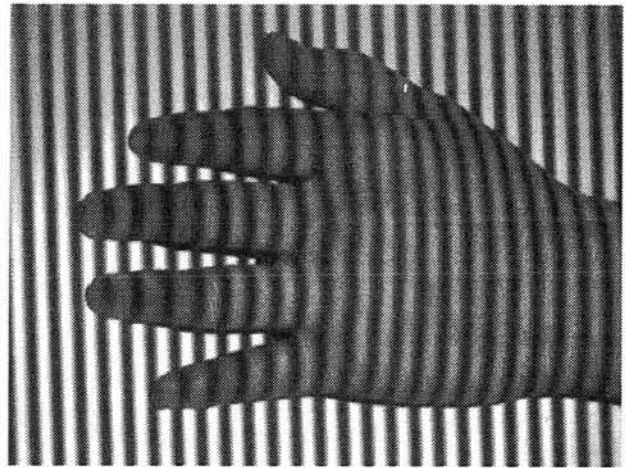


(c) リアルタイム位相接続回路全体

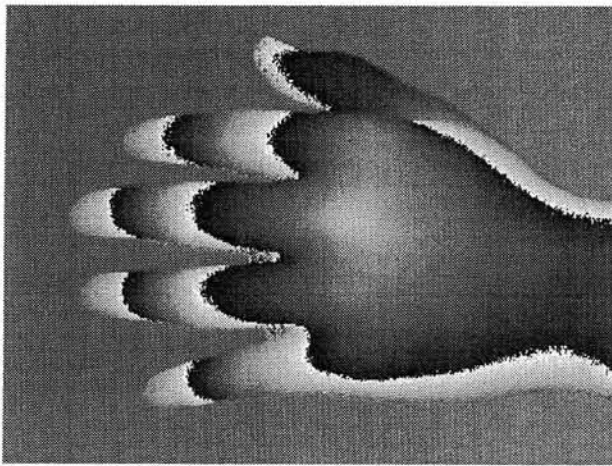
図 3.49 リアルタイム位相接続回路ブロック図



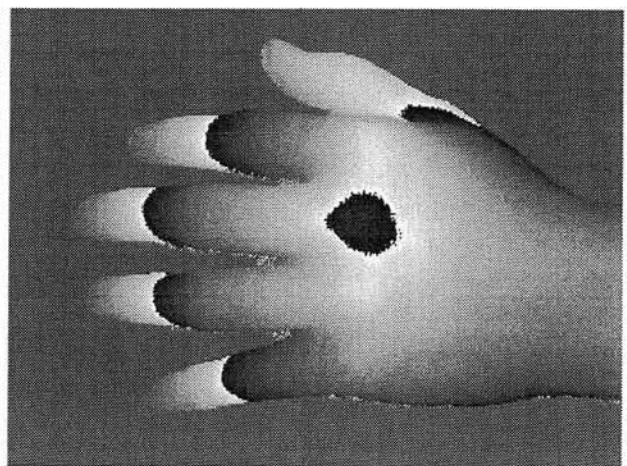
(a) 青格子画像（白黒比 1:2）



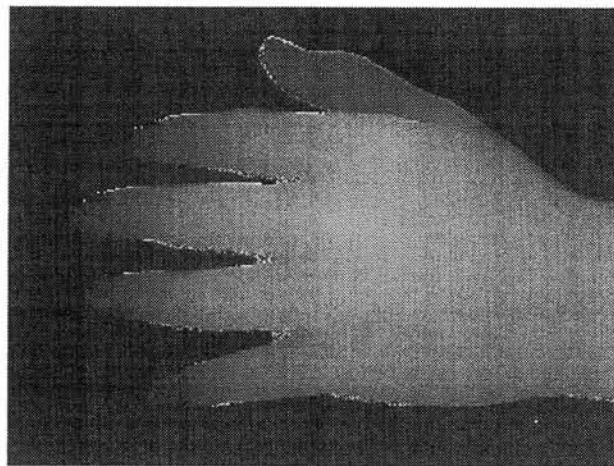
(b) 赤格子画像（白黒比 1:1）



(c) 青格子位相差分布画像



(d) 赤格子位相差分布画像



(e) 連続化後の位相分布画像

図 3.50 手の形状計測実験

3-8 高速度カメラへの適用

積分型位相シフト法による形状計測の高速度カメラへの適用例を示す。人体の運動時の形状変化を計測するには通常のビデオレートの数倍から10倍程度の撮影速度が必要である。ここでは、毎秒125フレーム撮影できる高速度カメラを用いて、歩行時の足先の形状変化の計測を試みる。

3-8.1 計測装置と計測対象

図3.51(a)に高速度カメラを用いた形状計測装置の構成を示す。カメラには高速読み出しができるCCD素子を用いた高速度カメラ（フォトロン、FASTCAM-neuest500S）を用いる。毎秒125フレーム撮影し、撮影された画像は画像メモリに格納される。画素数は512画素×480画素で、約2秒間撮影する。格子投影装置には、第3章3-5.2節の図3.29で開発した携帯型実時間形状計測装置を用いる。この格子投影装置は、通常の毎秒30フレームのカメラ用に作られており、格子の移動速度は微調整は可能であるが、大きく変更することができない。そのため、フィルム上の格子のピッチを通常の1/4 (0.125mm) にすることによって、4/125秒間に1ピッチの位相シフトが行えるようにする。格子のピッチが小さくなる分、高速度カメラにズームレンズを用いることによって通常より狭い領域を拡大して撮影するようにする。

計測対象物は人間の足先とする。、図3.51(b)に形状計測装置と試料の写真を示す。立っている状態からかかとをもち上げて歩行を開始する時の足先の形状および変形計測を行う。

3-8.2 計測結果

図3.52に計測結果を示す。図3.52(a)と(b)は、それぞれ基準板の格子画像とその位相分布である。図3.52(c)と(d)は、それぞれ歩行開始直後とその0.192秒後の格子画像である。ここでは、撮影開始後73フレーム目を歩行開始前とし、97フレーム目を歩行開始後としている。その差は24フレームあるので、その時間差は0.192秒となる。図3.52(e)と(f)は、それぞれ歩行開始前後の位相分布である。図3.52(g)と(h)は、それぞれ歩行開始前後の位相分布と図3.52(b)の基準板の位相分布との位相差の分布であり、これらが足先の

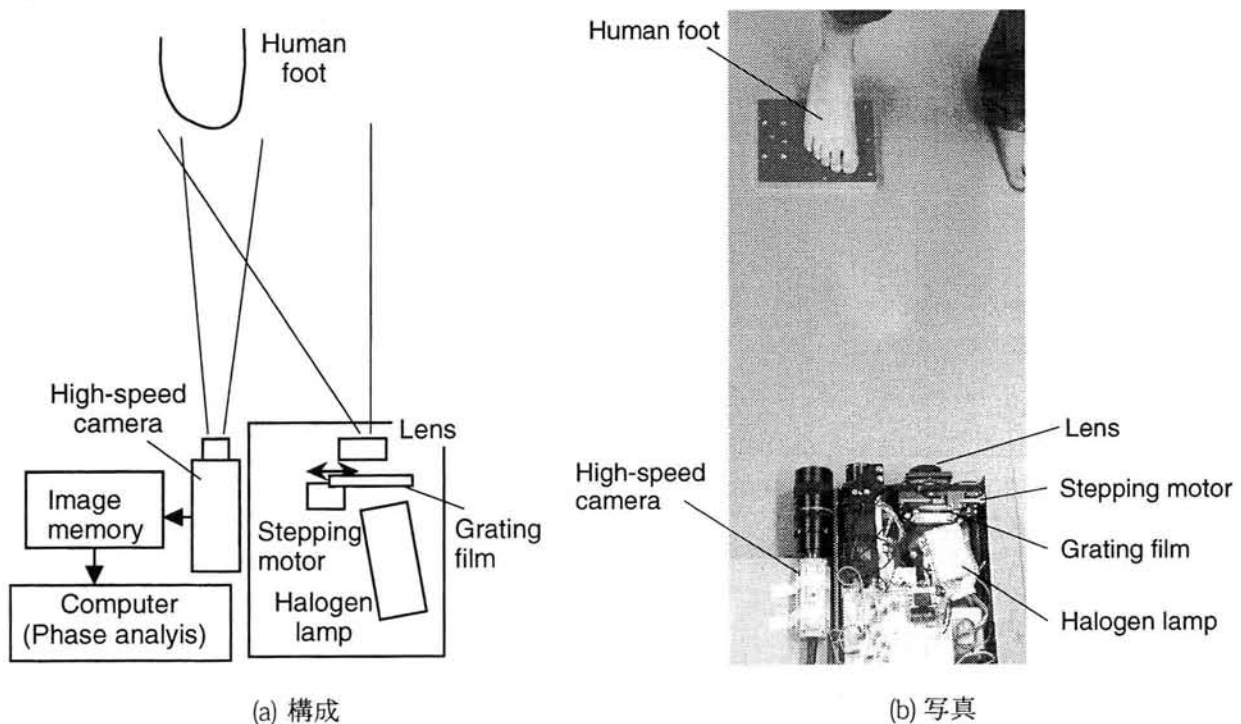


図 3.51 高速度カメラを用いた形状計測装置

形状を表している。図3.52(i)は、図3.52(g)と(h)の差の分布であり、これは変形量の分布を表している。指先はほとんど変形はなく、甲の部分は指から離れるにしたがって（画像では上部に向かうにつれて）大きく変形しているのが分かる。これはかかとを持ち上げていく動作と一致している。

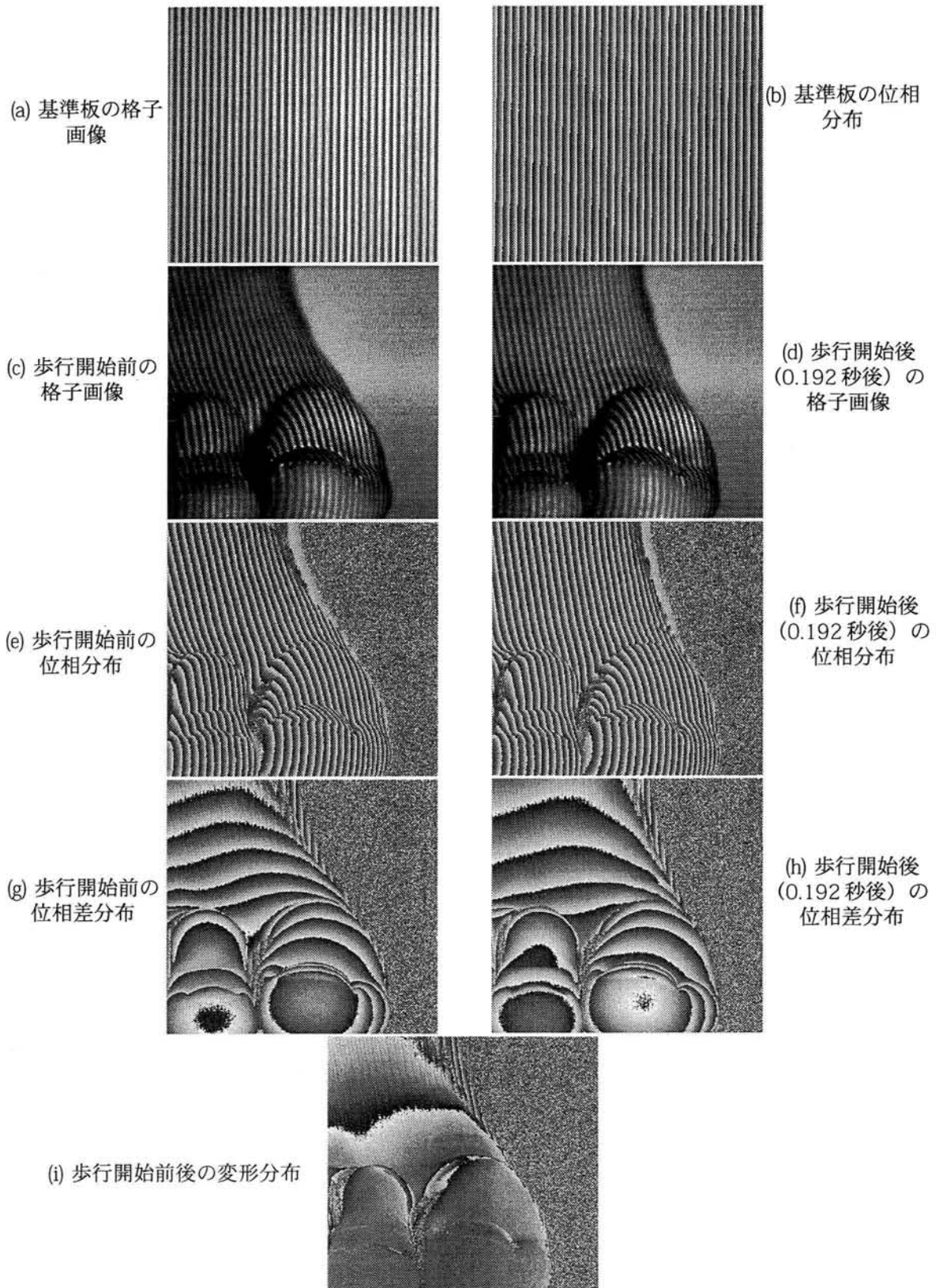


図 3.52 歩行開始時の足先の形状計測結果

3-9 積分型位相シフト法のマイクロメータオーダー微小変形計測への適用

ここでは、積分型位相シフト法をマイクロメータオーダーの微小変形計測に適用する。第3章3-6.1節で開発した実時間位相解析ボードをレーザー干渉じま投影による形状計測装置に用いることにより、マイクロメータオーダーの微小変形計測を実時間で行うことができることを示す。

3-9.1 干渉じま投影装置を用いた微小形状変形計測システム

トワイマン・グリーン干渉計によって作られたレーザーの干渉じまを格子として投影する装置を作成する。その構造を図3.53に示す。He-Neレーザーから光ファイバで装置内に導かれたレーザー光はファイバの先端部から放射される。レーザー光はミラーM₁とM₂によって反射され、レンズによって平行光となる。その後ハーフプリズムで2つに分けられ、ミラーM₃で反射された成分とミラーM₄で反射された成分が干渉することで干渉じまが発生する。ミラーM₃は傾きの微調整ができる構造になっており、ミラーM₃の傾きを調整することで干渉じまのピッチと角度を調整することができる。また、ミラーM₄はピエゾステージの上に取り付けられており、ピエゾステージを等速度でミラー面の法線方向に連続的に移動させることにより、干渉じまの位相シフトを行うことができる。なお、本装置では持ち運びができる程度のコンパクトさを実現するために、ミラーM₁とM₂でレーザー光を反射させる構造としている。

図3.54に干渉じま投影装置を用いた微小形状変形計測システムを示す。図3.54(a)にその構成を示す。干

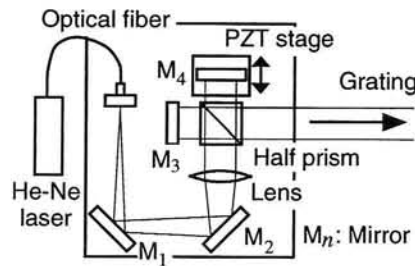


図 3.53 トワイマン・グリーン干渉計による干渉じま格子投影装置の構造

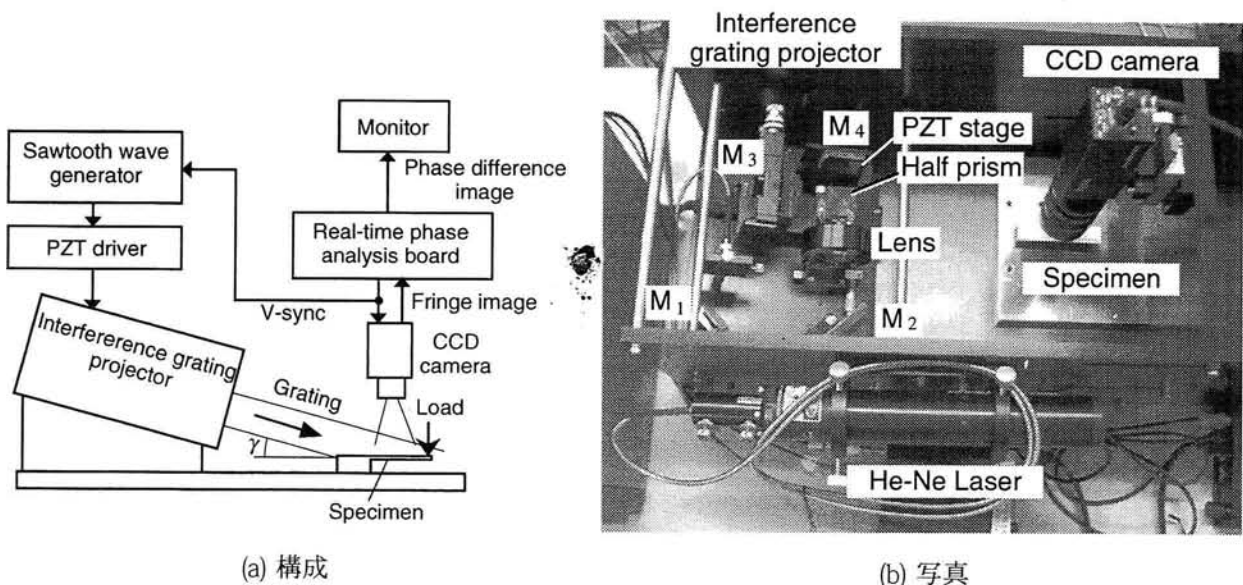


図 3.54 干渉じま格子投影による微小変形計測システム

干渉投影装置を傾けて斜め上方から試料に干渉縞を投影する。投影された干渉縞格子は、試料の上方からCCDカメラで撮影される。得られた画像は実時間位相解析ボードに入力され、位相解析がされてモニターに出力される。

また、干渉縞の位相シフトを行うためのピエゾステージの位置コントロール信号はノコギリ波形発生回路によって生成される。本実験で用いるピエゾステージは静電容量型の変位計が取り付けられておりその値によってフィードバック制御されているために、入力電圧とステージ位置は比例する。したがって、ノコギリ波状に変化する電圧をピエゾステージのドライバに入力することで一定速度でミラーが移動することになる。ピエゾステージの移動量には限界があるため、ピエゾステージのドライバに入力する電圧は、ある値に達すると、いったん0に下がり、その後ふたたび上昇を始めるように、周期的なノコギリ波状の電圧変化をさせる。その上昇開始のタイミングは、CCDカメラに入力する垂直同期信号を利用することにより、CCDカメラの4フレームごとの撮影タイミングと同期させる。積分型位相シフト法では、4フレーム撮影する場合の1フレーム目における格子の位相値を求めるため、もし同期させずにピエゾステージの位置をもとに戻すとそのたびに異なった初期位相が得られることになる。しかし、上記のようにCCDカメラの4フレームごとの撮影タイミングと同期させることにより常に同一の初期位相値を得ることができるようになる。

3-9.2 片持ち梁の微小変形計測実験

片持ち梁に荷重を加えて変形させた場合の変形量の分布を実時間で計測する。図3.55に試料の形状を示す。試料の固定端部分はベースプレートに固定する。片持ち梁には先端部に下向きに荷重を加えていく。変形前の干渉縞投影格子画像を図3.56(a)に示し、その位相分布を図3.56(b)に示す。これを基準位相として記憶しておき、変形後の干渉縞投影格子の位相分布との各画素ごとの差の分布を実時間位相解析ボードにて実時間で求める。ある荷重がかかった時点でその位相差の分布を図3.56(c)に示す。本実験の場合、干渉縞格子の投影方向とベースプレートのなす角度は15度であり、干渉縞投影格子のピッチは x 方向で $570\mu\text{m}$ であった。したがって、位相差 2π は $570\tan 15^\circ = 150\mu\text{m}$ の変形を意味し、輝度1あたりの変形量の分解能は $0.6\mu\text{m}$ となる。図3.56(c)に示す結果では、固定部分における変形量の標準偏差は $5.1\mu\text{m}$ であった。以上より、本計測法は実時間でマイクロメートルオーダーの変形分布を計測できることが確認できた。

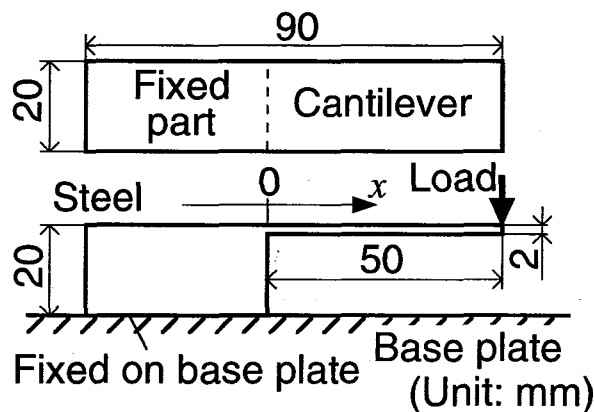
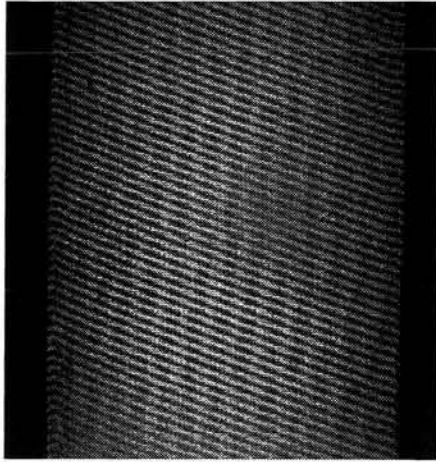
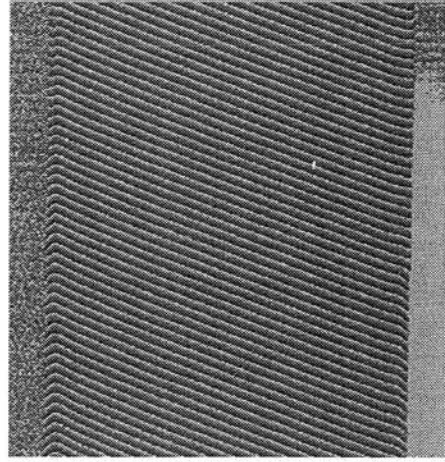


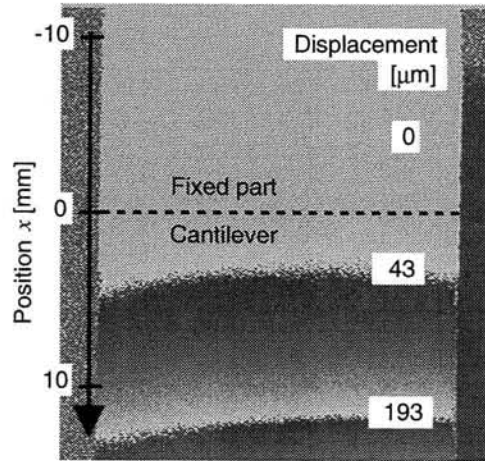
図 3.60 試料形状



(a) 変形前の干渉じま投影格子画像



(b) 変形前の干渉じま投影格子の位相分布



(c) 変形前後の位相差分布画像 (変形分布画像)

図 3.56 計測結果

3-10 積分型位相シフト法のナノメータオーダー微小変形計測への適用

ここでは、積分型位相シフト法をナノメータオーダーの微小変形計測に適用する。第3章3-6.1節で開発した実時間位相解析ボードをレーザー干渉じまの位相解析に用いることにより、ナノメータオーダーの微小変形計測が実時間で行えることを示す。

3-10.1 トワイマン・グリーン干渉計による微小変形計測の原理

トワイマン・グリーン干渉計による微小変形計測の光学系を図3.57に示す。ビームエキスパンダーで広げられた平行光はハーフプリズムによって参照ミラー方向と試料方向に分けられる。図3.57において、参照ミラーに入射した平行光の波面を W_0 とし、試料に入射した平行光の W_0 と仮想的に同位相な波面を W_0' とする。ハーフプリズムとレンズL間において、参照ミラーからの反射光の波面を W_1 とし、 W_1 と同位相の試料表面からの反射光の波面を W_2 とする。 W_1 と W_2 間の媒質中の屈折率を n 、 W_0 から試料表面までの距離を $h(x, y)$ とする。光の反射によって光路差が2倍になるので、 W_1 と W_2 での2光波の光路差 $\Delta d(x, y)$ は式(3.41)のようになる。

$$\Delta d(x, y) = 2nh(x, y) \tag{3.41}$$

光源の波長を λ とすれば、2つの光波の位相差 $\Delta\phi(x, y)$ は式(3.42)のように表すことができる。

$$\Delta\phi(x, y) = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta d(x, y) = \frac{4\pi}{\lambda} nh(x, y) \tag{3.42}$$

また、同一方向に進む2つの平行光の強度分布をそれぞれ $I_1(x, y)$ と $I_2(x, y)$ 、位相分布をそれぞれ $\phi_1(x, y)$ と $\phi_2(x, y)$ とする時、合成された強度分布 $I(x, y)$ は式(3.47)のように表すことができ、とくに、 $I_1(x, y) = I_2(x, y)$ の場合は式(3.43)のように表すことができる。

$$I(x, y) = I_1(x, y) + I_2(x, y) + 2\sqrt{I_1(x, y)I_2(x, y)} \cos(\phi_1(x, y) - \phi_2(x, y)) \tag{3.43}$$

$$I(x, y) = 2I_1(x, y) \{1 + \cos(\phi_1(x, y) - \phi_2(x, y))\} \tag{3.44}$$

したがって、 $\Delta\phi(x, y) = \phi_1(x, y) - \phi_2(x, y)$ とすると、式(3.42)と式(3.44)より、式(3.45)が得られる。

$$I(x, y) = 2I_1(x, y) \left(1 + \cos \frac{4\pi}{\lambda} nh(x, y)\right) \tag{3.45}$$

すなわち、CCDカメラ表面に試料表面を結像させるとき、参照面を平面とすれば試料の形状を意味する等高線が干渉じまとして得られることになる。この干渉じまの位相を求めることによって、 $h(x, y)$ を求めることができる。実際には、完全な平面参照ミラーを作成することは難しいため、この方法は、試料の変形量の分布を変形前後の位相の差から求める用途に用いられる。

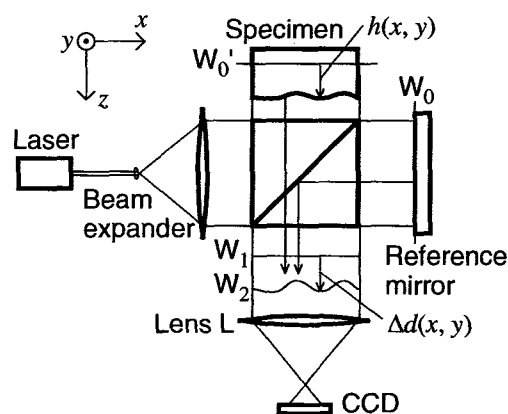


図3.57 トワイマン・グリーン干渉計による微小変形計測の原理

3-10.2 平面ミラーの実時間変形計測

3-10.2.1 計測装置

実験装置の構成を図3.58に示す。微小変形計測システムの写真を図3.59に示す。レーザーは波長633nmのHe-Neレーザーを用いる。平行に広げられたレーザー光は、ハーフプリズムによって試料と参照ミラーの2方向に分けられる。試料で反射された光線は再びハーフプリズムに入り、透過した成分がスクリーンに到達する。一方、参照ミラーで反射された光線も再びハーフプリズムに入り、反射された成分がスクリーンに到達する。スクリーン上では双方からの光が干渉し、試料と参照ミラーの平面度の差が干渉じまとなって現れる。この干渉じまをCCDカメラで撮影する。

ハーフプリズムは、ピエゾステージに取り付けられている。ピエゾステージを波長の1/2 (316nm)

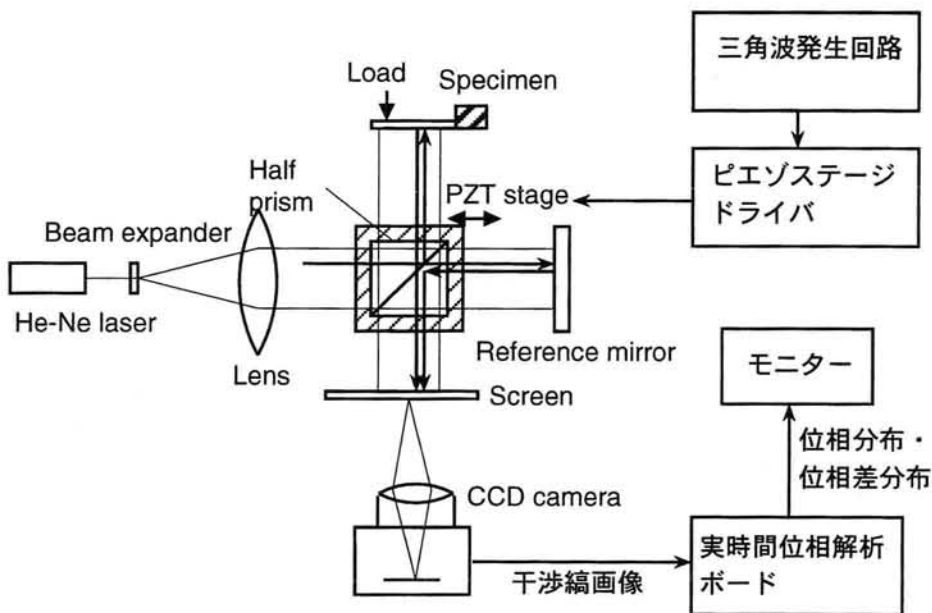
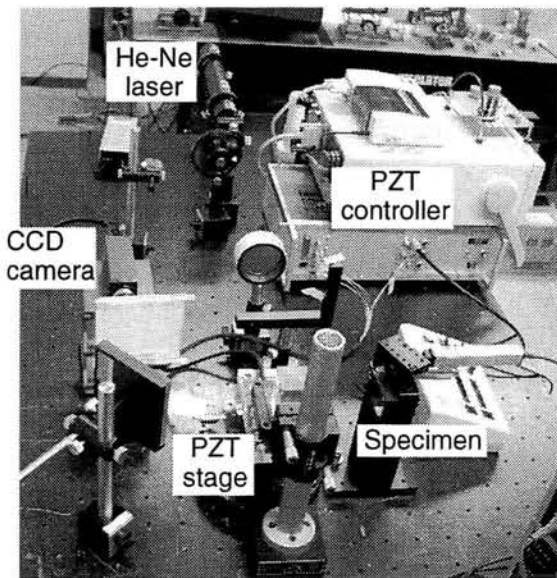
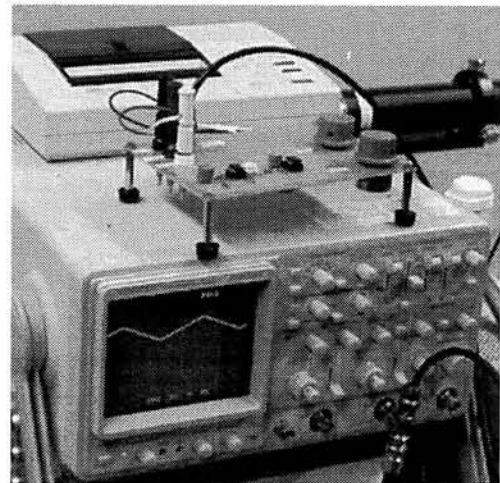


図 3.58 実験装置の構成



(a) システム全体



(b) 三角波発生回路

図 3.59 微小変形計測システム写真

だけ移動させることにより、干渉じまの位相を1周期分シフトすることができる。ピエゾステージの移動は、三角波発生回路から出力されるアナログ信号によりコントロールされる。本研究で行う実時間位相解析方法では、4枚画像を撮影する時間で1周期分の位相シフトを行う必要がある。そのため、ピエゾステージが4/30秒間で波長の1/2だけ移動するように、三角波発生回路の出力を調整する。このようにすることで、4/30秒間で干渉じまを連続的に1周期分位相シフトすることが可能になる。なお、高速度カメラを使用する場合でも、撮影速度に合ったピエゾステージの移動速度となるようなアナログ信号を三角波発生回路から出力することにより、高速撮影時の4フレーム分の時間で1周期の位相シフトを行うことが可能である。

試料は試料台に取り付けられている。試料台には電動のマイクロメータが取り付けられており、試料の一端を押すことにより変形させる。

3-10.2.2 計測結果

図3.60に変形前の干渉じまを示す。図3.60(a)~(d)は、位相シフトを行ったときの1/30秒おきの画像である。変形前であっても参照ミラーに対して試料が変形しているために、干渉じまが現れている。

実時間位相解析ボードは、位相値をメモリーに記憶して、新たな位相値とメモリー内の位相値の差（位相差）を出力することができる。本実験の場合、位相差は変形量を意味する。図3.61(a)と(b)にそれぞれ変形前と変形後の位相分布を示す。図3.62(a)は、変形前の位相値（図3.61(a)）を基準位相としてメモリーに記憶した場合の位相差である。変形していないので、一様な分布となっている。図3.62(b)は、ミラーを片持ち梁として変位を加えた場合の変形前後の位相差である。これが変形量を表している。変形量がレーザーの波長の1/2になる場合にちょうど 2π の位相差となるため、本実験の場合は位相差 2π で変形量316 [nm]を意味する。したがって、輝度分解能8ビットで画像解析を行う場合には $316/256=1.2\text{nm}$ の分解能となる。本実験では、時間的に変形量に変化していく様子が位相値として実時間でナノメートルオーダーの分解能で計測できることが確かめられた。

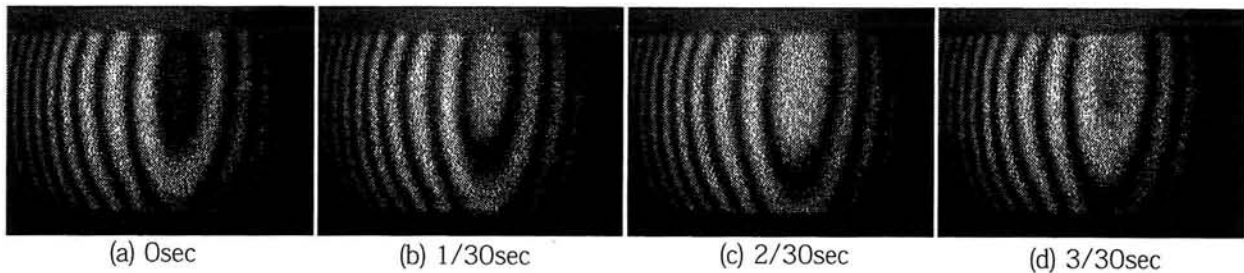
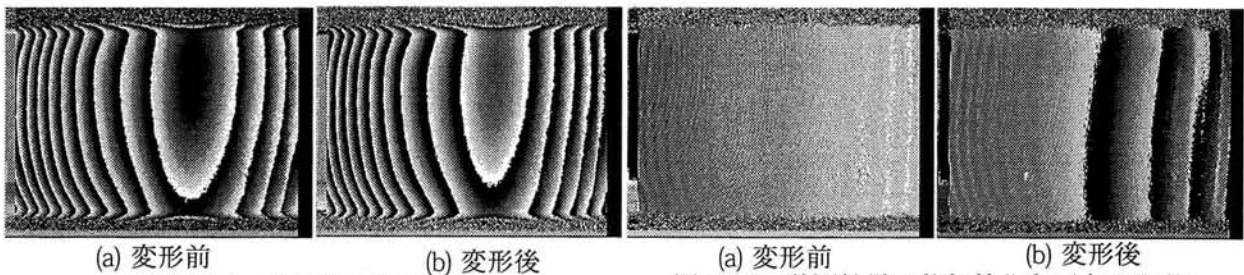


図3.60 位相シフト干渉じま画像



(a) 変形前 (b) 変形後
図3.61 干渉じま位相分布

(a) 変形前 (b) 変形後
図3.62 計測結果の位相差分布（変形分布）

3-10.3 加速度センサーの熱変形計測

3-10.3.1 実験方法

図3.63に示すトワイマングリーン干渉計を用いた実時間平面度計測システムにより、マイクロマシン技術を用いて製作された加速度センサーの熱変形計測を行う。干渉計に用いるハーフプリズムは、ピエゾステージ上に取り付けられている。ピエゾステージを波長の1/2 (316nm) だけ移動させることにより、干渉じまの位相を1周期分シフトすることができる。ピエゾステージの移動は、三角波発生回路から出力されるアナログ信号によりコントロールされる。本研究で行う実時間位相解析方法では、4枚画像を撮影する時間に1周期分の位相シフトを行う必要がある。そのため、ピエゾステージが4/30秒間に波長の1/2だけ移動するように、三角波発生回路の出力を調整する。すなわち、4/30秒間で干渉じまを連続的に1周期分位相シフトすることが可能になる。

図3.64に用いた加速度センサーの構造を示す。可動電極は4本のビームによって保持されている。本実験では図3.64(a)に示す可動電極上部に取り付けられている電極を取り外し、可動電極が外から見えるようにして可動電極表面の面外変形を計測する。図3.65に試料の写真を示す。図3.65に示すようにハンダごてを試料に接触させ通電することにより、試料に熱を加え、通電を止めることで自然冷却を行う。

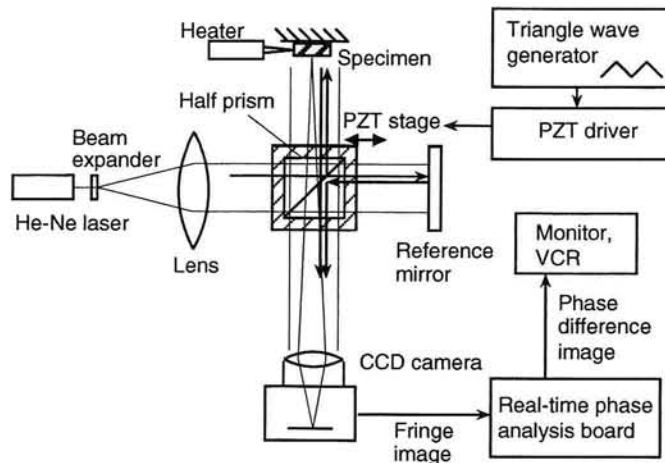


図 3.63 実時間平面度計測システム

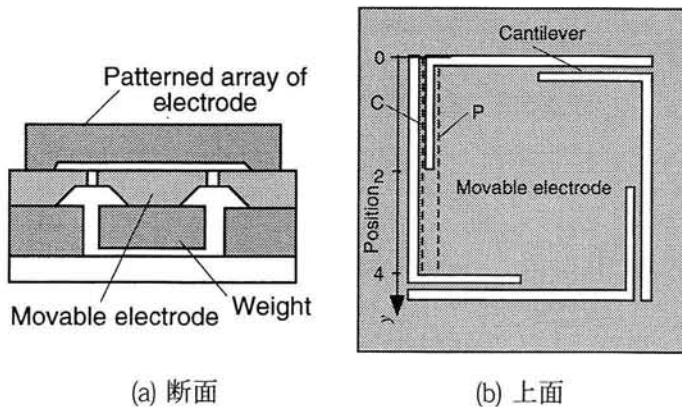


図 3.64 加速度センサー構造

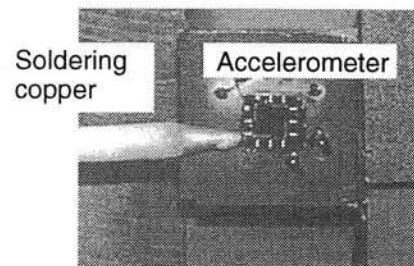
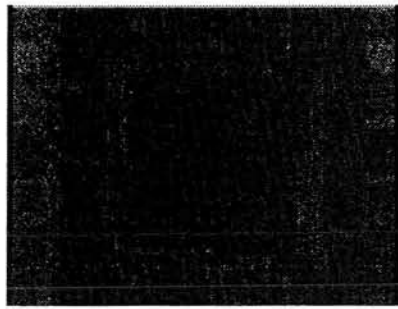
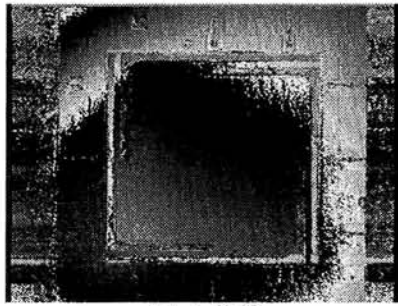


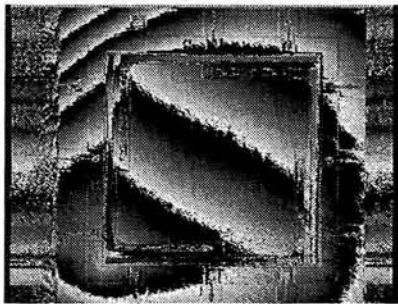
図 3.65 加速度センサーと加熱用ハンダごて



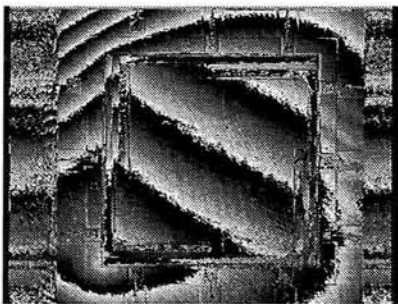
(a) 0分後



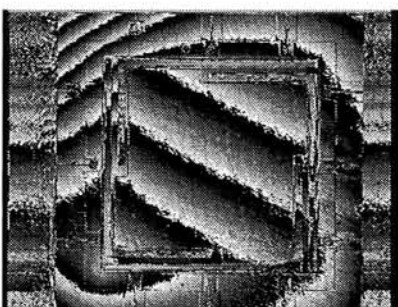
(b) 1分後



(c) 2分後

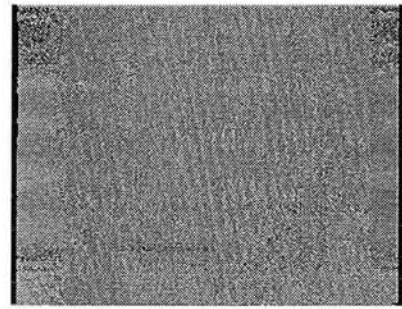


(d) 3分後

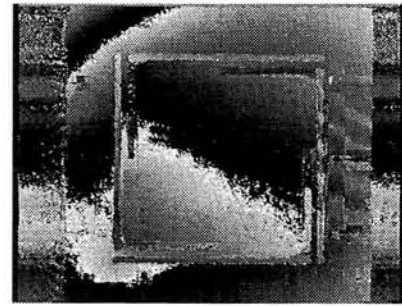


(e) 4分後

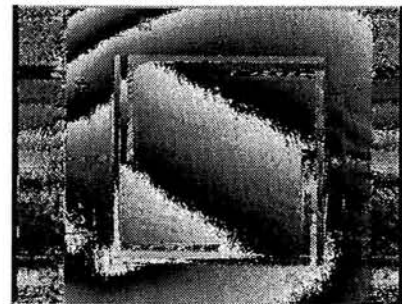
図 3.66 加熱時の変形分布計測結果



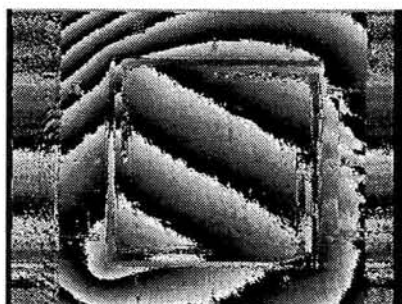
(a) 0分後



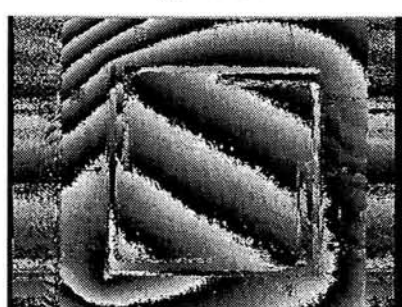
(b) 1分20秒後



(c) 2分40秒後



(d) 4分後



(e) 5分20秒後

図 3.67 冷却時の変形分布計測結果

3-10.3.2 計測結果

図3.66に本装置で計測された加熱時の変形分布計測結果を示す。図3.67に本装置で計測された冷却時の変形分布計測結果を示す。ここで、256段階の濃淡模様の1周期分が316nmの面外変形を表しており、輝度変化1段階が1.2[nm]を表している。

図3.68に可動電極を支えているビーム部および可動電極部の変形分布を示す。抽出位置は図3.64(b)に示された破線Cおよび破線Pの線上とする。図3.68(a)と(b)にそれぞれ加熱時と冷却時の変形分布を示す。ビーム部の方が可動電極部より大きく変形していることがわかる。

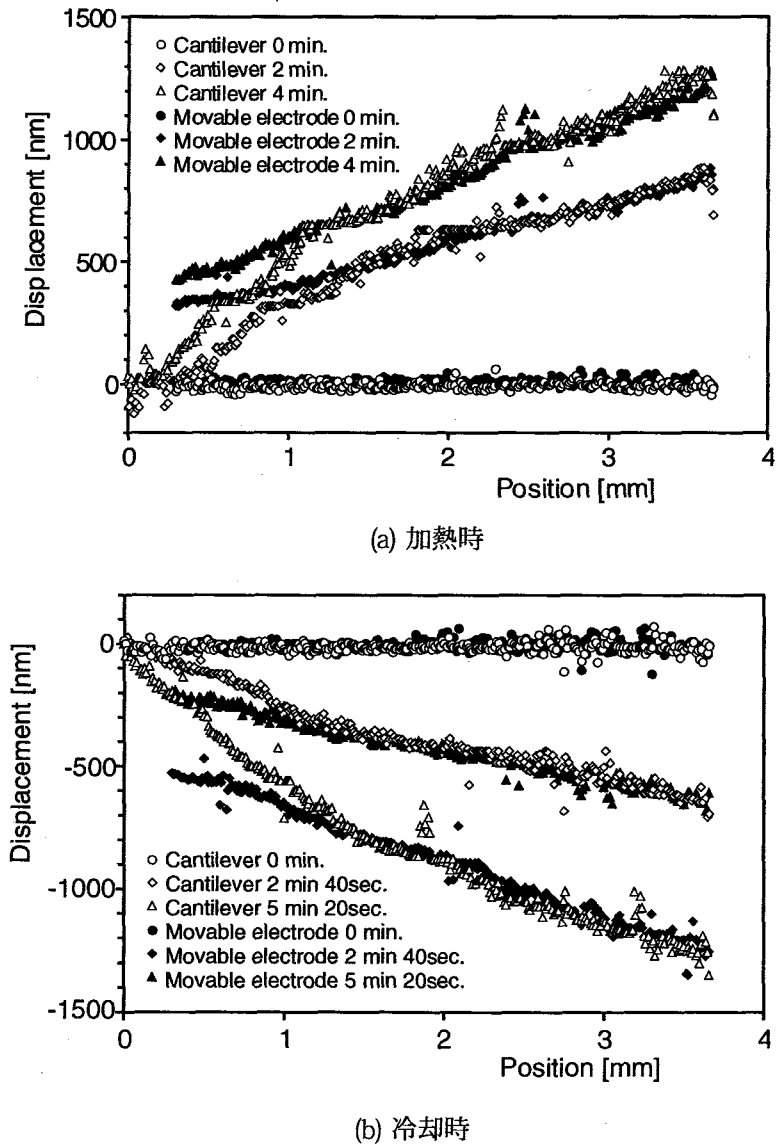


図3.68 断面の変形分布

3-11 おわりに

形状変形計測の高速化するために、高さ分布を表す等高線と変位分布を表す等変位線をそれぞれ位相で表現することにより実時間で高さ分布・変位分布を求めるシステムを開発した。新たに考案した積分型位相シフト法をハードウェア化した実時間位相解析ボードを開発した。それを用いた実時間形状計測システムを構築し、人体の形状計測に適用し、有効性を確認した。位相接続による高分解能化と高速度カメラへの適用を行った。さらに、実時間位相解析ボードの応用として、マイクロメートルオーダーの高さを持つ物体の形状や変形を計測することのできる干渉じま投影による微小形状変形計測装置を開発した。また、実時間位相解析ボードをトワイマン・グリーン干渉法に適用することによって、実時間でナノメートルオーダーの微小変形計測を行うことができるシステムを構築し、マイクロマシン技術によって製作された静電容量型の加速度センサーの熱変形分布を計測した。以下その詳細を述べる。

なお、本章で述べた積分型位相シフト法による実時間形状変形計測装置はほぼ次のようなスペックを持つ。

- (1) 実時間形状計測装置 (第3-5.2節) 計測物体サイズ: $(x)100\text{mm} \times (y)100\text{mm} \times (z)60\text{mm} \sim (x)1000\text{mm} \times (y)1000\text{mm} \times (z)600\text{mm}$, 分解能: $(x, y) 0.2 \sim 2\text{mm}$, $(z)0.1 \sim 1\text{mm}$, 有効計測点数: $(x)640 \times (y)480$ 画素, 計測速度: 30 回 / 秒。
- (2) 干渉縞投影装置を用いた微小変形計測装置 (第3-9.1節) 計測物体サイズ: $(x)5\text{mm} \times (y)5\text{mm} \times (z)0.1\text{mm} \sim (x)20\text{mm} \times (y)20\text{mm} \times (z)0.5\text{mm}$, 分解能: $(x, y) 0.01 \sim 0.04\text{mm}$, $(z)0.1 \sim 0.6\mu\text{m}$, 有効計測点数: $(x)640 \times (y)480$ 画素, 計測速度: 30 回 / 秒。
- (3) 干渉計による微小変形計測装置 (第3-10節) 計測物体サイズ: $(x)5\text{mm} \times (y)5\text{mm} \sim (x)20\text{mm} \times (y)20\text{mm}$, 分解能: $(x, y) 0.01 \sim 0.04\text{mm}$, $(z)1.2\text{nm}$, 有効計測点数: $(x)640 \times (y)480$ 画素, 計測速度: 30 回 / 秒。

3-11.1 等高線・等変位線の実時間表示と高精度化

まず、新たに開発した物体の形状が変化する際の同一の変化量を持つ部分を結ぶ等変位線画像を表示する手法について述べ、実際にそれらの手法をハードウェア化することによって実時間等高線・等変位線表示システムを開発した。

次に、等高線・等変位線を位相分布として求めることによって、高精度に物体の形状や変形量を計測することができることを述べた。その手法として、矩形波状の位相シフトされた投影格子と矩形波状の基準格子との相関値から位相を求める相関位相シフト法を開発した。この方法は矩形波状の格子を用いるため、物体表面の反射率の影響を受けにくいという特徴を持つ。

さらに、相関位相シフト法における積分の計算をCCDカメラの各画素上での時間積分として行わせる積分型位相シフト法を開発した。これはCCDの各画素が出力する輝度値は、各画素が電荷を蓄える時間内にその画素に到達する光の強度を時間積分した値となることを利用している。積分計算が自動的にCCDの画素上で行われるために、計算機で積分計算を行う必要がなくなるため、高速に位相分布を得ることができる。

3-11.2 積分型位相シフト法による実時間形状変形計測

この積分型位相シフト法のアルゴリズムをハードウェア化した実時間位相解析ボードを開発し、これを用いることによって、物体の形状や変形量を表す位相分布を実時間で表示する実時間形状変形計測装置を開発した。実時間形状変形計測装置の表示装置として、計測対象物の実物表面上に計測結果を表示する計測結果投影装置を開発した。計測しながら加工する時の支援装置や大物体の変形の監視装置などへの応用

が期待できる。また、このアルゴリズムを高速度カメラに適用することによって人体の動作時の形状変化を計測した。さらにカラー格子を用いて位相接続を実時間で行うアルゴリズムを開発した。

積分型位相シフト法に位相接続を適用するために、まず白黒比が2:1の矩形波を用いる積分型位相シフト法のアルゴリズムを構築した。2種類の格子を同時に解析するために、カラー格子を用い白黒比1:2の格子画像と白黒比1:1の矩形波状格子を用いる位相接続手法を開発した。

積分型位相シフト法は、投影格子を等速で連続的に移動すればいいので容易に高速化が可能であり、高速現象の計測に適している。そこで、高速度カメラに適用し、歩行開始時における足先の形状および変形の計測を行った。

3-11.3 実時間位相解析ボードの微小変形計測への適用

積分型位相シフト法による実時間位相解析ボードの応用として、マイクロメートルオーダーの高さを持つ物体の形状や変形を計測することのできる干渉じま投影による微小形状変形計測装置を開発した。さらに、トワイマン・グリーン干渉計による干渉じま位相解析に適用することによって、マイクロマシン技術で作成された加速度計の熱変形分布の時間変化をナノメートルオーダーの分解能で実時間で計測した。

3-11.4 今後の課題と発展

本研究成果を実用化するためには、形状計測については位相接続を実時間で行う必要がある。現在のところアルゴリズムの開発とその確認実験を行った段階である。今後は、実際にハードウェア化して実時間で位相接続された高さ分布画像または変位分布画像が得られるようにする。

人体の動きの解析に用いるためには、毎秒30フレームの撮影速度では不足であるので高速度カメラが必要となる。積分型位相シフト法は、投影格子を等速で連続的に移動すればいいので容易に高速化が可能である。最近ではフィルムに撮影するのではなく画像としてメモリーに記録するタイプの高速度カメラがよく用いられているので、この制御回路に積分型位相シフト法による位相解析回路を組み込むことによって、高速現象の形状計測結果がメモリーに記録される高速度形状計測カメラを実現させることを考えている。

本計測手法には、第2章2-6.4節で述べた内容と同じく、形状的な限界と表面の特性的な限界がある。とくに人体の計測を行う場合に問題になることとして、投影格子が皮膚表面での散乱反射だけでなく、表面を透過し、内部で乱反射を繰り返す、再び表面から出てくることである。そのため、人体の形状計測結果は、皮膚表面の形状を表しているとは限らない。これは人体に限らず、半透明の物体に共通の問題である。このような計測限界の問題が今後の研究課題として残されている。

現在、この研究成果を発展させて、ラインセンサを用いた形状計測手法の開発を行っている。ラインセンサを用いて形状計測や変形計測を高速に行えるようになれば、連続物体の実時間形状変形計測が可能となる。これは、工場ラインでの鋼板やパイプ、織物、紙、レトルトパック、などのような連続的に生産される加工物の検査などへ適用できる。また、トンネルや線路、道路のような巨大構造物の変形計測を高速に行うことも可能となる。その他の発展として、DMD (Digital Micro-mirror Device) とCCDを組み合わせることにより、CCDの各画素毎に高速にON/OFFできるシャッター付きのカメラを作ることができ、これを用いて1フレームの撮影画像だけで等高線・等変位線画像およびそれらの位相分布画像を得る手法を研究中である。

第4章 結論

4-1 本研究のまとめ

構造物の形状や変形を非接触で高精度かつ高速に計測することが強く求められている。その方法として、格子投影法が広く用いられている。高精度に計測するためには、格子の位相を精度よく求めることと、位相から空間座標を精度よく計算することが必要とされる。また、高速に形状や変形計測を行うためには、位相解析をハードウェア化する必要がある、そのためには高速に処理できるアルゴリズムの開発が必要となる。

本研究では、形状計測の高精度化および形状変形計測の高速化として以下のことを行った。その結果、高精度化としては、マイクロメートルオーダーの精度が達成できた。高速化としては、積分型位相シフト法による実時間位相解析ボードを開発し、それをを用いることによって、ミリメートルからメートルオーダーの物体の実時間形状変形計測、ミクロンメートルからミリメートルオーダー物体の実時間形状変形計測、ナノメートルオーダーの分解能での実時間変形計測を行うことができた。

これらの研究を行うことで、当初の目的である非接触形状計測の高精度化および高速化を達成することができた。

4-1.1 形状計測の高精度化

従来の形状計測手法を高精度化するために、新たに開発したレンズ収差によるゆがみの影響のない形状計測手法を提案した。その原理確認および従来の計測方法との比較を行った結果、本計測手法の場合、平板の形状計測で91mm×89mmの範囲において、従来方法では32 μm の精度であるのに対して12 μm の精度が得られた。また、円錐台状の物体を計測したところ、12 μm の精度が得られた。これらの結果より、本計測方法は従来と比較して高精度な形状計測であることがわかった。

さらに高精度化を行うために、誤差要因と対策について述べた。誤差の対策方法の一つとして、液晶ディスプレイを用いた基準板の開発と基準面を複数枚にする方法を提案した。その方法を実現するために、複数ピッチの格子を用いる位相接続手法および専用の解析ソフトウェア開発による自動化を行った。これらの高精度化と自動化を行い、平面を計測する実験を行った結果、誤差の平均が8.1 μm となった。これにより基準面の複数枚化の有効性が実証され、マイクロメートルオーダーの精度の形状計測を行うことが可能であることが確認できた。

本計測手法の適用例として、板金加工製品の平面度計測や二ホンオオカミの頭蓋骨模型の形状計測、液体ポンプのスクリューの形状計測例を示した。板金加工製品の平面度計測では、プレス加工によって平面部分が受けた0.1mm程度の変形の分布を計測することができた。二ホンオオカミの頭蓋骨模型の形状計測と液体ポンプのスクリューの形状計測を行うことによって、複雑な形状を持つ物体でも形状計測を行うことが可能であることを示すことができた。また、回転物体に適用する手法について試みた結果についても示した。

4-1.2 形状変形計測の高速化

形状変形計測を高速化するために、高さ分布を表す等高線と変位分布を表す等変位線をそれぞれ位相で表現することにより実時間で高さ分布・変位分布を求めるシステムを開発した。新たに考案した積分型位相シフト法をハードウェア化した実時間位相解析ボードを開発した。それをを用いた実時間形状計測システムを構築し、人体の形状計測に適用し、有効性を確認した。また、実時間位相解析ボードをトワイマン・グリーン干渉法に適用することによって、実時間でナノメートルオーダーの微小変形計測を行った。マイクロマシン技術によって製作された静電容量型の加速度センサーの熱変形分布を実時間でナノメートルオーダーで計測することができた。以下その詳細を述べる。

まず新たに開発した物体の形状が変化する際の同一の変化量を持つ部分を結ぶ等変位線画像を表示する

手法について述べ、実際にそれらの手法をハードウェア化することによって実時間等高線・等変位線表示システムを開発した。

次に、等高線・等変位線を位相分布として求めることによって、高精度に物体の形状や変形量を計測することができることを述べた。その手法として、矩形波状の位相シフトされた投影格子と矩形波状の基準格子との積分値から位相を求める相関位相シフト法を新たに開発した。矩形波状の格子を用いるため、物体表面の反射率の影響を受けにくいという特徴を持つ。

さらに、相関位相シフト法の積分の計算をCCDカメラの各画素上での時間積分として行わせる方法として積分型位相シフト法を開発した。CCDの各画素が出力する輝度値は、各画素が電荷を蓄える時間内にその画素に到達する光の強度を時間積分した値となることを利用している。積分計算が自動的にCCDの画素上で行われるために、計算機で積分計算を行う必要がなくなるため、高速に位相分布を得ることができる。

この積分型位相シフト法のアルゴリズムをハードウェア化した実時間位相解析ボードを開発し、これを用いることによって、物体の形状や変形量を表す位相分布を実時間で表示する実時間形状変形計測装置を開発した。実時間形状変形計測装置の表示装置として、計測対象物の実物表面上に計測結果を表示する計測結果投影装置を開発した。計測しながら加工する時の支援装置や大物体の変形の監視装置などへの応用が期待できる。また、このアルゴリズムを高速度カメラに適用することによって人体の動作時の形状変化を計測した。さらにカラー格子を用いて位相接続を実時間で行うアルゴリズムを開発した。

積分型位相シフト法による実時間位相解析ボードの応用として、マイクロメータオーダーの高さを持つ物体の形状や変形を計測することのできる干涉縞投影による微小形状変形計測装置を開発した。さらに、トワイマン・グリーン干渉計による干涉縞位相解析に適用することによって、マイクロマシン技術で作成された可速度計の熱変形分布の時間変化をナノメータオーダーの分解能で実時間で計測した。

4-2 今後の課題と発展

今後は、形状計測の高速化については、完全自動化を行う予定である。基準面の位相解析を全自動化することによって、基準面の枚数を手作業では行えない程多くすることが可能になり、極めて高精度に形状計測をおこなうことができると期待している。金型の検査を行うためには $1\mu\text{m}$ の精度が必要とされている。次の目標は現状より1桁精度を高め、 $1\mu\text{m}$ の精度を実現することである。ただし、計測精度がマイクロンオーダーになると計測装置自体の振動や熱変形の問題が大きく影響することがわかっている。そのため、市販のプロジェクト等を組み合わせるのではなく、振動や熱の対策が施された計測装置を開発する必要がある。基準板についても同様である。現在これらの対策を行いさらに高精度化を行う研究に取り組んでいる。格子投影方法についても改良する余地が残されている。現状のように液晶プロジェクトを用いる場合は、画素間の境界部分の影響が多少なりとも現れる。そこで、レーザー干渉じまや格子フィルムを用い、しかも格子方向とピッチを変えることができる投影装置を新たに開発する方が精度よい結果が得られると予想される。また、形状的な計測限界および表面の特性的な計測限界が今後の課題となる。

また、精度を向上させること以外には、計測対象物の適用範囲を拡大することを考えている。物体の全周を数方向から計測して、繋ぎあわせることで全周の形状計測を行う手法への適用の研究を進めている。本計測手法は、計測範囲周辺部でも高精度に空間座標が得られる特徴を持っているので、従来手法ほど繋ぎあわせる時に境界部分に段差が現れることはないと考えられる。他には、10メートル前後の大きさの大物体の形状計測への適用や、米粒程度の大きさの微小物体の形状計測への適用の研究を進めている。

形状変形計測の高速化については、位相接続を行うことによって、連続化された高さ分布や変位分布を得ることのできる手法をハードウェア化して実時間で行えるようにする。積分型位相シフト法は、投影格子を等速で連続的に移動すればいいので容易に高速化が可能であり、高速現象の計測に適している。最近ではフィルムに撮影するのではなく画像としてメモリーに記録するタイプの高速度カメラがよく用いられているが、この制御回路に積分型位相シフト法による位相解析回路を組み込めば、高速現象の形状計測結果がメモリーに記録される形状計測カメラが実現できる。

現在、この研究成果を発展させて、ラインセンサを用いた形状計測手法の開発を行っている。ラインセンサを用いて形状計測や変形計測を高速に行えるようになれば、連続物体の実時間形状変形計測が可能と

なる。これは、工場ラインでの鋼板やパイプ、織物、紙、レトルトパック、などのような連続的に生産される加工物の検査などへ適用できる。また、トンネルや線路、道路のような巨大構造物の変形計測を高速に行うことが可能となる。

将来は、本研究成果である高精度化手法と高速化手法を融合させることにより高精度かつ高速な形状変形計測システムを構築していく。同時に、これまでの研究で得た成果を実用化することにも取り組んでいく。

付録

A1 位相シフト法による位相の算出方法

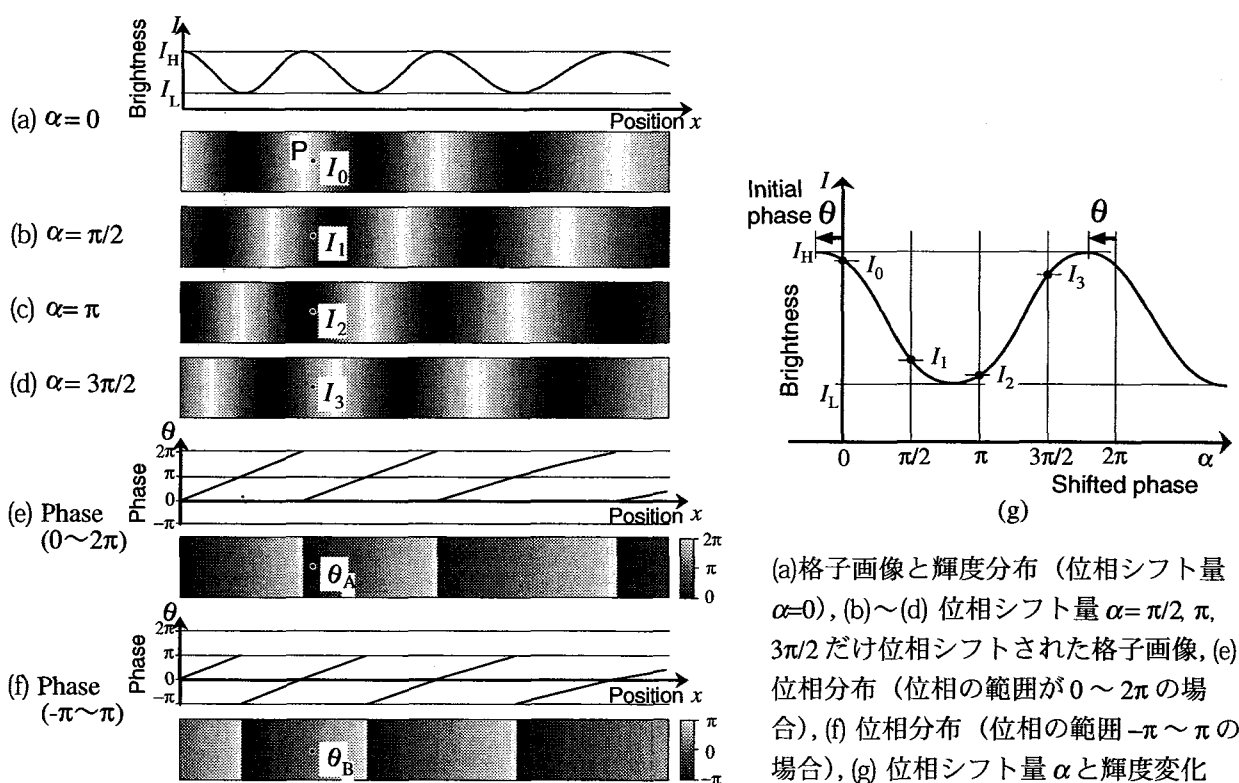
(第1章1-2.3.3節で参照)

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、段差や不連続のある物体の形状計測に有効な手法と言える。ここでは、最も一般的に用いられている $\pi/2$ ずつ位相シフトされた4つの輝度から位相を求める位相シフト法の原理を示す。

図A1.1(第1章の図1.5の再掲)に位相シフト法の原理を示す。図A1.1(a)は元の格子で、(b)~(d)はそれぞれ位相が $\pi/2$, π , $3\pi/2$ だけ位相シフトされた格子である。図A1.1(a)における格子の位相分布を図A1.1(e)に示す。位相シフト量 $\alpha=0$ における格子の位相を初期位相と呼ぶ。図A1.1(a)~(d)の各画像において点Pの輝度を順に I_0 , I_1 , I_2 , I_3 とし、点Pの初期位相を θ とする。初期位相とは、位相シフト量0の時の格子の位相のことであり、図A1.1(g)における θ の値である。位相シフト量 α と点Pにおける輝度変化の関係を図A1.1(f)に示す。 I_H と I_L は、それぞれ輝度の最大値と最小値である。

点Pにおける輝度 I_0 , I_1 , I_2 , I_3 は、式(A1.1)に示すように表すことができる。

$$\begin{aligned}
 I_0 &= a \cos \theta + b \\
 I_1 &= a \cos \left(\theta + \frac{\pi}{2} \right) + b \\
 I_2 &= a \cos (\theta + \pi) + b \\
 I_3 &= a \cos \left(\theta + \frac{3\pi}{2} \right) + b
 \end{aligned}
 \tag{A1.1}$$



図A1.1 位相シフトされた格子画像と位相分布 (第1章図1.5の再掲)

ここで、 a と b は、それぞれ式(A1.2)に示すように位相シフト時の輝度の振幅と輝度の平均値とする。

$$a = \frac{I_H - I_L}{2}, \quad b = \frac{I_H + I_L}{2} \quad (A1.2)$$

式(A1.1)より、 $I_2 - I_0$ と $I_3 - I_1$ を計算すると、それぞれ式(A1.3)と式(A1.4)が得られる。

$$I_2 - I_0 = -2a \cos \theta \quad (A1.3)$$

$$I_3 - I_1 = 2a \sin \theta \quad (A1.4)$$

これより、式(A1.5)が導かれる。

$$\frac{I_3 - I_1}{I_2 - I_0} = -\tan \theta \quad (A1.5)$$

x - y 平面において、原点と点 (x, y) を結ぶ直線、および x 軸の正の方向のなす一般角を θ とする。本研究ではこの θ を位相と呼ぶ。図A1.2に x - y 平面における点 (x, y) とその位相 θ の関係を示す。

式(A1.5)から位相 θ を算出する方法のひとつとして、 x と y の値に応じて表A1.1に示すような値をとる関数 $\arg(x, y)$ を定義する。これを用いれば、位相 θ を式(A1.6)に示すように I_0, I_1, I_2, I_3 の値を用いて求めることができる。

$$\theta = \arg \left(-(I_2 - I_0), I_3 - I_1 \right) \quad (A1.6)$$

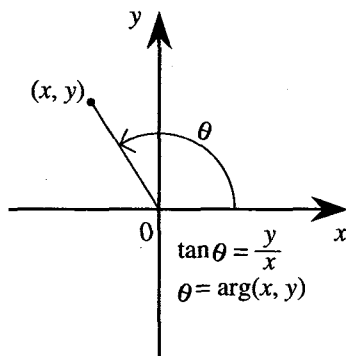
式(A1.6)で得られる位相の範囲は $0 \sim 2\pi$ である。 $\theta_A = \theta$ とすると、図A1.1(e)に示す分布となる。また、式(A1.7)に示す計算を行えば、図A1.1(f)に示すような $-\pi \sim \pi$ の範囲を持つ位相分布を得ることができる。

$$\theta_B = \begin{cases} \theta_A & (0 \leq \theta_A < \pi) \\ \theta_A - 2\pi & (\pi \leq \theta_A < 2\pi) \end{cases} \quad (A1.7)$$

なお、式(A1.5)から θ を求める計算式として式(A1.8)が示されている文献がよく見受けられる。

$$\theta = -\tan^{-1} \left(\frac{I_3 - I_1}{I_2 - I_0} \right) \quad (A1.8)$$

しかし、 \tan^{-1} は無限多価関数で $-\pi/2 \sim \pi/2$ を主値とするので、式(A1.8)では正しく位相 θ を求めることはできない。



表A1.1 座標 (x, y) と位相 θ の関係
(\tan^{-1} は主値 $(-\pi/2 \sim \pi/2)$ を用いる)

	$x < 0$	$x = 0$	$x > 0$
$y > 0$	$\pi + \tan^{-1} \left(\frac{y}{x} \right)$	$\frac{\pi}{2}$	$\tan^{-1} \left(\frac{y}{x} \right)$
$y = 0$	π	Undefined	0
$y < 0$	$\pi + \tan^{-1} \left(\frac{y}{x} \right)$	$\frac{3\pi}{2}$	$2\pi + \tan^{-1} \left(\frac{y}{x} \right)$

図A1.2 x - y 平面における点 (x, y) と位相 θ の関係

A2 2次元位相から画面内座標を求める手法

(第2章2-2.3節で参照)

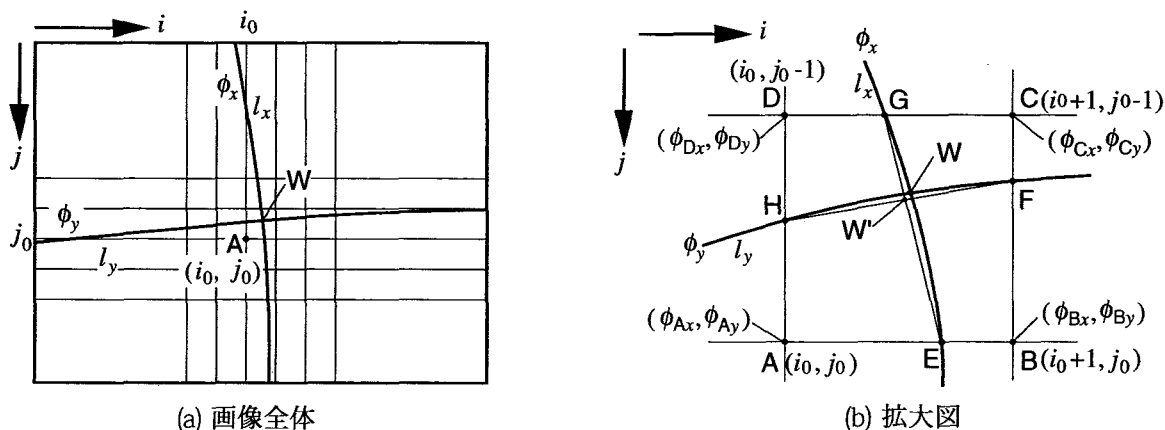
第2章2-2節で述べた2次元位相分布は、整数の画面内座標について求められている。しかし、本研究では、ある2次元位相を持つ実数値の画面内座標を見つける必要がある。ここでは、2次元位相からその位相を持つ画面内座標を求めるアルゴリズムについて述べる。

2次元位相分布をから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A2.1に画面内座標と2次元位相の関係を示す。図A2.1(a)で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 を越えない整数の座標値を持つ点 A を見つける。まず、点 A を見つける方法を述べる。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A3.1(b)に示す。図A2.1(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(A3.1)に示すような値となる。

$$\begin{aligned} E\left(i_0 + \frac{\phi_x - \phi_{Ax}}{\phi_{Bx} - \phi_{Ax}}, j_0\right), F\left(i_0 + 1, j_0 - \frac{\phi_y - \phi_{By}}{\phi_{Cy} - \phi_{By}}\right), \\ G\left(i_0 + \frac{\phi_x - \phi_{Dx}}{\phi_{Cx} - \phi_{Dx}}, j_0 - 1\right), H\left(i_0, j_0 - \frac{\phi_y - \phi_{Ay}}{\phi_{Dy} - \phi_{Ay}}\right) \end{aligned} \quad (\text{A2.1})$$

直線 EG と直線 FH の交点 W' は、式(A3.1)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。



図A2.1 画面内座標と2次元位相分布の関係

A3 2直線の交点を求める方法

(第2章2-2.3節で参照)

第2章2-2.3節で述べた形状計測原理や付録A3で述べる形状計測アルゴリズムでは、最終的に空間内の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。本研究における形状計測の場合は、物体表面上のある1点に投影されるプロジェクタからの光線と、その点からカメラに向かう光が通る光線の2直線を用いるため、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となる。そこで、ここでは、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A3.1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 上の点とする。

原点を点 O とすると、 $\overline{OM_c}$ と $\overline{OM_p}$ は、パラメータ t_c および t_p を用いてそれぞれ式(A2.1)のようにあらわすことができる。

$$\begin{aligned}\overline{OM_c} &= \overline{OC_0} + t_c \overline{C_1C_0} \\ \overline{OM_p} &= \overline{OP_0} + t_p \overline{P_1P_0}\end{aligned}\quad (A3.1)$$

これより、

$$\overline{M_pM_c} = (\overline{OP_0} - \overline{OC_0}) + (t_p \overline{P_1P_0} - t_c \overline{C_1C_0}) \quad (A3.2)$$

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(A3.3)のようになる。

$$\begin{aligned}\overline{M_pM_c} \cdot \overline{C_1C_0} &= 0 \\ \overline{M_pM_c} \cdot \overline{P_1P_0} &= 0\end{aligned}\quad (A3.3)$$

(A3.2)を代入して移項するとすると、式(A3.4)になる。

$$\begin{aligned}(t_c \overline{C_1C_0} - t_p \overline{P_1P_0}) \cdot \overline{C_1C_0} &= (\overline{OP_0} - \overline{OC_0}) \cdot \overline{C_1C_0} \\ (t_c \overline{C_1C_0} - t_p \overline{P_1P_0}) \cdot \overline{P_1P_0} &= (\overline{OP_0} - \overline{OC_0}) \cdot \overline{P_1P_0}\end{aligned}\quad (A3.4)$$

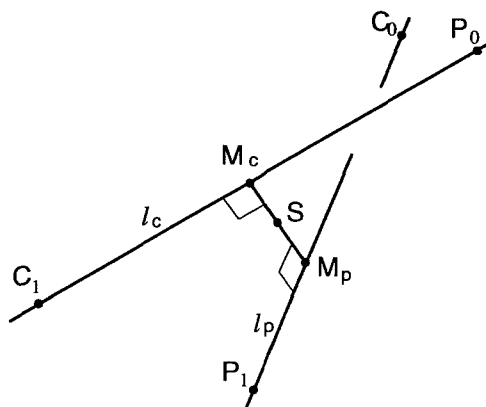


図 A3.1 2直線の交点の求め方

これを行列で表すと，式(A2.5)のようになる。

$$\begin{pmatrix} \overline{C_1C_0} \cdot \overline{C_1C_0} & -\overline{P_1P_0} \cdot \overline{C_1C_0} \\ \overline{C_1C_0} \cdot \overline{P_1P_0} & -\overline{P_1P_0} \cdot \overline{P_1P_0} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} t_c \\ t_p \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (\overline{OP_0} - \overline{OC_0}) \cdot \overline{C_1C_0} \\ (\overline{OP_0} - \overline{OC_0}) \cdot \overline{P_1P_0} \end{pmatrix} \quad (\text{A3.5})$$

これより式(A3.6)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(A3.1)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。

$$\begin{pmatrix} t_c \\ t_p \end{pmatrix} = \frac{1}{-\left(\overline{C_1C_0} \cdot \overline{C_1C_0}\right)\left(\overline{P_1P_0} \cdot \overline{P_1P_0}\right) + \left(\overline{C_1C_0} \cdot \overline{P_1P_0}\right)^2} \begin{pmatrix} -\overline{P_1P_0} \cdot \overline{P_1P_0} & \overline{P_1P_0} \cdot \overline{C_1C_0} \\ -\overline{C_1C_0} \cdot \overline{P_1P_0} & \overline{C_1C_0} \cdot \overline{C_1C_0} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} (\overline{OP_0} - \overline{OC_0}) \cdot \overline{C_1C_0} \\ (\overline{OP_0} - \overline{OC_0}) \cdot \overline{P_1P_0} \end{pmatrix} \quad (\text{A3.6})$$

点 S は点 M_c と点 M_p の中点とする。点 S の空間座標は，点 M_c と点 M_p を用いて式(A3.7)のように表すことができる。

$$\overline{OS} = \frac{1}{2}(\overline{OM_c} + \overline{OM_p}) \quad (\text{A3.7})$$

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_0C_1 と直線 P_0P_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の中点を求めることができる。

A4 フーリエ変換格子法

(第2章2-3節で参照)

(森本ら 1989) (Morimoto et al. 1991) (Morimoto and Fujigaki 1993) (Fujigaki et al. 1996)

基準板に描かれた2次元格子の2次元位相分布を容易に求めることのできるフーリエ変換格子法について述べる。

図A4.1(a)に変形前の2次元格子画像を示し、図A4.1(b)に変形後の2次元格子画像を示す。画像のサイズを x 方向と y 方向それぞれ D_x と D_y とし、変形前の格子のピッチを x 方向と y 方向それぞれ p_x と p_y とする。図A4.1(b)において、点線は変形前の格子線を表し、実線が変形後の格子線を表す。変形後の画像内の点 $P'(x, y)$ は、変形前に点 P に位置していたとし、その変位を $\vec{u}(x, y)$ とする。 $\vec{u}(x, y)$ は、 x 方向と y 方向の成分ごとに表すと式(A4.1)のようになる。

$$\vec{u}(x, y) = \begin{pmatrix} u_x(x, y) \\ u_y(x, y) \end{pmatrix} \quad (\text{A4.1})$$

変形前の座標 (x, y) に対する輝度を $f(x, y)$ とし、変形後の座標 (x, y) に対する輝度を $g(x, y)$ とする。 $f(x, y)$ は、フーリエ級数を用いて式(A4.2)のように表すことができる。

$$f(x, y) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} C_{m,n} \exp(2\pi j m \omega_x x + 2\pi j n \omega_y y) \quad (\text{A4.2})$$

ここで、 $C_{m,n}$ は定数である。 ω_x と ω_y は格子の空間周波数であり、式(A4.3)のように表わされる。

$$\omega_x = \frac{D_x}{p_x}, \quad \omega_y = \frac{D_y}{p_y} \quad (\text{A4.3})$$

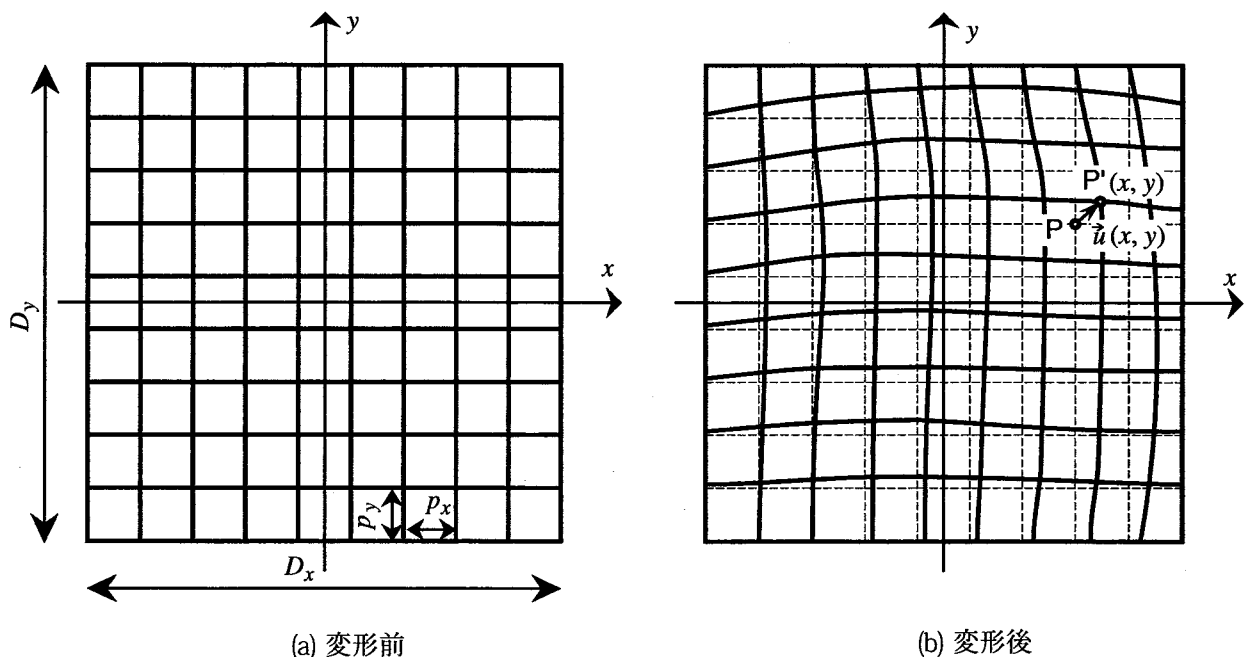


図 A4.1 2次元格子画像模式図

また、変形後の輝度分布 $g(x, y)$ は、変形前の輝度分布 $f(x, y)$ と変位を $\tilde{u}(x, y)$ を用いて、式(A4.4)に示すように表すことができる。

$$\begin{aligned} g(x, y) &= f(x - u_x(x, y), y - u_y(x, y)) \\ &= \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} C_{m,n} \exp \left(2\pi j m \omega_x \{x - u_x(x, y)\} + 2\pi j n \omega_y \{y - u_y(x, y)\} \right) \\ &= \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} C_{m,n} \exp \left(-2\pi j m \omega_x u_x(x, y) - 2\pi j n \omega_y u_y(x, y) \right) \exp \left(2\pi j m \omega_x x + 2\pi j n \omega_y y \right) \end{aligned} \quad (\text{A4.4})$$

ここで、

$$i_{m,n}(x, y) = C_{m,n} \exp \left(-2\pi j m \omega_x u_x(x, y) - 2\pi j n \omega_y u_y(x, y) \right) \quad (\text{A4.5})$$

とすれば、式(A4.4)は式(A4.6)となる。

$$g(x, y) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} i_{m,n}(x, y) \exp \left(2\pi j m \omega_x x + 2\pi j n \omega_y y \right) \quad (\text{A4.6})$$

これをフーリエ変換すると式(A4.7)となる。

$$\begin{aligned} G(\Omega_x, \Omega_y) &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} g(x, y) \exp \left(-2\pi j \Omega_x x - 2\pi j \Omega_y y \right) dx dy \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \left\{ \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} i_{m,n}(x, y) \exp \left(2\pi j m \omega_x x + 2\pi j n \omega_y y \right) \right\} \exp \left(-2\pi j \Omega_x x - 2\pi j \Omega_y y \right) dx dy \\ &= \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left\{ \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} i_{m,n}(x, y) \exp \left(2\pi j m \omega_x x + 2\pi j n \omega_y y \right) \exp \left(-2\pi j \Omega_x x - 2\pi j \Omega_y y \right) dx dy \right\} \\ &= \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left\{ \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} i_{m,n}(x, y) \exp \left(-2\pi j (\Omega_x - m \omega_x) x - 2\pi j (\Omega_y - n \omega_y) y \right) dx dy \right\} \end{aligned} \quad (\text{A4.7})$$

ここで、式(A4.8)に示すように、 $i_{m,n}(x, y)$ のフーリエ変換を $I_{m,n}(\Omega_x, \Omega_y)$ とする。 Ω_x と Ω_y はそれぞれ x 方向と y 方向の周波数とする。

$$I_{m,n}(\Omega_x, \Omega_y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} i_{m,n}(x, y) \exp \left(-2\pi j \Omega_x x - 2\pi j \Omega_y y \right) dx dy \quad (\text{A4.8})$$

式(A4.7)は、式(A4.9)と表すことができる。

$$G(\Omega_x, \Omega_y) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} I_{m,n}(\Omega_x - m \omega_x, \Omega_y - n \omega_y) \quad (\text{A4.9})$$

図A4.2に、このときの周波数空間を示す。図中○印は m, n がとる各値における各 $I_{m,n}(\Omega_x - m \omega_x, \Omega_y - n \omega_y)$ のスペクトルの存在する領域を模式的に示したものである。格子に変形がない場合は、○印の部分は点で表されるが、変形が大きくなると一般には○印の部分の大きさは大きくなる。変形が滑らかでそれほど大きくない場合には隣の○印の部分と重ならず、図A4.2に示す x 方向の1次調和波 $I_{1,0}$ および y 方向の1次調和波 $I_{0,1}$ をそれぞれフィルタリングにより取り出すことができる。この取り出した x 方向の1次調和波 $I_{1,0}(\Omega_x, \Omega_y)$ の逆フーリエ変換は次のようになる。

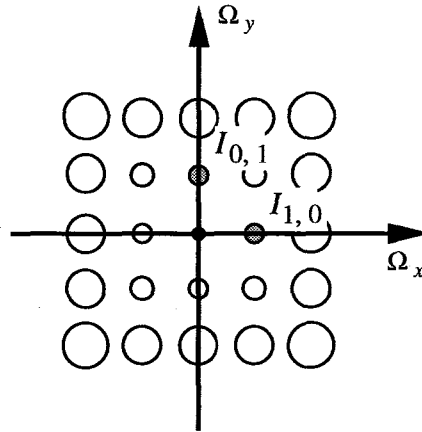


図 A4.2 変形後のフーリエスペクトル模式図

$$\begin{aligned}
 i_{1,0}(x, y) &= \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} I_{1,0}(\Omega_x - \omega_x, \Omega_y) \exp \{j2\pi(\Omega_x x + \Omega_y y)\} d\Omega_x d\Omega_y \\
 &= C_{1,0} \exp \{j\theta_x(x, y)\}
 \end{aligned}
 \tag{A4.10}$$

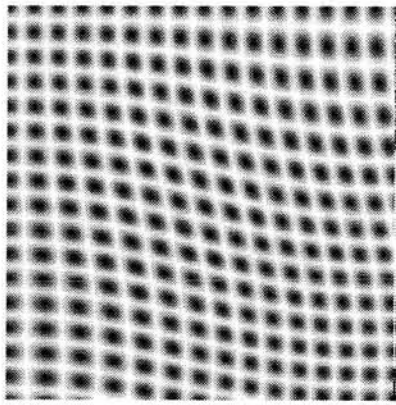
このパターンは2次元格子のx方向の格子だけを取り出したものになっており、その輝度分布は正弦波状になっている。これを複素格子と呼ぶ。その虚部と実部の比の逆正接をとることにより、式(A4.11)に示すようにその正弦波状の格子の位相値 $\theta_x(x, y)$ の分布を得ることができる。なおここで用いる関数 \arg は実部と虚部の値から位相を求める関数である。その定義を付録A1に記す。

$$\theta_x(x, y) = \arg (\text{Re} \{ I_{1,0}(x, y) \}, \text{Im} \{ I_{1,0}(x, y) \})
 \tag{A4.11}$$

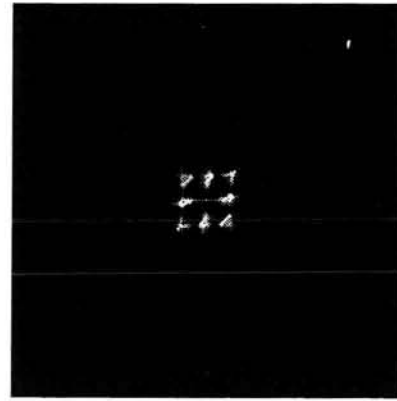
同様に、y軸方向の1次調和波 $I_{0,1}(\Omega_x, \Omega_y)$ を用いてy方向の位相値 $\theta_y(x, y)$ の分布を式(A4.12)のように求めることができる。

$$\theta_y(x, y) = \arg (\text{Re} \{ I_{0,1}(x, y) \}, \text{Im} \{ I_{0,1}(x, y) \})
 \tag{A4.12}$$

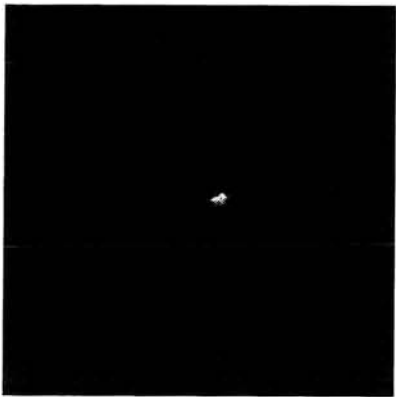
図A4.3にフーリエ変換格子法を用いて実際に2次元格子画像の位相解析を行った例を示す。図A4.3(a)は変形が加えられた2次元格子画像である。これに2次元フーリエ変換を行い得られたパワースペクトルを図A4.3(b)に示す。これより抽出されたx方向とy方向の1次調和波をそれぞれ図A4.3(c)および(d)に示す。図A4.3(c)および(d)を逆フーリエ変換することによって得られた位相分布をそれぞれ図A4.3(e)および(f)に示す。これらを位相接続して得られた位相分布をそれぞれ図A4.3(g)および(h)に示す。



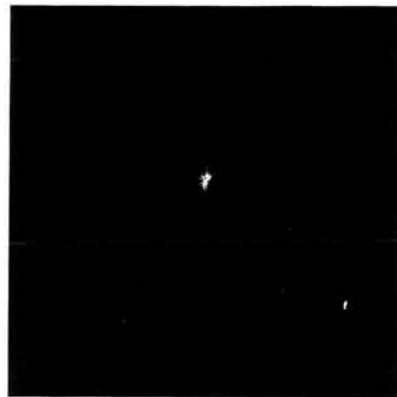
(a) 2次元格子画像



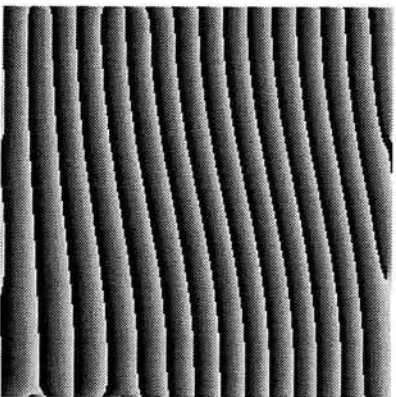
(b) パワースペクトル



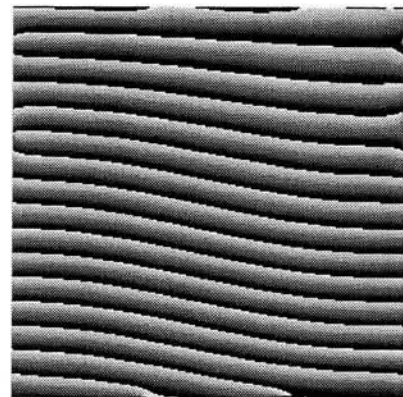
(c) x方向の1次調和波



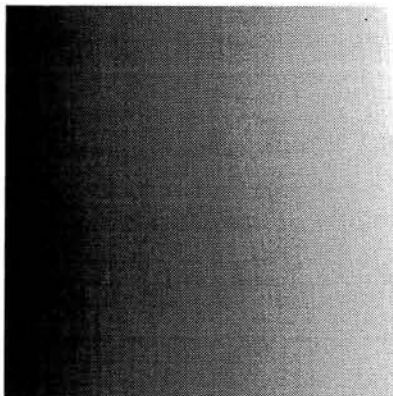
(d) y方向の1次調和波



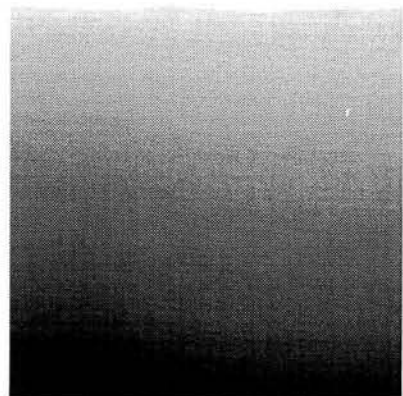
(e) x方向の位相分布 (位相接続前)



(f) y方向の位相分布 (位相接続前)



(g) x方向の位相分布 (位相接続後)



(h) y方向の位相分布 (位相接続後)

図 A4.3 フーリエ変換格子法 (FTGM) による2次元格子画像の位相解析例

A5 フーリエ変換位相シフト法

(第2章2-3節で参照)

(Morimoto and Fujisawa 1994)

プロジェクターから投影される格子パターンの位相を解析を精度よく求めることのできるフーリエ変換位相シフト法について述べる。

干渉じまや投影格子などのようにしま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 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A5.1(a)に示すような3次元画像を得ることができる。その場合、格子の輝度分布は式(A5.1)のように表される。

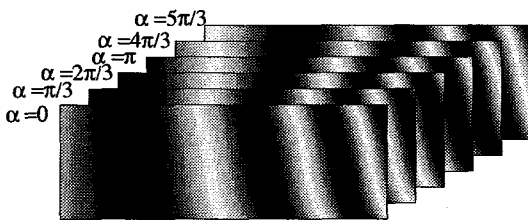
$$f(x, y, \alpha) = a(x, y) \cos(\theta(x, y) + \alpha) + b(x, y) \quad (\text{A5.1})$$

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、 $f(x, y, \alpha)$ は輝度値、 $a(x, y)$ と $b(x, y)$ 、 $\theta(x, y)$ はそれぞれ $\alpha=0$ における輝度振幅と背景輝度、しまの位相値を表す。 x 方向の1ラインにおける輝度分布の模式図を図A5.1(b)に示す。

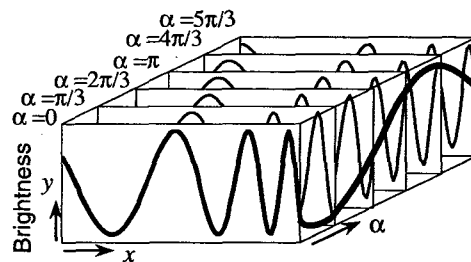
ある1点に注目すると、1周期の α の変化に対して、その点の輝度は $\alpha=0$ におけるしまと同じ輝度変化を持ちながらちょうど1周期分変化し、その初期位相は $\alpha=0$ におけるしまの位相と一致する。式(A5.1)をフーリエ級数で表すと、式(A5.2)、式(A5.3)ようになる。ここで、 ω_0 は基本周波数、 T は関数 $f(\alpha)$ の周期である。なお、簡単にするため (x, y) は省略している。

$$f(\alpha) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} c_n \exp(jn\omega_0\alpha) \quad (\text{A5.2})$$

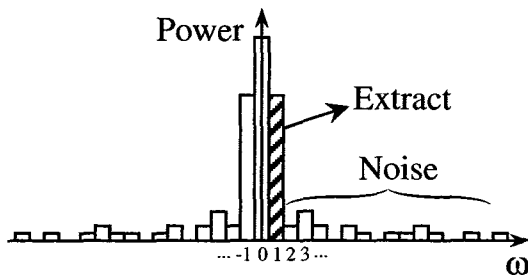
$$c_n = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(\alpha) \exp(-jn\alpha) d\alpha \quad (\text{A5.3})$$



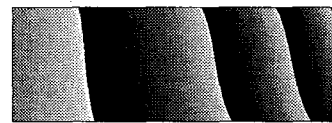
(a) 位相シフト三次元画像



(b) x 方向の1ラインにおける輝度分布の模式図



(c) 1点におけるパワースペクトル



(d) 位相分布

図A5.1 フーリエ変換位相シフト法の原理

式(A5.2)をフーリエ変換すると式(A5.4)に示すようなスペクトルが得られる.

$$F(\omega) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} 2\pi c_n \delta(\omega - n\omega_0) \quad (\text{A5.4})$$

ここで, δ はデルタ関数, ω は周波数である. 図A5.1(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, ノイズなどのように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(A5.4)から周波数1の成分だけ抽出すると式(A5.5)のようになる.

$$\begin{aligned} F(\omega_0) &= \sum_{n=-\infty}^{\infty} 2\pi c_n \delta(\omega_0 - n\omega_0) \\ &= 2\pi c_1 \delta(0) \end{aligned} \quad (\text{A5.5})$$

ここでは, $T=2\pi$, $\omega_0=1$ なので, 周波数1の成分は式(A5.6)のようになる.

$$\begin{aligned} F(1) &= \delta(0) \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} f(a) \exp(-j\alpha) da \\ &= \delta(0) \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \{a \cos(\theta + \alpha) + b\} \exp(-j\alpha) da \\ &= \pi a \exp(-j\theta) \delta(0) \end{aligned} \quad (\text{A5.6})$$

したがって, 位相 θ は, $F(1)$ の実部と虚部の値から式(2.21)のように求めることができる. なおここで用いる関数 \arg は付録A1に記されているように実部と虚部の値から位相を求める関数である.

$$\theta = \arg(\operatorname{Re}\{F(1)\}, \operatorname{Im}\{F(1)\}) \quad (\text{A5.7})$$

以上の計算を全画素について同様に行うことによって, 全画素それぞれ位相分布を得ることができる. 図A5.1(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A5.1(d)に示す.

A6 周囲の画素の位相値を参照する位相接続方法

(第2章 2-3節で参照)

(森本ら 1988) (Huntley and Saldner 1993) (森本, 藤垣 1997)

位相接続を簡単なアルゴリズムで行う方法として, 周囲の画素の位相値を参照しながら位相接続を行う方法があり, 従来から広く使われている. 図 A6.1 にその原理を示す. 図 A6.1(a) は格子画像で, 明るいまに格子番号 N が順番に付けられている. 図 A6.1(b) に図 A6.1(a) から求めた位相接続前の位相分布 $\theta(x)$ および位相接続後の位相分布 $\phi(x)$ を示す. $x=0$ の点から正の方向に $\theta(x)$ を走査していくと, $\theta(x)$ が π に達すると次は $-\pi$ となる. そこで, 前の値と比較して急に下がるところを位相の変わり目と判断し, $2k\pi$ (k は整数) を加えることで位相接続を行うことができる. ここで, 基準点において k は 0 とし, 位相の変わり目を見つけるたびに 1 ずつ増やしていく. 逆に, 位相が前の値と比較して急に上がる時には 1 ずつ減らすようにする. この整数 k は, 格子番号 0 の格子上に基準点を決めた場合には格子番号 N に一致することになり, 位相接続後の位相 $\phi(x)$ は, 式(A6.1) のように求めることができる.

$$\phi(x) = \theta(x) + 2\pi N \quad (\text{A6.1})$$

この方法は, アルゴリズムが簡単であるが, 段差などの不連続部がない滑らかな表面をもつ物体に対してのみ適用できる. 図 A6.2 に平板に半球が取り付けられている物体に, 撮影したカメラに対して右手方向から投影された格子の位相接続の例を示す. 連続化前の位相値はフーリエ変換位相シフト法を用いて求めている. 図 A6.2(a) に位相接続前の位相分布を示す. 分かりやすくするために位相分布の上半分と下半分で位相表示の輝度範囲を変えている. 半球と平板の接続部付近では不連続部分がある. 位相接続の基準点を半球の中央にとり, 位相接続を行った結果を図 A6.2(b) に示す. 物体が基準点から急変部なしで滑らかにつながっている半球表面では位相接続できているが, 平板部分では正しい位相接続ができないことがわかる.

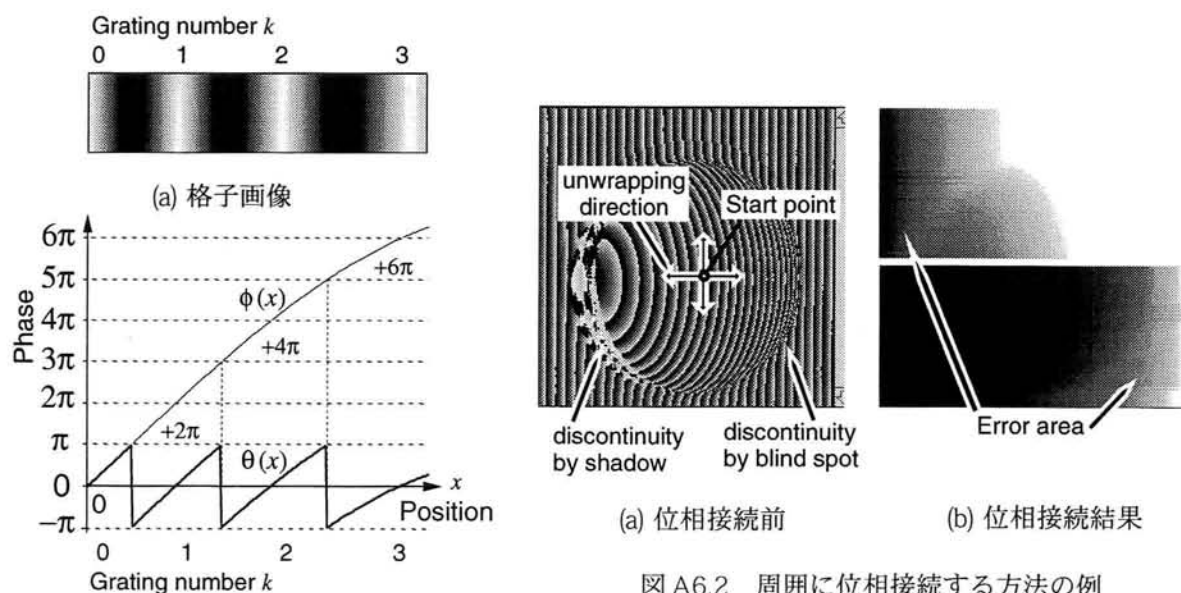


図 A6.2 周囲に位相接続する方法の例

(b) 格子番号と位相接続前後の位相分布

図 A6.1 周囲の画素の位相値を参照する
位相接続方法

A7 位相接続における格子ピッチの組み合わせ例

(第2章2-4.2.2節で参照)

第2章2-4.2.2節で述べた多数のピッチの格子を用いる場合の位相接続手法において、代表的なピッチの組み合わせの例を表A7.1に示す。ここで、 K_1 および D_1 は、それぞれピッチ p_1 での位相接続可能な格子本数および画素数を表す。

表A7.1 位相接続のための格子ピッチの組み合わせ例

p_1	p_2	p_3	n_1	n_2	n_3	K_1	D_1
8	9	11	3	-5	2	99	792
9	10	11	5	-1	-5	109	981
10	11	12	1	-2	1	66	660
11	12	13	1	-2	1	77	847
12	13	14	1	-2	1	91	1092
13	14	15	1	-2	1	104	1352
14	15	16	1	-2	1	120	1680
15	16	17	1	-2	1	136	2040
16	17	18	1	-2	1	153	2448
16	20	28	-1	2	-1	34	544
24	28	32	1	-2	1	27	648

p_1, p_2, p_3 : 格子ピッチ

n_1, n_2, n_3 : 位相接続係数

K_1 : ピッチ p_1 での位相接続可能な格子本数

D_1 : ピッチ p_1 での位相接続可能な画素数

A8 Mixed Radix Fast Fourier Transform (MR-FFT)

(第2章2-5.2節で参照)

一般の高速フーリエ変換 (FFT) のアルゴリズムでは、フーリエ変換可能なデータ数が2のべき乗に限られる。第2章の高精度形状計測では、画像サイズが縦640画素、横480画素の画像を用いて実験を行っているため、一般のFFTではフーリエ変換格子法 (第2章2-3.1節) による2次元位相の算出ができない。また、複数のピッチの異なる格子を用いた位相接続方法 (第2章2-4.1節) では、位相シフト回数が14、15、16回であるため、こちらもFFTでは解析できない。

そこで、本研究では、フーリエ変換のアルゴリズムにMR-FFT (Mixed Radix Fast Fourier Transform) (Singleton 1969) を用いる。このアルゴリズムはフーリエ変換可能なデータ数が非常に多いところが特徴である。Singleton は、MR-FFTによる計算精度の評価を行っている。ランダムな数列をフーリエ変換し、得られたスペクトルに対して逆フーリエ変換を行い、元の値との差の二乗平均の平方根を誤差としている。いくつかのデータ数に対して誤差計算を行った結果を表A4.1に示す。この結果より、MR-FFTのアルゴリズムは十分な精度を持っているといえる。

表A8.2に、MR-FFTでフーリエ変換可能な2048までのデータ数の一覧表を示す。

表A8.1 MR-FFTの誤差計算結果 (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

表A8.2 MR-FFTでフーリエ変換可能なデータ数 (2048まで)

2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	600	605	608	612	616	621	624	625	630	637
12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	640	644	648	650	660	672	675	676	680	684
22	23	24	25	26	27	28	30	32	33	686	693	700	702	704	720	722	726	728	729
34	35	36	38	39	40	42	44	45	46	735	736	748	750	756	760	765	768	780	784
48	49	50	51	52	54	55	56	57	60	792	800	810	816	819	825	828	832	833	836
63	64	65	66	68	69	70	72	75	76	840	845	847	850	855	864	867	875	880	882
77	78	80	81	84	85	88	90	91	92	891	896	900	912	918	931	936	945	950	960
95	96	98	99	100	102	104	105	108	110	968	972	975	980	990	1000	1008	1014	1024	1026
112	114	115	117	119	120	121	125	126	128	1029	1035	1040	1050	1053	1056	1058	1071	1078	1080
130	132	133	135	136	138	140	143	144	147	1083	1088	1089	1100	1104	1120	1125	1127	1134	1150
150	152	153	154	156	160	161	162	165	168	1152	1156	1170	1176	1183	1188	1197	1200	1210	1215
169	170	171	175	176	180	182	184	187	189	1216	1224	1225	1232	1242	1248	1250	1260	1274	1275
190	192	195	196	198	200	204	207	208	209	1280	1287	1296	1300	1323	1331	1344	1350	1352	1360
210	216	220	224	225	228	234	240	242	243	1368	1372	1375	1377	1386	1400	1404	1408	1425	1440
245	250	252	256	260	264	270	272	275	276	1444	1445	1449	1452	1456	1458	1470	1472	1485	1500
280	288	289	294	297	300	304	306	308	312	1512	1520	1521	1530	1536	1539	1568	1573	1575	1584
315	320	324	325	336	338	340	342	343	350	1587	1600	1617	1620	1625	1632	1638	1650	1656	1664
351	352	360	361	363	364	368	375	378	380	1666	1680	1683	1690	1694	1700	1701	1710	1715	1725
384	392	396	400	405	408	414	416	420	425	1728	1734	1750	1755	1760	1764	1782	1792	1800	1805
432	440	441	448	450	456	459	460	468	475	1815	1824	1836	1840	1859	1862	1863	1872	1875	1881
476	480	484	486	490	495	500	504	507	512	1890	1900	1904	1911	1920	1925	1936	1944	1950	1960
513	520	525	528	529	532	539	540	544	550	1980	2000	2016	2023	2025	2028	2048			
552	560	567	572	575	576	578	585	588	594										

A9 レンズ中心座標を用いた形状計測アルゴリズム

(第2章2-5.3節で参照)

第2章2-5.3節で、本研究で開発した形状計測手法との比較に、従来手法として用いたレンズ中心座標を用いた形状計測手法の詳細について述べる。

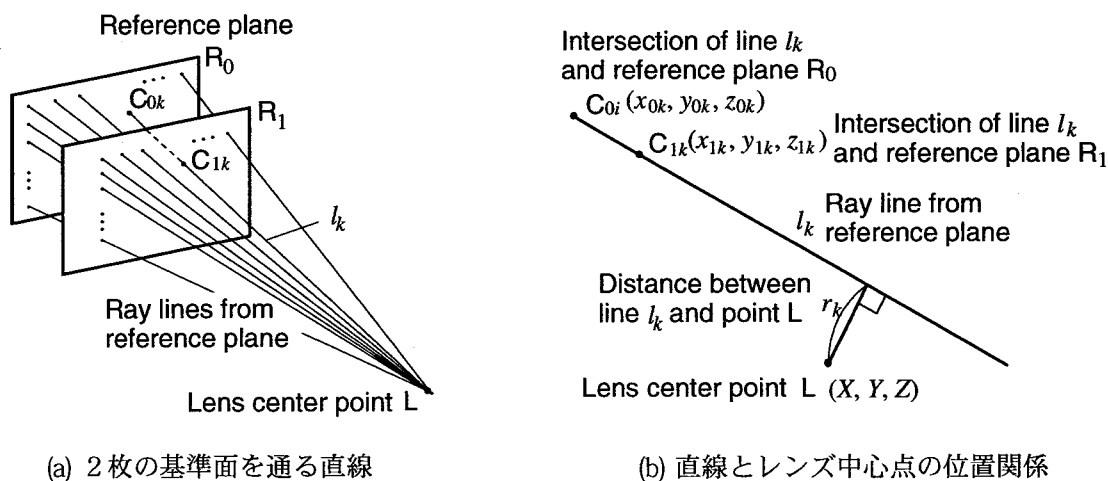
A9-1 最小二乗法によるレンズ中心座標の求め方

図A9.1に2枚の基準面を通る光線とカメラまたはプロジェクタのレンズ中心点の位置関係を示す。第2章2-5.3節で述べたように、カメラの各画素に到達する光線と2枚の基準面との交点の空間座標は全て得られているとする。2枚の基準面との交点の空間座標からそれらの点を通る直線を決定することができる。図A9.1(a)に示すように、これらの直線は、レンズの収差が無いという仮定のもとではレンズ中心点Lを全て通るのであるが、実際にはレンズ中心点Lの近傍を通る直線群となる。ここでは、各直線との距離の二乗の総和が最小となる点をレンズ中心点とする。レンズ中心点の座標の算出は以下の方法で行う。

図A9.1(b)において、レンズ中心点を $L(X, Y, Z)$ 、カメラのある画素 P_k に到達する光線を表す直線を l_k とする。ここで対象とする画素の数を N とし、1画素ずつに1～ N の個別の番号 k を付けるとする。直線 l_k と基準面 R_0 および R_1 との交点をそれぞれ点 $C_0(x_{0k}, y_{0k}, z_{0k})$ 、 $C_1(x_{1k}, y_{1k}, z_{1k})$ とする。直線 l_k の方向ベクトル $\vec{u}_k = (u_{xk}, u_{yk}, u_{zk})$ (ただし $u_{xk}^2 + u_{yk}^2 + u_{zk}^2 = 1$)は式(A9.1)のように求めることができる。点Lと直線 l_k との距離 r_k の2乗は、式(A9.2)のように表すことができる。

$$\begin{aligned} u_{xk} &= \frac{(x_{1k} - x_{0k})}{\sqrt{(x_{1k} - x_{0k})^2 + (y_{1k} - y_{0k})^2 + (z_{1k} - z_{0k})^2}} \\ u_{yk} &= \frac{(y_{1k} - y_{0k})}{\sqrt{(x_{1k} - x_{0k})^2 + (y_{1k} - y_{0k})^2 + (z_{1k} - z_{0k})^2}} \\ u_{zk} &= \frac{(z_{1k} - z_{0k})}{\sqrt{(x_{1k} - x_{0k})^2 + (y_{1k} - y_{0k})^2 + (z_{1k} - z_{0k})^2}} \end{aligned} \quad (\text{A9.1})$$

$$r_k^2 = (X - x_{0k})^2 + (Y - y_{0k})^2 + (Z - z_{0k})^2 - \left\{ (X - x_{0k})u_{xk} + (Y - y_{0k})u_{yk} + (Z - z_{0k})u_{zk} \right\}^2 \quad (\text{A9.2})$$



図A9.1 2枚の基準面を通る直線からレンズ中心座標を求める方法

式(A9.3)に示すように、全ての k についての r_k^2 の総和を S とする。 S が最小値となるのは式(A9.4)が満たされる場合である。式(A6.5)のように w_k を定義すると、式(A6.2)と式(A9.3)、式(A6.4)、式(A9.5)より式(A9.6)が導かれ、式(A9.7)を全ての k について計算することにより S が最小値となる (X, Y, Z) を得ることができる。また、プロジェクトのレンズ中心点の空間座標についても同様の方法で求めることができる。

$$S = \sum_{k=1}^N r_k^2 \quad (\text{A9.3})$$

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial S}{\partial X} \\ \frac{\partial S}{\partial Y} \\ \frac{\partial S}{\partial Z} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (\text{A9.4})$$

$$w_k = x_{0k}u_{xk} + y_{0k}u_{yk} + z_{0k}u_{zk} \quad (\text{A9.5})$$

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} \frac{\partial S}{\partial X} \\ \frac{\partial S}{\partial Y} \\ \frac{\partial S}{\partial Z} \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} \frac{\partial}{\partial X} \sum_{k=1}^N r_k^2 \\ \frac{\partial}{\partial Y} \sum_{k=1}^N r_k^2 \\ \frac{\partial}{\partial Z} \sum_{k=1}^N r_k^2 \end{pmatrix} = \sum_{k=1}^N \begin{pmatrix} \frac{\partial r_k^2}{\partial X} \\ \frac{\partial r_k^2}{\partial Y} \\ \frac{\partial r_k^2}{\partial Z} \end{pmatrix} \\ &= -2 \sum_{k=1}^N \begin{pmatrix} (u_{xk}^2 - 1)X + u_{xk}u_{yk}Y + u_{xk}u_{zk}Z - (w_k u_{xk} - x_{0k}) \\ u_{xk}u_{yk}X + (u_{yk}^2 - 1)Y + u_{yk}u_{zk}Z - (w_k u_{yk} - y_{0k}) \\ u_{xk}u_{zk}X + u_{yk}u_{zk}Y + (u_{zk}^2 - 1)Z - (w_k u_{zk} - z_{0k}) \end{pmatrix} \\ &= -2 \sum_{k=1}^N \left\{ \begin{pmatrix} u_{xk}^2 - 1 & u_{xk}u_{yk} & u_{xk}u_{zk} \\ u_{xk}u_{yk} & u_{yk}^2 - 1 & u_{yk}u_{zk} \\ u_{xk}u_{zk} & u_{yk}u_{zk} & u_{zk}^2 - 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} w_k u_{xk} - x_{0k} \\ w_k u_{yk} - y_{0k} \\ w_k u_{zk} - z_{0k} \end{pmatrix} \right\} \\ &= -2 \left\{ \begin{pmatrix} \sum_{k=1}^N (u_{xk}^2 - 1) & \sum_{k=1}^N u_{xk}u_{yk} & \sum_{k=1}^N u_{xk}u_{zk} \\ \sum_{k=1}^N u_{xk}u_{yk} & \sum_{k=1}^N (u_{yk}^2 - 1) & \sum_{k=1}^N u_{yk}u_{zk} \\ \sum_{k=1}^N u_{xk}u_{zk} & \sum_{k=1}^N u_{yk}u_{zk} & \sum_{k=1}^N (u_{zk}^2 - 1) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \sum_{k=1}^N (w_k u_{xk} - x_{0k}) \\ \sum_{k=1}^N (w_k u_{yk} - y_{0k}) \\ \sum_{k=1}^N (w_k u_{zk} - z_{0k}) \end{pmatrix} \right\} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (\text{A9.6})$$

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum_{k=1}^N (u_{xk}^2 - 1) & \sum_{k=1}^N u_{xk}u_{yk} & \sum_{k=1}^N u_{xk}u_{zk} \\ \sum_{k=1}^N u_{xk}u_{yk} & \sum_{k=1}^N (u_{yk}^2 - 1) & \sum_{k=1}^N u_{yk}u_{zk} \\ \sum_{k=1}^N u_{xk}u_{zk} & \sum_{k=1}^N u_{yk}u_{zk} & \sum_{k=1}^N (u_{zk}^2 - 1) \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \sum_{k=1}^N (w_k u_{xk} - x_{0k}) \\ \sum_{k=1}^N (w_k u_{yk} - y_{0k}) \\ \sum_{k=1}^N (w_k u_{zk} - z_{0k}) \end{pmatrix} \quad (\text{A9.7})$$

A9-2 レンズ中心座標を用いた座標算出方法

上記方法で求めたカメラとプロジェクタのレンズ中心点の空間座標を用いて物体表面上の点の空間座標を算出する方法を述べる。

図A9.2に $z=0$ の位置に設置された基準面 R_0 と物体、カメラ（レンズと撮像面）、プロジェクタ（レンズと液晶面）の位置関係を示す。カメラおよびプロジェクタのレンズの中心点をそれぞれ点 L_c および点 L_p とする。物体上の点 S に注目するとき、点 S を撮影しているカメラ撮像面での画素を点 C_s とし、その画面内座標を (i, j) とする。点 S に投影している格子の位相を持つ液晶面上の点を点 P_s とし、その点 P_s における格子の2次元位相を (ϕ_x, ϕ_y) とする。また、点 C_s に撮影されている基準面 R_0 における点を点 C_0 、点 P_s が投影されている基準面 R_0 における点を点 P_0 とする。

カメラに到達する光およびプロジェクタから投影される光がそれぞれカメラとプロジェクタのレンズ中心点 L_c および点 L_p を通ると仮定するとき、カメラの画面内座標 (i, j) と基準面 R_0 におけるその点に撮影されている点の空間座標 $(x, y, 0)$ の関係、および投影格子の2次元位相 (ϕ_x, ϕ_y) と基準面 R_0 におけるその2次元位相が投影されている点の空間座標 $(x, y, 0)$ の関係は、導出方法は省略するが幾何学的な位置関係より、それぞれ式(A9.8)および式(A9.9)のように表すことができる。ここで、 $a_1 \sim a_5$ 、 $b_1 \sim b_5$ 、 $c_1 \sim c_5$ 、 $d_1 \sim d_5$ は定数である。

$$x = \frac{a_1 i + a_2 j + a_3}{a_4 i + a_5 j + 1}, \quad y = \frac{b_1 i + b_2 j + b_3}{b_4 i + b_5 j + 1} \quad (\text{A9.8})$$

$$x = \frac{c_1 \phi_x + c_2 \phi_y + c_3}{c_4 \phi_x + c_5 \phi_y + 1}, \quad y = \frac{d_1 \phi_x + d_2 \phi_y + d_3}{d_4 \phi_x + d_5 \phi_y + 1} \quad (\text{A9.9})$$

(i, j) と $(x, y, 0)$ の関係、および (ϕ_x, ϕ_y) と $(x, y, 0)$ の関係として、第2章2-5.2節で述べたように基準板に描かれた2次元格子および基準板へ投影された2次元格子の位相解析によって多数の組のデータが得られている。これらの得られているデータの組の数を N とし、1画素ずつ1～ N の個別の番号 k を付けるとすれば、これらのデータの組は、 (i_k, j_k) と (ϕ_{xk}, ϕ_{yk}) 、 $(x_k, y_k, 0)$ のように表すことができる。 r_{ik} 、 r_{jk} 、 ϕ_{xk} 、 ϕ_{yk} をそれぞれ式(A9.10)のように定義する。また、 S_i 、 S_j 、 S_{ϕ_x} 、 S_{ϕ_y} をそれぞれ式(A9.11)のように定義する。

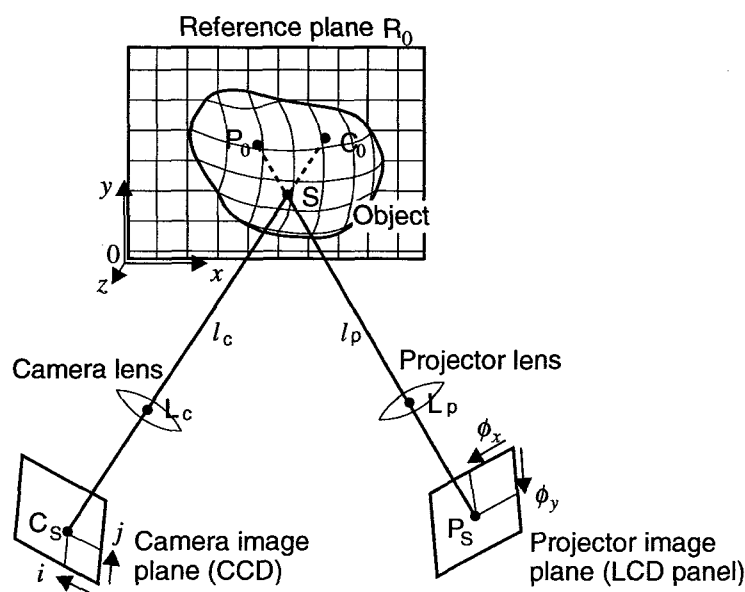


図 A9.2 物体表面上の空間座標を求める方法

$$\begin{aligned}
r_{ik} &= (a_1 i_k + a_2 j_k + a_3) - x_k(a_4 i_k + a_5 j_k + 1) \\
r_{jk} &= (b_1 i_k + b_2 j_k + b_3) - y_k(b_4 i_k + b_5 j_k + 1) \\
r_{\phi xk} &= (c_1 \phi_{xk} + c_2 \phi_{yk} + c_3) - x_k(c_4 \phi_{xk} + c_5 \phi_{yk} + 1) \\
r_{\phi yk} &= (c_1 \phi_{xk} + c_2 \phi_{yk} + c_3) - y_k(c_4 \phi_{xk} + c_5 \phi_{yk} + 1)
\end{aligned} \tag{A9.10}$$

$$S_i = \sum_{k=1}^N r_{ik}^2, \quad S_j = \sum_{k=1}^N r_{jk}^2, \quad S_{\phi x} = \sum_{k=1}^N r_{\phi xk}^2, \quad S_{\phi y} = \sum_{k=1}^N r_{\phi yk}^2 \tag{A9.11}$$

$S_i, S_j, S_{\phi x}, S_{\phi y}$ がそれぞれ最小値となるような定数 $a_1 \sim a_5, b_1 \sim b_5, c_1 \sim c_5, d_1 \sim d_5$ を最小二乗法により求めれば、それらの値を用いて式(A9.8)および式(A9.9)から点 C_0 および点 P_0 を求めることができる。

点 L_c と点 C_0 を通る直線として直線 l_c を求め、点 L_p と点 P_0 を通る直線として直線 l_p を求め、それらの交点として点 S の空間座標を求める。ただし、これらの2直線は、実際の計算上はねじれの位置の関係になる。そこで図A3.1に示すように、直線 l_c および直線 l_p 上でそれぞれがもう一方の直線に最も近づく点を点 M_c および点 M_p とし、それらの中点として点 S の空間座標を求める。点 S の空間座標は、付録A3と同一の方法で、点 C_1 を点 L_c に置き換え、点 P_1 を点 L_p に置き換えることによって算出できる。

A10 位相シフト走査モアレ法による等高線表示原理

(第3章3-2節で参照)

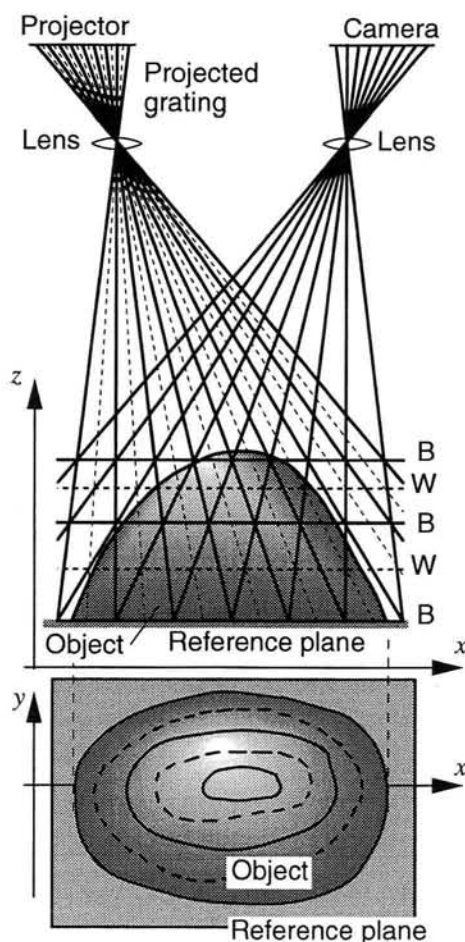
(Morimoto et al. 1996) (森本ら 1996) (藤垣ら 2000)

モアレトポグラフィの基本原理は、プロジェクタとカメラの位置関係がある条件を満たす場合、物体に投影した格子と基準格子を重ねることで等高線を表すモアレじまが現れるというものである。ここでは、格子の位相に着目することによってその原理を分析し、分解能のよい滑らかな等高線を得る位相シフト走査モアレ法について述べる。

A10-1 等高線画像作成原理

格子投影型のモアレトポグラフィの光学系を図A10.1に示す。図A10.1では、プロジェクタから投影される格子の低輝度の部分が実線で、高輝度の部分が点線で描かれている。また、基準平面に投影された格子を撮影した場合の画像上での格子ピッチと同一の間隔で間引いた画素に対応する視線が、カメラレンズ中心を通る実線で示されている。

プロジェクタから物体に投影する格子のピッチが整数画素となるようにカメラの倍率を設定し、さらにプロジェクタのレンズとカメラのレンズの光軸が z 軸に平行でかつレンズの中心位置が z 方向に同じ高さになるように位置調整を行う。このようにすると、プロジェクタからの実線あるいは破線とカメラからの実線が交わる点は図中実線Bあるいは破線Wに示すように水平線上に分布するため、実線Bと破線Wは等高線を示すことになる。カメラでは格子画像が撮影されるが、カメラの画素を一定間隔ごとに間引くと(カメラ側の実線部の映像だけを見ると)試料物体の実線Bおよび破線Wの高さの部分にそれぞれ低輝度と高輝度の線が等高線として現れることになる。



図A10.1 モアレトポグラフィの光学系(格子投影型)

A10-2 走査モアレ法の原理

モアレじまは変形前の元格子と変形した格子を重ねることで発生することが知られている。また図A10.2(a)に示す変形後の格子画像を元格子のピッチでサンプリングする画像処理を行うことでも図A10.2(b)に示す走査モアレじまを得ることができる。

図A10.3に画像における座標 x と格子の位相値の関係を示す。図A10.3において実線 A_0 と A_1 は変形前後の格子位相値であり、それぞれ $\phi_0(x)$ および $\phi_1(x)$ と表す。ここで変形前の格子のピッチを N 画素とすれば位相値 $\phi_0(x)$ は式(A10.1)のように表すことができる。

$$\phi_0(x) = \frac{2\pi}{N}x \quad (\text{A10.1})$$

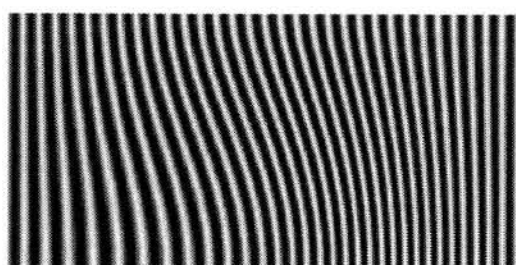
変形前後の格子によって作られるモアレじまの位相値 $\phi_m(x)$ は、変形前後の格子位相値の差であるので、これらの関係は式(A10.2)のようになる。

$$\phi_m(x) = \phi_1(x) - \phi_0(x) \quad (\text{A10.2})$$

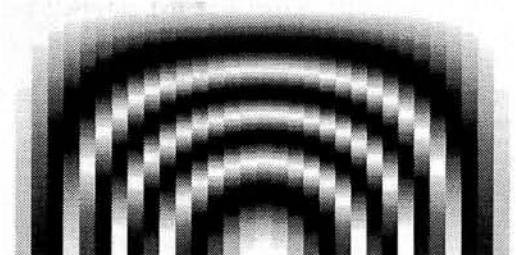
次に格子の位相値と輝度の関係について考える。格子の輝度は 2π を1周期とする位相値の関数であるため、輝度値は位相値を 2π で割ったあまりの値により決められる。ここで i は任意の整数、記号 $[\phi]$ は ϕ を 2π で割った余りと定義すると、変形後の格子を N 画素でサンプリングしたときの輝度値は、式(A10.3)の値により決められる。

$$\begin{aligned} [\phi_1(iN)] &= [\phi_m(iN) - \phi_0(iN)] \\ &= [\phi_m(iN) - 2\pi i] \\ &= [\phi_m(iN)] \end{aligned} \quad (\text{A10.3})$$

すなわち、変形後の格子画像を変形前の格子ピッチ(N 画素)でサンプリングすると、変形前後の格子によって作られるモアレじまを変形前の格子ピッチでサンプリングしたものと同一の画像が得られることになる。

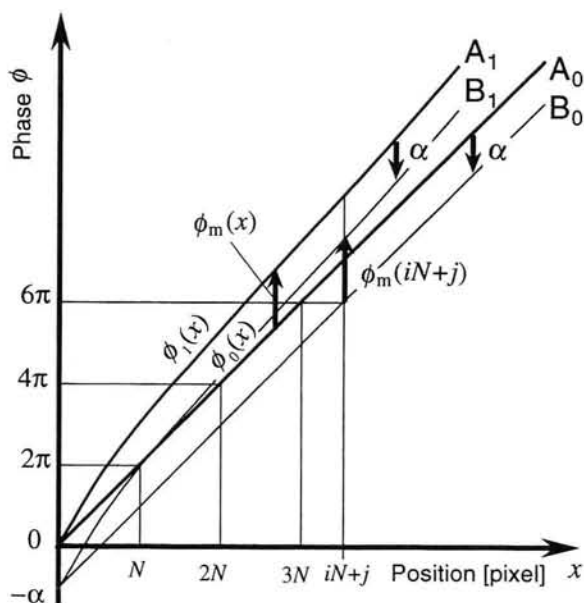


(a) 変形格子



(b) 走査モアレ

図A10.2 走査モアレ法の例



図A10.3 座標と格子位相値の関係

A10-3 位相シフト走査モアレ法の原理

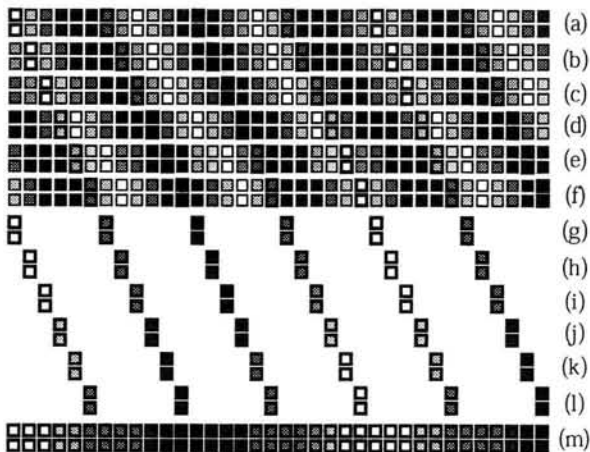
プロジェクタで格子を投影するような場合、投影する格子の位相を容易にシフトすることができる。図 A10.3 において変形前と変形後の格子の位相値をそれぞれ α だけ負の方向にシフトした場合の座標 x と格子の位相値の関係を実線 B_0 と B_1 で示す。 j を位相シフト回数を表す $0 \sim N-1$ の整数とすると、 $\alpha = 2\pi j/N$ となる。 サンプリングする座標を $iN+j$ とすると、走査モアレ法の場合と同様に、変形後の格子をサンプリングするときの輝度値は、次の式の値により決められる。

$$\begin{aligned} [\phi_1(iN+j) - \alpha] &= [\phi_m(iN+j) + \phi_0(iN+j) - \alpha] \\ &= [\phi_m(iN+j) + \frac{2\pi(iN+j)}{N} - \frac{2\pi j}{N}] \\ &= [\phi_m(iN+j)] \end{aligned} \quad (\text{A10.4})$$

また、図 A10.3 では $x=iN+j$ での B_0 の値は 2π の倍数となり、 B_1 の値は 2π の倍数にモアレじまの位相値 $\phi_m(iN+j)$ を加えた値となる。これより、上記のようにサンプリングすることによって得られる輝度値は、位相シフトを行わない場合の、座標 $iN+j$ におけるモアレじまの輝度値と同じ値が得られることがわかる。すなわち、 j が $0 \sim N-1$ のそれぞれの場合の輝度値を寄せ集めることにより、全ての座標で、その座標におけるモアレじまの位相値に相当する輝度分布が得られることになる。

さらに投影格子の位相値 ϕ に対する輝度分布を $g(\phi)$ とすると、モアレじまの輝度分布は $g(\phi(iN+j))$ となり、投影格子の輝度分布と同一となる。したがって投影格子の輝度分布をノコギリ波のように方向性を持ったものにする、得られる等高線にも方向性が現われ、物体表面の凹凸の違いを表現することができる。

図 A10.4 に、変形前の格子のピッチ $N=6$ の場合の位相シフト走査モアレ法によるモアレ画像の作成手順を示す。図 A10.4(a)~(f) は、それぞれ格子の位相が順次シフトされた場合の変形後の格子画像である。図 A10.4(g)~(l) は、位相シフト量 α に応じてサンプリングする座標を変えた場合のサンプリングされた画像である。図 A10.4(m) は、図 A10.4(g)~(l) を合成した画像であり、滑らかなモアレじまが得られていることがわかる。本手法により図 A10.2(a) の変形格子のモアレじまを求めた結果を図 A10.5 に示す。



(a) $\alpha = 0$ (b) $\alpha = \pi/3$, (c) $\alpha = 2\pi/3$,
 (d) $\alpha = \pi$, (e) $\alpha = 4\pi/3$, (f) $\alpha = 5\pi/3$,
 (g)~(l) それぞれ(a)~(f)のサンプリング画像,
 (m) (g)~(l)を合成した画像

図 A10.4 位相シフト走査モアレじま作成手順



図 A10.5 位相シフト走査モアレ法によって得られた滑らかなモアレじま

参考文献

- (Arai and Kurata 1988) Arai, Y. and Kurata, T., Binarization of Scanning Moire Fringe Pattern, Optics and Lasers in Engineering, Vol. 8, 263-275(1988).
- (新井, 倉田 1989) 新井泰彦, 倉田忠雄, 縞走査法による格子照射型モアレトポグラフィの精度向上, 光学, Vol. 18, No. 6, 311-315(1989).
- (Arai et al. 1991) Arai, Y., Yokozeki, S., and Yamada, T., Automatic 3D Measurement System by the Grid Illumination Type Moire Method, Journal of Robotics and Mechatronics, Vol. 3, No. 3, 177-183 (1991).
- (Arai et al. 1995) Arai, Y. Yokozeki, S., and Yamada, T., Fringe-scanning Method Using a General Function for Shadow Moire, Applied Optics, Vol. 34, No. 22, 4877-4882(1995).
- (荒木ら 1988) 荒木和男, 田中伸宜, 藤野智裕, 佐藤幸男, 高速3次元形状計測装置の試作, 電子情報通信学会論文誌, Vol. J71-D, No. 10, 2059-2068(1988).
- (Asundi and Zhou 1999) Asundi, A. and Zhou, W., Mapping Algorithm for 360-deg Profilometry with Time Delayed Integration Imaging, Optical Engineering, Vol. 38, No. 2, 339-344(1999).
- (Bremand 1994) Bremand, F., A Phase Unwrapping Technique for Object Relief Determination, Optics and Lasers in Engineering, Vol. 21, 49-60(1994).
- (Bruning et al. 1974) 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 Surface and Lasers, Applied Optics, Vol. 13 No. 11, 2693-2703(1974).
- (Cheng and Wyant 1984) Cheng, Y. Y. and Wyant, J. C., Two-wavelength Phase Shifting Interferometry, Applied Optics, Vol. 23, No. 24, 4539-4543(1984).
- (Cheng and Wyant 1985) Cheng, Y. Y. and Wyant, J. C., Multiple-wavelength Phase-shifting Interferometry, Applied Optics, Vol. 24, No. 6, 804-807(1985).
- (Choi and Kim 1998) Choi, Y. B. and Kim, S. W., Phase-shifting Grating Projection Moire Topography, Optical Engineering, Vol. 37, No. 3, 1005-1010(1998).
- (Cooley and Tukey 1965) Cooley, J. W. and Tukey, J. W., An Algorithm for the Machine Calculation of Complex Fourier Series, Mathematics of Computation, Vol.19, 297-301(1965).
- (越後, 谷内田 1985) 越後富夫, 谷内田正彦, 縞状パターンステレオによる3次元位置検出, 情報処理学会研究会資料, CV34-4(1985).
- (Fujigaki et al. 1995) Fujigaki, M., Inoue, H., and Morimoto, Y., Application of Gabor Transform to 3-D Shape Analysis Using Grating Pattern Projection Method, Proceedings of ATEM'95, JSME, 67-72 (1995).
- (Fujigaki et al. 1996) Fujigaki, M., Yang, I. H., Morimoto, Y., and Han, E. K., Strain Analysis of Moving Object Using Fourier Transform Grid Method, NDT & E International, Vol. 29, No. 4, 197-203 (1996).
- (藤垣 1996) 藤垣元治, 第9章 福祉機器, 光メカトロニクス入門, 和歌山大学光メカトロニクス研究会編, 共立出版, 113-122(1996).
- (藤垣, 森本 1996) 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).
- (Fujigaki and Morimoto 1996)** 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).
- (Fujigaki and Morimoto 1998)** Fujigaki, M. and Morimoto, Y., Automated Shape Analysis for Multiple Phase Fringes by Phase-shifting Method Using Fourier Transform, Proc. of the 11th International Conference on Experimental Mechanics, BSSM, Experimental Mechanics, Advances in Design, Testing and Analysis, I. M. Allison(ed.), A. A. Balkema, Vol. 1, 711-714(1998).
- (藤垣, 森本 1999)** 藤垣元治, 森本吉春, 積分型位相シフト法による実時間形状計測, 第4回知能メカトロニクスワークショップ講演論文集, 精密工学会, 102-105(1999).
- (Fujigaki et al. 1999)** Fujigaki, M., Morimoto, Y. and Toda, H., Small Displacement Analysis of Micro-Accelerometer by Integrated Phase Shifting Method, Proc. of SPIE(Interferometry '99, Techniques and Technologies), Vol. 3744, 101-108(1999).
- (藤垣ら 2000)** 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, Vol. 66, No. 8, 1221-1225(2000).
- (Fujigaki and Morimoto 2000)** Fujigaki, M and Morimoto, Y., Accuracy of Real-Time Shape Measurement by Phase-Shifting Grid Method Using Correlation, JSME International Journal, Series A, Vol. 43, No. 4, 314-320(2000).
- (Gu 1994)** Gu, R., Yoshizawa, T. and Otani, Y., One-Step Phase Shift 3-D Surface Profilometry with Grating Projection, Optics and Lasers in Engineering, Vol. 21, 61-75(1994).
- (Gushov and Solodkin 1991)** Gushov, V. I. and Solodkin, Y. N., Automatic Processing of Fringe Patterns in Integer Interferometers, Optics and Lasers in Engineering, Vol. 14, 311-324(1991).
- (Halioua et al. 1985)** Halioua, M., Kishnamurthy, R. S., Liu, H. C., and Chiang, F. P., Automated 360 ° Profilometry of 3-D Diffuse Object, Applied Optics, Vol. 24, No. 14, 2193-2196(1985).
- (Helm et al. 1994)** Helm, J. D, Sutton, M., and McNeill, S. R., Three-Dimensional Image Correlation for Surface Displacement Measurement, Proc. of SPIE, Vol. 2350, 32-45(1994).
- (Herraez et al. 1996)** Herraez, M. A., Burton, D. R, Lalor, M. J, and Clegg, D. B, Robust, Simple, and Fast Algorithm for Phase Unwrapping, Applied Optics, Vol. 35, No. 29, 5847-5852(1996).
- (Huntley and Saldner 1993)** Huntley, J. M. and Saldner, H., Temporal Phase-unwrapping Algorithm for Automated Interferogram Analysis, Applied Optics, Vol. 32, No. 17, 3047-3052(1993).
- (Huntley 2000)** Huntley, J. M., Chap. 3: Challenges in Phase Unwrapping, Trends in Optical Non-destructive Testing and Inspection, P. K. Rastogi and D. Inaudi, editors, Elsevier Science, 37-44(2000).
- (Idesawa et al. 1977)** Idesawa, M., Yatagai, T., and Soma, T., Scanning Moire Method and Automatic Measurement of 3-D Shape, Applied Optics, Vol. 16, No. 8, 2152-2162(1977).
- (井口 1986)** 井口征士, 三次元計測研究最近の動向と展望, 映像情報 (I), 6月号, 19-26(1986).
- (井口, 佐藤 1990a)** 井口征士, 佐藤宏介, 三次元画像計測, 昭晃堂, 13-14(1990).
- (井口, 佐藤 1990b)** 井口征士, 佐藤宏介, 三次元画像計測, 昭晃堂, 41-53(1990).
- (井口, 佐藤 1990c)** 井口征士, 佐藤宏介, 三次元画像計測, 昭晃堂, 91-99(1990).
- (井口 1995)** 井口征士, 3次元形状計測の最近の動向, 計測と制御, Vol. 34, No. 6, p. 429(1995).
- (格内ら 1989)** 格内敏, 岩田耕一, 長谷川素由, 山口眞二, しま走査干渉じま投影法による3次元形状計測, 精密工学会誌, Vol. 55, No. 1, 141-145(1989).

- (格内ら 1996) 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, Vol. 62, No. 11, 1592-1596(1996).
- (Kato et al. 1997) Kato, J., Yamaguchi, I., Nakamura, T., and Kuwashima, S., Video-rate Fringe Analyzer Based on Phase-shifting Electronic moire patterns, Applied Optics, Vol. 36, No. 32, 8403-8412 (1997).
- (川上ら 1998) 川上剛史, 三輪昌史, 金子礼三, 三澤弘明, レーザー顕微加工法を用いた微小構造物の作製, 第3回知能メカトロニクスワークショップ, 25-29(1998).
- (小寺ら 1999) 小寺豊, 金蓮花, 大谷幸利, 吉澤徹, 位相シフト実体格子型モアレ法による形状計測, 精密工学会誌, Vol. 65, No. 10, 1456-1460(1999).
- (桑島 1998) 桑島茂純, 光三次元計測 (第2版) 第6章, 吉澤徹 編, 新技術コミュニケーションズ, 114-132(1998).
- (盧ら 1998) 盧存偉, 山口証, 井口征士, 強度変調モアレ縞の強度・位相解析による3次元計測, 電子情報通信学会論文誌, Vol. J81-A, No. 9, 1257-1264(1998).
- (Meadows et al. 1970) Meadows, D. M., Johnson, W. O., and Allen, J. B., Generation of Surface Contours by Moire Patterns, Applied Optics, Vol. 9, No. 4, 942-947(1970).
- (森本, 白石 1984) 森本吉春, 白石泰, パーソナルコンピュータによるしま画像解析, 材料, No. 33, Vol. 367, 206-211(1984).
- (Morimoto et al. 1988) Morimoto, Y., Seguchi, Y., and Higashi, T., Application of Moire Analysis of Strain Using Fourier Transform, Optical Engineering, Vol. 27, No. 8, 650-656(1988).
- (森本ら 1988) 森本吉春, 瀬口靖幸, 東利彦, フーリエ変換を用いたモアレ法によるひずみ解析, 日本機械学会論文集 (A編), Vol. 54, No. 504, 1546-1551(1988).
- (森本ら 1989) 森本吉春, 瀬口靖幸, 坂上英和, モアレ法および格子法によるひずみ解析—画像処理とフーリエ変換の利用—, 機械の研究, Vol. 41, No. 1, 224-230(1989).
- (Morimoto et al. 1991) Morimoto, Y., Seguchi, Y., and Suese, N., Real-time Analyzer of Displacement and Strain Distributions Using Moire Method, Experimental Techniques, Vol. 15, No. 1, 36-39(1991).
- (Morimoto and Fujigaki 1993) Morimoto, Y. and Fujigaki, M., Automated Analysis of 3-D Shape and Surface Strain Distributions of a Moving Object Using Stereo Vision, Optics and Lasers in Engineering, Vol. 18, 195-212(1993).
- (Morimoto and Fujisawa 1994) Morimoto, Y. and Fujisawa, M., Fringe Pattern Analysis by a Phase-shifting Method using Fourier Transform, Optical Engineering, Vol. 33, No. 11, 3709-3714(1994).
- (Morimoto et al. 1994) Morimoto, Y., Morimoto, Y. Jr., and Hayashi, T., Separation of Isochromatics and Isoclinics Using Fourier Transform, Experimental Techniques, Vol. 17, No. 5, 13-16(1994).
- (Morimoto and Imamoto 1995) Morimoto, Y. and Imamoto, Y., Application of Wavelet Transform to Displacement and Strain Measurement by Grid Method, Proceedings of the 1995 SEM Spring Conference on Experimental Mechanics, 898-903(1995).
- (森本, 今本 1995) 森本吉春, 今本善美, ウェーブレット変換による光弾性しま次数決定法, 光弾性学会論文集, Vol. 15, No. 2, 29-34(1995).
- (Morimoto and Fujisawa 1996) Morimoto, Y. and Fujisawa, M., Fringe-pattern Analysis by Phase-shifting Method Using Extraction of Characteristic, Experimental Techniques, Vol. 20, No. 7, 25-29(1996).

- (森本ら 1996) 森本吉春, 金汪根, 藤垣元治, ノイズのない等高線を表示する走査モアレ法, 第1回知能メカトロニクスワークショップ, 精密工学会, 214-219(1996).
- (森本, 藤垣 1997) 森本吉春, 藤垣元治, 応力分布・ひずみ分布・形状・運動の実時間計測, 第1回実験力学先端技術研究会, 日本機械学会, (1997).
- (Morimoto and Fujigaki 1998) Morimoto, Y. and Fujigaki, M., Real-time Phase Distribution Analysis of Fringe Patterns, International Conference on Applied Optical Metrology, SPIE, Vol. 3407, 55-60 (1998).
- (Morimoto et al. 1999) Morimoto, Y., Fujigaki, M. and Toda, H., Real-time Shape Measurement by Integrated Phase-Shifting Method, Proc. of SPIE(Interferometry '99, Techniques and Technologies), Vol. 3744, 118-125(1999).
- (西川ら 1991) 西川尚之, 高安拓朗, 岩田耕一, 二波長位相シフト法による微細表面形状計測, 精密工学会誌, Vol. 57, No. 9, 1633-1638(1991).
- (Nitzan et al. 1977) Nitzan, D., Brain, A. E., and Duda, R. O., The Measurement and Use of Registered Reflectance and Range Data in Scene Analysis, Proc. IEEE, Vol. 65, No. 2, 206-219(1977).
- (Saldner and Huntley 1997) Saldner, H. and Huntley, J. M., Temporal Phase Unwrapping: Application to Surface Profiling of Discontinuous Objects, Applied Optics, Vol. 36, No. 13, 2770-2775(1997).
- (Sansori et al. 1997) Sansori, G., 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, Vol. 36, No. 19, 4463-4472(1997).
- (Sato and Inokuchi 1985) Sato, K. and Inokuchi, S., Three-Dimensional Surface Measurement by Space Encoding Range Imaging, Journal of Robotic Systems, Vol. 2, No. 1, 27-39(1985).
- (佐藤, 井口 1988) 佐藤宏介, 井口征士, 液晶レンジファインダー液晶シャッタによる高速距離画像計測システムー, 電子情報通信学会論文誌, Vol. J71-D, No. 7, 1249-1257(1988).
- (Singleton 1969) Singleton, R. C., Algorithm for Computing the Mixed Radix Fast Fourier transform, IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics, Vol. AU-17, No. 2, 93-103(1969).
- (Spik and Robinson 1991) Spik, A. and Robinson, D. W., Investigation of the Cellular Automata Method for Phase Unwrapping and its Implementation on an Array Processor, Optical and Lasers in Engineering, Vol. 14, No. 1, 25-37(1991).
- (Suganuma and Yoshizawa 1991) Suganuma, M. and Yoshizawa, T., Three-dimensional Shape Analysis by Use of a Projected Grating Image, Optical Engineering, Vol. 30, No. 10, 1529-1533(1991).
- (Takahashi et al. 1996) Takahashi, A., Ishii, I., Makino, H., and Nakashizuka, M., A Camera Calibration Method Using Parallelogramatic Grid Points, IEICE Trans. Inf. & Syst., Vol. E79-D, No. 11, 1579-1587(1996).
- (Takasaki 1970) Takasaki, H. Moire Topography, Applied Optics, Vol. 9, No. 6, 1467-1472(1970),.
- (Takeda et al. 1982) Takeda, M., Ina, H. and Kobayashi, S., Fourier-transform Method of Fringe-pattern Analysis for Computer-based Topography and Interferometry, Optical Society of America, Vol. 72, No. 1, 156-160(1982).
- (Takeda and Mutoh 1983) Takeda, M. and Mutoh, K., Fourier transform profilometry for the automatic measurement of 3-D object shapes, Applied Optics, Vol. 22, No. 24, 3977-3982(1983).
- (武田 1984) 武田光夫, サブフリンジ干渉計測基礎論, 光学, Vol. 13, No. 1, 55-65(1984).

- (**Takeda et al. 1997**) Takeda, M., Gu, Q., Kinoshita, M., Takai, H., and Takahashi, Y., Frequency-multiplex Fourier-transform Profilometry: a Single-shot Three-dimensional Shape Measurement of Objects with Large Height Discontinuities and/or surface isolations, *Applied Optics*, Vol. 36, No. 22, 5347-5354(1997).
- (**東京大学マイクロマシン研究共同体 1993**) 東京大学マイクロマシン研究共同体, 超技術マイクロマシン, NTT出版, 61-114(1993).
- (**Wei and Ma 1994**) Wei, G. Q. and Ma, S. D., Implicit and Explicit Camera Calibration: Theory and Experiments, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 16, No. 5, 469-480(1994).
- (**Weng et al. 1992**) Weng, J., Cohen, P., and Herniou, M., Camera Calibration with Distortion Models and Accuracy Evaluation, *IEEE Trans. Pattern Anal. & Mach. Intell.*, Vol. 14, No. 10, 965-980(1992)
- (**Wyant 1971**) Wyant, J. C., Testing Aspherics Using Two-wavelength Holography, *Applied Optics*, Vol. 10, No. 9, 2113-2118(1971).
- (**山田, 横関 1996**) 山田朝治, 横関俊介, モアレ縞・干渉縞応用計測法, コロナ社, 119-151(1996).
- (**山口 1998**) 山口一郎, 応用光学, オーム社, 35-45(1998).
- (**谷田貝, 出澤 1978**) 谷田貝豊彦, 出澤正徳, 走査モアレ法と三次元形状の自動計測, *応用物理*, Vol. 47, No. 4, 370-375(1978).
- (**横山ら 1996**) 横山敦, 佐藤宏介, 芦ヶ原隆之, 井口征士, 無調整型フォトVLSIセンサを用いた実時間距離画像計測, *電子情報通信学会論文誌*, Vol. J79-D-II, No. 9, 1492-1500(1996).
- (**吉野 1972**) 吉野洋一, 投影型モアレ等高線図化法, *光学*, Vol. 1, No. 3, 128-134(1972).
- (**吉澤, 米村 1977**) 吉澤徹, 米村元喜, 格子移動機構を備えた投影型モアレトポグラフィ法, *精密機械*, Vol. 43, No. 5, 556-561(1977).
- (**Yuk et al. 1994**) Yuk, K, C, Jo, J. H., and Chang, S., Determination of the Absolute Order of Shadow Moire Fringes by Using Two Differently Colored Light Sources, *Applied Optics*, Vol. 33, No. 1, 130-132 (1994).

研究業績

【論文】（6件）

1. Yang, I. H., 藤垣元治, 森本吉春, Han, E. K., フーリエ変換格子法による振動物体のひずみ解析, 非破壊検査, 非破壊検査協会, Vol. 41, No. 8, 486-492 (1992).
2. Morimoto, Y. and Fujigaki, M., Automated Analysis of 3-D Shape and Surface Strain Distributions of a Moving Object Using Stereo Vision, Optics and Lasers in Engineering, Vol. 18, 195-212(1993).
3. Fujigaki, M., Yang, I. H., Morimoto, Y., and Han, E. K., Strain Analysis of Moving Object Using Fourier Transform Grid Method, NDT & E International, Vol. 29, No. 4, 197-203(1996).
4. 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, Vol. 66, No. 8, 1221-1225(2000).
5. Fujigaki, M and Morimoto, Y., Accuracy of Real-Time Shape Measurement by Phase-Shifting Grid Method Using Correlation, JSME International Journal, Series A, Vol. 43, No. 4, 314-320(2000).
6. 藤垣元治, 森本吉春, 矢部正人, 積分型位相シフト法を用いた実時間ナノメートル変位分布計測, 日本機械学会論文集(2001年3月掲載予定)

【国際会議（査読あり）】（15件）

1. Fujigaki, M., Inoue, H., and Morimoto, Y., Application of Gabor Transform to 3-D Shape Analysis Using Grating Pattern Projection Method, Proc. of International Symposium on Advanced Technology in Experimental Mechanics, JSME, 67-72(1995).
2. Fujigaki, M. and Morimoto, Y., Accurate Shape Measurement for Cylindrical Object by Phase-Shifting Method Using Fourier Transform, Proc. of International Conference on Experimental Mechanics: Advances & Applications, SPIE, Vol. 2921, 557- 562(1996).
3. 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).
4. Fujigaki, M., Kim, W. G., and Morimoto, Y., Shape Measurement by Phase Shifting Scanning Moire Method, Proc. of International Conference on Advanced Technology in Experimental Mechanics, JSME, 161-164 (1997).
5. Morimoto, Y. and Fujigaki, M., Real-time Phase Distribution Analysis of Fringe Patterns, International Conference on Applied Optical Metrology, SPIE, Vol. 3407, 55-60(1998).
6. Fujigaki, M. and Morimoto, Y., Automated Shape Analysis for Multiple Phase Fringes by Phase-shifting Method Using Fourier Transform, Proc. of the 11th International Conference on Experimental Mechanics, BSSM, Experimental Mechanics, Advances in Design, Testing and Analysis, I. M. Allison(ed.), A. A. Balkema, Vol. 1, 711-714(1998).
7. Morimoto, Y. and Fujigaki, M., Digital Image Processing by Phase Shifting Method Using Fourier Transform, IUTAM Symposium on Advanced Optical Method and Applications in Solid Mechanics, (1998).
8. Fujigaki, M. and Morimoto, Y., Phase Analysis of Teeth Bed by Phase Shifting Method Using Correlation, Applied Mechanics in the Americas, Sixth Pan American Congress of Applied Mechanics (PACAM VI) , Vol. 6, 113-116(1999).
9. Fujigaki, M. and Morimoto, Y., Accuracy of Real-time Shape Measurement Method by Phase-shifting Grid Method Using Correlation, Proc. of International Conference on Advanced Technology in Experimental Mechanics '99, JSME, 589-592(1999), (Keynote Speech).
10. Fujigaki, M., Morimoto, Y. and Toda, H., Small Displacement Analysis of Micro-Accelerometer by Integrated Phase Shifting Method, Proc. of SPIE(Interferometry '99, Techniques and Technologies), Vol. 3744, 101-

108(1999).

11. Morimoto, Y., Fujigaki, M. and Toda, H., Real-time Shape Measurement by Integrated Phase-Shifting Method, Proc. of SPIE(Interferometry '99, Techniques and Technologies), Vol. 3744, 118-125(1999).
12. Morimoto, M. and Fujigaki, M., Real-time Phase Analysis Methods for Analyzing Shape, Strain and Stress, ASTM (American Society for Testing and Materials), Symposium on Nontraditional Methods of Sensing Stress, Strain, and Damage in Materials and Structures, (1999), (in printing).
13. Morimoto, Y. and Fujigaki, M., Real-time Phase Distribution Analysis in Moire, International Conference on Trends in Optical Non-destructive Testing, Trends in Optical Non-destructive Testing and Inspection, P. K. Rastogi and D. Inaudi, editors, Elsevier Science, 415-432(2000).
14. Fujigaki, M., Kim, M. S., Morimoto, Y., and Yabe, M., Real-time Measurement System for Small Displacement by Integrated Phase-shifting Method and Applications, Proc. of the SEM IX International Congress on Experimental Mechanics, Orlando, 804-807(2000).
15. Morimoto, Y., Fujigaki, M., and Iwai, K., Shape Measurement of Moving Human Body, Proceedings of International Conference on Machine Automation(ICMA2000), 345-350(2000).

【国際会議（査読なし）】（2件）

1. Yang, I. H., Fujigaki, M., Morimoto, Y., and Han, E. K., Shape and Strain Measurement of Vibrating Object Using Fourier Transform Grid Method, Proc. of First Far East Nondestructive Testing Conference, KSNT, 72-79(1991).
2. Morimoto, Y. and Fujigaki, M., Real-time Phase Distribution Analysis of Fringe Patterns Using Integrated Phase-Shifting Method, The American Society of Mechanical Engineers, Symposium on Recent Advances in Experimental Mechanics, 164(1999).

【展望解説】（1件）

1. 森本吉春, 藤垣元治, 各種変換を用いた応力・ひずみ測定技術, 非破壊検査, 非破壊検査協会, 46巻7号, 473-480(1997).

【著書】（2件）

1. Morimoto, Y. and Fujigaki, M., Chap. 27: Real-time Phase Distribution Analysis in Moire, Trends in Optical Non-destructive Testing and Inspection, P. K. Rastogi and D. Inaudi, editors, Elsevier Science, 415-432, (2000). (国際会議（査読あり）の13番と同一内容)
2. Morimoto, Y. and Fujigaki, M., Digital Image Processing by Phase Shifting Method Using Fourier Transform, 1998 IUTAM Symposium on Advanced Optical Method and Applications in Solid Mechanics, A. Lagarde (ed.), Kluwer Academic Publishers, 349-362, (2000). (国際会議（査読あり）の7番と同一内容)

【国内会議】（23件）

1. Yang, I. H., 藤垣元治, 森本吉春, Han, E. K., フーリエ変換格子法による振動物体のひずみ解析, 非破壊検査協会第24回応力ひずみ測定シンポジウム講演論文集, 119-124(1992).
2. 藤垣元治, 森本吉春, 川尻明彦, 三次元フーリエ変換位相シフト法によるスペックル干渉縞解析, 日本光弾性学会第17回研究発表講演会講演論文集, No. 17, 49-52(1995).
3. 藤垣元治, 夏克丁, 松井徹, 森本吉春, フーリエ変換位相シフト法を用いた形状計測, 日本機械学会第73期全国大会講演論文集 (I), No. 95-10, 328-329(1995).
4. 藤垣元治, 森本吉春, 格子投影による高精度形状計測法, 第168回材料力学談話会(1995).
5. 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法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談話会シンポジウム論文集, 日本機械学会, 9-12(1995).
6. 藤垣元治, 森本吉春, 投影格子画像の位相解析による全自動形状計測, 光・画像応用研究委員会, 日本

非破壊検査協会, (1995).

7. 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).
8. 森本吉春, 金汪根, 藤垣元治, ノイズのない等高線を表示する走査モアレ法, 第1回知能メカトロニクスワークショップ, 精密工学会, 214-219(1996).
9. 藤垣元治, 森本吉春, 今本善美, ウェーブレット変換格子法による形状計測の誤差検討, 平成8年度日本機械学会材料力学部門講演会講演論文集, Vol. A, 483-484(1996).
10. 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法の円筒物体への適用, 日本非破壊検査協会平成9年度春季大会講演概要集, 181-184(1997).
11. 金汪根, 藤垣元治, 森本吉春, 位相シフト走査モアレ法によるノイズのない等高線・等変位線表示システムの開発, 第2回知能メカトロニクスワークショップ, 精密工学会, 29-34(1997).
12. 森本吉春, 藤垣元治, 応力分布・ひずみ分布・形状・運動の実時間計測, 第1回実験力学先端技術研究会, 日本機械学会, (1997).
13. 藤垣元治, 金汪根, 森本吉春, 位相シフト走査モアレ法によるリアルタイム等高線・等変位線表示システムの開発, 非破壊検査協会光・画像応用研究委員会, (1998).
14. 藤垣元治, 腹巻宏一, 森本吉春, 相関を利用した位相シフト走査モアレ法による人体形状計測, 第3回知能メカトロニクスワークショップ, 精密工学会, 133-138(1998).
15. 藤垣元治, 森本吉春, 相関を利用した位相シフト格子法の精度検討, 平成10年度日本機械学会材料力学部門講演会講演論文集, No. 98-5, Vol. A, 201-202(1998).
16. 森本吉春, 野村孝徳, 藤垣元治, 実時間位相シフト法による縞画像解析, 日本光弾性学会第21回研究発表講演会(1999).
17. 藤垣元治, 森本吉春, 積分型位相シフト法による実時間形状計測, 第4回知能メカトロニクスワークショップ講演論文集, 精密工学会, 102-105(1999).
18. 森本吉春, 藤垣元治, 実時間微小変位分布計測, 平成11年度日本機械学会材料力学部門講演会講演論文集, No. 99-16, 307-308(1999).
19. 藤垣元治, 森本吉春, 岩井一能, 積分型位相シフト法による実時間位相解析装置の開発, 第1回動画像処理実利用化ワークショップ, 精密工学会, 24-29(2000).
20. 藤垣元治, 森本吉春, 基準面の複数枚化による形状計測の高精度化, 日本機械学会2000年度年次大会講演論文集(III), 187-188(2000).
21. 岩井一能, 森本吉春, 藤垣元治, 積分型位相シフト法による実時間形状計測における位相接続方法, 第5回知能メカトロニクスワークショップ講演論文集, 精密工学会, 255-260(2000).
22. 藤垣元治, 森本吉春, 矢部正人, 積分型位相シフト法を用いた実時間微小変位分布計測システム, 日本機械学会関西支部秋季技術交流フォーラム, (2000).
23. 岩井一能, 藤垣元治, 森本吉春, 積分型位相シフト法を用いた実時間形状変形計測, 第24回NCP研究会・機械の強度と形態研究談話会シンポジウム論文集, 日本機械学会, 第24回NCP研究会, 5-6(2001).

【賞】 (1件)

1. 1997年5月16日日本非破壊検査協会新進賞, 「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」(国内会議の8番)

【特許出願】 (9件)

1. 藤垣元治, 森本吉春, 形状計測方法及び装置, 出願1996年9月24日, 特許第2913021, 登録1999年4月16日.
2. 森本吉春, 藤垣元治, 形状変形計測方法, 出願1998年3月31日, 特許第2903111, 登録1999年3月26日.
3. 森本吉春, 藤垣元治, リアルタイム形状変形計測方法, 出願1999年6月25日, 特開2001-004338.

4. 藤垣元治, 森本吉春, 計測結果又は解析結果投影装置及び方法, 出願 1999 年 8 月 30 日, 特願平 11-242869.
5. 藤垣元治, 森本吉春, 形状計測方法および装置, 出願 1999 年 10 月 12 日, 特願平 11-289179.
6. 藤垣元治, 森本吉春, 形状計測方法及びその装置, 出願 2000 年 3 月 14 日, 特願 2000-070269.
7. 森本吉春, 藤垣元治, カラー矩形波格子投影によるリアルタイム形状変形計測方法, 出願 2000 年 9 月 14 日, 特願 2000-279457.
8. 森本吉春, 藤垣元治, 連続移動物体のリアルタイム形状計測方法, 出願手続中。(2001 年 2 月出願予定, 大学への届出日 2000 年 7 月 6 日)
9. 森本吉春, 藤垣元治, DMD を用いた CCD カメラによる実時間形状計測方法と装置, 出願 2001 年 2 月 2 日, 特願 2001-26564.

【その他】 (本研究とは無関係な研究業績)

<論文>

1. 和田成生, 瀬口靖幸, 田中正夫, 松田光正, 安達泰治, 藤垣元治, 固体別シミュレーションに基づく肺呼吸モデルのパラメータ同定, 日本機械学会論文集 A, 日本機械学会, Vol. 57, No. 537, 1252-1259(1991).
2. Wada, S., Seguchi, Y., Tanaka, M., Matsuda, M., Adachi, T., and Fujigaki, M., Parameter Identification for Respiratory Dynamics by Personalized Simulation and Experiment, JSME International Journal, Series I, Vol. 35, No. 2, (1992). (<論文>の 1 番と同一内容)

<国際会議 (査読なし) >

1. Seguchi, Y., Wada, S., Tanaka, M., and Fujigaki, M., Surface Tension and its Quantitative Influences Evaluated for Respiration, Abstracts of First World Congress of Biomechanics, First World Congress of Biomechanics, Vol. II, 165(1990).
3. Fujigaki, M., Kikutani, I., and Fukuda, K., A Method of Image Processing for Internal Surface for Flaws, Proc. of 1994 Japan-U.S.A. Symposium on Flexible Automation, Vol. I, 337-344(1994).
4. Nomura, T., Fujigaki, M., and Morimoto, Y., Diffraction Grating Using a Colloidal Liquid of Magnetic Particles and Its Characteristics, 17th Congress of the International Commission for Optics: Optics for Science and New Technology, Proc. SPIE, Vol. 2778, 487-488(1996).

<展望解説>

1. 藤垣元治, 福田耕治, 菊谷功, 2次元フーリエ変換をもちいた加工模様除去アルゴリズムによる欠陥抽出法, ナブコ技報, 株式会社ナブコ, No. 79, 3-6(1995).

<著書>

1. 藤垣元治, 和歌山大学光メカトロニクス研究会編: 光メカトロニクス入門, 9章 福祉機器, 共立出版, 113-122(1996).

<国内会議>

1. 藤垣元治, 和田成生, 瀬口靖幸, 田中正夫, 肺サーファクタントの力学特性(バブル法による実験と評価), 日本機械学会第2回バイオエンジニアリング部門学術講演会論文集, 45-47(1990).
2. 森本吉春, 床井浩平, 野村孝徳, 藤垣元治, 任意形状のモアレ縞の発生方法とデザインへの応用, 第21回NCP研究会・機械の強度と形態研究談話会シンポジウム論文集, 日本機械学会, 第21回NCP研究会, 63-66(1997).
3. 津田達, 藤垣元治, 三輪昌史, 触覚を利用した情報通信の一方式, 信学技報 HCS97-30, 電子情報通信学会ヒューマンコミュニケーショングループ大会, 1-8(1998).
4. 奥上将光, 曾我真人, 藤垣元治, 三輪昌史, 谷川寛樹, 山田宏之, 中島敦司, 森林環境ネットワークプロジェクトにおける環境学習支援システムの枠組み, 教育工学関連学協会連合第6回全国大会, (2000).
5. 藤垣元治, 金明洙, 三輪昌史, 中島敦司, 植物の活性度評価のためのフォルスカラー赤外線撮影システムの試作, 日本非破壊検査協会平成12年度秋季大会講演概要集, 101-104(2000).

<特許出願>

1. 藤垣元治, 電動車両, 出願 1994 年 8 月 4 日, 特許第 3042312, 登録 2000 年 3 月 10 日.
2. 森本吉春, 野村孝徳, 藤垣元治, 松井亮, 応力分布計測方法, 出願 2000 年 7 月 6 日, 特願 2000-204573.

関連特許出願

	名 称 (発明者)	概 要	番 号 出 願 日	本文中の 関連箇所
1	形状変形計測方法 (藤垣元治, 森本吉春)	2枚の基準平面上の2次元格子の位相分布および投影格子の位相分布を用いて, レンズ収差による歪みがない高精度な形状計測を行う方法	特許第2913021号 1999年4月16日登録 特開平10-096606 1996年9月24日出願	第2章 2-2.3節
2	形状計測方法及び装置 (森本吉春, 藤垣元治)	位相シフト走査モアレ法を用いて, 変形する物体の変位分布を等変位線としてリアルタイムで計測して表示する方法	特許第2903111号 1999年3月26日登録 特開平11-287625 1998年3月31日出願	第3章 3-2.1節
3	リアルタイム形状変形計測方法 (森本吉春, 藤垣元治)	格子模様を連続的に位相シフトさせながらCCDカメラで連続的に撮影し, 得られた画像から形状分布や変形分布を実時間で求める方法	特開2001-004338 1999年6月25日出願	第3章 3-4.3節 3-5.1節
4	計測結果又は解析結果投影装置及び方法 (藤垣元治, 森本吉春)	カメラとプロジェクターの光軸と倍率を一致させるようにハーフミラーを用いて配置することによって, 現物表面上に計測結果を表示する方法	特願平11-242869 1999年8月30日出願	第3章 3-6.1節
5	形状計測方法および装置 (藤垣元治, 森本吉春)	基準板として液晶板のようなディスプレイを用いることによって, 物体の形状を全自動で高精度に算出する方法	特願平11-289179 1999年10月12日出願	第2章 2-4.3節
6	複数の基準面を用いた形状計測方法 (藤垣元治, 森本吉春)	基準面を複数位置に移動することによって, 空間座標の計測精度を向上させる方法	特願2000-070269 2000年3月14日出願	第2章 2-4.4節
7	カラー矩形波格子投影によるリアルタイム形状変形計測方法 (森本吉春, 藤垣元治)	連続的に位相をシフトしながら投影されたカラー格子を用いて位相接続をリアルタイムで行うことによって, 形状や変形分布を実時間で計測する方法	特願2000-279457 2000年9月14日出願	第3章 3-7節
8	連続移動物体のリアルタイム形状計測方法 (森本吉春, 藤垣元治, 矢部正人)	複数のラインセンサを用いて物体の同一部分を撮影した位相シフト画像を得ることにより, 連続移動物体の形状変形計測を高速に行う方法	出願手続中 2001年2月出願予定	第3章 3-11節
9	DMDを用いたCCDカメラによる実時間形状計測方法及び装置 (森本吉春, 藤垣元治)	DMDとCCDを組み合わせることで, CCDで等高線または等変位線画像が枚フレームごとに撮影できるようにする方法と装置	特願2001-26564 2001年2月2日出願	第3章 3-11節

謝辞

本論文をまとめるにあたり、論文審査委員として懇切なる御指導と貴重な御意見を賜りました大阪大学大学院基礎工学研究科の宮崎文夫教授をはじめ、井口征士教授ならびに田中正夫教授に心から深く感謝の意を表します。

本研究は、筆者が大阪大学大学院在学中の研究テーマに端を発しており、その後、和歌山大学システム工学部に在職中の約6年間に行った研究をまとめたものです。学部在学中から長期にわたり公私共にはかりしれないほど様々なかたちで御指導御鞭撻をいただきました和歌山大学システム工学部の森本吉春教授に謹んで深く感謝いたします。田中正夫教授には在学中および大学院修了後もことあるたびに御指導いただきました。重ねて感謝の意を表します。また、本研究活動の初期の頃に実験室および実験機材を使用させていただきました林紘三郎教授に感謝いたします。貴重な試料を提供していただきました辻本良信教授に感謝いたします。

和歌山大学において本研究を進めるにあたり、当初から多くの助言と御支援を賜りました野村孝徳助教授と多くの御配慮をいただきました戸田裕己教授に深く感謝いたします。また、以前から会議等で親しくしていただき、昨年からは筆者と同じ研究室に所属している米山聡助手には論文執筆において多くの助言をいただき、添削もしていただきました。深く感謝いたします。

研究内容の一部は、新エネルギー・産業技術総合開発機構の平成10年度地域コンソーシアムの研究開発事業として行いました。共同研究者ならびに関係者の皆さまに深く感謝いたします。和歌山県工業技術センターの前田裕司氏、北斗電子工業株式会社の木下泰氏と大西俊浩氏、株式会社東洋精米機製作所の田宮徹弥氏、クインライト電子精工株式会社の中尾守氏には、とくに多くの御協力をいただきました。深く感謝いたします。

その他にも多くの企業や機関の方の御協力により本論文をまとめることができました。とくに実験装置や試料の製作をしていただきました株式会社応用計測研究所の中村亨氏、株式会社スカラテックの石田敬雄氏、甲子園金属株式会社の中島琥一郎氏、光洋精工株式会社の笠原文明氏、南海光学工業株式会社の竹村弘美氏に深く感謝いたします。また、和歌山工業技術センターの吉田茂氏と中本知伸氏には、実験に用いる基準板の平面度と粗さ計測を急な依頼にもかかわらずころよく引き受けていただきました。深く感謝いたします。

和歌山大学の研究室の皆さまにも多くの協力をいただきました。夏克丁氏（現株式会社サイバーリンク社員）ならびに金汪根氏（現韓国科学技術庁職員）、横森秀勝氏（現東京海上システム開発株式会社社員）、岩井一能氏（大学院在学中）、矢部正人氏（大学院在学中）にはそれぞれ熱意を持って実験を行っていただきましたことに御礼申し上げます。研究室に長期滞在された韓国群山大学校工科大学の白泰鉉副教授ならびに客員研究員として1年間滞在された金明洙副教授には、滞在中に多くの助言と激励を賜りましたことに御礼申し上げます。また、昨年までの1年半の間、研究室秘書役として研究活動を支えていただきました事務補佐員の鈴木佐知氏に御礼申し上げます。また、平素の研究活動に関し御協力いただきました卒業生と在学生の皆さまに御礼申し上げます。

大阪大学基礎工学部および大学院在学中に、先輩として終始暖かい御教示と激励をいただきました和田

成生氏（現北海道大学電子科学研究所講師）と花原和之氏（現神戸大学工学部助教授）、同輩として現在にわたり助言や御協力をいただきました安達泰治氏（現神戸大学工学部助教授）と林謙一氏（現松下電器産業株式会社）に感謝いたします。

株式会社ナブコ在職中には、非常に多くの有用な経験をさせていただき、本研究を進めることに大きく役立ちました。また、技術開発本部でのよき上司であった三宅恵氏と岸本功氏をはじめ、よき先輩であった菊谷功氏と村上義彦氏、よき同輩であった中根正貴氏と今北豊彦氏、同僚、同期入社の方々の皆さまには和歌山大学への転職時にこころよく送りだしていただきました。深く感謝いたします。知的財産部の近藤祐治氏と水谷幸弘氏には転職後も特許に関する資料や御知恵をいただきました。また、大学院の後輩でもある研究開発センターの井上博之氏には国際会議での発表や解析ソフトの作成などの御協力をいただきました。深く感謝いたします。

システム工学部が新学部として創設され、筆者が赴任してから学部棟が建つまでの期間に、仮住まいの研究室として図書館の会議室に同居していた情報通信システム学科の加藤浩仁講師と森山真光講師、環境システム学科の中島敦司助教授と江種伸之助教授、デザイン情報学科の原田利宣助教授と満田成紀講師、光メカトロニクス学科の村田頼信助手、ならびに頻りに図書館会議室に出入りしていた光メカトロニクス学科の三輪昌史助手には、当時から多くの刺激をいただきました。原田助教授と森山講師には本研究に関する貴重な試料をお貸しいただきました。さらに現在に至るまで親密なつきあいや数々の共同研究をさせていただき、本研究を円滑に進めるための大きな支えになりました。ここに感謝の意を表します。

光メカトロニクス学科の教職員の皆さまには、和歌山大学へ赴任後から現在に至るまで平素から多方面で研究の御支援をいただきました。とくに村田助手と三輪助手をはじめ、似内映之助手、サイ貴生助手、椎名達雄助手には様々な面で多くの御支援をいただきました。ここに感謝の意を表します。

以上のように、本論文は多くの方々の御指導と御協力、御支援の上に成り立っています。重ねて御礼申し上げます。

最後になりましたが、日々やさしく支えてくれました妻の政枝、本論文の完成直前に誕生し、かわいく勇気づけてくれました長男の優輝に心から感謝いたします。

皆さま、どうもありがとうございました。

2001年2月 藤垣元治