

博士学位論文

デジタルホログラフィによる
三次元形状の精密計測

Precision Measurement of 3D Shape Using Digital Holography

2015年

于 蓁悦
(Yu Qi Yue)

目次

第1章	はじめに	1
第2章	研究背景	4
2.1	三角測量法.....	5
2.1.1	光切断法.....	6
2.1.2	空間コード符号化法.....	8
2.1.3	位相シフト法.....	10
2.2	レンズ焦点法.....	14
2.2.1	合焦断面法.....	14
2.2.2	共焦点レーザ走査顕微鏡.....	15
2.3	TOF法.....	19
2.4	光干渉法.....	20
2.4.1	白色光干渉法.....	20
2.4.2	デジタルホログラフィによる三次元形状計測法.....	22
第3章	基礎理論	26
3.1	光の干渉原理.....	27
3.2	フレネル変換.....	30
3.3	位相シフトデジタルホログラフィ.....	32
3.4	干渉縞の周波数解析法.....	33
3.5	位相連結処理および干渉測量法.....	35
第4章	位相シフトデジタルホログラフィによる三次元形状計測法	37
4.1	まえがき.....	37
4.2	従来研究.....	39
4.3	提案システム.....	40
4.3.1	提案システムの動作原理.....	40
4.3.2	アルゴリズム検討用試作システムの構成.....	43
4.4	提案手法.....	47
4.4.1	計測の流れ.....	47
4.4.2	畳み込み原理を利用したフレネル回折.....	48
4.5	試作システムによる計測実験.....	51
4.5.1	鏡面反射物体に対する計測実験.....	52
4.5.2	透明物体に対する計測実験.....	55
4.5.3	精度評価.....	58
4.5.4	考察.....	62
4.6	システムの小型化に関する検討.....	63
4.6.1	小型計測システムの構成.....	63
4.6.2	従来法との比較.....	65
4.6.3	小型計測システムによる計測実験.....	66
4.6.4	精度評価.....	72
4.6.5	計測時間.....	75
4.6.6	考察.....	76
4.7	むすび.....	83

第 5 章	ワンショット位相シフトデジタルホログラフィ	84
5.1	まえがき	84
5.2	従来のワンショット法	85
5.2.1	並列位相シフトアレイを用いた手法	86
5.2.2	回折空間フィルタを用いた手法	86
5.3	提案手法	88
5.4	計測実験	90
5.4.1	鏡面反射物体に対する計測実験	90
5.4.2	透明物体に対する計測実験	92
5.4.3	動体に対する計測実験	95
5.5	システムの評価	98
5.5.1	精度評価	98
5.5.2	安定性評価	100
5.5.3	計測時間	102
5.5.4	考察	103
5.6	むすび	104
第 6 章	三次元顕微鏡に関する検討	106
6.1	まえがき	106
6.2	既存の三次元顕微鏡	107
6.3	提案システム	107
6.4	赤血球に対する三次元計測実験	110
6.5	むすび	116
第 7 章	おわりに	117
謝辞		119
参考文献		120
研究業績一覧		129

第1章 はじめに

近年、工業製品の精密不良検査および医療用精密生体検査などを目的とした高精度三次元形状計測技術の需要が増えている。既存の三次元計測手法としては、複数の投影パターンを利用した三次元画像計測法^{[1]~[10]}が広く使用されている。しかしながら、鏡面反射および透明な計測対象に対しては、投影パターンの撮影画像解析が困難であるため、三次元形状計測ができない。

鏡面反射および透明な計測対象に対する高精度な三次元形状計測手法として、デジタルホログラフィを用いた三次元形状計測法^{[11]~[16]}が提案されている。中でも、高精度の三次元形状計測の実現が可能な位相シフトデジタルホログラフィを用いた三次元形状計測法^{[17]~[27]}に関する研究が盛んに行われている。位相シフトデジタルホログラフィを用いた三次元形状計測では、まず、干渉性能の高いレーザ光を計測光源にし、参照光と物体光の光路差をレーザ波長の1/4倍ずつずらしながら、4枚の位相シフト干渉縞をカメラで撮影する。次に、位相シフト干渉縞撮影画像を用いて、位相シフト法により、直流成分および虚像成分を除去する。最後に、フレネル変換で計測対象表面の物体光を再生することで、計測対象表面上の物体光の位相値(以下、物体光の絶対位相値と呼ぶ)を算出し、干渉測量法を用いて計測対象の三次元形状を復元する。しかしながら、従来の位相シフトデジタルホログラフィを用いた三次元形状計測法において、位相シフト干渉縞を生成するためには、ピエゾステージで平面ミラーを移動させることで光路差を制御する必要がある。ピエゾステージは高価であるため、三次元計測装置の低価格化が困難である。また、ピエゾステージの制御精度が計測結果に悪影響を与えるという問題点が存在した。そこで、本研究では、検波原理^[28]および畳み込み定理^[29]を利用することで、高精度の位相シフトデジタルホログラフィを用いた三次元形状計測法を提案して、安価かつ小型の三次元計測装置を開発した。

位相シフトデジタルホログラフィを用いて、高精度の三次元形状計測および安価かつ小型の三次元計測装置を実現したが、計測を実行する際に、4枚の位相シフト干渉縞撮影画像を取得するために、偏光板の回転制御およびカメラによる複数回の撮影が必要であるため、高速の三次元計測には不向きである。また、

計測環境に振動が存在する場合には、撮影された位相シフト干渉縞画像間に位相誤差が生じてしまうなど、安定かつ高速の三次元計測の実現が困難であるという問題点が存在した。これらのような問題点を解決する手法として、4枚の位相シフト干渉縞を用いずにワンショットで三次元形状計測を行う位相シフトデジタルホログラフィ三次元形状計測法が提案されている。この計測手法では、干渉縞の位相をシフトせずに1枚の干渉縞を用いて三次元形状計測ができるが、物体光の絶対位相値を算出してフレネル変換で物体光の絶対位相値を算出するという三次元形状計測のアルゴリズムは位相シフトデジタルホログラフィによる三次元形状計測法と同一であるため、ワンショット位相シフトデジタルホログラフィによる三次元計測法と呼ぶ。ワンショット位相シフトデジタルホログラフィを用いた三次元形状計測法では、並列位相シフトアレイ素子を表面に貼り付けた特殊なCMOSセンサを使用した手法^{[30]~[32]}が最も利用されている。しかしながら、これらの手法では、並列位相シフトアレイ素子により、4画素の輝度情報から1つの位相値を算出するため、三次元計測に使用する情報量はCMOSセンサより取得された情報量の1/4しかない。また、並列位相シフトアレイ素子は数百万円程度と高価であるため、計測装置の低価格化が困難である。また、再生光に対するフィルタリング処理を用いて、1枚の干渉縞撮影画像から再生した物体光に存在する直流成分および虚像成分が除去できるデジタルホログラフィによる物体光の回折法および三次元計測法^{[33]~[36]}が提案されている。しかしながら、これらのワンショット計測手法では、フレネル回折空間におけるバンドパスフィルタを用いて、再生した物体光から実像成分を抽出し、物体光の絶対位相値を算出することで、三次元計測が可能であることを検証したが、干渉縞に対する解析をしておらず、三次元計測の精度および計測システムの実用性に関する検討が行われていない。そこで、本研究では、光干渉計測分野に応用されている干渉縞の周波数解析法をデジタルホログラフィによる三次元形状計測分野に応用することで、ワンショット位相シフトデジタルホログラフィによる三次元計測装置を開発し、複数の三次元計測実験を通して、その実用性を検証した。開発した計測装置は、一般的な光学部品で構成できるため、並列位相シフトアレイ素子を使用した手法よりも安価に計測装置を構築できる。また、位相シフトデジタルホログラフィの原理に基づくため、物体光の絶対位相値が算出でき、鏡面反射および透明の計測対象を高精度に三次元計測することができる。さらに、4枚の位相シフト干渉縞撮影画像を利用した従来法と比較することで、開発したワンショット計測法が安定性に優れることを検証し、鏡

面反射の金属工業製品および透明のガラス製品の精密不良検査に実用可能であることを示す。最後に、顕微鏡レンズシステムを検討して、計測装置に使用することで、三次元生体顕微鏡を開発した。ヒトの血液に存在する赤血球に対する三次元計測実験を通して、開発した三次元顕微鏡が将来の精密医療分析に応用可能であることを検証した。

本稿では、第2章で研究背景を説明した。第3章でデジタルホログラフィの基礎理論を説明した。第4章で位相シフトデジタルホログラフィによる三次元形状計測法を述べた。第5章でワンショット位相シフトデジタルホログラフィによる三次元計測法を述べた。4枚の位相シフト干渉縞撮影画像を用いずにワンショットで位相シフトデジタルホログラフィによる三次元計測法を実現して、計測精度および計測安定性向上を検証した。第6章で本研究の実用化に関する検討を述べた。計測装置に使用する顕微鏡レンズシステムを検討して、三次元顕微鏡を開発し、将来の精密医療分析に応用可能であることを検証した。第7章では、検討した位相シフトおよびワンショット位相シフトデジタルホログラフィによる三次元計測法をまとめ、今後の予定を述べた。

第2章 研究背景

近年，画像処理技術を用いて物体の三次元形状情報を得る研究^{[37]~[52]}は盛んに行われている．画像処理技術を用いた三次元形状計測手法の違いにより，次に二つ大きく分けられている．

- (1) 能動的計測：計測装置から対象物に光や電波などのエネルギーを照射し，対象物による反応から，対象物の位置や形状を測定する手法．
- (2) 受動的計測：計測装置は計測対象から得られる光などのエネルギーパターンだけを受けて，対象物の位置や形状を計測する手法．

能動的計測法は，計測環境と計測対象が限定されるという欠点があるが，高速・高精度計測が可能，長距離計測が可能，低価格化が容易などの利点があり，商用の三次元計測装置にも使用されている．

一方，受動的計測法は対象に対して計測環境からの影響を与えることがなく，画像データを取得できれば適応可能であるため，安定性が能動的計測より高いものの，計測精度が低いという課題が存在している．

受動的計測の代表的な手法として，ステレオ法が挙げられる．ステレオ法^{[53]~[56]}では，複数台のカメラから同一の計測対象を撮影し，得られた複数枚の画像間で対応点を求めることにより，計測対象の三次元形状を計測する．しかしながら，対応点を求めることが困難であるという対応点探索問題があり，安定な計測精度を取得することが困難である．そのため，三次元計測に特殊な光源を使用した能動的計測法がよく使用されている．能動的計測法の基本的な手法として，レーザ光を用いたスリット光走査法(光切断法)^{[57]~[60]}およびプロジェクタを用いたパターン投影法^{[61]~[62]}がある．これらの手法には対応点探索問題が生じないため，ステレオ法を代表とした受動的計測法に比較してロバストな三次元計測が行える．しかしながら，空間分解能と比例して多くのパターン投影と画像撮影を行う必要があるため，三次元計測に長い時間がかかるという問題が存在する．また，鏡面反射および透明な計測対象に対しては，投影パターンの撮影画像解析が困難であるため，計測ができない場合も多い．さらに，計測精度はレーザ光やパターンの投影装置に依存するため，高精度な三次元計測の実現が困難である．そこで，鏡面反射および透明な計測対象に対応でき，高速かつ高精度な三次元計測が可能な手法としてデジタルホログラフィによる三次元計測法が提案されている．この手法では，高干渉性能のレーザ光を計測

光源として用い、伝播時発生した光波の位相変化でナノメートルオーダーの高精度三次元計測が可能である反面、三次元計測に使用する情報量が少なく、計測環境から計測結果に悪影響を受けやすいという問題が存在する。

上記に述べた三次元形状計測手法の関係を図2.1に示す。

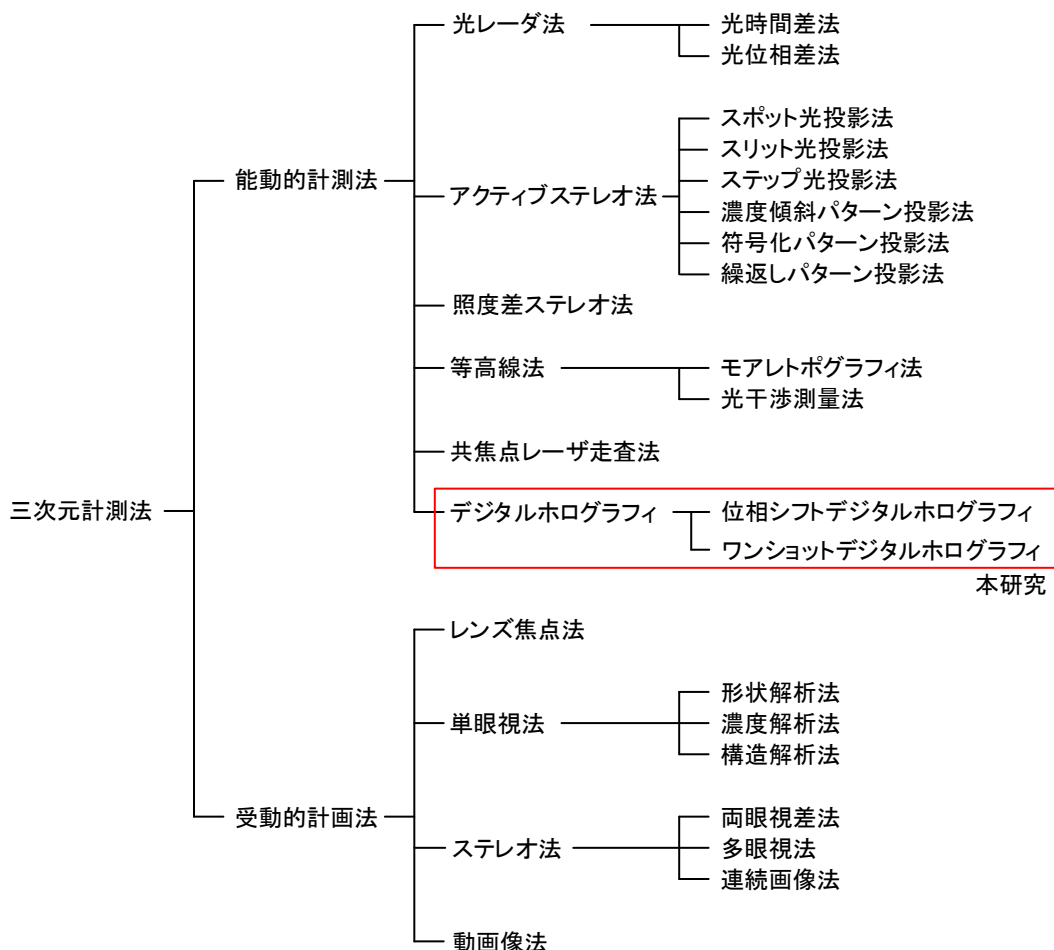


図 2.1 三次元計測法

2.1 三角測量法

既存の三次元画像計測法の多くは、三角測量法を基礎の計測手法として用いる。ここで、三角測量法について説明する。三角測量法は三角形の原理を使い、離れた地点との距離を計測する手法である。図2.2に示すように、ある2点(観測点Aと観測点B)間の正確な距離 L が既知である場合、その2点から離れた場所の

ある地点との距離は，その2点との角度 θ_A, θ_B が分かれば，「三角形の一辺の長さとその両端角が分かれば三角形が確定する」という性質により，算出することができる．

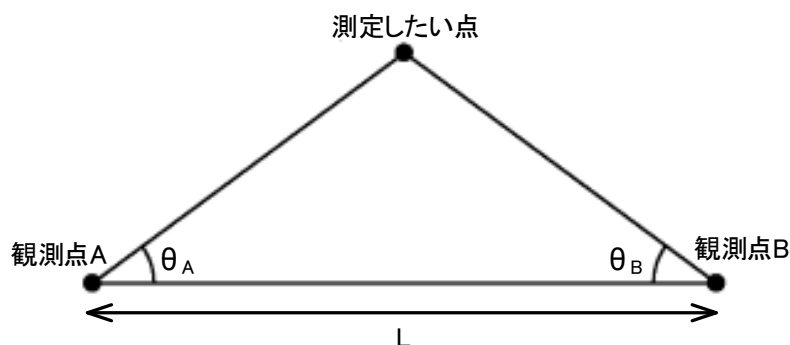


図 2.2 三角測量法

具体的な計算としては，三角形の内角の和は π であることと正弦定理を利用すると全ての辺と角の値が求められる．さらに観測点Aと観測点Bの正確な座標が算出できれば，その座標を用いて測定したい点の座標が得られる．

2.1.1 光切断法

三次元画像計測法の代表とした手法は光切断法およびパターン投影法である．ここで，光切断法について述べる．光切断法とは，計測対象にライン状のレーザ光(レーザスリット光)を照射し，三角測量の原理を利用して距離を計測する手法である^{[63][64]}．図2.4に光切断法の原理図を示す．スリット光は，レーザスポット光をシリンダリカルレンズなどでライン状にして投影したものである．計測物体表面に投影されたスリット光は物体表面の形状に応じて変形し，カメラなどの撮像面上に投影される．通常は，距離計算を単純化するために，スリット平面はカメラ座標の水平または垂直方向の軸と平行になるように生成する．このとき，計測距離 Z は式(2.1)で計算できる．ただし， f はカメラレンズの焦点距離， L は線分 AB の長さ， y は輝線位置の画像中心からの撮影面上での y 軸方向の距離， θ はスリット光の投影角度を示している．

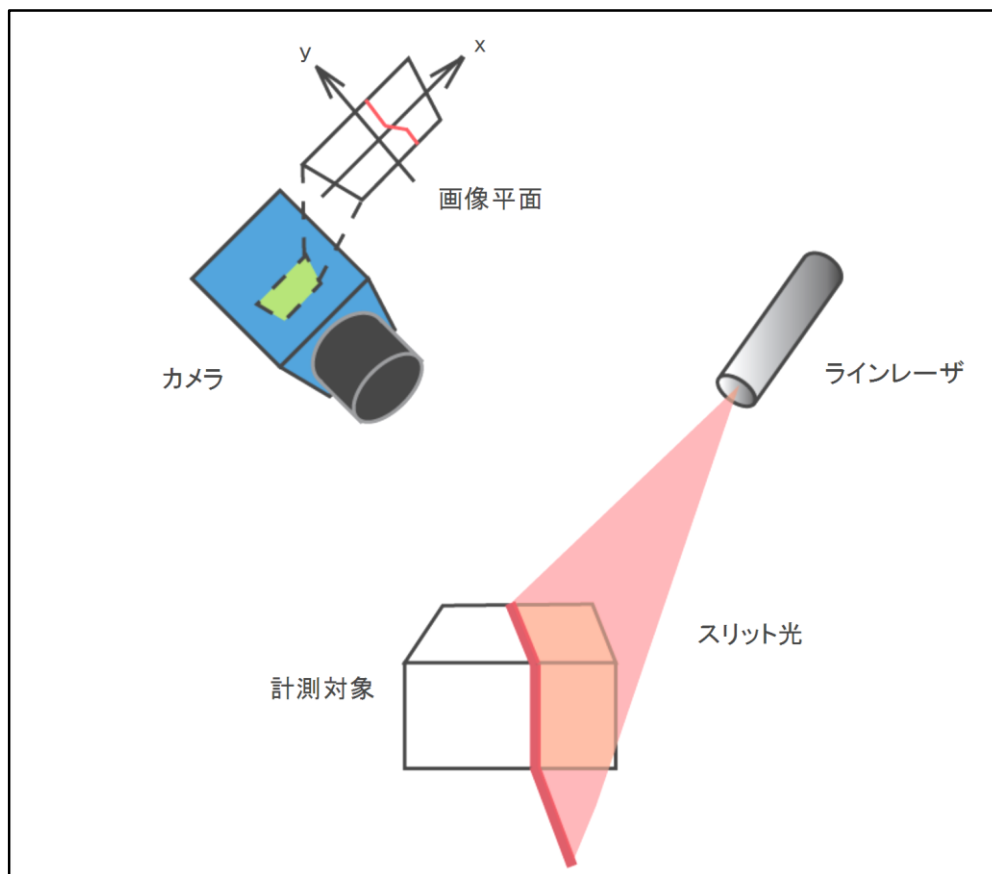


図 2.3 光切断法

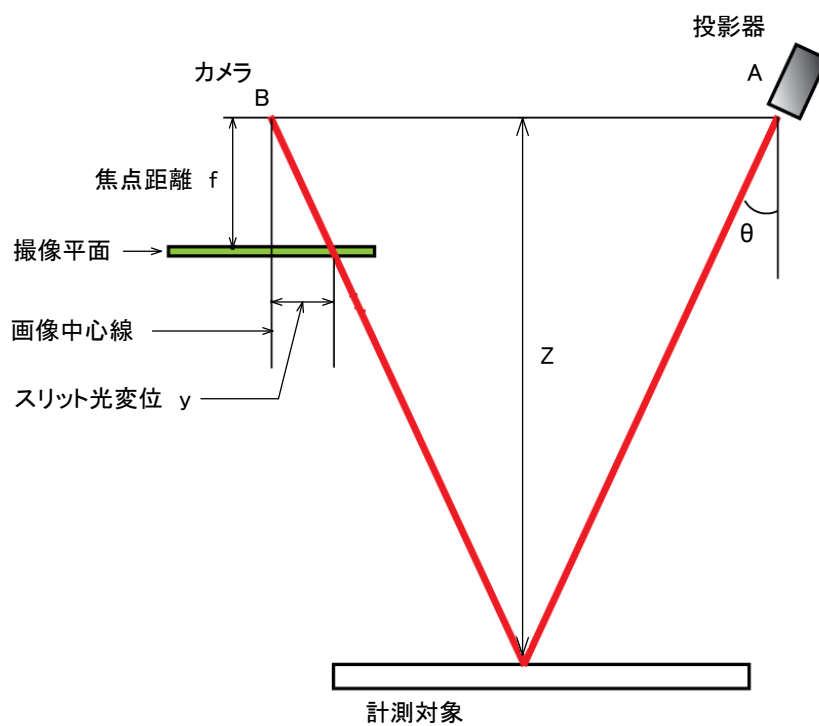
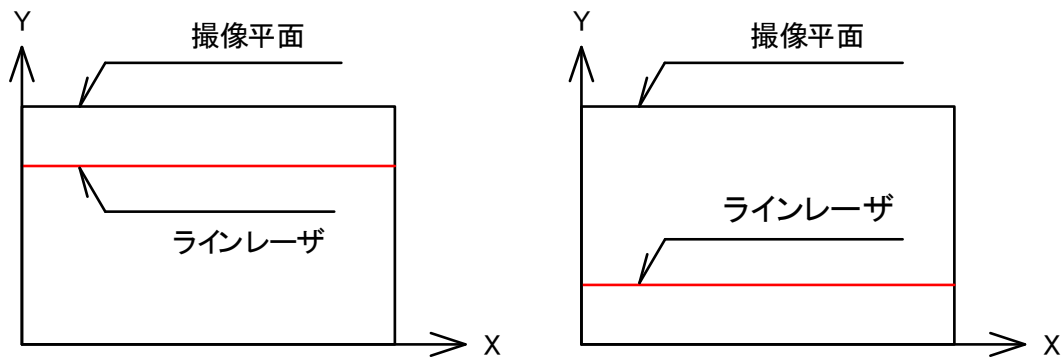


図 2.4 光切断法のモデル図



(a) 距離 Z が小さい場合

(b) 距離 Z が大きい場合

図 2.5 光切断法によって得られるラインレーザの例

$$Z = \frac{f \cdot L}{y + f \cdot \tan \theta} \quad (2.1)$$

図2.5に光切断法により得られる計測対象表面のラインレーザのモデルを示す。光切断法では、既知の f, L, θ, y を用いる事で、式2.1から計測距離 Z が算出できる。そのため、距離 Z を正確に算出するには、 f, L, θ, y の4変数の値を正確に得る必要がある。そのため実際に計測を行う際にはカメラや投影器を設置した後、カメラキャリブレーションを行い、これらの変数を求める。変数 L は各機器の位置関係に依存するため、その位置関係が変動した場合は再度キャリブレーションを行う必要がある。また、三次元形状を計測するには、計測対象を走査する必要がある。そのため、光切断法を用いた高速な三次元形状計測の実現が困難である。さらに、三次元形状計測の空間分解能および計測精度は計測対象の走査分解能および光源として使用したラインレーザの幅に依存するため、微小な凹凸の計測が可能な三次元形状計測の実現が困難である

2.1.2 空間コード符号化法

パターン投影法では、空間コード符号化法および位相シフト法が広く利用されている。ここでは、まず空間コード符号化法について説明し、次に位相シフト法を説明する。空間コード符号化法とは光切断法の一つであり、領域にコードを割り付け、そのコードの変位から距離を算出する手法である^{[66]~[68]}。例と

して、図2.6のような3枚のコードについて説明する。図2.6(a)のような白(1)、黒(0)からなる縞パターンを投影し、半分は白(1)が投影されて明るい部分、残りの半分は黒(0)が投影されて暗い部分を作成する。この状態から次第に細かく(b)、(c)のような縞パターンに分割されたコードに変化させていく。この例では3種類のパターンを作成しているので、縦方向に領域を分割していくと、上から000, 001, ..., 111のように3ビットで8の領域($2^3 = 8$)にコードを割り付けることができる。

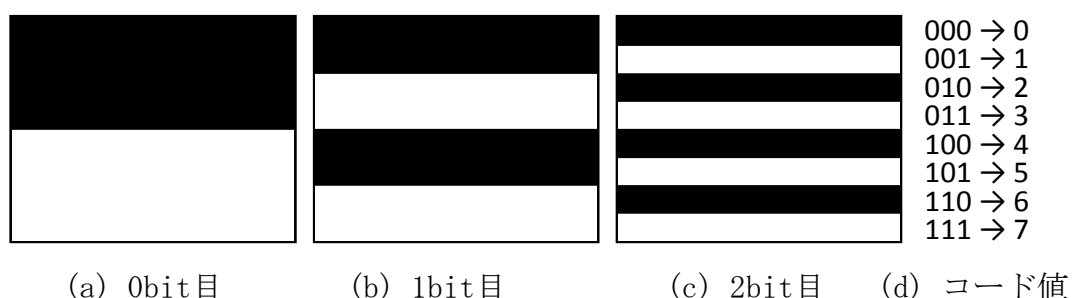


図2.6 空間コードパターン例(2進コード)

上記の説明を簡単にするため、投影する縞パターンは2進コードで表現した。しかし、実際に投影する縞パターンにはグレイコード(交番2進コード)と呼ばれる特殊なコード(図2.7)を用いる。グレイコードは隣接コード間のハミング距離が常に1であり、符号境界でのコード化誤りを最小化できる特徴がある。

グレイコードと2進コードには、下式の関係がある。

$$\begin{aligned}
 B_{n-1} &= G_{n-1} \\
 B_{i-1} &= B_i \oplus G_{i-1} \quad (i = n-1, n-2, \dots, 1, 0)
 \end{aligned}
 \tag{2.2}$$

ここで、 B は2進コード、 G はグレイコードを表わす。 n はグレイコードおよび2進コードのビット数である。 \oplus は排他的理論和を示す。

空間コード符号化法では、三次元形状計測に必要な空間コードを算出するために、計測の際に複数の投影と撮影が必要である。また、三次元形状計測の空間分解能および計測精度は投影する空間コードパターンの細かさに依存する。そのため、光切断法と同様に、高速な三次元形状計測が困難であり、計測対象に存在する微小な凹凸の三次元形状計測が困難である。

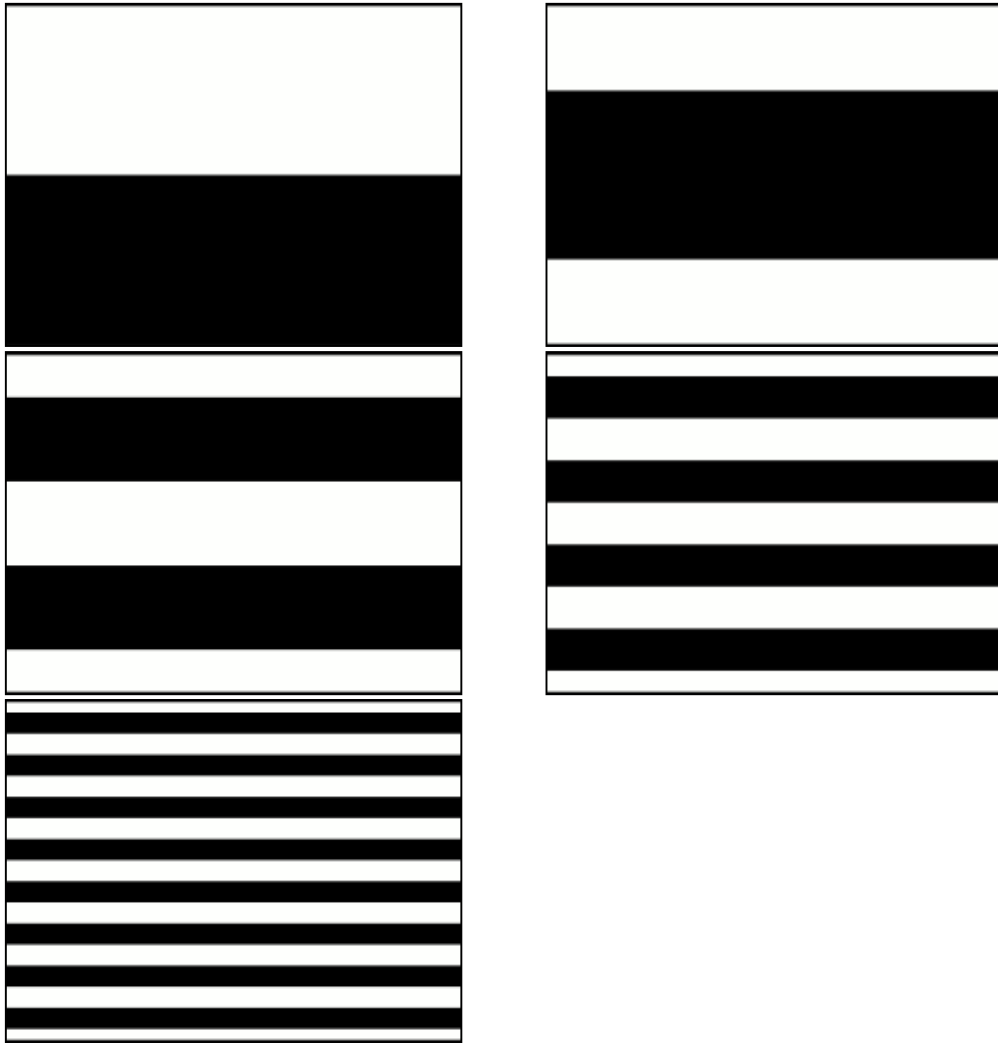


図2.7 グレイコードパターン

2.1.3 位相シフト法

スリット光走査法や空間コード符号化法では，コード画像の最も細かいスリット領域毎に距離を算出するため，距離値の分解能はスリットの細かさ，あるいはスリットの移動分解能に依存する．更に細かに3次元形状を計測するための手法として，位相シフト法(位相シフトモアレ法)がある^[69]．これにより，微小な凹凸の計測が可能となる．

位相シフト法では，線状のレーザ光を物体に投光する代わりに，既知の輝度パターンを投影した複数の画像から投光パターンの変化を得ることにより，3次元計測を行う．具体的には，図2.8のように対象物に斜め方向から明暗で正弦波を表したパターンを投影し，得られた位相のずれ $\Delta\theta$ を距離のずれ ΔZ に対応さ

せるという手法である。測定できる距離 ΔZ は、撮影系に依存するパラメータの他、輝度値の分解能に依存する。

計測の際は、輝度値の明暗で正弦波を表した縞パターン(図2.9)を計測対象物の表面に向けて投影し、その様子をカメラで撮影する。投影パターンは正弦波の位相を $\pi/2$ ずつずらして4回投影し、その都度カメラで撮影する。パターンの位相は合計で1周期分移動する。撮影された4枚の画像上の同じ座標における輝度値 $I_a \sim I_d$ は、図2.10に示すように、絶対的な輝度値はその座標での表面状態や色などで変化しても、相対的な輝度値は必ず投影パターンの位相差分だけの変化を示す。そのため、位相シフト法は環境光や計測対象の表面の色などに影響を受けにくいという利点がある。

そのため、後節で説明する位相シフト法により正弦波の方程式をあてはめれば、その座標での投影されたパターンの位相値が求められる。これを位相復元と呼ぶ。位相値の等しい点を連結して得られる線(等位相線)は、光切断法における切断線と同じく対象物のある平面で切断した断面の形状を表している。そのため、この位相値をもとに三角測量の原理により3次元形状(画像各座標 (x, y) における距離値)が計測できる。

位相シフト法の計測対象物として平面を用いた場合、出力される位相復元値は、理想的には図2.11のようになる。また、位相連結と呼ばれる処理を行うことで、空間コード符号化法に比べてより細かなコード画像を作成することが出来る。図2.12に、位相シフト法により平面を計測した結果算出された位相値の例を示す。

スポット光投影法を含め、スリット光走査法や空間コード符号化法、位相シフト法などの光学的な干渉を生じさせて三次元形状を計測する能動的な手法は、アクティブステレオ法と呼ばれる。この手法は、ステレオ法における2つのカメラのうち、片方を光源に置き換えた計測法であり、ステレオ法で問題となる対応点探索問題を解消することができる。また、パターンの投光範囲およびカメラの撮影範囲が容易に変更できるため、計測範囲が数センチメートルから数メートルまで容易に変更できる。さらに、三次元形状計測する前に、キャリブレーション処理を実行するため、形状変化の大きい物体に対しても三次元形状計測が可能である。しかしながら、これらの三次元形状計測法において、パターンを計測対象に投影してカメラで撮影した計測対象の画像を解析するという特徴が存在する。そのため、鏡面物体を計測する場合に、パターン光反射が強く、撮影画像にサチュレーションが発生してしまうため、撮影画像に対す

る解析が不可能となり，三次元形状計測が不可能となる．また，透明物体を計測する場合に，計測対象表面から光を反射しないため，カメラで反射光の情報を取得することができず，三次元形状計測が不可能となる．

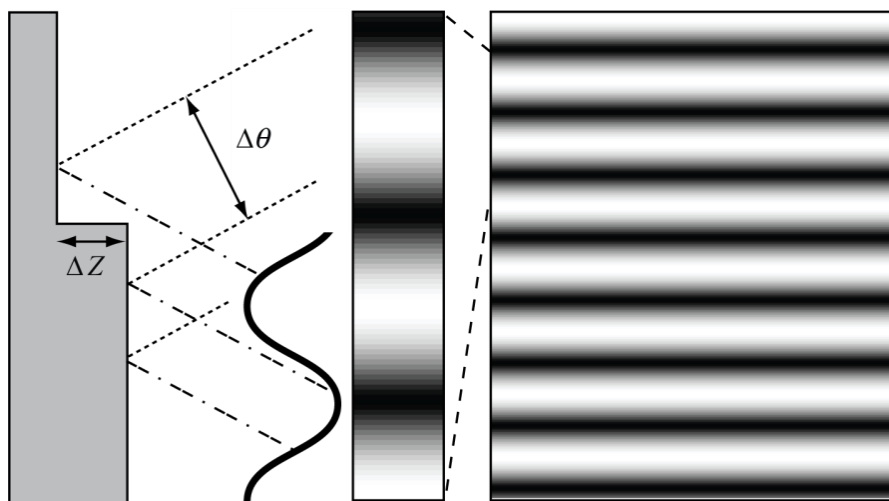


図2.8 位相シフト法模式図

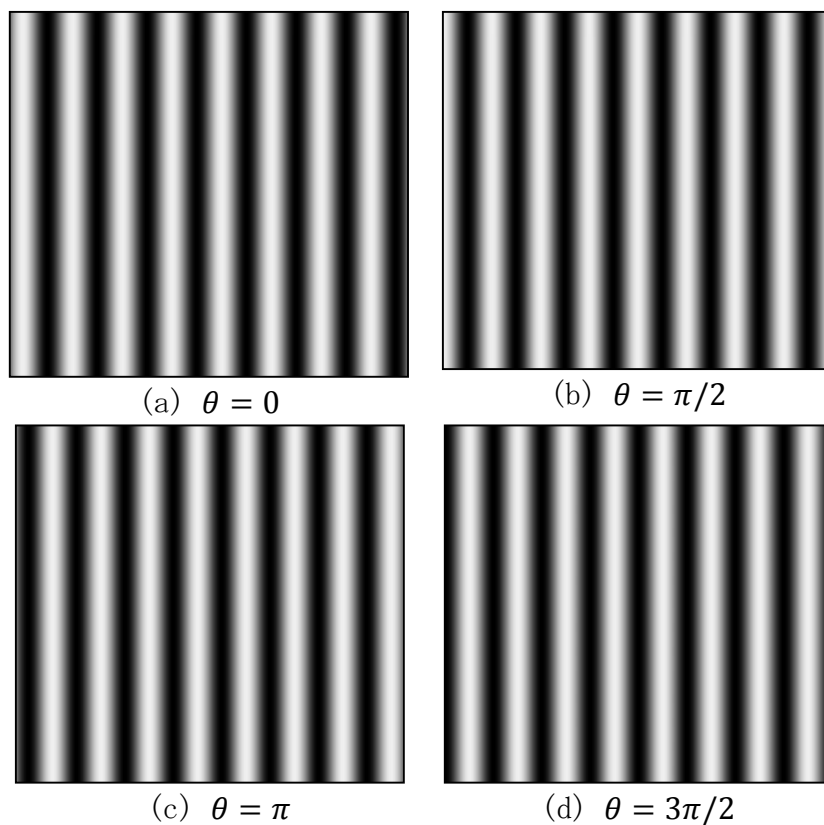


図2.9 正弦波縞パターン

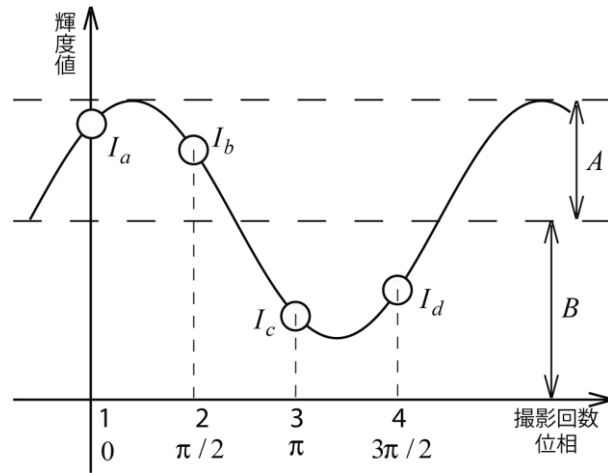


図2.10 位相シフト (A : 投影光の強度 B : 環境光の影響)

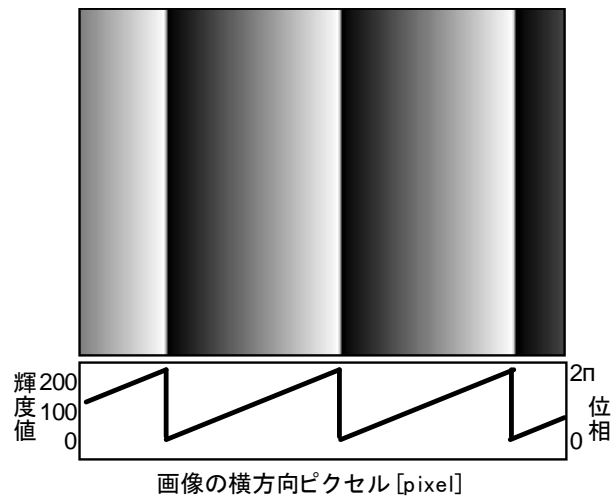


図2.11 理想的な平面の位相値

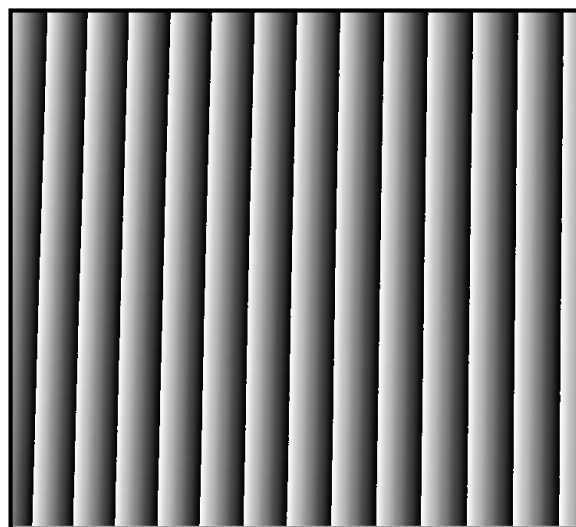


図2.12 平面で算出した位相値

2.2 レンズ焦点法

レンズ焦点法 (Shape from Focus method) は、レンズのフォーカス位置を移動させながら、合焦しているときの移動位置を求め、そのときのフォーカス位置から距離を求める三次元形状計測手法である。焦点法の中、合焦断面法および共焦点レーザ走査法は最も利用されている。

2.2.1 合焦断面法

合焦断面法^[70]とは、被写界深度の浅いレンズを移動させながら、カメラで各移動位置の画像を撮影し、レンズ焦点法を用いて、計測対象の三次元形状を計測する手法である。合焦断面法の撮影方法および撮影画像の概念図を図 2.13 に示す。図 2.13 (b) に示すように、焦点距離から外れた状態で撮影した場合、エッジ部分の輝度の立ち上がりが緩やかになり、輪郭線が薄く広がる状態の焦点ボケ画像になる。一方、焦点位置に合う状態で撮影した場合、撮影画像中のエッジ部分の輝度変化が激しくなり、輪郭線が細くなる。

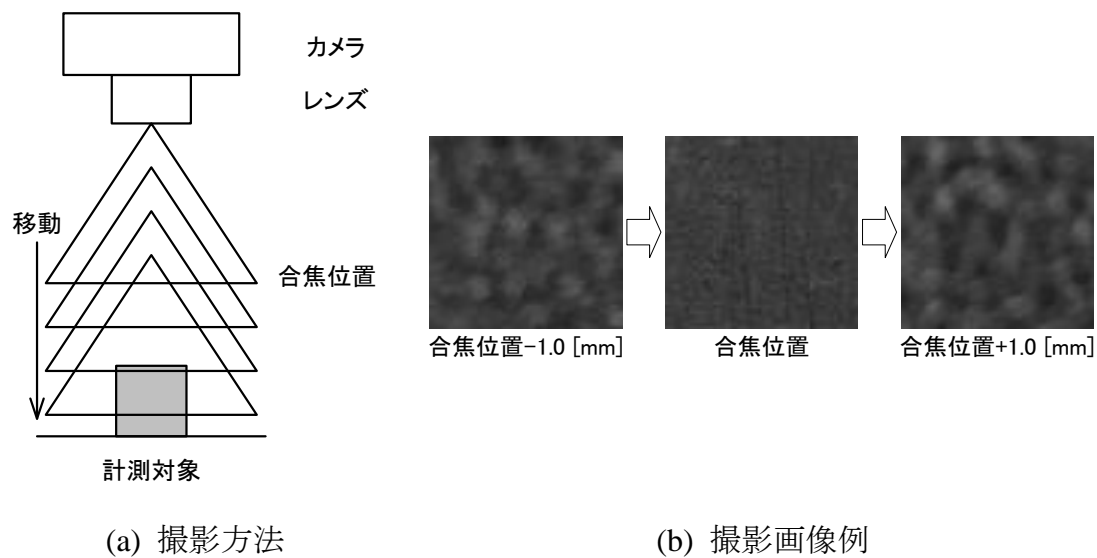


図 2.13 合焦画像と焦点ぼけ画像の概念図

合焦断面法では、合焦精度の判定するために、合焦測度を演算している。合焦測度はボケをガウス分布の低域通過フィルタとして考え、微分オペレータを用いた値を使用し、合焦位置をガウス関数へ回帰し求めている。合焦測度の演算に式 2.3 に示す変形ラプラシアン $ML(x, y)$ を用いている。

$$ML(x, y) = |2I(x, y) - I(x-1, y) - I(x+1, y)| + |2I(x, y) - I(x, y-1) - I(x, y+1)| \quad (2.3)$$

ここで、 $I(x, y)$ は撮影画像、 (x, y) は画像座標を表わす。 ML は合焦測度である。ガウス関数への回帰は合焦測度が最大の値とその前後の3つの値のみを用いて、式2.4より、算出する。

$$\bar{d} = \frac{(\ln F_m - \ln F_{m+1})(d_m^2 - d_{m-1}^2) - (\ln F_m - \ln F_{m-1})(d_m^2 - d_{m+1}^2)}{2\Delta d \{(\ln F_m - \ln F_{m-1}) + (\ln F_m - \ln F_{m+1})\}} \quad (2.4)$$

ここで、 \bar{d} は合焦位置、 F_M は位置 d_m の合焦測度、 Δd はレンズの移動距離間隔である。

式2.4より、最大合焦測度に対応した距離値を算出して計測対象の三次元形状を計測することができるが、下記の条件が必要になる。

- (1) 表面が粗い、もしくは計測部品にエッジとして検出できる領域があること。
- (2) レンズと計測物体との距離が狭いこと。

そのため、合焦断面法を用いて、表面の粗い計測対象に対する三次元形状計測が可能である。しかしながら、鏡面反射および透明な物体の三次元形状が計測できない。また、レンズの特徴として、レンズと計測対象の距離が長くなる場合、レンズの被写界深度が広くなり、計測精度が低下してしまうため、高精度な三次元形状計測を実現することが困難である。さらに、計測時、レンズを移動するため、高速な三次元形状計測が実現できず、計測精度が移動ステージの制御精度に依存する。

2.2.2 共焦点レーザー走査顕微鏡

共焦点レーザー走査法は顕微鏡システムに多く応用され、このような顕微鏡システムを共焦点レーザー走査顕微鏡と呼ぶ。共焦点レーザー走査顕微鏡では、共焦点レーザー走査法を用いて、高解像度のイメージと三次元情報の再構築が可能である^{[71][72]}。共焦点レーザー顕微鏡が持つ最大の特徴の一つは、非侵襲で内部計測が可能なことである。本節では、共焦点レーザー走査顕微鏡について説明する。

一般的な光学顕微鏡と共焦点顕微鏡の結像光学系を図 2.14 に示す。

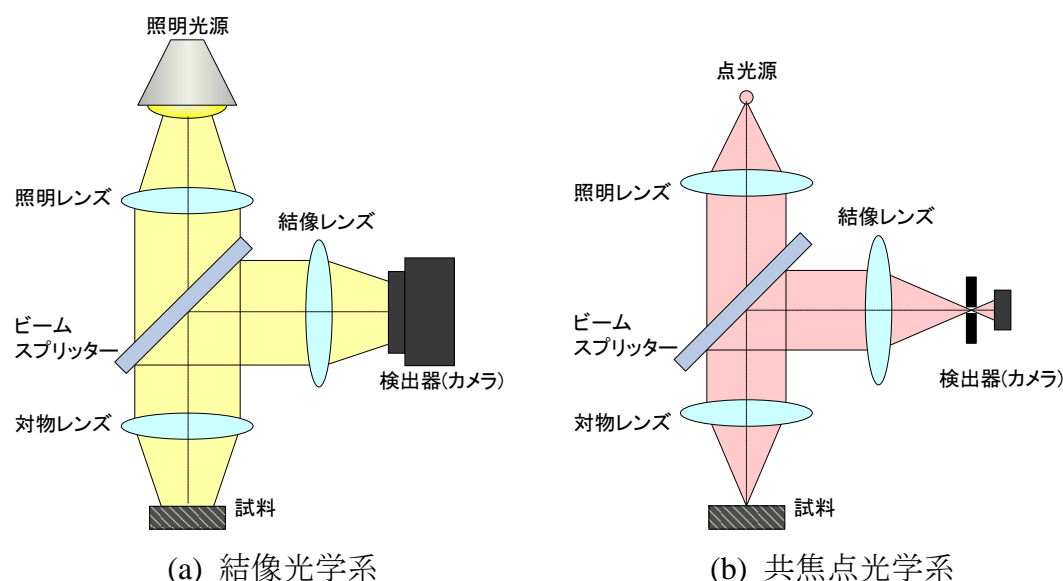


図 2.14 顕微鏡光学系

一般的な光学顕微鏡を用いた形状測定では、試料から反射された光は、結像レンズに様々な角度で入射して、検出器(カメラ)の決める開口の範囲内にすべて検出することとなる。そのため、焦点面だけでなく非焦点面からの光も捕らえてしまうため、凹凸のある表面や傾斜している面を観察しようとする、得られる画像は一部しか焦点が一致していない。一方、共焦点顕微鏡は、光検出器の手前にピンホールを配置することで、その位置で結像しない光を実質上すべて遮断し、入射角度のみならず、試料からの光の光軸方向の位置も限定して、光検出器に光を進ませることができる。また、このときピンホールの位置で結像する光が焦点面から反射した光になるように調節することで、焦点面からの光のみを検出して、焦点の一致した画像を作成することができる。

この共焦点光学系の原理は、1957年に Minsky により考案された。図 2.15 にその原理を模式的に示す。

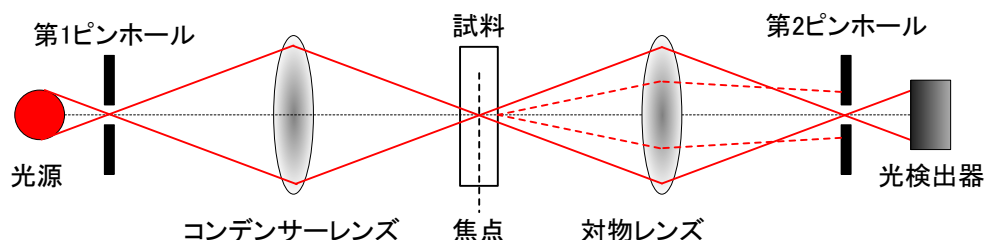


図2.15 平面で算出した位相値

光源から発射された光は第1ピンホールを通過して、コンデンサーレンズで試料上に照射される。試料からの光は、対物レンズにより再び集光され、焦点面からの光(図 2.15 上の赤色実線)のみが第2ピンホールを通過して、光検出器により電気信号に変換され、焦点面以外からの光(図 2.15 上の赤色点線)は第2ピンホールを通過できない。ここで、第1ピンホール(点光源)、試料、第2ピンホール(像位置)がすべて共役位置にあることから共焦点光学系と呼ばれる。また、第1ピンホールは必ずしも必要ではなく、近年の共焦点レーザ顕微鏡では、シングルモードファイバーのコア部分やLD(Laser Diode)の発光点がこのピンホールを兼ねている。

共焦点顕微鏡に用いられる光源としてはレーザが有効である。その理由を以下に示す。

- (1) 点光源とみなすことができ、位相がそろい干渉性や指向性も高く、理論的な回折限界付近までビームを絞り込むことができる。
- (2) 輝度が従来の光源(水銀ランプなど)に比べて高く、出力も安定する。
- (3) 波長帯域が狭く、一般には直線偏光であり、音響光学素子等による高速の強度変調が可能である。

上記の理由より、共焦点顕微鏡に用いられる光源はほとんどはレーザである。共焦点レーザ走査顕微鏡の基本光路図を図 2.16 に示す。

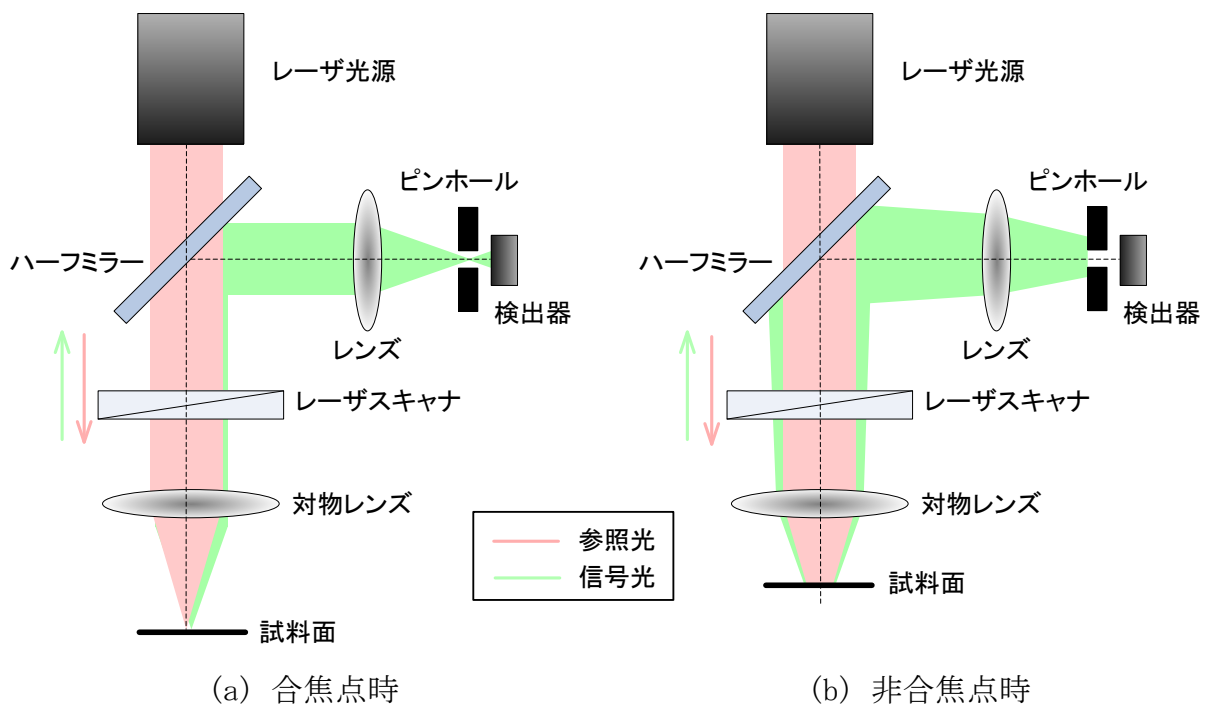


図 2.16 共焦点レーザ顕微鏡の基本光路

共焦点レーザ走査顕微鏡は、主としてレーザ光源、レーザスキャナ、制御・解析を行なうコンピュータから構成される。高輝度でコヒーレントな光であるレーザが発射、対物レンズにより集光され、試料に照射される。このとき、レーザ光は Huygens-Fresnel の理論値に近い小さなスポットまで絞り込める。つまり、光学的にコントロールされた光が試料のある一点の最小サイズのスポットとして照射される。スポット内の試料から反射された光は再び対物レンズを通過して細く絞られる。Minsky の基本原理では、光の焦点の作成をコンデンサーレンズと対物レンズにより行うが、この場合は対物レンズ1つで行なうことが可能となる。また、共焦点が結ばれる位置にはピンホールが置かれており、焦点面からの反射された光のみが通過できる(図 2.16(a))。すなわち、ピンホール通過光のみが光検出器に達して像は電気信号化される。一方、焦点面以外からの反射された光はピンホールを通過することができない(図 2.16(b))ため、光検出器には達しない。このようにして、一般の光学顕微鏡で像がぼやける原因となる焦点面以外からの光は共焦点レーザ走査顕微鏡では検出されず、焦点面からの信号のみが得られる。

共焦点レーザ顕微鏡は以下のように、一般の光学顕微鏡に比べてコントラストや分解能が向上するという特徴を有している。

- (1) 照明が点状であるため試料に隣接する横方向からの迷光が生じない。
- (2) 焦点位置だけの情報がピンホールを通過して検出器に到達し、焦点位置以外の光はピンホールでカットされるため、深さ方向に分解能が生じ、光学的断層像を得ることができ、非侵襲で物体の表面および半透明物体の内部構造に対する三次元形状計測が可能である。これは、一般的な顕微鏡では実現できないことである。
- (3) 特に、蛍光共焦点顕微鏡の場合、照射する光と試料からの蛍光はインコヒーレントなため、得られる点像強度分布(PSF: Point Spread Function)は、照明系と検出系各々のPSFの積(いわゆる2乗特性)で決まる。その結果、一般的な顕微鏡よりもPSFがよりシャープになり、水平分解能及び、深さ分解能が一般的な顕微鏡よりも向上する。

また、共焦点レーザ走査顕微鏡の特徴として、得られた像が電気信号化されていることが挙げられる。これにより、コンピュータによる画像処理を容易に行うことができ、定量化による評価、コントラストの増強、画像の重ね合わせによる三次元復元処理などを行うことができる。

しかしながら、三次元形状を計測する時、計測対象をステージで動かし、走査しながら三次元形状計測を行うため、計測対象が大きくなると移動回数が増える。そのため、計測対象が大きくなるほどステージの移動誤差が蓄積しやすく、計測精度は計測対象が大きいくほど不安定になる。また、走査時間が長いため、高速な三次元形状計測を実現するのが困難である。さらに、三次元計測の空間分解能は対物レンズで集光されたレーザスポットに依存する。最後に、レーザ光を計測対象表面反射して光検出器で焦点面を検知することで三次元形状計測を行うため、鏡面反射物体の三次元形状計測に適用できるが、透明な物体の三次元形状計測に不向きである。

2.3 TOF法

TOF法^[73](Time Of Flight, 光の飛行時間)は近赤外線LEDなどの高速光源と距離画像データを取得するために特別に設計されたカメラセンサを用い、投光した光が計測対象に照射して戻る時間を各画素ごとにリアルタイムで測定する手法である。

TOF法を用いた三次元形状計測の概念図を図2.17に示す。

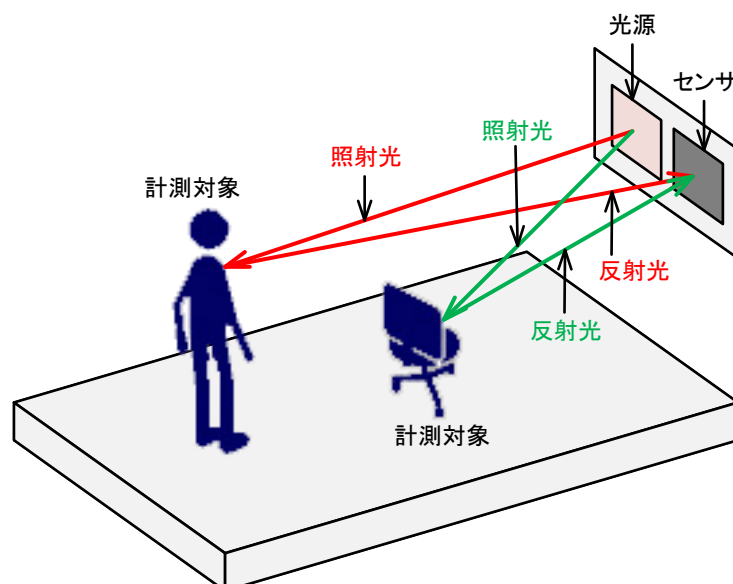


図 2.17 TOF法を用いた三次元形状計測の概念図

TOF 法では、光源から計測対象に照射して、計測対象からカメラセンサまで反射した光の伝播時間を用いて三次元形状計測を行うため、高速な三次元形状計測を実現することができる。しかしながら、計測精度はカメラセンサの距離検知精度に依存し、空間中に存在する外乱光は計測精度に悪影響を与えるため、高精度かつロバストな三次元計測手法ではない。また、透明な物体を計測する場合には、投光した光が計測対象を透過されるため、TOF 法を用いて透明な物体に対する三次元形状計測ができない。一方、鏡面反射物体を計測する場合には、計測対象の傾き角度により、反射光がカメラセンサに戻れば、三次元形状計測が実現できるが、その以外の角度であれば、三次元形状計測が困難である。

2.4 光干渉法

光干渉法は鏡面反射および透明物体を高精度に計測する可能な手法として提案されている。光干渉法では、白色光干渉法およびデジタルホログラフィによる三次元形状計測法が最も利用されている。本節では、光干渉法の代表手法とした白色干渉法およびデジタルホログラフィによる三次元形状計測法について説明する。

2.4.1 白色光干渉法

白色光干渉法とは、干渉性能の低い白色光を光源にして、ミラウ型やマイケルソン型などの等光路干渉計を利用し、測定面に対応するカメラセンサ各画素の等光路位置(干渉強度が最大になる位置)を、干渉計対物レンズを垂直走査して見つけ、等光路位置から計測対象の三次元形状を取得する手法である^{[74][75]}。

白色光干渉計の光学構成図を図 2.18 に示す。干渉計対物レンズ内のビームスプリッタにより、レーザ光は二分割される。ビームスプリッタを透過したレーザ光は計測対象の表面に照射して、計測対象の表面から反射したレーザ光は物体光になる。一方、ビームスプリッタから反射したレーザ光は平面ミラーに照射して、平面ミラーから反射したレーザ光は参照光になる。物体光と参照光はビームスプリッタにより結合され、干渉計対物レンズの内部において、干渉縞を生成する。

白色光干渉法の場合，三次元形状計測に使用する白色光源の干渉性能が低く，コヒーレント長が短いため，干渉縞を生成する可能な物体光と参照光の光路差の範囲が数十ナノメートル程度と極めて短い．そのため，干渉計対物レンズを垂直走査すれば，物体光と参照光の光路差が白色光源のコヒーレント長と同一になる場合，強度が最大である干渉縞が生じる．そこで，干渉計対物レンズの垂直走査の起点を距離原点とすれば，原点から干渉強度が最大になる垂直走査の位置(等光路位置)までの走査距離により，計測対象表面の三次元形状の距離値が算出できる．また，干渉計対物レンズの光学分解能は三次元形状計測の空間分解能であるため，干渉計対物レンズを垂直走査してカメラセンサにおける各画素の等光路位置を見つけることで，高精度な三次元形状計測が実現できる．カメラセンサの1画素において，走査距離と干渉強度の関係の概念図を図 2.19 に示す．

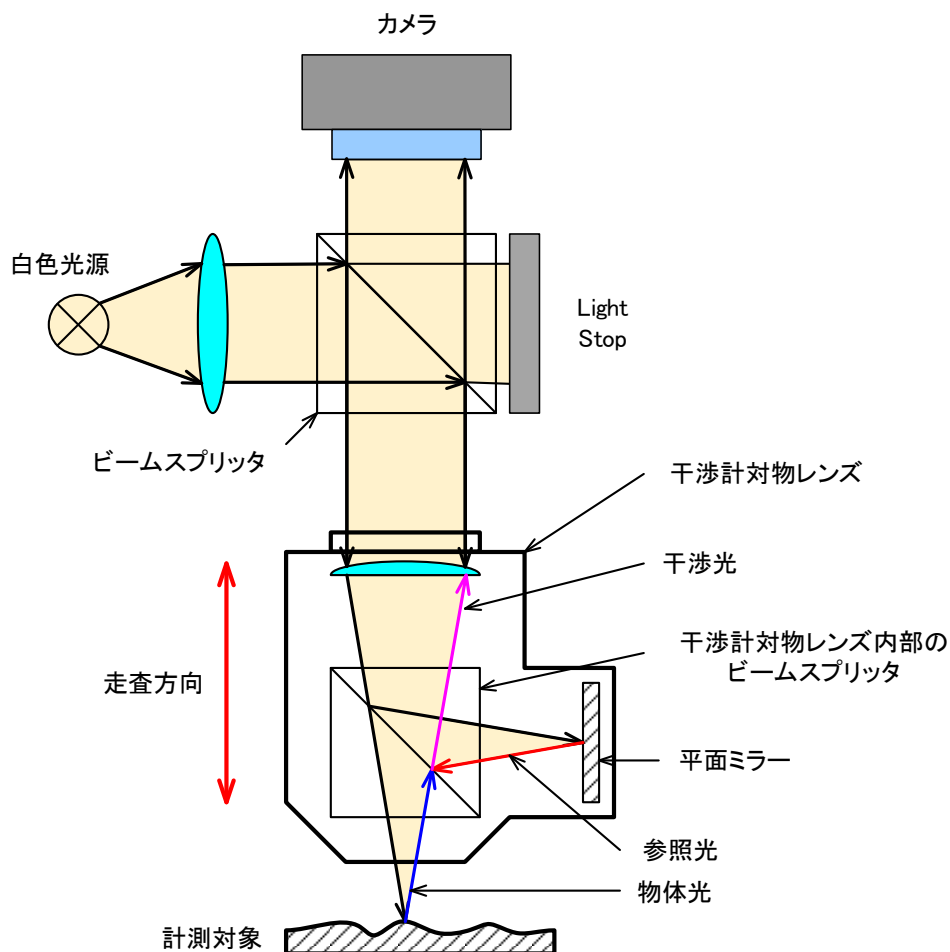


図 2.18 白色光干渉計の光学模式図

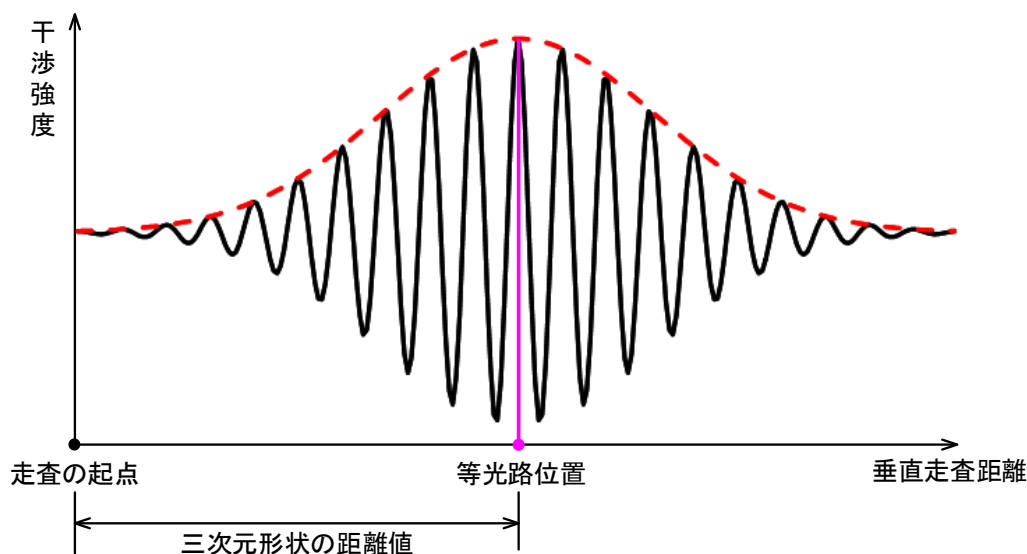


図 2.19 走査距離の干渉強度の関係の概念図

白色光干渉法を用いて、三角測量法、レンズ焦点法および TOF 法より高精度に鏡面反射および透明な物体の三次元形状を計測することが可能であるが、三次元形状計測には干渉計対物レンズを垂直走査する必要があるため、高速な三次元形状計測を実現することが困難である。また、計測精度は光源として使用した白色光のコヒーレント長に依存するため、精度が数ナノメートルである高精度な三次元形状計測の実現が困難である。さらに、干渉計対物レンズおよび垂直走査に使用するピエゾステージが百万円程度と高価であり、計測対象と計測装置の振動が三次元形状計測に悪影響を与えるため、安価かつ安定な三次元形状計測の実現が困難であるという問題点が存在した。

2.4.2 デジタルホログラフィによる三次元形状計測法

デジタルホログラフィによる三次元形状計測法とは、ホログラムの原理を利用した精密三次元形状計測法である。

デジタルホログラフィによる三次元形状計測法の基本的な光学構成を図 2.20 に示す。この手法では、干渉性能の高いレーザ光を計測光源として使用する。計測を行う際に、まず、物体光と参照光の干渉縞をカメラで撮影する。ここで、計測対象が鏡面物体の場合には、物体光は計測対象表面からの反射光となり、透明な物体を計測する場合には、物体光は計測対象を透過したレーザ光となる。また、計測対象の形状変化により、物体光と参照光の光路差が発生するため、干渉縞はその光路差により発生した物体光と参照光の位相差を表わす。

次に、フレネル変換を用いて物体光を再生することで、干渉縞の情報から物体光の位相情報を求める。最後に、 $0\sim 2\pi$ の位相値が計測光源として使用したレーザー光の波長と同一であるため、フレネル変換で求めた物体光の位相値から計測対象の三次元形状を復元することが可能である。

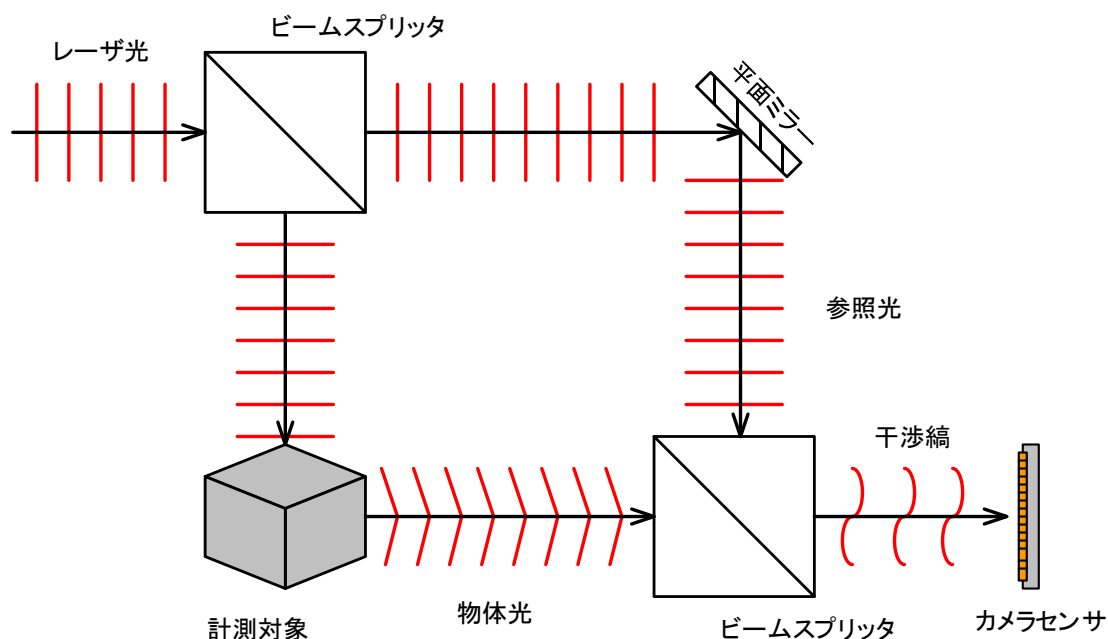


図 2.20 デジタルホログラフィの基本的な構成の概念図

デジタルホログラフィによる三次元形状計測法においてレーザー光の波長で計測対象の形状を計測し、レーザー光の波長がナノメートルであるため、三次元形状計測の計測精度は数ナノメートルであり、白色光干渉法よりも高精度である。また、計測対象から反射した物体光、または、計測対象を透過した物体光が参照光と干渉するため、鏡面反射物体および透明な物体の三次元形状が計測できる。さらに、カメラで撮影した1枚の干渉縞を用いて物体の形状を計測するため、高速な三次元形状計測が可能である。

しかしながら、デジタルホログラフィでは、以下に示すように、様々な問題点が存在している。

- (1) 光干渉の原理およびフレネル変換により、デジタルホログラフィでは、撮影した干渉縞の輝度情報を直接にフレネル変換すれば、算出した位相情報に物体光の位相成分、位相の共役成分および直流成分が同時に存在するため、三次元形状計測を正確に行うことができないという問題点が存在する。そこで、物体光の位相情報を容易に抽出できる位相シ

- フトデジタルホログラフィによる三次元形状計測が提案されたが、三次元計測の安定性および計測装置の低価格化と小型化が困難である。
- (2) デジタルホログラフィの計測範囲を変更する場合、テレセントリックレンズシステムを用いて、計測対象に照射するレーザ光の範囲を拡大・縮小する必要がある。しかしながら、テレセントリックレンズシステムの性能により、拡大・縮小の倍率が有限であり、拡大する場合には計測の空間分解能が低下となる。そのため、三角測量法を用いたアクティブステレオ計測法と比較して、計測範囲が小さく、サイズが数センチメートルから数メートルまでの物体に対する三次元形状計測が困難である。
 - (3) デジタルホログラフィによる三次元形状計測を行う際に、キャリブレーション処理が実行しないため、計測対象にレーザ光波長より大きな段差が存在する場合、位相連結処理が正確に実行できず、三次元形状計測が不可能となる。
 - (4) レーザ光を表面の粗い計測対象に照射する場合、スペックルノイズが発生してしまう。スペックルノイズがフレネル変換を用いた物体光の再生に悪影響を与えるため、物体光の位相情報が正確に算出できない。そのため、デジタルホログラフィによる三次元形状計測法で表面の粗い物体の三次元形状を計測することができない。
 - (5) レーザ光を曲率の高い計測対象に照射する場合、反射した物体光が拡散されてしまう。そのため、拡散された物体光が平行な参照光と干渉しなくなり、デジタルホログラフィによる三次元形状計測法で曲率の高い物体の全体形状を計測することが困難である。
 - (6) レーザ光を計測対象から反射する、又は、透過する必要があるため、鏡面反射物体の表面形状および透明物体の屈折率の変化が計測できるが、共焦点レーザ顕微鏡に比べて、半透明物体の内部構造が計測できない。

本章で説明した三次元形状計測手法の計測精度および計測時間の比較を表2.1、計測特徴の比較を表2.2に示す。なお、表2.2では、複雑な形状物体の計測に曲率の高い物体も含めている。ここで、複雑な形状物体とは、硬貨の表面のように急峻なエッジを含む凹凸が多く存在し、使用後の傷や欠損が多く存在した鏡面反射率の高くない物体を指す。

表2.1 各三次元形状計測手法の計測精度と時間の比較

計測手法	計測精度 [μm]	計測時間 [s]
三角測量法	10~100	1~30
合焦断面法	2~5	>10
共焦点法	1	>1000
TOF法	>1000	0.1
白色光干渉法	0.02~0.1	1~5
デジタルホログラフィ	<0.1	0.1~5

表2.2 各三次元形状計測手法の特徴の比較

計測手法	複雑形状	粗面物体	鏡面物体	透明物体	内部構造
三角測量法	○	○	×	×	×
合焦断面法	○	○	×	×	×
共焦点法	○	○	○	×	○
TOF法	○	○	△	×	×
白色光干渉法	○	○	○	○	×
デジタルホログラフィ	×	×	○	○	×

○：計測可能，△：計測可能な条件ある，×：計測不可

第3章 基礎理論

19世紀末までに、記録媒体として写真フィルムが普及し、コンパクトで手軽に写真が撮影できるカメラが大衆化してきた。しかしながら、写真フィルムが2次元の映像しか記録できず、三次元の映像を記録するには不可能であった。1947年にレーザ光の干渉縞が記録できるホログラムがハンガリーの物理学者ガーボル・デーネジュにより発明された。ホログラムを用いて、レーザ光の干渉縞を記録することで、光の電場の振幅と位相を記録し、三次元映像の再生が可能になった。しかしながら、当時のホログラムでは、干渉縞を1回しか記録できなかった。また、物体の三次元映像が再生できたが、再生した情報から物体の三次元形状を計測することができなかった。1975年に発明されたデジタルカメラに伴い、ホログラムの代わりにデジタルカメラを利用したデジタルホログラフィ技術が急速に発展された。デジタルホログラフィでは、デジタルカメラを用いて、干渉縞の記録をデジタル化することが可能であり、干渉縞情報の繰り返し記録および長時間保存を可能にした。また、高性能コンピュータの発展により、ホログラムを用いた光の再生の数値化および高速計算ができた。そのため、干渉縞の記録および光の再生を数値化することで、デジタルホログラフィによる三次元形状計測法が可能になった。しかしながら、ホログラムと比べて、デジタルホログラフィに以下の問題点が存在していた。

- (1) デジタルカメラセンサの素子サイズが数マイクロメートル程度大きい
ため、ホログラムと比べて、細かい干渉縞が記録できない。そのため、
デジタルホログラフィによる三次元計測の分解能はデジタルカメラセンサの
素子サイズに依存し、三次元情報の再生性能はアナログ材料による記録に
比べて低い。
- (2) デジタルカメラを用いて、干渉縞の強度情報しか記録できない。そのため、
デジタルホログラフィを用いて、物体の三次元情報を再生する際に、三次元
形状計測に必要な物体光の位相情報および不要な位相情報の共役と直流成分
が同時に再生してしまい、干渉縞撮影画像の輝度値のみを用いた三次元形
状計測が困難である。
- (3) 三次元計測装置のサイズが大きく、使用した光学部品が高価であるため、
計測装置の小型化および低価格化が困難である。

- (4) 計測環境に存在する振動や空気の歪みなどにより、干渉縞が不安定であるため、安定な三次元形状計測が困難である。

本研究では、デジタルホログラフィに存在する問題点を解決し、安定かつ高速、高精度なデジタルホログラフィによる三次元形状計測法を提案して、安価な小型三次元計測装置を開発する。本章では、使用した三次元形状計測手法に関わる基礎理論について説明する。

3.1 光の干渉原理

光は電磁波の一種であり、空間中の電場と磁場の変換により、形成された波である。電磁波理論を解析するマクスウェルの方程式を用いて、空間中の電場と磁場を表わすモデルを式(3.3)に示す。

$$\begin{aligned}\vec{s} &= \vec{E} \times \vec{H} \\ \nabla^2 \vec{E} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} &= 0 \\ \nabla^2 \vec{H} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2} &= 0 \\ \nabla^2 &= \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}\end{aligned}\tag{3.3}$$

ここで、 \vec{s} はポインティングベクトル、 \vec{E} は電場強度、 \vec{H} は磁場強度を表わす。 c は真空中の光速である。ただし、光の干渉現象は電場上で発生した現象であるため、磁場に関する方程式が省略でき、空間中に伝播する光波を式(3.4)で表わすことができる。

$$\nabla^2 E - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = 0\tag{3.4}$$

ここで、 E は方程式の解であり、光の複素振幅を表わす。

式(3.4)より、伝播波面が平面のレーザ光の複素振幅を式(3.5)で表わすことができる。レーザ光の伝播の概念図を図3.1に示す。

$$E(x, y, z, t) = a \cos(\omega t - \vec{k}\vec{r} - \varphi) \quad (3.5)$$

ここで、 φ は位相値、 ωt および $\vec{k}\vec{r}$ は伝播時間および伝播方向を表わす。

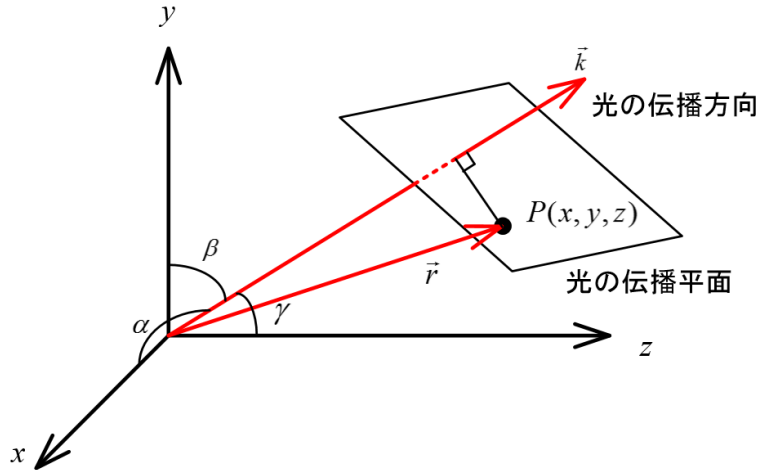


図 3.1 レーザ光の伝播の概念図

カメラおよびスクリーンなどの観察装置を用いて、干渉現象を観察する際に、時刻上における一定な伝播方向の干渉現象を観察するため、伝播時間および伝播方向に関するパラメータが省略でき、オイラーの方程式を用いて、レーザ光の複素振幅を式(3.7)に表わすことができる。

$$E(x, y) = A(x, y) \exp[j\varphi(x, y)] \quad (3.6)$$

ここで、 $E(x, y)$ はレーザ光の複素振幅、 $A(x, y)$ は振幅値、 $\varphi(x, y)$ は位相値、 (x, y) はレーザ光の波面座標を表わす。

物理学における波の干渉概念により、光の干渉は二つの光波の重ね合わせであることが分かる。また、デジタルホログラフィによる三次元計測では、計測対象の表面から伝播してきた物体光および平面ミラーの表面から伝播してきた参照光の干渉を利用するため、光の干渉現象を式(3.7)で表わすことができる^{[76][77]}。

$$\begin{aligned} E_R(x, y) &= A_R(x, y) \exp[j\varphi_R(x, y)] \\ E_O(x, y) &= A_O(x, y) \exp[j\varphi_O(x, y)] \\ E(x, y) &= E_R(x, y) + E_O(x, y) \end{aligned} \quad (3.7)$$

ここで、 $E_R(x, y)$ は参照光の複素振幅、 $E_O(x, y)$ は物体光の複素振幅、 $E(x, y)$ は干渉光の複素振幅を表わす。

ただし、カメラを用いて干渉縞を撮影する際に、位相値を含めた干渉光の複素振幅が取得できず、干渉光の強度振幅のみを輝度情報として取得するため、干渉縞の撮影画像 $I(x, y)$ を式(3. . 8)に示すことができる。

$$\begin{aligned}
 I(x, y) &= |E_R(x, y) + E_O(x, y)|^2 \\
 &= A_R(x, y)A_R^*(x, y) + A_O(x, y)A_O^*(x, y) + A_O(x, y)A_R^*(x, y) + A_R(x, y)A_O^*(x, y) \\
 &= B(x, y) + C(x, y) \cos[\Delta\varphi(x, y)] \\
 B(x, y) &= A_R^2(x, y) + A_O^2(x, y) \\
 C(x, y) &= 2A_O(x, y)A_R(x, y) \\
 \Delta\varphi(x, y) &= \varphi_O(x, y) - \varphi_R(x, y)
 \end{aligned} \tag{3. 8}$$

ここで、 $\Delta\varphi(x, y)$ は物体光と参照光の位相差である。 $\varphi_R(x, y)$ は参照光の位相値、 $\varphi_O(x, y)$ は物体光の位相値を表わす。

参照光の位相値を0とした場合、 $\Delta\varphi(x, y)$ は物体光の位相値と同一であり、つまり、 $\Delta\varphi(x, y)$ は参照光の位相値を参考した物体光の位相値である。本論文では、 $\Delta\varphi(x, y)$ を物体光の相対位相値と呼ぶ。また、物体光の位相値 $\varphi_O(x, y)$ を物体光の相対位相値と区別するために、 $\varphi_O(x, y)$ を物体光の絶対位相値と呼ぶ。

上記により、物体光の相対位相値が算出できれば、参照光の位相値が0としたものの、物体光の絶対位相値を理論的に算出することが可能である。物体光の絶対位相値は計測対象の三次元形状を表わすため、物体光の絶対位相値を用いて、三次元形状計測が可能である。

しかしながら、式(3. 4)により、計測環境の影響およびカメラセンサーに存在するノイズの影響により、干渉光の振幅値を表わ $B(x, y)$ と $C(x, y)$ を正確に算出することが困難である。また、 \cos 関数が偶関数であるため、物体光の相対位相値を計算する際に、位相値の符号における両義性が存在する。さらに、参照光の位相値が0の場合には、物体光の絶対位相値が相対位相値と同一であるが、実際には参照光の位相値が未知であるため、物体光の相対位相値から絶対位相値を算出することが難しい。これらのことにより、1枚の干渉縞撮影画像における輝度情報のみを利用することでは物体光の相対位相値が算出できず、物体光の絶対位相値の計算も困難である。

3.2 フレネル変換

3.1.1で説明したことにより、1枚の干渉縞撮影画像の輝度情報のみを用いて、物体光の絶対位相値が算出できないため、三次元形状計測を行うために、物体光の複素振幅を再生することが必要である^[78]。物体光の複素振幅を再生するさいに、光の回折を数学的に表現できるフレネル変換を使用する。フレネル変換を使用して、物体光をカメラセンサ表面から回折することで、計測対象表面上に存在する物体光の複素振幅が数学的に算出でき、三次元形状計測に必要な物体光の絶対位相値も算出できる。物体光の伝播およびフレネル変換を用いた回折の空間座標の関係を図3.2に示す。一般的なフレネル変換式を式(3.9)に示す。

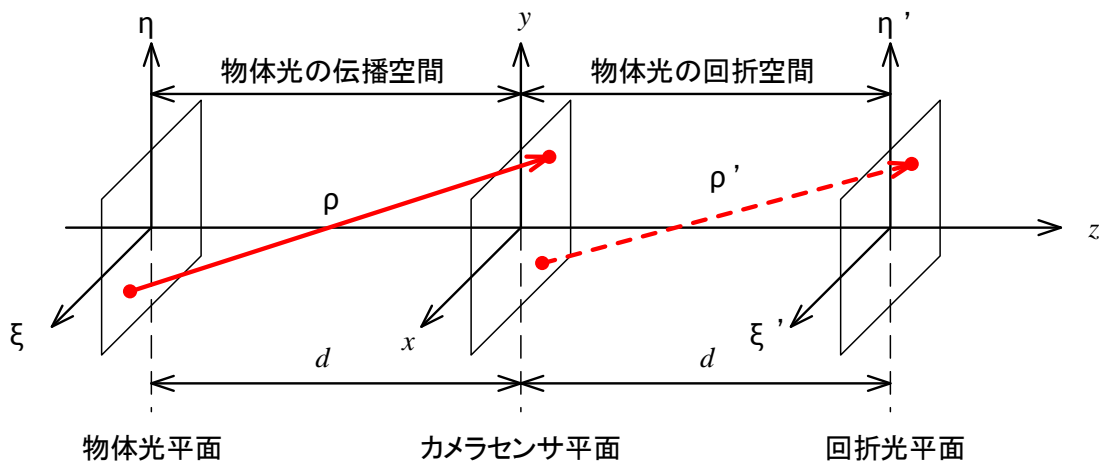


図3.2 物体光の伝播およびフレネル回折の空間座標の関係(概念図)

$$\Gamma(\xi', \eta') = \frac{i}{\lambda} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} h(x, y) E_R(x, y) \frac{\exp(-i \frac{2\pi}{\lambda} \rho')}{\rho'} dx dy \quad (3.9)$$

$$\rho' = \sqrt{(x - \xi')^2 + (y - \eta')^2 + d^2}$$

ここで、 $h(x, y)$ は干渉縞を記録するホログラムの関数、 $E_R(x, y)$ は参照光の複素振幅、 $\Gamma(\xi', \eta')$ は回折した物体光の複素振幅である。 (ξ, η) は物体光の平面座標、 (x, y) はカメラセンサの平面座標、 (ξ', η') は回折光の平面座標を表す。 d は物体光平面とカメラセンサ平面間の距離およびカメラセンサ平面と回折光平面間の距離、 λ は使用したレーザー光の波長である。 ρ は物体光平面上の一点とカ

メラセンサ平面上の一点間の距離， ρ' はカメラセンサ平面上の一点と回折光平面上の一点間の距離である．

デジタルホログラフィでは，ホログラムの代わりにカメラセンサを使用して干渉縞を記録するため，ホログラムの関数は干渉縞の撮影画像となる．また，物体光の複素振幅と回折光の複素振幅は振幅値が同一，位相値が符号反対の複素数であるため，フレネル変換式を式(3.10)に書き換えることができる．

$$\Gamma(\xi, \eta) = \frac{i}{\lambda} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} I(x, y) \frac{\exp(-i \frac{2\pi}{\lambda} \rho)}{\rho} dx dy \quad (3.10)$$

$$\rho = \sqrt{(x - \xi)^2 + (y - \eta)^2 + d^2}$$

ここで， $I(x, y)$ は干渉縞の撮影画像， ρ は物体光平面上の一点とカメラセンサ上の一点間の距離である．

ただし，カメラセンサにおいては，光の複素振幅をデジタル化して，強度情報のみを輝度情報として取得するため，フレネル変換をデジタル化する必要がある．また，デジタル情報処理を容易に行うために，デジタル化を行う際に，テイラー展開を用いて，フレネル変換を簡易化する．デジタル化したフレネル変換を式(3.11)に示す^[79]．

$$\Gamma(m, n) = \frac{i}{\lambda d} \exp(-i \frac{2\pi}{\lambda} d) \exp \left[-i\pi\lambda d \left(\frac{m^2}{N_x^2 \Delta x^2} + \frac{n^2}{N_y^2 \Delta y^2} \right) \right]$$

$$\times \sum_{x=0}^{N_x-1} \sum_{y=0}^{N_y-1} I(x, y) \exp \left[-i \frac{\pi}{\lambda d} (x^2 \Delta x^2 + y^2 \Delta y^2) \right] \exp \left[i2\pi \left(\frac{xm}{N_x} + \frac{yn}{N_y} \right) \right] \quad (3.11)$$

$$m = 0, 1, \dots, N_x - 1$$

$$n = 0, 1, \dots, N_y - 1$$

ここで， $\Gamma(m, n)$ は回折光の複素振幅， (m, n) はカメラセンサの画像座標に対応した回折光の平面座標である． $I(x, y)$ は干渉縞の撮影画像， (x, y) は撮影画像の座標である． N_x と N_y は干渉縞撮影画像幅(横方向のピクセル数)および高さ(縦方向のピクセル数)である． Δx と Δy はカメラセンサにおける1ピクセルの幅と高さである．

式(3.11)を用いて、物体光を回折し、式(3.12)により、物体光の絶対位相値および振幅値を算出する。ただし、三次元形状計測を行う際に、物体光の絶対位相値のみを使用する。

$$\begin{aligned} A_o(m,n) &= |\Gamma(m,n)|^2 \\ \varphi_o(m,n) &= \arctan \frac{\text{Im}[\Gamma(m,n)]}{\text{Re}[\Gamma(m,n)]} \end{aligned} \quad (3.12)$$

3.3 位相シフトデジタルホログラフィ

フレネル変換を用いて、1枚の干渉縞の撮影画像から計測対象の表面上に存在する物体光の複素振幅を算出することができるが、式(3.4)により、位相値情報が存在しない直流成分 $A_R(x,y)A_R^*(x,y) + A_O(x,y)A_O^*(x,y)$ 、物体光の絶対位相値と共役する位相情報が存在する虚像成分 $A_R(x,y)A_O^*(x,y)$ および物体光の絶対位相値情報 $A_O(x,y)A_R^*(x,y)$ は1枚の干渉縞撮影画像に同時に存在する。そのため、フレネル変換を用いて、物体光を回折するさいに、三次元計測に不要な直流成分および虚像成分も回折してしまい、ノイズとして計測結果に悪影響を与える。直流成分および虚像成分を容易に除去し、高精度な三次元形状計測を実現するために、位相シフトデジタルホログラフィによる三次元計測法に関する研究が盛んに行われている。

位相シフトデジタルホログラフィでは、まず、物体光と参照光の光路差をレーザ波長の $1/4$ 倍ずつずらすことで、位相差が $1/2\pi$ の4枚の位相シフト干渉縞を作成し、カメラで撮影する。位相シフト干渉縞の撮影画像における輝度情報の数学モデルを式(3.13)に示す。

$$\begin{aligned} I_1(x,y) &= B(x,y) + C(x,y)\cos(\Delta\varphi) \\ I_2(x,y) &= B(x,y) + C(x,y)\cos(\Delta\varphi + \frac{\pi}{2}) \\ I_3(x,y) &= B(x,y) + C(x,y)\cos(\Delta\varphi + \pi) \\ I_4(x,y) &= B(x,y) + C(x,y)\cos(\Delta\varphi + \frac{3\pi}{2}) \end{aligned} \quad (3.13)$$

ここで、 $I_1(x, y) \sim I_4(x, y)$ は4枚の位相シフト干渉縞撮影画像である。 (x, y) は干渉縞の画像座標である。 $B(x, y)$ と $C(x, y)$ を干渉縞のオフセット値と振幅値をそれぞれ表わす。 $\Delta\varphi$ は物体光の相対位相値である。

次に、4枚の位相シフト干渉縞の撮影画像を用いて、式(3.14)に示す位相シフト法により、物体光の相対位相値 $\Delta\varphi$ を算出することができる。

$$\Delta\varphi(x, y) = \arctan \frac{I_4(x, y) - I_2(x, y)}{I_1(x, y) - I_3(x, y)} \quad (3.14)$$

さらに、算出した物体光の相対位相値を用いて、オイラー方程式により、干渉縞の複素振幅が算出できる。干渉縞の複素振幅を式(3.11)に示したフレネル変換式に代入し、三次元計測に必要な物体光の相対位相値のみを回折することで、直流成分および虚像成分が存在しない物体光の複素振幅が算出できる。干渉縞の複素振幅および位相シフトデジタルホログラフィに使用するフレネル変換式を式(3.15)に示す。

$$\begin{aligned} E(x, y) &= \exp[\Delta\varphi(x, y)] \\ \Gamma(m, n) &= \frac{i}{\lambda d} \exp(-i \frac{2\pi}{\lambda} d) \exp \left[-i\pi\lambda d \left(\frac{m^2}{N_x^2 \Delta x^2} + \frac{n^2}{N_y^2 \Delta y^2} \right) \right] \\ &\times \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{N-1} E(x, y) \exp \left[-i \frac{\pi}{\lambda d} (x^2 \Delta x^2 + y^2 \Delta y^2) \right] \exp \left[i2\pi \left(\frac{xm}{N_x} + \frac{yn}{N_y} \right) \right] \end{aligned} \quad (3.15)$$

最後に、回折した物体光の複素振幅より、式(3.12)を用いて、三次元形状計測に必要な物体光の絶対位相値を算出することができる。

3.4 干渉縞の周波数解析法

位相シフトデジタルホログラフィでは、4枚の位相シフト干渉縞の撮影画像を用いて、位相シフト法により、物体光の相対位相値を算出することで、三次元形状計測に不要な直流成分および虚像成分を容易に除去することができ、デジタルホログラフィによる三次元計測法において、最も高精度な手法である。しかしながら、計測装置および計測対象の振動や空気密度の変化など、計測環

境の影響により、干渉縞が不安定の場合が多い。そのため、撮影した4枚の位相シフト干渉縞画像において、位相差ずれが存在し、物体光の相対位相値を正確に算出することが困難である。上記の問題点を解決し、位相シフトデジタルホログラフィによる三次元形状計測の安定性を向上させるために、本研究では、光干渉測量分野に応用されている干渉縞の周波数解析法^{[80]-[82]}をデジタルホログラフィによる三次元形状計測分野に応用することで、1枚の干渉縞撮影画像のみを用いて物体光の相対位相値が算出できるワンショット位相シフトデジタルホログラフィによる三次元形状計測を提案する。ここで、本研究に使用した干渉縞の周波数解析法を説明する。

式(3.4)により、カメラセンサを用いて干渉縞を撮影する際に、干渉光の強度しか取得できないため、干渉縞撮影画像の輝度情報のみを用いて、物体光の相対位相値が算出できない。しかしながら、オイラーの方程式により、式(3.6)を式(3.16)に書き換えることができる。

$$\begin{aligned}
 I(x, y) &= B(x, y) + C(x, y) \cos[\Delta\varphi(x, y)] \\
 &= B(x, y) + D(x, y) + D^*(x, y) \\
 D(x, y) &= \frac{1}{2} C(x, y) \exp[i\Delta\varphi(x, y)]
 \end{aligned} \tag{3.16}$$

ここで、 $I(x, y)$ は干渉縞の撮影画像、 (x, y) は画像座標である。 $B(x, y)$ と $C(x, y)$ は干渉光強度のオフセットおよび振幅値である。 $\Delta\varphi(x, y)$ は物体光の相対位相値、 $D^*(x, y)$ は $D(x, y)$ の共役である。

干渉縞の撮影画像に対して、縦方向(y 軸)の1ラインずつ、輝度データを1次元フーリエ変換すれば、空間周波数領域における干渉縞を式(3.17)に示すことができる。

$$I_F(x, f) = B_F(x, f) + D_F(x, f + f_\Delta) + D_F^*(x, f - f_\Delta) \tag{3.17}$$

ここで、 $I_F(x, y)$ は空間周波数領域における干渉縞、 $B_F(x, y)$ は干渉光強度のオフセットに対するフーリエ変換の結果である。 $D_F(x, f + f_\Delta)$ および $D_F^*(x, f - f_\Delta)$ は物体光の相対位相情報の空間周波数およびその共役である。

式(3.17)により、干渉縞撮影画像の空間周波数において、中心周波数 f に対して、正の周波数帯域は物体光の相対位相値に対応するため、三次元形状計測に

必要な実像成分を表わす。また、中心周波数帯域および負の周波数帯域はそれぞれ0の位相値および物体光の相対位相値の共役に対応するため、三次元形状計測に不要な直流成分および虚像成分を表わす。上記により、空間周波数領域におけるバンドパスフィルタを用いて、式(3.18)に示すように、正の周波数帯域における情報のみを残し、逆フーリエ変換を実行することで、1枚の干渉縞撮影画像から物体光の相対位相値を算出することが可能である。

$$D(x, y) = \mathfrak{F}^{-1}[D_F(x, f + f_\Delta)] = \frac{1}{2} C(x, y) \exp[i\Delta\varphi(x, y)]$$

$$\Delta\varphi(x, y) = \arctan \left\{ \frac{\text{Im}[D(x, y)]}{\text{Re}[D(x, y)]} \right\} \quad (3.18)$$

ここで、 \mathfrak{F}^{-1} は逆フーリエ変換を表わす。 $D_F(x, f + f_\Delta)$ と $D(x, y)$ は空間周波数領域におけるバンドパスフィルタリング処理の結果およびその逆フーリエ変換の結果を表わす。 Re と Im はそれぞれ $D(x, y)$ の実部と虚部を表わす。

式(3.16)～式(3.18)により、周波数領域において、干渉縞の撮影画像を解析することで、1枚の干渉縞の撮影画像から、物体光の相対位相値を算出することが可能である。また、周波数解析法を用いて算出した物体光の相対位相値を式(3.15)に示した位相シフトデジタルホログラフィに代入することで、物体光の絶対位相値が算出でき、高精度な三次元形状計測が可能である。

3.5 位相連結処理および干渉測量法

物体光の絶対位相値を用いて、位相連結処理を実行し、干渉測量法で計測対象の三次元形状を復元する。

式(3.19)に示したように、物体光の絶対位相値は逆正接関数を用いて得られる。そのため、得られた物体光の絶対位相値は全画像中で連続ではなく、 $-\pi \sim +\pi$ の値域で求められ、図3.3に示すような鋸刃状の情報となる^[83]。これを画像絶対での連続値とするように図中 $-\pi \sim \pi \sim 2\pi \sim 3\pi \dots$ と示すように n 本目の縞が画像上でどの位置にあるかを求め、 $2n\pi$ を加算して連結し、連続な位相値を算出する必要がある。これが位相連結である。本研究では、位相連結処理にLF(Laplacian Filter) Quality Mapを用いた二次元位相連結法^[84]を使用する。

また、レーザ光を計測光源にしたデジタルホログラフィによる三次元形状計測法では、物体光の絶対位相値における 2π の位相変化とは、三次元空間において、レーザ光の波長と同一の距離変化である。これが干渉測量法である。本研究では、三次元形状の復元は式(3.14)に示す。

$$X = \frac{\lambda d}{W\Delta x} x \quad Y = \frac{\lambda d}{H\Delta y} y \quad Z = \frac{\lambda}{2\pi} \varphi(x, y) \quad (3.19)$$

ここで、 (X, Y, Z) は計測対象のワールド座標、 (x, y) は撮影画像の画像座標である。 Δx と Δy はカメラセンサのピクセルサイズ、 W と H は撮影画像の幅と高さである。 λ と d は使用したレーザ光の波長およびフレネル回折の距離、 φ は位相連結処理を実行した連続的な物体光の絶対位相値である。また、 $(\lambda d)/(W\Delta x)$ および $(\lambda d)/(H\Delta y)$ は計測装置のXY平面上の空間分解能と同一である。

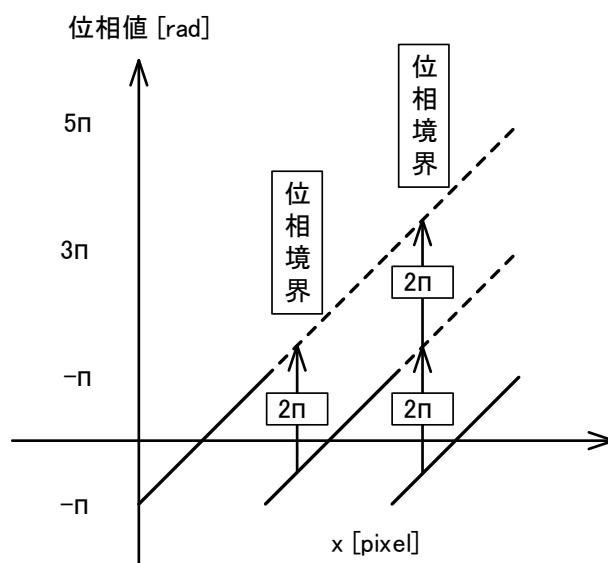


図3.3 位相連結の概念図

第4章 位相シフトデジタルホログラフ ィによる三次元形状計測法

4.1 まえがき

既存の三次元形状計測手法では、複数の投影パターンを利用した三次元画像計測法が広く利用されている。複数の投影パターンを利用した三次元計測法では、プロジェクタを用いて特殊なパターンを計測対象表面上に投影し、カメラを用いて計測対象の様子を撮影する。また、撮影した複数枚の画像を解析することで、計測対象における投影パターンの形状変化により計測対象の三次元形状を復元する。しかしながら、以下に示す問題点により、一般的な投影パターンを使用した三次元画像計測法では計測が困難である対象も多い。

- (1) 鏡面反射物体の三次元形状を計測する場合に、計測対象の表面から投影パターンの光が直接に反射してしまうため、カメラで撮影した画像において、サチュレーションが発生して輝度情報を失い、画像解析は不可となる。そのため、三次元画像計測法は鏡面反射物体の三次元形状計測に不向きである。
- (2) 透明物体の三次元形状を計測する場合に、プロジェクタからパターンを計測対象表面に投影して、パターン光は反射せずに計測対象を透過するため、カメラを用いて、計測対象表面上における投影パターンの様子が撮影できない。そのため、撮影画像の解析は不可であり、三次元画像計測法は透明物体に対する三次元形状計測にも不向きである。
- (3) カメラの世界座標に対する計測対象の世界座標を算出するために、三次元形状計測を行う前に、キャリブレーション処理を実行する必要がある。キャリブレーション処理により、三次元形状計測に手間がかかる。また、キャリブレーション処理で発生した誤差は計測精度に悪影響を与える。
- (4) プロジェクタの投影画像の分解能およびカメラの撮影画像の分解能が異なるため、プロジェクタとカメラの素子対応マッピング手法が必要である。また、プロジェクタから投影したパターンの輝度値は投影する前のパターン画像の輝度値と異なるため、パターンの投影輝度およ

び画像輝度を対応する手法が必要である。さらに、投影パターンの輝度情報はデジタル情報であるため、投影パターンの撮影画像を用いた三次元形状計測では、空間分解能が数十マイクロメートル程度と低い。

鏡面反射物体および透明物体に対するナノメートルオーダの三次元形状計測を実現し、上記の問題点を解決する手法として、デジタルホログラフィによる三次元形状計測法が提案されている。中でも、計測精度の高い三次元形状計測が実現できる位相シフトデジタルホログラフィによる三次元形状計測法に関する研究が盛んに行われている。位相シフトデジタルホログラフィでは、まず、参照光と物体光の光路差をレーザ波長の1/4倍ずつずれしながら、4枚の位相シフト干渉縞画像をカメラで撮影する。次に、撮影した位相シフト干渉縞画像を用いて、位相シフト法により、干渉縞に存在する直流成分および虚像成分を除去する。最後に、フレネル変換を用いて、計測対象表面の物体光を再生することで、物体光の絶対位相値を算出し、干渉測量法を用いて計測対象の三次元形状を復元する。しかしながら、従来の手法では、位相シフト干渉縞を生成するためには、ピエゾステージで平面ミラーを平行移動させることで、光路差を制御する必要がある。ピエゾステージは高価であるため、三次元形状計測システムの低価格化が困難であり、ピエゾステージの制御精度が計測結果に悪影響を与えるという問題が存在していた。

そこで、本研究では、光の検波原理および畳み込み定理を利用することで、安価かつ高精度の位相シフトデジタルホログラフィによる三次元形状計測システムおよび計測手法を提案する。提案手法では、高価なピエゾステージを使用せず、一般的な光学部品を使用して計測システムを構築するため、三次元形状計測システムの低価格化を実現することができる。また、偏光板を回転させることで、位相シフト干渉縞を生成し、カメラで4枚の位相シフト干渉縞画像を撮影する。さらに、デジタルホログラフィの原理を利用するため、物体光の絶対位相値が算出でき、鏡面反射および透明物体の三次元形状をナノメートルオーダの高精度に計測できる。最後に、畳み込み定理を利用することで、インパルス応答関数を用いたフーリエ変換のみを使用して物体光を回折するため、従来のフレネル回折式より、実装が簡単であり、利用上有利である。

4.2 従来研究

本節では、ピエゾステージを用いた位相シフトデジタルホログラフィによる三次元形状計測法を従来法として説明する。

従来法に使用した計測システムの構成を図4.1に示す。図4.1により、ピエゾステージでミラーを平行移動することで、参照光と物体光の光路差をレーザ波長の1/4倍ずつずらすことができる。光路差をレーザ波長の1/4倍ずらすと、干渉縞に $1/2\pi$ の位相差が発生するため、ピエゾステージで平面ミラーを4回ずらすことで、カメラの撮影により、4枚の位相シフト干渉縞画像が取得できる。

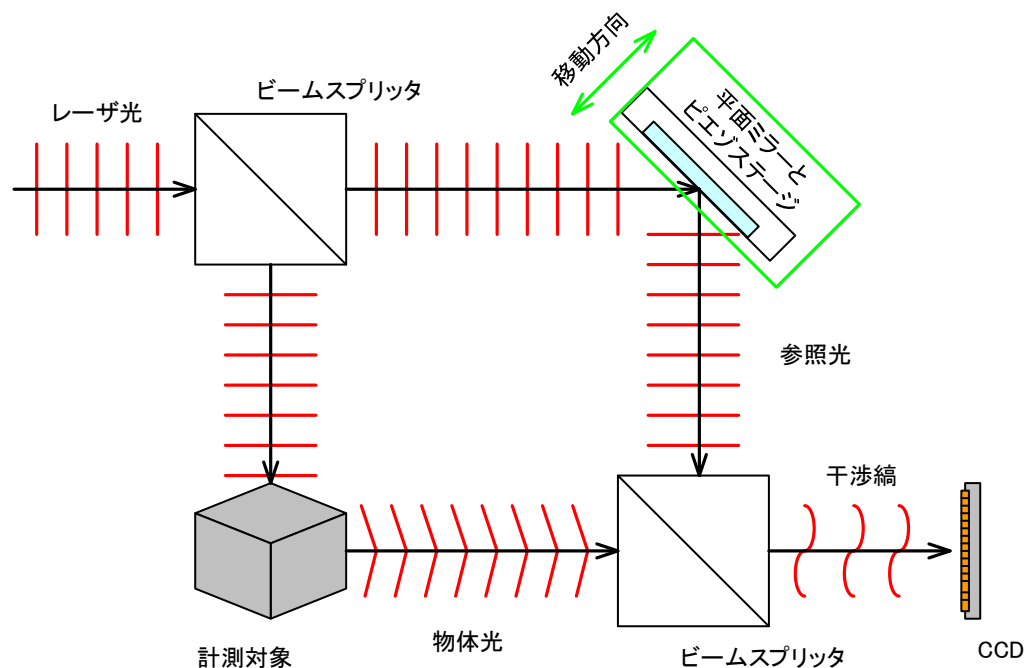


図4.1 従来法の計測システムの構成

しかしながら、従来法は、デジタルホログラフィにより回折した物体光の振幅値を用いた。三次元画像表示に関しては検討しているが、物体光の絶対位相値を用いた三次元計測への応用や三次元計測精度に関する検討していない。また、従来法のシステム構成により、物体光と参照光の生成と合成に二つのビームスプリッタを使用しており、参照光の光路も長いいため、三次元形状計測システムの小型化の実現が困難であり、ピエゾステージの使用により低価格化も困難である。

4.3 提案システム

本節では、本研究で用いる計測装置の動作原理および構成について説明する。

4.3.1 提案システムの動作原理

提案システムの構成モードを図4.2に示す。まず、ビームエキスパンダーで拡大されたレーザ光は1/2波長板を透過して、偏光ビームスプリッタにより、2光束に分割される。次に、一方のレーザ光は計測対象から反射して物体光となり、もう一方のレーザ光は平面ミラーから反射して参照光となる。最後に、物体光と参照光は光検波器に透過した後、カメラセンサ(CMOSセンサ)表面で干渉させられる。ここで、光検波器における偏光板を45度ずつ回転させ、干渉光における位相差を $1/2\pi$ 調整することで、三次元形状計測に必要な4枚の位相シフト干渉縞画像をCMOSセンサで撮影する。

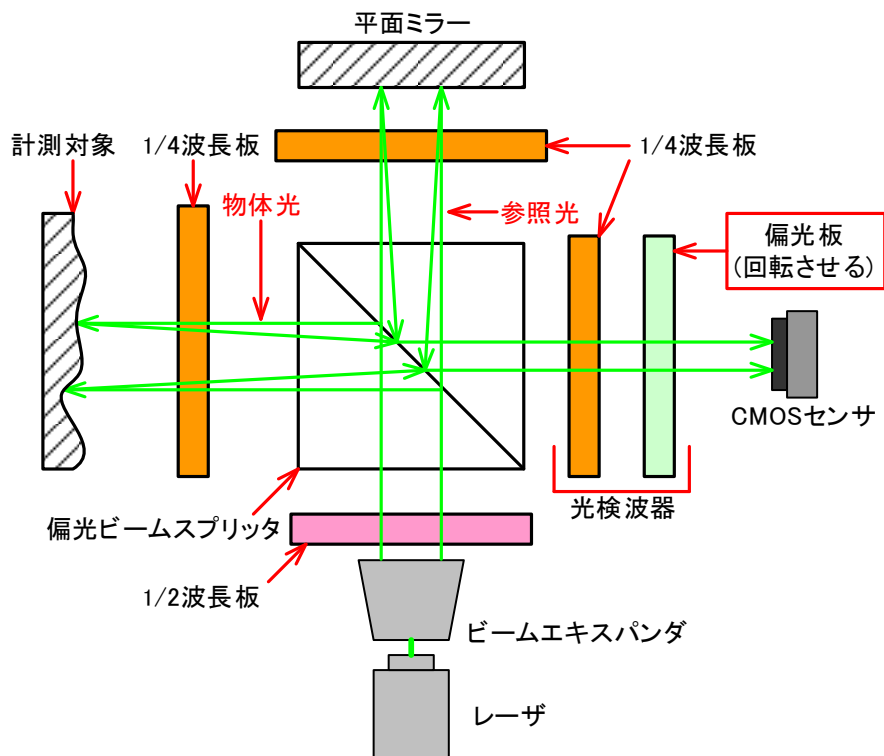


図4.2 提案システムの構成モード図

提案システムの光学系における偏光の状態および光検波器について説明する。まず、図4.3を用いてレーザ光を平面ミラーおよび計測対象の表面に照射する時の光学系における偏光の状態を説明する。三次元形状計測範囲を広くするために、レーザ光はビームエキスパンダーで拡大される。拡大されたレーザ光は1/2波長板を透過して偏光ビームスプリッタに照射され、1/2波長板の角度を回転させることで参照光と物体光の光強度を調整する。レーザ光は、偏光ビームスプリッタにより、偏光面の異なる2光束に分割され、P偏光の光束は平面ミラーに向けて、S偏光の光束は計測対象の表面に向けてそれぞれ出射される。その後、S偏光およびP偏光のレーザ光は1/4波長板を透過して旋光方向が異なる円偏光となり、平面ミラーおよび計測対象の表面に照射される。

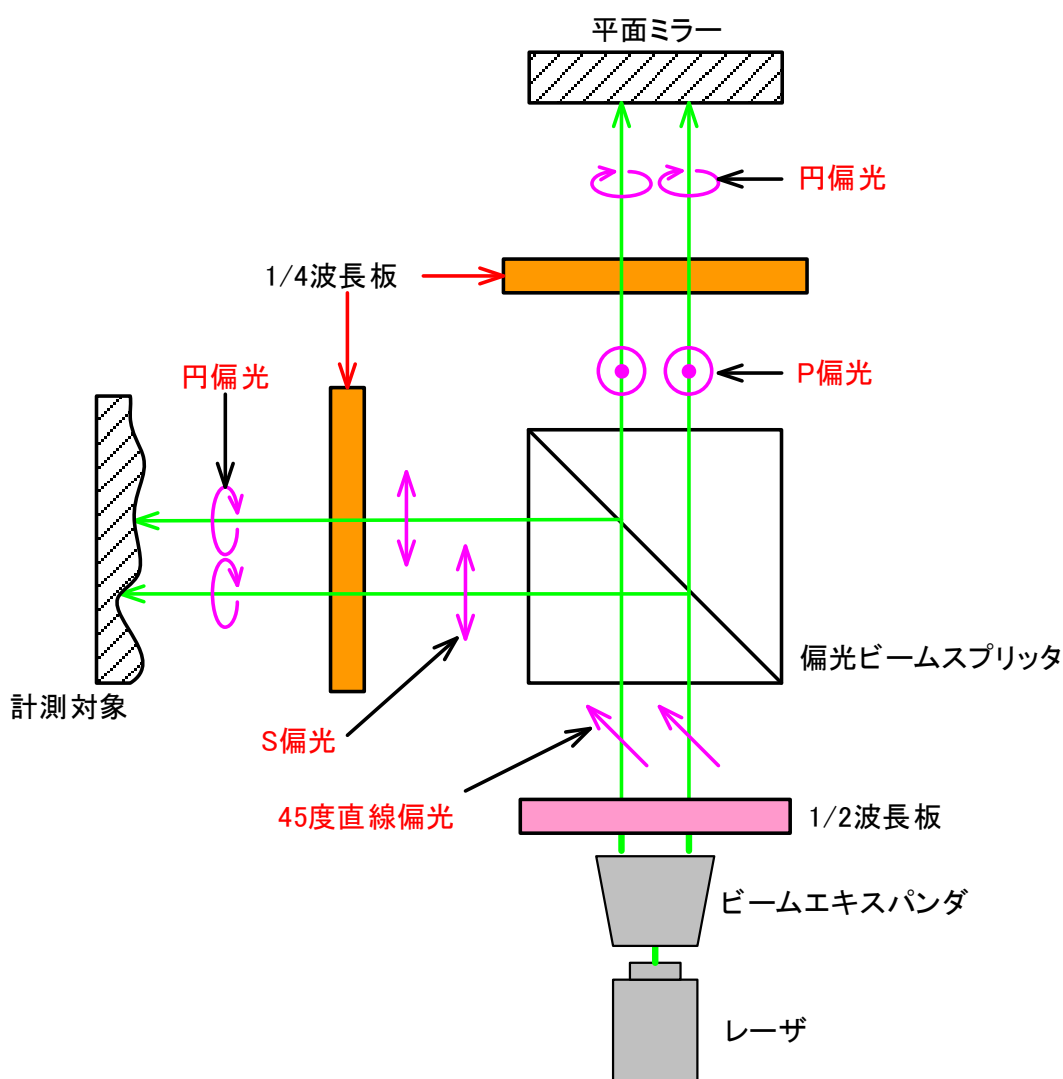


図4.3 レーザ光照射時の偏光状態

次に、図4.4を用いてレーザ光が計測対象の表面および平面ミラーから反射してCMOSセンサで検出されるまでのレーザ光の偏光状態を説明する。計測対象の表面から反射した円偏光(物体光)は、1/4波長板を透過してP偏光になり、偏光ビームスプリッタを透過する。一方、平面ミラーから反射した円偏光(参照光)は1/4波長板を透過してS偏光になり、偏光ビームスプリッタで反射される。ここで、物体光と参照光は共にCMOSセンサ方向に進行するが、それぞれの偏光が直交しているため、偏光ビームスプリッタの出力において、干渉現象が発生しない。この後、物体光と参照光は1/4波長板を透過して、旋光方向が異なる円偏光になり、偏光板により所定の直線偏光成分のみが透過することで、偏光板を透過した物体光と参照光はCMOSセンサ上で干渉し、偏光板を45度ずつ4回回転させることで、位相シフト干渉縞が検出される。計測対象を単純な平面ミラーにして、位相シフト干渉縞の生成を原理検証した結果を図4.5に示す。画像中の1ラインの輝度変化から、偏光板の回転により相対的な位相が $1/2\pi$ ずつ変化していることが分かる。

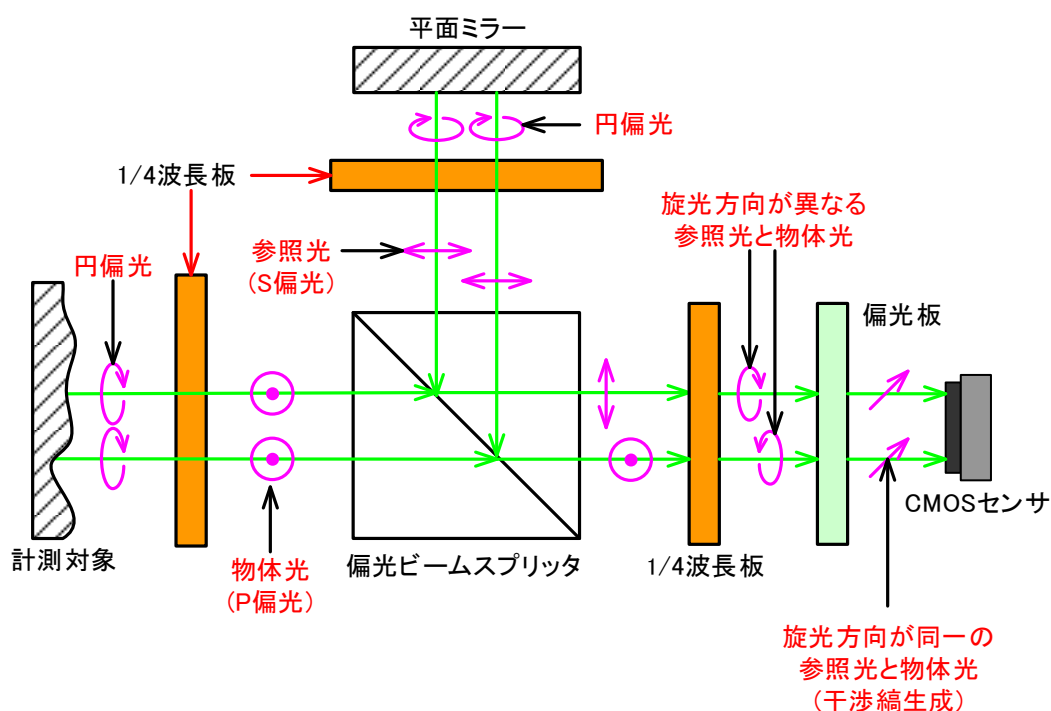


図4.4 レーザ光反射時の偏光状態

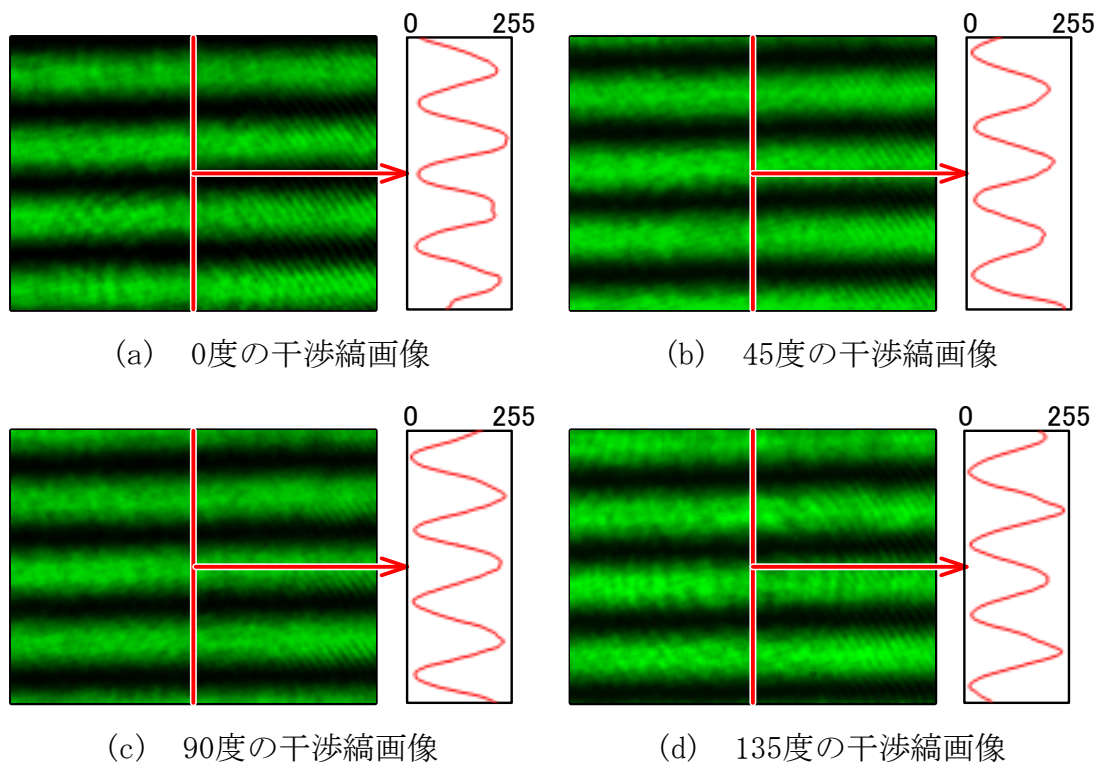


図4.5 平面ミラーを対象とした4枚の位相シフト干渉縞

4.3.2 アルゴリズム検討用試作システムの構成

図4.2に示した光学模式図により、三次元形状計測システムを試作した。試作システムの外観を図4.6に示す。試作システムでは、計測光源として使用したレーザーの波長は532 [nm] (緑色)、カメラセンサ (CMOS) のピクセルサイズは6.0 × 6.0 [μm]である。ただし、上記のカメラセンサはカラーセンサであり、レーザー光は緑色であるため、撮影画像における緑チャンネルの輝度情報のみを三次元形状計測処理に使用する。干渉縞の撮影画像のサイズは640 × 480 [pixel]であるため、試作システムの三次元計測範囲は3.84 × 2.88 [μm]である。位相シフト干渉縞の撮影には、角度付きの偏光子ホルダを45度ずつ手動回転しながら、カメラで4回撮影を実行した。試作システムに使用したカメラおよびレーザーの仕様を表4.1と4.2に示す。使用した光学部品の仕様を表4.3から表4.8に示す。

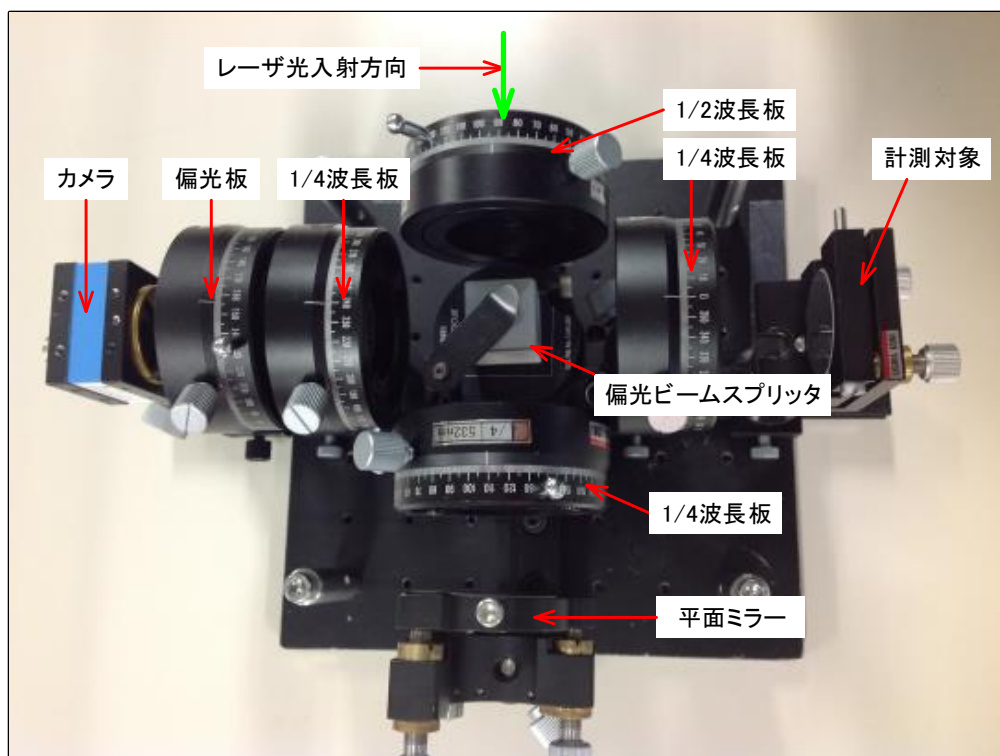


図4.6 試作システムの外観図

表4.1 CMOSカメラ仕様


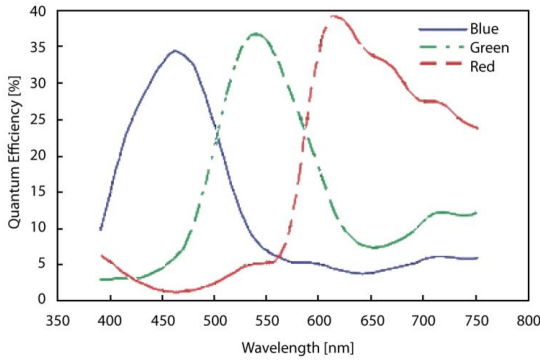
メーカー	IMAGING SOURCE
型番	DFK22BUC03
撮像素子	CMOS
画素数	640×480 [pixel]
ピクセルサイズ	6.0×6.0 [μm]
接続方式	USB2.0
外観	
分光特性	

表4.2 レーザの仕様

メーカー	LASOS
型番	LGK 7654-8
出力ビーム径	1.9 [mm]
発光波長	532 [nm]
出力パワー	10 [mW]
外観	

表4.3 ビームエキスパンダの仕様

メーカー	シグマ光機
型番	LBED-10
ビーム倍率	10倍
設計波長	400~700 [nm]
有効入射径	2.6 [mm]
外観	

表4.4 偏光板の仕様

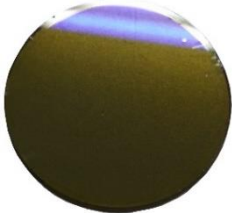
メーカー	岡本ガラス
型番	Glapola
設計波長	532 [nm]
外観	

表4.5 1/2波長板の仕様

メーカー	シグマ光機
型番	WPQ-5320-2M
材質	水晶
適応波長	532 [nm]
外観	

表4.6 1/4波長板の仕様

メーカー	シグマ光機
型番	WPQ-5320-2M
材質	水晶
適応波長	532 [nm]
外観	

表4.7 偏光ビームスプリッタの仕様



メーカー	シグマ光機
型番	PBSHP-20-5320
サイズ	20×20×20 [mm] (長さ×高さ×幅)
適応波長	532 [nm]
S偏光反射率	>97%
外観	

表4.8 平面ミラーの仕様

メーカー	シグマ光機
型番	TFA-30C05-1
外径	30 [mm]
外観	

4.4 提案手法

従来の位相シフトデジタルホログラフィによる三次元形状計測では、位相シフト法により算出した物体光の相対位相値をフレネル変換に代入して、カメラセンサの平面から、カメラ平面の後ろに存在する回折面に光を回折することで、回折光の複素振幅を算出する。ここで、回折面と実際の計測対象が存在する計測面は対称であるため、回折光は物体光と同一であり、回折光の絶対位相値を物体光の絶対位相値として算出する。しかしながら、従来のフレネル変換では、計算を簡単に実行するために、テイラー展開を用いて、フレネル変換式を近似する必要がある。また、近似したフレネル変換をコンピュータ上に実装することが難しいという問題点が存在していた。本研究では、上記の問題点を解決するために、畳み込み原理を利用したフレネル回折を提案する。

4.4.1 計測の流れ

提案システムでは、図4.7に示すフローに従い三次元形状計測を実行する。まず、偏光板を45度ずつ回転させながら、カメラで4枚の位相シフト干渉縞画像を撮影する。次に、位相シフト法を用いて、位相シフト干渉縞撮影画像より物体光の相対位相値を算出する。また、算出した物体光の相対位相値を畳み込み原理を利用したフレネル回折式に代入して、物体光の複素振幅を求め、物体光の絶対位相値を算出する。ここで、計測対象の形状変化がレーザの波長(532 [nm])

より大きい場合，算出された物体光の絶対位相値は $-\pi \sim +\pi$ の不連続な値になるため，位相連結処理を用いて，物体光の絶対位相値を連結することが必要である．最後に，位相連結処理後の連続な物体光の絶対位相値より，干渉測量法を用いて，ワールド座標を算出し，計測対象の三次元形状を復元する．

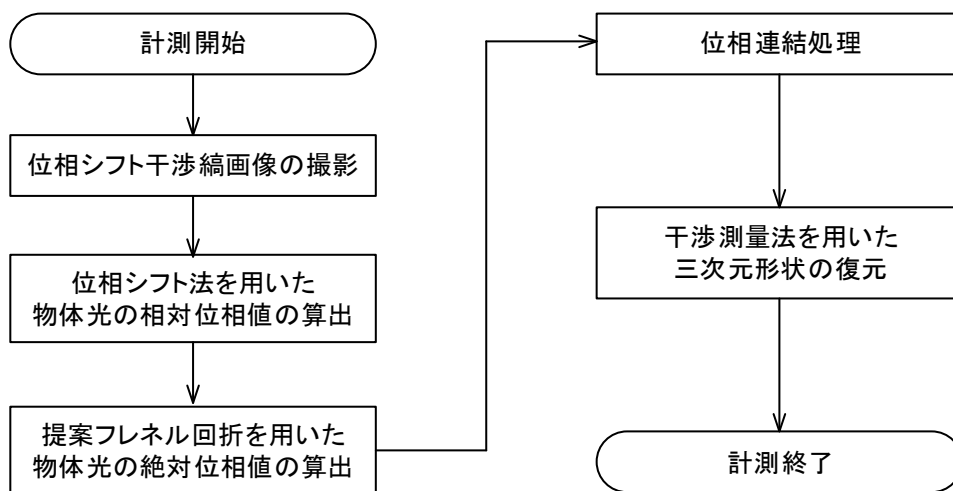


図4.7 計測フロー

4.4.2 畳み込み原理を利用したフレネル回折

計測対象表面は光を反射するため，計測対象を点光源として考えることができる．そのため，式(3.5)に示した一般的なフレネル回折により，計測対象の表面からカメラセンサ表面に伝播した光の複素振幅を式(4.1)に示すことができる．式(4.1)において，従来の物体光の伝播空間を回折空間として使用するため，従来の回折光は物体光の相対位相値で表わす干渉光の複素振幅となり，従来の干渉光は計測対象表面上に存在する物体光の複素振幅となる．提案手法におけるフレネル回折と従来法の比較を図4.8に示す．

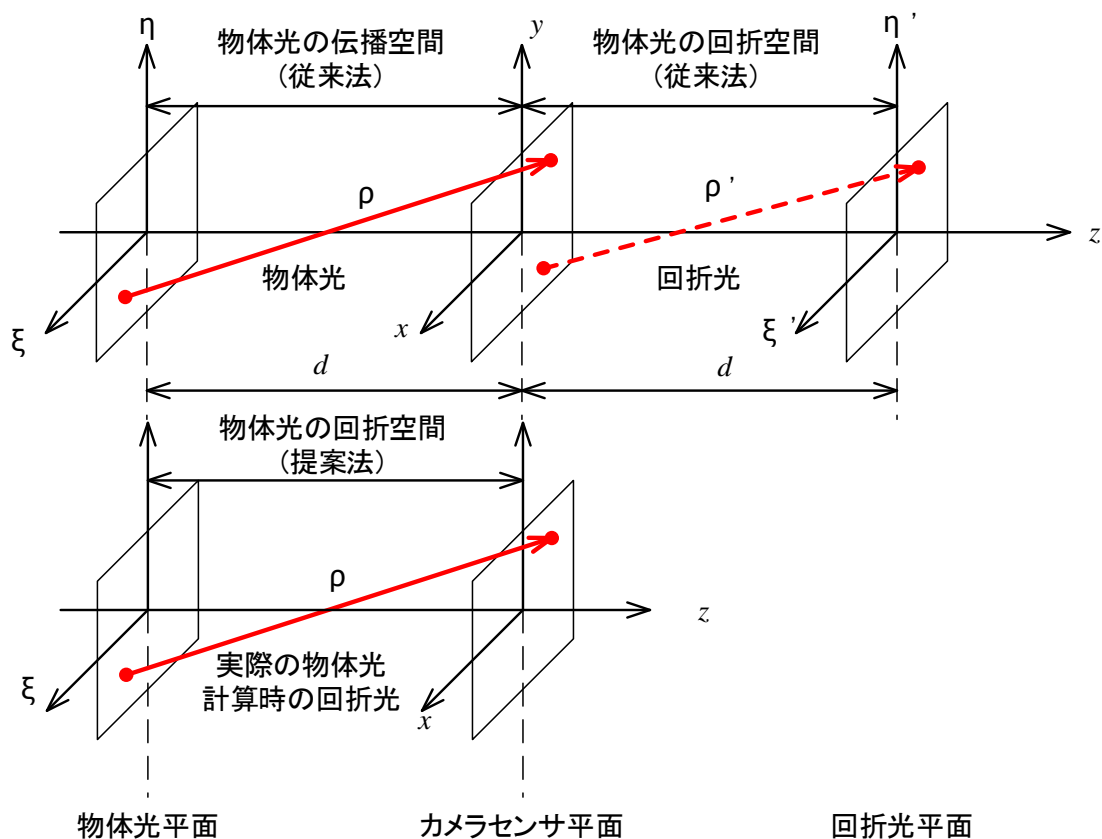


図4.8 提案法と従来法における回折空間に対する定義の比較

$$E_o(x, y) = \frac{i}{\lambda} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \Gamma(\xi, \eta) \frac{\exp(-i \frac{2\pi}{\lambda} \rho)}{\rho} d\xi d\eta \quad (4.1)$$

$$\rho = \sqrt{(x - \xi)^2 + (y - \eta)^2 + d^2}$$

$$E_o(x, y) = \exp[i\Delta\varphi(x, y)]$$

ここで、 $E_o(x, y)$ は干渉光の複素振幅、 $\Delta\varphi(x, y)$ は位相シフト法を用いて算出した物体光の相対位相値である。 (x, y) はカメラの撮影画像の画像座標を表わす。 $\Gamma(\xi, \eta)$ は計測対象表面に存在する物体光の相対位相値、 (ξ, η) は物体光平面の平面座標である。 ρ は物体光平面上の一点とカメラセンサ平面上の一点間の距離、 d は物体光平面中心とカメラセンサ平面中心間の距離、 λ は使用したレーザの波長である。

式(4.1)において、干渉光の複素振幅 $E_o(x, y)$ は既知値、物体光の複素振幅 $\Gamma(\xi, \eta)$ は求める値であるため、式(4.1)を線形システムとして考えることができ

る。また、線形システムの理論により、式(4.1)に示すシステムのインパルス応答関数を式(4.2)に示す。

$$g(x-\xi, y-\eta) = \frac{i \exp(-i \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2 + d^2})}{\lambda \sqrt{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2 + d^2}} \quad (4.2)$$

式(4.2)を式(4.1)に代入することで、式(4.3)が成立つ。

$$Eo(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \Gamma(\xi, \eta) g(x-\xi, y-\eta) d\xi d\eta \quad (4.3)$$

式(4.3)に示すように、計測対象における物体光の複素振幅 $\Gamma(\xi, \eta)$ およびインパルス応答 $g(x-\xi, y-\eta)$ は関数の畳み込み関係であるため、フーリエ変換により、式(4.3)を式(4.4)に書き換えることができる。

$$\mathfrak{F}\{Eo(x, y)\} = \mathfrak{F}\{\Gamma(\xi, \eta)\} \times \mathfrak{F}\{g(\xi, \eta, x, y)\} \quad (4.4)$$

ここで、 \mathfrak{F} はフーリエ変換である。

そのため、式(4.5)を用いて、計測対象における物体光の複素振幅および物体光の絶対位相値を算出することができる。

$$\Gamma(\xi, \eta) = \mathfrak{F}^{-1} \left\{ \frac{\mathfrak{F}(Eo(x, y))}{\mathfrak{F}(g(\xi, \eta, x, y))} \right\} \quad (4.5)$$

$$\varphi(\xi, \eta) = \arctan \frac{\text{Im}[\Gamma(\xi, \eta)]}{\text{Re}[\Gamma(\xi, \eta)]}$$

ここで、 $\varphi(\xi, \eta)$ は物体光の絶対位相値、 Re と Im は物体光の複素振幅の虚部と実部をそれぞれ表わす。 \mathfrak{F}^{-1} は逆フーリエ変換である。

式(4.5)に示すように、位相シフト法を用いて、カメラセンサ表面における干渉光の複素振幅を求めることができる。また、システムのインパルス応答関数は既知である。これらのことから、式(4.5)を用いて、物体光の絶対位相値が算出できる。図4.5に示した平面ミラーの位相シフト干渉縞撮影画像の輝度値を利用して、式(4.5)により、算出した物体光の絶対位相値分布を図4.9に示す。

ただし、提案手法で算出した縦方向1ラインの位相値を赤線に、従来のフレネル変換を利用して算出した位相値を青線に、それぞれ示す。

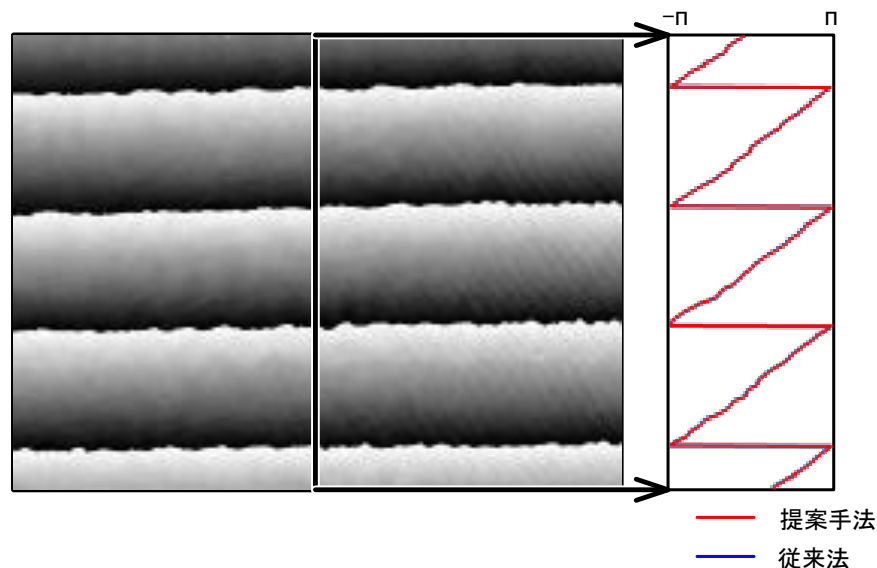


図4.9 提案法と従来法で算出した位相値の比較

図4.9より、畳み込み原理を利用した提案手法をテイラー展開で近似した従来のフレネル変換と比較して、算出した物体光の絶対位相値分布は同一であることを確認した。しかしながら、式(4.8)と式(3.5)および式(3.10)を比較すれば、従来法より、提案手法はフーリエ変換のみを使用するため、数式の簡単化が実現でき、実際の三次元形状計測システムの開発に対して有効であると考えている。

4.5 試作システムによる計測実験

既存の三次元形状計測システムでは、鏡面反射および透明の計測対象に対して、撮影画像を解析することが困難であるため、三次元形状計測が不可である。提案した位相シフトデジタルホログラフィによる三次元形状計測法を用いて、上記の問題点が解決できることを検証するために、鏡面反射物体および透明物体に対する計測実験を実行した。計測範囲は 3.84×2.88 [mm]である。

4.5.1 鏡面反射物体に対する計測実験

提案手法を用いて鏡面反射物体の三次元形状を計測できることを検証するために、平面ミラーを計測対象とし、計測実験を実行した。計測対象の外観を図4.10に示す。計測時、計測システムと計測対象の位置関係を図4.11に示す。撮影した位相シフト干渉縞画像を図4.12、提案手法を用いて算出した物体光の絶対位相値を図4.13、復元した計測対象の三次元形状を図4.14にそれぞれ示す。



図4.10 計測対象の外観

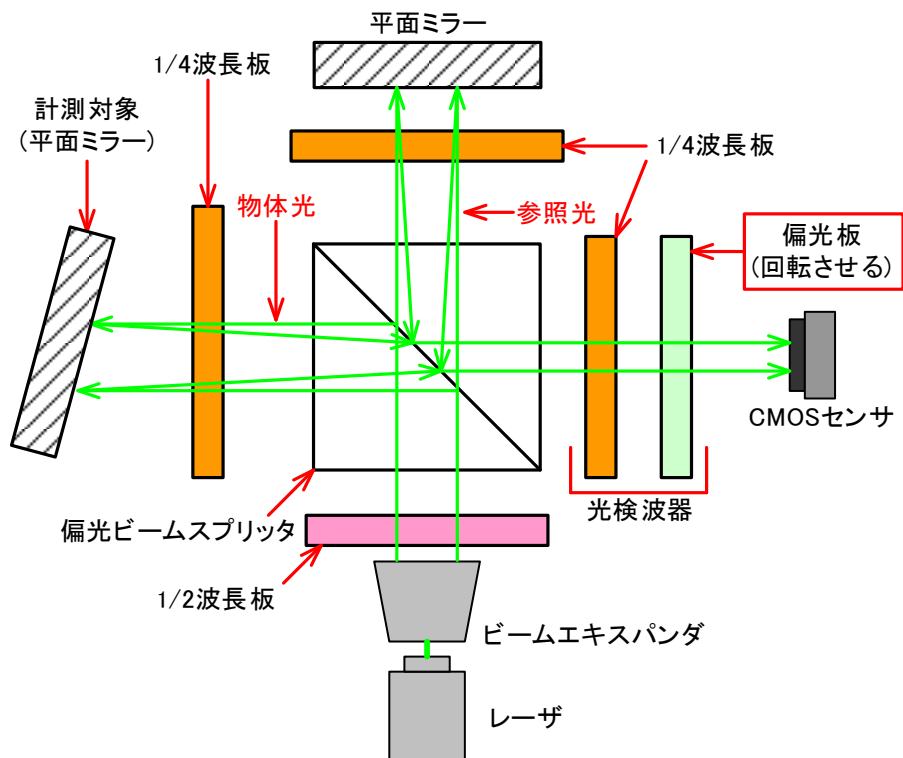
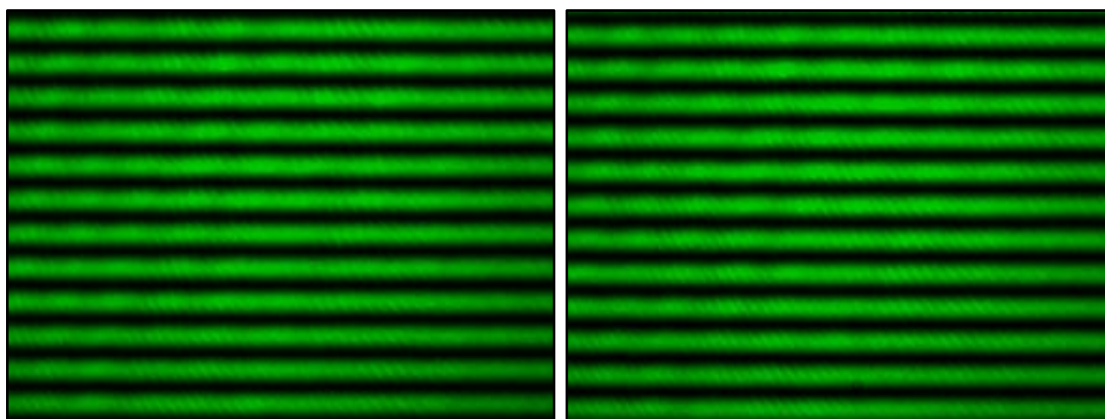
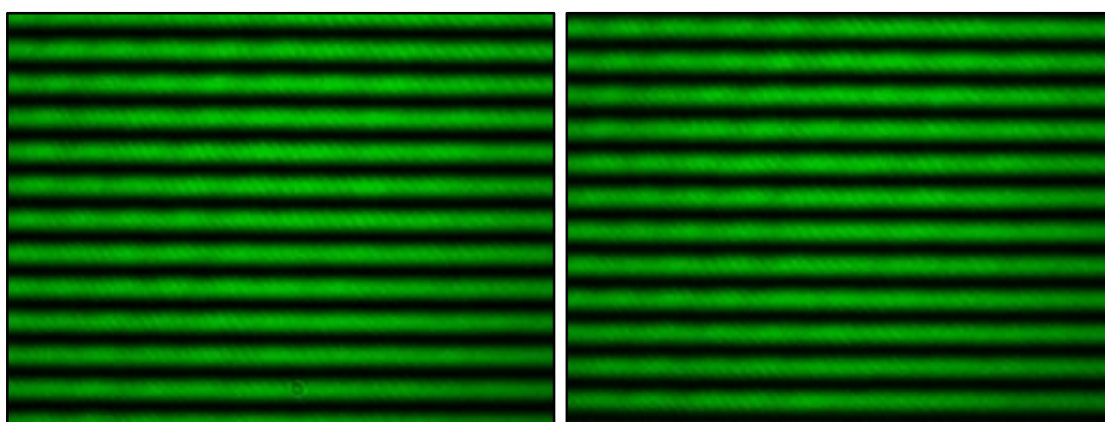


図4.11 計測時、計測装置と計測対象の位置関係の概念図



(a) 0度の干渉縞画像

(b) 45度の干渉縞画像



(c) 90度の干渉縞画像

(d) 135度の干渉縞画像

図4.12 平面ミラーを対象とした4枚の位相シフト干渉縞



図4.13 物体光の絶対位相値(位相連結処理前)

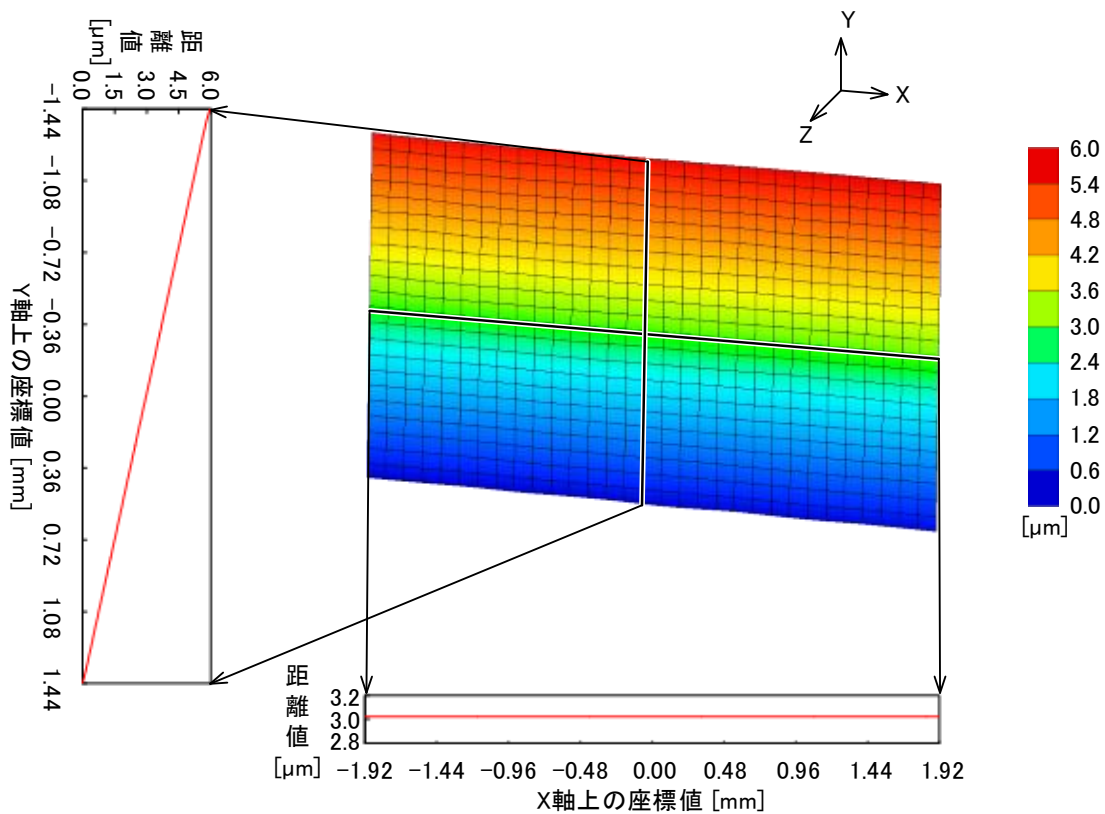


図4.14 鏡面反射物体(平面ミラー)の計測結果

図4.11より、レーザ光を傾けた計測対象(平面ミラー)に照射して、計測対象から反射された物体光と参照光を干渉させて、三次元形状計測実験を実行した図4.13に示した計測の結果より、提案手法を用いて、鏡面反射物体に対する三次元形状計測が可能であることが分かる。

このことにより、平面ミラーなどの鏡面反射の光学部品において、異物や傷などの不良が存在すれば、三次元形状計測の結果を解析することで、自動検出できると考えられる。現在、光学部品に異物や傷などが存在するかという不良検査が検査員による目視観察で実行されている。検査員の目視観察による不良検査法は検査精度および効率が低下であり、人件費もかかるという問題点が存在していた。また、鏡面反射の光学部品では、面精度と呼ぶ表面コーティングの厚さの均一度が光学部品の性能を表わす重要なパラメータとして取得されている。現在、光学部品の面精度を保証するために、表面から反射されたレーザ光の位相分布により面精度が許容範囲以内であるかを判断していた。しかしながら、この手法を用いて、面精度が標準であるかを判断できるが、具体的な面精度数値を計算できないという問題点が存在していた。本研究を用いて、鏡面反射の光学部品の三次元形状が計測できるため、異物や傷などが存在するこ

とが三次元形状解析で自動判断できる。また、三次元形状における計測対象の表面歪みも自動算出できるため、具体的な面精度数値も計算できる。

そのため、提案手法および提案システムを用いて、鏡面反射製品に対する精密自動不良検査が可能であると考えている。

4.5.2 透明物体に対する計測実験

提案手法を用いて透明物体の三次元形状を計測できることを検証するために、まず、透明な平凸レンズを計測対象とし、計測実験を実行した。計測対象の外観を図4.15に示す。計測時、計測システムと計測対象の位置関係を図4.16に示す。撮影した位相シフト干渉縞画像を図4.17に示す。提案手法を用いて算出した物体光の絶対位相値を図4.18、復元した計測対象の三次元形状を図4.19に示す。

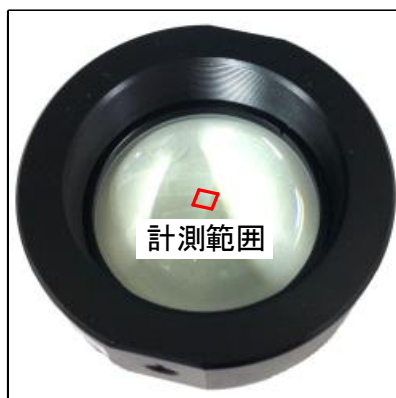


図4.15 透明な平凸レンズの外観

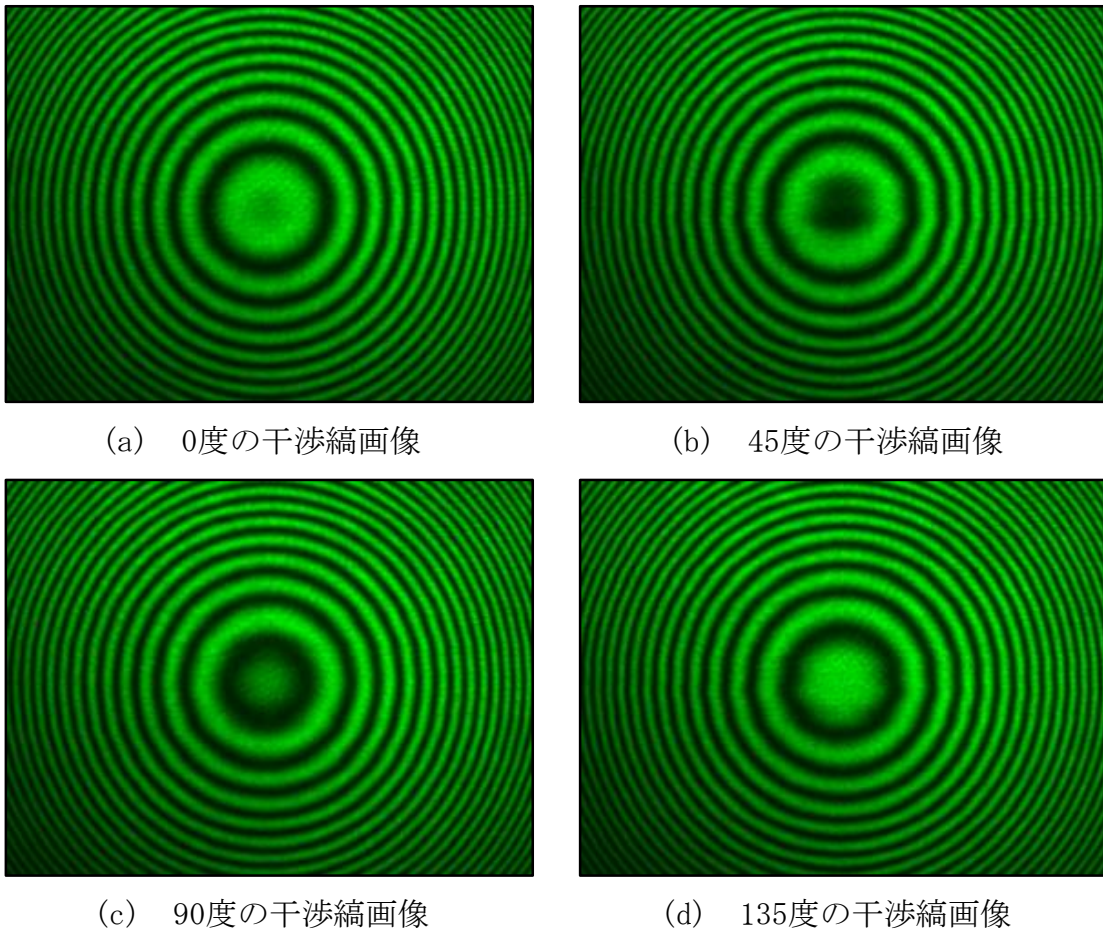
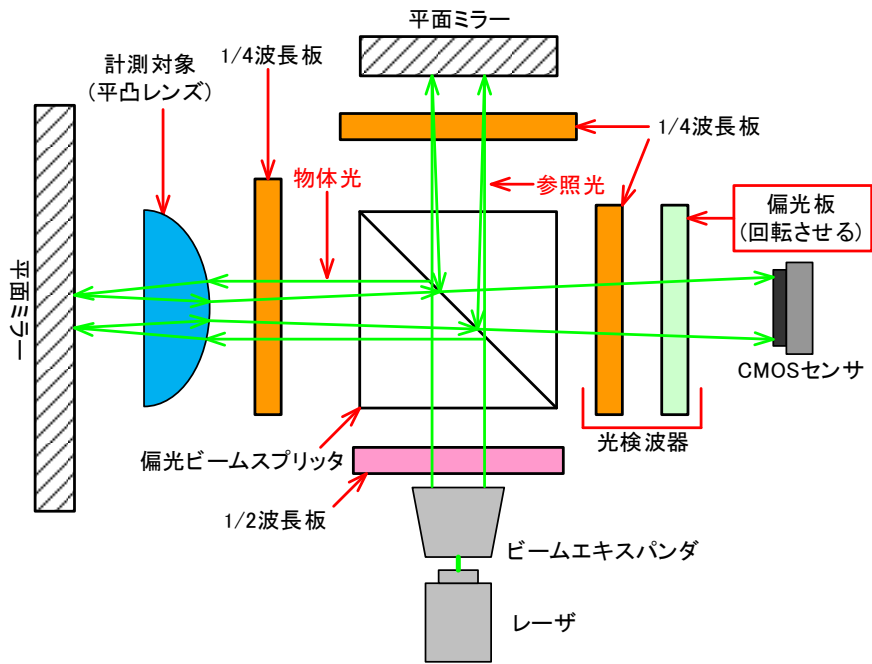


図4.17 透明な平凸レンズを対象とした4枚の位相シフト干渉縞

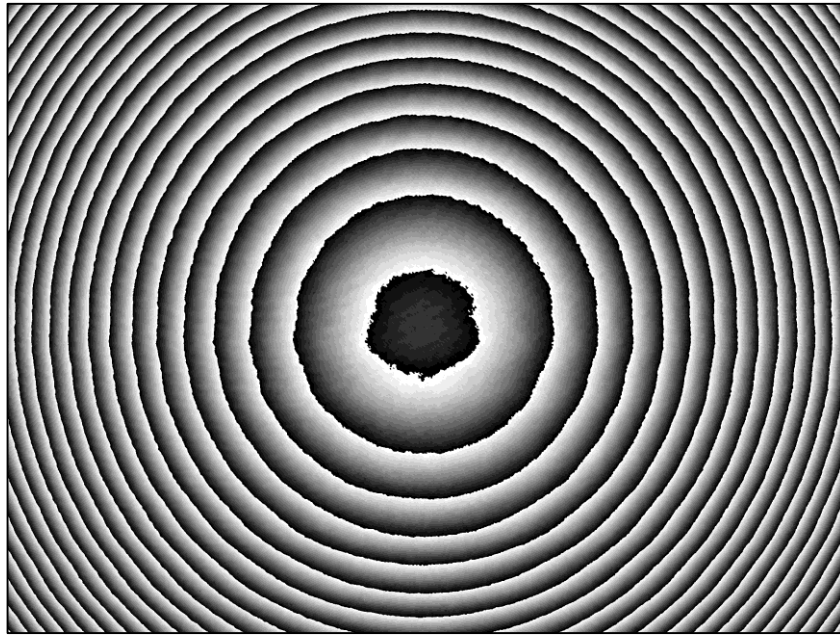


図4.18 物体光の絶対位相値(位相連結処理前)

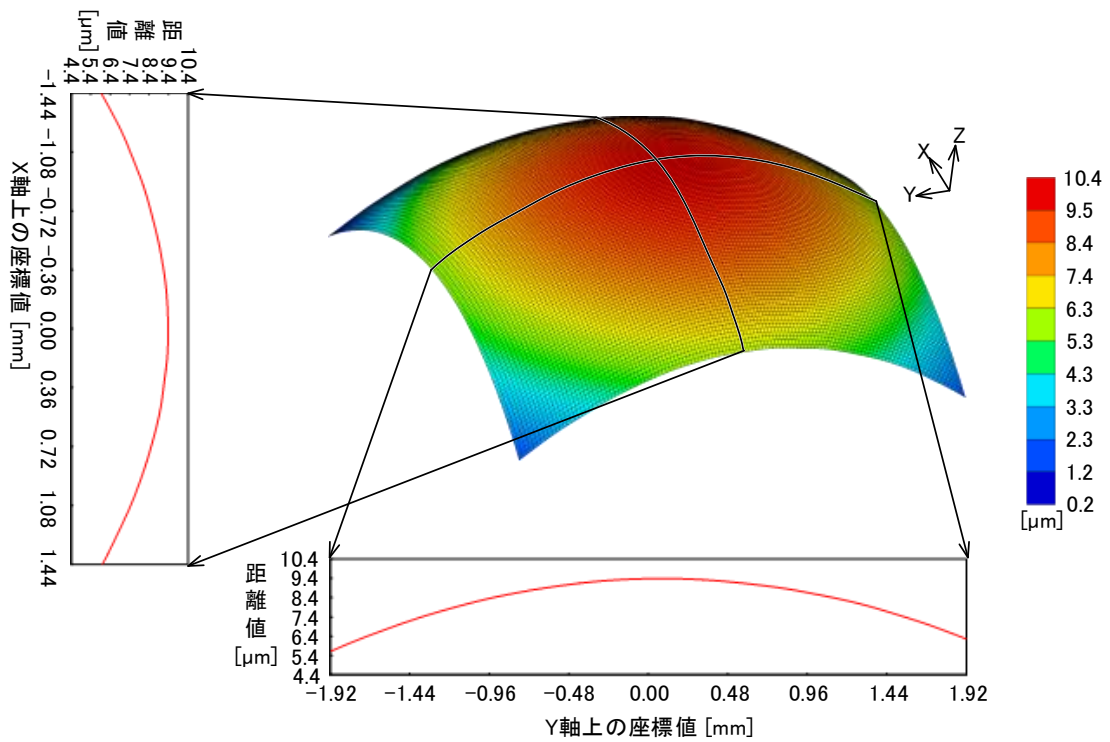


図4.19 透明物体(平凸レンズ)の計測結果

図4.16より，平凸レンズに対する三次元形状計測実験では，計測対象が透明な物体であるため，物体光を取得して参照光と干渉させるために，平凸レンズの後ろに，鏡面反射する平面ミラーを置いていた．屈折率により，平凸レンズ

を透過して平面ミラーから反射した物体光と参照光の光路差が異なるため、図4.16に示した干渉縞画像を取得した。ここで、実際に算出された三次元形状は表面形状ではなく、平凸レンズの屈折率の変化を表わす。ただし、計測対象表面や内部に存在する異物や傷などの不良部分が存在すれば、計測対象の局所屈折率の異なりが発生するため、取得した三次元データを解析することで、自動検出も可能である。現在、平凸レンズのような透明な光学部品やガラス製品に対する不良検査では、接触式の三次元形状計測器および検査員の目視検査を併用した不良検査法を使用することが多い。この検査法では、まず、接触式の三次元形状計測器を用いて、数箇所のみ計測して、計測結果から平均屈折率を自動算出する。次に、検査員の目視観察により、異物や傷などの不良箇所が存在するかを判断する。しかしながら、接触式の三次元形状計測器を用いた屈折率の計算については、物体の全体表面に対する計測ではないため、計測箇所以外の屈折率が算出できない。また、計測実験に使用した平凸レンズのサイズと相当する製品を検査するには、40分から1時間までの検査時間が必要であるという問題点が存在していた。図4.19に示した計測の結果より、本研究では、透明な対象の屈折率がエリア的に計測できることが分かる。そのため、本研究を用いた不良検査では、従来の接触式の三次元形状計測器より、計測対象の全体表面に対する検査時間が短縮できる。また、異物や傷などの不良箇所が存在すれば、屈折率が良品箇所と異なるため、計測結果の自動三次元形状解析を実行することで、上記の不良検査に対しても可能であると考えられる。

4.5.3 精度評価

前節までに説明した手法および実験の結果により、提案システムを用いて、小型な三次元形状計測が構築でき、鏡面反射および透明な製品に対する不良検査の可能性のあることを検証した。本節では、提案システムにおいて、計測精度の評価を説明する。

計測精度の評価実験では、図4.20に示すミットヨ社製の段差マスタ(Mitutoyo No. 516-498)を計測対象にして、1 [μm]段差箇所を10回計測することで、提案した三次元形状計測システムの計測精度を評価した。計測範囲は3.84×2.88 [mm]である。計測を行う際に、計測装置と段差マスタの位置関係の概念図を図4.21に示す。撮影した4枚の位相シフト干渉縞画像例を図4.22に示す。位相シフトデジタルホログラフィを用いて図4.22に示した干渉縞撮影画像

から算出した物体光の絶対位相値を図4.23に示す。段差の計測値を算出する際に、図4.24に示す位相連結処理後の位相値から距離値を算出して、縦方向1ライン毎に平均距離値を算出した。平均距離値の例を図4.25に示す。その後、平均距離値の両側に存在する距離値の平均を計算して、平均距離の差を段差の計測値として取得した。段差の計測値と真値(1 [μm])を比較して、計測精度を評価した結果を図4.26に示す。図4.26により、提案システムを用いた三次元形状計測では、三次元空間のZ軸(距離)に対して、段差箇所の計測値と真値(1 [μm])の平均誤差は186 [nm]であることを確認した。

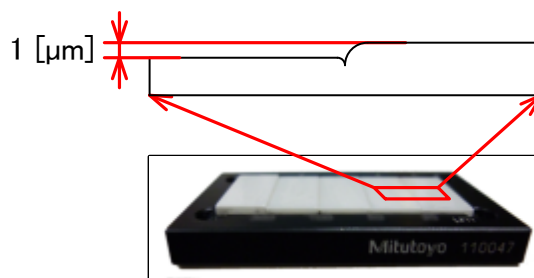


図4.20 段差マスタの外観および1 [μm]段差箇所の概念図

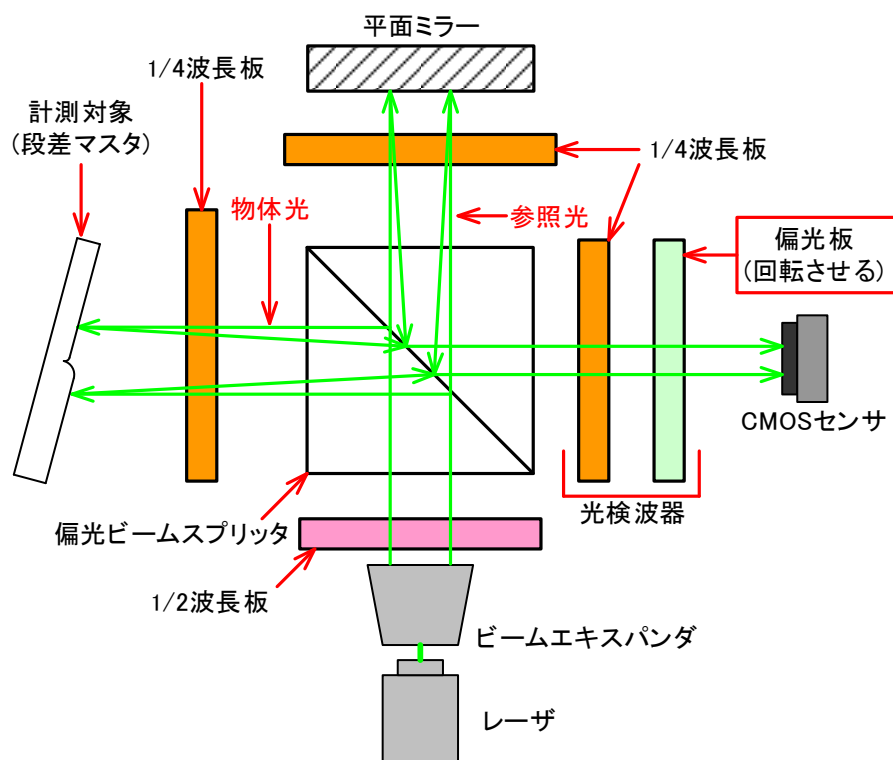
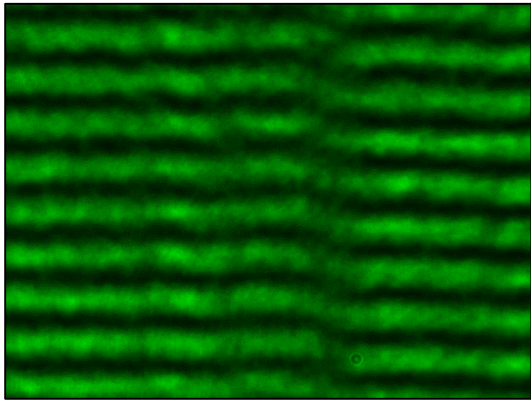
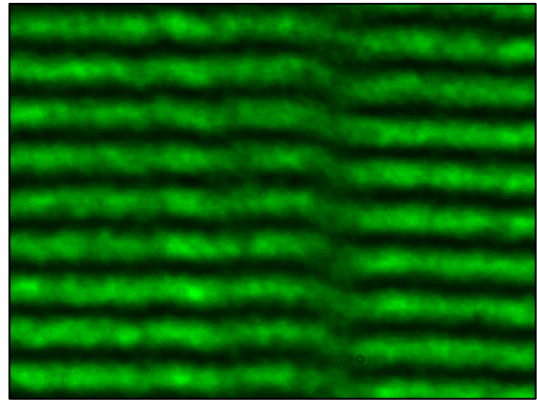


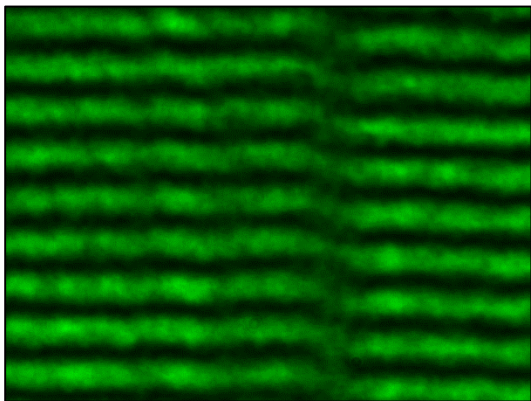
図4.21 計測装置と計測対象(段差マスタ)の位置関係の概念図



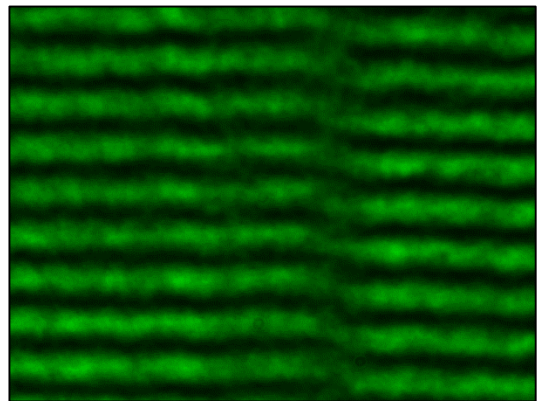
(a) 0度の干渉縞画像



(b) 45度の干渉縞画像



(c) 90度の干渉縞画像



(d) 135度の干渉縞画像

図4.22 1 [μm]段差箇所の位相シフト干渉縞撮影画像例

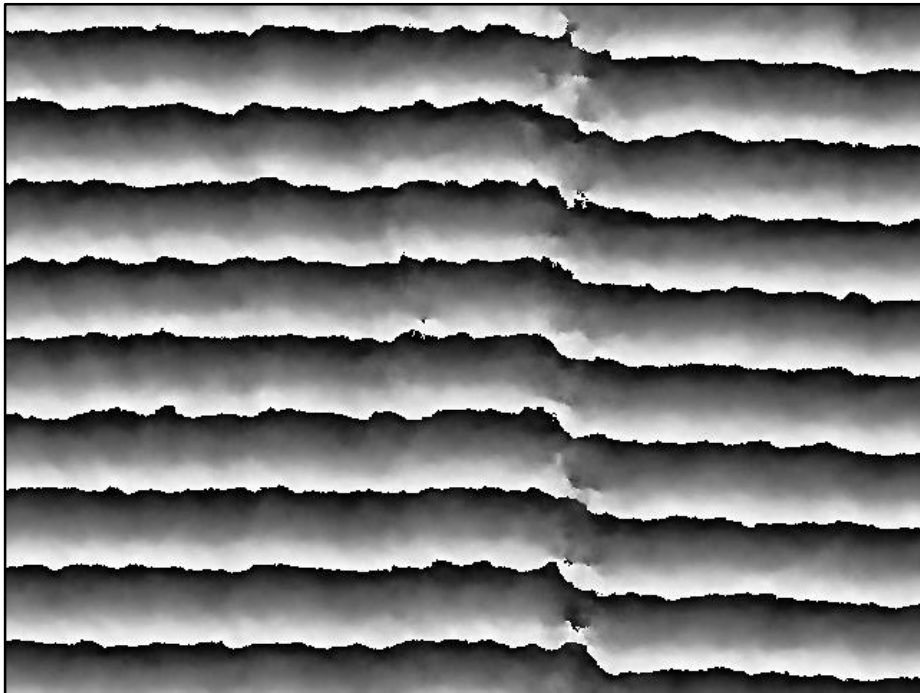


図4.23 算出した物体光の絶対位相値(位相連結前)



図4.24 位相連結したの物体光の絶対位相値

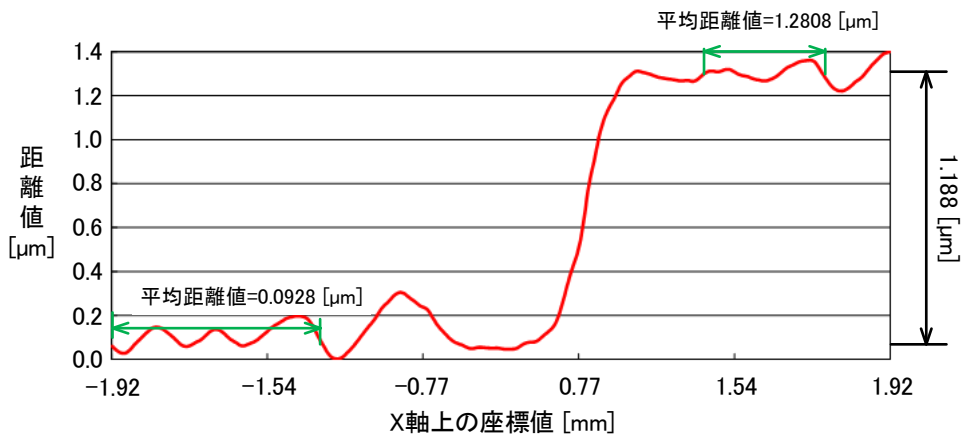


図4.25 縦方向1ライン毎に算出した平均距離値

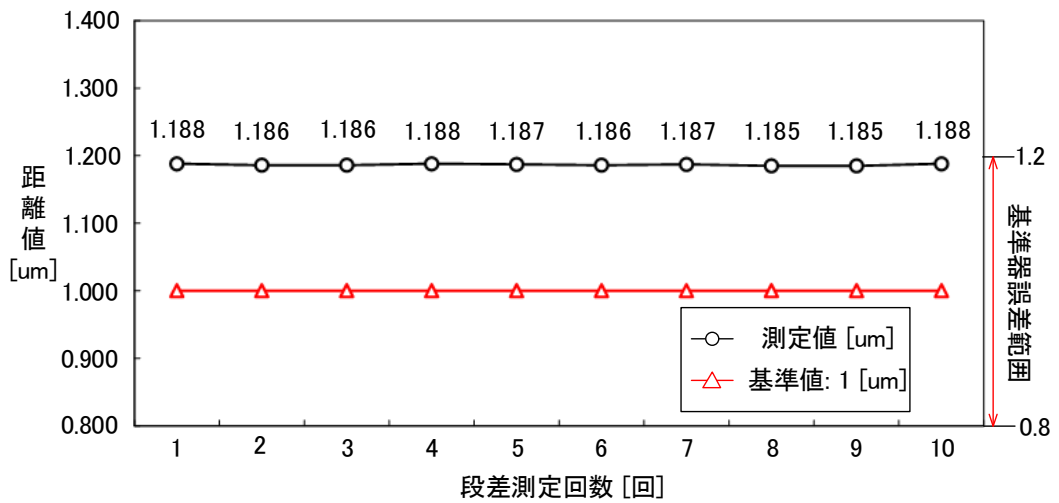


図4.26 計測精度の評価結果

4.5.4 考察

計測精度評価の結果について、まず、使用した段差マスタの加工・生産誤差により、1 [μm]段差箇所では±200 [nm]の許容誤差が存在する。計測値と真値の平均誤差により、提案手法を用いた三次元形状計測誤差は段差マスタの許容誤差以内であることが分かる。次に、計測箇所は1 [μm]の段差箇所であるため、1 [μm]を段差の真値として使用した。しかしながら、段差マスタの誤差許容範囲により、計測箇所の段差真値は1 [μm]であるかを確認できないため、提案手法の計測平均誤差が段差マスタの誤差許容範囲以内であることが確認できたが、この平均誤差は計測精度であることを言えないと考えている。また、図4.20より、計測箇所の段差は急激な段差ではなく、緩やかな斜面であるため、位相シフト法を用いて算出した位相値は位相連結処理が可能な範囲である。しかしながら、段差箇所の斜面真値および実際の三次元形状を確認することが困難であるため、1 [μm]を真値とした計測精度の評価が不適切であると考えている。

提案手法を用いた三次元形状計測について、式(2.15)に示したフレネル変換のデジタル化により、デジタルカメラを用いた干渉縞の撮影は実際の干渉縞に対するサンプリングであることが分かる。このサンプリングの間隔はカメラセンサのピクセルサイズである。そのため、複雑な計測対象の三次元形状に対する計測では、幅が数マイクロメートルの微細な干渉縞でも撮影できるように、ピクセルサイズがさらに細かいカメラセンサを使用する必要がある。また、計測システムの光路空間中に存在する空気密度の変化および振動が発生すれば、物体光と参照光の光路差が変化するため、干渉縞が不安定になり、4枚の位相シフト干渉縞画像に存在する位相差が正確ではなくなる。そのため、偏光板を回転して位相シフト干渉縞を生成する提案手法では、計測が不安定であるという問題点が存在する。ただし、計測環境が安定な光学暗室を使用することで、この問題点を解決できるが、提案システムの実用化を低下してしまうと考えている。最後に、レーザ光の干渉性能を表わすコヒーレント長が提案手法を用いた三次元形状計測に影響を与える。レーザ光のコヒーレント長とは参照光と物体光が干渉できる光路差の長さである。干渉性能が低下のレーザを使用した場合に、レーザ光のコヒーレント長が短いため、計測対象が計測システムから一定な距離以上離れると、干渉縞が撮影できなくなる。そのため、提案手法を用いた三次元形状計測の安定性を向上させるために、計測環境を安定化するのみならず、干渉性能の高いレーザ光を使用する必要もある。

4.6 システムの小型化に関する検討

上記に示した提案手法を用いた三次元形状計測に存在する問題点により、計測システムの高精度化、安定化および自動化を実現するために、試作システムの小型化に関する検討を実行した。

4.6.1 小型計測システムの構成

試作システムを小型化するために、LINOS社製の小型光学部品ホルダを用いて、使用した光学部品を一体化して、小型計測システムを構築した。構築した小型計測システムの外観図を図4.27に示す。図4.27より、小型計測システムのサイズは40×83 [mm]であるため、手持ちできるサイズの計測システムが構築できた。使用したCCDカメラおよび高干渉性能のレーザの仕様を表4.9と4.10に示す。また、使用したLINOS社製の小型光学部品ホルダの仕様を表4.11～4.13に示す。4枚の位相シフト干渉縞を生成する際に、シグマ光機社製の自動回転ステージを使用した。

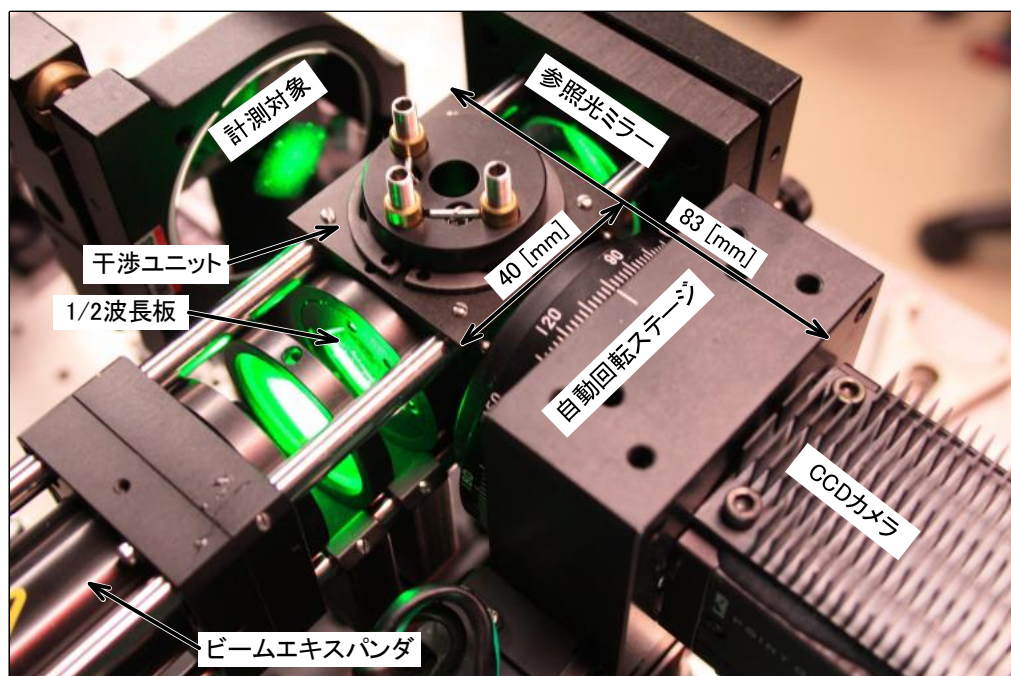


図4.27 提案システムの外観図

表4.9 CCDカメラ仕様


メーカー	Point Grey
型番	GS2-GE-50S5M-C
撮像素子	CCD
画素数	2448×2048 [pixel] (実験では2048×2048 [pixel]を使用)
ピクセルサイズ	3.45×3.45 [μm]
接続方式	GigE
外観	

表4.10 レーザの仕様


メーカー	Coherent
型番	Sapphire 532 LP
出力ビーム径	0.7 [mm]
発光波長	532 [nm]
出力パワー	50 [mW]
干渉距離	200 [m]
外観	

表4.11 干渉ユニットキューブの仕様


メーカー	LINOS
商品名称	Cube 30
型番	G06 1081 000
寸法	40×40×40 [mm]
外観	

表4.12 ビームスプリッタホルダの仕様

メーカー	LINOS
商品名称	Adjustable prism insert 30
型番	G06 3731 000
外径	30 [mm]
光学素子の調整	XY軸傾きおよび回転調整可能
適応素子サイズ	20×20×20 [mm]
外観	

表4.13 平面ミラーホルダの仕様





メーカー	LINOS
商品名称	Adjusting mount 31.5 S
型番	G06 5075 000
傾き調整	±4度XY軸調整可能
適応素子の直径	31.5 [mm]
外観	

4.6.2 従来法との比較

偏光板を回転することで位相シフト干渉縞を生成した提案手法およびピエゾステージを使用した従来手法を比較した。本研究では、提案手法と従来手法に使用した光学部品が相当するため、位相シフト干渉縞生成以外の価格も相当すると考え、位相シフト干渉縞の生成装置のみを比較した。本研究に使用した自動回転ステージおよび従来手法に使用したピエゾステージの仕様を表4.14

にそれぞれ示す．表4.14より，本研究の位相シフト干渉縞生成装置の価格は従来手法より1/2程度と安価であることが確認できる．

表4.14 位相シフト干渉縞生成装置の比較

	自動回転ステージ	ピエゾステージ
メーカー	シグマ光機	シグマ光機
ステージの型番	FPW06360	SFS-H40Z
制御精度	0.05 [°]以下 (位相値精度<0.1 [°])	10 [nm] (位相値の精度=6.8 [°])
ステージの外観		
コントローラの型番	DS102	FINT-01 γ
コントローラの外観		
総合価格	¥284,000	¥570,000

4.6.3 小型計測システムによる計測実験

小型計測システムを用いて，三次元形状計測ができることを検証するために，図4.28に示すディスプレイ用のマイクロレンズアレイに対する三次元形状計測実験を実行した．しかしながら，小型システムに使用したカメラのセンサ面積により，三次元計測範囲が7×7 [mm]，XYの空間分解能が3.45×3.45 [μm]に限定された．サイズの小さいマイクロレンズアレイの三次元形状を計測するために，計測実験では，対物レンズおよび引き伸ばしレンズを使用したテレセントリックレンズを構築して，計測範囲を縮小して三次元計測の空間分解能を向上させた．ここで，テレセントリックレンズを用いて，計測対象に照射するレ

一ザ光を縮小する．計測対象表面から反射した物体光がテレセントリックレンズにより拡大され，カメラで拡大された物体光と参照光の干渉縞を撮影する．

本計測実験において，50倍の対物レンズおよび焦点距離が105 [mm]の引き伸ばしレンズを用いて，テレセントリックレンズを構築した．計測範囲は 460×460 [μm]，空間分解能は0.22 [$\mu\text{m}/\text{pixel}$]である．テレセントリックレンズを使用した計測システムの光学模式図および外観図を図4.29および図4.30に示す．

テレセントリックレンズを使用した計測システムを用いて，撮影したマイクロレンズアレイの干渉縞を図4.31，提案手法で算出した物体光の絶対位相値を図4.32に示す．復元したマイクロレンズアレイの三次元形状を図4.33に示す．図4.33より，提案システムを用いて，テレセントリックレンズの使用により，計測の空間分解能が向上でき，サイズの小さいマイクロレンズアレイの三次元形状が計測できた．

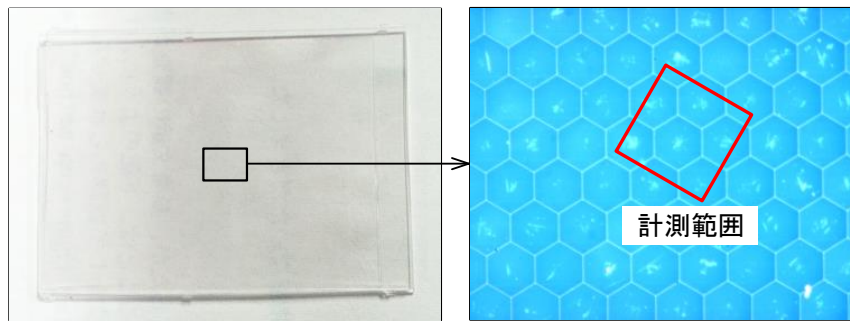


図4.28 計測対象(マイクロレンズアレイ)の外観図

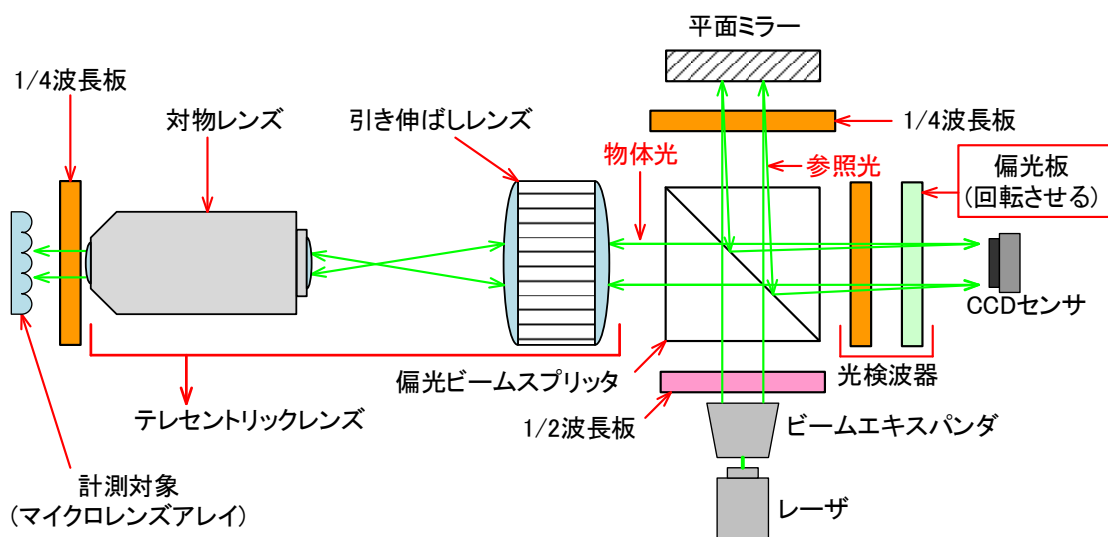


図4.29 テレセントリックレンズを使用した計測システムの光学模式図

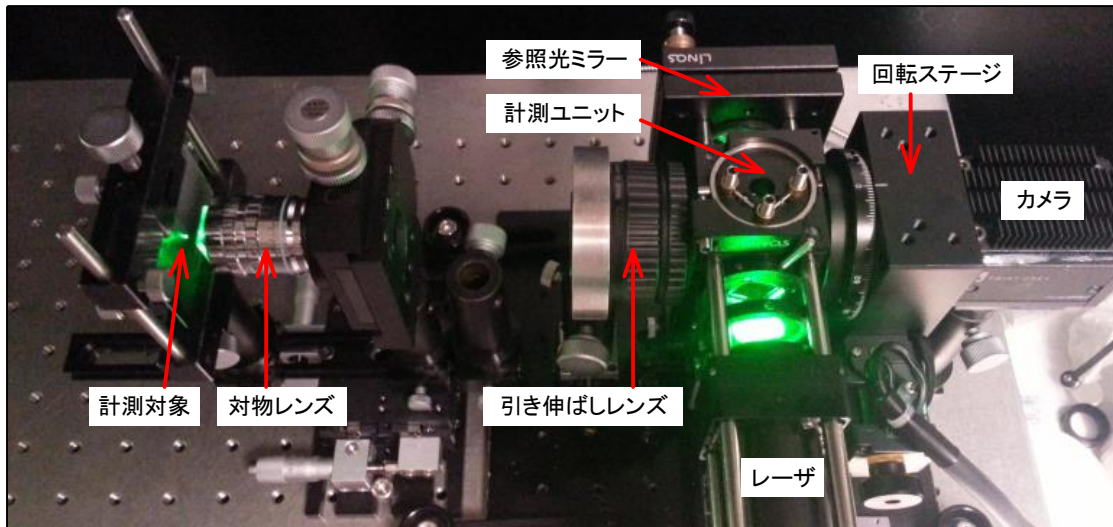
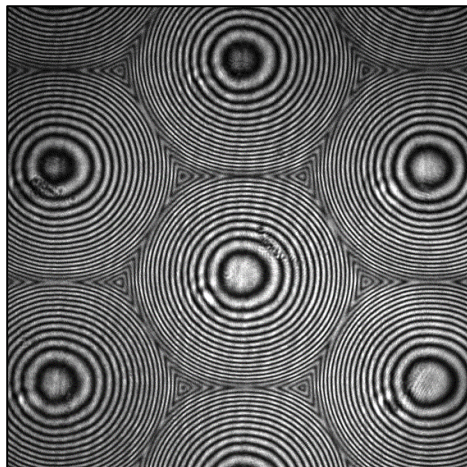
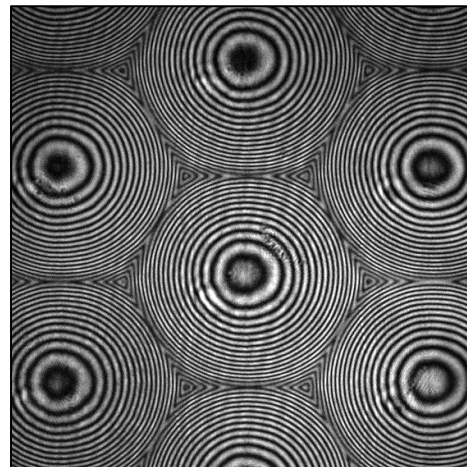


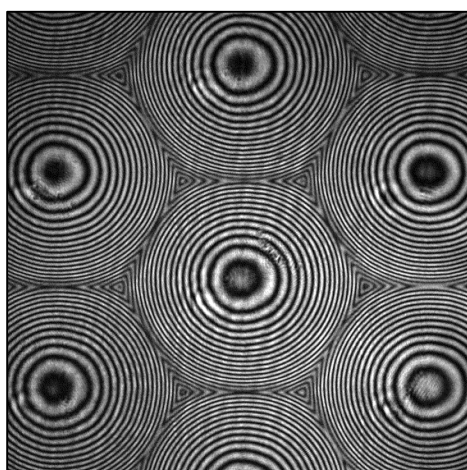
図4.30 テレセントリックレンズを使用計測システムの外観図



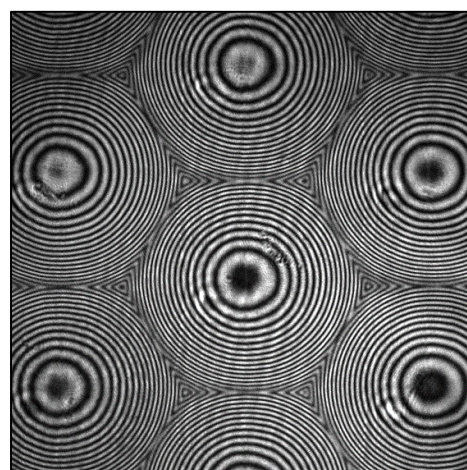
(a) 0度の干渉縞画像



(b) 45度の干渉縞画像



(c) 90度の干渉縞画像



(d) 135度の干渉縞画像

図4.31 マイクロレンズアレイの位相シフト干渉縞撮影画像

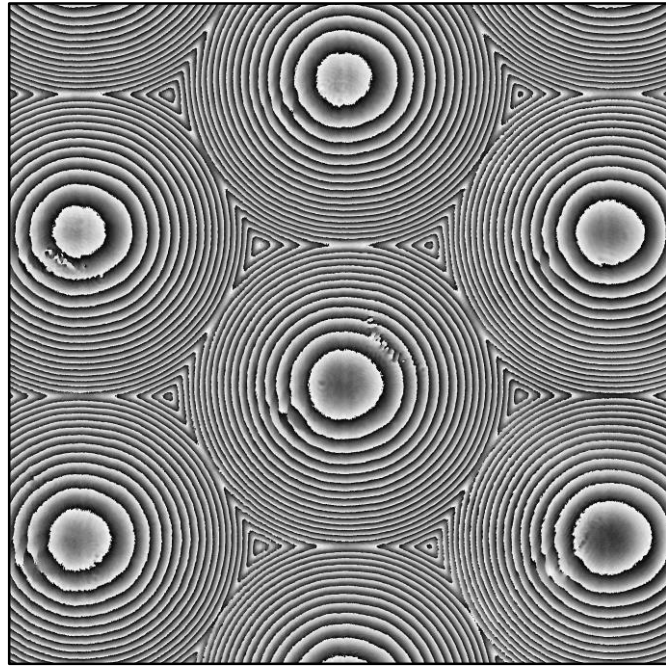


図4.32 算出した物体光の絶対位相値(位相連結前)

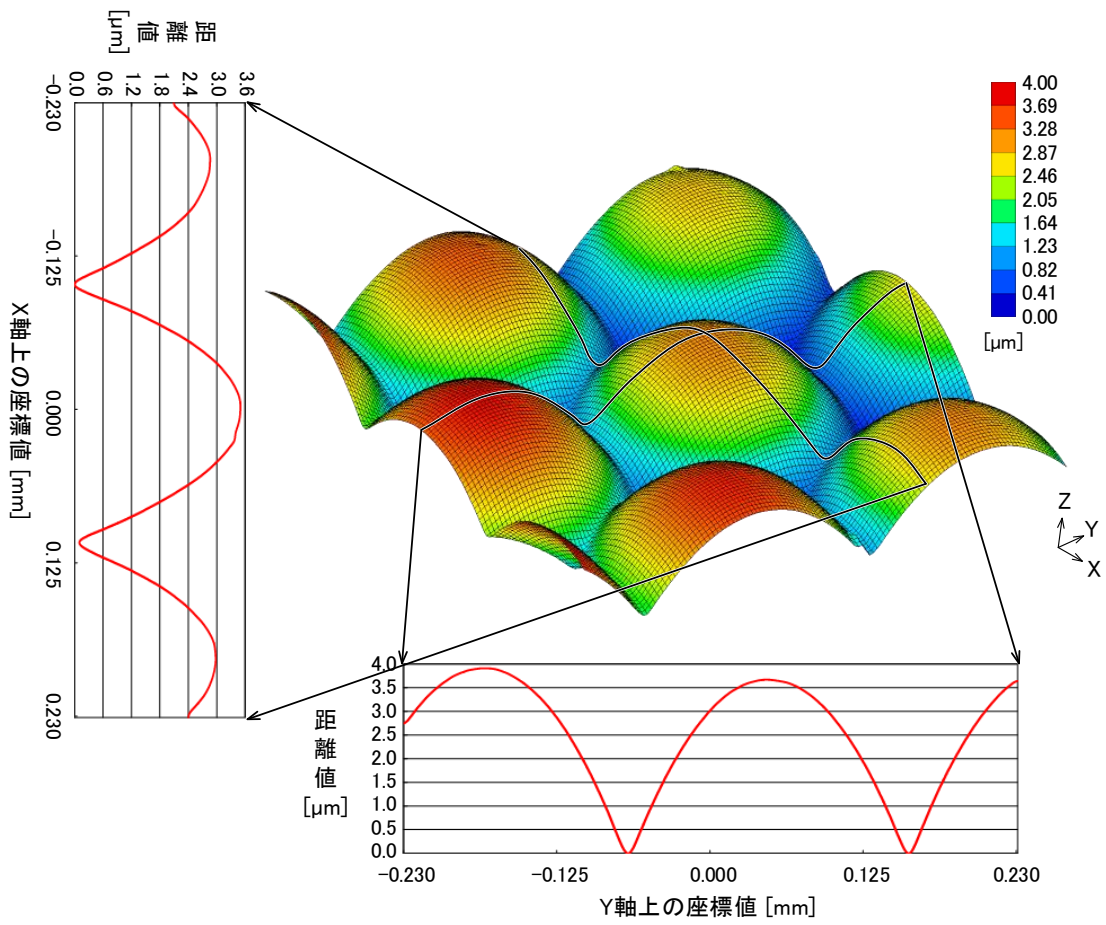


図4.33 復元したマイクロレンズアレイの三次元形状

また、5倍の対物レンズを使用して、 $800 \times 800 [\mu\text{m}]$ の計測範囲におけるマイクロチップの表面を計測した。計測対象の外観を図4.34に示す。位相シフト干渉縞画像を図4.35、物体光の絶対位相値を図4.36、計測の結果を図4.37に示す。

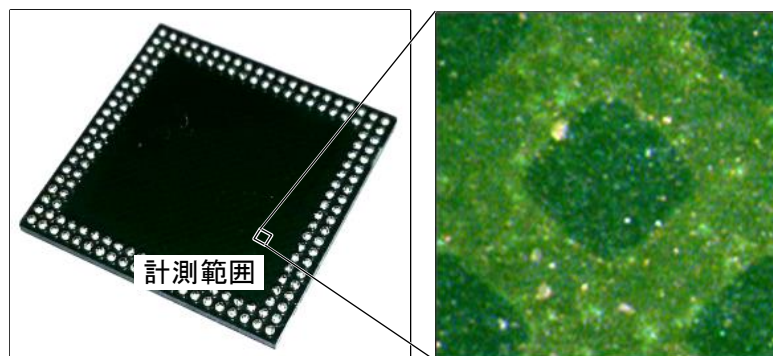
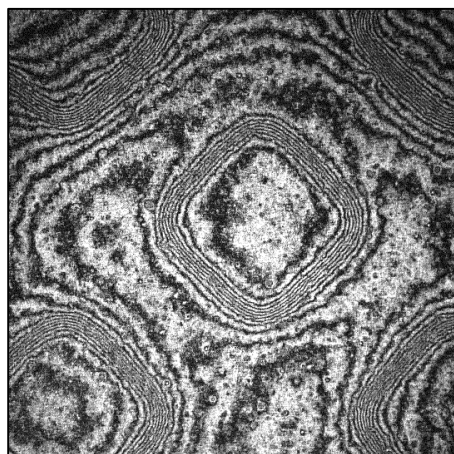
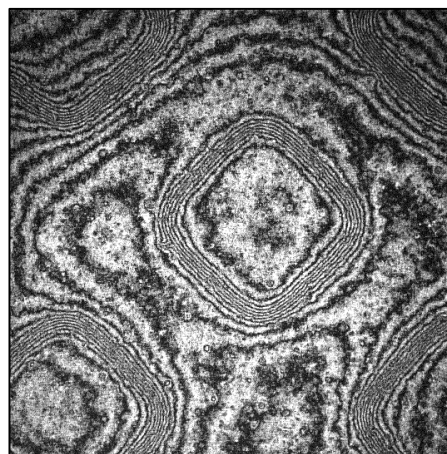


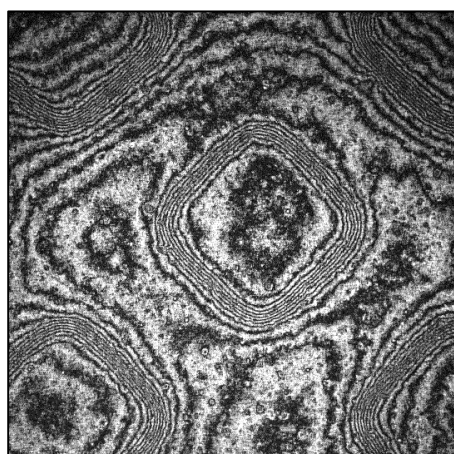
図4.34 計測対象(マイクロチップ)の外観図



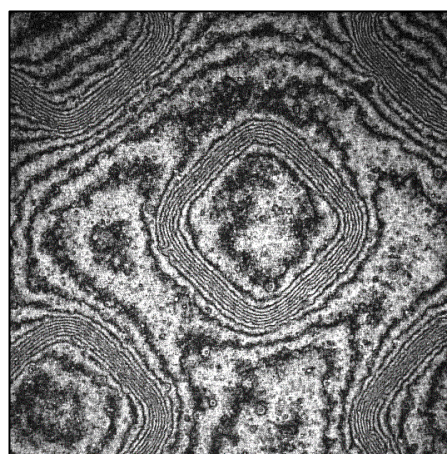
(a) 0度の干渉縞画像



(b) 45度の干渉縞画像



(c) 90度の干渉縞画像



(d) 135度の干渉縞画像

図4.35 マイクロチップの位相シフト干渉縞撮影画像

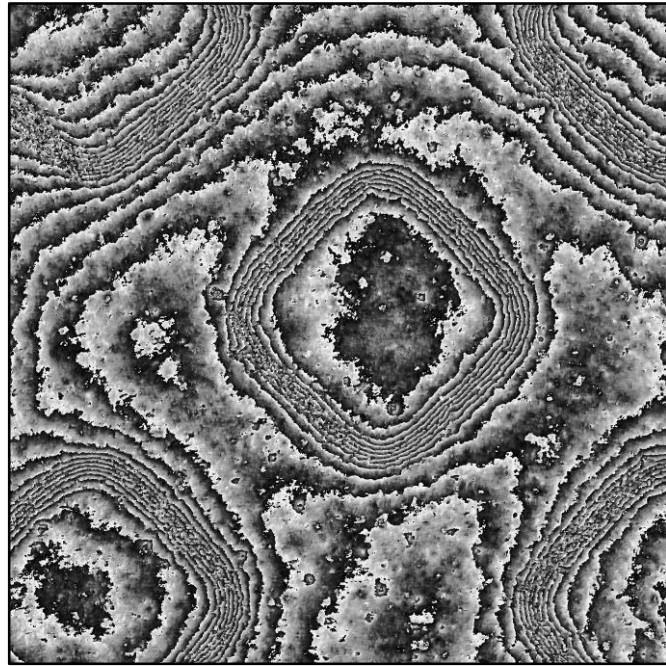


図4.36 算出した物体光の絶対位相値(位相連結前)

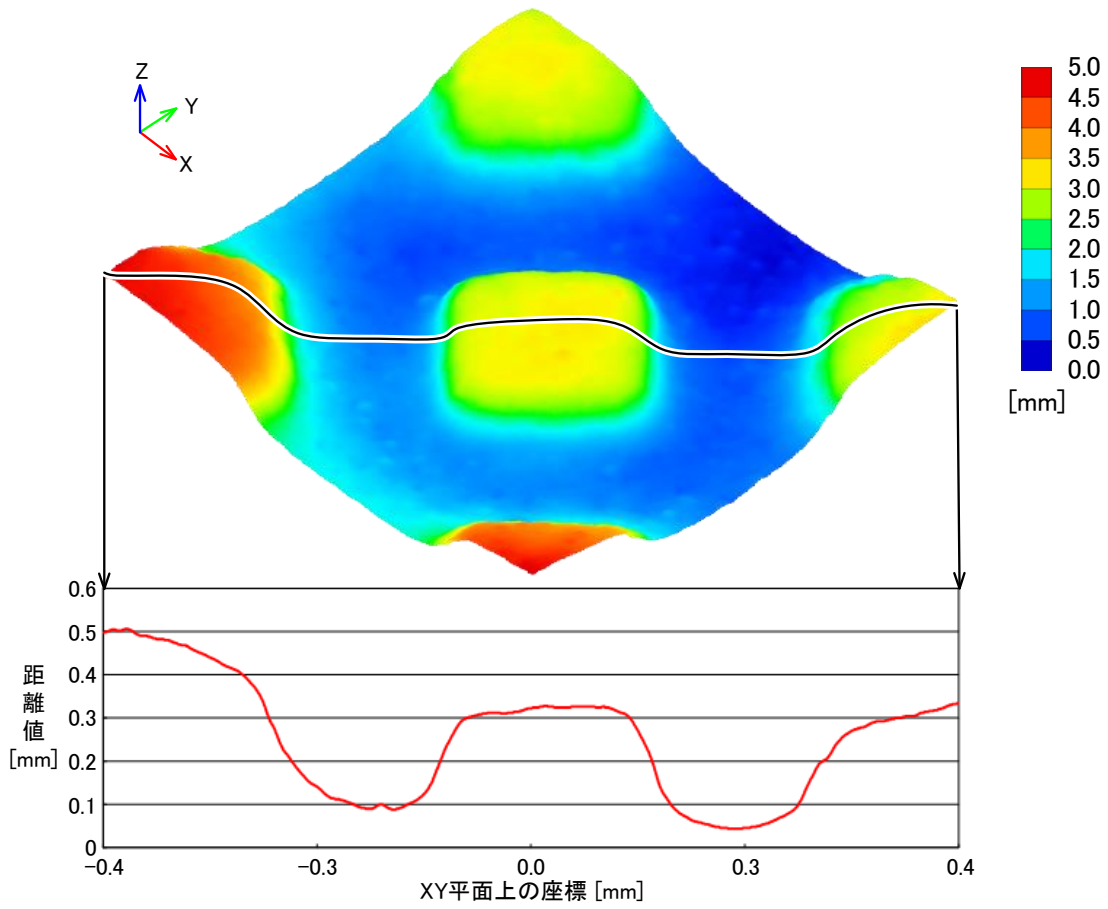
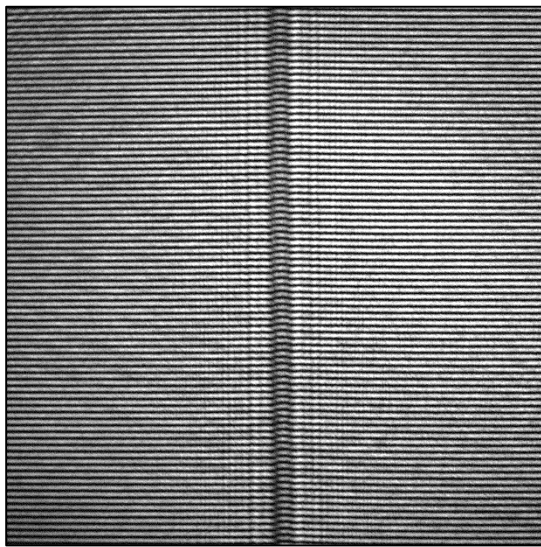


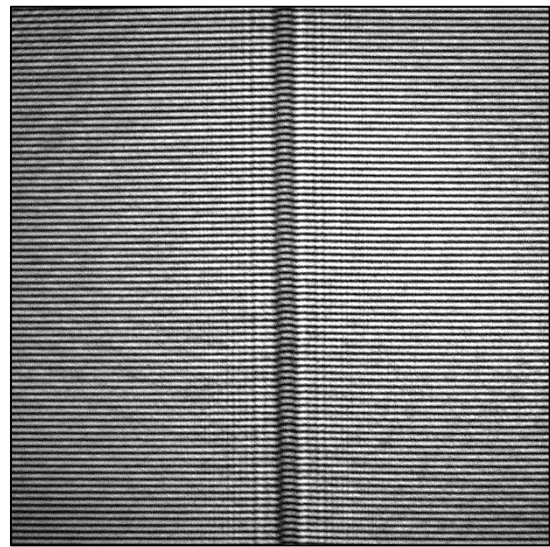
図4.37 復元したマイクロチップの三次元形状

4.6.4 精度評価

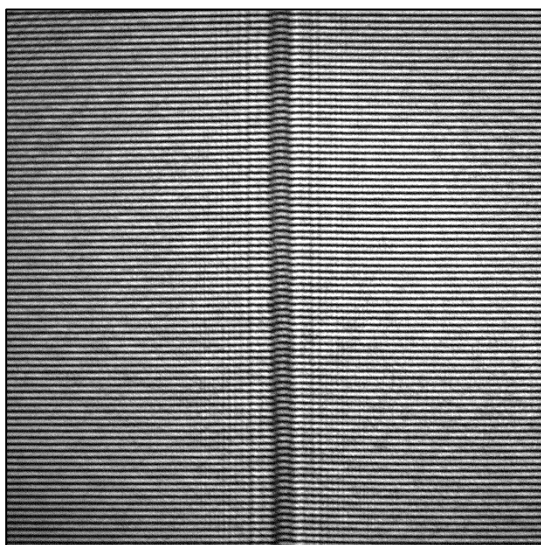
小型計測システムの計測精度評価実験では、4.5.3節で使用したMitsutoyo社製の段差マスタを用いて、1 [μm]の段差箇所を10回計測した。計測する際に、計測装置と計測対象(段差マスタ)の位置関係は図4.28と同一、計測範囲は7×7 [mm]である。計測精度評価に使用した4枚の位相シフト干渉縞撮影画像例を図4.38、物体光の絶対位相値を図4.39、位相連結の結果を図4.40、4.5.3節に説明した評価手法と同様に算出した平均距離値を図4.41に示す。



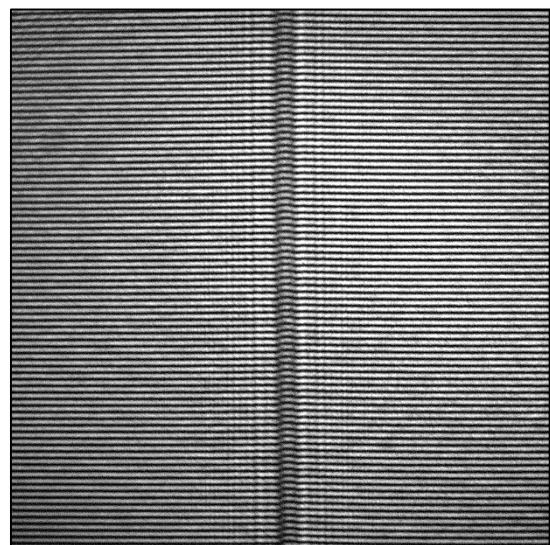
(a) 0度の干渉縞画像



(b) 45度の干渉縞画像



(c) 90度の干渉縞画像



(d) 135度の干渉縞画像

図4.38 1 [μm]段差箇所の位相シフト干渉縞撮影画像例

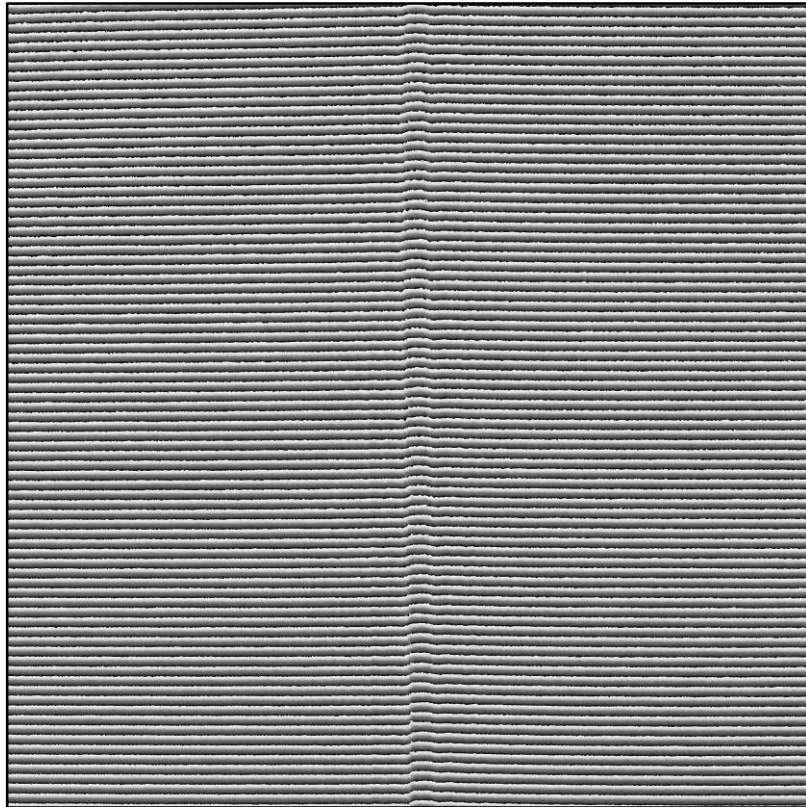


図4.39 算出した物体光の絶対位相値(位相連結前)

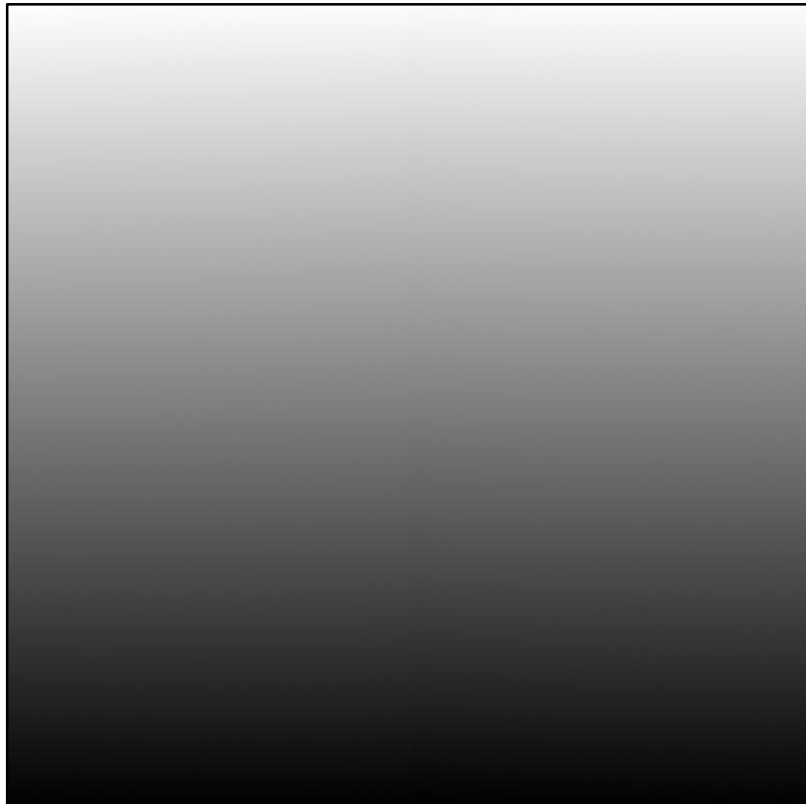


図4.40 位相連結したの物体光の絶対位相値

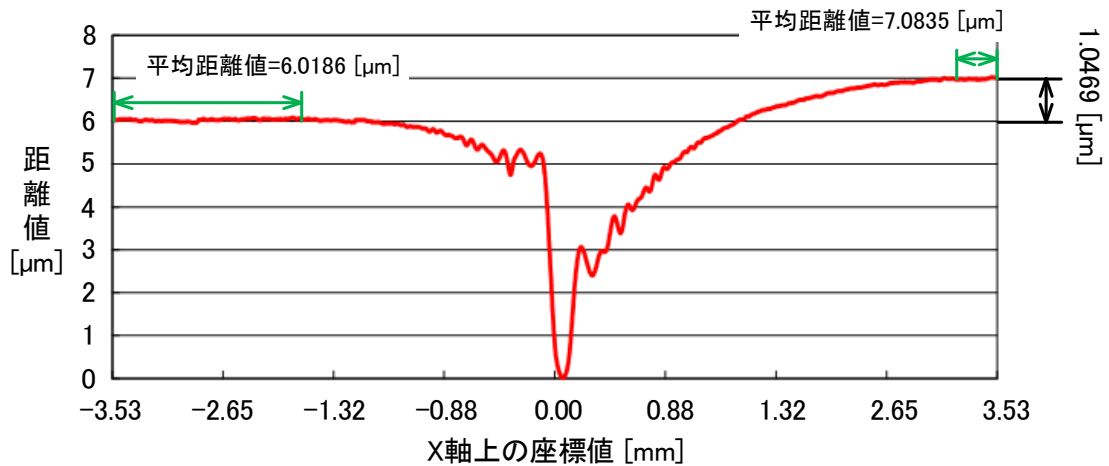


図4.41 縦方向1ライン毎に算出した平均距離値

次に、段差の計測値と真値を比較することで、計測の平均誤差を算出した。ただし、本実験で使用した真値について、接触式の精密三次元計測器 (Dektak 150 Surface Profiler) を用いて、同一計測箇所を計測した結果 (1.040 [μm]) を真値として仮定した。使用した接触式の精密三次元計測器の仕様を表4.15に示す。計測精度評価の結果を図4.42に示す。図4.42に示した計測精度評価の結果より、小型化した計測システムの計測平均誤差は7.1 [nm]である。

表4.15 接触式の精密三次元計測器の仕様

メーカー	BRUKER
型番	G06 5075 000
高さの計測分解能	0.001 [nm]
高さの計測範囲	524 [μm]
外観	

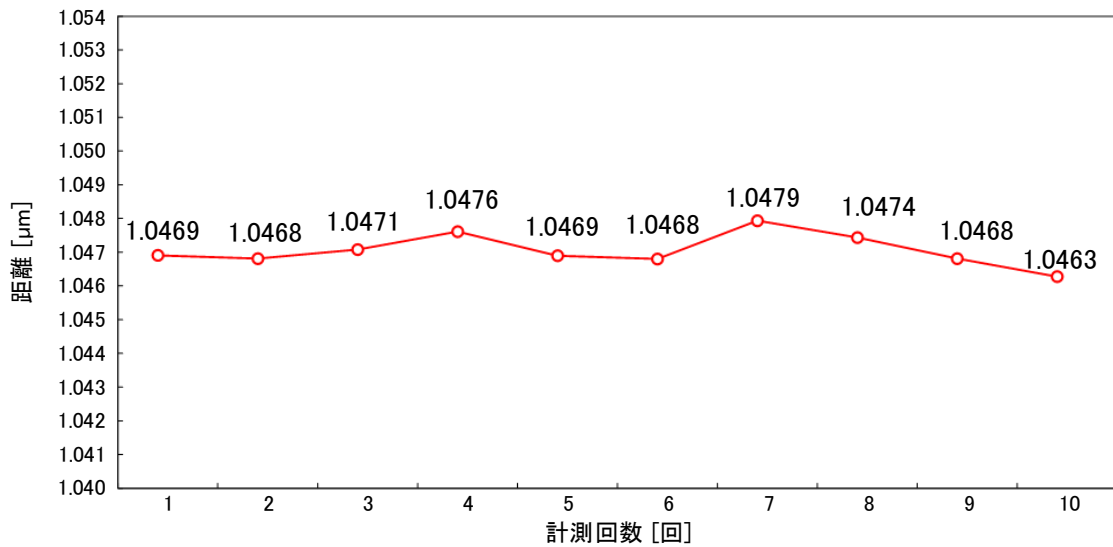


図4.42 計測精度の評価結果

4.6.5 計測時間

提案手法では、まず、回転ステージを使用して偏光板を回転させ、カメラで4枚の位相シフト干渉縞画像を撮影する。次に、提案した位相シフトデジタルホログラフィによる三次元形状計測法を用いて、計測対象の三次元形状を復元する。そのため、提案システムの計測時間においては、干渉縞の撮影時間および三次元計測の処理時間が存在している。干渉縞の撮影時間とは、偏光板を回転しながら、4枚の位相シフト干渉縞画像を撮影する時間である。三次元計測の処理時間とは、位相シフトおよびフレネル変換の計算時間である。本研究では、表4.16に示すコンピュータを用いて、回転ステージを制御して三次元計測処理を実行し、それぞれの時間を記録した。撮影画像サイズは2048×2048 [pixel]を使用した場合、提案システムの計測時間を表4.17に示す。

表4.16 計測に使用したコンピュータのスペック

CPU	Intel core i7 3.2 [GHz]
RAM	18 [GB]
Operating Ssystem	Windows 7 64-bit

表4.17 提案システムの計測時間 [ms]

撮影時間	17,000
処理時間	250
総合時間	17,250

4.6.6 考察

図4.42に示した計測精度評価の結果より、仮定した真値と比較して、小型化した計測システムの計測平均誤差は7.1 [nm]である。ここで、接触式の三次元計測器を用いて段差箇所を計測した環境(計測時の温度や空気密度の変化など)と提案システムを用いた計測環境が異なるため、接触式の三次元計測器を用いて取得した段差値を仮定な真値として使用した。そのため、計測実験を通して取得した提案システムの計測平均誤差は接触式の三次元計測器を用いて計測した段差値を参考した誤差である。

また、試作計測システムと小型計測システムの計測精度は段差マスタの許容誤差以内であることを確認したが、小型計測システムにピクセルサイズの小さいカメラセンサおよび干渉距離が200 [μm]の高干渉性能のレーザを使用したため、三次元計測のXY空間分解能および計測の安定性は試作計測システムより高い。また、光学部品の一体化により、計測環境における空気密度の変化も減らせると考えられる。そのため、小型計測システムの計測精度が試作計測システムより高い。

しかしながら、計測時間の評価結果より、4枚の位相シフト干渉縞を作成するために、偏光板の回転が必要であるため、干渉縞の撮影時間が長いという問題点が確認できる。ただし、高速の回転ステージを使用することで、問題点が簡単に解決できるが、市販の高速回転ステージでは、回転の制御精度が低く、回転時に振動が発生してしまう。そのため、単純に回転速度を向上させることは、干渉縞の撮影に対する高速化が実現できるが、計測の安定性および計測精度に対して、悪影響を与えてしまう。計測の安定性に関しては、計測システムの振動および計測環境における空気密度の変化が微細に発生した場合に撮影した平面ミラーの位相シフト干渉縞画像を図4.43、位相シフト法により算出された物体光の相対位相値を図4.44にそれぞれ示す。図4.44より、計測対象は平面ミラーであるため、物体光の相対位相値は直線状のはずであるが、計測環境からの影響により、位相シフト干渉縞間に位相差のずれが生じてしまうため、算出した物体光の相対位相値に歪みが存在してしまうことを確認することができる。

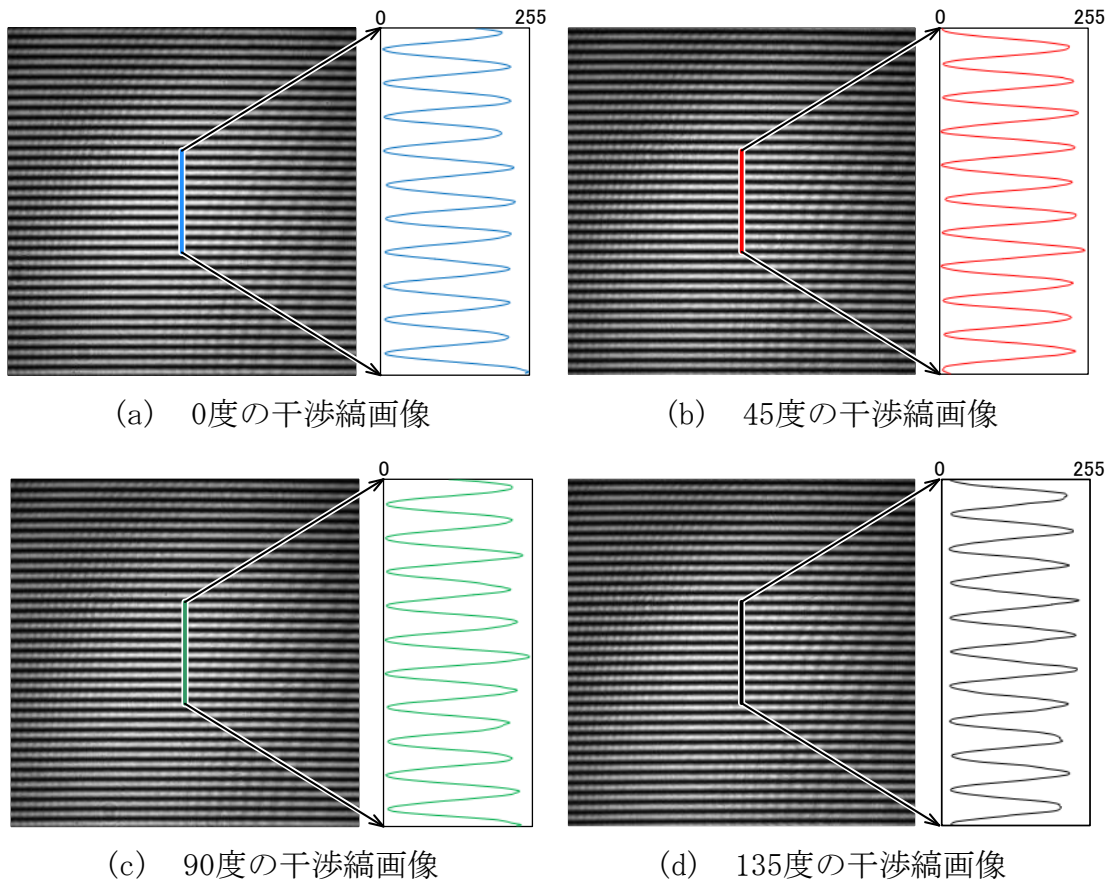


図4.43 計測環境の影響が発生時の位相シフト干渉縞

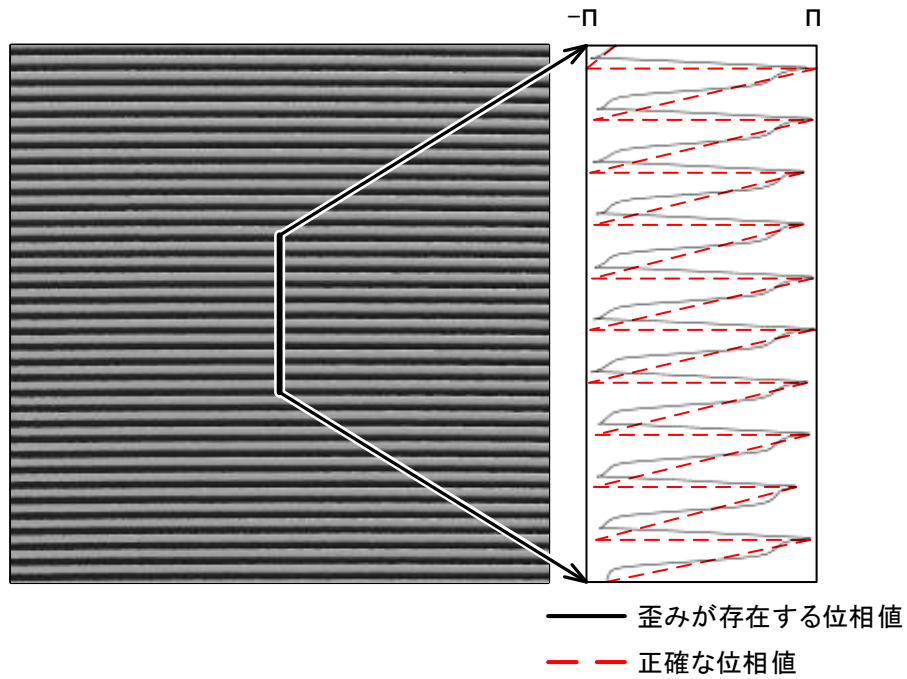


図4.44 歪みが存在する物体光の相対位相値

最後に、提案した位相シフトデジタルホログラフィによる三次元形状計測法を用いて、鏡面反射物体の表面形状および透明物体の屈折率の変化が計測できる前提条件は撮影画像に干渉縞が存在することである。そのため、下記に示すように、提案手法を用いて、傾き角度の高い物体および表面の粗い物体に対する三次元形状計測が困難である。

- (1) 傾き角度の高い斜面が存在する物体の三次元形状を計測する場合、平行なレーザ光を傾き角度の高い箇所に照射すると、斜め方向への反射が発生してしまふ。ここで、参照光は照射範囲が一定な平行光であるため、斜めに反射した物体光が参照光の照射範囲以外の領域に照射し、干渉縞が生成できない。そのため、計測対象表面上に傾き角度の高い斜面が存在する場合、三次元形状計測が不可能である。
- (2) 表面の粗い物体の三次元形状を計測する場合、物体表面の凹凸により、スペックル干渉縞がノイズとして存在する。スペックルノイズは提案手法で算出した物体光の絶対位相値に悪影響を与えるため、位相連結処理が正確に実行できず、三次元形状計測が不可能である。

傾き角度の高い斜面が存在する物体について、ボタン電池を計測対象例として説明する。計測対象の外観を図4.45に示す。計測時光路の概念図を図4.46に示す。図4.46より、傾き角度の高い斜面から反射した物体光は参照光の照射範囲に照射せず、干渉が発生しないため、図4.47に示す撮影画像に干渉しない部分が存在した。また、干渉縞が存在しないため、図4.48に示すように、物体光の絶対位相値が算出できないことが確認できる。そのため、提案手法を用いて、傾き角度の高い斜面に対する三次元形状計測は不可能である。同様に、球面形状の計測対象に対して、頂点部分しか計測できないと考えられる。



図4.45 計測対象(ボタン電池)の外観

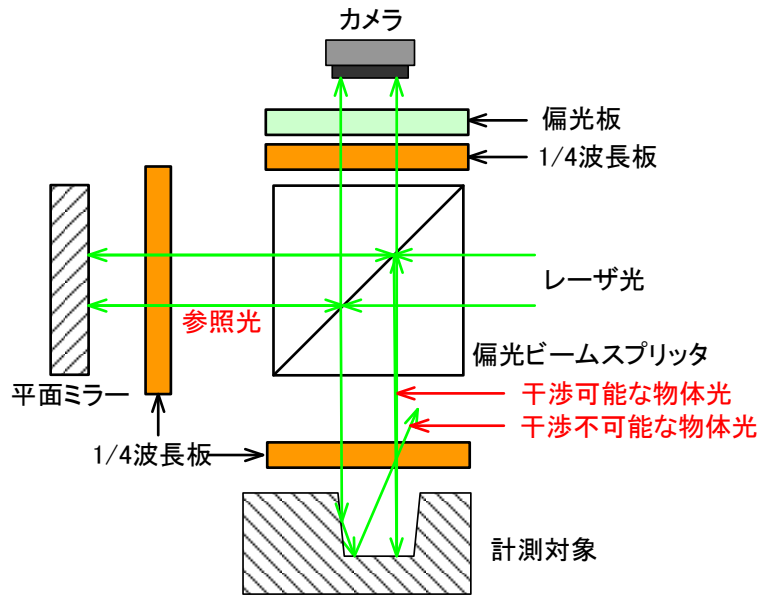


図4.46 計測時光路の概念図

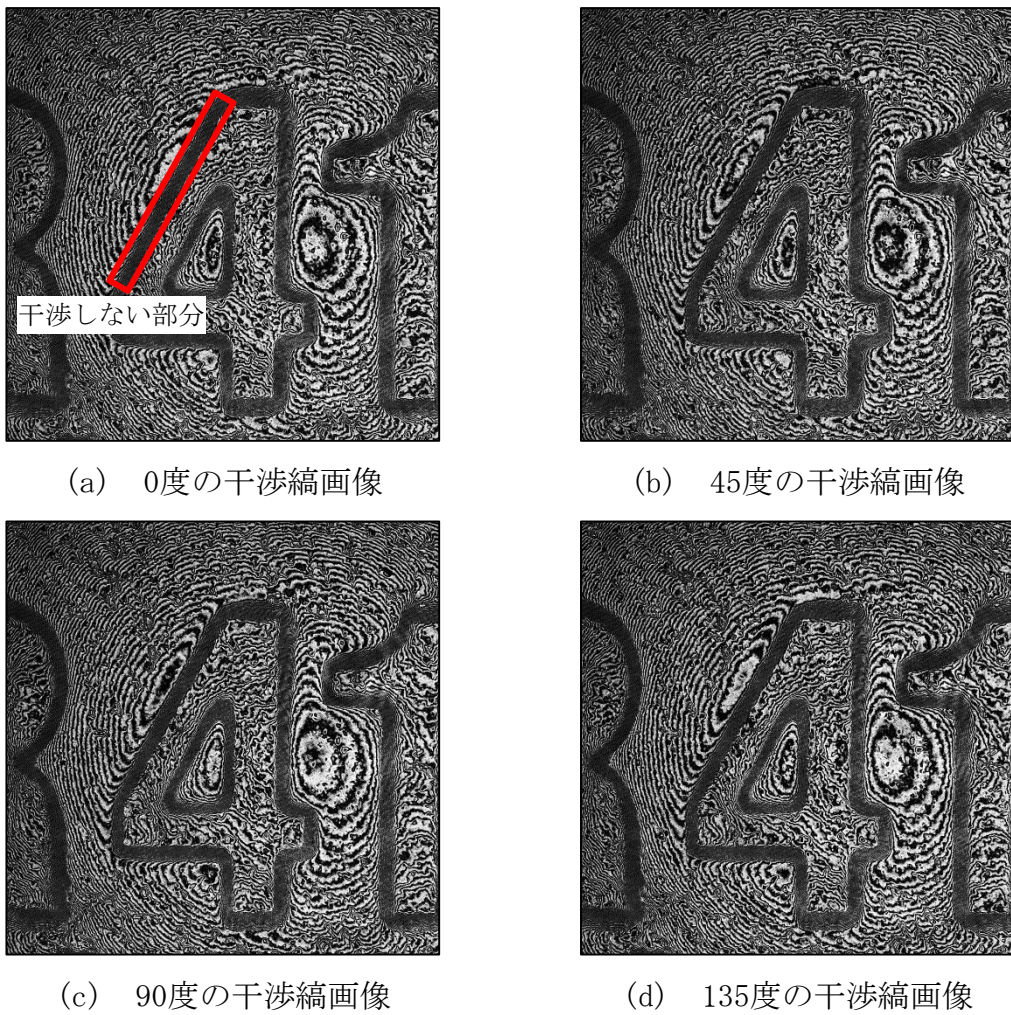
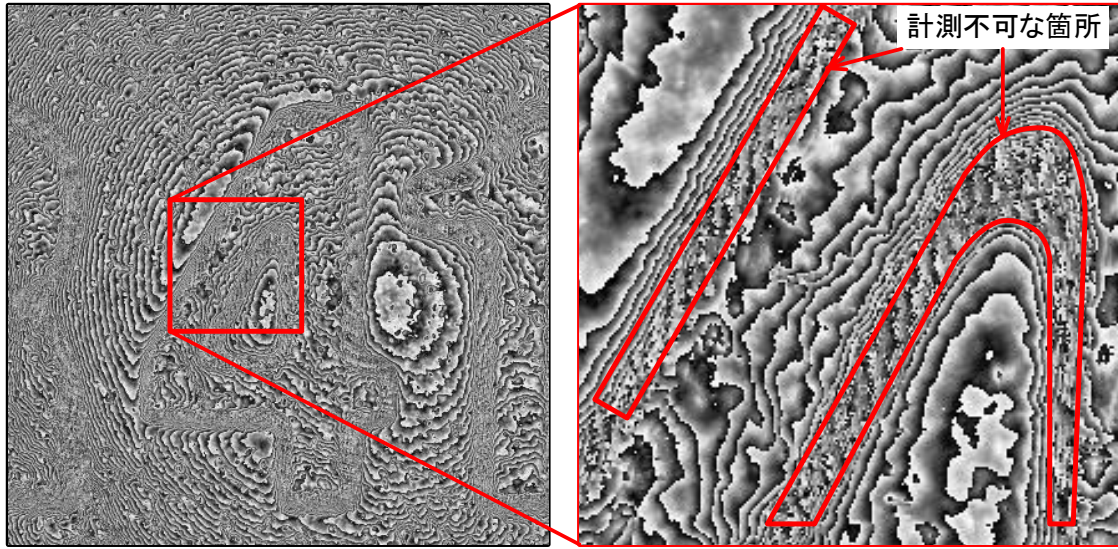


図4.47 ボタン電池表面の位相シフト干渉縞撮影画像



(a) 物体光の絶対位相値画像 (b) 計測不可な箇所の拡大図

図4.48 算出した物体光の絶対位相値(位相連結前)

表面の粗い物体について、金属コイン(1円玉)を例として説明する。計測対象の外観を図4.49に示す。計測時光路の概念図を図4.50に示す。図4.50より、計測対象表面に存在する凹凸により、物体光と物体光が干渉してしまい、スペックル干渉縞がノイズとして図4.51に示す干渉縞の撮影画像に存在する。提案手法を用いて、図4.51に示す干渉縞の撮影画像から算出した物体光の絶対位相値を図4.52に示す。図4.52より、スペックルノイズの位相値と物体光の絶対位相値が同時に存在するため、物体光の絶対位相値のみに対する位相連結処理が実行できず、三次元形状の復元が不可能である。



図4.49 計測対象(金属コイン)の外観

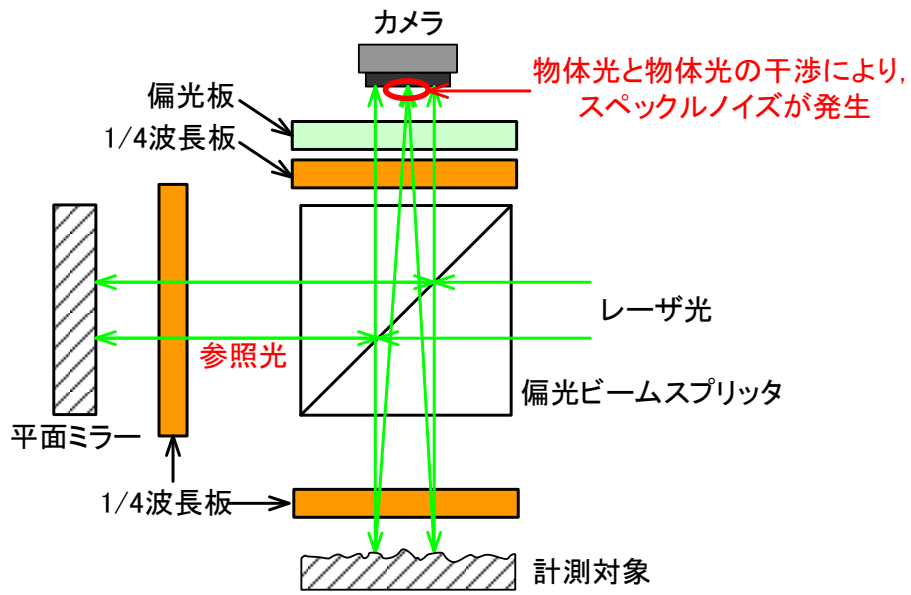


図4.50 計測時光路の概念図

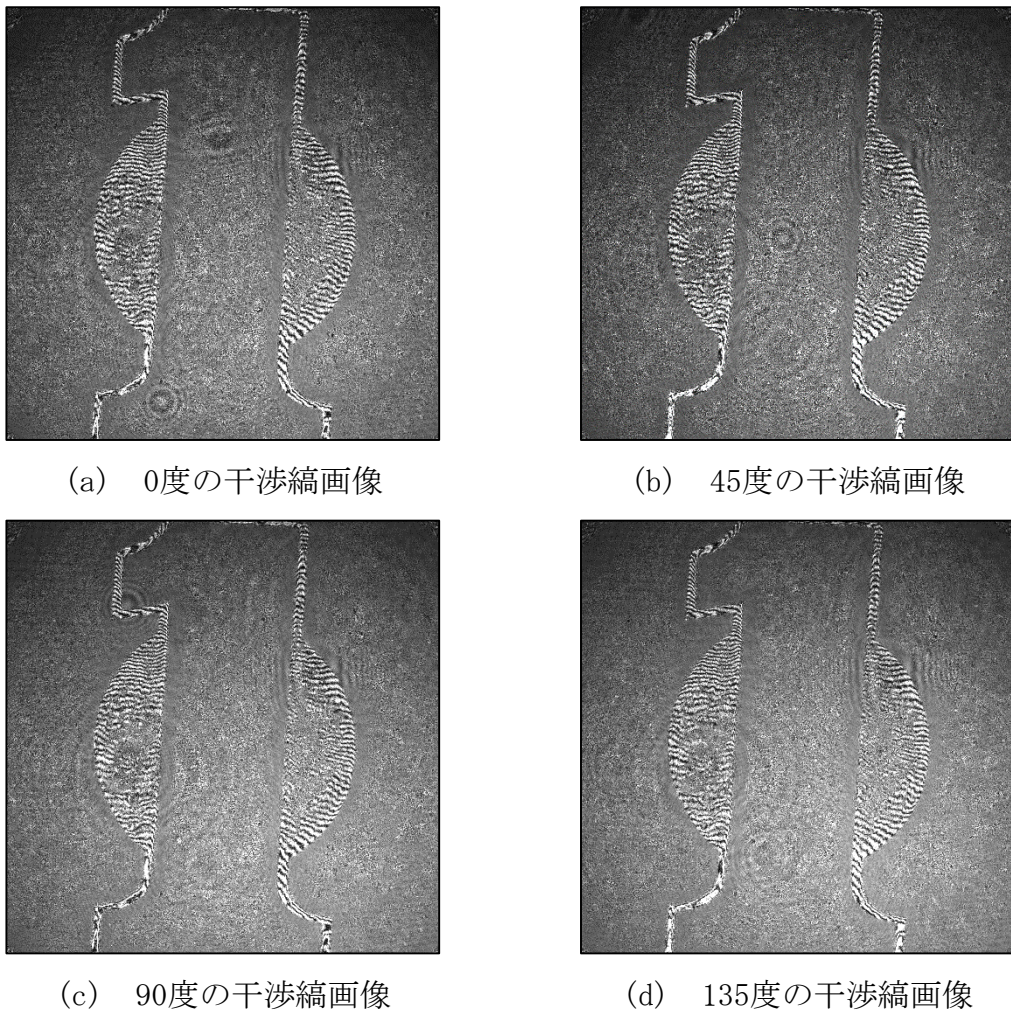
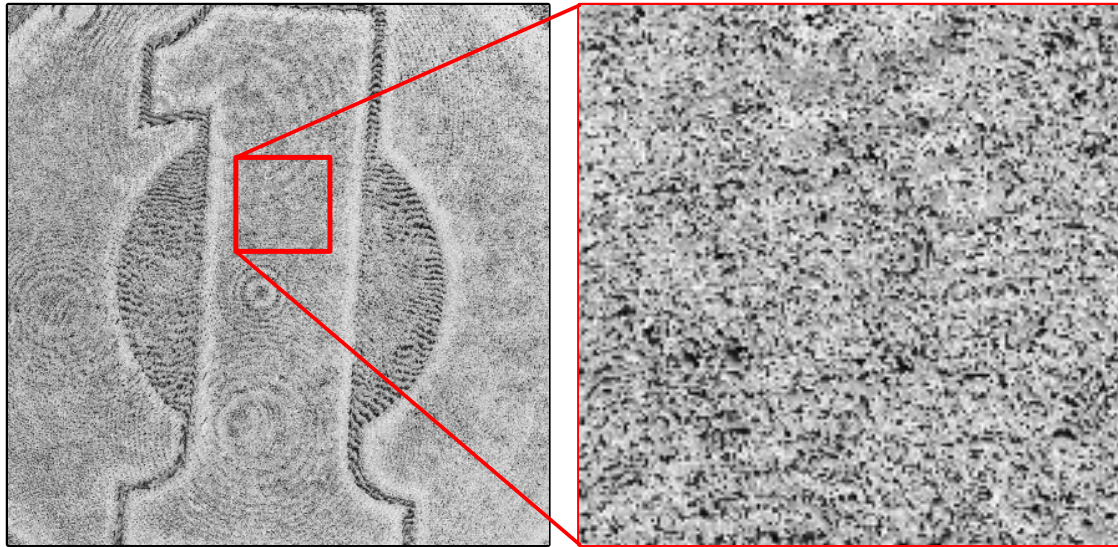


図4.51 金属コイン表面の位相シフト干渉縞撮影画像



(a) 物体光の絶対位相値画像 (b) スペックル位相箇所の拡大図

図4.52 算出した物体光の絶対位相値(位相連結前)

提案手法を用いて、上記に示した計測例以外、様々な材質の物体も計測実験を実行したことがある。本稿では、計測実験の結果を示さず、材質別計測可能な物体および計測できない物体を表4.18に示してまとめる。

表4.18 計測対象材質別特性表

材質	計測可否
金属(鏡面)	○
金属(研磨)	○
金属(粗面)	×
セラミック(鏡面)	○
セラミック(粗面)	×
球型バンプ	△
金はんだ	○
ガラス	○
透明樹脂	○

○：計測可能，△：一部分の計測が可能，×：計測不可

4.7 むすび

本研究では、既存の三次元形状計測システムの問題点を解決し、鏡面反射および透明物体の三次元形状を計測可能な位相シフトデジタルホログラフィによる三次元形状計測法を提案して、安価かつ高精度な計測システムを開発した。

提案システムでは、光の検波原理を使用して、偏光板を45度ずつ回転させることで、三次元形状計測に必要な4枚の位相シフト干渉縞を生成する。ここで、ピエゾステージを使用した従来の計測システムより、高精度な位相シフト干渉縞の生成および計測システムの低価格化が実現できた。また、参照光と物体光の分割および合成が同一のビームスプリッタにより行われるため、従来の計測システムより、小型な構成が実現できた。

提案手法では、位相シフトにより算出された物体光の相対位相値を畳み込み原理を利用したフレネル変換に代入することで、計測対象の表面に存在する物体光の複素振幅を算出するという新たな位相シフトデジタルホログラフィによる三次元形状計測法を実現した。フーリエ変換のみを利用することで、一般的なフレネル変換を使用した従来法より、簡単に実装することができ、三次元形状計測システムの開発に対しては有効であると考えられる。

段差マスタ1 [μm]段差箇所を10回計測した計測値および真値(接触式三次元計測器の計測結果)を比較して、平均計測誤算を算出することで、計測システムの計測精度を評価した。計測精度の評価結果により、提案システムの計測誤差は7.1 [nm]である。また、コンピュータを用いて回転ステージを制御して三次元計測処理を実行する計測時間に関して、三次元計測処理の時間が250 [ms]であるが、偏光板を回転しながら4枚の位相シフト干渉縞を撮影するため、干渉縞の撮影時間(17 [s])は高速に不向きであるという問題点を確認した。さらに、位相シフト干渉縞を撮影する際に発生した振動や空気密度の変化などにより、提案システムは計測環境からの影響を受けやすいと考えられる。最後に、提案手法を用いて、傾き角度の高い物体および表面の粗い物体に対する三次元形状計測ができないことを確認した。

上記の計測精度、速度および安定性の問題点を解決するために、1枚の干渉縞撮影画像から物体光の相対位相値を算出する可能なワンショット位相シフトデジタルホログラフィを提案する。

第5章 ワンショット位相シフトデジタルホログラフィ

5.1 まえがき

高精度かつ高速の三次元形状計測に関して、様々な研究や開発が行われている。既存の三次元計測手法として、複数の投影パターンを利用した三次元画像計測法が最も使用されているが、特に、ワンショット三次元計測による高速化の実現に期待が寄せられている。林らは^[86]、プロジェクタから投影する正弦波パターンにRGB正弦波パターンを用いて、カラーカメラで撮影し、色分解を行うことで、従来は複数回撮影が必要である位相シフト法の三次元計測をワンショットで実現した。しかしながら、この手法による計測値のばらつき標準偏差は23 [μm]と報告されており、高精度化に課題が存在していた。また、鏡面反射物体および透明な物体に対しては、投影パターンの撮影画像解析が困難であるため、計測ができない場合も多い。一方、鏡面反射および透明な物体を高精度に計測する可能な手法として、光干渉計測法^{[86]~[90]}が提案されている。光干渉計測分野においては、参照面となるミラーを傾けて物体撮影画像にキャリア縞を生成させ、1枚のキャリア縞撮影画像を解析して物体光の相対位相値を算出し、計測対象の表面形状をワンショットで計測する手法が提案されている。しかしながら、これらの手法では、フレネル変換を用いた物体光の再生処理を実行しないため、算出した物体光の位相値は参照光の位相値を参考にした物体光の相対位相値であり、参照光の位相値を参考しない物体光の絶対位相値を厳密に算出することが困難である。

一方で、前章で述べたデジタルホログラフィによる三次元形状計測法では、物体光と参照光をそれぞれ偏光面が直交した円偏光にし、偏光板を45度ずつ回転させて検波することで、90度ずつ位相の異なる4枚の位相シフト干渉縞を生成する手法を検証し、安価で小型な位相シフトデジタルホログラフィによる三次元形状計測システムを提案した。しかしながら、4枚の位相シフト干渉縞画像を取得するために、偏光板の回転制御およびカメラによる複数回の撮影が必要であるため、高速な三次元形状計測に不向きである。また、計測環境に振動がある場合には、撮影された位相シフト干渉縞画像間に位相誤差が生じてしまう

など、安定かつ高速な三次元形状計測の実現が困難であるという課題が存在した。

この課題を解決するために、4枚の位相シフト干渉縞を用いずにワンショットで計測を行う位相シフトデジタルホログラフィによる三次元形状計測法として、並列位相シフトアレイ素子を表面に貼り付けた特殊なカメラセンサを使用した手法が提案されている。しかしながら、この手法では、並列位相シフトアレイ素子により、4画素の輝度情報から一つの位相値を算出するため、三次元計測に使用する情報量はカメラセンサより取得された情報量の1/4しかない。また、並列位相シフトアレイ素子は数百万円程度と高価であるため、計測装置の低価格化が困難である。また、再生光に対するフィルタリング処理を用いて、1枚の干渉縞撮影画像から再生した物体光に存在する直流成分および虚像成分が除去できるデジタルホログラフィによる物体光の回折法および三次元計測法が提案されている。しかしながら、これらのワンショット計測手法では、フレネル回折空間におけるバンドパスフィルタを用いて、再生した物体光から実像成分を抽出し、物体光の絶対位相値を算出することで、三次元計測が可能であることを検証したが、干渉縞に対する解析をしておらず、三次元計測の精度および計測システムの実用性に関する検討が行われていない。

そこで、本研究では、光干渉計測分野に応用されている干渉縞の周波数解析法を用いて、ワンショット位相シフトデジタルホログラフィによる三次元形状計測システムを開発し、複数の三次元計測実験を通して、その実用性を検証する。開発した計測システムは、一般的な光学部品で構成できるため、並列位相シフトアレイ素子を使用した手法よりも安価に計測システムを構築できる。また、位相シフトデジタルホログラフィの原理に基づくため、鏡面反射および透明物体に対して、物体光の絶対位相値を用いて高精度に三次元計測することができる。さらに、4枚の位相シフト干渉縞撮影画像を利用した従来法と比較することで、開発手法が安定性に優れることを検証し、鏡面反射の金属工業製品および透明のガラス製品の精密不良検査に実用可能であることを示す。

5.2 従来のワンショット法

従来のワンショット位相シフトデジタルホログラフィによる三次元形状計測法では、並列位相シフトアレイを用いた手法および回折空間フィルタを用い

た手法が最も利用されている。本節では、上記の手法を従来のワンショット法として説明する。

5.2.1 並列位相シフトアレイを用いた手法

並列位相シフトアレイを用いた手法では、図5.1に示す並列位相シフトアレイ素子を表面に貼り付けたカメラセンサを用いて干渉縞を撮影し、4画素から一つの位相値を算出することで、物体光の相対位相値を算出する。また、算出した物体光の相対位相値から、位相シフトデジタルホログラフィを用いて、物体光の絶対位相値を算出し、計測対象の三次元形状を復元する。

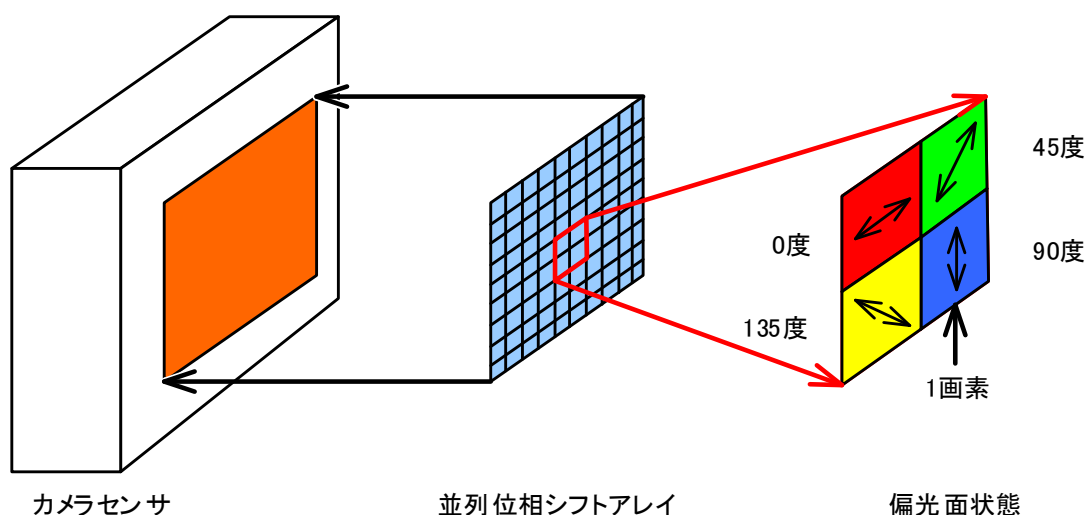


図5.1 並列位相シフトアレイ素子を貼り付けたカメラセンサの概念図

しかしながら、4画素を用いて一つの位相値を算出することにより、カメラセンサで取得された情報を1/4しか使用しないため、復元した三次元形状において、XY平面の分解能が低くなる。また、2画素で1/4周期のような細かい干渉縞に対して、この手法を用いて物体光の相対位相値を正確に算出することが困難であるという問題点が存在する。

5.2.2 回折空間フィルタを用いた手法

1枚の干渉縞の輝度情報を用いて、デジタルホログラフィにより、三次元形状計測に不要な直流成分と虚像成分および計測に必要な実像成分が同時に回折される。一般的なデジタルホログラフィでは、回折空間において、実像成分お

よび直流成分と虚像成分が同時に存在するため、実像成分のみを用いた三次元形状計測が困難であるという問題点が存在していた。回折空間フィルタを用いて手法は、干渉縞の周波数解析法の原理と同一であるが、干渉縞の撮影画像ではなく、回折光に対して周波数解析法を使用する。回折空間フィルタを用いた手法の光学構成概念図を図5.2に示す。この手法では、まず、参照面に使用する平面ミラーの傾き角度を大きくして1枚の干渉縞をカメラで撮影し、デジタルホログラフィで回折光の複素振幅を算出する。次に、回折光の複素振幅をフーリエ変換して空間周波数を算出する。ここで、参照面に使用する平面ミラーの傾き角度は大きいため、干渉縞の周波数解析法の原理により、空間周波数領域においては直流成分と虚像成分および実像成分の周波数帯域距離も大きいことが分かる。そのため、バンドパスフィルタを用いて、回折した実像成分のみを抽出することができ、物体光の絶対位相値の算出が可能である。しかしながら、この手法を用いた三次元形状計測では、計測に使用された情報は回折した情報の1/3しかないため、復元した形状における空間分解能が低いという問題点が存在すると考えている。

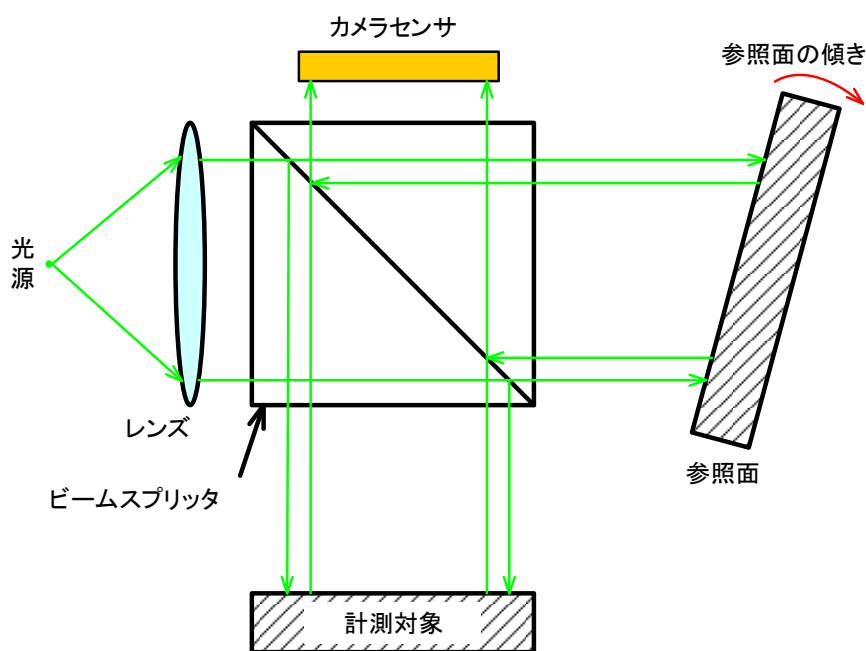


図5.2 回折空間フィルタを用いた手法の構成の概念図

5.3 提案手法

本研究では、光干渉計測分野に使用された干渉縞の周波数解析法を用いて、新たなワンショット位相シフトデジタルホログラフィによる三次元計測法を提案する。提案手法と並列位相シフトアレイ素子を用いた手法と比較すると、提案手法は1画素から一つの位相値を算出するため、三次元形状空間におけるXY平面の分解能が低下にならず、特殊な並列位相シフトアレイ素子を使用しないため、計測システムの低価格化が実現できる。また、回折空間フィルタを用いた手法と比較すると、回折光ではなく、干渉縞に対する周波数解析を行うため、位相シフトデジタルホログラフィで回折したすべての情報が利用できる。さらに、回転ステージを利用した従来の位相シフトデジタルホログラフィに対して、提案手法は1枚の干渉縞から物体光の相対位相値を算出するため、4枚撮影する手法で発生していた位相シフト干渉縞間の位相ずれが存在せず、計測システムの安定性を向上させることができる。また、位相シフト干渉縞の生成に使用された回転ステージが不要であるため、計測システムをさらに低価格化して、リアルタイムの三次元形状計測が可能であると考えられる。

干渉縞の周波数解析法を用いた提案手法を原理検証するために、平面ミラーを計測対象とした干渉縞撮影画像を使用して実験を実行した。原理検証に用いた干渉縞の撮影画像を図5.3に示す。この画像の縦方向1ラインの輝度値のパワースペクトルを図5.4に示す。このパワースペクトルから正の周波数帯域成分を空間周波数におけるバンドパスフィルタで抽出して逆フーリエ変換を行い、式(2.13)より、物体光の相対位相値を算出した。この計算処理を干渉縞の撮影画像全体に縦方向1ラインずつ行い、物体光の相対位相値を算出することで、1枚の干渉縞の撮影画像から物体光の相対位相値を取得した。4枚の位相シフト干渉縞を用いた従来の位相シフト法と比較するために、位相シフト法で取得した位相値を求め、提案手法で求めた位相値との誤差を算出した。取得した物体光の相対位相値および位相シフト法との比較を図5.5に示す。図5.5より、提案手法と位相シフト法の位相値誤差は ± 0.06 度であるため、提案手法を用いた位相の算出が正確であり、位相シフト法より高速であることが分かる。

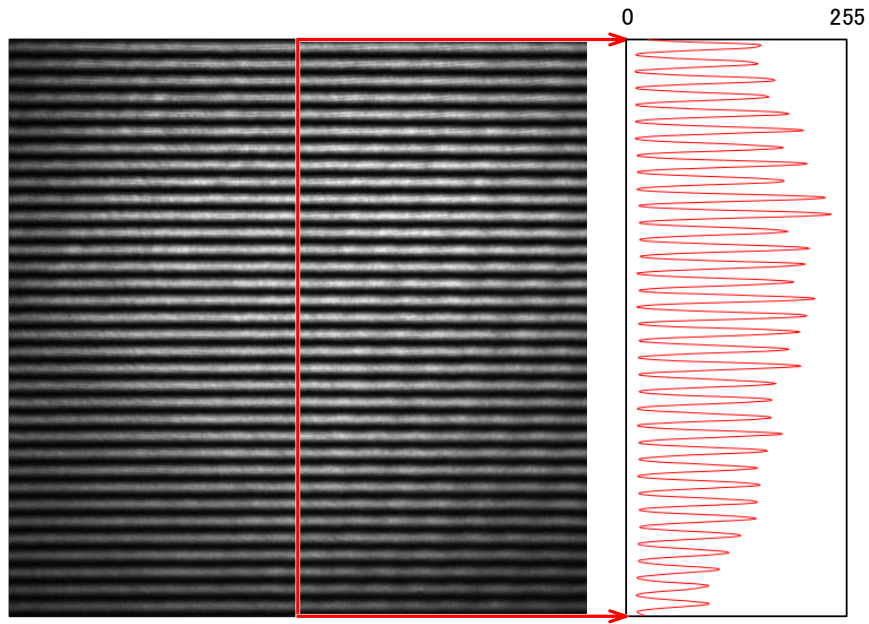


図5.3 平面ミラーの干渉縞撮影画像

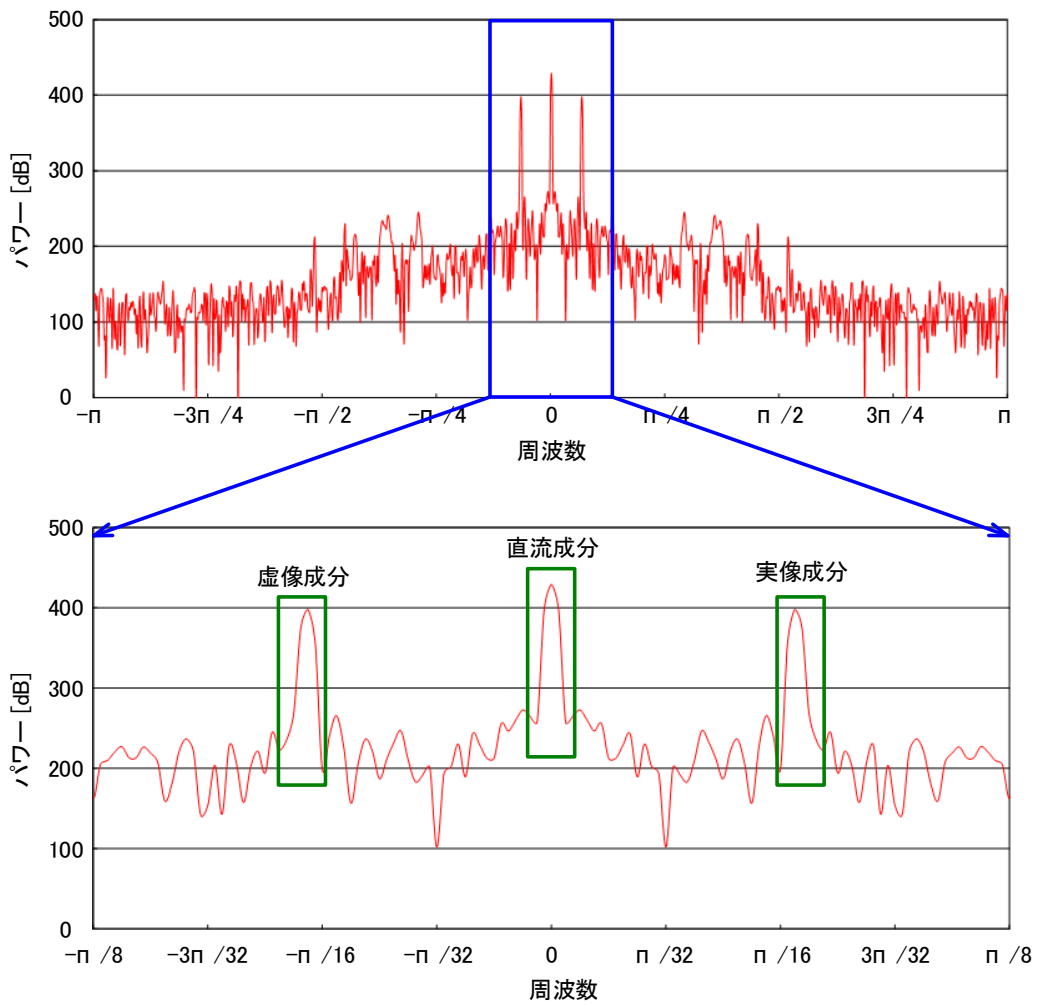


図5.4 1ラインの干渉縞のパワースペクトル

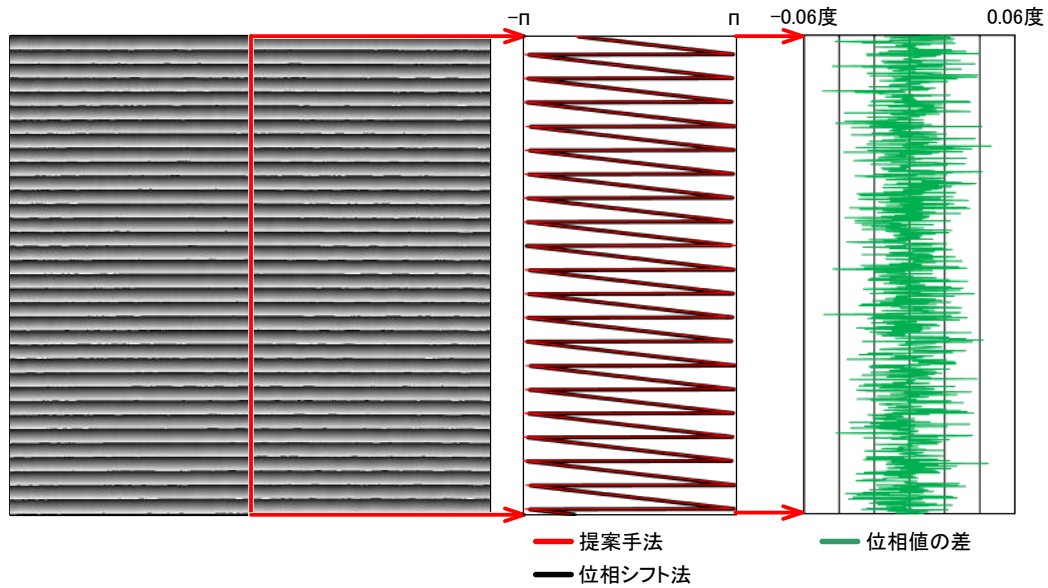


図5.5 提案手法で算出した位相値および位相シフト法との比較

5.4 計測実験

提案手法を用いて、鏡面反射物体、透明物体および動体の三次元形状を高速かつ高精度で計測することを検証するために、三次元形状計測実験を実行した。計測実験において、計測範囲は7×7 [mm]である。

5.4.1 鏡面反射物体に対する計測実験

提案手法を用いて、アルミボードを対象とした計測実験を実行した。計測対象の外観を図5.6、撮影した1枚の干渉縞画像を図5.7に示す。算出した物体光の絶対位相値を図5.8、復元した計測対象の三次元形状を図5.9に示す。

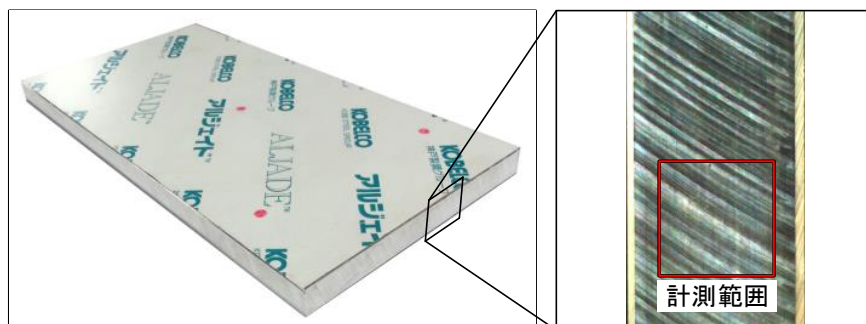


図5.6 鏡面反射物体(アルミボード)の外観

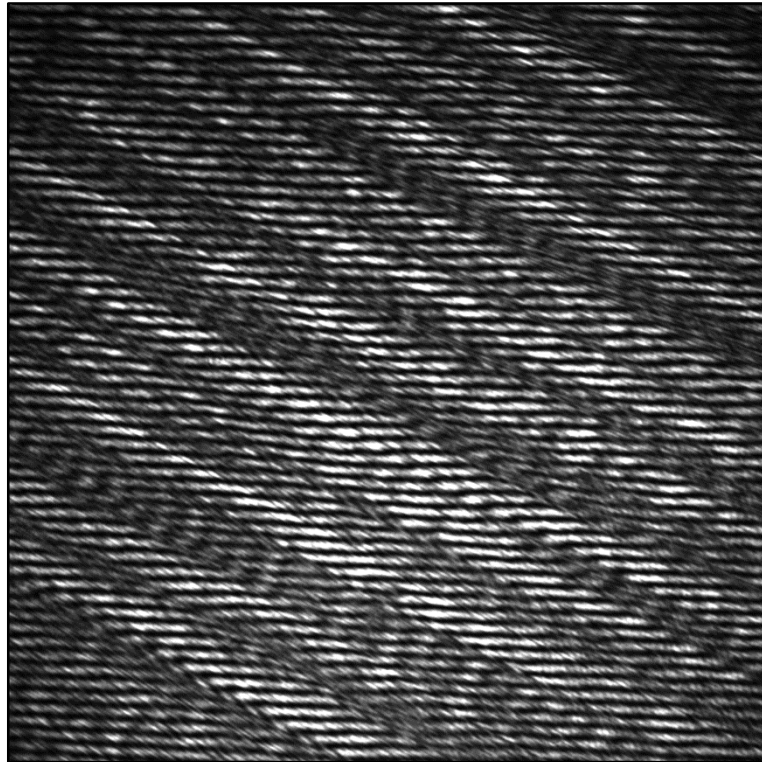


図5.7 干渉縞の撮影画像

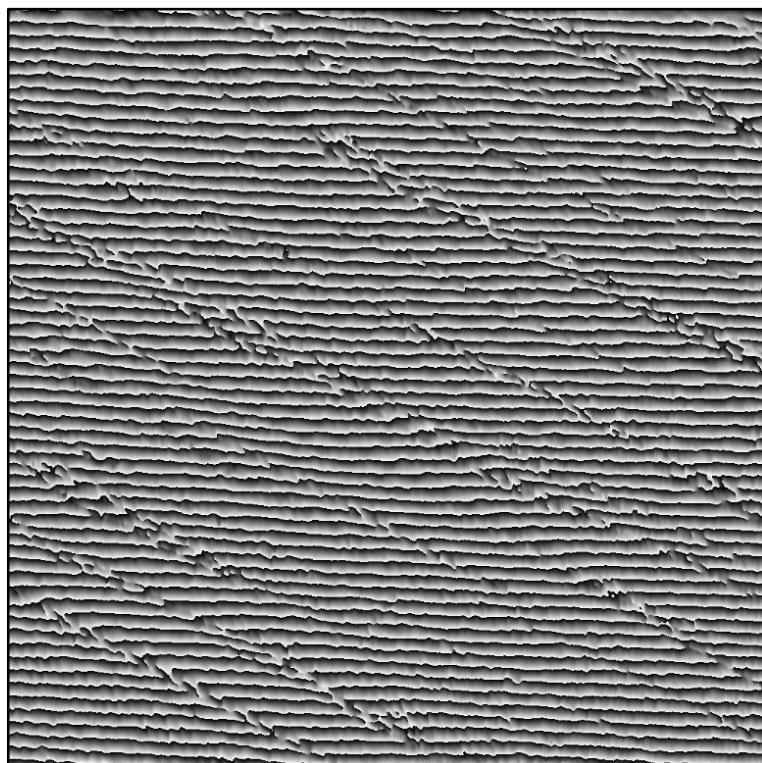


図5.8 算出した物体光の絶対位相値

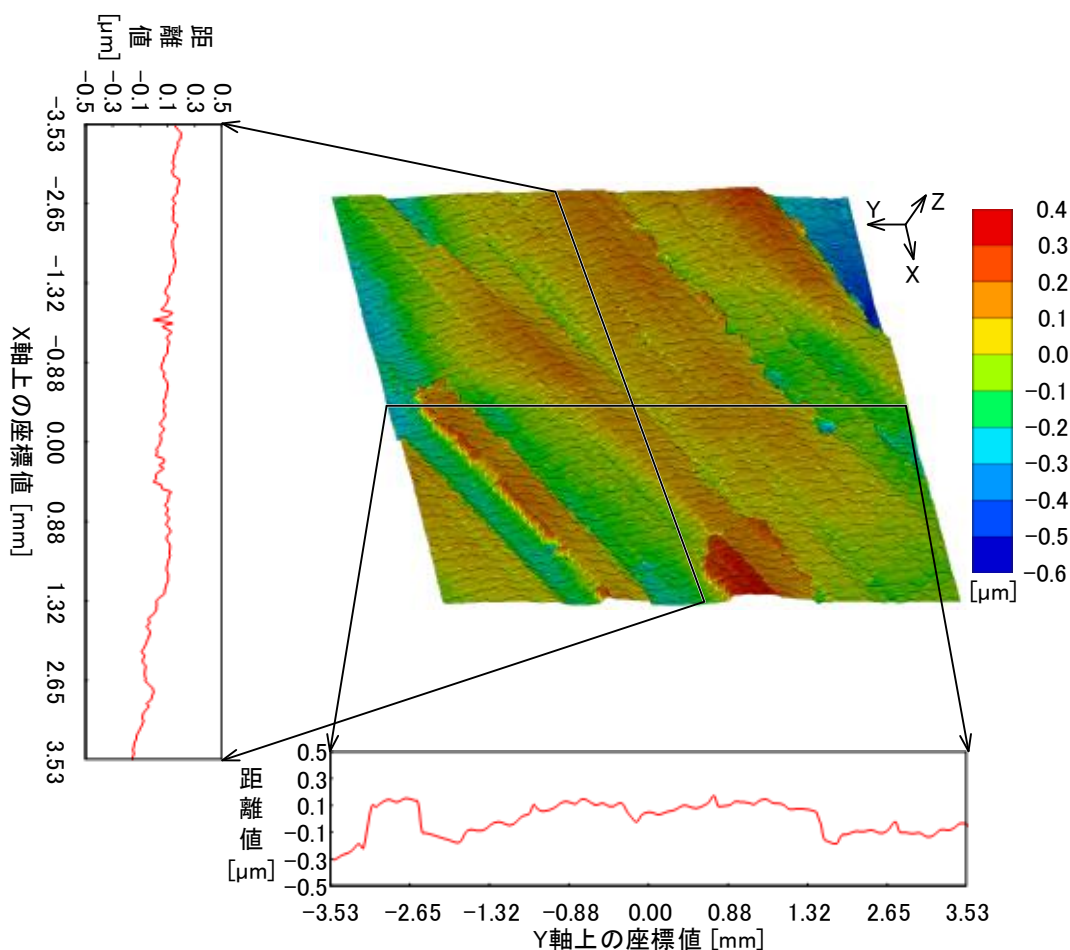


図5.9 鏡面反射物体(アルミボード)の三次元形状計測の結果

計測対象の外観図より、計測箇所はアルミボードの切削面であるため、計測対象の表面上に斜めの直線状の傷が存在し、撮影された干渉縞画像および算出された絶対位相値においても斜めな直線が存在する。計測結果より、アルミボードの平面形状が計測でき、切削により発生した直線状の傷も三次元形状計測ができた。そのため、提案手法を用いて、アルミボードのような鏡面反射の金属製品に対する三次元形状計測が可能であり、その精密不良検査も可能であると考えている。

5.4.2 透明物体に対する計測実験

提案手法を用いて、透明な物体の三次元形状も計測できることを検証するために、透明な油液を対象とした計測実験を実行した。計測対象の外観を図5.10、撮影した1枚の干渉縞画像を図5.11に示す。提案手法を用いて算出した物体光

の絶対位相値を図5.12, 復元した計測対象の三次元形状を図5.13にそれぞれ示す. ここで, 計測対象は透明物体であるため, 復元した計測対象の三次元形状は計測対象の屈折率の変化を表わす.

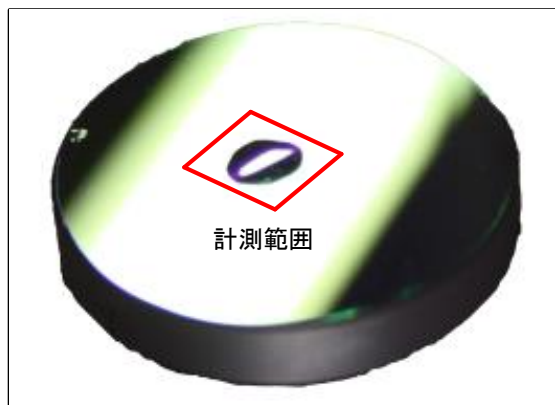


図5.10 透明物体(油液)の外観

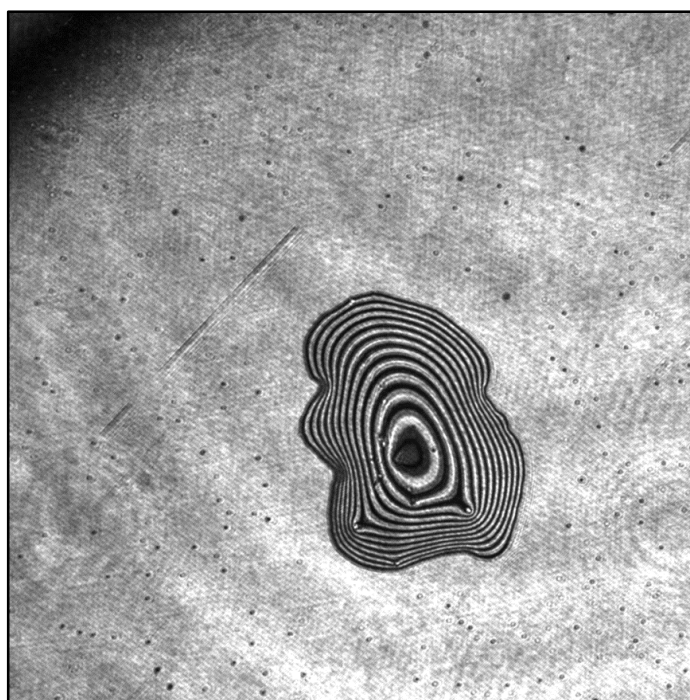


図5.11 干渉縞の撮影画像



図5.12 算出した物体光の絶対位相値

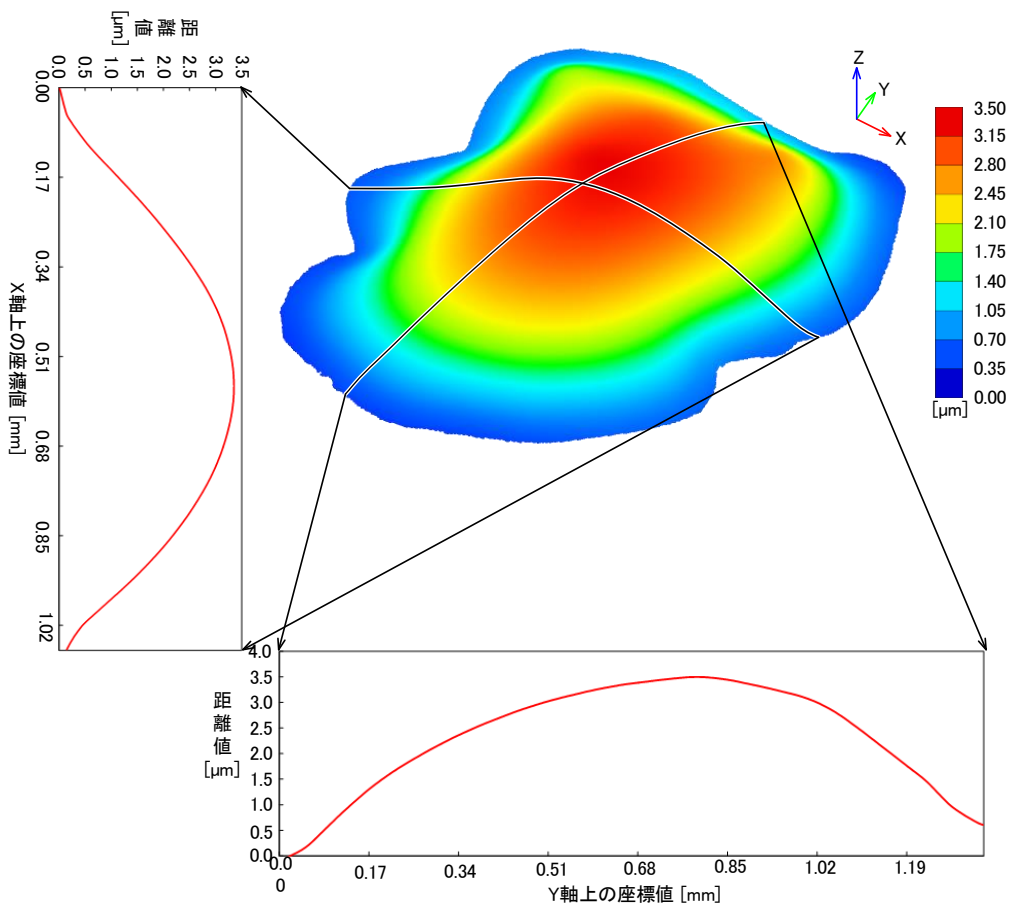


図5.13 透明物体(油滴)の三次元形状計測の結果

5.4.3 動体に対する計測実験

提案手法は1枚の干渉縞撮影画像から物体光の絶対位相値が算出できるワンショットの三次元形状計測法であるため、高速な三次元形状計測を実現することが可能である。これを検証するために、流れている油液を計測対象として、動体に対する計測実験を実行した。

計測システムと計測対象の位置関係を図5.14に示す。流れているオイルを計測する際に、一滴の油液を平面ミラー表面に置いて、平面ミラーの表面は地面に垂直するため、図5.14に示すように、計測対象が上から下へ流れながら、カメラで干渉縞を撮影して計測を実行した。このとき、カメラの撮影画像サイズは 2048×2048 [pixel]、計測範囲は 7×7 [mm]、カメラのフレームレートは8 [FPS]、カメラからコンピュータへの画像データ転送時間は0.04 [s]、物体光の絶対位相値の平均計算時間は0.3 [s]、1次元位相連結処理の平均計算時間は0.2 [s]である。そのため、流れている油液の三次元表面形状が時間とともに変換する様子を高速に計測することを可能にした。連続した3枚の干渉縞撮影画像および物体光の絶対位相値を図5.15～図5.17、計測結果を図5.18にそれぞれ示す。

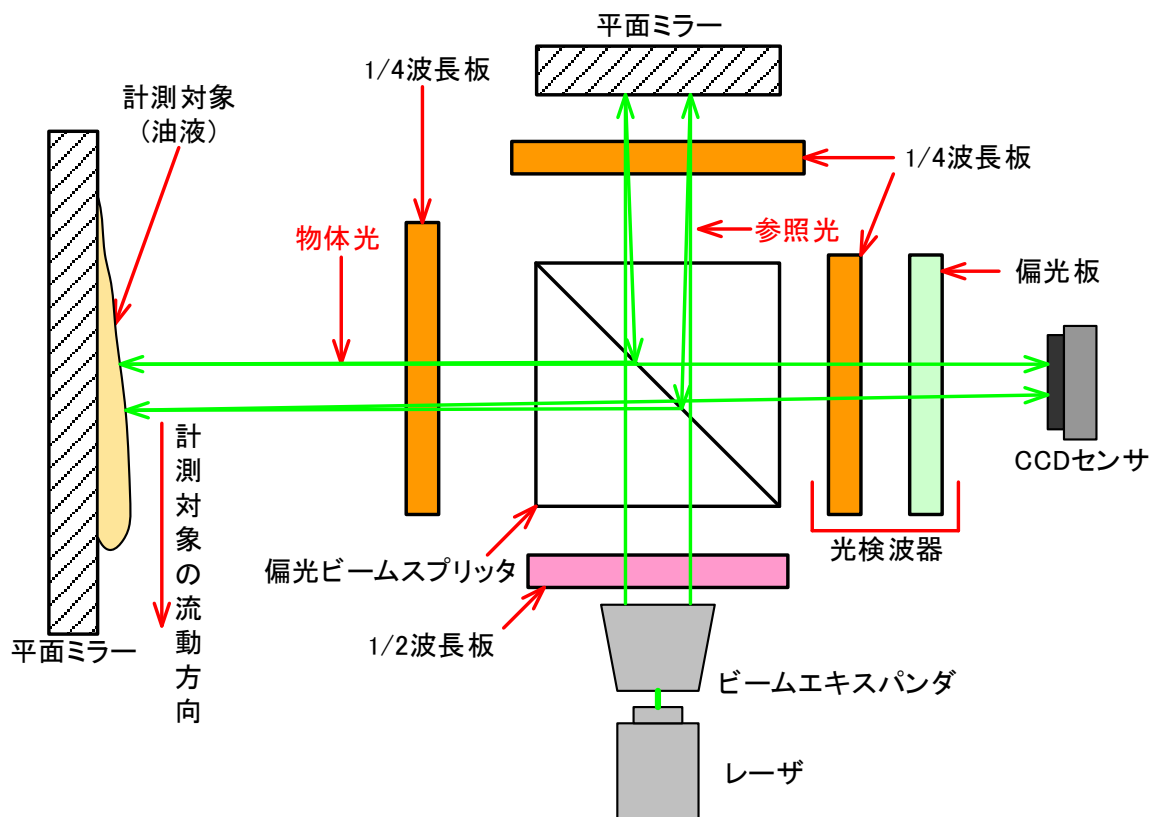
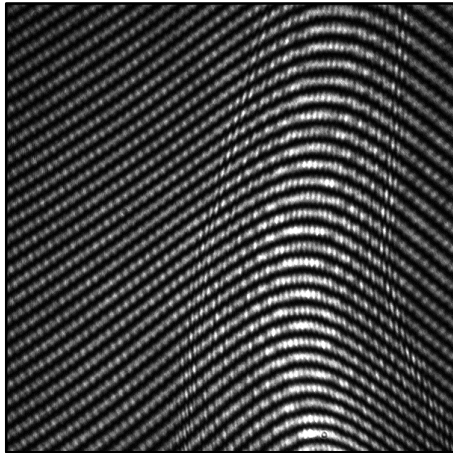
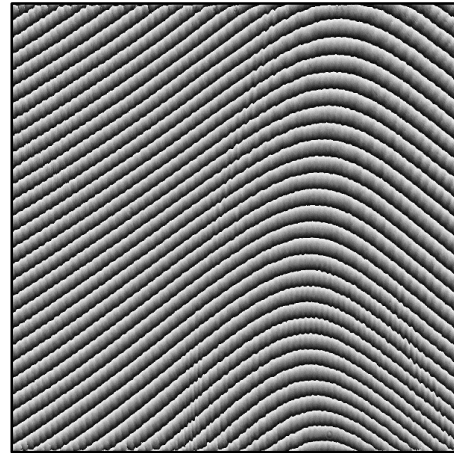


図5.14 計測システムと計測対象(油液)の位置関係

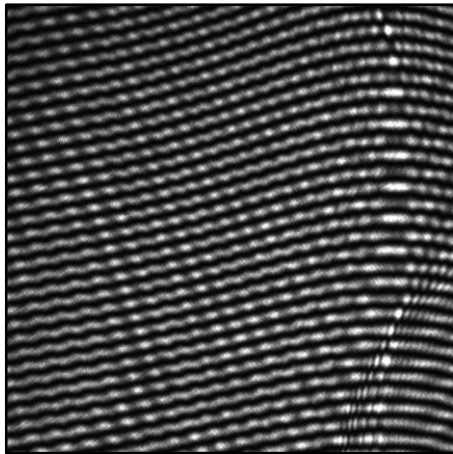


(a) 干渉縞の撮影画像

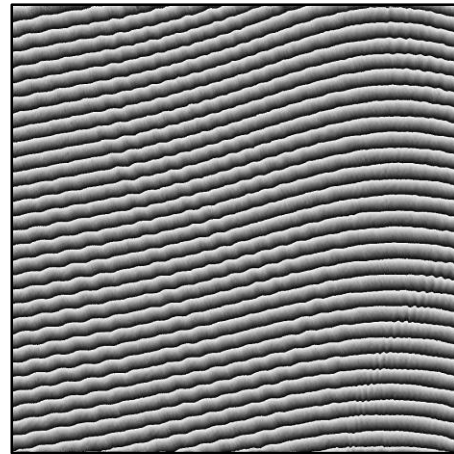


(b) 物体光の絶対位相値

図5.15 連続撮影した干渉縞画像と物体光の絶対位相値(1枚目)

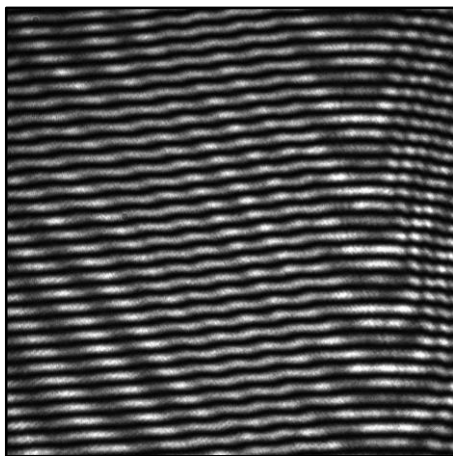


(a) 干渉縞の撮影画像

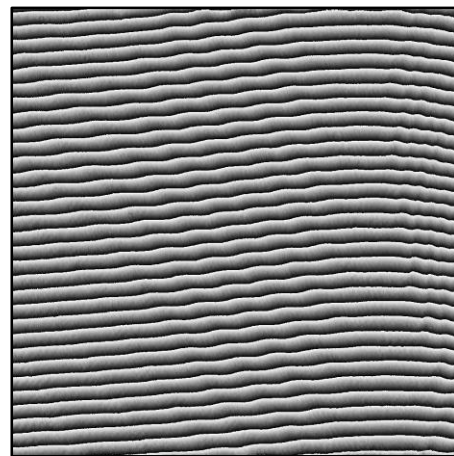


(b) 物体光の絶対位相値

図5.16 連続撮影した干渉縞画像と物体光の絶対位相値(2枚目)

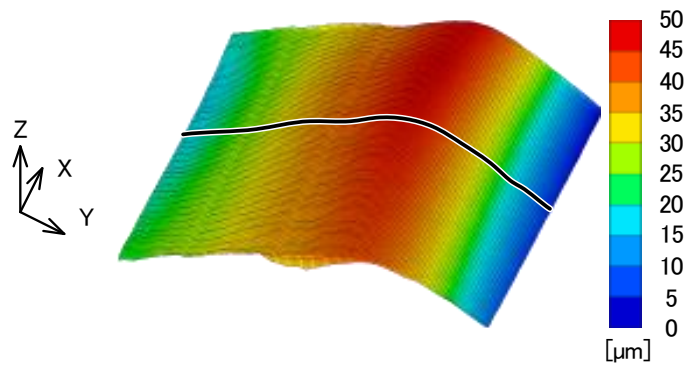


(a) 干渉縞の撮影画像

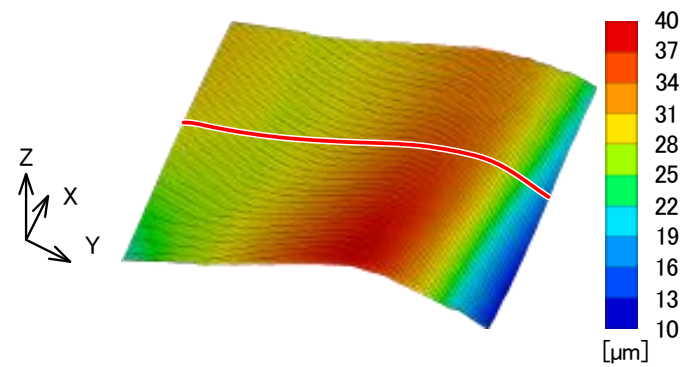


(b) 物体光の絶対位相値

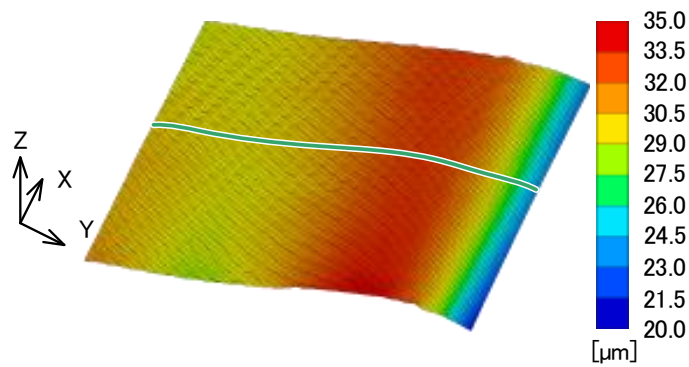
図5.17 連続撮影した干渉縞画像と物体光の絶対位相値(3枚目)



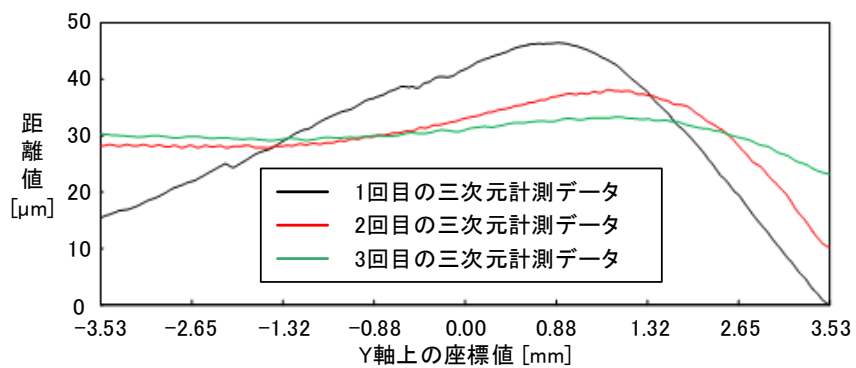
(a) 1回目の三次元形状計測の結果



(b) 2回目の三次元形状計測の結果



(c) 3回目の三次元形状計測の結果



(d) 連続に計測した三次元形状のYZ平面の断面図

図5.18 連続に計測した流れている油液の三次元形状

5.5 システムの評価

本研究で提案した計測手法について評価実験を実行した。評価実験で使用した計測システムは前章で提案した位相シフトデジタルホログラフィによる三次元形状計測システムと同一の構成であるが、偏光板の自動回転ステージを使用していない。本節では、実行した計測精度の評価実験、システムの安定性に対する評価実験および計測時間の評価実験に関して説明する。

5.5.1 精度評価

まず、ミットヨ社製の段差マスタ (Mitutoyo No. 516-498) を使用して、4枚の位相シフト干渉縞撮影画像を使用した従来の位相シフトデジタルホログラフィによる三次元形状計測法 (以下、従来法と呼ぶ) と提案したワンショット位相シフトデジタルホログラフィによる三次元形状計測法 (以下、ワンショット法) の計測精度を比較評価した。精度評価実験では、段差マスタにおける1 [μm] 段差箇所を10回計測して、取得した三次元形状から段差計測値を算出した。段差マスタを計測する際に、計測装置と計測対象 (段差マスタ) の位置関係は図5. 20 と同一、計測範囲は7×7 [mm] である。計測精度評価に使用した干渉縞撮影画像例を図5. 19、物体光の絶対位相値を図5. 20に示す。4. 5. 3節に説明した評価手法と同様に算出した平均距離値を図5. 21に示す。従来法およびワンショット法を用いて求めた段差計測値を図5. 22に示す。

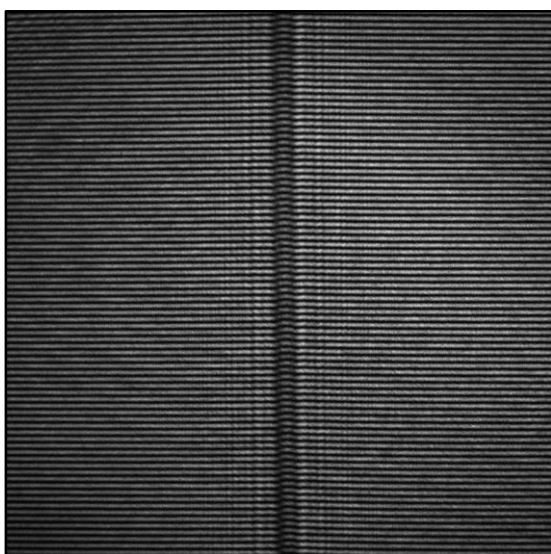


図5. 19 段差マスタの干渉縞画像例

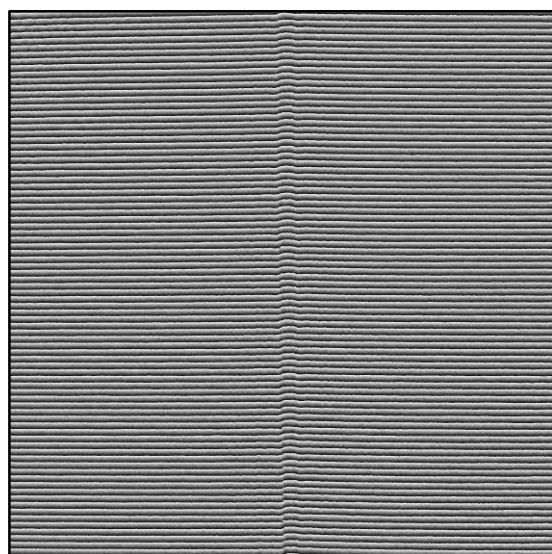


図5. 20 物体光の絶対位相値

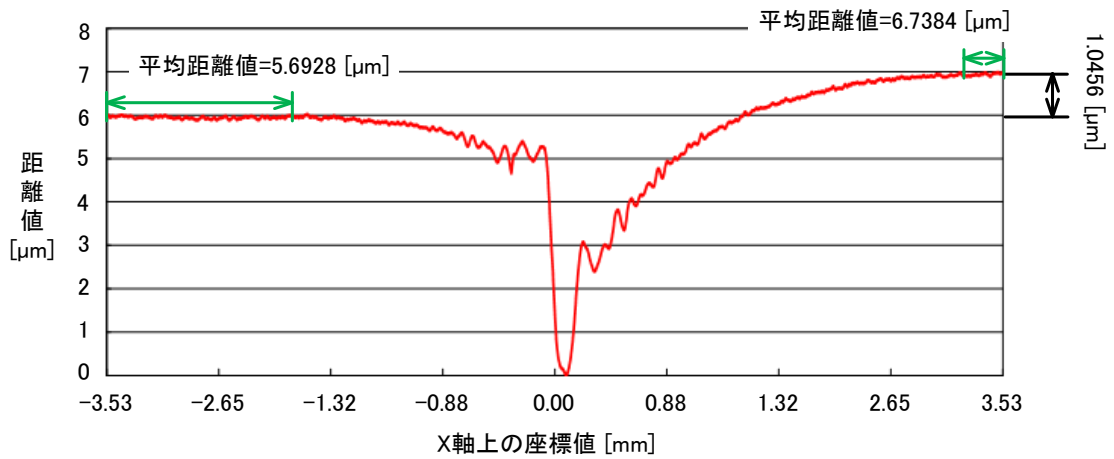


図5.21 縦方向1ライン毎に算出した平均距離値

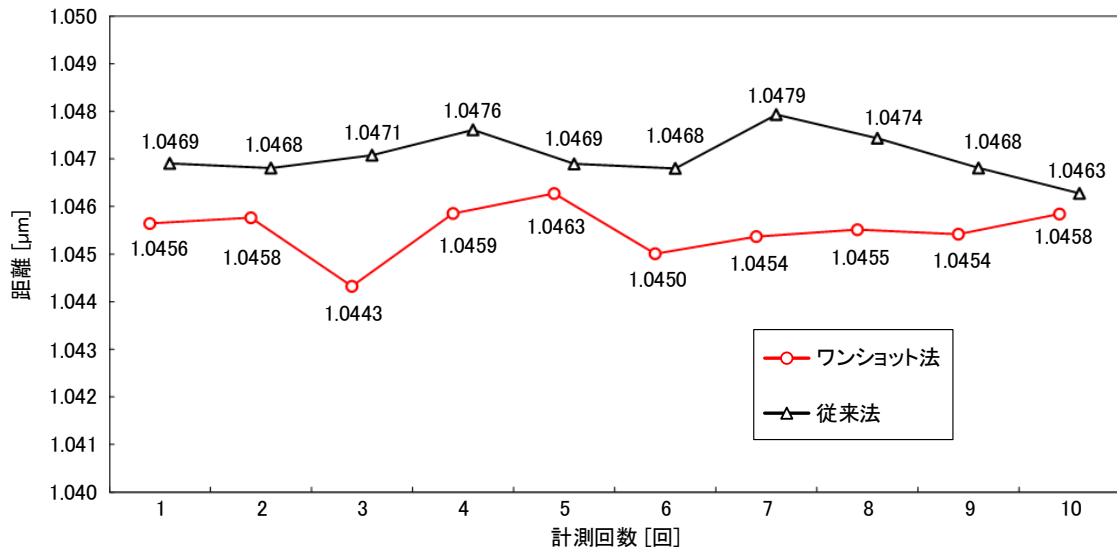


図5.22 計測精度の評価結果

図5.22より、段差計測値は段差マスタの許容誤差値(±200 [nm])以内であることを確認した。また、計測値の再現性を評価するために、接触式精密三次元計測装置(Dektak 150 Surface Profiler)を用いて、同一計測箇所を計測した結果(1.040 [μm])を真値として仮定し、従来法およびワンショット法の計測平均誤差を算出した。従来法の計測平均誤差は7.1 [nm]、計測分散値は0.22 [nm]、ワンショット法の計測平均誤差は5.5 [nm]、計測分散値は0.3 [nm]であることを確認した。そのため、ワンショット法は従来法よりも高精度である。また、0.1~1.0 [μm]の計測精度を要求する精密不良検査に対して、得られた計測平均誤差および計測分散値は問題のない範囲以内であると考えられる。

5.5.2 安定性評価

次に、従来法とワンショット法の計測安定性を比較した。比較実験では、平面ミラーの傾き角度を0.068度ずつ10回増やして、干渉縞の幅を狭くしながら、従来法およびワンショット法を用いて計測を実行した。その後、最小二乗法で計測結果の法線ベクトルを求め、法線ベクトルより平面ミラーの傾き角度を計測値として算出した。従来法とワンショット法の計測値および真値を図5.24に示す。

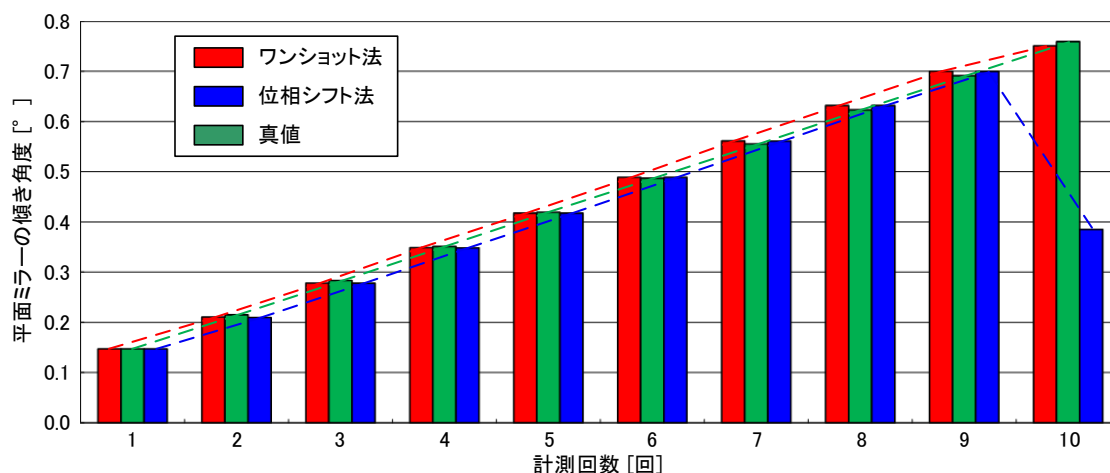
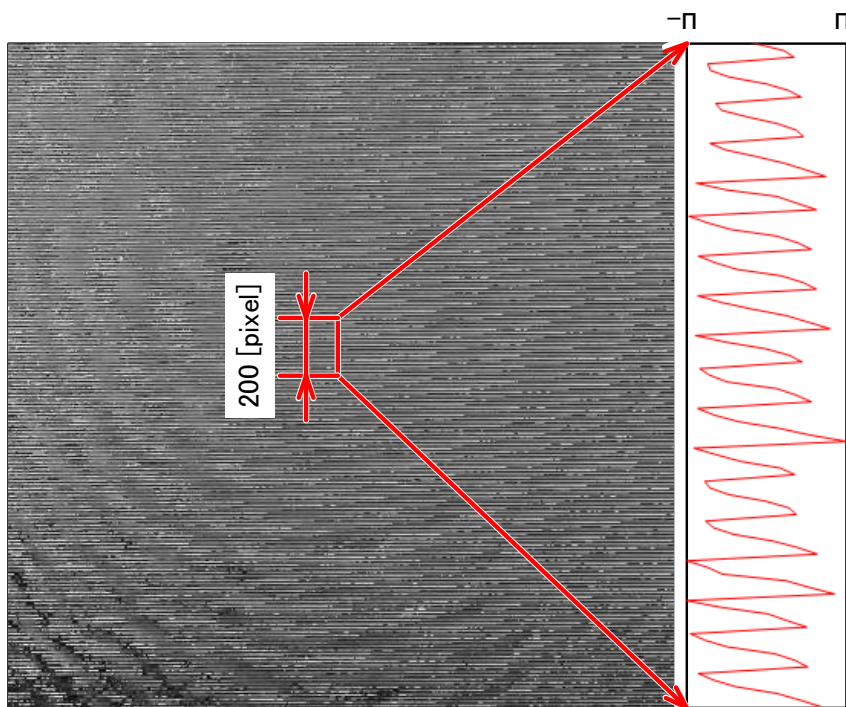
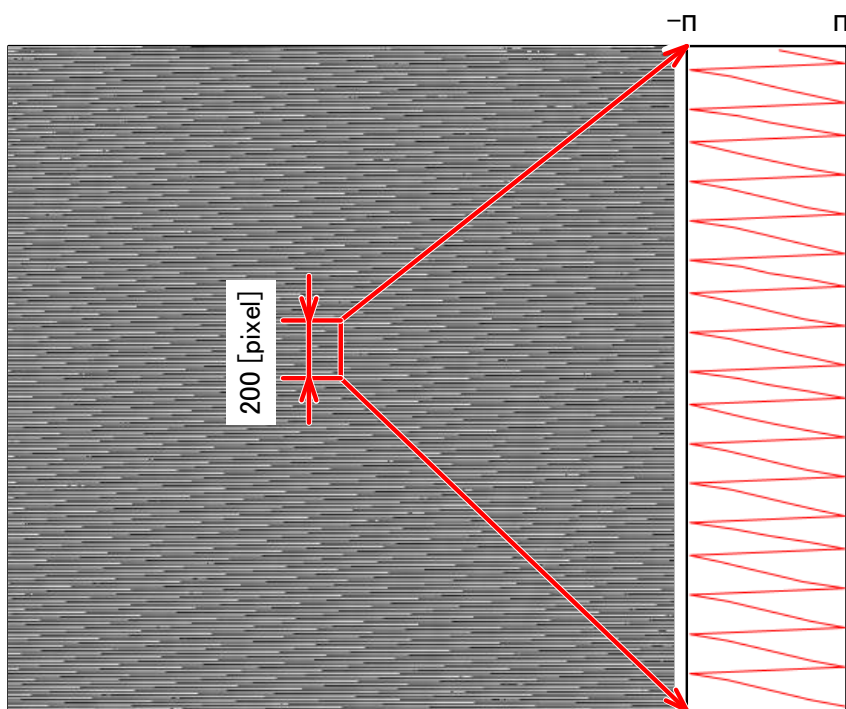


図5.23 システム安定性の評価結果

図5.23より、1～9回目の計測では、従来法とワンショット法は同様に安定であることを確認した。しかしながら、10回目の計測では、従来法での計測精度が低下した。図5.24に示すように、従来法では、物体光の相対位相値が正確に算出できないことを確認した。原因としては、10回目の計測では、傾きが0.68度となり、使用したCMOSセンサの解像度に対して干渉縞の幅が非常に狭いため、4枚の位相シフト干渉縞の撮影画像に位相差誤差が生じたためと考えられる。ワンショット法では、干渉縞の周波数領域から物体光の相対位相情報を算出し、位相シフトの位相差に依存しないため、干渉縞の幅が非常に狭い場合も、位相情報が算出でき、正確に計測することができる。上記により、ワンショット法は従来法より安定性に優れることが実験により示された。



(a) 従来法で求めた相対位相値



(b) ワンショット法で求めた相対位相値

図5.24 10回目で算出した物体光の相対位相値

5.5.3 計測時間

最後に、従来法とワンショット法の計測時間に関する評価を実行した。計測時間には、4.6.2での説明と同一、撮影時間と計測処理時間が存在する。また、計測時間を評価する際に使用したコンピュータのスペックは表5.4に示したスペックと同一である。計測時間の評価結果を図5.25に示す。図5.25より、ワンショット法は偏光板の自動回転およびカメラの4回撮影が不要であるため、撮影時間がカメラからコンピュータへの画像転送時間になり、従来法より高速であることを確認した。しかしながら、計測実験に使用したカメラセンサの撮影画像サイズは2048×2048 [pixel]であり、ワンショット法を用いた物体光の相対位相値の算出に2048回の1次元フーリエ変換が必要であるため、三次元計測処理ではワンショット法が従来法より遅くなる。ただし、表5.1に示すコンピュータを使用する場合、GPUを用いた処理の並列化により、ワンショット法の計測処理時間が80 [ms]となり、実時間の三次元計測が可能である。

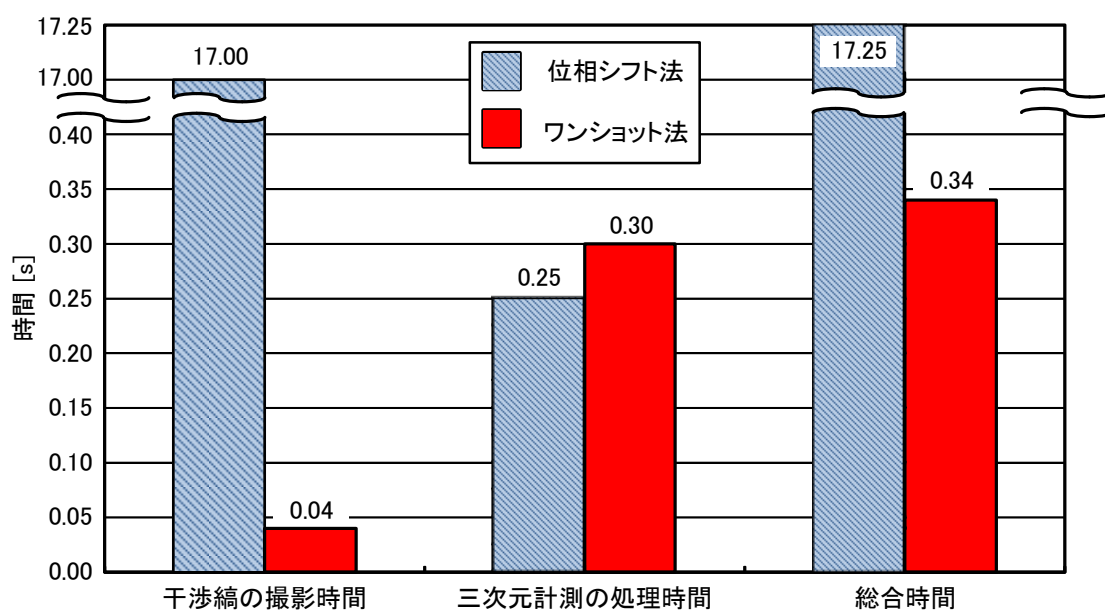


図5.25 計測時間の評価結果

表5.1 コンピュータのスペック

CPU	Intel core i7 3.2 [GHz]
GPU	NVIDIA Tesla C2050
RAM	18 [GB]
Operating Ssystem	Windows 7 64-bit

5.5.4 考察

1枚の干渉縞撮影画像から物体光の相対位相値を算出するワンショット法では、4枚の位相シフト干渉縞撮影画像を用いた従来法と同様に、得られた物体光の相対位相値が連続して算出されることが必須条件である。これにより、ワンショット法の計測可能な物体形状の高さ変化範囲(以下、奥行き範囲と呼ぶ)は以下の2通り考えられる。

- (1) 高さ変化が不連続であり、かつその変化がレーザ光波長より大きい場合、位相の連結数に相当する 2π の整数倍の不定性が残るため、位相連結が不能となり、三次元形状復元ができない。そのため、計測できる不連続な奥行き範囲はレーザ光の波長(本研究では、532 [nm])以内である。
- (2) 高さ変化が緩やかであり、得られた物体光の相対位相値が連続している場合、位相連結が行えるため、三次元形状復元が可能となる。しかしながら、撮影した干渉縞の1/2周期の幅がCMOSセンサのピクセルピッチ以下では、CMOSセンサで干渉縞が撮影できないため、三次元形状復元ができない。そのため、計測できる奥行き範囲がCMOSセンサのピクセルピッチにより限定される。計測の安定性を検討した実験では、平面ミラーを0.680度傾け、CMOSセンサの解像度の限界付近まで干渉縞の幅を狭くした。このとき、式(5.1)を用いて、7×7 (mm)の計測範囲における平面ミラーの奥行き範囲は83 [μ m]であることが計算でき、計測できる奥行き範囲は83 [μ m]以内であると考えられる。

$$d = L \times \tan(\theta) \quad (5.1)$$

ここで、 d は平面ミラーの奥行き距離、 L は計測範囲(7 [mm])、 θ は平面ミラーの傾き角度(0.68°)である。

また、周波数解析を行う際に使用したフィルタリング処理は実際の計測精度に影響を与えていると考えている。しかしながら、本研究では、最適なフィルタリング処理に関する検討を実行せず、単純なバンドパスフィルタを使用した。これについて、今後は周波数解析に使用する最適なフィルタリング処理に関する検討を行いたい。

さらに、本研究では、計測精度評価に使用した段差マスタの真値が分からず、接触式精密三次元計測装置で計測した段差値を真値と仮定して評価を実行した。そのため、本研究に使用した評価手法も計測精度に影響を与える。

最後に、本研究で開発した計測装置では、三次元計測範囲が 7×7 [mm]に限定されたが、テレセントリックレンズを使用することで、計測範囲を拡大することができる。テレセントリックレンズを用いて、計測対象に照射するレーザー光範囲を拡大し、かつ計測対象表面から反射した物体光がテレセントリックレンズにより収束され、CMOSセンサで収束された物体光と参照光の干渉縞を撮影する。そのため、計測装置にテレセントリックレンズを使用することで、計測範囲を拡大することが可能である。使用するテレセントリックレンズの拡大率により、計測可能な範囲は異なるが、例としては、拡大率2倍のテレセントリックレンズを使用した場合には、計測可能な範囲を 14×14 [mm]まで実現できる。上記により、テレセントリックレンズを使用することで、小型な計測装置のまま、計測範囲を拡大することが可能となる。また、計測対象の反射率などにより、物体光の強度が低い場合には、計測装置に設置した $1/2$ 波長板を回転させ、参照光と物体光の光強度比率を調整することで、カメラセンサにより干渉縞画像が撮影され、三次元計測が可能となる。また、提案した位相シフトデジタルホログラフィによる三次元形状計測と同一、ワンショット位相シフトデジタルホログラフィによる三次元形状計測法を用いて、傾き角度の高い斜面が存在する物体および表面の粗い物体に対する三次元形状計測が不可能である。

5.6 むすび

本研究では、4枚の位相シフト干渉縞の撮影画像を使用した従来の位相シフトデジタルホログラフィによる三次元形状計測に存在する計測の高速化および安定性問題を解決するために、光干渉計測分野に利用された干渉縞の周波数解析法を用いて、ワンショット位相シフトデジタルホログラフィを提案し、高速、高精度かつ安価な三次元形状計測システムを開発した。

提案手法では、干渉縞の周波数解析法を用いて、1枚の干渉縞の撮影画像から物体光の相対位相値を算出した。また、3章で提案した位相シフトデジタルホログラフィによる三次元計測のアルゴリズムを適用することで、高精度な三次元形状計測を実現した。3章で提案した従来法と比較して、従来システムに使用し

た偏光板の自動回転ステージが不要となるため、提案システムはさらに低価格である。また、計測実験の結果より、ワンショット法を用いて、鏡面反射および透明物体に対する三次元計測が可能であり、動体に対するリアルタイムの三次元形状計測も実現できることを確認した。さらに、計測精度の評価実験より、提案手法に位相シフトの位相誤差が存在しないため、計測平均誤差は5.5 [nm]であり、従来法の計測誤差(7.1 [nm])よりも高精度であることを確認した。計測安定性比較実験の結果より、ワンショット法は、カメラセンサの解像度限界付近でも従来法より安定な三次元形状計測が実現できることが示された。GPUを用いた計測時間は80 [ms]であるため、リアルタイムの三次元形状計測が可能である。計測範囲は7×7 [mm]であるが、計測システムにテレセントリックレンズ系で構築したレンズシステムを使用することで計測範囲を容易に拡大や縮小することも可能である。

第6章 三次元顕微鏡に関する検討

6.1 まえがき

近年、生体組織検査などの精密医療分析に対して、高速かつ高精度な三次元顕微鏡の需要が増えている^[91]。医療分析の中では、人間の血液に存在する赤血球の三次元形態を解析することで、健康状態を判断する血液検査がなども行われている^[92]。通常の血液検査では、まず、一定な容積の血液サンプルを染色して、光学顕微鏡により取得された赤血球の二次元画像を観察する。次に、観察した赤血球の数および血液サンプルの容積を用いて、赤血球の平均サイズを算出する。算出した赤血球の平均サイズの値を正常値と比較することで、血液病症があるかを判断する。ここで、人間の平均赤血球体積は約80~100 [μm^3]であるが、80 [μm^3]より小さい場合には小球性貧血、100 [μm^3]より大きい場合には大球性貧血と呼び、小球性貧血と大球性貧血は不健康な病症である。最後に、光学顕微鏡を用いた目視観察により、赤血球の三次元形態を分析し、血液病症の種類を判断する。しかしながら、赤血球の形態を容易に観察するために、血液検査を実行する前、血液サンプルを染色する必要がある。また、光学顕微鏡を用いた血液検査には、目視観察時間が長いため、血液の検査時間が長く、血液を保管する環境が必要であるという問題点も存在している。

上記の問題点を解決するために、コンピュータを用いた自動医療分析装置が必要である。既存の自動医療分析装置では、画像処理技術を用いた医療分析法^{[93][94]}が最も利用されている。この手法を用いて血液検査を実行する場合に、まず、染色された赤血球の映像を光学顕微鏡およびカメラで取得する。次に、画像処理技術を用いて、撮影された赤血球の位置を自動で検出し、パターン認識法により各赤血球の形態を分析する。最後に、画像処理技術およびパターン認識法を用いて求められた赤血球の数および形態により、血液検査の結果を自動で出力する。しかしながら、画像処理技術を用いた自動分析でも、血液サンプルを染色する手間がかかる。また、重なった赤血球のような生体組織に対しては、自動分析の誤差が大きいという問題点が存在している。

本研究では、上記の問題点を解決するために、開発されたワンショット位相シフトデジタルホログラフィによる三次元形状計測法を用いて、顕微鏡レンズ

システムを検討し、ワンショット型三次元顕微鏡を開発して精密医療分析分野への応用の可能性を検討する。

6.2 既存の三次元顕微鏡

画像処理技術を用いた自動医療分析法に存在する問題点の解決手法として、三次元電子顕微鏡および共焦点レーザ顕微鏡が提案されている。三次元電子顕微鏡^{[95]~[97]}では、通常の光学顕微鏡に使用されている可視光線の代わりに、電子線を使用して、複数の方向から生体組織などの計測対象に照射してカメラで撮影する。また、撮影された複数枚の画像を用いて、画像処理技術により計測対象の立体構造を把握する。三次元電子顕微鏡を用いて、計測対象の三次元形状を高空間分解能(0.1 [nm])で復元することができるが、三次元形状計測に電子線の発生装置および真空環境が必要である。そのため、三次元顕微鏡の低価格化が困難であり、計測環境の要求が厳しいという問題点が存在する。一方、共焦点レーザ顕微鏡^{[98]~[101]}は、計測光源としてレーザ光の焦点を対物レンズを用いて計測対象表面に結び、計測対象を走査しながら、レーザの合焦位置を検知して計測対象の三次元形状を復元する。しかしながら、共焦点レーザ顕微鏡により得られた計測対象の三次元情報は微小なレーザの焦点毎に復元されるため、高速な三次元計測を実現することが困難である。また、計測精度が1 [μm]程度であるため、微小な細胞などの生体組織の三次元形状を正確に計測することが困難である。そのため、三次元電子顕微鏡および共焦点レーザ顕微鏡を代表とした既存の三次元顕微鏡を用いた、生体組織に対する高速かつ高精度な三次元形状計測は困難である。

6.3 提案システム

本研究では、干渉縞の周波数解析法を用いたワンショット位相シフトデジタルホログラフィによる三次元形状計測法を提案した。計測の評価実験により、計測精度が5.5 [nm]、GPUを使用した計測時間が80 [ms]であることを確認した。本研究を精密医療分析に応用する可能性を検討するために、対物レンズおよび球面アクロマティックレンズで構築した顕微鏡レンズシステム^{[102]~[104]}を提案

システムに使用することで、光学分解能の高い三次元顕微鏡システムを開発した。提案システムの光学構成および外観図を図6.1および図6.2に示す。

提案装置に使用した顕微鏡レンズシステムでは、微小な細胞やナノ構造物体を高分解能で撮影するために、表6.1に示す50倍の無限補正対物レンズを使用した。対物レンズから出力した物体の映像をカメラセンサ表面上に結像するために、表6.2に示す焦点距離が100 [mm]の球面アクロマティックレンズを使用した。上記の顕微鏡レンズシステムを使用することで、光学分解能が0.59 [μm]、焦点深度が1.76 [μm]、結像分解能が0.22 [μm]の三次元顕微鏡を実現した。ここで、提案装置の光学分解能が0.59 [μm]であるため、三次元形状計測におけるXY平面の空間分解能が0.59 [μm]である。また、三次元計測の範囲は500×500 [μm]、計測装置のサイズは480×240 [mm]であるため、小型かつ高分解能の三次元計測装置の実現が可能である。さらに、一般的な光学部品を使用することで、干渉性能の高いレーザを除けば、150万円程度で構成が可能であり、既存の三次元顕微鏡が数千万円程度であることを比較すれば、計測装置の低価格化が実現できると考えられる。

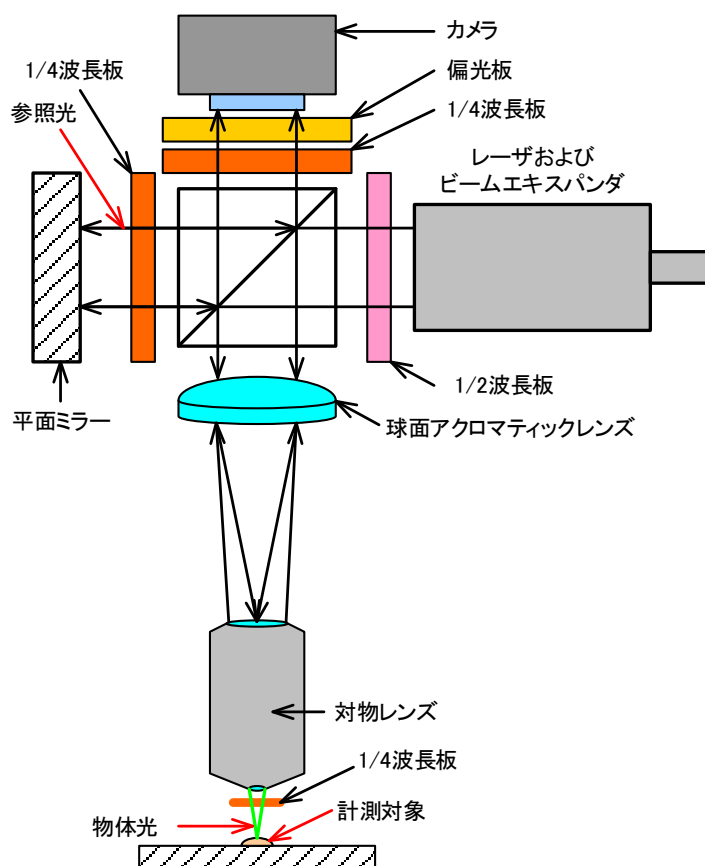


図6.1 提案システムの光学構成の模式図

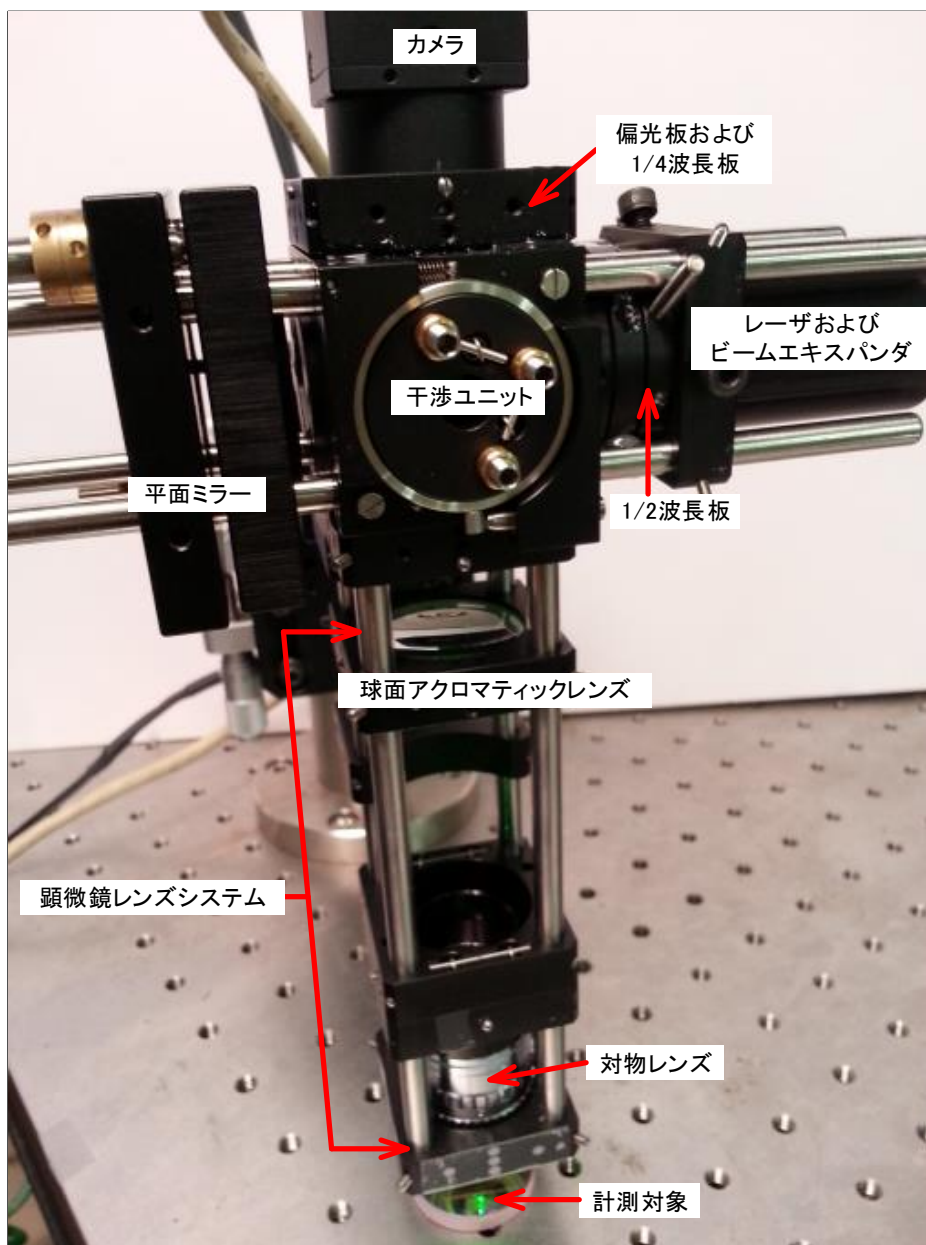


図6.2 提案システムの外観

表6.1 対物レンズの仕様


メーカー	Nikon
型番	LCD Plan
倍率	50X
焦点距離	1.76 [μm]
開口数	0.55
外観	

表6.2 球面アクロマティックレンズの仕様

メーカー	シグマ光機
型番	DLB-30-100PM
焦点距離	100 [mm]
コーティング	可視域反射防止コート
外観	

6.4 赤血球に対する三次元計測実験

本節では，提案した三次元顕微鏡を用いた赤血球に対する三次元計測実験に関して，説明する．

血液に存在する赤血球の三次元形状を計測する際に，血液を採集するために，医療用血液検査キットを用いて指先から採血を行う．次に，採集した血液を平面ミラーの上に置き，顕微鏡観察用のカバーガラスを血液上に載せた．計測に使用した血液の外観図および対物レンズと血液の位置関係の概念図を図6.3に示す．図6.3より，赤血球は透明な細胞であるため，対物レンズから出射されたレーザ光は赤血球を透過して平面ミラーから反射し，物体光になる．最後に，物体光と参照光の干渉縞画像をカメラで撮影して，提案手法で赤血球の三次元形状を復元する．

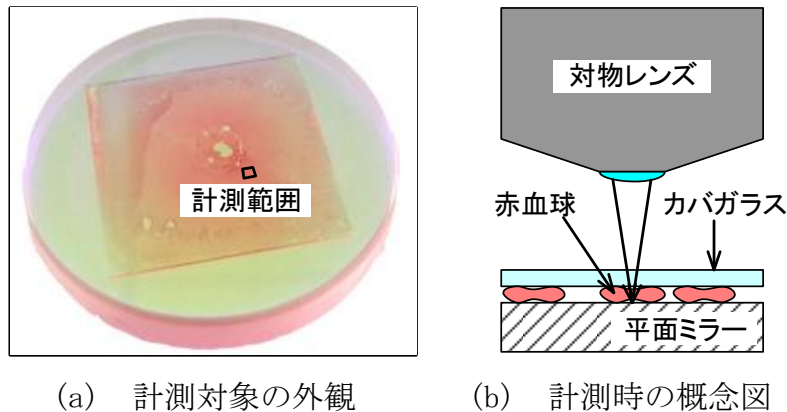


図6.3 計測対象の外観および計測時の概念図

撮影した赤血球の干渉縞を図6.4，提案手法を用いて算出した物体光の絶対位相値を図6.5，復元した三次元形状を図6.6にそれぞれ示す．図6.6より， 500×500 [μm]の計測範囲において，血液に存在する赤血球(約6000個)の三次元形状をワンショットで計測することが可能であることが確認できる．

しかしながら，赤血球は透明物体であるため，求めた三次元形状は計測対象の屈折率の変化である．正確な三次元形状を算出するために，赤血球の密度および屈折率を用いて距離データに変換する必要があるが，計測対象の密度および屈折率を測定することが困難であるため，本研究では，赤血球の三次元形状および体積を検討する際に，提案手法で算出した赤血球の屈折率の変化に固定の倍率(4倍)をかけて，赤血球の標準高さ(8 [μm])に合わせた．そのため，次に示した赤血球の高さ，容積および容積の分布は相対的な数値である．

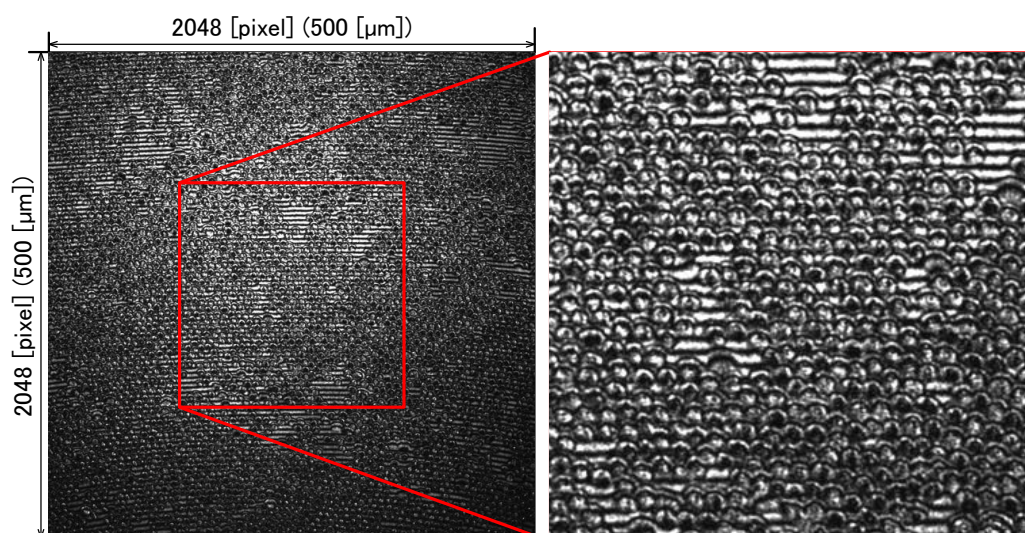


図6.4 計測対象の干渉縞撮影画像および拡大図

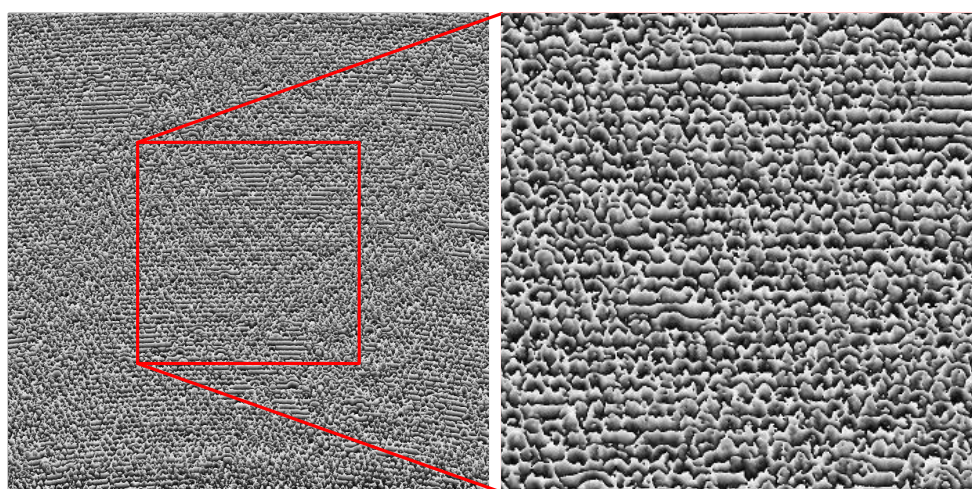


図6.5 算出した物体光の絶対位相値分布および拡大図

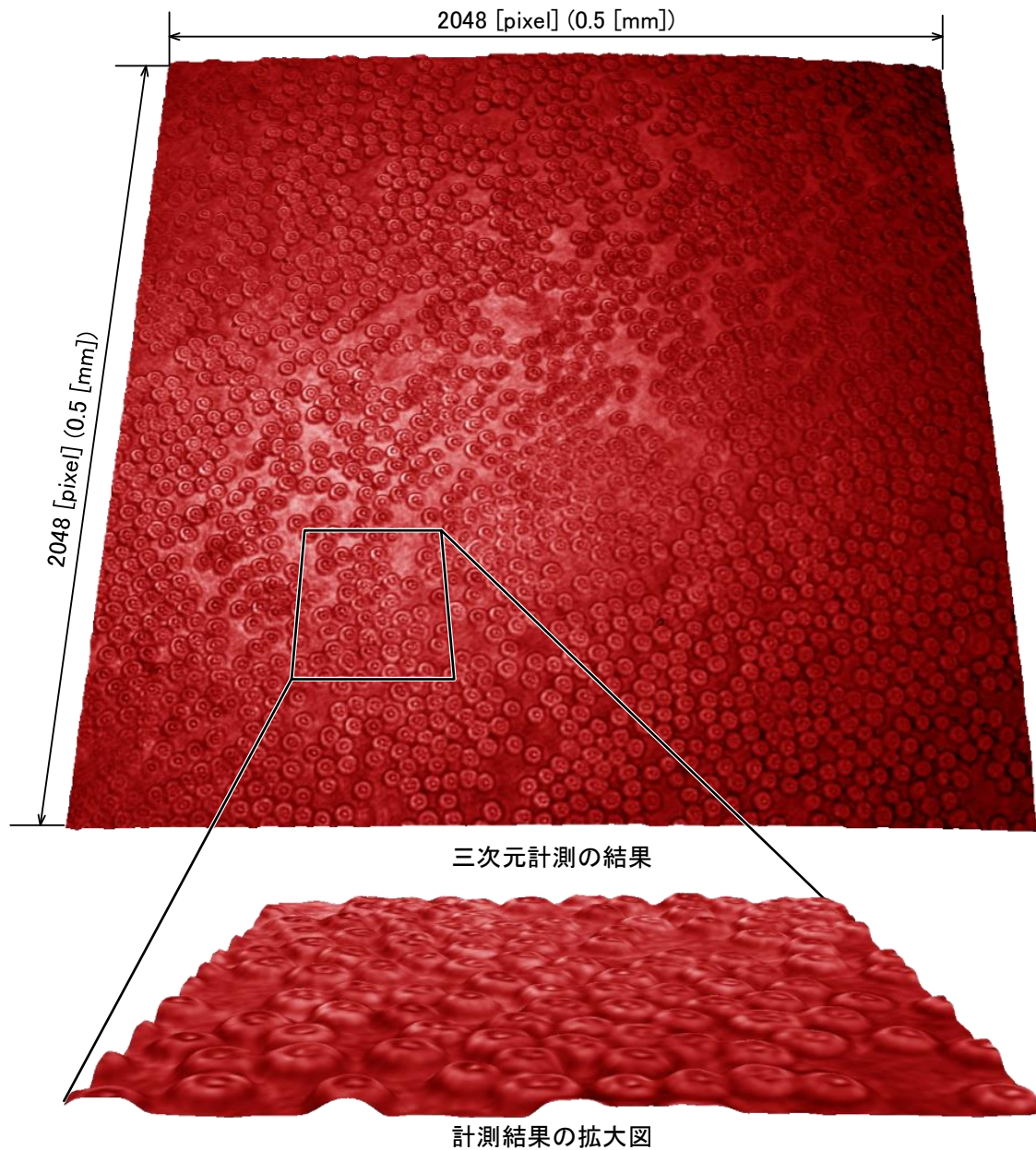


図6.6 復元した赤血球の三次元形状

また、赤血球に対する三次元計測の再現性を検討するために、まず、水環境の浸透圧が赤血球の形態に与えた影響を三次元計測で検証した。赤血球の外部水環境において、高浸透圧、等浸透圧および低浸透圧のとき、計測した赤血球三次元形状を図6.7～図6.9に示す。次に、同一計測範囲に対して、1時間、1200回の三次元計測を実行した。計測結果より、計測範囲に存在する赤血球の平均体積を算出し、赤血球の平均体積の変化を確認した。赤血球の平均体積および水環境の浸透圧の関係を図6.10に示す。

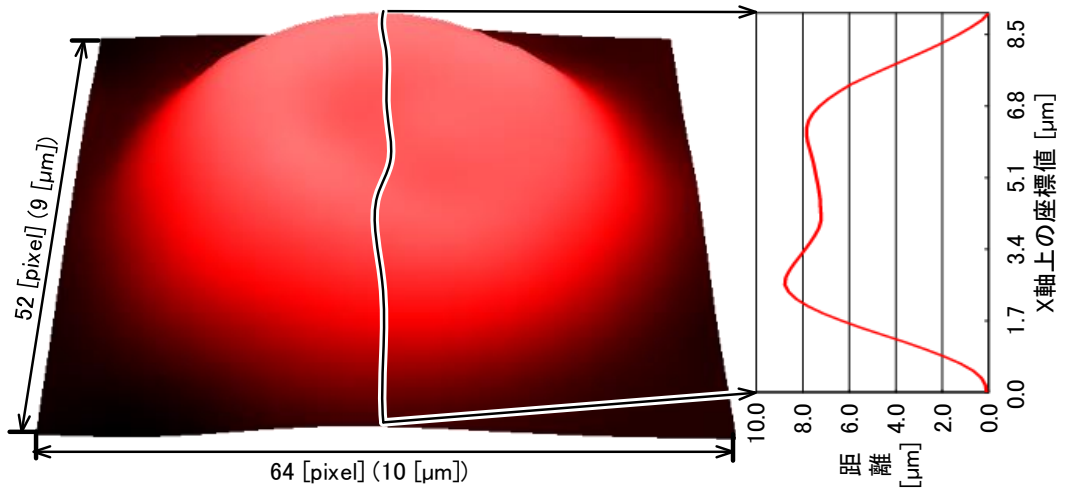


図6.7 高浸透圧時の赤血球の三次元形状

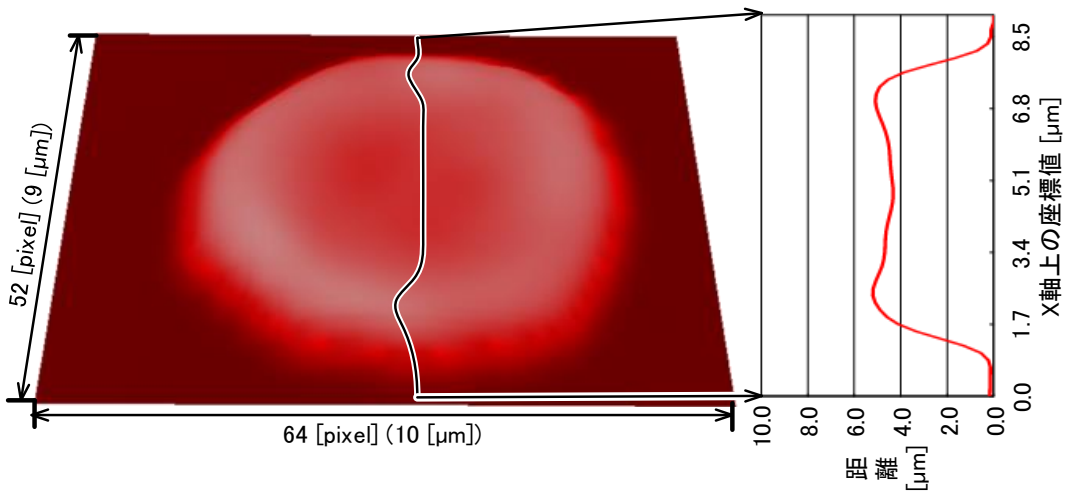


図6.8 等浸透圧時の赤血球の三次元形状

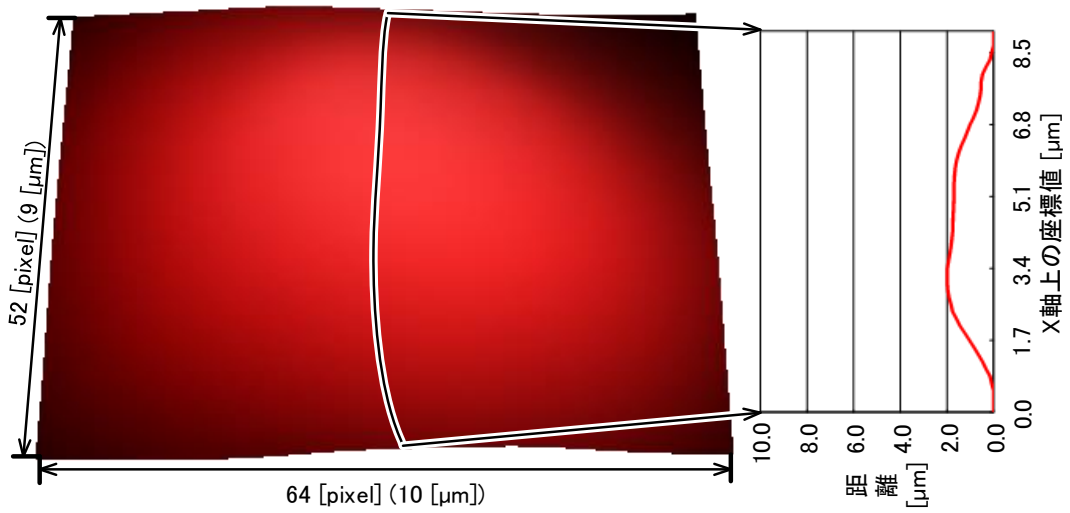


図6.9 低浸透圧時の赤血球の三次元形状

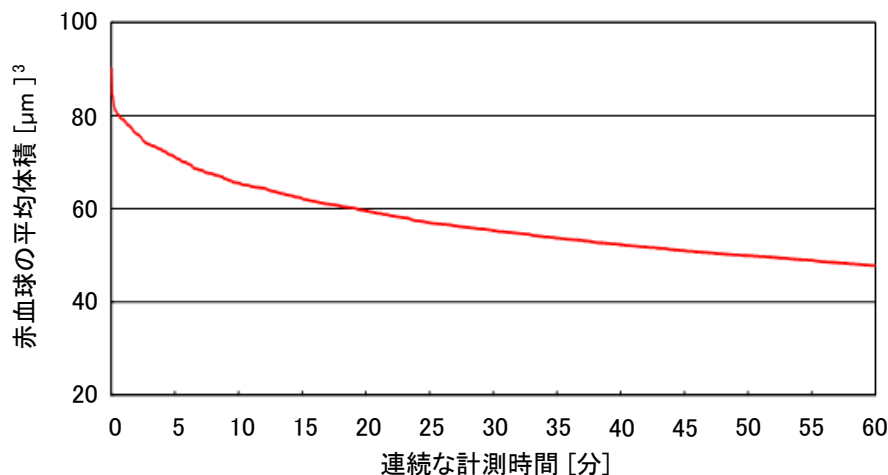


図6.10 赤血球の平均容積と水環境の浸透圧の関係

図6.7～図6.9より、同一の赤血球に対して、外部に水成分が多いとき、赤血球の浸透圧が大きいため、赤血球の三次元形状が膨らんでいることが確認できた。また、計測サンプルに水の蒸発により、浸透圧が低くなる。そのため、等浸透圧時、赤血球の三次元形状において、高さが5 [μm]、幅が7 [μm]であることが確認できた。最後に、水成分がほぼ蒸発してしまい、赤血球の外部水環境が低浸透圧である際に、赤血球の高さが2 [μm]と薄くなることが確認でき。また、図6.10より、1時間、1200回の三次元計測を実行することで、計測サンプルにおける水が蒸発してしまい、赤血球の外部水環境の浸透圧が低下になり、平均体積が小さくなることが確認できた。

赤血球の三次元形状と体の健康状態との関係を検討するために、朝6時、午前12時および午後6時において、血液サンプルにおける異なる10箇所(7万個の赤血球)に対して三次元計測を実行することで、それぞれの赤血球の体積分布を算出した。時間帯が異なる赤血球の体積分布を図6.11に示す。図6.11より、朝6時においては、赤血球の体積の平均値は90.0 [μm^3]、分散値は0.9 [μm^3]である。午前12時においては、赤血球の体積の平均値は89.9 [μm^3]、分散値は0.9 [μm^3]である。午後6時においては、赤血球の体積の平均値は89.8 [μm^3]、分散値は1.3 [μm^3]である。そのため、一日中においては、赤血球の平均体積がほぼ同一であるが、朝および午前のときでは、赤血球の体積分散値が最も小さく、赤血球の三次元形状の変化が最も小さいことが確認できた。同様に、午前12時における食事直前および食後の赤血球の体積分布を図6.12に示す。図6.12より、食事直前においては、赤血球の体積の平均値が89.6 [μm^3]、分散値は1.0 [μm^3]である。

上記の数値を示した表6.3により、食事直後より、食事直前では、赤血球の三次元形状が少し薄いことを確認できた。

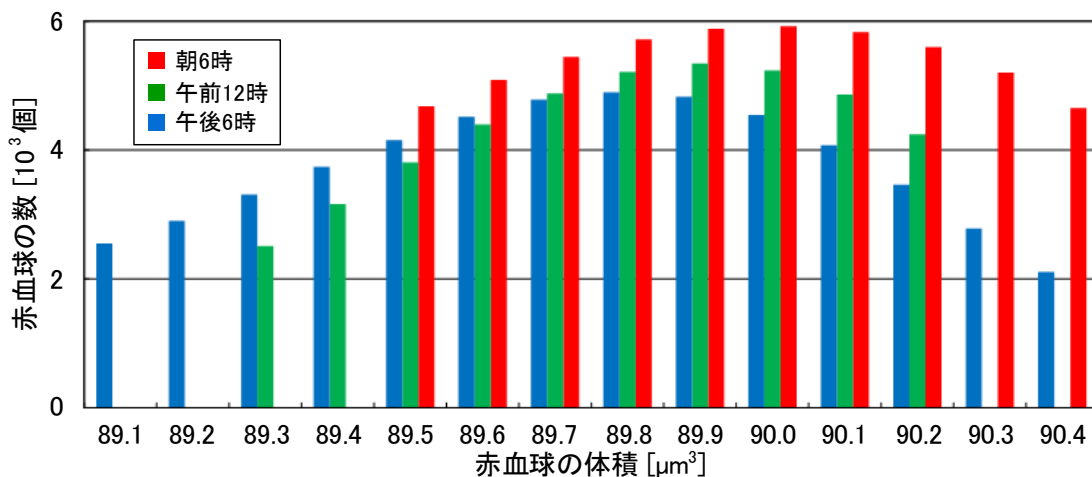


図6.11 時間帯の異なる赤血球体積の統計分布

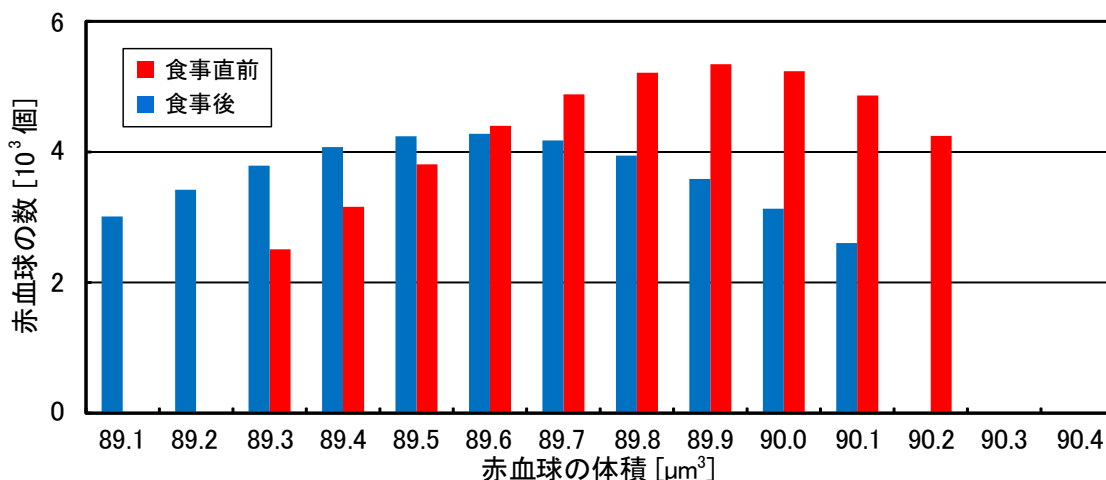


図6.12 食事直前および食後の赤血球体積の統計分布

表6.3 赤血球体積の統計結果

	平均値 [μm^3]	分散値 [μm^3]
朝6時	90.0	0.9
午前12時	89.9	0.9
午後6時	89.8	1.3
食事前(午前12時)	89.6	1.0
食事後(午前12時)	89.9	0.9

上記より，提案システムを用いて，人間の血液に存在する赤血球の三次元形状をリアルタイムで計測することが可能である．また，計測結果を用いて，赤血球の三次元形状を解析することにより，自動血液検査が実現できる可能性が高いと考えている．

6.5 むすび

本研究で提案したワンショット位相シフトデジタルホログラフィを用いて，精密医療分析分野に応用する三次元顕微鏡を検討した．従来の三次元電子顕微鏡および共焦点レーザ顕微鏡より，提案した三次元顕微鏡は高速，高精度かつ安価である．さらに，顕微鏡レベルの高光学分解能を実現するために，対物レンズおよび球面アクロマティックレンズで構築した顕微鏡レンズシステムを検討して，ワンショット位相シフトデジタルホログラフィ三次元形状計測システムに使用した．顕微鏡レンズシステムの使用により，開発した三次元顕微鏡において，光学分解能が $0.59 [\mu\text{m}]$ ，結像分解能が $0.22 [\mu\text{m}]$ ，三次元計測の範囲は $500 \times 500 [\mu\text{m}]$ である．最後に，人間の血液に存在する赤血球の三次元形状計測実験を通して，提案システムを用いて，生体組織に対する三次元形状計測が可能であり，リアルタイムの血液検査が実現できる可能性が高いことを確認した．今後は，健康や不健康な血液を入手して，三次元形状計測による血液検査の結果と従来の血液検査の結果を比較することで，血液の検査精度を評価したいと考えている．また，高精度かつ高速な三次元形状解析の手法に関して検討したいと考えている．

第7章 おわりに

本論文では、位相シフトおよびワンショット位相シフトデジタルホログラフィによる三次元計測について説明した。特に、高干渉性能のレーザ光源を利用して、「鏡面反射および透明な物体に対する三次元計測」、「計測システムの低価格化」、「高精度な三次元計測の実現」、「三次元計測の安定性の向上」の四点に注目して、計測手法および計測システムを提案し、評価した。

まず、位相シフトデジタルホログラフィによる三次元計測法および計測システムを提案した。提案手法では、位相シフトにより算出された物体光の相対位相値を、畳み込み原理を利用したフレネル変換に代入することで、計測対象の表面に存在する物体光の複素振幅を算出するという新たな位相シフトデジタルホログラフィによる三次元形状計測法を実現した。提案手法ではフーリエ変換のみを利用するため、一般的なフレネル変換を使用した従来法より、簡単に実装することができ、三次元形状計測システムへの応用に有効である。提案システムでは、光の検波原理を使用して、偏光板を45度ずつ回転させることで、三次元形状計測に必要な4枚の位相シフト干渉縞を生成する。ここで、ピエゾステージを使用した従来の計測システムより、高精度な位相シフト干渉縞の生成および計測システムの低価格化が実現できた。また、参照光と物体光の分割および合成が同一のビームスプリッタにより行われるため、従来の計測システムより、小型な構成が実現できた。鏡面反射および透明物体に対する三次元計測実験を通して、三次元画像計測法を用いた既存の三次元形状計測システムに存在する問題点が解決でき、鏡面反射の光学部品および透明なガラス製品などの精密不良検査にの応用が可能であることを検討した。段差マスタを用いた計測精度評価実験の結果より、提案手法の計測精度が7.1 [nm]であるため、高精度な三次元計測が実現できた。しかしながら、位相シフト干渉縞画像を撮影するために、偏光板の4回回転およびカメラの4回撮影が必要であるため、提案手法は高速な三次元形状計測に不向きである。また、位相シフト干渉縞画像を撮影する際に発生した振動や空気密度の変化などにより、提案システムは計測環境からの影響を受けやすく、安定な三次元形状計測システムではないという問題点を確認した。

次に、上記の問題点を解決し、高速かつ安定な三次元形状計測システムを実現するために、光干渉計測分野に利用された干渉縞の周波数解析法を用いて、

ワンショット位相シフトデジタルホログラフィによる三次元形状計測を提案した。提案手法では、干渉縞の周波数解析法で1枚の干渉縞の撮影画像から物体光の相対位相値を算出し、畳み込み原理を利用したフレネル変換式に代入することで、ワンショットの三次元形状計測を実現した。そのため、従来法に使用した偏光板の自動回転ステージが不要となり、ワンショット法を用いた三次元形状計測システムが安価かつ高速である。計測実験の結果より、ワンショット法を用いて、鏡面反射および透明物体に対する三次元計測が可能であり、動体に対する実時間の三次元形状計測も実現できることを確認した。計測精度の評価結果より、ワンショット法に位相シフトの位相誤差が存在しないため、計測の平均誤差が5.5 [nm]であり、従来法の7.1 [nm]の計測精度よりも高精度であることを確認した。計測安定性の比較実験を通して、ワンショット法は、カメラセンサの解像度限界付近でも従来法より安定な三次元形状計測が実現できることを検証した。三次元形状計測の範囲は7×7 [mm]であるが、計測システムにレンズレンズシステムを使用することで計測範囲を容易に拡大や縮小することも可能である。

さらに、本研究の実用化を検討するために、ワンショット型の三次元顕微鏡を開発した。提案したワンショット位相シフトデジタルホログラフィによる三次元形状計測法を使用したため、従来の三次元電子顕微鏡および共焦点レーザ顕微鏡より、開発した三次元顕微鏡は高速、高精度かつ安価である。対物レンズおよび球面アクロマティックレンズで構築した顕微鏡レンズシステムを使用することで、光学分解能が0.59 [μm]、結像分解能が0.22 [μm]の高分解能を実現した。人間の血液に存在する赤血球の三次元形状計測実験を通して、開発した三次元顕微鏡を用いて、生体組織に対する三次元形状計測が可能であり、実時間の血液検査が実現できる可能性が高いことを確認した。

本研究にて、鏡面反射および透明な物体に対する精密不良検査に応用可能な高精度三次元形状計測法を提案して、安価な計測システムを開発した。また、提案手法に対する高速化を検討し、計測の安定性を向上させた。さらに、将来の精密医療分析に応用する可能性を検証した。今後は、まず、計測システムに使用した光学部品を一体化することで、計測システムをさらに小型化したいと考えている。また、段差距離がナノメートル単位の精密段差マスタを用いて、三次元計測精度および計測の高さ分解能を厳密に評価したいと考えている。最後に、さらに多い三次元形状計測実験を実行し、三次元形状解析法を検討することで、本研究を精密不良検査および医療分析分野に応用したい。

謝辞

本研究を行うにあたり，終始懇切丁寧なるご指導を頂きました名古屋工業大学 梅崎太造教授，岩田彰教授，本谷秀堅教授に謹んで感謝いたします。

また，本研究を行うにあたりご協力頂いた，田口亮助教，服部公央亮先輩，加藤嗣先輩をはじめとする梅崎研究室関係者各氏に深謝いたします。研究に対して様々なご協力を頂いた中部大学 保黒政大准教授，合同会社3Dragons 堀米秀嘉氏，西郷知泰氏に感謝いたします。

なお，位相シフトデジタルホログラフィ三次元計測の研究の一部は，公益財団法人堀科学芸術振興財団の研究助成を受けて実施しております。関係者各位に深謝いたします。

参考文献

- [1] Song Zhang, Peisen S. Huang: “High-resolution, real-time three-dimensional shape measurement”, *Optical Engineering*, Vol.45, No.12, 2006.
- [2] 岡崎智也, 岡谷貴之, 出口光一郎: “構造化投影と照度差ステレオを組み合わせた自動校正による3次元物体計測手法”, *MIRU2008*, pp.1100-1107, 2008.
- [3] 高地伸夫, 渡邊広登, 伊藤忠之: “デジタル画像による3D計測とその応用例”, *画像ラボ15(12)*, p.p.25-29, 2004.
- [4] 三高良介, 濱田長生: “位相シフト法による高速高精度3次元形状計測”, *松下電工技報Aug.2002*, pp.10-15, 2002.
- [5] 森山拓哉, 高地伸夫, 山田光晴, 深谷暢之, 藤田光伸: “カラ-コードターゲットを用いた自動三次元画像計測”, *SSII2008*, pp.273-277, 2008.
- [6] 土居謙介, 辻徳生, 山本健吉, 石井抱: “高フレームレート三次元画像計測のためのコード化パターン光投影法”, *電子情報通信学会論文誌D, Vol.J91-D, No.5*, 2008.
- [7] 戸塚聡, 古川亮, 川崎洋: “プロジェクタ・カメラシステムのレスポンス関数を用いた位相シフト法によるアクティブ・ステレオの精度向上”, *MIRU 2009, IS3-33*, pp.1594-1599, 2009.
- [8] 吉澤徹: “光三次元・産業への応用”, *アドコム・メディア株式会社*, 2008.
- [9] 石川尋代, 佐藤幸男: “人体の3次元形状計測とモデル化”, *電気情報学会技術研究報告, マルチメディア・仮想環境基礎, 104(634)*, pp.31-36, 2005.
- [10] 盧存偉, 相利民, 井口征士: “三次元画像計測のための投影パターンの最適化及び準最適組合せ生成アルゴリズム”, *電気情報通信学会論文誌D-II, 情報・システム, II-パターン処理, J88-D-II(2)*, pp.325-333, 2005.
- [11] Bryngdahl O, Wyrowski F: “Digital Holography – computer generated holograms”, *Progress in Optics 28*, pp.1-86, 1990.
- [12] Adams M, Kreis T, Juptner W: “Particle size and position measurement with digital holography”, *Proc SPIE, Vol.3098*, pp.234-240, 1997.
- [13] Butters JN, Leendertz JA: “Holographic and Videotechniques applied to engineering measurements”, *J Meas Control, 4*, pp.349-354, 1971.

- [14] CuChe E, Bevilacqua F, Depeursinge C: "Digital holography for quantitative phase-contrast imaging", *Optics Letters*, Vol. 24, No 5 4, pp.291-293, 1999.
- [15] Soenke Seebacher, Wolfgang Osten, Werner P.O. Jueptner: "Measuring shape and deformation of small objects using digital holography", *Proc. SPIE 3479, Laser Interferometry IX: Applications*, Vol. 24, No 5 4, pp.104, 1998.
- [16] Gang Pan, Hui Meng: "Digital Holographic PIV for 3D Flow Measurement", *ASME 2002 International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, pp.43-39, 2002.
- [17] Creath K: "Phase shifting speckle-interferometry", *Appl Opt*, Vol.24, No.18, pp.3053-3058, 1985.
- [18] Creath K: "Phase-shifting holographic interferometry", *Springer Series in Optical Sciences*, 68, pp.109-150, 1994.
- [19] Yamaguchi, T.Zhang: "Phase-shifting digital holography", *Optical letter*, Vol.22, No.16, pp.1268-1270, 1997.
- [20] Guo CS, Zhang L, Wang HT, Liao J, Zhu Y: "Phase-shifting error and its elimination in phase-shifting digital holography", *Optical letter*, Vol.27, No.19, pp. 1687-1689, 2002.
- [21] Shigeru Murata, Daisuke Harada, Yohsuke Tanaka: "Spatial Phase-Shifting Digital Holography for Three-Dimensional Partical Tracking Velocimetry", *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol.48, No.9S2, pp.09LB01-1-9, 2009.
- [22] Yasuhiro Awatsuji, Tatsuki Tahara, Atsushi Kaneko, Takamasa Koyama, kenzo Nishio, Shogo Ura, Toshihiro Kubota, Osamu Matoba: "Parallel two-step phase-shift digital holography", *Applied Optics*, Vol.47, No.19, pp.D183-D189, 2008.
- [23] Yamaguchi, Ida T, Ykota M, Yamashita K: "Surface shape measurement by phase-shifting digital holography with a wavelength shift", *Appl. Opt.*, Vol.45, No.29, pp.7610-7616, 2006.
- [24] Ichirou Yamaguchi, tatsuki Matsumura, Jun-ichi Kato: "Phase-shift color digital holography", *Opitcs Letters*, Vol.27, No.13, pp.1108-1110, 2002.
- [25] Jung-Ping Liu, Ting-Chung Poon: "Two-step-only quadrature phase-shifting digital holography", *Optics Letters*, Vol.34, No.3, pp.250-252, 2009.

- [26] Yasuhiro Awatsuji, Atsushi Fujii, Toshihiro Kubota, Osamu Matoba: “Parallel three-step phase-shifting digital holography”, *Optics Letters*, Vol.45, No.13, pp.2995-3002, 2006.
- [27] Y. Morimoto, T. Nomura, M. Fujigaki, S. Yoneyama, I. Takahashi: “Deformation measurement by phase-shift digital holography”, *Experimental Mechanics*, Vol.45, No.1, pp.65-70, 2005.
- [28] J. Millerd, N. Brock: “Methods and apparatus for splitting, imaging and measuring wavefronts in interferometry”, U.S. Patent, 6, pp.304-330, 2001
- [29] Demetarakopoulos TH, Mittra R: “Digital and optical reconstruction of images from suboptical diffraction patterns”, *Appl Opt*, Vol. 13, No. 3, pp. 665-670, 1974
- [30] James Millerd, John Hayes, Michael North-Morris, Matt Novak, James Wyant: “Pixelated Phase-Mask Dynamic Interferometer”, *Interferometry XII Techniques and Analysis*, 2004.
- [31] Tatsuki Tahara, Kenichi Ito, Takashi Kakue, Motofumi Fuji, Yuki Shimozato, Yasuhiro Awatsuji, Kenzo Nishio, Shogo Ura, Toshihiro Kubota, Osamu Matoba: “Parallel phase-shifting digital holographic microscopy”, *Biomedical optics express*, Vol. 1, No. 2, pp.610 2010.
- [32] Yasuhiro Awatsuji, Masaki Sasada, Toshihiro Kubota: “Parallel quasi-phase-shifting digital holography”, *Applied physics letters*, Vol. 85, No. 6, pp.1069 2004.
- [33] Etienne CuChe, Pierre Marquet, Christian Depeursinge: “Spatial filtering for zero-order and twin-image elimination in digital off-axis holography”, *Applied Optics*, Vol.39, No.23 pp.4070-4075, 2000.
- [34] Daesuk Kim, Robert Magnusson, Moonseob Jin, Jaejong Lee, Won Chegal: “Complex object wave direct extraction method in off-axis digital holography”, *Optics Express*, Vol.21, No.3 pp.3658-3668, 2013.
- [35] G. Ade: “A Digital Method For Noise Reduction in Holographic Reconstructions and Electron Microscopical Images”, *Scanning Microscopy*, Vol 11, pp.375-378, 1997.
- [36] Thomas Kreis: “Digital Holographic interference-phase measurement using the Fourier-transform method”, *Optical Society of America*, Vol.3, No.6, pp.847-855, 1986.
- [37] 井口征士, 佐藤宏介: “三次元画像計測”, 昭晃堂, 1990.

- [38] 松山隆司, 久野義徳, 井宮淳: “コンピュータビジョン, 新技術コミュニケーションズ”, pp. 29-30, 1998.
- [39] 佐藤淳: “プロジェクタ・カメラの多視点幾何とその応用”, 情報処理学会研究報告”, CVIM, Vol.2006, No.115, pp.61-68, 2006.
- [40] 佐藤淳: “コンピュータビジョン-視覚の幾何学”, コロナ社, 1999.
- [41] Hiroshi Matsuda, Masaki hongo, Satoshi tsuruta, Tsutomu Yamashita, Mei Huang, Shouzo Nishimura, Akira Demizu: “3-D digital photogrammetric measurement of the structure and 3-D finite element free vibration analysis”, Journal of Structural engineering.A, Vol.53A, pp. 33-40, 2007.
- [42] Yasuhiro Mizutani, Hiroo Fujita, Yukitoshi Otani, Norihiro Umeda, Toru Yoshizawa: “Three-dimensional shape measurement using shape from focus method by using liquid crystal grating”, JSPE Spring Meeting, E39, 2005.
- [43] 安藤昌樹, 要石翔, 新井泰彦, 横関俊介: “SEMを用いた格子投影技術による三次元形状計測法の開発”, 精密工学会学術講演会講演論文集, 2008A(0), pp.197-198, 2008.
- [44] 望月優介, 青木公也, 興水大和: “焦点ずれによる画像ぼけ特徴を利用した三次元形状計測”, 電気学会論文誌, Vol.129, No.5, pp.909-915, 2009.
- [45] 辻岡, 藤井, 古橋, 内田: “光学的三次元形状計測における物体表面模様の影響除去について”, 平成12年電気学会全国大会, Vol.1, No.1, pp.072, 2000.
- [46] K. Tsujioka, H. Ito, H. Furuhashi, S. Higa, N. Hayashi, J. Yamada, K. Hatano, Y. Uchida: “Three-Dimensional Shapes Measurement using Grating Patterns from an Optical Spatial Modulator”, Korean Automatic Control conference, International Sessions 94KACC, Proceedings, pp.561-565, 1994.
- [47] 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, pp.1221-1225, 2000.
- [48] 長元気, 盧存偉: “投影パターン自動調節に基づく実用型全自動3次元計測システム”, 電気学会論文誌C, Vol.127, No.4, pp.561-567, 2007.
- [49] 眞鍋佳嗣, 黒坂信一, 千原國宏: “3次元形状と表面スペクトル分布の同時計測システム”, 電子情報通信学会論文誌D, Vol.J84-D2, No.6, pp.1012-1019, 2001.

- [50] 森田正彦, 齋藤達也, 栗原聡, 小檜山賢二: “スリット光を用いた3次元モデル撮影システムの設計と実装”, 画像電子学会誌, Vol.33, No.4B, pp.555-564, 2004.
- [51] 井口 征士: “最近の画像処理-三次元画像計測とスペクトル画像計測-”, 電気学会論文誌C, Vol.124, No.8, pp.1556-1562, 2004.
- [52] 盧存偉, 上塘広也, 孫可, 辻野和広, 長元気: “立体カメラ : 全自動三次元画像計測システムの開発と応用”, 電気学会論文誌C, Vol.131, No.2, pp.320-328, 2011.
- [53] 西野耕一, 木伸英, 佐田豊: “画像処理に基づく流れの三次元計測に関する研究”, 日本機械学会論文集B, Vol.55, No.510, pp.404-412, 1989.
- [54] 山内航一郎, 柴田進, 佐藤幸男: “多視点距離画像を用いた人体の三次元形状計測”, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J88-D-II, No.8, pp.1564-1572, 2005.
- [55] 野口剛宏: “自動ステレオマッチングによる3次元地形データ”, 測量調査技術, 通号 72, pp. 28~31.
- [56] 星仰: “衛星画像の並列ステレオマッチング処理と標高誤差”, 情報処理学会第 60 回全国論文集, Vol.2, pp. 225-226, 2000.
- [57] 熊谷正朗: “光等位相面切断法によるロボット用3次元計測システムの開発”, 計測自動制御学会東北支部第219回研究集会, 資料番号219-4, 2004.
- [58] 船富卓哉, 美濃導彦: “さまざまな姿勢での光切断法による三次元人体形状モデリング”, 情報処理学会論文誌, Vol.2007, No.42, pp.233-248, 2007.
- [59] 鎌田裕介, 長谷川誠: “光切断法を応用した電極表面形状の評価システムに関する基礎検討”, 電子情報通信学会技術研究報告, Vol.105, No.648, pp.41-44, 2006
- [60] 大池祐輔, 新宅宏彰, 池田誠, 浅田邦博: “光切断法による高精細・実時間3次元撮像システム”, 映像情報メディア学会誌, Vol.57, No.9, pp.1149-1151, 2003
- [61] Joaquim Salvi, Jordi Pages, Joan Batlle: “Pattern codification strategies in structured light system”, Pattern Recognition, 2004.
- [62] 高辻誠也, 佐川立昌, 越後富夫, 八木康史: “グレイコードパターンを利用したレンズ歪みの補正手法”, MURA2005, pp.174-180, 2005.
- [63] 船富卓哉, 飯山将晃, 角所考, 美濃導彦: “光切断法による複数運動剛体の形状計測”, 電子情報通信学会論文誌D, Vol.J90-D, No.8, pp.1858-1867, 2007.

- [64] 曾根秀昭, 高木相: “光切断法によるコンタクト表面形状の自動測定の基礎検討”, 電子情報通信学会論文誌D, Vol.J70-C, No.3, pp.424-429, 1987.
- [65] 新津靖, 宮崎新一: “光切断法を用いた非接触3次元全周形状計測システム”, 精密工学会誌, Vol.62, No.12, pp.1790-1794, 1996.
- [66] J.Battle, E.Mouaddib, J.Salvi: “Recent progress in coded structured light as a technique to solve the correspondence problem: a survey”, Pattern Recognition, Vol. 31, No.7, pp.963–982, 1998.
- [67] J.L.Posdamer, M.D.Altshuler: “Surface measurement by space-encoded projected beam systems”, Computer Graphics and Image Processing, Vol.18, No.1, pp.1–17, 1982.
- [68] 服部数幸, 佐藤幸男: “レーザパターンシフトによる高分解能空間コード化法”, 電子情報通信学会論文誌D, Vol.J80-D2, No.6, pp.1423–1431, 1997.
- [69] 傳田壮志, 大橋健, 江島俊朗: “位相シフト法を用いた高速な3次元計測手法の提案”, 電子情報通信学会技術研究報告. PRMU, パターン認識・メディア理解, Vol.99, No.515, pp.43–50, 1999.
- [70] 柴田進, 西郷知泰, 林真司, 田口亮, 梅崎太造: “区分的焦点画像による合焦式高速三次元計測”, 電気学会論文誌C, Vol.130, No.7, pp.1192-1197, 2010.
- [71] 山崎貴之, 礪川悌次郎, 松井伸之, 池野英利, 神崎亮平: “共焦点レーザ顕微鏡画像に基づく昆虫神経細胞モデルの再構築”, 電子情報通信学会技術研究報告. NC, ニューロコンピューティング, Vol.104, No.760, pp.19–24, 2005.
- [72] リヒトマン: “立体像が得られる共焦点顕微鏡”, 日経サイエンス, pp.100–106, 1994.
- [73] 伊藤慎悟, 住川隆, 河森栄一郎, 小野靖: “レーザ光の往復反射及び飛行時間差を用いたトムソン散乱多点計測装置の開発”, 電気学会論文誌A(基礎・材料・共通部門誌), ニューロコンピューティング, Vol.128, No.7, pp.499–500, 2008.
- [74] 小川英光, 下山賢一, 福永正和, 北川克一, 杉山将: “白色干渉法による透明膜に覆われた物体の膜厚と表面形状の同時測定”, 計測自動制御学会論文集, Vol.43, No.2, pp.71–77, 2007.
- [75] 佐藤世智, 栗原徹, 安藤繁: “白色光干渉と時間相関イメージセンサを用いる微小構造体の振動振幅位相分布の実時間観測システム”, 電気学会論文誌E, Vol.130, No.1, pp.17–24, 2010.

- [76] Kreis T: “Holographic Interferometry”, Akademie, 1996
- [77] Ostrovsky YI, Butosov MM, Ostrovskaja GV: “Interferometry by Holography”, Springer, New York, 1980
- [78] Schnars U, Juptner W: “Direct recording of holograms by a CCD-target and numerical reconstruction”, Applied Optics, Vol. 33, No. 2, pp. 179-181, 1994
- [79] Schnars U: “Direct phase determination in hologram interferometry with use of digitally recorded holograms”, Journ Opt Soc Am A, Vol.11, No. 7, pp. 2011-2015, 1997
- [80] Yaroslavskii LP, Merzlyakov NS: “Method of digital holography”, Consultants Bureau, New York, 1980
- [81] 加藤純一: “実時間干渉じま解析とその応用”, 精密工学会誌, Vol. 64, No. 9, pp. 1289, 1998
- [82] Mitsuo Takeda, Hideki Ina, Seiji Kodayashi: “Fourier-transform method of fringe-pattern analysis for computer-based topography and interferometry”, J. Opt. Soc. Am., Vol. 72, No. 1, pp.156, 1984
- [83] D.C.Ghiglia, M.D.Pritt: “Two-Dimensional Phase Unwrapping–Theory, Algorithms, and Software”, New York, Wiley, 1998.
- [84] Y. Barseghyan, H. Sarukhanyan: “Laplacian Based LF Quality Map for Phase Reconstruction”, CSIT, 2009
- [85] 林真司, 西郷知泰, 柴田進, 梅崎太造: “カラーパターン投影による顔表情3次元形状のリアルタイム計測”, 第15回画像センシングシンポジウムSSII09講演論文集 IS4-09, 2009.
- [86] 北川克一, 杉山将, 松坂拓哉, 小川英光, 鈴木一嘉: “2波長ワンショット干渉計測”, 精密工学会誌, Vol.75, No.2, pp.273-277, 2009.
- [87] Katsuichi Kitagawa: “Surface and thickness profile measurement of a transparent film by three-wavelength vertical scanning interferometry”, Opt. Lett., Vol.39, pp.4172-4175, 2014.
- [88] 花山良平, 日比野謙一, Jan Burke, Bozenko F.Oreb, 割沢伸一, 光石衛: “波長走査干渉計による多面干渉計測手法の開発”, 精密工学会誌, Vol.71, No.5, pp.579-583, 2005.

- [89] 江連朝寛, 水谷孝一, 増山裕之: “マッハツェンダ干渉計を用いる複数の光干渉像から推定する音場計測”, 電子情報通信学会論文誌 C, Vol. J86-C, pp.1324-1330, 2003.
- [90] 北川克一: “位相勾配検出による干渉縞画像の2次元周波数推定”, 計測自動制御学会産業論文集, Vol.8, No.13, pp.108-112, 2009.
- [91] 村木茂, 喜多泰代: “3次元画像解析とグラフィック技術の医学応用に関するサーベイ”, 電子情報通信学会論文誌 D-II, Vol. J87-D-II, pp.1887-1920, 2004
- [92] 日本臨床検査医学会: “臨床検査のガイドライン”, 2003
- [93] 尾崎良太, 織田英人, 薄葉亮子, 熊澤幸夫, 加藤典司, 北美紀子, 高林晴夫: “Cell-HOG特徴量を用いた顕微鏡画像からの有核赤血球自動検出”, 動的画像処理実利用化ワークショップ DIA 2013, I2-19, pp.233-237, 2013.
- [94] 堀田政二, 森田敏樹, 北美紀子, 高林晴夫: “顕微鏡画像からの高精度な有核赤血球の検出”, 第15回画像シンポジウム論文集, IS4-29, 2009.
- [95] 陣内浩司, 西川幸宏, 西敏夫: “三次元イメージングがもたらす新しい高分子構造解析”, 高分子論文集, Vol. 62, No. 10, pp. 488-501, 2005.
- [96] 徳永万喜洋, 若林健之, 須藤和夫: “ミオシンATP結合部位の電子顕微鏡による三次元位置の決定”, 生物物理, Vol. 29, No. 2, pp. 51-53, 2005.
- [97] 鷹岡昭夫: “三次元電子顕微鏡の開発と特徴”, 顕微鏡, Vol. 39, No. 1, pp. 11-14, 2004
- [98] 藤田哲也: “コンフォーカル走査型レーザー顕微鏡とその応用”, 電子顕微鏡, Vol. 25, pp. 189-194, 1991
- [99] 石川春律: “共焦点レーザー顕微鏡-原理と基礎-”, 組織細胞科学, pp. 19-23, 1996
- [100] 白川英樹, 白石浩一, 宮崎俊一: “共焦点レーザー顕微鏡その原理と応用”, 東京女子医科大学雑誌, Vol. 64, No. 12, pp. 1043-1048, 1994
- [101] T. Bourouina, A. Garnier, H. Fujita: “Magnetostrictive microactuators and application to two-dimensional optical scanners”, Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 41, pp.1608-1613, 2002

- [102] Benjamin Rappaz, Pierre Marquet, Etienne Cuche, Yves Emery, Christian Depeursinge, Pierre J. Magistretti: "Measurement of the integral refractive index and dynamic cell morphometry of living cells with digital holographic microscopy", *Optics Express*, Vol.13, No.23, pp.9361-9373, 2005
- [103] Florian Charrière, Nicolas Pavillon, Tristan Colomb, Christian Depeursinge, Herry J. Hegera,b, Edward A.D. Mitchell, Pierre Marquet, Benjamin Rappaz: "Living specimen tomography by digital holographic microscopy: morphometry of testate amoeba", *Optics Express*, Vol.14, No.16, pp.7005-7013, 2006
- [104] Bjorn Kemper, Patrik Langehanenberg, Gert Von Bally: "Digital Holographic Microscopy, A New Method for Surface Analysis and Marker-Free Dynamic Life Cell Imaging", *Biophotonics, Optik&Photonk*, No. 2, pp.41-44, 2007

研究業績一覧

学術論文（査読有） 主：3，副：0

- [1] **YuQiyue**, 田口亮, 保黒政大, 堀米秀嘉, 梅崎太造, “位相シフトデジタルホログラフィによる三次元計測システムの開発”, 電気学会論文誌C, Vol.134, No.1, pp.56-62, 2014.
- [2] **YuQiyue**, 田口亮, 保黒政大, 堀米秀嘉, 梅崎太造, “ワンショット位相シフトデジタルホログラフィによる三次元計測装置の開発”, 精密工学会誌, Vol.80, No.4, pp.375-381, 2014.
- [3] **YuQiyue**, 田口亮, 保黒政大, 堀米秀嘉, 梅崎太造, “ワンショットデジタルホログラフィによる赤血球の三次元計測”, 精密工学会誌「ViEW2013・DIA2014論文」, 掲載決定.

国際会議（査読有） 主：3，副：0

- [4] **Qiyue Yu**, Ryo Taguchi, Taizo Umezaki, Masahiro Hoguro, Hideyoshi Horimai, “Development of 3D measurement system using Digital Holography”, 23rd 2012 International Symposium on Micro-NanoMechatronics and Human Science, pp.491- 494, 2012.
- [5] **Qiyue Yu**, Ryo Taguchi, Masahiro Hoguro, Hideyoshi Horimai, Taizo Umezaki, “Development of 3D measurement system using phase-shift digital holography”, The International Conference On Future Trends In Computing and Communication, pp.138- 142, 2013.
- [6] **Qiyue Yu**, Ryo Taguchi, Masahiro Hoguro, Hideyoshi Horimai, Taizo Umezaki, “Development of 3D Measurement System Using Single-shot Phase-shift Digital Holography”, The 15th International Conference on Precision Engineering, pp.235- 238, 2014.

シンポジウム（査読有） 主：7，副：1

- [7] ウキエツ, 田口亮, 梅崎太造, 保黒政大, 堀米秀嘉, “デジタルホログラフィによる三次元計測システムの開発”, ViEW (Vision Engineering Workshop), IS2-C9, 2012.
- [8] YuQiyue, 田口亮, 保黒政大, 堀米秀嘉, 梅崎太造, “デジタルホログラフィによる三次元計測”, FIT(情報科学技術フォーラム), H-014, 第3分冊 pp.145- 146, 2012.
- [9] ウキエツ, 田口亮, 保黒政大, 堀米秀嘉, 梅崎太造, “位相シフトデジタルホログラフィを用いた三次元計測装置の小型化に関する検討”, DIA(Dynamic Image processing for real Application), I3-13, pp.310-314, 2013.
- [10] ウキエツ, 田口亮, 保黒政大, 堀米秀嘉, 梅崎太造, “位相シフトデジタルホログラフィを用いた小型化三次元計測システムの開発”, SSII (Symposium on Sensing via Image Information), IS1-19, pp.IS1-19-1-IS1-19-6, 2013.
- [11] ウキエツ, 田口亮, 保黒政大, 堀米秀嘉, 梅崎太造, “ワンショットDHを用いた油液表面の三次元形状計測”, ViEW (Vision Engineering Workshop), OS2-H5(IS1-F8), 2013
- [12] ウキエツ, 田口亮, 保黒政大, 堀米秀嘉, 梅崎太造, “ワンショット型デジタルホログラフィ顕微鏡による赤血球の三次元計測”, DIA(Dynamic Image processing for real Application), IS4-1, pp.125-128, 2014.
- [13] Qiyue Yu, Ryo Taguchi, Masahiro Hoguro, Hideyoshi Horimai, Taizo Umezaki, “3D Measurement for Red Blood Cells Using Digital Holography”, IPSJ Transactions on Computer Vision and Applications, Vol.6, pp 73- 77, 2014
- [14] 川井将人, Yu Qiyue, 田口亮, 保黒政大, 梅崎太造, “航空機用高密度配線組立時における被覆剥ぎ導線の自動良否判定システム”, DIA(Dynamic Image processing for real Application), I2-3, pp.156-159, 2013.

研究会・口頭発表（査読無） 主：3，副：1

- [15] YuQiyue, 田口亮, 梅崎太造, 保黒政大, 堀米秀嘉, “デジタルホログラフィを用いた三次元形状計測システムの開発”, 平成24年度電気関係学会東海支部連合大会, M4-7, 2012.
- [16] ウキエツ, 田口亮, 保黒政大, 堀米秀嘉, 梅崎太造, “位相シフトデジタルホログラフィを利用したワンショット三次元計測システムの開発に関する検討”, FIT(情報科学技術フォーラム), I-019, 第3分冊 pp.273-277, 2013.
- [17] ウキエツ, 田口亮, 梅崎太造, 保黒政大, 堀米秀嘉, “位相シフトデジタルホログラフィによる三次元計測の高速化に関する検討”, 平成25年度電気関係学会東海支部連合大会, H3-5, 2013.
- [18] 尾崎裕章, YuQiyue, 加藤嗣, 田口亮, 梅崎太造, 保黒政大, 堀米秀嘉, “非点収差を用いたレーザスポット形状変化の検証”, 平成25年度電気関係学会東海支部連合大会, H2-7 2013.

表彰

- [1] 一般社団法人情報処理学会 第12回情報科学技術フォーラム 奨励賞
- [2] 公益社団法人精密工学会 平成25年度 技術奨励賞
- [3] 一般社団法人電気関係学会 平成25年度東海支部連合大会 奨励賞受賞
- [4] 公益社団法人精密工学会 動的画像処理実用化ワークショップ2014 研究奨励賞

採択奨励研究費

- [1] 堀科学芸術振興財団 2013年度 研究助成 一般の部(外国人) 50万円