

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

Development of Single-Shot 3D measurement system using Phase-Shift Digital Holography

ウ キェツ† 田口 亮† 保黒 政大†† 堀米 秀嘉‡ 梅崎 太造†
Qiyue Yu† Ryo Taguchi† Masahiro Hoguro†† Hideyoshi Horimai‡ Taizou Umezaki†

1. まえがき

近年、工業製品の精密不良検査などを目的として高精度三次元形状計測技術の需要が増えている。既存の三次元形状計測手法としては、複数の投影パターンを利用した三次元画像計測法が最も仕様されている。しかし、鏡面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。一方、このような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[1]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による三次元形状計測法[2]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、参照光と物体光の光路差をレーザ波長の $1/4$ 倍ずつらしながら、4 枚の位相シフト干渉縞をカメラで撮影する。次に、位相シフト干渉縞の撮影画像を用いて、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、位相分布を算出し、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、位相シフト干渉縞を生成するためには、圧電薄膜を貼り付けたミラー(PZT ミラー)を使用して光路差を制御する必要がある。PZT ミラーが高価であり、PZT ミラーを使用した光学構成が複雑であるため、三次元計測システムの低価格化および小型化が困難であり、PZT ミラーの制御精度が計測結果に影響を与えるという問題が存在した。また、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ためには、4 枚の位相シフト干渉縞撮影画像が必要であるため、撮影時間の問題も存在した。さらに、撮影時計測装置の振動などにより、位相シフト干渉縞が正確に撮影できない場合も多い。

そこで、本研究では、光の検波原理を利用することで、位相シフトデジタルホログラフィ三次元計測システムの低価格化および小型化を実現する。また、周波数領域における干渉縞解析および畳み込み定理を利用することで、ワンショットの位相シフトデジタルホログラフィ三次元計測手法を提案する。

2. 提案システムの概要

提案システムの構成を図 1 に模式的に示す。まず、拡大したレーザ光は $1/2$ 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を透過した後、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 度ずつ回転させることで、従来の位相シフトデジタルホログラフィによる三次元計測に必要な 4 枚の位相シフト干渉縞を CMOS センサで撮影する。

提案した三次元計測処理の流れを図 2 に示す。

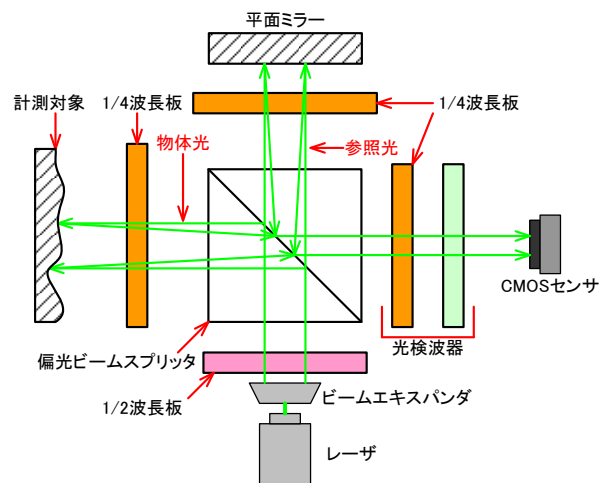


図1 提案システムの模式図

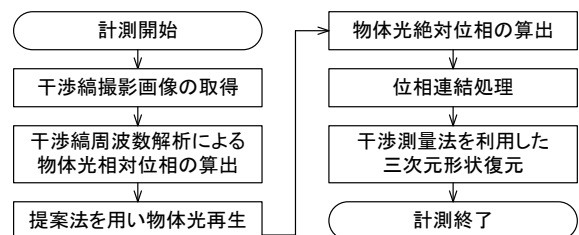


図2 提案三次元計測法の流れ

3. 干渉縞の生成原理

図 3 を用いてレーザ光を平面ミラーおよび計測対象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に照射される。

† 名古屋工業大学大学院情報工学専攻,
Nagoya Institute of Technology

†† 中部大学工学部電子情報工学科, Chubu University

‡ (社) ホーリーマイン, HolyMine Cooperation

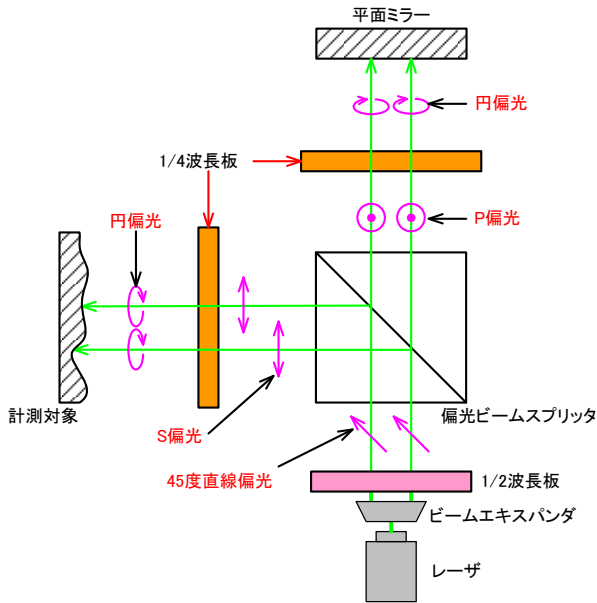


図3 レーザ光照射時の光学系における偏光状態

次に、図4を用いてレーザー光が計測対象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ー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、干渉現象は発生しない。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センサ上で干渉する。ここで、従来の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使用する場合、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5～図8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90度ずつ変化しているのが分かる。提案手法では、偏光板を回転させず、1枚の干渉縞のみ撮影する。

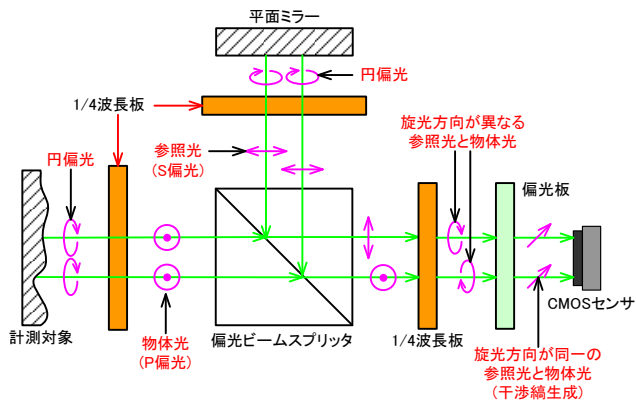


図4 レーザ光反射時の光学系における偏光状態

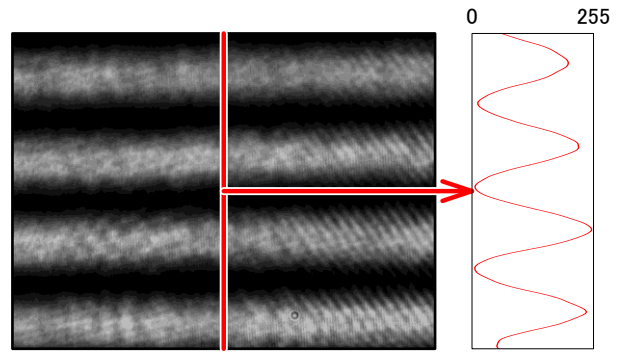


図5 偏光板回転角度が0度時の干渉縞撮影画像

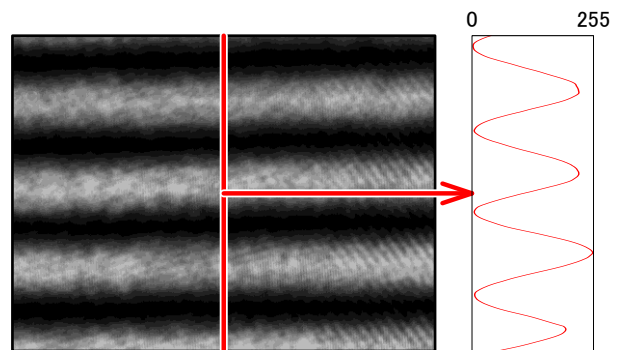


図6 偏光板回転角度が45度時の干渉縞撮影画像

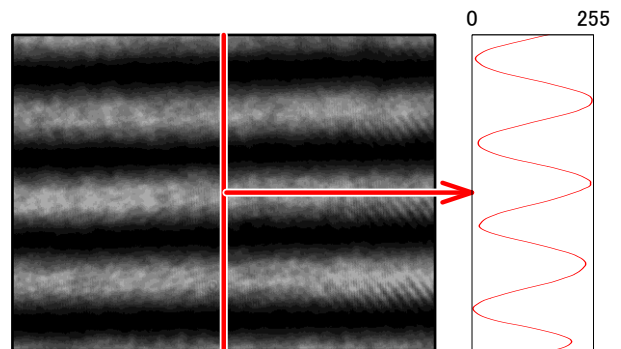


図7 偏光板回転角度が90度時の干渉縞撮影画像

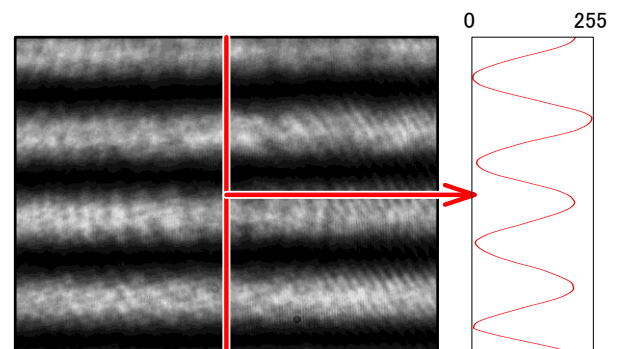


図8 偏光板角度が135度時の干渉縞撮影画像

4. 従来の三次元計測手法

従来の位相シフトデジタルホログラフィによる三次元計測法では、4枚の位相シフト干渉縞撮影画像を使用することで、計測に不要な直流成分および虚像成分を除去する。

4.1 干渉原理

マクスウェル方程式により、光複素数振幅を(1)式に示す。

$$A = a \times \exp(i\varphi) \quad (1)$$

A は光の複素数振幅、 a は光強度、 φ は位相値である。

光の干渉は伝播方向および偏光方向が同一の複数の光複素数振幅の重ね合わせであるため、干渉光の複素数振幅を(2)式に示すことができる。

$$\begin{aligned} A_o &= a_o \times \exp(i\varphi_o) \\ A_R &= a_R \times \exp(i\varphi_R) \\ A &= A_o + A_R \end{aligned} \quad (2)$$

A_o は物体光の光複素数振幅、 a_o および φ_o は物体光の光強度および位相値を表わす。 A_R は参照光の光複素数振幅、 a_R および φ_R は参照光の光強度および位相値を表わす。 A は干渉光の複素数振幅である。

干渉縞撮影画像を(3)式に示す。

$$\begin{aligned} I(x, y) &= |A_R(x, y) + A_o(x, y)|^2 \\ &= A_R(x, y)A_R^*(x, y) + A_o(x, y)A_o^*(x, y) \\ &\quad + A_o(x, y)A_R^*(x, y) + A_R(x, y)A_o^*(x, y) \end{aligned} \quad (3)$$

(x, y) は干渉縞パターン撮影画像の画像座標を表わす。 $A_R(x, y)$ および $A_R^*(x, y)$ は参照光の光複素数振幅およびその共役、 $A_o(x, y)$ および $A_o^*(x, y)$ は物体光の光複素数振幅およびその共役である。

(1)式を(3)式に代入すると、(3)式を(4)式で書き換えることができる。

$$\begin{aligned} I(x, y) &= B(x, y) + C(x, y) \cos(\Delta\varphi(x, y)) \\ B(x, y) &= a_R^2(x, y) + a_o^2(x, y) \\ C(x, y) &= 2a_o(x, y)a_R(x, y) \\ \Delta\varphi(x, y) &= \varphi_o(x, y) - \varphi_R(x, y) \end{aligned} \quad (4)$$

$\Delta\varphi(x, y)$ は物体光と参照光の位相差である。

(4)より、 $B(x, y)$ および $C(x, y)$ は未知であり、 $\cos$ 関数が偶関数であるため、位相値 $\Delta\varphi(x, y)$ の符号(+, -)を正確に決めることが不可能である。そのため、物体光と参照光の位相差を正確に算出するために、フレネル回折原理を利用することで、物体光を再生する必要がある。また、(3)式より、1枚の干渉縞画像に(5)式～(7)式に示す3の成分が存在する。

$$Term_{DC} = A_R(x, y)A_R^*(x, y) + A_o(x, y)A_o^*(x, y) \quad (5)$$

$$Term_{real} = A_o(x, y)A_R^*(x, y) \quad (6)$$

$$Term_{virtual} = A_R(x, y)A_o^*(x, y) \quad (7)$$

(5)式～(7)式より、 $Term_{DC}$ に物体光 $A_o(x, y)$ の位相情報が存在しないため、再生光の直流成分となる。 $Term_{real}$ に物体光の複素数振幅 $A_o(x, y)$ が存在するため、実像成分となる。 $Term_{virtual}$ に物体光の複素数振幅の共役 $A_o^*(x, y)$ が存在するため、虚像成分となる。直流成分および虚像成分において、計測対象三次元形状情報を正確に含める物体光位相情報が存在しないため、計測には使用しない。しかしながら、計測に必要な実像成分および計測に不要な直流成分と虚像成分は1枚の干渉縞撮影画像に同時に存在するため、直流成分と虚像成分を除去しなければ、物体光位相情報が正確に算出できず、三次元計測が困難である。

4.2 位相シフト法

従来の位相シフトデジタルホログラフィでは、90度ずつ位相がシフトした4枚の干渉縞を撮影することで、(8)式により、物体光と参照光の位相差を直接算出することが可能となる。ただし、参照光位相値を参考にするため、物体光位相値は相対位相となる。

$$\Delta\varphi(x, y) = \arctan \frac{I_4(x, y) - I_2(x, y)}{I_1(x, y) - I_3(x, y)} \quad (8)$$

$I_1(x, y) \sim I_4(x, y)$ は4枚の位相シフト干渉縞撮影画像、 (x, y) は画像座標である。 $B(x, y)$ および $C(x, y)$ は干渉縞のオフセットおよび振幅、 $\Delta\varphi(x, y)$ は物体光の相対位相値を表わす。

マクスウェルの方程式により、カメラセンサ表面における物体光の複素数振幅を(9)式に示す。

$$\begin{aligned} E_o(x, y) &= A(x, y) \exp\{i\Delta\varphi(x, y)\} \\ A &= \frac{1}{4} \sqrt{\{I_1 - I_3\}^2 + \{I_4 - I_2\}^2} \end{aligned} \quad (9)$$

$E_o(x, y)$ は計測対象表面からカメラセンサ表面に伝播した物体光の複素数振幅、 (x, y) は画像座標である。 $\Delta\varphi(x, y)$ は物体光の相対位相値、 $A(x, y)$ は物体光複素数振幅の振幅値を表わす。 $I_1 \sim I_4$ は4枚の位相シフト干渉縞撮影画像を表わす。

4.3 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。フレネル回折原理により、計測対象表面からカメラセンサ表面に伝播した物体光の複素数振幅を(10)式に示す。フレネル回折に使用した座標系を図9に示す。

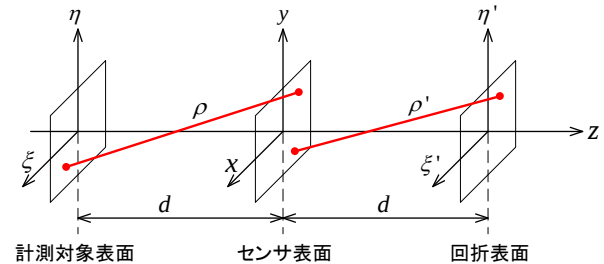


図9 フレネル回折に使用した座標系

$$\begin{aligned} E_o(x, y) &= \frac{i}{\lambda} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \Gamma(\xi, \eta) \frac{\exp(-i \frac{2\pi}{\lambda} \rho)}{\rho} d\xi d\eta \\ \rho &= \sqrt{(x - \xi)^2 + (y - \eta)^2 + d^2} \end{aligned} \quad (10)$$

$\Gamma(\xi, \eta)$ は計測対象表面における物体光の複素数振幅、 (ξ, η) は計測対象平面座標である。

線形システムの理論により、(10)式に示すシステムのインパルス応答関数を(11)式に示す。

$$g(\xi, \eta, x, y) = \frac{i \exp(-i \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{(x - \xi)^2 + (y - \eta)^2 + d^2})}{\lambda \sqrt{(x - \xi)^2 + (y - \eta)^2 + d^2}} \quad (11)$$

(11)式を(10)式に代入すると、(12)式が成立つ。

$$Eo(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \Gamma(\xi, \eta) g(\xi, \eta, x, y) d\xi d\eta \quad (12)$$

(12)式に示すように、計測対象における物体光の複素数振幅 $\Gamma(\xi, \eta)$ およびインパルス応答関数 $g(\xi, \eta, x, y)$ は関数の畳み込み関係であるため、フーリエ変換により、(12)式を(13)式に書き換えることができる。

$$\mathfrak{F}\{Eo(x, y)\} = \mathfrak{F}\{\Gamma(\xi, \eta)\} \times \mathfrak{F}\{g(\xi, \eta, x, y)\} \quad (13)$$

$\mathfrak{F}$ はフーリエ変換である。

(13)式より、(14)式が成立つ。

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

$$\varphi(\xi, \eta) = \arctan \frac{\text{Im}[\Gamma(\xi, \eta)]}{\text{Re}[\Gamma(\xi, \eta)]} \quad (14)$$

$\varphi(\xi, \eta)$ は物体光の絶対位相値を表す。Im および Re は物体光複素数振幅の虚部および実部を表す。 $\mathfrak{F}$ はフーリエ変換、 $\mathfrak{F}^{-1}$ は逆フーリエ変換である。

4.4 干渉測量法を用いた三次元形状復元

計測対象の三次元形状を復元するために、(14)式より算出した物体光の絶対位相値を連結して、(15)式に示す干渉測量法で計測対象の三次元形状を算出する。本研究では、位相連結処理に Quality Map 法[3]を使用する。

$$X = \frac{\lambda d}{W \Delta x} x \quad Y = \frac{\lambda d}{H \Delta y} y \quad Z = \varphi \frac{\lambda}{2\pi} \quad (15)$$

x, y は撮影画像の画像座標、 $\Delta x, \Delta y$ はカメラセンサ各ピクセル間の距離、 W, H は撮影画像の幅および高さを表す。 λ はレーザ光の波長、 d はカメラセンサ平面座標と計測平面座標間の距離である。 φ は物体光の位相値、 X, Y, Z は計測対象形状の三次元座標を表す。

5. 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計測法では、干渉縞撮影画像に存在する直流成分および虚像成分を除去するために、4 枚の位相シフト干渉縞撮影画像が必要である。しかしながら、位相シフト干渉縞を取得するために、偏光板を 45 度ずつ回転させ、4 回の撮影が必要である。そこで、偏光板の回転時間およびカメラの撮影時間により、計測時間が長いという問題が存在した。また、位相シフト干渉縞画像を撮影する際に、計測装置の振動などにより、撮影した位相シフト画像を用いて、物体光相対位相値が正確に算出できない場合も多い。そのため、位相シフトデジタルホログラフィを用いて算出物体光絶対位相値も正確ではなく、計測失敗する可能性が高い。これらの問題を解決するために、本研究では、周波数領域における干渉縞解析法を用いて、三次元計測に不要な直流成分および虚像成分を除去することで、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手法を提案する。また、提案手法で算出した相対位相値を(9)式に代入することで、カメラセンサ表面における物体光の複素数振幅を求める。さらに、フレネル回折および干渉測量法を用いて、ワンショットの位相シフトデジタルホログラフィによる三次元計測を実現する。

4.1 節により、1 枚の干渉縞画像に直流成分、虚像成分および実像成分が同時に存在することが分かる。このことから、撮影画像の輝度情報を利用することで、実像成分のみ抽出することが困難である。しかしながら、干渉縞が正弦波であるため、図 5 に示す干渉縞撮影画像から縦方向 1 ラインを抽出して、フーリエ変換すれば、周波数帯域において、直流成分に物体光相対位相情報が存在しないため、中央帯域(周波数が 0)に存在する。また、虚像成分に物体光相対位相情報の共役が存在するため、負の周波数帯域に存在し、実像成分に物体光相対位相情報が存在するため、正の周波数帯域に存在することが考えられる。このことから、周波数バンドフィルタを利用することで、実像成分の周波数情報を抽出することができる。さらに、逆フーリエ変換を実行することで、実像成分が抽出でき、物体光相対位相情報を取得することが可能である。図 5 に示す縦方向 1 ラインのパワースペクトルを図 10(b)に示す。

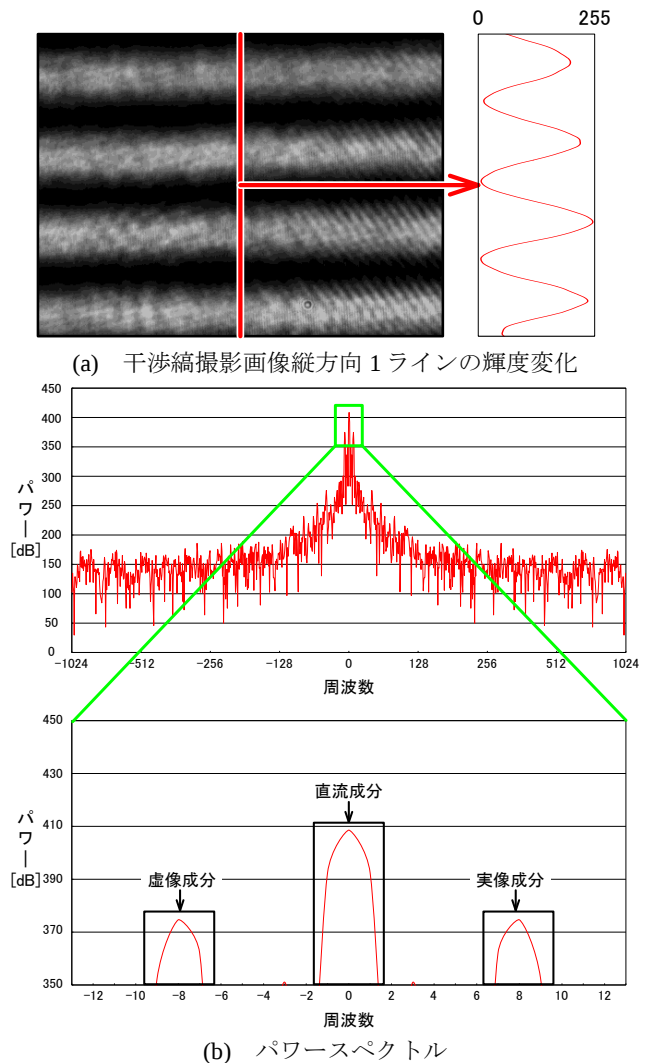


図 10 干渉縞縦方向 1 ラインの輝度のパワースペクトル

図 10 より、周波数領域において、実像成分と三次元計測に不要な直流成分および虚像成分が分離できることを確認した。このことから、周波数バンドフィルタをかけることで直流成分および虚像成分が除去でき、逆フーリエ変換することで、実像成分から物体光相対位相値を算出するこ

とが可能である．従来法を用いて算出した物体光絶対位相値および提案手法を用いて算出した物体光絶対位相値を図11に示す．

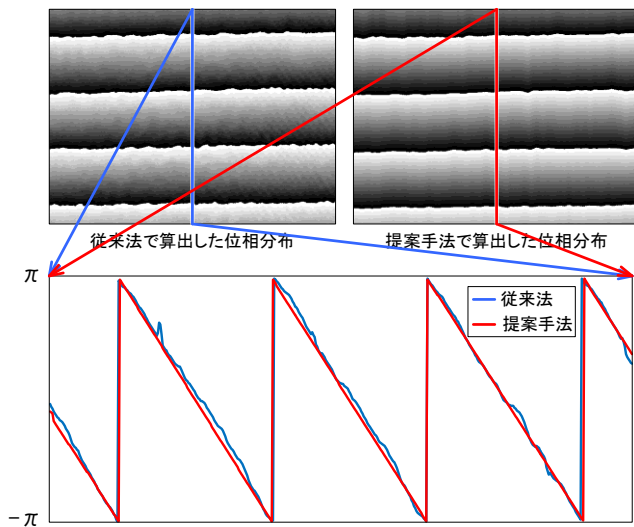


図11 従来法および提案手法で算出した物体光絶対位相

図11より，従来法と比較して，提案手法を用いて，物体光絶対位相分布を正確に算出したことを確認できた．また，周波数フィルタリング処理により，位相分布に存在するノイズを除去したことを確認できた．

6 提案システムの構築

提案システムの構成を図12に示す．提案システムでは，使用したレーザの波長は532[nm](緑)，カメラセンサ(CMOS)におけるピクセル間の距離は3.45[μm]，計測範囲は7×6[mm]である．計測ユニットのサイズは40×40[mm]であるため，計測システムの小型化ができる．

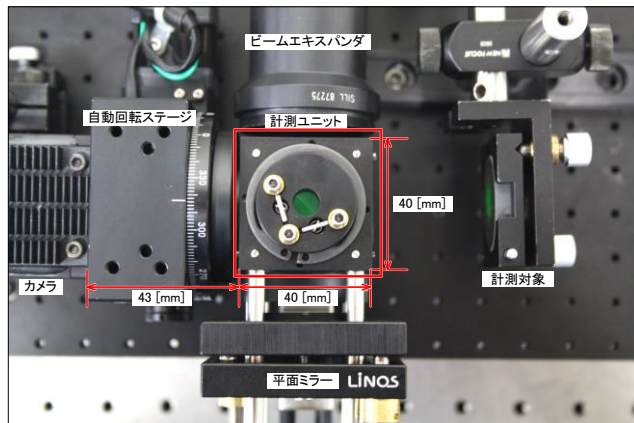


図12 計測システムの外観

7 計測実験

提案システムを用いて，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5×4[mm]である．

(1) 平面ミラーに対する計測実験

鏡面反射物体に対する計測を検討するために，平面ミラーに対する計測実験を実行した．計測結果を図13に示す．

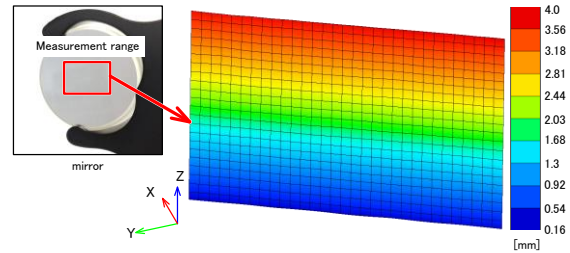


図13 平面ミラーの計測結果

(2) 平凸レンズに対する計測実験

透明物体に対する計測を検討するために，平凸レンズに対する計測実験を実行した．計測結果を図14に示す．

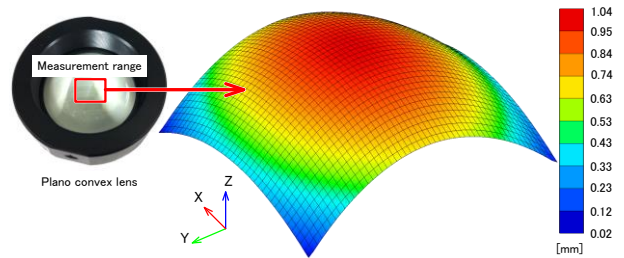


図14 平凸レンズの計測結果

8 まとめおよび今後の予定

本研究では，従来の位相シフトデジタルホログラフィに使用する高価のPZTミラーの代わりに，安価の偏光板および波長板を利用することで，安価かつ小型の位相シフトデジタルホログラフィ三次元計測装置を構築した．また，周波数領域における干渉縞解析を利用することで，1枚の干渉縞画像を用いて，計測に不要な直流成分および虚像成分を除去した．1枚の干渉縞撮影画像から抽出した実像成分より，物体光絶対位相値を算出し，デジタルホログラフィ原理を用いて，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計測法を検討した．検討の結果により，従来法と比較して，物体光絶対位相値が正確に算出したことを確認できた．さらに，計測実験結果より，構築した計測システムを用いて，鏡面反射および透明物体に対する三次元形状計測が可能である．

今後は，提案手法で算出した物体光絶対位相値および従来法で算出した物体光絶対位相値の誤差を確認したいと考えている．また，従来法より，三次元計測の高速化に関して検討したい．さらに，構築した計測システムの計測精度を確認したいと考えている．

参考文献

- [1] Schnars U, Kreis T, Juptner W : Digital recording and numerical reconstruction of holograms. Optical Engineering 34(4), pp.997-982, 1996
- [2] Yamaguchi, Zhang t: Phase-shifting digital holography. Optical letter, vol.22, no.16, pp1268-1270, 1997
- [3] Yuri Barseghyan, Hakob Sarukhanyan: Laplacian Based LF Quality Map for Phase Reconstruction. CSIT 2009