

## デジタルホログラフィによる三次元計測 3D Measurement by Digital Holography

Yu Qiyue†  
Yu Qiyue

田口 亮†  
Taguchi Ryo

梅崎 太造†  
Umezaki Taizo

保黒 政大††  
Hoguro Masahiro

堀米 秀嘉‡  
Horimai Hideyoshi

### 1. まえがき

三次元テレビなどの三次元形状出力デバイスの普及及び工業製品の不良品検査などにより、高速・高精度の三次元計測の需要が大きい。既存の三次元計測手法においては、複数の投影パターンを利用した三次元画像計測法が多い。しかし、全反射や透明の計測対象に対して、画像処理を利用した投影パターン解析が困難であるため、計測できない場合も多い。また、複数のパターンを投影するため、計測時間も長い。これらの問題点を解決するために、従来のホログラムをデジタル化したデジタルホログラフィによる三次元計測を提案してきた。デジタルホログラフィによる三次元計測では、まず、レーザを光源として使用し、CCDカメラを用いて計測対象から反射した物体光と参照光の干渉縞パターンを記録する。次に、干渉縞パターンの撮影画像を用いて、フレネル変換で物体光を再生することで計測対象の位相分布を算出する。最後に、干渉測量法により位相分布から計測対象の三次元形状を求めることで、高速・高精度の三次元計測を実現する。近年、デジタルホログラフィによる三次元計測に関する研究は盛んに行われてきたが、既存手法の多くは、位相シフト法を用いたデジタルホログラフィ三次元計測法である。この手法は参照光の位相値を調整しながら、4枚の干渉縞パターンを撮影する。また、干渉縞パターンの撮影画像を用いて、直流成分と虚像のない物体光を求めることができる。しかし、4枚の干渉縞パターンを撮影するには長い計測時間が必要である。また、参照光の位相値を調整する装置は高価であり、調整精度により、計測誤差が生じる。

### 2. 概要

本稿では、まず計測時間を短縮するために、干渉縞パターン及び参照光の強度のみ CCDカメラで記録する。次に、2枚の撮影画像を用いて、フレネル変換で物体光及び参照光の位相分布を算出する。最後に、物体光と参照光の位相分布を比較することで、物体光の位相分布を修正し、最も正確な物体光の位相分布を求める。これにより、高速・高精度のデジタルホログラフィ三次元計測法を提案する。

### 3. 基礎理論

#### 3.1 光の干渉

マクスウェル方程式より、単色の平面光を式(1)に示す。

$$E(x, y, z, t) = a \operatorname{Re}\{\exp(i(\omega t - \vec{k}\vec{r} - \varphi_0))\} \quad (1)$$

ここで、 $E(x, y, z, t)$ は平面光の複素数振幅と呼ばれ、空

間ベクトル $\vec{r} = (x, y, z)$ 及び伝播時間 $t$ における光の電場ベクトルを表わす。 $a$ は振幅であり、 $\vec{k}$ は光の伝播方向を表わす。 $\varphi_0$ は位相値である。 $\operatorname{Re}$ は複素数振幅の実部を表わす。ただし、光の干渉を解析する際に、伝播時間 $t$ は関係がないため、式(1)を式(2)に書き換えることができる。

$$A(x, y) = a \operatorname{Re}\{\exp(i\varphi(x, y))\} \quad (2)$$

ここで、 $(x, y)$ は平面光電場の座標を表わす。

光の干渉は伝播方向及び偏光方向が同一である2つの光の加算であるため、干渉光の複素数振幅を式(3)に示すことができる。

$$I = a_1 \exp(i\varphi_1) + a_2 \exp(i\varphi_2) \quad (3)$$

#### 3.2 計測対象の像の再生

干渉縞パターンの撮影画像を利用し、離散フレネル変換を用いて、計測対象の像を再生する。ここで、計測の処理時間を短縮するために、高速フーリエ変換(FFT)をフレネル変換に代入する。FFTを利用した離散フレネル変換を式(4)に示す。

$$\Gamma(m, n) = \frac{i}{\lambda d} \exp(-i\frac{2\pi}{\lambda}d) \exp\left[-i\pi\lambda d \left(\frac{m^2}{N^2\Delta x^2} + \frac{n^2}{N^2\Delta y^2}\right)\right] \times F^{-1}\left\{A_R(k, l)h(k, l) \exp\left[-i\frac{\pi}{\lambda d}(k^2\Delta x^2 + l^2\Delta y^2)\right]\right\} \quad (4)$$

ここで、 $\Gamma(m, n)$ は再生した計測対象の像の複素数振幅を表わし、 $(m, n)$ は再生像の平面座標を表わす。 $h(k, l)$ は開口関数を表わし、デジタルホログラフィにおいては、干渉縞パターンの撮影画像となる。 $(k, l)$ は撮影画像の画像座標を表わす。 $N$ は開口関数のサンプリング点数である。 $\Delta x$ 及び $\Delta y$ は CCD センサ上素子間の距離を表わす。 $A_R(k, l)$ はデジタル化した参照光の複素数振幅である。 $\lambda$ 及び $d$ は使用したレーザの波長及び CCD センサ平面と再生像平面間の距離を表わす。式(4)により、再生像の光強度を式(5)に示す。

$$I(m, n) = |\Gamma(m, n)|^2 \quad (5)$$

再生像上の位相分布を式(6)に示す。

$$\varphi(m, n) = \arctan \frac{\operatorname{Im}[\Gamma(m, n)]}{\operatorname{Re}[\Gamma(m, n)]} \quad (6)$$

$\operatorname{Re}$ は実部を表わし、 $\operatorname{Im}$ は虚部を表わす。

### 4. 計測実験

図 1 に示す計測装置を用いて、透明の平凸レンズを対象

†名古屋工業大学 ††中部大学

‡(社) HolyMine

にした計測実験をした。図 1 より、波長が 632.8 [nm]の He-Ne レーザを使用した。干渉縞を記録する際に、まず、ビームエキスパンダを利用して、レーザビームの直径を 14 [mm]に拡大し、ビームスプリッタ 1(BS1)に照射する。次に、ビームスプリッタ 1により、レーザ光は 2つの光束に分割される。1つの光束は平面ミラーから反射され、計測対象を透過し、物体光になる。もう1つの光束は平面ミラーの反射によりビームスプリッタ 2(BS2)に照射され、参照光になる。参照光及び物体光はビームスプリッタ 2(BS2)を透過して干渉する。最後に、CCD カメラを用いて、干渉縞パターンを撮影する。本稿では、使用した CCD センサ素子間の距離 $\Delta x$ 及び $\Delta y$ は 4.4 [ $\mu\text{m}$ ]であり、撮影画像の横方向及び縦方向のサンプリング点数 $N$ は 2048 である。

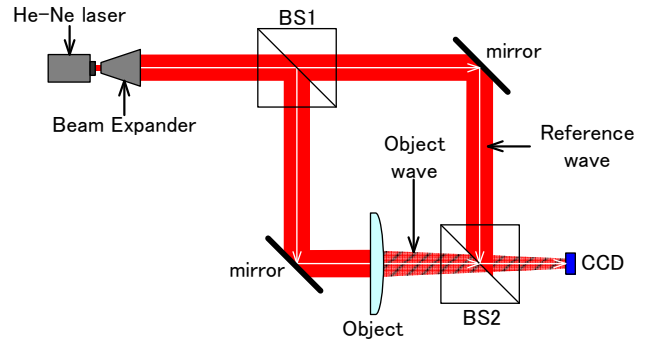
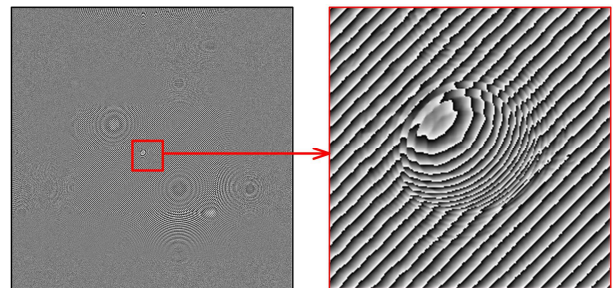


図 1 計測装置の概念図

4.1 位相比較の結果

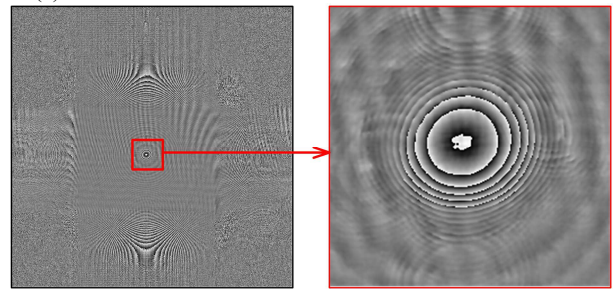
式(4)より、干渉縞パターンの撮影画像を用いて、計測対象の再生像の複素数振幅を求めることができる。また、式(6)を用いて、再生像の位相分布を算出することができる。算出した再生像の位相分布を図 2(a)に示す。図 2(a)より、再生像の位相分布において、斜めの位相変化が存在することを確認した。斜めの位相変化を除去し、正確な再生像位相分布を取得するために、参照光のみ撮影し、式(4)を用いて参照光の位相分布を算出した。また、再生像及び参照光の位相分布を差分処理することで、位相分布を比較し、正確な再生像位相分布を求めた。求めた正確な再生像位相分布を図 2(b)に示す。



(a) 斜めの位相変化が存在する計測対象の位相分布

4.2 位相連結処理及び計測結果

図 2(b)より、再生像の位相値は $[-\pi, \pi]$ 区間で変化するため、位相連結処理が必要であることを確認した。本稿では、Quality Map 法を用いて再生像の位相分布を連結した。連結した位相分布を図 3(a)に示す。



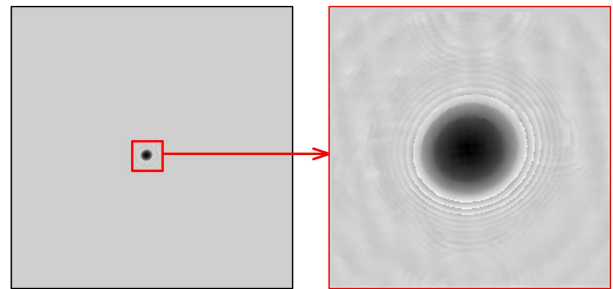
(b) 位相比較で修正した計測対象の位相分布

連結した位相分布を用いて、式(7)で計測対象の三次元形状を算出した。

$$X = \frac{\lambda d}{N\Delta x} m \quad Y = \frac{\lambda d}{N\Delta y} n \quad Z = \varphi \frac{\lambda}{2\pi} \quad (7)$$

ここで、 $X, Y, Z$ は計測対象形状の世界座標を表わす。

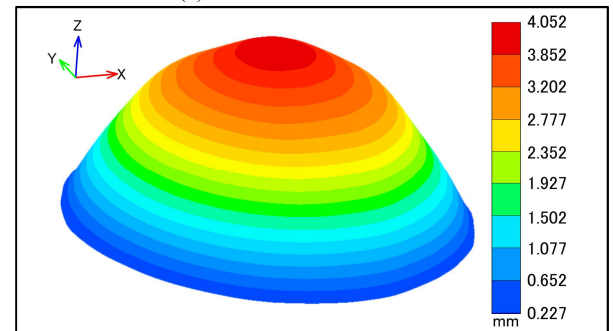
算出した平凸レンズの三次元形状を図 3(b)に示す。このことにより、デジタルホログラフィによる三次元法を用いて、透明物体の三次元形状計測が可能であることを確認した。また、1.8GHz Core i7のCPU及び4GBのメモリで構成したコンピュータを使用した場合、計測処理時間は 2 [s]であることも確認した。このことから、高速の三次元計測が可能であると考えられる。



(a) 位相連結処理の結果

5. まとめ

本稿では、デジタルホログラフィの原理を利用した新たな三次元計測手法を提案した。He-Ne レーザを光源として使用し、CCD カメラを用いて物体光と参照光の干渉縞パターンを記録した。計測対象の三次元形状を取得するために、干渉縞パターンの撮影画像を使用して、高速化したフレネル変換で計測対象の再生像を算出した。再生像より算出した位相分布を参照光の位相分布と比較することで計測対象の位相分布を修正し、Quality Map 法で連続的な位相分布を求めた。計測実験の結果から、デジタルホログラフィによる三次元計測法を用いて、透明物体の高速三次元形状計測が可能であると考えられる。



(b) 取得した平凸レンズの三次元形状

図 3 位相連結処理及び計測実験の結果