207 DMD を用いた実時間形状計測手法の開発

Real-time Shape Measurement Method Using Digital Micro-mirror Device

○高 齋(和歌山大院) 正 藤垣元治(和歌山大) 正 森本吉春(和歌山大)
Qian GAO*, Motoharu FUJIGAKI** and Yoshiharu MORIMOTO**

*Graduate school of Systems Engineering, Wakayama University, Sakaedani 930, Wakayama

**Faculty of Systems Engineering, Wakayama University

Keywords : Shape measurement, Real-time, Digital micro-mirror device, Correlation, Phase-shifting method

1. はじめに

非接触で三次元形状計測を行う方法として、物体に投影された格子のゆがみを解析する方法がよく用いられている。物体に等ピッチの格子を投影し、別の方向からテレビカメラで撮影すると、物体の形状に応じてゆがんだ格子画像が得られる。モアレボグラフィ⁽¹⁾の手法を用いれば、このゆがんだ格子画像から簡単な画像処理で物体の等高線画像を得ることができる。等高線の位相分布を実時間で求めることができれば、実時間形状計測を実現することができる。

我々はこれまでに等高線の位相分布を求める手法として、相関位相シフト法⁽²⁾と積分型位相シフト法⁽³⁾を開発してきた。しかし、これらの手法は投影格子の位相をシフトしながら複数枚の画像を撮影する必要があり、時間とともに形状が変化する物体に対しては誤差が大きくなるという問題がある。

そこで本研究では、DMD(Digital Micro-mirror Device)を利用することによって、カメラの撮影時間である1/30秒間で位相分布を得ることのできるDMD積分型相関位相シフト法を新たに開発する。デジタルマイクロミラーデバイス(DMD)は数十～百万個の微細なミラーの向きを高速に自由に変わることができる新しい光学素子である⁽⁴⁾。本手法ではDMDとCCDを組み合わせることによって、CCDの画素ごとに高速に制御できるシャッター機能を持つDMD反射式CCDカメラを開発する。そのシャッター機能を利用することによってCCDカメラの各画素の輝度値をシャッターが開いている時間の輝度の時間積分値として得ることができる。得られた輝度から相関位相シフト法により格子の位相値を求める。この手法を積分型相関位相シフト法と呼ぶ。ここでは、まず、積分型相関位相シフト法の算出原理を述べる。次にDMDを用いた積分型相関位相シフト法のアルゴリズムをシミュレーションにより確認する。

2. DMD 反射式 CCD カメラ

図1にDMDの基本動作を示す。DMD画素は16 μ m角の微小な平面鏡であり、信号により2方向に向きを変えることができる。DMDは、縦横にDMD画素が並べられた構造をしている。画素の数は縦横にそれぞれ数百～1千画素程度のものが作られている⁽⁴⁾。図1ではDMD素子を側面から見た図を画素数を減らして模式的に示している。

図1において、各DMD画素は、入力されるon/off信号に応じて、onの時は下向き角度10度でoffの時は上向き角度10

Fig. 1 Reflected pattern by DMD

Fig. 3 Image obtained by DMD reflection-type CCD camera

度となるように向きを変える。ここではDMD正面からの入射光に対するonの時の反射光の向きをDMD反射角と呼ぶことにする。DMD正面から入射した光は、DMD画素の向きに応じて上方向または下方向に反射される。したがって、入射光のうち、一部分だけをon/offパターン信号によって選択的に取り出すことができる。

図2にDMD反射式CCDカメラの構成を示す。撮影対象物体の像をレンズ1によってDMD素子表面に結像させる。このとき、DMDとレンズ1のレンズ面は互いに平行になるように配置する。DMD表面の各DMD画素には、結像の位置関係となる対象物体表面の1点から出た光が到達することになる。次に、DMDの表面とCCD表面が結像の位置関係となるようにレンズ2を配置する。このとき、DMDとCCD、レンズ2のレンズ面は互いに平行になるように配置し、さらに、DMDの1画素とCCDの1画素が対応するように倍率を選び、DMD反射角のあおりをつけた光学系となるようにする。このように配置することによって、onの信号を受けているDMD画素に到達した光は、CCD方向に反射され、レンズ2によってCCDの対応する画素に結像することになる。すなわち、撮影対象物体の像は、いったんDMD表面に結像し、onになっているDMD画素で反射されて再度CCD表面に結像することになる。

図3に、撮影対象が図3(a)に示すようなパターンの場合のDMDのon/offパターンと撮影される画像の関係を示す。まず、DMD画素が全てonの場合は、撮影対象の像がそのままCCDで撮影される。逆にDMD画素が全てoffの場合は、CCDには何も撮影されない。次に、図3(b)に示すように一部のDMD画素がonで他がoffの場合は、図3(c)に示すようにoffの画素だけ撮影されず、onの画素は撮影されることになる。

3. 積分型相関位相シフト法の算出原理

本手法では矩形波状の輝度分布を持つ格子を用いる。図4(a)に、撮影対象物体上にある1点における投影格子の位相シフト量と輝度の関係を示す。これは格子の初期位相が ϕ の場合の輝度変化である。この輝度変化に図4(b)、(c)に示すような重み関数 f_0 と f_1 を掛け、それぞれ式(1)、(2)に示す積分を行うことにより、相関係数 S_0 と S_1 を得る。

Fig. 4 Phase-shifting method using correlation

$$S_0(\phi) = \int_0^\pi g(\alpha + \phi) \cdot f_0(\alpha) d\alpha$$

$$= \int_0^\pi g(\alpha + \phi) d\alpha - \int_{\frac{\pi}{2}}^\pi g(\alpha + \phi) d\alpha + \int_{\frac{3\pi}{2}}^{2\pi} g(\alpha + \phi) d\alpha \quad (1)$$

$$S_1(\phi) = \int_0^\pi g(\alpha + \phi) \cdot f_1(\alpha) d\alpha$$

$$= \int_0^\pi g(\alpha + \phi) d\alpha - \int_{\frac{\pi}{2}}^\pi g(\alpha + \phi) d\alpha \quad (2)$$

このようにして得られた S_0 と S_1 と格子の初期位相 ϕ との関係は式(3), (4)のようになる。

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

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

これをグラフに示したものを図 4(d)に示す。式(3), (4)から次式(5)が得られる。

$$I_1 - I_0 = (|S_0| + |S_1|) / \pi \quad (5)$$

更に、式(5)を式(3), (4)に代入すると、次式が得られる。

$$\phi = \begin{cases} \left(1 - \frac{S_0}{|S_0| + |S_1|}\right) \cdot \frac{\pi}{2} & (0 \leq \phi < \pi) \\ \left(3 + \frac{S_0}{|S_0| + |S_1|}\right) \cdot \frac{\pi}{2} & (\pi \leq \phi < 2\pi) \end{cases} \quad (6)$$

ここで図 4(d)を見ると、次式の関係が成り立つ。

$$\frac{S_1}{|S_1|} = \begin{cases} -1 & (0 \leq \phi < \pi) \\ +1 & (\pi \leq \phi < 2\pi) \end{cases} \quad (7)$$

式(7)を式(6)に代入すると、位相値 ϕ が得られる。

$$\phi = \left\{ 2 + \frac{S_1}{|S_1|} + \frac{S_0 - S_1}{(|S_0| + |S_1|) \cdot |S_1|} \right\} \cdot \frac{\pi}{2} \quad (8)$$

これにより図 4(a)における格子の初期位相 ϕ を求めることができる。さらに得られた位相値 ϕ から変形前の位相値 ϕ_0 を引くことにより、モアレじまの位相分布(等高線を表す)を得ることができる。その例を図 5 に示す。図 5(a)は、試料に投影された矩形波状格子の画像である。位相シフト回数は1ピッチあたり32回とする。図 5(b)に、相関位相シフト法によって得られた位相分布を示す。

4. DMD への適用とシミュレーションによる確認

まず、DMD 積分型相関位相シフト法のアプローチを示す。式(1)右辺におけるプラス項(第1項と第3項)を S_{0+} 、マイナス項(第2項)を S_{0-} とし、さらに、式(2)右辺におけるプラス項(第1項)を S_{1+} 、マイナス項(第2項)を S_{1-} とすると、式(1)と式(2)はそれぞれ式(9)と式(10)のように表すことができる。

$$S_0 = S_{0+} - S_{0-} \quad (9)$$

$$S_1 = S_{1+} - S_{1-} \quad (10)$$

この四つの項を各画素ごとに求める。本手法では図 6(a)に示すように、CCD カメラの各4画素にこの四つの項を配列する。図 6(b)に図 6(a)において S_{0+} が撮影されるある1画素とそ

(a) Projected Grid

(b) Phase

Fig. 5 Phase analysis by phase-shifting method using correlation

(a) Arrangement of S_{0+} , S_{0-} , S_{1+} and S_{1-} on image

(b) Calculated method of S_0 and S_1 at pixel (i, j)

Fig. 6 Calculated method of S_0 and S_1

の周辺の画素の拡大図を示す。この画素における S_0 と S_1 の値は、それぞれ周辺画素の輝度値を使った式(13)と式(14)のように求める。

$$S_0(i, j) = S_{0+}(i, j) - \frac{S_{0-}(i-1, j) + S_{0-}(i+1, j)}{2} \quad (13)$$

$$S_1(i, j) = \frac{S_{1+}(i, j-1) + S_{1+}(i, j+1)}{2} - \frac{S_{1-}(i-1, j-1) + S_{1-}(i+1, j-1) + S_{1-}(i-1, j+1) + S_{1-}(i+1, j+1)}{4} \quad (14)$$

撮影される輝度が S_{0+} 以外の画素についても同様の計算式で S_0 と S_1 を求めることができる。この手法を用いれば、CCD カメラの1フレームで、すなわち1/30秒で画素ごとの位相値を求めることができる。

この DMD 積分型相関位相シフト法のアプローチを用いて行ったシミュレーションの結果を図 7 に示す。図 8 に図 5(b)で示した相関位相シフト法によって得られた位相値との差の分布を示す。四角で囲った内部の標準偏差は 0.0017π で、偏差の最大値は 0.025π である。この結果により、このアプローチが有効であることがわかる。

Fig. 7 Phase distribution calculated by DMD correlation phase-shifting method by simulation

Fig. 8 phase difference distribution between Figs. 5(b) and 7

5. おわりに

本研究ではシミュレーションによって DMD 積分型相関位相シフト法のアプローチが有効であることが確認できた。今後は高速に DMD をコントロールできる装置を製作し、実時間で等高線の位相値を表示するシステムを開発する。

参考文献

- (1) Takasaki, H.: Moire Topography, Applied Optics, 9-6(1970), 1467-1472.
- (2) Fujigaki, M. and Morimoto, Y., Accuracy of Real-Time Shape Measurement by Phase-Shifting Grid Method Using Correlation, JSME International Journal, Series A, Vol. 43, No. 4, 314-320(2000).
- (3) 藤垣元治, 森本吉春: 積分型位相シフト法による実時間形状計測, 第4回知能メカトロニクスワークショップ講演論文集, 精密工学会, (1999), 102-105.
- (4) Hornbeck, L. J.: Digital Light Processing for High-Brightness, High-Resolution Applications, Proc. of SPIE, 3013(1997), 27-40.