研究論文

デジタル PLL を用いたしま画像からの 実時間形状復元処理*

志沢雅彦** 加藤純一*** 大園成夫*** 高増 潔†

A Real-time Profile Restoration Method from Fringe Patterns
Using Digital Phase-Locked Loop

Masahiko SHIZAWA, Junichi KATO, Shigeo OZONO and Kiyoshi TAKAMASU

A real-time method is developed for measuring 3-dimensional profiles from fringe patterns generated by moiré-topography or a deformed grating method. This paper presents theoretically relationship between object shapes and phases of fringes. It also describes the construction of an experimental system which uses a Digital Phase-Locked Loop (DPLL) circuit. Furthermore, experimental results that confirm the DPLL circuit's performance are reported. In the system, a video-camera scans the fringe patterns across the array of fringe stripes. The video signal has a sine-wave form. The low frequency component of the wave is eliminated by a high-pass filter and its output is digitized by an A/D converter. The phase restoration of the digital signal is performed by the DPLL circuit. The obtained phase signal is proportional to relative distance between the camera and the object. Then the phase signal is converted into analog signal by a D/A converter and the results are displayed as gray-level images on a CRT monitor and also as perspective diagrams on an oscilloscope. An exact profile of the object can be obtained at the video-rate with this method.

Key words: real-time profile restoration method, fringe patterns, moiré-topography, deformed grating method, digital phase-locked loop

1. 緒 言

モアレトポグラフィ（以下、モアレ法）に代表される非接触の3次元形状計測の方法¹⁾では、出力画像のしまが持つ2次元位相情報として形状が得られる。このしま画像から測定対象物体の3次元形状を高速に復元する技術は、リモートセンシング及びロボットのための3次元形状計測に有用である。この形状復元処理の自動化は、ソフトウェア・ハードウェアによる画像処理技術として各種試みられている^{2)~4)}。しかし、従来の方法はいずれも静止画を対象にしたものであり、高速な応答が必要とされる用途には適用できなかった。例えば、デジタル画像処理技術を用いてしまの位置・パターンを検出することにより形状を復元する方法では、その高速化は大規模なハードウェアの力に

頼らざるをえない⁵⁾。また、1次元複素 Fourier 変換・逆変換を用いて、しまの位相を求め、形状を復元する方法⁶⁾⁷⁾では、FFT アルゴリズムによるハードウェアを用いることによってある程度的高速化が可能であるが、ビデオカメラからの映像信号を直接処理できるほどに高速化することは困難である。本研究では、モアレ法や変形格子法の画像が、ある空間キャリアを測定対象の形状によって位相変調した形になっていることに注目し、Digital Phase-Locked Loop(以下、DPLL)を用いてビデオカメラの映像信号から実時間で3次元形状を復元することを試みた。以下では、まず、モアレ法、及び、変形格子法による画像をビデオカメラから取り込んだ時の映像信号の波形と測定対象の形状との関係、及び、DPLLによる形状復元の原理について述べる。更に、試作した実験システムと評価実験について述べる。

2. 原 理

2.1 測定対象面の形状としまの位相の関係

図1に格子投影型モアレ法の光学系模式図を示す。光源、シリンドリカルレンズ CL、格子 G₁、投影側レ

* 原稿受付 昭和61年4月14日、昭和60年度精機学会秋季大会学術講演会（昭和60年10月15日）および昭和61年度精密工学会春季大会学術講演会（昭和61年3月28日）にて発表

** 正 会 員 日本電信電話(株)（横須賀市武1-2356）

*** 正 会 員 東京大学工学部（東京都文京区本郷7-3-1）

† 正 会 員 東京電機大学（東京都千代田区神田錦町2-2）

Fig. 1 Optical system schematic for moiré topography and the deformed grating method

レンズ L_1 から成る格子投影系から照射された光は測定対象の表面上に格子像を結ぶ。表面の形状により変形された格子像は撮影側レンズ L_2 を通じて格子 G_2 面に結像する。この像を CCD カメラにより撮像しビデオ信号に変換する。格子 G_2 を取り外すことにより変形格子像を撮像することができる(変形格子法)。以下、図 1 に示すようにレンズ L_2 の中心を原点 O とし、 x 軸はレンズ L_2 からレンズ L_1 の中心を通る直線、 y 軸は、レンズ L_1 と L_2 がつくる面内で、 x 軸に対して垂直な方向の直線、 w 軸は、レンズ L_2 から測定対象の方向を向いているものとする。

モアレ法においては、図 1 のように物体側結像面を w 軸との交点 O_s を固定して y 軸回りに θ 回転したものを測定基準面とし、測定対象面上の点の w 座標値が x 方向の走査に対して単調増加するようにして測定対象面の凹凸の決定を避けた。

以下、測定対象面の形状とモアレ法および変形格子法により得られるしま画像との関係を示す。

測定対象面上の点を $Q(x, y, w)$ とし、測定対象面を次式で表す。

$$w(x, y) = x \tan \theta + r(x, y) \quad (1)$$

ここで、 $r(x, y)$ は、測定対象面の形状を表す。CCD カメラにより撮像される像は、 G_2 面上に結像した像であり、この像は、物体側結像面上に投影される像と相似である。測定表面上の点 $Q(x, y, w)$ を撮影側光学系に関して物体側結像面に投影した点を $Q'(x_f, y_f, D)$ と

する。測定基準面と w 軸との交点 O_s を原点とし基準面上に $x_s y_s$ 面をもつ座標系 (x_s, y_s, z_s) と実際に観測される x_f, y_f, r との関係は次式で表される。

$$\left. \begin{aligned} x_s &= R(x_f \cos \theta + D \sin \theta) - D \sin \theta \\ y_s &= R y_f \\ z_s &= R(-x_f \sin \theta + D \cos \theta) - D \cos \theta \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

ただし、 $R = r(x_f, y_f) / (D - x_f \tan \theta)$ 。

したがって、 $r(x_f, y_f)$ が得られれば測定対象面の形状を求めることができる。

物体側結像面での光強度 $I(x_f, y_f)$ は次式で表される。

$$I(x_f, y_f) = I_0(x_f, y_f) \times [1 + \gamma \cos \{2\pi(f_0 x_f + \alpha(x_f, y_f))\}] \quad (3)$$

ここで、 $I_0(x_f, y_f)$ は光路長および物体表面の反射率の変化による光強度の変化を表す。また、 f_0 は撮像されるしま画像の x 軸方向のキャリア空間周波数、 $\alpha(x_f, y_f)$ はその位相変調項、 γ は定数で、モアレ法の場合 $\gamma = 1/2$ 、変形格子法の場合 $\gamma = 1$ である。厳密には、 f_0 は $r(x_f, y_f)$ によって変化し、 $\alpha(x_f, y_f)$ と $r(x_f, y_f)$ は非線形の関係にある。しかし、本研究では、 $r(x_f, y_f)$ の変化範囲が十分小さいと仮定し、 f_0 は定数で、 $\alpha(x_f, y_f)$ と $r(x_f, y_f)$ は線形の関係にあるとみなした。

しま画像から、 $\alpha(x_f, y_f)$ を求めれば、式 (2) により、測定対象面の形状が(絶対位置を表す定数項を除いて)求められる。

2.2 ビデオ信号波形との関係

撮像系の CCD カメラをその走査線の方が x 軸方向に一致するように設置すると、しま画像のビデオ信号出力は正弦波状の波形になる(図 2)。この波形は、式 (3) に対応する次式によって表される。

$$E(t) = A(t, y_v) + B(t, y_v) \times \cos[2\pi\{f_0 t + \alpha(t, y_v)\}] \quad (4)$$

ここで、 y_v は画面上での垂直座標、 t は時間、 $A(t, y_v)$ は画面全体の濃度むら、 $B(t, y_v)$ はコントラストのむら、 f_0 は画面内におけるしまのキャリア空間周波数である。 $A(t, y_v)$ 、 $B(t, y_v)$ の変化は $\cos$ 項の変化に比べて十分ゆるやかである。また、 f_0 は f_0 とシステムに依存する定数を掛けた値になる。

$E(t)$ から $\alpha(t, y_v)$ を求めるために、まず、ハイパスフィルタにより $A(t, y_v)$ の成分を取り除き、次に DPLL による位相検波を行い $\alpha(t, y_v)$ を求める方法を試みた。

図 3 は PLL の原理図である⁸⁾。PLL は、入力信号 $v(t)$ の大きさにより発振周波数が変化する発振器 VCO (Voltage-Controlled Oscillator) をもつ。PLL に入力

Fig. 2 Video signal output of TV camera

Fig. 3 Rough sketch of PLL signal processing

された信号 $i(t)$ は、位相比較器において VCO の出力信号 $s(t)$ と乗算される。位相比較器の出力 $\theta(t)$ は各入力信号の周波数差と周波数和の信号成分が含まれているので、ローパスフィルタにより高周波成分である周波数成分を減衰させる。その出力 $v(t)$ は VCO に入力される。VCO では、入力信号 $v(t)$ に対して $f_0 + gv(t)$ の周波数の正弦波を出力する。この正弦波 $s(t)$ はふたたび位相比較器により入力信号 $i(t)$ と比較される。このように、PLL はフィードバックループを形成している。同期後の定常状態では入力信号の瞬時周波数と VCO の瞬時発振周波数は同一である。つまり、入力信号に変調がかかった場合、信号 $v(t)$ は、入力信

Fig. 4 Diagram of phase restoration apparatus for experiment

号の瞬時周波数とキャリア周波数の差になるので、 $v(t)$ を積分することにより、復調された位相信号 $\omega(t)$ を求めることができる。

この PLL を使って図 2 の波形を 1 走査線ごとに処理すれば、実時間、すなわち、ビデオレートで、 $\alpha(t, y_v)$ に相当する信号 $\omega(t)$ を求めることができる。

3. 実験装置

3.1 DPLL 信号処理装置

図 4 に、本装置の構成をブロック図で示す。まず、CCD カメラからのビデオ信号を同期分離回路により映像信号と同期信号に分離する。映像信号は、ハイパスフィルタを通してから、A/D 変換部によりデジタル化され、DPLL 信号処理部に入力される。同期信号は内部クロックを作るために使用される。

図 5 は DPLL 信号処理部の構成である。信号処理回路の処理過程を示す差分方程式を次に示す。

$$\theta(nT) = i(nT)s((n-1)T) \quad (5)$$

$$v(nT) = \theta((n-1)T) + kv((n-1)T) \quad (6)$$

$$\omega(nT) = gv((n-1)T) + \omega((n-1)T) \quad (7)$$

$$\phi(nT) = c + \phi((n-1)T) \quad (8)$$

$$\phi(nT) = \omega(nT) + \phi(nT) \quad (9)$$

$$s(nT) = \sin\{\lambda\phi(nT)\} \quad (10)$$

($t = nT$, n はクロックカウンタ, T はクロック周期, λ は定数)

ここで、図 5 に示す通り、 $\theta(nT)$ は位相比較器の出力、 $i(nT)$ は A/D 変換部からの入力、 $s(nT)$ は sin 発生器の出力、 $v(nT)$ はループフィルタの出力、 $\phi(nT)$ は sin 発生器の入力、 $\phi(nT)$ はキャリア位相発生器の出力、 $\omega(nT)$ は復調信号出力である。式 (5)

(a) Input image (stripe image)

(a) Input image (stripe image)

(a) Input image (stripe image)

(b) Output image (shaded image)

(b) Output image (shaded image)

(b) Output image (shaded image)

(c) Output image (perspective image on oscilloscope)

8rad/div

(c) Output image (perspective image on oscilloscope)

16rad/div

(c) Output image (perspective image on oscilloscope)

8rad/div

Fig. 7 Experimental results of test object [1]**Fig. 8** Experimental results of test object [2]**Fig. 9** Experimental results of test object [3]

各透視図の縦軸は位相変化量で、位相と実際の距離との関係は変形格子法で 2.3 mm/rad 、モアレ法で 0.35 mm/rad である。

5. 検 討

変形格子法による結果(図7~図9)では、格子の空間周波数に比較して高い周波数のノイズ(高周波ノイズ)と、格子の空間周波数と同一か、あるいはその半分の周波数のノイズ(低周波ノイズ)が存在する。高周波ノイズは、矩形格子の高周波成分が出力に表れたものと考えられる。対策としては、正弦格子を使用するか、あるいは、DPLL回路の入力の前にローパスフィルタを置くことが考えられる。また、低周波ノイズは、A/D変換の際のサンプルクロックが1走査線当たり160サンプル(1しきあたり約4サンプル)としきの空間周波数に比較して低いために、モアレを生じた結果と考えられる。一方、モアレ法による結果(図10)では、原画像のしきが正弦波に近いので、高周波ノイズは観察されないが、変形格子法の場合と同様に低周

波ノイズが存在する。本装置では、原理の確認という目的からDPLLの演算素子に、TTLロジック素子(加算器、レジスタ)およびEPROMによるルックアップテーブル(乗算器、sin関数発生器)を使用したもので、これ以上の演算速度を得ることができない。実用的には、しきの空間周波数の8倍以上のサンプル周波数が必要であると考えられる。

また、図10のモアレ法の結果において凹みの右端から画像が乱れている。これは、DPLLが同期外れを起こしているためである。この原因は、原画像の右側でしきのコントラストが低いために凹みの右端の位相変化が大きい位置で入力信号に追従できないためと考えられる。また、DPLLの入力信号に対する追従性は、入力信号の振幅が大きくS/Nが良いほど良好になる。入力信号の振幅およびS/Nは、物体の表面性状(反射率の変化によるしきのコントラストのむらなど)によって影響を受ける。一方、DPLLでは、演算レンジが語長によって制限されるので、演算レンジを有効に使うことが望ましい。したがって、DPLLの前段階

(a) Input image (stripe image)

(b) Output image (shaded image)

32rad/div

(c) Output image (perspective image on oscilloscope)

Fig. 10 Experimental results of test object [4]

で、AGC (Automatic Gain Control) などを入力信号の振幅をそろえることにより、DPLL の追従性を改善できると考えられる。

PLL の原理から、同期外れが発生しないかぎり、しまの位相に換算して π rad 以上の誤差は生じない。したがって、変形格子法による実験では 5 mm、モアレ法による実験では 2.5 mm が奥行き方向の分解能 (最悪値) である。精度は、主に光学系の精度と DPLL 信号処理装置の演算精度に関係している。光学系の誤差は奥行きとしまの位相との間の非線形性によるものが多いと考えられる。これは、図 9、図 10 の (c) において、底面のたわみに現れている。変形格子法 ($\theta=0^\circ$) では式 (2) の関係が線形である。したがって、図 9 での底面のたわみは主として α と r との非線形関係によると考えられる。モアレ法 ($\theta=20^\circ$) の場合は、式 (2) は非線形になる。したがって、結果に現れている底面のゆがみは主に式 (2) の非線形関係と、 α と r との非線形関係によると考えられる。この内、式 (2) の非線形性によるゆがみは、式 (2) の座標変換回路を加えれば取り除くことができる。

DPLL 信号処理装置の誤差は、入力信号の S/N 比・

強度・周波数変化範囲、パラメータの設定値、サンプル周波数等に関係するので、一概には表せない。しかし、分解能と同様に、 π rad 以上の誤差は原理的に発生しない。今後、入力条件が与えられたときの DPLL の誤差を検討する必要がある。

また、本実験では、処理結果を D/A 変換して濃淡画像と透視図を出力しているが、これをフレームメモリに書き込む構成にすれば、計算機への入力になる。本装置の出力は、物体の形状を直接に表現しており、しかもビデオレートで処理できるので、高速応答が必要な用途に使用する際にその有効性を発揮する。

6. 結 論

- (1) モアレトポグラフィにより得られるしま画像と変形格子法による格子像に関して、しまの位相が測定対象物の形状に関係することを利用して、奥行き方向の距離を求める方法を示した。
- (2) ビデオカメラからの入力映像信号を実時間で位相情報に変換するための、DPLL を使用したしまの位相検出方法を提案した。
- (3) DPLL によって復元した 3 次元形状を濃淡画像と透視図により表示するハードウェアを試作し、テストオブジェクトを使用した評価実験によりその動作を確かめ、本方法の有効性を確認した。最後に、モアレカメラを提供していただいた富士写真光機機の鈴木正根氏に心から謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) 例えば、H. Takasaki: Moiré Topography; From its Birth to Practical Application, Optics and Lasers in Engineering, 3, 3, (1982) 3.
- 2) 谷田貝豊彦: 縞画像の解析と処理, 光学技術コンタクト, 20, 9 (1982) 18.
- 3) T. Yatagai and M. Idesawa: Automatic Fringe Analysis for Moiré Topography, Optics and Lasers in Engineering, 3, 3, (1982) 73.
- 4) P. O. Varman: A Moiré System for Producing Numerical Data of the Profile of a Turbine Blade Using a Computer and Video Store, Optics and Lasers in Engineering, 5, 5, (1984) 41.
- 5) 上田照夫: マイクロコンピュータ制御実時間モアレトポグラフィ計測装置, 電子通信学会論文誌, J 61-D, 5(1978) 299.
- 6) M. Takeda, H. Ina and S. Kobayashi: Fourier-Transform Method of Fringe-Pattern Analysis for Computer-Based Topography and Interferometry, J. Opt. Soc. Amer., 72, 1, (1982) 156.
- 7) M. Takeda and K. Mutoh: Fourier Transform Profilometry for the Automatic Measurement of 3-D Object Shapes, Appl. Opt., 22, 24, (1983) 3977.
- 8) 例えば、畑 雅恭, 古川計介: PLL-IC の使い方, 産報出版 (1976).