液晶格子パターン投影による 3 次元形状計測*

—ストライプ型液晶格子の開発—

山谷 謙** 山本将之*** 藤田宏夫† 勝呂 彰††
大谷幸利*** 諸川 滋†† 吉澤 徹***

Three-dimensional Shape Measurement by LC Grating Pattern Projection Method
—Development of Striped Liquid Crystal Grating—

Ken YAMATANI, Masayuki YAMAMOTO, Hiroo FUJITA, Akira SUGURO,
Yukitoshi OTANI, Shigeru MOROKAWA and Toru YOSHIZAWA

This paper describes a key device for measuring three-dimensional surface profiles using grating projection method. In this system a structured pattern is projected onto the object and the pattern deformed in accordance with the surface shape is captured by a CCD camera. And the captured image is analyzed to get three-dimensional coordinates of the surface on the basis of phase shifting technique. A special grating is built-up which consists of an active-controlled liquid crystal (LC) aligned as stripes. This LC grating has the performances of 4bits gray levels and 50 micrometers of period. Experimental results are gotten by using this LC grating and improved driving method.

Key words: pattern projection method, phase shifting technique, striped liquid crystal grating, pulse-width modulation control, frame rate control

1. 緒 言

物体の 3 次元形状を非接触で計測する方法の 1 つとして、格子パターン投影法^{1)~3)}がある。格子パターン投影法は非常に優れた手法であるが、計測物体の大きさや表面の凹凸に応じて最適のピッチの格子パターンが必要であり、また、位相シフト法を適用するためには投影する格子の透過率分布が正弦状であるという前提がある。さらには、格子のピッチを変更したり、シフトするには機械的移動よりは電気的移動が望まれていた。

そこで、我々は格子パターン投影法で用いられてきた従来の実体格子に代わり、液晶を用いた格子を利用することを検討してきた⁴⁾。近年、液晶に関する技術開発の進展は目覚ましく、多くの AV 用液晶ディスプレイが製品化されている。しかし、これらの液晶をディスプレイ機器用として利用するのではなく、計測に利用することができれば、その応用範囲も広がると考えられる。液晶を利用してパターン投影法に適した格子を作れば、

1. 計測物体の大きさや表面の凹凸にあわせて任意に格子ピッチを変えることができる
 2. 格子自身を機械的に移動させるのではなく、液晶格子パターンを電気的に移動させることが可能となり、可動部なしにスピーディな操作が可能となる
- といった特徴を持つシステムを形成しうる。

従来も、液晶を利用した格子パターン投影法が幾つか報告されているが、既存のプロジェクタ用の液晶を取り外すなどして利用しているため、格子パターン投影法で必要となる正弦的な光強度分布を持つ格子パターンを作成できているとは言えない。

そこで本論文では、液晶格子を用いた格子パターン投影法として、従来の液晶格子の問題点について検討した上で新たにストライプ型液晶格子を提案し、試作を行った⁵⁾。さらに格子パターンを作成する際、従来の駆動方法では正確な正弦格子を作成することができないため、駆動ドライバについても新しい方法を適用した駆動ドライバを製作し⁶⁾、実際に計測を行った。

2. 計 測 原 理

格子パターン投影法では、直線状の格子模様からなる基準パターンを物体に投影する。このパターンは投影方向とは別の方向より観察すれば、物体表面形状に応じて変形したパターン(いわゆる変形格子像)を観察することができる⁷⁾。この変形の具合から、3 次元座標の算出を行うが、さらに、測定における横分解能の向上を目的として位相シフト法⁸⁾もあわせて導入する。

2.1 格子パターン投影法

図 1 に計測を行うための光学系を示す。ここでピッチ P の正弦状の透過率分布をもつ格子パターンを作成し、計測対象上に投影する。計測対象上に投影された格子パターンはその物体表面の凹凸に応じて変形する。この変形格子像を投影方向とは別の方向より CCD カメラを用いて取り込む。この CCD カメラの結像面上の点 $i(x, y)$ で得られる値 $T(X, Y, Z)$ は次式となり、変形したパターンの位相 $\phi(x, y)$ と対応関係を持つ。

* 原稿受付 平成 12 年 9 月 28 日

** 学生会員 東京農工大学大学院 (小金井市中町 2-24-16)

*** 正 会 員 東京農工大学工学部

† 正 会 員 シチズン時計 (株) 技術研究所 (所沢市下富 840)

†† シチズン時計 (株) 技術研究所

$$\begin{cases} X = \frac{e - a + ab}{\alpha + e/w} \\ Y = -\frac{\sqrt{(b-X)^2 + (a-Z)^2}}{\sqrt{(b-X')^2 + (a-Z')^2}} Y' \\ Z = -\frac{e}{w} X + e \end{cases} \quad (1)$$

ただし、 X', Y', Z' は CCD 結像面上の点 $t(x, y)$ を光学系全体の 3 次元座標系に変換した座標、 $T(X, Y, Z)$ は物体上の点の 3 次元座標、また $\alpha = (Z' - a) / (X' - b)$ 、 $w = P\phi / 2\pi$ である。

ここで、投影パターンの位相をシフトして強度分布を時間的に変化させれば、計測対象上の光強度分布に応じた位相情報を得ることができる。このとき物体上の点 $t(x, y)$ における光強度分布は以下の式で表すことができる。

$$I_t(x, y) = \alpha(x, y) \{1 + \beta(x, y) \cos[\phi(x, y) + \delta_t]\} \quad (2)$$

ここで、 $I(x, y)$ は光強度、 $\alpha(x, y)$ はバイアス成分、 $\beta(x, y)$ はコントラスト成分、 $\phi(x, y)$ は計測対象の表面形状を与える位相、 δ_t は位相シフト量を示す。

ここで、シフトによって位相差を $0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$ と与えたとき、得られる光強度分布を I_0, I_1, I_2, I_3 とすると、計測対象の形状を決定する位相値 $\phi(x, y)$ は物体点 $t(x, y)$ において次のようにして求められる。

$$\phi(x, y) = \tan^{-1} \left\{ \frac{I_3(x, y) - I_1(x, y)}{I_0(x, y) - I_2(x, y)} \right\} \quad (3)$$

Fig.1 Grating projection method for profiling

(a) Intensity distribution of the projected pattern

(b) Intensity distribution along the grating line

Fig.2 Intensity distribution using usual LCD projector

3. 液 晶 格 子

従来の格子パターン投影法で使用する格子は計測物体の大きさや表面の凹凸により、それに適したピッチの格子を作成しなければならなかった。つまり、計測物体にあわせて機械的に格子を交換する必要があった。そのため、計測パラメータを同一条件で設定し、スムーズに計測を行うことが困難であった。さらに、位相シフト法を適用するために、格子を機械的に移動させることが多かった。このため移動する際の誤差、つまりシフト誤差が起こり、算出した位相値がばらつき形状誤差の要因となっていた。そこで、格子を交換することなく、しかも格子のピッチを任意に変化させることができ、シフト誤差を改善するために電氣的に格子を移動させることができる液晶を使用して格子パターンを作成した。

こうした格子パターンにあつては、位相シフト法を正確に適用するためには正弦状の明暗の透過率分布を持つことが前提とされている。一般に市販されているプロジェクタに内蔵されている液晶格子は、こうした目的には不十分である。一例としてこうした液晶を用いて実際に正弦格子パターンとなるように努力しても、投影したときのパターンの光強度分布は図 2(a)、格子作成方向の一断面の光強度分布は図 2(b)に示ようになる。図 2(a)より実際の格子パターンは非正弦的であることがわかり、また図 2(b)では均一な光強度とならずに細かいノイズが混在していることが確認できる。

そこで理想的な正弦格子パターンを作成するために使用する液晶のタイプを検討し、さらに色情報と画素配列についても検討する。

3.1 液晶のタイプによる中間階調表示の違い

一般にディスプレイ用に使用される液晶のタイプは、TN (Twisted Nematic) 型が基礎となっている。これはネマティック液晶を 90° ツイストしたものであり、低消費電力で薄型、軽量、安価というメリットを持つ。また、STN (Super TN) 型はネマティック液晶を 260° 程度ツイストしたものである。これは大容量表示で薄型、軽量、低消費電力、ハイコントラストというメリットを持つ。

正弦格子パターンを作成する際に重要となるのは中間の階調表示の幅である。これを見るために電圧と光強度の関係を TN 型の場合 (図 3(a))、STN 型の場合 (図 3(b)) に示す。TN 型の場合、駆動電圧が $0.7V$ であるのに対し、STN 型では $0.2V$ と狭くなる。これより中間階調を作成する際に重要となる電圧幅が広いのは TN 型の方であることがわかる。しかも、STN 型の場合は色調が濃紺濃黄のため透過率が低下してしまう。したがって、中間階調の表示に最も適している TN 型を今回は使用する。

3.2 色情報

市販のプロジェクタ用の液晶では、液晶パネルに色情報を表示させるための赤、青、緑のカラーフィルタがついている。このため、各色成分により透過する光強度が異なり、正弦格子パターンに光強度むらをもたらす。

こうしたカラーフィルタは取り除くことが簡単ではないので、本研究では、各画素の光強度が一定となるようにしてモノクロの液晶パネルを使用した。

3.3 画素配列

プロジェクタ内蔵の液晶は図 4(a)のようなマトリクス型となっており、その一部拡大図を図 4(b)に示す。これは 1 つの

Fig.3 Intensity change due to the applied voltage

Fig.4 Scheme of LC panel for commercial LC projector

画素が縦 66 μ m、横 33 μ m、すきまが 33 μ m という液晶であるが、赤青緑の画素が 1 セットで 1 画素となるため、実際には 1 つの画素は縦 66 μ m、横 165 μ m となる。この液晶で正弦格子パターンを作成する際に格子を作成する方向とは無関係の方向、つまり、縦じまの格子の場合、横方向の画素間にすきまが存在するため、正弦格子パターンを作成した際にすきまによるノイズが現れる。

マトリクス型の欠点を解決するために、格子作成方向とは無関係な方向の各画素間のすきまを取り除いた棒状画素のストライプ型液晶を新たに試作した。その外観図を図 5(a)に、一部拡大図を図 5(b)に示す。これは 1 つの画素が 42 μ m で、すきまが 8 μ m であり、ライン数が 960 本の液晶である。このストライプ型液晶を用いて格子パターンを投影した際の 1 断面の光強度分布を図 6 に示すが、図 2(b)と比べてすきまの影響が低減されていることが確認できる。

4. 駆動ドライバ

市販のプロジェクタ用液晶格子では、アナログ信号が利用されている。この信号で正弦格子パターンとなるよう信号を作成し電圧に変換した場合では、正弦状となるはずであるが、実際

Fig.5 Scheme of LC panel for structured LC grating

Fig.6 Intensity distribution along the grating line

は液晶の立ち上がり特性上、図 3(a)に示すような透過率分布上に一致するよう強制的に電圧が変換されてしまう。このため、従来の駆動ドライバで正弦状の格子パターンを作成するのは困難である。また、液晶の表示可能な階調が 4bit 分つまり 16 階調のため、作成した格子パターンにフリッカと呼ばれるちらつきが生じる。そこで、信号をデジタル化することにより駆動方法を改善し、新たにドライバを製作した。

4.1 パルス幅変調制御 (PWM)

まず、使用している液晶の表示階調限界である 16 階調を安定化する手法を考える。図 7(a)に 1 つの液晶の画素に印加する電圧と時間の関係を示す。安定した 16 階調を表現するために、各階調において 0 から 15 階調それぞれの電圧の大きさを一定にする。次に各階調に印加する電圧の時間を変化させることで安定する部分を 16 か所見つけ、その決定した 16 種類の時間幅を 1 つの基準パルスとする。この基準パルスを決することで 16 階調を瞬時に決定可能となるように各階調を制御する方法をパルス幅変調制御 (PWM) と呼ぶ。これにより各階調での液晶の安定性を向上させることができる。こうして得られた特性を図 7(b)に示す。

4.2 フレームレート制御 (FRC)

ここで PWM により決定した各階調だけでは正弦格子パターンを作成するには困難である。そこで各階調間の中間階調を作成するためにフレームレート制御 (FRC) を適用する。図 8 は 1 つの液晶の画素に表示する階調を示している。例えば、PWM で決定した隣り合う 2 点間の階調を A、E とする。この A と E の画面表示の割合を 3 : 1、2 : 2、1 : 3 というように、A と E の階調の切り替えを行うことで、両者の中間階調である B、C、D を作成する制御である。この方法では PWM により決定した各階調を使用しているため、正弦格子パターンを作成した場合においてもフリッカを起すことはなくなる。

以上の方法により 16 階調以上の階調を作成し正弦格子パターンを作成する。

PWM と FRC を用いることで 1 周期の正弦格子パターンを作成する場合の出力信号の例を図 9(a)に示す。その一部分を拡大すると図 9(b)に示すが、●で示した点は PWM によ

(a) Signal pattern

(b) Transmittance

Fig.7 Pulse width modulation control method (PWM)

Fig.8 Frame ratio control method (FRC)

で決定したもの、■、▲、◆で示した点は FRC を用いて決定し、格子パターンのデータを作成する。

次に線形的に変化するように作成したデータを用いて表示階調数を変化させたときに液晶に表示されるグレースケール画像を図 10 に示す。これより、PWM と FRC を用いることで表示階調を向上させることが可能であることが確認できる。

さらに、図 9 の方法により表示階調数を 32 階調の場合の正弦格子パターンとして作成したときの光強度分布を図 11 に示す。このように光強度が一定であり、正弦性の高い格子パターンが作成可能となった。

5. 実験および結果

5.1 精度検定

ストライプ型液晶格子パターンを使用して実際の計測を行った。ガラス板を平坦と仮定し、100×100mm の計測を行った。図 12 に位相計算処理の流れを示す。液晶格子パターンを $\pi/2$ ずつシフトさせた画像をそれぞれ 4 枚ずつ取り込む。その画像に対して、式(3)を適用して位相を算出する。ここで得られた位相は、0 から 2π まですラップされた不連続な分布である

(a) Example of sinusoidal grating pattern

(b) Macrograph of sinusoidal grating pattern

Fig.9 Control of the grating pattern driven by PWM and FRC

Fig.10 Captured intensity distribution of projected pattern of the structured LC grating

Fig.11 Intensity distribution of sinusoidal grating pattern using stripe-type liquid crystal

ため、位相接続を行う。これと同時に、計算処理の高速化のため、得られた画像を用いて画像内の計測対象である領域のみを抽出し、領域内のすべての画素に対する物体の表面上の点を算

Fig.12 Procedure of phase calculation

Fig.13 Surface height of the glass plate

出する。正弦格子パターンを投影したときの変形格子像を図 12(a)に示し、これら 4 枚の画像より位相計算したものを図 12(b)に示す。この位相分布は 0 から 2π ままでラップされているので位相接続してアンラップした結果を図 12(c)に示す。その後、式(1)より 3 次元座標を算出した。

得られた表面形状について一断面を示したものを図 13 に示す。従来の駆動方法ではガラス板を平面と仮定したとき、標準偏差が従来の方法では $248\mu\text{m}$ であるのに対し⁶⁾、新しい駆動方法では $50\mu\text{m}$ となり、精度が向上したことが確認できた。

5.2 軟物体測定

応用計測の例として、接触方式では計測不可能な軟物体であるハナミズキの花の 3 次元形状を計測した。ハナミズキの外観を図 14(a)に示す。また、計測した結果のワイヤーフレーム表示を図 14(b)に示す。

6. 結 言

格子パターン投影方式による 3 次元形状計測においてストライプ型液晶格子を用いることを提案した。そして、駆動方式にパルス幅変調制御とフレームレート制御を用いることによって、表示階調数を向上させた。その結果、100mm の計測範囲において標準偏差 $50\mu\text{m}$ の精度を得ることができ、一般的な

(a) Photo of a flower (120 × 120mm)

(b) Three dimensional expression

Fig.14 Surface measured result of a flower (dogwood)

液晶を用いた結果と比較して精度を大きく向上することができた。

参 考 文 献

- 1) 吉澤 徹，鈴木賢策：格子パターン投影による三次元形状の自動測定，精密工学会誌，53.3(1987)422.
- 2) 小松原良平，吉澤 徹：縞走査を導入した格子パターン投影法，精密工学会誌，55.10(1989)1817.
- 3) 小松原良平，片瀬和伸，吉澤 徹：縞走査を導入した格子パターン投影法(第2報)－正弦格子の利用－，精密工学会誌，58.7(1992)1173.
- 4) 山谷，山本，藤田，大谷，吉澤：ストライプ型液晶格子を用いた格子パターン投影法(第1報)－ストライプ型液晶格子について－，1998年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集，(1998)509.
- 5) 山谷，山本，藤田，勝呂，大谷，諸川，吉澤：ストライプ型液晶格子を用いた格子パターン投影法(第2報)－格子パターン作成方法の変更－，1999年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集，(1999)450.
- 6) 山谷，山本，藤田，勝呂，諸川，大谷，吉澤：ストライプ型液晶格子を用いた格子パターン投影法(第3報)－格子作成結果と計測例－，2000年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集，(2000)542.
- 7) 吉澤 徹編：光三次元計測，新技術コミュニケーションズ，(1993)77～92
- 8) J.E.Greivenkamp and J.H.Bruning：Phase Shifting Interferometry, in Optical Shop Testing, 2nd ed., Edited by D.Malacara, John Wiley & Sons, New York, (1992)501.