プロジェクタを用いた三次元形状計測*

— 段差を持つ物体の測定 —

格内 敏** 中本邦博*** 坂本 亨** 岩田耕一†

Profile Measurement Using a Liquid Crystal Projector -Measurements of Object Surface with Steps-

Satoshi Kakunai, Kunihiro Nakamoto, Tohru Sakamoto and Koichi Iwata

A method for measuring surface profile of objects with large steps is proposed and verified by some basic experiments. The method uses a pattern of two primary color gratings with different pitches, which is projected on the object surface through a liquid crystal projector controlled by a computer. In the single grating projection, the integer grating order becomes ambiguous and the profile cannot be determined when the height change between any adjacent pixels is larger than a height corresponding to the grating pitch. In the proposed method, two gratings are projected on the object at a time. Two phases of the deformed gratings are calculated by phase-shifting technique. Integer orders can be determined by the phase difference between them. In the experiment made for proving the validity of the proposal, the deformed gratings are observed through color filters sequentially. An object with step height of 20.0mm is measured with standard deviation about 0.3%.

Key words: profile, object with steps, liquid crystal grating, sinusoidal grating, phases-shifting technique

1. はじめに

物体に格子を投影し、投影方向とは異なる方向より観察すると、格子は物体形状に応じて変形して見える。この変形格子より物体形状が算出できる。格子に正弦波の格子を用いると、変形格子の読み取りにしま走査法が適用できるため、格子を密にすることなく高い空間分解能で形状測定ができる¹⁾²⁾。正弦波格子はレーザ干渉じまによって容易に作成できるが、レーザ光では広範囲で明るい格子を作成するのが困難である。そのためレーザ干渉じま格子は小さな物体の測定に適する。一方、ロンキー格子を適当にデフォーカスすることによって正弦波に近似させることも試みられているが、正しい正弦波を得ることは困難である³⁾。

我々は液晶をコンピュータ制御することにより正弦波の格子を作成し、この格子を用いた形状測定法について検討してきた。液晶格子は、ひずみや位置ずれのない正確なしま走査が得られ、容易に格子ピッチや格子のカラーや明るさを変更できる等の特徴があり、種々の応用が考えられる。

本稿では図1に示すような高さが急激に変化する物体測定への応用について検討した。この段差物体に格子を投影し、図中のAAラインの形状を求めようとした場合、段差が格子ピッチで測定できる範囲を越えると、段の部分で格子の次数が区別できなくなり正しい値を読み取れなくなる。このような段差物体の測定は、異なるピッチを持つ2つの格子をそれぞれ投影し、しま走査により求まる2つの位相から計算した高さの差から、

段差における正しいしま次数を決定できる⁴⁾。しかし、2度にわたって別々に格子を投影する場合、従来の2倍の取込み時間を要する。このことはコンベアで流れてくる製品や、人体など動きやすい対象の形状測定において、測定時間の問題に加えて測定誤差が入りやすくなり、2ピッチ格子投影法の実用化を妨げてきた。本稿では、従来の1ピッチ格子投影法の測定時間内で、2ピッチ法による段差物体の測定が可能となる方法を提案し、基礎実験によりその有効性を確かめた。

異なるピッチを持つ2つの格子は、コンピュータ制御による液晶プロジェクタの異なる2原色でそれぞれ作成し、この2つを合成した格子を物体に一度に投影する。投影された物体上の変形格子は、この2原色に相当するカラーフィルタをカメラの前に挿入して、それぞれ元のカラー格子の変形格子に分離して取り込む。

Fig.1 Deformed grating pattern projected on an object with steps

* 原稿受付 平成7年11月16日

** 正会員 姫路工業大学工学部(姫路市書写2167)

*** 姫路工業大学大学院

† 正会員 大阪府立大学工学部(堺市学園町1-1)

Fig. 2 Experimental set-up

2. 測定原理

2.1 測定システム

図2に提案する実験装置を示す。光源には液晶プロジェクタ (EPSON, VPJ-2000, Pixel size $46\mu\text{m} \times 56\mu\text{m}$) を使用した。プロジェクタはコンバータを通してホストコンピュータに接続されており、コンピュータからのコマンドにより0~255階調の3原色の濃淡の光を投影することができる。物体上の変形格子は、カラーフィルタを通してCCDカメラ (NEC, TI-24A, Pixel size $11.4\mu\text{m} \times 13.4\mu\text{m}$) を用いて、画像処理装置 (ADS, PIP-4000) により、強度が8ビットにA/D変換される。

始めにプロジェクタの白色光の明るさを256階調に変化させながら物体に投影し、3原色 (R,G,B) のフィルタをそれぞれカメラの前に配置して、反射光の特性曲線を求める。物体からの反射率を考慮して適当な2原色を選び、特性曲線から正弦波の格子を作成し、これらを合成して物体に投影する。物体上の変形格子は、使用したカラー格子と同じフィルタをそれぞれ通すことにより分離してCCDカメラで記録する。

ただし、本稿では図中の括弧部のカメラ(2)を除いた1台のCCDカメラを使用し、その前のフィルタを変えて基礎実験を行った。実際に2台のカメラを使用する場合、幾何学的に2台のカメラの正確な配置と、カメラどうしの素子の間の対応関係を正確に求める必要がある。一方高価ではあるが、カラーCCDカメラを用いると素子の対応関係の問題は無くなり、従来の1ピッチ格子投影法と同じような光学系が構築できる。

本手法では、前もって投影カラーの特性曲線を得るなどの準備が必要であるが、製品の検査など同じような形状に対する測定の繰返しには特に有効となる。

2.2 形状の算出

形状はしま走査格子投影法の計算手順によって求める¹⁾。図3のA点は格子の投影中心であり、それから a だけ離れた距離のO点は、カメラレンズの主点の位置である。OA方向をX軸とし、撮像系の光軸をZ軸とし、像面とZ軸とを垂直にする。一方、Z軸上にビームスプリッタ (B.S.) を置き、物体光の半分を直角方向に反射させて、O点に置いたものと同じカメラをB.S.

Fig. 3 Optical system

Focused Defocused

Grating: 20 pixel/pitch

Fig. 4 Feature of projected sinusoidal grating made through liquid crystal

から同じ距離の所に配置する。測定物体上の一点 P_0 のXZ面への垂線の足を P_0' とすると、2点A、Oから P_0' を見込む角 α 、 ξ を測定できれば、XY面から P_0' までの距離 Z_0 が次式より求まる。

$$Z_0 = \frac{a}{\tan \alpha - \tan \xi} \quad (1)$$

ξ はイメージセンサ上のP点の位置から次式で求まる。

$$\tan \xi = \frac{X}{Z} \quad (2)$$

投影格子の明るい部分が図中のm面のようにXZ面に垂直な面であれば、像上の明暗から α の値を知ることができる。投影格子の1ピッチに相当する角度を α_p とすると、角度 α は次式となる。

$$\alpha = (n + \delta n) \alpha_p \quad (3)$$

n はしま次数の整数成分、 δn は端数成分でありしま走査により求める。いま、しま走査によって求まる初期位相を ϕ とする

Fig.5 Dependence of phase error $\delta\phi$ upon the quantization level

(a) Primary red grating

(b) Primary blue grating

(c) A composed grating (a)+(b)

Fig.6 Two primary color gratings (a), (b) and the composed grating (c) made through liquid

と、 $\phi/(2\pi)$ はしま次数 δn を表す。この初期位相 ϕ は、正弦波格子の位相を $\pi/2$, π , $3\pi/2$, 2π と4回シフトさせて得られる強度データ I_1 , I_2 , I_3 , I_4 より次式から求まる。

$$\phi = \tan^{-1} \frac{I_3 - I_1}{I_4 - I_2} \quad (4)$$

一方、隣り合ったピクセル間の位相差が 2π より大きいとき、整数のしま次数 n が決定できなくなる。このため物体に異なるピッチを持つ2つの格子を投影し、整数の次数を決定する⁴⁾。

いま異なるピッチを持つ2つの格子 (P_1 :短ピッチ, P_2 :長ピッチ)を投影すると、次式で示される合成有効ピッチの段差までの測定が可能となる。

$$\Lambda = \frac{P_1 P_2}{P_2 - P_1} \quad (5)$$

3. 実験結果と考察

2つの異なるカラーの正弦波格子は、コンピュータの出力階調に対する物体からの反射率特性曲線を基にして作成する。図

Fig.7 Intensity distribution of a composed grating (a) and gratings separated by red and blue filters (b), (c)

4に液晶プロジェクトで作成した白色投影格子を、基準平板上にフォーカス(結像)した場合と、わずかにデフォーカスした場合を示す。フォーカスした場合、液晶セル間のギャップにより小刻みな強度変化が現れ、正弦波格子の妨げとなっている。したがって適当な量だけデフォーカスした正弦波格子を作成する必要がある。

2原色の混合カラー格子を物体に投影すると、物体からの反射率(量子化レベル)が投影カラーにより異なり、測定精度に影響を及ぼす。図5に格子の量子化レベルと位相誤差(測定精度)の関係を示すが¹⁾、量子化レベルが4から5ビット程度になると、誤差がかなり小さくなりあまり変わらない。したがって投影格子の反射率が4ビット以上になることを目安に作成する。前もって投影するカラーのコンピュータ出力階調に対する測定物体からの反射率特性曲線を調べ、適する反射率が得られるような出力階調で正弦波を作成した。

図6はこのようにして作成した異なるピッチを持つ赤と青のカラー格子とその合成波を白色の基準板に投影した時の白黒写真を示す。また図7はこの合成波をモノクロ CCDカメラで記録した時の強度分布(a)と、カメラの前にそれぞれ赤と青のフィルタを挿入して記録した時の強度分布(b),(c)を示す。図より合成波から長・短のピッチの正弦波が正しく分離されて記録できていることがわかる。

検証実験として、この合成波を用いて図1に示すような段差 20.0mmを持つ物体の測定を行った。試料にはアルミニウム材を機械加工し、表面につや消しの白色ラッカーを吹き付けた拡散反射物体を用いた。測定は図3の光学系において、 $\alpha_0 = \pi/4$ 、短ピッチ $P_1 = 12\text{mm}$ (液晶素子数16個、CCDカメラ素子数70個に相当)、長ピッチ $P_2 = 18\text{mm}$ 、合成有効ピッチ $\Lambda = 36\text{mm}$ とした。図8(a),(b)に任意の一断面の測定結果と誤差分布を示す。その結果、段差 20.0mmに対して平均の段差 20.06mm(約0.3%のばらつき)が得られた。これはレーザ干渉じま格子によ

Fig.8 Experimental verification

Fig.10 Mean height error due to defocused grating pitch

Fig.9 Profile measurement of an object with steps

る測定結果（約1%以下）⁴⁾と比べて少し良い。また、図9に円弧と段差を持つ物体の測定例を示す。ディスプレイにおいて、形状が幾分ひずんで見えるが、これは画像の表示処理技術に起因するものであり、実際の測定精度には影響しない。

これらの結果より、液晶で作成した正弦波格子を用いると、従来しま走査法で問題となっていたしま走査誤差がなくなり、振動にも比較的強く高精度な段差物体の測定が可能となることからわかる。

レーザ干渉しま格子では、しまは任意の位置でコントラストがよいので、表面の位置によってしまの違いは生じない。しかし、液晶格子では、適当なコントラストで正しい正弦格子とみなせる位置が、ある範囲内に限定される。（ここでは、これを

局在位置と呼ぶ。）そのため、格子のデフォーカス量が問題となる。局在の範囲は記録時のカメラ絞りによっても影響され、形状測定の精度に影響する。

ここでは図10に示す実験光学系を用いて、段差によって生じるデフォーカス量と測定誤差の関係について考察する。実験は、種々の段差物体の代わりに1つの基準平板を用い、平板に対する投影格子のデフォーカス量を変化させて行なった。測定基準面の後方に投影格子の局在位置があるようにして、デフォーカス量 $= L/M$ を定義した。ただし L ($=2145\text{mm}$) は、図3でのプロジェクター中心から物体までの距離 AO' であり、 M はその後方にある格子の局在位置までの長さを表す。カメラ絞りは5.6とし、投影格子ピッチを変化して実験を行なった。図の横軸には、

投影格子ピッチの作製に用いた LCD 素子数と、記録時の CCD カメラ素子数を併記した。図より投影格子ピッチが 15mm 近傍では、格子の局在位置の違いによる測定誤差が最も小さくなる。これは投影格子ピッチ（式(3)の α_p に相当する）が小さい場合、同じ読取誤差 $\delta\alpha$ に対して、式(1)の形状誤差 δZ_0 が小さくなる。しかし、格子ピッチを小さくしすぎると格子のコントラストが減少し、もはや正弦波と見なされなくなり誤差が急激に大きくなるためと思われる⁵⁾。

図 10 において、いまピッチ 15mm でデフォーカス量が 0.89 と 0.83 では、ほぼ同じ量の測定誤差と考えると、これらの差である約 174mm までの段差が、ほぼ同精度で測れることになる。

4. お わ り に

従来、段差物体は異なるピッチを持つ格子をそれぞれ投影して求めている。本稿では、液晶の 2 原色からなる異なるピッチを持つ格子を合成して、一度に投影することにより測定時間の短縮が可能となる方法を提案した。

実験は 1 台のカメラを使用し、投影格子の 2 原色に相当するカラーフィルタを、カメラの前にそれぞれ配置する方法により

行った。実験結果の要約を次に示す。

- 1) 正弦波液晶格子により、段差 20.0mm を持つ物体を約 0.3% のばらつきで測定できた。
- 2) 段差による格子のデフォーカス量の影響について考察した結果、使用した実験系でピッチ 15mm の格子を用いると、174mm 程度の段差まで測定できることがわかった。

参 考 文 献

- 1) 格内 敏, 岩田耕一, 長谷川素由, 山口慎二: しま走査干渉しま投影法による 3 次元形状計測, 精密工学会誌, **55**, 1 (1989) 141.
- 2) K. Creath: Progress in Optics XXVI, ed. E. Wolf Elsevier Science, New York, (1988) Chap. V, p.345.
- 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), 精密工学会誌, **58**, 7 (1992) 1173.
- 4) 格内 敏, 岩田耕一, 斎藤伸一, 坂本 亨: 2 ピッチ格子 投影法による 3 次元形状計測, 精密工学会誌, **58**, 5 (1992) 877.
- 5) S. Kakunai, K. Iwata, M. Hasegawa and T. Sakamoto: Profile Measurement by Projecting Phase-shifted Interference Fringes, SPIE **1163**, (1989) 128.

書 評

レ ー ザ ー 工 学

編 著 池田正幸

発 行 オーム社

レーザー光を応用した製品は CD プレーヤ等の民生品にも多く用いられるようになっており、その傾向は今後ますます強まるだろう。その意味でレーザーと関連光学、およびその応用工学を学ぶことは今後の技術開発に必ずや寄与すると思われる。本書は精密工学会出版事業委員会での審議をきっかけにして出版されたものであり、レーザーの基礎から応用までが平易に記述されており、学生から一般技術者まで、幅広い読者層に受け入れられると考えられる。すなわちレーザーの発振原理や光学の基礎から始まり、加工、表面改質、各種計測、データの記録、レーザー化学、医療などの各分野での先端的应用までが解説されている。

本書の内容は、

1. レーザの歴史 (量子論とレーザー, メーザ, レーザの発明)
2. レーザの基礎 (光の吸収と放出, 光の自然放出と誘導放出, 反転分布, レーザの発振条件, レーザの種類)
3. 共振器とレーザー (光共振器, レーザ光の特性)
4. 光の伝搬 (伝搬と伝送路, 偏光)
5. 光特性の測定 (ビーム特性, エネルギー, パワー, スペクトラム, パルス幅)
6. レーザ光学部品 (光学部品への要求, 赤外線用光学部品, 紫外線用光学部品)

7. レーザ加工 (加工の基礎現象, レーザ光の吸収, 材料の温度上昇, 材料の熔融と蒸発, 加工ひずみと材料の組織変化)
8. CO₂ レーザ加工 (発信器の原理, 加工例, 新しい応用)
9. 固体レーザー加工 (Nd:YAG レーザ, YAG レーザの構成, 加工例, 新しい固体レーザー)
10. エキシマレーザー加工 (エキシマレーザーの光学的性質, 表面改質への応用, 半導体プロセスへの応用)
11. 距離計測 (レーザー測距の原理, 三角測量法, ロボットの目)
12. 干渉計測 (レーザー干渉の原理, 干渉応用計測, ホログラフィ干渉, スペックル)
13. レーザによる記録 (CD とレーザーディスク, レーザプリンタ, 光ディスクメモリ)
14. レーザ化学と分析 (合成・分離反応, セラミックスパウダーの合成, レーザ誘起発光, 分光分析への応用)
15. レーザ医療 (レーザー治療装置, レーザ診断装置) となっている。

応用の紹介においても基本原理が多く説明されており、レーザー工学の恰好の入門書と位置づけられよう。 (諸貫信行)

(A 5 判, 167 ページ, 3 300 円)