特殊格子パターン投影による三次元形状測定*

五十嵐 悟** 沢川 勝久** 竹内 啓五***

3 D Measurement of Shape by Projection Method of Specially Designed Grating

Satoru IGARASHI, Katsuhisa SHIBUKAWA and Keigo TAKEUCHI

In 3 D measurement of shape by grating projection method, it is necessary to identify each line of grating projected on an object with the line of the reference grating. When a surface of an object has discontinuity in height in some region, projected lines of grating have also discontinuity in the region, and this identification becomes difficult. In this paper, we propose a method of 3 D measurement of shape by projecting a specially designed grating pattern with which we can identify each projected line with the line of the reference grating. Several kinds of surfaces of objects are measured by applying the proposed method, and the results show that it is possible to measure some surfaces which are difficult to measure without misidentification by usual grating projection method.

Key words : surface topography, noncontact 3 D measurement, grating projection, deformed grating pattern, special grating pattern

1. 緒 言

物体表面に1本の格子線,あるいは複数の格子線からなる平行格子パターンを投影して得られる変形格子像から,物体表面の三次元形状を求める方法が提案され¹⁾,実用的な測定装置も開発されている。これらの格子パターンを使用する方法では,投影する格子線とその像との対応がついていることが測定の前提である。1本の格子線を使う場合には,この対応は自明であり,測定は容易で確実である。しかし,物体の表面を測定するためには数多くの画像を必要とし,非能率的である。一方,平行格子パターンを使う方法は,1枚の画像を処理することによって表面の測定ができる点で能率の良い方法であるが,格子線の対応付けには問題がある²⁾。すなわち,表面が滑らかで格子線の像が連続して観測される場合には問題はないが,表面の急激な段差や穴などの存在によって格子線の像が不連続になる場合には,格子線とその像の対応付けが困難となり,誤った計測をする可能性が大きくなる。

本研究では,格子線に等間隔でマークをつけた特殊な格子パターンを使用し,マークを手がかりにして格

子線とその像の対応付けを行う方法を提案し,従来の方法では測定が困難であった上記の形状の測定を可能にして格子投影法による形状測定の適用範囲を広げることを目的とする。本論文では,提案する測定法の原理と画像の処理,および解析方法について述べ,2,3の測定例を通して,従来の格子投影法では測定が困難であった物体の形状が提案した方法によって測定可能となることを示す。

2. 特殊格子と測定原理

使用する格子パターンは図1に示すように ξ 軸に平行に等間隔(η_0)に引かれた格子線から成り,各格子線には等間隔(ξ_0)に円形のマークが付けられている。格子面上の任意の格子線に付けられたマークの座

Fig. 1 Specially designed grating pattern

* 原稿受付 平成3年2月7日, 1989年度精密工学会春季大会学術講演会(平成元年3月22日)にて発表

** 正 会 員 北海道大学工学部(札幌市北区北13条西8丁目)

*** 北海道大学大学院(現,清水建設(株)):東京都中央区京橋2-16-1)

Fig. 2 Arrangement of the optical system

標は, M, N を整数として $(M\xi_0, N\eta_0)$ で表される. すなわち, 格子面上のマークの座標は整数の組 (M, N) によって確定する. 整数 N を格子線の番号, M を格子線上のマークの番号と呼ぶ.

測定法は, 従来の格子パターン投影法と同様に格子パターンを物体表面に投影し, その変形格子像を投影方向とは異なった方向からカメラで撮影する. カメラからのビデオ信号を A/D 変換してフレームメモリーに記憶し, 変形格子像を計算機を使って解析して任意の格子線とその像の対応付けを行い, 物体表面の三次元座標値を求める.

測定系の概要と, 物体, カメラおよびプロジェクタの配置並びに座標系を図 2 に示す. まず物体空間座標系を直角座標系 $O-XYZ$ とする. プロジェクタの光軸を Y 軸に一致させ, レンズの主点を O から L_1 の距離におく. さらに, 主点から格子面までの距離を l_1 とし, 格子面上に光軸との交点を原点として, X 軸に平行に ξ 軸を, Z 軸と平行に η 軸を採る. カメラの光軸は, $Y-Z$ 平面内にあって原点 O を通り Y 軸と角度 θ を成す直線とし, カメラレンズの主点は O から L_c の距離におく. 主点からカメラ撮像面までの距離を l_c とし, 撮像面上に光軸との交点を原点として観測系 (直角座標 $x-y$) をとり, x 軸は X 軸に平行とする.

いま, N 番目の格子線上の任意のマーク (番号 M_i) が物体上に投影された像を点 $P(X_p, Y_p, Z_p)$ と

し, カメラ撮像面上の対応する点の座標を (x_p, y_p) とすると, 幾何学的な関係からこれらの座標間に次の関係式が導かれる.

$$\left. \begin{aligned} -N\alpha_0 &= \frac{Z_i}{A - Y_i} \\ -x_i &= \frac{X_i}{1 - Y_i \cos \theta - Z_i \sin \theta} \\ y_i &= \frac{Y_i \sin \theta - Z_i \cos \theta}{1 - Y_i \cos \theta - Z_i \sin \theta} \\ -M_i\beta_0 &= \frac{X_i}{A - Y_i} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$(i=0, \pm 1, \pm 2, \dots)$

ただし, 記法を簡略化するために, 以下の無次元量を導入した.

$$\left. \begin{aligned} \alpha_0 &= \eta_0/l_1, \quad \beta_0 = \xi_0/l_1, \quad A = L_1/L_c, \\ X_i &= X_p/L_c, \quad Y_i = Y_p/L_c, \quad Z_i = Z_p/L_c, \\ x_i &= x_p/l_c, \quad y_i = y_p/l_c \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

格子線の番号 N が既知の場合には, 格子線の像上の任意の点の無次元座標を (X_i, Y_i, Z_i) として, 式 (1) の最初の 3 式を使ってこの点の三次元座標を次式のように求めることができる.

$$\left. \begin{aligned} X_i &= -\frac{x_i}{H_i} \{ \sin \theta + N\alpha_0(A - \cos \theta) \} \\ Y_i &= \frac{y_i + N\alpha_0(y_i \sin \theta - \cos \theta)A}{H_i} \\ Z_i &= N\alpha_0(Y_i - A) \\ H_i &= (N\alpha_0 y_i + 1) \sin \theta - (N\alpha_0 - y_i) \cos \theta \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

これが格子像を利用した従来の方法の測定原理である.

これに対して, ここでは格子線の番号が未知の場合を考える. この場合は, 同じ格子線上にある任意の 2 つのマーク (番号 M_1, M_2) の像 P, Q について式 (1) を考える. 未知数の数は, 2 点 P および Q の座標値 6 個に番号 (M_1, M_2, N) の 3 個を加えて, 合計 9 個あり, 式の数は 8 本であるからこのままでは解くことができない. しかし, マークの番号の差 ($m = M_1 - M_2$) が既知であれば未知数の数と方程式の数が一致し, 2 点の座標値と格子線およびマークの番号が求められる. この条件のもとで式 (1) を格子線番号 N について解けば, 次式を得る.

$$\left. \begin{aligned} N &= \frac{1}{\alpha_0(A - \cos \theta)} \left\{ \frac{m\beta_0 C_1 C_2}{C_1 x_2 - C_2 x_1} - \sin \theta \right\} \\ C_i &= A \sin \theta + y_i(A \cos \theta - 1) \quad (i=1, 2) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

2 点 P, Q の座標, およびマークの番号 (M_1, M_2) も式 (1) から求められるが, 格子線の番号が求めれば, 式 (3) を使ってこの格子線の像上の任意の点の三次元

Fig. 3 Example of image processing

座標を求めることができるので、格子線の番号 N を求めるためにこの方法を使う。これが本研究で提案する方法である。なおこの場合、同一格子線の像上にあるマークの数は原理的には2個あれば良いが、その番号の差は大きいほど、また、マークの数は多いほど格子の番号を決める際の信頼度は高くなる。

3. 画像処理と解析方法

まず CCD カメラで物体上に投影された格子の像を撮影し、256階調の画像データをフレームメモリー（横 512 画素×縦 480 画素）に格納する。この画像から格子線の像とマークの像を抽出する。マークは格子線よりも輝度が高いので、やや高めのしきい値で2値化し、雑音を除去してマークの像だけを抽出する。次に画像に微分処理を行って格子線の像を強調し、しきい値を設定して格子パターンの像を2値化し、さらに膨張、収縮および細線化処理を行って格子線の2値化像を得る。

一例として、図3(a)に示す平面上に置かれた滑らかな表面を持つ物体に、斜め上方から格子パターンを投影して得た変形格子像、マーク抽出像、および格子

線抽出像を図3(b), (c), (d)に示す。この例の場合には、(d)の格子線の像に見るように、物体の表面に投影された格子線と、物体が置かれた平面に投影された同じ格子線の像の対応付けは困難であり、また、図の中央部分では物体表面に投影されたある格子線の像と平面に投影された別の格子線の像が連続して観察される。従って、このままでは表面の三次元座標を正しく求めることは困難である。このような場合には、別に通常照明を行って得た画像から物体の境界を示すエッジを検出して面の境界を求め、この境界線によって画像を分割する。分割された画像はそれぞれ別の表面を表すので、以後はこの分割された画像に対して以下の処理を行う。図3(e)がこの例の場合の通常照明のもとでの画像からのエッジ検出像で、(c), (d)のマークの像と格子線の像は、それぞれこの境界線（エッジ）によって3つの領域に分割される。

これらの処理の後、マーク、および格子線の抽出像からマークの重心位置と、格子線の中心座標を求める。これらの座標はすべて画素単位で求められる。ただし、カメラによって撮影された像にはひずみが存在するので、次のような補正を行った。まず、平面

($Y=Y_0$) 上に格子を投影し、その像をカメラで撮影する。この画像上での任意のマークの観測座標値を(I_k, J_k)とすると、補正座標値(K_k, L_k)を次式で表す。

$$\left. \begin{aligned} K_k &= a_0 + a_1 I_k + a_2 J_k + a_3 I_k^2 + a_4 I_k J_k + a_5 J_k^2 \\ L_k &= b_0 + b_1 I_k + b_2 J_k + b_3 I_k^2 + b_4 I_k J_k + b_5 J_k^2 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

ここで、 a_r, b_r ($r=0\sim5$) は補正係数である。一方、画像にひずみがないときの理想状態での座標値(x_k, y_k)は、式(1)で $M_i=M_k, N=N_k, Y_i=Y_0$ と置くことによって理論的に求められる。この理論値と補正座標値の差の自乗和が最小となるように補正係数を決める。

$$\sum_{k=1}^n (x_k - K_k)^2 + \sum_{k=1}^n (y_k - L_k)^2 = \text{minimum} \quad (6)$$

マークの重心および格子の中心線の座標値を式(5)によって補正した後、格子の中心線を一定の方向にたどって各格子線に乗っているマークを探索し、格子線とマークの対応付けを行うと共に、マークにはそれが現れた順に仮の番号を付ける。この番号は、本来のマークの番号とは異なるが、番号の差は元のマークの番号差と同じである。このデータを基に2節で述べた方法で各格子線の番号を決定し、物体上に投影された格子線上の三次元座標を求める。

以上の処理の流れを示したのが図4である。このうちひずみの補正までは画像処理装置(日本アビオニクス社製 SPICCA-II, ホスト: 日本電気社製 PC-9801 Vm)を使用し、それ以降の処理はワークステーション(Digital Equipment 社製 VAXstation II/GPX)上で行った。処理時間は測定対象によって異なるが、画像入力から結果のワイヤフレーム表示までに要する時間はおよそ10分から15分、その大半(1/3~1/2)がマークと格子線の対応付けと格子線番号の決定に費やされる。残りは三次元座標の計算と結果の表示に要する時間であり、画像処理装置での処理は1分以内である。

4. 測定例と測定結果の検討

まず画像のひずみ補正の効果を調べるために平面の測定を行った。平面に投影された格子の像はほぼ平行な直線からなり、各格子線には数多くのマークが観測される。この格子像を格子線に直交する2本の直線で3分割し、ひずみの補正を行わずに、分割した部分をそれぞれ独立に処理して高さを測定した結果を図5(a)に示す。ひずみの大きな左右の下隅に格子番号の対応付けの誤りが生じているのが分かる。同じ画像をひずみの補正を行って処理した結果が(b)で、右隅

Fig. 4 Flow of image processing and 3D measurement

(a) without correction of strain

(b) with correction of strain

Fig. 5 Results of measurement for a plane

(a) An object (model of face)

(b) An object with hole

Fig. 6 Examples of measured objects

の誤りが修正されており、ひずみの補正が格子の対応付けの誤りを改善するのに有効であることが分かる。左隅の誤りは改善されていないが、これはひずみの補正がまだ十分ではないことと、座標値を画素単位で量子化したことによる誤差に起因するものである。なお、図には示さないが画像を分割しない場合には各格子線に十分な数のマークがあり、格子線番号の対応付けが正しく行われ、平面の測定ができています。

図6に測定に用いた物体の例を示す。(a)は滑らかな表面を持つ顔面の模型で、従来の変形格子法で問題なく測定ができる例である。(b)は表面に穴のある物体の例で、穴の境界で格子線の像が不連続となり、従来の方法では対応付けの誤りが起きる可能性のある場合である。この物体は平面上に置かれているが、この場合については表面と穴の測定に限定した。このほかに、先に図3(a)に示した滑らかな表面を持つ物体を平面上に置いた場合についても測定例を示す。この例は、先に述べたように、物体表面とそれが置かれた平面との間に急激な段差があって、従来の方法では画像

(a) Result for Fig.6(a)

(b) Result for Fig.6(b)

(c) Result for Fig.3(a)

Fig. 7 Results of measurement

上での対応付けの誤りが起きる可能性のある場合である。これらの物体は、 X 方向と Z 方向に100~200 mm、 Y 方向に40~100 mmの大きさをもつ。

図7(a)~(c)は、図6(a),(b)および図3(a)に示した物体表面の測定結果をワイヤフレーム表示したものである。(a)の滑らかな表面を持つ顔面の模型については、当然のことながら従来の方法と同じ結果が得られている。この場合の処理時間(画像入力から結果の表示まで)は約10分であった。(b)の穴のある物体の表面の測定では、画像は穴の境界で分割され、分割領域はそれぞれ独立に処理されている。穴の認識ができており、一部に計測の誤りは認められるが、物体

表面と穴の深さの測定ができていることが分かる。この場合の処理時間は画像が一部分割されているため、格子とマークの対応付けに時間を要し、約12分であった。(c)の場合については、図3(e)に示したエッジ検出によって段差部分で格子線が分離され、物体表面と物体が置かれた平面の測定が独立に行われている。この内、物体表面はほぼ正しく測定されている。しかし、平面の一部に対応付けの誤りによる測定ミスが認められる。これは、平面部分で観測される格子線上のマークの数が少ないこと、および先に述べたひずみの補正が画像の周辺部では不充分であることによるものと考えられる。この誤りは、同一面上にある隣合った格子線の番号の差は1である、という情報を使うことによって修正することができると考えられる。ただし、ここではこの処理は行っていない。この場合は画像が三つの領域に分割されているため、(b)の場合に比べてさらに処理時間が長く、結果の表示までに約13分を要した。

なお、これらの測定を通じて、測定の誤差は画像中心部で最大約0.5 mmであった。誤差の最大の要因はマークの中心座標、格子線の中心座標を画素単位で量子化したことによるものと考えられる。この点を確認するために平面の測定を想定し、この平面上に投影された格子の像からその中心座標を量子化せずに正しく測定した場合に算出される平面の高さと、画素単位に量子化した場合に算出される高さを比較して、量子化による誤差の平均値と標準偏差を計算した。その結果、誤差の平均値は0.0092 mmとほぼ0に近いが、標準偏差は0.283 mmとかなり大きいことが分かった。この結果から前述の測定誤差は、基本的に量子化誤差によるものであることが分かる。測定精度を向上させる方法としては、格子画像を2値化、細線化して格子の中心座標を求める代わりに、画素単位で得られる濃淡画像の輝度値を内挿して、最大輝度を与える点の座標値を格子の中心座標として実数値で求める方法もあるが、本質的に精度を向上させるためにはカメラの解像度を上げる必要がある。また、画面の周辺部では画像のひずみの影響が大きく、特に画像が分割され

て格子線の長さが短くなっている場合には、格子の対応付けの誤りが生じることがある。これを改善するには前述のように隣接した格子線との関係を調べる方法もあるが、根本的にはひずみの少ないレンズ系と解像度の高いカメラを使用し、ひずみの補正をより正確に行うことが必要である。さらに、測定密度を向上させるためには、吉沢らが提案している方法¹⁾³⁾を本方法に取り入れる手法が考えられる。

5. 結 論

本研究で得られた結果を要約すれば次の通りである。

- (1) 平行格子の各格子線に等間隔でマークを付けた特殊格子を利用して、格子線とその像の対応付けを行い、物体の三次元形状を測定する方法を提案した。
- (2) 物体表面に急激な高さの変化がある場合に対して、エッジ検出を行ってその境界を求め、この境界線によって分割された画像を独立に処理して物体表面の三次元座標を求める方法を提案した。
- (3) 幾つかの測定例によって、従来の変形格子法では測定が困難であった物体に対して、本論文で提案した方法を用いれば形状測定が可能であることを実証した。
- (4) 画像のひずみの補正が、格子線とその像の対応付けの誤りを改善するのに有効であることを確かめた。

謝 辞

本研究に対しご協力頂いた日本アビオニクス(株)機器事業部第一画像鶴川洋課長に感謝申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 吉沢 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) 谷内田正彦: 日経メカニカル (映像技術特集), 1984年1月2日号, p. 82.
- 3) 吉沢 徹, 小松原良平: 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.