M 配列を用いた鏡面物体の三次元形状計測

非会員 西 村 拓 一 (東京大)

正 員 藤 村 貞 夫 (東京大)

非会員 伊 藤 直 史 (東京大)

非会員 喜 安 千 弥 (東京大)

Measurement of 3-D Shape for Glossy Objects Using M -Array Coded Light Source

Takuichi Nishimura, Non-member, Sadao Fujimura, Member, Tadashi Ito, Non-member,
Sen-ya Kiyasu, Non-member (Tokyo University)

A non-contact method to measure 3-D shape of smooth glossy objects is proposed. This method uses a M -array coded light source to determine correspondence between a position on the light source and a point on an image of the surface of the glossy object which reflect light from the light source, and estimates the 3-D shape of the objects from the correspondence by fitting a plane locally. It requires less light source planes and smaller template for deciding the correspondence than conventional methods. The accuracy of measurement is also improved. The validity of the method is confirmed by experiments for plane mirror.

キーワード：鏡面物体，非接触計測，三次元形状計測， M 配列

1. ま え が き

工業製品には金属部品など著しい正反射特性をもつ鏡面物体が多数存在し，その三次元形状を非接触で計測することは重要である。従来の正反射特性の強い物体に対する三次元形状計測法は，次の3種類に分類できる。

(1) 拡散面を計測する方法を，正反射特性の影響を受けないよう改良したもの^{(1)~(3)}

(2) 鏡面の偏光特性を利用する方法⁽⁴⁾

(3) 鏡面の正反射特性を利用する方法

(1)は原理的にかなりの拡散性を有する物体を前提としており，拡散性のない鏡面には適用できない。(2)では偏光板を回転させて多くの画像を入力することが必要であり，高速性に欠ける。また，物体の全体の形状を同時に得ることができないなどの問題点が存在する。

本研究では，上記の問題を回避できる(3)を採用し，CCDカメラを使って検出した鏡面物体の画像か

ら，その形状を検出する簡便な測定法の開発を目標とした。

正反射特性を利用する鏡面形状計測法としては，以下のような方法が提案されている。

(3-i) レーザー光の反射方向から求める方法⁽⁵⁾

(3-ii) 疑似照度差ステレオ法⁽⁶⁾⁽⁷⁾

(3-iii) 構造化ハイライトパタン法⁽⁸⁾

(3-iv) カラーハイライト法⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾

(3-v) M 系列符号化格子提示法⁽¹¹⁾

これらの方法はいずれも次の二つの段階により鏡面上の各点の法線を求め，それから鏡面物体の形状を決定している。

(1) 対応関係決定段階 対象に映った面光源の像をカメラで観察する。このとき符号化した光源を用いることによって，光源上の点と像面上の点との対応を付ける。光源面の符号化には，①濃淡レベルによるもの，②複数の光源面を用いて時間的に符号化するもの，③光源面の小領域（以下，この小領域を対応関係決定のためのテンプレートと呼ぶ）のパターンから，

その領域の位置が光源面内で特定できるよう符号化した光源面を用いるものが、組合されて使われている。

(2) 法線決定段階 光源と像面の対応関係だけでは決定できない法線方向を、対象に何らかの拘束条件を付加して決定する。

このように鏡面の三次元計測法のポイントは、第一段階では対応関係を決定する符号化光源に、第二段階では対象の拘束条件にある。(3-i)～(3-iv)の方法は、各段階で次のような問題を含んでいる。

(1) 対応関係決定段階 ①光源を濃淡レベルで符号化するものは、CCD素子のノイズにより像面上の対応点の精度が落ちやすい。②多くの光源面を用いて符号化するものは、画像取込みの時間が長くなる。

(2) 法線決定段階 いずれの方法も「物体面と参照面との距離が小さい」(条件1)としている方法(参照面法)のため、①一般に物体が大きいほど誤差が大きくなり、②形状は、得られた法線を積分して得られるため誤差が加算されやすく、③絶対位置は求まらない。

これらの問題は、対応関係と法線方向を像面上の1点の観測から決定しているため生じたものである。しかし、ほとんどの鏡面物体は、ある程度の大きさの滑らかな面で構成されており、このとき像面上の1点についてはその近傍からも有用な情報が得られる。このことを利用して、 M 系列で符号化した格子光源を用いる(3-v)は、各段階において上記の問題を以下のように小さくしている。

(1) 対応関係決定段階 滑らかな鏡面では M 系列の対応関係決定のためのテンプレートを用いることができるため、少ない濃淡レベル(3値)と少ない光源面数(3枚)とで対応関係が決定できる。

(2) 法線決定段階 (条件1)の代わりに「局所的に平面とみなせる」(条件2)として、像面上の各点の法線と位置を、各点の近傍の小領域(以下、この小領域をあてはめ領域と呼ぶ)に、平面をあてはめて直接決定する。つまり、法線の積分をしなくても形状が得られ、参照面を仮定していないため光学系に対して大きな物体の形状と位置が計測できる。

従って、この方法は「滑らかな鏡面や平面鏡面の形状と位置を高速で精度良く得ることができる測定法」として注目できる。しかし、問題点として①対応関係決定段階では、像面上の対応点を濃淡画像の極小点として得るためピクセルオーダの位置誤差がある、②法線決定段階では、あてはめ領域が大きい(曲面を平面で近似するため、あてはめ領域は小さいほうが誤差が小さくなる)があった。

本研究では、これらの問題点を解決し、更に精度が良く大きな対象にも適用できる以下のような方法を開発した。

(1) 対応関係決定法 M 配列符号化光源を使用する方法。

(利点) 像面上の対応点の位置がサブピクセルの精度で求まる。光源面の数が少なくなり、画像取込みの時間が短くなる。対応点決定のためのテンプレートの大きさが小さくなり、より小さい平面でも対応がつく。

(2) 法線決定法 対応関係から平面あてはめ法で求める方法。

(利点) 小さいあてはめ領域から法線と位置が決定できるため、より曲率の大きい曲面でも小さい誤差で計測できる。

2. 対応関係決定アルゴリズム

〈2・1〉 M 配列符号化光源 M 配列は M 系列を二次元にならべたものである。次数 n の M 系列 $a(k)$ の周期 $N=2^n-1$ が $N=N_1 \times N_2$ で N_1, N_2 は互いに素、 $N_1=2^{k_1}-1, n=k_1+k_2$ と書けるとき、

$$b(k \bmod N_1, k \bmod N_2) = a(k) \cdots \cdots (1) \\ (k=1, \dots, N)$$

のように $a(k)$ を基本周期 $N_1 \times N_2$ の配列に配置したものを $N_1 \times N_2$ の M 配列という。このとき、 M 配列1周期内で任意の $k_1 \times k_2$ のパターンが一箇所だけ存在する。つまり、 $k_1 \times k_2$ のパターンがわかれば1周期中でそのパターンの位置を特定できる。

上で述べた M 配列を用いて拡散面の M 配列符号化光源を作成する。カメラには光源面の一部が変形して得られる。そこで、0, 1, 2の三値レベルの光源を用い、 M 配列の要素をレベル0, 1の領域に対応させ、各領域の境界をレベル2とすることで、 M 配列の行列要素を分離して得ることができるようにした。この領域の中心で対応関係を得る。

更に、鏡面物体の反射率や光源を見込む角度による影響をなくするためレベル2の正規化用の光源を用い、これら2枚の光源を用いて対応関係を決定する。

M 配列符号化光源の例を図1に示す。次数 n は8、配列の大きさ $N_1 \times N_2$ は 15×17 、ウィンドウの大きさ $k_1 \times k_2$ は 4×2 である。

〈2・2〉 処理の流れ 図2のような光学系で M 配列符号化光源を対象に反射させてカメラで観測した後、正規化用の光源を観測して次のように処理して対応関係を得る。

(1) 観測した M 配列画像の正規化と三値化

図 1 M 配列符号化光源
Fig. 1. A M -Array coded light source.

図 2 測定光学系
Fig. 2. System configuration for the measurement.

- (2) M 配列要素の領域レベル 0, 1 の部分の抽出(図 3 (a))
 - (3) 領域の中心を領域の重心で推定(図 3 (a))
 - (4) 隣接する領域の重心の選択(図 3 (b))
- 「像面上の配列の回転が ± 45 度以内」(条件 3) と仮定する。このとき、上方向 ± 45 度以内の範囲にある最も近い重心を上方向の領域の重心とする。同様に上下左右の領域の重心を選択する。
- (5) ウィンドウの選択 正しく $k_1 \times k_2$ の大きさがとれているか調べる。
 - (6) 対応点の決定 M 配列とマッチングして対応関係を決定する。
 - (7) 補間 マッチングできなかった点でも隣接する領域から対応点かわかるものは補間する。
- ここで、対応点の決定では M 配列の情報が冗長なのでさらに高速に対応付けしたり、3 値化誤りを訂正するなど工夫できる可能性がある。

この処理方法でほとんどの対応点を得られた。また、対応点は重心の計算で推定したためサブピクセルの精度で求めた(実験では、標準偏差が 0.2 ピクセルであった)。

以下に M 配列光源を用いた符号化の利点をあげる。

(a) 抽出された M 配列と重心

(b) 重心どうしの関係を結んだもの

図 3 対応関係決定の段階
Fig. 3. Step to determine correspondences.

- ① 光源面数が 2 枚で対応付けできる。
 - ② テンプレートの大きさが $(n/2) \times 2$ と小さい。
 - ③ 濃淡レベルが三値ですむため CCD 素子の雑音に強い。
 - ④ M 配列要素の重心を求めることによって、像面上の対応点(領域の中心点)がサブピクセルの精度で求まる。
- 本方式は、 M 系列符号化光源を用いる方法より①, ②, ④の点で優れている。

3. 法線算出法

従来の法線算出法である参照面法について簡単に記す。更に、今回提案する法線決定法を説明する。

〈3・1〉 参照面法の問題点 参照面法は「物体と参照面との距離が小さい」(条件 1) と仮定し、図 4 のように物体上の法線ベクトル n が、参照面と視線との交点での法線 n' で近似的に得られるとして ($n \approx n'$)、これを積分して物体の形状を求める方法である。

従って、この方法では物体の位置は決定できない。参照面法の問題点を整理すると次のようになる。

- (1) 法線誤差が $\Delta Z/a$ にほぼ比例して大きくなる。
- (2) 法線の積分から形状は測定できるが、位置は定まらない。

図 4 参照面法
Fig. 4. Reference plane method.

(a) 対応関係からの制約条件

(b) 二つの制約条件

図 5 法線決定法
Fig. 5. Determination of normal vectors.

〈3・2〉 局所的に平面をあてはめる方法 図 5 (a)のように光源上の点 (X_s, Y_s, Z_s) が鏡面で反射されてカメラの像面上の点 (x, y, l_c) に観測されたとき、この2点と原点 $(0, 0, 0)$ の三点が作る平面 (a) は、鏡面の法線ベクトル $(a, b, -1)$ を含む。このことから法線のパラメータ a, b の拘束条件として

$$p_1 a - p_2 b - p_3 = 0 \quad (2)$$

$$p_1 = Y_s l_c - y Z_s$$

$$p_2 = X_s l_c - x Z_s$$

$$p_3 = X_s y - x Y_s$$

が得られる。この方程式を二つの対応関係から得れば a, b が連立方程式で求まる。これは、図 5 (b) のように傾きの異なる二つの平面 (a), (b) の交線として鏡面法線が求まるためである。実際には像面上で得られる重心の、真の対応点からの誤差の影響を小さくするため、8 近傍または 4 近傍に平面をあてはめ、以下の

(a) 参照面が平面鏡の中心のとき

(b) 参照面が中心から 5 cm 離れたとき

図 6 平面鏡に対する法線算出結果
Fig. 6. Results of normal vector calculation for a plane mirror.

ように最小 2 乗法で a, b を決定する。

$$\sum (p_1 a - p_2 b - p_3)^2 \rightarrow \min \quad (3)$$

法線ベクトルが求まれば (X_s, Y_s, Z_s) と (x, y, l_c) の値を用いて鏡面上の点 (X, Y, Z) が求まる。

4. 実験結果

図 6 (a), (b) に、傾けた平面鏡を数十点で観測した法線決定結果を示す。(a) 図では参照面を平面鏡の中心にとるようにし、(b) 図では参照面をわざと 5 cm ずらした。平面のあてはめを最小 2 乗法で行い法線を求めた方法 (平面あてはめ法) では、参照面の位置によらず真値の周りに観測結果が散らばっているが、参照面法では鏡面の参照面からのずれが、大きな誤差を引起こしている。

以上より、平面あてはめ法で大きな対象に対しても原理的に法線が決定できることが裏付けられたが、対応点検出誤差により際立った精度改善には至っていない。平面あてはめ法の結果の分散を見ると、法線パラメータ a が b の約 10 倍になっている。これは、図 5 (b) において、 (X, Y, Z) の誤差が対応点の誤差によって生じ、 x 軸方向に傾いた 2 平面によって x 方向

図 7 将来の光学系
Fig. 7. Future system configuration.

の法線ベクトル成分の誤差が大きくなるためである。従って、二つの平面のなす角度が大きいほど代表点検出誤差の影響が小さくなるが、そのためにはあてはめを行う近傍を広くとらなくてはならない。その場合には、曲面鏡面の場合は平面で近似することによる誤差が多くなるため、曲面で近似する必要がある。

5. む す び

少ない光源面の数と小さなテンプレートから対応関係がサブピクセルの精度で決定できる M 配列符号化光源を用いる対応関係決定法と、対応関係を使って小さいあてはめ領域から法線と位置が決定できるため、より曲率の大きい曲面でも小さい誤差で計測できる方法（平面あてはめ法）を提案した。また、実験によりこれらの方法の有用性を示した。

今後の課題は、M 配列符号化光源に適した光学系で、より広い範囲の傾きの鏡面を観測できるようにすることである。これは、〈2・2〉節の(4)項で用いられた(条件3)を、(図7)のように1枚の光源面の大きさを対象に対して適切にとり、直方体の内部に対象を囲むように6枚の光源面を配置して満たすことで解決できる。この光学系ではカメラで捕らえられる鏡面上のすべての点の法線ベクトルと位置が決定できる。

(平成3年7月29日受付)

文 献

- (1) E. N. Coleman & R. Jain.: "Obtaining 3-Dimensional Shape of Textured and Specular Surfaces Using Four-Source Photometry", *Computer Graphics Image Processing*, 18, 309 (1982)
- (2) M. D. R. Babu, C. h. Lee & A. Rosenfeld: "Determining Plane Orientation From Specular Reflectance, Pattern Recognition", 18, 53 (1985)
- (3) 漢野・中野・渡辺: 「鏡面反射を持つ金属物体の面の認識, 情報処理学会コンピュータビジョン研資」, CV 52-7 (昭 63)
- (4) K. Koshikawa: "A Polarimetric Approach to Shape Understanding of Glossy Objects", *Proc. 6th Int. Joint Conf. Artificial Intell.*, p. 493 (1979)
- (5) 村岡: 「レーザー光線を用いたハンダ付外観検査装置」, *電子材料*, 27, 64 (昭 63-11)
- (6) 西野・白井: 「投影光学系を用いた光度差ステレオ法による金属面の形状決定」, *情報処理学会コンピュータビジョン研*

資, CV 31-2 (昭 59)

- (7) S. K. Nayar, K. Ikeuchi, T. Kanade: "Determining Shape and Reflectance of Hybrid Surfaces by Photometric Sampling", *IEEE Trans. Robotics & Automation*, 6, No. 4 (1990)
- (8) A. C. Sanderson, et al.: "Structured Highlight Inspection of Specular Surface", *IEEE Trans. PAMI*, PAMI-10, 44 (1988)
- (9) D. W. Capson & S. K. Eng: "A Tiered Color Illumination Approach for Machine Inspection of Solder Joints", *ibid.*, PAMI-10, 387 (1988)
- (10) 小林: 「色彩照明を用いたソルダジョイント検査」, *精密工学誌*, 56, 1375 (平 2)
- (11) 葉・藤村・山田: 「M 系列符号化格子光源の照明による鏡面物体の測定」, *計測自動制御学会誌*, 26, 123 (平 2-2)

西村 拓一 (非会員)

昭和42年5月23日生。平成2年東京大学工学部計数工学科卒業。同年同大学院計数工学科修士課程進学。現在に至る。医用画像処理, 非接触画像計測などの研究に従事。計測自動制御学会会員。

藤村 貞夫 (正員)

昭和43年東京大学大学院博士課程修了。43年同大学工学部助手, 講師を経て, 48年電気通信大学助教授。53年東京大学工学部助教授, 63年同教授, 現在に至る。工学博士。この間, 55~56年アメリカ・テネシー大学客員教授。光情報処理, リモートセンシング, パターン計測, パターン認識などの研究に従事。

伊藤 直史 (非会員)

昭和61年東京大学大学院修士課程修了。61年横河電機(株)。平成2年東京大学工学部助手, 現在に至る。三次元パターン計測における逆問題の解法に興味をもっている。

喜安 千弥 (非会員)

昭和37年5月29日生。61年東京大学工学部計数工学科卒業。同年(株)日立製作所入社。平成3年東京大学工学部助手, 現在に至る。光応用計測などの研究に従事。計測自動制御学会, 情報処理学会会員。