

多値M配列パターン投影法を用いた3次元物体形状の再構成と識別

森田啓義 佐藤昌彦 古賀勝敏 阪田省二郎 北川孟
豊橋技術科学大学 工学部 生産システム工学系

ほぼ回転体に近い物体形状を非接触に計測し、物体表面形状をソリッドモデルとして計算機内に再構成する手法を開発した。計測物体は多面体、曲面体のいずれでもよく、どちらの物体であるかは、計測データの処理過程で自動的に判断され、多面体は多面体モデルを用いて、曲面体は滑らかな曲面モデルを用いて再構成される。物体の測定には、すでに提案した2値M配列パターン投影法を7値M配列に拡張した方法を用いる。パターンを多値化することによって、ドット対応の誤り率を大幅に低減できた。

Reconstruction of Shapes of 3-D Objects by multi-valued M-Array Pattern Projection Method

Hiroyoshi Morita, Masahiko Sato, Katsutoshi Koga, Shojiro Sakata, Hajime Kitagawa
School of Production Systems Engineering, Toyohashi University of Technology
Tempaku, Toyohashi, Aichi 440, Japan

We develop a system to measure the shape of a 3-D object and to reconstruct the whole shape as a solid model.

Polyhedra and smooth curved objects are able to be measured by the proposed system. The type of objects can be automatically recognized by the system. Therefore, a suitable solid model (polyhedron or curved solid) for an measured object can be chosen.

To measure surfaces of objects, we propose a 7-valued M-array pattern projection method. The method is an extension of a 2-valued M-array pattern projection method which has been previously proposed. By adopting a multi-valued pattern as a projection pattern, it shows that a significant reduction of the rate of mismatching between projected and observed patterns is attained.

1 はじめに

3次元物体の形状をTVカメラで撮影した2次元画像から計算機内部に再構成することは、機械による視覚系を実現するために重要であるばかりでなく、3次元CADのための形状入力としての応用が考えられ、さまざまな研究がなされている[1, 2]。

物体形状を再現するためには、物体表面の位置を測定することが不可欠であり、接触針を用いる方法[3]や、ステレオ法[4]、光投影法[5, 6, 7]など、各種の方法が提案されている。中でも光投影法は計測物体の撮影が瞬時に行え、ステレオ法では困難な曲面物体の計測に適している。

光投影法の原理は、物体に投影したパターンの投影面と受像面における対応関係より、三角測量の原理を用いて、物体表面上の位置を測定するものである。このとき、投影側と受像側の視差のため、投影されたパターンと同じ順序のパターンが受像されるとは限らず、欠落、ずれといったパターンの乱れが生じうる[7]。パターンの乱れが存在するもとの、両パターンの正確な対応付けをいかに行うかが光投影法の大きな問題点である。

パターン間の対応付けのために、グレイコードを用いてスリットパターンの各スリットに固有のコード番号を割り当てる方法[5]や、3原色の色スリットを用い、一定長さのスリット列ごとに、固有の色パターンを割り当てる方法[6]が提案されているが、いずれも、正確な対応を得ることは困難である。

それに対し、著者らは投影パターンにM配列を利用して、パターンの乱れを検出、訂正する計測方法を提案した[7]。M配列はM系列と同様に、一周期内に全零以外のすべてのウィンドウパターンが一度のみあらわれるという性質(ウィンドウ性)をもつ。原理的には、このM配列のウィンドウ性を利用して、投影パターンと受像パターンの一義的な対応付けを行える。

[7]の方法では、パターンの乱れを訂正するために、M配列パターン以外にもスリット状の補助パターンの使用を必要としていたが、その後、同じ著者らによって補助パターンを用いずに、パターンの乱れを検出、訂正する方法が提案されている[8]。

今回提案する方法では、M配列の要素数を2値から7値に拡張することによって、ウィンドウサイズを3×4から2×2へ小型化する。これにより、従

来の方法ではウィンドウを切り出せなかった部分の対応付けを可能にする。また、[8]のものに比べ、対応付けの手順が簡略化できた。

計測された物体表面上の位置データから、物体の3次元形状モデルを計算機内部に構築するには、単なる距離情報だけではなく、計測データから計測物体の位相構造を抽出したり、多面体であるか曲面体であるかという幾何学的な特徴を識別する必要がある。

従来、物体を計測して形状を再構成する手法として、1)ステレオ画像から多面体を構成する方法[1]、2)多面体とその影情報を用いる方法[9]、3)輪郭特徴点から立方体形状を再構成する方法[2]などが提案されている。しかし、1),2)の方法は多面体のみを対象としており、滑らかな曲面体には不適当である。また3)の方法では局所的な凹部をもつ曲面体を再構成することは原理的に不可能である。

一方、本稿で提案する計測物体の再構成法は、多面体、曲面体のいずれにも適用できる。計測物体がどれだけの形状であるかは、処理の途中で自動的に識別される。この識別結果に基づいて、それぞれの場合に適した手法で、物体形状はソリッドモデルとして再構成される。

2 観測系

図1に本研究に用いた観測系を示す。計測装置は、投影装置、受像装置、回転テーブルから構成され、回転テーブル上に固定された計測物体の表面上に投影されたパターンの3次元座標値を算出する。

投影装置には液晶ディスプレイ投影機を使用し、格子状に配列された正方形のドットパターンを投影する。受像装置には、CCD白黒テレビカメラを使用し、計測物体に投影されたパターン像を撮影し、画像入力装置を通してコンピュータに入力される。画像入力装置は、CCDカメラのテレビ映像信号を、縦横512×768画素(8ビット/画素)のデジタル濃淡画像に変換する。回転テーブルは複数方向から物体の全形状を計測するために用いる。テーブルの回転は、計算機からの制御信号をインターフェースを介して2相励磁信号に変換し、ステッピングパルスモータを駆動することによって行われる。回転テーブルの直径は350mm、最小回転角度は1.8度である。

3.2 M系列からM配列への変換

m_1, m_2 を $k = m_1 m_2$ を満たす正整数として与える。GF(q) 上の M 系列 $(a_0, a_1, \dots, a_{n-1})$, $n = q^k - 1$ から次の条件を満たす、大きさ $e_1 \times e_2$ の行列 A を作成する [10]。

1. $e_1 e_2 = q^k - 1 (= n)$.
2. e_1 は $q^{m_1} - 1$ を割りきるが、 $q^k - 1$ ($0 < k < m_1$) は割り切らない。
3. e_1 と e_2 は互いに素。
4. A の (i, j) 要素を、 $a_{e_2 i + e_1 j \pmod n}$ とおく。

実際には、上の条件 (2) を無視しても M 配列を作成することができる。例えば、 $q = 7$ の場合、 $m_1 = m_2 = 2, n = 2400, e_1 = 75, e_2 = 32$ は条件 (2) を満たさないが、発生された行列は M 配列であることが確認できる。実験には、この M 配列を用いた。

M 配列は、2 次元偏差分方程式系 (2 次元線形再帰関係) の解として与えることができる [11]。上述の M 配列に対応する偏差分方程式系は

$$\begin{aligned} u_{i,j+2} &= 4u_{i+2,j} + u_{i+1,j} + 5u_{i,j+1} + 6u_{i,j} \\ u_{i+1,j+1} &= 6u_{i+2,j} + 4u_{i+1,j} + u_{i,j+1} + 2u_{i,j} \quad (2) \\ u_{i+3,j} &= 5u_{i+2,j} + 2u_{i+1,j} + 4u_{i,j+1} + 3u_{i,j} \end{aligned}$$

となる。この関係を図式的に示したのが図 3 である。図 3 において * で記された位置は、(2) の各左辺の変数に対応しており、これらの変数の値は、図 3 に示した太線で囲まれたウィンドウ内の値から定まる。したがって初期ウィンドウの値が一組定まると、M 配列全体は (2) を再帰的に用いることによって一意的に求められる。一つの M 配列を定める偏差分方程式は一通りとは限らない。例えば、図 4 のような 2×2 の正方ウィンドウの場合、このウィンドウの周囲にある 12 個の格子点における M 配列の値は以下の偏差分方程式により求められる。

$$\begin{aligned} a &= 6u_{i+1,j+1} + 6u_{i,j+1} + 5u_{i,j} \\ b &= 6u_{i+1,j+1} + 4u_{i+1,j} + u_{i,j+1} + 2u_{i,j} \\ c &= 2u_{i+1,j+1} + 3u_{i+1,j} + 2u_{i,j+1} + 2u_{i,j} \\ d &= 5u_{i+1,j+1} + 6u_{i+1,j} + 3u_{i,j+1} + 3u_{i,j} \\ e &= 5u_{i+1,j+1} + 2u_{i,j+1} + 5u_{i,j} \\ f &= 3u_{i+1,j+1} + 3u_{i+1,j} + 2u_{i,j+1} \end{aligned}$$

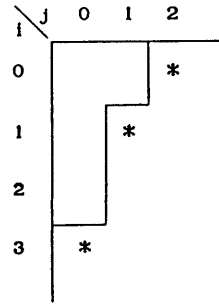


図 3: 偏差分方程式系 (2) の図式表現

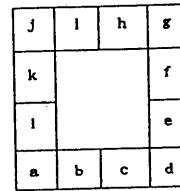


図 4: 正方ウィンドウ

$$\begin{aligned} g &= 2u_{i+1,j+1} + 5u_{i+1,j} + 4u_{i,j+1} + 5u_{i,j} \quad (3) \\ h &= u_{i+1,j+1} + 6u_{i+1,j} + 4u_{i,j+1} + u_{i,j} \\ i &= 3u_{i+1,j+1} + u_{i+1,j} + 2u_{i,j+1} + u_{i,j} \\ j &= 3u_{i+1,j+1} + u_{i+1,j} + 5u_{i,j+1} \\ k &= 3u_{i+1,j+1} + 6u_{i+1,j} + u_{i,j} \\ l &= u_{i+1,j+1} + 6u_{i+1,j} + 5u_{i,j+1} + 4u_{i,j} \end{aligned}$$

この例以外にも、図 5 に示すように多種類のウィンドウ形状をとることができる。実際の計測においては、パターンノイズの影響を受けにくいコンパクトなものがよい。そこで実験では 2×2 の正方形のものを中心に用い、正方ウィンドウがとれない細長い領域に対しては $4 \times 1, 1 \times 4$ のウィンドウもあわせて使用する。

4 投影パターンと受像パターンの対応付け

受像面上で受像パターン各ドットの中心座標ならびに M 配列の観測値を求める。次に各ドットの受像面上での隣接位置関係を反映させながら、2 次元配列上に順次配置する。このようにして定められる 7 値の 2 次元配列を仮配列と呼ぶ。

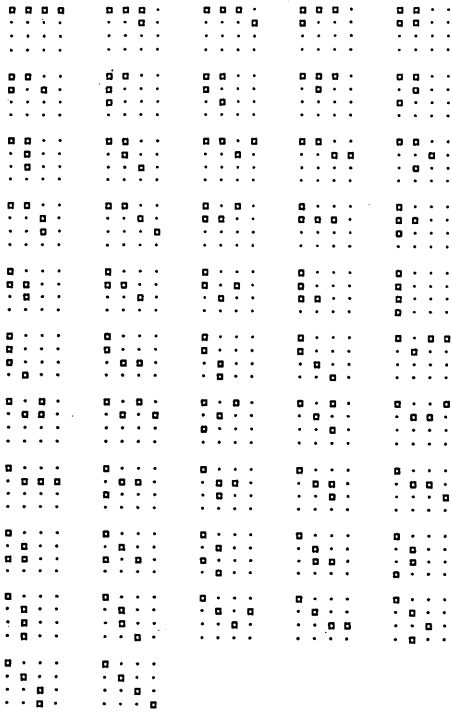


図 5: 7 値 M 配列のウィンドウ例

受信側と投影側における視差のため、複数物体の境界部分でドットの欠落やずれが生じ、仮配列上のドットの順序は、投影パターンのもとは必ずしも一致しない。両パターンの正確な対応付けを得るためには、1) 仮配列上でパターンの乱れている箇所を検出し、2) 適切に訂正しなければならない。以下にその詳細を述べる。

4.1 極大領域の拡大生成

仮配列上で、パターンの乱れが存在しないとみなされる極大な領域を次に示す拡大アルゴリズムによって求める。拡大アルゴリズム

1. D を空領域とする。仮配列上で D 以外の領域からウィンドウ領域の一つを選び、それを C とする。 C と同じパターンをもつウィンドウを M 配列上で探し、その位置を求める。一方、仮配列上から新たにウィンドウ領域を選ばなくなれば終了する。
2. C に隣接するドットと、 C 内のドットとを同時に含むウィンドウ領域 W がとれ、さらに、 W のパ

ターンが M 配列上で W に対応する位置にあるウィンドウのパターンと矛盾しなければ、 $C = CUW$ として、2の最初にもどって同じ操作を繰り返す。もし矛盾が生じれば、 $D = DUC$ とおき、1に戻る。

上の手続きで求められた領域 C と同じパターンをもつ領域は M 配列上に存在するが、 C に隣接するドットを加えた領域のパターンは M 配列上には存在しない。すなわち、領域 C は、パターンの乱れが存在しないとみなされる領域の中で、極大である。以下では C を単に極大領域と呼ぶ。

4.2 極大領域の重複部分の復号

一つの極大領域の内部では、矛盾なく M 配列との対応を一義的に定めることができる。しかし、二つの極大領域が互いに重なり合っていると、各々の対応付けに矛盾が生じる場合がある。例えば、図6に示すような欠落がある場合、図中の中央のドットは両方の極大領域に含まれ、 M 配列上の位置は一意には定まらない。このように複数の極大領域に含まれるドットを重複ドットと呼ぶ。重複ドットの M 配列上における位置を定めるため、本研究では、

物体の輪郭およびエッジは、投影パターンのピッチ幅に対して十分滑らかである。

という前提に基づき、この前提により適する方の極大領域へ重複ドットを含めている。

この方法では、必ずしも正しい対応付けが得られるとは限らないが、重複ドットの出現する場所は、ほとんどの場合、物体同志の境界付近に限定され、しかも M 配列のウィンドウ性より、極大領域が重なる領域の幅は、高々 $\max(n, m) - 1$ であることが保証されるので、重複ドットが頻繁に現れることはない。実際、今回の実験では、 $2 \times 2, 4 \times 1, 1 \times 4$ のウィンドウを用いたので、重複領域の幅は高々 1 となり、重複ドットが計測ドット全体に占める割合は数パーセント程度であった。

5 計測結果の検討

図7に示す円錐と円柱が相貫した物体と四角柱を同時に計測した。図8は、 2×2 の正方ウィンドウのみで領域を拡大した結果である。図中の正整数

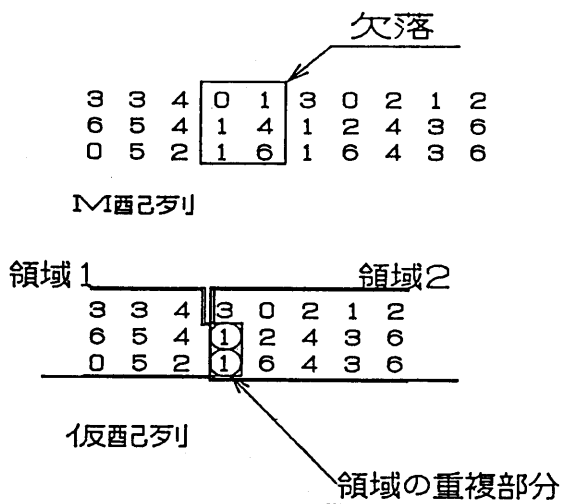


図6: 極大領域が重なりあう例

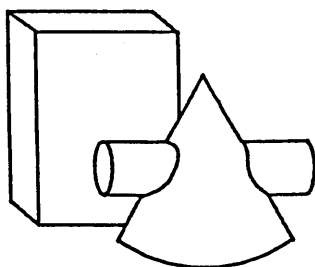


図7: 計測対象

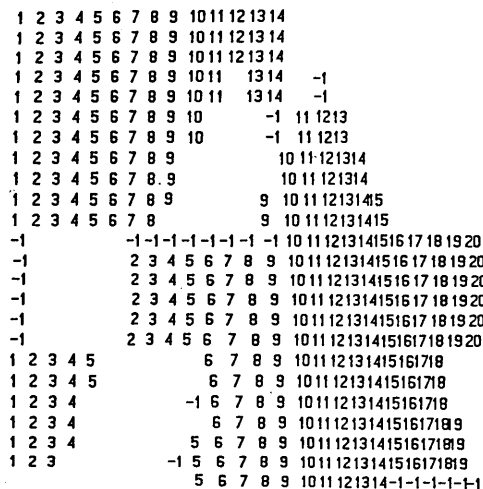


図8: 正方ウィンドウのみを用いた極大領域の生成

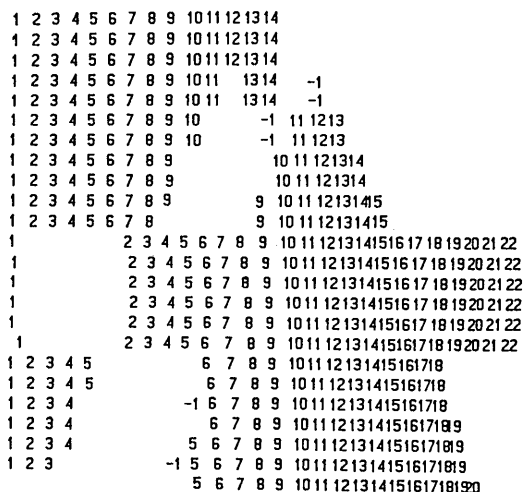


図9: 4×1, 1×4 ウィンドウの適用結果

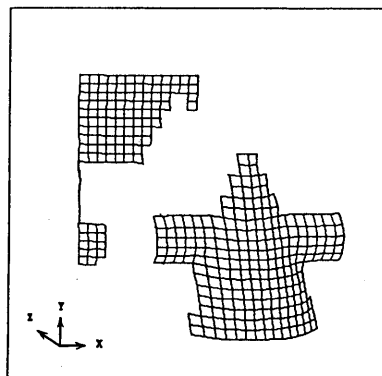


図10: 計測結果のワイヤフレーム表示

は、受像されたドットのM配列上の列番号を表している。正整数の位置は、受像面上でのドットの位置に対応している。また、-1は未対応ドットを表している。未対応ドットが水平、垂直方向に直線状の領域となって残っている。図9は、4×1, 1×4の細長いウィンドウを用いて残った領域に拡大アルゴリズムを適用した結果である。未対応ドットの数大幅に減少している。なお、この例では、重複ドットは現れなかった。図10に、各ドットの空間座標を求めた結果を示す。

提案方式の有効性を調べるために、従来の2値M配列パターン投影法[7]と、色スリット投影法[6]との比較を試みた。図11に示す四つのシーンを各方式によって計測し、未対応ドットを含んだ正しく復号されなかったドットの全受像ドットに対する割合を調べた。結果を表5に示す。

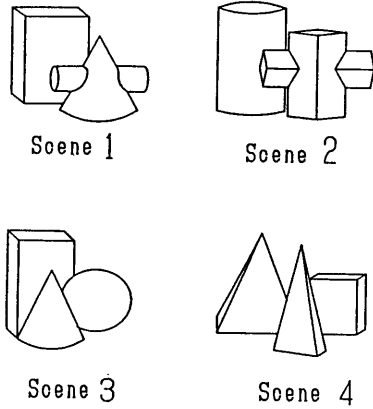


図 11: 計測した四つのシーン

	7値M配列パターン投影法 2x2window 2x2, 1x4, 4x1		2値M配列 パターン投影法	Boyer and Kakaoコード
Soene 1	5.1	1.0	16.5	2.4
Soene 2	2.0	1.1	13.5	0.6
Soene 3	4.9	3.0	21.9	3.5
Soene 4	0.7	0.7	19.7	5.8

表 1: 正確に対応付けられなかったドットの割合(%)

2値M配列パターン投影法では、ウィンドウサイズが3×4と大きく、物体の境界や先端部分でウィンドウがとれないため、拡大アルゴリズムが有効に働かず、多くの未対応ドットが現れた。

色スリット法は本質的に1次元のウィンドウを用いているため、受像パターンに大きな乱れが生じている場合には、2次元ウィンドウを用いる提案方式より有効な場合がある。しかし、その反面、1次元ウィンドウを用いるゆえに、重複ドットの判定があいまいになり、誤った対応付けがおこりやすい。実際、シーン1、シーン3、シーン4における誤対応ドットの数は、それぞれ、全ドット数の0.6、2.3、3.4%を占めていた。一方、提案方式では、重複ドットはすべて正しく対応付けられた。

6 物体形状の再構成

この章では、提案する7値M配列パターン投影法を用いて測定された点データ(3次元空間座標)

から、物体の元の形状を再構成する方法について述べる。対象物体は多面体でも曲面体でもよいが、水平断面の輪郭上の任意の点を適当な極座標系で表すと、1対1で角座標に対応するものに限定する。

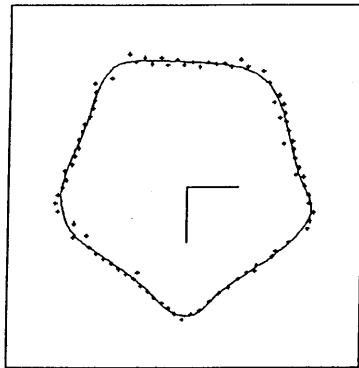
まず、図1に示した測定装置を用い、計測物体を回転テーブル上に固定して、物体を90度づつ回転させ、合計4方向から物体を測定する。次に、各方向から測定された点座標を逆回転変換して、一つにまとめると、原理的には、物体全面の形状を計測したのと等価になる。さらに、各点Pの直交座標(X, Y, Z)を円柱座標(R, θ, Y')に変換する。ここで、Y'は、全計測点の重心を通るX-Z平面に平行な面πへPから下ろした垂線の長さ、Rは重心を通り、平面πと直交する直線lへPから下ろした垂線l_Pの長さ、θはl_PとZ軸とがなす角である。最後に、全測定点データをθによって小さいもの順に並べ直す。

6.1 方針

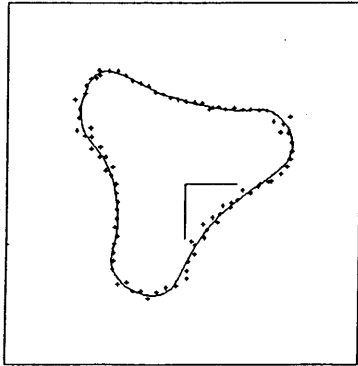
与えられた点データから計測物体の形状を再構成するための手続きを2段階に分けて考える。第一段階では、観測系が、投影パターン上の同一行のドットは、物体上でもほぼ等しい高さに投影されるように設定されていることを考慮して、同一高さの点データ(断面データ)から輪郭線を再構成する。さらに、輪郭形状の特徴を分析して、計測物体が多面体か曲面体かの識別も行う。第二段階では、多面体と判断された場合と曲面体と判断された場合とに分けて、それぞれに適した方法で、断面の輪郭群から物体の全面形状を再構成する。

6.2 断面輪郭線の再構成

断面データから輪郭線を求めるために、断面データを平滑化する。平滑化に用いる近似関数としては、精度ならびに安定性に優れた3次B-スプライン曲線[12]を用いる。スプライン曲線で点データを平滑化する場合、節点を適切に決定することが重要で、最適な節点配置を求めるには長い計算を要する。そこで本稿では、簡単なアルゴリズムで準最適な結果を得ることのできる逐次分割法[12]を採用した。最初にデータの両端点とその中点を節点として与える。近似の悪い区間をその中点で2分し、中点を新たに節点として加えるという操作を、すべての区間で満足のいく近似が得られるまで再帰的



(a)



(b)

図 12: 断面閉曲線

に繰り返す。この方法を用いて正十二面体および凹部をもつ曲面物体のある断面データを平滑化した結果を図 12 に示す。

6.3 物体形状の識別

物体が多面体であるか曲面体であるかの判断は、平滑化された断面閉曲線の形状が多角形として近似できるかどうかによって行う。

6.3.1 特徴点の抽出

まず、断面閉曲線を構成する各スプライン曲線をパラメータ区間で n 等分し、対応する点 p_1, p_2, \dots, p_n における曲率半径 $r_i, i = 1, \dots, n$ を求める (実際には $n = 10$ に設定)。次に、断面形状の最大半径をしきい値 T_1 として、 T_1 以下の曲率半径 r_i をもち、かつ点列 $r_i, i = 1, \dots, n$ において極小である点 p_i を特徴点として選ぶ。このとき、直前に選ばれた特徴点との間に存在する点の曲率半径の最大値

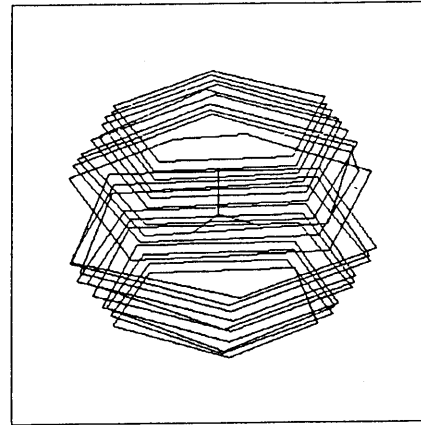


図 13: 識別後の多面体の輪郭線群

が、しきい値 T_2 (断面形状の最大半径の 1.2 倍) 以下ならば、二つの特徴点は本来一つのものとみなし、両者の中間点を改めて特徴点とする。最後に、各特徴点に最も近い計測データ点を対応づけておく。

6.3.2 断面形状の識別

計測された物体形状が多面体であるか曲面体であるかは、断面形状が多角形であるか、閉曲面であるかによって判断する。断面形状の識別は、特徴点を頂点とする多角形の周囲長に対する、前節で求めた平滑化スプライン曲線の全長の比をとり、あるしきい値 T_3 より小さければ多面体、大きければ曲面体とみなす。実際の T_3 の値は、4 種類の多面体 (正 12 面体、立方体、正 3 角錐、正 6 角柱) と曲面体 (凹部をもつ曲面体、円柱、円錐、球) を計測した結果、0.987 と定められた。この値によって、計測に用いた物体の形状は、正確に識別された。

多角形と判断された断面データに対しては、特徴点に対応する計測データごとに部分セグメントに分割する。そして、セグメントごとに最小二乗近似直線を求める。さらに、隣接するセグメント間で近似直線の交点を算出し、交点を頂点とする多角形を得る。一方、曲面体と判断された場合には、すでに求められている断面スプライン閉曲線のパラメータを出力する。図 13 に、識別後の断面形状の一例を示す。

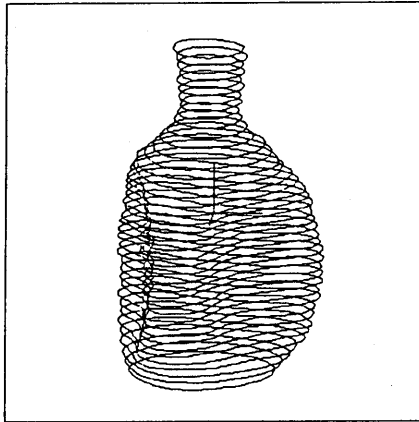


図 14: 識別後の曲面体の輪郭線群

6.4 多面体の再構成

前節で求めた多角形の辺の集合を、その向きがある許容誤差範囲で等しいとみなされるもの同士に分割する。一つの分割集合は一つの平面に対応している。

つぎに分割集合に対応する平面の隣接関係を調べる。横方向の隣接関係は、辺の隣接関係に帰着されるので、各辺ごとに、その辺を含む分割集合を記録しておけば、容易に求めることができる。縦方向の隣接関係を求めるには、各分割集合に対して、属する辺の両端点の角座標の最大、最小値を計算する。そして、これらを両端としてもつ数直線上の区間 I を、分割集合ごとに求める。分割集合に対応する面分上の点の角座標は、かならず I 内にある。そこで、対応する I 同士が互いに交わる分割集合は隣接しているとみなす。

また、分割集合の Y 座標の最大値(最小値)が計測データの Y 座標の最大値(最小値)と等しければ、天井面と底面と隣接しているものとする。

分割集合に対する平面の方程式 $aX + bY + cZ + d = 0$, $a^2 + b^2 + c^2 = 1$ は、それに属する辺の端点全体から最小二乗法を適用して求める。平面の方程式と隣接関係が求まれば、相互に隣接している三つの平面の交点を計算する。その結果、これらの交点を頂点とし、平面内で隣合う2交点を結ぶ線分を稜線とする多面体モデルが完成する。

6.5 曲面体の再構成

断面閉曲線(平滑化スプライン曲線)上で等しい角座標をもつ点を2分割法によって求める。すなわち、一つのスプライン曲線に対応するパラメータ区間を2分割し、それぞれの区間の両端の角座標を求め、与えられた角を含む区間をさらに2分割する。この操作を、区間の長さが十分小さくなるまで繰り返すことによって、指定された角をもつ点を求めることができる。つぎに、これらの点を用いて Y 軸方向に沿って、もう一度逐次分割法による平滑化を行い、さらに2分割法によって、 Y 座標の等しい点を求める。最終的に得られた点を曲面形状物体の近似多面体の頂点とする。近似多面体の4頂点で囲まれた四角形領域に対して、[13]の方法で Bézier 曲面パッチを張る。この方法により、隣接する曲面パッチは単位法線ベクトルと曲率ベクトルが連続に接続される。

7 再構成の結果

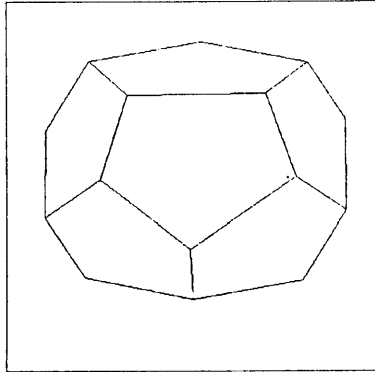
7値 M 配列パターン投影法によって測定された物体表面上の点データの集合から、物体形状の再構成を試みた。測定に用いた物体は、3種類の多面体:

1. 1辺62mmの正12面体
2. 1辺100mmの立方体
3. 1辺123mm, 高さ192mmの正3角錐

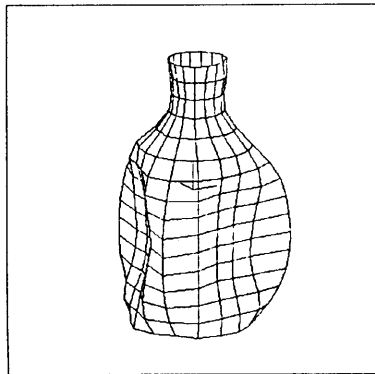
と3種類の曲面体

1. 三つの凹部をもつ曲面体
2. 半径74mm, 高さ179mmの円錐
3. 半径46mm, 高さ206mmの円柱

である。再構成した結果を図15に示す。再構成された形状と計測物体の形状とを比較するために、立方体と正12面体の面間角度を計算した。その結果を表2に示す。本システムの全計測時間は、ファイルの入出力時間も含めて、約55分である。その内容は、物体の計測時間に30分、 XYZ 座標値の算出に10分、断面形状データの作成に7分、物体形状の再構成に、多面体の場合で7分、曲面体で6分である。計算機は、 XYZ 座標値の算出にNEWSを、それ以外の処理はPC-9801VXを使用した。



(b) 正十二面体



(a) 凹部を持つ曲面体

図 15: 物体の再構成

	正十二面体	立方体
理論値	116.5651	90.0000
エッジの数	30	12
平均値	116.5509	89.9997
最大値	121.1694	90.5482
最小値	112.5046	89.2287
標準偏差	1.4921	0.3270

表 2: 多面体の面間角度

8 おわりに

7 値 M 配列パターン投影法は、2 次元的な情報を有効に使うことができ、さらに復号において対応付けのあいまいさが小さくなることが明らかにした。さらに、この計測方式を用いて測定された点データの集まりから、多面体ならびに曲面体を識別しながら再構成する手法を与えた。

パターン投影法では、パターンの重心やパターンの最も明るい一点を指標とするため、一つのドットや一本のスリットにゆがみを与えるようなシーンに対しては計測誤差が大きくなる。実際の実験で問題となったのは、以下の三つの場合である。

1. 傾きの大きな面でドットが変形した場合
2. 物体の境界で一つのドットが二つに分裂する場合
3. 物体の境界で異なる二つのドットが一つに融合される場合

これらのドットは自動的に除去する必要がある。

また、7 値の M 配列で符号化するのに 2 値のパターンを用いているため、最低 4 枚の画像を取り込まなければならない。今回の実験では、より鮮明なコントラストを得るため、各パターンに対応した反転パターンも使用しているので、合計 8 枚の画像を処理している。処理時間の多くはこれらの画像の取り込みと、差分や 2 値化に要している。処理の高速化を実現するには、カラーパターンの使用による入力画像の枚数の削減や、専用の画像処理プロセッサの使用によって可能である。

参考文献

- [1] 丸山, 阿部: 立体視に基づく面の抽出と面内ベクトルの認定による多面体の抽出, 電子情報通信学会論文誌 (D), Vol.J70-D, No.12, pp.2581-2589 (1987).
- [2] 三宅, 土井: 立体形状の多面体近似システム, 情報処理学会論文誌, Vol.25, No.5, pp.745-754 (1984).
- [3] 梅谷, 菱川: 網目状能動体による曲面のパターン識別, 計測自動制御学会論文集, Vol.14, No.4, pp.413-419 (1978).

- [4] Yakimovsky, Y., and Cunningham, R. "A system for extracting three-dimensional measurements from a stereo pair of TV cameras," *Comput. Graphics Images Processing* Vol.7, pp.195-210, 1978.
- [5] 佐藤, 井口: 空間コード化による距離画像入力, *電子通信学会論文誌 (D)*, Vol.J68-D, No.3, pp.369-375 (1985).
- [6] Boyer, K.L. and Kak, A.C. "Color-encoded structured light for rapid active ranging," *IEEE Trans. on PAMI*, Vol.PAMI-9, pp.14-28, 1987.
- [7] 森田, 矢島, 阪田, 中村: ドット誤り訂正能力をもつ符号化パターン投影法による物体形状の計測, *情報処理学会論文誌*, Vol.29, No.3, pp.233-241 (1988).
- [8] Morita, H., Yajima, K. and Sakata, S. "Reconstruction of Surfaces of 3-D Objects by M-Array Pattern Projection Method," *Proc. 2nd ICCV*, Tampa, FL, pp468-473 (Dec. 1988).
- [9] 郭, 谷内田, 辻: 多面体の3次元位置と姿勢の計測, *電子通信学会論文誌 (D)*, Vol.J68-D, No.3, pp.376-383 (1985).
- [10] MacWilliams, F.J. and Sloane, N.J.A. "Pseudo Random Sequences and Arrays," *Proc. IEEE*, Vol.64, No.12, pp.1715-1726 (1976).
- [11] Sakata, S. "Finding a minimal set of linear recurring relations capable of generating a given finite 2-D array," *J. of Symbolic Computation*, Vol.4, 1987.
- [12] 市田, 吉本: スプライン関数とその応用, 教育出版 (1979).
- [13] 中野, 森田, 阪田, 藤元: 双3次Bézier曲面を统一的に用いた滑らかなソリッドモデルについて, *情報処理学会グラフィックスとCADシンポジウム論文集*, pp.151-157 (Nov. 1986).