

多値 M 配列パターン投影法による複数物体の計測†

森田 啓 義†† 古 賀 勝 敏††† 阪 田 省 二 郎††††

3次元物体計測法の一つである光パターン投影法は、物体に投影した2次元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計測する手法である。光パターン投影法は、計測が高速に行え、曲面物体の計測に適しているという利点をもつが、複数物体の同時計測においては、受像側では必ずしも投影側と同じ順序のパターンが観測されるとは限らず、一般には、欠落、ずれといったパターンの乱れが生じる。パターンの乱れが存在するもつで、両パターンの正確な対応付けを行うため、本論文では、投影パターンに多値 M 配列を用いた計測方法を提案する。 M 配列はある一定サイズのウィンドウを配列に沿ってすべらせたとき、すべての可能な（全零パターンを除く）パターンが、一周期内に必ず一度、しかも一度だけ現れるというウィンドウ性をもつ2次元周期配列である。このウィンドウ性を利用すれば、投影パターンと受像パターンの一意的な対応は原理的に可能である。しかし、受像パターンに乱れた部分が存在すると、一義的には対応付けられない部分が生じる。この対応付けのあいまいな部分の大きさはウィンドウサイズと密接に関係しており、できるだけ小さなウィンドウを使用することによって、あいまいな部分が減少し、結果的に誤対応パターンの発生を抑えることができる。そこで、従来使用していた2値 M 配列を7値 M 配列に拡張してウィンドウの小型化を図った。提案方式の有効性をいくつかの測定例から明らかにする。

1. はじめに

画像処理によって3次元物体の形状を計測する方法は、機械による3次元物体の認識を行うための前処理として重要であり、さまざまな計測方法が提案されている。それらを大別すると、受動的に物体の反射光を観測する両眼視法と能動的に光パターンを物体に投影する光投影法がある。

両眼視法¹⁾は物体の撮影が容易であるが、一般に、対応点の探索に時間がかかり、正確な対応が得られない場合が生じる。それに対し、光投影法のなかでも、スリット光を空間的に走査する方法は、対応点の探索は必要でなく、高精度な測定が可能であるが、走査に長い時間を要する。光パターン投影法は、物体に2次元パターンを同時に投影するもので、パターンを走査する必要がないために、スリット光走査方式に比べると処理時間が短く、装置化が容易である。

光パターン投影法の問題点は、投影側と受像側の視差のために、物体の不連続な部分において、投影パターンと受像パターンの対応付けにあいまいさが生じ

る点である。図1は、物体前方から投影されたパターンと、物体に向かって右側からカメラで撮影されたパターンの像を表している。この図では、物体1の前方に置かれた物体3が2～4のドットを遮り、さらに、物体1と物体2の奥行きの違いから、本来縦に並んで投影された二つのドットが受像側では1列ずれて観測されている。このような、光パターン投影法に固有するパターンの欠落やずれを**パターンの乱れ**と呼ぶ。

乱れた受像パターンから、投影パターンとの正確な対応付けを得るために、 M 系列やその2次元への拡張である M 配列、そしてグレイコードなどを用いて、投影パターンを符号化する方法が提案されている²⁾⁻⁵⁾。 M 系列を用いる方法²⁾は、 M 系列によって特徴付けられたスリットパターンを物体に投影し、 M 系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を一義的に対応付ける。しかし、パターンの乱れを含む領域の対応付けにはあいまいさが残る。グレイコードを用いる方法³⁾では、グレイコードを構成する n 枚のパターンを投影することによって 2^n 本のスリットパターンを生成する。各スリットは異なるコード値によって符号化されるので、原理的に正確なパターンの対応付けが可能である。しかも、グレイコードの性質から、コード化誤りが起こったとしても、その影響を低く抑えることができる。しかしながら、パターンの撮影はスリットの総数 N に対して、少なくとも $\lceil \log_2 N \rceil$ 枚のパターンを撮影しなければならない。

一方、筆者らは、投影パターンに2値 M 配列を利用して、2枚のパターンの撮影のみからパターンの対応

† Measurement of 3-D Objects by Means of Multi Valued M -Array Pattern Projection Method by HIROYOSHI MORITA (Department of Production Systems Engineering, Faculty of Engineering, Toyohashi University of Technology), KATSUTOSHI KOGA (Division of Technological Development, TOTO Ltd.) and SHOJIRO SAKATA (Department of Knowledge-based Information Engineering, Faculty of Engineering, Toyohashi University of Technology).

†† 豊橋技術科学大学工学部生産システム工学系

††† 東陶機器(株)技術開発部

†††† 豊橋技術科学大学工学部知識情報工学系

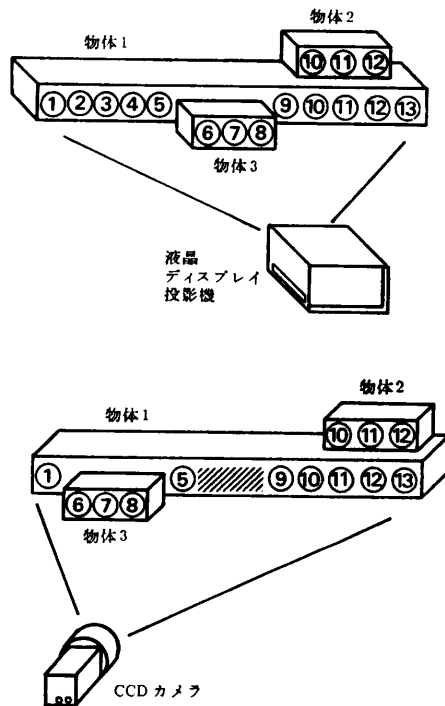


図1 パターンの乱れの例：投影側からは順に並んでいるパターンも受像側からみると、欠落したり、ずれたりする。

Fig. 1 An example of pattern disorders: A received pattern includes disorders such as deficiency and displacement of subpatterns.

付けを行う方法を以前に提案した^{5),6)}。これは、受像パターンから切り出されたウィンドウサイズのパターン領域から始めて、対応する投影パターンと矛盾が生じない限り、領域を上下左右に拡大していくもので、Boyer & Kak による色スリット投影法⁴⁾の中で用いられている1次元的な“Crystal Growing”法を2次元へ拡張したものである。しかしながら、この方法では、異なるウィンドウパターンから成長した二つの領域が互いに重なる場合が生じ、この重複部分においては、依然としてパターンの対応付けにあいまいさが残る。このあいまいさは、いくつかの発見的手法を用いることによって低減できるが、それでも、物体の形状が複雑になると誤対応の割合は急増する。

本研究では投影パターンとして M 配列の要素数を2値から7値に拡張したものをを用い、ウィンドウサイズの小型化 (3×4 から 2×2 へ)を図る。ウィンドウの小型化により、従来の方法ではウィンドウを切り出せなかった部分も対応付けることが可能となるばかりでなく、重複部分の発生に起因する対応付けのあいまいさを低減することができる。すなわち、 M 配列の

ウィンドウ性より、重複部分はウィンドウサイズ以上に成長しないことが保証されるので、できるだけ小さなウィンドウをもつ M 配列を使用することにより、重複部分が減少し、結果的にパターンの誤対応を抑えることができる。本方式は、3回のパターンの撮影によって物体の形状を計測することができ、移動ロボットの視覚系のように短時間で形状入力及要求される場合に有効である。

以下では、まず多値 M 配列の生成法について簡単に触れ、与えられた M 配列からウィンドウ形状を決定する方法を示す。次に、投影パターンと受像パターンの対応付けを M 配列のウィンドウ性を利用して行うアルゴリズムを与える。さらに、パターンの乱れに対する本方式の有効性を従来法との比較において検討するために、いくつかのシーンに対する計測結果を報告する。加えて、また、実際の計測に際して用いた観測系、測定法についても詳しく述べる。

2. 多値 M 配列

q を素数 p のべきとして、 q 値の M 配列とは、有限体 $GF(q)$ の要素の2次元配列で、ある一定サイズの窓（ウィンドウ）を配列に沿ってすべらせたとき、全零パターンを除くすべての可能なパターンが、一周内に必ず一度、しかも一度だけ現れるという性質をもつものである。この性質を、 M 配列のウィンドウ性と呼ぶ。 M 配列は1次元的な q 値の M 系列を変換して作成することができる⁷⁾。

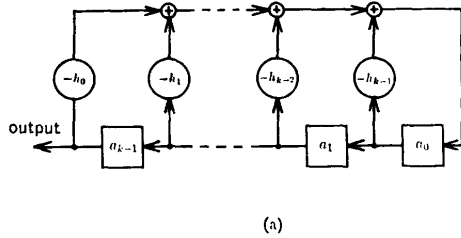
2.1 多値 M 配列の生成

まず、 $GF(q)$ 上の k 段シフトレジスタで発生し得る最大周期 $n=q^k-1$ をもつ q 値 M 系列は、 $GF(q)$ 上の k 次の原始多項式 $H(x) = \sum_{j=0}^{k-1} h_j x^j$, $h_0 \neq 0$, $h_k = 1$, $h_j \in GF(q)$ を結線多項式とする図2(a)に示すような線形フィードバックシフトレジスタ回路によって、非全零の値 a_0, a_1, \dots, a_{k-1} , $a_i \in GF(q)$ を各シフトレジスタ（図中のブロック）の初期値として与えれば生成できる。

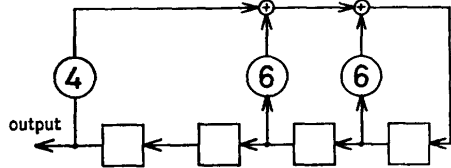
我々は、 $q=7$, $k=4$ の場合、 $GF(7)$ 上の4次の原始多項式、

$$H(x) = x^4 + x^3 + x^2 + 3 = (x^4 - (6x^3 + 6x^2 + 4)) \quad (1)$$

を用いた。図2(b)に、(1)式を結線多項式とする回路を示す。この回路に非全零の初期値を与えると、周期 $2400=7^4-1$ の $GF(7)$ 上の M 系列 $\{u_i\}$ を発生することができる。



(a)



(b)

図 2 M 系列を発生する線形フィードバックシフトレジスタ回路

Fig. 2 A linear feedback shift register circuit to generate an M -sequence.

次に M 系列 $\{u_i\}$ から変換

$$u_{i,j} = u_{32i + 75j \pmod{2400}}, \quad 0 \leq i \leq 74, \quad 0 \leq j \leq 31$$

により、大きさ 75×32 の M 配列 $A = (u_{i,j})$ を得る⁹⁾。

2.2 M 配列のウィンドウの決定

得られた M 配列のウィンドウを以下のようにして求める。一般に、 M 配列は、2次元偏差分方程式系(2次元線形再帰関係)の解として与えられる。この偏差分方程式系は、2次元 Berlekamp-Massey アルゴリズム⁹⁾を用いることによって、導くことができる。いまの場合は次の系を得る。

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

この関係は図3に示したウィンドウを意味している。すなわち、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、ウィンドウ内の値から定まる。このように初期ウィンドウ内の値が一組与えられると、 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。

ウィンドウの形は一つとは限らない。すなわち、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 の正方形ウィンドウが存在し、このウィンドウの周囲にある12個の格子点における変数の値はウィンドウ内の変数 $u_{i,j} = \alpha$,

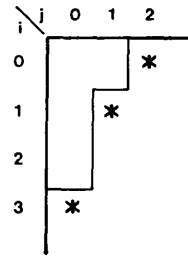


図 3 大きさ 75×32 の7値 M 配列を解としてもつ偏差分方程式系(2)の図式表現

Fig. 3 This diagram represents a system of linear partial difference equations over $GF(7)$ whose solution provides a 7-valued M -array of size 75×32 . The locations indicated by * are corresponding to the left-hand variables of equation (2).

a	b	c	d
l	α	β	e
k	δ	r	f
j	i	h	g

図 4 7値 M 配列の正方ウィンドウ

Fig. 4 A 2×2 square window of a 7-valued M -array of size 75×32 . Each of 12 variables around the window can be represented by a linear equation of variables inside the window.

$u_{i,j+1} = \beta$, $u_{i+1,j+1} = \gamma$, $u_{i+1,j} = \delta$ から以下の偏差分方程式を用いることによって求められる ($GF(7)$ 上の計算)。

$$\begin{aligned} a &= 5\beta + 3\gamma + \delta \\ b &= \alpha + 2\beta + 3\gamma + \delta \\ c &= \alpha + 4\beta + \gamma + 6\delta \\ d &= 5\alpha + 4\beta + 2\gamma + 5\delta \\ e &= 2\beta + 3\gamma + 3\delta \\ f &= 5\alpha + 2\beta + 5\gamma \\ g &= 3\alpha + 3\beta + 5\gamma + 6\delta \\ h &= 2\alpha + 2\beta + 2\gamma + 3\delta \\ i &= 2\alpha + \beta + 6\gamma + 4\delta \\ j &= 5\alpha + 6\beta + 6\gamma \\ k &= 4\alpha + 5\beta + \gamma + 6\delta \\ l &= \alpha + 3\gamma + 6\delta \end{aligned} \quad (3)$$

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が存在する。実際の計測においては、パターンの乱れの影響を受けにくいコンパクトなものが多い。そこで実験では 2×2 の正方形のものを用い、正方形ウィンドウがとれない細長い領域に対しては 4×1 , 1×4 のウィンドウもあわせて使用する。

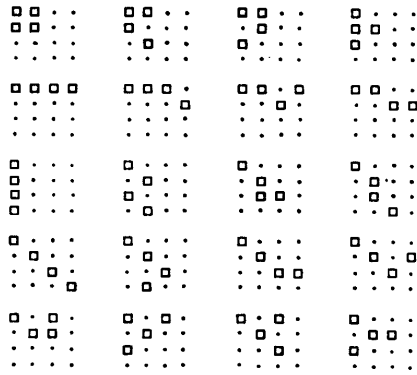


図5 7値M配列のウィンドウ例
Fig. 5 Other windows of a 7-valued M-array of size 75x32.

3. 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を2値化して、輪郭線追跡により、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保持させながら、観測結果を2次元格子上に順次整列させる。このようにして定められる2次元配列を**仮配列**と呼ぶ。

受像側と投影側における視差のため、物体の不連続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、仮配列上でパターンの乱れている箇所を検出し、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。

3.1 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極大な領域を次に示すアルゴリズムによって求める。

[領域拡大アルゴリズム]

1. A, Z を空領域 ϕ とする。i を1とおく。
2. 仮配列上で Z 以外の部分にウィンドウ部分 W が存在するならば、 $A = AUW$ とする。次に、W と同じパターンをもつウィンドウ部分を M 配列上で探し、その位置を求める。一方、W が選べなければ終了。
3. A に隣接するドットと、A 内のドットとを同時に含むウィンドウ部分 W が存在し、かつ、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部分のパターンと一致するならば、 $A = AUW$ として、3の最初に戻って同じ操作を繰り返す。そのような W が一つも存在しなくなれば、A を A_i として記録する。i

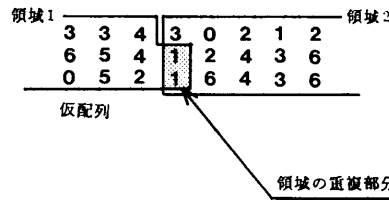
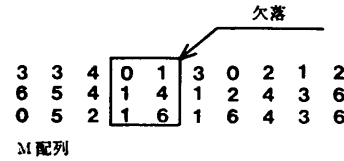


図6 極大領域が重なり合う例
Fig. 6 Since two columns on the projection pattern enclosed by thick lines have not been observed, two adjacent maximal regions overlap each other.

を1増やす。 $A = \phi$, $Z = ZUA_i$ とおき、2に戻る。

上の手続きで次々に求められる領域 A_i と同一のパターンをもつ領域は M 配列上に存在するが、 A_i にかかると隣接ドットを加えた領域のパターンも M 配列上には存在しない。すなわち、領域 A_i 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 A_i を単に**極大領域**と呼ぶ。二つ以上の A_i が共通部分をもつことがあることに注意しよう。

3.2 極大領域の重複部分の復号

一つの極大領域の内部では、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。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。

重複ドットの出現する場所は、ほとんどの場合、物体同士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、ウィンドウサイズを $m \times n$ とおくと、高々 $\max(m, n) - 1$ であることが保証される。それゆえ、重複ドットが頻繁に現れることはない。今回の実験ではサイズ 2×2 のウィンドウを用いたため、重複領域の幅は高々1となり、実際の計測データにおいて、重複ドットは全計測ドットの約5%程度にすぎなかった。

重複ドットのM配列上における位置を定めるために、物体の輪郭およびエッジは、投影パターンのピッ

子幅に対して十分滑らかである, という仮定を設け, この仮定に, より適するほうの極大領域へ重複ドットを含める. 図6の例では, 二つの重複ドットは領域1に含まれるとすると領域1に対応する物体には小さな突起が, 領域2に対応する物体のほうには小さなくぼみが存在することになる. これに対し, 重複ドットを領域2に含まれると仮定すると, 凸凹は生じず, 一層仮定に適合した結果を得る.

4. 実験

4.1 装置

図7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, テーブルから構成され, 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.

投影するパターンは, 26×29 の正方格子ドットパターンで, 各ドットの1辺の長さでドット間隔は, ディスプレイ上で2画素である. これらの値は, 計測装置前方 1800 mm に位置する平面に投影した場合, 実測値では 5 mm , また, 受像面上では6画素に相当する. ドットパターンとしては, 2章で作成した7値 M 配列 (75×32) の一部分 (26×29) を使用している.

7値 M 配列パターンの投影は, まず7値 M 配列パターンを3枚の2値パターンに分解し, それらを順に

3回投影することによって行う.

空間座標系 X - Y - Z を次のように導入しておく (図7参照). 原点 O_{xyz} をカメラのレンズ中心とおき, レンズの中心軸を Z 軸とし, 水平, 垂直方向にそれぞれ X, Y 軸を左手系にとる. さらに, 受像画面上において, 画素を単位とする受像面座標系 x - y をとる. 画面の左上隅に原点 O_{xy} をおき, x 軸, y 軸をそれぞれ, 列方向, 行方向にとる.

計測物体は計測装置の前方 $1500 \sim 1900 \text{ mm}$ に配置される. また, 投影機のレンズ中心の位置を, X, Y, Z 軸上で, それぞれ, $320 \text{ mm}, 0 \text{ mm}, 0 \text{ mm}$ と設定し, レンズの中心軸は Z 軸に平行とする. このように設定された観測系では, 物体が Z 方向に移動すると, 物体に投影されたパターンは, 受像画面上では水平方向にのみ移動する. 実際の実験においては測定誤差が含まれるため, 垂直方向にも若干移動する. 今回使用した観測系では, 垂直平面を $1500 \sim 1900 \text{ mm}$ の範囲で Z 軸方向に移動した場合, 受像画面上で x 方向に117画素, y 方向に1.8画素移動しているが, 水平方向の移動量に比べ, 垂直方向の移動量は無視できるほど小さい.

4.2 物体表面上の各点の座標値の算出

今回実験で用いたカメラと投影機は市販のものを使用し, レンズの焦点距離などの光学系パラメータの高精度な同定は行っていない. それゆえ, 物体上に投影されたドットの空間座標値 (X, Y, Z) を算出するためには, 観測系の高精度な位置ぎめが必要な三角測量法は適さず, 以下に示す補間式を用いる方法を採用した.

Z 座標の算出: 観測系の原点から測って 1500 mm から 1900 mm の範囲で X - Y 平面と平行な基準面を Z 軸に沿って 50 mm 間隔ごとに移動させて, パターンを合計9回撮影する. そして, 各投影ドットごとに Z 値を受像面上の x 座標値 (単位は画素数) の2次関数として最小2乗近似し, 近似式

$$Z = a_i + b_i x + c_i x^2, \quad i = 1, \dots, 754 \quad (4)$$

を求める.

X, Y 座標の算出: X, Y の値は, Z とカメラの焦点距離 l より

$$X = \frac{w_x}{l} Z x, \quad Y = \frac{w_y}{l} Z y \quad (5)$$

から計算する. ここで, w_x, w_y は CCD 素子の横方向, 縦方向の大きさである. 実際には, l ならびに w_x, w_y を個別に求める代りに, 比 $w_x/l, w_y/l$ を次

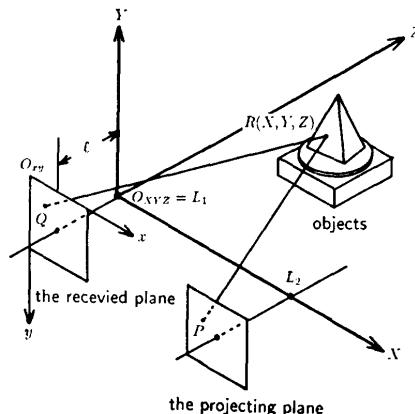


図7 M 配列パターン投影法の観測系

Fig. 7 A view of a 3-D object measurement system.

のようにして計測する。

[$w_x/l, w_y/l$ の算出方法]

1. 一定の大きさ (横 X_0 , 縦 Y_0) の物体を Z 方向に移動し, $Z^{(i)}, i=1, \dots, n$ において, 画面上の物体の x 方向の大きさ $x^{(i)}$ を測定する。
2. $1/x$ が Z に比例することより, 式 $1/x = aZ + b$ の係数 a, b を観測値 ($x^{(i)}, Z^{(i)}$) から最小 2 乗法より求める。

ここで, w_x/l は aX_0 として得られる。同様にして, w_y/l の計測も行う。なお, 上述の算出方法では物体に投影されたパターンではなく, 物体そのものの大きさを計測していることに注意する。

近似式の精度を調べるために, Z 軸上 1725 mm の位置に基準面を立て, Z 値の測定誤差を求めた。結果を表 1 の上段に示す。測定可能範囲 400 mm に対して, 最大で ± 5 mm の誤差が生じている。この値は, 受像面上で 1.5 画素に相当し, 液晶ディスプレイ投影機のパターンの安定度や量子化誤差を考慮すると妥当な結果である。

上記の算出方法では, 全部で 754 個もの近似式を記憶しなければならず, 繁雑である。観測系の設定方法から, 近似式の係数が同一列ではほとんど一定になる (図 8 参照) ことに着目し, 同一列のドットに対する近似式の係数は一定 (それらの平均値) とした。これによって, 記憶しなければならない近似式の数 は 1/26 に削減された。また削減後の近似式を用いた測定誤差を表 1 の下段に示す。標準偏差が約 2 割増加しているが, 測定範囲に対して十分な精度が得られている。

4.3 計測結果とその検討

パターンの乱れに対する提案方式の有効性を調べるために, 提案方式と従来の 2 値 M 配列パターン投影法⁵⁾, ならびに色スリット投影法⁴⁾ に対して, 誤対応ドットの発生率を比較する実験を行った。図 9 に示す四つのシーンを各方式によって計測し, 誤対応ドットの

表 1 近似式の係数の与え方による計測精度の比較
 Table 1 Comparison of measurement accuracy with respect to two approximation methods. The first row shows results when each projected dot has its own quadratic equation of the least squares method. The second row shows results when all the dots in a column have the same quadratic equation.

近似方法	平均値	最大値	最小値	標準偏差
ドットごと	1725.86	1730.66	1721.45	1.42
列ごと	1725.88	1730.86	1718.22	1.66

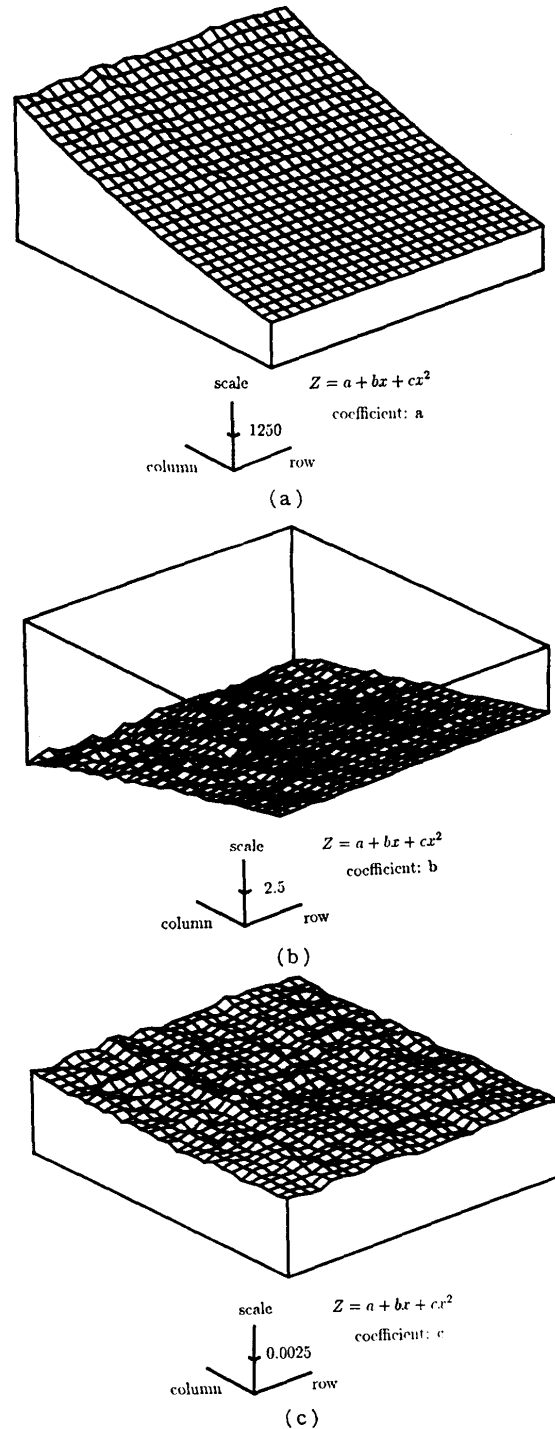


図 8 各ドットパターンに対する最小 2 乗 2 次式の係数 a, b, c の分布
 Fig. 8 For each dot pattern, the relationship between its depth Z and x -coordinate on the image plane is approximated by a quadratic equation, that is, $Z = a + bx + cx^2$. The above figures (a), (b), and (c) illustrate distributions of coefficients a, b , and c , respectively.

全受像ドットに対する割合を求めた。その結果を表 2 に示す。

ここで、誤対応ドットには、領域拡大の際に、ウィンドウが切り出せず、未対応のまま残ったドット (未対応ドット) も含まれていることに注意する。

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、領域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。

色スリット法では、4 色のスリット (赤、緑、青、白) を用い、同色のスリットが隣接しないように符号化することによって、投影パターンを作成している (本実験では M 配列パターンと同一ピッチの 2 値パターンを 4 回に分けて投影することで模擬的に色スリット法を実現した)。この方法は、投影パターンの不連続部分の判別が容易なために、重複領域が生じにくいシーン (シーン 2) に対しては、有力な方法である。しかし、重複部分が生じた場合、より大きな領域を優先させて復号するため、誤った対応付けが残りやすい。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、それぞれ、全ドット数の 0.6、2.3、3.4% を占めていた。

提案方式によって、シーン 1 (円錐と円柱が相貫した物体と四角柱) を計測し、 2×2 の正方ウィンドウのみで領域を拡大した結果を図 10 に示す。図中の正整

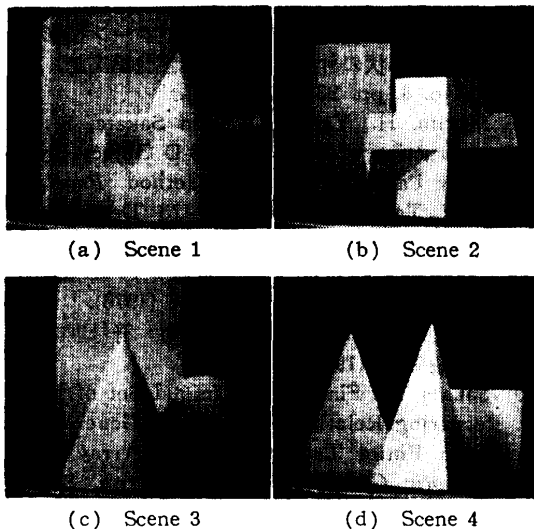


図 9 計測したシーン

Fig. 9 Four scenes to be measured.

表 2 正確に対応付けられなかったドットの割合 (%)

Table 2 The number of dots which could not be obtained their own location on the M -array compared to the total number of observed dots.

Scene No.	7 値 M 配列パターン投影法		2 値 M 配列パターン投影法	Boyer and Kak の方法
	2×2 window	$2 \times 2, 1 \times 4, 4 \times 1$		
1	5.1	1.0	16.5	2.4
2	2.0	1.1	13.5	0.6
3	4.9	3.0	21.9	3.5
4	0.7	0.7	19.7	5.8

数は、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。図 11 は、残った領域に $4 \times 1, 1 \times 4$ の細長いウィンドウを用いて拡大アルゴリズムを適用した結果である。未対応ドットの多くは正確に復号されたが、物体の境界部分に投影されたいくつかのドットは未対応のまま残った。これは、物体の境界においてドットが著しく変形したり、二つに分割したために、パターン入力時に 3 枚の撮影画像から M 配列の値を正しく復元できなかったこと (多値識別誤り) に起因する。なお、この例では、重複ドットは現れていない。図 12 に、各ドットの空間座標を求めた結果を示す。他の三つのシーンについては、重複領域が生じたにもかかわらず

```

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 13 14 -1
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 13 14 -1
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 -1 11 12 13
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 -1 11 12 13
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 5
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15
-1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 -1 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 -1 -1
-1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22
-1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22
-1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22
-1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22
-1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 -1 -1
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18
1 2 3 4 -1 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18
1 2 3 4 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 9
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 9
1 2 3 -1 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 9
5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 -1 -1 -1 -1 -1
    
```

図 10 正方ウィンドウのみを用いた領域拡大アルゴリズムの結果

Fig. 10 Result of the region growing algorithm by using only a square window of size 2×2 . Each number except -1 shows the decoded column number of the M -array for a dot, while -1 implies that a dot has not been decoded because of mismatch.

```

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 13 14 -1
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 13 14 -1
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 -1 11 12 13
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 -1 11 12 13
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14
1 2 3 4 5 6 7 8 9 9 10 11 12 13 14 5
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15
1
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22
1
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22
1
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22
1
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 8
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 8
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 8 9
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 8 9
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 8 9 20

```

図 11 2×2 の正方形ウィンドウの後に 4×1 , 1×4 ウィンドウを適用した結果

Fig. 11 Result of the region growing algorithm by using 1×4 and 4×1 windows after applying a 2×2 square window.

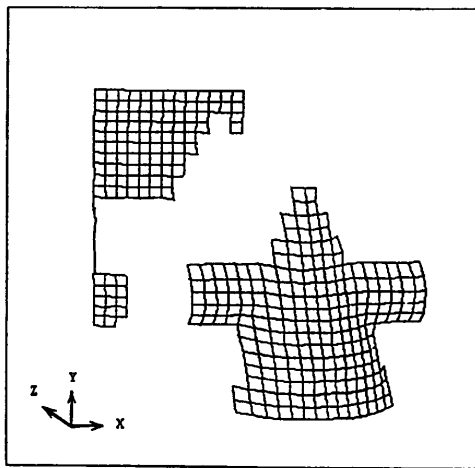


図 12 計測結果のワイヤフレーム表示

Fig. 12 Display of a wire-frame model of measured points.

らず、提案方式は重複ドットをすべて正しく対応付けることができた。ウィンドウ形状の小型化により重複領域の幅が減少した効果大きい。表 2 における対応不可能なドットの発生率は、シーン 1 と同様に多値識別誤りによるものである。

5. おわりに

光パターン投影法における対応付け問題を解決するために、7 値 M 配列パターンのウィンドウ性を利用して受像パターンと投影パターンを対応付ける手法と、それを用いた計測システムを新たに提案した。7

値の M 配列パターンを使用することによって、従来の 2 値 M 配列パターンに比べてウィンドウサイズが小型化された。これによって、パターンの乱れの影響を受けにくいパターン対応が実現できた。また、複数形状のウィンドウを使用することによって未対応パターン領域も減少し、対応付けの正確さが向上した。さらに、実際の計測例によって、従来の方式とも比較しながら、提案方式の有効性を確認した。

本方式の問題点として、受像パターンから仮配列を作成する際に、ドット位置の算出に時間がかかること、勾配の急な物体に対しては、測定精度が劣化することがある。これらの問題点の解決は今後の課題である。

謝辞 観測系の実装に協力していただいた、佐藤昌彦、大森荘司の両氏に深謝いたします。

参考文献

- 1) Yakimovsky, Y. and Cunningham, R.: A System for Extracting Three-dimensional Measurements from a Stereo Pair of TV Cameras, *Comput. Gr. Image Process.*, Vol. 7, pp. 195-210 (1978).
- 2) 米沢 進, 玉邑嘉章: 符号化格子を用いた物体形状の計測, *電子通信学会論文誌 (D)*, Vol. J61-D, No. 6, pp. 411-418 (1978).
- 3) 佐藤宏介, 井口征士: 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).
- 4) 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).
- 5) 森田啓義, 矢島一泰, 阪田省二郎, 中村浩章: 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).
- 6) 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, pp. 468-473 (Dec. 1988).
- 7) MacWilliams, F. J. and Sloane, N. J. A.: Pseudo Random Sequences and Arrays, *Proc. IEEE*, Vol. 64, No. 12, pp. 1715-1726 (1976).
- 8) 宮川 洋, 岩垂好裕, 今井秀樹: 符号理論, p. 495, 昭晃堂 (1973).
- 9) Sakata, S.: Finding a Minimal Set of Linear Recurring Relations Capable of Generating a Given Finite Two-dimensional Array, *J. of Symbolic Computation*, Vol. 5, pp. 321-337 (1988).

(平成元年 6 月 21 日受付)

(平成 2 年 2 月 13 日採録)

**森田 啓義** (正会員)

1955年生。1978年大阪大学基礎工学部生物工学科卒業。1983年同大学院博士課程(機械工学専攻)修了。同年豊橋技術科学大学生産システム工学系助手。工学博士。コンピュータ・グラフィックス, 画像認識, 画像データ圧縮の研究に従事。電子情報通信学会, IEEE 各会員。

**古賀 勝敏** (正会員)

昭和61年豊橋技術科学大学生産システム工学課程卒業。昭和63年同大学院修士課程修了。同年東陶機器(株)入社。現在, 電子計測機器の開発に従事。

**阪田省二郎** (正会員)

昭和39年東京大学工学部計数卒業。昭和44年同大学院博士課程修了。同年相模工業大学(現湘南工科大学)情報工学科勤務。昭和56年豊橋技術科学大学生産システム工学系助教授。現在同大学知識情報工学系教授。代数的符号理論と応用, 代数的アルゴリズム, 多次元システム理論, 符号化パターン光投影法による3次元形状計測・ソリッドモデリングなどの研究に従事。工学博士。著書(共著)「応用数学3, マトリックス」(培風館), (共訳)「線形計画法上・下」(啓学出版)。IEEE, 電子情報通信学会, 情報理論とその応用学会, 計測自動制御学会, 日本OR学会, 日本ソフトウェア科学会各会員。