

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†

森田 啓義^{††} 矢島 一泰^{††}
 阪田 省二郎^{††} 中村 浩章^{††*}

符号化パターン投影法は、物体の三次元形状を物体に非接触な条件下で計測する方法で、ある符号化されたパターンを物体に投影し、投影パターンの歪を計測することによって物体表面の三次元座標を算出するものである。本論文では、符号化パターンとして M 平面ドットパターンを用いることにより、パターンの歪を計測する際に問題となる投影パターンと元のパターンとの一義的な対応づけを容易に行う技法を提案する。さらに、投影ドットの一部が受像されない場合やその順序が反転した場合には、符号理論における誤り訂正の考え方を導入することによって、ドットの正確な対応づけを復元するアルゴリズムを提案し、その誤り訂正能力を明らかにする。最後に、本方式を用いた物体形状計測システムを試作し、複数物体の測定実験を行った結果を報告する。

1. ま え が き

物体に非接触な状態で瞬時に物体の3次元形状を測定・記録する非接触測定法は、生産・製造の分野で従来より用いられている接触法¹⁾に比べ、操作性および測定時間の点で優れ、特に移動ロボットの視覚系の研究や、医療分野・アパレル業界からの要請による人体などの柔軟な構造を持つ物体、動きのある物体の形状入力に関する研究において注目されている。

非接触法の代表的な方法には、異なる2方向から撮影した画像を合成する両眼視法と^{2)~5)}、レーザー光や一定のパターン光を物体に投影する光投影法^{6)~9)}の二つがある。両眼視法は、物体の撮影が簡単で、人間の視覚系との類似性からも興味深いが、測定できるのは物体に含まれる特徴点(例えば、エッジ)に限定され、特に滑らかな物体表面の情報を得ることが困難である。さらに2画面間で同じ特徴点同士を一義的に対応づけることができないという欠点を持つ。正確な対応づけを行うため、物体の色情報やテクスチャを補助的に用いる方法⁴⁾や、投影方向をさらに増した多眼視法⁵⁾も研究されているが、これらは一般に複雑な手順と長い計算時間が必要とされ、それらの改良によっても依然対応づけに生じる誤りを完全になくすことはで

きない。

一方、光投影法は、両眼視法における一方のカメラを光を投影する装置に置き換えたものであり、物体にあるパターン光(例えば、スリット光⁶⁾やモアレ縞⁷⁾)を投影して、撮影した受像パターンと元のパターンとの対応づけから物体表面の形状を測定するものである。このため、物体が滑らかな表面を持っていてもパターン光が投影されていれば、その面の三次元情報を得ることができる。しかし、パターン投影法においても、受像パターンと投影パターンとの対応づけに問題が残されている。これは、投影されたパターンが受像側からは見えなかったり、またその順序が入れ替わって観測されるなどの一種の誤りが生じるためである。この問題を解決するため、M系列やグレイコードを用いて、投影パターンを符号化する方法^{8)~9)}が提案されている。投影パターンを符号化して特徴づけることにより、原理的には、各パターンを他のパターンと区別することが可能で、観測画像のパターンを投影パターンに一意に対応づけることができる。

符号化パターンとしてM系列を用いる方法⁸⁾は、基本的には、M系列(最大周期系列)によって特徴づけられたスリット列を、一定間隔で配列して物体に投影し、M系列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一意に対応づけるものである。この方法では、ドット誤りを効率よく訂正するため、M系列を1シンボルずつシフトして、2次元的に配置したマトリックス符号を構成し、各系列を複数行にわたって同時に復号している。しかし、誤りを検出・除去することはできても、完全に訂正することはできない。

† Measurement of Three Dimensional Shape by Means of Projected Encoded Patterns Capable of Correcting Dot-Errors by HIROYOSHI MORITA, KAZUYASU YAJIMA, SHOJIRO SAKATA and HIROAKI NAKAMURA (Department of Production Systems Engineering, Toyohashi University of Technology).

†† 豊橋技術科学大学生産システム工学系

* 現在 日本電気ホームエレクトロニクス(株)

そのため、誤りの発生した部分の3次元情報は失われてしまう。

一方、グレイコードを用いる方法⁹⁾は、グレイコードを構成する n 枚のパターンを撮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。グレイコードは、交番2進符号の一種で、シンボル間のハミング距離が常に1であるという性質を持つ。この性質を利用して、量子化誤差やパターンを交換する際に生じるパターンのずれによるコード化誤りの影響を低く抑えることができる。しかしながら、誤りそのものの検出・訂正を行うことはできない。

上述の2つのパターン投影法に共通した欠点は、受像パターンに含まれる誤りの影響をできるだけ受けないように符号化を行ってはいないものの、パターンに生じる誤りを訂正するための符号化に関しては全く考慮していない点である。

そこで本論文では、パターン投影法において受像パターンの誤りを積極的に訂正する方法を新しく提案する。まず、投影パターンとしては、M平面¹⁰⁾にしたがって構成されたドットパターンを用いる。このM平面のウィンドウ性を利用することによって、投影パターンと受像パターンの一義的な対応づけを行うことができる。この方法は、単にM系列をシフトしながら繰り返しならべて2次元パターンを作成する方法に比べ、直接2次元的なパターン・マッチングを行うことができるため、マッチングに費やす処理手数を大幅に減少することができる。さらに、受像パターンに誤りが生じ、その対応づけが困難な場合には、Walsh関数¹¹⁾的な補助パターンを使用し、あわせて符号理論における誤り訂正 (error correcting) の考え方によって、ドット誤りを訂正する方法を与える。この方法では、使用する符号化パターンに応じて、誤り訂正能力を明確に求めることができるので、あらかじめ予想される誤りに適した符号化パターンを設計することも可能である。最後に、提案方式の有効性を確認するために、複数物体形状の計測実験を行った結果について報告する。

2. 符号化パターン投影法の測定原理

2.1 観測系

図1に示すような観測系を用いて、二次元正方格子ドットパターンを物体に投影し、TVカメラで撮影した画像より物体の三次元座標を求め、以下では、ドットパターンの x 方向を行、 y 方向を列と呼ぶ。

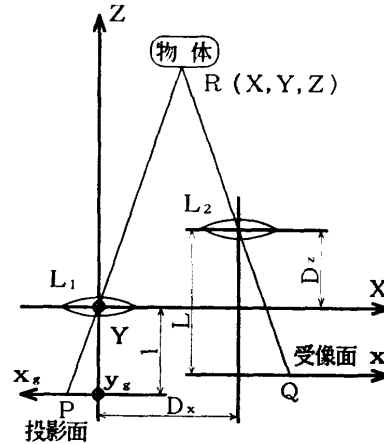


図1 観測系の構成
Fig. 1 System arrangement.

いま、投影面上のドットを中心点 P が、物体上では点 R に映り、受像面で点 Q で観測されたとする。このとき、 P の座標値 (x_s, y_s) と Q の座標値 (x, y) のうち、 x の値を測定することから物体上の R の三次元座標値 (X, Y, Z) を次式より算出することができる。

$$X = \alpha x_s, \quad Y = \alpha y_s, \quad Z = \alpha l. \quad (1)$$

ここで、 $\alpha = (LD_x + xD_x)/(x_sL + xl)$ とおいた。図1のレンズ L_1 とレンズ L_2 の光軸は平行であり、 D_x 、 D_y 、 D_z はそれぞれ X 、 Y 、 Z 軸方向のレンズ間隔、 l はレンズ L_1 の中心から投影面までの距離、 L はレンズ L_2 から受像面までの距離を表す。これらの値は観測系を固定することにより定まる。

2.2 受像パターンの性質

投影面と受像面のドットを正確に対応づけられるなら、(1)式より各ドットに対応する物体表面上の点の位置の三次元座標を求めることができる。しかし、測定する物体が複雑な形状である場合や複数の場合、受像画像上においてドットの一部が欠落したり、隣接するドットの順序が入れ替わるなどの一種の誤りが生じる。以後、これらの受像画像上に生じる誤りをドット誤りと呼ぶことにする。ドット誤りには大きく分けて以下に示す3種類のものが存在する。

(a) パースト的な欠落

投影されたパターンの一部が、物体の他の部分などに隠されて受像されないことがある。このように物体上にドットが投影されているにもかかわらず、それが受像されない現象を欠落と呼ぶ。これは、投影軸と受像軸がずれていて、投影側からは見えても受像側からは物体の影になる部分が存在するために生じる。例え

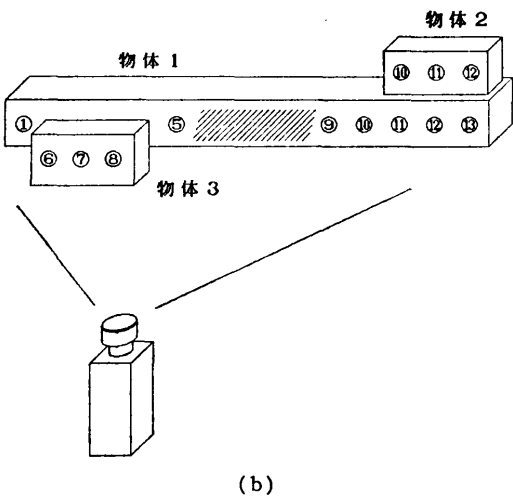
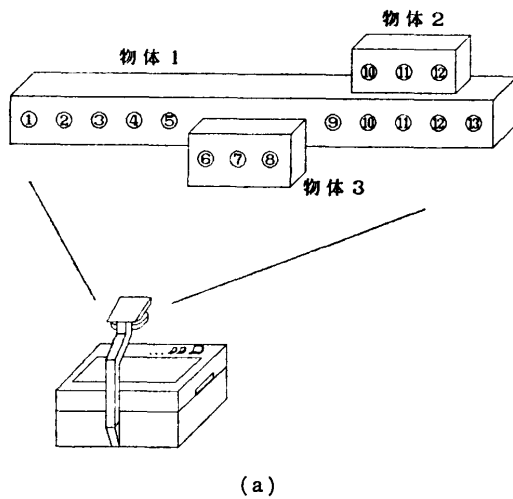


図 2 ドット誤りの発生
 (a) 投影側, (b) 受像側
 Fig. 2 Occurrence of dot-errors.
 (a) View of projected side.
 (b) View of received side.

ば、図 2 (a) のように番号づけられたドットパターンが物体に投影され、図 2 (b) のように受像されたとする。このとき、番号 2~4 のドットはカメラ側からは前方の物体 3 の影になり受像されておらず、欠落が発生している。

(b) パースト的な列方向 (行方向) のドットのずれ (断層)

複数の物体が奥行きが異なって存在する場合、物体の境界部分でパースト的な列方向 (行方向) のドットのずれが観測される。これを断層と呼ぶ。図 2 の例では、物体 1 の上に物体 2 が存在し、各々の奥行きが異なるため、物体 2 の 10~12 のドットはカメラ側から見ると図 2 (b) のように、断層として観測される。

(c) 欠落を伴った置換

一つの物体の前方に他の物体が存在する場合、投影ドットパターン列と受像ドットパターン列の順序が入れ替わることがある。これを置換と呼ぶ。例えば、図 2 (a) の物体 1 と物体 3 の間では、カメラ側から見ると 5 と 6~8 のドットの順序が入れ替わっている。

以上述べた 3 種類のドット誤りは、投影パターンと受像パターンとの一義的な対応づけを困難にし、このままでは各ドットに対応する三次元座標を求めることができない。そこでドット誤りが生じて、投影パターンと受像パターンの正確な対応づけを行えるように、ドットパターンを符号化する方法について次章で検討する。

3. パターンの符号化

前章で述べたドット誤りは、一般には行、列両方向に生じうる。しかしながら、もし観測系において、カメラと OHP のレンズ間隔 D_y, D_z を 0 と設定したとすれば、カメラの焦点が合っている範囲で物体の位置が Z 方向に移動しても、物体表面に映ったドットパターンは、受像側から見ると水平方向にしか移動しない。すなわち、誤り発生を水平方向のみに限定できる。そこで、以下では観測系においてドット誤りを訂正する処理を簡略化するために、 $D_y=0, D_z=0$ が成立しているものとして議論する。

本論文では、各ドットの行列番号を求めるために、M平面のウィンドウ性を利用する。

M平面は、M系列 (最大周期系列) を二次元に拡張した符号である。M平面はそれと同数のエレメントを持つM系列を一定の規則で並べ直すことにより、容易に作成できる¹²⁾。周期 2^n-1 の 2 値M系列には、その一周期中に全零以外の長さ n の窓パターンが一度ずつ

1	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	1	0	0	..		
0	1	1	0	0	1	0	0	1	1	1	0	0	1	0	..		
1	0	1	1	1	0	0	1	0	0	0	1	0	1	1	..		
1	0	1	0	1	1	0	1	0	0	0	1	1	1	0	..		
0	0	0	1	1	0	1	0	1	0	1	0	0	0	1	1	0	..
0	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1	..		
1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	0	0	0	1	1	..		
0	0	1	1	1	1	0	1	1	0	1	0	1	1	1	0	..	
1	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	..	
0	0	1	1	0	1	0	1	0	0	1	1	1	0	0	..		
..	

図 3 91×45 M 平面パターンの一部
 (ウィンドウサイズ 3×4)
 Fig. 3 A part of 91×45 M-array pattern.
 (window size 3×4)

現れる。同様に、M平面に関しても、一周期に全零以外のすべての窓パターンが一度のみ現れるという性質がある。これをM平面のウィンドウ性と呼ぶ。このM平面のウィンドウ性を用い、受像パターンから切り出したウィンドウをM平面上でパターンマッチングすることにより、原理的にはウィンドウ位置を正確に求めることができる。図3にウィンドウサイズ 3×4 をもつ大きさ 91×45 のM平面の一部を示す。

4. ドット誤りの訂正方法

測定物体に、M平面パターン、および補助パターンを時間をずらして投影し、得られた画像上の各ドットに対応する投影パターン上のドットを捜し、そのM平面パターン上における行列番号(固有番号と呼ぶ)を復元する方法を以下に示す。なお、投影パターン上では、各行・各列のドットに行・列番号が、列番号は左から右へ、行番号は上から下へ順次割り振っておく。

4.1 M平面ウィンドウパターンのマッチング

(1) 仮配列の作成

まず撮影した画像を左側から走査してゆき、ドットを発見したらFreemanの物体境界追跡法¹³⁾を用いてドット中心の座標値を計算する。

次に、画面を左から右、下から上へ走査してゆき、同じ固有行番号を持つ、すなわち同一行上のドットに対しては左側から発見された順に $0, 1, 2, \dots$ と仮の列番号をつけてゆく。この結果、仮配列に含まれるドット誤りの一部は、仮配列から切り出したウィンドウパターンと投影パターンのマッチングを行うことによって検出できる。実際、正確にマッチングした仮配列上の位置から逐次にウィンドウをずらしてゆき、マッチングのとれなくなった最初の位置においてウィンドウ内にドット誤りが生じていると判定できる。ところが、この方法だけでは、M平面パターンにおいて0や1が行(列)方向に連続して存在する部分では、ドットの誤りを検出することはできない。例えば、図3に示すウィンドウパターンの(3,3)成分である0が欠落したパターン(図4(a)参照)が受像されたとすると、右隣のドットがみつめられて、図4(b)のように仮配列上に配置される。このときドット間の対応は誤っているにもかかわらず、マッチングの結果は正しいと判定されてしまう。そこで、直前に走査した行のドットと同一列上にあると見なされたドットに対しては、直前行のドットの列番号を優先的に割り振ることにする。この優先規則によって、本来離れた位置にある二

1	1	0	0	1	0	
0	1	1	0	1	0	1
1	1	0	1	0	1	0
0	1	1	0	0	0	1
1	0	0	0	1	1	

図4 M平面による誤り訂正が困難になる例
(a) 受像パターン, (b) 仮配列中のパターン
Fig. 4 This illustrates a scene which is difficult to correct dot-errors in case of using only an M-array pattern.
(a) Received pattern. (b) Pattern assigned in the temporary array.

つのドットが、間のドットの欠落のために、仮配列上に隣接して配置されることを防ぐことができる。

以上の操作を全ドットに対して行い、各ドットの情報、すなわち、中心座標、行・列番号を仮配列上におく。仮配列上の各ドットの列番号は、ドット誤りのために一般には固有列番号と異なっていることに注意しておく。

(2) 補助パターンの使用

ドット誤りの訂正処理を簡単に行うために、さらに誤りが水平方向にのみ生じることを考慮して、列方向には一様で、行方向にWalsh関数的なパターンを補助パターンとして使用する。いま、 n 枚の補助パターンを用いるとすると、第 i 番目の補助パターンは行方向にサイズ i の0の連と1の連が交互に現れ、全体として、0から $2^n - 1$ までの値を行方向に割り振ることができる。これを補助符号値と呼ぶ。図5に $n=3$ の場合の補助パターンを示す。

n 枚の補助パターンを用いることによって、1周期以内に1箇所生じる $2^n - 1$ 個までの相続くドットの欠落、両者間の距離が1から $2^n - 1$ までのドットの置換を訂正できる。すなわち、 $0, 1, \dots, 2^n - 1$ の補助符号値がこの順で繰り返されていけば誤りはないと判断

No.1	No.2	No.3

補助パターン 1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1
補助パターン 2	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1
補助パターン 3	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0
補助符号値	0	1	2	3	4	5	6	7	0	1	2	3

図5 補助パターン ($n=3$)
Fig. 5 This illustrates subpatterns used for correcting dot-errors.

し、順序が異なっていれば誤りが生じていると判断する。

(3) 完全ウィンドウパターンのマッチング

仮配列からM平面のウィンドウサイズのドット配列を切り出し、まず補助パターンの情報よりドット誤りが含まれているかどうか検査する。もし、誤りが含まれているなら別のウィンドウを切り出し、誤りを含んでいないウィンドウ（これを完全ウィンドウと呼ぶ）を探す。そして、完全ウィンドウをM平面上でパターンマッチングし、ウィンドウ内の全ドットの固有行・列番号を求める。画面中に1箇所完全ウィンドウのパターンマッチングができればこのステップを終了する。

4.2 ドット誤り訂正アルゴリズム

画面中で求めた1つの完全ウィンドウの固有行・列番号、および n 枚の縦縞の補助パターンから得られた $0 \sim 2^n - 1$ の補助符号値の情報を用いて、誤りが見つかからないときはその連続性より各行ごとに他の全ドットの固有行・列番号を求めていく。誤りを含んでいるドットについては次に示すアルゴリズムで訂正し、正しい固有列番号を求める。

[ドット誤り訂正アルゴリズム]

仮配列上でM平面の行列番号が既知であるドット全体の集合を S とする (S は完全ウィンドウマッチングが行われているので空でない)。テンポラリ集合 T を S と等しくおけ。

(1) T が空ならば終了。 T が空でなければ、 T から1つのドット P を取り出す。ここで、 P の仮配列上の行列番号を (i_P, j_P) 、M平面上における行列番号を (I_P, J_P) とする。(2)へ進め。

(2) P から上下左右4方向に仮配列を走査し、最初に発見された S に属さないドットを $Q(i_Q, j_Q)$ とする。 Q を S と T に加え、(3)へ進め。もしどの方向にも発見できなければ、(1)へ戻れ。

(3) P, Q の補助パターンの値をそれぞれ、 X_P, X_Q とし、 P と Q の補助パターンの間隔 δ を、

$$\delta = \begin{cases} X_Q - X_P \pmod{2^n}, & j_Q \geq j_P \\ X_P - X_Q \pmod{2^n}, & j_Q < j_P. \end{cases}$$

で定め、以下の処理を行う。その後で、(2)に戻り、残り方向の走査を継続せよ。

(3.1) Q が P と仮配列上で同列にある場合 ($j_Q = j_P$)

$$J_Q = \begin{cases} J_P + \delta, & \delta < 2^{n-1} \\ J_P + \delta - 2^n, & \delta \geq 2^{n-1}. \end{cases}$$

(3.2) Q が P と仮配列上で同行にある場合 ($i_Q = i_P$)

δ の値に応じて、以下の処理を行え。

(3.2.1) $\delta = 1$ ならば、

$$J_Q = \begin{cases} J_P + 1, & j_Q > j_P \\ J_P - 1, & j_Q < j_P. \end{cases}$$

(3.2.2) $1 < \delta < 2^n$ ならば、 P から Q とは反対方向に第 i_P 行を走査する。 Q から1周期以内に不連続なドット、すなわち、直前のドットとの補助パターンの間隔が1より大きいものがあれば、 P に最も近いものを $R(i_R, j_R)$ 、 $i_R = i_P$ とし、列番号の比較より、以下のア)、イ)の処理を行え。1周期以内に R が発見されなければウ)を行え。

ア) $j_P < j_Q$ ならば

$$J_Q = \begin{cases} J_P + \delta - 2^n, & J_R < J_P \\ J_P + \delta, & J_R > J_P. \end{cases}$$

イ) $j_P > j_Q$ ならば

$$J_Q = \begin{cases} J_P - \delta + 2^n, & J_R > J_P \\ J_P - \delta, & J_R < J_P. \end{cases}$$

ウ)

$$J_Q = \begin{cases} J_P + \delta, & j_Q > j_P \\ J_P - \delta, & j_Q < j_P. \end{cases}$$

[アルゴリズム終了]

上述のアルゴリズムのステップ(3.1)では、断層の検出と訂正を行っている。断層の訂正能力、すなわち、正確に訂正できる断層の幅は、訂正方法から明らかかなように、 $2^{n-1} - 1$ である。ステップ(3.2.1)、(3.2.2)では欠落と置換の訂正を行っている。欠落および置換の訂正に関しては、上述のアルゴリズムによって、間隔が 2^n 未満で、かつ1周期の間では一箇所しか生じない誤りを訂正することができる。実際にこのアルゴリズムがどのように動作するかは、次章で詳しく説明する。

5. 実験

5.1 計測システム

本方式の有効性を確認するため、以下の実験を行った。測定する対象は、図6に示した、奥行きを変えて配置された三つの物体である。観測系としては、2章で説明した図1のとおり設定した。観測系のパラメータは表1に示す。ここで、 $D_z \neq 0$ と設定されているために、ドットパターンは受像面上で垂直方向にも移動する。しかしながら、実験で用いた観測系では測定範囲を1500 mm から2000 mm まで変化させても各ドットは受像画像上でたかだか3画素しか移動せず、これは隣接する行のドット間の距離（受像画面上で少な

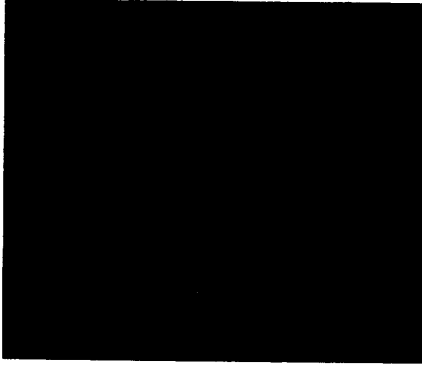


図 6 投影画像

Fig. 6 Original scene projected an encoded pattern.

表 1 観測系パラメータ
Table 1 Parameters of system.
単位 mm

D_x	260	L	25
D_y	0	l	330
D_z	85	d	2
測定範囲 Z	1500-2000		

くとも9画素)の1/2以下であるため,あらかじめ各行ごとのドット位置を計測しておけば各ドットの行番号を一意に決定できる.このことより,この観測系ではドット誤りは水平方向にしか生じないといえ,先に提案した訂正アルゴリズムをそのまま適用することができる.投影パターンは,実験でドット直径1mm,ドットピッチ2mmの29×21の全開口ドットパターンをOHPによって投影することによって作成した.全開口ドットパターンはOHPのステージ上に固定されており,符号化パターンの描かれたOHPシートを全開口ドットパターン上に重ね,ドット穴をマスクすることによって符号化パターンを作成する.これにより,投影に用いる複数枚のパターンのずれをなくすることができる.使用した符号化パターンは,1)ウィンドウサイズ3×4をもつ大きさ91×45のM平面の1を明,0を暗としたドットパターン,2)図5に示した3枚の縦縞の補助パターンである.これらの符号化パターンと全開口ドットパターンをCCDカメラで撮影し,計算機内に256×256の16値デジタル画像として取り込む.次に,取り込んだ画像を二値化することによってドットと背景に分離する.さらに,各ドットにM平面と補助パターンの情報を与え,復号してゆく.訂正アルゴリズムはパソコン上でCで記述され,誤りの検出・訂正を自動的に行う.

受像されたパターンを,図7(a)に示す.ここで各ドット位置を示す番号は,そのドットの仮配列上の行番号である.ただし左端の一行は各ドットの仮配列上の行番号(すなわち固有行番号)を表す.つぎに完全ウィンドウマッチングを行った結果を図7(b)に,各ドットの補助符号値を図7(c)に示す.図7(b)中の“-1”は,まだ復号されていないドットを表す.実際には仮の列番号2~4は5と置換しており,1と5の間の3つのドットは欠落している.さらに,行番号19と21の間では仮の列番号9~16のところで断層が生じている.

これらのドット誤りを復号してゆく過程を次節で説明する.

5.2 誤り訂正の手順

(1) 欠落,置換の訂正

第28行のドット列について考える.M平面による完全ウィンドウマッチングとステップ(3.2.1)によって仮の列番号右端から6までは,すでに固有列番号が復号されているものとする.

1. 点 P を $(i_P, j_P) = (28, 6)$ とおき,左側に走査して,点 Q を $(i_Q, j_Q) = (28, 5)$ を見つける.このとき,

$$\delta = 2 - 6 \pmod{8} = 4$$

となり, P と Q は同一行上にあり, $1 < \delta < 8$ なのでステップ(3.2.2)へ進む.1周期以内に R が発見されないので(ウ)へ進む. $j_Q < j_P$ より,

$$J_Q = J_P - \delta = 10 - 4 = 6$$

2. 点 P を $(i_P, j_P) = (28, 5)$,点 Q を $(i_Q, j_Q) = (28, 4)$ とする.このとき,

$$\delta = 6 - 1 \pmod{8} = 5$$

となり,1周期以内に R $(i_R, j_R) = (28, 6)$ が存在し, $j_P > j_Q$ であるのでステップ(3.2.2)の(イ)へ進む.

$$J_P = 6 < J_R = 10 \text{ なので,}$$

$$J_Q = J_P - \delta + 2^* = 6 - 5 + 8 = 9$$

と求まる.仮配列上のドット(28,3),(28,2)はステップ(3.2.1)によって求まる.

3. 点 P を $(i_P, j_P) = (28, 2)$,点 Q を $(i_Q, j_Q) = (28, 1)$ とする.このとき,

$$\delta = 7 - 2 \pmod{8} = 5$$

となり,1周期以内に点 R $(i_R, j_R) = (28, 5)$ が存在し, $j_P > j_Q$ であるのでステップ(3.2.2)の(イ)へ進む.

$$J_P = 7 > J_R = 6 \text{ なので,}$$

$$J_Q = J_P - \delta = 7 - 5 = 2$$

となる.仮配列上のドット(28,0)はステップ

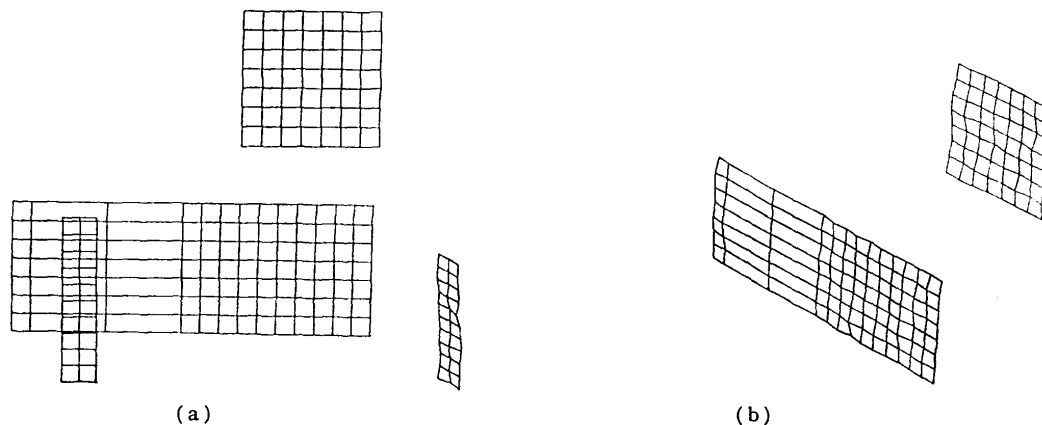


図 8 グラフィック表示

Fig. 8 A display of obtained three dimensional objects.

6. む す び

本研究をとおして、符号化パターン投影法で問題となる投影パターンと受像パターンの対応づけ問題を、M平面とWalsh関数的な補助パターンを用いることにより解決した。すなわち、M平面の有するウィンドウ性を利用して受像ドットパターンの固有行列番号を求め、さらに、補助パターンの周期性を用いてドット誤りを訂正する方法を提案し、提案方式の有効性を実際に確かめた。

なお、5.3節では座標軸に平行に配置された多面体の測定例を示したが、訂正アルゴリズムそのものは、座標軸に対して斜めにおかれた多面体や曲面の形状計測に際しても有効である。ただし、この場合には、物体表面に投影されているドットパターンが変形するため、正確な中心座標を求めるのが困難になり、測定精度の劣化を招く。実際、今回使用した観測系では、投影ドットパターンの間隔は測定物体表面上において20mm前後となり、物体表面から得られる位置情報量が少なく、複雑な物体形状を細かく測定することはできない。この点は、投影ドットパターンの間隔を小さくし、物体に投影されるドットの数を増やすことによって、さらに高分解能カメラを用いることによって改善できる。

最後に、本研究ではパターン作成の容易さから投影にドットパターンを用いたが、スリット光パターンを用いる場合でも、スリット列を本方式のように符号化するならば、今回提案したアルゴリズムはそのまま適用できることに注意しておく。なお、本方式ではM平面のウィンドウ性を受像パターンの絶対座標を知るた

めだけに利用し、ドット誤りの訂正には補助パターンを使用している。今後の課題として、M平面パターンだけを用いて誤りを訂正する手法を確立することが残されている。

謝辞 本研究の一部は文部省科研費(奨励研究(A) NO. 62750382)による。

参 考 文 献

- 1) 岡田, 土屋: 人工の手による形状認識, 電子技術総合研究所集報, Vol. 35, No. 3, pp. 334-344 (1971).
- 2) 大森: 立体視, 計測と制御, Vol. 26, No. 4, pp. 352-356 (1987).
- 3) Yakimovsky, Y.: A System for Three-Dimensional Measurements from a Stereo Pair of TV Cameras, *Comput. Gr. Image Process.*, No. 7, pp. 195-210 (1978).
- 4) 青木, 谷内田, 辻: パターン投影法と2台のカメラを用いた3次元物体の計測, 信学論(D), Vol. J-68 D, No. 3, pp. 384-391 (1985).
- 5) 北村, 谷内田: 3眼視による3次元情報の計測, 昭61信学全, p. 6-335 (1986).
- 6) Will, P. M.: Grid Coding: A Novel Technique for Image Processing, *Proc. IEEE*, Vol. 60, No. 6, pp. 669-680 (1972).
- 7) 鈴木, 金谷, 鈴木: モアレ縞による3次元計測, 精密機械, Vol. 41, No. 9, pp. 746-753 (1974).
- 8) 米沢, 玉邑: 符号化格子を用いた物体形状の計測, 信学論(D), Vol. J 61-D, No. 6, pp. 411-418 (1978).
- 9) 佐藤, 井口: 空間コード化による距離画像入力, 信学論(D), Vol. J 68-D, No. 3, pp. 369-375 (1985).
- 10) MacWilliams, F. J. and Sloane, N. J. A.: Pseudo Random Sequences and Arrays, *Proc.*

IEEE, Vol. 64, No. 12, pp. 1715-1729 (1976).

- 11) 喜安: アダマール行列とその応用, p. 113, 電子通信学会, 東京 (1979).
- 12) 阪田: 2重線形再帰系列とM系列, 信学論(A), Vol. J 60-A, No. 10, pp. 918-925 (1977).
- 13) Freeman, H.: Boundary Encoding and Processing, *Picture Processing and Psychopictures*, pp. 241-263, Academic Press, New York (1970).

(昭和62年7月31日受付)

(昭和63年1月19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。



矢島 一泰 (学生会員)

昭和38年生。昭和61年豊橋技術科学大学工学部生産システム工学課程卒業。同年同大学院工学研究科入学。画像処理の研究に従事。



阪田省二郎

昭和16年生。昭和39年東京大学工学部計数工学科卒業。昭和44年同大学院博士課程修了。同年4月相模工業大学工学部講師。昭和46年同助教授。昭和56年4月より豊橋技術科学大学工学部生産システム工学系助教授。工学博士。主として代数的符号論, システム理論, コンピュータビジョン, 生産計画の研究に従事。昭和60年日本学術振興会特定国派遣研究員(オーストリア, リンツ大学客員教授)。著書「応用数学3—マトリックス」(培風館)(共著)。電子情報通信学会, 計測自動制御学会, 日本OR学会, ソフトウェア科学会, 米国IEEE等各会員。



中村 浩章 (正会員)

昭和36年生。昭和60年豊橋技術科学大学生産システム工学課程卒業。昭和62年同大学院修士課程修了。同年, 日本電気ホームエレクトロニクス(株)に入社, 光ディスク開発推進本部技術部にてCD-ROM等の生産用ソフトウェア開発に従事。