

3P-3

M平面を用いた符号パターン投影法の
ドット誤り訂正能力について

中村浩章, 矢島一泰, 森田啓義, 阪田省二郎, 藤元克己

豊橋技術科学大学工学部生産システム工学系

1. はじめに

符号化パターン投影法は、ある一定のパターンを物体に投影し、その投影パターンの歪みを計測することによって物体表面の3次元座標を求める手法¹⁾²⁾である。筆者らは符号化パターンにM平面を用い、M平面のウィンドウ性³⁾から投影パターンともとのパターンの一義的な対応づけを容易に行う方法をすでに提案した⁴⁾。本論文では、投影パターンにドット欠落やドット並びの反転などの誤りが生じた場合について詳しく検討する。さらに、ドット対応の誤りの検出・訂正を行うアルゴリズムを新しく考案し、その有効性を確かめる。

2. ドットの反転条件

測定する物体が複数あり、カメラ位置からは重なって見える場合、投影されたドットの並びが反転して観測されることが生じうる。ドット反転は、投影パターンと受像パターンの一義的な対応づけを困難にする。そこでまず、どのような状況下で反転が生じるのかを明らかにする。まず符号パターンの投影・受像は、図1に示す観測系を用いて行うものとする。投影面上の P_0 に位置するドットが受像面上で Q_0 の位置に観測されたとすると、物体1の表面上の位置 R_0 の座標値 (X, Y, Z) は、 P_0 の座標値 (x_g, y_g) と Q_0 でのX座標値 x を測定することによって次式から求められる。

$$X = \alpha x \quad Y = \alpha z \quad Z = \alpha$$

$$\alpha = (L D_x + x D_z) / (X_g L + x l)$$

ここで、 D_x, D_z はX, Z軸方向のレンズ間隔、 l, L はそれぞれレンズ L_1 と L_2 の中心から投影面までの距離である。

いま物体1の前方、図1中の点線領域に、物体2が存在したとする。投影面上に P_0, P_1 に位置するドットは、受像面では Q_0, Q'_1 の位置に観測され、その結果、ドット順序の反転が生じてしまう。物体1から反転が生じうる台形領域まで

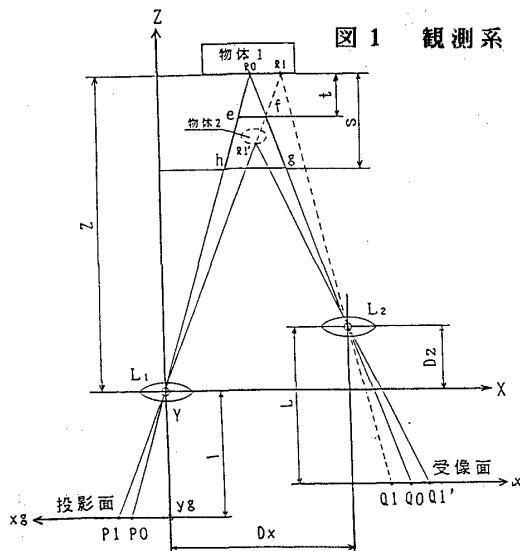


図1 観測系

表1 投影面と台形領域の関係

X_g	t	w_{min}	w_{max}
10.0	75.77	10.65	26.62
20.0	76.52	10.65	26.35
30.0	77.28	10.65	26.10
40.0	78.06	10.64	25.83
50.0	78.86	10.64	25.57

観測パラメータ

$D_x=260 \quad D_z=100$
 $l=380 \quad Z=2100$
 $s=200 \quad P_g=2$
 (単位 mm)

の距離を t とすると、 t の値は次式より求まる。

$$t = (Z - D_z) P_g / ((P_g(z - D_z) - X_g D_z + l D_x))$$

ここで P_g は、投影面におけるドット・ピッチを表す。さらに観測する台形efghの上底 w_{min} ・下底 w_{max} も容易に計算できる。本研究で使用した観測系におけるこれらの値を表1に掲げる。この表より、おおよそ直径が20mm以下の物体を背景面から80mm以上離して設置すると反転が生じることが分かる。

3. 観測条件の限定

撮影パターンのドット欠落・反転を検出・訂正するに先立ち、今回は取り扱いを簡単にするため、以下の仮定を設ける。

- ① 投影レンズと受像レンズの中心は同じ高さにある。すなわち、 $D_y=0$ である。この条件を満たすように観測系を設置すれば、z方向に物体が移動した場合、ドットの位置は画面上で水平方向にしか変化せず、処理を簡略化することが出来る。
- ② ドット列の欠落は連続して2列以上起こらない。
- ③ ドット列の反転は隣接する列間でのみ生じる。
- ④ 撮影パターンにおいて各物体ごとに少なくとも一つの完ウィンドウが存在する。

4. ドット・パターンの種類

測定には次の投影パターンを使用する。

1. 全ドットパターン
2. M平面パターン
3. 補助パターン#1
4. 補助パターン#2

全ドットパターンはドットを格子状に等ピッチで配置したものである。M平面パターンは、ウィンドウサイズ 3×4 の大きさ 91×45 のものである。補助パターン#1はすべての要素が0のドット列と1のドット列を縦縞状に配置したものの、#2の方は縦縞の幅を#1の2倍にしたものである。

5. ドット位置の測定復元方法

撮影パターン中のドットの基準M平面における行および列番号(固有番号と呼ぶ)を復元する方法を以下に述べる。

5.1. 仮配列の作成

まず撮影した画面を左側から縦方向に(下から上)に走査する。ドットを発見したらFreemanの物体境界の追跡法

を用いてドットの中心座標を計算し、条件①が成り立つ下で、列方向の値から固有行番号を定める。同じ行のドットには、左側から発見された順に0,1,2,...と仮の列番号を付ける。ただし、画面上で同じ列上にあるとみなされたドットには同一番号を付ける。以上の操作を撮影したすべてのドットに対して行い、各ドットの情報を仮の行列番号に従ってあらかじめ用意した配列（仮配列と呼ぶ）に置く。

5.2. 完全ウィンドウパターンのマッチング

仮配列から3x4の連結したドットからなるウィンドウを取り出し、M平面上でパターンマッチングを行い、ドットの固有列番号を求める。この場合、ウィンドウ内のデータに欠落が生じていれば、正しい列番号は求められない。欠落の有無は、補助パターン#1を用いて検出できる。例えば、図2に示す補助パターンに対しては、本来(1,1)要素にくるべきドットが欠落していることが条件②から分かる。欠落が生じているウィンドウに対してはマッチングは行わない。

図2. ウィンドウ内に欠落が生じている補助パターン例

5.3. 隣接関係によるドット位置の復元

完全ウィンドウが作れずに残ったドットに対しては、仮配列上で上下左右にすでに対応づけが完了したドットが存在するかを調べる。もし存在すれば、両ドットの隣接関係より未判定のドットの固有列番号を算出する。以上の操作を未判定のすべてのドットに対して繰り返し行う。

row no.	20								
col. no.		4	5	8	7	9			
sub pat. #1		0	1	0	1	1			
sub pat. #2		0	0	0	1	0			
pat no.		0	1	0	3	1			

18			4	5	6	7	8	9	
19		3	4	5	6	7	8	9	10
20	2	3	4	5	8	7	9		10
21	2	3	4	5	8	7	9		10
22	2	3	4	5	8	7	9		10
23	2	4	5	8	7	9			10

図3. ドットの反転と欠落が同時に生じたパターン

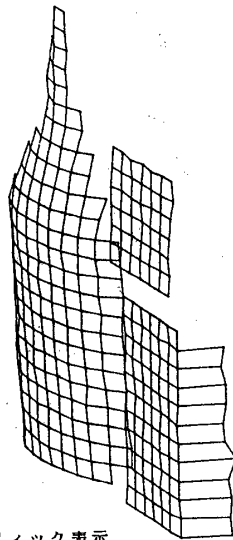


図4 測定結果

(d) グラフィック表示

5.4. 反転部分の訂正

各ドットに対する補助パターン#1,#2の値を0から3までの値として表す。図1の観測系において、条件②③が満たされているとする。このとき、仮配列上で隣接する二つのドット(n1,n2)のn2で反転が生じるための必要十分な条件は、 $(n1+3)=n2(\text{mod } 4)$ であることに着目し、この関係が成立するならばn2が反転しているとみなし、n1とn2の順序を逆転する。ただし、実際の投影では図3のように、反転と欠落が同時に生じる場合が頻繁に起こる。この場合には、上の条件式が連続した2箇所成立する。しかし、補助パターンの値から条件②を満たす復号は一意に定まる。

6. 結果

実際に物体の計測を行った結果を図4a)~d)に示す。図4a)は受像パターンから求めたドットの画面上での位置と仮の行列番号を示している。図4b)は完全ウィンドウのマッチング結果を、図4c)は最終的に得られた復号結果を示す。図4b)において、-1で示された未判定なドットは、図4c)において、ドット欠落の生じている部分も含めてすべて正確に復号されていることに注意する。図4d)は各ドットのz座標を算出した結果をグラフィック表示した例である。平坦な物体にパターンを投影して調べたz座標の測定誤差は約±5mmであった。使用したディジタイザの分解能が256x256であることと、設置した観測系の各パラメータから逆算すると、この値は測定限界を越えている。これは、CCDカメラの映像信号の偶数フィールドと奇数フィールドを別々にディジタル化し、計算機内で一枚の画像に合成する手法を用い、実質的に256x512の解像度で測定したのと同等の精度を実現したためである。

7. まとめ

M平面のウィンドウ性は投影パターンと受像パターンの一意的な対応付けに非常に有効であるが、ウィンドウ内にドットの欠落や反転によるパターンの誤りが存在する場合には、たとえ誤りを検出できたとしても、訂正する能力はない。そこで、誤りパターンに制限を加えることと補助パターンの使用によって、ドット誤りの訂正が可能であることを示した。

参考文献

- 1) Will, P.M. & Pennington, K.S.: "Grid coding; A novel technique for image processing", Proc. IEEE., 60, 6, p.669 (June 1972).
- 2) 米沢, 玉邑, 服部: "色格子像による物体形状計測法の検討", 信学会画像工学研究会資料, 1E76-7(昭51-06).
- 3) 宮川, 岩垂, 今井: "符号理論", 昭晃堂(昭48).
- 4) 森田, 矢島他: "符号パターン投影法による曲面形状の計測", 昭60信学全大6-309.

4				4 5					
5				4 5					
6				3 4 5					
7				3 4 5					
8				3 4 5					
9				3 4 5 6					
10				3 4 5 6					10 11 12 13 14 15 16
11				2 3 4 5 6 7					10 11 12 13 14 15 16
12				1 2 3 4 5 6 7					10 11 12 13 14 15 16
13				1 2 3 4 5 6 7 8					10 11 12 13 14 15 16
14				0 1 2 3 4 5 6 7 8					10 11 12 13 14 15 16
15				0 1 2 3 4 5 6 7 8 9					10 11 12 13 14 15 16
16				0 1 2 3 4 5 6 7 8 9					10 11 12 13 14 15 16
17				0 1 2 3 4 5 6 7 8 9					10 11 12 13 14 15 16
18				0 1 2 3 4 5 6 7 8 9					10 11 12 13 14 15 16 17
19				0 1 2 3 4 5 6 7 8 9					10 11 12 13 14 15 16 17
20				0 1 2 3 4 5 6 7 8 9					10 11 12 13 14 15 16 17
21				0 1 2 3 4 5 6 7 8 9					10 11 12 13 14 15 16 17
22				0 1 2 3 4 5 6 7 8 9					10 11 12 13 14 15 16 17
23				0 1 2 3 4 5 6 7 8 9					10 11 12 13 14 15 16 17
24				0 1 2 3 4 5 6 7 8 9					10 11 12 13 14 15 16 17
25				0 1 2 3 4 5 6 7 8 9					10 11 12 13 14 15 16 17
26				0 1 2 3 4 5 6 7 8 9					10 11 12 13 14 15 16 17
27				0 1 2 3 4 5 6 7 8 9					10 11 12 13 14 15 16 17
28				0 1 2 3 4 5 6 7 8 9					10 11 12 13 14 15 16 17

(a) 受像パターン

4				-1 -1					
5				-1 -1					
6				-1 -1 -1					
7				-1 -1 -1					
8				-1 -1 -1					
9				9 10 11 12					17 18 19 20 21 22 23
10				9 10 11 12					17 18 19 20 21 22 23
11				8 9 10 11 12 13					17 18 19 20 21 22 23
12				7 8 9 10 11 12 13					17 18 19 20 21 22 23
13				7 8 9 10 11 12 13 14					17 18 19 20 21 22 23
14				6 7 8 9 10 11 12 13 14					17 18 19 20 21 22 23
15				6 7 8 9 10 11 12 13 14 15					17 18 19 20 21 22 23
16				6 7 8 9 10 11 12 13 14 15					17 18 19 20 21 22 23
17				6 7 8 9 10 11 12 13 14 15					17 18 19 20 21 22 23
18				6 7 8 9 10 11 12 13 14 15					17 18 19 20 21 22 23 -1
19				6 7 8 9 10 11 12 13 14 -1					17 18 19 20 21 22 23 -1
20				6 7 8 9 10 11 12 13 14 15					17 18 19 20 21 22 23 -1
21				6 7 8 9 10 11 12 13 14 15					17 18 19 20 21 22 23 -1
22				6 7 8 9 10 11 12 13 14 15					17 18 19 20 21 22 23 -1
23				6 7 8 9 10 11 12 13 14 15					17 18 19 20 21 22 23 -1
24				6 7 8 9 10 11 12 13 14 -1					17 18 19 20 21 22 23 -1
25				6 7 8 9 10 11 12 13 14 15					17 18 19 20 21 22 23 -1
26				6 7 8 9 10 11 12 13 14 15					17 18 19 20 21 22 23 24
27				6 7 8 9 10 11 12 13 14 15					17 18 19 20 21 22 23 24
28				6 7 8 9 10 11 12 13 14					17 18 19 20 21 22 23 24

(b) 完全ウィンドウのマッチングを行った復号結果

4									10 11
5									10 11
6									9 10 11
7									9 10 11
8									9 10 11
9									9 10 11 12
10									9 10 11 12
11									8 9 10 11 12 13
12									7 8 9 10 11 12 13
13									7 8 9 10 11 12 13 14
14									6 7 8 9 10 11 12 13 14
15									6 7 8 9 10 11 12 13 14 15
16									6 7 8 9 10 11 12 13 14 15
17									6 7 8 9 10 11 12 13 14 15
18									6 7 8 9 10 11 12 13 14 15
19									6 7 8 9 10 11 12 13 14 15
20									6 7 8 9 10 11 12 13 14 15
21									6 7 8 9 10 11 12 13 14 15
22									6 7 8 9 10 11 12 13 14 15
23									6 7 8 9 10 11 12 13 14 15
24									6 7 8 9 10 11 12 13 14 15
25									6 7 8 9 10 11 12 13 14 15
26									6 7 8 9 10 11 12 13 14 15
27									6 7 8 9 10 11 12 13 14 15
28									6 7 8 9 10 11 12 13 14

(c) 復号されたパターン