M系列符号化投影法による3次元物体の計測†

葉 雄英*・藤 村 貞 夫*

Measurement of 3-D Object by Using M-Sequence Grid Projection

Xiongying YE* and Sadao FUJIMURA*

A new 3-D measurement method is proposed. We use the measurement of deformation of the projected grid pattern on an object. The three level grid is coded by a pseudo-random M-sequence to make it easy to identify the position on the object. We also use the gray image obtained by the projection of uniform light onto the object to normalize the gray level of the grid detected by a TV camera. The coordinates of the object points on the grid are calculated by triangulation based on the decoding of the M-sequence. This method has an advantage that only two images obtained by two projections are required. Experimental results show that the decoding is not influenced by the color and/or the reflectance of the object.

Key Words: coded grid projection, range-maps, robot vision, M-sequence

1. はじめに

知能ロボットにとって3次元の環境や物体の位置、形状を認識することは不可欠であり、そのための3次元計測手法が種々提案されている。その一般的な手法として、受動的な両眼立体視があるが、対応点の決定に曖昧さが生じたり、処理に長い時間がかかるなどの欠点がある。それに対し、能動的にスリット光を走査する方法¹⁾は対応づけの必要はないが、走査に長い時間を要する。佐藤ら²⁾や Minou ら³⁾が提案した符号化パターン投影法では走査する必要はないが、符号長に等しい枚数の画像を必要とし、各パターンの正確な位置調節が必要となる。大谷ら⁴⁾はM系列による符号化方法を提案した。この方法は1枚のM系列パターンで

けを用いているが、このパターンをM系列の次数の回数だけずらして投影するので、複数回にわたり、正確な位置調節を必要とし、複数枚の画像を必要とする。米沢ら⁵⁾が提案したカラーによるM系列符号化方法および K. L. Boyer ら⁶⁾のカラー符号化方法は1枚の画像で測定できるという利点を有するが、物体が不連続なところでは符号対応づけに不確定が生じることがあり、さらに物体の色によっては符号化誤りが生じることもある。

本研究ではM系列で符号化した濃淡3値パターンおよび均一光を物体空間に投影し、観測した縞画像を均一光投影画像を基準として3値化し、M系列に対応づけして、縞の番号を決定する。対応づけで不確定なところにおいては均一光画像に対して物体のエッジを検出し、エッジ位置によって一義的に対応づけをする。これによって2枚の画像で3次元形状の測定ができ、移動ロボットの視覚系のように、短時間の形状測定が要求される場合には大きな利点となる。

2. 原 理

2.1 物体座標の計算

本手法は三角測量の原理に基づくもので、Fig. 1に示すように被測定物体に符号化された縞パターンを投影し、その像をカメラで受像する。縞パターン投影によって、被測定空間が多くの細い扇状領域に分割される。物体上の注目点Oに対応する投影面上の位置 $P(x_P)$ および像面上の位置 $Q(x_C, y_C)$ がわかれば、点Oの3次元座標 (X, Y, Z) は(1)、(2)式を用いて求められる。

$$\begin{aligned} X &= X_C - Z' \tan(\theta + \theta_0) \\ Y &= Y_C - Z' \tan \xi \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} Z &= Z_C - Z' \\ Z' &= \frac{X_P - X_C + (Z_C - Z_P) \tan(\phi + \phi_0)}{\tan(\phi + \phi_0) - \tan(\theta + \theta_0)} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\tan \theta = x_C / l_C, \quad \tan \xi = y_C / l_C, \quad \tan \phi = x_P / l_P$$

† 第26回計測自動制御学会学術講演会で発表 (1987・7)

* 東京大学工学部 東京都文京区本郷 7-3-1

* Faculty of Engineering, University of Tokyo, Bunkyo-ku, Tokyo

(Received May 26, 1988)

(Revised January 27, 1989)

Fig. 1 System configuration

ここで像面および投影面の座標の y 軸は Y 軸に平行であるとした。 X_c, Y_c, Z_c はカメラのレンズ中心の座標で、 X_p, Z_p はプロジェクタのレンズ中心の座標 (Y 方向は寄与しない) である。 l_c, l_p はそれぞれカメラのレンズ中心と像面間の距離およびプロジェクタのレンズ中心と投影面間の距離であり、 θ_0, ϕ_0 はそれぞれカメラおよびプロジェクタの光軸と Z 軸とのなす角度である。 x_c, y_c は注目点の像面上的座標値を表わし、直接画像から得られる。一方、 x_p は画像中で定めた注目点上の縞の投影面における位置を表わし、この縞に対応する投影縞パターン上の番号より定まる。

2.2 符号化パターン

縞番号を決定するには、物体上に、ある符号に従って作成した縞パターンを投影し、観測画像より縞パターンを抽出して、投影縞と対応づけることが考えられる。投影する縞の符号化に用いる符号系列はできるだけ短い符号長で多くの縞を符号化できる (すなわち、周期が長い) ことが望ましい。これにはM系列が適している。

符号長が k のM系列⁷⁾では符号系列中に長さ k のすべての組合せパターン (すべて0のパターンを除く) が一度ずつ現れる。M系列の周期は $(2^k - 1)$ で、符号系列のうち最も周期が長い。1周期のM系列を用いれば、長さ k 以上の部分系列が復号でき、M系列上における位置は一義的に定まる。

以下、一義的決定の条件を満たすため、測定対象の一つの連続した領域上には長さ k 以上の部分系列が投影されるものと仮定する。これは本測定法の測定対象に制約を与えるものとなる。

物体上に縞パターンを投影するとき、対象面の向きによって観測される縞の幅が変化する。そのため、同じ符号が隣合うような場合にはいくつの符号が入っているのかわからなくなる。これを避けるため、M系列符号縞を1本1本分割できるようにする必要がある。

Fig. 2 M-sequence coded pattern

この実現のため、ここでは Fig. 2(a)に示すように各符号縞間にもう1本階調の異なる縞 (以下、クロック縞と呼ぶ) を入れる。M系列の0, 1およびクロックを区別するのに、3階調の濃度をもつ縞パターンを用いる。縞パターンの透過率分布を Fig. 2(b)に示す。クロックの検出が重要であるので最も検出しやすいピーク (透過率1) をクロックに用い、M系列の0, 1はそれぞれ透過率0.5, 0に対応させている。

3. 画像の処理

3.1 縞画像の3値化

観測した縞画像から符号系列を抽出し、投影に用いたM系列と対応づけるにはまず縞画像を3値化しなければならない。物体の反射率や傾きによって反射してくる光の強さが異なるため、そのままでは3値化誤りが起きやすい。それを防ぐため、透過率0.25のフィルムを通した均一光を投影して得た画像を3値化の基準として用いる。

入力画像の濃度 (ここで、グレイレベルを意味する) は一般に Fig. 3 のようになる。縞画像の濃度はピークと谷が交互に現れ、均一光画像の濃度は滑らかに変化する。3値化に際しては、まず縞画像に対しピークと谷を検出し、ピークはクロックに対応させる。M系列符号に対応する谷の部分は平滑化した均一光画像の濃度をしきい値として2値化し、画面の端から順

Fig. 3 Gray level of coded pattern image and uniform light image

番に番号づけしておく。ピークおよび谷の中心位置を検出して、縞の中心位置とする。均一光画像の濃度が 0 (黒) のところでは物体が存在しないとして、系列の区切りとする。

3.2 M系列対応づけ

(1) 部分系列の対応づけ

縞画像から抽出された 0, 1 の符号系列 L より、長さ k の部分系列 L_i を取り出し、投影 M 系列 M と比較して、一致する M 系列の部分系列 M_j の位置 j を決定する。 L_i, M_j が $k+1$ 個以上続けて一致するならばらに対応づけを継続する。 L_i, M_j が一致しなくなるまでに対応づけできた部分系列の長さを l とする。 L_i, M_j の位置および l を記録したリストをつぎのように作る。

$$MAT_n = (i_n, j_n, l_n)$$

i_n : n 番目に M に対応づけられた L の部分系列の最初の縞の番号

j_n : i_n に対応する M 系列上の番号

l_n : L と M で一致した部分の長さ

続いて、対応づけられた系列 L の最後の $k-1$ 個の符号につぎの 1 個の符号を加えて、つぎの L の部分系列の始まりとし、系列 M の始めから探索を開始し、上と同様に対応づけて、リスト $MAT_{n+1} \dots$ を作成する。 L の対応づけが終るまでこの手順を続ける。 MAT 作成の一つの例を Fig. 4 に示す。図には $k=6$ の場合を示してある。Fig. 4 の MAT の括弧位置はおのの MAT で表わされる符号の位置に対応している。長さ $k-1$ 以下のパターンは M 系列の 1 周期中に 2 回以上現れるため、Fig. 4 の MAT_1, MAT_4 のように、対応できる部分系列が実際あるべき部分系列より長くなることがある。このことによる誤りを避けるため、探索に用いるつぎの部分系列は対応づけられた L の最後の $k-1$ 個の符号から始めることにしている。

(2) M系列不連続位置の決定

Fig. 4 Example of M-sequence matching when $k=6$

縞画像から抽出される M 系列が切断される原因には

(i) 対象物体の不連続性

(ii) 系列符号の 2 値化誤り

の二つがある。(i) による不連続は対象物体本来のもので、検出すべきであり、(ii) による不連続は誤りであって、除去すべきものである。

Fig. 4 からわかるように、以上のアルゴリズムで作った MAT では、M 系列の隣接しないところからきた長さ $k-1$ 以下の二つの部分系列よりできた (物体の不連続部にまたがった) 部分系列が対応づけされることがある。このような部分系列は除去したほうが後の処理が簡単になる。このような部分系列は M 系列の隣接しない二つの部分系列によって作られ、 k より長い系列が対応づけられる確率は長さが増すにつれて急激に減少する。このことを考慮すれば、前に得られたリスト MAT_n に対して長さ l_n がある閾値 D より短い MAT_n の多くは実際の物体に対応していない、実際の物体に対応する MAT_n の大部分は $l_n \geq D$ であると考えることができる。 $l_n \geq D$ を満たす MAT_n を取り出し、

$$MAT_{n1}, MAT_{n2}, \dots, MAT_{np}, \dots, MAT_{nq}$$

とする。

もし $i_{np} + l_{np} \geq i_{np+1}$ なら $i_{np+1} - C \sim i_{np} + l_{np} + C$ (C : 定数) の間で均一光画像に対してエッジを検出し、エッジの位置によって MAT_{np}, MAT_{np+1} を訂正する。

もし $i_{np} + l_{np} < i_{np+1}$ なら、 $i_{np} + l_{np} - C \sim i_{np+1} + C$ の間でエッジを探索し、エッジの数によってつぎの三つの場合に分け、→の後の処置をする。

(i) エッジなし [$i_{np} + l_{np} \sim i_{np+1}$ の間の L の 2 値化が誤っていることを意味する] → MAT_{np} と MAT_{np+1} を連結する

(ii) エッジ 1 本 [エッジの近くの L_i に 2 値化誤りが起きていることを意味する] → エッジの位置によって MAT_{np}, MAT_{np+1} を訂正する

(iii) エッジ 2 本以上 [エッジ間に D 個の縞より狭い物体があることを意味する] → エッジの位置によって MAT_{np}, MAT_{np+1} を訂正する。エッジ間の距離が k 縞以上ある場合、 l_n が D より小さい MAT_n の中からエッジの位置とエッジ間の距離にちょうど合致する i_n と l_n をもつ MAT を取り出す

この処理を nq まで繰り返す。もし、 MAT_{n1}, MAT_{nq} が最初あるいは最後の MAT でなければ、 MAT_{n1} あるいは MAT_{nq} と画像の端の間で (ii) または

(iii)の状態が存在するので、上述の処理を行う (Fig. 4の例では MAT_5 がこれによって検出される)。訂正された L_k が k より小さくなった MAT は除去する。以上によって符号系列 L を M 系列に一義的に対応づける (Fig. 4の例の結果のリストは (1, 6, 10) (11, 26, 14) (25, 54, 8) である)。 D の値によって得られる結果は変わらないが、 D が大きすぎるとエッジ位置によって対応づけるものが多くなり、一方、 D が小さすぎるとエッジをまたがった MAT も選ばれる確率が大きくなる。いずれの場合も処理時間が余分にかかる。ここでは、 $k=6$ に対し D を経験的に 9 とした。

この対応づけアルゴリズムは符号系列の2値化に誤りがなく、物体間のエッジが検出できるなら、曖昧さなく正確に対応づけができる。たとえ2値化に誤りがあったり、一つの物体上の部分系列が誤りによって切断されたりしても残る部分系列の長さが誤りの符号をまたがった部分系列より長ければ、その物体に対する部分系列も正確に対応づけできる。

4. 測定系および測定系パラメータ

4.1 測定系

本実験では、原始多項式 $X^6 + X^4 + X^3 + X + 1$ ；系列長 $2^6 - 1 = 63$ の M 系列を用いた。符号化された投影縞はクロックを含めて 127 縞となる。1本の明または暗の縞内に少なくとも1画素は必要であり、平均2画素があるのが望ましいので、用いるカメラの画素数が 256×256 であるから、それに関連して系列長 63 の M 系列を用い、投影縞を 127 縞にした。均一光投影には、符号化パターン M 系列の 0, 1 における透過率の中間値の透過率 (0.25) のフィルムを用いた。フィルムの切替えには、2枚のスライドフィルムを上下に固定し、横ずれなしに上下させられるように設定した。

投影系には画角約 28° のスライドプロジェクタ (レンズの焦点距離: 60 mm) を用い、受像系には画角約 24° (レンズの焦点距離: 16 mm) の CCD カメラを用いた。データは6ビット階調の A/D 変換器を介してパーソナルコンピュータに取込み、処理した。

測定系の配置は Fig. 1 に示すようにカメラの像面およびプロジェクタの投影面の y 軸が Y 軸と平行になるように設定し、カメラの光軸は Z 軸とほぼ平行に、カメラとプロジェクタの光軸の交角は約 17° 、それらの間の距離は約 30 cm に配置した。原点からカメラのレンズ中心までの Z_c は約 100 cm であり、原点は対象物体のほぼ中央に取っており、 Y 軸は鉛直方向に、 Z 軸は奥行き方向に取ってある。

4.2 測定系のパラメータの推定

Fig. 1 に示した測定系のパラメータを直接正確に測定するのは困難である。ここでは、以下に述べる方法で、実験的にこれらのパラメータを推定して用いる。

Fig. 1 からわかるようにカメラパラメータに関してつぎの式が成り立つ。

$$\frac{X_c - X_i - (Z_c - Z_i) \tan \theta_0}{Z_c - Z_i + (X_c - X_i) \tan \theta_0} = \frac{x_{ci}}{l_c} \quad (3)$$

$$\frac{Y_c - Y_i}{Z_c - Z_i} = \frac{y_c}{l_c} \quad (4)$$

ここで $X_c, Y_c, Z_c, l_c, \tan \theta_0$ は推定したいパラメータであり、 (X_i, Y_i, Z_i) は空間上の点の座標で、 (x_{ci}, y_{ci}) はその点に対応する画像上の座標である。空間上にいくつかの点を設定し、それらの座標を測定し、(3), (4)式により画像上の座標の推定値 $\hat{x}_{ci}, \hat{y}_{ci}$ を得る。この推定値と実測値との差の2乗和

$$Q = \sum \{ (x_{ci} - \hat{x}_{ci})^2 + (y_{ci} - \hat{y}_{ci})^2 \} \quad (5)$$

が最小になるように非線形最小2乗法 (Gauss-Newton 反復法) を用いて、 $X_c, Y_c, Z_c, l_c, \theta_0$ を推定した。推定にはすべての点と同じ平面上にはない6点以上のデータが必要である。本実験では測定領域にほぼ均等に分布する約50点のデータを用いた。

プロジェクタにおいても同じように次式が成り立つ。

$$\frac{X_p - X_i - (Z_p - Z_i) \tan \phi_0}{Z_p - Z_i + (X_p - X_i) \tan \phi_0} = \frac{x_{pi}}{l_p} \quad (6)$$

(3), (6)式より X_i を消去して整理すると

$$x_{pi} = l_p \frac{X_p - X_c + (Z_c - Z_i) A_c - (Z_p - Z_i) \tan \phi_0}{Z_p - Z_i + (X_p - X_c + (Z_c - Z_i) A_c) \tan \phi_0} \quad (7)$$

ここで

$$A_c = \frac{x_{ci} + l_c \tan \theta_0}{l_c - x_{ci} \tan \theta_0}$$

である。プロジェクタパラメータの推定には、いくつかの平面 (板) を Z 軸に垂直に物体空間に立てて、それらの Z_i を測定した。これらの平面に符号化パターンを投影して得られた画像を処理し、それらの縞の像面座標 x_{ci} および投影面上の座標 x_{pi} を得た。(7)式による x_{pi} の推定値 $\hat{x}_{pi}$ とその実測値との2乗和

$$Q = \sum (x_{pi} - \hat{x}_{pi})^2 \quad (8)$$

が最小になるように非線形最小2乗法 (Gauss-Newton 反復法) を用いて $X_p, Z_p, l_p, \tan \phi_0$ を推定した。このとき、前もって推定されたカメラのパラメータおよびデータ Z_i, x_{ci}, x_{pi} を用いた。

本実験において推定したカメラおよびプロジェクタ

Table 1 Estimated camera parameters

	X_c (cm)	Y_c (cm)	Z_c (cm)	l_c (pixel)	$\tan \theta_0$
Estimate	-0.24	17.6	108.7	607.5	-0.006
Std. Err.	0.22	0.02	1.90	12.1	0.0023

Table 2 Estimated projector parameters

	X_p (cm)	Z_p (cm)	l_p (fringe)	$\tan \phi_0$
Estimate	29.1	99.6	254.5	0.348
Std. Err.	0.42	1.11	3.21	0.0016

のパラメータを Table 1, Table 2 に示す。

4.3 パラメータの推定誤差による測定誤差の検討

測定系パラメータの推定誤差がどのように物体の測定精度に影響するかを調べる。そのため、パラメータの推定誤差による奥行き Z 座標の測定誤差をシミュレーションによって求める。

(1) 式の 3 番の式および (2) 式より

$$Z = \frac{X_c - X_p - Z_c \frac{x_c + l_c q}{l_p - x_p p} - Z_p \frac{x_p + l_p q}{l_c - x_c p}}{\frac{x_c + l_c q}{l_p - x_p p} - \frac{x_p + l_p q}{l_c - x_c p}} \quad (9)$$

が得られる。ここで、 $p = \tan \theta_0$, $q = \tan \phi_0$ である。

(9) 式から、 Z の RMSE (平均 2 乗誤差の平方根) は各パラメータの RMSE に δ をつけて表現し、誤差伝搬の法則より

$$(\delta Z)^2 = \left(\frac{\partial Z}{\partial X_p} \delta X_p \right)^2 + \left(\frac{\partial Z}{\partial Z_p} \delta Z_p \right)^2 + \left(\frac{\partial Z}{\partial q} \delta q \right)^2 + \left(\frac{\partial Z}{\partial l_p} \delta l_p \right)^2 + \left(\frac{\partial Z}{\partial X_c} \delta X_c \right)^2 + \left(\frac{\partial Z}{\partial Z_c} \delta Z_c \right)^2 + \left(\frac{\partial Z}{\partial p} \delta p \right)^2 + \left(\frac{\partial Z}{\partial l_c} \delta l_c \right)^2 \quad (10)$$

が得られる。パラメータの RMSE による Z の RMSE (δZ) をいくつかの奥行きに対して、計算した結果を Fig. 5 に示す。ここで、真のパラメータの値として、

Fig. 5 Error of Z -coordinate caused by estimated error of system parameters
— $Z=0$ cm; ---- $Z=10$ cm; -.- $Z=20$ cm

Table 1, Table 2 に示す推定値を用い、各パラメータの RMSE には推定した標準偏差を用いた。実線は $Z=0$ cm, 破線は $Z=10$ cm, 一点鎖線は $Z=20$ cm に対する誤差限界である。横軸は測定領域におけるワールド座標の X を表す。Fig. 5 からわかるように、 Z の小さいところすなわちカメラから遠いほどパラメータの誤差が大きく測定精度に影響し、 $X=0$ すなわちカメラの光軸から離れるほどパラメータの誤差の影響を大きく受ける。

5. 測定結果および検討

5.1 実 測 例

前述の測定系で、実際の物体に対する測定例について述べる。Fig. 6 は入力画像の 1 例である。(a) は M 系列符号化パターンの投影画像で、(b) は均一光投影画像である。測定対象は濃淡段差のある灰色 (反射率の最小値が 0.43 であった) 円柱、濃い緑、青、赤、薄い黄色、赤、緑の直方体および平板である。Fig. 7 の (a), (b), (c) はそれぞれ Fig. 6 の画像のライン (1), (2), (3) に沿った濃度および 3 値化の結果を示す。上段は濃度で、ほぼ平らなのは平滑化した均

Fig. 6 Input images

Fig. 7 Three level quantization on Fig. 6

一光投影画像の濃度である。これが縞パターン投影画像の濃度の谷を切るか否かによって谷を2値化する。下段は3値化した結果である。ライン(1)は灰色円柱(反射率: 0.43)と濃い青色平板を通り、ライン(2)は灰色円柱(反射率: 0.57)と濃い赤色の直方体の面を通る。両方とも3値化は正しく行われていることが

Fig. 8 Measurement results of X-Z range

わかる。ライン(3)は濃い緑の直方体および白い直方体を通っており、濃い緑の直方体のところで3値化の誤りが生じたが、対応づけにおける符号の誤り訂正によって、Fig. 8(c)に示すように正しい結果を得ている。Fig. 8はライン(1)、(2)、(3)の測定結果の断面図である。しかし、均一光投影画像において二つの物体のエッジが検出できない場合、誤った結果が得られることがまれに生じる。

Fig. 9はもう一つの入力画像で、対象は淡緑色のラッカを塗った底の平らなボウル(bowl)、円柱と直方体の箱である。その測定結果はFig. 10に示してあ

(a) M-sequence coded pattern projection

(b) Uniform light projection

Fig. 9 Input images

Fig. 10 3-D display of measured result of Fig. 9

り、三つの物体のいずれも再現できている。ただボウルの縁のところでは面の傾きが急なため、結果が少し欠けたり、誤差が大きくなったりしている。一方、ラッカ塗布面は鏡面反射もあるので、プロジェクタや周りのランプからの光を強く反射した点が生じ、縞パターンが抽出できず、形状が再現できない部分が生じている。

5.2 測定精度および分解能

以上の測定結果より、本手法は拡散面物体に対して有効であることがわかり、カメラから奥行き約 100cm のところでの測定精度は約 1 cm であり、約 1 % の精度を得た。横方向の誤差は視野約 40 cm のところで 3 mm 以下で 0.75 % の精度を得た。測定誤差の主な原因は画像上の縞位置の検出誤差によるものとパラメータの推定誤差によるものである。特に円柱やボウルの勾配の急なところでは縞幅が広くなり、対称でないため縞位置の推定誤差が大きくなる。Fig. 11 は縞中心位置の検出誤差による奥行き Z と横方向 X の推定誤差を、 $X=0$ cm, $Z=0$ cm のところに対し、シミュレーションしたものである。横軸は縞中心位置の誤差で、単位は画素数である。縞位置の誤差の増大に対

Fig. 11 Relation between estimated error of X and Z -coordinate and error of fringe position on image

し、 Z , X の誤差はほぼ線形的に増大した。

この測定系では分解能は水平方向はカメラの画素数の約半分の 127 点、垂直方向はカメラの画素数の 256 点である。符号長 6 の M 系列を利用しているため、測定可能な物体は横方向に符号縞 6 縞、すなわち投影領域の 6/63 より大きいものである必要がある。

6. おわりに

クロック縞をもつ M 系列を利用した新しい符号化投影法による 3 次元物体測定について述べた。濃淡 3 階調の M 系列符号化縞パターン投影および均一光投影の 2 枚の画像により、拡散面物体の 3 次元的位置、形状の測定が可能であることを実験例を通じて示した。本手法は測定対象が横方向にある程度の幅のある物体に制限されるという欠点があるが、測定に必要な画像が 2 枚だけで画像入力および処理時間が短くできること、また、2 枚の投影フィルム間の正確な位置合せが不要であるため装置が簡便となること、さらに、濃淡パターンおよび 3 値化に均一光投影を用いているので、物体の色や濃淡による影響を受けにくく、迷光に強いことなどの特長がある。

本手法の問題点として、物体間のエッジが検出できない場合、対応づけに曖昧さが生じること、勾配の急なところにおいて測定精度が低下することが挙げられる。それらの問題点を解決し、さらに完備した測定系にすることが今後の課題である。

参考文献

- 1) Y. Shirai: Recognition of Polyhedra with a Range Finder, *Pattern Recognition*, **4**, 243/250 (1972)
- 2) 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*, **J68-D-3**, 369/375 (1985)
- 3) M. Minou, T. Kanade and T. Sakai: A Method of Time-Coded Parallel Planes of Light for Depth Measurement, *Trans. IECE Japan*, **E64-8**, 521/528 (1981)
- 4) 大谷, 大友: ステレオ CCD カメラを用いた 3 次元計測システム, *写真測量とリモートセンシング*, **26**, 特集号 2, 6/12 (1987)
- 5) 米沢, 玉邑: 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*, **J61-D-6**, 411/418 (1978)
- 6) K.L. Boyer and A.C. Kak: Color-Encoded Structured Light for Rapid Active Ranging, *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, **PAMI-9-1**, 14/28 (1987)
- 7) 宮川, 岩垂, 今井: 符号理論, p. 481, 昭晃堂 (1973)