

多値パターン投影による3次元形状測定（第2報）*

- 空間符号化の信頼性向上 -

浅野秀光** 大澤尊光** 古谷涼秋***
高増 潔† 大園成夫† 上川哲生††

Measurement of Three Dimensional Objects Using Gray Code Projection (2nd Report)
- Improvement of Reliability of Space Encoding Method -

Hidemitsu ASANO, Sonko OSAWA, Ryoshu FURUTANI,
Kiyoshi TAKAMASU, Shigeo OZONO and Akio UEKAWA

In three dimensional measurement system using the gray code projection, this paper proposes the technique for improving the reliability of the space encoding method. This space encoding method can measure the object under the illumination, the colored surface of object. The measurement space is encoded to 256 spaces by four gray level patterns. These patterns are projected by liquid crystal color projector, and are taken by CCD camera. When measurement area is 160 mm × 130 mm, measurement accuracy of this system is 1 mm, and the standard deviation is 0.41 mm in the horizontal cross-section, 0.34 mm in the vertical cross-section. It is shown that this method can measure colored object, by measuring the colored plaster figure in the dark and under the illumination.

Key words: three dimensional measurement, gray code projection, profile measurement, time sequential space encoding

1. 緒 言

画像計測による3次元形状測定法には、種々の手法¹⁾が提案されている。これらの画像計測法により機械部品の形状測定や外観検査を行う場合の最大の問題点は、外乱光の変化や対象物表面の色や性状の相違などにより、観測される輝度が変化し、画像計測の信頼性が低下することである。

この問題を解決する手法のひとつに、対象物にパターン光を投影し、その情景をカメラで撮影した画像より物体形状を求める能動的な光源を用いる手法がある。能動的な光源を用いる代表的な手法として光切断法²⁾があげられるが、この手法では、スリット光を投影した部分の形状しかわからず、ミラーなどを用いてスリット光を測定対象に走査する必要があるため、多くの測定時間を必要とする。この測定時間の問題を解決する手法のひとつとして、2値パターンを用いた時系列空間符号化法が佐藤ら³⁾によって提案されている。

この手法では、対象物全体に対し、白と黒からなる2値しまパターンを時系列に投影することにより、測定空間を分割し3次元測定を行う手法である。これらの手法において画像の信頼性を高くし、測定の精度を上げるための工夫が種々の方法で行われている^{4)~7)}。我々は前報⁸⁾において、この白と黒からなる2値しまパターンに、その間の灰色にあたる濃度を2つ追加した4値しまパターンを作成し、さらなる測定時間の短縮を図った。しかし、この手法では外乱光の影響が大きい通常照明下での測定や、対象物に暗い色が塗布されている場合において、4値しまパターンの符号化の信頼性が低下するという問題があった。本論文ではこの符号化の信頼性を向上させるため、4枚の参照用パターンを使用する符号化法を提案する。以下ではその符号化法の原理を述べ、本計測システムにおける測定結果を示す。

2. 測 定 原 理

2.1 多値パターン投影による時系列空間符号化法の原理⁸⁾

本システムの測定原理は時系列空間符号化法と三角測量に基づいている。2値のしまパターン投影による時系列空間符号化法³⁾では、測定空間を256分割するために8回のパターン投影が必要である。撮像系にビデオカメラを用いる場合、1回の撮像に要する時間は1フレーム分の時間であり、8回のパターン投影を観察するためには最低でも8フレーム分の時間が必要となる。測定時間は、投影するパターン数に依存するので、投影回数を減らすことができれば、測定時間を短縮することが可能となる。

多値パターン投影による時系列空間符号化法は、投影マスクの透過率を変えることによって、投影光の明るさを多段階に変えたパターンを使用することにより、測定空間を多進数で符号化する。多値パターンに対応した符号化をするための参照用の投影を考えなければ、 2^m 値のパターンを用いて空間を 2^s 分割するための投影回数 n は

$$n = \frac{s \log 2}{m \log 2} = \frac{s}{m} \quad (1)$$

で与えられる。もし、4値のしまパターンにより測定空間を256分割する場合、 $s=8$ 、 $m=2$ 、 $n=4$ であり、必要なパターン投影回数は4回となり、2値しまパターンで測定空間を256分割する場合の $s=8$ 、 $m=1$ 、 $n=8$ と比較しパターン投影の回数を4回減少させることが可能となる。

2.2 取得画像の4値化

時系列空間符号化法は、投影光の明るさで測定空間を符号化することに基づいているため、計測の安定性や精度は、取得画像からの投影パターンの抽出に大きく影響される。本システムでは4値のしまパターンを投影するため、取得画像の4値化処理の安定性が、3次元計測全体の安定性を決定することになる。

前報において行った4値化の手法は、全開口投影と、無開口投影の2つの参照用投影パターンを用い、この各画素における

* 原稿受付 平成7年9月19日

** 学生会員 東京電機大学工学部（東京都千代田区神田錦町2-2）

*** 正会員 東京電機大学工学部

† 正会員 東京大学工学系研究科（東京都文京区本郷7-3-1）

†† 正会員 三菱電機株式会社（尼崎市塚口本庁8-1-1）

輝度差を4分割し、符号化用画像の輝度はその幅に収まるコード値を割り当てるといったものであった。このため、取得画像にガンマ特性などの非線形性がある場合や、反射輝度差が少ない領域において符号化誤りを起こしやすく、通常照明下での安定した測定が困難であった。また、計測結果が物体表面の色などの状態に影響されていた。

本報では、これらの問題点を解決するために、次のような手法により取得画像を4値化する。まず、図1(a)のような4値の投影しまパターンに使用する4つの濃度値を、全開口投影を0、無開口投影を3とし、その間の濃度を等分割し順に0, 1, 2, 3とする。図1(b)のように全画素が0のみのパターン、1のみ、2のみ、3のみのパターンを参照用投影パターンとして用意する。これらを対象物に対して投影し、それぞれの画像をカメラによって取得し、4枚の参照用画像として保存する。

図2のグラフはこの時の4枚の参照用画像0, 1, 2, 3を投影したときの輝度と、符号化用しま画像を投影したときの輝度をプロットしたものである。符号化用画像にコード値を割り当てる際、この4枚の参照用画像の同位置の画素と比較を行い、一番近い値を取る参照用画像のコードによって符号化を行う。また、0, 1, 2, 3の輝度の中間的な輝度を利用して、3枚の参照用画像で同様なことを行うことも可能である。

2.3 参照用投影を含めた投影回数

前項の議論によれば、 2^m 値のパターンを用いて空間分割を行う場合、前報の手法で2つ、今回の手法で 2^m または、 $2^m - 1$ 個の参照用投影パターンが必要となる。表1に前報の手法および本報の手法を利用した場合の、空間の分割数と必要な投影回数の関係を、2値、4値、8値の場合でまとめた。

CCD カメラおよび画像処理装置の空間分解能、ダイナミックレンジが広がっていることを考えると、将来的には1024分割以上の空間分割が可能となってくる。この条件では、前報の手法によれば8値による投影が、本報の手法によれば4値による投影が、投影回数を最も少なくする。

2.4 測定不能点の検出

通常照明下での測定や反射率の低い対象物表面の測定では、投影パターンの反射輝度差が小さくなる領域ができる。そのような領域では、外乱などの影響を相対的に受けやすいため、測定の信頼性が低下する。参照パターンなしの2値パターンによる測定などでは、このような領域は測定結果の不整合から判断するしかなかった。

また、前報の手法では、2枚の参照用画像の各画素における輝度差が、あるしきい値以下であった場合を、対象の反射輝度が低い不安定な領域であると仮定し、測定不能点と定めていたが、そのしきい値は実験的に設定する必要があった。

本報では、投影する4枚の参照用プレーンを用いることにより、このような問題を解決している。取得される4枚の参照用画像の輝度差から、対象の反射輝度が低い領域で図3のBのように輝度が近づいたり、外乱や二次反射などの影響を受けCのように輝度の反転が起こりやすく、不安定な領域の検出が可能となる。また、Bのような領域を判断するしきい値の設定も、各輝度値が判断できるかどうかの値で良いため、比較的容易に設定が可能である。

2.5 本報の手法の利点と欠点

本報で提案した空間符号化法において、以下の利点が考えられる。

- (1) 取得画像の輝度値に非線形性がある場合にも、符号化

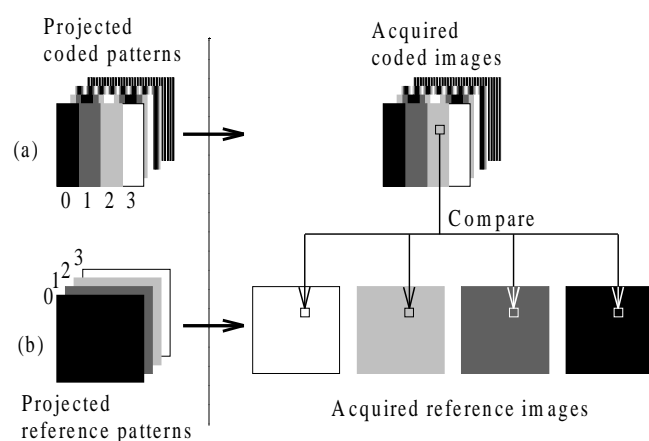


Fig. 1 Comparing coded images with 4 reference images

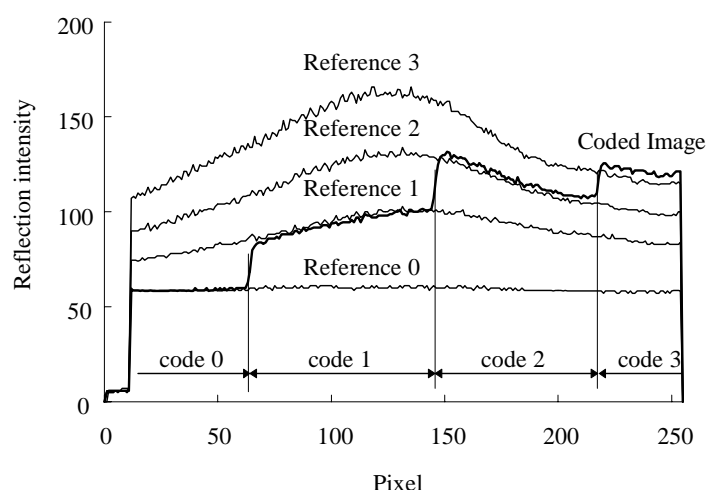


Fig. 2 Encoding coded image using 4 reference images

Table 1 Number of projection by old and new methods

gray level	old/new method	no. of encoded space				
		256	512	1024	2048	4096
2	old	10	11	12	13	14
2	new	9 - 10	10 - 11	11 - 12	12 - 13	13 - 14
4	old	6	7	7	8	8
4	new	7 - 8	8 - 9	8 - 9	9 - 10	9 - 10
8	old	5	5	6	6	6
8	new	10 - 11	10 - 11	11 - 12	11 - 12	11 - 12

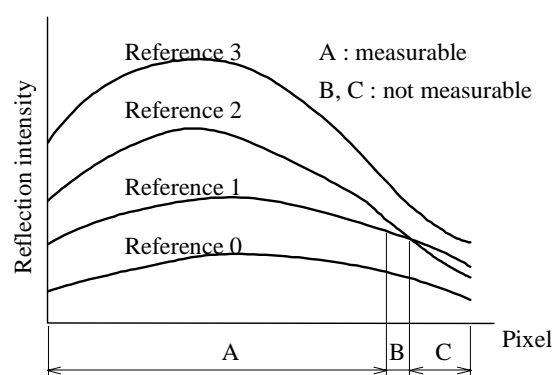


Fig. 3 Detection of not measurable areas B and C

誤りを起こさず安定した符号化を可能とする。

- (2) 取得画像の4値の輝度差が少ない領域においても、安定した符号化を可能とする。
- (3) 参照投影を利用して、測定不能点の検出が可能となる。
- (4) 参照投影を含めた投影回数では、2値、8値に対して少ない投影回数で測定が行える。

また、欠点としては以下の点が挙げられる。

- (1) 前報の手法と比較した場合、投影回数が増加する。
- (2) 参照投影などの画像を保存するために必要なメモリ量が増加する。

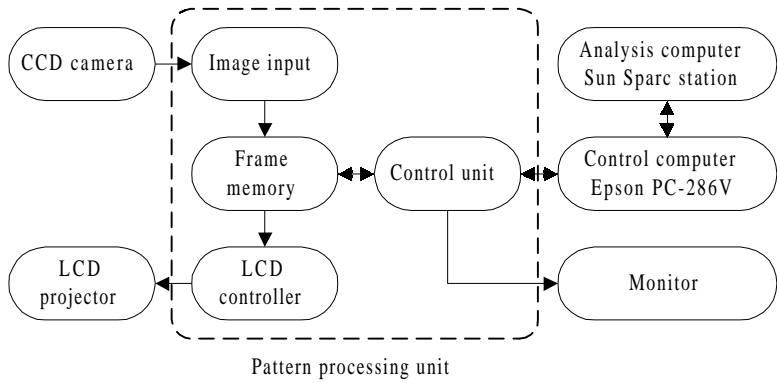


Fig. 4 Block diagram of measurement system using gray code projection

3. 測定システムの構成

本計測システムは、CCDカメラ (SONY 製 XC-73)、液晶プロジェクタ (SONY 製 CPJ-100)、画像取得装置、モニタ、制御用コンピュータ、解析用コンピュータの6つの主要なハードウェアから構成されている。図4は測定システムの構成図である。

フレームメモリの画素数は縦256×横256である。本システムでは液晶プロジェクタから投影された多値パターンをCCDカメラによって取得、制御用コンピュータによって空間符号化を行い、3次元位置の演算は解析コンピュータにより行っている。

4. 測定実験

本報で提案した符号化手法の有効性確認のため、以下の測定実験を行った。使用した測定光学系の配置は、図5の通りである。物体座標系の水平方向をX軸、垂直方向をY軸、奥行き方向をZ軸とし、カメラとプロジェクタを物体座標系のX軸と水平に配置している。 h_1 はカメラ距離、 h_2 はプロジェクタ距離、 ϕ はZ軸とCCDカメラの光軸のなす角、 θ はZ軸とプロジェクタの光軸のなす角である。実験に際しては、各パラメータの値は平面測定の測定値を利用して校正している。

4.1 平面の測定

測定精度の確認のため、白色拡散平面の測定を暗室内と通常照明下において行った。測定条件は図5において $h_1 = 350$ mm、 $\phi = 20^\circ$ 、 $h_2 = 500$ mm、 $\theta = 15^\circ$ であり、この時の測定範囲はY方向で160 mm、X方向で130 mmである。再構成された平面の、 $y = 0$ mmのXZ断面をプロットしたグラフを図6に示す。図6(a)は暗室内における測定結果、図6(b)は通常照明下における測定結果であり、一部分を拡大した表示も同時に示している。

暗室内におけるXZ断面でのZ座標値の標準偏差は0.41 mmであり、YZ断面でのZ座標値の標準偏差は0.34 mmであった。測定した平面の精度は本システムの測定精度に比較して十分に良いので、この標準偏差を本システムの測定精度と考えることができる。またXZ断面での、最大誤差 $z_{\max} - z_{\min}$ は2.12 mmであった。

前報において報告した量子化誤差からなる理論的誤差値は、この場合2.11 mmであるため、この最大誤差 $z_{\max} - z_{\min}$ は、理論値に近い値を取っており、本システムは理論通りの測定ができていていることがわかる。図6の拡大した表示を見ると、量子化誤差の影響がよく分かる。

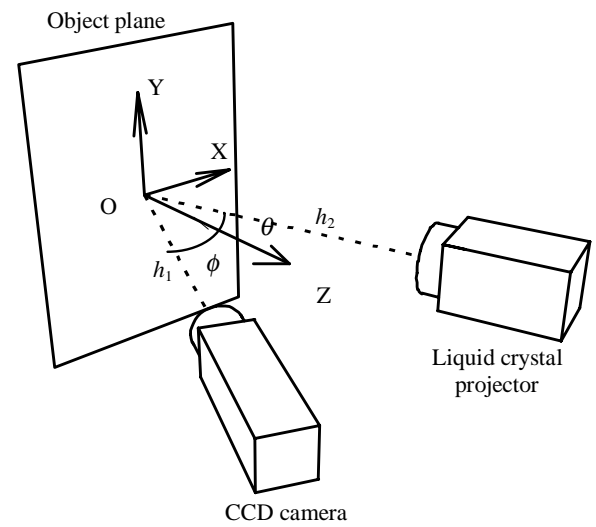
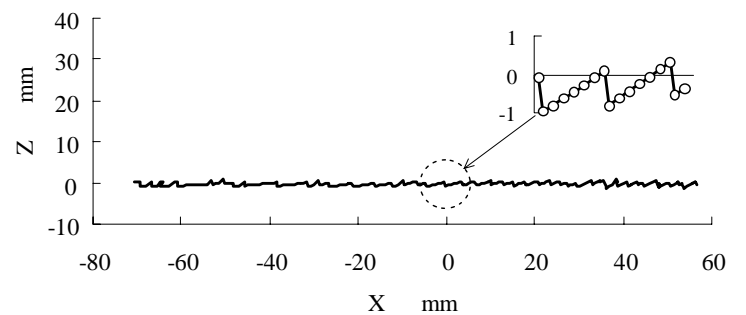
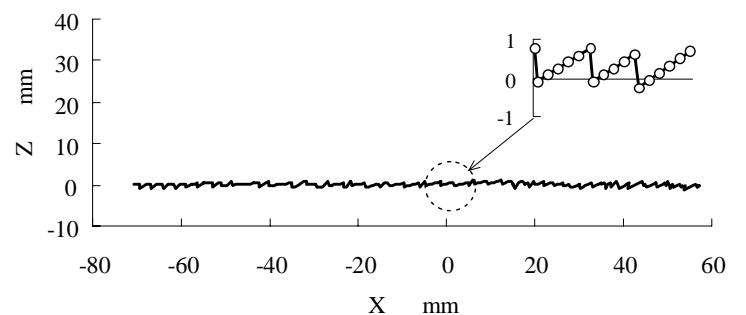


Fig. 5 Experimental setup of optical system

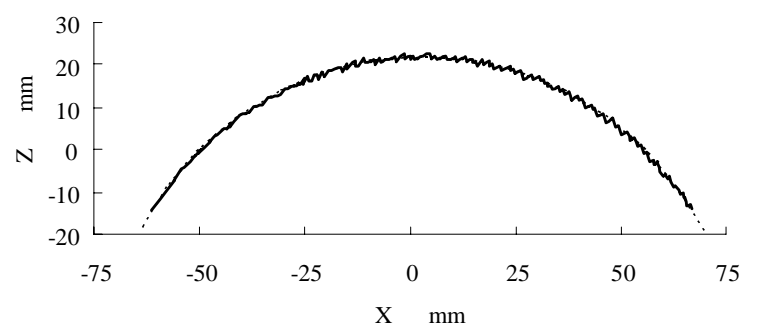


(a) Measured Z value of a plane (in the dark)

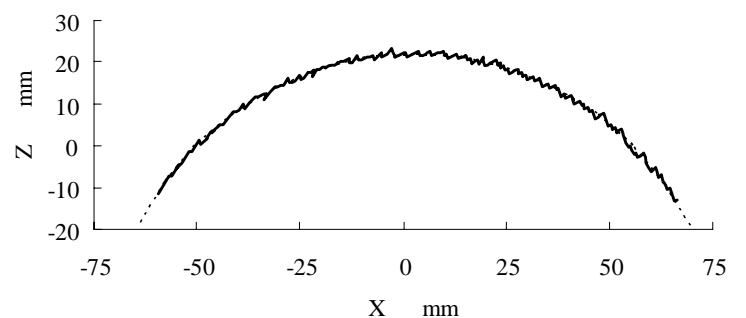


(b) Measured Z value of a plane (under the illumination)

Fig. 6 Measured result of a plane in XZ plane



(a) Measured Z value of a cylinder (in the dark)



(b) Measured Z value of a cylinder (under the illumination)

Fig. 7 Measurement result of a cylinder in XZ plane.

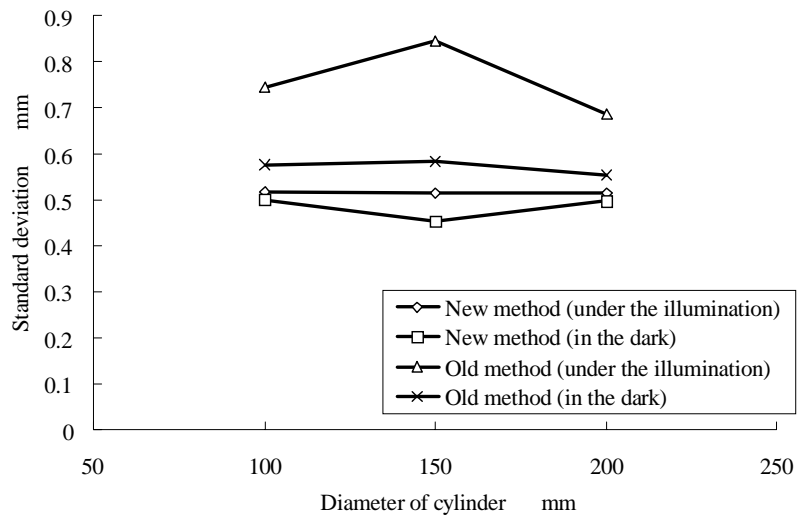
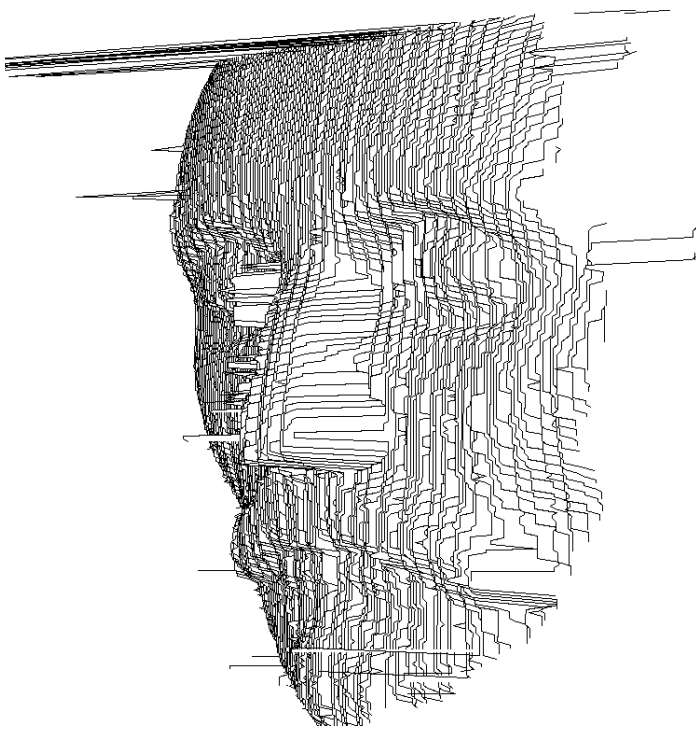


Fig. 8 Standard deviations of cylinders by new and old methods



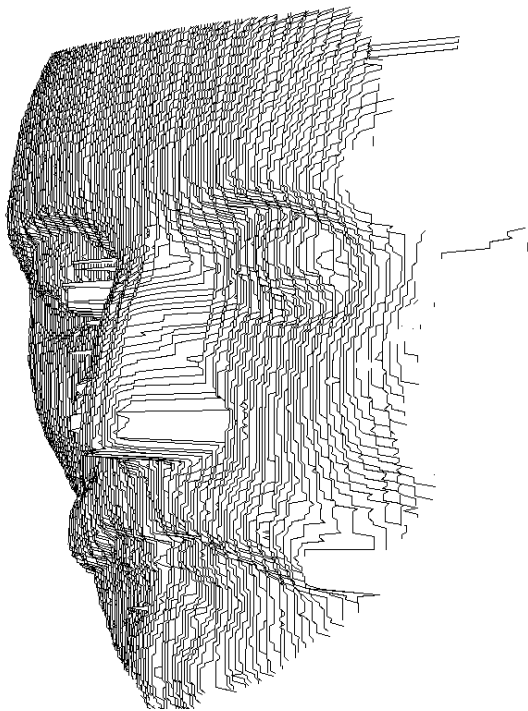
Fig. 9 Plaster figure with colors (face: blue, right eye: red, left eye: yellow, mouth: green)



(a) Measurement result by old method



(a) Measurement result by old method



(b) Measurement result by new method

Fig. 10 Measurement result of plaster figure (in the dark)



(b) Measurement result by new method

Fig. 11 Measurement result of plaster figure (under the illumination)

次に、通常照明下における XZ 断面での Z 座標値の標準偏差は 0.46 mm、YZ 断面での Z 座標値の標準偏差は 0.32 mm であり、暗室内に比較し若干の精度低下が見られる。最大誤差 $z_{\max} - z_{\min}$ の値も 2.39 mm と、暗室内の測定結果よりも大きい値となっている。この原因は暗室内と比較し、若干の符号化誤りが起こっているためであるが、通常照明下においても、ほぼ理論通りの測定が行えることが確認された。

4.2 円柱の測定

形状測定の際の有効性の確認のため、本報の空間符号化法と前報の空間符号化法により、直径の異なる 3 種の白色円柱の測定を、暗室内及び、通常照明下において行った。測定条件は図 5 において、 $h_1 = 400 \text{ mm}$ 、 $\phi = 20^\circ$ 、 $h_2 = 550 \text{ mm}$ 、 $\theta = 15^\circ$ であり、この時の測定範囲は Y 方向で 170 mm、X 方向で 145 mm である。

図 7(a) は直径 150 mm の円柱を暗室内において、本報の空間符号化法によって測定した結果であり、図 7(b) は通常照明下において測定した結果である。この時の円柱形状からの標準偏差は、暗室内で 0.45 mm、通常照明下で 0.52 mm であった。

また、直径 100 mm、200 mm の円柱も同様に測定し、XZ 断面の円柱形状からの標準偏差を計算した結果を図 8 のグラフに示す。前報の手法による測定では、通常照明下の結果は暗室内での結果と比較し、約 0.1 mm 標準偏差が悪くなっているが、本報の手法による測定では、通常照明下、暗室内共にほぼ同様の結果を得られている。これにより通常照明下での形状測定においても良い結果が得られることが確認された。

これらの測定結果から、本報の手法による形状測定は、前報の手法と比較し、測定精度が優れていることが確認された。特に通常照明下での測定において本報の手法は、安定した測定結果が得られ、有効であることが確認された。

4.3 着色した石膏像の測定

色のついた対象物に対して有効であることを確認するために、測定対象に図 9 のように色を塗布した石膏像（全体を青色、目および口を赤色、黄色、緑色とした）を用い、暗室内および、通常照明下において、本報の空間符号化法と前報の空間符号化法により測定を行った。測定条件は図 5 において、 $h_1 = 500 \text{ mm}$ 、 $\phi = 20^\circ$ 、 $h_2 = 600 \text{ mm}$ 、 $\theta = 15^\circ$ であり、この時の測定範囲は Y 方向で 200 mm、X 方向で 160 mm である。

図 10(a) は暗室内における前報の空間符号化による測定結果、図 10(b) は本報の手法による結果である。前報の手法による結果では、左上の額部分に明らかに符号化誤りとわかる点が見られているが、本報の手法による結果では、それらの点がな

いことがわかる。これは、2.4 項で示した方法により測定不能点を取り除くことに成功しているためである。

次に、図 11 に通常照明下において同様の測定を行った結果を示す。図 11(a) は前報の手法による測定結果、図 11(b) は本報の手法による測定結果である。通常照明下において色のついた対象物を測定しているため、測定の安定性は図 10 よりも劣るが、このように測定が可能であることが確認された。

5. 結 言

本論文で提案した空間符号化法により、画像計測の最大の問題点である、外乱光や対象物表面の色や性状の相違などの影響による測定信頼性の低下を減少させることに成功した。

測定実験から得られた結論は以下の通りである。

- (1) 測定範囲が 160 mm × 130 mm 程度であれば、測定点の Z 座標値の標準偏差は 0.3 ~ 0.4 mm と前報通りの高精度な測定が可能である。
- (2) 白色の対象物ならば通常照明下の測定においても、暗室内とほぼ同精度の測定が可能である。
- (3) 円柱の測定によって曲面形状の測定ができることを確認した。
- (4) 有色の測定物に対する測定において、測定不能点の安定した検出が可能であるため、符号化誤りの少ない測定が可能である。

参 考 文 献

- 1) 井口征士, 佐藤宏介: 3次元画像計測, 昭晃堂, (1990)。
- 2) 例えば, 小関 修, 中野倫明, 山本 新: 光切断法を用いた実時間距離検出装置, 信学論, **J68-D**, 5, (1985) 1141。
- 3) 佐藤宏介, 井口征士: 液晶レンジファインダ - 液晶シャッタによる高速距離システム -, 信学論, **J71-D**, 7, (1988) 1249。
- 4) 小松原良平, 片瀬和伸, 吉澤 徹: 縞走査を導入した格子パターン投影法 (第 2 報) - 正弦格子の利用 -, 精密工学会誌, **58**, 7, (1992) 1173。
- 5) 田島譲二, 岩川正人: Rainbow Range Finder による距離画像取得, 信学論, **J73-D**, 3, (1990) 374。
- 6) M. Ito and A. Ishii: A Three-Level Checkerboard Pattern (TCP) Projection Method for Curved Surface Measurement, Pattern Recognit., **28**, 1, (1995) 27。
- 7) G. Sansoni et al.: A Novel, Adaptive System for 3-D Optical Profilometry Using a Liquid Crystal Light Projector, IEEE Trans. Instrum. Meas., **43**, 4, (1994) 558。
- 8) 大澤尊光, 古谷涼秋, 川上和彦, 高増 潔, 大園成夫, 川上哲生: 多値パターン投影による 3次元形状測定, 精密工学会誌, **61**, 8, (1995) 1101。