

簡易型非接触三次元スキャン技術に関する研究（第 2 報）

生産技術部

中野太郎 田中徹 福島章吾

昨年度は、画像処理技術を応用した校正作業の自動化について検討し、校正儀上に配置されたマーカの位置や配列状態を高い精度で安定的に推定する手法を構築した。本年度は、マーカを検出することによって得られた対応点データを、計測装置を校正するための基準値として利用するプログラムの開発に取り組んだ。空間コード化法を適用した三次元復元アルゴリズムと動画処理機能を実装した簡易的な実験装置によって、自由曲面形状を有する測定対象の立体形状を三次元座標データとして取得できることを確認した。

1. はじめに

近年、消費財・産業財を含むあらゆる分野の製造業は、経済のグローバル化や急成長するアジア諸国との激しい国際競争に直面しており、製品の多様化や短サイクル化への対応が急務となっている。このような情勢を受け、県内企業の設計製造部門においても、業務効率の向上やコスト削減、設計技術の高度化に寄与するものとして、CAD・CAMを活用したデジタル設計が広く普及してきている。

一方、生産現場における最終品の検査工程は、ノギスや自製テンプレートをを用いた形状確認、または目視による外観検査が依然として主流となっている。これらの検査方法は、判断基準に個人差があるため再現性に乏しく、熟練した検査員を育成することが難しいという問題がある。加えて、デジタル設計の普及により、自由曲面で構成される繊細で複雑な製品形状の割合が増え、ノギスなどの汎用的な点間距離測定器のみでは対応が困難な案件が増加しており、画像処理技術を応用した効率的で再現性の高い定量的な計測技術に対するニーズが高まっている。

本研究では、検査工程を含む製造プロセス全体の一貫したデジタル化を支援するために、生産現場に導入しやすい簡易型非接触三次元スキャン装置を開発する。本年度は、産業用カメラと民生品のプロジェクタを組み合わせ、動画処理機能を有する簡単な実験装置を試作した。また、空間コード化法による校正原理と三次元復元アルゴリズムを実装したプログラムの開発に取り組み、測定対象の立体形状を三次元データ化する非接触計測技術の検討を行った。

2. 空間コード化法

2.1 空間コード化法による校正

測定対象の撮影画像から三次元形状を復元するた

めには、三次元座標系と画像座標系の射影関係を厳密に対応づける必要がある。この射影関係は、計測に使用する各デバイスの固有特性や、その相対的な位置関係から決定されるもので、このような射影関係に関わるパラメータを推定するプロセスがキャリブレーション（以下、校正とする）である。

撮影用カメラと投影用プロジェクタから構成される計測装置を校正する場合、校正儀をカメラで撮影し、測定対象の三次元座標と撮影画像における二次元座標を対応づけることによって、カメラと校正儀の射影関係を推定することができる。しかし、プロジェクタには撮影機能が無く、投影領域の状態を画像データとして取得できないため、カメラとは異なる校正方法が必要となる。

2.2 空間コード化の原理

2.2.1 投影領域のコード化

カメラとプロジェクタの対応関係を解析する手法として空間コード化法¹⁾²⁾がある。空間コード化法では、プロジェクタの投影像をカメラの撮影画像を通して間接的に解析することによって、カメラとプロジェクタの射影関係を推定する。

図 1 に空間コード化法の原理を示す。まず、縞パターンをプロジェクタから測定対象に向けて投影する。次に、縞のパターンの幅を 1/2 ずつ細分化しながら、投影状態をカメラで順次撮影し、撮像の明るい部分に「1」、暗い部分に「0」という符号を与える。合計 n 枚の 2 値化された撮影画像が得られるとき、プロジェクタ投影範囲は 2^n の領域に分割され、各領域毎に付与された n ビット長の 2 進数を、領域を識別するための空間コードとして利用することができる。

図 1 の例では、3 枚の投影パターン（3 ビット）を用いることで、左から順に、0(000)、1(001)、…、7(111)と横方向に 8 分割した領域を一意に識別している。

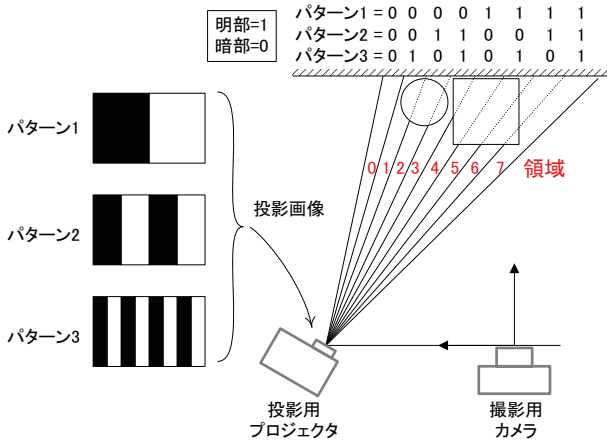


図 1 空間コード化法 (2進コード投影パターン)

2.2.2 グレイコード

空間コード化法を実施する際、投影画像の物理的な位置ずれや撮影画像の2値化における閾値の影響などによって、得られる空間コードに誤差が生じることがある。この誤差による影響を最小限に抑えるために、グレイコードと呼ばれる投影パターンを利用する。

単純な2進コードで明暗化された投影パターンを用いた場合、計測誤差が空間の識別能力を著しく悪化させる可能性がある。例えば図1において、領域4(100)の最上位ビットを誤って0と取得したとすると、領域4(100)と認識されるはずの空間が、大きく離れた領域0(000)と誤認されることになる。

一方、グレイコードは隣接するコード値が常に1ビットしか変化しないという特性があるため、空間コードの「1ビットの誤差」を、空間上の識別能力として「隣接する領域の範囲内」に収めることができる。

n ビットのグレイコードを $g_i (i = 0, \dots, n-1)$, 2進コードを $b_i (i = 0, \dots, n-1)$ とすると、

$$\begin{cases} g_0 = b_0 & (\text{最上位ビット}) \\ g_{i+1} = b_i \oplus b_{i+1} & (\oplus \text{は排他的理論和}) \end{cases} \quad (1)$$

という関係があり、グレイコードによって作られた投影パターンは図2(a)のようになる。

2.2.3 相補パターン比較による画像の2値化

領域に空間コードを付与するためには、カメラで撮影した画像の明部と暗部を明確に判別しなければならないが、環境光の影響や測定物表面の模様・質感による反射率の違いなどにより、適応性のある判断基準を定義することが困難な場合が多い。そこで、グ

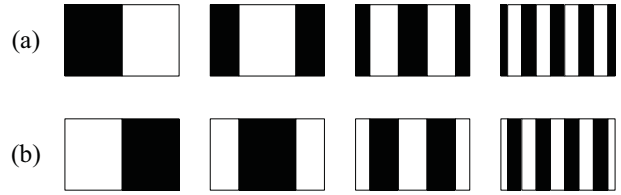


図 2 グレイコードパターン

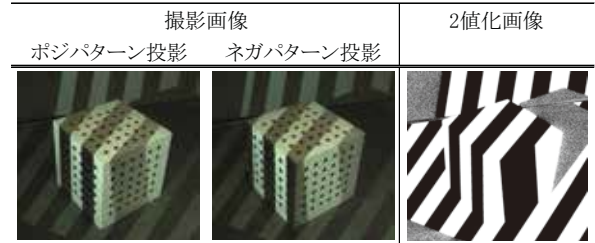


図 3 相補パターン法による2値化

レイコードのポジパターン (図2(a)) と、その明暗を反転させたネガパターン (図2(b)) を測定物に投影し、各々の投影状態をカメラで撮影した画像データの輝度を比較することで明暗を判定する、相補パターン投影法と呼ばれる2値化処理を用いることにする。

ネガ・ポジ撮影画像の輝度差の正負により2値化した例を図3に示す。相補パターン投影法は、1つの投影パターンにつき2枚の画像が必要なため計測回数が増えるが、測定対象の表面特性や照明などの影響を効果的に排除できるロバストな2値化処理として有効な手段である。

3. 非接触三次元計測

3.1 カメラモデル

空間コード化法により数値化した情報を校正の基準値として利用し、撮影画像から三次元座標データを復元するカメラモデルについて説明する。

図4に示すように、画像座標系における画素値を (u, v) , 測定点の三次元座標値を (X, Y, Z) とするとき、中心射影における射影方程式は拡張ベクトル $\tilde{\mathbf{m}}$, $\tilde{\mathbf{M}}$ を用いて次式のように表現される。

$$s\tilde{\mathbf{m}} = \mathbf{A}[\mathbf{R}, t]\tilde{\mathbf{M}} = \mathbf{P}\tilde{\mathbf{M}} \quad (2)$$

$$\tilde{\mathbf{m}} = [u, v, 1]^T, \tilde{\mathbf{M}} = [X, Y, Z, 1]^T$$

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} & P_{14} \\ P_{21} & P_{22} & P_{23} & P_{24} \\ P_{31} & P_{32} & P_{33} & P_{34} \end{bmatrix}$$

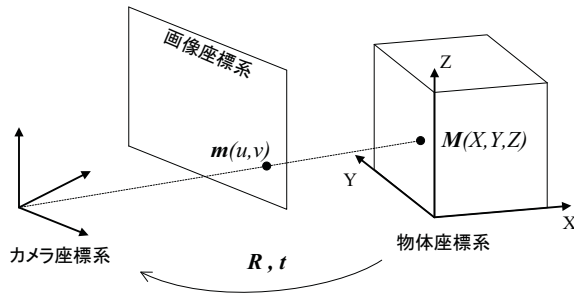


図 4 カメラモデル

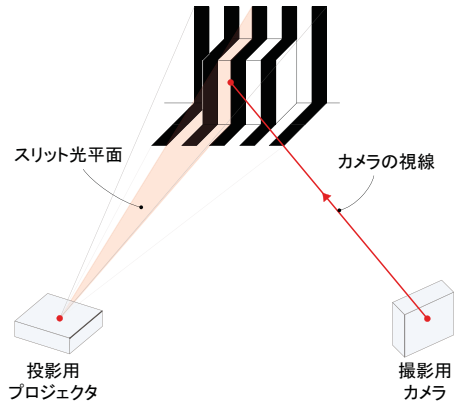


図 5 視線とスリット光平面

ここで、 A はカメラの内部行列、 R, t はそれぞれ回転、並進ベクトルであり、 s はスカラーとする。このとき、 P を射影行列といい、スケールが任意なので、11 の自由度がある³⁾⁴⁾。

3.2 三次元座標の復元

空間コード化法による計測では、撮影用カメラと投影用プロジェクタにおいてそれぞれ座標系が存在することになる。いま、撮影用カメラの座標系における画素値を (u_c, v_c) 、計測点の三次元座標を (X, Y, Z) とすると、計測点と投影座標の関係は式 (2) より以下のように定義できる。

$$s_c \tilde{m}_c = P_c \tilde{M} \quad (3)$$

$$\tilde{m}_c = [u_c, v_c, 1]^T, \tilde{M} = [X, Y, Z, 1]^T$$

$$P_c = \begin{bmatrix} P_{c11} & P_{c12} & P_{c13} & P_{c14} \\ P_{c21} & P_{c22} & P_{c23} & P_{c24} \\ P_{c31} & P_{c32} & P_{c33} & P_{c34} \end{bmatrix}$$

同様に、投影用プロジェクタにおいても射影方程式が成立するが、今回の例のように片方の軸 (x 軸) のコード値しか存在しない場合、得られた空間コード (u_p) を用いて以下のように記述することができる。

$$s_p \tilde{m}_p = P_p \tilde{M} \quad (4)$$

$$\tilde{m}_p = [u_p, 1]^T, \tilde{M} = [X, Y, Z, 1]^T$$

$$P_p = \begin{bmatrix} P_{p11} & P_{p12} & P_{p13} & P_{p14} \\ P_{p21} & P_{p22} & P_{p23} & P_{p24} \end{bmatrix}$$

このとき、式 (3) と式 (4) は、図 5 に示すようにそれぞれカメラの視線やプロジェクタからのスリット光平面を表現しており、その交点である測定点 (X, Y, Z) は、式 (3) と式 (4) から得られる連立方程式

$$\begin{cases} P_{c34}u_c - P_{c14} = (P_{c11} - P_{c31}u_c)X \\ \quad + (P_{c12} - P_{c32}u_c)Y + (P_{c13} - P_{c33}u_c)Z \\ P_{c34}v_c - P_{c24} = (P_{c21} - P_{c31}v_c)X \\ \quad + (P_{c22} - P_{c32}v_c)Y + (P_{c23} - P_{c33}v_c)Z \\ P_{p24}u_p - P_{p14} = (P_{p11} - P_{p21}u_p)X \\ \quad + (P_{p12} - P_{p22}u_p)Y + (P_{p13} - P_{p23}u_p)Z \end{cases} \quad (5)$$

の解として導出できる。

式 (5) をベクトルと行列を用いて表記すると

$$F = QV \quad (6)$$

$$F = \begin{bmatrix} P_{c34}u_c - P_{c14} \\ P_{c34}v_c - P_{c24} \\ P_{p24}u_p - P_{p14} \end{bmatrix}, V = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}$$

$$Q = \begin{bmatrix} P_{c11} - P_{c31}u_c & P_{c12} - P_{c32}u_c & P_{c13} - P_{c33}u_c \\ P_{c21} - P_{c31}v_c & P_{c22} - P_{c32}v_c & P_{c23} - P_{c33}v_c \\ P_{p11} - P_{p21}u_p & P_{p12} - P_{p22}u_p & P_{p13} - P_{p23}u_p \end{bmatrix}$$

となり、 Q の逆行列が存在するならば、次式から計測点の三次元座標 (X, Y, Z) が得られる。

$$V = Q^{-1}F \quad (7)$$

3.3 校正方法

前述した三次元座標の復元を行うためには、事前に射影行列 P を求めておく必要がある。ここでは、 n 個の測定点の三次元座標 (X_i, Y_i, Z_i) と、その測定点に対応するカメラ画素 (u_{ci}, v_{ci}) および空間コード (u_{pi}) が既知であるときに、射影行列 P を推定する校正方法について説明する。

射影行列はスケールが任意なので、計算を簡略化するために $P_{c34} = 1$ と置いた場合¹⁾、測定点 (X_i, Y_i, Z_i) と (u_{ci}, v_{ci}) の対応関係は式 (3) から

$$\begin{cases} P_{c11}X_i + P_{c12}Y_i + P_{c13}Z_i + P_{c14} \\ \quad - P_{c31}X_i u_{ci} - P_{c32}Y_i u_{ci} - P_{c33}Z_i u_{ci} = u_{ci} \\ P_{c21}X_i + P_{c22}Y_i + P_{c23}Z_i + P_{c24} \\ \quad - P_{c31}X_i v_{ci} - P_{c32}Y_i v_{ci} - P_{c33}Z_i v_{ci} = v_{ci} \end{cases} \quad (8)$$

となる。ここで、 n 個の既知座標を式 (8) に代入し、

連立させることで次式を得る．

$$AP_c = R_c \quad (9)$$

$$P_c = \begin{bmatrix} P_{c11} \\ P_{c12} \\ \vdots \\ P_{c32} \\ P_{c33} \end{bmatrix} \quad R_c = \begin{bmatrix} u_{c1} \\ v_{c1} \\ \vdots \\ u_{cn} \\ v_{cn} \end{bmatrix}$$

$$A = \begin{bmatrix} X_1 & Y_1 & Z_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & -X_1u_{c1} & -Y_1u_{c1} & -Z_1u_{c1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 & X_1 & Y_1 & Z_1 & 1 & -X_1v_{c1} & -Y_1v_{c1} & -Z_1v_{c1} \\ & & & & & & & \vdots & & & \\ X_n & Y_n & Z_n & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & -X_nu_{cn} & -Y_nv_{cn} & -Z_nv_{cn} \\ 0 & 0 & 0 & 1 & X_n & Y_n & Z_n & 1 & -X_nv_{cn} & -Y_nv_{cn} & -Z_nv_{cn} \end{bmatrix}$$

このとき， P_c の推定値を \hat{P}_c とすると，推定誤差の平方和 S_e は次式で与えられる．

$$S_e = (R_c - A\hat{P}_c)^T (R_c - A\hat{P}_c) \quad (10)$$

さらに， S_e の \hat{P}_c に関する停留条件から

$$\frac{\partial S_e}{\partial \hat{P}_c} = -2A^T (R_c - A\hat{P}_c) = 0$$

$$\hat{P}_c = (A^T A)^{-1} A^T R_c \quad (11)$$

が導かれ，最小二乗法により撮影用カメラの射影行列 P_c を推定することができる．

三次元座標 (X_i, Y_i, Z_i) に対応する空間コード (u_{pi}) が 1 次元のみの場合， n 個の既知座標と空間コードから得られる連立方程式は式 (12) となるが，カメラの校正と同様に，最小二乗法を用いて撮影用プロジェクタの射影行列 P_p を推定することができる．

$$BP_p = R_p \quad (12)$$

$$P_p = \begin{bmatrix} P_{p11} \\ \vdots \\ P_{p23} \end{bmatrix} \quad R_p = \begin{bmatrix} u_{p1} \\ \vdots \\ u_{pn} \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} X_1 & Y_1 & Z_1 & 1 & -X_1u_{p1} & -Y_1u_{p1} & -Z_1u_{p1} \\ & & & & & & \vdots \\ X_n & Y_n & Z_n & 1 & -X_nu_{pn} & -Y_nu_{pn} & -Z_nu_{pn} \end{bmatrix}$$

4. 計測実験

4.1 実験装置

空間コード化法を実装した三次元計測プログラムを作成し，撮影画像から三次元座標値を復元する確認実験を行った．計測に使用した産業用カメラ，カメラ用レンズおよびプロジェクタを図 6 に示す．

4.2 動画像処理

撮影状態をリアルタイムに確認し，カメラの位置や撮影パラメータなどを調整しながら画像データを取得するためには，動画像を処理できる計測システムであることが望ましい．

動画像処理プログラムを開発する比較的容易な手

段として，OpenCV⁵⁾ 等の画像認識ライブラリを用いることが考えられるが，撮影に使用するカメラの種類によっては，取得画像の解像度設定やフレームレートの変更などに対応できない場合がある．そこで，Microsoft 社が提供する DirectShow⁶⁾ を利用した計測システムを開発した．DirectShow は Windows 用のマルチメディア拡張 API 群で，カメラデバイスの色相，明度，彩度，ガンマといったさまざまな撮影パラメータの操作に対応しており，より高速で柔軟な動画像処理機能を実装することができる．

開発した計測システムの実行画面を図 7 に示す．動画処理に加え，校正や三次元復元処理に伴う行列演算処理を高速に実施するために，Windows7(64bit) 上で C++ 言語を用いて開発した．また，GUI 開発フレームワークとして The Qt Company 社 Qt4.8.6(64bit)⁷⁾ を利用することで，ソフトウェアの操作性を向上させた．

4.3 校正手順

実際に行った校正作業の手順を図 8 に示す．

まず，幾何学的な特徴が既知な校正儀をカメラで撮影し，検知したマーカの位置情報から対応点データを取得する．本実験では，縦横 20mm 間隔に並んだ円形マーカ（6 行 6 列）を，平面ごとに色分け（赤，青，緑）して配置した立方体（図 7 参照）を校正儀と

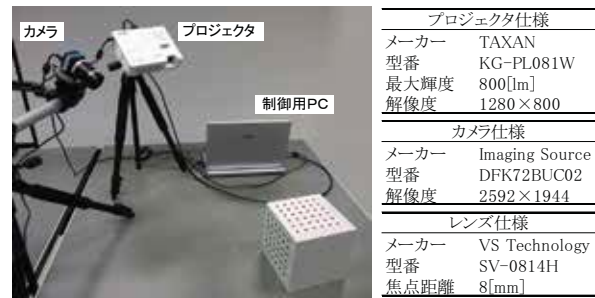


図 6 実験装置

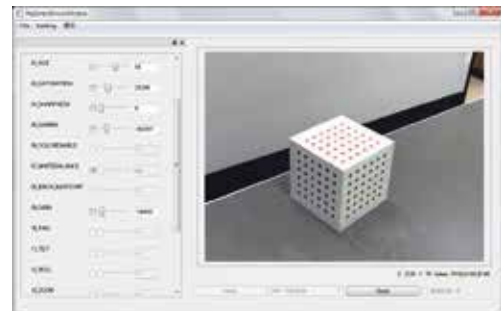


図 7 計測システムの実行画面

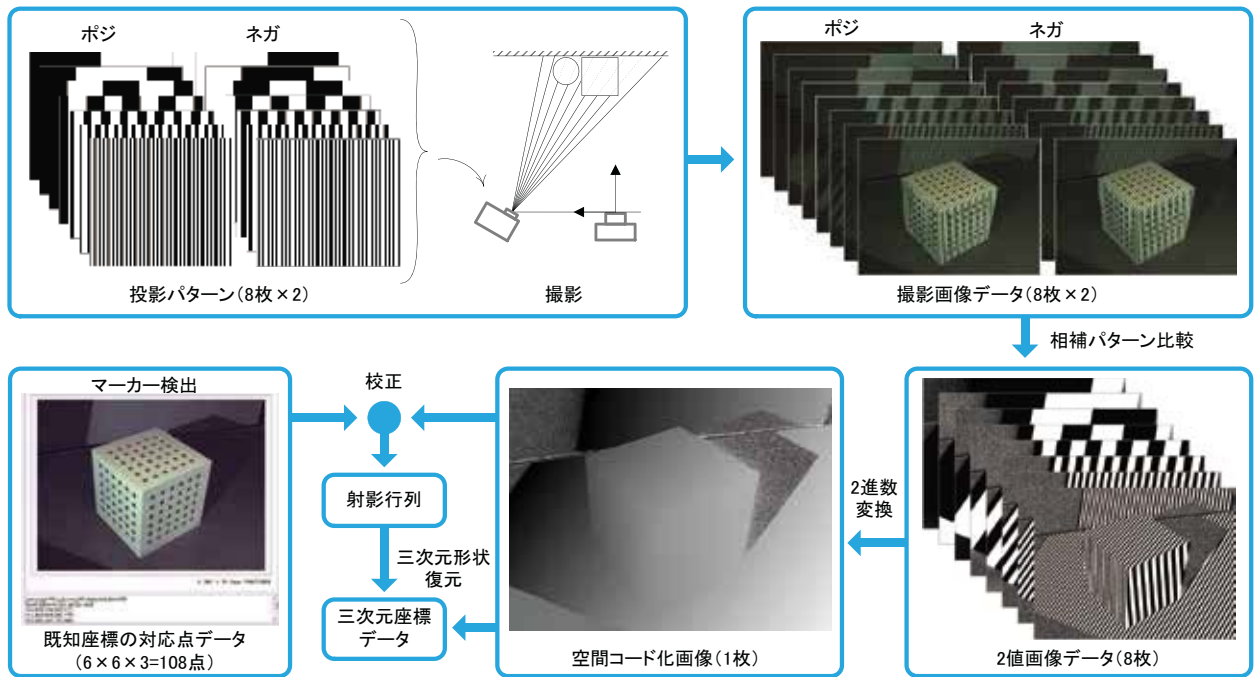


図 8 校正作業および非接触三次元計測の流れ

して利用した。この校正儀を通常の照明環境下で撮影し、昨年度開発した画像処理システム⁸⁾によってマーカーの重心位置を検出することで、1枚の撮影画像から $6 \times 6 \times 3 = 108$ 個の既知座標に関する対応点データを取得した。

次に、校正儀に向けて投影したグレイコードパターンの撮影画像から空間コードを求める。ここでは、8ビットのグレイコードパターンを用意し、パターン投影範囲を $2^8 = 256$ の領域に分割した。さらに、 $8 \times 2 = 16$ 枚のネガ・ポジ投影画像を解析し、得られた空間コードを輝度値として画像データ化することで、プロジェクタの射影関係を反映した空間コード化画像1枚を取得した。

最後に、既知座標の対応点データと空間コードから射影行列を推定する演算プログラムを実行し、計測装置の校正作業が完了する。

4.4 非接触三次元計測

校正により射影行列が既知となることで、画素座標とその画素に対応する空間コードが分かれば三次元座標を復元できる。

校正済みの実験装置を用いて、自由曲面形状を有する測定対象を計測した様子を図9に示す。校正作業における空間コード化手順と同様に、16枚の撮影画像から8ビットのコード化画像1枚を作成した。

図10に示す三次元形状データは、作成した空間コード化画像を参照し、スリット光平面の照射位置に相

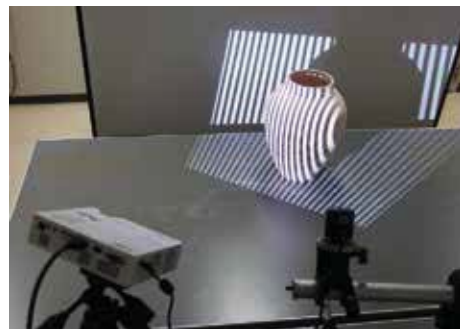


図 9 自由曲面形状の計測

当する立体形状を、三次元座標データとして復元したものである。

5. おわりに

産業用カメラとプロジェクタで構成された簡単な実験装置に空間コード化法を適用した計測機能を実装することで、測定対象の立体形状を三次元データとして復元できることを確認した。ただし、現時点ではマニュアル操作で画像を取得しているため、撮影の作業効率が悪いという問題がある。また、空間コード化の分解能が十分ではないため、取得できる計測点の密度が低いという課題が残る。

今後は、空間分解能の高精細化や計測作業の自動化に取り組み、より高密度な計測データを効率的に取得する非接触計測技術の検討を行う予定である。

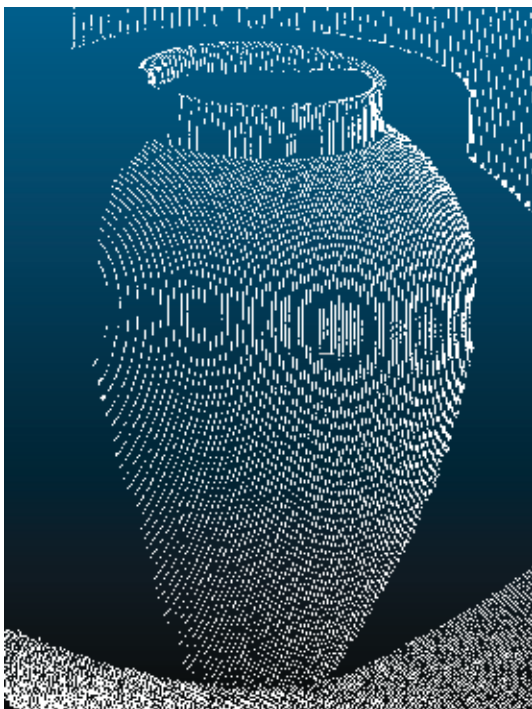


図 10 復元した三次元形状データ

参考文献

- 1) 井口征士 他, 三次元画像計測, 株式会社昭晃堂, 1990, p.79-99.
- 2) 見市伸裕, 和田俊和, 松山隆司 他, プロジェクタ・カメラシステムのキャリブレーションに関する研究, 情報処理学会研究報告コンピュータビジョンとイメージメディア, 2002, p.1-8.
- 3) 徐剛 他, 3次元ビジョン, 共立出版, 1998, p.7-14.
- 4) 佐藤淳, コンピュータビジョンー視覚の幾何学ー, 株式会社コロナ社, 1999, p.10-41.
- 5) OpenCV, <http://opencv.org/>
- 6) DirectShow, <https://msdn.microsoft.com/ja-jp/library/cc353899.aspx>
- 7) The Qt Company, <http://qt-project.org/>
- 8) 中野太郎, 田中徹, 簡易型非接触三次元スキャン技術に関する研究 (第 1 報), 平成 26 年度佐賀県工業技術センター研究報告書, 2014, No.23, p.51-56.