

民生機器を利用した三次元計測システムの開発

依田康宏^{*1}、山本昌治^{*1}

Development of the 3D Digitizing System Using Consumer Electronic Appliances

Yasuhiro YODA and Masaharu YAMAMOTO

Research and Development Division, AITEC^{*1}

民生機器であるデジカメとプロジェクタを用いて三次元計測システムを開発した。計測方式は、プロジェクタから9ビットグレイコード相補パターンを投影したアクティブステレオ方式である。また、計測範囲はプロジェクタの投影範囲により調整でき、最小で横250mmである。開発したシステムにより、平面板を計測したところ、平面度は $\pm 0.2\text{mm}$ であった。更に、20.00mmの段差幅形状を計測したところ、平均距離 $\pm 20.2\text{mm}$ であった。

1. はじめに

製造プロセスの中で実形状（三次元形状）のデジタルデータを計測する技術は、品質保証のための形状検査等で必要な技術である。三次元計測システムとしては、CMM等の接触式のものと、CCDカメラ等を用いた非接触式のものがある。

接触式のもの精度は良いが一度に測定できる測定点数は限られる。一方、非接触式のもの一度に多数の点を測定でき、接触式と比較すると精度は低い、限られた用途では工学的にも利用できる精度に近づいている。

しかしながら、三次元計測システムは一般にソフトウェア、ハードウェア一体の計測器として提供されることが多く、非接触式のもの接触式のものと比較すれば安価ではあるものの、中小企業等にとってはなお割高感のある装置となっている。

本研究は、複雑な三次元形状を迅速に工学的にも利用可能な精度で測定すること、かつ民生機器を利用した汎用的で安価な三次元計測システムを実現することを目的とする。

2. 実験方法

2.1 三次元計測システムの原理の概要

図1は開発した三次元計測システムの原理の概要を示し、プロジェクタからは縞パターンを投影する。カメラとプロジェクタは、予めキャリブレーションすることにより、位置、姿勢、画角等を含むパラメータが分かっており、プロジェクタから投影された1本の縞による平面と、カメラの各画素方向への直線との交点から、三角測量の原

理により測定物体表面での三次元座標を算出する。

プロジェクタによる縞パターンの投影

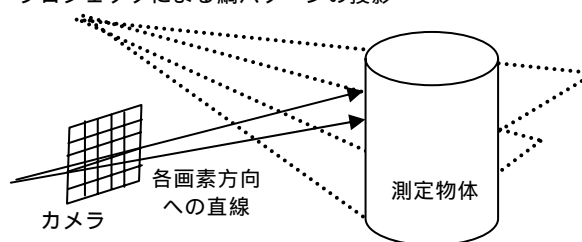


図1 三次元計測の原理

2.2 三次元計測システムの構成

図2は開発した三次元計測システムを示し、民生機器であるデジカメとプロジェクタがそれぞれUSBケーブル、RGBケーブルを介してパソコンに接続されている。パソコンは、デジカメの撮影と、プロジェクタの投影パターンを制御する。

デジカメは最大解像度 2048×1536 画素のものを使用し、メーカー付属ソフトによりパソコンからリモート撮影が可能である。このため、デジカメ本体のシャッターを直接押下する必要はなく、測定中にデジカメの位置が変わることはない。測定中はフォーカス、アイリス、ズーム等の条件は一定としている。

使用したプロジェクタは解像度 1024×768 画素であり、最小の投影範囲で横250mmである。このプロジェクタから投影される縞パターンは、縞の幅が4画素より細かいため、奥行方向に焦点が合いにくくなるため、縞の幅が4画素以上の投影パターンとなるようにした。

また、キャリブレーション用の基準物体として、図3

*1 基盤技術部

に示すようにアルミの立方体の三平面上に、20mm間隔で円環状の溝を切削加工し、その円環を黒く色付けし基準点としたものを用意した。

データの測定及び三次元座標を計算するプログラムの開発はJava言語により行った(図4)。また、デジカメ付属のソフトも、開発したプログラムを介して操作している。

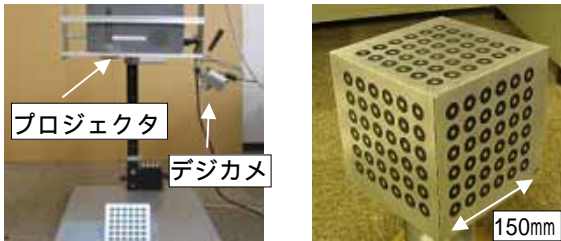


図2 三次元計測システム 図3 基準物体

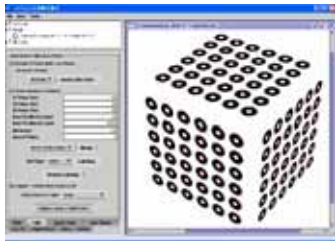


図4 三次元計測システムのソフトウェア操作画面

2.3 投影パターン

プロジェクタの投影パターンとしては、9ビットグレイコード相補パターンを用いた。グレイコードは、縞の境界で隣のパターンと誤認識しても、値の最大誤差が1なので、ノイズに強いことが知られている¹⁾。

図5は3ビットグレイコードの投影パターンの例であり、黒に投影された部分を“0”、白に投影された部分を“1”に割り当ててビット的に合計すると、3回の投影で $2^3 (=8)$ 個の平面が識別可能である。9ビットの場合、512本の平面の分解能となる。グレイコードを空間的に順番に並ぶように変換したものを空間コードと呼ぶ。

更に、ポジのパターン光と、それを明暗反転したネガのパターン光を投影する相補パターンは、ポジパターンとネガパターンを比較することにより、背景の照明や物体の反射特性の変動等に影響されにくい、安定した空間コードを得ることができる。相補パターンは画像データの数が2倍となり、9ビットの場合は18枚必要である。

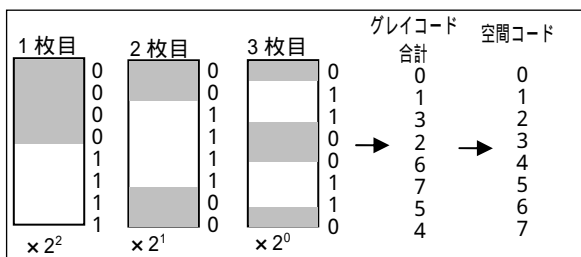


図5 グレイコード(3ビット)の説明

2.4 三次元計測システムの測定手順

測定としては図6に示すデータを測定する。最初にキャリブレーション用に基準物体を測定する。データとしては、パターン光を投影しない通常画像1枚、パターン光を投影した画像18枚の合計19枚である。一度キャリブレーションした後は、測定物体を置いて同様に合計19枚の画像を記録する。

なお、通常画像1枚、パターン光を投影して画像を18枚順次記録する手順は自動化されており、画面上からボタンを1回押せば実行できる。

	通常画像(1枚)	パターン投影(18枚)	
(基準物体) キャリブレーション			
(測定物体) 測定			

図6 測定データ

2.5 三次元計測システムの計算手順

図7は三次元座標計算におけるデータ、処理の流れを示している。カメラキャリブレーションでは、基準物体の通常画像からカメラの位置関係を表すカメラパラメータを計算する。プロジェクタキャリブレーションでは、パターンを投影した基準物体の画像から、プロジェクタの位置関係を表すプロジェクタパラメータを計算する。

最後に、カメラパラメータ、プロジェクタパラメータを利用して、パターンを投影した測定物体の画像から、測定物体の三次元座標を算出する。

なお、図7におけるデータは全てファイルとして生成

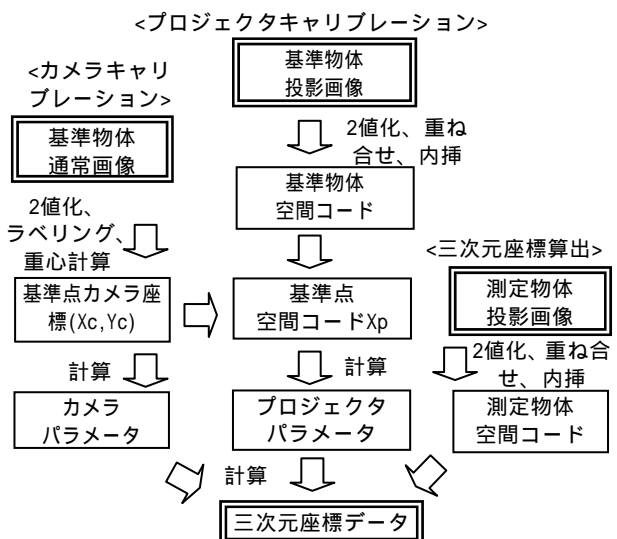


図7 三次元座標計算におけるデータ、処理の流れ

する。カメラパラメータ、プロジェクタパラメータは、XML形式のファイルであり、もし他のキャリブレーションの方法により算出したパラメータの値を利用する場合でもすぐに変更でき、汎用的なつくりとしている。

2.6 カメラキャリブレーション

次に、キャリブレーションについて、計算方法を詳細に説明する。カメラモデルとして、ピンホールカメラモデルを用いると、物体座標 (X, Y, Z) とそれに対応するカメラ座標 (X_c, Y_c) は次式で表される¹⁾。ここで H_c は媒介変数である。

$$\begin{pmatrix} H_c X_c \\ H_c Y_c \\ H_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & c_{14} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} & c_{24} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} & c_{34} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

基準物体の i 番目の基準点の物体座標 (X_i, Y_i, Z_i) は一定間隔で加工してあるため既知であり、カメラ座標 (X_{c_i}, Y_{c_i}) は基準物体の通常画像から、2値化、ラベリング²⁾を用い、円環マークの重心としてサブピクセル的に求める。

(1)式はスケールが任意なので、 $c_{34}=1$ とにおいて、 $H_c=c_{31}X+c_{32}Y+c_{33}Z+c_{34}$ の関係を代入し、基準点 n 個について行列で整理すると、

$$\begin{pmatrix} X_1 & Y_1 & Z_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -X_1 X_{c1} & -Y_1 X_{c1} & -Z_1 X_{c1} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X_1 & Y_1 & Z_1 & 1 & -X_1 Y_{c1} & -Y_1 Y_{c1} & -Z_1 Y_{c1} \\ & & & & & & & & \dots & & \\ X_n & Y_n & Z_n & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -X_n X_{cn} & -Y_n X_{cn} & -Z_n X_{cn} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X_n & Y_n & Z_n & 1 & -X_n Y_{cn} & -Y_n Y_{cn} & -Z_n Y_{cn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_{c1} \\ Y_{c1} \\ \dots \\ X_{cn} \\ Y_{cn} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_{c1} \\ Y_{c1} \\ \dots \\ X_{cn} \\ Y_{cn} \end{pmatrix} \quad (2)$$

一般に、

$$X = \begin{pmatrix} x_{11} & \dots & x_{1p} \\ \dots & \dots & \dots \\ x_{m1} & \dots & x_{mp} \end{pmatrix}, \text{ 係数 } b = \begin{pmatrix} b_1 \\ \dots \\ b_p \end{pmatrix}, \text{ 実測値 } y = \begin{pmatrix} y_1 \\ \dots \\ y_m \end{pmatrix} \text{ として、}$$

$Xb=y$ の連立1次方程式を b について解くとき、 $m>p$ の場合には、式の数未知数の数よりも多くなるため、 y に対する残差平方和を最小とする最小二乗法で係数 b を求める。そのとき、 X^t を X の転置行列として、

$$b = (X^t X)^{-1} X^t y \quad (3)$$

(最小二乗法で $Xb=y$ の b を求めるとき)

が成立する³⁾。(2)式を $AC=R$ とおくと、(3)式から最小二乗法により、 $C = (A^t A)^{-1} A^t R$ となり、カメラパラメータを表す行列 C が求まる。

2.7 プロジェクタキャリブレーション

(1)式と同様に、物体座標 (X, Y, Z) とそれに対応する空間コード X_p は次式で表される。 H_p は媒介変数である。

$$\begin{pmatrix} H_p X_p \\ H_p \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} & p_{14} \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} & p_{24} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{pmatrix} \quad (4)$$

$p_{24}=1$ として基準点の物体座標 (X_i, Y_i, Z_i) と、その空間コード X_{p_i} の関係から、カメラパラメータの場合と同様に、最小二乗法によりプロジェクタパラメータを算出することができる。

なお、基準点のカメラ座標 (X_{c_i}, Y_{c_i}) はサブピクセル的に求めているので、 X_{p_i} の値も周囲4画素の点の空間コードの値から距離の逆数の重みをかけて求める。

2.8 空間コードの内挿

図8に示すように、プロジェクタにより投影した平面を表す空間コードの値は、整数値で離散的な値であり、同じ縞が投影された領域は同一の値となる。このような場合、算出される三次元座標も不連続な値となり、プロジェクタの最小の縞幅以下の精度とすることはできない。

グレイコードのビット数を大きくすれば、計測精度は向上するが、それにはプロジェクタの解像度を大きくする等の必要がありハード的にも特殊となるため、安価な民生機器の利用ができなくなる。

一般的に、縞幅程度の小さな領域では物体表面は緩やかな形状として、空間コードを内挿して算出すると計測精度の向上に有効である。ここでは内挿の方法として、図8に示すように、空間コードが ± 1 変化する周囲の隣接4点を見つけ、空間コードを双一次曲面⁴⁾上の点とする方法を用いた。

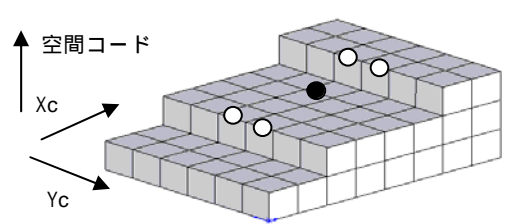


図8 空間コードの内挿

2.9 三次元座標の算出

(1)(4)式において、 $H_c=c_{31}X+c_{32}Y+c_{33}Z+c_{34}$ 、 $H_p=p_{21}X+p_{22}Y+p_{23}Z+p_{24}$ の関係を代入して整理すると、

$$\begin{pmatrix} c_{34} X_c - c_{14} \\ c_{34} Y_c - c_{24} \\ p_{24} X_p - p_{14} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_{11} - c_{31} X_c & c_{12} - c_{32} X_c & c_{13} - c_{33} X_c \\ c_{21} - c_{31} Y_c & c_{22} - c_{32} Y_c & c_{23} - c_{33} Y_c \\ p_{11} - p_{21} X_p & p_{12} - p_{22} X_p & p_{13} - p_{23} X_p \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}$$

上式を $F=QV$ とおけば、 $V=Q^{-1}F$ から三次元座標 (X, Y, Z) が算出される。ここで、 X_p は測定物体のカメラ座標

(Xc, Yc)における空間コードの値であり、全てのカメラ座標について三次元座標を計算することにより、カメラの画素分の三次元座標の点群データが得られる。

3. 実験結果および考察

3.1 計測時間

開発したシステムの計測時間を表1に示す。測定時間は、ほとんどがデジカメからパソコンへ画像を転送する時間である。また、計算時間は大部分の時間が画像から空間コードを作成する時間と、空間コードの内挿処理時間である。

表1 三次元計測システムの計測時間

画像サイズ	測定時間 (画像19枚)	計算時間 (空間コード化 + 内挿処理)
2048 × 1536	約2分45秒	約5分40秒
1600 × 1200	約2分	約1分40秒
1024 × 768	約1分20秒	約45秒
640 × 480	約1分20秒	約25秒

3.2 平面度及び平均段差の測定

開発したシステムの基本精度を確認するため、平板と段差を測定した(図9)。最も精度が良い計測となるように、画像サイズを2048 × 1536、プロジェクタの投影範囲を最小として計測した。

図9(a)に示す右下の矩形の範囲を対象領域として、平面度を評価した。対象領域の点群データから、平面への距離の二乗和を最小にするフィッティング平面を計算し、その平面から各点群への距離を求めたところ、標準偏差は表2に示すとおりとなった。空間コードの内挿処理をすることにより、2倍程度の精度向上となっている。

また、20.00mmの段差幅に加工した形状の物体を計測し、絶対精度を評価した。図9(a)に示す段差の矩形部分が評価対象領域である。段差の下側の領域の点群データからフィッティング平面を計算し、その平面から上側の点群データへの距離を求めたところ、平均距離は表2に示すとおりとなった。

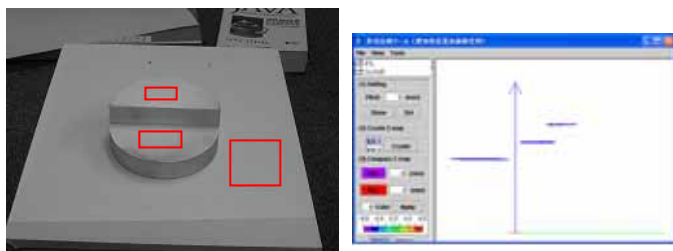


図9 平面度と段差の評価

この結果より、今回開発したシステムの精度は0.5mm程度であることが分かるが、プロジェクタのパターン投影の分解能は、250/512 ~ 0.5(mm)程度であり、空間コードの内挿処理を行うにしても、投影パターンの真の境界をサブピクセル単位で求めていないため、平面度、段差の測定ともに妥当な精度と考えられる。

表2 平面と段差の測定結果

測定対象	内挿なし	内挿あり
平面 (約45 × 63mm、 対象点数約8.5万点)	平面度 =0.5mm	平面度 =0.2mm
20mm 段差 (約31 × 21mm、 対象点数約1.7万点)	段差平均距離 =20.4mm	段差平均距離 =20.2mm

3.3 複雑形状物体の測定

図10は、複雑形状物体の測定としてマウスを測定した例であり、曲面形状も三次元計測できていることが分かる。三次元座標は画像データの画素ごとに算出するため、三次元データに色属性をつけることも容易である。

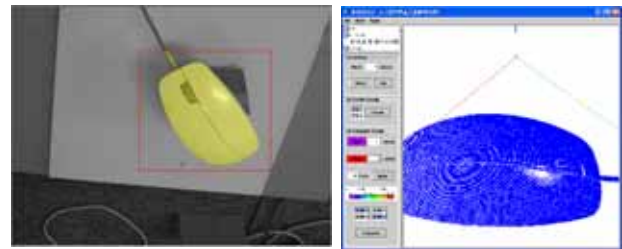


図10 複雑形状の三次元計測例

4. 結び

デジカメとプロジェクタを用いて構成した安価な三次元計測システムを開発した。開発したシステムにより、平板を計測したところ、平面度は = 0.2mm であり、また 20.00mm の段差幅を計測したところ、平均距離 = 20.2mm であった。

今回のシステムでは、一方向のみからの三次元計測であるが、今後は、複数の方向から計測したデータを位置合わせして合成する等、ソフトウェア機能を充実する予定である。

文献

- 1) 井口征士, 佐藤宏介: 三次元画像計測, (1990), 昭晃堂
- 2) 酒井幸市: デジタル画像処理の基礎と応用, (2003), CQ 出版
- 3) 例えば, 吉澤正: 情報処理入門コース統計処理, P122(1992), 岩波書店
- 4) 三浦曜, 望月一正: 実践 NURBS, P171(2001), 工業調査会