

# 全周三次元計測システムの開発

依田康宏<sup>\*1</sup>、山本昌治<sup>\*2</sup>

## Development of the 3D Digitizer to Measure All-Around

Yasuhiro YODA<sup>\*1</sup> and Masaharu YAMAMOTO<sup>\*2</sup>

Research and Development Division, AITEC<sup>\*1\*2</sup>

プロジェクタとカメラを利用した三次元計測システムにおいて、測定対象を回転、移動して複数回測定し、測定データを座標変換して統合することにより、全体形状の三次元計測を試みた。円筒スコヤ（直径：120.69mm）を7方向から全周計測し、この円筒スコヤを基準とみなしたときの測定精度（全測定点の誤差の2乗平均平方根）は0.41mmであった。また、組付け式金型方式の緩衝材設計において、本システムにより包装対象物を三次元計測したデータは入力データとして有効に利用できることを確認した。

### 1. はじめに

三次元 CAD の普及に伴い、製品の三次元形状データを利用して設計することが多くなっている。筆者らも緩衝材設計において、三次元 CAD を利用して緩衝材形状を自動で設計する方法を提案している<sup>1)</sup>。

三次元 CAD 上で緩衝材設計を行うには、製品の三次元形状データをもとに、製品の形状に適した緩衝材を設計することになるが、発注元から三次元形状データ（CAD データ）が提供されない場合もある。その場合には、実物製品をもとに、手作業で製品の三次元形状データを作成するか、三次元デジタイザ等で計測する必要がある。

手作業でデータを作成するのは、作成時間、作成データの精度に問題があるため、短時間で効率的に計測できる三次元デジタイザを利用の方が便利である。ただし、市販の三次元デジタイザは専用の計測機器で一般に高価であり、中小企業が導入するのは困難な場合が多い。

筆者らは、中小企業等で三次元デジタイザが簡易に利用できるように、民生機器であるカメラとプロジェクタを利用した三次元計測システムの開発<sup>2)3)</sup>を行ってきた。これまで開発してきたシステムでは、一方向からの計測のみであるが、一方向から測定するだけでは、測定対象全体の計測データを得ることはできない。

緩衝材設計では、多方向から緩衝材で製品を支持するように設計するため、全体形状データが必要である。そこで、測定対象を周囲から複数回測定して測定データを統合し全体形状データを作成するシステムを開発し、緩衝材設計の製品データ入力部として利用できるか検討した。

### 2. 実験方法

#### 2.1 三次元形状計測装置

これまで開発してきたシステム<sup>2)3)</sup>を利用し、**図1**、**表**に示す構成でカメラとプロジェクタをパソコンに接続し測定を行った。

計測用カメラは、The 1394 Trade Association(電子



**図1** 計測システム外観

**表** 計測システム概要

測定方式	カメラ1台、プロジェクタ1台のアクティブステレオ方式
カメラ	IEEE1394方式デジタルカメラ（1024×768画素）
プロジェクタ	DLP方式（1024×768画素）
プロジェクタ投影パターン	6ビットグレイコード + 位相シフト
カメラ撮影範囲	250～1,000mm（横）
プロジェクタ投影範囲	250～1,000mm（横）
計測時間	約10秒

\*1 基盤技術部（現産業労働部 新産業課） \*2 基盤技術部

機器関連企業の業界団体)で標準化された「IIDC 1394-based Digital Camera Specification version 1.30」規格に準拠したデジタルカメラを用い、カーネギーメロン大学で開発されたカメラドライバ<sup>4)</sup>を用いた。

## 2.2 位相シフト法

本システムの三次元測定方式は、プロジェクタによりパターン投影し、1台のカメラで撮影するアクティブステレオ方式である。投影パターンとして正弦波状に明るさが変化する縞状のパターンを用い、縞位置を走査しながら計測する位相シフト法<sup>5)</sup>を採用した。位相シフト法では、1周期以上離れた位相角を選別できない。そこで、あらかじめ6ビットグレイコードパターンを投影し、空間コード化法<sup>5)</sup>により、撮影画像の各画素が投影パターン全体を64(=2<sup>6</sup>)分割した小領域のどの位置に対応しているか識別しておく。

次に、位相シフト法により、パターン光の位置を精密に計測する。位相シフト用のパターン光の相対輝度(プロジェクタの最大出力輝度を1とした輝度)  $I_0$  は、次式に示す強度分布に設定した。

$$I_0 = a + b \cos \varphi, \quad \varphi = 2\pi(X_p/T) \quad (1)$$

係数  $a$ 、 $b$  は、 $a=0.78$ 、 $b=0.16(\cos \varphi \geq 0$  の場合)、 $0.31(\cos \varphi < 0$  の場合)とした。 $b$  の値を二種類使用しているのは、カメラで検出した輝度値が正弦波状の強度分布を持つように簡易的に調整したためである。 $\varphi$ 、 $X_p$ 、 $T$  は、それぞれ位相角、プロジェクタの横方向画素位置、周期を表している。 $T$  は空間コード化法で識別した小領域の幅と等しく設定した。(1)式で設定したパターン光を白色板に投影し、その白色板をカメラで撮影した画像を図2に示す。撮影画像では、図3に示す正弦波状の輝度分布が得られている。

このパターン光の位相角を90度ずつ移動して4回投影し撮影して得られる各画素の4種類の輝度値  $I_k'$  は、

$$I_k' = a + b \cos(\varphi + k\pi/2) \quad (k=0,1,2,3) \quad (2)$$

となる。得られた  $I_k'(k=0,1,2,3)$  より、投影されたパターンの位相  $\varphi$  は、

$$\varphi = \tan^{-1}[(I_3' - I_1') / (I_0' - I_2')] \quad (3)$$

となる。 $\varphi$  は、 $0 \leq \varphi < 2\pi$  であり、16画素内での位置(相対位相)しか分からないが、グレイコードの値から絶対位相が分かるので、カメラの各画素ではプロジェクタから投影されたパターン光の横方向の位置  $X_p$  が分かる。カメラの各画素で  $X_p$  が分かれば、三次元座標の点群データが得られる<sup>2)</sup>。

## 2.3 位置合わせ方法

全体形状計測のために周囲から複数回計測したデータは、統一した座標系に変換する必要がある。これを位置合わせという。位置合わせをするには、二つの計測画

像間で共通点が少なくとも3点必要となる。

共通点を抽出しやすいように、測定対象に予め図4に示すようなターゲットシールを貼る。各測定は位置合わせが可能なように、シールを少なくとも3点重複するように測定を行う。

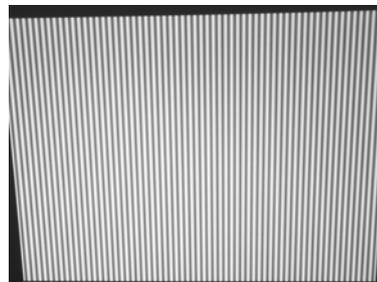


図2 パターン光を撮影した画像

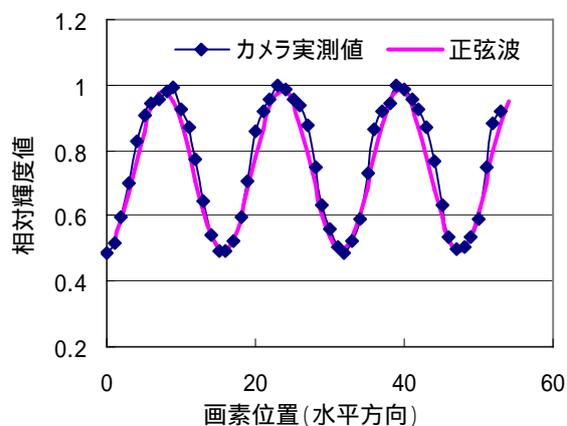


図3 撮影画像の輝度分布

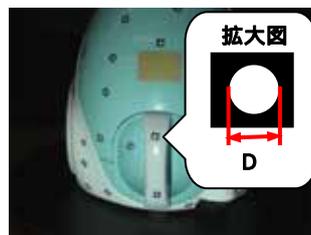


図4 位置合わせ用ターゲットシール

シールの画像上での位置は、シールの濃淡を利用して画像処理によりシールを特定し、重心位置から求める。シールの重心位置はサブピクセル的に求められ、シールの三次元座標は、重心位置の近傍4画素の三次元座標から計算する。

例えば、画像1を基準の座標系として、画像1と画像2との間で  $n$  個の同一のシールが見つかり、それを利用して座標変換のための回転、並進移動量を求めるとする。画像1のシールの三次元座標を  $X_i (i=1, \dots, n)$ 、それに対応する画像2のシールの三次元座標を  $X_i'$  とし、画像1を測定してから画像2で測定するとき、測定対象を物理的に回転、移動したときの回転行列と並進ベクトルを  $R$ 、 $t$  とすると、

$$X_i = RX_i + t \quad (4)$$

測定誤差を考慮し以下の評価関数  $C$  を最小にするように  $R$  と  $t$  を求める。

$$C = \sum |X_i' - (RX_i + t)|^2 \quad (5)$$

ただし、 $\Sigma$  は計測された共通の  $n$  個のシールに対する和である。このとき、 $R$  は直交行列 ( $R^T R = I$ ) および  $\det(R) = 1$  であることを利用し、 $C$  が最小となる  $R$ 、 $t$  を特異値分解により求める<sup>6)</sup>。特異値分解の計算には、フリーのソフトウェアライブラリ<sup>7)</sup>を用いた。

$R$ 、 $t$  が求めれば、画像 2 の測定データに対して、 $R$ 、 $t$  の逆変換を行うと、画像 1 の座標系に一致したデータとなる。更に測定物を回転、移動して画像 3 を計測する。そのとき、基準座標となる画像 1 のシールの三次元座標  $X_i$  は、それまでに測定した画像 1 と画像 2 のすべてのシールのデータを利用して求める。画像 1 と画像 2 で共通のシールの三次元座標は誤差の分だけ一致しないが、平均値とする。同様にして、画像 4、画像 5 と全方位から測定を行い、全体形状を計測する。何度も測定対象を回転、移動して測定を行うと、同一のシールが複数回現れるが、その場合には画像 1 のシールの三次元座標  $X_i$  は測定の平均値とする。

### 3. 実験結果及び考察

#### 3.1 測定精度

小領域の測定精度を求めるために、段差基準片 (段差 20.00mm) を測定した。測定データの中から段差のある 2 つの平行平面領域 A (59×37mm)、B (53×39mm) の点群データを取り出した。領域 A の点群データから最小 2 乗平面を計算し、この平面から領域 B の各測定点までの距離を求めた結果、平均距離は 19.97mm、ばらつき ( $\sigma$ ) は 0.03mm、段差基準片を基準とみなしたときの形状測定誤差の 2 乗平均平方根は 0.04mm であった。前報の空間コード化法を用いた計測システムの測定結果<sup>2)</sup> (平均距離: 20.2mm、ばらつき ( $\sigma$ ): 0.2mm) に比べ大幅に改善できた。

空間コード化法とフェーズシフト法を組み合わせた本システムの計測方法は、空間コード化法では利用していないアナログ輝度情報をフェーズシフト法で有効利用しているので、高精度化を図れたものと思われる。

全周測定精度を確認するため、円筒スコヤに直径 5mm のターゲットシールを印刷した白色紙を貼り付けた円筒物体 (円筒半径: 60.345mm、高さ 400mm) を測定した。7 方向から測定したデータをシールをもとに統合し全周形状とした。統合した点群データを最小 2 乗円筒面として評価し、各測定点の中心軸からの距離を求めた。その結果、平均距離は 60.67mm、ばらつき ( $\sigma$ ) は 0.25mm、

円筒スコヤを基準とみなしたときの形状測定誤差の 2 乗平均平方根は 0.41mm であった。また、シールの位置合わせ誤差は  $\sigma = 0.2\text{mm}$  であった。小領域の測定に比べ、測定精度が低下しているが、位置合わせ誤差が主な要因として考えられる。なお、どちらの測定も測定範囲を最小に設定し、高精度が得られる状態で行った。

#### 3.2 実物工業製品の全周形状測定

複雑な形状をした工業製品の一例として掃除機 (外形寸法: 300×250×250mm) を取り上げ、本システムが工業製品の全周形状測定に有効かどうか検証した。

図 5 に示すように測定対象を三次元的に回転、移動して複数回の計測を行い、位置合わせを行って一つの統合したデータとした。位置合わせ用のシールの直径は 4mm で、53 個を位置合わせ計算に利用し、シールの位置合わせ誤差は  $\sigma = 1.2\text{mm}$  であった。円筒スコヤの測定に比べシールの位置合わせ誤差が大きい原因として、1 測定の測定範囲が 4 倍大きいことと位置合わせ用のシールの直径が小さいことが挙げられる。図 6 は、商用の非接触三次元測定機 (ドイツ GOM 社製 ATOS Standard) を用いて測定し、その点群データと本システムで測定した点群データをフィッティングし、両者の差を濃淡表示した結果である。比較対象の測定点は約 20 万点で、各点の差の 2 乗平均平方根は 2.0mm であった。掃除機全体では、両者の差はほぼ  $\pm 2\text{mm}$  以内に収まっているが、掃除機底面の後左部分で  $\pm 2\text{mm}$  以上の大きなずれが生じている。

本システムでは、最初の測定データを基準として、重複しているシールの三次元座標をもとに周辺の測定データの位置合わせを順次行っている。このため、基準とした最初の測定データから位置合わせの回数を重ねるに従い、誤差の累積が生じ位置合わせ精度が低下する傾向にある。2 つの測定データ間に大きな差の現れた部分は、本システムにおいて最後にデータ統合処理を行った箇所であり、本システムのデータ統合処理の誤差の可能性が

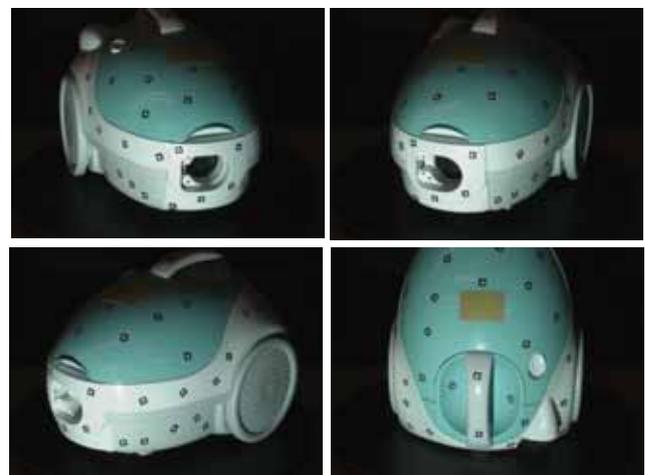


図 5 複数回測定した計測画像



図6 商用機の測定結果との比較(濃淡表示)

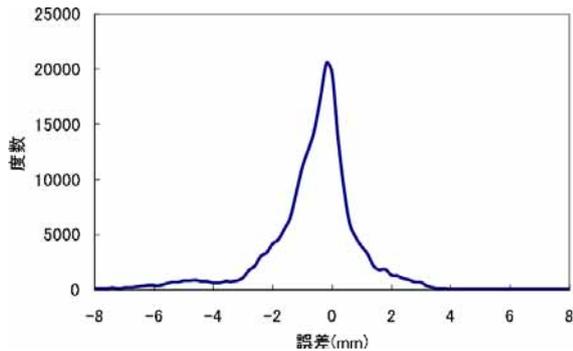


図7 測定誤差分布(ヒストグラム)

考えられる。図7は、両者の形状差のヒストグラムであり、掃除機の底面の誤差の大きい部分が-5mm付近に出ている。また、工業製品の計測では、図面を要求されることが多いので、簡易図面作成機能を用意した。図8は、計測結果の三面図を自動で作成表示した例である。三次元座標データから最小値、最大値を算出できるため、幅、高さ、長さ等の寸法を自動で計算することができる。

### 3.3 組付け式金型の設計への応用

本システムの応用として、計測したデータを包装対象物の形状データとして緩衝材設計に利用できるか確認した(図9)。一般に三次元CADを利用した設計システムでは、物体形状はNUBUS等の曲面データで定義されており、計測により得た点群データで表された形状は認識できない。そこで、点群データを曲面データの一形式であるSTL形式に変換し、組付け式金型方式の緩衝材設計システム<sup>1)</sup>に入力した。STL形式で表された包装対象物の形状は、設計システム内の仮想空間において、3次元CADで設計した緩衝材形状と同様に自由に操作でき、問題なく緩衝材設計を行うことができた。

また、包装対象物を計測し曲面データを作成するまでに要する時間は1時間程度であり、手作業により寸法を採寸し三次元CADでモデルを作成する従来のモデル作成方法に比べ大幅に作業時間を短縮することができた。

## 4. 結び

一昨年度から開発を行っている三次元計測システムにおいて、周囲から複数回測定し測定データを統合するこ

とにより、全周計測を試みた。円筒スコヤの全周形状測定精度(全測定点の誤差の2乗平均平方根)は、0.41mmであり、緩衝材設計において三次元計測したデータを有効に利用できることを確認した。現状では、シールにより位置合わせを行っている。測定したデータ全体で重なった曲面が合うように位置合わせを行えば、位置合わせ精度が更に向上すると考えられるが、それは今後の課題である。

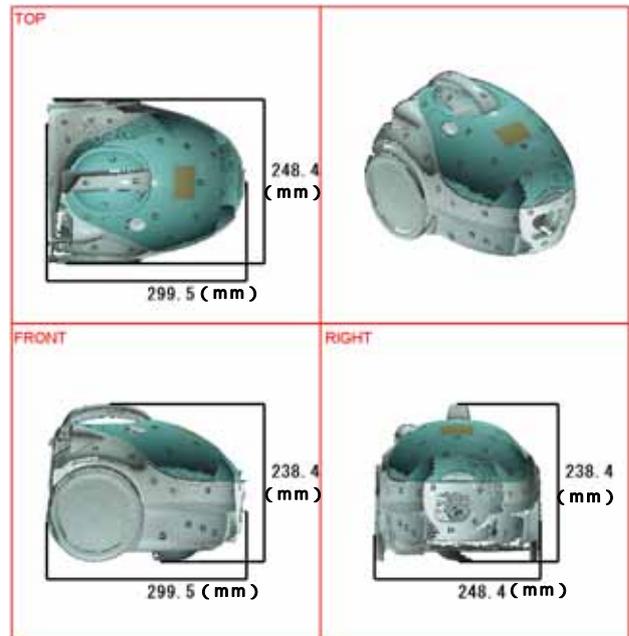


図8 計測結果の三面図

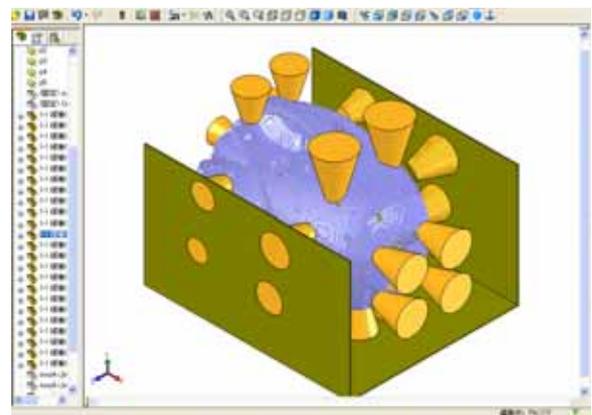


図9 緩衝材設計

## 文献

- 1) 山本ほか：愛知県産業技術研究所報告，5，18 (2006)
- 2) 依田，山本：愛知県産業技術研究所報告，4，18 (2005)
- 3) 依田，山本：型技術，20 (15)，66 (2005)
- 4) <http://www-2.cs.cmu.edu/~iwan/1394/>
- 5) 吉澤徹：最新光三次元計測，P67 (2006)，朝倉書店
- 6) 徐剛：写真から作る3次元コンピュータグラフィックス，P80 (2001)，近代科学社
- 7) <http://math.nist.gov/javanumerics/jama/>