

2 段階の能動ステレオ画像計測法を用いたハンドヘルド型 3D スキャナ*

藤田日出人[†]・蚊野 浩[†]・吉田 博明[†]・安田 昌司[†]

Hand-held 3D Scanner Using Two-stage Active Stereo Method*

Hideto FUJITA[†], Hiroshi KANO[†], Hiroaki YOSHIDA[†] and Masashi YASUDA[†]

A new 3D scanning device which consists of a hand-held 3D sensor head and a stereo camera, is developed. In the measuring process, the coordinates of observed points are computed relative to the 3D sensor head, and the 3D sensor head is located relative to the fixed stereo camera. The 3D coordinates of the measured object are reconstructed in the two-stage process. The unique two-stage method makes it possible to move the sensor head freely and to measure the whole shape of the object in one sequence of scanning. In this paper, we describe the system structure, the principle of measurement, some examples of measurement and its accuracy.

1. はじめに

立体物の形状をコンピュータに入力する3次元形状測定装置の開発が盛んである [1-4]. これらの装置は、金型や機械部品などを高精度に測定する分野から実用化が進んだが、近年では、全身や顔、手足などの人体をはじめ、人形などのキャラクターモデル、工芸品や農作物などに応用分野を広げている。

応用分野が広がるに従い、装置に対する要求は、測定精度に加えて、価格や操作性、測定時間が重視される傾向にある。現在の技術で、これらの要求に答えることができる方式として、特定の光パターンを照射し、被測定物上の光像を画像センサで観察する能動ステレオ法が有力である。

能動ステレオ法で計測が可能な領域は、被測定物上で光パターンが照射され、かつ、その光像が画像センサから観察される領域である。したがって、測定装置を固定して用いる場合には、被測定物の全表面のなかで、測定装置に対向する部分だけが測定可能である。被測定物の全体を測定するためには、全体をいくつかの部分に分けて測定し、後処理でそれらを合成する必要がある。

我々の装置は、能動ステレオ法により取得される複数

の部分的な3次元点群データを統合し、全体形状を再構成するという問題を以下の方法で解決した。①3Dセンサヘッドを手持ちで操作することで、自由な位置から被測定物を観察することを可能にした。②2段階の能動ステレオを用いることで、逐次測定される部分的な点群データを実時間で合成し、全体形状を容易に取得可能とした。以下、2.で従来技術について述べ、3.で本装置の測定原理を説明する。4.で測定精度に関する実験データを示し、5.でまとめを行う。

2. 従来技術

本装置の特徴は、自在に移動可能な3Dセンサヘッドで得られる局所的な3次元点群データを、実時間で合成し、物体の全体形状に統合することである。これに類似する従来技術を説明する。

被測定物を複数の方向から観察する方法と、複数の部分的な点群データを一つに統合する方法がいくつか知られている。代表的なものは、回転ステージを用いて被測定物を回転させる方法である [5,6]. この場合、複数の方向から測定が可能であると同時に、複数の点群データ間の位置関係が既知であるから、データの統合が容易である。しかし、物体を1軸方向に回転させるだけでは、観察不能領域が生じやすい。

また、多関節アームの先端に3Dセンサヘッドを配置し、3Dセンサヘッドで局所的な形状測定を行いつつ、アーム先端を移動させることで全体形状の測定を可能と

* 原稿受付 2001年5月24日

[†] 三洋電機(株) Sanyo Electric CO., LTD.; 1-18-13 Hashiridani, Hirakata city, Osaka 573-8534, JAPAN

Key Words: stereo vision, three dimensional measurement, laser scanner, active stereo method.

する装置が知られている [7]. この装置では, 各関節に配置したエンコーダなどを用いて, アーム先端の3Dセンサヘッドの位置と姿勢を検出する. この種の装置で, アームの移動を手動で行うタイプは, 3Dセンサヘッドを動かすための慣性力が大きくなるため操作性が悪い. また, 高精度なメカニカルアームは高価であるため, 用途が制限される.

3Dセンサヘッドの3次元位置・姿勢 (3次元座標と各軸回りの回転角) を検出するために, 磁気センサを用いるものも知られている [8]. しかし, 磁気センサは金属物が近傍に存在する場合に精度が劣化するという問題があり, 利用範囲が制限される.

一方, 3Dセンサヘッドの位置と姿勢を検出することなく, 点群データを統合することも可能である. 一つの方法は, 被測定物上に識別可能なマークを配置し, 複数の測定データ間で共通に観察されるマークを指示する方法である. また, 複数の点群データ間で共通に観察される部分があれば, その形状の重なりを数値計算的に最適化することで, 統合することが可能である. しかし, これらの方法は, 統合プロセスに人手の介入が避けられず, 自動化は困難である.

3. 測定原理とシステム構成

3.1 測定原理

本装置は Fig. 1 に示すように, 自在に移動可能な3Dセンサヘッドと3Dセンサヘッドの位置決めを行うステレオカメラ, および演算処理部で構成される.

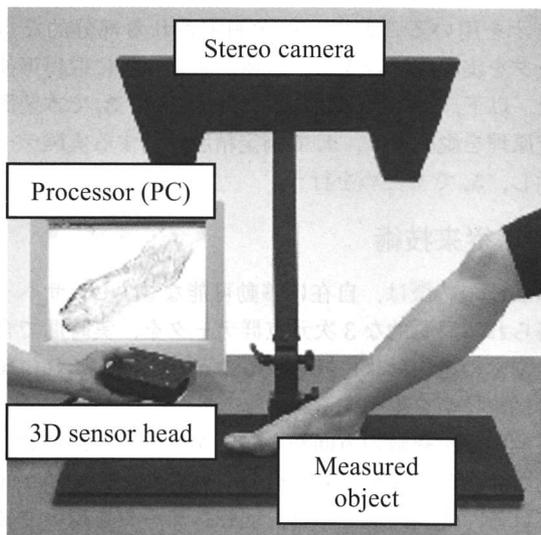


Fig. 1 Hand-held 3D scanner system

3Dセンサヘッド中心の3次元座標系で, Fig. 2の M 点の座標が $M_c = [x_c, y_c, z_c]^t$ と計測されたとする ($[]^t$ は転置を表す). ここで, 3Dセンサヘッド中心の座標系とは, 3Dセンサヘッドに内蔵されたカメラの光学中心を原点とし, その光軸方向を z 軸, 撮像素子の水平方向を x 軸, 垂直方向を y 軸とする座標系であり, 3Dセンサ

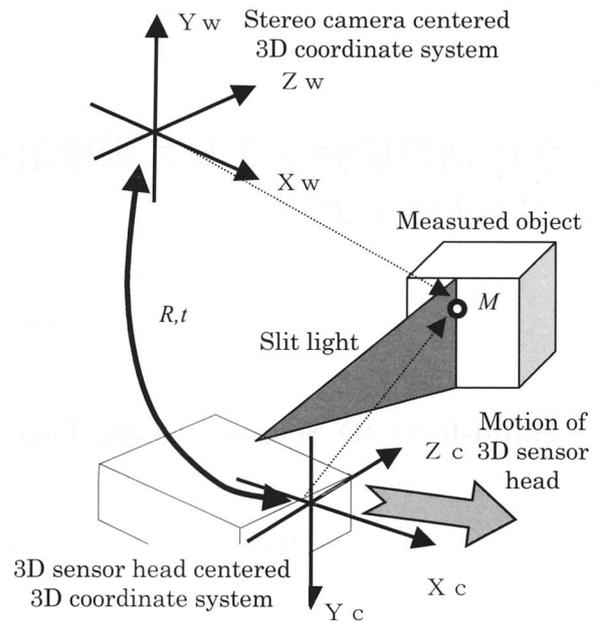


Fig. 2 Two 3D coordinate systems

ヘッドの移動に伴って, 被測定物との相対関係が移動する座標系である. 一方, 被測定物に固定された座標系として, ステレオカメラの片方のカメラを中心とする3次元座標系を採用する. 以下では, 3Dセンサヘッド中心の座標系を移動座標系, ステレオカメラ中心の座標系を固定座標系と呼ぶ.

移動座標系と固定座標系の位置関係が, 回転行列 R と並進ベクトル t であるとき, M 点の固定座標 $M_w [x_w, y_w, z_w]^t$ は (1) 式によって記述することができる.

$$M_w = R \cdot M_c + t \quad (1)$$

したがって, 測定が行われるつど, (1) 式の回転行列 R と並進ベクトル t を求め, 座標変換を行うことで被測定物の形状が固定座標系で統合される.

これを実現するために, 本装置では, Fig. 3 に示す以下の処理を実行している.

- ①3Dセンサヘッドでの光切断法 [9] による3次元計測.
- ②ステレオカメラを用いた3Dセンサヘッドの3次元的位置決め.
- ③移動座標系から固定座標系への座標変換.

3Dセンサヘッドは光切断法を用いて3次元計測を行う. 3Dセンサヘッドに用いるカメラの特性を 3×3 行列 A で表し, スリット光が表す平面を移動座標系で $a \cdot x_c + b \cdot y_c + c \cdot z_c + d = 0$ とする. 被測定物に照射するスリット光をカメラで撮影すると, 画像上に明確な輝線が観察される. 輝線上のある1点の, 画像面での座標 $[u, v]$ を $\tilde{m}[u, v, 1]^t$ と同次座標で表すと, これに対応する3次元座標 M_c は (2) 式から得ることができる.

$$\begin{aligned} s \cdot \tilde{m} &= A \cdot M_c \\ a \cdot x_c + b \cdot y_c + c \cdot z_c + d &= 0 \end{aligned} \quad (2)$$

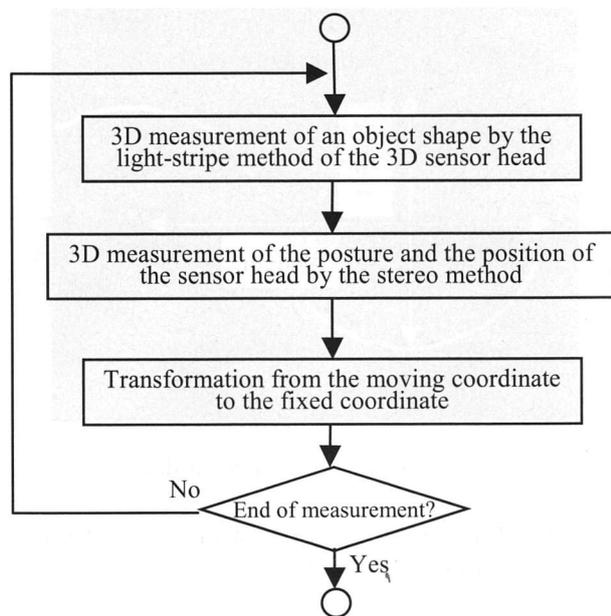


Fig. 3 Flow chart of the measurement process

ここで s は任意の定数, A は内部パラメータ行列と呼ばれ, (3) 式のように記述される.

$$A = \begin{pmatrix} \alpha & \gamma & u_0 \\ 0 & \beta & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3)$$

(3) 式で α は画像座標の水平方向のスケール因子, β は垂直方向のスケール因子, γ は画像座標の2軸のなす角度に関係した因子, $[u_0, v_0]$ は画像中心である.

3D センサヘッドの位置と姿勢を求めるために, 3D センサヘッドの特定の位置をステレオ計測する. ステレオ計測は一般に単眼による計測に比べ, 精度の高い計測が期待できる. 3.3 で述べるように, 3D センサヘッドの上面に6個の赤色 LED (Light Emitting Diode) が配置されている. 第 i 番目の LED の, 固定座標系における座標値を $L_{wi} = [x_{L_{wi}}, y_{L_{wi}}, z_{L_{wi}}]^t$ とする. 一対のステレオカメラで観察した LED の, 各カメラの画像面での座標を, $\tilde{m}_r = [u_r, v_r, 1]^t$, $\tilde{m}_l = [u_l, v_l, 1]^t$ とすると, L_{wi} は (4) 式から求めることができる.

$$\begin{aligned} s_r \cdot \tilde{m}_r &= P_r \cdot \tilde{L}_{wi} \\ s_l \cdot \tilde{m}_l &= P_l \cdot \tilde{L}_{wi} \end{aligned} \quad (4)$$

ただし, s_r, s_l は任意の定数. P_r, P_l は, ステレオカメラの構成により決まる, 各カメラの透視投影行列. \tilde{L}_{wi} は L_{wi} の同次座標表現である. 一方, 各 LED の移動座標系における座標値を $L_{ci} = [x_{L_{ci}}, y_{L_{ci}}, z_{L_{ci}}]^t$ とする. この値は, 3.3 で述べる方法で, あらかじめ求めておく.

二つの3次元座標系において, 3組以上の対応する座標値の組から, (5) 式を最小化する回転行列 R と並進ベクトル t として, 二つの座標系の位置関係を得ることができる.

$$\sum_i \{ \text{distance}(L_{wi}, R \cdot L_{ci} + t) \}^2 \quad (5)$$

ここで, $\text{distance}()$ は2点間のユークリッド距離を意味する. (5) 式は, 結局, 回転行列の最適化の問題に帰着され, 行列の特異値分解や回転行列の4元数による表現を使う線形解法が知られている [10].

3.2 システム構成

本装置は, 3D センサヘッド, ステレオカメラ, および演算処理部で構成される. 演算処理部は, イメージキャプチャ機能を付与したパソコンであり, すべての処理はソフトウェアで実行される. 3D センサヘッドで1台, ステレオカメラで2台のビデオカメラを用いるが, これらは同期して動作するように接続されている.

3.3 3D センサヘッド

3D センサヘッドは, Fig. 4 に示すように, スリット光を照射するレーザ光源とビデオカメラを内蔵し, 筐体上面に6個の LED マーカを配置した.

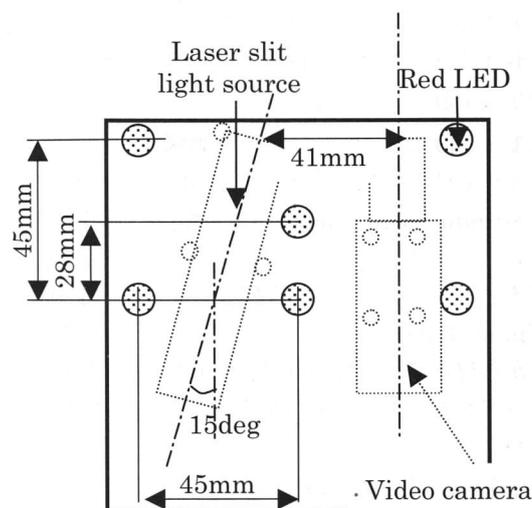


Fig. 4 3D sensor head

3D センサヘッドの3次元的位置決めには3個の LED マーカで十分であるが, (5) 式に基づき計測精度を最小二乗的に向上させるため6個の LED マーカを用いた. また, スリット光の抽出を容易にするため, カメラレンズ前面にフィルタを取り付けた.

3D センサヘッド内のカメラは Tsai の方法で校正した [11,12]. スリット光が表す平面は, 奥行きが既知の平面から得られる点群データに平面フィティングを行うことで校正した. 3D センサヘッド中心の座標系における LED マーカの座標は, 校正パターン (規則正しい図形が平面上に印刷されたもの) と 3D センサヘッドの位置関係, およびカメラの外部パラメータ (校正パターンに対するカメラの位置と姿勢) から計算した.

3.4 ステレオカメラ

ステレオカメラは2台のビデオカメラから構成される. ステレオカメラの下方 500 [mm] ~ 700 [mm] の位置で 3D

センサヘッドによる計測を行えるようステレオカメラの基線長を364 [mm]とし、両カメラの輻輳角を36度に設定した。カメラレンズ前面に、LEDマーカを安定に抽出するためのフィルタを取り付けた。ステレオカメラの校正は、Tsaiの方法で2台のカメラを同時に校正することで行う。その結果、それぞれのカメラに対して、3×4行列で表現される透視投影行列を得る。

4. 実験と計測例

(1)式において、1段階目の計測値 M_c に対して、2段階目の計測値は回転行列 R と並進ベクトル t である。並進ベクトル t の誤差は、単純に加算されるのに対し、回転行列の誤差は1段階目の計測値に乗算される。したがって、本装置の計測原理は、1段階目の測定誤差が2段階目の誤差によって増幅されるという性質を持つ。たとえば、3Dセンサヘッドから距離が離れた測定点に対しては、2段階目の測定誤差の影響がより大きくなる。

本章では、1段階目の計測精度、すなわち3Dセンサヘッド単体での精度と、2段階目の計測精度、すなわちステレオカメラによる3Dセンサヘッドの位置決め精度に関する実験データを示す。

4.1 3Dセンサヘッドの計測精度

3次元座標が既知の参照点を、3Dセンサヘッド先端から80 [mm]~220 [mm]の距離に配置し、各点を3Dセンサヘッド単体で計測した。Fig.5は、各軸ごとの測定誤差をプロットしたものである。ここで、120 [mm]~160 [mm]は3Dセンサヘッドを校正した範囲である。この図から校正範囲内であれば、±0.2 [mm]以下の誤差に収まっており、この範囲を超えると誤差が大きくなることがわかる。

Fig.6に、3 [mm]~25 [mm]の大きさで、半円の凹凸を形成した金型を測定したデータを示す。図の凹部の頂点座標と凸部の頂点座標から、凹凸の波の長さ

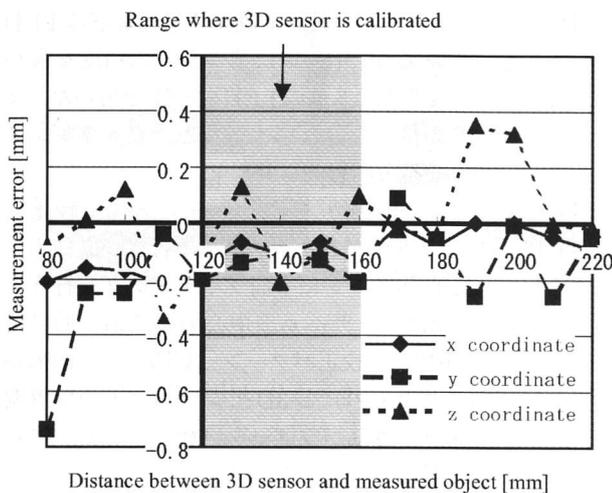


Fig. 5 Measurement precision of 3D sensor head in measuring reference points

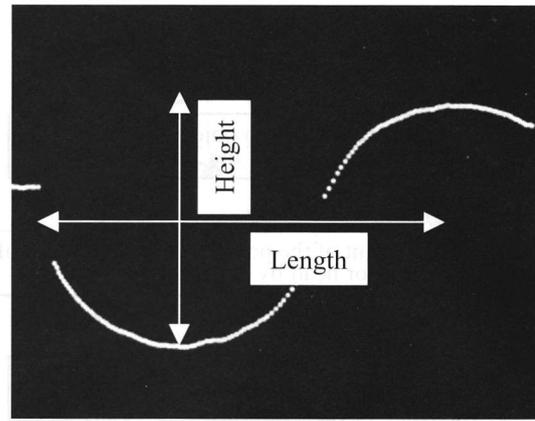


Fig. 6 Sample measurement data

Table 1 Measurement precision of 3D sensor head in measuring 凹凸 mold

凹凸 Grand truth [mm]	Length		Height	
	measured value [mm]	Error [mm]	measured value [mm]	Error [mm]
25.00	24.80	-0.20	25.00	0.00
15.00	14.90	-0.10	14.86	-0.14
10.00	10.07	0.07	9.85	-0.15
5.00	4.86	-0.14	5.02	0.02
4.00	3.99	-0.01	4.08	0.08
3.00	2.87	-0.13	2.92	-0.08

計算することができる。その数値と実際の金型の寸法を比較したものをTable 1に示す。このデータでも測定精度は±0.2 [mm]に収まっている。

4.2 ステレオカメラの測定精度

3Dセンサヘッドの上面に配置したLEDマーカを位置決めすることで、3Dセンサヘッドの位置と姿勢を求める。その精度は、ステレオカメラの校正精度から予想することができる。

校正に用いる参照点をステレオカメラで観察した画像座標と、校正から得るカメラパラメータを用いて、各参照点に対応する視線を3次元空間に逆投影する。2台のカメラの視線が交わる、または最も近づく点として参照点の座標を推定し、真値と比較した。その結果は、3軸の座標値において平均的な誤差はほぼ0、誤差の標準偏差は x 軸で0.15 [mm]、 y 軸で0.17 [mm]、 z 軸で0.38 [mm]であった。また、画像の周辺部と中心部で誤差に大きな差はなかった。したがって、6個のLEDマーカを用いて、水平状態の3Dセンサヘッドの位置決めする場合、位置の平均誤差は0、標準偏差は上記の数値の $1/\sqrt{6}$ 程度、すなわち z 軸で0.16 [mm]程度になると期待できる。

4.3 3Dセンサヘッドの位置決め精度

3Dセンサヘッドの位置決め誤差が大きくなると予想されるのは、LEDマーカがステレオカメラの画像周辺部に観察され、かつ3Dセンサヘッドが傾いた場合である。このような状態での位置決め精度を検証するために、

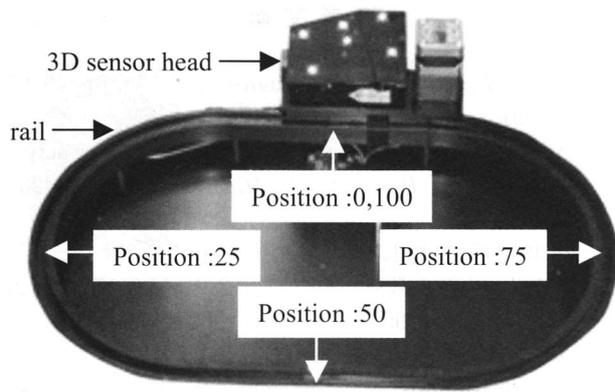


Fig. 7 Jig to evaluate accuracy of 3D sensor head position

Fig. 7のように、直線と半円で構成される楕円形のレール上に3Dセンサヘッドが移動できるようにした治具を用いた。3Dセンサヘッドの移動軌跡は平面上に規制されており、3Dセンサヘッドは一定の角度で傾いて保持されている。

本治具の上部にステレオカメラを配置し、レール上で均等間隔となる100ヶ所で、3Dセンサヘッドの位置と姿勢を表す並進ベクトルと回転行列を求めた。

並進ベクトルの座標値をプロットするとFig. 8になり、3Dセンサヘッドがレールの軌跡を移動したことが明らかである。機械加工されたレールの平面度は十分な精度であるから、Fig. 8の点集合の、平面からのずれはステレオ計測による誤差に起因すると考えられる。そこで、各点からの垂直距離の二乗和が最小になる近似平面を求め、各点と近似平面の垂直距離を解析した。Fig. 9がその結果である。Fig. 9の横軸は3Dセンサヘッドの位置を示す番号である。0から100の位置は、おおむね、Fig. 7に示した位置である。番号が進むにつれ3Dセンサヘッドは反時計回りに移動し、100で元の位置に戻る。したがって、25の前後がレールの左端、75の前後がレールの右端である。縦軸は各点と近似平面の垂直距離である。この図から、レールが湾曲する部分で3Dセンサヘッドの位置が浮き上がって計測され、直線部分で、相対的に沈み込んで計測されていることがわかる。誤差は最大 ± 1.5 [mm] 近くあり、誤差の標準偏差は0.82 [mm]であった。

3Dセンサヘッドの角度計測誤差を評価した。計測治具上で3Dセンサヘッドは一定の角度(0~40度で自由に設定可能)を保持したままレール上を一周するように構成されている。したがって、3Dセンサヘッド上面とレール平面のなす角度は常に一定である。これに対して、3Dセンサヘッドの姿勢の測定誤差から、この角度がばらつく。Fig. 10は、Fig. 9で用いた近似平面(レール面に平行と推定される面)と、3Dセンサヘッド上面のなす角度をプロットしたものである。横軸は、Fig. 9と同様に3Dセンサヘッドのレール上での位置を示す番号で

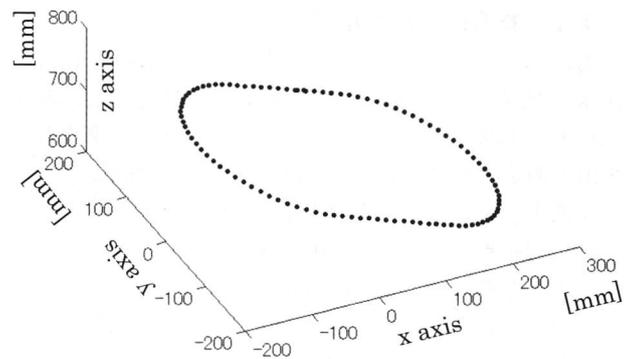


Fig. 8 Trace of 3D sensor head position

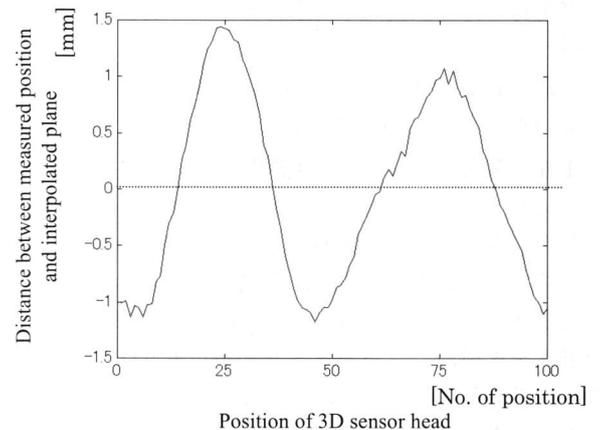


Fig. 9 Error of 3D sensor head position

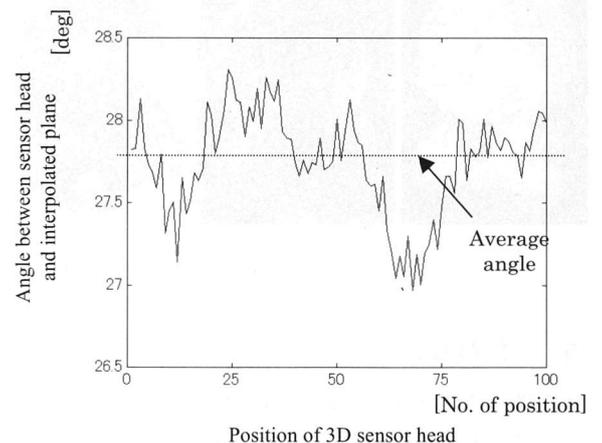


Fig. 10 Error of 3D sensor head orientation

ある。縦軸は推定された角度である。この図から、角度は最大で1度近くの誤差があり、誤差の標準偏差は0.30度であった。

3Dセンサヘッドの位置決め精度として得られた並進ベクトルの標準偏差0.82 [mm]は、4.2の解析に比べると、かなり悪くなっている。これは、3Dセンサヘッドを斜めに保持したことによる影響と、画像処理における校正用パターンとLEDマーカの抽出精度の違いによるものと想像している。いずれにしても、3Dセンサヘッドの位置決め精度の改善は今後の課題である。

4.4 総合的な計測精度

3Dセンサヘッドを、白色平板に対して約100 [mm]の距離で把持し、平行に移動させながら測定した。測定データに平面フィティングを行い、フィティングされた平面と測定データに関して、以下の結果を得た。

- ①測定データと近似平面の平均距離：0.07 [mm]
- ②上記距離の標準偏差：0.09 [mm]
- ③上記距離の最大値：0.34 [mm]

また、一辺50 [mm]の白色立方体に対して3Dセンサヘッドを約100 [mm]の距離で把持し、平行に移動させながら各面を測定した。各面の測定データに平面フィティングを行い、形状復元した立方体に関して、以下の結果を得た。

- ①辺の長さ：49.3 [mm]~49.8 [mm]
- ②頂点の角度：89.5度~90.1度

4.5 実モデルによる計測例

Fig. 11にキャラクター人形を計測した例を示す。計測に要した時間はおよそ100秒、計測点数は約5万点となっている。図左は人形の現物、中央は計測した形状データを点群表示したものである。図右は、点群データから、点群データ処理ソフトウェアを用いてCADデータ化したものである。このように、本装置を用いることで、キャラクター人形のリバースエンジニアリングが容易になる。

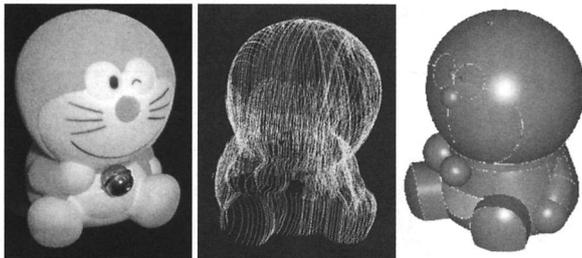


Fig. 11 Measurement sample of toy model

5. おわりに

2段階の能動ステレオ法を用いた、新しい3次元形状測定装置を開発した。本装置は、手持ちで操作する3Dセンサヘッドを用いることで、複雑な形状の全体を容易に測定することが可能になった。

本装置の測定誤差は、3Dセンサヘッド単体で最大 ± 0.2 [mm]の誤差を持ち、3Dセンサヘッドの3次元的な位置決めにおいて、誤差の標準偏差が0.82 [mm]、および0.30度であった。また、単純な立体を良い条件で測定した場合、50 [mm]の長さあたり0.7 [mm]~0.2 [mm]程度の絶対誤差、誤差の標準偏差0.1 [mm]程度であった。

今後は装置の高精度化と特定アプリケーションに適した装置の開発や、形状と色彩情報を同時に計測できる装置の研究開発を進める予定である。

参考文献

- [1] 立体を写し撮る; 日経CG, August, Vol. 155, pp. 46-65 (1999)
- [2] K. Hattori and Y. Sato: Handy rangefinder for active robot vision; *Proc. of 12th IEEE ICRA*, pp. 1423-1428 (1995)
- [3] 金出, 蚊野, 木村, 川村, 吉田, 織田: ビデオレートステレオマシンの開発; ロボット学会誌, Vol. 15, No. 2, pp. 261-267 (1997)
- [4] 井口, 佐藤: 三次元画像計測, 昭晃堂 (1990)
- [5] Y. Matsumoto, H. Terasaki, K. Sugimoto and T. Arakawa: Three dimensional scene reconstruction system from monocular image sequences; *International conference on virtual system and multi-media '96*, pp. 353-358 (1996)
- [6] 杉本, 奥富: 時空間画像を用いた回転物体の形状復元; 情報論文誌, Vol. 40, No. 6, pp. 2717-2724 (1999)
- [7] 蒲生: アーム式3次元スキャナー; *O plus E*, Vol. 20, No. 11, pp. 1281-1286 (1998)
- [8] <http://www.polhemus.com/fastscan.htm>
- [9] 小関, 中野, 山本: 光切断法を用いた実時間距離検出装置; 信学論 (D), Vol. J78-D, No. 5, pp. 1141-1148 (1985)
- [10] O. Faugeras: *Three-dimensional computer vision*, The MIT press (1993)
- [11] R. Y. Tsai: A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV camera and lenses; *IEEE Journal of Robotics and Automation*, RA-3, 4, pp. 323-344, August (1987)
- [12] <http://www.cs.cmu.edu/afs/cs.cmu.edu/user/rgw/www/TsaiCode.html>

著者略歴

ふじ 藤田日出人



1987年神戸大学大学院工学研究科修士課程修了。同年三洋電機(株)入社。現在、メカトロニクス研究所主管研究員。コンピュータビジョンの研究開発に従事。計測自動制御学会、映像情報メディア学会会員。

か の 蚊野 ひろし 浩 (正会員)



1984年京都大学大学院工学研究科修士課程修了。同年三洋電機(株)入社。1993年~1995年米国CMU計算機科学科客員研究員。現在、メカトロニクス研究所担当課長。コンピュータビジョンの研究開発に従事。工学博士。1998年日本ロボット学会論文賞受賞。情報処理学会、日本ロボット学会会員。

よしだ ひろあき
吉田 博明

1991年立命館大学工学部情報工学科卒業。同年三洋電機(株)入社。現在、メカトロニクス研究所主任研究員。コンピュータビジョンの研究開発に従事。情報処理学会会員。

やすだ まさし
安田 昌司 (正会員)

1980年京都大学大学院工学研究科修士課程修了。同年三洋電機(株)入社。現在、メカトロニクス研究所部長。工学博士。日本機械学会、日本ファジィ学会、IEEE会員。