

回転台を用いた 3 次元形状の全周リアルタイム獲得システム

角野 裕樹[†] 川崎 洋[†] 大沢 裕[†] 古川 亮^{††}

[†] 埼玉大学工学部情報システム工学科 〒 338-8570 さいたま市桜区下大久保 255

^{††} 広島市立大学情報科学部情報メディア工学科 〒 731-3194 広島市安佐南区大塚東三丁目 4 番 1 号

E-mail: [†]{kadono,kawasaki,ohsawa}@mm.ics.saitama-u.ac.jp, ^{††}ryo-f@cs.hiroshima-cu.ac.jp

あらまし 本論文では、回転台とラインレーザポインタと単眼ビデオカメラを用いた 3 次元計測システムを利用して、効率的に対象物体の全周の 3 次元形状をリアルタイムに獲得するシステムを提案する。一般に 3 次元計測システムでは、計測対象の一方の形状しか計測することが出来ない。そこで本論文では、計測した形状をリアルタイムに確認しながら物体の 3 次元形状を計測することが可能なレーザ 3D スキャナを用いて、回転台に計測対象をのせ、回転しながら計測することで、全周計測を実現するシステムを提案する。その際、回転台に LED をつけ、画像ベースで回転角を推定するシステムとすることで、利用する 3D スキャナの利点である、リアルタイム性、インタラクティブ性が損なわれないように工夫した。実際にシステムを作成し計測を行ったところ、物体の全周形状を効率良く獲得することが出来た。

キーワード 3 次元計測システム, 全周形状獲得, 画像処理

All The Circumferential Acquisition System Of 3D Shape Using The Rotation Table

Hiroki KADONO[†], Hiroshi KAWASAKI[†], Yutaka OHSAWA[†], and Ryo FURUKAWA^{††}

[†] Department of Information and Computer Sciences Faculty of Engineering, Saitama University
Shimo-Okubo 255, Sakura-ku, Saitama, 338-8570 Japan

^{††} Department of Computer Science, Hiroshima City University Ozuka-higashi 3-4-1, Asaminami-ku,
Hiroshima, 731-3194 Japan

E-mail: [†]{kadono,kawasaki,ohsawa}@mm.ics.saitama-u.ac.jp, ^{††}ryo-f@cs.hiroshima-cu.ac.jp

Abstract In this paper, a realtime and handheld entire model acquisition system consisting of a laser projector, a video camera and a turn table is described. A user projects a stripe of light to the 3D object by hand while rotating the object with turn table. The projected light and LED markers attached to the laser projector and turn table are captured with the video camera. By estimating the 3D pose of the laser projector and the angle of the turn table angle from the 2D locations of the markers, the 3D location of the surface lit by the laser can be calculated. With this system, the user can measure the entire 3D model of the object in real time even if outside the laboratory.

Key words 3D acquisition system, Entire shape acquisition, Image processing

1. はじめに

3 次元物体の形状獲得を行う 3 次元計測装置は、幅広い分野で求められており開発も盛んである。多様な 3 次元物体の形状を計測し、モデル化するための様々なシステムがこれまでに提案・利用されてきた。

例えば、レーザレンジファインダは、長距離かつ正確で高密度なデプスイメージが獲得可能なもの [1] や、中小距離において正確で高密度な計測を可能としているもの [2] 等、広く利用

されている。これらは、精度が高い反面、総合的なコストが高価であったり、特別な光源や対象の配置等が必要となることがある。

一方、ステレオビジョンやモーションステレオシステムは、一般にデジタルスチールカメラやビデオカメラを使用するため低コストである。またビルや陸地といったようなスケールの大きなものや、建築物などのモデルを構築することも可能 [3] である。その反面、画像ベースの特徴点を用いるため、精密な形状を得ることが一般に難しい。

IEEE 1394 や USB といったインターフェースの発達により、スチールカメラやビデオカメラのデータをコンピュータで簡単に取得できるようになった。そのため、これら機器を用いた低コストで簡単に使用可能な 3 次元計測システムが多数提案されている [4] [5] [6]。

そこで、本論文ではこのような低コストな計測システムを基にした、3 次元形状の全周獲得システムを提案する。本システムに必要な装置は単眼ビデオカメラと、LED の付属したラインレーザポインタと、LED の付属した回転台のみである。これは、過去の計測装置が、ステレオ方式の場合には、同期のとれた 2 台のカメラが必須であり、また、レーザ計測の場合は、機械式制御機構の付いたレーザ装置が必要であることに対して、大きな利点となっている。このため持ち運びが容易で、安価にシステムを構築することが可能である。

計測は、計測対象を回転台の上に乗せ、単眼ビデオカメラによって形状を獲得しながら対象をリアルタイムに回転し、レーザ光線（平面）を照射することで行われる。また計測結果は即座にディスプレイ上に表示される。このため、計測者はどの部分のデプスが欠けているのかを直接画面で確認しながら、インタラクティブに計測を行うことが出来る。

本論文では、これらの計測装置を実際に作成し、全周形状を獲得した結果を示す。また、その際の誤差等についても議論する。

2. 関連研究

2.1 3 次元全周獲得システム

通常、3D スキャナでは単一方向からの形状から取得出来ないため、以下のような 3 ステップにより全周形状のモデリングが行われる。

- (1) 単一方向からデプスの獲得
- (2) 異なる視点から獲得した複数デプスの位置あわせ
- (3) 複数デプスの統合

(1) のスキャンに関しては、ステレオ法やアクティブ法などほとんどの 3 次元形状計測手法があてはまる [7]。

(2) の位置あわせ手法としては、ICP [8] [9] や点とポリゴン間の距離による方法 [10] [11] 等がある。また、Neugebauer [9] により同時位置合わせ手法も提案されている。

(3) の統合手法に関しては、メッシュの重なり合う部分を予め削除することで 2 つの範囲イメージを並べる方法 [12] や、マーチング・キューブ法 [13]、3 次元サーフェスモデルの陰極表現関数に特化したマーチング・キューブ法 [14] などがある。

上記のシステムではそれぞれの処理が独立しているため、位置あわせ後に計測が出来なかった部分が明らかになると、最初から (1) と (2) の処理を繰り返す必要がある。そのため、全周計測を行うには (1) と (2) の処理を繰り返し実行しなければならず、計測効率は低いものとなる。

そこで、これを解決するため、Rusinkiewicz ら [6] はインタラクティブスキャニングシステムの重要性について述べている。インタラクティブスキャニングシステムにおいては、(1) と (2) の処理が同時に行われるため、効率よく全周形状を取得するこ

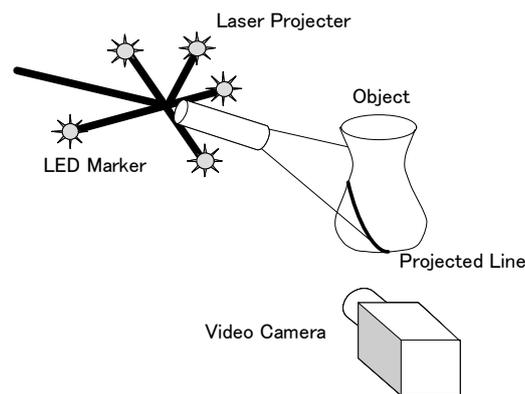


図 1 3D 計測システム

Fig. 1 3D measurement system.

とが可能である。Rusinkiewicz らは実際にパターンコード化法を用いたリアルタイム全周形状計測手法を提案している。これに近い考え方として、藤田らはハンドヘルド型 3D スキャナを用いた 2 段階方式での全周形状計測手法を提案している [15]。上記 2 つの手法はそれぞれ効率よく全周形状を獲得することに成功しているものの、装置が複雑で大掛かりになるという問題点があった。

そこで本論文では、上記提案手法と同様、リアルタイムで (1) と (2) を同時に実現するシステムの構築を目指す一方、これまでの提案手法の問題点であった、装置が複雑で大掛かりであることの解消を目指す。その際、対象物体を 3 次元空間内で自由に動かすことが出来れば最も都合が良いが、本論文においては、簡単な処理を実現するため回転台を利用し、対象物体の動きを回転の 1 自由度に限定したシステムとした。

3. 単眼カメラ 3 次元計測システム

3.1 システム構成

本論文で使用する 3 次元計測システム [16] は単眼ビデオカメラとラインレーザポインタからなる (図 1)。ラインレーザポインタには LED が取り付けられている。ラインレーザポインタはレーザ平面を射出する。計測時にはレーザ計測機器を手に持ち、計測対象をレーザで直接照射する。レーザ平面が計測対象上にレーザのスリット光を作るため、計測機器を動かすことでこのスリット光が対象の表面全体を覆うようにスキャンすることが出来る。このレーザによるスリット光とレーザポインタに取り付けてある LED の両方を単眼ビデオカメラを用いて撮影し、ビデオ映像を解析することで対象物体の 3 次元形状を取得することが出来る。レーザ計測機器の位置・姿勢は、レーザポインタに取り付けてある LED マーカにより推定される [4]。LED は全部で 4 つが平面上で正方形に配置され、これら 4 つの LED で形成される平面をマーカ平面と呼ぶ。

3.2 形状の獲得

本システムは、レーザ平面とほぼ等しいマーカ平面を使用し、三角測量の原理により表面点の位置を獲得する。レーザ平面を表す平面の方程式は、単眼カメラにより撮影された LED を用いて推定出来るため、対象物体上に映されたスリット光が

カメラ画像上で検出されると、視線とレーザ平面の交点として、その位置の3次元座標を推定することが出来る。

計算は全てリアルタイムで行われ、推定されたデプス値はリアルタイムに画像上に3D表示される。そのため、ユーザは、その表示された3D画像を見ることで、各ピクセルに対し推定されたデータ値を即座に確認することが出来、まだ計測できていない箇所の確認も容易である。これにより、インタラクティブにスキャンを行うことができ、効率的に形状を獲得することが可能である。また、本システムは繰り返し同じピクセルをスキャンすることで、統計的に精度を向上するシステムとなっている。

4. 回転台を用いた全周3次元計測システム

4.1 システム構成

提案するシステムは、前章で述べたビデオカメラとレーザ計測機器に、計測対象を回転するための回転台を加えたものである。回転台にはキャリブレーションパターンとLEDが設置してあり、キャリブレーションパターンは回転台の回転軸の計算に用い、また、LEDは回転台の回転角度を求めため使用する。

4.2 回転台の構造

回転台を図2に示す。計測対象を置くための約20cm四方の台と、それを回転するための回転テーブル、台に取り付けたLEDから成る。回転台上には、キャリブレーションパターンが取り付けられている。また、LEDは回転角によって物体の陰に隠れることがあるため、回転の中心と点対称になる位置に別のLEDを取り付けてある。さらに、LEDは見る角度によって見え方が異なるように、白の亚克力板で拡散させ輝度を一定に保つよう工夫してある。回転テーブルの回転軸の中心とキャリブレーションパターンの中心は、計測の効率化のため厳密に一致させてある。

4.3 LED検出

キャプチャ画像から、今回作成した回転台に取り付けられたLEDを検出する。台に取り付けてあるLEDの色は、レーザ計測機器に用いられているLED(青・緑)及びレーザ(赤)と区別するため、異なった色(黄)とした。また、対となる2つのLEDの識別方法には、異なる色を使用することも可能であるが、色を閾値に用いての識別は検出が不安定になりやすいため、中心からの距離を異なるものとする事で識別を実現している。これにより2つ以上のLEDを追加することも、容易に対応可能である。

4.4 回転軸の算出

回転軸の算出は、回転台を回転して撮影した複数のキャリブレーションパターン画像を用いて実現できる。撮影した画像列を用いて、カメラの外部パラメータを推定する。これを用いて、カメラ座標系と回転台座標系の2つの座標系の変換行列を計算することが出来る。

回転台座標系は回転軸をz軸とし、これに垂直な平面をxy平面とする。このxy平面は、キャリブレーションパターン平面と一致する。

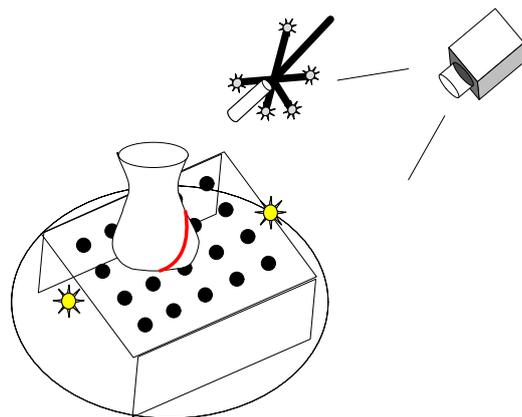


図2 キャリブレーションパターンのついた回転台とLED
Fig.2 Rotation table and LED

4.5 回転角の算出

カメラ座標系から見た回転テーブル上のLEDの位置を、回転台座標系のLED位置に変換することで回転角を推定する。4.4節で求めた、カメラ座標系から回転台への変換行列をAとする。

画像上でのLED座標を (u, v) とし、焦点距離を f とすると、カメラ座標系での画像上のLED座標は (u, v, f) となる。これを \mathbf{u} とすると、回転台座標系での座標は $A\mathbf{u}$ となる。また、同様にカメラ座標系の原点 \mathbf{o} は $A\mathbf{o}$ となる。カメラ座標系の原点を通り、画像中のLEDのピクセルを通る直線は、回転台座標系の $z=0$ 平面と交わるため(図3)、 $\mathbf{p} = A\mathbf{u}$, $\mathbf{q} = A\mathbf{o}$, $\mathbf{e}_z = (0, 0, 1)$ とすると交点は、

$$\mathbf{p} - (\mathbf{q} - \mathbf{p}) \cdot \frac{\mathbf{e}_z \cdot \mathbf{p}}{\mathbf{e}_z \cdot (\mathbf{q} - \mathbf{p})} \quad (1)$$

となる。式(1)より求められた座標と、回転座標系での基準ベクトル $(1, 0, 0)$ との差として、回転角を計算することが出来る。

4.6 複数LEDの取り付け位置の推定

複数のLEDにより対象物体の回転角を推定するため、それぞれのLEDの位置関係を事前に推定しておく必要がある。具体的には、対象物体の無い状態でLEDが同時に写るように画像を撮影し、それぞれのLEDの回転中心からの距離と回転角を求め、回転中心からの距離により一意に定まるLEDに、その回転角を保存しておけばよい。この時、回転台は、視線に対

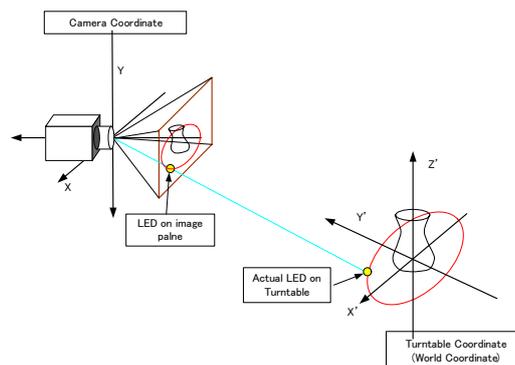


図3 回転角の推定方法

Fig.3 Calculation of rotation angle.

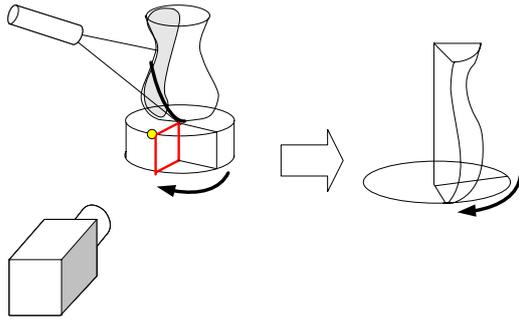


図 4 回転角を利用してデータを回転

Fig.4 Rotation of the acquired 3D data.

して水平に近く設置されているため、LED の撮影位置によっては、量子化誤差などの影響が大きくなり、正確な回転角と大幅にずれることがある。そのため、回転台を回転させながら複数の位置で推定を行い、その中央値を採用する。

4.7 デプスをボクセルに格納

3次元計測の際、デプス値は、距離画像として格納されることが多い。本システムでは、計測対象を回転しながら全周方向を計測するため、距離画像として保存することが困難である。そこで、本論文ではボクセルの形式の保存を行う。ボクセルは20cm四方を128×128×128の解像度で表現したものである。計測したデータはリアルタイムで回転台座標系へ変換され、算出された回転角を用いてz軸で回転した後(図4)、ボクセルに格納される。これにより、全周形状データを表現することが可能となる。

4.8 投票によるボクセルからの形状生成

計測の際、実際にはノイズや計測誤差により、計測対象以外の形状を取得してしまうことがある。本論文では投票によりこれを解決する。

計測したデプス値が変換後、どのボクセルに格納されるかが決まると、対応する各ボクセルに対して投票を行う。形状生成の際には、投票が閾値を超えたボクセル部分にのみ頂点を生成する。これにより、信頼度の高い点のみを生成することが出来る(図5)。

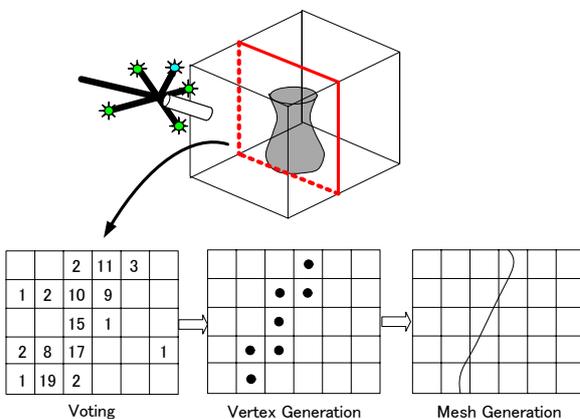


図 5 投票による形状生成プロセス

Fig.5 Voting to voxel.

5. 実験

回転角の推定精度およびボクセルによる全周形状の生成に関する実験を行った。これらの実験を行う前提として、まず始めに、対象物体を乗せずに回転台を回転し、回転台およびその上に固定されているキャリブレーションパターンを複数枚撮影し、このパターン列を利用して回転軸を算出した。以下の実験では、このような処理により、予め回転台の中心位置や、回転軸などが既知であるものとする。

5.1 回転角の推定

LEDによる回転角の推定精度を確認するために、回転台を回転している間は計測を行わず、回転台を一旦固定した後に、計測を行う、という作業を複数回行った。回転角の推定結果を、表1及び表2に、獲得した形状を図6~図12に示す。

表1及び表2は、提案した手法で回転台の回転角を推定し、その角度で対象を回転したとき、実際の形状との間に生じた誤差を実測し、その結果についてまとめたものである。今回の実験では、回転台にLEDを2つ設置して回転角を推定しているため、それぞれのLEDについて評価を行った。また、それぞれの表の2列目にある回転角度とは、回転台の中心から、カメラから見て右方向へ伸ばした直線を基準の0度としたものである。これらの表を見ると、全ての誤差は1度以内であり、高い精度で回転角を推定できていることが分かる。

また、図6~図12を見ると、計測した物体が正しく回転され、同じ座標系に変換されていることが分かる。

5.2 データの統合

また、リアルタイムに計測対象を回転させながら、ボクセルに投票を行うシステムを用いて計測した例を図14、図15に示す。この実験の際には、回転台を自由に回転させながら、レーザーポインタで対象を照射してインタラクティブに計測を行った。

表 1 LED1 による回転角度

Table 1 result rotation angle

データ番号	回転角度(度)	誤差(度)
00	90.45	-0.84
01	133.94	+0.80
02	177.96	-0.39
03	225.40	+0.39
05	314.39	-0.29
06	4.68	+0.17
07	52.65	+0.55

表 2 LED2 による回転角度

Table 2 result rotation angle

データ番号	回転角度(度)	誤差(度)
00	312.59	-0.08
01	356.67	-0.22
02	41.51	-0.78
03	88.08	-0.00
04	136.81	+0.83
05	176.45	+0.26

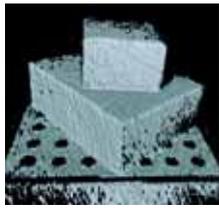


図 6 回転前データ 1
Fig. 6 Initial data1

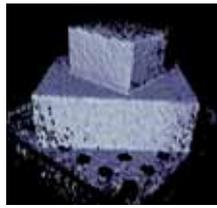


図 7 回転前データ 2
Fig. 7 Initial data2

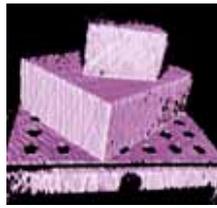


図 8 回転前データ 3
Fig. 8 Initial data3

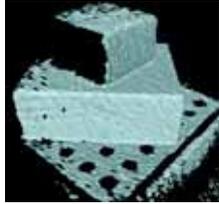


図 9 回転後データ 1
Fig. 9 Rotated data1

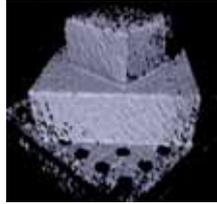


図 10 回転後データ 2
Fig. 10 Rotated data2

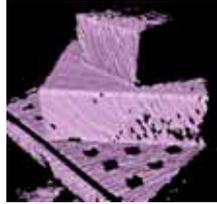


図 11 回転後データ 3
Fig. 11 Rotated data3

Fig. 9 Rotated data1 Fig. 10 Rotated data2 Fig. 11 Rotated data3

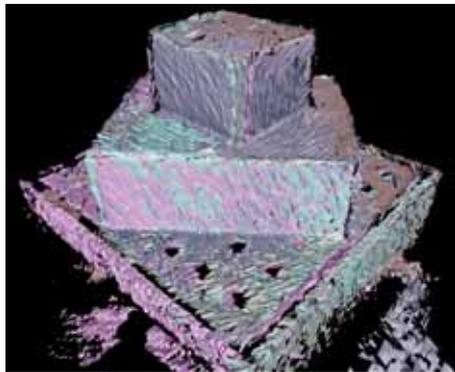


図 12 全てのデータを回転させて統合
Fig. 12 Integrated 3D data.

図 13 は計測対象の外見を示している。回転台を用いたリアルタイム計測により、穴の無い全周形状を獲得することが出来た。

6. 結 論

回転台を用いて全周の形状をリアルタイムに 3 次元計測するシステムを提案した。回転角は LED を回転台に設置することで、画像処理によりリアルタイムに計算される。推定した回転角を用いて、3 次元データを逐次回転・変換し、ボクセルに格納することで効率よく穴の無い全周形状を計測することが出

来た。また、実験の結果、LED を用いた画像処理による回転角の推定は十分高い精度で実現可能であることが分かった。ただし、実際の処理においては、事前に回転台の軸の推定が必要であり、これを高い精度で行うためには、様々な工夫が必要であった。これを常に、より安定して行うためには、今後の更なる研究が必要であろう。

文 献

- [1] “<http://www.cyra.com/>”.
- [2] “<http://www.minoltausa.com/vivid/>”.
- [3] M. Pollefeys, R. Koch, M. Vergauwen and L. V. Gool: “Hand-held acquisition of 3D models with a video camera”, Second International Conference on 3D Digital Imaging and Modeling, pp. 14–23 (1999).
- [4] F. Ryo and K. Hiroshi: “Interactive shape acquisition using marker attached laser projector”, International Conference on 3D Digital Imaging and Modeling 2003, pp. 491–498 (2003).
- [5] T. Masahiro, G. A. West, S. Venkatesh and T. M. Caelli: “Low-cost interactive active monocular range finder”, Computer Vision and Pattern Recognition 99, Vol. 1, pp. 444–449 (1999).
- [6] S. Rusinkiewicz: “Real-time 3D model acquisition”, ACM SIGGRAPH, pp. 438–446 (2002).
- [7] 井口, 佐藤: “3 次元画像計測”, 昭晃堂 (1990).
- [8] P. Besl and N. McKay: “A method for registration of 3-d shapes”, IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 14, pp. 239–256 (1992).
- [9] P. Neugebauer: “Geometrical cloning of 3d objects via simultaneous registration of multiple range images”, Int. Conf. on Shape Modeling and Application, pp. 130–139 (1997).
- [10] Y. Chen and G. Medioni: “Object modeling by registration of multiple range images”, Image and Vision Computing, Vol. 10, pp. 145–155 (1992).
- [11] K. Nishino and K. Ikeuchi: “Robust simultaneous registration of multiple range images”, Asian Conference on Computer Vision, pp. 454–461 (2002).
- [12] G. Turk and M. Levoy: “Zippered polygon meshes from range images”, SIGGRAPH'94, pp. 311–318 (1994).
- [13] W. Lorensen and H. Cline: “Marching cubes: a high resolution 3d surface construction algorithm”, SIGGRAPH'87, pp. 163–170 (1987).
- [14] H. Hoppe, T. DeRose, T. Duchamp, J. McDonald and W. Stuetzle: “Surface reconstruction from unorganized points”, SIGGRAPH'92, pp. 71–78 (1992).
- [15] 藤田, 蚊野, 吉田, 安田: “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”, システム制御情報学会論文誌, 第 15 巻, pp. 213–219 (2002).
- [16] “<http://td21.jp/>”.



図 13 計測対象の書棚
Fig. 13 Bookshelf.

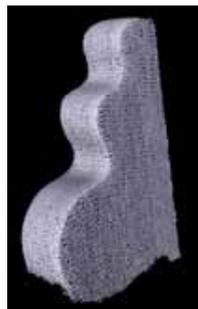


図 14 計測結果 1
Fig. 14 3D data.



図 15 計測結果 2
Fig. 15 Another view.