

自己キャリブレーションによる プロジェクタ・カメラ3次元計測システムを用いた簡易な全周形状獲得 手法

榎本 和史[†] 川崎 洋[†] 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: [†]{enomoto,kawasaki}@cgv.ics.saitama-u.ac.jp, ^{††}ryo-f@cs.hiroshima-cu.ac.jp

あらまし 本論文では、単眼ビデオカメラとプロジェクタを用いた自己キャリブレーションによる3次元計測システムを利用し、効率的に計測対象物の全周形状を獲得するシステムを提案する。この3次元計測システムは、計測対象にプロジェクタにより光パターンを投射し、これをカメラでキャプチャする空間コード化法のうち、事前のキャリブレーションを必要としない自己キャリブレーション方式によるものである。このような空間コード化法では、通常カメラの視点から見える部分の形状しか獲得することができない。そこで本論文では、計測対象物体を回転台に載せ回転させて複数回計測を行い、それを1つに統合することで全周形状を獲得する手法を提案する。統合する際、外部パラメータとして回転台の回転軸及び各計測での回転台の回転角度が必要となる。通常これらのパラメータは事前にキャリブレーションしておく必要があり簡易な計測の妨げとなる。そこでこれらのパラメータを事前にキャリブレーションすること無く計測データのみから推定することで、簡易な全周形状の獲得を実現する方法を提案する。

キーワード 3次元全周形状獲得, セルフキャリブレーション, 空間コード化法

Entire shape acquisition method using uncalibrated coded structured light system

Kazufumi ENOMOTO[†], Hiroshi KAWASAKI[†], 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: [†]{enomoto,kawasaki}@cgv.ics.saitama-u.ac.jp, ^{††}ryo-f@cs.hiroshima-cu.ac.jp

Abstract In this paper, we describe the system which efficiently acquires entire shape of the object by using the uncalibrated 3D measurement system which consists of a single video camera and a projector. The uncalibrated 3D measurement system, which projects an optical pattern from the projector to the object, captures the image sequence by the camera and recovers 3D shape by decoding the pattern and self-calibrating the extrinsic parameters, can acquire only the part of the shape at each scan. To acquire the entire shape of the object, we use a rotation table and scan the object several times by rotating it. For integration, the rotation angle and the rotation axis of the rotation table is required, which parameters are usually pre-calibrated. In this paper, we propose an efficient method which requires only captured images to estimate these parameters, and achieves simple system to acquire the entire shape of the object without pre-calibration.

Key words entire shape acquisition, self calibration, coded structured light system

1. はじめに

近年, CG 技術の発展とそのデータの需要増に伴い, 非常に

多くの3次元モデルが必要となってきた。従来, このような3次元モデルの構築方法としては, 計算機上でモデリングソフトを用いて人手で行われることが一般的であり, 非効率的で

あった．そのため，最近では3次元計測システムを用いて多くの現存する物体を計測し，3次元モデル化することが良く行われるようになってきており，様々なシステムが提案・実用化されている [1] [2]．特に，アクティブ方式の3次元計測システムはレーザやプロジェクタなどを利用することで，効率良く精度の高い3次元計測が行えるため，盛んに用いられている．

しかし，一方でアクティブ方式の3次元計測システムでは，一般に一度の計測では一方向から見える部分の形状しか計測することができず，取得できる3次元データは不十分なものである．そのため，異なる視点から獲得した複数形状の位置合わせを行うことで全周形状を獲得することが一般に行われている．このような複数形状の計測手法としては，複数台の計測装置を用いたり [3]，対象物を動かす等の手法 [4] がある．複数回計測して得られた複数の3次元データを，互いの相対的な位置情報を利用して位置合わせを行い全周形状に統合する．この時，相対的な位置情報を得るためにマーカーを用いたり，回転台を利用する手法が提案されている [5]．後者の場合には，回転台に計測対象を載せ，回転させることで形状の全周囲を計測することができ効率が良い．また，回転台の回転軸を事前に得られれば，回転角度を求めるだけで複数の3次元データ間の位置関係が推定できるため，形状の統合が容易となる [6]．

マーカーや回転台を用いて初期位置合わせした後の詳細な3次元データの位置合わせ手法としては，ICP [7] [8] や点とポリゴン間の距離による手法 [9] [10] がある．また，Neugebauer [8] や大石 [3] らにより複数形状の同時位置合わせ手法も提案されている．

本論文では，空間コード化法を用いた自己キャリブレーションによる3次元計測システム [11] と回転台を使用し，複数形状を取得し自動で統合することにより3次元全周形状を獲得するシステムを提案する．提案する3次元計測システムの大きな特徴として，事前のキャリブレーションを必要とせず，即座に計測を行えるという利点がある．これは，マーカー等を対象物体に設置することなく，複数形状を統合するための外部パラメータを計測データのみから自動推定することで実現される．また，推定結果の精度向上を実現する手法も同時に提案する．

2. システムの概要

本論文では3次元計測システムとして，自己キャリブレーションによる単眼カメラ・プロジェクタを用いたステレオシステムを用いる．このシステムでは，機器の位置関係などのパラメータは計測と同時に推定される．そのため，カメラ及びプロジェクタをそれぞれ動かしながら複数回形状を計測すると，回転・平行移動からなる外部パラメータも毎回変化し，それぞれ再推定される．そこで本論文では，複数回計測する際にはカメラとプロジェクタの相対関係を固定し，外部パラメータを不変とし，全てのデータを一度に入力とすることで同時復元を行う．これにより，統一されたスケール及び外部パラメータを得ることが出来る．回転台の軸や角度の推定は，回転台にキャリブレーション用のパターンを設置しておき，計測の際に得られるカメラ画像上でそのパターンを認識することで，形状復元と

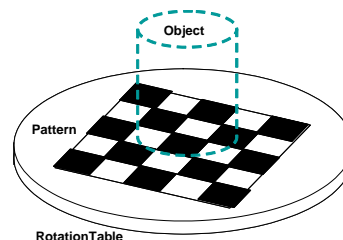


図1 キャリブレーションパターンを付与した回転台



図2 今回使用する回転台

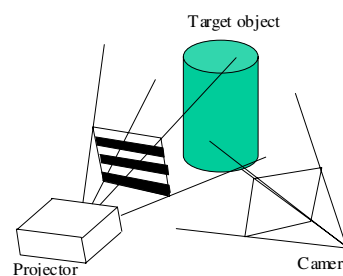


図3 3次元計測システムの構成

同時に行われる．通常このような目的には，市松模様等のキャリブレーションパターンがよく用いられるが，パターンを計測物体に精度よく設置するには手間がかかり，またパターンが推定に十分な範囲撮影されるためには一定以上の大きさでなくてはならない (図1)．そこで本手法では，回転台の縁に少ない特徴点を取り付けて，これを用いて回転軸・回転角度を推定を行うことにする (図2)．

2.1 システムの構成

本システムは，単眼カメラ・プロジェクタ，各1台ずつで構成される (図3)．計測は対象物体にプロジェクタとカメラを向けプロジェクタから光パターンを投影し，これをカメラで撮影し解析する，自己キャリブレーションによる空間コード化法により行われる．

また複数の形状を計測する際には，対象物体を回転台に載せて計測することにより，全周の形状を取得する．本手法における回転台には以下のような特徴がある．

- 回転は手動操作により行う
- 回転する角度の自由度に制限を設けない
- 回転角度は計測結果から自動で計算する

また，特徴点としてはLEDを用いることとした．これにより安定した特徴点の検出が可能となる．実際に作成した回転台を図2に示す．

2.2 計測手法

3次元全周形状のための計測手順は次のとおりである．

- (1) 回転台に計測対象物体を載せ、それら全てが計測できるようにカメラとプロジェクタを設置する
 - (2) 回転台の回転を完全に停止させ、その視点での計測を行う
 - (3) 回転台を回転させる
 - (4) (2),(3) を繰り返し、複数視点における入力データセットを取得する
 - (5) 全ての入力データセットを用いて形状を同時復元する
 - (6) 同じ入力データセットから回転軸・角度を推定する
 - (7) (5),(6) の結果を用いて全周形状を作成する
- カメラ、プロジェクタの配置は任意であるが、計測中においてはその配置を固定して動かさないものとする。

3. 回転台の軸及び角度の自動推定手法

本システムで得られるデータは、カメラで撮影した画像と、提案手法により同時復元した距離画像である。これらを用いて以下の手順による回転台の平面及び角度を自動推定する。

- (1) 特徴点の3次元座標の獲得
- (2) 回転平面推定
- (3) 回転台の軸推定
- (4) 回転角度の推定

3.1 特徴点の3次元座標の獲得

これは以下の二段階の処理により行われる。

- (1) 撮影画像上からのLED座標の検出
- (2) 対応する3次元座標を距離画像から取得

最終的なデータは、カメラ座標系における3次元点群として得られる。以下それぞれの処理の概要を述べる。

3.1.1 撮影画像上からのLED座標の検出

計測した撮影画像から回転台に取り付けられたLED部分を検出する。画像の走査対象ピクセルがLEDを構成する部分であるか否かの判定は予め設定した閾値によって判断する。実際にはRGBからHSV形式に変換し、閾値による判定を行う。明度によりLED領域を判定し、色相により個々のLEDを識別する。識別されたLED領域の重心を画像上のLED座標とする。

3.1.2 対応する3次元座標を距離画像から取得

撮影画像と距離画像は1対1で対応しているため、LEDの画像上の2次元座標から即座に3次元座標を得ることが出来る。ところが、今回使用した計測システムは3次元復元が空間コード化法に基づいているため、自ら発光する部分の形状取得は出来ない。そのため、単純に撮影画像に対応する距離画像を参照しても、LED部分の3次元座標を取得できない(図4)。

そこで、対応する3次元座標の取得は、撮影画像と同時に計測した距離画像からではなく、他の時点で計測した距離画像を参照し、対応する3次元座標を取得するものとした。しかし、このとき取得できた3次元座標が必ずしもLED部分の3次元座標になることは保障されない。例えば、図5のように計測物体にLED部分が隠されたとき、物体表面の座標が取得されてしまう。そのため、全ての計測結果における3次元座標を取得しその分散が一定以下のときのみ、特徴点の3次元座標が取得できたものとし、以下の処理で用いることとした。



図4 LED部分の形状の欠損(赤丸で囲った部分がLEDのある位置)

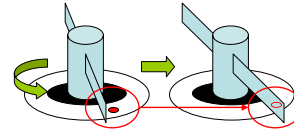


図5 LED部分が物体形状により隠された状態

3.2 回転台平面推定

LEDの3次元点群に平面あてはめを行い、平面の法線ベクトル及び平面方程式を求める。本論文では、LEDの3次元点群に対し、主成分分析(PCA)を行い、これにより平面の法線ベクトルを得る。

また、この手法ははずれ値に敏感なため、はずれ値が混入すると推定結果が真値とは異なってしまう。そのため、はずれ値に対する処理を以下のように行う。

- (1) LED点群に対し、PCAによる平面あてはめを行う
- (2) 推定平面と個々の3次元点との距離を計算し、全ての値が一定以下であれば処理を終了する
- (3) 値が一定以上の場合には最も距離の大きい点を除き、収束するまで(1)(2)を繰り返す

3.3 回転台の軸推定

3.2で得られた3次元点群を任意の平面に対して正射影し、この点群に対し、楕円あてはめを行い回転中心座標を推定する。この処理においても、平面あてはめと同様に以下のはずれ値対策処理を行う。

- (1) LED点群に対し、最小自乗法による楕円あてはめを行う
- (2) 推定した楕円と個々のLED点との距離を計算し、全ての値が一定以下であれば処理を終了する
- (3) 値が一定以上の場合には最も距離の大きい点を除き、収束するまで(1)(2)を繰り返す

3.2で推定した平面法線ベクトルと、ここで推定した中心座標から、回転台の回転軸が決定できる。

3.4 LED座標を用いた回転角度の推定

まずLED点群のうち任意の1点を基準となる点として定める。この点の回転角度を0度とし、それ以外の点についてこの基準点からの回転角度を求める。このとき角度の値域を $-180^\circ \sim 180^\circ$ とした。この角度は、回転中心から基準点へのベクトル及び、回転中心から対象となるLED点へのベクトルとの内積計算により計算出来る。

LEDは計測対象物体により遮蔽されることがあるため、図2

に示してあるように、複数個設置してある。それぞれの LED は異なった色にしてあるため、容易に識別可能である。本システムでは回転台の LED は 90 度間隔で配置されているため、常に最低 2 個の LED を撮影することができ、従って全ての計測において回転角を推定することが出来る。また複数の LED が同時に計測される場合には、これらの平均を最終的な角度として用いる。

3.5 剛体変換による 3 次元全周形状の取得

算出した回転角度と推定した回転軸から回転行列を作成する。

ここで回転軸を $\mathbf{a} = (a_0, a_1, a_2)^T$ 、回転軸を中心とした回転角度を θ 、 $c = \cos \theta$ 、 $s = \sin \theta$ としたとき、

$$\begin{pmatrix} c + a_0^2(1-c) & a_0a_1(1-c) - a_2s & a_0a_2(1-c) + a_1s \\ a_1a_0(1-c) + a_2s & c + a_1^2(1-c) & a_1a_2(1-c) - a_0s \\ a_2a_0(1-c) - a_1s & a_2a_1(1-c) + a_0s & c + a_2^2(1-c) \end{pmatrix} \quad (1)$$

で、回転行列を算出する。

求めた回転行列により、それぞれ視点ごとの形状を剛体変換し、形状を回転させ、同一座標空間へと変換する。これにより、対象の全周 3 次元形状が獲得できる。

4. ロバストな推定手法

4.1 除外した特徴点の再検出

3 章で提案した手法において、特徴点の 3 次元座標の獲得や、回転軸・角度の推定時に、はずれ値に対する処理を行った。しかし、計測対象物体の形状が複雑で回転台の LED 部分に形状がかぶることが多くなると、有効となる LED 点が少なくなり、回転軸・角度の正確な推定が困難となる。特に、効率的な計測のためにはなるべく少ない回数で計測で全周形状の獲得が望ましいが、その場合さらに有効 LED 点数が減少してしまい、精度のよい 3 次元全周形状を獲得することが困難となる。そこで、一度推定した平面の情報を用いて特徴点の再検出を行い、精度を向上する手法を提案する。

3.1 における有効点の決定方法は、ある画像上の LED 点における 3 次元情報を全て集計し、その分散が一定以下のものを採用するというものであった。この場合、計測回数が少なく LED 点における有効な 3 次元サンプル数が非常に少ないケースでは、はずれ値の影響が強くなり現れ無効な LED と判定されることが多くなる。そのため、一度平面推定を行い、その平面に近い 3 次元位置にある無効な LED 点を有効な LED 点として復活させることで、より多くの LED 点を再検出する。

実際の手順を以下に示す。

- (1) 3.1 で述べた通常の特徴点検出処理を行う
- (2) 取得した 3 次元点群に平面あてはめを行う
- (3) 3.1 で無効と判定された LED 点から任意の 1 つを選択する
- (4) 選択した LED の画像上の座標に対応して得られる複数の 3 次元座標の中から、(2) で推定した平面にのっていないかを確認し、あればそれをその LED の 3 次元座標として復活させる。無ければその LED は無効のままとする

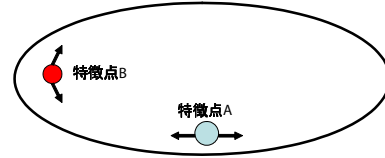


図 6 撮影画像上での特徴点座標の誤差

(5) 3.1 の処理で無効と判断された LED 点が無くなるまで (3),(4) を繰り返す

4.2 回転角度のロバスト推定

回転台には 4 つの LED が取り付けられているため、単純な方法としては、各視点の回転角度を算出する際に、それら 4 つの LED の推定回転角度全ての平均を取ることが考えられる。しかし、それぞれの LED の推定回転角度の精度を考慮に入れていないため、どれか 1 つの LED が大きく誤差を含むものであった場合、最終的な結果に大きく影響を与えてしまう。

推定回転角度の精度は、LED の 3 次元座標の精度に依存する。この LED の 3 次元座標は計測の結果得られる距離画像から求めているが、画像上における LED の位置によりその精度は大きく変化する。回転角度を推定するための特徴点の検出は、回転台の回転方向に沿って図 6 のように行われるため、角度誤差も同じ方向に発生する。図 6 を計測結果の 3 次元点を用いて、視点を変えて表現したものが、図 7 である。3 次元点が特徴点 A に沿う方向には密に、B に沿う方向では粗にしかないと分かる。

ここで撮影画像上の点を (u, v) 、それに対応する 3 次元点を (x, y, z) とし、カメラの光軸方向と回転台平面とのなす角を θ 、 u 軸方向と回転台平面とのなす角を γ とする。このとき画像上での移動量 Δd は $\Delta d = \sqrt{\Delta u^2 + \Delta v^2}$ となり、これに対応する 3 次元座標での移動量 Δl は $\Delta l = z/f \times \sqrt{(\Delta u/\cos \gamma)^2 + (\Delta v/\sin \theta)^2}$ となる。通常の計測では角度 γ はほぼ 0 度に設定するため、図 6 の特徴点 A のように回転台の正面における微小移動量は $\Delta l \approx z/f \times \Delta u$ と近似でき、特徴点 B のように回転台のへりにおける微小移動量については $\Delta l \approx z/f \times \Delta v/\sin \theta$ となる。これにより特徴点 A に比べ特徴点 B は θ が 0 度に近いほど画面上での単位微小移動量に対する 3 次元座標での移動量が大きくなり、誤差の影響を受けやすくなることが分かる。

このような誤差の影響を最小限にとどめるため、各 LED の回転角度を推定した後、各 LED の精度の信頼度を $\Delta d/\Delta l \times f/z$ と定義し、この信頼性にもとづいた重みを加えた加重平均によりそれぞれの視点の回転角度を算出する。これにより事前確率に基づいた信頼性の高い角度推定を行うことが出来る。

手順は次のとおりである。

- (1) それぞれの視点での各 LED の回転角度を推定する
- (2) それぞれの LED 点に対し、撮影画像上の位置により点の信頼度を算出する
- (3) LED の信頼度を重みとして、加重平均により視点ごとの回転角度を決定する

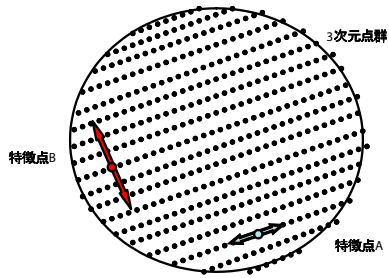


図 7 カメラ座標系での特徴点座標の誤差

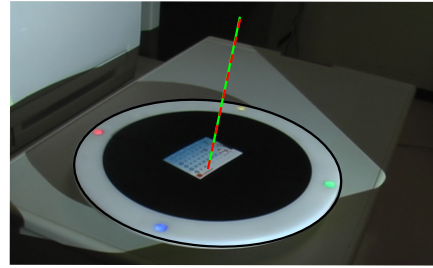
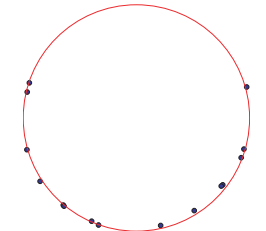


図 9 回転軸推定結果 (赤破線が真値, 緑線が推定値)



(a) 上方から見た LED 位置



(b) 側面から見た LED 位置

図 8 カメラ座標での LED 位置

表 2 有効点数結果

	(有効点)	× (はずれ値)
ロバスト処理前	17	12
ロバスト処理後	21	8

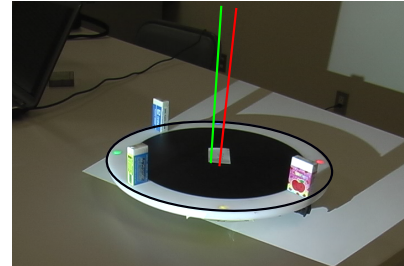


図 10 ロバスト処理による回転軸推定結果 (赤線がロバスト処理, 緑線がロバスト未処理による結果)

5. 実験

5.1 実験内容

回転台に対象物体をのせ、回転をさせながら複数回計測し、自動で全周 3 次元形状に統合する実験を行った。実験は以下の 3 ステップに分けて行う。

- LED の 3 次元座標推定
- 回転軸推定
- 回転角推定

5.2 LED の 3 次元座標推定

LED の 3 次元座標推定は、撮影画像上から LED 座標を検出し、それに対応する 3 次元座標を取得することで行われる。6 枚の撮影画像から画像上の LED 座標を検出し、その 3 次元座標の推定を行った結果を図 8 に示す。赤線で示してあるのが円あてはめの結果である。

図 8(a) を見ると、LED 位置は回転台の回転にあわせて円状に並んでいることがわかる。同様に 8(b) を見ると、LED が回転台の平面上に存在していることがわかる。また、偏差によりはずれ値を除いたため、大きく円や線上から外れている点の無いことが分かる。

5.3 回転軸推定結果

回転台に計測物体を置き、回転させながら 4 回計測を行った結果を図 9 及び表 1 に示す。ここで赤破線が真値、緑線が推定値である。また、真値としては回転台のみを用いて 18 回計測を行った結果を用いた。図及び表より高い精度で回転軸の推定が出来ること分かる。

5.3.1 ロバストな推定処理を加えた結果

ロバストな処理を加える前後での軸推定結果の比較を行った。ここでは意図的にはずれ値を発生させるために、図 10 のように回転台 LED 同周円部分に物体を置いた状態で、計測を

表 4 回転角度算出結果

データ番号	真値	ロバスト前	ロバスト前誤差	ロバスト後	ロバスト後誤差
00	0.00	-2.61	-2.61	-2.09	-2.09
01	-15.50	-18.61	-3.11	-18.49	-3.01
02	-66.60	-71.83	-5.23	-71.30	-4.70

行った。

ロバストな処理を加える前後での有効点の数を表 2 に示す。有効点数は、ロバスト処理前 17 点からロバスト処理後 21 点となり、4 点有効点が増えている。

また、回転軸推定の結果を図 10 及び表 3 に示す。ロバスト処理前の推定回転軸が真値から大きくずれているのに対し、ロバスト処理後の推定回転軸では、十分に真値に近い推定の実現が出来ること確認できる。

5.4 回転角推定結果

推定した回転軸と LED 点から、各視点ごとの回転角度を算出した。実験では直方体の物体を計測対象物体とし、箱の側面の辺が各視点ごとにどれだけずれているかを調べることで、回転角度の精度検証を行った。本実験では 3 回、回転計測を行った。計測結果を表 4 及び図 11 に示す。図 11 の (a),(c),(e) は回転処理前の状態を表し、(b),(d),(f) は回転処理後の状態を表す。表 4 及び図 11 より、精度の良い推定が出来ること分かる。またロバスト推定によりさらに精度が向上していることが確認出来る。

5.5 剛体変換による 3 次元全周形状取得結果

回転軸及び回転角度を自動推定し、その結果から各視点の形状を統一した座標系に変換することで全周形状を取得した。結果を図 12 に示す。正しく回転軸を推定することで、全周形状が獲得できていることが分かる。

表 1 回転軸推定結果

	回転中心			回転平面法線ベクトル		
回転台のみ	-0.271×10^{-1}	-0.732×10^{-1}	-0.903	0.101	0.824	0.558
回転台+計測物体	-0.276×10^{-1}	-0.734×10^{-1}	-0.904	0.100	0.825	0.556

表 3 ロバスト処理による軸推定比較結果

	回転中心			回転平面法線ベクトル		
ロバスト処理前	0.506×10^{-1}	0.928	0.368	0.205×10^{-1}	-0.990×10^{-1}	-1.27
ロバスト処理後	0.750×10^{-1}	0.932	0.354	0.243×10^{-1}	-0.981×10^{-1}	-1.29

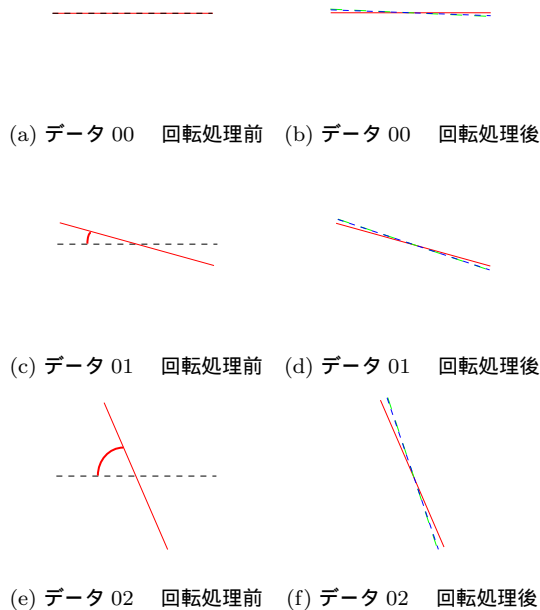


図 11 回転角度の誤差

(黒線：0度の基準線，
赤線：正確な回転角度，
緑線：ロバスト処理前回転角度，
青線：ロバスト処理後回転角度)

6. まとめ

本論文では、自己キャリブレーションによるプロジェクタ・カメラ 3 次元計測システムと回転台を用いた簡易な全周形状獲得手法を提案した。提案した手法では、計測データからの情報のみを用いて形状統合のためのパラメータを全て推定可能なため、事前のキャリブレーションやマーカーの貼り付けなどが不要で、効率よく簡易に全周形状を計測することが可能である。実験を行ったところ、高い精度で全周形状を獲得することができ、手法の有効性を確認することが出来た。また、提案したロバスト推定手法により精度を向上させるのにも成功した。今後は、LED などの特徴点を予め用意することなく、対象物体の特徴点を検出することで回転パラメータを推定する、より利便性の高いシステムを構築する予定である。

文 献

- [1] CYRAX: “<http://www.cyra.com/>”.
- [2] Vivid: “<http://www.minoltausa.com/vivid/>”.
- [3] 大石, 中澤, 池内: “インデックス画像を用いた複数距離画像の高速同時位置合せ”, 電子情報通信学会論文誌, vol.J89-D, pp.

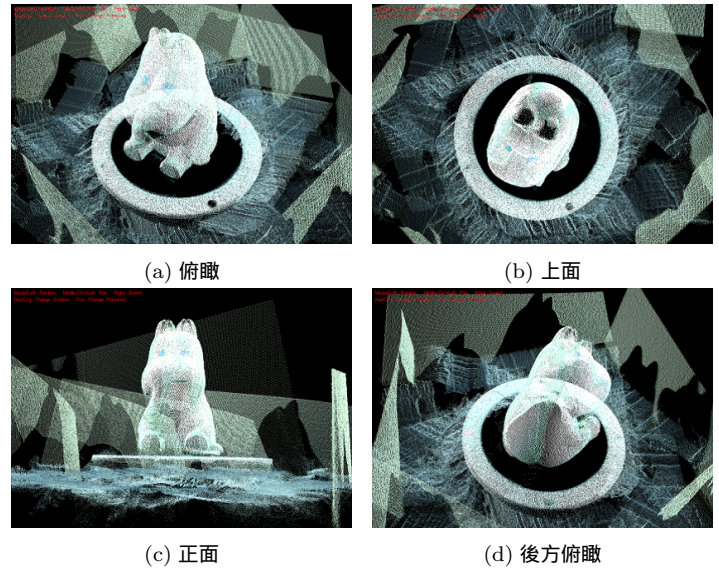


図 12 統合結果

- 513–521 (2006).
- [4] S. Rusinkiewicz: “Real-time 3D model acquisition”, ACM SIGGRAPH, pp. 438–446 (2002).
- [5] CANON 3D Software Object Modeller: “<http://www.cre.canon.co.uk/3dsom/>”.
- [6] 角野, 川崎, 大沢, 古川: “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”, 画像の認識・理解シンポジウム (MIRU2004), vol.2, pp. 217–221 (2004).
- [7] P. Besl and N. McKay: “A method for registration of 3-d shapes”, Vol. 14, pp. 239–256 (1992).
- [8] 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).
- [9] Y. Chen and G. Medioni: “Object modeling by registration of multiple range images”, Image and Vision Computing, Vol. 10, pp. 145–155 (1992).
- [10] M. Wheeler, Y. Sato and K. Ikeuchi: “Consensus surfaces for modeling 3d objects from multiple range images”, Proc. 6th Int. Conf. Comp. Vision, pp. 917–924 (1998).
- [11] “Uncalibrated multiple image stereo system with arbitrarily movable camera and projector for wide range scanning”, Proceedings of IEEE International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling, pp. 302–309 (2005).