

3次元物体全形状復元のための レンジセンサと可動雲台とのキャリブレーション

白川 智也[†] 杉本 晃宏^{††} 岡谷 (清水) 郁子^{†††} 井宮 淳^{††††}

[†] 千葉大学 自然科学研究科

^{††} 国立情報学研究所

^{†††} 東京農工大学 工学部 情報コミュニケーション工学科

^{††††} 千葉大学総合メディア基盤センター

概要 物体の3次元全形状を復元するためには、物体を多視点から計測することが必要になる。そのために、コンピュータ制御可能な雲台とレンジセンサで構成される計測システムを構築する。本論文では、物体の3次元全形状を復元するための、計測システムのキャリブレーション手法を提案する。また、この精度を多角的に評価する実験を行う。なお、本論文においてキャリブレーションとは、レンジセンサと可動雲台がもつ座標系間の座標変換を推定することを意味する。

Calibration of a System with a Range Sensor and a Motorized Stage for 3D Full-Shape Reconstruction

Tomoya Shirakawa[†] Akihiro Sugimoto^{††} Ikuko Shimizu Okatani^{†††} Atsushi Imiya^{††††}

[†]School of Science and Technology, Chiba University

^{††}National Institute of Informatics

^{†††}Dept. of Computer, Information and Communication Sciences,
Tokyo University of Agriculture and Technology

^{††††}IMIT, Chiba University

Abstract For 3D full-shape reconstruction, we develop a measuring system that consists of a range sensor and a motorized stage, where the motorized stage can be controlled through a computer. We then propose a calibration method for estimating the transformation between the coordinate system of the range sensor and that of the motorized stage. We also present experiments that evaluate this calibration method from various points of view.

1 はじめに

コンピュータビジョンなどの分野では、物体の3次元形状モデルを自動的に構築する研究が盛んに行われている [1]。3次元形状モデルは、例えば、インターネットにおけるショッピングの商品の提示、建造物の形状記録、仮想現実における物体表示、などに用いられる。インターネットにおけるショッピングでは、消費者が商品を選ぶ際に実物を手にとって見るができない。しかし、商品の3次元形状と色情報が分かれば、消費者に任意の方向からその商品を見た画像を提供することができる。また、近年、大仏のような歴史的建造物の3次元形状データを電子的に保存し、デジタルアーカイブとして後世に残そうというプロジェクトも進められている [2], [3]。他に、近年のコンピュータゲームなどのめざましい発展に伴い、仮想現実における、よりリアルな物体表示の必要性が増してきている。

物体の3次元形状を直接計測する装置として、Micro Scribe などの接触型の装置と、レンジセンサなどの非接触型の装置が挙げられる [5], [4], [7]。接触型の装置では、物体中の復元したい点を1点1点計測していく。この装置は、その扱いが容易で、3次元情報を復元したい点を自由に選択できるという長所がある。その反面、計測に莫大な労力と時間を要し、得られるデータが粗く、誤差が大きいといった短所がある。これに対して、非接触型であるレンジセンサは対象にレーザスリット光を照射し、そのレーザスリット光の像をカメラで観測し、スリット光の写っている物体表面上の点の3次元座標を三角測量の原理で計算する。レーザを使用しているため、レーザを吸収するような表面特性をもつ物体の形状を復元することができない。しかし、密な3次元データを容易に得ることができるという長所をもつ。

そこで、本稿では、物体の3次元全形状復元を目指して、レンジセンサと可動雲台からなる計測システムを構成する。ここで可動雲台とは、コンピュータで回転や並進運動を正確に制御できる雲台である。本計測システムを用いた物体の全形状復元の手続きは次のようになる。まず、可動雲台に物体を載せ、コンピュータで雲台を制御し、物体を複数の方向から撮影し、距離画像を得る。次に、取得された距離画像を重ね合わせて、物体の全形状を復元する。このとき、複数の視点から得られた距離画像は、それぞれの視点の位置と姿勢に依存する座標系で表されているため、各距離画像を、基準となる座標系で表現する必要がある。このためには、レンジセンサと可動雲台の基準位置との関係を求めることが必要となる。本稿では、これをレンジセンサと可動雲台のキャ

リブレーションと呼び、その手法を提案する。そして、提案手法の精度を多角的に評価する実験を行う。

2 レンジ座標系と雲台座標系

2.1 システム構成

本稿で構成する計測システムは、レンジセンサと可動雲台からなる。レンジセンサとして、LDI社製のPS-3300Cを用いる。また、可動雲台は、中央精機株式会社製の6軸コントローラQT-CN6、並進ステージALSシリーズ、回転・傾斜ステージARS/ATS/ATDシリーズを使用する。扱う可動雲台がもつ自由度は、並進方向に1、回転方向に2で、合計3である。

レンジセンサと可動雲台に対して、図1(a), (b)に示すように、2通りの配置を用意する。図1(a)は、可動雲台の並進方向とレンジセンサの視線方向とが直交するような配置である。以後、このような配置を直交配置と呼ぶ。一方、図1(b)は、可動雲台の並進方向とレンジセンサの視線方向とが平行になるような配置である。以後、このような配置を平行配置と呼ぶ。なお、図の左側がレンジセンサ、右側が可動雲台である。

多視点から物体を計測し、得られた距離画像を重ね合わせて3次元全形状を復元するためには、各視点に依存する座標系で表された距離画像を、基準となる座標系に変換する必要がある。本計測システムでは、可動雲台をコンピュータで制御しているため、レンジセンサと可動雲台の基準位置(初期位置)との相対的な位置関係を知れば、全ての距離画像を雲台の初期位置の座標系で表すことができる。そこで、可動雲台を制御し、対象を多視点から計測し、その3次元座標と可動雲台の制御量から、可動雲台とレンジセンサのもつ座標系をキャリブレーションする。



(a) 直交配置



(b) 平行配置

図 1: レンジセンサと可動雲台からなる計測システム

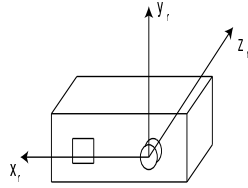
2.2 レンジ座標系と雲台座標系

レンジセンサを図2(a)に示す。レンジセンサは、レーザスリット光の像をカメラで観測し、スリット光の写っている物体表面上の点の3次元座標を三角測量の原理で計算する。従って、得られる3次元座標はレンジセンサを中心とする座標系で表されている。このレンジセンサがもつ座標系を、図2(b)に示す。この座標系をレンジ座標系と呼び、 x_r - y_r - z_r と表す。

図3(a)に可動雲台を示す。可動雲台の初期位置を基準とする座標系を、本稿では雲台座標系と呼ぶ。この雲台座標系は、図3(b)に示すように、初期位置にある可動雲台の回転盤の中心に、その原点をもつように x_u - y_u - z_u と定義する。この可動雲台は x_u , z_u 軸回りに回転することができ、雲台座標系の回転軸や回転方向を図4に示すように定義する。ここで、 θ は x_u 軸回りの回転角を表し、 ϕ は z_u 軸回りの回転角を表す。また可動雲台は、雲台座標系の z_u 軸に沿って並進運動する。

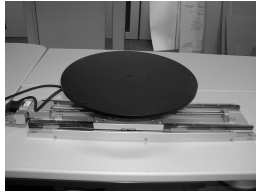


(a) レンジセンサ

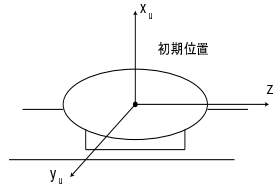


(b) レンジ座標系

図2: レンジセンサとレンジ座標系



(a) 可動雲台



(b) 雲台座標系

図3: 可動雲台と雲台座標系

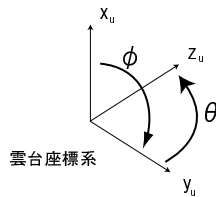


図4: 雲台座標系と回転角

2.3 レンジ・雲台座標変換

レンジ座標系と雲台座標系との座標変換は、回転行列 R 、並進ベクトル t で表されるとする。以後、この座標変換をレンジ・雲台座標変換と呼ぶことにする。レンジ・雲台座標変換を求めておくことにより、レンジ座標系で表されている各距離画像を、基準となる雲台座標系に変換し、異なる視点から得られた距離画像を重ね合わせて物体の全形状を復元することができる。レンジ・雲台座標変換は、可動雲台にキャリブレーション用の物体を載せ、可動雲台を制御していろいろな位置からこれを計測し、物体上の同一の点のレンジ座標系での3次元座標値の関係からキャリブレーションする。

雲台を制御したときのレンジ座標系での座標値と、その雲台座標系での座標値の関係について述べる。

j を雲台制御回数とする。そして、 j 回雲台制御後の物体表面上の i 番目の点を p_{ij} と表す。図5(a)に示すように、例えば、計測点 i の雲台初期位置状態の点は p_{i0} と表され、雲台制御を加えていくと p_{i1} , p_{i2} のように表される。点 p_{ij} の座標を、レンジ座標系では $\mathbf{a}_{ij} := (a_{ij}, b_{ij}, c_{ij})^\top$ 、雲台座標系では $\mathbf{b}_{ij} := (x_{ij}, y_{ij}, z_{ij})^\top$ と記述する。レンジ座標系と雲台座標系の関係、および、2つの座標系で表された計測点の座標を図5(b)に示す。レンジセンサで得ることができる座標はレンジ座標 \mathbf{a}_{ij} のみであり、雲台座標 \mathbf{b}_{ij} は未知である。レンジ座標系を雲台座標系に座標変換することにより、物体の3次元座標を雲台座標 \mathbf{b}_{ij} で表すことができる。

計測点 i を考える。雲台座標系とレンジ座標系との関係は、回転行列 R 、並進ベクトル t を用いて、次のように表すことができる。

$$\mathbf{b}_{ij} = R\mathbf{a}_{ij} + t. \quad (1)$$

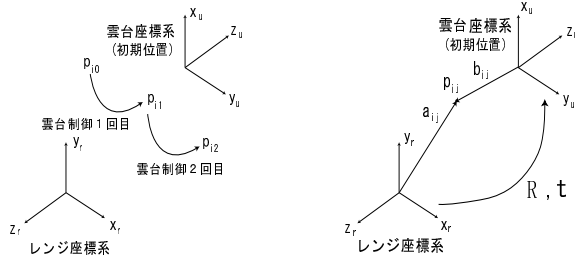
A を次式のように定義する。

$$A := \begin{pmatrix} R & t \\ \mathbf{0} & 1 \end{pmatrix}. \quad (2)$$

$\tilde{\mathbf{a}}_{ij} := (a_{ij}, b_{ij}, c_{ij}, 1)^\top$, $\tilde{\mathbf{b}}_{ij} := (x_{ij}, y_{ij}, z_{ij}, 1)^\top$ と定義すると、式(1)は

$$\tilde{\mathbf{b}}_{ij} = A\tilde{\mathbf{a}}_{ij} \quad (3)$$

と書き換えることができる。本稿におけるキャリブレーションとは、レンジ・雲台座標変換 A を求めることに相当する。



(a) 計測点の移動 (b) レンジ座標系と雲台座標系
図 5: レンジ座標系と雲台座標系

3 雲台制御によるレンジセンサと可動雲台とのキャリブレーション

3.1 雲台制御による制約式の導出

j 回目の雲台制御の回転量や並進量を表す行列を、雲台制御行列 B_j と記述する。 B_j は j 回目の雲台制御を表す回転行列 R_j と並進ベクトル t_j を用いて、次のように表すことができる。

$$B_j := \begin{pmatrix} R_j & t_j \\ \mathbf{0} & 1 \end{pmatrix} \quad (j = 1, 2, \dots). \quad (4)$$

可動雲台は x_u 軸と z_u 軸回りに回転制御できる。したがって、雲台制御行列の回転成分 R_j は、 x_u 軸回りの回転角 θ_j 、 z_u 軸回りの回転角 ϕ_j を用いて

$$R_j = \begin{pmatrix} \cos \phi_j & -\sin \phi_j & 0 \\ \cos \theta_j \sin \phi_j & \cos \theta_j \cos \phi_j & -\sin \theta_j \\ \sin \theta_j \sin \phi_j & \sin \theta_j \cos \phi_j & \cos \theta_j \end{pmatrix} \quad (5)$$

と表すことができる。また、雲台は z_u 軸方向に並進制御ができるため、雲台制御行列の並進ベクトルを $t_j = (t_{j1}, t_{j2}, t_{j3})^\top$ とおく。なお、可動雲台は雲台座標系の z_u 軸にそって並進運動するので、常に $t_{j1} = 0, t_{j2} = 0$ である。式 (4) に、 R_j と t_j を代入することにより、 B_j が求まる。

計測点 i の雲台初期位置 ($j = 0$ のとき) におけるレンジ座標系と雲台座標系との関係式として、次式が成立する。

$$\tilde{\mathbf{b}}_{i0} = A\tilde{\mathbf{a}}_{i0}. \quad (6)$$

j 回目の雲台制御を加えると、式 (6) は、

$$B_j \cdots B_1 \tilde{\mathbf{b}}_{i0} = A\tilde{\mathbf{a}}_{ij} \quad (7)$$

となる。ただし、 $\tilde{\mathbf{a}}_{ij}$ は j 回雲台制御後の距離画像から得られる、計測点 i のレンジ座標である。式 (6)、(7) よ

り、次式を得る。

$$B_j \cdots B_1 A\tilde{\mathbf{a}}_{i0} - A\tilde{\mathbf{a}}_{ij} = 0. \quad (8)$$

式 (8) が、雲台を制御し、対象上の同一の点を計測したときに 1 点の対応から得られる A に関する制約式である。

3.2 必要な計測点と雲台制御回数との関係

レンジ・雲台座標変換の推定すべき未知数は、 R の 9 要素、 t の 3 要素の合計 12 要素である。 R は $R^\top R = I$ (I は単位行列) を満たすので、 R の自由度は 3 である。 $R^\top R = I$ は R の要素に関する非線形拘束になっているが、非線形拘束下では、良い初期値を与えないと、局所解に陥ってしまう可能性があり、これを考慮するのは困難である。そこで、 R が満たす $R^\top R = I$ を無視し、 R の 9 個の要素は全て独立であると仮定し、線形最小二乗法を用いて R と t を推定する。推定された R は正規直交行列になっているとは限らないので、直交性を満たすように R を修正することで、回転行列を推定するというアプローチをとる。

線形最小二乗法では、未知数に対する制約式の数が重要である。1 回の雲台制御で式 (8) の第 1 成分、第 2 成分、第 3 成分から 3 つの制約式が得られる。なお、左辺の第 4 成分は恒等的に 0 となる。制約式数が未知数以上になるように、計測点と雲台制御回数を多くする必要がある。表 1 に A の推定に必要な計測点数と雲台制御回数の関係を示す。

表 1: 必要な計測点数と雲台制御回数との関係

計測点数	1	2	3	4 以上
雲台制御回数	4	2	2	1

3.3 レンジ・雲台座標変換の推定

レンジ・雲台座標変換 A を推定するには、制約式 (8) の左辺と右辺との差の二乗ノルムの i と j に関する和

$$\sum_{i,j} \| B_j \cdots B_1 A\tilde{\mathbf{a}}_{i0} - A\tilde{\mathbf{a}}_{ij} \|^2 \quad (9)$$

を最小にする A を考えよう。本稿では、線形最小二乗法 [6] により、 A の推定を行う。すなわち、非線形条件を無視して推定を行う。そのため、 A の推定後に得られた回転行列に対応する部分を正規直交行列の性質を満

たす回転行列へと修正する必要があるが、ここでは [10] に従って修正することにする。

正規直交行列である回転行列 R は、以下の式を満たす。

$$R^T R = I. \quad (10)$$

線形最小二乗法により得られた行列 R を、式 (10) を満たす行列のうち、Frobenius norm のもとで R から最も近い行列 \hat{R} で近似する。すなわち、 \hat{R} は、式 (10) を満たし、かつ、

$$\min_{R'} \|R' - R\|_F \quad (11)$$

を達成する R' である。

いま、 R を特異値分解すると次のようになったとする、

$$R = USV^T. \quad (12)$$

ただし $S := \text{diag}(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3)$ である。このとき $Z := V^T \hat{R}^T U = \{z_{ii}\}$ とおくと、 Z は直交行列であるので、

$$\text{trace}(\hat{R}^T R) = \sum_{i=1}^3 z_{ii} \sigma_i \leq \sum_{i=1}^3 \sigma_i \quad (13)$$

が成り立つ。式 (13) で等号が成り立つのは $\hat{R} = UV^T$ としたときである。したがって、求める \hat{R} は $\hat{R} = UV^T$ となる。

4 実験

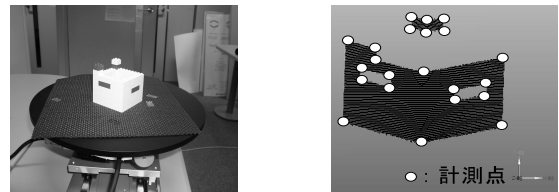
使用したレンジセンサは、最大視野角度が 30° である。レンジセンサからの距離が 20cm から 75cm の範囲において、焦点の合った距離画像が取得できる。

本稿では、3種類の実験によってキャリブレーションの精度を評価した。1番目の実験では、レンジ座標系と雲台座標系とのキャリブレーションに用いる制約式の数を固定し、計測点数と雲台制御回数を変化させて、精度を評価した。2番目の実験では、キャリブレーションのために用いる対象とレンジセンサとの距離のちがいによる精度を評価した。3番目の実験では、選択した計測点の分布のちがいによる精度を評価した。3種類の実験は、次の手順に従って行った。

1. 図 6(a) に示す対象 (一辺約 8cm) を可動雲台に乗せ、レンジセンサで撮影する (レンジセンサから対象までの距離はおよそ 40cm であった)。
2. レンジセンサの焦点が合う範囲内で、 θ が $\pm 10^\circ$ 以内、 ϕ が $\pm 5^\circ$ 以内の雲台制御をし、対象の一辺の長さの 2 割から 3 割の長さの並進運動をする。そして、移動した対象をレンジセンサで撮影する。

3. 図 6(b) に示すように、取得した距離画像から特徴的な計測点を手動で選択し、レンジ座標系で表された 3次元座標と雲台制御量から、レンジ・雲台座標変換 A を推定する。

4. 推定された A に基づき、レンジ座標系で表された 2 枚の距離画像 (雲台初期位置と 1 回の雲台制御後の位置での距離画像) を雲台座標系に変換し、重ね合わせる。具体的には、レンジ・雲台座標変換 A 、雲台制御行列 B_j の積を式 (7) に代入し、雲台座標系で表した座標 b_{i0} を得る。

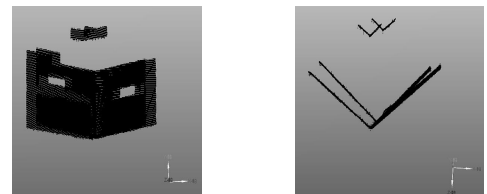


(a) 撮影対象

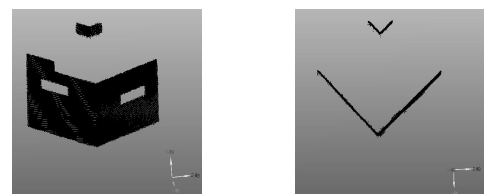
(b) 計測点の選択

図 6: 手順

レンジセンサで得られた距離画像はレンジ座標系で表されている。レンジ座標系で表された 2 枚の距離画像を重ね合わせた様子を図 7(a)(b) に示す。キャリブレーションにより推定されたレンジ・雲台座標変換 A に基づき、距離画像を雲台座標系で表して重ね合わせた様子を図 7(c)(d) に示す。レンジセンサで撮影された距離画像は、視点の位置や姿勢に依存しているため、そのまま重ね合わせることができない。多視点で取得した距離画像を雲台座標系に座標変換したとき、正しくキャリブレーションができていれば撮影対象の共通部分は一致する。したがって、キャリブレーションの精度評価は、雲台座標系で表した距離画像の重ね合わせ結果により行う。



(a) レンジ座標系 前面 (b) レンジ座標系 上面



(c) 雲台座標系 前面 (d) 雲台座標系 上面

図 7: レンジ、雲台座標系で表された 2 枚の距離画像の重ね合わせ結果

4.1 計測点数と雲台制御回数による精度評価

制約式を得る際に、計測点数を増やす場合と、雲台制御回数を増やす場合がある。ここでは、同数の制約式を取得するとき、計測点数と雲台制御回数がどのような関係になっていれば、精度良いキャリブレーションができるかを評価する。表2に、計測点数と雲台制御回数の関係を示す。本実験では直行配置を採用し、制約式数が72になる8通りのパターンを選び、キャリブレーションを行った。

表 2: 計測点数と雲台制御回数の関係

計測点数	24	12	8	6	4	3	2	1
雲台制御回数	1	2	3	4	6	8	12	24
制約式数	72	72	72	72	72	72	72	72

8通りの実験パターンにおける重ね合わせ結果を上から見た様子を図8に示す。

図8から、計測点数と雲台制御回数がキャリブレーション精度に関係していることが分かる。計測点数と雲台制御回数が同程度になるとき、精度良くキャリブレーションが行える。しかし、どちらかに偏っている場合はキャリブレーションの精度は悪くなることが分かる。これは、毎回必ずしも同一の計測点を観測できないことが原因であると考えられる。計測点数が少なく、雲台制御回数が多い場合、異なる計測点を観測することによって含まれる誤差が累積してしまっていると考えられる。

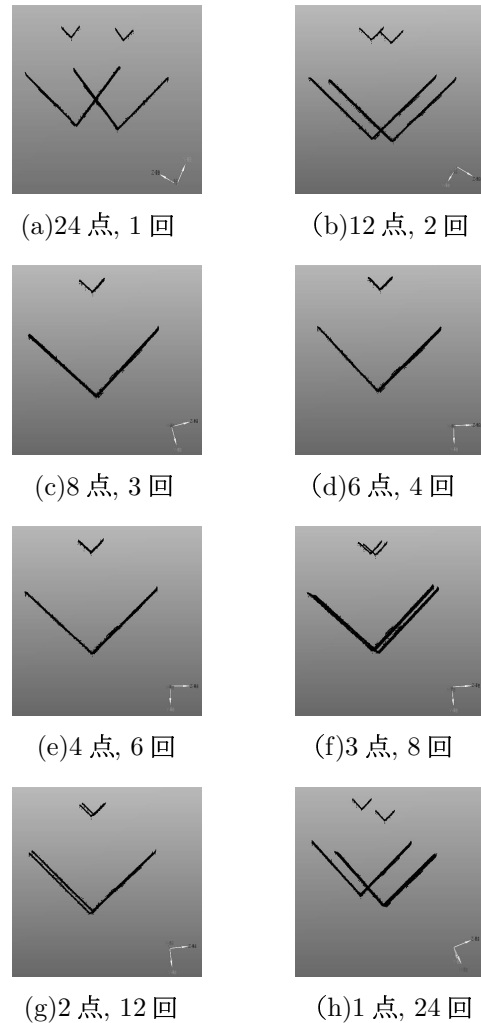


図 8: 計測点数と雲台制御回数による精度評価 (計測点数, 雲台制御回数)

4.2 レンジセンサからの距離による精度評価

ここでは、平行配置(図1(b))を採用し、キャリブレーションのために用いる対象とレンジセンサとの距離のちがいでによるキャリブレーション精度の評価を行った。次の2通りの実験を行った。

- レンジセンサと対象との距離による精度評価
- 可動雲台の並進量の大小による精度評価

この2つの実験では、4.1節での実験において精度良い結果が得られた計測点数6点、雲台制御回数4のパターンを用いた。また、2つの実験において、可動雲台の並進量を大きくした制御と、小さくした制御を行っている。それぞれの制御量を表3, 4に示す。表3, 4の回転角や並進量は、図3(b), 図4に示した雲台座標系に対するものである。並進量が正のとき、可動雲台はレンジセンサから遠ざかる方向に移動し、並進量が負のときはレンジセンサに近づく方向に移動する。

4.2.1 レンジセンサと対象との距離による精度評価

次の2通りのパターンにおいて実験を行った。

1. レンジセンサからの距離がおよそ60cmになるように対象を置く。可動雲台の並進量を小さくしてキャリブレーションをする。
2. レンジセンサからの距離がおよそ30cmになるように対象を置く。可動雲台の制御量は上記と等しくする。

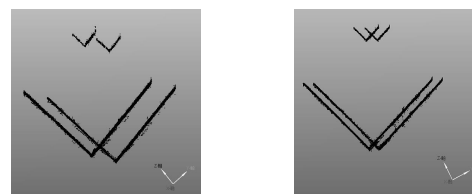
それぞれの結果を上から見た様子を図9に示す。レンジセンサの仕様上、視線方向に多くの計測誤差が含まれてしまうことが分かっているが、この実験ではまさに計測誤差が多く含まれる方向に並進運動をしている。そのため、精度が悪くなっていると考えられる。図9から、レンジセンサから対象までの距離が大きくなると、キャリブレーション精度が悪くなると考えられる。

表 3: 並進量大 (縦: 制御回数, 横: 回転・並進量)

	θ (度)	ϕ (度)	並進 (mm)
1	5	2	-100
2	4	-1	-60
3	-6	-2	90
4	-3	1	70

表 4: 並進量小 (縦: 制御回数, 横: 回転・並進量)

	θ (度)	ϕ (度)	並進 (mm)
1	5	2	-10
2	4	-1	-5
3	-6	-2	7
4	-3	1	8



(a) 距離 60cm (b) 距離 30cm

図 9: レンジセンサと対象との距離による精度評価



(a) 並進量大 (b) 並進量小

図 10: 可動雲台の並進量の大小による精度評価

4.2.2 可動雲台の並進量の大小による精度評価

次の 2 通りのパターンにおいて実験を行った。なお、可動雲台の回転制御量は 1, 2 とともに等しくした。

1. レンジセンサからの距離がおよそ 60cm になるように対象を置く。可動雲台の並進量を大きくしてキャリブレーションをする。
2. レンジセンサからの距離がおよそ 60cm になるように対象を置く。可動雲台の並進量を小さくしてキャリブレーションをする。

それぞれの結果を上から見た様子を図 10 に示す。ここでは、初めレンジセンサから遠い位置にある対象が、レンジセンサの方向に並進運動する。したがって、並進量を大きく制御した方が、制御後の対象はレンジセンサから近い位置にあることになる。

図 9, 図 10 より、対象とレンジセンサとの距離が小さいときが、もっとも精度が良い。このことより、キャリブレーション精度は可動雲台の並進量の大小よりも、対象とレンジセンサとの距離に大きく影響されると考えられる。

4.3 計測点の分布による精度評価

ここでは、計測点数、雲台制御回数のいずれもが等しい場合、選択した計測点の分布のちがいによるキャリブレーション精度を評価する。

直交配置を採用し、計測点数を 6、雲台制御回数を 4 として実験を行った。選択した計測点の分布の様子を図

11 に示す。

計測点を対象全体に一樣に選択した場合と、対象の一部に偏在して選択した場合の重ね合わせ結果を上から見た様子を図 12 に示す。

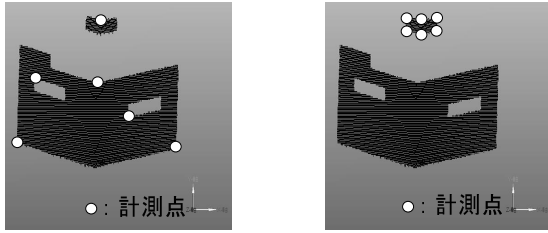
図 12 から、計測点を対象上に一樣に選択した方が精度良いキャリブレーションが行えると考えられる。計測点が対象の一部に偏在する場合、その計測点の対応づけから得られる制約式は、対象全体の対応づけを表していない。そのため、偏在する計測点の対応づけから得られた制約式は、正確に解を推定する制約式とは言えないと考えられる。

以上 3 つの実験より、精度良いキャリブレーションを行うためには、次のようなことが必要であると考えられる。

- 計測点数と雲台制御回数は同程度にすること。
- キャリブレーションに用いる対象はレンジセンサの近くに設置すること。
- 計測点はキャリブレーションに用いる対象全体に一樣に選択すること。

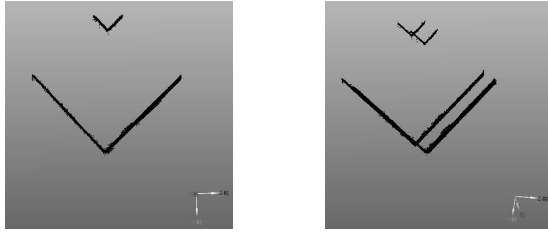
5 おわりに

本稿では、物体の 3 次元全形状復元を目指して、レンジセンサと可動雲台からなる計測システムを構成した。そして、その計測システムのキャリブレーション手法を提案した。具体的には、雲台を制御することにより得られる情報を用いて、レンジ座標系と雲台座標系との



(a) 計測点は全体に一樣 (b) 計測点は一部に偏在

図 11: 計測点の分布



(a) 計測点は全体に一樣 (b) 計測点は一部に偏在

図 12: 計測点の分布による精度評価

間の座標変換を求める手法を提案した。また、計測点数と雲台制御回数、対象のレンジセンサからの距離、計測点の分布の3つの観点から実験を行い、キャリブレーションの精度を評価した。

今後は、レンジセンサの仕様上、視線方向に生じてしまう誤差を考慮し、キャリブレーション精度の向上を目指す。なお、本稿の一部は、科学研究費補助金 13224051, 14380161, および、14750342 の補助を受けて行った。

参考文献

- [1] D. A. Forsyth and J. Ponce: Computer Vision: A Modern Approach, Pearson Education, Inc., 2003.
- [2] 池内克史, 倉爪亮, 西野恒, D. Wheeler: リフレクタンスエッジと濃淡エッジを用いたテクスチャのアライメント, 電子情報通信学会論文誌, Vol. J85-D-II, No. 6, pp. 1038-1046, 2002.
- [3] K. Ikeuchi, R. Kurazume, K. Nishino, Z. Zhang: Simultaneous 2D Images and 3D Geometric Model Registration for Texture Mapping Utilizing Reflectance Attribute, Proc. of The 5th Asian Conference on Computer Vision, pp. 23-25, 2002.
- [4] K. Ikeuchi, K. Nishino, R. Sagawa: Robust and Adaptive Integration of Multiple Range Image with Photometric Attributes, Proc. of CVPR, Vol. 2, pp. 172-179, 2001.
- [5] K. Ikeuchi, K. Nishino, R. Sagawa, D. Wheeler: Parallel Processing of Range Data Merging, Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Intell. Robots and Systems, Vol.1, pp. 577-583, 2001.
- [6] 金谷健一: これなら分かる応用数学教室: 最小二乗法からウェーブレットまで, 共立出版, 2003.
- [7] 岡谷(清水) 郁子: 距離画像の位置合わせに関する研究, 東京大学工学系研究科博士論文, 1999.
- [8] 奥富正敏: ステレオ視 (Stereo Vision), コンピュータビジョン: 技術評論と将来展望 (松山, 久野, 井宮 編) 第8章, 新技術コミュニケーションズ, pp. 123-133, 1998.
- [9] W. H. Press, B. P. Flannery, S. A. Teukolsky, W. T. Vetterling: Numerical Recipes in C [日本語版], 技術評論社, 1993.
- [10] 杉本晃宏: カメラモデルとカメラパラメタのキャリブレーション, 京都大学, 2001.