

位置関係が未知の複数視点からの距離画像の 重ね合わせ手法

清水 郁子 出口 光一郎
東京大学工学部

複数の視点から得た距離画像を統合して、対象の三次元形状を復元する手法を述べる。各視点からの距離画像内の対象表面を平面で表し、その対応から視点間の位置関係を求める。対象物体が多面体でない場合にも、対象物体の距離画像を表側から凸多面体で覆う。凸多面体の各面の対応は、各視点からの面の隣接関係を表すグラフを構成し、隣接する視点のグラフを面積を用いてマッチさせて求める。視点間の位置関係を回転行列と並進ベクトルによって表す。このマッチさせた平面の法線ベクトルの対応からまず回転行列のみを求め、続いて並進ベクトルをそれぞれ独立に求めることができる。平面の当てはめ誤差が大きくなってきた場合、単なる最小二乗当てはめで回転行列を求めると、適切な解を求めることができなくなる。本手法では、回転行列を行列式が1の正規直交行列であるという拘束のもとで求めることにより、回転行列として適切な解を得ている。

A Method of Registering Multiple Range Images from Unknown Viewing Directions

Ikuko Shimizu and Koichiro Deguchi

Faculty of Engineering, University of Tokyo,
Bunkyo-ku, Tokyo, Japan

A method of registering multiple range views is proposed. We obtain relative transformation between multiple views by corresponding their planar surfaces. For non-polyhedral objects, we construct three dimensional convex hulls from each range images. Then, we build adjacency graphs of large faces contained in the each convex hull, and match graphs of two neighbor views based on their areas. We represent the 3D transformation by rotation matrix and translation vector, and first, we recover the rotation matrices using normal vectors of the planar surfaces by constrained least squares fitting. The rotation matrix must be constrained to be orthonormal with determinant 1. Then, translation vectors are obtained by simple least squares fitting.

1 はじめに

レンジファインダとは、対象物体表面上の三次元座標を測定するための装置である [1]。本研究では、図 1 に示すように、対象物体にプロジェクタを用いてパターン光を投影し、それを相対的な位置関係が既知であるカメラで撮像して座標値を計算する方式のものを使用した。各画素が、対応する物体表面上の点の三次元座

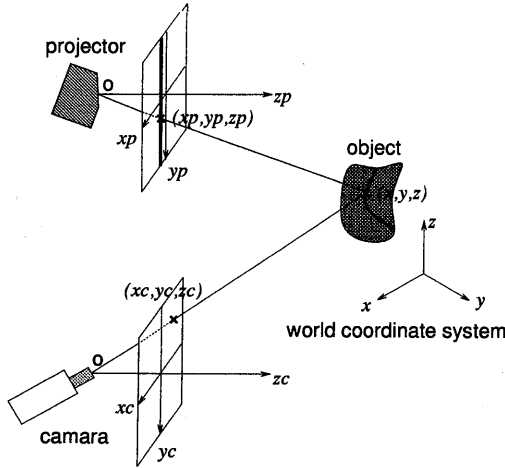


図 1. 本研究で使用したレンジファインダの測定原理

標であるような画像を距離画像と呼ぶ。本研究では、距離画像を用いて、対象物体の完全な三次元形状を測定することを目的とする。

レンジファインダによる単一方向からの測定では、裏側や凸部に隠された部分など、データの得られない部分が存在するので、対象物体の完全な形状を知るためには、複数方向から測定して得られる距離画像を統合することになる。このとき、得られる距離画像は、各視点のカメラ座標に依存するから、距離画像を統合するためには全ての方向から得られた距離画像を一つの座標系に変換しなければならない。そこで、各視点の正確な位置関係を知る必要が出てくる。

ここでは、あらかじめ視点間の位置関係を正確に決めておくのではなく、任意の方向から対象物体を測定し、各視点で得られた距離画像を用いて視点間の位置関係を決定することを考える。このような場合には、異なる視点から共通に観測することのできる何らかの特徴の対応から位置関係を求めることになる。ここで問題となるのが、どのような特徴を用いてどのように対応関係を求めるか、対応関係からどのように位置関係

を求めるかの二点である。

これまで、点の対応によって位置関係を求める様々な手法が提案されている [2][3]。これらは、モデル形状が既知である場合にモデルとデータの位置関係を推定する手法である、ICP アルゴリズム [4] に基づくものである。この方法は、対象の形状を限定せず、点と点の対応をあらかじめ決める必要がない代わりに、点と点の対応の膨大な組み合わせを探索する必要があったり、良い初期値を与える必要があるなどの欠点があった。これに対し、平面、二次曲面、曲率などの幾何学的特徴の対応により位置関係を求める方法も多数提案されている [5][6][7]。平面の対応によって位置関係を求める [8] 場合、点の対応によって求めるときなど比べ対応付けが容易であり、また、平面の法線ベクトルは並進に対して不変であることを用いて、位置関係を回転の成分と並進の成分に分け、別々に求めることができるという利点がある。これらの利点に注目し、我々は平面の対応により位置関係を求める。このとき、多面体だけでなく、もっと一般的な物体、例えば図 2 に示すような物体も対象とするため、得られた距離画像の表側を凸多面体である三次元凸包を利用する。各視点で得られた距離画像の表側を凸包で覆ったものは、完全な対象物体を凸包で覆ったものと同じ方向から見たものに一致する。すなわち、異なる視点から得られた距離画像を凸包で覆うことにより、重複した部分に関しては同じ平面を観測することができる。よって、凸包の面の対応から視点間の位置関係を求めることが可能になる。

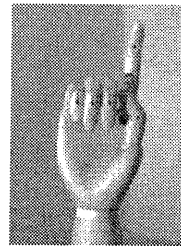


図 2. 実験に用いた手の模型の写真。

もう一つの問題は、対応関係から視点間の位置関係を求める方法にである。視点間の位置関係は、回転行列と並進ベクトルによって関係付けることができる。回転行列は、行列式の値が 1 の正規直交行列である。回転行列と並進ベクトルは、何らかの関数を最小にする解として求めることになる。誤差がなければ、従来の方法のように、単純な最小化によって回転行列を求め

ることができるが、一般には誤差の影響によって単純な最小化によって得られた解は回転行列にはなっていない。そこで、本研究では、行列式の値が1の正規直交行列であるという拘束条件のもとで、回転行列を求める。

処理の概要は次の通りである。まず複数の視点から得られた距離画像を視点毎に凸包で覆う。次に、凸包の各面を、領域の隣接関係と面積を用いて隣合う二視点間で対応付ける。求めた凸包の各面の対応関係から視点間の位置関係を求める。平面の法線ベクトルは並進に関して不変であることから、まず観測された平面の法線ベクトル全てを用いて、全ての視点の回転行列を一度に求める。このとき、回転行列は行列式が1である正規直交行列であるという拘束条件のもとで求める。並進ベクトルは、求めた回転行列を用いて容易に求めることが可能である。最後に、各視点で得られた距離画像を求めた各視点の位置関係を用いて基準座標系における値に変換する。

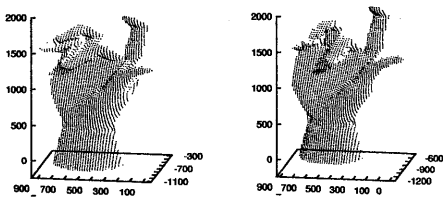


図3. 手の模型を二視点から測定した距離画像。

2 凸多面体の構成

本節では、図3のように、複数方向から測定した対象物体の距離画像を、表側から過不足なく凸多面体、すなわち三次元凸包で覆う方法について述べる。ある方向から測定した対象物体の距離画像を、表側から三次元凸包で覆ったものは、完全な対象物体を三次元凸包で覆い、その方向から観測したものと一致する。よって、距離画像を表側だけ三次元凸包で覆えば、異なる視点から観測される凸包の各面は一致し、その面の対応から視点間の位置関係を求めることが可能になる。

凸包は、包装法 [9] という手法により構成する。このとき、多数の点が同一平面上にある場合に膨大な例外処理を用意する必要が出てくるが、それを避けるために SoS (Simulation of Simplicity) に基づく八方向摂動

法 [10] を用いる。摂動方向を八方向にすることにより、凸多面体の表面に残る点をできるだけ少なくすることができる。

次に、隣り合う領域で、法線ベクトル間の角度が閾値以下である領域を統合し、各面の法線ベクトルと視点からの距離を更新する。各平面領域の法線ベクトル n 、平面の原点からの距離 d は、 x は計測点の三次元座標とし、平面の式を

$$n^T x = d \quad (1)$$

のように表して $\|n^T x - d\|^2$ を最小にするように求める。

以上のようにして図3(b)のような手の模型の距離画像を表側から凸多面体で覆ったのが図4である。

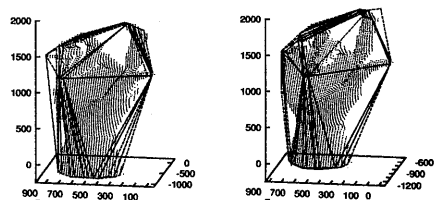


図4. 手の模型の距離画像を凸多面体で覆ったもの。

3 面の対応

面の対応は、ある程度自動的に求めることが可能である。隣合う二つの視点毎に対応する面を求める場合、図4を見ても分かるように、領域の面積と隣接関係から求められることがわかる。

ここで、小さい平面領域は、対応が一意に決定しにくく、また正確な変換を求めるのには適していないと考えられる。そこで、まずすべての平面領域の隣接関係を表すグラフを作ってから、最短辺が閾値より小さい領域は省略したグラフに更新する。得られたグラフは、面積の差が閾値以下の領域をマッチさせることにより、正しい対応関係を得ることができる。

4 視点間の位置関係

本節では、対象とする多面体の各面に対し、前節で述べた方法より視点間の対応を求めた後で、その対応関係から視点間の位置関係を求める方法について述べる。平面の法線ベクトルの対応から、回転行列を分け

で求めることができる。回転行列は、行列式の値が1の正規直交行列であるという拘束のもとで求める。以下に詳しく説明する。

基準座標系と視点*i*のカメラ座標系は、回転行列 R_i 、並進ベクトル t_i によって

$$\mathbf{x}_i = \mathbf{R}_i \mathbf{x} + \mathbf{t}_i \quad (2)$$

のように関係付けることができる。

基準座標系における平面*j*の方程式を

$$\mathbf{n}_j^T \mathbf{x} = d_j \quad (3)$$

視点*i*のカメラ座標における平面*j*の方程式を

$$\mathbf{n}_j^{iT} \mathbf{x}_i = d_j^i \quad (4)$$

とおく。ただし、 \mathbf{n}_j を基準座標系における見方面*j*の単位法線ベクトル、 d_j を基準座標の原点から面*j*への距離、 \mathbf{n}_j^i を視点*i*のカメラ座標における面*j*の単位法線ベクトル、 d_j^i を視点*i*のカメラ座標の原点から面*j*への距離であるとする。

以上の関係から

$$\mathbf{n}_j^i = \mathbf{R}_i \mathbf{n}_j \quad (5)$$

$$d_j^i = (\mathbf{R}_i \mathbf{n}_j)^T \mathbf{t}_i + d_j \quad (6)$$

であるから、式(5)の関係を用いて、観測された法線ベクトル \mathbf{n}_j^i だけから回転行列 R_i を求めることができることがわかる。

4.1 回転行列の推定

式(5)の関係から、

$$\begin{array}{c} \text{視点 1} \\ \text{視点 } i \\ \text{視点 } N \end{array} \begin{array}{c} \text{面 1} \\ \text{面 } j \\ \text{面 } M \end{array} \begin{pmatrix} \mathbf{n}_1^1 & \cdots & \mathbf{n}_j^1 & \cdots & \mathbf{n}_M^1 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{n}_1^i & \cdots & \mathbf{n}_j^i & \cdots & \mathbf{n}_M^i \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{n}_1^N & \cdots & \mathbf{n}_j^N & \cdots & \mathbf{n}_M^N \end{pmatrix} \\ = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_1 \\ \mathbf{R}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{R}_N \end{bmatrix} [\mathbf{n}_1, \mathbf{n}_2, \dots, \mathbf{n}_M] \quad (7)$$

という式が成り立つ。すなわち、上式の左辺を $3N \times 3$ 行列と $3 \times M$ 行列に分解することによって、 R_i 、 \mathbf{n}_j を求めることができる。ただし、一つの視点から全ての

面が見えるわけではないので、上式の左辺の行列の成分で未知のものが存在する。その場合でも、

$$\sum_i \sum_j \|\mathbf{n}_j^i - \mathbf{R}_i \mathbf{n}_j\|_p^2 \quad (8)$$

を最小にする解として R_i 、 \mathbf{n}_j を求めることができる[8]。ただし、 $\sum_i \sum_j \|\cdot\|_p^2$ は、 \mathbf{n}_j^i が観測されたもののみに関する二乗和である。

上式を最小にするときに注意すべきなのは、 R_i は回転行列であるから、正規直交行列でかつ行列式の値は1であるということである。特に、誤差が大きくなってきた場合、従来の手法のように単に最小化を行っても適切な回転行列は得られない。そこで、正規直交行列でかつ行列式の値は1であるという拘束条件のもとで R_i を求める。

そのために、ラグランジュ未定乗数法に基づき目的関数

$$J = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \gamma_{ij} \|\mathbf{n}_j^i - \mathbf{R}_i \mathbf{n}_j\|^2 + \sum_{i=1}^N \{ \text{tr}(\mathbf{L}_i (\mathbf{R}_i^T \mathbf{R}_i - \mathbf{I})) + g_i (\det(\mathbf{R}_i) - 1) \} \quad (9)$$

を定義する。求める R_i 、 \mathbf{n}_j は、

$$\frac{\partial J_i}{\partial \mathbf{n}_j} = \mathbf{0}, \quad \frac{\partial J_i}{\partial \mathbf{R}_i} = \mathbf{0}, \quad \frac{\partial J_i}{\partial \mathbf{L}_i} = \mathbf{0}, \quad \frac{\partial J_i}{\partial g_i} = 0 \quad (10)$$

の解として得られる。

ここで、 R_i を固定したとき J を最小にする \mathbf{n}_j は簡単に与えられ、 \mathbf{n}_j を固定したとき J を最小にする R_i を求める方法[11]が知られている。

そこで、 R_i 、 \mathbf{n}_j は、 R_i の初期値を適当に与え、 R_i を固定したときの J を最小にする \mathbf{n}_j 、 \mathbf{n}_j を固定したときの J を最小にする R_i を収束するまで繰り返すという方法で求める。

具体的に、 R_i を固定したとき J を最小にする \mathbf{n}_j 、 \mathbf{n}_j を固定したとき J を最小にする R_i を求める方法についてそれぞれ述べる。

まず、 R_i を固定したとき J を最小にする \mathbf{n}_j は、 G^+ を G の一般逆行列として

$$\mathbf{n} = G^+ \mathbf{w} \quad (11)$$

で与えられる。ただし、

$$\mathbf{n} = [\mathbf{n}_1^T, \mathbf{n}_2^T, \dots, \mathbf{n}_M^T] \quad (12)$$

る。各視点から5面ずつ観測されたとして、法線ベクトルを用いて拘束をつけた場合、つけない場合について回転行列を求める。視点1を基準座標系として、視点 $i(i = 2, \dots, 12)$ の回転行列で単位ベクトルを回転させる。100回試行したとき、求めた解で回転させた単位ベクトルの分布の様子を図6に示す。(a)は拘束条件のもとで求めた場合、(b)は拘束条件を付けずに求めた場合である。各視点に対応するベクトルの分布を楕円で示す。中心から引いてある実線は真の値で回転させたものである。

これを見ると、誤差のばらつきは、拘束条件をつけた場合の方が小さくなっていることがわかる。

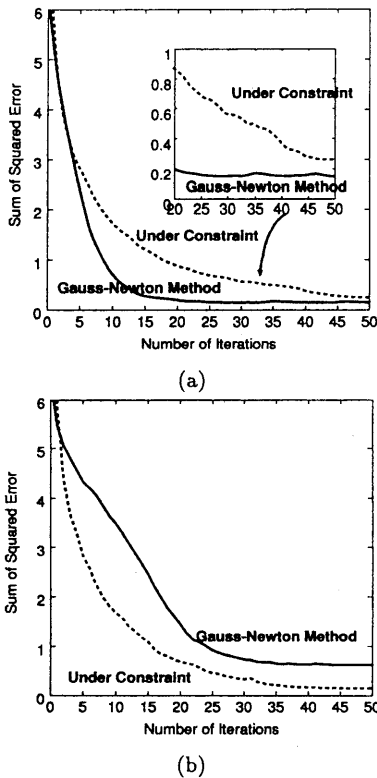


図5. 繰り返し回数と誤差の二乗和の関係。

5.3 実距離像による実験

5.3.1 対象が多面体の場合

視点間の位置関係が既知である正十二面体の距離画像に平面を当てはめ、その各面の対応から変換を求め

る。対比として

- (1) 全てのデータを用いて、回転行列の拘束なしで変換を求めた場合 [8]
- (2) 隣合う2視点ごとに順番に変換を求めた場合 [11] の2通りの方法でも変換を求めて結果を比較する。

正確な位置決めが可能なターンテーブル上に対象物体をのせて複数方向から測定し、位置関係を推定して真の値と比較した。まず、求めた回転行列から回転角を求めて各視点での誤差の絶対値を平均し、比較する。また、求めた位置関係を用いて各距離画像を基準座標に変換し、各面毎に再び平面を当てはめ、その当てはめ誤差を求め、その各面の平均を比較する。

表1 回転角の誤差の絶対値の平均。単位は[度]。上段が30度ずつ回転させた場合、下段が15度ずつ回転させた場合。

Rotation Angle	Proposed Method	(1)	(2)
30.0	0.28154	0.44905	0.430325
15.0	0.18999	0.21648	0.482176

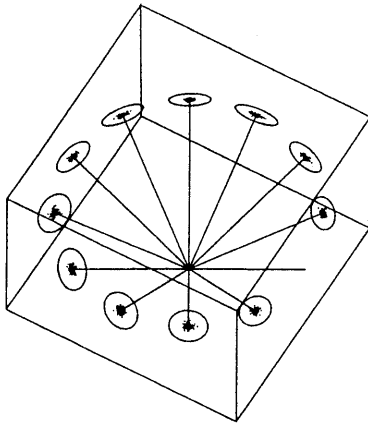
表2 平面の当てはめ誤差。単位は[cm]。上段が30度ずつ回転させた場合、下段が15度ずつ回転させた場合。

Rotation Angle	Proposed Method	(1)	(2)
30.0	2.86e-03	3.98e-03	3.18e-03
15.0	2.04e-03	3.05e-03	2.75e-03

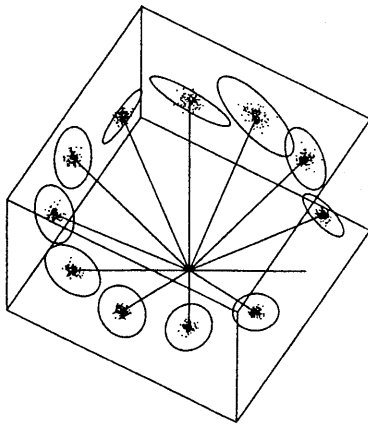
このように、対象が多面体であるような場合には、位置関係を求めるために用いる平面の法線ベクトル・原点からの距離は正確に求めることが可能であるため、拘束条件を付けずに回転行列を求めても拘束条件を付けた場合とほとんど差がなく、どちらも良い結果が得られることがわかる。

5.3.2 対象が一般の物体の場合

図7のような模型を回転テーブルにのせて20度ずつ回転させた。各距離画像を凸包で覆った結果を図8に示す。(a)を40度回転させたものが(b)である。得られた凸多面体の各面の対応から、視点間の回転行列から回転角を求め、拘束条件を付けずに求めた場合と比較した結果を表3に示す。また、求めた変換を評価するため、この模型の凸包の対応から求めた回転行列のうちの一つを用いて、立方体を回転させ、変換の真の値は既知であるので、真の値で立方体を回転させ、拘束条件つきで求めた回転行列と拘束条件なしで求めた回転行列でもそれぞれ回転させ、重ねて表示し



(a)



(b)

図6 推定された回転行列により単位ベクトルを回転させた結果。(a)が拘束をつけて求めた場合、(b)が拘束を付けずに求めた場合。

たものが図9である。実線が拘束条件もとので求めた回転行列により変換した立方体、点線が拘束条件なしで求めた解で変換した立方体である。また、推定された回転行列を用いて単位ベクトルを回転させたものを図10に示す。表3に、回転行列から回転角を求め、拘束条件をつけないで求めた場合と比較した結果を示す。

このように、平面の当てはめ誤差が大きくなってしまふような場合には、拘束条件なしで求めると、解は回転行列から離れてしまい、その解をそのまま用いて距離画像を変換すると形を歪ませてしまうことにもなりかねない。また、拘束をつけた場合解を回転行列に当てはめて回転角を求めても、拘束をつけた場合より誤差は大きくなっている。

最後に、手の模型の距離画像から位置関係を求め、距離画像を統合した結果を示す。6視点から得られたデータを統合したのもである。

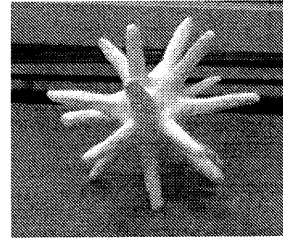


図7. 実験に用いた模型。

表3. 回転角の誤差の絶対値の平均。単位は[度]。

Rotation Angle	Proposed Method	Former Method
20.0	0.47067	1.0155

6 まとめ

視点間の位置関係が未知である複数の視点で得られた距離画像から位置関係を求め、重ね合わせる手法を示した。

視点毎に得られたレンジデータを各視点のカメラ座標系において凸多面体で覆い、各視点で得られた多面体の面の隣接関係から各視点間の面の対応を決定する。面の対応から、各視点において得られた平面の法線ベクトルと原点からの距離の全てを用いて、全体として整合する基準座標系から各視点のカメラ座標への変換を求める。

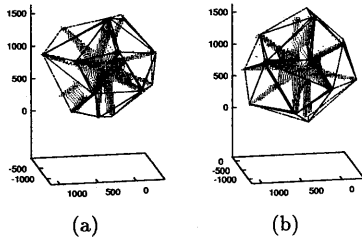


図8 模型の距離画像を表側から凸多面体で覆った結果.

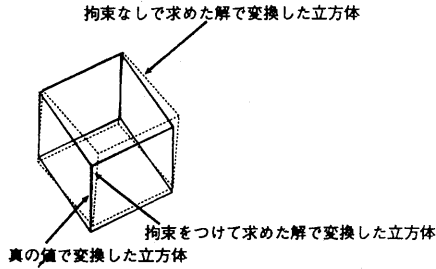


図9 拘束条件なしで求めたときの歪み.

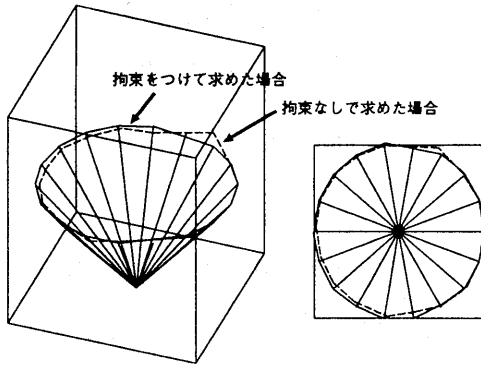


図10 推定された回転行列で単位ベクトルを回転させたもの.

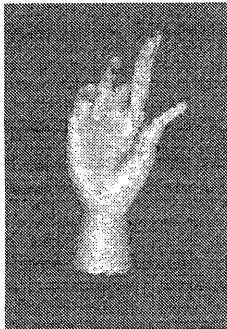


図11. 手の模型の結果.

平面の当てはめ誤差の分散が小さい場合、視点間の位置関係を求めるときに、拘束条件をつけて求めた場合も、つけずに求めた場合も、多少結果に差はあるもののどちらを用いて距離画像を変換しても結果に問題はない。しかし、誤差が大きくなってくると、拘束条件をつけずに求めた場合、回転行列として求められた解が、回転行列ではない行列になり、対象物体の形を歪ませるような変換をする行列になってしまう。拘束条件つきで求めればそのようなことは起こらない。また、誤差のばらつきは、拘束条件をつけた場合の方が小さくなっていることがわかった。

参考文献

- [1] 井口 征士, 佐藤 宏介. 三次元画像計測. 昭晃堂, 1990.
- [2] Y.Chen and G.Medioni. Object Modeling by Registration of Multiple Range Images. In *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 2724-2729, 1991.
- [3] T.Masuda and N.Yokoya. A Robust Method for Registration and Segmentation of Multiple Range Images. *CVIU*, Vol. 61, No. 3, pp. 295-397, 1995.
- [4] P.J.Besl and N.D.McKay. A Method for Registration 3-D Shapes. *IEEE Trans. PAMI*, Vol. 14, No. 2, pp. 239-256, 1992.
- [5] 河井 良浩, 植芝 俊夫, 吉見 隆, 大島 正隆. 多視点レンジデータからの3次元形状復元. *信学論 D-II*, Vol. J75-D-II, No. 4, pp. 737-748, 1992.
- [6] 脇迫 仁, 鎌田 清一郎, 河口 英二. 2次元形状データの張り合わせによる距離画像の統合. *信学論 D-II*, Vol. J78-D-II, No. 5, pp. 727-736, 1995.
- [7] M.Hebert, K.Ikeuchi and H.Delingette. A Spherical Representation for Recognition of Free-Form Surface. *IEEE Trans. PAMI*, Vol. 17, No. 7, pp. 681-690, 1995.
- [8] H.Shum, K.Ikeuchi and R.Reddy. Principal Component Analysis with Missing Data and Its Application to Polyhedral Object Modeling. *IEEE Trans. PAMI*, Vol. 17, No. 9, pp. 854-867, 1995.
- [9] D.R.Chand and S.S.Kapur. An Algorithm for Convex Polytopes. *J. ACM*, Vol. 17, No. 1, pp. 78-86, 1970.
- [10] 小野剛. 三次元凸包構成のための八方向摂動法. *情報処理学会研究報告アルゴリズム*, Vol. 39, No. 5, pp. 33-39, 1994.
- [11] S.Umeyama. Least-Square Estimation of Transformation Parameters Between Two Point Patterns. *IEEE Trans. PAMI*, Vol. 13, No. 4, pp. 376-380, 1991.