

距離画像を用いた位置姿勢推定法に関する研究

関野進 吉田耕一 原輝彦

NTT アクセスサービスシステム研究所

〒 305-0805 茨城県つくば市花畑 1-7-1

E-Mail: sekino@ansl.ntt.co.jp

あらまし システム内部にモデルの特徴点に関する情報と、距離画像から得られた特徴点に関する情報とが与えられているときに、位置姿勢パラメータをどのように決定するかが問題となる。位置姿勢パラメータの推定手法に関する従来法の一つである Gongzhu の手法では、位置姿勢パラメータの導出に Hough 空間における投票を行うが、任意パラメータに対して、微小刻みで値を変化させ、すべての解について投票といったことをするため、位置姿勢パラメータの精度と推定時間は、任意パラメータの刻み幅に依存する。精度は、この刻み幅が小さい程高くなるが、投票時間は逆に増えてしまうという問題点がある。本報告では、Gongzhu の手法に解析的な手法を用いた改良を加え、位置姿勢パラメータの推定時間と精度の向上の確認を行った。

キーワード 距離画像、Hough 空間、位置姿勢パラメータ、特徴点

A study on the object pose estimation from range images

Susumu Sekino , Koichi Yoshida and Teruhiko Hara

NTT Access Network Service Systems Laboratories

1-7-1 Hanabatake, Tsukuba-city, Ibaraki, 305-0805 JAPAN

E-Mail: sekino@ansl.ntt.co.jp

Abstract We have been developing object shape recognition systems using range images. These are images composed of scene images whose pixel contains information on the distance from the camera. A range image can be obtained, for example, by capturing the reflection of laser lines from an object through a CCD camera and employing triangulation. We can use this information to realize a recognition system which can distinguish an object, whose 3D shape is specified by CAD data, from a cluttered scene containing many unknown objects. We developed arranged method based on Gongzhu's method.

Keywords range image, Hough space, pose estimation, feature points

1 はじめに

物体の位置姿勢を決定する方法の一つに、距離画像の処理と物体の認識の2つのステップを踏んで行うものがある。物体の認識において、モデル座標系とシーン座標系との間には、回転行列を R 、変位ベクトルを T としたとき、

$$p_s = R \cdot p_m + T$$

なる関係がある。但し、 p_s をシーン上での物体座標、 p_m をモデル座標系上の物体モデル座標とする。シーン上の物体の位置姿勢を決定するためには、回転行列 R と変位ベクトル T を推定する必要がある。物体の位置姿勢パラメータである回転行列 R 、変位ベクトル T を推定する従来法として、Gongzhu [1] の手法を取り上げるが、この手法の位置姿勢パラメータの決定における Hough 空間への投票は、投票点の数が膨大となるため、かなりの時間を要する。

本報告では、Gongzhu の手法において最も時間を要する投票点を大幅に削減し、位置姿勢パラメータの推定時間を短縮するアルゴリズムの提案を行う。

2 Gongzhu 法とその問題点

まず、モデル座標系上の特徴点と対応するシーン座標系上の特徴点との関係を、変位ベクトル T と回転行列 R で表現する方法について述べる。ここでの「シーン」とは、入力装置での座標系上で定義される距離画像のことである。

モデル座標系上の特徴点から3点 p_{m1} 、 p_{m2} 、 p_{m3} を選び、この3点から決まる三角形と合同な三角形を構成するように、シーン座標系の3点 p_{s1} 、 p_{s2} 、 p_{s3} をとる。モデル座標系の3点 p_{m1} 、 p_{m2} 、 p_{m3} からなる2ベクトルを $n_m (= p_{m2} - p_{m1})$ と $r_m (= p_{m3} - p_{m1})$ とする。シーン座標系の3点からなる2ベクトルを $n_s (= p_{s2} - p_{s1})$ と $r_s (= p_{s3} - p_{s1})$ とする。

モデル座標系とシーン座標系との間に、 R を

回転行列、 T を変位ベクトルとし、

$$p_s = R \cdot p_m + T$$

なる関係があるとする、モデル座標系の x 座標を $x_m = (1, 0, 0)$ とし、対応するシーン座標系の x 座標を $x_s = (a, b, c)$ としたとき、

$$r_s \cdot x_s = r_m \cdot x_m = d_1$$

$$n_s \cdot x_s = n_m \cdot x_m = d_2$$

なる内積関係と、

$$a^2 + b^2 + c^2 = 1$$

が成立する。ここで、 $r_s = (r_x, r_y, r_z)$ 、 $n_s = (n_x, n_y, n_z)$ とおくと、

$$r_x \cdot a + r_y \cdot b + r_z \cdot c = d_1$$

$$n_x \cdot a + n_y \cdot b + n_z \cdot c = d_2$$

$$a^2 + b^2 + c^2 = 1$$

から、3つの未知パラメータに対して、3方程式が得られ、外積で与えられる座標系の束縛条件 $z_s = x_s \times y_s$ を用いて、不適解の削除を行うことにより、

$$R = (x_s, y_s, z_s)$$

$$T = p_s - R \cdot p_m$$

を得ることができる。

以上から、モデル座標系の3点から構成される三角形と合同となるような三角形を構成するシーン中から三角形が決まると、位置姿勢を決定する T 、 R が決定されることがわかる。

2.1 Gongzhu 法による T, R の推定手法

Gongzhu の文献 [1] は、モデルの特徴点間の位置関係と、シーンの距離画像を利用して得られた特徴点間の位置関係とのマッチングを利用して位置姿勢パラメータ T 、 R を決定する方法である。

まず、モデルから選んだ2点からなるエッジと、距離画像上の特徴点から選んだ2点からなるエッ

ジとが、どの程度合致するかの判定を行う。モデルの座標系から2点 p_{m1} 、 p_{m2} を選び、この2点から決まる線分の写像とみなせるシーン座標系の2点 p_{s1} 、 p_{s2} を選ぶ(図1、図2参照)。

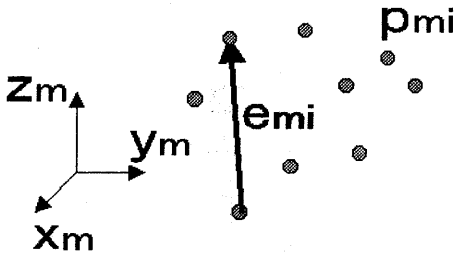


図1: モデル座標系

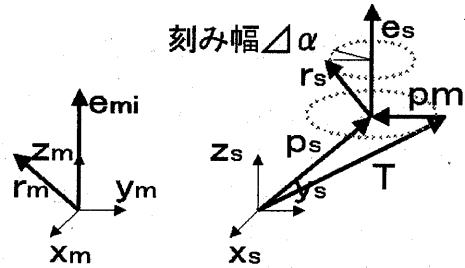


図3: Tの導出

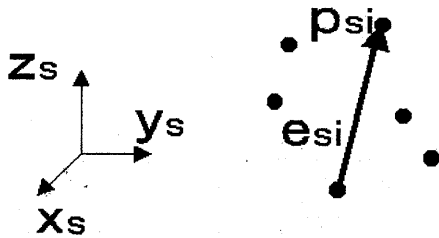


図2: シーン座標系

次に、モデル座標系の2点 p_{m1} 、 p_{m2} からなるベクトルを $e_m (= p_{m2} - p_{m1})$ とモデル座標系に任意に選んだベクトルを r_m とし、 $d = e_m \cdot r_m$ を考える。シーン座標系の2点からなるベクトルで、かつ e_m の写像とみなせるベクトルを $e_s (= p_{s2} - p_{s1})$ とし、 $d = e_s \cdot r_s$ となるように r_s をシーン座標系にとる。 r_s は、内積 $r_s \cdot e_s$ の値を等しくしたまま、その座標として e_s の円錐の表面の縁に沿うことは明らかである(図3参照)。この r_s は、 e_s の周りに $\Delta\alpha$ 度刻みで360度回転させ、それぞれについて T の計算を行う。この処理をすべての特徴点の組合せについてに行い、位置ベクト

ル T の投票空間に投票する。そして、多数投票によって得られた T と対応する R とを、位置姿勢パラメータとして確定する。

2.2 Gongzhu 法の問題点

Gongzhu の手法による位置姿勢パラメータ推定法は、シーン座標系でのエッジとモデル座標系でのエッジとの対応ごとに、 r_s を e_s の周りに $\Delta\alpha$ 刻みで、360度回転させ、それぞれについて、回転行列 R や変位ベクトル T の計算といったことをする。このように、すべての場合に対してこの計算操作を行うことは、非常に重い処理となってしまふ。

また、推定されるパラメータの精度は、刻み幅に依存するが、刻み幅を小さくする程、精度が向上するが、逆に計算時間が増加してしまう。また、刻幅を多くする程、計算時間は短縮されるが、逆に精度が落ちてしまう。この方法では、複雑な図形では膨大な計算をようしてしまう。

刻み幅	投票点の数	精度	計算時間
小さい	大	上がる	増加
大きい	小	下がる	減少

以上のように、Gongzhu の手法では、

- 投票点の数が膨大で、位置姿勢パラメータの

確定に長い時間を要する、

- 精度は、刻み幅に依存し、精度をあげようとすると、計算時間が大幅に増加する、

という問題点がある。

3 位置姿勢推定法の提案

本提案手法は、Gongzhu の手法において、参照ベクトルを n_s の周りに1度刻みで360度回転させると、位置姿勢パラメータ T の投票空間上で構成する軌跡が円となることを利用し、参照ベクトルを n_s の周りに、120度刻みの代表点3点を取り、その写像から投票空間上での構成される円の中心と半径を求める。すべての組合せについて求めた円の中心と半径とから、解析的に位置姿勢のパラメータ T, R を決定し、投票を行なうことにより、 T, R を確定する。 n_s の周りに1度刻みで360度回転させると、位置姿勢パラメータ T の投票空間上で構成する軌跡が円となることを利用し、その円の中心と半径とを代表点3つから求め、これらの情報を元にして、投票点が集中する点を求める。これにより、変位ベクトル T の投票空間の投票点の数を大幅に削減し、解析的に求めることにより、精度の向上と計算時間の短縮ができる、ことが本手法の最大の特徴である。

3.1 提案手法1：Gongzhu 法の改良による T, R の推定手法

モデル座標系のエッジとシーン座標系上での対応するエッジとの対応においてモデル座標系の参照ベクトルに対応するシーン座標系の参照ベクトルは、シーン座標系上のエッジの周りに360度回転分の自由度があるが、120度刻みで360度回転させ、そのとき求められる回転行列 R を利用して、変位ベクトル $T = R \cdot p_m - p_s$ の3つ求めることにする。ここで求められた変位ベクトルを T_1, T_2, T_3 とすると、この3ベクトルは投票空間上で、正三角形を構成している。この変位ベクトルが構成する T の投票空間における3点

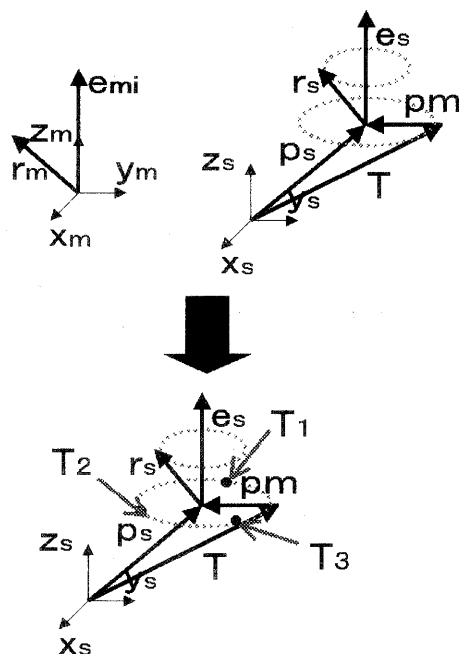


図4: T_1, T_2, T_3

を通るような円の中心と半径、および、投票空間 T 上での円の法線ベクトルを求め、これらの情報を元にして投票点が集中する点を求める。

以下に、本手法のアルゴリズムを示す。

1. 円の中心は T_1, T_2, T_3 が正三角形を構成することにより、この正三角形の重心の位置に同じである。したがって、円の半径と円の中心と半径は、

$$(\text{円の中心}) = \frac{T_1 + T_2 + T_3}{3}$$

$$(\text{円の半径}) = \left| T_1 - \frac{T_1 + T_2 + T_3}{3} \right|$$

として求まる。円の法線ベクトルは、2ベクトル $(T_2 - T_1), (T_3 - T_1)$ の外積

$$(\text{円の法線ベクトル}) = (T_2 - T_1) \times (T_3 - T_1)$$

から求まる。

2. モデル座標系とシーン座標系のすべてのエッジのマッチングに対して、これらの操作を行い、投票空間 T 上で構成される円のパラメータ (O_1, R_1, L_1) をすべて求める。

ここで、

O_i : 円 i の中心

R_i : 円 i の半径

L_i : 円 i の法線

π_i : 円 i の中心 O_i を通り、かつ法線が L_i である平面

C_i : 中心 O_i で半径が R_i である球

とおく。

3. 求めた円のパラメータ群

$$\{(O_1, R_1, L_1), (O_2, R_2, L_2), \dots, (O_n, R_n, L_n)\}$$

から任意の2つの円の交点を求め、変位ベクトル T の投票空間に投票を行う。

以下に円の交点の求め方を示す。

- (a) 円のパラメータ群

$$\{(O_1, R_1, L_1), (O_2, R_2, L_2), \dots, (O_n, R_n, L_n)\}$$

から任意の二つの円を取り出し、それを円 i : (O_i, R_i, L_i) 、円 j : (O_j, R_j, L_j) とする。

- (b) L_i と L_j とが平行であるか否かを外積 $L_i \times L_j$ の値を利用して判断する。

- (c) $L_i \times L_j > 0.008$ または、 $L_i \times L_j = 0.008$ のときには、平行でないので、円 i の決める平面 π_i と円 j の決める平面 π_j との交線を求め、その交線と球 C_i との交点を求める。交点を持たない場合には、投票空間への投票はなしとする。交点を持つ場合には、さらに、その交点が球 C_j 上に含まれるかを調べ、含まれる場合には、円 i と円 j との交点として、投票空間 T への投票を行う。

$L_i \times L_j < 0.008$ のときには、平行なので同一平面にあるか否かを、円 j の中心 O_j が円 i を決める平面 π_i の方程式に代入したときに、方程式を満たすかによって判断する。 π_i と π_j とが同一平面でない場合には、円 i と円 j とは交点を持たない。 π_i と π_j とが同一平面で有る場合には、中心一致でかつ半径も一致する場合か、中心一致で半径が異なる場合も、投票点は持たないとする。円 i と円 j との平面 π_i と π_j が平行でかつ同一平面であり、円の中心が一致しない場合には、そのときの交点を求め、それを投票点とする。

3次元空間上の円の方程式は、

$$\text{円 1:} \quad ax + by + cz = d \quad (1)$$

$$(x - m)^2 + (y - n)^2 + (z - o)^2 = p \quad (2)$$

$$\text{円 2:} \quad ex + fy + gz = h \quad (3)$$

$$(x - i)^2 + (y - j)^2 + (z - k)^2 = l \quad (4)$$

と球と平面の方程式の共有点によってあらわされる。図5において、

- 交点が2つということは、式(1),(2),(3),(4)の連立方程式の解が2つであり、
- 交点が1つということは解が1つ、
- 交点が無いということは、解なし、であることに相当する。

以上の操作を、円のパラメータ群 $\{(O_1, R_1, L_1), (O_2, R_2, L_2), \dots, (O_n, R_n, L_n)\}$ から任意の2つの円すべてに対し、行い、すべての投票点を投票空間 T へと投票を行う。

4. 最多投票された T と対応する R が位置姿勢パラメータとして確定する。

投票の方法としては、まず、投票点 T_1 に対して、 E_0 とし、その代表点を T_1 とする。投票点 T_2 については、投票空間 F の中を

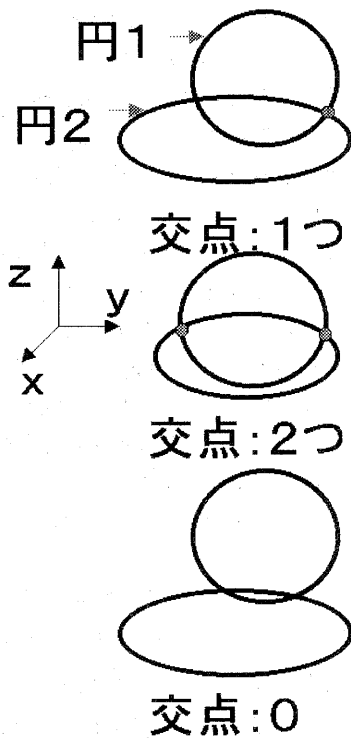


図 5: 2 円の位置関係

見ていき、 E_0, E_1 と見ていき、それぞれの代表点から同じとみなせるだけの近い距離に有る場合には、その E_i に投票し、 E_i の投票値に 1 票を加える。最終的にすべての投票点に対して、この操作を行い、最も投票値の多い投票空間 F 中の E_i の代表値を位置姿勢を決定するパラメータである変位ベクトル T と回転行列 R として採用する。

3.2 提案手法 2: 三角形の合致性を利用する手法

本手法は、モデル上の特徴点群に対して任意の 3 点より構成される三角形と距離画像から得られた特徴点群の任意の 3 点から構成される三角形との合致性の高い組合せに対する変位ベクトル T と回転行列 R を推定し、モデルの各特徴点の

T, R による写像点が、より多く距離画像上で検出された特徴点と同一とみなせる T, R の組み合わせを、位置姿勢を決定するパラメータとして確定する。

モデル特徴点と距離画像より得られる特徴点から、それぞれ、位置姿勢を決定するパラメータ T, R を決定するために、最小の点の対応である 3 点ずつを選び出し、この三角形の合致性を確認することにより、計算時間を短縮させることが、本手法の特徴である。

以下に、本手法のアルゴリズムを示す。

1. モデルの特徴点 (M 個) から任意の 3 点を選び、この 3 点から決定される三角形を M_i とする。そして、距離画像から決定されたシーンの特徴点 (s 個) より任意の 3 点を選び、この 3 点から決定される三角形を S_j とする。
2. M_i と S_j の合致性を確認する。
3. 合致とみなせる場合には、変位ベクトル T および回転行列 R を求める。
4. そして、この T, R に対し、モデルの特徴点のすべてをシーン中に写像し、写像されたモデルの特徴点のうち、その近傍に距離画像中の特徴点を含む点の数 N_k を確認する。
5. 以上について、モデルからの任意の 3 点からなる三角形とシーンからの任意の 3 点からなる三角形の組み合わせのうち、対応する三角形の合致性の高いものについて、それぞれについての総当りを行う。
6. すべて終了したとき、各 T, R を用いて写像されたモデルの特徴点のうち、その近傍に距離画像中の特徴点をもつもの数 N_k が最大値であるような、 T, R の組み合わせを正しい位置姿勢パラメータであると確定する。

4 シミュレーション結果

図 2,3 はモデル特徴点 8 点、シーンから得られた特徴点 40 点に対する、位置姿勢を示すパラメータを決定するための T の投票空間の様子である。

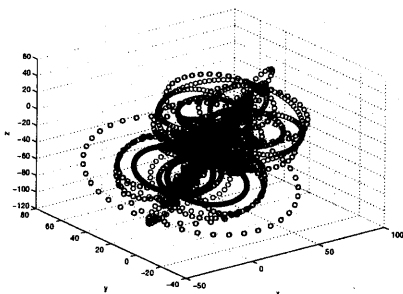


図 6: Gongzhu 法による T の投票空間

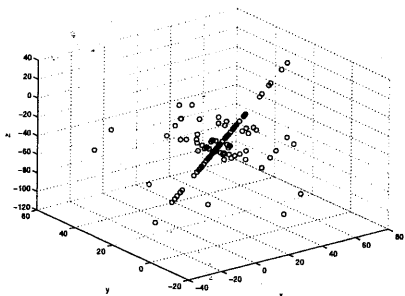


図 7: 提案手法 1 による T の投票空間

下表は、モデル特徴点 8 点に対して、シーンから得られた特徴点を、モデルに対応する特徴点 8 点とした場合と、モデルの特徴点に対応しない特徴点が多く加わった 40 点とした場合の位置姿勢を示すパラメータを決定するのに要した時間を示す。

シーンの特徴点数	3 点	8 点
Gongzhu の手法	12 秒	4704 秒
提案手法 1	0.49	91
提案手法 2	0.21	4

Gongzhu による投票空間に比べ、提案手法 1 では、投票点の数が大幅に減少し、提案手法 1、2 とも計算時間の短縮が確認できた。

5 まとめと今後の課題

物体形状の識別技術に関する位置姿勢推定法に関する提案を行い、推定時間の高速化の確認と、位置姿勢パラメータの精度の向上の確認を行なった。今後の課題としては

- ノイズや計測誤差の影響に対する検討
- 曲面物体に対しての応用の検討

を行なう。

参考文献

- [1] Gongzhu Hu, "3-D Object Matching in the Hough Space", Proc.Int.Conf. on IEEE Systems, Man, and Cybernetics, p2718-2723, 1995
- [2] 角保志、富田文明、"ステレオビジョンによる 3 次元物体の認識", 信学会 D-II, Vol.J80-D-II No.5 p1105-1112, 1997
- [3] 竹野内紋子、金丸直義、水川真、"ピンピッキング作業のための距離画像を用いた物体検出法の検討", ロボット学会学術講演会、No.II, pp555-556, 1996