

特徴点对応を必要としない剛体の位置合せ手法

喜多泰代

電子技術総合研究所 視覚情報研究室

剛体を平行移動、回転移動して得られる任意の位置・姿勢を、特徴点や特徴セグメントの対応ペアの抽出を行わずに検出する手法について発表する。本手法では、対象剛体は対象上の代表点の空間座標値 $P_i(x, y, z)$ ($i=1\sim n$) で表し、これらの代表点の移動後の新しい座標値 $P'_j(x', y', z')$ ($j=1\sim n$) は、その対応はわからないがすべて既知であることを条件とする。まず、移動前と移動後の P_i ($i=1\sim n$) の重心のずれの分、平行移動させることにより重心を重ね合わせる。次に、重心を固定した状態で適切な回転力を加えることにより、目標姿勢に収束させる。この回転力としては、初期姿勢の各点 P_i に対して、目標姿勢のすべての点 P'_j からその2点間の距離の二乗に比例する斥力をかけると、局所安定点に陥る場合が少なく、安定に目標姿勢に収束する興味深い性質を見い出した。そこで、この性質を利用したアルゴリズムを紹介し、その特性に関する考察を示す。また、対象物体の表面の模様の変化から、その物体の位置・姿勢の決定を行なう実験結果についても合わせて報告する。

A registration method for rigid objects without point matching

Yasuyo KITA

ELECTROTECHNICAL LABORATORY COMPUTER VISION SECTION

1-1-4 Umezono, Tsukuba, Ibaraki 305, Japan

A method for registration of rigid objects without point matching is described. In this method, an object is represented as a group of points. Inputs are a group of three-dimensional coordinates of the points in the initial state and in the goal state. No information on point correspondence between the initial and the goal states is given. Firstly, the object is translated from the initial position so that its centroid become coincident with one of the goal position. The difference in posture of the object is corrected by rotating round the centroid by the torque which attracts it to the goal posture. The technique used to obtain such torque is important. We found that repulsive forces to each point of the object from all points at the goal posture, whose magnitude is the square of the distance between the points, satisfactorily produces such torque. In this paper, the algorithm of the method and its performance characteristics are described. Experiments on the registration of rigid objects from observed data are also presented.

1. はじめに

観測データから空間における対象物体の移動量(座標系の移動による相対的な移動も含める)を求める問題は、物体の動きの検出、また、(相対的な移動から)カメラの移動量の検出など種々の応用の基本要素として重要である。今、対象を剛体に限定し、その初期3次元座標を X 、移動後の座標を X' としたとき、

$$X' = R * X + T \quad (1)$$

を満たす平行移動ベクトル T 、回転移動行列 R の組で移動量を表すこととする。観測データとして2次元画像を用いる研究も多くなされている[1][2][3]が、本稿では3次元情報が観測される場合を扱う。3次元情報を入力として対象物体の姿勢の検出を行なう手法の研究[4][5][6]では、基本的に、入力データにエラーや隠れによるデータ落ちがある状態で移動前後でどのように特徴点や面の法線ベクトルなどの正しい対応の組を見つけるかが検討されている。これは、式(1)を解析的に解くためには、どうしても点やベクトルの対応組が必要であることに基づいており、このような単純な特徴に対して正しい対応の組合せを見つけるためには、他の要素との位置関係などを考慮する必要が生じ、処理が複雑になる。

例えば、レンジデータがカラーもしくは濃淡情報とともに得られる場合を考えると、図1の例で、対象剛体表面上の模様(例えば色情報)容易に抽出可能であれば、この部分の対応は難なく得られる。しかし、その輪郭が自由曲線なため、この輪郭上から特徴的な対応点を見つけるのは難しい。そこで、このように、対応する部分(例えば輪郭点列や領域)は容易に得られるが点対応を求めるのは難しい場合に、特徴点抽出、対応点探索を行なうことなく、移動成分を求める問題を本研究報告では考える。以降、対応のとれている部分だけに着目し、この部分を新たに対象物体と呼ぶ。

この問題を解決する代表的な解法は、対象物体のモーメントを利用する手法[7][8]である。対象剛体の移動前後の座標群の1次モーメントからそれぞれの重心が求まるため、重心のずれを平行移動ベクトルとして算出する。姿勢に関しては、重心回りの2次モーメントから各姿勢での直交する3つの主軸方向を算出し、これを一致させる回転ベクトルを解析的に求める。ただし、主軸は方向が得られるだけで向きは定まらないため、 R は一意的ではなく4つの候補行列が求まる。このため、正しい行列を選出する処理が必要である。また、主軸の方向が一意的に定まらない立方体、また底面が正方形の直方体などに関

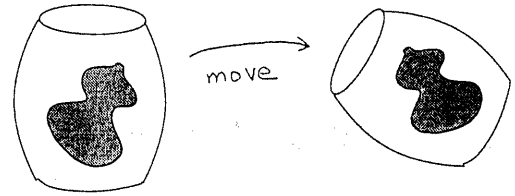
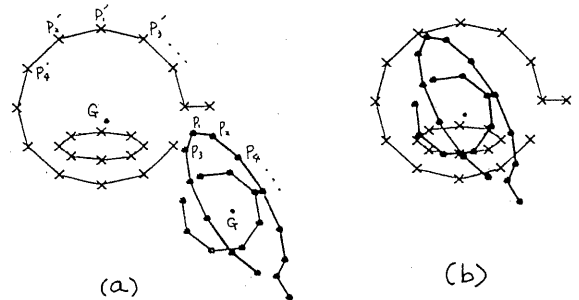


図1: 特徴点对応を求めるのが難しい一例



- Points at initial posture $P_i(x_i, y_i, z_i)(i=1\sim n)$
- × Points at goal posture $P'_j(x'_j, y'_j, z'_j)(j=1\sim n)$

図2: 物体の初期姿勢と目標姿勢

しては、主軸を求めることができず、この手法は適用できない。

本研究報告では、これとは全く異なる戦略で回転行列を求める手法を提案する。説明をわかりやすくするため、図2の例を使う。対象物体の初期状態は代表点の3次元座標 $P_i(x_i, y_i, z_i)(i=1\sim n)$ 、図2の●)の集合で与えられるとする。形状を把握しやすくするため補助線を書き込んであるが、相互の点の構造的な関係は何も与えられておらず、点列の順番にも意味はない。そして、任意の平行移動、回転移動した後のすべての代表点の3次元座標 $P'_j(x'_j, y'_j, z'_j)(j=1\sim n)$ 、図2の×)の集合が観測されるとする。ただし、同様にこの点列の順番には意味もなく、移動前の点との対応も不明とする。対象剛体を表す代表点は移動前後で必ずしも同じ点である必要も、その数が一致している必要もないがしばらくは同一のものとして話を進める(異なる場合に関しては、4.3で述べる)。

まず、平行移動に関してはモーメントと同様に重心を重ね合わせるように移動し(図2b)、初期状態を表す代表点座標集合の移動後の新しい座標を改めて P'_j とし、以後、これを初期姿勢と呼ぶ。 P'_j によって表される移動後の姿勢は目標姿勢と呼ぶこととす

る。今、対象物体が重心で固定されていると想定すると、適切な回転力を加えれば必ず目標姿勢まで回転することに着目する。したがって、目標姿勢からのずれに対して、対象を常に目標姿勢に近づけるような回転力を定義することができれば、この力による物体の回転をシミュレーションすることにより、これを目標姿勢に移動させることができる。Rは、このシミュレーション時の移動量から検出できる。

この戦略の実現性は、移動前後の座標集合だけから対象物体を目標姿勢に常に引き寄せるといった回転力の定義が得られるかにかかっている。2章では、目標姿勢の座標集合から対象物体の座標集合に対する斥力が物体を安定に目標姿勢に引き寄せるといった興味深い性質を紹介し、3章ではこれを利用し対象物体を目標姿勢に位置合せする具体的なアルゴリズムを示す。また、4章で、この手法の特性をいくつかの視点から検討し、5章では、この応用例としてカップの表面の模様を用いた位置・姿勢検出をとりあげ、実データを使った実験結果を示す。

2. 回転力の定義

与えられる情報は初期姿勢と目標姿勢における代表点の座標集合 P_i, P'_j だけなので、回転力の定義は座標集合 P_i の座標集合 P'_j に対する相対的な位置関係に基づくしかない。まず一番自然に思いつく定義として、万有引力があげられる。すなわち、目標姿勢の各点 P'_j からすべての P_i に距離の二乗に反比例する吸引力(ただし距離0においては力0)である。しかし、この定義に基づき生じる回転力を図2の対象物体を例で試したところ、物体の各点に加わる力が平衡して回転力が0となる安定姿勢が目標姿勢以外にも多数存在し、初期姿勢の目標姿勢からのずれが少し大きくなると目標姿勢には収束しない。この多数の局所安定姿勢を生じる理由の一つは、距離 r の関数 $1/r^2$ による引力の定義のため、近傍の目標姿勢の点からの影響が強効くためと考えられる。

これに対して、逆の発想から各点 P'_j からすべての P_i に距離の二乗に比例した斥力を加えると、任意の回転移動量に対して、目標姿勢もしくは重心に対してそれとほぼ正対する姿勢に安定に収束する現象が観測された。斥力による目標姿勢への収束は、図3の2点A,Bからなる系を例とすると次のように説明できる。今、目標姿勢 A_0, B_0 から θ 回転してずれた場合、Aに A_0, B_0 から斥力 F_A, F_B がかかるとする。斥力が距離に比例とした場合、 F_A, F_B により生じる力モーメント N_A, N_B の大きさは、それぞれ図中a, bとなり大きさが等しく打ち消し合う。したがって、斥力が距離の二乗であれば必ず遠い点か

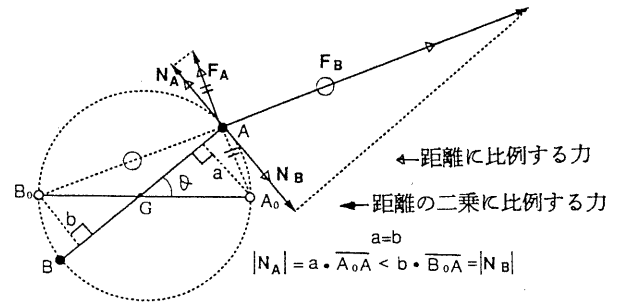


図3: 2点からなる物体における斥力の効果

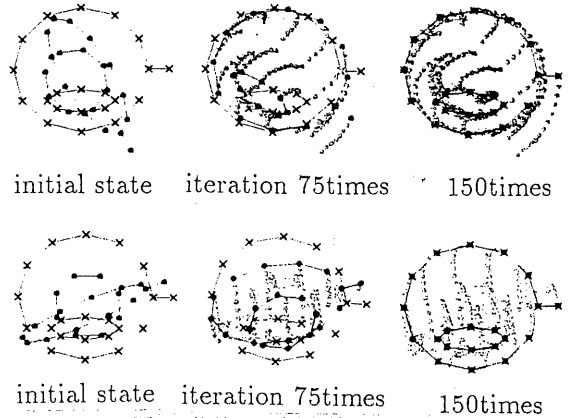


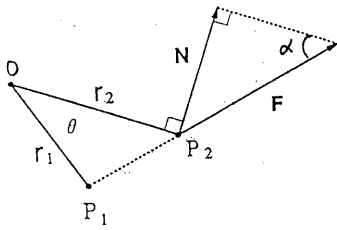
図4: 物体の目標姿勢への収束例
(軌跡を灰色で示す)

ら受ける斥力が大きくなり、常にAは近い方の点に引き戻される。Bについても同様なことが言え、常に回転のずれを減らす方向に合力が働き、目標姿勢に収束する。この2点系では、先に述べた距離の二乗に反比例の引力の定義でも同様な結果が得られるが、後者の場合、斥力の大きさの定義、距離 r の関数 r^2 が遠い点からの影響を強く考慮する形になっているため、対象を表す点数が増えた場合にも局所安定姿勢が生じにくいと考えられる。

3. 位置合せのアルゴリズム

まず、この定義にしたがって生じる力による対象物体の回転運動を逐次近似で算出するアルゴリズムについて述べる。

- 1) 目標姿勢のすべての点 P'_j から各点 P_i に2点間の距離の2乗に比例した斥力 $F(F_x, F_y, F_z)$ を与え、重心固定としたときこの斥力により生じる力モーメントの総和 $N(N_x, N_y, N_z)$ を剛体 $P_i (i=1 \sim n)$ にかかる回転力モーメントとする。
- 2) 今、対象剛体が角速度に比例する抵抗係数 γ を



$$|N_{P_1 P_2}| = r_1 r_2 \sin \theta \sqrt{r_1^2 + r_2^2 - 2r_1 r_2 \cos \theta}$$

図5: P_1 から P_2 へ2点間の距離の二乗の大きさの斥力をかけた時に生じる回転モーメント

もつ粘性流体中で回転すると仮定すると、その運動方程式は $I * d^2\theta/dt^2 + \gamma d\theta/dt = N$ (I は慣性モーメント) となり、 γ が非常に大きく第一項の加速度は無視できるとすると、 $dt = 1$ の間に $d\theta = N/\gamma$ だけ回転すると近似できる。 $(\gamma$ は、 $d\theta$ が微小変移となるように適応的に自動算出する。) この変移を各 P_i に加えて新しい姿勢を算出する。

この1),2)の処理を剛体が $d\theta = 0$ となる安定姿勢に落ちつくまで繰り返す。図4に、この処理により、剛体(●)が図2bの初期状態から目標姿勢(x)まで収束する過程(灰色は軌跡)を示す。初期姿勢から目標姿勢に変換する回転行列 R は、 k 回目の繰り返しにおいて $d\theta$ 回転させる行列を R_k とし、安定するまでの処理回数を m とすると、 $R = R_m * R_{(m-1)} * \dots * R_2 * R_1$ で求まる。

4. 安定状態に関する考察

4.1 安定状態に対する理論的特性

まず、安定状態を解析的に考えてみる。今、図5のように、重心中心の極座標系において、 $P_1(r_1, \phi_1)$ から $P_2(r_1, \phi_2)$ に距離の2乗の力を加えた時の、重心回りの回転力モーメントは、 $\theta = \phi_2 - \phi_1$ とおくと、

$$|N| = r_1 r_2 \sin \theta \sqrt{r_1^2 + r_2^2 - 2r_1 r_2 \cos \theta} \quad (2)$$

と表せる。対象物体が目標姿勢にある状態では、代表点の任意の2点の組合わせにおいて相互に斥力が及び、上式により明らかなように、この斥力のペアは同じ大きさで逆向きの力モーメントを発生するため、任意の物体において回転力が0となる安定状態である。

次に、2次元座標系で対象物が代表点3点で表される場合の振舞いを示す。図6aのように、重心を極

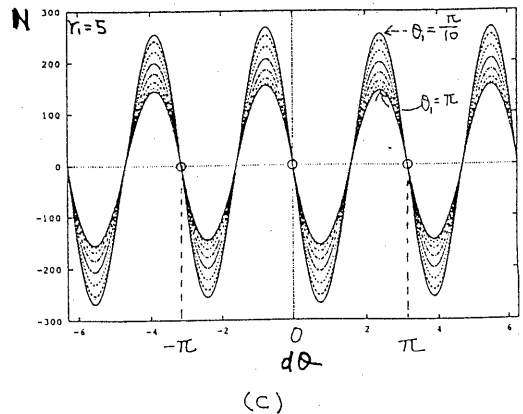
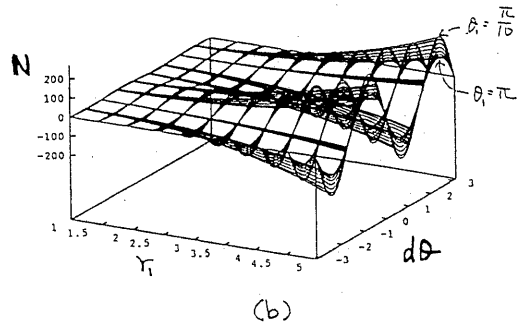
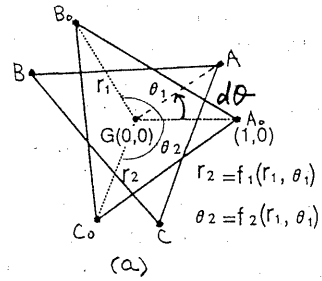


図6: 2次元極座標平面上の3点系の場合

座標系の原点とし、三角形の2点を $A(1,0)$, $B(r_1, \theta_1)$ とおく。最後の一点 $C(r_2, \theta_2)$ は重心条件により必然的に決定するため、 r_1, θ_1 の2つの変数で3点系の一般的な場合を考えることができる。この三角形が、 $d\theta$ 回転した時に目標姿勢の各点 A_0, B_0, C_0 からかかる斥力を式(2)に基づき算出し、各状態にかかる力モーメントを $f(r_1, \theta_1, d\theta)$ の3変数の関数として表した。図6bは、この関数を r_1 と $d\theta$ の2変数の関数として表示し、 θ_1 が $m\pi/10$ ($m=1 \sim 10$) の各値に対して算出した結果である。図6cは、 $r_1 = 5.0$ における断面図である。この図より $d\theta$ が0度と180度において、その点における力モーメントが0でありかつ、その前後で回転のずれに対して常に逆向きの力モー

メントが作用することがわかり、これら2点が唯一の安定点であることを示している。このように、2次元平面上の3点系に対しては安定点の確実性が示せたが、それ以上の点数に関する理論的検討は困難である。

4.2 対象形状に対する経験的特性

いくつかの形状の物体に関して位置合せ実験を行なった。そのうちの一部の結果を図7に示す。図7aは、表彰台をその14頂点で表したものの、図7bは底面が正方形の直方体を8頂点で表したものの、図7cは曲面に描かれたハート型をほぼ等間隔の42代表点で表したものの実験結果例である。実験を行なったほとんどの対象に関して、目標姿勢からの初期姿勢のずれが任意の軸回りに $\pi/2$ 以内(以降、これを片半球内のずれと呼ぶ)なら目標姿勢に収束し、それよりずれが大きい場合、いくつかの異なる姿勢に収束する現象が観測された。安定姿勢数は対象形状によって変化し、図2の例では2つだが、図7a,7cの場合には4つであった。図8に図7aの表彰台の安定姿勢を示す。実験による観察からは、この安定姿勢の数はそう急激には増えず、通常は4以下であると期待される¹。

1章で述べたように、モーメント手法[8]では、図7bのような対象形状物体に対処できないが、本手法では、通常の物体と同様に適用可能である。この場合、目標姿勢に重なるいくつかの姿勢変化が存在するが、本手法では、最も小さい回転移動で重なる姿勢に収束する。したがって、どの姿勢においても片半球以内のずれで目標姿勢に到達できるため、目標姿勢以外の安定姿勢は存在しない。

目標姿勢からのずれがある範囲(一般的には片半球以内)に限られる場合は、必ず目標姿勢に収束するため一意に R を決定できるが、目標姿勢のずれに制約がない場合は、異なる安定姿勢に収束する場合も考慮して正しい R を求める必要がある。これは、下記のような手順で実現できる。まず、あらかじめ、対象物体の安定姿勢を求めておく。先に述べたように、安定姿勢数は物体形状により異なるが、多くてもせいぜい10程度で相互の安定姿勢は離れて存在するため、例えば x, y, z の各軸まわりにそれぞれ $\pi/2, \pi, 3\pi/2$ 回転させた9つの姿勢から収束する姿勢を調べれば、すべての安定姿勢を求めることが一般的に

¹一般的には凹の形状で局所安定姿勢が生じやすいが、2次元平面画像上で輪郭の凹の数を増やしていく実験で、凹が4つまでは各凹に応じた安定姿勢が生じたが、凹が5つ以上では凸同士の間隔が狭くなり、目標姿勢とその正対姿勢の2つの安定姿勢だけとなった。

は可能である。今、安定姿勢が n 個あったとして、それぞれの姿勢を目標姿勢に変換するための回転行列 $R_{s_i}(i=1\sim n)$ を求めておく。初期姿勢を収束させた後、収束後の各代表点の重なりを調べることにより、目標姿勢に安定しているか、それ以外の姿勢であるかは判定できる。もし、目標姿勢でなければ、その姿勢を $R_{s_i}(i=1\sim n)$ で変換し、再度、重なりを調べる。良い重なりが得られるまで、 $R_{s_i}(i=1\sim n)$ を順番に試す。

4.3 異なる代表点による影響

今まで、剛体を表す代表点として移動前後で同じ点の3次元座標値が観測されると仮定して実験を行ってきた。しかし、現実的には対応する線分、領域が得られたとしてもそこから同じ代表点を選択するのは難しい。この節では、移動前後に異なる代表点を選んだ場合の実験結果を示す。図9a,bは、1105点の点列で表された3次元自由曲線の移動前後である。この観測データから、移動前には20点おきに55点、移動後は33点おきに33点を代表点として選び(\times と \bullet)、本手法を適用したところ、図9cのように良好に目標姿勢に収束した。これにより、真の回転軸(0.492, 0.0868, -0.866)まわりの60.0度の回転に対して、回転軸(0.496, 0.0867, -0.864)、回転角59.6度の結果が得られた。

5. 本手法の応用例

誤差が含まれる実データに対する本手法の有効性を検討するために、レンジファインダで観測された3次元データを入力として、本手法によるカップの位置・姿勢検出の実験を行なった。図10aが、実験に用いたカップで、側面に"て", "ら", "し", "や", "す", "よ"の6文字のひらがな模様が入っている。一般的にこのような模様は、背景とのコントラストが固定されており、安定に検出しやすい特徴の一つである。今回の実験では、入力装置としてわれわれの研究室で開発した赤外線レンジファインダ[9]を用いたため、黒い模様部分は赤外線光を反射しない3次元データの欠ける領域として抽出できる。まず最初に、各ひらがなの領域がきれいに観測されるような6つの方向から3次元データを入力し、この6姿勢を基準状態とする。図10bに、2番めの"ら"に対応する基準姿勢データの正面図と側面図を示す。各ドットは3次元データの観測されている点を示す。データの欠如領域として検出される"ら"の領域の輪郭上の3次元座標点列を各点間の3次元距離がほぼ等しくなるように検出し、この座標集合を基準パターンとする。例として、2番めの基準パターンは、図

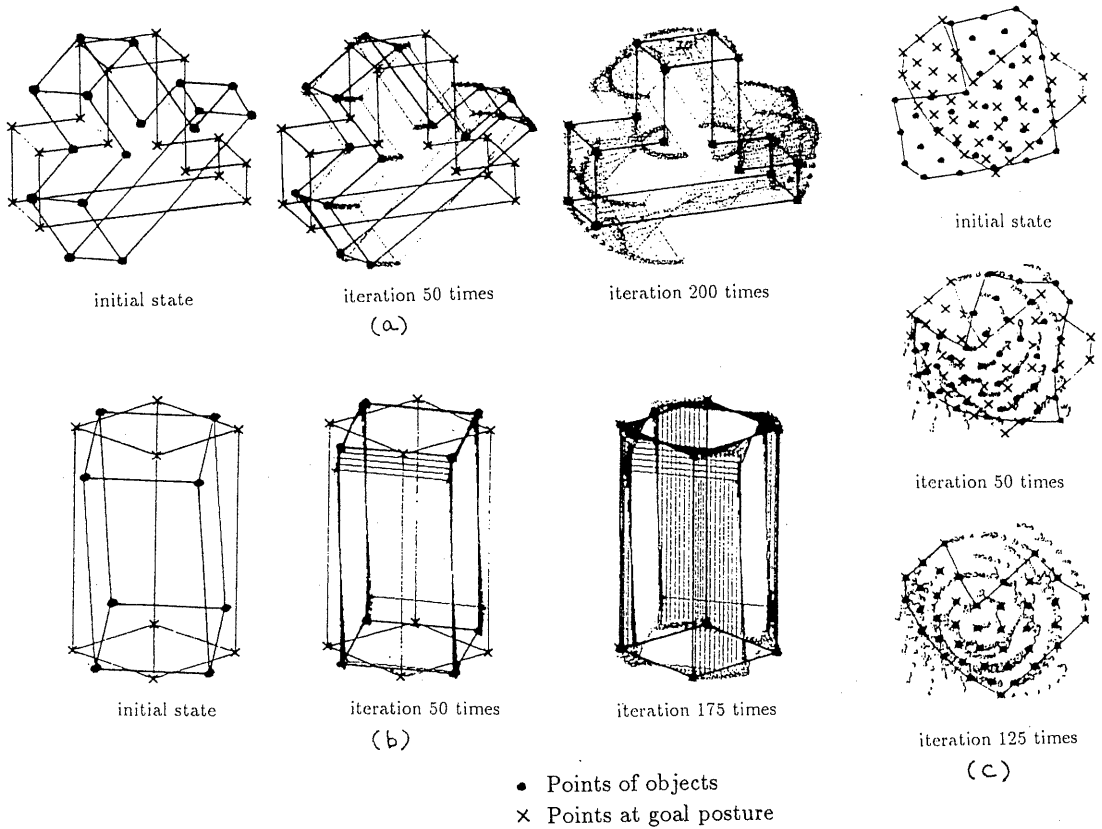


図7: 種々の形状の目標姿勢への収束 (軌跡を灰色で表す)

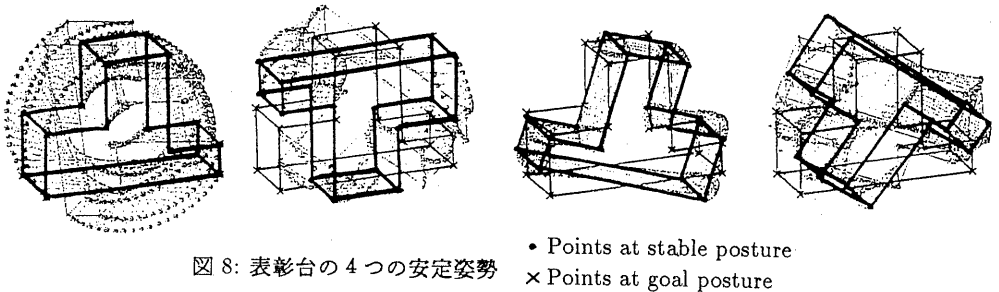


図8: 表彰台の4つの安定姿勢

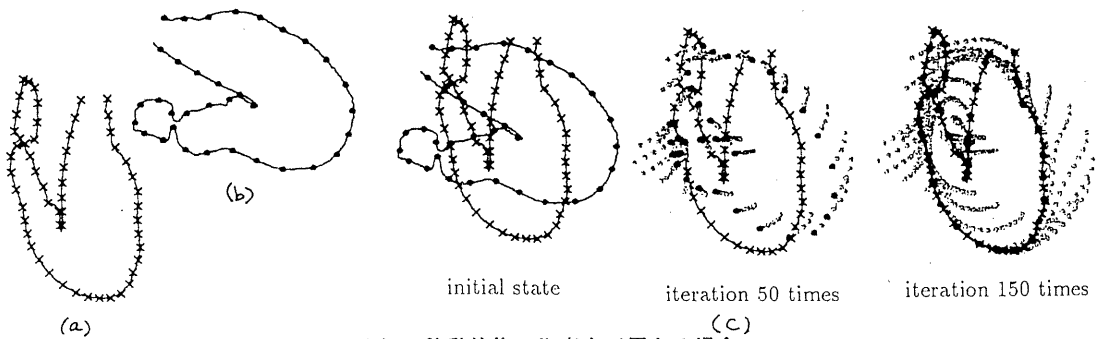
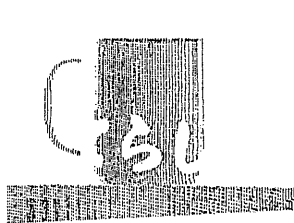


図9: 移動前後で代表点異なる場合



(a) mug used for experiments.

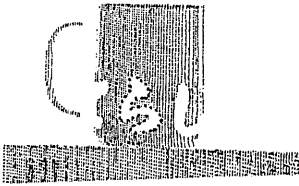


front view



top view

(b) 3D data; dots represents points at which 3D data is obtained.

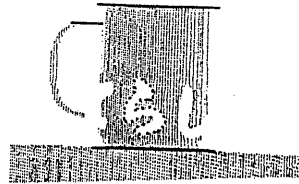


front view

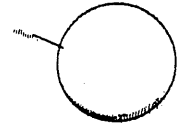


top view

(c) one of 6 canonical patterns.



front view



top view

(d) brim, bottom and handle; the former two are represented as circles and the last one as a short line.

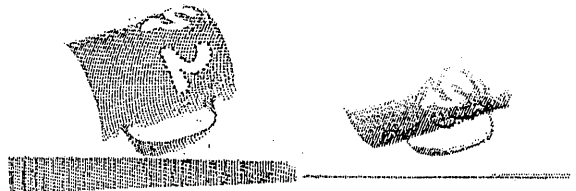
図 10: 基準状態の例



front view

top view

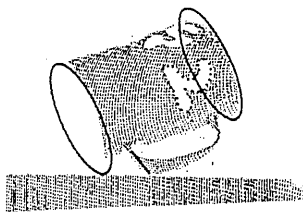
(a) Observed 3D data; dots represents points at which 3D data is obtained.



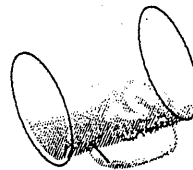
front view

top view

(b) Points on the contour of a possible region for a pattern.



front view



top view

(c) Canonical data transformed by translation and rotation matrices obtained by the method are superposed on the observed data.

図 11: 姿勢検出例

10cの黒点(●)で表す38点の3次元座標である。各基準状態において、カップの縁、底面のへりと持ち手の位置を図10dに示すように円や線分で与える。

任意の位置(ただし、側面の模様が観測される位置)にカップを動かした後、新しい位置での状態をその時見える模様を使って決定する。図11aは、観測データの一例である。まず、模様として可能なデータ欠落領域を抽出し、その領域の輪郭の3次元座標点列を点の距離がほぼ等間隔になるように抽出する(図11b)。この3次元座標集合を目標姿勢、各基準パターンを初期姿勢として、提案した手法でパターンの位置合せを行う。位置合せ後、もっとも最適な重なりを見せた基準パターンを選出し、その基準状態からの平行移動、回転移動にもとづき、現在のカップの姿勢を求める。図11の例では、基準パターン“て”が選ばれた。図11cは、基準状態のカップの縁、底面の縁、持ち手を検出された姿勢に座標変換した結果を重ねたものである。カップの姿勢がほぼ良好に得られているのがわかる。10例以上の種々の姿勢で実験を行ない、同様な結果が得られている。

6. まとめ

本稿では、対象物体を目標姿勢に引き寄せる力のシミュレーションを行なうことにより、剛体の姿勢を検出する新しい手法を提案した。この手法は、目標姿勢のすべての代表点から物体の各代表点と距離の二乗の斥力をかけた時、その総和として物体を目標姿勢に引き付ける回転モーメントが安定に生じるという興味深い性質に基づき実現されている。

この手法の長所は、特徴点抽出やその対応付けを必要とせずに、輪郭や領域など任意な形状の要素の対応に基づき回転行列 R が求まることである。ある部分同士対応は検出されても、その中で点对応を見つけるのが難しい場合に有効である。ただし、対応部分に関しては過不足なく求まっている必要があるので、移動前後両方で、安定に検出される要素を単位とする必要がある。

逐次近似で繰り返し演算を行ない安定姿勢への収束を求めるが、力の定義が不連続点を含まず単純であるため、演算時間は短い。演算時間は、代表点数の二乗に比例し、目標姿勢からのずれの大きさに比例するが、20点の代表点(図2の例)で、50度ずれている場合に、SUN SS10で0.5秒である。このことに加え、物体が目標姿勢からある範囲内(一般的に片半球内)のずれであれば常に目標姿勢に安定に収束することを考慮すると、物体の姿勢の変化をリアルタイムに追跡する目的にも有用と考えられる。

<謝辞>有益な御助言をいただいた、藤村是明主

任研究官、喜多伸之主任研究官、また、高瀬国克知能システム部長および富田文明研究室長をはじめとする視覚情報研究室の皆様へ深く感謝いたします。特に3次元画像データの入力に関しては、吉見隆主任研究官、植芝俊夫主任研究官、河井良浩研究官にお世話になりました。

参考文献

- [1] R.Y. Tsai and T.S. Huang: "Uniqueness and estimation of three-dimensional motion parameters of rigid objects with curved surfaces", *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol.6, No. 1, pp.13-27, 1984.
- [2] D. G. Lowe: "The viewpoint consistency constraint", *International Journal of Computer Vision*, Vol. 1, No. 1, pp.57-72, 1987.
- [3] 森尻智昭, 金谷健一: "3次元運動の不偏推定法と統計的誤差解析", 情処研資, CV77-3, pp.17-24, 1992.
- [4] O. D. Faugeras and M. Hebert: "The representation, recognition, and locating of 3D objects", *Int. J. Robotics Research*, Vol. 5, No. 3, pp. 27-52, 1986.
- [5] S. Umeyama, T. Kazvand and M. Hospital: "Recognition and positioning of three-dimensional objects by combining matchings of primitive local patterns", *Computer Vision, Graphics & Image Processing*, Vol. 44, No. 1, pp.58-76, 1988.
- [6] 増田健, 横矢直和: "2枚の距離画像からの物体の3次元剛体運動パラメータの推定", 第22回パターン計測部会研究・見学会資料, pp.17-24, 1993.
- [7] L. G. Brown: "A survey of image registration techniques", *ACM Computing Surveys*, Vol 24, No. 4, pp.325-376, 1992.
- [8] J. M. Galves and M. Canton: "Normalization and shape recognition of three-dimensional objects by 3D moments", *Pattern Recognition*, Vol. 26, No. 5, pp. 667-681, 1993.
- [9] T. Yoshimi and M. Oshima: "Multi light sources range finder system", In *Proc. of IAPR workshop on CV*, pp. 245-248, 1988.