

画像系列からの人体運動復元に関する一考察

白石 圭子 寺内 睦博 翁長 健治

広島大学工学部

新しいマン・マシンインターフェースを実現するための手法の一つとして、人間の運動を復元しようとする研究は従来から盛んに行なわれている。本研究の目的は単眼正射影動画像から運動に伴う2次元形状の変化に着目した運動復元を行なうことである。人体形状を表すモデルとしては各リンクを一般化円筒、円錐で近似したモデルがよく使われているが、本研究では各リンクを3軸の長さの違う楕円体で近似したリンクモデルを用いるものとする。本稿では特に、3次元での運動と2次元形状間の関係の定式化と、2次元形状から3次元姿勢を抽出する手法についての考察を行なう。

A Consideration on Reconstruction of Human Motion from an Image Sequence

Keiko Shiraiishi[†], Mutsuhiro Terauchi and Kenji Onaga

Faculty of Engineering, Hiroshima University
1-4-1 Kagamiyama, Higashi-Hiroshima 724 Japan

[†] keiko@infonets.hiroshima-u.ac.jp

This paper presents an approach to recognize human motion from a single viewed image sequence in order to realize a new man-computer interface. The human body is assumed to be linked model of rigid segments which are approximated by ellipsoids with three different length of diameters. The reconstruction of human motion is mainly performed by interpretation of 2D pattern deformation as 3D motion. We show the effectiveness of utilizing changes of curvature and discontinuity on the contour of 2D pattern for human motion reconstruction.

1. はじめに

将来のマン・マシンインタフェースではより人間の立場に近く、より自然な情報の伝達手段の実装が期待されている。このための有力なメディアには、言語が通じない状況でのコミュニケーション手段としての身振り、手振りなどのボディランゲージがある。このような人間同士の柔軟なコミュニケーション能力を解析し導入することが望まれる。

これまで人間の動作を解析する問題に対して、Badlerらはコンピュータ生成の人体のシミュレート画像を用いて運動の表現方法を定義し¹⁾、制約伝播オペレータを用いて時系列画像の解析を行った²⁾。Webbらは剛体リンク状の対象を観察することにより、その構造を復元する手法を提案した³⁾。また Akita は人体を一般円錐で表現し、時系列画像において画像中の局所的な輪郭形状をコード化し、これをマッチングさせることにより人体運動の解析を行った⁴⁾。柴藤らはこれをもとに画像中の輪郭の曲率に着目し、より信頼性のある特徴点を抽出するとともに、両側のエッジの直線性とデータとの整合性を用いて、より正確なリンクの中心軸を推定し、画像から人体姿勢を求めている⁵⁾。しかし、これらの研究では画像上における2次元パターンの変形という観点から見た場合、その2次元での形状や変形を十分に利用しているとは言えない。

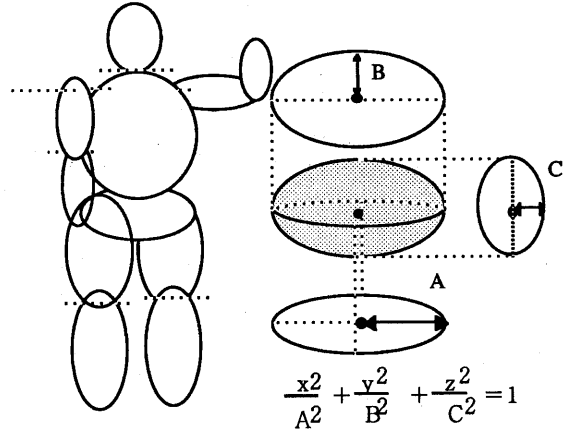


Fig.2 人体表現モデルと楕円体

そこで本研究では、2次元画像上での人体各部分の形状とその変形に着目して、人体の姿勢や運動を簡単な曲面モデルを用いて復元する方法について考察する。

2. 画像系列の分析の概要と準備

本研究では、運動する人間を写した継時的な画像系列を分析して運動を3次的に復元し、また可能ならばその後の運動を予測することを目標とする。

2.1 処理の概要

運動解析の処理の概略を Fig.1 に示す。時系列に並んだ静止画像のそれぞれを処理し、それぞれ一枚の画像から得られる知識を集め、さらにその知識から連続する画像の処理に役立つ情報を抽出する。

まず、各々の画像から輪郭線を抽出し、人体の各部分に分割する。次に各部分の形状から3次元シーンでの各リンクの姿勢を独立に推測する。復元された人体の部分どうしをリンクモデルの記述に基づき連結し、全体の人体姿勢を推定する。個々の画像で人体の姿勢が抽出できれば連続する画像間での各リンクのマッチングを調べることにより運動が抽出できる。このような画像間での姿勢の推定を行い移動量を調べるという従来手法に付加して、それぞれの画像での局所的な特徴点付近の形状を調べ、画像間での形状の変化から直接人体運動を抽出することも並行的に行うことを考える。

2.2 人体形状のモデル

3次元での人間の動きを2次元の投影画像から復元する場合、まず人体を空間上の物体としてどのように表現するかということが問題となる。

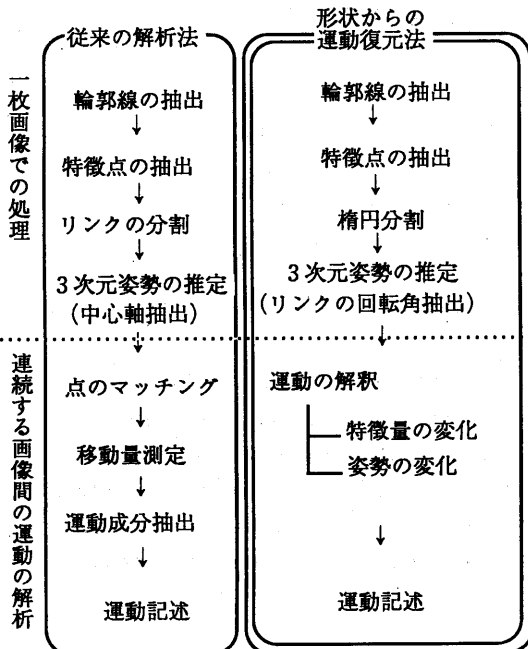


Fig.1 画像解析の概略

Table 1 楕円体の運動と画像特徴の関係

3次元の運動		画像上での変化			
		極点		リンク	
		位置	曲率	端点位置	長さ
並進運動	Z軸に沿った	無	無	無	無
	それ以外の方向	平行移動	無	平行移動	無
回転運動	Z軸回り	回転移動	無	回転移動	無
	それ以外の方向	有り(?)	有	楕円軌道上の運動	有

本研究では人体の形状は Fig. 2 のようなモデルとして表すことにする。人体をおもだった関節部で個々のリンクに分割し、それぞれの形状を楕円体で近似表現する。ここで関節は楕円体の長軸の一端、または両端付近の決った位置にあるものとする。また楕円体の3軸の長さは人体の標準的な寸法として与え、関節の可動範囲を拘束条件として付加する。ここで楕円体を人体の各リンクの形状の近似モデルとする利点は、楕円体の射影像は楕円であり、その画像上の輪郭から対象リンクの姿勢を推定可能なことである。

2.3 画像における特徴点

画像から得られる輪郭を個々のリンクに分割したり、運動を推定する場合に手がかりとなる特徴として以下のものが考えられる。

(1) 不連続点

(2) 曲率の極点

一般に、平面上に存在する滑らかな閉じた曲線はその曲率の極点が形状を決定すると Leyton は提唱しており⁶⁾、人体の射影像も滑らかな曲線により構成されていることから、この曲率の極点を用いると、人体のリンクの投影形状はある程度特定できると考えられる。また人体形状はその投影平面上では各リンクを楕円で近似できることから、負の曲率と不連続点はリンクの輪郭の重なる部分や関節の周りに現われる。そこで負の曲率をもつ部分や不連続点をリンクの分割に利用する。

(1) 不連続点の利用

空間中で、奥行方向に物体が交差している場合、それらの投影面上では個々の部分の輪郭が重なるため、輪郭の交差点に微分不可能な不連続点が生じる。不連続点は人間の姿勢や動き、関節の曲げなどの相対的位置関係に起因する。また直線の輪郭線をもつ物体の重なり除去のための部分分割において、輪郭線の凹頂点を結ぶ線が分割線になる可能性が高いこ

とが報告されている⁷⁾。これらの手法を用いることにより、各リンクへの部分分割は行われると考えられる。

(2) 曲率の利用

3次元空間で円盤を直径を軸にして回転させた時に、その正射影では極点の曲率は回転につれて変化する。このことから、曲率の極をもつ滑らかな曲面体が回転運動を行うとその正射影像では極点の曲率が変化すると考えられる。運動に伴うこのような曲率の変化は物体の回転運動の抽出に役立つ。

まず、単独の楕円体の運動から射影画像上の曲率の変化と3次元での運動との関係を調べる (Table 1)。ただしここでは回転運動と並進運動は区別しておく。

3. 単一リンクの3次元姿勢の推定

3.1 単一リンクの投影像

本研究で、用いる画像は物体の正射影画像とする。(Fig. 3) 正射影画像を使用する利点には以下のようなことがある。

- ・画像と物体の距離により大きさが変化しないため歪が生じない。
- ・運動を定式化しやすい。
- ・単眼映像は視点と物体の距離が充分遠ければ正射影と見なせる。

2次元の画像では、3次元の物体をある一方向だけからみているので、画像間で対応をとる場合必ずしも対応点があるとはかぎらない。つまり不可視領域内の運動は認識できないということになる。また対応関係が認められる点の間にも、それらが対応しているという保証はない。そのため、点の対応関係ではなく2次元画像上での形状やその変形に注目して姿勢や運動を抽出することは有用である。

本研究では楕円体により構成される人体モデルを用いて解析を行う。ここではまず、ひとつの3次元楕円体の姿勢と投影面上での輪郭との相関関係について考察する。

各リンクの重心のX-Y面での位置は画像から計算可能であり、ここでは各リンクの姿勢のみに注目していることから、リンクの重心点に3次元座標の原点を置くことができる。したがって楕円体の一般式のうち1次の項は無視できるから、楕円体の表面は、次式で表される。

$$a_1x^2 + b_1y^2 + c_1z^2 + d_1xy + e_1yz + f_1xz + g_1 = 0 \quad \dots (1)$$

ここで、式(1)の各係数はリンクの三軸の長さ r_1, r_2, r_3 および楕円体の姿勢 $(\theta_1, \theta_2, \theta_3)$ ($\theta_1, \theta_2, \theta_3$ はそれぞれX軸, Y軸, Z軸回りの回転

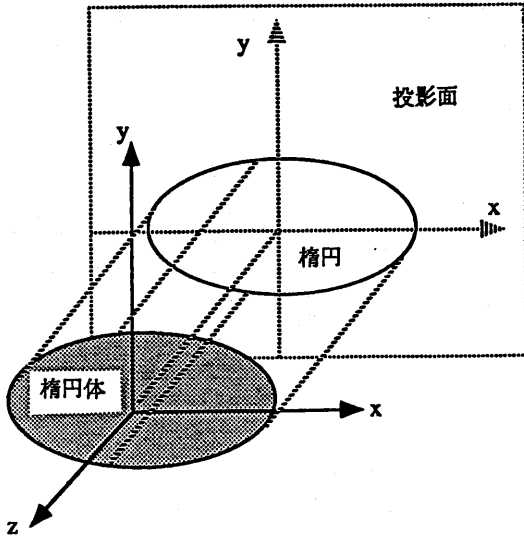


Fig.3 楕円体の正射影

角) によって以下のように表される.

$$\begin{aligned}
 a_1 &= a \cos^2 \theta_2 \cos \theta_3 + b \cos \theta_2 \sin \theta_3 + c \sin \theta_2, \\
 b_1 &= a (-\sin \theta_1 \sin \theta_2 \cos \theta_3 + \cos \theta_1 \sin \theta_3)^2 + \\
 &\quad b (\cos \theta_1 \cos \theta_3 + \sin \theta_1 \sin \theta_2 \sin \theta_3)^2 + \\
 &\quad c \sin \theta_1^2 \cos \theta_2^2, \\
 c_1 &= a (\sin \theta_1 \sin \theta_2 \cos \theta_3 + \sin \theta_1 \sin \theta_3)^2 + \\
 &\quad b (\sin \theta_1 \cos \theta_3 - \cos \theta_1 \sin \theta_2 \sin \theta_3)^2 + \\
 &\quad c \cos \theta_1^2 \cos \theta_2^2, \\
 d_1 &= 2 \cos \theta_2 (a (\sin \theta_1 \sin \theta_2 \cos \theta_3 - \\
 &\quad \cos \theta_1 \cos \theta_3 \sin \theta_3) + \\
 &\quad b (\cos \theta_1 \sin \theta_3 \cos \theta_3 + \sin \theta_1 \sin \theta_2 \sin \theta_3^2) + \\
 &\quad c (\cos \theta_1 \sin \theta_3 \cos \theta_3 + \sin \theta_1 \sin \theta_2 \sin \theta_3^2)), \\
 e_1 &= -2 (a (\cos \theta_1 \sin \theta_2 \cos \theta_3 + \sin \theta_1 \sin \theta_3) \\
 &\quad (-\sin \theta_1 \sin \theta_2 \cos \theta_3 + \cos \theta_1 \sin \theta_3) + \\
 &\quad b (\cos \theta_1 \cos \theta_3 + \sin \theta_1 \sin \theta_2 \sin \theta_3) \\
 &\quad (\sin \theta_1 \cos \theta_3 - \cos \theta_1 \sin \theta_3) - \\
 &\quad c (\cos \theta_1 \cos \theta_3^2 \sin \theta_3)), \\
 f_1 &= -2 \cos \theta_2 (a (-\cos \theta_1 \sin \theta_2 \cos \theta_3 - \\
 &\quad \sin \theta_1 \sin \theta_2 \cos \theta_3) + \\
 &\quad b (\sin \theta_1 \sin \theta_3 \cos \theta_3 - \cos \theta_1 \sin \theta_2 \sin \theta_3^2) + \\
 &\quad c (\cos \theta_1 \sin \theta_2)), \\
 g_1 &= d, \\
 a &= r_1^2 r_2^2, b = r_1^2 r_3^2, c = r_1^2 r_2^2, d = r_1^2 r_2^2 r_3^2.
 \end{aligned}$$

投影画像上の楕円が3次元上の楕円体をどの平面で切取ったものであるのかということが一般には不明であるため、2次元楕円の輪郭生成線を求めることを考える。式(1)をZについて偏微分すると以下の4次式が導かれる。

$$A x^4 + (B y^3) x^3 + (C y^2 + D) x^2 + (E y^3 + F y) x + G y^4 + H y^2 + I = 0 \quad \dots\dots(2)$$

ここで、それぞれの係数は以下の式で表される。

$$A = (f_1^2 - 4a_1 c_1)^2 (a_1 e_1^2 - d_1 e_1 f_1 + b_1 f_1^2)^2,$$

$$B = 4c_1 (f_1^2 - 4a_1 c_1) (d_1 f_1 - 2a_1 e_1) (d_1 e_1 - 2b_1 f_1) (a_1 e_1^2 - d_1 e_1 f_1 + b_1 f_1^2),$$

$$\begin{aligned}
 C &= -2 (a_1 e_1^2 - d_1 e_1 f_1 + b_1 f_1^2) (-16 a_1^2 b_1 c_1^2 e_1^2 - \\
 &\quad -8 a_1 c_1^2 d_1^2 e_1^2 + 4 a_1 c_1 e_1^4 + \\
 &\quad 48 a_1 b_1 c_1^2 d_1 e_1 f_1 - 4 a_1 c_1 d_1 e_1^3 f_1 - \\
 &\quad 16 a_1 b_1^2 c_1^2 f_1^2 - 8 b_1 c_1^2 d_1^2 f_1^2 - \\
 &\quad 8 a_1 b_1 c_1 e_1^2 f_1^2 + 4 c_1 d_1^2 e_1^2 f_1^2 + \\
 &\quad 4 a_1 e_1^4 f_1^2 - 4 b_1 c_1 d_1 e_1 f_1^3 - \\
 &\quad d_1 e_1^3 f_1^3 + 4 b_1^2 c_1 f_1^4 + b_1 e_1^2 f_1^4),
 \end{aligned}$$

$$D = -4c_1 g_1 (f_1^2 - 4a_1 c_1) (2a_1^2 e_1^4 - 2a_1 d_1 e_1^3 f_1 + d_1^2 e_1^2 f_1^2 - 2b_1 d_1 e_1 f_1^3 + 2b_1^2 f_1^4),$$

$$E = 4c_1 (e_1^2 - 4b_1 c_1) (d_1 f_1 - 2a_1 e_1) (d_1 e_1 - 2b_1 f_1) (a_1 e_1^2 - d_1 e_1 f_1 + b_1 f_1^2),$$

$$F = -8c_1 g_1 (d_1 f_1 - 2a_1 e_1) (d_1 e_1 - 2b_1 f_1) (2a_1 c_1 e_1^2 + 2b_1 c_1 f_1^2 - e_1^2 f_1^2),$$

$$G = (e_1^2 - 4b_1 c_1)^2 (a_1 e_1^2 - d_1 e_1 f_1 + b_1 f_1^2)^2,$$

$$H = -4c_1 g_1 (e_1^2 - 4b_1 c_1) (2a_1^2 e_1^4 - 2a_1 d_1 e_1^3 f_1 + d_1^2 e_1^2 f_1^2 - 2b_1 d_1 e_1 f_1^3 + 2b_1^2 f_1^4),$$

$$I = 16 c_1^2 g_1^2 (-a_1 e_1^2 + b_1 f_1^2)^2.$$

一般に、4次方程式は2つの2次方程式の積の形で表すことができ、以下のように3組の2次方程式での表現が求められる⁸⁾。

$$\begin{cases} x^2 + 1x + (1^2 - m^2 - n^2 - 2mn)/4 \\ x^2 + 1x + (1^2 - m^2 + n^2 - 2ln)/4 \end{cases} = 0$$

$$\begin{cases} x^2 - mx + (1^2 + m^2 - n^2 + 2lm)/4 \\ x^2 + mx + (1^2 + m^2 - n^2 - 2lm)/4 \end{cases} = 0$$

$$\begin{cases} x^2 - mx + (1^2 - m^2 + n^2 + 2ln)/4 \\ x^2 + mx + (1^2 - m^2 + n^2 - 2ln)/4 \end{cases} = 0$$

ここで、l, m, n はそれぞれ、次の3次元方程式の3つの解の符号を反転したものの平方根をとり、その符号を反転したものである。

$$\omega^3 + s\omega^2 + t\omega + u = 0 \quad \dots\dots(3)$$

ここで s, t, u は、以下のように4次方程式の係数で表される。

$$s = -\frac{2D}{A} + y^2 \left(\frac{3B^2}{4A^2} - \frac{2C}{A} \right),$$

$$t = \frac{D^2}{A^2} - \frac{4I}{A} + y^2 \left(-\frac{B^2 D}{2A^3} + \frac{2CD - BF}{A^2} + \frac{4H}{A} \right) + y^4 \left(\frac{3B^4}{32A^4} - \frac{B^2 C}{2A^3} + \frac{C^2 - BE}{A^2} + \frac{4G}{A} \right),$$

$$u = y^2 \left(\frac{B^2 D^2}{4A^4} - \frac{BDF}{A^3} + \frac{F^2}{A^2} \right) + y^4 \left(-\frac{B^4 D}{8A^5} + \frac{2B^2 CD + B^3 F}{4A^4} - \frac{BDE + BCF}{A^3} + \frac{2EF}{A^2} \right) + y^6 \left(\frac{B^6}{64A^6} - \frac{B^4 C}{8A^5} + \frac{B^2 C^2 + B^3 E}{4A^4} - \frac{BCE}{A^3} + \frac{E^2}{A^2} \right).$$

l, m, n は次のようになる。

$$l^2 = \frac{s}{3} +$$

$$\frac{-\frac{s^2}{9} + \frac{1}{3}}{\left(-\frac{s^3}{27} + \frac{st}{6} - \frac{u}{2} + \sqrt{\left(-\frac{s^2}{9} + \frac{1}{3} \right)^3 + \left(-\frac{s^3}{27} + \frac{st}{6} - \frac{u}{2} \right)^2} \right)^{\frac{1}{3}}}$$

$$\left(-\frac{s^3}{27} + \frac{st}{6} - \frac{u}{2} + \sqrt{\left(-\frac{s^2}{9} + \frac{1}{3} \right)^3 + \left(-\frac{s^3}{27} + \frac{st}{6} - \frac{u}{2} \right)^2} \right)^{\frac{1}{3}},$$

$$m^2 = \frac{s}{3} -$$

$$\frac{(\sqrt{-3} - 1) \left(-\frac{s^2}{9} + \frac{1}{3} \right)}{2 \left(-\frac{s^3}{27} + \frac{st}{6} - \frac{u}{2} + \sqrt{\left(-\frac{s^2}{9} + \frac{1}{3} \right)^3 + \left(-\frac{s^3}{27} + \frac{st}{6} - \frac{u}{2} \right)^2} \right)^{\frac{1}{3}}}$$

$$(1 - \sqrt{-3}) \cdot$$

$$\frac{\left(-\frac{s^3}{27} + \frac{st}{6} - \frac{u}{2} + \sqrt{\left(-\frac{s^2}{9} + \frac{1}{3} \right)^3 + \left(-\frac{s^3}{27} + \frac{st}{6} - \frac{u}{2} \right)^2} \right)^{\frac{1}{3}}}{2},$$

$$n^2 = \frac{s}{3} +$$

$$\frac{(2\sqrt{3} - 1) \left(-\frac{s^2}{9} + \frac{1}{3} \right)}{\left(-\frac{s^3}{27} + \frac{st}{6} - \frac{u}{2} + \sqrt{\left(-\frac{s^2}{9} + \frac{1}{3} \right)^3 + \left(-\frac{s^3}{27} + \frac{st}{6} - \frac{u}{2} \right)^2} \right)^{\frac{1}{3}}}$$

$$(1 + \sqrt{-3}) \cdot$$

$$\frac{\left(-\frac{s^3}{27} + \frac{st}{6} - \frac{u}{2} + \sqrt{\left(-\frac{s^2}{9} + \frac{1}{3} \right)^3 + \left(-\frac{s^3}{27} + \frac{st}{6} - \frac{u}{2} \right)^2} \right)^{\frac{1}{3}}}{2}.$$

このようにして4次方程式の解として得られる三組の2次方程式の積のうち一つが輪郭生成線を表している。

3.2 楕円体モデルを用いた3次元姿勢探索的解法

(1) 楕円体の初期姿勢

基準姿勢は、楕円体の3軸のうち長いものから順に a, b, c とするとき x 軸を a, y 軸を b, z 軸を c とおいたものとする。一方、画像からは楕円の方程式をもとめ、長軸 a' と短軸 b' をえる。画像の長軸と短軸がもとまれば画像の楕円の中心と楕円体の重心を重ね合わせ、基準姿勢にある楕円体をその長軸の方向が画像からえた楕円の長軸に一致するまで z 軸(c 軸) まわりで回転させる。このときの楕円体の姿勢を初期姿勢とし、a, b, c 軸はそれぞれ x', y', z' 軸上にあるものとする。

ここで用いる手法では、画像からえられる長軸の長さ |a'| 短軸の長さ |b'| が、

$$|b| \leq |a'| \leq |a| \text{ かつ } |c| \leq |b'| \leq |b|$$

の場合にのみ適用可能という制約がある。

(2) 漸近的な姿勢の決定

楕円体の姿勢を求める方法の概略を以下に記す⁹⁾。まず、画像の楕円の方程式と長軸、短軸がもとまり、楕円体の初期姿勢がえられているところから出発する。

①楕円体の a 軸の投影された長さが画像上の長軸の長さに近づくように y 軸(つまり b 軸)まわりに回転させ長さを一致させる。座標軸 x'', y'', z'' を a, b, c 軸上にとる。(以後回転させるごとに a, b, c 軸上に新しい座標軸をとる。)

②次に短軸方向の長さが一致するように x'' 軸(a 軸)まわりに回転させる。

③このとき長軸方向と a 軸にずれがあれば補正するために z''' 軸(c 軸)まわりに楕円体を回転させて二軸を一致させる。

以上の①~③を繰返して楕円体を投影した楕円と画像上の楕円の長軸、短軸を一致させる。(Fig. 4)

つまり収束するまでの n 回の回転系列はオイラー角表現を用いて、

$$\text{Euler}(\theta_0, \dots, \theta_n) = \text{Rot}(z, \theta_0) \text{Rot}(y, \theta_1) \text{Rot}(x, \theta_2) \text{Rot}(z, \theta_3) \text{Rot}(y, \theta_4) \text{Rot}(x, \theta_5) \dots \text{Rot}(z, \theta_n)$$

となる。ここで、

$$\text{Rot}(z, \theta_{3k}) = \begin{bmatrix} \cos \theta_{3k} & -\sin \theta_{3k} & 0 & 0 \\ \sin \theta_{3k} & \cos \theta_{3k} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

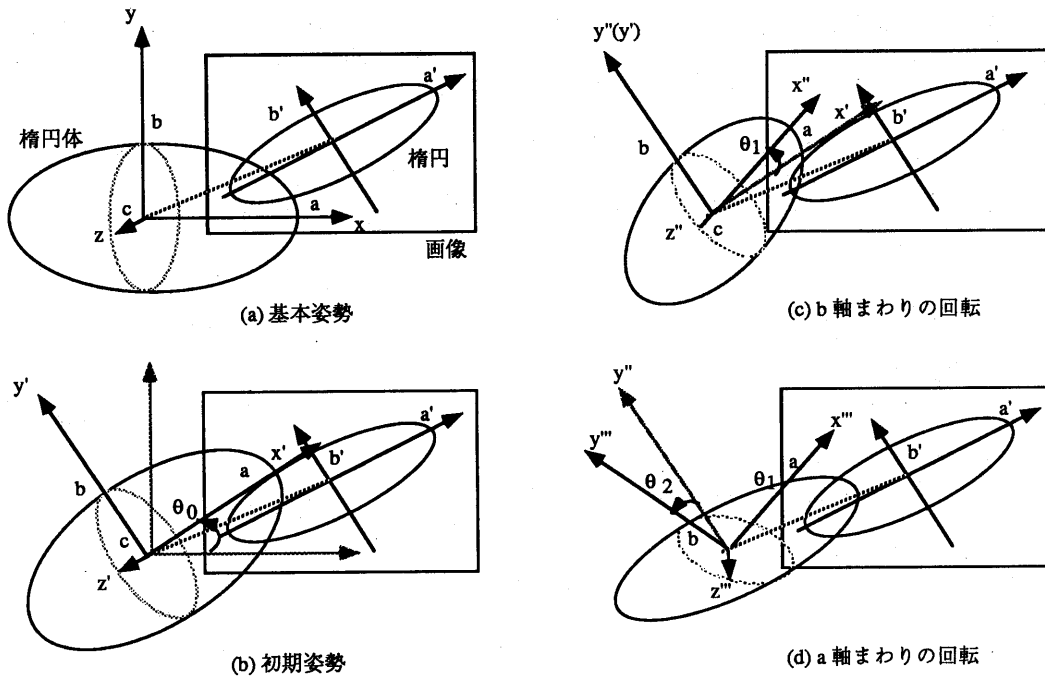


Fig.4 姿勢の探索的解法

$$\text{Rot}(y, \theta_{3k+1}) = \begin{bmatrix} \cos \theta_{3k+1} & 0 & \sin \theta_{3k+1} & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \theta_{3k+1} & \cos \theta_{3k+1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\text{Rot}(x, \theta_{3k+2}) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_{3k+2} & -\sin \theta_{3k+2} & 0 \\ 0 & \sin \theta_{3k+2} & \cos \theta_{3k+2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\text{Euler}(\theta_0, \dots, \theta_{n-1}) = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & 0 \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & 0 \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

よって、これらの式を連立させて解くことにより橢円体の姿勢 (ϕ, θ, ϕ) が決定できる。

4. 輪郭変形の解釈

本研究では復元の対象とする人体は剛体リンクである橢円体と仮定しているので、画像上でのその投影後の輪郭の変化は必ず対象物の運動に起因している。また平行投影下では対象の並進運動は画像上でもz軸を除く平面上での並進運動として観測できる

ので、像上の橢円の重心位置の変化から求めることができる。

3次元の橢円体表面の主曲率の6つの極点では、その点の画像への投影点が画像上の投影輪郭の曲率の極点となるような物体の3次元姿勢が何通りもあるが、橢円体上のその他の点については、その投影点と2次元輪郭の曲率の極点とが一致する姿勢は1組(1つの姿勢とその鏡像)しか存在

ただし k は $0 \leq k \leq \lfloor \frac{n-1}{3} \rfloor$ の整数とする。
ここで(1)式の橢円体の表現はロール、ピッチヨーの回転角で記述しているのでその回転は

$$\text{RPY}(\phi, \theta, \varphi) =$$

$$\begin{bmatrix} \cos \phi \cos \theta & -\cos \phi \sin \theta & \sin \phi \cos \theta & 0 \\ \cos \theta \sin \phi & \cos \phi \cos \theta & \sin \phi \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \phi \cos \theta & \sin \phi \sin \theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

となり上述のオイラー角表現した回転変換と等価になるので、実際に得られる収束までの回転系列を表す回転行列 $\text{Euler}(\theta_0, \dots, \theta_{n-1})$ を下のよう

しない。よって一般的には、画像上で観測される極点の変化は対象の運動により輪郭上に異なる楕円体の点が出現していると解釈できる。つまり前章で得られる3次元姿勢と画像上の極点位置から、これに対応する楕円体上の点を求め、これと楕円の極の曲率変化より物体の回転運動とその大きさを限定できる可能性がある。さらに画像面上での極の運動、極間の距離（長短軸の長さ）を用いることにより回転運動パラメータの解の候補をしぼることができると考えられる。なお、この解法については現在考察中である。

5. おわりに

本稿では、人間の運動系列の正射影画像の変化を3次的に解釈するための枠組に関する一考察を行った。従来にも人間の運動を解析する手法は提案されているが、それらは形状表現モデルとしてはリンクモデルや一般化円筒、円錐モデルを用い、それらのモデルをあてはめることからその中心軸を求め、人体の構造および運動を復元するものがほとんどである。本研究では、2次元の輪郭から直接3次元の姿勢の推定を行うということと、画像中の局所的な特徴量変化をも有効に利用して、対象の運動を解析するために曲率の変化と運動の関係について考察することを行った。すなわち、従来用いられてきた手法である“姿勢からの運動抽出”と、曲率の変化という局所的情報からの定性的な運動抽出を並行的に行いながら、ある程度の精度が得られる場合には定性的運動抽出を主とした運動抽出を行うという方法を提案した。

今後の課題としては、本稿で示した定性的な解析の限界点を見極め、定量的手法との融合方法を確立し、人体の運動復元を実現することである。また、二枚の画像間の運動解析だけでなく、時系列画像の流れの中で運動予測をしたり、画像間の状態の補間も必要であろう。さらに、個々の部分の運動の解析だけでなく、全体の運動を復元するとともに、何を行っているのかという動作の解釈を推論することも考えていきたい。

[参考文献]

- 1) N. I. Badler and S. W. Smoliar : “ Digital representation of human movement ” , Ass. Comput. Mach. Comput. Surv. 11 pp19-38 (1979).
- 2) J. O'Rourke and N. I. Badler : “ Model-based image analysis of human motion using constraint propagation ” , IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell. PAMI-2 pp522-536 (1980).
- 3) J. A. Webb and J. K. Aggarwal : “ Structure from

motion of rigid and jointed objects ” , Proc. 7th IJCAI pp686-691 (1981).

- 4) K. Akita : “ IMAGE SEQUENCE ANALYSIS OF REAL WORLD HUMAN MOTION ” , Pattern Recognition Vol. 17 No. 1 pp73-83 (1984).
- 5) 栄藤稔, 伴野明, 小林幸雄 : “ステレオ輪郭像を用いた円錐体モデルの再構成” , 信学技法 PRU89-36 pp69-76 (1988).
- 6) M. Leyton : “ A Process-Grammar for Shape ” , Artificial Intelligence, Vol. 34 pp213-247 (1988).
- 7) 北橋忠宏, 巨煉, 古林貴, “シルエットによる対象物認識” , 情報処理学会研究報告 64-7 pp49-56 (1990).
- 8) フォン・デル・ヴェルゲン : “ 現代代数学2 ” 東京図書.
- 9) R. P. Paul : “ ROBOT MANIPULATORS, PROGRAMMING, AND CONTROL ” , The MIT Press (吉川恒夫訳 : “ ロボットマニピュレータ ” , コロナ社 , (1984).