

論 文

ロボットモデルに基づく人間動作の3次元動画像追跡

山本 正信[†] 川田 聡[†] 近藤 拓也[†] 越川 和忠^{††}

Human Motion Analysis Based on a Robot Arm Model

Masanobu YAMAMOTO[†], Satoshi KAWADA[†], Takuya KONDO[†],
and Kazutada KOSHIKAWA^{††}

あらまし 本論文では、3次元的に動作を行っている人間を動画像により追跡する手法を提案している。この手法は、まず人体の立体形状をあらかじめCADモデルで構成しておき、このモデルを追跡開始フレームで人体像に一致させておく。追跡は運動パラメータの推定と、得られたパラメータに基づくモデルの移動を交互に繰り返すことにより達成される。運動パラメータは人体をロボットとみなしたときのアームパラメータである。パラメータの推定は時空間こう配法による直接推定である。実際に、階段を下りる、椅子から立ち上がる、コーナを曲がる、などの動作の動画像追跡により本手法の有効性を確認している。また、追跡結果をCGアニメーションにより再現し、3次元の追跡であることを強調している。

キーワード 動画像解析、人間の行動、ロボットモデル、追跡、CADモデル、時空間こう配法

1. まえがき

動画像による動作の解析は、人間とコンピュータとの知的コミュニケーションや、動きの個性を取り入れたアニメーションの制作、あるいは器用なマニピュレータの動作計画、等に役立つことができる。

人の動きの動画像解析は古くから行われてきた。動きを使って人体の部分を抽出し、それらが手であるか足であるかの認識[9]、3次元構造や連節構造の抽出[8]、[18]、胴体のような人体主要部の発見とそれによる簡潔な動きの記述[1]、[2]、ジェスチャーやスポーツの動作の認識[15]、[17]、[25]等が課題である。本論文では3次元運動をしている人間の追跡問題を扱っている。

人体の動画像追跡は、その構造や動きが複雑なことから、特徴点やエッジあるいは領域の追跡[16]、時空間断面画像の利用[19]、[21]といったボトムアップ的な手法だけでは不十分である。対象についての知識を使ったトップダウン的なアプローチが必要になってくる。

O'Rourkeら[12]は人体を関節でつながったセグメントモデルで表した。人体の追跡に、このセグメントモデルから導かれる拘束を利用することを提案したが、実際の画像を対象としていない。Hogg[4]は、木構造をもつ一般化円筒を人体のモデルとして採用した。モデルの輪郭と画像から得られる人体の輪郭を探索手法により照合し追跡した。更に、Rohr[14]はこのモデルの運動パラメータをカルマンフィルタを使って精度良く推定した。一方、木本ら[6]はスティックモデルで人体の構造を表した。スティックモデルは人体各部の移動可能な範囲を予測することができる。追跡はこの範囲内を探索することにより行われる。これらの研究では、動作は直線歩行に限定され3次元動作を扱っていない。より複雑な3次元動作の追跡を目指した研究[5]もあるが、追跡は頭や手など部分的対象の追跡に留まっている。

本論文では、一般的な3次元動作を行っている人間を追跡する。人間の3次元追跡を行うことは、単に画像上で人間像を追跡できるだけではない。人間の3次元動作を復元できることも意味する。そのためには、人間の動作をどのように表現し記述するのが問題となる。

コンピュータグラフィックスの世界では、人体を多関節ロボットアームでモデル化することが一般的となっ

[†] 新潟大学工学部情報工学科, 新潟市
Faculty of Engineering, Niigata University, Niigata-shi, 950-21 Japan

^{††} 電子技術総合研究所, つくば市
Electrotechnical Laboratory, Tsukuba-shi, 305 Japan

ている。このとき人体の姿勢はアームの関節角度で表すことができる。また、人体の運動は関節角速度を運動パラメータとして表すこともできる。人体のモデルとして提案された、関節セグメントモデルや一般化円筒の木構造あるいはスティックモデルなどは、剛体がリンクによって接続した木構造であり、これらはすべてロボットモデルとみなすこともできる。

Yamamoto ら [22], [23] はこのロボットモデルを CAD モデルにより実装し、動画像から時空間こう配法を使って、動作の運動パラメータを推定した。しかし、この初期の研究では、人体の動きが画像面に平行な動きに限定されていた。本論文では、この手法を一般的な人間の 3 次元運動が扱えるように拡張している。そのとき、動作を表す運動パラメータが精度良く安定に推定できるように工夫している。この手法をいくつかの 3 次元追跡実験で確認している。更に、追跡した 3 次元動作をコンピュータアニメーションにより再現する。

2. 追跡アルゴリズムの概要

3 次元シーンに図 1 のように直交座標系を設定する。シーン中の点 (x, y, z) は座標系の原点を視点として、 z 軸に垂直な平面に中心投影されるとする。この座標系はカメラを中心としているのでカメラ座標系と呼ぶ。投影面座標 (X, Y) は、 z 軸と投影面の交点を原点に、 X, Y 軸をそれぞれ x, y 軸と平行になるように定めておく。投影面を $z = f$ とすれば、点 $\mathbf{p} = (x, y, z)$ とその投影 (X, Y) との関係は次式で与えられる。

$$\begin{cases} X = f \frac{x}{z} \\ Y = f \frac{y}{z} \end{cases} \quad (1)$$

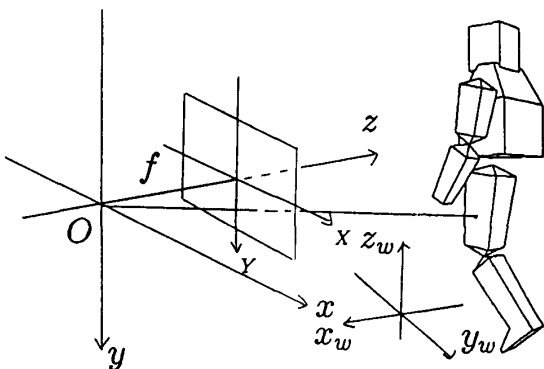


図1 カメラ座標系, ワールド座標系, 人体のロボットモデル

Fig.1 The camera-centered and world coordinates systems.

点 \mathbf{p} の 3 次元速度ベクトル $(u, v, w)^T$ と、その投影点の速度ベクトル (U, V) との関係は、式 (1) を時刻 t で微分することにより次のように得られる。

$$\begin{cases} U = f \frac{u - Xw}{z} \\ V = f \frac{v - Yw}{z} \end{cases} \quad (2)$$

画面上の点 (X, Y) における時刻 t での明るさを $E(X, Y, t)$ とする。点 (X, Y) が微小時間 δt 経過後、点 $(X + \Delta X, Y + \Delta Y)$ に移動したとする。移動先との明るさの差を、点 (X, Y) , 時刻 t においてテーラー展開し、2 次以上の微小項を無視すれば、下の近似式 (3) を得る。

$$\begin{aligned} E(X + \Delta X, Y + \Delta Y, t + \delta t) - E(X, Y, t) \\ \approx E_X \Delta X + E_Y \Delta Y + E_t \delta t \end{aligned} \quad (3)$$

$$\approx E_X U + E_Y V + E_t \quad (4)$$

更に、移動ベクトル $(\Delta X, \Delta Y)$ を、点 (X, Y) での速度ベクトル (U, V) を用いて次式で近似し、

$$\begin{cases} \Delta X \approx U \delta t \\ \Delta Y \approx V \delta t \end{cases} \quad (5)$$

フレーム間の時間間隔を $\delta t = 1$ とおくことにより、明るさの差は式 (4) で近似することができる。

移動先でも明るさが変わらないとすれば、速度ベクトルは次の 1 次方程式から近似的に知ることができる。

$$E_X U + E_Y V + E_t = 0 \quad (6)$$

ここで、 (E_X, E_Y) は明るさの空間こう配であり、 E_t は時間こう配である。それぞれ動画像から差分演算などで容易に計算することができる。

式 (2) を式 (6) に代入すれば、3 次元速度ベクトルの拘束式が得られる。

$$\frac{f}{z} E_X u + \frac{f}{z} E_Y v - \frac{f}{z} (X E_X + Y E_Y) w + E_t = 0 \quad (7)$$

この式で、 $\dot{\mathbf{p}} = (u, v, w)^T$, $\mathbf{G} = (f E_X / z, f E_Y / z, -f (X E_X + Y E_Y) / z)$ とおけば、上式は

$$\mathbf{G} \dot{\mathbf{p}} + E_t = 0 \quad (8)$$

とも書ける。

一方、人体を図 1 のように多関節アームロボットでモデル化する。このとき人体は複数の剛体のジョイント結合で表される。 $\mathbf{p} = (x, y, z)^T$ を人体上 (モデル上) の任意の位置ベクトルとすれば、 \mathbf{p} はロボットアーム

の位置と姿勢を表すベクトル

$$\mathbf{q} = (q_1, q_2, \dots, q_n)^T$$

を用いて、次式のような関係で表すことができる [13].

$$\mathbf{p} = \mathbf{f}(\mathbf{q}) \quad (9)$$

\mathbf{q} は人間の位置と姿勢を表すパラメータでもある。ベクトル関数 \mathbf{f} は一般に非線形関数であるが、姿勢ベクトル \mathbf{q} の時間変化率 $\dot{\mathbf{q}}$ に対する位置 \mathbf{p} の速度ベクトル $\dot{\mathbf{p}}$ は、 \mathbf{f} のヤコビ行列 $\mathbf{J}(\mathbf{q})$ を使って次の線形式で関係づけられる。

$$\dot{\mathbf{p}} = \mathbf{J}(\mathbf{q})\dot{\mathbf{q}} \quad (10)$$

ここで、 $\mathbf{J}(\mathbf{q}) = \partial \mathbf{f} / \partial \mathbf{q}$ である。 $\dot{\mathbf{q}}$ は人間の動作を表す運動パラメータでもある。

この式 (10) の速度ベクトルを式 (8) に代入すれば、

$$\mathbf{G}\mathbf{J}(\mathbf{q})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{E}_t = 0 \quad (11)$$

となる。 \mathbf{G} はカメラから人体までの距離 z と時空間こう配値が与えられれば、確定するベクトル量である。ヤコビ行列 $\mathbf{J}(\mathbf{q})$ はロボットモデルの幾何学的構造さえわかればそれから得ることができる。従って、式 (11) は人間の動作を表す運動パラメータを知るための線形推定式となる。ロボットモデル上のいくつかの点から導かれるこの推定式を連立させれば、次の線形連立方程式が得られる。

$$\mathbf{A}\dot{\mathbf{q}} = \mathbf{b} \quad (12)$$

ここで、

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} \mathbf{G}_1 \mathbf{J}_1 \\ \mathbf{G}_2 \mathbf{J}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{G}_n \mathbf{J}_n \end{pmatrix} \quad \mathbf{b} = \begin{pmatrix} -\mathbf{E}_{t_1} \\ -\mathbf{E}_{t_2} \\ \vdots \\ -\mathbf{E}_{t_n} \end{pmatrix}$$

運動パラメータはこの線形連立方程式を解くことにより得られる。追跡開始フレームにおいて、ロボットモデルは人体の位置と姿勢を正しく表しているとする。その後の位置・姿勢は各フレームでの解 $\dot{\mathbf{q}}$ をつなぎ合わせるにより知ることができる。すなわち、時刻

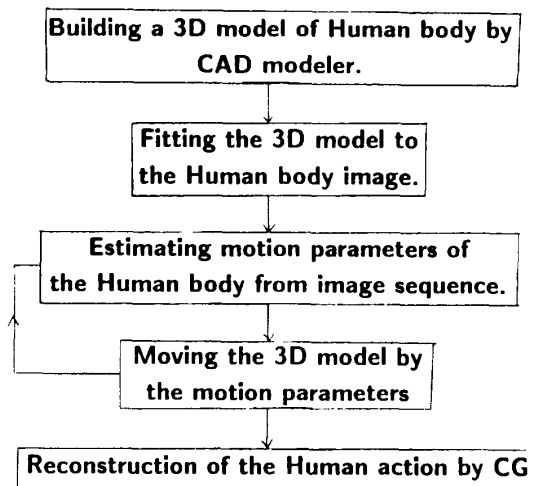


図2 人間動作の追跡処理の流れ

Fig. 2 Steps of processing for human motion tracking.

t における人間の位置・姿勢 $\mathbf{q}(t)$ は

$$\mathbf{q}(t) = \mathbf{q}(0) + \sum \dot{\mathbf{q}} \quad (13)$$

で与えられる。ここで、 $\mathbf{q}(0)$ は追跡開始フレームでの人体の位置・姿勢である。

運動パラメータ $\dot{\mathbf{q}}$ を求めるための前提条件として、人体の立体モデルの作成法、このモデルを追跡開始フレームで人体に一致させる方法、を3.で述べる。連立線形推定式 (12) の係数行列の具体的な求め方を4.で、この線形推定式を安定に精度良く解くための方法を5.で述べる。6.では、追跡実験およびコンピュータアニメーションによる動作の再現結果を示す。本手法による追跡のための処理の流れを図2に示す。

3. 人体のCADモデル

人体の立体モデルは幾何モデラ SOLVER [7] (A solid modeler for vision engineering research) で作られる。この幾何モデラは、ソリッドモデルとして立体を作成することができる。直方体、球、回転体、凸多面体、一般錐台、等素立体と呼ばれる基本的な立体について、それらを表すパラメータを対話的にコンピュータ内に入力することにより作成する。複雑な対象物の立体モデルは、素立体同士の集合演算により作成することができる。

人体のモデルは、まず各部分の立体モデルを作ることから始められる。ここで、人体の部分とは、頭、胴体、上腕、下腕、上脚、下脚、などである。それらの3次元モデルを作成するためには、対象となる人間の

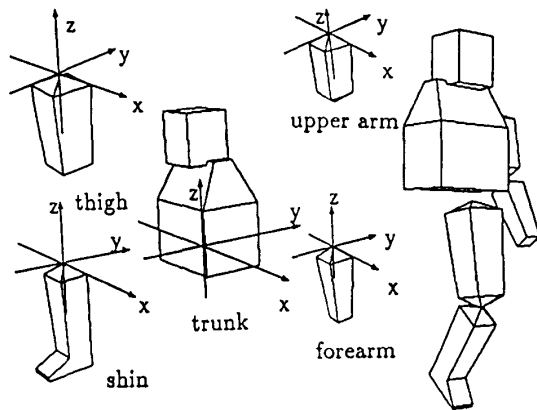


図3 人体各部のCADモデル
Fig. 3 CAD modeling of parts of human body.

寸法を実際に測定しておく。図3に作成された人体各部分の幾何モデルを示す。ここでは、頭は胴体に固定されている。

作成された立体モデルは、ワールド座標系内に配置される。ワールド座標系は3次元シーンに固定された座標系である。それぞれの部分立体も固有の座標系もっている。図3にはそれぞれの座標系の軸が重ねて描かれている。胴体の原点はへその奥付近に置かれている。また、上腕、下腕、上脚、下脚の原点は、それぞれ肩、肘、腰、膝に位置している。立体モデルはワールド座標系の中で、自由に移動させることができる。移動は並進移動と回転移動である。回転移動は、固有座標系の原点を通る軸回りの回転である。この移動は物体の固有座標系も一緒に移動させる。つまり、物体が移動しても物体とその固有座標系との関係は変わらない。この移動も対話的に行わせることができる。ワールド座標系に対する物体座標系の位置と姿勢は、物体の移動のたびに更新される。シーンを観測するカメラのモデルも作るができる。図1には、カメラ座標系がワールド座標系と共に描かれている。カメラもワールド座標系内で自由に移動させることができる。ワールド座標系に対するカメラ座標系の位置・姿勢もカメラの移動のたびごとに更新される。このカメラから見た物体モデルの投影は、画像と重ねて表示させることができる。この機能により物体とその3次元モデルの照合を確認することができる。

追跡開始フレームで、人体モデルを人体に一致させるには次のようにする。単一の画像を使って、物体とその3次元モデルを照合させる問題には、既に多くの手法が提案されている[3],[10]。それらのほとんどは、物体が剛体でありその3次元モデルが正確に作られ

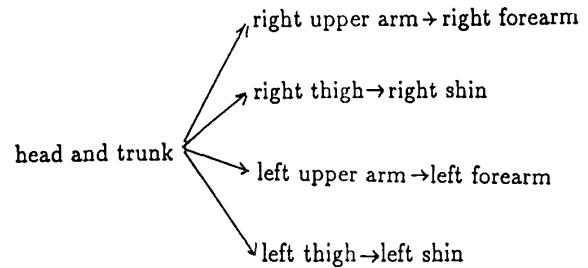


図4 人体の木構造モデル
Fig. 4 Tree structure of human body.

ていることが前提となっている。本論文では、対象となっている人体は非剛体であり、ロボットモデルは人体の近似モデルである。従って、これまでの手法を適用することはできない。本論文では、モデルを投影面に投影し、その投影像が人体像と一致するようにモデルの位置と姿勢を手動で調整した。奥行き方向の位置は、中心投影を仮定しているので、モデルの投影像を人体像の大きさに合わせることで決定できる。姿勢は、胴体や手足の中心軸（体軸）の方向が投影面と平行であれば（例：真横から見た歩行動作）、照合は比較的容易であるが、平行でなければ困難である。そこで、(1) 体軸が投影面と平行となるフレームを捜し追跡開始フレームとする（例：6.3の実験）、(2) 画像内の演者と同じ姿勢を試み3次元姿勢を推測する、等の方法で照合を行っている。

人体の手、足、胴体は互いに関節を介してつながっている。我々の幾何モデルは、各部分の座標系に親子関係を結ぶことにより接続構造を表すことができる。図4はこのようにして結ばれた人体の木構造である。矢印は親から子の方向を示している。親を移動させれば、子も付随して親と一緒に移動する。しかし、子の移動は親と独立である。

モデルが人体と一致した状態で、モデルから引き出される情報は、領域情報と距離情報の二つである。領域情報は、画面上で人体の各部分の占める領域を表している。カメラから見て他の物体に部分的に隠されているときには、隠された部分を除いた残りの領域が表示される。この領域マップにより、画像上の任意の点が人体上の点か、人体上の点であるならば、どの部分に属しているかを知ることができる。距離情報は、カメラから見て最も近い、すなわち見えている物体表面までの距離情報を与える。これはカメラ座標系の z 値で与えられる。人体の領域情報と距離情報は後で運動パラメータを算出するときに使用する。これらの情報

表1 座標変換と運動変換

Table 1 Coordinate and motion transforms.

Object	Coordinate Transform	Motion Transform
Camera	$\mathbf{p}_w = R(t)\mathbf{p} + \mathbf{T}(t)$	
Body	$\mathbf{p}_u = R_1\mathbf{p}_1 + \mathbf{T}_1$	$\mathbf{p}_1(t) = Q_1(t)\mathbf{p}_1 + \mathbf{S}_1(t)$
SubBody	$\mathbf{p}_w = R_2\mathbf{p}_2 + \mathbf{T}_2$	$\mathbf{p}_2(t) = Q_2(t)\mathbf{p}_2 + \mathbf{S}_2(t)$
SubSubBody	$\mathbf{p}_w = R_3\mathbf{p}_3 + \mathbf{T}_3$	$\mathbf{p}_3(t) = Q_3(t)\mathbf{p}_3 + \mathbf{S}_3(t)$

はZバッファアルゴリズムを用いて計算される。

4. ヤコビ行列の計算

運動パラメータの推定式(11)の係数は、ベクトル \mathbf{G} とヤコビ行列 \mathbf{J} との積である。ベクトル \mathbf{G} は動画像の時空間こう配値とモデルから与えられる距離情報 z とから決定される。本節では、ヤコビ行列 \mathbf{J} の決定法を述べる。

人体各部の動きは、各部固有の物体座標系で表されている。例えば、歩いているときの腕の動きは、両肩を結んだ直線を軸とした振り子運動である。胴体の向きが変われば、腕の回転軸は見かけ上変わるが、腕固有の座標系では一定の回転軸の回りに回転している。このように、運動は各部の固有の座標系で表した方が都合が良い。しかし、観測できるのはカメラ座標系での座標値 (x, y, z) であるので、カメラ座標系と物体の座標系との間の変換が必要となる。すなわち、カメラ座標を物体座標に座標変換し、物体座標系で記述された運動結果をカメラ座標系に逆変換することにより、カメラ座標と運動パラメータの関係を求めるのである。

図1には、人体の立体モデルがカメラ座標系やワールド座標系と共に描かれている。立体モデルを構成する部分物体が、親子関係でつながっているとき、これらの部分物体を1, 2, 3, ...の順番で順序づけておく。例えば、物体1を胴体としたとき、物体2は上腕、物体3は下腕とみなしてよい。また、物体2, 3をそれぞれ上脚、下脚とみなしてもよい。各物体の座標系とワールド座標系との座標変換式が表1に示されている。 \mathbf{p} , \mathbf{p}_w , \mathbf{p}_i は、それぞれカメラ座標系、ワールド座標系、および物体 i の座標系で表された座標値を意味する。 R_i は回転を表す変換行列であり、 \mathbf{T}_i は並進を表す変換ベクトルである。また、物体の運動も同じ表に示されている。運動は各物体座標の原点回りの回転運動を表す変換行列 Q_i と並進運動を表す変換ベクトル \mathbf{S}_i で表される。更に、カメラ座標系とワールド座標系との間の変換も、回転を表す変換行列 R 、並進

ベクトル \mathbf{T} で表される。

カメラはワールド座標に対して移動可能とする。この移動を強調するために、時刻 t を入れて次のように表記する。

$$R(t) = \begin{pmatrix} \cos \phi(t) & -\sin \phi(t) & 0 \\ \sin \phi(t) & \cos \phi(t) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$\cdot \begin{pmatrix} \cos \psi(t) & 0 & \sin \psi(t) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \psi(t) & 0 & \cos \psi(t) \end{pmatrix}$$

$$\cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varphi(t) & -\sin \varphi(t) \\ 0 & \sin \varphi(t) & \cos \varphi(t) \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{T}(t) = \begin{pmatrix} a(t) \\ b(t) \\ c(t) \end{pmatrix}$$

ここで、 φ, ψ, ϕ はそれぞれ、 x, y, z 軸回りの回転角である。特に、初期状態 $t = 0$ で、

$$R(0) = R_0, \mathbf{T}(0) = \mathbf{T}_0 \tag{14}$$

とする。

物体の運動も同様に次のように表す。回転行列は、

$$Q_i(t) = \begin{pmatrix} \cos \phi_i(t) & -\sin \phi_i(t) & 0 \\ \sin \phi_i(t) & \cos \phi_i(t) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$\cdot \begin{pmatrix} \cos \psi_i(t) & 0 & \sin \psi_i(t) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \psi_i(t) & 0 & \cos \psi_i(t) \end{pmatrix}$$

$$\cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varphi_i(t) & -\sin \varphi_i(t) \\ 0 & \sin \varphi_i(t) & \cos \varphi_i(t) \end{pmatrix}$$

また、並進運動は

$$\mathbf{S}_i(t) = \begin{pmatrix} a_i(t) \\ b_i(t) \\ c_i(t) \end{pmatrix}$$

と表す。初期時刻で

$$\phi_i(0) = \psi_i(0) = \varphi_i(0) = a_i(0) = b_i(0) = c_i(0) = 0$$

とすると、回転行列は単位行列となり、並進行列はゼロベクトルである。

$$Q_i = \mathbf{I}, \mathbf{S}_i(0) = \mathbf{0}$$

物体1上の点 $\mathbf{p} = (x, y, z)^T$ が、時間 t 経過した後の位置 $\mathbf{p}(t)$ は表1を参照しながら次のように計算される。

\mathbf{p} をワールド座標で表すと、 $\mathbf{p}_w = R_0\mathbf{p} + \mathbf{T}_0$ である。これを物体1の座標で表すと、 $\mathbf{p}_1 = R_1^{-1}(\mathbf{p}_w - \mathbf{T}_1)$ となる。物体の運動により、この点は $\mathbf{p}_1(t) = Q_1\mathbf{p}_1 + \mathbf{S}_1$ に移動する。移動先の位置はワールド座標で $\mathbf{p}_w(t) = R_1\mathbf{p}_1(t) + \mathbf{T}_1$ となる。カメラ座標に変換すれば、 $\mathbf{p}(t) = R^{-1}(\mathbf{p}_w(t) - \mathbf{T})$ となる。以上の変換と運動を行うと、

$$\mathbf{p}(t) = R^{-1}(R_1(Q_1 R_1^{-1}(R_0\mathbf{p} + \mathbf{T}_0 - \mathbf{T}_1) + \mathbf{S}_1) + \mathbf{T}_1 - \mathbf{T}) \quad (15)$$

が得られる。上式を時刻 t で微分して $t = 0$ とおけば、速度ベクトルを表す式が得られる。

$$\dot{\mathbf{p}} = \dot{R}^{-1}R_0\mathbf{p} + R_0^{-1}R_1\dot{Q}_1R_1^{-1}(R_0\mathbf{p} + \mathbf{T}_0 - \mathbf{T}_1) + R_0^{-1}R_1\dot{\mathbf{S}}_1 - R_0^{-1}\dot{\mathbf{T}} \quad (16)$$

文字の上のドットは時間 t での微分を表す。

物体1の子である物体2の上の点の動きは次のように求められる。まず、カメラ座標で表されている点 \mathbf{p} をワールド座標に変換する。次いで、物体2の座標に変換する。物体2の運動によりこの点の移動先を求める。移動先の座標をワールド座標に変換する。更に物体1の座標に変換する。物体1の運動を加え新たな移動先を求める。この移動先の座標をワールド座標に変換し、更にカメラ座標に変換すれば、動いた後の点の座標値が次のように得られる。

$$\mathbf{p}(t) = R^{-1}(R_1(Q_1 R_1^{-1}(R_2(Q_2 R_2^{-1}(R_0\mathbf{p} + \mathbf{T}_0 - \mathbf{T}_2) + \mathbf{S}_2) + \mathbf{T}_2 - \mathbf{T}_1) + \mathbf{S}_1) + \mathbf{T}_1 - \mathbf{T}) \quad (17)$$

この座標値を時刻 t で微分し、 $t = 0$ とすれば速度ベクトルが得られる。

$$\dot{\mathbf{p}} = \dot{R}^{-1}R_0\mathbf{p} + R_0^{-1}R_1\dot{Q}_1R_1^{-1}(R_0\mathbf{p} + \mathbf{T}_0 - \mathbf{T}_1) + R_0^{-1}R_2\dot{Q}_2R_2^{-1}(R_0\mathbf{p} + \mathbf{T}_0 - \mathbf{T}_2) + R_0^{-1}R_2\dot{\mathbf{S}}_2 + R_0^{-1}R_1\dot{\mathbf{S}}_1 - R_0^{-1}\dot{\mathbf{T}} \quad (18)$$

物体2の子である物体3上の速度ベクトルを求めてみよう。まず、カメラ座標からワールド座標に変換し、

次いで物体3の座標に変換する。変換した座標値に物体3の運動を行い、移動先の座標値を求める。この座標値をワールド座標に変換し、更に物体2の座標に変換する。物体2の運動を加えた後、求まった新たな座標値をワールド座標、次いで物体1の座標に変換する。物体1の運動を加えた後、移動後の座標値をワールド座標に変換後、更にカメラ座標に変換する。これで、移動先の座標値が求まった。

$$\mathbf{p}(t) = R^{-1}(R_1(Q_1 R_1^{-1}(R_2(Q_2 R_2^{-1}(R_3(Q_3 R_3^{-1}(R_0\mathbf{p} + \mathbf{T}_0 - \mathbf{T}_3) + \mathbf{S}_3) + \mathbf{T}_3 - \mathbf{T}_2) + \mathbf{S}_2) + \mathbf{T}_2 - \mathbf{T}_1) + \mathbf{S}_1) + \mathbf{T}_1 - \mathbf{T}) \quad (19)$$

この新たな座標値を時刻 t で微分することにより、速度ベクトルが得られる。

$$\dot{\mathbf{p}} = \dot{R}^{-1}R_0\mathbf{p} + R_0^{-1}R_1\dot{Q}_1R_1^{-1}(R_0\mathbf{p} + \mathbf{T}_0 - \mathbf{T}_1) + R_0^{-1}R_2\dot{Q}_2R_2^{-1}(R_0\mathbf{p} + \mathbf{T}_0 - \mathbf{T}_2) + R_0^{-1}R_3\dot{Q}_3R_3^{-1}(R_0\mathbf{p} + \mathbf{T}_0 - \mathbf{T}_3) + R_0^{-1}R_3\dot{\mathbf{S}}_3 + R_0^{-1}R_2\dot{\mathbf{S}}_2 + R_0^{-1}R_1\dot{\mathbf{S}}_1 - R_0^{-1}\dot{\mathbf{T}} \quad (20)$$

物体3の先に更に物体(例えば、手や指)が子としてつながっている場合も同様にして位置ベクトルと速度ベクトルを求めることができる。以上の手順をまとめると次のようになる。

- (1) 画像上の点がどの物体に属しているか調べる。これは、モデルからの領域情報より知ることができる。更に、距離情報よりこの画像上の点に投影される物体上の点 \mathbf{p} の位置をカメラ座標値として得る。 \mathbf{p} をカメラ座標からワールド座標に変換しておく。
- (2) ワールド座標からその物体座標に変換する。
- (3) 運動を行い結果をワールド座標に変換する。
- (4) もし、この物体が親をもつ物体ならば、親の物体座標に対し、上の(2)、(3)を繰り返す。
- (5) 親をもたないならば、ワールド座標で表された運動後の座標値をカメラ座標に変換する。
- (6) 運動後の点 $\mathbf{p}(t)$ を時間で微分し、速度ベクトル $\dot{\mathbf{p}}$ を算出する。

得られた速度ベクトル式の中で、カメラの座標変換行列やベクトルの微分、各物体の動きを表す運動変換行列やベクトルの微分は次のように求められる。各変換行列やベクトルを時間 t で微分し、 $t = 0$ とする。

$$\dot{R}^{-1} = \begin{pmatrix} 0 & \dot{\phi} & -\dot{\psi} \\ -\dot{\phi} & 0 & \dot{\varphi} \\ \dot{\psi} & -\dot{\varphi} & 0 \end{pmatrix} \quad (21)$$

$$\dot{\mathbf{T}} = \begin{pmatrix} \dot{a} \\ \dot{b} \\ \dot{c} \end{pmatrix} \quad (22)$$

同様に、運動変換行列の微分は次のようになる。

$$\dot{Q}_i = \begin{pmatrix} 0 & -\dot{\phi}_i & \dot{\psi}_i \\ \dot{\phi}_i & 0 & -\dot{\varphi}_i \\ -\dot{\psi}_i & \dot{\varphi}_i & 0 \end{pmatrix} \quad (23)$$

$$\dot{\mathbf{S}}_i = \begin{pmatrix} \dot{a}_i \\ \dot{b}_i \\ \dot{c}_i \end{pmatrix} \quad (24)$$

各座標系のワールド座標系に対する座標変換行列 R_i, \mathbf{T}_i は幾何モデルより与えられる。カメラの位置・姿勢 R_0, \mathbf{T}_0 もモデルから与えられる。従って、速度ベクトルを表す式は、物体の運動とカメラの運動を表すパラメータ

$$\dot{\mathbf{q}} = (\dot{\varphi}, \dot{\psi}, \dot{\phi}, \dot{a}, \dot{b}, \dot{c}, \dot{\varphi}_1, \dot{\psi}_1, \dot{\phi}_1, \dot{a}_1, \dot{b}_1, \dot{c}_1, \dots, \dot{\varphi}_i, \dot{\psi}_i, \dot{\phi}_i, \dot{a}_i, \dot{b}_i, \dot{c}_i, \dots)^T$$

の線形結合で記述される。この線形結合式の係数がヤコビ行列 \mathbf{J} の要素である。

推定すべき運動パラメータの数は、必要最小限であることが望ましい。なぜならば、パラメータの数が必要以上に多すぎると、ノイズの影響を受けやすくなり推定精度が悪化するからである。また、場合によっては連立方程式(12)が独立でなくなり解がユニークに決まらないことも起こり得る。そこで、パラメータの値があらかじめわかっている場合には、そのパラメータを推定すべき運動パラメータから除外しておく。

まず、カメラがシーンに対して静止しているとするれば、

$$\dot{\varphi} = \dot{\psi} = \dot{\phi} = 0 \\ \dot{a} = \dot{b} = \dot{c} = 0$$

である。

また、人体の構造から来る動きの制約を考慮することもできる。例えば、腕や肘の動きは、関節回りの回転運動であり、並進運動はない。従って、

$$\dot{a}_i = \dot{b}_i = \dot{c}_i = 0$$

としてよい。足も同様である。

更に、動作の種類があらかじめわかっている場合にも、運動パラメータの数を節約することができる。この節約は視認と追跡の試行によって行っている。すなわち、まず動画像を見ることにより、最小限必要と思われるパラメータを選択する。連立方程式(12)が独立でないならば、パラメータが冗長な可能性があるのでパラメータ数を減らす。連立方程式の独立性は、その係数行列の条件数によって判定できる。追跡を試行した結果、ずれが大きな場合にはパラメータの数を増やす。後述の実験では、さまざまな動作例を対象としてパラメータの数を節約している。

推定された運動パラメータに基づき、モデルをその座標軸ごとに移動させる。移動させたモデルは、次のフレームでも投影像は人間の像と一致している。運動パラメータの推定と、モデルの移動をフレーム順に逐次行うことにより追跡を達成することができる。

5. 推定の安定化と高精度化

運動パラメータ $\dot{\mathbf{q}}$ を推定するための連立方程式

$$A\dot{\mathbf{q}} = \mathbf{b}$$

は、一般に未知数の数よりも方程式の数が多い。しかも、各方程式には測定ノイズが含まれているので、この連立方程式を満たす解は存在しない。そこで、上式の左辺と右辺の差のノルムの2乗

$$\|A\dot{\mathbf{q}} - \mathbf{b}\|^2 = (A\dot{\mathbf{q}} - \mathbf{b})^T (A\dot{\mathbf{q}} - \mathbf{b}) \quad (25)$$

を最小とするような $\dot{\mathbf{q}}$ を解とする。この最適解は上式を $\dot{\mathbf{q}}$ について偏微分しそれを $\mathbf{0}$ とおくことにより得られる。すなわち、次の正規方程式

$$A^T A \dot{\mathbf{q}} = A^T \mathbf{b} \quad (26)$$

を解けばよい。

追跡を確実にするためには、この運動パラメータを高い精度で推定しなくてはならない。推定精度を向上させるための方策を述べる。

5.1 拘束条件の均等化

胴とか手足などの各部分に対応する方程式の個数がアンバランスだと、方程式の個数が少ない部分、例えば手先とか足先などは拘束が弱くなる。そのとき、解はわずかなノイズにも影響され、それらの部分に対応

する解が発散する恐れがある。

そこで、評価式(25)の代わりに、重み行列 H を使った次の評価式

$$\|H(A\dot{\mathbf{q}} - \mathbf{b})\|^2 \quad (27)$$

を用いる。ここで H は対角行列で対角要素一つ一つが対応する方程式の重みとなる。

$$H = [h_{ii}]$$

重み行列 H の要素を調整することにより、各部分に対応する方程式間の拘束力を均等化する。目安として、各部分の方程式の個数の逆数などが考えられる。最適解は次の正規方程式から得られる。

$$A^T H^T H A \dot{\mathbf{q}} = A^T H^T H \mathbf{b} \quad (28)$$

5.2 運動の予測

時空間こう配法は、動きが小さな場合は便利であるが、大きな動きの推定にはその適用が難しい。人間の動作を解析する場合には、ビデオレートで動画像を入力したとしても、人間の動きには非常に速い部分があり、大きな動きの推定は避けて通れぬ問題である。

大きな動きを時空間こう配法により解析するには、画像をあらかじめスムージングしておくか、階層的解析法を用いる、等の工夫が必要とされる。しかし、像のパターンに細かな模様があるとこれらの手法の効力も薄くなる。そこで、前フレームまでの運動パラメータの推定結果から、運動パラメータの予測値を推定し、真の値と予測値との差を推定するのである。最も簡単な予測値の与え方は、前フレームでの推定値をそのまま予測値とすることである。動きの変化が少ない場合には、この差は小さい。従って、大きな動きも小さな動きの推定問題に帰着させることができる。

予測値を利用することの効果は、オプティカルフローの推定 [11] や、モデルを物体に一致させるための移動量の推定 [10] において実証されている。本研究では、時空間こう配法による運動パラメータの推定に適用した。

真の値と予測値との差 $\dot{\mathbf{s}} = \dot{\mathbf{q}} - \dot{\mathbf{r}}$ は、評価式(27)の代わりに次の評価式を最小にするように求める。

$$\begin{aligned} & \|H(A\dot{\mathbf{q}} - \mathbf{b})\|^2 + \lambda^2 \|W(\dot{\mathbf{q}} - \dot{\mathbf{r}})\|^2 \\ & = \|H(A\dot{\mathbf{s}} - \mathbf{e})\|^2 + \lambda^2 \|W\dot{\mathbf{s}}\|^2 \end{aligned} \quad (29)$$

但し、 $\mathbf{e} = \mathbf{b} - A\dot{\mathbf{r}}$ である。また、 W は予測値の信頼性を表す対角行列である。

$$W = [w_{ii}]$$

重み行列 W の要素は予測値の信頼性を数値化して入れる。正しい推定値が、予測値 \dot{r}_i の前後 $\pm\sigma_i$ 以内に収まると予想されるとき、重みを

$$w_{ii} = \frac{1}{\sigma_i}$$

とする。この σ は予測値からの偏差である。予測値の信頼性が増すにつれ、偏差がゼロに近づき重みは ∞ となる。実際には十分大きい値を重みとする。予測値を前フレームでの推定値とすれば、この偏差は連続するフレーム間での推定値の差となる。推定すべき量が並進運動パラメータの場合、偏差は加速度である。また、回転運動パラメータの場合、角加速度である。これらの量の上限はあらかじめ知っておく必要がある。上限の目安を得るために次の簡単な実験を行った。直立静止状態から3mの距離の歩行移動を対象に、移動にかかる時間をさまざまに変化させ、歩行者の追跡を行った。その結果、最短4.7秒までの歩行動作の追跡が可能であった。これは、歩行動作の通常の変化に相当するものであり、他の動作に関しても、通常動作変化であれば追跡が可能であることを示唆している。

λ は、方程式(12)の解と予測値のどちらか一方を重視したいとき、両者のバランスを制御するための正則化定数である。

運動パラメータの予測値 $\dot{\mathbf{r}}$ から式(10)および(2)を介して、速度ベクトルの予測値 (U, V) が得られる。定数ベクトル $-\mathbf{e} = A\dot{\mathbf{r}} - \mathbf{b}$ は、この速度ベクトルを式(4)に代入したものに等しい。式(4)は、この $-\mathbf{e}$ が移動先の画像の明るさ $E(X + \Delta X, Y + \Delta Y, t + 1)$ と移動前の画像の明るさ $E(X, Y, t)$ の差を近似していることを示している。すなわち、 $-\mathbf{e} = E(X + \Delta X, Y + \Delta Y, t + 1) - E(X, Y, t)$ である。

最適解は次の正規方程式から得られる。

$$(A^T H^T H A + \lambda^2 W^T W) \dot{\mathbf{s}} = A^T H^T H \mathbf{e} \quad (30)$$

求めるべき運動パラメータは、この正規方程式より得られた解 $\dot{\mathbf{s}}$ に予測値 $\dot{\mathbf{r}}$ を加えた値である。すなわち、

$$\dot{\mathbf{q}} = \dot{\mathbf{s}} + \dot{\mathbf{r}}$$

である。

5.3 反復こう配法

時空間こう配法により推定された運動パラメータは正しい値の近似にしかすぎない。その主な理由として、

次の二つが挙げられる。(1) 基本推定式(6)が明るさの差分の1次近似式に基づいて導かれている。(2) 移動ベクトル($\Delta X, \Delta Y$)が速度ベクトル(U, V)で近似されている。そこで、時空間こう配法の反復適用により、正しい値に逐次接近させる方法が考えられている[20]。

運動パラメータの反復推定は、推定式(30)で得られた運動パラメータ $\hat{s} + \hat{r}$ を新たな予測値として、推定を繰り返すのである。得られた運動パラメータが正しければ画像間の差分値はゼロになる。実際は、差分値の自乗和 $\sum \|E(X + \Delta X, Y + \Delta Y, t + 1) - E(X, Y, t)\|^2$ が反復と共に単調に減少しなくなるまで繰り返す。各繰返して推定された予測値との差 \hat{s}_k (k は繰返しの回数) と最初の予測値 \hat{r} から正しい運動パラメータは得られる。

$$\hat{q} = \sum_k \hat{s}_k + \hat{r}$$

動きが小さくて予測が必要ない場合でも、この繰返しは高い精度で運動パラメータを得るために必要である。

6. 追跡実験

いくつかの簡単な人間の動作について追跡実験を行った。追跡の結果、動作が運動パラメータの時系列として得られる。この運動パラメータを使って、人間の動作をコンピュータグラフィックスによりアニメーションとして再現させた。

さまざまな動作の追跡実験を行ったが、本論文では次の3種類を示す。(1) 階段を下りる、(2) 椅子から立ち上がる、(3) コーナーを曲がる。いずれの場合もカメラは固定されている。つまり、 $\dot{R}^{-1} = 0$ 、 $\dot{T} = 0$ である。それぞれの動作は家庭用のビデオカメラ (TR-1000, SONY) で撮影され、ビデオディスク (LQ-4100, Matsushita) に直接書き込まれる。動画は、ビデオディスクから1枚ずつ画像入力ボード (Xvideo, Pallalax Graphics) によりコンピュータ (SPARC Station 2) のディスクに入力される。追跡はリアルタイムではなくオフラインで行われた。追跡の対象は常にカメラから見えている部分とした。以下の三つの実験ではカメラ側の手足および胴体を追跡対象としている。反対側の手足は、カメラ側の手足と動きが同じ、あるいは対称であるため追跡しなかった。

6.1 階段を下りる

階段を下りている人間の追跡を行った。動画は全

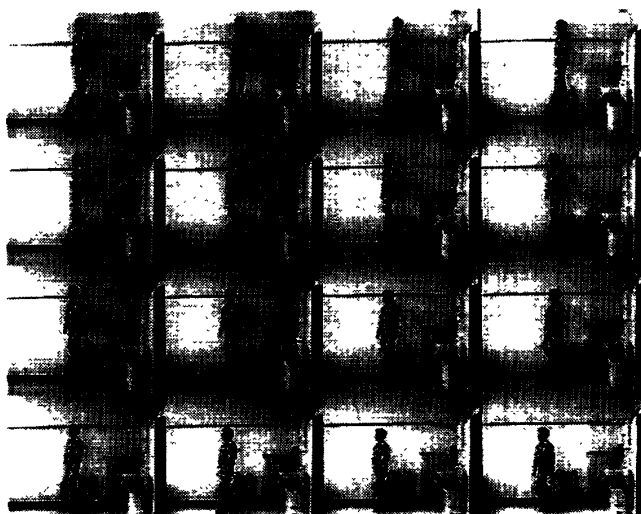


図5 階段を下りている人の動画像
Fig. 5 A man is going down the stairs.

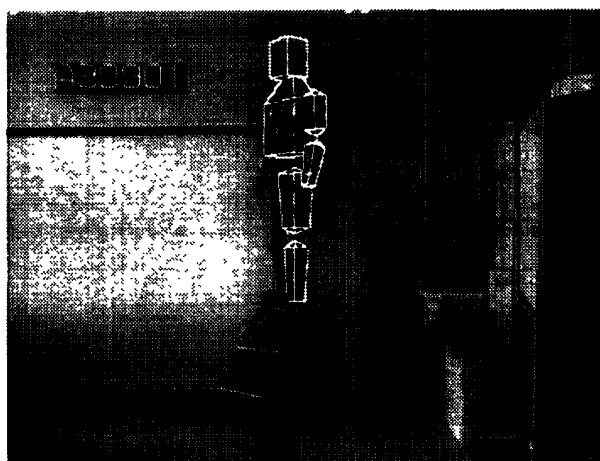


図6 追跡開始フレームでのモデルと画像の照合。モデルの輪郭が白線で描かれている
Fig. 6 Fitting body model to initial frame. The model is overlapped on human image by white lines.

部で500フレーム、その内から33フレームごと抜き出して順番に並べたのが図5である。第1フレームでモデルと人体の像を合わせたのが図6に示してある。この動作では、人間の動きは次のように限定される。胴体・頭部はその前方および垂直方向の並進運動をし、回転運動は行わないとする。手足の動きは、肩、肘、腰、膝を中心とした回転運動で、回転軸の方向は人体の左右方向のみとする。従って、推定すべき運動パラメータの数は全部で6個である。追跡結果を図7に示す。かなり長い時間の追跡にもかかわらず追跡に成功している。

6.2 椅子から立ち上がる

椅子に座っている人間が立ち上がって歩き始めるま

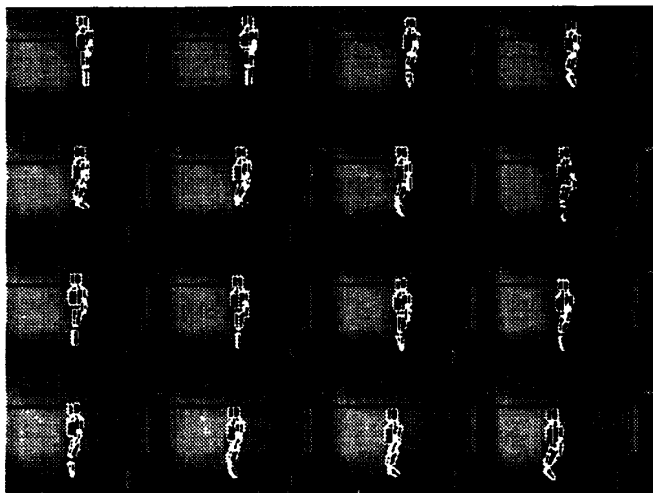


図7 階段を下りている人の追跡結果
Fig. 7 Tracking result.

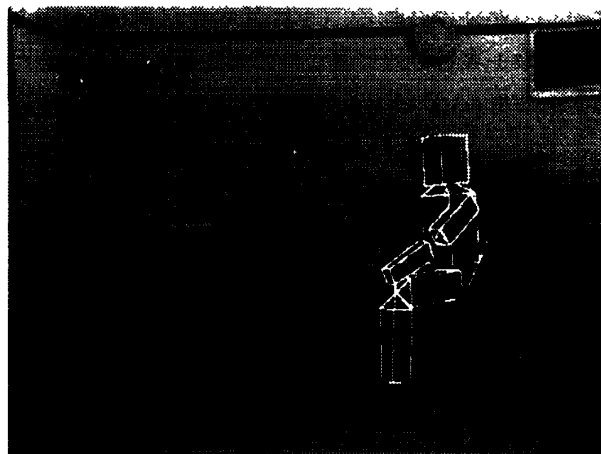


図9 追跡開始フレームでのモデルと動画像の照合
Fig. 9 Fitting human model to initial frame.

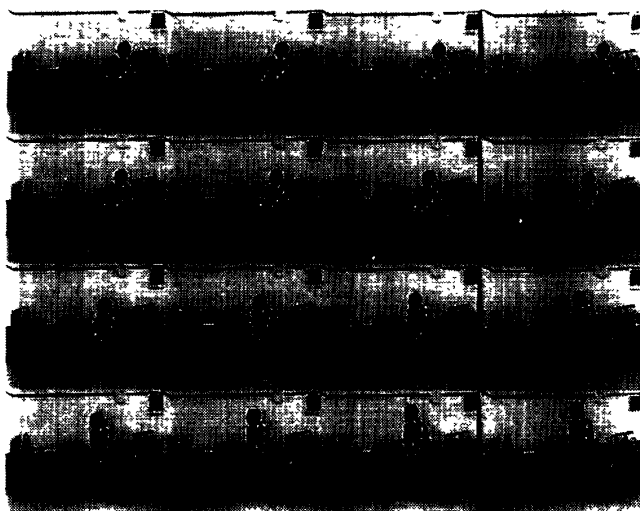


図8 椅子から立ち上がっている人の動画像
Fig. 8 A man is standing up the chairs.

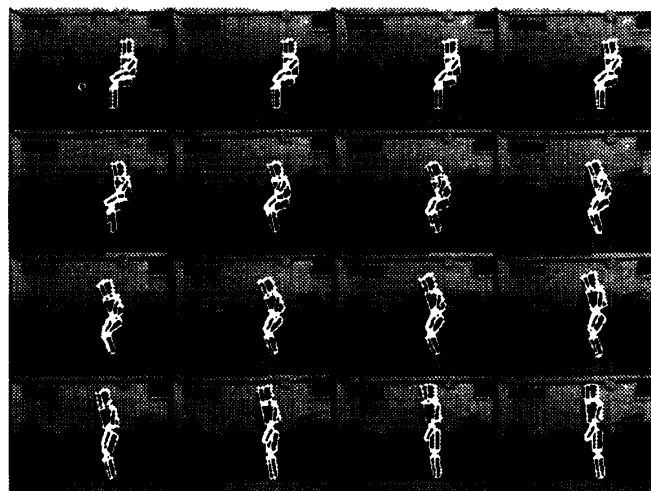


図10 椅子から立ち上がっている人の追跡結果
Fig. 10 Tracking result.

43

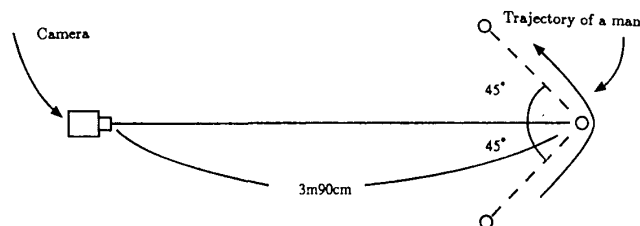


図11 コーナを曲がっている人の動きとカメラの配置
Fig. 11 A plan view of the scene containing camera and human trajectory.

での動作を追跡した。動画像は全部で74フレーム、その中から5フレームごとに抜き出して表示したのが図8である。図9にはモデルを第1フレームの人体像と照合させた結果を示している。この動作の運動パラメータの種類は、階段から下りる動作のモデルに腰回りの回転運動を加えたものとする。回転軸の方向は体の左右方向である。従って、運動パラメータの総数は7個となる。追跡結果を図10に示す。

6.3 コーナを曲がる

「人間が腕を振りながら画面右側から中央に向かって歩き、中央付近で左向きに90度向きを変えて歩いて行く」といった動作を追跡した。このときのカメラと人間の位置関係を図11に示す。この動画像は全部

で215フレームである。130フレーム目は人間がカメラに対して真横を向いている。この状態でのモデルとの照合は容易であるため、130フレーム目を追跡開始フレームとした。照合の結果を図12に示す。この動作の運動モデルは、階段を下りている人の運動モデルに胴体の垂直軸まわりの回転を加えたものとした。従っ

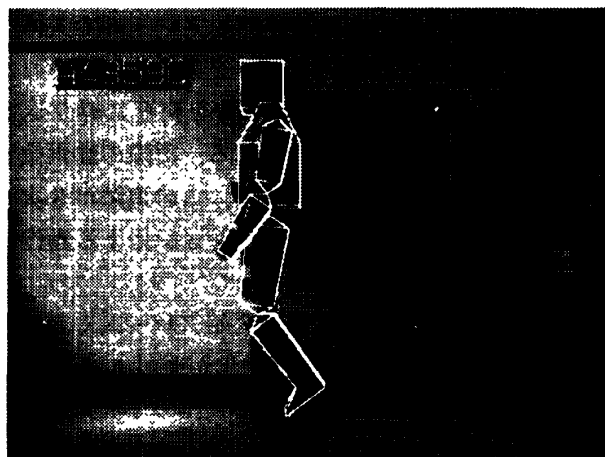


図12 追跡開始フレーム（130フレーム目）でのモデルと画像の照合
Fig. 12 Fitting human model to 130th frame.

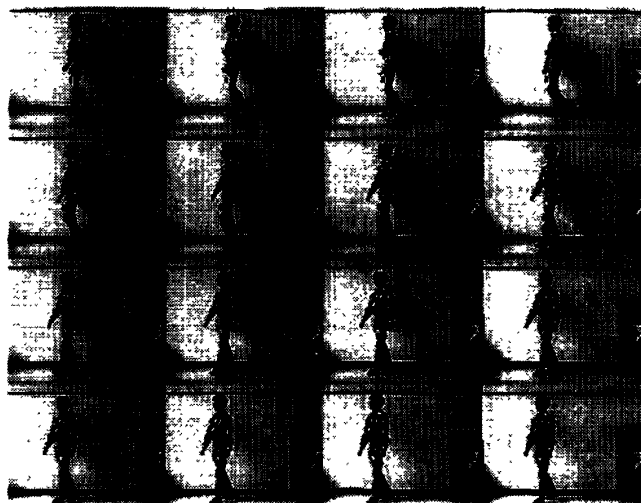


図14 コーナを曲っている人の動画像（130フレーム目から215フレーム目まで）
Fig. 14 Image sequence of a walking man from 130th to 215th frames.

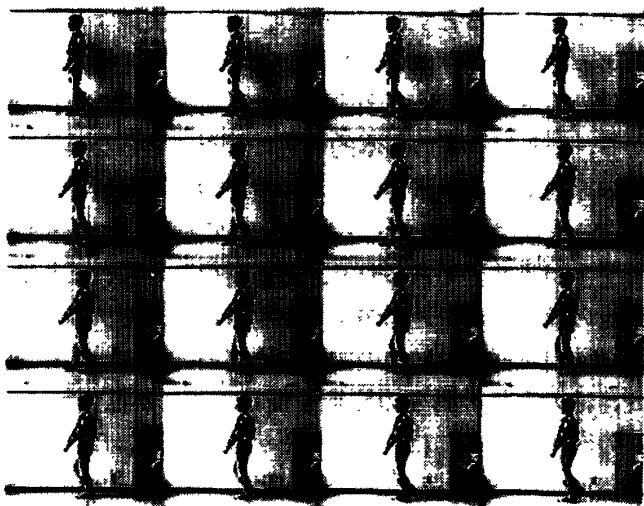


図13 コーナを曲がっている人の動画像（130フレーム目から逆に1フレーム目まで）
Fig. 13 Image sequence of a walking man from 130th back to 1st frames.

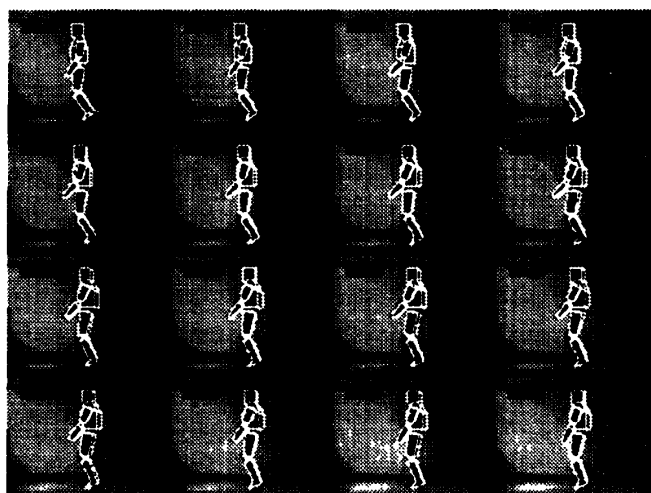


図15 130フレーム目から1フレーム目までの、歩行者の逆方向追跡結果
Fig. 15 Back tracking result from 130th to 1st frames.

て、運動パラメータの総数は、七つとなる。追跡は130フレームから215フレームまでの順送りの追跡と、130フレームから1フレーム目までの逆送りの追跡の2通り行った。図13には、130フレーム目から逆に1フレームまで8フレームごとに抜き出した動画像が示されている。図14には、130フレームから215フレームまで、5フレームごとに抜き出した動画像が示されている。追跡の結果を図15、16に示す。なお、蹴り出された足の早い動きの追跡に、予測値の利用は有効であった。また、拘束条件の均等化は均等化しなかった場合に比べ、追跡精度の向上が見られたがその差はわずかであった。これは各部分に対応する方程式の個数

が均衡していたためと考えられる。前二つの実験に関しても同様であった。1フレームから215フレームまでの全歩行動作の運動パラメータ系列は、逆送りの運動パラメータの符号を変え、順送りの追跡結果につなぎ合わせるにより得られる。

6.4 CGアニメーションによる動作の再現

人間の動作は運動パラメータの時系列として抽出される。この値をもとに比較的簡単にCGアニメーションを作成することができる。追跡したのはいずれも人体の半面のみである。全体の動きを再現するためには、追跡しなかった手足の動きを削り出さなくてはならな

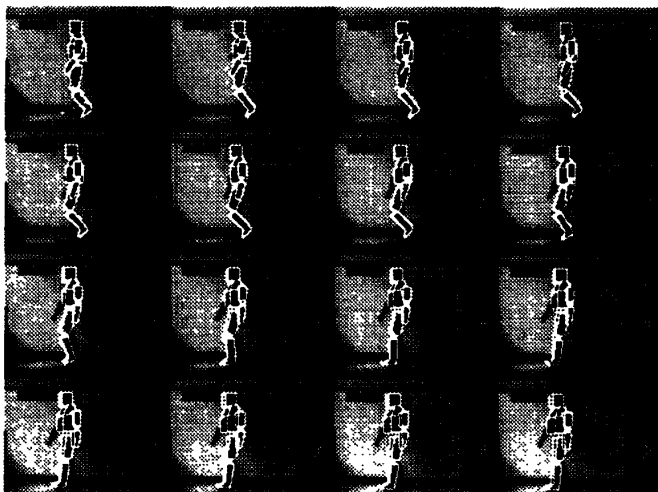


図16 130フレーム目から215フレーム目までの、歩行者の順方向追跡結果
Fig. 16 Tracking result from 130th to 215th frames.

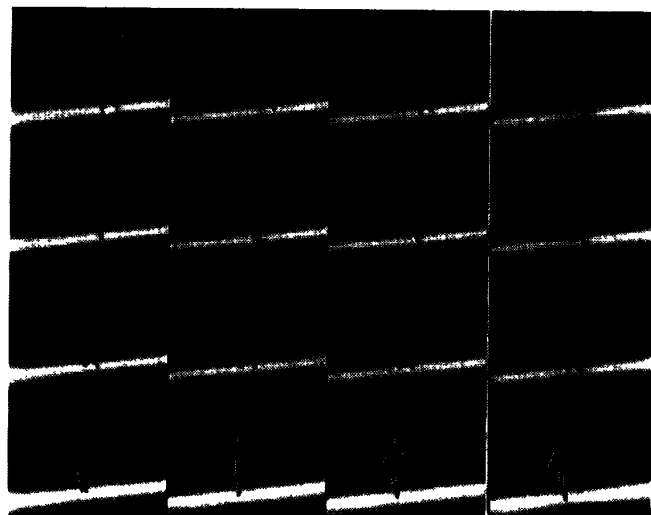


図17 コンピュータアニメーションによる人間の動きの再構成
Fig. 17 Reconstruction of human motion by CG animation.

い。歩行動作は周期的であり、左右の動きは半周期ずれている。このことから、観測した手足の動きを半周期ずらせることにより、もう一方の手足の動きを作った。また、椅子から立ち上がる動作は、左右の手足が同じ動きをしているので、もう一方の手足にも同じ動きをさせた。コーナを曲がる動作のを再現した例を図17に示す。

7. む す び

3次元的に動作を行っている人間を動画像により追跡する手法を提案した。この手法は、あらかじめ作ら

れた人体のCADモデルを追跡開始フレームで人体像に一致させておき、運動パラメータの推定と得られたパラメータに基づくモデルの移動を交互に繰り返すことにより、追跡を行うものである。実際の動画像を使って、人間動作の追跡を行った。この追跡が3次元追跡であることを、CGアニメーションによる動作の再現で強調した。

今後の課題として、まず追跡開始フレームにおけるモデルと人体像との照合の自動化が挙げられる。そのためには、人体像領域の抽出、人体の3次元姿勢の決定、等が必要である。また、使用したCADモデルは、元来機械部品など硬い物体を対象としている。人体のような柔らかい物体を対象とするには、新たな幾何モデルの検討も欠かせない。更に、今回の実験では数百フレームにわたる追跡に成功したが、モデルが物体とずれ始めるとずれが拡大し、追跡に失敗する場合もあった。このずれの開始時刻は、5.1で述べた拘束条件の均等化によって多少遅らせることができた。しかし、これは問題の根本的解決にはなっていない。ずれの原因は、本手法がモデルの投影像内の領域を人体像とみなして追跡を行っているからである。すなわち、モデルが不完全であったり、追跡時のノイズによるモデルの進み過ぎや遅れが生じた場合には、モデルの投影領域内に背景など他の物体の像が混入する。このとき、他の物体の動きの影響を受け、ずれが拡大する。この対策として、(1) 正確なモデルの作成、(2) 人体像と他の物体像との区別、等が考えられる。

奥行き方向の追跡誤差は、モデルの投影像と人体像の大きさのわずかな違いによってのみ評価される。これは、投影面に平行な動きの追跡に比べて誤差が大きく、この誤差によるモデルと人体のずれを検知する感度も鈍いことを意味している。動画像から得られる3次元情報を利用した、奥行き方向のずれの自動修正機構[24]を取り入れる必要がある。

本研究の応用として、いろいろな映画で俳優の動作を解析し新たな映画を作成することも可能である。これは別の機会に発表したい。

謝辞 動画像入力システムの開発を行った朝井隆仁氏(現,(株)セガ・エンタープライゼス)、グラフィックスシステムの開発を担当した向井淳氏(現,(株)三菱自動車工業)、動画像の表示に協力した速水康晴氏(修士在学中)に感謝致します。本研究の一部は、文部省科研費重点領域研究(No.06212208)の補助によるものである。

文 献

- [1] 浅田 稔, 谷内田正彦, 辻 三郎, “三面世界で動く物体の線画の解釈,” 信学論, vol.J65-D, no.5, pp.606-613, 1982.
- [2] 浅田 稔, 谷内田正彦, 辻 三郎, “物体の3次元運動の解釈,” 信学論, vol.J65-D, no.6, pp.687-694, 1982.
- [3] 出口光一郎, “画像と空間,” 昭晃堂, 1991.
- [4] D.Hogg, “Model-based vision: a program to see a walking person,” Image and Vision Computing, vol.1, no.1, pp.5-20, 1983.
- [5] 石井浩史, 望月研二, 岸野文郎, “人物像合成のためのステレオ画像からの動作認識法,” 信学論, vol.J76-D-II, no.8, pp.1805-1812, 1993.
- [6] 木本伊彦, 梶谷昭彦, 安田靖彦, “スティックモデルに基づく単眼視動画像からの人体歩行運動の解析の一手法,” 信学論, vol.J74-D-II, no.3, pp.376-387, 1991.
- [7] K.Koshikawa and Y.Shirai, “A 3-D modeler vision research,” Proc. of the Int. Conference on Advanced Robotics, pp.185-190, 1985.
- [8] 倉掛正治, ラマカント ネバティア, “関節のある動物体の記述と追跡,” 信学論, vol.J76-D-II, no.4, pp.854-862, 1993.
- [9] M.K.Leng and Y.H. Yang, “A region based approach for human body motion analysis,” Pattern Recognition, vol.20, no.3, pp.321-339, 1987.
- [10] D.G.Lowe, “Fitting parameterized three-dimensional models to images,” IEEE Trans. Pattern Anal. & Mach. Intell., vol.PAMI-13, no.5, pp.441-450, 1991.
- [11] H.-H.Nagel and W.Enkelmann, “An investigation of smoothness constraints for the estimation of displacement vector fields from image sequences,” IEEE Trans. Pattern Anal. & Mach. Intell., vol.PAMI-8, no.5, pp.565-593, 1986.
- [12] J.O'Rourke and N.J.Badler, “Model-based image analysis of human motion using constraint propagation,” IEEE Trans. Pattern Anal. & Mach. Intell., vol.PAMI-2, no.6, pp.522-536, 1980.
- [13] R.P.Paul, “Robot manipulators, Mathematics, programming, and control,” The MIT press, Cambridge Massachusetts, 1981.
- [14] K.Rohr, “Towards model-based recognition of human movements in image sequences,” CVGIP: Image Understanding, vol.59, no.1, pp.94-115, 1994.
- [15] 高橋勝彦, 関 進, 小島 浩, 岡 隆一, “ジェスチャー動画像のスポットニング認識,” 信学論, vol.J77-D-II, no.8, pp.1552-1561, 1994.
- [16] 築山俊史, 白井良明, “連続するTV画像からの人の動きの検出,” 計測自動制御学会論文集, vol.19, no.11, pp.909-915, 1983.
- [17] 牛田博英, 山口 亨, 高木友博, “ファジー連想記憶システムを用いた動作認識,” 信学論, vol.J77-D-II, no.8, pp.1571-1581, 1994.
- [18] J.A.Webb and J.K.Aggarwal, “Visual interpreting the motion of objects in space,” IEEE Computer, vol.14, no.8, pp.40-46, 1981.
- [19] 山本正信, “画像化された運動軌跡による動画像処理,” 情処学論, vol.32, no.9, pp.442-449, 1981.
- [20] 山本正信, “勾配法による動画像と距離情報からの複数動物体の3次元運動解析,” 信学論, vol.69-D, no.5, pp.785-793, 1986.
- [21] 山本正信, ロベルト チボラ, “ステレオ動画像解析の一手法,” 信学論, vol.J72-D-II, no.6, pp.855-865, 1989.
- [22] 山本正信, 越川和忠, “幾何モデルを用いた束縛運動の動画像解析,” 計自学術講演会, vol.1, pp.549-550, 1987.
- [23] M.Yamamoto and K.Koshikawa, “Human motion analysis based on a robot arm model,” Proc. CVPR'91, pp.664-665, 1991.
- [24] 山本正信, “3次元運動推定時におけるモデルの一と姿勢の自動修正,” 信学論, vol.J77-D-II, no.2, pp.321-330, 1994.
- [25] 大和淳司, 大谷 淳, 石井健一郎, “隠れマルコフモデルを用いた動画像からの人物の行動認識,” 信学論, vol.J76-D-II, no.12, pp.2556-2563, 1993.

(平成6年12月21日受付, 7年6月29日再受付)

山本 正信 (正員)



会, IEEE各会員.

昭48九工大・工・制御卒, 昭50東工大大学院修士課程了, 同年, 電総研入所, 動画像処理, コンピュータビジョン等の研究に従事, 平元~2年カナダ国立研究協議会招聘研究員, 昭62情処学会研究賞授賞, 平4より新潟大学工学部情報工学科教授, 工博, 情報処理学

川田 聡



平5新潟大・工・情報工学卒, 現在, 同大学院情報工学専攻修士課程在学中, コンピュータビジョンに関する研究に従事.

近藤 拓也



平6新潟大・工・情報工学卒, 現在, 同大学院情報工学専攻修士課程在学中, 動画像処理の研究に従事.

越川 和忠 (正員)



昭39東大・工・航空卒, 昭44同大学院博士(航空学)課程了, 工博, 昭44電子技術総合研究所に入所, 現在に至る, 物体認識およびその立場からの3次元対象物の計算機内表現技術の研究に従事.