

インタラクティブな操作のためのインバースキネマティクスパラメータのモーションデータからの取得手法

Calculating inverse kinematics parameters from motion data for interactive control

幸村 琢¹, 黒田 篤²

- 1) 理化学研究所 イメージ情報技術開発室 (〒351-0198 埼玉県和光市広沢 2-1 E-mail: taku@ieee.org)
2) 有限会社ジースポート (〒130-0004 東京都墨田区本所 3-15-5 ベンチャー SUMIDA 1号 E-mail: kuroda@g sport.co.jp)

概要

計算機の能力の向上により、ごく一般的な環境においても容量の大きい3次元ポリゴンモデルをリアルタイムに閲覧することが可能になったが、それらのモデルをインタラクティブに扱うための効果的な手法はまだ少ない。本研究では階層構造を持つ3次元ポリゴンモデルで動作データを含むものを扱うための新しいインバースキネマティクス手法を提案する。本研究のインバースキネマティクス手法において必要となる、重み行列や各セグメントの相対速度などといったパラメータは動作データから算出される。これらのパラメータを用いることにより、ユーザが仮想空間内のポリゴンモデルをクリック、ドラッグした時のモデルの反応動作を決定する。本手法を用いることにより、ユーザは簡単な操作でモデルの動作を編集することができるようになる。本手法は主にモーションキャプチャー等で取り込んだ3次元人間データを扱うのに効果的である。
キーワード：インバースキネマティクス、アニメーション、インタラクティブコンテンツ

Abstract

Even though the increased computational power have enabled users to observe heavy 3D polygonal animations on their desktops, there are still few effective methods for interactive online control of 3D models in cyberspace. In this paper, we propose a new inverse kinematics method by which users can control tree-structured 3D polygonal models with motion data. The key idea is to extract parameters necessary for inverse kinematics control from the motion data: such data include the mass matrix that determines the motion of the redundant joints, and the transform function of end effectors that determine the relative velocity of the controlled segment and the end effectors. Then such parameters are used to calculate the response of the 3D character model when users click and drag the parts of the model with their mouse. Using our method, users can easily edit, warp, and retarget 3D character motions by least effort. Our method is especially effective to handle complex 3D human motion data captured by motion-capture devices.

keywords: inverse kinematics, animation, interactive web contents

1 はじめに

インターネットの普及により、これまでゲームや映画といった産業に目的が重点化されていたコンピュータグラフィックスはより自己表現やコミュニケーションの道具として持ち入れられる機会が多くなっている。そのため、近年、フラッシュなどのインタラクティブなコンピュータグラフィックス技術が特に注目を集めるようになってきている。インタラクティブな3D技術としてVRMLやWEB3Dといった枠組みが提案されてきたが、予想に反し、普及度はかなり低い。その大きな理由として考えられるのがインタラクティブ性の低級さである。キャラクターアニメーションに注目したとき、これまでの研究開発はゲームや映画等で用いられるキャラクターの動作を作成する手法のための研究に重点がおかれており、インタラクティブにキャラクターを動かす技術はあまり発展していない。

本研究ではより簡単な操作によって、コンテンツ製作者が特徴的な動作をインタラクティブに行うキャラクターを作成するための基盤技術を提案する。本システムの提

唱する技術によって作成されたコンテンツは極めて抽象度が高く、そのため、ユーザーが作成したコンテンツの蓄積によってインターネット上における自己表現手段の幅が大きく広がることになる。

2 関連研究

最も古くからあるインタラクティブな3Dキャラクターの操作に関する研究は主にインバースキネマティクスに関するものであるといえる。というのは昔からロボティクスの分野でロボットマニピュレータを操作する時に望み通りのエンドイフェクタの動きを作るためにはどのようにロボットの関節を動かせばよいかという問題があったからである。例えば、中村ら [10] は特異点のまわりでも安定にロボットを動かすためのインバースキネマティクス手法を提案している。

近年になり、3Dグラフィックスの需要が大きくなることにつれ、コンピュータグラフィックスの分野においてもインバースキネマティクスの需要が大きく増えることになった。それは複雑な3Dモデルを簡単な操作で動かす

のに単純な操作で全体を制御することにインバースキネマティクスが向いているためである。

Phillips *et al* [12] は複数の拘束条件を扱えるインバースキネマティクスのシステムを開発した。その仕事は [11] で拡張され、歩行動作等も扱えるようになった。Zhao と Badler [19] は数値的な解法により人体の姿勢を決めるアルゴリズムを提案した。彼等の手法は任意の木構造のモデルに拡張可能であることが知られている。Mas *et al* [9] と Boulic *et al* [1] は人間の体の重心位置を直接操作することができるインバースキネマティクス手法を提案した。Koga *et al* [6] らは様々な物体をある地点から別の地点に移動させるためのモーションプランニングのアルゴリズムを提案している。彼等はその中で手で物体持ち変えたりすることにより、物体の姿勢を変えることを可能にしている。この研究の中でもインバースキネマティクスは重要な役割を果たしている。

これらの手法は主に機構の運動学的な要素のみを考慮に入れていたが、力学を考慮に入れたインバースキネマティクスの研究もある。例えば、Lee *et al* [8] は体のモデルを動かす際に、関節の角度の変化量を関節の comfort level と呼ばれる値を考慮に入れて決定している。また [5] ではロボットマニピュレータインバースキネマティクス問題をトルク最小化により解いている。

生体工学分野においてもインバースキネマティクスのな人体制御アルゴリズムを提案した研究がある。辻井ら [14, 15] は筋骨格モデルとインバースキネマティクス手法を組み合わせ、筋肉のインピーダンスを利用して、人体動作が外力に対して反応する仕組みを説明した。

キャラクターのモーションデータを編集、変形、リターゲットするための手法はモーションキャプチャーデバイスの普及とともに提案されるようになった。Witkin ら [18] は動作データにキーフレームを挿入することにより、動きを "warp" するための手法を提案した。Unuma ら [16] や Bruderlin ら [2] はモーションデータを周波数成分に分解し、特定の成分の係数を変化させることにより動作をモーフィングしたり、特徴づける手法を提案した。Gleicher [3] はモーションデータに新たに幾何的な拘束条件を付け加えたり、拘束条件を守りながら動作に変形を加えたり、体のサイズを変えたりすることが可能なモーションリターゲットングと呼ばれる手法を提案した。Popović ら [13] は重力や質量、といった力学的なパラメータも編集可能な手法を提案している。

しかしこれらの手法は動作を入力した後、結果が得られるまで重い計算をしなければならないため、オフラインなシステムである。これらの手法は映画やアニメーションを作成する手法としては優れているが、ユーザーの入力に対して、すぐに反応のあるようなリアルタイムには向かない。

コンピュータグラフィックスにおいて、リアルタイムに動いているキャラクターを操作するための手法も増えてきている。Lee *et al* [7] は多重解像度手法を用いて、キャラクターの形状や幾何学的な拘束をリアルタイムに変化させるための手法を提案している。また、Gleicher [4] は歩行等の動作の軌道を自由に編集する手法を提案している。

本研究では新しいインタラクティブなインバースキネマティクス手法を提案する。これまでのインバースキネマティクス手法では主に動作を静的に扱うことが多かったが、本研究では動作データを考慮に入れることにより、リアルタイムにキャラクターがリアルな反応を返す手法を提案する。

3 インバースキネマティクス

ここではキャラクターの静的な姿勢を体の自由度の要素を持つベクトルで表現する。

$$\theta = (\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_m) \quad (1)$$

ここで、 m は体の自由度を表す。また、セグメント i_s の三次元空間内における姿勢を

$$(P_{i_s}, \Theta_{i_s}). \quad (2)$$

で表す。ここで P_{i_s} は三次元空間内の座標を表し、 Θ_{i_s} はオイラー角による回転量を表す。まず、初期姿勢として体全体の状態が

$$\theta_0 = (\theta_1^0, \theta_2^0, \dots, \theta_m^0), \quad (3)$$

セグメント i_s の状態が

$$(P_{i_s}^0, \Theta_{i_s}^0) \quad (4)$$

であったとする。セグメント i_s は体の一部であるため、その姿勢は θ_0 の関数で表すことができる。

$$(P_{i_s}^0, \Theta_{i_s}^0) = F(\theta_1^0, \theta_2^0, \dots, \theta_m^0). \quad (5)$$

インバースキネマティクス問題は以下のように記述することができる。セグメント i_s が $(P_{i_s}^0, \Theta_{i_s}^0)$ から $(P_{i_s}^0 + \Delta P_{i_s}, \Theta_{i_s}^0 + \Delta \Theta_{i_s})$ に移動した場合、体全体の姿勢を表すベクトル θ_0 の変化量 $(\Delta \theta_1^0, \Delta \theta_2^0, \dots, \Delta \theta_m^0)$ はいくらか。

m は多くの場合、セグメント i_s の世界座標系における自由度 (6) よりも大きい。これは冗長性を持つ問題である。セグメント i_s の自由度の変化量と体全体の自由度の変化量の関係は以下の式で表すことができる。

$$\begin{pmatrix} \Delta P \\ \Delta \Theta \end{pmatrix} = J \Delta \theta. \quad (6)$$

J は一般にヤコビアンと呼ばれる行列である。この式の関係を満たす $\Delta \theta$ は以下の式で表すことができる。

$$\Delta \theta = J^+ \begin{pmatrix} \Delta P \\ \Delta \Theta \end{pmatrix} + (I - J^+ J) k \quad (7)$$

ここで、 k は m 次元の任意のベクトルを表し、 J^+ は一般に擬似逆行列と呼ばれる行列である。擬似逆行列はヤコビ行列 J を用いて、以下のように計算することができる。

$$J^+ = (J^T J)^{-1} J^T. \quad (8)$$

Whitney [17] はインバースキネマティクス問題を二次形式の最適化問題におきかえることに解く手法を提案した。すなわち、自由度の変化量 $\Delta \theta$ をパラメータとする以下のような二次形式があった場合、

$$Q(\Delta \theta) = \Delta \theta^T W \Delta \theta. \quad (9)$$

この式を最小化する $\Delta \theta$ は以下の解法によって得ることができる。

$$\Delta \theta = W^{-1} J^T (J W^{-1} J^T)^{-1} \begin{pmatrix} \Delta P \\ \Delta \Theta \end{pmatrix}. \quad (10)$$

ここで W を二次形式の係数を決定する重み行列と呼ぶことにする。 W は $n \times n$ の正方行列である。たとえば W が単位行列の場合、上の式は以下になる。

$$\Delta \theta = J^+ \begin{pmatrix} \Delta P \\ \Delta \Theta \end{pmatrix} \quad (11)$$

このようにして得られる解はすなわち $\Delta\theta$ のノルムの二乗和を最小化する。

例として図3に示すような4自由度のロボットマニピュレータのエンドイフェクタを考える。このマニピュレータの状態を $\theta = (\theta_0, \theta_1, \theta_2, \theta_3)$ という4次元ベクトルで表す。 θ_i は各関節 i の関節角度を表すものとする。この場合、重み行列は 4×4 の正方行列となる。ここでは以下のような対角化された二つの行列を用意したとする。

$$W_1 = \begin{pmatrix} 10 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 10 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.1 \end{pmatrix}, W_2 = \begin{pmatrix} 0.1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 10 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 10 \end{pmatrix}$$

重み行列 W_1, W_2 を用いてマニピュレータのエンドイフェクタを右側に動かしたときの各関節角度の変化量は図3で示されるようになる。つまりは対角行列の各関節に対応す

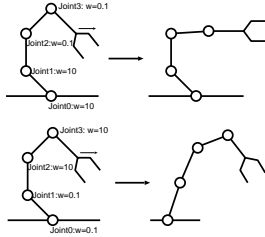


図1: 重み行列のパラメータを変えた時のマニピュレータの動作の違い

る要素の値が大きい場合にはその関節はあまり動かず、小さい値のときは動きが大きいことを示している。

4 モーションキャプチャデータから逆ヤコビ行列動作を計算

インバースキネマティクスを用いて人体の姿勢を作成する際、多くの場合、重み行列 W は対角成分に各セグメントに対応する質量等の値を入れる場合が多かった。インバースキネマティクスを用いることにより、実際の人体動作を再現しようとする場合はモーションキャプチャデータより逆に重み行列を計算し、それを適用することが適当である。ここでは動きデータから逆ヤコビ行列を計算するための手法を提案する。

まず、モーションデータにおいてある時刻 t_i における体全体の自由度の速度が $\dot{\theta}_i$ であったとする。そのとき、体の各エンドイフェクタ j の世界座標系における移動と回転の速度 $(\dot{P}_{i_j}^0, \dot{\Theta}_{i_j}^0)$ も同時に動作データから得ることができる。ここでエンドイフェクタの数を m とすると、すべてのエンドイフェクタ $j = 0, \dots, m-1$ においてその移動と回転の速度を求めることが可能である。ここで各エンドイフェクタの各 $(\dot{P}_{i_j}^0, \dot{\Theta}_{i_j}^0)$ と $\dot{\theta}_i$ の関係は以下のように書くことができる。

$$\dot{\theta}_i = \begin{pmatrix} J_0^\# & \dots & J_{m-1}^\# \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{P}_0^0 \\ \dot{\Theta}_0^0 \\ \vdots \\ \dot{P}_{m-1}^0 \\ \dot{\Theta}_{m-1}^0 \end{pmatrix} \quad (12)$$

ここではいかにして $J_0^\#, \dots, J_{m-1}^\#$ を求めるかが問題となる。 $J_0^\#, \dots, J_{m-1}^\#$ が与えられたエンドイフェクタの変化量に対してある二次形式を最小化するような体全体の自由度の変化量を与えるものと考えたとすると、式12は以下のように書き直すことができる。

$$\dot{\theta}_i = W^\#^{-1} J_{all}^T (J_{all} W^\#^{-1} J_{all}^T)^{-1} (\dot{r}). \quad (13)$$

ここで、 J_{all} はすべてのエンドイフェクタのヤコビ行列を縦に並べたマトリクスである。

$$J_{all} = \begin{pmatrix} J_0 \\ \vdots \\ J_{m-1} \end{pmatrix} \quad (14)$$

また \dot{r} はすべてのエンドイフェクタの世界座標系における変化量を縦に並べたベクトルである。

$$\dot{r} = \begin{pmatrix} \dot{P}_{i_j}^0 \\ \dot{\Theta}_{i_j}^0 \\ \vdots \\ \dot{P}_{i_j}^{m-1} \\ \dot{\Theta}_{i_j}^{m-1} \end{pmatrix} \quad (15)$$

ここで、 $W^\#$ は $m \times m$ の正定値な正方行列である。ここでは $W^\#$ は対角成分にのみ値のある行列と仮定する。すると、各対角成分の値を未定係数とした場合、 $W^\#$ は n の未定乗数によって表現することができる。すなわち、式13は m の式からなり、未知数も n であるため、 n 次の非線形連立方程式であることがわかる。

$$W^\# = \begin{pmatrix} w_{0,0} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & w_{1,1} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & w_{n-1,n-1} \end{pmatrix} \quad (16)$$

と定義すると、式13は以下のように書き直すことができる。

$$\dot{\theta}_i = f(w_0, \dots, w_{n-1}) \dot{r} \quad (17)$$

ここで

$$g(w_0, \dots, w_{n-1}) = \dot{\theta}_i - f(w_0, \dots, w_{n-1}) \dot{r} \quad (18)$$

と定義すると、 $g(w_0, \dots, w_{n-1}) = 0$ となるような (w_0, \dots, w_{n-1}) を求める問題となる。ここでは (w_0, \dots, w_{n-1}) をニュートン・ラプソン法により算出する。まず初期値として (w_0, \dots, w_{n-1}) に $(\alpha_0^0, \dots, \alpha_{n-1}^0)$ を代入する。この初期値には既存の手法のように各セグメントの質量や慣性モーメント等を用いる。この場合、当然 $g(\alpha_0^0, \dots, \alpha_{n-1}^0) \neq 0$ であるが、 $\alpha = (\alpha_0^0, \dots, \alpha_{n-1}^0)$ に微小変化量 $(\Delta\alpha_0^0, \dots, \Delta\alpha_{n-1}^0)$ を加えて

$$g(\alpha_0^0 + \Delta\alpha_0^0, \dots, \alpha_{n-1}^0 + \Delta\alpha_{n-1}^0) = 0 \quad (19)$$

となると仮定した場合、上式は以下のように線形展開することができる。

$$g(\alpha_0^0, \dots, \alpha_{n-1}^0) + \frac{\partial g}{\partial w} \Delta\alpha = 0 \quad (20)$$

よって、 $\Delta\alpha$ は

$$\Delta\alpha = \frac{\partial g}{\partial w}^{-1} g(\alpha_0^0, \dots, \alpha_{n-1}^0) \quad (21)$$

で計算することができる。 $\Delta\alpha$ を α^0 に加え、 $\alpha^1 = \alpha + \Delta\alpha$ を得る。 α^1 について同様に $\Delta\alpha^1$ を計算し、逐次 α を更新することにより、最終的に $g(\alpha_0, \dots, \alpha_{n-1}) = 0$ を満たすような α を求める。このようにして求めた値を用いて重み行列 $W^\#$ を計算することにより、任意の方向にエンドイフェクタを動かしてもモーションデータを反映した関節角度の変化量を求めることができる。

5 操作セグメントとエンドイフェクタの関連付け

簡単な操作により、体全体を動かすための手法としてインバースキネマティクスは優れた手法であるといえるが、これまでの手法においてはエンドイフェクタ等を動かした際に体のツリー構造の根の部分からエンドイフェクタに至る経路の関節のみが動く仕組みであった。静的な姿勢をユーザが指定するツールとしてインバースキネマティクスを用いる場合はそれで充分であったが、本研究のようにそれを積極的に動的なモデルとのインタラクションのためのツールとして用いる場合は不十分であるといえる。前章においてはモーションキャプチャーデータから重み行列の計算を行うための手法を提案したが、動作データから動きの特徴を抽出し、簡単な操作で新しい動作を生成するためにはエンドイフェクタの移動量の間の相関関係も必要になる。本章ではマウスによりユーザが動作中のキャラクターの各部を動かした際にキャラクターが動作データの特徴を保ちつつ自然に反応するようにするための手法を説明する。

ある時刻 t_i において、セグメント p の世界座標系における速度を $(\dot{P}_p^i, \dot{\Theta}_p^i)$ で定義する。また同時に各エンドイフェクタ e^1, e^2, \dots, e^m のそのときの三次元空間内における並進、回転速度を $(\dot{P}_{e_j}^i, \dot{\Theta}_{e_j}^i)$ で定義する。モーションデータを用いてセグメント p の動作と各エンドイフェクタの動作を関連づけるために以下のような関数を定義する。

$$T_{p,e^1, \dots, e^m}^i \quad (22)$$

ここでは明らかに

$$T_{p,e^1}^i(\dot{P}_p^i, \dot{\Theta}_p^i) = (\dot{P}_{e_1}^i, \dot{\Theta}_{e_1}^i) \quad (23)$$

$$T_{p,e^2}^i(\dot{P}_p^i, \dot{\Theta}_p^i) = (\dot{P}_{e_2}^i, \dot{\Theta}_{e_2}^i) \quad (24)$$

$$\vdots \quad (25)$$

$$T_{p,e^m}^i(\dot{P}_p^i, \dot{\Theta}_p^i) = (\dot{P}_{e_m}^i, \dot{\Theta}_{e_m}^i) \quad (26)$$

であることがわかる。 $T_{p,e^1}^i, \dots, T_{p,e^m}^i$ の定義の仕方には様々な方法が考えられるが、ここでは以下のような回転、スケーリングによる変形を用いることにする。

$$T_{p,e^j}^i = (R_t^{p,e^j} S_t^{p,e^j}, R_r^{p,e^j} S_r^{p,e^j}) (j = 1, \dots, m) \quad (27)$$

ここで R_t^{p,e^j} は回転を表す線形変換で回転の軸は

$$\dot{P}_p^i \times \dot{P}_{e_j}^i \quad (28)$$

回転角度は

$$\text{acos}(\dot{P}_p^i \cdot \dot{P}_{e_j}^i) \quad (29)$$

で計算されるものとする。ここで \times は外積を表し、 \cdot は内積を表すものとする。 S_t^{p,e^j} は線形なスケーリング変換を表し、その変換行列は以下ようになる：

$$\begin{pmatrix} \frac{\|\dot{P}_{e_j}^i\|}{\|\dot{P}_p^i\|} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\|\dot{P}_{e_j}^i\|}{\|\dot{P}_p^i\|} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\|\dot{P}_{e_j}^i\|}{\|\dot{P}_p^i\|} \end{pmatrix} \quad (30)$$

同様に R_r^{p,e^j}, S_r^{p,e^j} も各セグメントの速度の回転成分 $\dot{\Theta}_p^i, \dot{\Theta}_{e_j}^i$ を用いて定義することができる。

以上のように $T_{p,e^1}^i, \dots, T_{p,e^m}^i$ を定義することにより、モーションデータにおいて、ある時刻でセグメント p を元の動作データと異なる任意の方向に動した場合に、全てのエンドイフェクタ e^1, \dots, e^m の動作方向を定義することが可能になる。また前章の手法により重み行列を動作データから計算することにより、エンドイフェクタの三次元的な動作に伴う、各関節角度の変化量の計算が可能になる。

つまり、総じて言えば、動作データに基づいて、ある時刻でセグメント p を任意の方向に動した場合に、他の全ての関節自由度の変化量を求めることができることを意味する。もとのモーションデータに基づく動きであるため、元の動きを反映した反応であることが予想できる。事実、セグメント p を元のモーションデータと全く同じ方向に動した場合の関節角度の変化量は元の動作と全く同じであることは重み行列の定義からしても明らかである。このようにユーザによるマウス等を使ったインタラクティブな操作により、元の動作と同じエッセンスを持ったキャラクターの反応を得ることが可能となる。

6 実験

重み行列の算出、動作中のキャラクターのマウスによる操作の実験を

- ロボットマニピュレータ (自由度 6) (図 6(a))
- 人間型モデル (自由度 60) (図 6(b))

に大して行なった。ロボットマニピュレータには図 6 に示



図 2: ロボットマニピュレータと人間型モデル

されるような動きを、人間型モデルには図 6 に示されるような野球の投球動作と図 6 に示されるような踊り動作が与えられているとする。ロボットマニピュレータは 7 セグメントで構成されている。このモデルは実際には 24 自由度あるが、(ベースとなる根ノードのセグメントが 6 自由度、残りのセグメントがそれぞれ 3 自由度持つ) この動作中は 3 自由度しか使われていない。動作データを用いて、??章で説明した手法により、重み行列を計算した。初期値としては単位行列を用いた結果、実際に使われている自由

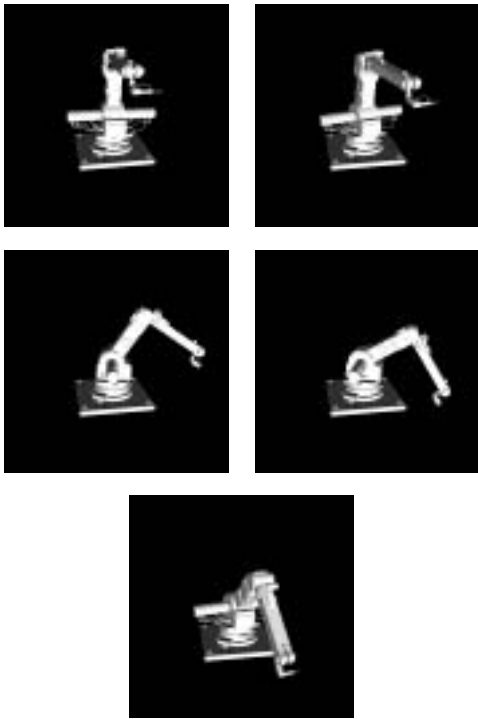


図 3: ロボットマニピュレータのモーションデータ

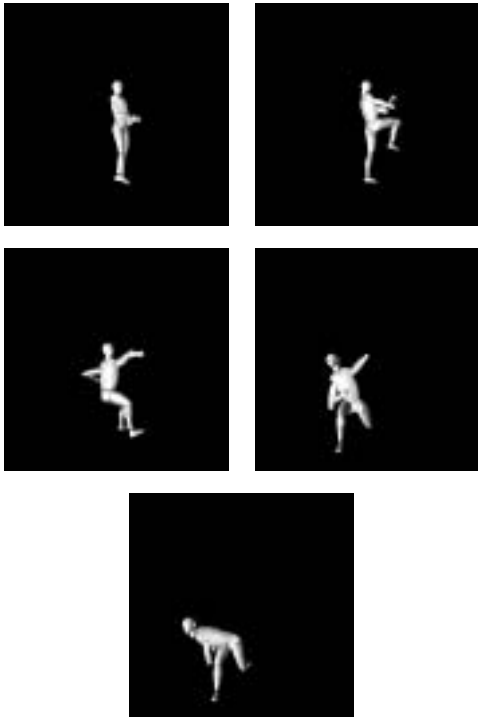


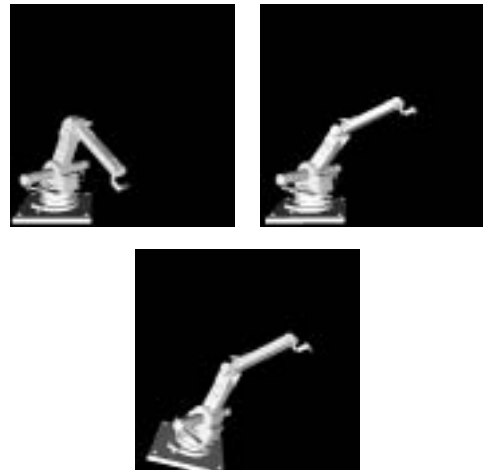
図 4: 人間型モデルのモーションデータ (野球の投球動作)



図 5: 人間型モデルのモーションデータ (踊り動作)

度に対応する重み行列の要素のみが小さい値に収束した。計算された重み行列を用いてロボットのエンドイフェクタにインバースキネマティクスを適用した。最初の姿勢を図 6(a) に示す。インバースキネマティクスを用いてエンドイフェクタを図の左上方向に引いた後の結果を図 6(b) に示す。重み行列に単位行列を用いた結果も図 6(c) に示す。

重み行列の効果は図より明確に表れている。計算された行列を使った場合、動作データで動いている自由度のみが使われていることがわかるが、単位行列の場合は全ての自由度が用いられていることがわかる。次に 図 6 にある人



(a) (b) (c)

図 6: インバースキネマティクスにより、ロボットマニピュレータのアームを操作した時の結果。(a) 初期姿勢 (b) 動作から計算した重み行列を用いたときのアームの動き (c) 単位行列を重み行列として使ったときのアームの動き

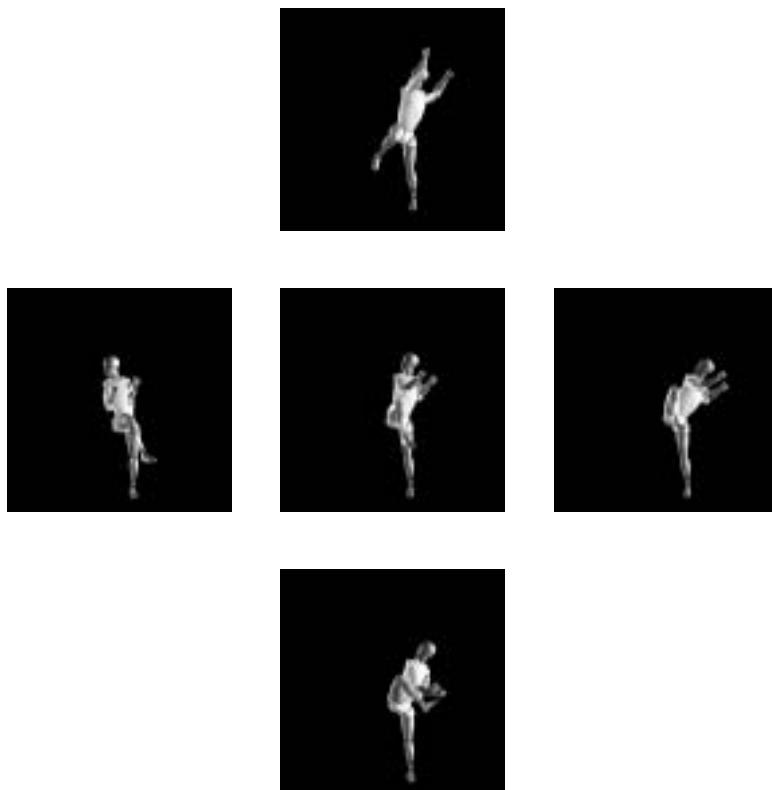


図 7: 野球の投球動作におけるモデルの操作

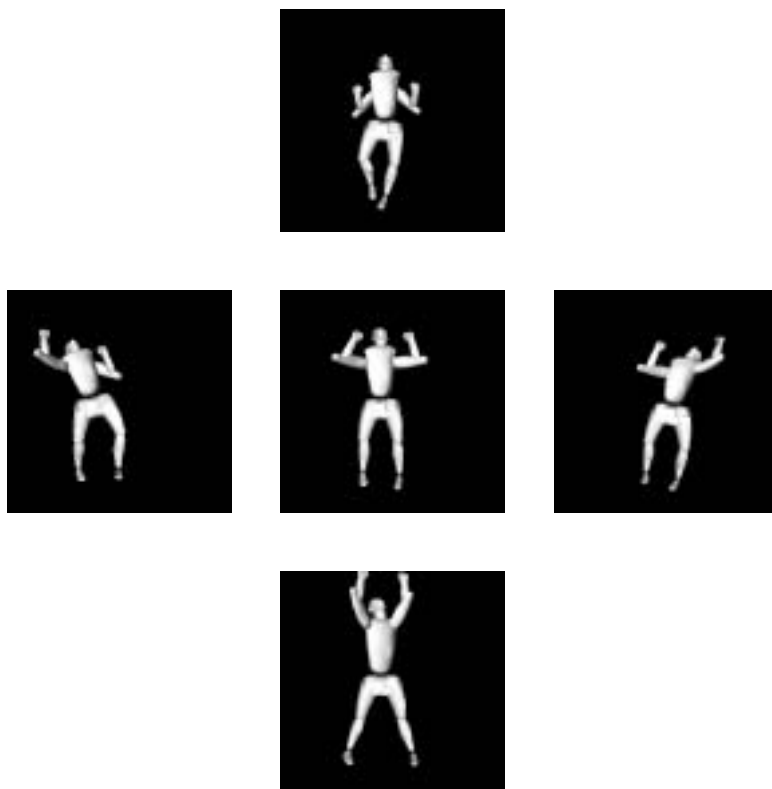


図 8: ダンス動作におけるモデルの操作

間型モデルの動きにおいて、マウスを用いて、体の各セグメントを任意の方向に動かした場合に、体の他の関節角度がどのように変化するかを調べた。図6において、投球動作の途中で人体モデルの左手を上下左右に動かしたときに全身が反応する様子を示す。同様に図6のダンス動作の途中のフレームでマウスを用いて、左手を動かしたときにどのようにキャラクターモデルが姿勢を変化させるかを図6に示す。他の全てのセグメントがマウスの動きにあわせて動くことがわかる。最後に本手法を用いて動作中の姿勢を編集し、補間により動作全体を変形した結果を図6に示す。図6(a)が元の動作データ、図6(b)に変形された後の動作を示す。

図6の4コマめにおいて、左手を上方にインバースキネマティクスを用いて引き上げた

7 考察

本研究ではモーションデータ等から直接、キャラクターの重み行列やエンドイフェクタの動作の相関を算出し、そのデータに基づいて、マウス等でインタラクティブにキャラクターのインバースキネマティクス操作ができるようにした。本手法で得られる人体動作は主に元の動作データを反映したものであるため、自然な動作変形が可能になっていることがわかる。例えば、野球の投球動作においては手足の連動が実際のピッチング動作の特徴をとらえたものであるため、キーフレーム等の編集も非常に容易に行なうことができる。

8 将来課題

今後の展開としては以上のような点が考えられる。

- 本研究では一つの動作からインバースキネマティクス動作を計算してきたが、複数の似たような動作で条件が違うものを用いることにより、さまざまな状況に対して安定して自然な動作が生成可能になるであろうと推定できる。
- マウス動作のドラッグ速度等のパラメータを反映した人体動作を生成することにより、よりインタラクティブ性の高い操作が可能になるものと思われる。

参考文献

- [1] Ronan Boulic, Ramon Mas-Sanso, and Daniel Thalmann. Complex character positioning based on a compatible flow model of multiple supports. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 3(3):245–261, 1997.
- [2] Armin Bruderlin and Lance Williams. Motion signal processing. *Computer Graphics (Proceedings of SIGGRAPH 95)*, 29:97–104, 1995.
- [3] Michael Gleicher. Retargetting motion to new characters. *Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series*, pages 33–42, 1998.
- [4] Michael Gleicher. Motion path editing. *Proceedings on 2001 Symposium on Interactive 3D graphics*, pages 195–202, 2001.
- [5] John M. Hollerbach and Ki C. Suh. Redundancy resolution of manipulators through torque optimization. *IEEE Journal of Robotics and Automation*, 3:308–316, 1987.
- [6] Yoshihito Koga, Koichi Kondo, James Kuffner, and Jean-Claude Latombe. Planning motions with intentions. *Computer Graphics*, 28:395–408, 1994.
- [7] Jehhee Lee and Sung Yong Shin. A hierarchical approach to interactive motion editing for human-



図9: 野球の投球動作を本手法を用いて変形した例。4フレーム目において左手を上へ引っ張った後、動作をワーピングしたものの (a) 元の動作 (b) 変形された動作

- like figures. Computer graphics proceedings, annual conference series, pages 39–48, 1999.
- [8] Philip Lee, Susanna Wei, Jianmin Zhao, and Norman I. Badler. Strength guided motion. Computer Graphics (Proceedings of SIGGRAPH 90), 24:253–262, 1990.
- [9] R. Mas, R. Boulic, and D. Thalmann. A robust approach for the control of the center of mass with inverse kinetics. Computers and Graphics, 20(5):693–701, 199.
- [10] Yoshihiko Nakamura and H. Hanafusa. Inverse kinematic solutions with singularity robustness for robot manipulator control. Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, 108:163–171, 1986.
- [11] Cary B. Phillips and Norman I. Badler. Interactive behaviors for bipedal articulated figures. Computer Graphics, 25(4):359–362, 1991.
- [12] Cary B. Phillips, Jianmin Zhao, and Norman I. Badler. Interactive real-time articulated figure manipulation using multiple kinematic constraints. Computer Graphics, 24(2):245–250, 1990.
- [13] Zoran Popović and Andrew Witkin. Physically based motion transformation. Computer graphics proceedings, annual conference series, pages 11–20, 1999.
- [14] Toshio Tsuji, Takashi Ikemotio, Koji Ito, and Mitsuo Nagamachi. Impedance transformations in multi-joint arm movements with redundant degrees of freedom. Transactions on IEE Japan(in Japanese), 108-C(7):471–476, 1988.
- [15] Toshio Tsuji, Koji Ito, Mitsuo Nagamachi, and Takashi Ikemotio. Impedance regulations in musculo-motor control system and the manipulation ability of the end-point. Journal of SICE(in japanese), 24(4):63–70, 1988.
- [16] Munetoshi Unuma, Ken Anjyo, and Ryoza Takeuchi. Fourier principles for emotion-based human figure animation. Computer Graphics (Proceedings of SIGGRAPH 95), 29:91–96, 1995.
- [17] D. E. Whitney. Resolved motion rate control of manipulators and human prostheses. IEEE Transactions on Man-Machine Systems, 10:47–53, 1969.
- [18] Andrew Witkin and Zoran Popović. Motion warping. Computer Graphics (Proceedings of SIGGRAPH 95), pages 105–108, 1995.
- [19] Jianmin Zhao and Norman I. Badler. Inverse kinematics positioning using nonlinear programming for highly articulated figures. ACM Transactions on Graphics, 13(4):313–336, 1994.