

3点の6自由度トラッカによる両手把持道具を利用する 人体運動アニメーション生成

河 崎 雷 太[†] 北 村 喜 文^{††} 岸 野 文 郎^{††}

3点という少数の6自由度トラッカによるモーションキャプチャを用いることによって、棒状の道具を持つ人物の全身運動アニメーションをリアルタイムで生成するための方法を提案する。本手法では、6自由度のトラッカを肩、腰、道具、両肘、両膝に装着し、まず、これらの値を変数として回帰式を求める。そして、この回帰式を用いて、6自由度のトラッカを肩、腰、道具の3点のみ装着することで、肘関節や膝関節などの未解決自由度を推定する。この際に、人物の足位置を固定して道具を両手で把持することを制約条件とし、両腕と両足の関節角度をインバースキネマティクスによって求める。さらに、未知である関節位置を回帰式から求めることによって、人物の動作を再構成する。その結果、棒状の道具を持つ骨格モデルを用いた実験において、自然な人体運動アニメーションを生成することができた。

Generation of Character Animation Holding a Tool with Its Both Hands by Using Three 6DOF Trackers

RAITA KAWASAKI,[†] YOSHIFUMI KITAMURA^{††} and FUMIO KISHINO^{††}

We propose a real-time method to generate character animation of whole body while holding stick-like tools by using only three 6DOF trackers. This method is achieved by introducing estimation with regression analysis based on the variables obtained from the 6DOF trackers attached to the subject's shoulder, waist, both elbows, both knees and the tool. On the execution period, the animation of character is generated by estimating the unknown DOFs such as joints of elbow and knee, by using the established regression formula with three 6DOF trackers attached to the shoulder, the waist, and the tool as the inputs. Here, the method assumes the fixed foot position and holding tools with his both hands as constraints, and joint angles of both elbows and both knees are calculated by inverse kinematics. As the result, we could generate natural character animation of whole body by using the proposed method.

1. はじめに

モーションキャプチャを利用したキャラクタなどの動作生成は、近年、映画やゲームなどの分野で広く用いられている。このような方法で人体の運動を取得しようとする場合、人体の骨格をモデル化しておく必要があるが、人体モデルは多くの関節および自由度を有するため、この動きを計測するためのシステムでは、モデルの複雑度に応じ計測すべき部位の数も増加し、そのため、マーカやトラッカなどのキャリブレーションに要する時間や手間も増加する傾向がある。こういったシステムを将来的に幅広く普及させ、たとえば一般

家庭などやゲームなどで利用する場合などを想定すると、できるだけ少ない数のトラッカを用い、その上で、単純な操作で、人体全体の複雑な動きのアニメーションを表現できる方法の確立が期待される。

このような問題に対して、たとえば Lee らは、仮想環境に移動すべきパスラインを描くなどの操作で、あらかじめモーションデータベースに蓄えておいたモーションを利用し、その環境に対応した新たなモーションを生成している⁵⁾。しかし、一般にモーションデータベースを用いる手法では、表現の自由度を高めるためにデータベースに多くのモーションを登録しておく必要があり、そのため、多くのデータ量を必要とする。

その他、センサ装着などの負担軽減を考慮した研究に、画像解析を用いて非接触で人体動作を検出する手法がある。石井らは、2台のカメラによるステレオ画像を解析し、頭部、顔、手の3次元位置を検出し、あらかじめ用意されたモデル動作とマッチングさせるこ

[†] 大阪キリスト教短期大学
Osaka Christian College

^{††} 大阪大学大学院情報科学研究科
Graduate School of Information Science and Technology,
Osaka University

とによって、人物動画画像を生成している³⁾。しかし、画像解析を用いる手法は、人物領域抽出が困難である。Badler らは、6 自由度磁気式トラッカを頭部、腰部、両手甲部の 4 点に装着し、トラッキングを行い、背骨の状態を IK (Inverse Kinematics) によって推定した¹⁾。しかし、この手法では、肘関節や膝関節の角度に関して解決しているが、位置に関して汎用的な対応がなされていない。また、大日方らは、大腿部に加速度センサを取り付けることによって、歩行状態を推定している^{7),8)}。しかし、この手法では、歩行以外の運動に対応していない。

本研究では、モーションデータベースや画像解析を用いるのではなく、3 個の 6 自由度トラッカを利用する手法を用いる。その際、Badler らの手法と同様に IK を用いて各肢の関節角度を求めるが、予備実験より得た関節位置をあらかじめ重回帰分析により定式化し、対応するモーションごとに回帰式を切り替えることで、関節位置の算出問題をより汎用的に解決する。本手法は、回帰式を各モーションごとにストックするという点で、モーションデータベースを用いる手法と同様の考え方であるが、モーション自体をストックするのではなく、数式のみをストックするので、保持するデータ量が少なくて済む。

本研究では、バット、ゴルフクラブ、竹刀など棒状の道具を両手で把持して利用する場合の人体運動アニメーションを生成するため、3 個の 6 自由度トラッカを利用することによって、人体全身の姿勢をリアルタイムに推定する手法を提案する。6 自由度のトラッカを肩、腰、道具、両肘、両膝に装着し、まず、これらの値を変数として回帰式を求める実験を行う。ここで、肩、腰、道具の測定値を説明変数とし、両肘、両膝の測定値を目的変数とする。そして、この回帰式を用いて、6 自由度のトラッカを肩、腰、道具のみ装着することで、肘関節や膝関節などの未解決自由度を推定する。この際に、下半身と上半身の運動に分けて、それぞれに対して制約条件を加えて、両腕と両足の関節角度を IK によって求める。下半身に関しては、足の接地点を固定し、上半身については、棒状の道具を両手で把持することを制約条件とする。さらに、未知である関節位置を回帰式から求めることによって、人物の動作を再構成する。

2. トラッカ 3 点による姿勢推定

2.1 動作モデル

人体全身の姿勢を正確に表現する場合、両手首から先を除いたとしても、31 関節 62 自由度が必要である

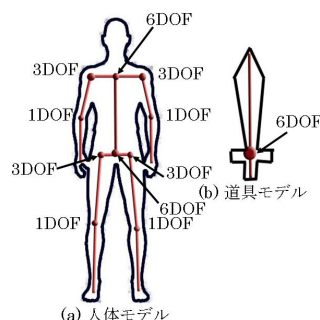


図 1 骨格モデル
Fig. 1 Skeleton model.

といわれており²⁾、複雑になりすぎる。そこで本手法では、回帰式を用いた運動アニメーション生成の可能性を調べることを目標とし、変数項を少なくして回帰式の決定係数を高めるため、図 1 のように、体幹と足・腕に分けて簡略化した骨格モデルを使用する。運動によっては、胴体部分は背骨によりある程度伸縮し、そのセグメントは湾曲することもある。この姿勢に関しては、Badler らの手法¹⁾を用いて推定することも可能であるが、本研究ではその表現を省略する。そして、腕・足を、体幹の所定の位置を基準とした 4 関節 16 自由度の骨格モデルとする。こうすることによって、全身の姿勢を合計 10 関節 28 自由度による骨格モデルと近似する。本研究では両手によって道具を把持している場合を想定しているので、これに道具の位置と回転に関する 6 自由度を加えて、合計 34 自由度のモデルを利用する。

2.2 未知自由度の解決

図 1 に示すモデルの 34 自由度を、6 自由度トラッカ 3 個 (18 自由度) によって決めるため、まず、両肘、両膝の各関節角 (1 自由度 $\times$ 4) を IK によって求める。この場合、腕と腿の先端と付け根の位置が既知である必要がある。ここで、各腿および各腕の付け根 (ルート) と先端 (エンドエフェクタ) を結ぶベクトルと、そのベクトルを軸とする回転角を成分とするクォータニオンによって表現できる⁶⁾。両腕と両腿のルートは、図 1 に示すように、肩セグメントと腰セグメントの両端に連結されており、肩と腰セグメントの位置および回転の値を得ることで、IK のルート位置が決定される。そこで、肩と腰セグメントの 6 自由度を、トラッカの計測値を直接利用する。次に、腕のエンドエフェクタは、両手で把持する道具を利用する条件を設けることで、道具セグメントの位置および回転の値により決定される。そこで、道具セグメントの 6 自由度をトラッカの計測値から直接取得する。腿の

エンドエフェクタは、床に対する足の接地点が変わらないことを条件として設けることで既知となる。

両腿と両腕の状態を表現するためには、上腕と大腿の方向（3 自由度 × 4）を示す必要がある。すなわち、クウォータニオンで表現する場合の IK 関節方向（本研究では、IK アップベクトルと呼ぶ）を示す必要がある。そこで、本研究では、既知自由度と IK アップベクトルとの相関を調査し、回帰式を得ることによって、IK アップベクトルを推定する。たとえば下半身の場合、腰セグメントの測定値（位置および回転の値）と両腿の IK アップベクトルとの関係を調べ、回帰分析を用いて一般化することにより、腰に取り付けた 1 つのトラッカで両腿姿勢を推定する。

提案システムを利用する際には、トラッカを腰、肩、道具の 3 点に装着することで、腰回転中心、肩回転中心、道具の測定値（位置および回転の値）の合計 18 自由度（6 自由度トラッカ × 3）を取得する。これらのうち、腰回転中心と肩回転中心の取得データによって、体幹の姿勢を決定する。その結果、全身 34 自由度のモデルの姿勢を、18 自由度にて表現することが可能となる。

3. 下半身と上半身の運動

3.1 足の接地点を固定した場合の下半身運動

人間の骨格構造は、ロボット工学におけるリンク機構と考えることができる。よって、床に対する足の接地点が自由に動かない条件を設定した場合の下半身は、腰セグメントが、6 自由度のマニピュレータとなり、両足はそれぞれ、2 リンク 3 関節とする平行リンク機構と考えることができる。また、人体の関節可動域は、ほとんどの人物において近い値であると考えられ、日本人成人男子の平均的な可動域を各ジョイントの制限として考慮する⁹⁾。さらに、リンク機構は、床に対する足の接地点が固定されていないため、倒れないようバランスを保つ条件を考慮すると、腰セグメントの運動はある程度予測できる。予測される運動のうち、比較的変位の大きい運動は、腰セグメントの上下屈伸運動と高さ方向を軸とする回転運動と考えられる。これらの運動は、リンク機構に IK を利用した場合の関節方向に大きく影響すると考えられる。

そこで本研究では、床に対する足の接地点を固定した場合の下半身運動は、膝の屈伸運動（本研究では、しゃがみ運動と呼ぶ）と腰セグメントの回転運動（本研究では、腰回転運動と呼ぶ）の 2 つに分けて考える。

3.2 道具を把持した場合の上半身運動

上半身の運動は、道具を把持する条件を備えても、

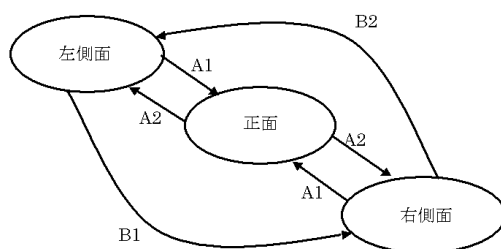


図 2 回帰式選択の状態遷移図

Fig. 2 State transition for choice of the regression formula.

下半身に比べて動きの自由度が高く、たとえば、ゴルフのスウィングや野球のバッティングといったように様々な運動が存在する。複雑になるのを防ぐため、何らかの運動に限定する必要がある。そこで、本研究では、剣を使う運動を扱う。上半身運動の要素を中段位置の構えから上段位置の構えへの運動と中段位置の構えからグリップを中段位置の左右脇に構える運動の 2 種類と定め、それぞれの姿勢をあらかじめ設定したルールによる基本姿勢として定める。

3.3 状態の遷移判定と関係式

本研究では、両腕および両腿の状態を推定するための回帰式を作成する目的で、定めた運動を数回繰り返す実験を行う。ここで、行う運動は、先に定義したように、下半身運動と上半身運動に分けて行う。

下半身運動としては、しゃがみ運動と垂直方向を軸とする腰回転運動を行う。それらの結果から、両膝の位置と腰セグメントの位置および回転の値との相関を重回帰分析により定式化する。実験によって求められた回帰式は、しゃがみ運動による関数と腰回転運動による関数が存在し、それぞれ独立している。そこで、それらを動作状態によって巧く選択する必要がある。そこで本研究では、各動作の最終姿勢状態として、正面・左右側面状態の合計 3 状態とし、図 2 のような状態遷移と考える。正面状態は腰の垂直方向を軸とする回転角の $\pm 30^\circ$ を閾値として左右側面状態と区別する。立位姿勢からしゃがみ姿勢への動作での関節方向を制御する関数式は、しゃがみ運動の回帰式として考える。

上半身運動としては、中段の構えから上段の構えに道具を移動する運動と中段の構えから左右脇構えに道具を移動する運動を行う。それらの結果から、両肘の位置と肩セグメントの位置および回転の値との相関を重回帰分析により定式化する。下半身運動同様に、実験によって求められた回帰式は、中段の構えから上段の構えに道具を移動する運動による関数と中段の構え

から左右脇構えに道具を移動する運動による関数が存在し、それぞれ独立している。そこで下半身運動と同様に、各動作の最終姿勢状態として、正面・左右側面状態の合計 3 状態とし、図 2 の状態遷移と考える。正面状態は肩の垂直方向を軸とする回転角の $\pm 30^\circ$ を閾値として左右側面状態と区別する。上段状態から中段状態への動作での関節方向を制御する関数式は、中段の構えから上段の構えに道具を移動する運動の回帰式として考える。

下半身と上半身いずれの運動も、左右側面状態～正面状態への遷移は、遷移 A1 および遷移 A2 として考え、各状態の閾値を超えた時点で、正面状態での予測値（下半身の場合、しゃがみ運動回帰式の予測値）と側面状態での予測値（下半身の場合、腰回転運動回帰式の予測値）との誤差を補間し修正する。ここで、遷移時間（補間のきざみ幅）を 5 frame に設定することで、急激な変化を避ける。

側面状態～反対側面状態（たとえば、右側面状態から左側面状態）への遷移は、遷移 B1 および遷移 B2 として考え、回帰式は、下半身運動の場合、腰回転運動の回帰式として考えられる。左右側面状態への遷移（遷移 B1 および B2）は、予備実験より 1～2 frame 内で正面状態を通過することが確認されており、遷移 A1 および A2 遷移時間（補間のきざみ幅 5 frame）内に反対側面側への遷移に移り変わる。よって、結果として腰回転運動の回帰式による関節位置推定が保たれる。遷移 A1 および A2 遷移時間を超える時間をかけての左右側面状態への遷移は、右（左）側面状態から正面状態への遷移（遷移 A1）と正面状態から左（右）側面状態への遷移（遷移 A2）の連続と考える。

4. システム構成

6 自由度トラッカには、Polhemus 社 Fastrak を用い、トランスミッタに同社 Long Ranger を用いる。PC は、Windows NT マシンを利用する。PC における各処理モジュールの構成を図 3 に示す。

IK 部では、入力されるトラッカの位置情報とあらかじめ定数として定めたセグメント長データから、肘関節と膝関節の角度を出力する。状態遷移判定部では、入力されるトラッカの回転情報から、正面状態であるか、左右側面状態であるかの判定結果を出力する。UP ベクトル制御部では、状態遷移判定部から得られた結果より回帰式を選択し、入力されるトラッカの計測値を変数とすることで、肘関節および膝関節の方向を出力する。姿勢生成部では、入力されるトラッカの計測値、IK 部で得られた関節角度、UP ベクトル制御部

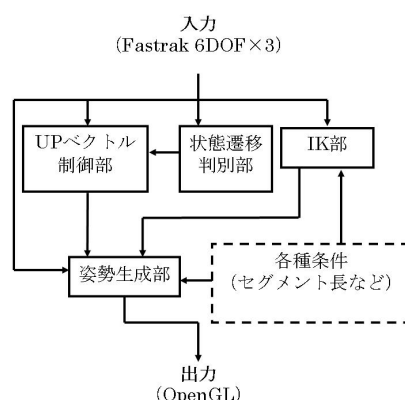


図 3 各処理モジュール構成図

Fig. 3 Configuration of processing modules.

で得られた関節方向、および、定数として定義するセグメント長などの各種データを基に、骨格モデルの姿勢を出力し、OpenGL にて描画する。腰および肩回転中心は、各トラッカから一定の定数距離の位置と定義し、回転中心推定のためのキャリブレーションなどは行っていない。また、トラッカの座標値は、トランスミッタを原点とする右手系・高さ y ・奥行き z のグローバル座標系の座標値として計測し、回転情報は、右手系・高さ y ・奥行き z の座標系をトラッカを原点とするローカル座標系として計測する。

5. 実験と評価

5.1 IK アップベクトルの推定

道具を使用して運動中の人体のある姿勢における 6 自由度トラッカの計測値から IK アップベクトルを推定することができるかどうかを確認するための実験を行う。まず下半身に関しては、しゃがみ運動と腰回転運動の 2 種類のタスクに対して実験する。トラッカを腰と両膝の 3 点に取り付け、しゃがみ動作運動時の腰の 6 自由度と両膝の開きの関係を調べる。モーション開始時の IK アップベクトルを初期姿勢値とし、単位時間ごと（描画フレームごと）の IK アップベクトルの角度変化量を算出する。同じように、腰回転運動時の腰の 6 自由度と両膝の開きの関係を調べる。

上半身に関しては、中段から上段への運動と、中段から左右脇構えへの運動の 2 種類に対して実験する。トラッカを肩と両肘および道具の 4 点に取り付け、棒状の道具（剣）を中段から上段に上げ下げする運動時の道具の 6 自由度と両肘の開き関係を調べる。同じように、道具を中段から左右脇腹に構える動作時の肩の 6 自由度と両肘の開き関係を調べる。

しゃがみ運動は意識的に膝を閉じた状態で行うこと

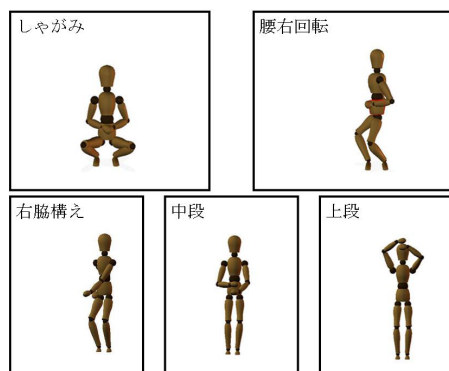


図 4 各最終姿勢

Fig. 4 Pose for motion start and motion end.

表 1 下半身しゃがみ運動の重回帰分析結果

Table 1 Regression formula of squats motion.

	回帰式	R^2
実験 1 右足	$UA = 3.1T_y + 1.9R_z - 3.3R_x + 2.2$	0.66
実験 1 左足	$UA = 46.7T_x - 17.1T_z + 1.0R_y - 5.3R_z - 3.4$	0.81
実験 2 右足	$UA = 26.6T_x - 3.8T_y - 18.9T_z - 0.3R_x + 1.1R_y - 2.8R_z - 3.0$	0.77
実験 2 左足	$UA = 42.9T_x - 52.8T_z + 0.5R_x + 0.9R_y - 4.4R_z - 0.5$	0.77
実験 3 右足	$UA = 45.1T_x - 39.8T_z + 0.6R_x + 0.4R_y - 0.9R_z + 14.0$	0.64
実験 3 左足	$UA = 70.2T_x - 56.7T_z + 1.0R_x - 2.3R_z + 18.1$	0.70

もできるが、下半身・上半身共に、どちらの運動も我々が指定した初期ポーズから目的ポーズへの運動とする。そのため、被験者にはあらかじめ十分各ポーズの練習を行ってもらい、各運動の最終姿勢を図 4 に示す。中段ポーズは、腹部の前に剣のグリップがある状態とする。上段ポーズは額の前に剣のグリップがあり、明示的に両肘を開いた状態とする。左右脇構えポーズは、左右わき腹に剣のグリップがある状態で、肩中心を同じ方向にひねった状態とする。

5.2 重回帰分析による下半身運動分析

1名の被験者に、しゃがみ運動(10往復)を3セット(実験1, 実験2, 実験3)行ってもらい、腰の6自由度を説明変数とし、膝関節のIKアップベクトルの角度変化(UA)を目的変数とした場合の下半身運動の重回帰分析⁴⁾の結果を表1に示す。変数名は、腰セグメントの移動値を T_x, T_y, T_z とし、回転値を R_x, R_y, R_z とした。このとき、説明変数の選択には、ステップワイズ法(変数増減法, F-in 2.0, F-out 2.0)

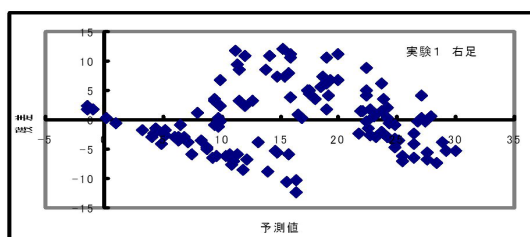


図 5 予測値に対する残差の散布図

Fig. 5 Scatter plot of residual for estimated value.

表 2 UA に対する各変数との相関係数

Table 2 Coefficient of correlation of UA for each variables.

	実験 1 : 右足 自由度 121	実験 1 : 左足 自由度 121	実験 2 : 右足 自由度 151	
T_x	0.56927	0.57158	0.64478	
T_y	-0.70840	-0.86206	-0.65616	
T_z	-0.51479	-0.69236	-0.47815	
R_x	0.52260	0.48448	0.16491	
R_y	0.62567	0.55119	0.26445	
R_z	-0.70806	-0.84995	-0.57944	
	実験 2 : 左足 自由度 151	実験 3 : 右足 自由度 258	実験 3 : 左足 自由度 258	平均
T_x	0.72667	0.55876	0.50530	0.59606
T_y	-0.76949	-0.68388	-0.75741	-0.73957
T_z	-0.22359	-0.19228	-0.12764	-0.37147
R_x	0.47338	0.05891	0.37789	0.34703
R_y	0.13998	0.28385	0.03564	0.31680
R_z	-0.71733	-0.36483	-0.32809	-0.59128

を用いる。

表からも明らかのように、被験者が同一人物であっても測定ごとに選択された説明変数が異なり、決定係数(自由度調整済み: R^2)もそれほど高くなく、望ましい結果ではなかった。そこで、回帰診断を行った結果、図 5 に示すように、予測値と残差の散布図において、予測値の中央値で残差が大きいたことが判明した。このように予測値の大小によって残差のパラッキが異なる場合、等分散性、または線形性の仮定が不適当であると考えられる。

そこで、各説明変数と目的変数の相関係数を調べた結果を表 2 に示す。結果の平均値の絶対値より、変数 T_y (腰の高さ値) が比較的強い相関を示していることが確認できた。したがって変数を T_y に絞り、図 6 に示すように、変数 T_y に対する IK アップベクトルの角度変化(UA)の散布図を調べたところ、データが 2 次以上の関係を示していることが判明し、非線形の項を組み込む必要があることが分かった。

同じように、腰回転運動の相関係数平均を求めた。回転方向を左回転と右回転に分けて分析したところ、

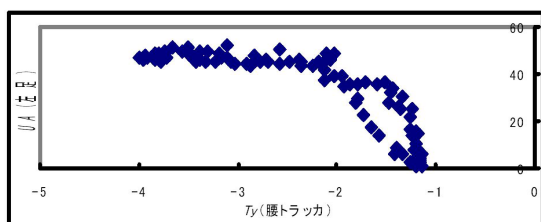


図 6 T_y に対する UA の散布図 (しゃがみ運動)
Fig. 6 Scatter plot of UA for T_y .

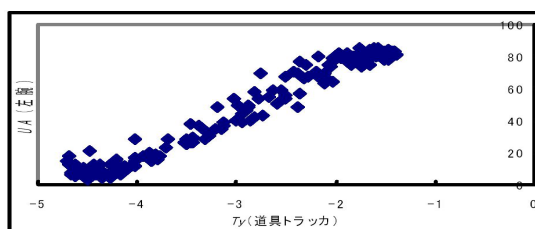


図 8 T_y に対する UA の散布図 (中段～上段運動)
Fig. 8 Scatter plot of UA for T_y .

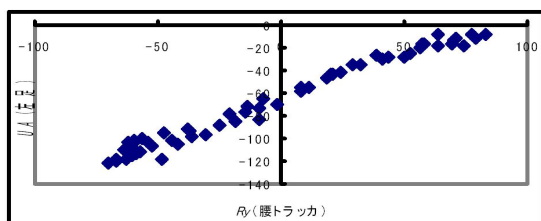


図 7 R_y に対する UA の散布図 (腰回転運動)
Fig. 7 Scatter plot of UA for R_y .

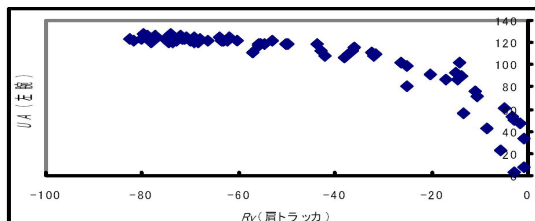


図 9 R_y に対する UA の散布図 (中段 → 左脇構え運動)
Fig. 9 Scatter plot of UA for R_y .

変数 R_y が相関係数 0.89 と比較強い相関を示していることが確認できた。変数 R_y 以外にも、変数 R_z にも同じような相関が確認できたが、変数 R_y と変数 R_z との相関係数が、ほぼ 1.0 であったため、共線性を避けるため、どちらか一方を選択する必要があった。本研究では、変数 R_y を選択した。変数 R_y に対する IK アップベクトルの角度変化 (UA) の散布図を図 7 に示す。

5.3 重回帰分析による上半身運動分析

1 名の被験者に、中段から上段の運動 (10 往復) を 3 セット (実験 1, 実験 2, 実験 3) 行ってもらった。道具の 6 自由度を説明変数とし、肘関節の IK アップベクトル (UA) を目的変数とした場合の重回帰分析を、上半身の運動に関しても、下半身同様に行った。その結果、3 セット測定を行った決定係数の平均は、0.86 と比較的高い値であり、予測値と残差の散布図においても、比較的に等しく分散しており、線形性が保証された。ただし、下半身と同様に、被験者が同一人物であっても測定ごとに選択された説明変数が異なった。そこで、下半身同様に、各説明変数と目的変数の関係を調べることにした。各説明変数と目的変数の相関係数を調べた。結果の平均値の絶対値より、変数 T_y (道具の高さ値) が相関係数 0.92 と比較強い相関を示していることが確認できた。変数 T_y に対する IK アップベクトルの角度変化 (UA) の散布図を図 8 に示す。

同じように、中段から左右脇構えへの運動の相関係数平均を求めた。回転方向を左回転と右回転に分け、さらに、正面から側面への遷移と側面から正面への遷

移とを分けて分析したところ、変数 R_y が相関係数 0.85 と比較的強い相関を示していることが確認できた。変数 R_y 以外にも、変数 R_z 、変数 R_x にも同じような強い相関関係が確認できた。共線性を避けるため、本研究では、変数 R_y を選択した。変数 R_y に対する IK アップベクトルの角度変化 (UA) の散布図の一例を図 9 に示す。

5.4 非線形単回帰分析による結果

3 名の被験者が 10 往復しゃがみ運動をしたときの腰の高さ (T_y) に対する IK アップベクトルの角度変化 (UA) を図 10 (a) に示す。最小 2 乗法による回帰式との決定係数を調べたところ、決定係数 0.87 の相関が得られた。なお、 UA は初期姿勢値から体の外側方向を正回転方向とした。次に、腰回転運動時の腰の回転角度と両膝の開きの関係を調べ、腰の回転角 (R_y) に対する IK アップベクトルの内角 (UA) を示したグラフを図 10 (b) に示す。同時に分析を行ったところ、平均して決定係数 0.97 の相関が得られた。

同じく上半身に関して、中段～上段運動時の道具の高さ (T_y) に対する IK アップベクトルの角度変化 (UA) を図 11 (a) に示す。分析を行ったところ、決定係数 0.97 の相関が得られた。次に、中段～左右脇構え運動時の肩の回転角度と両肘の開きの関係を調べ、肩の回転角 (R_y) に対する IK アップベクトルの内角 (UA) を示したグラフを図 11 (b) に示す。同時に分析を行ったところ、平均して決定係数 0.88 の相関が得られた。

これらの結果より、膝の IK アップベクトルの方向

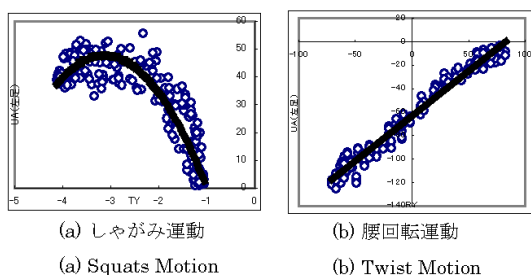


図 10 下半身運動の近似曲線

Fig. 10 Approximated curve of lower body motion.

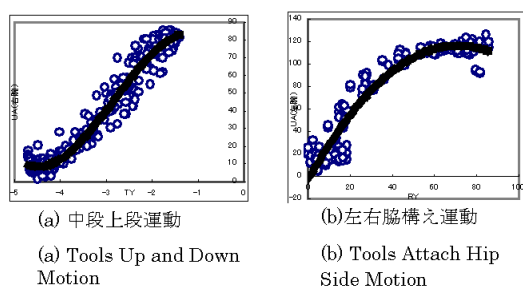


図 11 上半身運動の近似曲線

Fig. 11 Approximated curve of upper body motion.

が、腰の位置と回転値から推定でき、肘の IK アップベクトルの方向が、道具の位置や肩の回転情報から推定できることが確認できた。各遷移に対する近似式と決定係数を表 3 に示す。表 3 の結果は、すべて左側（左腕・左足）の UA を導くものであり、右側の UA の変化は逆符号で対象となるものとして実装する。

6. 実装結果

5 章で記述した手順で、求めた回帰式を骨格モデルの制御に利用した結果を図 12 に示す。図は自由に剣を振るアニメーションを生成したもので、動作中の代表フレームを 5 フレーム掲載したものである。同図左側は、トラッカを本手法で提案する 3 点に装着した被験者の実写映像を示しており、その背景にある三脚は、計測システムの一部である Long Ranger である。同図右側は、本手法を用いて生成された骨格モデルの CG を示している。これらにより、膝関節、肘関節の角度、方向ともに自然に変化していることが確認できた。

本システムでは、描画速度が約 25 fps であったため、腰や肩を意識的に素早く回転させた際の遷移時間（5 frame）に若干もたつきを感じた。また、各動作の最終姿勢が定義されているため、意図的に想定外の姿勢を入力した際（たとえば、剣動作に対して、ゴルフ

表 3 運動に対する回帰式と決定係数（左足：左腕）

Table 3 Regression formula of motions and coefficient of determinations.

	回帰式	R^2
しやがみ運動	$y = -10.412x^2 - 65.179x - 54.439$	0.872
腰回転運動 (左回転)	$y = -0.7684x - 63.658$	0.9726
腰回転運動 (右回転)	$y = -0.0047x^2 + 0.5727x - 95.569$	0.9699
中段～上段運動	$y = -4.1574x^3 - 35.239x^2 - 65.317x + 49.134$	0.9686
中段～脇構え運動 (右回転, 正面から側面方向)	$y = -0.0235x^2 + 3.346x - 2.8933$	0.9124
中段～脇構え運動 (左回転, 側面から正面方向)	$y = 0.0316x^2 + 1.6472x + 26.664$	0.8478
中段～脇構え運動 (左回転, 正面から側面方向)	$y = -0.0233x^2 - 2.9061x + 34.779$	0.8844
中段～脇構え運動 (右回転, 側面から正面方向)	$y = 0.0192x^2 + 0.1673x + 13.929$	0.8692

スウィングを行うなど）の表示されたセグメント姿勢の違いを不自然に感じた。しかし、想定に従い、剣を扱うゲームなどでの利用と意識を限定した場合、遷移時間やセグメント姿勢に不都合を感じることはなかった。むしろ、被験者が間違った最終姿勢を行った場合でも、映像としては、正しい（見栄えの良い）姿勢を描画するため、自分自身の動作が見栄え良いと錯覚し、爽快感があった。

他の実装例として、ゴルフスウィングを本手法で表現したものを図 13 に示す。本例では、アドレスからトップまでのバックスウィング状態と、トップからフォローまでのダウンスウィング状態の 2 状態について回帰式を用意した。それらの回帰式の説明変数に、道具（クラブ）に取り付けられたトラッカの位置情報（高さ値）と腰トラッカの回転値を入力し、剣動作と同じく肘と膝の IK アップベクトルの初期値からの変位角度を出力した。また、状態の切替えには、道具トラッカのローカル座標における加速度方向をフラグとして利用した。図 13 左側は、トラッカを本手法で提案する 3 点に装着した被験者の実写映像を示している。同図右側は、本手法を用いて生成された CG を示している。剣動作と比較して、状態の切替え点（トップ姿勢）での 2 状態間の関節位置に差が少ないため、より滑らかな動作が実現できた。

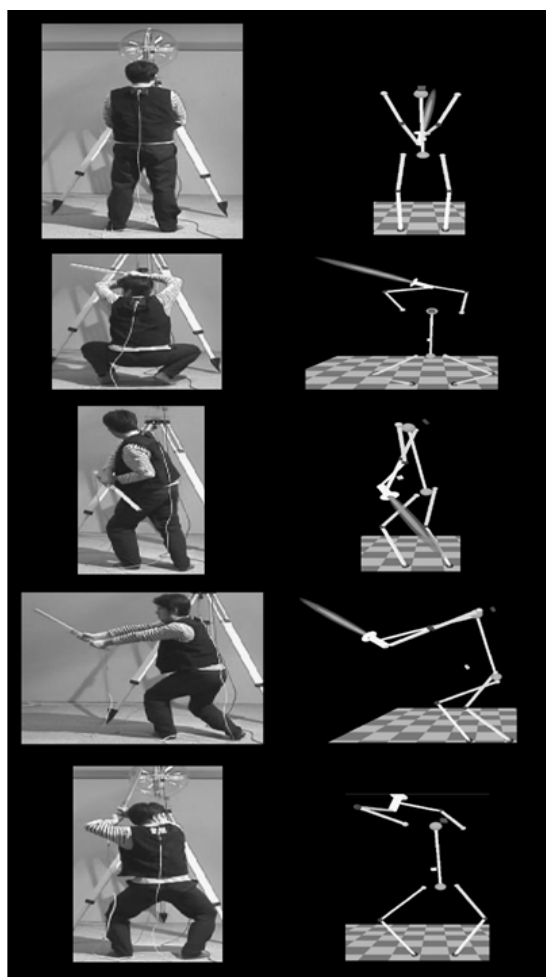


図 12 実装結果 1 (剣)
Fig. 12 Results 1 (Sword action).

本研究の目的は、手軽に動作目的に応じたモーションキャプチャを行うことであり、それを達成できたと考える。また、野球のバッティングなど動作目的ごとに回帰式を準備しておけば、様々な運動に応用できると考える。

7. おわりに

6 自由度トラッカ 3 点のみを利用することによって人体全身の姿勢を推定するリアルタイムアニメーション手法を提案した。IK アップベクトルの制御に、取得するデータからの相関関係を用いる方法を提案し、その妥当性を実験により明らかにした。

今後の予定として、本研究では、下半身の運動には、腰部のトラッカ情報を用い、上半身の運動には、肩部および道具部のトラッカ情報を用いた。しかし、人間は、バランスを保つために、姿勢をとると考えるなら

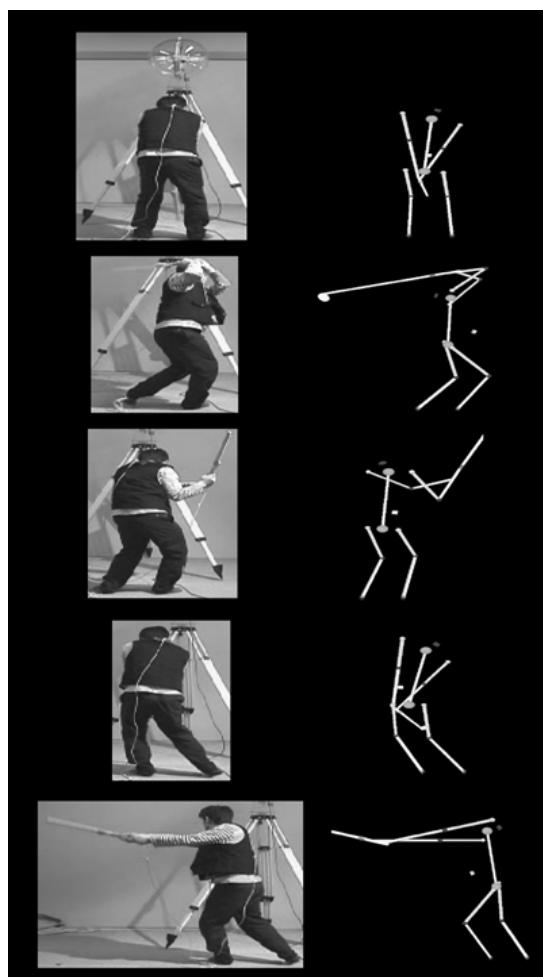


図 13 実装結果 2 (ゴルフスウィング)
Fig. 13 Results 2 (Golf swing).

ば、下半身の運動に、上半身や腕の状態が影響することは明らかである。今後は、全身のバランスを入力情報とし、下半身状態や上半身状態を推定することを目指す予定である。

参 考 文 献

- 1) Badler, N.I., Hollick, M. and Granieri, J.: Real-time control of a virtual human using minimal sensors, *Presence*, Vol.2, No.1, pp.82-86 (1993).
- 2) Boulic, R., Fua, P., Herda, L., Silaghi, M., Monzani, J.S., Nedel, L. and Thalmann, D.: An anatomic human body for motion capture, *Proc. EMMSEC '98*, Bordeaux (1998).
- 3) 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 (D-II), Vol.J76-D-II, No.8, pp.1805-1812 (1993).

- 4) Kitamura, Y., Higashi, T., Iida, T. and Kishino, F.: Interactive computer animation of hand gestures using status estimation with multiple regression analysis, *Computer Graphics Forum, Proc. EUROGRAPHICS*, Vol.20, No.3, pp.251-259 (2001).
- 5) Lee, J., Chai, J., Reitsma, P.S.A., Hodgins, J.K. and Pollard, N.S.: Interactive control of avatars animated with human motion data, *ACM Trans. Graphics, Proc. SIGGRAPH 2002*, Vol.21, No.3, pp.491-500 (2002).
- 6) Lee, J. and Shin, S.Y.: A hierarchical approach to interactive motion editing for human-like figures, *Proc. SIGGRAPH '99 Conference*, pp.39-48 (1999).
- 7) 大日方五郎, 中山 淳, 阿部善博: ウェアラブルな加速度センサによる歩行状態の推定, ヒューマンインタフェースシンポジウム 2002 論文集, pp.753-754 (2002).
- 8) 大日方五郎, 長谷和徳: 身体運動支援のためのシステム制御情報技術, システム/制御/情報, Vol.46, No.7, pp.369-367 (2002).
- 9) 鈴木孝雄: 日本人のからだ—健康・身体データ集, 朝倉書店 (1996).

(平成 15 年 12 月 11 日受付)

(平成 16 年 6 月 8 日採録)



河崎 雷太 (正会員)

平成 9 年大阪産業大学大学院工学研究科博士前期課程修了。平成 14 年大阪大学大学院工学研究科博士後期課程単位取得退学。現在, 大阪キリスト教短期大学国際教養学科講師。

モーションキャプチャ, モーション加工に関する研究に従事。



北村 喜文 (正会員)

昭和 62 年大阪大学大学院基礎工学研究科博士前期課程修了。同年キヤノン株式会社情報システム研究所, 平成 4 年 ATR 通信システム研究所, 平成 9 年大阪大学大学院工学研究科助教授, 平成 14 年より同大学大学院情報科学研究科助教授。ACM, IEEE, 電子情報通信学会, ヒューマンインタフェース学会等会員。博士 (工学)。



岸野 文郎

昭和 46 年名古屋工業大学大学院電子工学専攻修士課程修了。同年日本電信電話公社 (現 NTT) 電気通信研究所入所。同ヒューマンインタフェース研究所において, 高速・広帯域通信システムの研究・実用化, 画像処理の研究に従事。平成元年 ATR 通信システム研究所知能処理研究室室長。臨場感通信, 画像処理等の研究に従事。平成 8 年大阪大学大学院工学研究科教授, 平成 14 年より同大学大学院情報科学研究科教授。ACM, IEEE, 電子情報通信学会, 映像情報メディア学会, ヒューマンインタフェース学会等会員。博士 (工学)。