

# 個人利用を想定した簡易モーションキャプチャシステム

川澄裕一<sup>†</sup> 宮岡伸一郎<sup>‡</sup>

<sup>†</sup>東京工科大学大学院 バイオ・情報メディア研究科メディアサイエンス専攻

<sup>‡</sup>東京工科大学 メディア学部メディア学科

〒192-0982 東京都八王子市片倉町 1404-1

Email: <sup>†</sup>g31070106e@gss.teu.ac.jp <sup>‡</sup>miyaoka@media.teu.ac.jp

あらまし 本研究では、個人利用を想定した取り扱いの容易なモーションキャプチャシステムを提案する。本システムでは市販の Web カメラを 2 台使用し、簡易カラーマーカを装着したユーザの上半身を撮影する。マーカは両腕の肩・肘・手に装着する。マーカ追跡にはパーティクルフィルタを用いた。カメラキャリブレーションはユーザが特定の姿勢をとることで行う。各マーカの 3 次元座標を復元し、アバターの腕姿勢を設定する。実験では各処理の精度の検証を行い、一般ユーザの利用に耐えうる精度であることを確認した。

## Motion Capture System for Personal Use

<sup>†</sup>Yuichi KAWASUMI <sup>‡</sup>Shinichiro MIYAOKA

<sup>†</sup>Graduate School of Bionics, Computer and Media Sciences, Tokyo University of Technology

<sup>‡</sup>School of Media Science, Tokyo University of Technology

Email: <sup>†</sup>g31070106e@gss.teu.ac.jp <sup>‡</sup>miyaoka@media.teu.ac.jp

**Abstract** In this paper, we propose a user-friendly motion capture system. This system uses two Web cameras on the market and each camera takes a picture of the upper-body of the user wearing the simple color markers at shoulders, elbows and hands. The system tracks markers using the particle filter. Camera calibration can be carried out easily using user's specific posture. 3D coordinates of each marker are restored from movie pictures, and the arm posture of avatar is controlled by the coordinates. This system is confirmed to have efficient accuracy for personal use.

### 1. はじめに

モーションキャプチャはアクターの演じる姿勢や動作、物体の動きなどをキャプチャし、モーションデータを取得する技術である。動作情報の取得方法には、赤外線マーカやカラーマーカを装着し、複数台のカメラや専用デバイスで撮影するものやあらかじめ撮影した動画像から動作を解析する方法などがある。CG キャラクターへの動作マッピングにモーションキャプチャを用いることで CG キャラクターに人間らしい動作を与えることができる。現在、モーションキャプチャには様々なシステムが提案されている [1][2][3]。取得したモーションデータはアニメーション、映画、ゲームなどのコンテンツ制作に利用されている。近年では、モーションキャプチャはスポーツ動作のチェック、伝統舞踊などのアーカイブ [4] などにも用いられている。

一方、インターネットなどでアバターが多く用いられるようになった。アバターとは自分の分身として扱う CG キャラクターのことであり、オンラインゲーム、チャット、SNS などに用いられる。これらのアバ

ターはキーボードやマウスで操作するものが多い。この方法では直感的な操作が行えず、動きも用意されたものに限定されてしまう。この問題を解決するためにモーションキャプチャを用いることが考えられる。しかし、モーションキャプチャは大規模な装置や広い空間、高いコスト、煩雑な作業などが必要となる。このため、一般ユーザが気軽に使用することは難しい。

本研究では、3D アバター制御に応用可能な簡易モーションキャプチャシステムを提案する。このシステムでは撮影デバイスやマーカに簡易なものを使用し、煩雑な作業を必要としないシステムの構築を目指す。個人利用可能なモーションキャプチャが実現されることでアバターによるビデオチャットやオンラインゲームの CG キャラクター操作など個人が利用するコンテンツへの使用や、映像コンテンツ作成時における簡易モーションの作成・修正作業の効率化が期待できる。

### 2. モーションキャプチャ概要

人物動作の撮影には市販されている Web カメラを

2台使用する。撮影対象は席に着いているユーザの上半身とする。ユーザは簡易なカラーマーカを装着する。マーカの装着部位は両腕の肩・肘・手とする。マーカの色は背景の色と区別しやすいものとし、各マーカの色情報はあらかじめ調べておく。このマーカの色情報を用いて撮影画像中のマーカの追跡を行う。マーカの追跡にはパーティクルフィルタを利用する。

2台の Web カメラから取得したマーカの画像座標を 3次元座標に復元する。復元時に必要となるカメラパラメータはシステム使用の最初にカメラキャリブレーションを行うことで取得する。本研究ではカメラキャリブレーションにユーザが特定の姿勢をとることで行う方法を提案する。この方法はマーカ以外の道具や煩雑な作業を必要とせず容易に行える。

復元された 3次元座標からアバターの姿勢を設定する。ここでは動作撮影時にリアルタイムでアバターの腕姿勢のマッピングを行う。

本システム使用時の環境を図 1 に、本システムの処

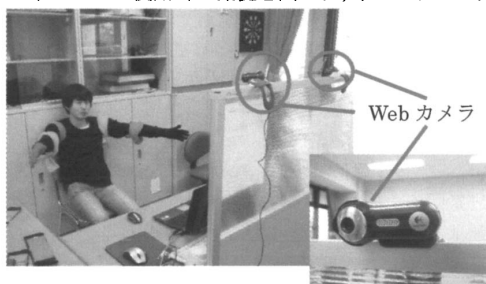


図 1. システム使用時の環境

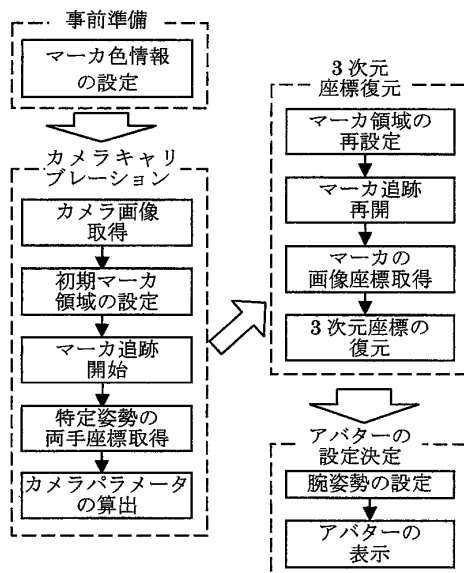


図 2. システムの処理手順

理手順を図 2 に示す。

### 3. マーカの追跡

#### 3.1 初期マーカ領域の設定

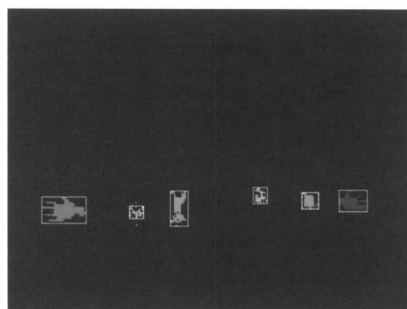
装着したマーカの画像座標の取得方法について述べる。本研究では背景と区別しやすい色のマーカを使用する。マーカの装着部位は両腕の肩・肘・手とする。あらかじめ使用するマーカの HSV と YCrCb の色情報を調べておく。

マーカ追跡のはじめに初期マーカ領域を設定する。これは後述するパーティクルフィルタの初期設定を行うためである。システム使用の最初にユーザは図 3(a)のような両腕を広げた姿勢をとる。この姿勢を撮影した画像を縦方向にスキャンし、各マーカの色情報の HSV に近い画素をマーカ候補画素とする。このときごとに候補画素数をカウントし、候補画素数が多い列をマーカ領域の候補列とする。この候補列が連続する箇所をマーカ列領域とする。各マーカ列領域で横方向にスキャンを行い、マーカ候補画素がまとまっている箇所をマーカ領域とする。図 3(a)からマーカ領域を設定した画像が図 3(b)である。

図 3(b)のように領域は画像の左から右手、右肘、右肩、左肩、左肘、左手となる。



(a) 撮影画像



(b) 設定したマーカ領域

図 3. マーカ領域の作成



図 4. パーティクル発生



図 5. 算出したマーカ座標

### 3.2 パーティクルフィルタによるマーカ追跡

本システムではマーカ追跡にパーティクルフィルタを用いる。パーティクルフィルタはある時刻の観測データから、次の状態を予測することで物体追跡を行う手法である[5]。コンピュータビジョンの分野では移動する人物や物体の追跡に効果を上げている手法である。パーティクルフィルタは以下の処理を繰り返す。

1. ある時刻での状態を予測し、状態ベクトルを持ったパーティクルを移動させる
2. 各パーティクルの状態ベクトルを用いて観測を行い、尤度を求める
3. 重みに応じてパーティクルの複製・削除を行う

本研究のパーティクルフィルタを用いた追跡手法を述べる。本研究では、状態ベクトルを  $\mathbf{s}_t = (x_t, y_t, v_{x_t}, v_{y_t})^T$  とする。ここで  $(x_t, y_t)$  は時刻  $t$  の画像座標であり、 $(v_{x_t}, v_{y_t})$  はそれぞれ  $x, y$  軸方向の速度を表わす。図 4 はパーティクルを白の画素で表現した画像である。マーカ追跡開始時は 3.1 で求められたマーカ領域内に各マーカを追跡するパーティクルを発生させる。

次フレーム以降は等速直線運動にノイズ  $\mathbf{n}_t$  を加えたものを予測に用いる。時刻  $t$  の状態ベクトルは式(1)のように予測される。

$$\mathbf{s}_t = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \mathbf{s}_{t-1} + \mathbf{n}_t \quad (1)$$

予測された状態ベクトルを用いて観測を行う。予測された状態ベクトルの画像座標  $(x_t, y_t)$  における HSV と YCrCb を取得し、これを  $\mathbf{h}_t = (H_t, S_t, V_t, Y_t, Cr_t, Cb_t)$  とおく。このベクトル  $\mathbf{h}_t$  と事前に取得しておいたマーカ色情報  $\mathbf{h}_0$  とのユークリッド距離  $d$  を求める(式(2))。

$$d_t = \|\mathbf{h}_t - \mathbf{h}_0\| \quad (2)$$

ユークリッド距離  $d$  から各パーティクルの尤度  $w_t$  を求める。尤度は平均 0、分散  $\sigma^2$  の正規分布とする(式(3))。

$$w_t = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \exp\left(-\frac{d_t^2}{2\sigma^2}\right) \quad (3)$$

$M$  個のパーティクルの尤度を求め、これを正規化した重みを求める(式(4))。

$$\pi_t^{(i)} = \frac{w_t^{(i)}}{\sum_{m=1}^M w_t^{(m)}} \quad (4)$$

各パーティクルの画像座標  $\mathbf{x}_t^{(m)}$  にそれぞれの重みを掛け、足し合わせたものをマーカの画像座標  $\mathbf{x}_t$  とする(式(5))。図 5 に算出したマーカ座標の例を示す。

$$\mathbf{x}_t = \sum_{m=1}^M \pi_t^{(m)} \mathbf{x}_t^{(m)} \quad (5)$$

座標算出後、重みに応じて各パーティクルの複製と削除を行う。重みの大きいパーティクルから複数個複製をし、重みの小さいパーティクルは削除する。一連の処理を繰り返すことでフレーム間の追跡を行っていく。

### 3.3 マーカ追跡失敗時の回復処理

本システムのマーカ追跡には事前に取得した色情報や前フレームの座標、速度を利用している。このため、マーカにオクルージョンが発生した場合や、各マーカの動きが速い場合、急に運動の様子が変わった場合などにマーカ追跡に誤りが出る可能性がある。

追跡失敗例を図 6 に示す。図 6(a) で左手のマーカを追跡していたパーティクルが速い動きに対応できず、図 6(b) で拡散している。次のフレームである図 6(c) では拡散したパーティクルが誤って右肩のマーカ周辺に集まってしまう。このようにパーティクルフィルタではある一時刻の誤りが、以後の追跡に影響する。そのため、誤りが発生した場合に正しい追跡に回復することが必要となる。

ここではひとつの部位にしか用いられていない色のマーカのパーティクルが誤追跡した場合の回復処理を述べる。式(3)で求めた正規化前の尤度の値は、各パーティクルの座標における色とあらかじめ取得しておいた色が類似しているほど大きくなる。そこで、一定の値以上の尤度を持ったパーティクルの数を調べる。一定数以下の場合、正しいマーカ追跡が行われ

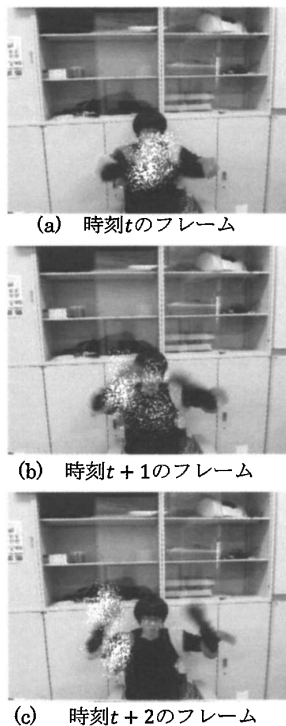


図 6. 追跡失敗例

ていないものとし、3.1の方法でマーカ領域を再設定する。このマーカ領域内に改めてパーティクルを発生させることで正しい追跡を行う。なお、この追跡回復処理では複数の部位に同色のマーカを使用した場合にパーティクルが他の部位を追跡してしまう誤追跡は回復できない。

#### 4. 3次元座標復元

##### 4.1 カメラキャリブレーション

###### 4.1.1 DLT法

2台のカメラから取得されたマーカの画像座標を、ステレオビジョン法により3次元座標に復元する。2次元画像座標 $(x, y)$ と3次元座標 $(X, Y, Z)$ は式(6),(7)の関係にある。

$$x = \frac{p_1 X + p_2 Y + p_3 Z + p_4}{p_9 X + p_{10} Y + p_{11} Z + 1} \quad (6)$$

$$y = \frac{p_5 X + p_6 Y + p_7 Z + p_8}{p_9 X + p_{10} Y + p_{11} Z + 1} \quad (7)$$

ここで $p_1 \sim p_{11}$ は焦点距離や空間中の位置、向きからなるカメラパラメータである。このカメラパラメータはカメラキャリブレーションによって求められる。本研究ではDLT(Direct Linear Transform)法によるカメラキャリブレーションを行う。

カメラパラメータ $\mathbf{p} = (p_1, \dots, p_{11})$ は11個の未知数からなっており、6点以上の3次元座標 $(X_i, Y_i, Z_i)$ と撮

影時に得られる2次元画像座標 $(u_i, v_i)$ から算出することができる(式(8))。

$$\mathbf{p} = (\mathbf{B}^T \mathbf{B})^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{x} \quad (8)$$

ここで、 $\mathbf{B}, \mathbf{x}$ は式(9),(10)のようになる。

$$\mathbf{B} = \begin{pmatrix} X_1 & Y_1 & Z_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -u_1 X_1 & -u_1 Y_1 & -u_1 Z_1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X_1 & Y_1 & Z_1 & 1 & -v_1 X_1 & -v_1 Y_1 & -v_1 Z_1 \\ X_2 & Y_2 & Z_2 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -u_2 X_2 & -u_2 Y_2 & -u_2 Z_2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X_2 & Y_2 & Z_2 & 1 & -v_2 X_2 & -v_2 Y_2 & -v_2 Z_2 \\ & & & & & & & & & & \vdots \end{pmatrix} \quad (9)$$

$$\mathbf{x} = \begin{pmatrix} u_1 \\ v_1 \\ u_2 \\ v_2 \\ \vdots \end{pmatrix} \quad (10)$$

なお、DLT法では一般に設定座標が多いほど精度が高くなる。

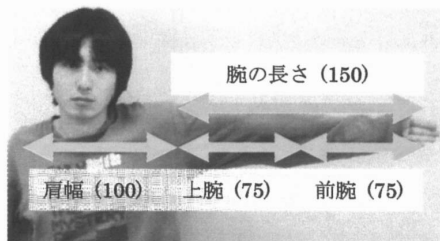
##### 4.1.2 キャリブレーション座標の取得

カメラキャリブレーションには様々な手法が提案されており、高い精度で3次元復元が行えることが確認されている。しかしカメラキャリブレーションには道具や煩雑な作業が必要となる場合が多い。一般ユーザの使用を考えると高精度な復元を行うより、妥当な復元精度を道具や機材、煩雑な作業を必要としない方法で行うことが望ましい。

本研究ではユーザが特定の姿勢をとることでカメラキャリブレーションを行う方法を提案する。この方法はマーカ以外の道具や機材、煩雑な作業が不要である。

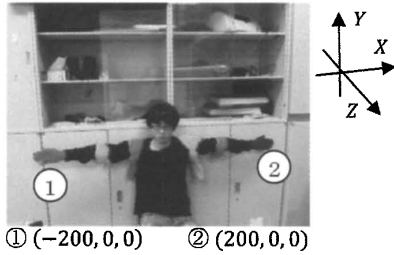
ここで腕全体、肩幅、上腕、前腕の長さの比に注目する(図7)。これらの比は個人差が表れにくく、汎用的なシステムに利用できると考えられる。本研究では、「日本人の人体計測データ」(社団法人 人間生活工学研究センター)を参考に、腕の長さとして150、肩幅の長さとして100、上腕の長さとして75、前腕の長さとして75とした。この長さから設定した相対的3次元座標をカメラキャリブレーションに利用する。

カメラキャリブレーション作業ではユーザは図8で示す4つの姿勢をとる。このときの両手のマーカ座標を取得する。

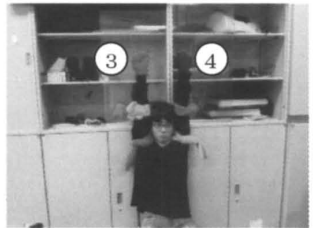


( )は設定した相対的長さ

図 7. 肩幅と腕の相対的長さ



(a) 姿勢 1



(b) 姿勢 2



(c) 姿勢 3



(d) 姿勢 4

図 8. 姿勢と 3 次元相対座標

図 8(a)に示す姿勢 1 は 3.1 の初期マーカ領域の設定と同じ姿勢であり、パーティクルを発生させマーカ座標を算出する。姿勢 1 撮影後、パーティクルフィルタによるマーカ追跡が始まる。ユーザは一定時間内に次の姿勢をとる。各姿勢の両手マーカの座標を取得することで計 8 点のキャリブレーション用設定 3 次元座標と画像座標を用意する。

#### 4.2 3 次元座標の復元

アバターの動作制御時には各カメラのマーカ座標から 3 次元座標を復元する。3 次元復元時にはカメラキャリブレーションによって求められたカメラパラメータを使用する。両カメラのマーカ座標  $(x, y), (x', y')$  とカメラパラメータ  $p, p'$  から 3 次元座標  $X = (X, Y, Z)$  を算出する方法を式(11)に示す。

$$X = (S^T S)^{-1} S^T q \quad (11)$$

ここで、 $S, q$  はそれぞれ式(12), (13)である。

$$S = \begin{pmatrix} p_9 x - p_1 & p_{10} x - p_2 & p_{11} x - p_3 \\ p_9 y - p_5 & p_{10} y - p_6 & p_{11} y - p_7 \\ p'_9 x' - p'_1 & p'_{10} x' - p'_2 & p'_{11} x' - p'_3 \\ p'_9 y' - p'_5 & p'_{10} y' - p'_6 & p'_{11} y' - p'_7 \end{pmatrix} \quad (12)$$

$$q = \begin{pmatrix} p_4 - x \\ p_8 - y \\ p'_4 - x' \\ p'_8 - y' \end{pmatrix} \quad (13)$$

#### 5. アバターの動作マッピング

取得されたマーカの 3 次元座標を用いて 3D アバターの姿勢を設定する。本研究で使用したアバターを図 9 に示す。

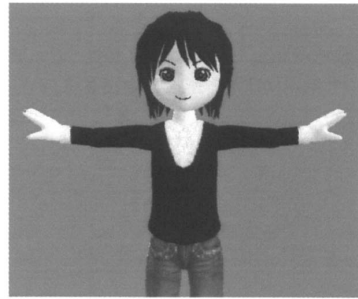


図 9. 使用した 3D アバター

3D アバターの腕姿勢を設定する際に上腕、前腕のそれぞれを回転させるための回転軸ベクトルと角度を求める。

まず、上腕の姿勢を設定する。上腕の姿勢は肩と肘のマーカ座標を用いて設定する。図 10 のように腕を横に広げた姿勢を回転前の姿勢とし、そのときの腕ベクトルを  $a$  とおく。ユーザ姿勢の上腕ベクトル  $b$  は肩、肘それぞれのマーカの 3 次元座標  $X_s, X_e$  から式(14)で求める。

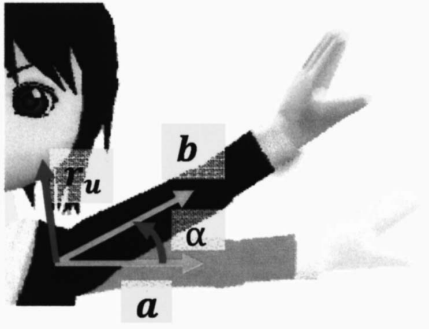
$$b = X_e - X_s \quad (14)$$

この  $a, b$  それぞれのベクトルから上腕の回転軸ベクトル  $r_u$  と回転角  $\alpha$  を算出する。上腕の回転軸ベクトル  $r_u$  と回転角  $\alpha$  は図 10 のようになり、それぞれ式(15), (16)のように求めることができる。

$$r_u = a \times b \quad (15)$$

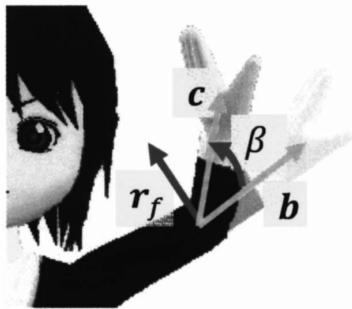
$$\alpha = \arccos \frac{a \cdot b}{|a||b|} \quad (16)$$





$a$ : 回転前上腕ベクトル  $b$ : 算出した上腕ベクトル  
 $\alpha$ : 回転角  $r_u$ : 回転軸ベクトル

図 10. 上腕の回転軸ベクトルと回転角



$b$ : 回転前前腕ベクトル  $c$ : 算出した前腕ベクトル  
 $\beta$ : 回転角  $r_f$ : 回転軸ベクトル

図 11. 前腕の回転軸ベクトルと回転角

次に、前腕の姿勢設定を行う。前腕は上腕を親としており、回転前の前腕ベクトルは式(14)で求めた上腕ベクトルと一致する。また、ユーザ姿勢の前腕ベクトル  $c$  は肘、手それぞれのマーカの 3 次元座標  $X_e, X_h$  から式(17)で求める。

$$c = X_h - X_e \quad (17)$$

この  $b, c$  それぞれのベクトルから前腕の回転軸ベクトル  $r_f$  と回転角  $\beta$  を算出する。前腕の回転軸ベクトル  $r_f$  と回転角  $\beta$  は図 11 のようになり、それぞれ式(18), (19)のように求めることができる。

$$r_f = b \times c \quad (18)$$

$$\beta = \arccos \frac{b \cdot c}{|b||c|} \quad (19)$$

以上の方法で左右両腕の姿勢を決定する。毎フレーム姿勢を決定することで 3D アバターの動作を描画する。

## 6. 実験と評価

### 6.1 マーカ追跡実験

パーティクルフィルタを利用したマーカ追跡の精度を検証するため実験を行った。ユーザには両手の



図 12. マーカ装着例

肩・肘・手に 4 色のマーカを装着した(図 12)。両手には赤、青の軍手を装着した。両手は運動量が多く、速度も速いため追跡を誤りやすいと考え、他の部位に使われていない色を使用した。右肩と左肘、右肘と左肩にはそれぞれピンク、黄緑のタオルをマーカとして装着した。マーカの色を交互にすることで同色マーカの接近を少なくし、誤追跡が起りにくくするためである。

まず、腕の交差やオクルージョンが発生せず、比較的ゆっくりとした動作の追跡を行った。パーティクルはマーカごとに 1500 個発生させ、式(3)の尤度の計算は  $\sigma = 30$  とした。両手マーカの追跡失敗時のみ 3.3 の回復処理を行った。図 13 はマーカ追跡実験時の様子である。各マーカとも正しく追跡できることが確認できた。

次に素早い動きやオクルージョンが発生した際の回復処理を実験した(図 14)。図 14(a)の回復処理を行わないときは左手のマーカが追跡できていないが、図 14(b)の回復処理を行う場合はマーカを追跡できている。ブラーやオクルージョンにより色情報が取得しにくく、一時的にパーティクルは不安定になるが、全体として追跡が可能であることを確認した。

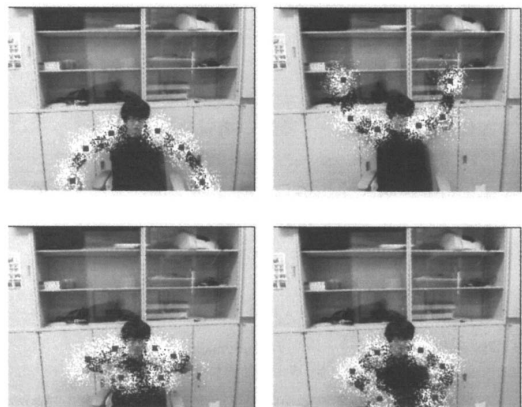
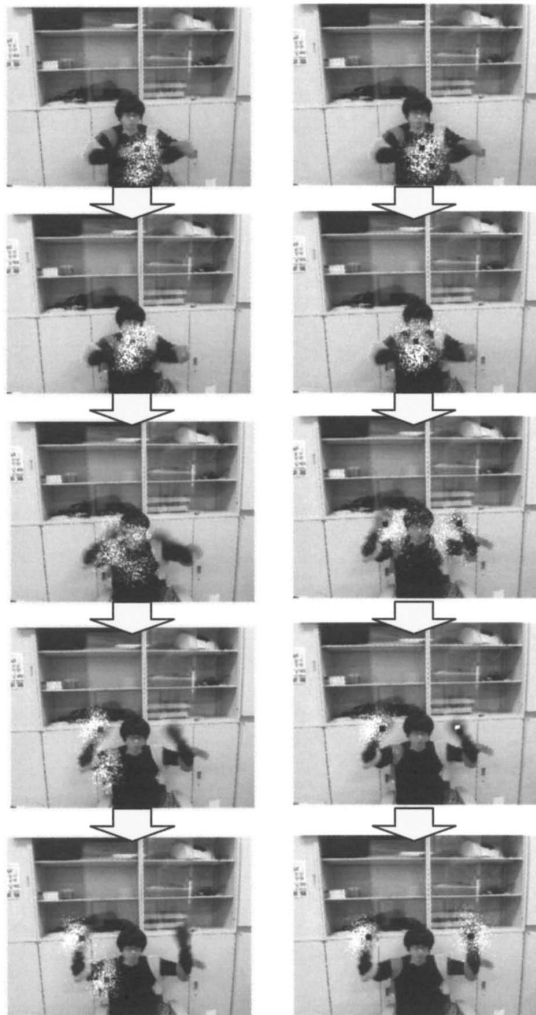


図 13. マーカの追跡実験



(a) 回復処理なし (b) 回復処理あり

図 14. 回復処理の検証

## 6.2 3次元復元精度の検証

3次元座標復元に用いる DLT 法やステレオビジョン法は従来から利用され、効果を実証された手法である。しかし、本研究の安価なカメラによる撮影や簡易なカメラキャリブレーション作業において、満足いく精度であるか検証する必要がある。そこでカメラキャリブレーションを行い得られたカメラパラメータを利用した 3次元座標復元の実験を行った。

本研究ではカメラキャリブレーションを行う際に相対的な 3次元座標を用い、3D アバターの姿勢は移動前の上腕・前腕ベクトルと復元 3次元座標から求めた上腕・前腕ベクトルとの角度を算出することで決定する。そこで実験では 3つの 3次元座標を復元し、

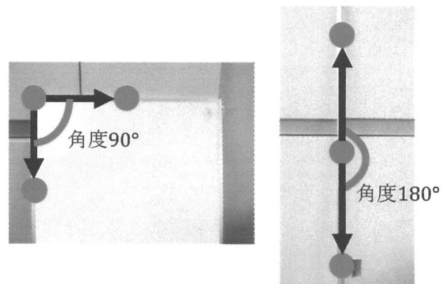


図 15. 復元角度

得られた 2つのベクトルの角度を算出した。図 15 に用いた道具と復元箇所、ベクトル間の角度を示す。復元後の理想角度は  $90^\circ$  と  $180^\circ$  である。算出した角度の平均誤差はそれぞれ  $3.22^\circ$ 、 $4.35^\circ$  となった。これは違和感の少ない姿勢復元が行える精度と考えられる。

## 6.3 アバター動作マッピングの実験

システム全体の処理を行いアバターへの動作マッピングを行った。ユーザの動作はゆっくりとした動作とし、リアルタイムでアバターに動作をマッピングする。装着マークは 6.1 と同じとする。ユーザの姿勢とアバターの姿勢を図 16 に示す。アバターの姿勢はおおむねユーザの姿勢を復元しているといえる。高精度とは言い難いが個人利用を想定しているシステムの精度として十分であると考えられる。

## 7. おわりに

本研究では、個人利用可能なモーションキャプチャシステムを提案した。モーションキャプチャは大規模な装置や広い空間、高いコスト、煩雑な作業などが必要となり一般ユーザが容易に扱えるものではない。このシステムでは撮影カメラやマークに簡易的なものを利用し、カメラキャリブレーションをユーザが特定の姿勢をとることで行う方法にした。精度検証では一般ユーザが利用するうえで十分な精度であることを確認した。

今後の課題として、マーク追跡の改良が挙げられる。本研究では、マーク追跡時の回復処理は 1 つしか使っていないマークを対象とした。そのため、同色を複数利用したマークが追跡を誤った場合、回復することはできない。同色マークの追跡失敗時の回復処理について検討していく。また、本システムのコンテンツへの利用を検討し、その有用性も検証していく。

## 参考文献

- [1] 岡田隆三, シュテンガーピオン, 池司, 近藤伸宏, “マークレスモーションキャプチャによる仮想ファッションショー”, 電子情報通信学会技術研究報告, PRMU2004-215, pp.19-24, 2005

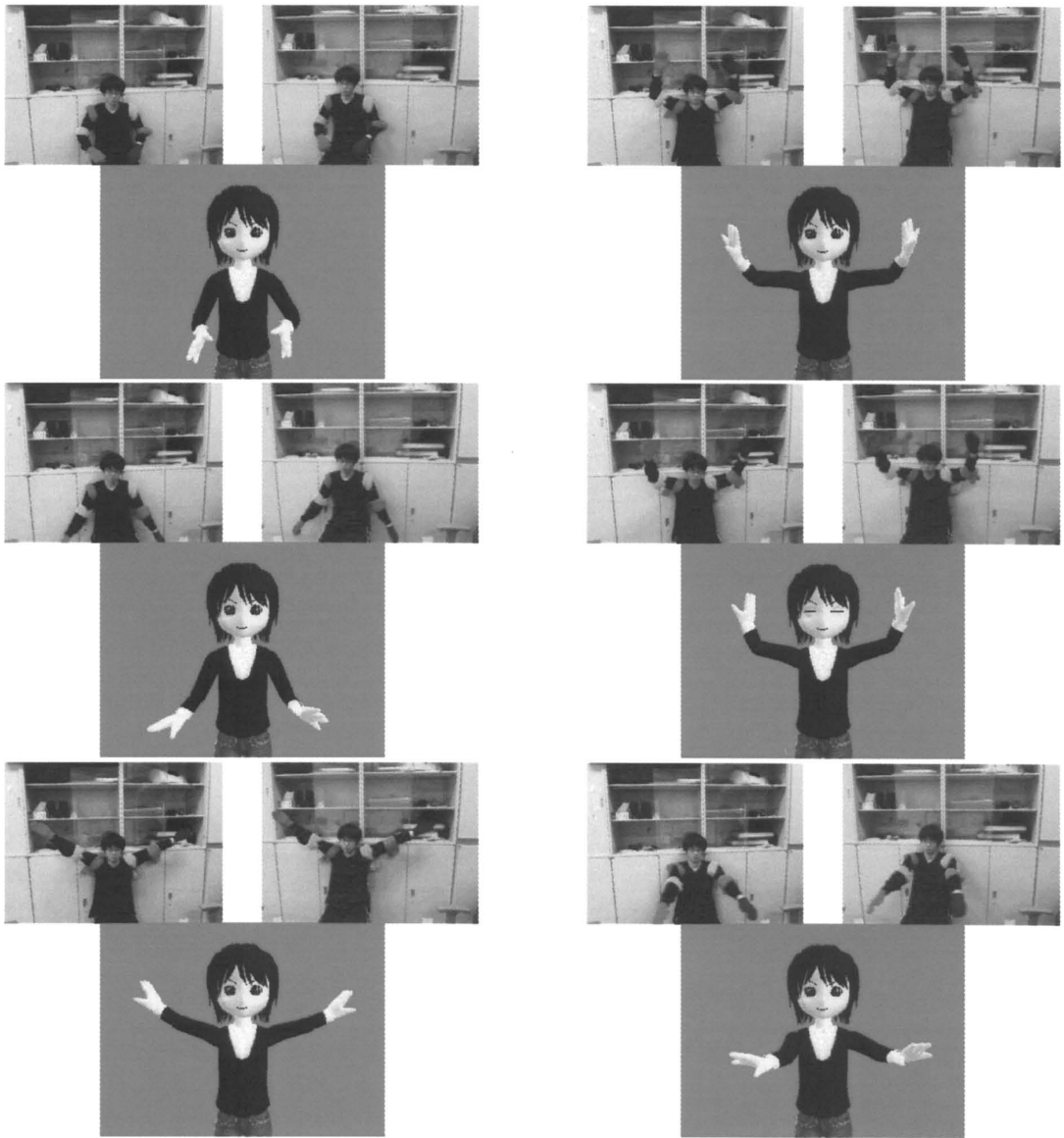


図 16. ユーザ姿勢とアバター姿勢

[2] 平尾公男, 中澤篤志, 清川清, 竹村治雄 “単眼カメラとモーションキャプチャデータによる両腕の姿勢推定”, ヒューマンインタフェースシンポジウム講演論文集, pp. 1159-1164, 2004

[3] 米元聡, 有田大作, 谷口倫一郎, “多視点動画画像処理による実時間全身モーションキャプチャシステム”, 映像情報メディア学会誌, Vol.54, No.3, pp. 409-416, 2000

[4] 八村広三郎, “モーションキャプチャによる舞踏のデジタルアーカイブ”, 情報処理学会研究報告, 2007-CVIM-157-(1), pp. 1-8, 2007

[5] 樋口知之: “粒子フィルタ”, 電子情報通信学会誌, Vol.88, No. 12, pp. 989-994, 2005