

点光源群を用いた人体の モーションキャプチャシステムの実験

宮内 宏*・浅野 智志**・網本晋太郎**・島田 恭宏**
塩野 充**

*岡山理科大学大学院工学研究科情報工学専攻

**岡山理科大学工学部情報工学科

(1998年10月5日 受理)

1 まえがき

近年、コンピュータの急速な発展により複雑な画像処理が可能になってきた。一昔前のコンピュータでは不可能に近かった3次元CG処理も現在のコンピュータでは容易に実行できるようになった。また、グラフィックワークステーション並の高度な3次元CG機能を有したゲーム機の登場により、アニメーションやゲーム機にCGが多用されるようになり、人間の動きをコンピュータで生成する必要性が高まってきたが、人間の動きをコンピュータで計算的に生成することは非常に難しい。ロボットのような多関節の物体の動きですら、まだまだ滑らかとはいえないギクシャクした表現である。まして、人間のように筋肉まで付いていて複雑な動きをする物体のシミュレーションは、簡単に解決できる問題ではない。そこで、コンピュータ内部で人間の動作データを生成する代わりに、実際の人間の動きからデータを取るために作り出された装置がモーションキャプチャである。モーションキャプチャを簡単に説明すると、人間の動作や顔の表情変化の3次元データをコンピュータに自動的かつ正確にコンピュータに入力するシステムであり、磁気式センサ、光学式センサ、機械式センサを用いて動作の抽出を行なっている。このモーションキャプチャのおかげで従来のCGにとっての課題であった正確な動作データが手軽に入手可能になり、人間や動物が出演するシーンの映像の質の大幅な向上が実現した。現在、映画作成はもとより、CGゲーム、CFやアニメーションでの動きのデータ生成用に欠かせないものとなり頻繁に使われている。

しかし、モーションキャプチャにも一長一短がある。それは大掛かりな設備と高価な機材が必要なところである。アニメーションプロダクション、映画プロダクション、ゲームプロダクションなどはモーションキャプチャを所持するのは可能かもしれないが、個人レベルでモーションキャプチャを購入するのは難しい価格になっており、モーションキャプチャが個人レベルに普及できるような価格になるにはまだまだ時間がかかるであろう。そこで本研究では、センサの代わりに身近で安価な豆電球を色分けして体に装着し、豆電球

の点光源を追跡することにより人体の動きをデータ入力できる簡易で安価なモーションキャプチャを製作した。

2 従来のモーションキャプチャ

モーションキャプチャには磁気式センサ、光学式センサ、機械式センサを用いる方法があるが、その中でも一般的に使われている磁気式センサ、光学式センサを用いた方法について説明する²⁾。

1. 磁気式モーションキャプチャ：被験者の身体に、多数の磁気装置を取り付け（各磁気装置の位置は、センサーの場の中であれば自由に決めることができる）、各装置が発する磁気パルスによりモーションキャプチャする。
2. 光学式モーションキャプチャ：被験者の身体に、多数の反射標識を取り付け（被験者の反射標識の位置は、反射した光を記録する複数のカメラのネットワークによって決められる）、標識の反射材で反射した光を受けてモーションキャプチャする。

これら2つの方法はそれぞれ長所と短所を持っており、磁気的な方法では命綱のような一組みのケーブルを被験者に取り付ける必要があるが、被験者がどのような姿勢であってもパルスを発し続けるため動きに制限がない。光学的な方法では、ケーブルの必要がなく被験者の動きはかなり自由になるが、被験者の姿勢によっては、反射標識のいくつかが陰になりカメラの視野から外れてしまいモーションキャプチャできない場合がある。

3 点光源群を用いたモーションキャプチャの原理

3.1 処理手順

本研究におけるモーションキャプチャシステムの流れを図1に示す。まず、人体の各関節部や頭部などに色分けした豆電球を取り付け(図2)、暗室で1台のカメラを用いて正面、左側面、右側面から同じ動きを撮影する。次に撮影した画像の1フレーム目を曲率を用いて閾値を決定し、2値化²⁾する。そして、その画像に対しラベリング³⁾を行い、豆電球の光源と思われる物体から重心を求め人体の関節座標とし、色情報および位置情報から関節座標と人体の各関節との対応づけを行う。2フレーム目以降は関節座標を追跡⁴⁾することにより、各関節と豆電球の対応づけとする。1フレーム目の正面画像の各関節座標間の長さを各部位の大きさの基本サイズ、その座標を基本座標とし、人体モデル(図3)を作成する。正面画像の各関節座標をもとに左右の移動角度を計算し、座標間の長さから前後の移動角度を計算する。両側面画像からの各関節座標の前後の動きのグラフと正面画像の各関節座標間の長さのグラフから正面画像と両側面画像の同期をとり、得られた移動角度をもとに人体モデルを動かしアニメーションさせる。

3.2 画像入力

豆電球を装着し、暗室にて1台のカメラを用いてある動作を正面、左側面、右側面の計

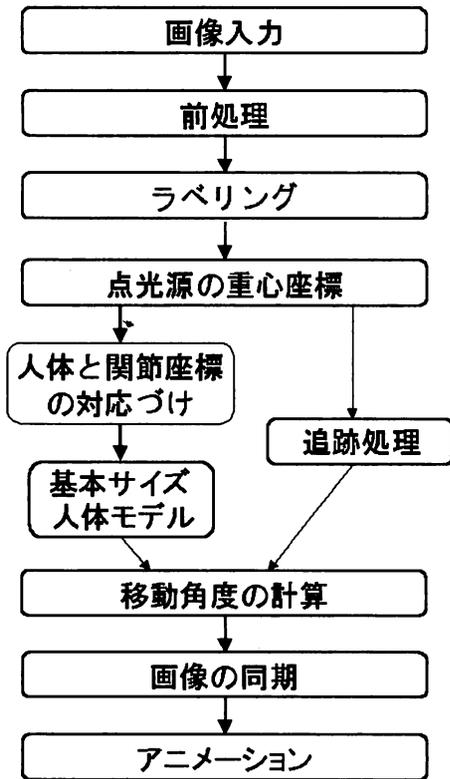


図1 本方式の処理の流れ

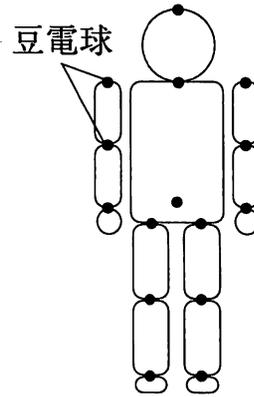


図2 豆電球の装着位置

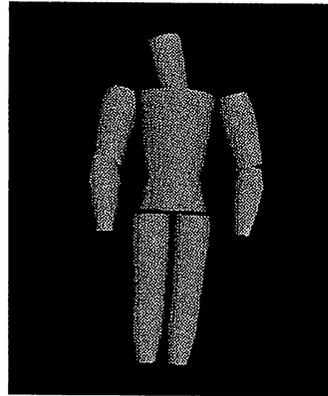


図3 人体モデル

3回撮影する。撮影した画像を秒間20フレームでコンピュータに取り込む。この際3度同じ動作を行なう必要があるが、後述の同期法によりある程度同じ動作であれば同期が可能のため、正確に同じ動作を行なう必要はない。

3.3 前処理

前処理として、画像を2値化し雑音除去⁵⁾を行なう。本研究では以下の方法を用いて適切な2値化画像を得る。まず、 R, G, B 表色系で入力された画像を H, S, I 表色系⁶⁾に変換する。実験に用いる画像は暗室にて撮影を行うため、豆電球以外(背景)は黒に近い色である。それ故、 I (輝度) の値は豆電球の部分では、高い数値を示し、豆電球以外(背景)については0に近い数値を示す。その性質を利用し、2値化のための閾値を曲率を用いて計算する。具体的には以下の方法で行なう。まず、 I (輝度値) に対するヒストグラムを求め、ヒストグラムの最大値より曲率を計算していくと、図4の T の位置で曲率が最大となる。そのときの値を閾値として、画像の2値化を行なう。また、2値化画像に対し、雑音除去を行ない次節で述べるラベリング処理を高速化する。

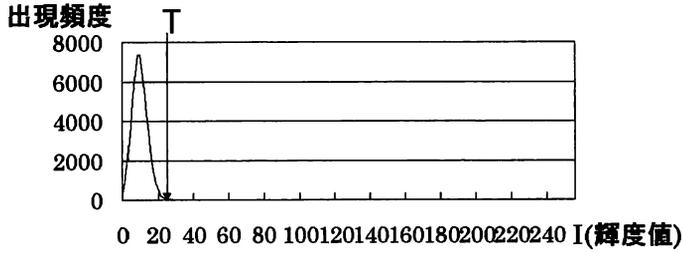


図4 I (輝度値) に対するヒストグラム

3.4 ラベリング

2値化, 雑音除去処理を行った画像に対してラベリング処理を行い, 個々の物体に番号を付けていく。原画像は2値化, 雑音除去を行った時点で数個の豆電球の点光源であると思われる物体と雑音除去で除去できなかった雑音物体を含んだ画像になっている。ラベル付けされた物体の面積計算を行い, ある閾値を越えているならば, その物体は豆電球候補とし, 閾値以下であれば雑音とみなし, その物体を除去する。

3.5 点光源の重心座標

ラベリングなどの処理により, 画像中には数個のラベル付けされた物体のみになっている。ラベル付けされた物体の重心を関節座標として, 今後処理を進めていく。重心の座標は以下の式より求まる。

$$\text{重心}(x, y) = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n-1} x_i, \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n-1} y_i \right) \quad (i=1, 2, 3, \dots, n-1) \quad (1)$$

関節座標を求める際, 次のような場合は特別な処理を施す。(図5を参照)。

1. 豆電球候補である物体が重なった場合
2. 豆電球候補である物体の距離が離れている場合

1の場合は, 図5の上段のような状態であり, 2つの豆電球候補間の距離が近く, 豆電球同士が重なる部分が現れてしまった状態であり, 2つの豆電球候補から1つの重心を求めてしまうため関節座標の数が合わず, 後に述べる追跡処理が正しく行われぬ。そこで, 以下の処理を行い, 重心を正しく求める。

まず, 2つの豆電球候補を含む小領域を切り出し, その領域における色相のヒストグラムを求める。2つの豆電球候補の色は異なっており, ヒストグラムはある値で2つに分けられると考えられる。そこで, ヒストグラムをもとに判別分析法⁷⁾を用いてヒストグラムを2つに区切る。2つに区切られた領域の前後で出現頻度の最も高い値を各豆電球候補の色相であるとし, その色相をもとに個々の豆電球候補を色成分で抽出し, 面積を求め, 重心を得る。これにより, 豆電球候補が重なってしまった場合でも正しい豆電球候補の個数分の重心が求められ, 次節以降の処理が正確に行われる。図6は色相のヒストグラムであり,

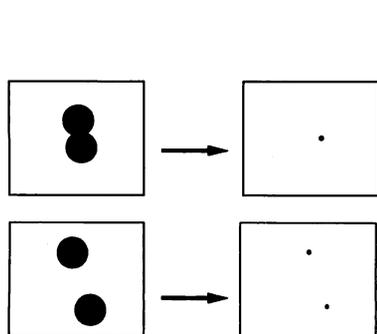


図5 豆電球の重なり

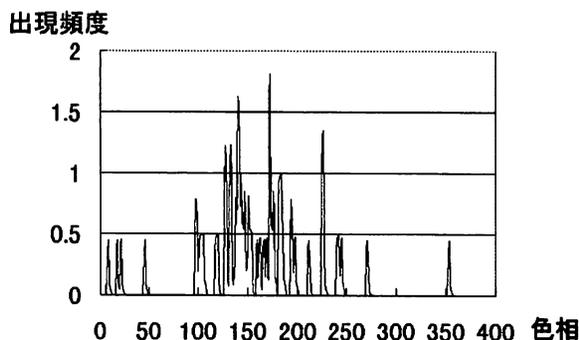


図6 色相のヒストグラム

判別分析法で求めた閾値は159であり、豆電球の色相(出現頻度の高い値)は140(黄), 172(緑)である。

2の場合は正しい豆電球候補の個数分の重心が求められ、問題なく処理が行われる。

3.6 人体と関節座標の対応づけ

得られた関節座標が人体の関節のどの位置の豆電球であるかを決定する必要がある。各関節ごとに異なった色を着色した豆電球を使用しているが、各フレームごとに色情報は変化するため、1フレーム目の画像に対し、位置情報、色情報をもとに人体の各関節との対応づけを行い、2フレーム目以降は関節座標を追跡することにより対応づけとし、色情報は補助的に用いる。また、正面画像と両側面画像の関節座標も色情報と位置情報により対応づける。

3.7 基本サイズと人体モデル

正面画像の1フレーム目の各関節座標間の長さを各部位の大きさの基本サイズとし、その時の座標を基本座標とする。また、基本サイズで各部位を構成した人型モデルを人体モデルとし、以後人体モデルを動作させることによりアニメーションを行う。

3.8 関節座標の追跡

3.6節で述べたように、関節座標を人体の各関節と色で対応させていく方法では、着色した豆電球の色が微妙に変化しただけでも判別ミスを起こす場合がある。そこで、1フレーム目で人体と各関節座標を対応させ、対応させた各関節座標を次の画像に対して随時追跡していくことにより、各関節座標と人体に装着した豆電球との対応づけとする。

追跡の手法については、以下の手法を用いた。

- (1) 各フレームにおける各関節座標の移動ベクトルを求める。
- (2) 移動ベクトルをもとに移動範囲の予測をする。
- (3) 移動範囲内に2つ以上の座標が含まれる場合のみ色情報を用いる。

(1): n フレーム目の座標を (x_n, y_n) とすると、各関節座標の n フレーム目の移動ベクトル \vec{v}_n は以下の式で求めることができる。

$$\vec{v}_n = (x_n - x_{n-1}, y_n - y_{n-1}) \quad (2)$$

(2): 1, 2フレーム前のベクトルをもとに移動範囲の予測をする。例えば2フレーム前の座標が(0, 0), 1フレーム前の座標が(1, 1)であれば, 現在のフレームにおける座標は(2, 2)近辺と予測される。その座標周辺(10×10 pixel)を調べ, 座標点を見つけ出す。これは単純な方法であるが, 入力画像は秒間20コマで入力してあるため, 1フレームでの動きは微小なものである。それ故この手法で十分に確実な追跡を行うことができると考えられる。

(3): 予測移動範囲内に1つの座標点であればその座標点が追跡座標点であると決定するが, 予測移動範囲内に2つ以上の座標点が含まれている場合にどの座標点を追跡座標点であるかを判定する判定基準が必要になる。本研究では豆電球を色分けして体に装着しているため(上半身8色, 下半身7色), 追跡元の座標点の色(H の値)と移動範囲内の色(H の値)を比較し, 色のより近い座標点を追跡座標点であると決定する。

3.9 移動角度の計算

本方式のモーションキャプチャは, 豆電球を装着した人間がどの程度動いたかを表すのに角度を用いる。各関節座標から角度を計算し, 角度分だけ体モデルを動かすことにより行う。そのため, 前後の移動角度, 左右の移動角度を求める。

3.9.1 左右の角度計算

正面画像の各関節座標から各部位の左右の移動角度を計算する。まず, 人体の各部位がどの座標点を軸に回転を行なうかを決定する。本研究では, 図7に示す座標点を各部位の回転軸とし, 以下の計算により左右の移動角度を計算する。図8の白い丸が基本座標, 黒い丸が現在の座標である。例えば, 上腕部であれば肩の座標を軸に回転するため, 肩の基本座標と現在の肩の座標をアフィン変換⁹⁾により, 一致させる。次に一致させた肩の座標(図8中のA), 肘の現在の座標(図8中のB)の2つの点を結んだ直線(図8中のc), 一致させた肩の座標(図8中のA)と肘の基本座標(図8中のC)を結んだ直線(図8中のb)とのなす角が肩の移動角度であり, 図8中の線分a, b, cを用いて式(3)の余弦定理より角が求められる。

$$\cos \theta_2 = \frac{b^2 + c^2 + a^2}{2bc} \quad (3)$$

3.9.2 前後の角度計算

正面画像の各関節座標から各部位の前後の移動角度を計算する。前後の移動角度であるが, 1台のカメラで同じ動きを正面, 左側面, 右側面から撮影するため, 正面画像と両側面画像の同期がとれず, 各関節座標の正確なZ軸方向の座標が求められない。そこで, 正面画像で決定した各部位の基本サイズと各関節座標の長さ(図9参照)を用いて前後

名称 軸座標

頭部 2

胴体部 9

右上腕部 3

左上腕部 4

右前腕部 5

左前腕部 6

右大腿部 10

左大腿部 11

右下腿部 12

左下腿部 13

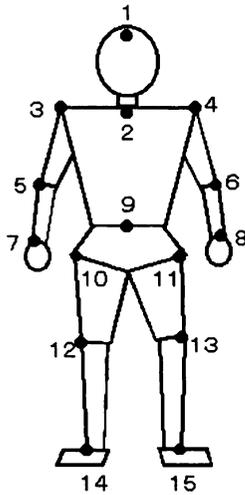


図7 回転軸

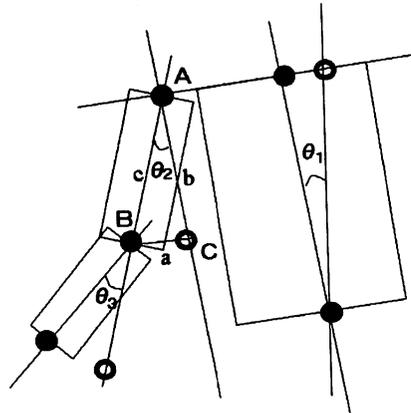


図8 左右の移動角度計算

の移動角度を求める。例えば、肩の部位の場合、肩の基本サイズ（図9中の a ）および肩の座標と肘の座標の2つの点を結んだ直線（図9中の b ）の長さから $\cos \theta$ により移動角度を求めることができる。しかし、移動角度だけでは前後の動きの判別ができない。そこで、前後の動きを調べる必要があるがそれについては次節で述べる。

3.10 画像の同期

1台のカメラを用いて正面、左側面、右側面を撮影するため、同じ動きを3度行う必要がある。しかし、同じ動きを全く同じ時間で完了するのは不可能である。そこで、3種類の画像の同期をとるが、本手法では正面画像より、前後左右の全ての動きを求めているため、普通に画像の同期をとるのではなく、両側面画像から前に動いているフレーム区間、後ろに動いているフレーム区間を見つけ、正面画像の前後の動き区間と対応づけを行えばよい。以下に具体的な方法を説明する。

両側面画像の全フレームにおける各座標の前後の動き（図10は右側面画像の手首座標の前後の動き）と正面画像の各部位の関節座標間の長さを求める（図11は上腕部の長さの変化量）。次に図10の山の頂点（各部位が前後に交差する点）、図11のグラフの基準点（各部位が前後に交差する点）を対応させ（図12参照）、各部位が前に動いている区間、後ろに動いている区間を求める。

3.11 アニメーション

アニメーションは人体モデルを各部位の移動角度分だけ動かすことにより行う。

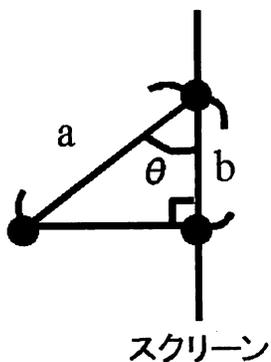


図9 前後の移動角度計算

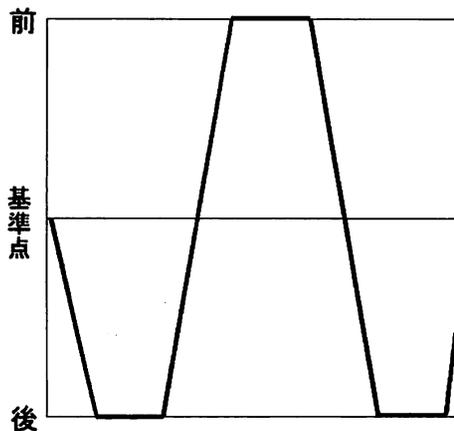


図10 手首座標の前後の動き (右側面)

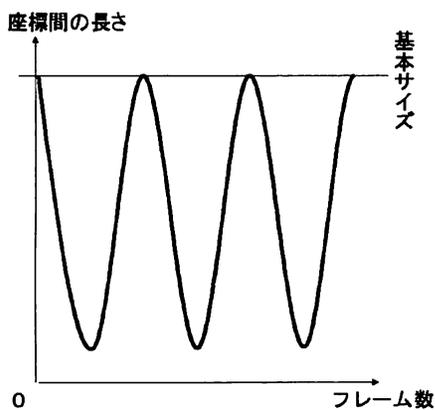


図11 上腕部の長さの変化量

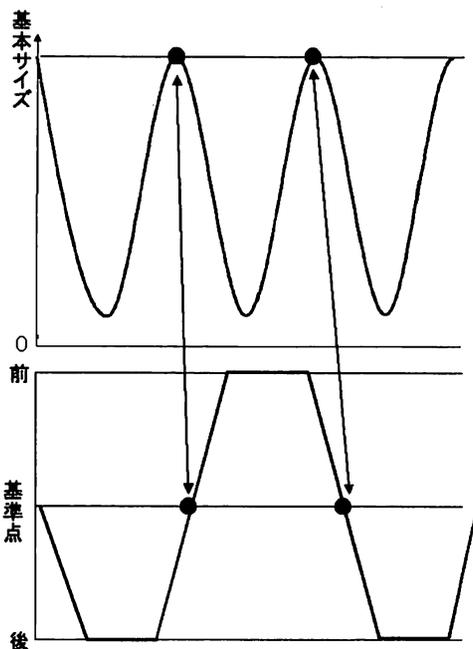


図12 同期

4 実験結果

実験は、デジタルビデオカメラで撮影した画像をパソコンのキャプチャーボードで秒間20コマで入力し、パソコン (Pentium, 166MHz) で処理を行った。C言語を使用し、画像サイズは320×240 pixel である。撮影は暗室で行ったが、その際普通に豆電球を撮影したのでは色の判別が困難であったため、ピントをずらしぼやけた画像にした。以上に述べた処理手順に従い処理した結果を図13に示す。

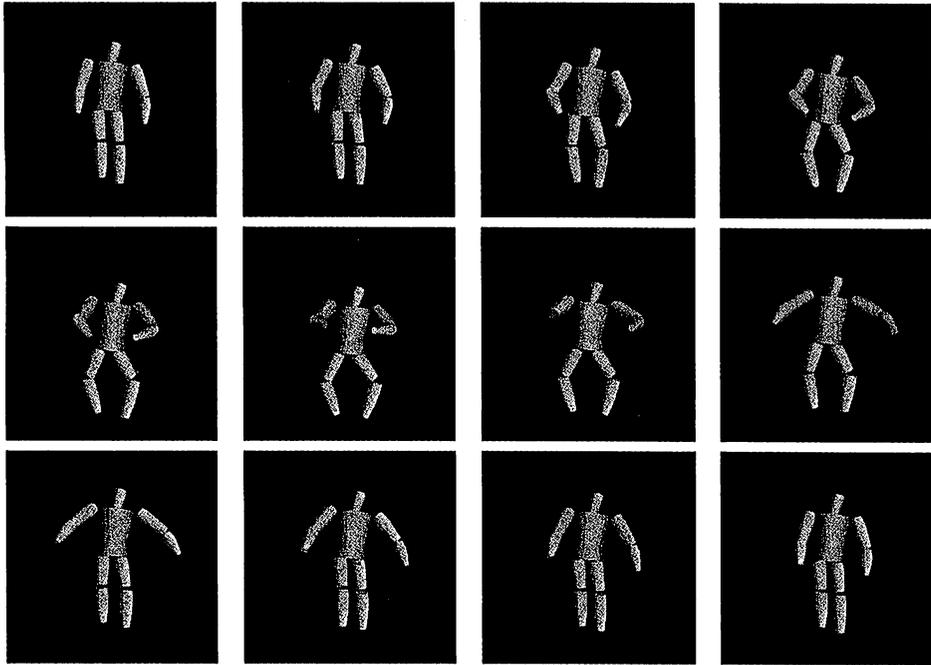


図13 実験結果

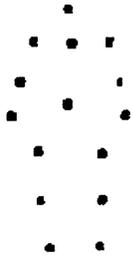


図14 2値化画像

4.1 2値化

画像を2値化する際、閾値を動的に決定する必要があるが、動的2値化法にも多くの種類があり、どの手法を適用するかで結果が大きく変わってくる。本研究では暗い部屋で豆電球を撮影するため豆電球以外の背景は黒である。それを利用し適切な閾値を決定する方法として曲率を用いた。曲率を用いた方法は豆電球以外が黒という性質を最大

限に利用した最も適切な方法ではないと思われる。実際処理結果の図14を見ればわかるように、うまく豆電球だけを抽出することができている。

4.2 関節座標の取得

3.5節で述べたように豆電球が重なった場合、本手法では判別分析法を適用して2つの豆電球の閾値を求め2つの重心を求めている。色を着色した豆電球を装着しているため、この方法が最適であった。実際、正面画像の場合はこの2つの豆電球が重なる場合は無かったが、側面から見た場合は直立の状態であっても豆電球が重なる。そこで側面画像を撮影する際に豆電球の色は同系色の物をできるだけ離し装着している。

4.3 追跡結果

画像を秒間20フレームで取り込んでいるため、1フレームで関節座標が動く距離は微小

なものである、それ故今回適用した単純な追跡法で十分な結果を得ることができた。

4.4 画像の同期

本研究では1台のカメラを用いてモーションキャプチャの製作を行っているため、3方向から撮影する画像の同期をとる必要がある。本手法では正面画像を基本にし、関節座標間の長さから前後の動きを計算しているため、完全な同期をとるのではなく、正面画像の前に動いている区間、後ろに動いている区間を求め、正面画像に適用する方法をとっている。この方法では、座標間の距離により前後の動きを求めるため、座標間の距離の長さが実際の動きに影響してくる。そのため、カメラと被験者の距離をできるかぎり近づけ(ズームアップ)て撮影をおこなうのが最適であると思われる。カメラと被験者の距離が近い程2つの座標間の pixel が多くなり、細かな動きが再現できる。

4.5 人体モデル

図14は実際に処理を行なった画像であり、この結果は、平泳ぎの様な動作を立ったままの姿勢で行ない、本手法でモーションキャプチャを行ない、人体モデルを動作させ、連続的に示した物である。結果を見ればわかるように、正しく動作の抽出を行なうことができる。

5 む す び

本稿では、点光源群を用いたモーションキャプチャについて説明し、実験結果を示した。本手法の特徴として以下に記すような点が挙げられる。

- ・センサの代わりに安価な豆電球を使用している。
- ・正面、両側面から撮影し、画像を同期させるためカメラが1台でよい。
- ・着色した豆電球の点光源から関節座標を取得するが、人体と関節座標の対応づけを色だけに頼らずフレーム間で座標を追跡することにより、良好な動作の抽出結果が得られた。

また、今後の課題としては、

- ・各部位を回転させ、豆電球が隠れた場合の対処。
- ・現段階では楕円を結合した簡単な部位であるが、各部位をより人間らしくする。
- ・正面、両側面の画像を同期させ動作の抽出を行なっているが、正面画像のみから動作の抽出を可能にする。

などの点が考えられる。

参 考 文 献

- 1) 中嶋政之, 山本正信: "グラフィックスとビジョン—デジタル映像処理—", オーム社 (1996).
- 2) 長尾 真: "パターン情報処理", コロナ社 (1983).
- 3) 谷尻豊寿: "最新画像処理入門", 技術評論社 (1996).
- 4) 長尾 真: "デジタル画像処理", 近代科学社 (1978).
- 5) 画像処理ハンドブック編集委員会: "画像処理ハンドブック", 昭晃堂 (1987).

- 6) 八木伸行, 井上誠喜, 林 正樹, 中須英輔, 三谷公二, 奥井誠人, 鈴木正一, 金次保明: "C言語で学ぶ実践画像処理", オーム社 (1992).
- 7) 森 俊二, 坂倉柊子: "画像認識の基礎 [I] — 前処理と形の特徴抽出 —", オーム社 (1986).
- 8) 日本図学会: "CGハンドブック", 森北出版 (1989).

An Experiment on Motion Capture System using Point Light Sources

Hiroshi MIYAUCHI*, Satoshi ASANO**, Shintaro AMIMOTO**
Yasuhiro SHIMADA** and Mitsuru SHIONO**

**Graduate school,*

Okayama University of Science,

Ridai-cho 1-1, Okayama 700-0005 Japan

***Department of Information & Computer Engineering,*

Faculty of Engineering,

Okayama University of Science,

Ridai-cho 1-1, Okayama 700-0005 Japan

(Received October 5, 1998)

In this report, a low cost human motion capture system using point light sources is proposed. In the field of recent computer graphics, the needs of getting the three dimensional motion of a human body along the time coordinate t in much increased. Precise (x, y, z, t) coordinates values are necessary for making precise human body motion in computer graphics. The system for getting human body motions is called a motion capture system. As the general motion capture systems using various kinds of sensors (magnetic, optical, mechanical and so on) are very expensive, the development of low cost motion capture system is expected. Since our motion capture system is made using only point light sources (colored midget lamps) and TV camera, it can be constructed with very low cost. As the experimental result, good performance can be obtained.