

仮想空間内における人の動作の融合手法に関する基礎研究

社領 一将*¹ 小牧 大輔*¹ 石井 裕剛*¹ 下田 宏*¹ 吉川 榮和*¹

A Basic Study on Mixing Method of Human Body Motion in Virtual Environment

Kazumasa Sharyo*¹ Daisuke Komaki*¹ Hirotake Ishii*¹ Hiroshi Shimoda*¹ and Hidekazu Yoshikawa*¹

Abstract - A new method is proposed to synthesize various kind of natural human body motion in virtual environment. The method is mixing two human body motion to synthesize a composite human body motion according to "weight average" of each joint. The authors have researched how to decide the weight average to synthesize a 'natural' human body motion. Firstly, a Human Motion Mixing Tool (HMMT) has been developed with which a user can decide the weight average via Graphical User Interface. Secondly, some experiments are conducted to examine how the users decide the weight average by using the HMMT. In this paper, the configuration of the HMMT and the result of the experiments are described.

Keywords : Human Motion, Virtual Environment, Computer Graphics, Motion Capture

1. はじめに

近年、コンピュータグラフィックス (CG) の技術は飛躍的に発展し、我々の身近なものとなった。例えば、先日発売され話題を呼んだPlayStation2では写真と見間違うほど精巧に作られたCGの車を自由に操作したり、CGとは思えないほど自然な人の動きが合成されている。このようにCGは新たな表現手法としてゲームや映画などの分野で確実にその地位を築きつつあるが、CGアニメーションを制作するには多くの時間と費用が必要である。特に人の自然な動きを合成することはその関節数の多さから非常に手間がかかり、CGアニメーション作品を制作する際の大きな障害となっている。

現在、人の動きをCGとして制作する際には主に3次元モーションキャプチャを用いて直接人の動作を計測したり^[1]、逆運動学を用いて目的の動作を計測したりしている^[2]。特に比較的容易に自然な動作を合成できることから3次元モーションキャプチャは非常に多用されている。しかし、3次元モーションキャプチャ等を用いて制作された人の動作に関するデータ(動作データ)は一般に汎用性が無く、新しい人の動きのCGを制作するには新たな動作データを1から作り直さなければならない。したがって、計算機の発達により人体アニメーションは格段に身近なものとなりつつあるが、制作する手間の面でまだまだ大きな問題を抱えているのが現状である。

一方、様々な種類の人体アニメーションを少ない労力と時間で合成できる手法として、既に制作された複数の人体アニメーションを融合することにより、1つの新しい人体アニメーションを合成する方法が考えられる。例えば、「人が歩く動作」と「手を振る動作」の人体アニメーションが既に制作されている場合、これらの2つの動作を融合することにより「手を振りながら歩く動作」を合成できれば、新しい動作を合成する際の労力と時間を削減できるものと期待される。このようなアイデアを利用して人体アニメーションの合成を実現する試みとして、Douglasら^[3]は「重要度」という概念を提案している。重要度とは、融合するそれぞれの動作の各関節が融合後の動作にどれほどの影響を与えるものかを示す指数を0から100までの数値で与えたものであり、この重要度を用いれば、比較的自然的な人体アニメーションの合成が可能になるものと期待される。しかしDouglasらは重要度を計算機が自動的に設定する方法を確立しておらず、現時点では人が試行錯誤しながら最適な値を設定する必要がある。

本研究では2つの動作を融合する際の重要度を容易に設定できるようにするための支援ツールとして、GUI(Graphical User Interface)により重要度を設定し、融合したアニメーションを容易に確認できるシステムを開発した。また、2つの動作が与えられたときに適切な重要度を自動的に設定するシステムを開発する指針を得るために、人に2つの動作を融合する際の重要度を設定してもらい、その設定の傾向を解析することで、人はどのような動作なら融合可能と考えるか、融合した結果にはどのような共通性があるのかを調べ

*1: 京都大学大学院 エネルギー科学研究科

*1: Graduate School of Energy Science, Kyoto University

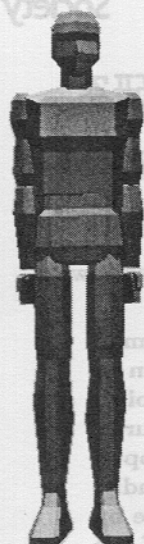


図1 人体モデルの構成
Fig.1 Human body model.

- | | |
|--------|--------|
| 1 腰 | ① 腰の関節 |
| 2 頭 | ② 首 |
| 3 右腕 | ③ 右肩 |
| 4 右肘 | ④ 右肘 |
| 5 右腕 | ⑤ 右腕 |
| 6 左腕 | ⑥ 左肩 |
| 7 左肘 | ⑦ 左肘 |
| 8 左腕 | ⑧ 左腕 |
| 9 右太股 | ⑨ 右股関節 |
| 10 右太股 | ⑩ 右太股 |
| 11 右足 | ⑪ 右足 |
| 12 右足 | ⑫ 右足 |
| 13 左太股 | ⑬ 左股関節 |
| 14 左太股 | ⑭ 左太股 |
| 15 左足 | ⑮ 左足 |

脚
足全体

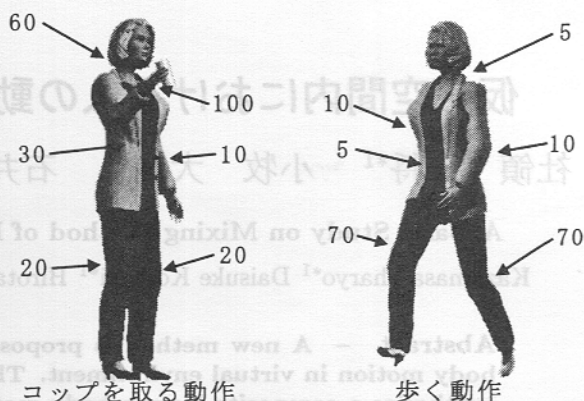


図2 重要度の設定例
Fig.2 Weight assignment example.

ることとした。

以下ではまず、重要度を用いた人体アニメーションの融合方法について述べる。そして本研究で開発した動作融合作業支援ツールを複数の被験者に使用してもらうことで、自然な動作を融合する際の重要度の設定傾向を調べた結果について述べる。

2. 人の動作の融合方法

2.1 人の動作の分類

人の動作の種類は無限にあるため、個々の動作を全て計測してデータベース化することは不可能である。したがって、似た特徴を持つ動作同士を可能な限り一括して扱う方が効率的である。そこで、まず動作学における動作の分類法^[4]を用いて、人の動作の分類を試みた。この動作分類では幼児期以降に獲得する動作を次の2つに大別する。

- 体幹運動：体の移動を伴う運動。さらに水平方向の動作と垂直方向の動作に分類される。
- 四肢運動：体の移動を伴わない運動。さらに手腕を用いる動作と足脚を用いる動作に分類される。

以下、体幹運動の水平方向の動作を水平動作、垂直方向の動作を垂直動作と呼び、四肢運動の手腕を用いる動作を手腕動作、足脚を用いる動作を足脚動作と呼び、水平動作、垂直動作、手腕動作、足脚動作の4つに動作を分類する。

2.2 人体モデルの構成

本研究で使用する人体モデルを図1に示す。人体モデルは15個の体の部位（リンク）と各リンクを結ぶ14個の関節から成る。各関節を結ぶリンクは関節を中心とした3自由度の回転運動を行うことができる。またこのモデルでは腰を頂点にしてリンクの階層構造

を設定する。各リンクには上位リンクとの接続部分である関節を原点とするローカル座標系を設定する。これによりワールド座標系から、腰のリンクのローカル座標系への変換と隣接する2つのリンクのローカル座標系の間の変換（計15個の変換）を用いることにより、人体モデルの姿勢を記述する事ができる。

2.3 重要度を用いる人の動作の融合

本研究では動作を融合する手法として、先に述べたように重要度を用いる。計測した動作データの融合の方法は、人体モデルの頭、胴体、右腕、左腕、右脚、左脚の6点に重要度を設定することによって調整する。重要度とは、前述のように融合するそれぞれの動作の各関節が融合後の動作にどれだけ影響を与えるか、その度合いを0から100までの値で表すものである。すなわち、ある動作に欠かすことができない重要な関節には高い重要度を、比較的動作に影響が少ない関節には低い重要度を設定する。なお本研究では、胴体の2つの関節、両腕の3つの関節、両脚の3つの関節に同じ重要度を設定し、体全体で6種類の重要度を設定することとした。

重要度の設定例を図2に示す。図2において、右側の歩く動作では主に脚の関節に大きな重要度を設定し、首や腕の関節には小さな重要度を設定している。一方、左側のコップを取る動作では、右手や首の重要度が大きく、下半身は小さくなっている。融合前の個別の動作データは各関節の角度の時間変化としてそれぞれ用意されており、融合後の関節の角度は重要度を用いて次のように計算することとした。

$$\theta_j = \frac{\sum_{i=1}^n W_{ij} \theta_{ij}}{\sum_{i=1}^n W_{ij}} \quad (1)$$

θ_j : 融合後の関節 j の角度 j : 関節の番号

i : 融合される動作の番号 n : 融合する動作の数

θ_{ij} : i 番目の動作の j 番目の関節の角度

W_{ij} : i 番目の動作の j 番目の関節の重要度

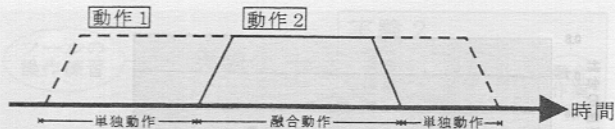


図3 重要度の時間変化
Fig.3 Ramp weight of human body motion beginning and end.

すなわち融合後の14個の関節の角度は、融合される動作の関節の角度の加重平均となる。ただし全ての動作について0の重要度が割り当てられた場合と100の重要度が割り当てられた場合にはそれぞれの関節の角度を平均した結果を融合後の関節の角度とした。

しかし以上のような方法だけでは、その動作の組み合わせによって、融合した結果が不連続的で不自然なアニメーションになる場合がある。この問題を解決するにはフレーム間をスプライン関数によって補完する方法が考えられるが、アプリケーションによってはそこまでの動作の滑らかさを必要としない場合や計算機的能力も十分利用できない場合も考えられる。そこで本研究では、重要度に時間的変化を与えることにした。つまり図3に示すように、動作の開始と終了の数フレームに重要度の立ち上がりとしち下がり線を形的に設けることで、人体モデルの各関節の急激な変化を抑えるものとした。

3. 動作融合作業支援ツール

本章では、人の動作の融合作業を支援するために開発した動作融合作業支援ツールについて述べる。まず、開発した動作融合作業支援ツールの仕様とシステムの構成について述べ、次いで実際の使用例について述べる。

3.1 仕様とシステム構成

動作融合支援ツールは複雑な動作の融合を比較的簡単に行えるように、GUIを用いて重要度や融合開始フレーム、重要度の立ち上がり等を設定できるようにした。動作融合作業支援ツールの仕様を表1に示す。

動作融合支援ツールは、3次元モーションキャプチャであらかじめ計測した61種類の異なった動作が格納されているデータベースから任意の2つの動作を選択して融合することができる。融合した動作は自由な角度から眺められるように視点の移動が可能で、動作を融合するタイミングや重要度の立ち上がりや立ち下がりにより要するフレーム数を自由に設定できるようにしている。

動作融合作業支援ツールはSilicon Graphics社のグラフィックワークステーションで開発した。動作融合作業支援ツールのインタフェースは図4に示すように、3つのウィンドウから構成される。動作パラメー

表1 動作融合作業支援ツールの仕様
Table 1 Method of Human Motion Mixing Tool

入力フォーマット	人体動作を表す各関節の Quaternion
融合可能な動作数	2 (フレームの総数は異なってもよい)
重要度の設定部位 (各動作につき)	頭、胴体、右腕、左腕、右脚、左脚
出力フォーマット	人体動作を表す各関節の Quaternion
その他の特徴	1. 融合した動作を3次元アニメーションとして表示できる 2. 融合した動作は自由な角度から眺めることができる 3. 動作を融合するタイミングを自由に変更できる 4. 重要度に立ち上がりとしち下がりを設定できる



図4 動作融合作業支援ツールのインタフェース
Fig.4 Interface of Human Motion Mixing Tool.

タ設定ウィンドウでは、融合する2つの動作の選択と重要度の設定が行える。融合パラメータ設定ウィンドウでは、融合のタイミングと重要度の時間変化を設定でき、パラメータの初期化やアニメーション再生のためのボタンが用意されている。画像表示ウィンドウでは、融合されたアニメーションが再生される。

4. 人による動作融合作業の特徴解析

重要度を用いて動作を融合する手法により、様々な種類の動作を合成できるが、自然な動作を融合するにはどのような重要度を設定したらよいかについては、まだ明確な方針が確立されていない。そこで重要度の設定方法の指針を得ることを目的に、前章で述べた動作融合作業支援ツールを用いて実際にユーザに動作融合作業を行ってもらい、その結果を分析し、人はどのような動作の組み合わせなら融合可能と考えるか、融合した結果にはどのような傾向があるかを調べる実験を行った。

表 3 選択された動作の組み合わせ (実験 1)
Table 3 Sets of selected motions(exp.1)

動作分類	動作数	動作分類	動作数
水平+水平	4	垂直+手腕	14
+垂直	3	+足脚	3
+手腕	15	手腕+手腕	7
+足脚	2	+足脚	11
垂直+垂直	2	足脚+足脚	0

表 4 融合可能、不可能の予想と結果 (実験 2)
Table 4 Expectations and result of mixing(exp.2)

動作分類	予想	結果	動作分類	予想	結果
水平+水平	5	5	垂直+手腕	6	5
+垂直	2	3	+足脚	4	4
+手腕	6	6	手腕+手腕	5	6
+足脚	3	3	+足脚	5	3
垂直+垂直	3	5	足脚+足脚	2	4

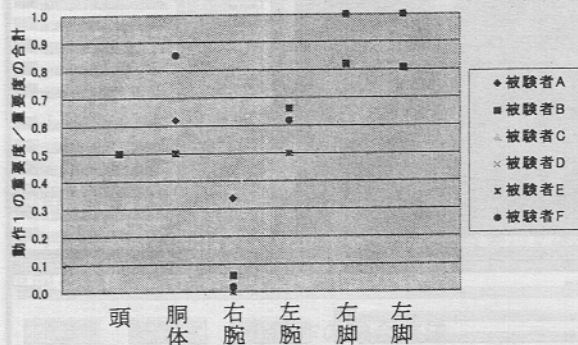


図 6 融合可能と予想した動作の組み合わせ (動作 1「早歩き」と動作 2「右手を振る」) における重要度の割り当て (実験 2)

Fig. 6 Weight tendency when users expected mixing could do.

あると予想し融合した動作の組み合わせの数を示す。図 6 に、実験 2 において全被験者が融合可能と予想した動作の組み合わせ (動作 1「早歩き」と動作 2「右手を振る」) に対して割り当てた重要度の値を示す。縦軸は、融合した動作に対して動作 1 が与える影響の大きさを表すために、動作 1 の重要度を動作 1 と動作 2 の重要度の合計で割った値である。図 7 に、実験 2 において融合不可能と予想した被験者が多かった動作の組み合わせ (動作 1「忍び足」と動作 2「ジャンプ」) に対して割り当てた重要度の値を示す。

4.4 自然な動作が融合可能と予想した動作の組み合わせについての考察

表 3 からわかるように、実験 1 において被験者が自然な動作が融合可能と予想した動作の組み合わせは、「歩く」と「投げる」などの「水平動作と手腕動作」と「椅子から立つ」と「左手で物を取る」などの「垂直動作と手腕動作」の 2 つの組み合わせが多い。また「飲む」と「物を踏む」などの「手腕動作と足脚動作」、

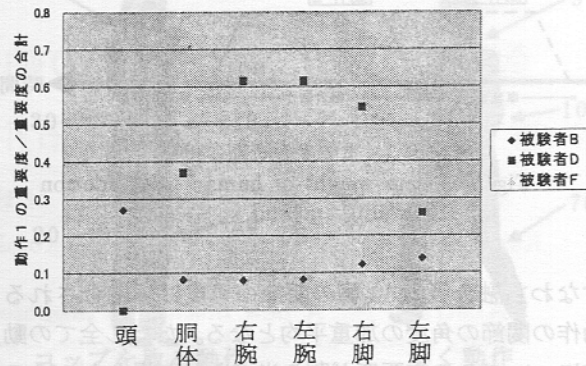


図 7 融合不可能と予想した動作の組み合わせ (動作 1「忍び足」と動作 2「ジャンプ」) における重要度の割り当て (実験 2)

Fig. 7 Weight tendency when users expected mixing couldn't do.

「右手で飲む」と「左手で物を取る」などの「手腕動作と手腕動作」の組み合わせも多いことが分かる。以上の動作の組み合わせの特徴は、いずれも手腕動作と他動作との組み合わせである点である。特に水平動作、垂直動作、足脚動作は融合後の動作に対して脚の影響が非常に大きい動作である。つまり上半身中心の手腕動作と下半身中心の各動作との組み合わせは、容易に動作を融合できる組み合わせであると考えられる。

4.5 融合可能か不可能かの予想と結果の考察

4.4 節の考察から、人は手腕動作と下半身の動作を融合しやすいと考える傾向があることが分かった。この傾向は表 4 から確認でき、「水平動作と手腕動作」「垂直動作と手腕動作」「手腕動作と足脚動作」の組み合わせのいずれも、自然な動作として融合できると予想した被験者が多い。また、4.4 節の考察の結果と同様に、「手腕動作と手腕動作」の組み合わせも自然な動作として融合できるとする被験者が多かった。

それ以外では、「水平動作と水平動作」の組み合わせを自然な動作として融合できると予想し、実際に融合できた被験者が多く、4.4 節の考察の結果と異なっている。これは動作の融合のタイミングによって融合できる場合と融合できない場合があるためと思われる。しかし逆に、移動する距離、歩幅、加速度、歩数など細かなパラメータを設定可能とすれば自然な動作として融合できる可能性があると考えられる。

4.6 重要度の設定の共通性についての考察

表 4 から、実験 2 において被験者が最も融合しやすいと判断した動作の組み合わせは「水平動作と手腕動作」であることが分かる。また、最も融合しにくいと判断した動作の組み合わせは「水平動作と垂直動作」である。そこでこの 2 つの組み合わせについて重要度の設定の共通性を調べる。

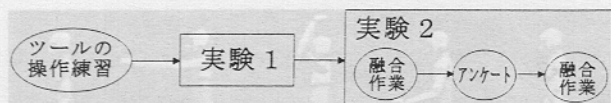


図5 実験の流れ
Fig.5 Process of experiment.

4.1 実験の目的

本実験では、2つの動作を重要度を用いて自然な動作に融合するためにどのように重要度を設定すればよいかを調べることを目的とする。具体的に次の2点を調べた。

1. 2つの動作の組み合わせについて、それらの動作が融合可能と考えるのはどのような場合か？また融合不可能と考えるのはどのような場合か？
2. 同じ2つの動作を融合する場合、融合作業をする人が代わっても、動作融合のタイミングや重要度の設定に共通性はあるか？

本研究では、上記の2つの項目について調べるために以下の2つの実験を行った。

● 実験1

複数の動作から融合が可能であると思われる動作の組を自由に選択し、実際に動作融合作業支援ツールを用いて融合作業を行う。

● 実験2

予め指定した動作の組み合わせに対してそれらの動作の組み合わせが融合可能かどうかを判断し、その後、動作融合作業支援ツールを用いて融合作業を行う。

そして実験1に対しては、被験者が選択した動作の組み合わせに対してその選択の傾向を解析し、また、被験者が指定した重要度の値についてもその共通性を分析した。また実験2に対しては、被験者がどのような動作の組み合わせに対して融合可能であると判断するのか、また、どのような組み合わせに対して融合不可能であると判断するのかの傾向について分析した。さらに、被験者が設定した重要度の値についてその共通性を分析した。

4.2 実験の方法

実験は図5に示すように、動作融合作業支援ツールの操作練習、実験1、実験2、アンケートの順に行った。

1. 動作融合作業支援ツールの操作練習

実験開始直前に動作融合作業支援ツールの操作に慣れてもらうための操作練習を行った。操作練習ではパラメータの設定方法を理解してもらうことを目的に、「スキップ」と「拍手」の組み合わせを融合し「スキップしながら拍手する」動作を合成する練習してもらった。操作練習は被験者が納得するまで時間を制限せずに行った。

表2 被験者に提供した動作一覧(実験1)

Table 2 Offered motions(exp.1)

体幹運動	水平動作	歩く	またぐ
	垂直動作	跳ねる	立ち上がる
四肢運動	手腕動作 (右手) (左手) (両手)	飲む	物を投げる
		物を掴む	
		拍手する	箱を開ける
	足脚動作	物を蹴る	踏む

2. 実験1

実験1では、表2に示す11種類の動作から動作の融合が可能であると予想される2つの動作を選択してもらい、実際に動作の融合作業を行ってもらった。これら11種類の動作は、人がどのような動作の組み合わせに対して融合可能であると考えのかを調べるために、2.1節で述べた動作の分類を用いて、使用する手の左右の区別も含めて6種類の動作の分類から2つずつ動作を選択した。ただし、手腕動作(左手)に関しては、動作データベースを制作する際の被計測者が右利きであったことから、左手を用いた動作が数多く制作できなかったために、左手を用いた代表的な動作(左手で物を掴む)のみを用いた。なお被験者には動作を10組選択してもらい、動作融合の作業を行ってもらった。

3. 実験2

実験2では、被験者にあらかじめ融合する動作の組み合わせを10組指定し、その組み合わせについて融合可能かどうかの判断と実際の融合作業を行ってもらった。10組の動作の組み合わせは、2.1節で述べた動作の分類の各組み合わせに対する重要度等のパラメータの設定の類似性を比較するために、体幹運動の水平動作と垂直動作、四肢運動の手腕動作と足脚動作の全ての組み合わせに対して、それぞれ動作を選択した。

4. アンケート

実験2の終了後、「思い通りに自然な動作を作ることができたか」「再生されるアニメーションは滑らかだったか」等の実験内容に関するアンケートを行った。実験内容や実験の方法について5段階に評価してもらい、さらに自由に感想も記入してもらった。

なお、実験の被験者は本研究室の大学院生A、B、C、D、EおよびF(男性5名、女性1名)である。

4.3 実験の結果

表3に、実験1において被験者が自然な動作が融合できるとして選択した動作の組み合わせを2.1節で述べた動作分類に従って集計した結果を示す。また表4に、実験2において被験者が自然な動作が融合可能で

図6から、全ての被験者が融合可能と予想した「水平動作と手腕動作」の組み合わせでは特に、大半の部位が水平動作である動作1「早歩き」の影響を大きくするように設定しているのにも関わらず、右腕だけは手腕動作である動作2「右手を振る」の影響を大きくするように設定していることが分かる。これは「早歩きしながら右手を振る」という融合の目的を達成するためには、全体として「早歩き」動作が重視されつつも「右手を振る」動作が自然に見えるために右腕が重要であることを全被験者が共通の意識として持っていることを示している。一方、図7からは、融合しにくいとされた「水平動作と垂直動作」である動作1「忍び足」と動作2「ジャンプ」の組み合わせに対する各被験者の重要度の割り当て方には共通性が見られない。これは、融合することが難しい動作である程、融合後の動作として持っている動作のイメージについて、各被験者ごとの差異が大きいためであると考えられる。

5. 重要度を用いた動作の融合方法の有効性

5.1 自然な動作を融合するために重要度を設定する方法

実験2の結果から、融合しやすい動作の組み合わせの方が融合しにくい動作の組み合わせに比べ、重要度の割り当て方に共通する傾向が現れることが分かった。それは、自然な動作として誰もが容易に想像できる動作の組み合わせの方が、その融合動作の特徴や動作の目的が明確であるためと考えられる。このような重要度の割り当て方に関する共通の傾向を、それらの組み合わせの動作を融合する際の指針とすれば、自動的に自然な動作を融合できるシステムが構築可能になると考えられる。

5.2 動作融合手法としての重要度の有効性

重要度が、比較的容易に、そして直感的に動作を融合できる手法として有効なことは、被験者全員が簡単な操作練習を行っただけで戸惑い無く動作を融合できたことから明らかである。またアンケートの結果からも「思い通りに自然な動作を作ることができた」との評価を得ることができた。一方で、動作の再生速度を変化させる機能が欲しかったという意見も複数聞かれた。特に「歩く」や「走る」などの水平動作では、再生速度を変化させることによって歩調を変化させることができるため、他の水平動作、例えば「またぐ」などと歩調と融合のタイミングを調整すれば、自然な動作として融合できるようになると考えられる。

また本研究では、動作融合の開始と終了の部分で重要度の立ち上がりとしち下がり設けた。図8は被験者が融合した人体アニメーションの例であるが、アンケートでは再生するアニメーションについて、全ての

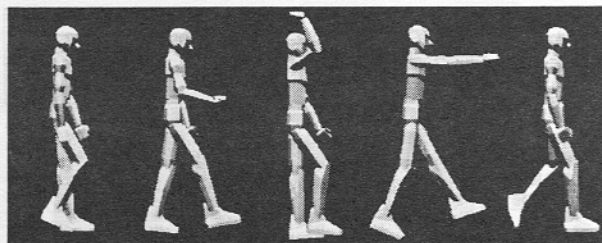


図8 融合されたアニメーション

Fig.8 Animation synthesized from mixed two human body motion.

被験者から「非常に滑らかで自然である」との高い評価を受けることができ、重要度の立ち上がりとしち下がり設けた効果を確認することができた。

6. おわりに

本研究では仮想空間内における人の動作を少ない労力と時間で合成できる手法として、Douglasらが提案した重要度の概念を用いた動作の融合方法に関する基礎研究を行った。具体的には、

1. GUIを介して重要度を設定できる動作融合支援ツールの開発
 2. 被験者実験による自然な動作を融合するための重要度の設定傾向の調査
- を行った。その結果、以下のような結果が得られた。
- 重要度とその時間変化は、比較的容易に、そして直感的に動作を融合できる手段として有効である。
 - 上半身中心の手腕動作と下半身中心の各動作の組み合わせは融合可能であり、水平動作同士の組み合わせは融合のタイミングによっては融合できる。
 - 融合しやすいとされた組み合わせでは、重要度の設定に各被験者間で共通性が見られる。

今後の課題としては、さらに重要度の設定傾向の解析を進め、重要度を用いた動作融合方法をさらに広範囲に適用できるように研究を進める。最終的には、自然な動作を融合する手法を確立し、自動的に動作を融合できるシステムの開発を行いたいと考えている。

参考文献

- [1] 安藤寛：仮想空間内における自然な人体モーションの生成，京都大学大学院工学研究科電気工学第二専攻修士論文（1998）。
- [2] Cary B. Phillips and Norman I. Badler : Interactive Behaviors for Bipedal Articulated Figures, Computer Graphics, 25(4), pp.359-363(1991).
- [3] Douglas E. Dow and Sundhanshu K. Semwal : Fast Techniques for Mixing and Control of Motion Units for Human Animation, Proc. of Graphics '94, pp.229-242(1994).
- [4] J. ヘルムート編，岩本憲監訳：障害乳幼児の発達研究，黎明書房（1975）。