

モーションキャプチャによる全身運動解析と模倣ロボット - 「じょんがら」節を HRP-1S に踊らせる -

中澤 篤志† 中岡 慎一郎‡ 白鳥 貴亮‡ 工藤 俊亮‡ 池内 克史‡

†大阪大学サイバーメディアセンター
‡東京大学生産技術研究所

あらまし ロボットのインタラクションとは、ロボットが外界のさまざまな刺激に対して、それに適した反応を返すことである。特に、人間との円滑なコミュニケーションを目指して作られたヒューマノイドロボットにとっては、人に違和感を与えない技術、すなわち人と同様の自然な動き生成や外界反応が必要である。本稿では、人の舞踊模倣をロボットのためのテーマとし、その動きや音楽との関係における「自然さ」を追求するため我々が行った諸研究を、他の動作解析・生成に関する関連研究とともに概説する。

Structure Analysis of Human Motion and Motion Imitation of Humanoids -Dancing Humanoid Project-

Atsushi Nakazawa, Shinichiro Nakaoka, Takaaki Shiratori
Shunsuke Kudoh and Katsushi Ikeuchi

Cybermedia Center, Osaka University
Institute of Industrial Science, The University of Tokyo

Abstract: The interaction of robots is the reaction to their outer world according to the outer signals made by humans or environments. In particular, the humanoids which do the cooperative tasks with humans have to be considered how smoothly and naturally communicate with humans. This is achieved by the technologies of the natural motion synthesis or understanding of outer signals. In this paper, we introduce our project which aims to develop the methods to import human motion into humanoids, in particular, human dance motion. Through our research, we concentrated that how to express the 'naturalness' of human and synchronization method to the important signals of dances: music signals.



図 1 人間の動作とロボットの模倣動作（津軽じょんがら節）

1. はじめに

我々の研究グループでは、視覚技術を用いて文化遺産をデジタル保存するプロジェクトを推進しており、レーザセンサを用いた建築物や仏像の3D形状保存や、カラーカメラ等を用いた表面反射特性や環境光学情報の記録等を行ってきた[1]。これら「静的」なオブジェクトによる文化遺産と同時に、伝統舞踊や匠の技等の「人の動きの文化財(無形文化財)」もデジタル保存の対象となることが考えられる。これらの保存や伝承は、主に人から人への伝承に頼ってきたのが事実であり、様々な変化や後継者不足による散逸が起こってきた。これを解決するためには、人の動きをデジタル技術により保存し、高度利用することを可能にする技術が求められているといえる。

この無形文化財の保存技術に対してはいくつかのアプローチが見られるが、従来から広く行われているのは、ビデオや音楽テープなどによる保存方法である。しかし、ビデオの撮影視点による観測不能可能性の問題や、基本的に画像による記録であることなどを考えると、人の動きを精緻に保存できているとはいえない。一方、人の動きを3次元的に計測する研究は、近年の画像分野のトピックであり、画像による人物のトラッキングや姿勢推定、ジェスチャー認識等で多くの研究が行われている[2]。これらの研究は主に人物位置や姿勢など、人がとりうる数値としての値(metrics)を計測するものであり、近年のアルゴリズムや計算能力の向上により、ほぼ実用的な段階に近づいていると言える。しかし、得られた metrics としての人の動きを解析し利用することを想定した研究は未だ多いとは言えず、今後は計測で得られた数値的な動き情報を高度に利用する手法の開発が必要である。

これに対し、我々は図2のようなフローを実現する要素技術を開発している。動き情報の獲得に関しては、現状ではモーションキャプチャがもっとも正確な動きが獲得可能であると考え、これを用いている。獲得されたデータは解析ス

テップに移される。ここでは、動作の自己相関を用いた解析手法と、それを発展させ動作データと音楽情報を用いた動作解析技術を開発している。音楽情報を使うことで、舞踊の上半身動作におけるキーポーズの抽出精度が向上することが明らかになった。次に、保存された動きのCGへの再利用を考えると、動きを編集し新たな動作を合成することが必要となる。このために、動き解析によってセグメント化された動きを滑らかに接続し、新たな動作を生成する手法を提案している。

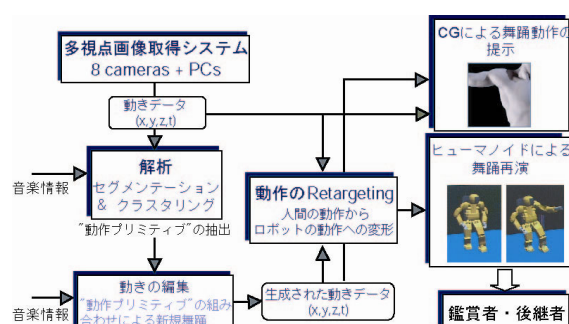


図2 舞踊のデジタルアーカイブプロジェクト

最後に問題となるのが、保存された動きをいかに提示するかという問題である。2次元での動き(ビデオテープ)が、動きのアーカイブとして適切でないのと同様に、いかに3次元での動き情報を獲得しても、その提示が従来と同じ2次元画像(CG)では意味がないと考えられる。そこで我々のグループでは、保存された動きをそのまま立体として提示する手法として、ヒューマノイドロボット HRP-1S[3]を用いた。これにより、アーカイブした動きを直接「モノ」の動きとして認知することができ、鑑賞者(後継者)に対してもよりリアリティのあるディスプレイとしてデータを提示することが可能になる。しかし、モーションキャプチャされたデータをそのままロボットに入力することは、両者の機構的、バランス的な違いから不可能であるため、何らかの変形が必要になる。ここで、元の動き

の特徴を残しながら、動作をロボットに合わせて変形させる必要があり、先の解析結果を重視し踊りの特徴を維持しながら動作変形を行う手法を開発している。

2. 関連研究

本プロジェクトに関連する要素研究としてはいくつか見られるが、これらを分類すると、動きのアーカイブ化全体に関する研究、動きの解析を行う研究、動きの合成を行う研究、およびロボット等を用いた動きの提示（ロボットへの入力）に関する研究に分類できる。

2.1 動きのデジタル保存に関する研究

伝統舞踊等の動きデータに関して、モーションキャプチャによるデジタル保存を試みた研究として、八村らによるモーションキャプチャデータからの Labanotation の抽出および動作の再生の研究が挙げられる[4]。ここではモーションキャプチャデータを Labanotation と呼ばれる記号に変換しシンボリックに動きを記述する。Labanotation は西洋舞踊等において一般的に用いられ汎用性が高いことから、無形文化財のアーカイブ化においても有用な記述方法である。しかしこの表現方法は、舞踏分野に精通した人が理解の記録のために使用するため、細部の動きはすでに理解できているという前提に立っており、人の動きを粗く表現する傾向がある。このため、プロフェSSIONナルのための舞踊の記述には用いることができても、我々のようにロボット等を用いて動作を再生するためには適していない。さらに、動きの認識に対して固定しきい値を用いているため、同じ動きに対しても異なる舞踏譜として記録される可能性がある。我々のグループでは、入力されたモーションキャプチャデータを分割し、低レベルの表現としてその分割された動きセグメントをそのまま保存するアプローチをとる。分割された動きセグメント間ではその目標点(手先、足先)の軌跡によって動きの相関が評価され、舞踊の中で頻出する動きセグメントが「基本動作」として抽出される。最終的には、同一の動作とさ

れた分割セグメントの中の動き情報を平均化しアーカイブ化する。この方法では、実際のモーションキャプチャデータから得られたデータをそのまま保存データとして用いるため動作の再現が容易になる。

2.2 動きの解析に関する研究

舞踊を有限個の基本動作によって記述するという取り組みはすでにいくつか成されている。秋田県のわらび座では手動で動きデータを分割し、基本動作として記録している[5]。また、ロボットの行動獲得を目的とした研究としては、複数の関節角度を Self Motion Element と呼ばれる単位に分割し、HMM を用いて基本動作を抽出したものの[6]や複数物体の3次元の接触状態をロボットの視覚で観測しその制約条件から行動計画を学習するもの[7]等がある。人の「見かけの動き」に基づいたアプローチとしては、手先の動きを平面に投影し直線・円弧等の基本パターンに分類し再現したもの[8]や、手先の動きを速度に基づいて切り出しその手先の3次元空間中の動きを Dynamic Time Warping による距離を用いてラベル付けする手法[9]などが挙げられる。

2.2 動きの合成に関する研究

動きの合成に関する研究は、グラフィックス・アニメーション分野において多く研究されており、特にモーションキャプチャデータを基づいたアニメーション生成の研究は Motion Capture based Animation として分類され、いくつかの手法が知られている。Atkeson らが提案した Motion Graph アルゴリズム[10]は、複数のモーションキャプチャ動作列のフレーム毎の相関を評価し、類似した点をつなぎ合わせてグラフをつくる。動作を生成する際には、そのグラフを順次任意にたどることで動作が生成される。Bland らが開発した Style Machine アルゴリズム[11]は、同系列の動作を HMM で学習させ、学習させた状態空間内での補間により新規動作を生成するというアルゴリズムである。Bregler らが提案したアルゴリズムも同様に、動きをクリップに分割し、ユーザーが望む体姿勢が生成できるクリ

ップをつなぎ合わせるといったアルゴリズムにより新規動作を生成する[12]。

2.3 動きの提示に関する研究

モーションキャプチャデータからロボットを動作させるには、元の動作からの逆運動学によって直接的に得られた関節角軌道をベースとすることが考えられる。Pollard ら[13]は上半身の動作に対して、得られた個々の関節角軌道を可動範囲や最大角速度内に収まるよう修正することで、ロボットによる舞踊模倣を実現している。しかしこうして得られた動作は身体全体とその力学を考慮していないので、自己干渉を起こしてしまったり、元の動作の特徴を失ってしまったりする上に、自らの脚でバランスをとって動作を続けることは難しい。本プロジェクトでは、これらの手法を参考にしつつも、脚も含めた全身動作の再現を目指しているため、新たな手法の開発が必要である。

3. 提案手法

我々の提案手法は、先に述べたように舞踊の解析、生成、ロボットによる再現の3要素から構成される。ここで、我々の基本となっている考え方が、動きのセグメント化と分類による解析、および再現である。ここで我々の基本となる考え方が「動作プリミティブ」である。これは、ある舞踊動作の中で頻出する動作セグメントであり、ここから舞踊の大部分は構成することが可能になる。また、この動作プリミティブを導入することで、キーポーズの抽出やロボットへの動作の変換を容易にすることができる。

3.1 モーションキャプチャデータによる動作解析

民俗舞踊を見ると、その動きの中には繰り返しやバリエーションを持たせた動作など、音楽のような動作構造が存在することに気づく。そこで、以下に述べる5つのステップで、低レベル表現である分割された動作データをクラス化することで動作の構造を把握する。

1) 各フレーム毎に人の腰位置に体中心座標系を

設定。

- 2) この座標系における手先足先の速度と軌跡を得る。
- 3) 速度の極小値を動きのセグメントの境界フレームと考え動作を切り分ける。これには **EM-Algorithm** を使用する。
- 4) 切り分けられた動作セグメント内の軌跡の相関を評価することで動作をクラス化する。
- 5) 同クラスの動作セグメントが連続する場合、セグメントの併合を行うことで舞踊全体の動作構造を把握する。

以上の5ステップにより手足の動きの加速度で切り分け体中心に対して同じ軌跡を描くセグメント(最小セグメント)が分類できる。この最小セグメントでは手や足の振り等の動きが検出できるが、舞踏のようなシナリオをもった動きではより大きな単位である共通した動きが存在する。これを検出するためにレベル付けされた最小セグメント列から頻出する一連のパターンを検出して、より大きな動き列を抽出する。これには **Apriori Algorithm** を用いる。これらの大きな動き列を分類することで同一部位における動作ラベル列の階層化を行う。次に、他の部位の動きとの関連付けも行い最終的な動きの記述とする[14]。

本アルゴリズムを用いた「そうらん節」の解析結果を図3に示す。舞踊がいくつかの繰り返しのある動作プリミティブとそれらを連結する動作セグメント、一度しか出現しない動作プリミティブ等の部分から成り立っていることが確認できる。繰り返し演じられる動きが同様のラベルに振られるため、必要最小限の動作プリミティブを登録するのみで十分となるだけでなく、舞踊全体の構造を把握することも可能である。これらの動作セグメントを利用して **Labanotation** の抽出を安定化することも可能である。

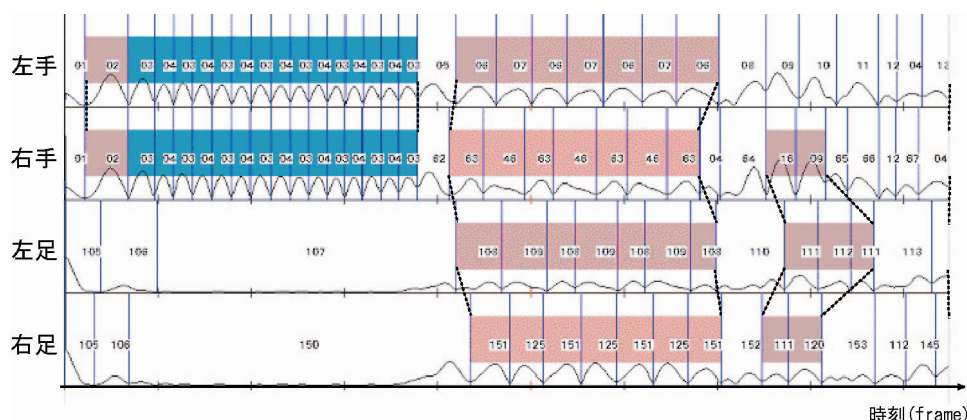


図 3 そうらん節の解析結果

ラベル番号は同種の動き、色付けされたところは繰り返し動作を示している

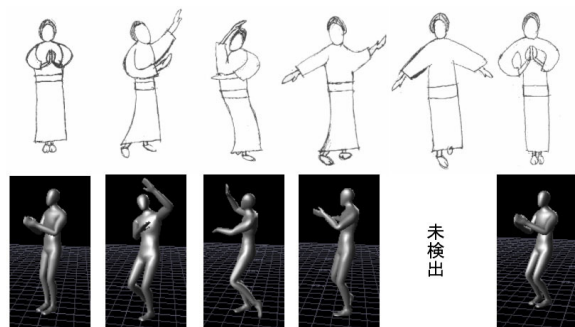


図 4 音楽を用いた舞踊解析結果

3.2 音楽とモーションキャプチャデータによる動作解析

前節の手法では、人の手足の動き情報のみをセグメント化とクラス化に用いている。だが、これが舞踊において意味レベルでも正しいものであるかは分からない。これを解決するため音楽情報を導入して意味レベルでも正しいセグメント化を行う手法を開発した。ここでは、舞踏の動きは音楽と不可分のものであり、音楽の節々に重要な動きが出るとの仮定による。まず、舞踏で流される音楽をスペクトル解析することでリズム(ビート)を抽出する。このビートと先に求めた動作セグメントがほぼ同時刻にくるものを見つけ、加えて両手両足、重心のそれぞれの動作セグメント点と同時に存在する場合、意味レベルでも正しいセグメント点として動作の切り分けを行う。図4に、この手法を用いて会津磐梯山踊りに対して適

用した結果を示す。止め動作が正しく抽出されている様子が見取れる。実際、踊り手が踊っているときに意識している姿勢についてヒアリングを行い、求められた動作セグメントとの比較をおこなったところほぼ一致した結果が得られ、本手法の有効性が示された。

3.3 動作の合成

前章の手法で舞踊中の動作プリミティブを導出できる。ここで例として挙げた3つのおどりの解析結果を見ると、舞踊はいくつかの繰り返し動作と、それを連結する動作から成り立っていることがわかる。すなわち、舞踊動作は有限の動作群の組み合わせによって構成されるという仮説を支持するものであると言える。この知見から、抽出された動作プリミティブをデータベースとして蓄積することの重要性がわかる。さらに、任意の動作プリミティブを自動的に連結する手法があれば、既存のプリミティブをつなぎ合わせて新しい舞踏生成するという舞踊動作の編集が可能になる。

この舞踏編集のための繋ぎ動作は、人の動作軌道生成に基づく軌道を生成する必要がある。軌道生成のうち、腕の動きに関しては神経科学やロボティクスの分野で多くの研究がなされている[15][16]。Flashらは、腕の動作軌道に対してJerk(躍度)最小モデルという概念を提唱している[17]。人の腕の動作においてはその最中の躍度

の積分がもっとも小さくなる軌跡を通るという理論であり、実験的にもその正しさが証明されている。この概念を発展させ、宇野らはトルク変化最小モデルを提唱し、川戸らは粘性トルク変化最小モデルを提唱している。いずれも、より人間の随意運動に近い動きを生成することが示されている。

一方、脚の動きに関しては現在さまざまな手法が考えられているが、脚は手と異なり体を支えるためのバランスをとる必要があるため、腕のように動き自体を他の部位の動きと独立して考えることが難しい。我々は、動きの間ではいずれかの脚が支持脚となるという拘束のみを与え、他の脚や体全体は滑らかに連続した動作をするという仮定を設けることと脚の軌道生成を行う手法を開発した[14]。連結対象とする動作プリミティブ間での支持脚を設定し、他方のプリミティブはこの脚が一致するように平行移動させる。次に、遊脚先位置、腰位置、体中心位置、首位置を2つのプリミティブの間で一致するよう他方のプリミティブを移動させる。さらに、腰ならびに首の座標系を回転させる。最後に、腕および脚の関節角度跳躍度最小な軌道で補間を行う。動作変形のアニメーションから、異なる舞踊などの間でもスムーズに連結動作が確認でき、本動作編集手法が有効に働いていると思われる。

3.4 最適化計算による動作生成

前節の軌道計算では、跳躍度最小となる軌道を利用した。人型モデルの動作生成においては、モデルに予期せぬ外乱が加えられた場合でも、それを適切に対処できるようにすることが重要である。とくに、2本脚モデルでは体を支えるための「支持面」が小さいため、バランスをとることが難しくなる。これまでCGやロボティクスの分野で人型モデルのバランス制御についての研究がなされてきた。

CGの分野においては、力学的に正しいリアルなキャラクターアニメーションへの需要の高まっており、グローバルなフィルタリングにより力学

的に正しい動作を生成する手法[18][19]や取得された動きとPD制御を組み合わせた手法[20]、あるいは力学的な保存量に注目した手法[21][22]などが代表的なものである。一方、ロボティクスの分野においては近年ヒューマノイドに関する研究が盛んであり、これらの研究においてはバランス制御は本質的に重要な問題であるため、[23][24][25]などの手法が提案されてきた。

一方、人間は非常に高度なバランス保持動作を行っており、そのメカニズムを見習うことで、より効果的で頑強なシステムを構築できる可能性がある。このため、人間のバランス保持動作について観察することは重要であると考えられる。人間の場合大きな外乱が加えられると、バランスを保つためにしばしば腕を大きく振り回したり、腰を大きく折り曲げたりする。すなわち、外乱で生じた角運動量をこれらの動作によって適切にコントロールし、転倒を回避していると考えられる。大きな外乱に対処するには、このようなダイナミックな全身動作によるバランス保持が必要である。ところがこれらのダイナミックな動作は、従来のフィルタリングやPD制御によるバランス制御の手法では実現が困難であった。これは、従来の手法では現在の姿勢と目標とする姿勢の差を縮めるように動作を生成するため、「一時的に目標とする姿勢からは遠ざかるが、実はバランスを回復するのに効果的な動作」を生成することができなかったからである。

我々のグループでは、この点に注目し、最適化を用いた姿勢制御の手法を開発している。この手法においては、ZMP (Zero Moment Point) と呼ばれる「地面から受ける力によるモーメントが0になる点」を足の支持多角形内に納まるよう制御することで、動的バランスを直接的に取り扱う[26]。ここでは各関節の角加速度を変数とし、「できるだけ力を使わずに姿勢を保持する」ということに相当する「関節角加速度の二乗和」の最小化する定式化を行う。最適化には、二次計画法を用いる。その際、拘束条件として次の3つの条件を設定した。

- ・ 重心の加速度が、重心の目標位置の方向を向いている。
 - ・ モデルの ZMP が足の支持多角形内に存在する。
 - ・ できるだけ左右対象な動きとなるようにする。
- すなわち、重心の位置・加速度や ZMP のみを問題にし具体的な姿勢については問題にしないことによって、フィルタリングや PD 制御では実現できなかったような、ダイナミックに全身を使ったバランス回復動作が生成できるようになった。具体的には、人間によく見られるような腕を振り回すことによって角運動量を適切に制御してバランスをとる動作が生成された (図 5)。

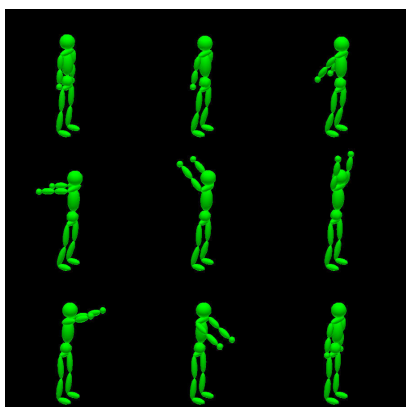


図 5 動力学シミュレーションを用いた動作生成結果

3.5 ヒューマノイドによる動き提示

コンピュータ上に取得された動作データのより効果的な提示手法として、ヒューマノイドロボットによる舞踊の実演を試みている。しかし、ヒューマノイドロボットは人間に似せて設計されてはいるものの、現状ではまだ関節の構造や自由度・可動範囲・動作速度などにおいて制限されたものとなっており、身体における重量配分も異なる。よって人間から得られた動作データをそのままロボットに適用することは不可能であり、ロボットは目標とする動作を自らの身体に適応させていく必要がある。これは人間同士であっても体格や身体能力の違いがある中で同じ動作をしようとしていることと同じであり、動作模倣における一般的な問題であると考えられる。

ロボットを動作させるにあたって、元の動作からの逆運動学によって直接的に得られた関節角軌道をベースとすることが考えられるが、通常の方法では身体全体とその力学を考慮していないので、自己干渉を起こしてしまったり、元の動作の特徴を失ってしまったりする上に、自らの脚でバランスをとって動作を続けることは難しい[13]。これに対し、我々は今まで述べてきたような動作の解析結果を有効に活用することでこの問題を解決することをめざしている。元の動作をそのままロボットの制約内に修正していくのではなく、元の動作を解析して基本となる動作の列を抽出し、ロボットの動作はその基本動作列をもとに新たに生成する。ロボットは各種の制約や力学を満たしながら、個々の基本動作のもつ動作の特徴を反映していけばよい。この流れを図 6 に示す。現在のところ、バランスが重要となる脚の動作に関して、両足立ち、しゃがみ、踏み出しの 3 種のプリミティブを用い、人間の動作からこれらを抽出した後、ロボットに再現させる形で、元の動きを模倣させている。この手法を用いて、ロボットが自らの脚でバランスをとりながら舞踊の模倣を行うことに成功した (図 1、7) [27]。

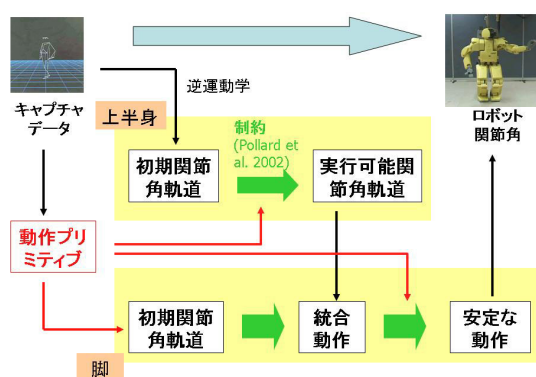


図 6 ヒューマノイドによる舞踊再現手法

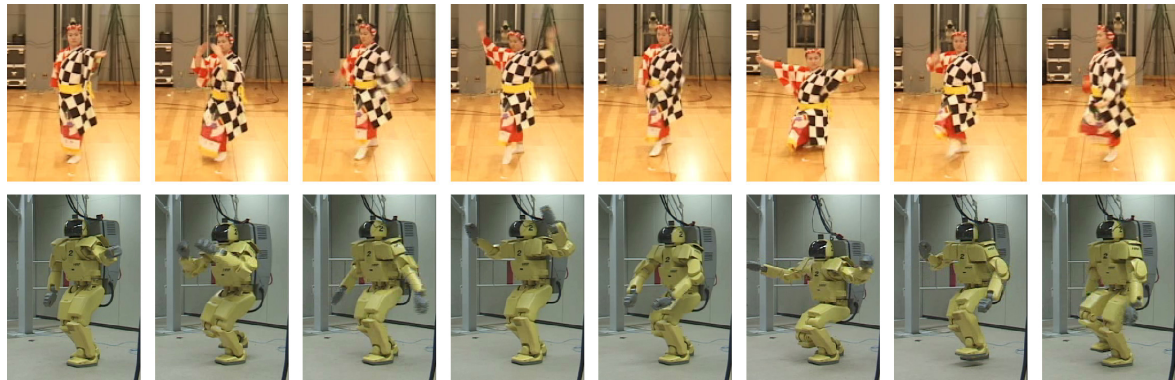


図 7 舞踊動作の HRP-2 による再現

4. まとめ

本論文では、我々が行っているデジタル舞踊アーカイブ研究に関する一連のプロジェクトの概要を述べ、ロボットによる人間動作模倣研究について概説した。このような試みでは、ビジョン等による人間の姿勢推定や、ロボットのための制御アルゴリズムのみでなく、動作の意図解析など高位レベルの動作解析・認識が必要になることは明らかである。一方で、現在のモーションキャプチャシステムでは、センサを舞踊者に取り付けるなどの負担も大きく、ビジョンのみによる安定した姿勢推定手法も必要であり、ロボットそのものに関しても、人間の動作をそのまま再現できる自由度や関節角速度等はいまだ備わっていないとはいえない。これら両面での更なる発展が必要である。

謝辞 本研究は科学技術振興機構戦略的創造研究推進事業のサポートによって実施されている。また HRP-1S への実装および実験に関しては、独立行政法人産業技術総合研究所 知能システム研究部門 ヒューマノイド研究グループの協力を受けている。

参考文献

[1] Katsushi Ikeuchi, "Overview of the CREST Digital Archiving Project", Proc. of International Symposium on the CREST Digital Archiving Project, pp.3-16, 2003.
 [2] D.M.Gavrila: The Visual Analysis of Human

Movement: A Survey, CVIU vol.73, no.1, pp.82-98, 1999
 [3] Kazuhito Yokoi and Fumio Kanehiro and Kenji Kaneko and Kiyoshi Fujiwara and Shuji Kajita and Hirohisa Hirukawa "A Honda Humanoid Robot Controlled by AIST Software", Proceedings of International Conference on Humanoid Robots, pp.259-264, 2001.
 [4] 松本敏良, 八村広三郎: モーションキャプチャデータからの基本身体動作の抽出, 人文科学とコンピュータシンポジウム論文集, pp.17-24, 2000.
 [5] わらび座, <http://www.warabi.or.jp/>.
 [6] T. Inamura, Y. Nakamura, H. Ezaki, I. Toshima: "Imitation and Primitive Symbol Acquisition by the Integrated Minesis Loop," Proc. ICRA 2001. pp.4208-4213, 2001.
 [7] J. Takamatsu, H. Tominaga, K. Ogawara, H. Kimura, K. Ikeuchi "Extracting Manipulation Skills from Observation," Proc. ICRA, Vol.1 pp.584-589, 2000.
 [8] O. C. Jenkins, M. J. Mataric, S. Weber "Primitive based movement classification for humanoid imitation," IEEE Int. Conf. Humanoid Robots, 2000.
 [9] 大崎竜太, 嶋田光臣, 上原邦明: 速度に基づく切り出しとクラスタリングによる基本動作の抽出, 人工知能学会誌 15 巻 5 号, pp.878-885, 2000.
 [10] L. Kover, M. G. eocjer, F. Pighin, "Motion Graphs", Proc. of SIGGRAPH2002, 2002.
 [11] M. Bland and A. Hertzmann, "Style Machines", Proc. of SIGGRAPH2000, pp. 183-192, 2000
 [12] Kathy Pullen, Christoph Bregler, "Motion Capture assisted Animation: Texturing and Synthesis", Proc. of

SIGGRAPH2002, 2002.

[13] N. S. Pollard, J. K. Hodgins, M. J. Riley, C. G. Atkeson, "Adapting Human Motion for the Control of a Humanoid Robot," Proc. ICRA, pp.1390-1397, 2002.

[14] 中澤篤志、中岡慎一郎、原田貴昭、工藤俊亮、池内克史: 視覚による舞踊動作の保存・解析および生成、画像の認識・理解シンポジウム, pp.I-153-158, 2002.

[15] 川人光男: 脳の計算理論, 産業図書, 1996.

[16] 伊藤宏司, 伊藤正美: 生体とロボットにおける運動制御, コロナ社, 1991.

[17] T. Flash, H. Hogan "The coordination of Arm Movements: An Experimentally Confirmed Mathematical Model," J. Neuroscience, pp.1688-1703, 1985.

[18] S. Tak, O. Song, and H. Ko, "Motion Balance Filtering", Computer Graphics Forum, 19(3):pp. 435-446, 2000.

[19] K. Yamane and Y. Nakamura, "Dynamics Filter-Concept and Implementation of On-Line Motion Generator for Human Figures", Proc. ICRA, pp.688-695, 2000.

[20] V. Zordan and J. Hodgins, "Motion capture-driven simulations that hit and react", SIGGRAPH, pp.89-96, 2002.

[21] C. K. Liu and Zordan Popvic, "Synthesis of Complex Dynamic Character Motion from Simple Animations", SIGGRAPH02, 21(3):pp. 408-416, 2002.

[22] A. C. Fang and N. S. Pollard, "Efficient Synthesis of Valid Human Motion", SIGGRAPH03, 22(3):pp. 417-426, 2003.

[23] K. Nishiwaki, S. Kagami, Y. Kuniyoshi, M. Inaba, H. Inoue, "Online Generation of Humanoid Walking Motion based on a Fast Generation Method of Motion Pattern that Follows Desired ZMP", Proc ICRA, pp.2684-2689, 2002.

[24] R. Kurazume, T. Hasegawa, K. Yoneda, "The Sway Compensation Trajectory for a Biped Robot", Proc. ICRA, pp.925-931, 2003.

[25] S. Kajita, F. Kanehiro, K. Kaneko, K. Fujiwara, K. Harada, K. Yokoi, H. Hirukawa, "Resolved Momentum Control: Humanoid Motion Planning based on the Linear and Angular Momentum", Proc. IROS, pp.1644-1650,

2003.

[26] S. Kudoh, T. Komura, K. Ikeuchi, "The Dynamic Postural Adjustment with the Quadratic Programming Method", Proc. IROS, pp.2563-2568, 2002.

[27] S. Nakaoka, A. Nakazawa, K. Yokoi, K. Ikeuchi, "Leg Motion Primitives for a Dancing Humanoid Robot", Proc. ICRA, 2004.