

舞踊模倣ヒューマノイドロボットにおける脚動作の認識と生成

中岡 慎一郎[†], 中澤 篤志^{††}, 横井 一仁^{†††}, 池内 克史^{††††}

[†] 東京大学大学院 情報理工学系研究科 コンピュータ科学専攻

^{††} 科学技術振興事業団

^{†††} 産業技術総合研究所 知能システム研究部門

^{††††} 東京大学 情報学環

〒 153-8505 東京都目黒区駒場 4-6-1 駒場 II キャンパス E 棟

東京大学生産技術研究所 第 3 部 池内研究室

03-5452-6242

nakaoka@cvl.iis.u-tokyo.ac.jp

概要 本研究では人間の舞踊を模倣するヒューマノイドロボットの実現を目指している。人間の舞踊動作はモーショキャプチャにより取得することができるが、ロボットと人間の身体構造の違いから、キャプチャさ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、脚についてはバランス維持の面から特に制約が厳しい。本論文では実ロボットで実行可能な脚動作を生成するための、脚の動作プリミティブに基づいた動作認識・生成システムを提案する。舞踊動作の構成に必要な脚の動作プリミティブを定義し、キャプチャされたデータからプリミティブ列を抽出する。ロボットの脚動作はこの情報をもとに、各種制約を満たすよう生成される。生成された動作データを動力学シミュレータ OpenHRP で検証し、本手法の有用性を確認した。

キーワード 舞踊, 模倣, ヒューマノイドロボット, ZMP

Recognition and Generation of Leg Motion for Dance Imitation by a Humanoid Robot

Shinichiro Nakaoka[†], Atsushi Nakazawa^{††}, Kazuhito Yokoi^{†††} and Katsushi Ikeuchi^{††††}

[†] Graduate School of Information Science and Technology, The University of Tokyo

^{††} Japan Science and Technology Corporation

^{†††} Intelligent Systems Institute, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

^{††††} Graduate School of Interdisciplinary Information Studies, The University of Tokyo

Institute of Industrial Science, The University of Tokyo, 3rd Dept. Ikeuchi Laboratory

4-6-1 Komaba, Meguro-ku, Tokyo, 153-8505, JAPAN

+81-3-5452-6242

nakaoka@cvl.iis.u-tokyo.ac.jp

Abstract This study attempts to realize a humanoid robot which can imitate human dances. Human motion can be acquired by a motion capturing system. However, the captured data cannot be directly imported to a robot because of difference of body structure between a human and the robot. Since leg motion must consider balance keeping, constraints of it is too restricted to apply the captured data. This paper proposes a method to recognize human motion and generate robot motion from the recognition result. Primitive motions which is required to express leg motion in dances are defined. A sequence of primitives is extracted from captured motion data. Leg motion of a robot is generated from the primitive sequence to satisfy the leg constraints and the dynamic balance. Generated motion is tested on OpenHRP dynamics simulator. We certified validity of this method.

Keywords Dance, Imitation, Humanoid Robot, ZMP

1 はじめに

近年、2足歩行ヒューマノイドロボットの技術が発展し、安定な歩行動作が実現できるようになった。本論文では、2足歩行ロボットのより高度な全身動作として舞踊動作を扱う。最終的には人間の舞踊動作を観察し模倣することの出来るロボットの実現を目指している。このようなロボットが実現できれば、無形文化財としての伝統舞踊の保存・アーカイブ化に役立てることができる。実物のロボットが実際に舞踊を演じることは、3DCGによる表現に比べ効果も大きい。現在対象としているのは日本の伝統民族舞踊で、図1はそのひとつの「津軽じょんがら節」である。

舞踊模倣ロボットの研究として、Pollardら[5]はモーションキャプチャで取得した人間の舞踊動作データをロボットで実行できるよう変換する手法を提案している。ヒューマノイドロボットは人間に似せて設計されているが、現在のロボットでは関節構造などに違いがある。人間の動作を実行させる際、この違いが制約となる。彼らの手法により、キャプチャされた動作データは元の動きの特徴を残しつつ制約内に収められる。しかしこの手法が対象とするのは上半身動作のみであり、脚で自立してバランスをとることは考えられていない。ロボットは腰部部位で固定されたものが使用されている。

本研究では2足歩行ヒューマノイドロボットを用いて、脚を含む舞踊動作を自立してバランスをとりながら実演させる。そのような動作の実現は上半身動作のみに比べ難しい。脚は床と接触して体全体のバランスをとらねばならず、これが大きな制約となる。腕に比べ自己干渉も生じやすい。また現在のロボットでは関節の可動範囲もあまり広くはない。このように脚動作には制約が多く、人間から得られた動作データを上半身動作と同様に適用することは難しい。

このため、本論文では脚動作に関して、人間からロ

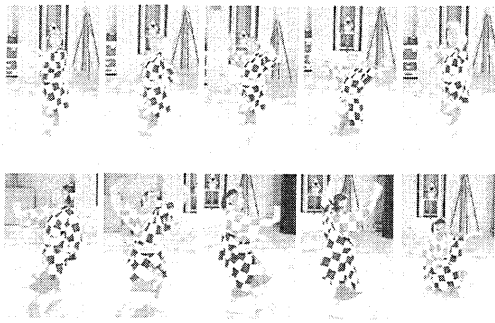


図1: 津軽じょんがら節

ボットへの直接的な動作データ変換を適用するのではなく、まず人間の動作を認識しその認識に基づいて新たにロボット動作を生成するというアプローチを提案する。人間の動作からその基本要素を簡潔な記号として抽出し、その記号列を基に制約を考慮しながらロボット動作を再構成するわけである。このアプローチにより、人間の動作データからの直接的な変換より簡潔にロボットで実行可能な動作を生成することができる。また、様々な舞台環境への対応や振り付けの再構成なども可能になる。

このような、人間の動作の観察・認識からロボット動作を生成するというアプローチで、様々な研究がなされている。稲村ら[2]は一般的な動作に関して、観察と動作生成の繰り返しにより、より良い模倣動作を得るという「ミメシスループ」の概念を提案している。実際の動作認識・生成については、関節角軌道のいくつかのパターンをシンボルとした隠れマルコフモデルを用いており、一般的な動作を扱うことが出来る。ただしこの手法が扱うのは動作の見えが中心であり、複雑なスキルが必要とされるタスクを確実にこなすといった用途には向いていない。これに関しては、タスク対象を特定し先天的な動作の知識に基づいて動作の習得を行うというアプローチでいくつかの研究が行われている。組み立て作業においては物体間の可能な接触状態とその間の遷移が厳密に定義され、それに基づいた動作の認識・生成が実現されている[6]。また、紐を結ぶ動作の認識・生成に関しては結び目理論に基づいた結び目の状態とその遷移が定義され、それを基にした結び目タスクの習得が提案されている[9]。本論文においても同様に対象タスクを舞踊動作に特化し、必要とされる脚動作の要素を定義し、認識・生成はこの要素に基づいて行われる。

舞踊に特化した動作認識・生成に関しては、主にCGによる表現を対象として様々な研究がなされている。湯川らは[11]モーションキャプチャで取得した動作データを舞踊の振り付け単位でデータベース化した「舞踊符」システムを提案している。このシステムにより、新たな振り付けを編集しそれをもとに新たな舞踊のCGアニメーションを生成することができる。ただし振り付けの抽出・分類は人間の専門家の手に委ねている。より機械的な動作記述とその自動抽出として、岡本らは[8] Labanotation [1]を用いた舞踊の認識・動作生成システムを提案している。Labanotationは手先・足先の位置を表す記号を時系列に並べたもので、舞踊における楽譜のようなものとして設計されている。ただし動作記述が機械的で粗いため、直接的に使用した場合、再生成される動作はざこちないものになりがちである。

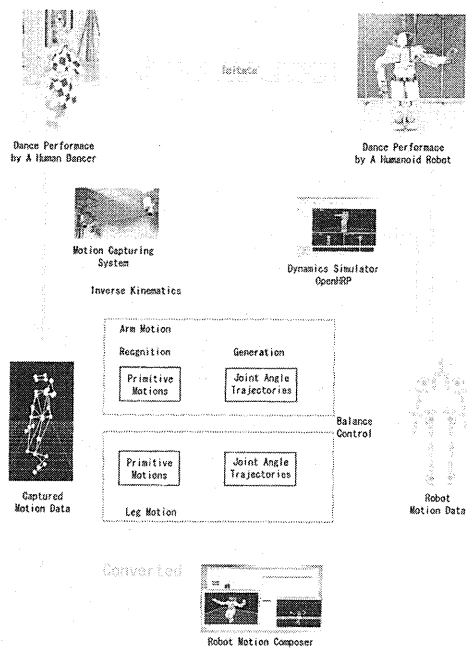


図 2: システム全体図

いずれにしても、これらの研究において生成対象としているのは CG アニメーションであり、そのまま実ロボットの動作生成に適用することはできない。

以上の考察に基づき、本論文ではロボットによる舞踊再演を念頭においた動作記述手法を提案し、人間の舞踊動作からこの記述を得る動作認識と、この記述からロボット動作を得る動作生成手法について解説する。

2 システム概要

本節では、人間の動作から動作要素を認識し、認識された動作要素からロボット動作を生成するまでの一連の流れを説明する。本研究で構築したシステムの全体像を図 2 に示す。

まずモーションキャプチャを用いて人間の舞踊動作をデジタルデータとして取得する。本研究では主に光学式モーションキャプチャの VICON システムを用いて、体に取り付けた 30 個のマーカの 3 次元座標を毎秒 200 フレームの割合で取得した動作データを扱っている。

取得された動作データを直接ロボットの動作データとして使用することはできず、ロボットを動かすための関節角軌道へと変換する必要がある。変換のプロセスは取得された動作データからの動作要素認識と、認

識結果からのロボット動作生成の 2 つから構成される。

動作認識により、動作データから舞踊を構成する最小単位である「動作プリミティブ」の列が抽出される。脚の動作プリミティブの定義とその認識に関しては、3 章で解説する。

現在のシステムでは、ロボット動作生成プロセスは上半身(腕および頭部)と下半身(脚)とで異なるものになっている。上半身動作は取得されたデータからの逆運動学によって得られる関節角軌道をベースとし、それをロボットの制約に適応するよう修正して生成される [5]。この修正時に抽出された動作プリミティブの情報を用いて、舞踊の特徴的な表現をなるべく保存するようにする [4]。一方、脚動作は抽出された動作プリミティブの情報を用いて、新たに生成される。その後上半身動作と脚動作は統合され、力学バランスを満たす動きになるよう腰の軌道が修正される。この脚動作の生成と腰軌道修正については、4 章で解説する。

生成されたロボット関節角軌道を用いて、ヒューマノイドロボットによる舞踊実演が行われる。本研究では OpenHRP ロボットプラットフォーム [3] を用いて動作を検証する。OpenHRP システムでは、シミュレーションと実ロボットとで同じ制御ソフトウェアおよび動作データを用いることができる。力学シミュレータ OpenHRP 上で生成された動作が安定して実行できることを確認した後、実ロボット HRP-1S[7] を動作させる。

モーションキャプチャで取得された動作データからロボットで実行可能な関節角軌道データへと変換する一連のプロセスは、我々の開発したソフトウェアで自動化される。またこのソフトウェアを用いて対話的に変換過程のデータを編集し、3DCG で確認しながら動きを修正することもできる。対象ロボットのモデルデータは OpenHRP と同じフォーマットのファイルで与えるようになっており、様々なロボットに対応することが可能である。

3 脚動作の認識

本論文のアプローチにおいては、まず舞踊を構成する基本的な状態・動作を動作プリミティブとして定義し、各プリミティブの抽出手法も用意する必要がある。我々はこれを以下のように定義した。

3.1 脚動作プリミティブの定義

現在扱っている舞踊においては、図 3 に示すような、両足立ちの状態 (STAND)・踏み出し動作 (STEP)・しゃがみ動作 (SQUAT) の 3 つが舞踊を構成する脚の動作

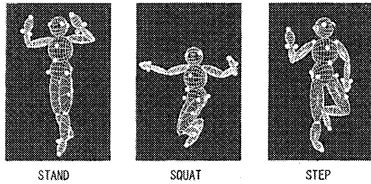


図 3: じょんがら節にみられる脚動作プリミティブの例

要素として観察される。これらを脚の動作プリミティブとし、動作を表すのに必要なパラメータを定義する。これは各動作の特徴を表現しつつもなるべく簡潔なものが望ましい。なお、脚の動作プリミティブとしては他に跳躍や回転といった動作も考えられるが、現在対象としている舞踊においてはこれらの動作は表れないため、本論文では扱わない。

STAND プリミティブは両足を接地しながら上体のバランスをとっている状態である。このプリミティブは動作時間と腰高さをパラメータとしてもつ。

STEP プリミティブはどちらかの足を 1 回踏み出す動作を表す。正確には、一方の足が接地された状態で、もう一方の足が床から離れ再び接地するまでの動作である。接地したままの脚を支持脚、踏み出す方の脚を遊脚と呼ぶ。踏み出し動作は様々な形態をもつが、それを表現するため中間状態を定義する。これは遊脚が床から離れた後もっとも高い位置にある状態をさす。この中間状態と遊脚が再接地する最終状態それぞれについて、その時間と、遊脚の足先の位置および姿勢をパラメータとしてもつ。時間はプリミティブ開始時点を中心として記述され、位置姿勢は支持脚からの相対座標で記述される。また最終状態における腰座標系の向き、即ち腰が支持脚に対してどれだけひねられているか、についても支持脚座標で記述される。なお、踏み出しプリミティブはパラメータとして初期状態を必要としない。初期状態は直前のプリミティブの最終状態を引き継ぐと考え、これによってどんなプリミティブ列の組み合わせにも対応できる。

SQUAT プリミティブは腰がある程度下がり、また元の高さに戻るといふしゃがみ動作を表す。このプリミティブも STEP と同様に中間状態をもつ。中間状態は腰がもっとも低くなる状態であり、その時間と腰高さをパラメータとしてもつ。最終状態はその時間のみが記述される。

以上のプリミティブのパラメータの定義を表 3.1 にまとめる。

なお、位置や高さのパラメータは適当に定義された標準人体モデルに適合する値へと正規化して記述する。

プリミティブ	パラメータ
STAND	- 動作時間 - 腰高さ
SQUAT	- 中間状態・最終状態の時間 - 中間状態において最も低くなった腰の高さ
STEP	- どちらが遊脚/支持脚か？ - 中間状態・最終状態の時間 - 中間状態・最終状態における遊脚の位置と姿勢 - 最終状態における腰座標の姿勢

表 1: 各プリミティブのパラメータ

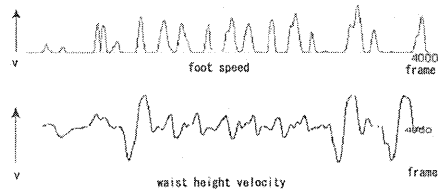


図 4: 足先速度 (上) と腰高さ速度 (下) のグラフ

これにより、様々な舞踊者から得られた動作データからも統一的な記述が得られ、また動作生成においても様々なロボットへの対応が容易になる。

3.2 プリミティブの抽出

プリミティブを抽出する際には、キャプチャされた動作データの関連するマーカの軌道に着目する。

STEP プリミティブの抽出については、図 4 上に示すような各足先の速さのグラフに着目する。このグラフは基本的にいくつかの山形状で構成されており、接地時に足先は固定されていると仮定すると、それぞれの山が 1 回の踏み出し動作に対応する。よって、ひとつひとつの山形状をグラフの脚を遊脚とする STEP として認識すればよい。中間状態は遊脚が最高位置をとる時点として認識される。ただし実際には足先は接地時にも多少はすべて動くものであり、この時も山となって表れてしまう。しかしこれは通常短い軌道にしかならないので、移動距離 (=山の面積) で適当な閾値を設定することにより除去することができる。プリミティブの区間が認識されれば、足先を構成するマーカの座標から、パラメータとなる位置姿勢を抽出することができる。

SQUAT プリミティブについては、図 4 下に示すよ

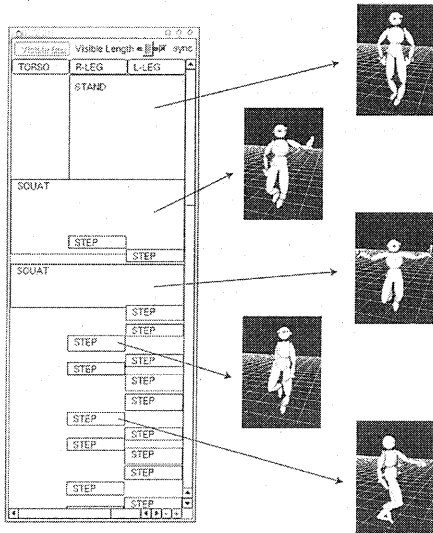


図 5: じょんがら節から認識されたプリミティブ列の例

うな腰の高さ成分の速度グラフに着目する。しゃがみ動作はこのグラフにおいて凹形状と凸形状の組として表れる。それぞれ腰下げ動作と腰上げ動作に相当する。腰高さの軌道がある程度の距離をもっていればしゃがみとして認識する。即ち、軌道の距離が適当な閾値を越えている凹凸の組を SQUAT の区間として抽出する。凹凸の間で速度が 0 になる時点が腰を一番下げた中間状態に相当し、この時間と腰高さをパラメータとして抽出する。

STAND プリミティブは STEP にも SQUAT にも相当しない区間として抽出される。

図 5 は以上の手法によってじょんがら節から認識されたプリミティブ列の例である。

4 脚動作の生成

ロボットの脚動作は、上述した手法で人間の舞踊動作から抽出されたプリミティブ列を基に生成される。まず足先の位置・姿勢の軌道を生成し、そこから逆運動学によって脚の関節角軌道を算出し、これを初期動作とする。次に脚動作と上半身動作を統合し、力学バランスを満たすよう腰軌道が修正される。

4.1 初期動作の生成

脚の動きは腰に対する足先軌道として表現することができるので、脚動作生成においてはまず足先軌道の

生成に集中する。抽出されたプリミティブ列の各プリミティブに対して、以下のようにして足先の位置と姿勢の軌道を生成する。

STEP プリミティブについては、直前の動作の最終状態を初期状態とし、これとプリミティブのもつ中間状態・最終状態を補間することで足先軌道を作る。プリミティブのパラメータは支持脚に対する遊脚の位置姿勢として記述されているが、これを腰に対する支持脚・遊脚それぞれの位置姿勢へと変換した上で軌道を生成する。補間には適当な多項式を用いている。

軌道生成の際、ロボットの制約に応じて中間状態・最終状態は修正される場合がある。制約として接地条件、可動範囲、自己干渉などを考慮する。

接地条件としては、足裏を床に対して完全に水平に接地させる必要がある。人間は足裏を柔軟に変形させ様々な接地状態をとることができるが、現在のロボットでは足裏は剛体であり床に水平に接地させないでバランスをとることはほぼ不可能となっている。足裏に関節をもつ場合でも接地させる部分に関しては同様である。よって、プリミティブがもつ最終状態において、姿勢は床と水平に、位置は床と同じ高さへと制約する必要がある。

足先の可動範囲については、脚を構成する各関節の可動範囲や自由度の違いにより、通常人間に比べ狭いものになる。プリミティブの各状態の位置姿勢が可動範囲を越えている場合、範囲内に収める必要がある。

また、ロボットでは基本的に脚同士が接触することはあってはならず、元の動作に含まれる自己干渉は取り除く必要がある。さらに一般的にロボットの脚は自由度の制約や形状から自己干渉を起こしやすい。よって、プリミティブの各状態において自己干渉を検証し、位置姿勢は干渉を避けるよう修正される。

このようにロボットの脚動作は人間に比べ制約が大きく、動作生成時にはこれら制約の考慮が必要とされる。この点において、プリミティブからの動作生成では基本的にいくつかの足先の状態のみを考慮すればよく、元の動作データから直接的に変換したデータを制約に適合させる場合に比べ、よりシンプルな形で対応することができる。

SQUAT プリミティブについても、STEP と同様に各状態を補間することで生成する。STAND については直前の状態の維持するようにする。

足先軌道が得られたら、脚の関節角軌道を逆運動学により生成する。

4.2 力学バランスとZMP

生成された初期動作の関節角軌道はロボットの関節で駆動できるものになっている。しかし実際にロボットが床上で動作を行うと、ロボットはバランスを失い転倒してしまうことになるだろう。ロボットで実演可能な動作とするためには、力学バランスを考慮する必要がある。

脚動作は支持脚の足裏面が常に地面と水平に接地するという仮定のもと作られている。これは言い換えれば、支持状態において足裏が回転しないということである。この条件はロボットにかかる回転モーメントの垂直成分が0となる点が足裏領域上に存在するとき満たされる。このような点は歩行ロボットの分野で”Zero Moment Point(ZMP)”と呼ばれる。ロボットが両足によって支持されているときは、足裏領域は両足裏で構成される凸領域へと拡張され、これらをまとめて「支持領域」と呼ぶ。

ロボットの物理モデルが与えられれば、関節角軌道からZMP軌道を計算することができる。これは支持領域が無限に広がっていると仮定した上でのZMPに相当する。この計算上のZMPが実際の支持領域の外に存在していると、その動きは足裏の回転を含むことになり、実際には実現不可能なものである。逆に言えば、計算上のZMPが常に支持領域内に収まるような動作を作れば、それは理論上は転倒せず実行できる動作であると言える。

本論文では、初期動作から計算されるZMP軌道とは関係なく、まず目標とすべきZMP軌道をプリミティブ列に応じて作成する。そしてそのZMP軌道を実現するよう、腰軌道に着目して初期動作を修正する。

4.3 目標ZMP軌道の生成

基本的な条件として、ZMPは支持領域内になければならない。しかしこの条件だけでは実際に安定な動作とはならない。ZMPの挙動は極力安定しているべきである。支持状態が常に一定であれば、ZMPは支持領域内の中心に近い安定な位置にとどまっていればよい。しかし踏み出し動作とともに支持状態は変化していくので、これに伴うZMPの遷移が問題となる。本研究では以下のようにして目標ZMP軌道を生成している。

- STEPの間はZMPは支持脚の足首関節直下に位置する。
- STANDの間においては、基本的にはZMPは直前の位置から次のプリミティブの安定な位置まで、

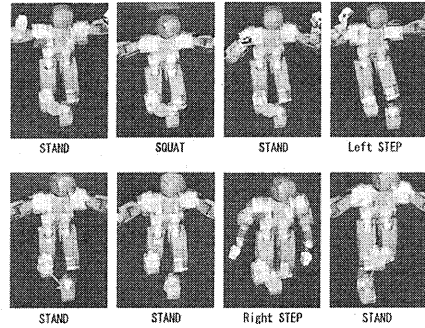


図6: 支持状態遷移に伴うZMPの遷移

端点で速度・加速度ともに0という条件の多項式補間を用いて移動させる。

- STANDの期間が長い場合、ZMPは遷移は以下の3つに分ける。(1)直前の状態から支持領域中心へ(2)中心位置を維持(3)次のプリミティブの安定な位置へ
- STANDの期間が短い場合、ZMPの移動は急激になり動作は不安定になってしまう。より安定な動作を得るためには、より長いZMPの遷移時間が必要とされる。これを得るため、ZMPの移動は直前のプリミティブの後半と直後のプリミティブの前半まで拡張される。

図6は支持状態の変化とそれに伴うZMPの遷移を示している。

4.4 目標ZMP軌道の実現

生成された目標ZMPを実現するよう、初期動作は修正されなければならない。動作データからZMPを算出するのは容易だが、この逆は一般的には解くのが困難である。この問題に関して、西脇ら[10]は修正条件を限定し離散化した計算式を用いることで解決する手法を提案している。この手法では、動作の修正はロボットを構成する全てのリンクが水平方向に同量だけ並進するという制約のもとで、元の動作から計算されるZMPと目標ZMPとの差分から、並進修正量を求めることができる。 x 軸に関して、フレーム*i*におけるZMPの差分を $x_{zmp}^c(t_i)$ 、重心の高さを*h*、1フレームあたりの時間を Δt とすると、並進修正量 $x^c(t_i)$ は以下の式により表される。

$$x_{zmp}^c(i) = \frac{-hx^c(t_{i+1}) + (2h + g\Delta t^2)x^c(t_i) - hx^c(t_{i-1})}{g\Delta t^2}$$

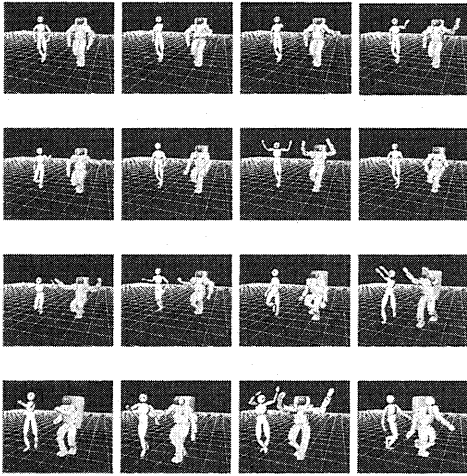


図7: キャプチャされた舞踊動作と生成されたロボット動作

これは連続する3フレームの関係式になっており、 $x^e(t_i)$ に関する三重対角な連立一次方程式として解くことができる。

実際には全てのリンクを同量並進させることは不可能であり、これは腰位置を並進させる動作に近似させることになる。一回の計算では目標ZMPを完全に追従する動作とはならないが、繰り返し計算により結果を収束させることができる。

5 生成結果と考察

脚動作の認識については、図5のように元の動作と一致する動作プリミティブ列を得ることができた。ここでは、生成されたロボット動作の妥当性を検討する。

5.1 見えの妥当性

図7はじょんがら節のキャプチャされた動作と生成されたロボット動作を並べて比較したものである。ここでのアニメーションは力学シミュレーションではなく、接地条件を満たした形での関節角軌道の再生である。

これをみると、生成結果は人間の舞踊をよく模倣した動作になっているように見える。一番顕著な違いとして、大きく踏み出ししたり旋回したりするところで体全体の軌道がずれていってしまうが、これは脚の可動範囲の制約によるもので、現在のロボットではやむを得ない。しかしながら、シンプルな動作プリミティブ

を用いながらも脚の動作をよく表現できていると思われる。

但し、これでは主観的な評価にしかっていない。舞踊の類似性や習熟度を評価する何らかな客観的な手法が必要であるが、これは今後の課題であり、大きなテーマである。簡単な手法としては何らかの身体部分の軌道の差位を評価基準とすることも考えられる。しかし、ロボットと人間では身体構造が異なるため、これはあまり適切な評価手段とは言えない。ではロボットによる習熟した舞踊実演は無理かと言うと、そうとは限らない。なぜなら人間でも身体的特徴が異なる舞踊者が、同じ舞踊に対してそれぞれ高い習熟度をもつことも一般的だからである。このことを考慮した上で、適切な評価手法を確立し、より良い模倣表現を実現できるようにしなければならない。

5.2 力学的な実現可能性

模倣すべき舞踊動作は腕の激しい動作をしながらの不安定な踏み出しを含むもので、転倒せずに最後まで実演できることも重要な評価要素である。これは見えの妥当性に比べ明確に評価することができる。

関節角軌道に関しては関節の制約をみたくよう生成されており問題ない。ここでは体全体のバランス維持について、力学シミュレータOpenHRP上でのシミュレーション結果を検証する。制御コントローラとしては、目標関節角軌道と目標ZMPを与えるとその軌道を足首センサのZMPフィードバック込みのPD制御により実現するものを用いた[7]。なおこのコントローラにおける目標ZMPは微小な外乱に対応し安定性をあげるためのものがある。

まず、バランス修正適用前の動作を実行させたところ、最初の足の踏み出しで転倒してしまった。コントローラの目標ZMPフィードバックがあっても、動作

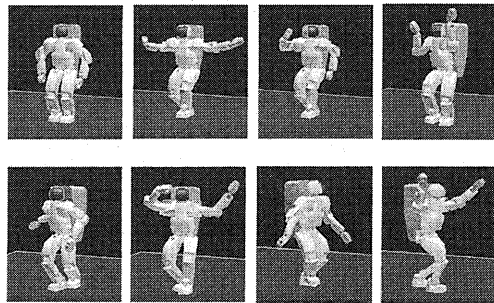


図8: OpenHRPによる力学シミュレーション

そのものの力学的妥当性は必要とされることが確認できた。バランス修正された動作データでは、計算上のZMP軌道も安定し、シミュレーションも最後まで転倒せず実演することができた(図8)。実現可能性という点で、本研究の手法の有効性を確認できた。

但し、まだ実ロボットで実行させられるほど安定な動作とはなっていない。一番の問題は、水平方向の回転成分である。対象舞踊においては脚の踏み出し時の旋回も含まれるが、この旋回時に動作が不安定になって身体がぐらついてしまう。これはZMPは垂直回転成分に関する概念で、水平回転成分についてはそのバランス補償が考慮されていないからである。ある程度の水平方向の回転は支持脚の滑りを引き起こし、これは垂直方向の安定性にも影響を及ぼす。

また、バランス修正適用後も、ZMPの挙動が局部的に不安定になる部分が生じてしまう。ZMPフィードバックなしのコントローラでシミュレーションを行うと、この際に転倒してしまう。これは脚の初期動作を力学を考慮しない単純な補間のみで生成しているため、初期動作において目標ZMPとの解離が大きいためだと思われる。

実ロボットによる安定した実演に向けて、以上の問題に対処する必要がある。

6 まとめ

本論文では、舞踊を対象とした動作プリミティブに基づく模倣動作生成の枠組みを提案し、動作プリミティブの定義と認識・生成のアルゴリズムについて解説した。この手法により、様々な制約により人間の動作データからロボットの動作データへの直接的な変換が困難な脚動作に関して、よりシンプルな形で実行可能な動作を生成することができた。生成された動作は力学シミュレータ上で最後まで転倒せず実行することが確認できた。

今後の課題として、まず実ロボットによる実演に向けて、より安定な動作を生成できるよう改良することが挙げられる。特に力学バランス修正に関して、初期動作の生成においても何らかのかたちで力学を考慮し、また旋回時に水平回転成分を補償できるようにしなければならない。

また、模倣の類似度や習熟度を評価する客観的な手法を確立し、それに基づいてより良い舞踊表現の生成を追求していくことも、大きな課題である。

謝辞

本研究は、科学技術振興事業団・池内CRESTプロジェクトの補助を受けている。

参考文献

- [1] Ann Hutchinson. *Labanotation*. Theatre Arts Books, New York, 1977.
- [2] Tetsunari Inamura, Iwaki Toshima, and Yoshihiko Nakamura. Acquisition and embodiment of motion elements in closed mimesis loop. *Proceedings of International Conference on Robotics and Automation*, April 2002.
- [3] Fumio KANEHIRO, Kiyoshi FUJIWARA, Shuuji KAJITA, Kazuhito YOKOI, Kenji KANEKO, Hirohisa HIRUKAWA, Yoshihiko NAKAMURA, and Katsu YAMANE. Open architecture humanoid robotics platform. *Proceedings of International Conference on Robotics and Automation*, April 2002.
- [4] Atsushi Nakazawa, Shinichiro Nakaoka, and Katsushi Ikeuchi. Imitating human dance motions through motion structure analysis. *Proceedings of International Conference on Intelligent Robots and Systems*, September 2002.
- [5] Nancy S. Pollard, Jessica K.Hodgins, Marcia J. Riley, and Christopher G. Atkeson. Adapting human motion for the control of a humanoid robot. *Proceedings of International Conference on Robotics and Automation*, April 2002.
- [6] Jun Takamatsu, H. Tominaga, Koichi Ogawara, Hiroshi Kimura, and Katsushi Ikeuchi. Symbolic representation of trajectories for skill generation. *Proceedings of International Conference on Robotics and Automation*, Vol. 4, pp. 4077-4082, 2000.
- [7] Kazuhito Yokoi, Fumio Kanehiro, Kenji Kaneko, Kiyoshi Fujiwara, Shuji Kajita, and Hirohisa Hirukawa. A honda humanoid robot controlled by aist software. *Proceedings of the IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots*, November 2001.
- [8] 岡本賢一, 八村広三郎, 中村美奈子. 舞踊譜 labanotation に基づく身体運動データ入力・編集・表示システムの開発. 人文科学とコンピュータシンポジウム じんもんこん 2001 論文集, Vol. 2001, No. 18, pp. 73-80, 2001.
- [9] 森田拓磨, 高松淳, 小川原光一, 木村浩, 池内克史. 観察による紐結び動作の学習. 第135回情報処理学会 コンピュータビジョンとイメージメディア(CVIM)研究会, pp. 71-78, 2002.
- [10] 西脇光一, 北川知伸, 杉原知道, 加賀美聡, 稲葉雅幸, 井上博允. Zmp 導出の線形・非干渉化、離散化によるヒューマノイドの動力学安定軌道の高速生成- 感覚行動型統合全身型ヒューマノイド h6 での実現 -. 第18回日本ロボット学会学術講演会, 2000.
- [11] 湯川崇, 海賀孝明, 長瀬一男, 玉本英夫. 舞踊譜による身体動作記述システム. 情報処理学会論文誌, Vol. 41, No. 10, 2000.