

脚動作の認識に基づく舞踊動作観察学習ロボットの実現

中岡 慎一郎^{†‡ 1} 池内 克史[‡]

[†] 東京大学大学院 情報理工学系研究科

[‡] 東京大学 生産技術研究所

概要：本論文では、二足歩行ヒューマノイドロボットが全身の動作を観察によって人から習得するための枠組みを提案する。対象動作は舞踊とし、ロボットは自脚による身体支持を行うものとする。本研究の枠組みでは、脚に関してどのような動作が行われているかという認識に基づいてロボットの動作を生成する。この枠組みによって、本研究が対象とする安定性・身体特性に関する条件の厳しい動作を扱うことが可能となる。脚動作の本質を表す「脚タスクモデル」を設計し、動作軌道からモデルによる表現を認識する手法と、この表現からロボットで実行可能な動作を生成する手法を開発した。提案手法により、HRP-2 ロボットは人の演じた舞踊を安定に再現することに成功した。

Recognition of leg motions that enables a robot to learn dance motions from observation

Shinichiro Nakaoka^{†‡} Katsushi Ikeuchi[‡]

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

[‡] Institute of Industrial Science, The University of Tokyo

Abstract: This paper proposes a framework that enables biped humanoid robots to learn whole body motions by observing human motions. Our goal is that a robot learns dances and performs them using the legs to support the body. In our framework, what kind of motion is done in legs is recognized, and motion of a robot is generated from the recognition result. The framework can deal with our target motions, which is under severe conditions for stability and physical body properties. We design “leg task models”, which represent essence of leg motions, and develop a method for recognizing the model representation from motion trajectories and a method for generating executable motions of a robot from the representation. Our methods have enabled a robot HRP-2 to stably perform motions reproduced from human dances.

1 はじめに

本論文では、ヒューマノイドロボットが全身の動作を観察によって人から学習するための枠組みを提案する。この枠組みでは、脚動作の習得は観察した動作の理解に基づくことが大きな特徴となっており、これによって二足歩行ロボットが脚を含めた動作を習得し安定に再現することが可能となる。

人がロボットに対してタスクの実演を行うことでロボットがそのタスクを習得できるようになれば、

ロボットへの教示を手軽に行えるようになり、汎用的な機械としてのロボットの活用を幅広げることができる。このアプローチでは、人の動作をいかにしてロボットの行動へと結びつけるかが問題となり、これに関して多くの研究がなされている [1]。

一般的にタスクを実行する際には、教示者とロボットの身体の違いや状況の変化へ対応しなければならない。これに関して、動作の本質を表すモデルによって観察した動作を表現し直し、その表現に基づいてタスクの実行を行う手法が池内らの“Learning from Observation (LFO)”[2] や國吉らの“Learning by

¹2006 年 4 月より、産業技術総合研究所知能システム研究部門に所属

Watching”[3] として提唱されている．特に LFO では，あるタスクドメインに対して作業状態と状態間の遷移のモデルをトップダウンで与え，確実な動作の理解と実行を実現している．この LFO のパラダイムは手作業を対象として研究されており，高松らによって組立作業 [4] やひも結び作業 [5] をタスクドメインとした手法が提案されている．一方で，多数の動作データからボトムアップにモデルを構築していくアプローチもある．この例として，稲邑ら [6] は HMM に基づく身体動作認識・生成の枠組みを提案している．このアプローチでは幅広い動作を対象とする一方で，特定の作業を確実にこなすことは難しくなる．

本研究は，全身を用いた舞踊動作をタスクドメインとして LFO のパラダイムを実現することを目標としている．全身動作を対象とすることで，近年開発の盛んな二足歩行可能なヒューマノイドロボット [7, 8, 9, 10] の活用の幅を広げることができる．また，舞踊という身体を最大限に動かす部類の動作を対象とすることで，全身動作の習得における基本的な課題がより明確になる．さらに，舞踊の価値がそれを再現するロボットの応用的な価値を高めることにもなる．実際，人型であるヒューマノイドロボットの重要な価値のひとつは，人の行う様々な身体表現を行う能力を秘めている点にあり，この能力に対する期待は高い．

複雑な作業をせずに人の動作からロボットの全身動作を生成する手法として，Pollard ら [11] はモーションキャプチャによって得た人の動作軌道をロボットの関節制約内に収め，ロボットで再現する手法を提案している．また山根ら [12] は，キャプチャした動作軌道をマリオネットで再現する手法を提案している．ただしこれらの研究は，自らの脚で身体を支えるロボットは対象としていない．自脚による身体支持を実現するためには，床と足との力学的なインタラクションにおける安定性や整合性を考慮する必要があり，これはより複雑な問題となる．これに関して山根らは，ある身体モデルに対して力学的に不整合な動作データ整合なデータへと変換する汎用的な手法として，“Dynamics Filter”[13] を提案している．ただしこの手法は局所的な整合性のみに着目しているため，身体差異が大きい場合には必ずしも元データの意図する動作を実現できるとは限らず，現在のところ二足歩行ロボット実機への適用はなされていない．田宮ら [14] は全身動作整合化の手法を提

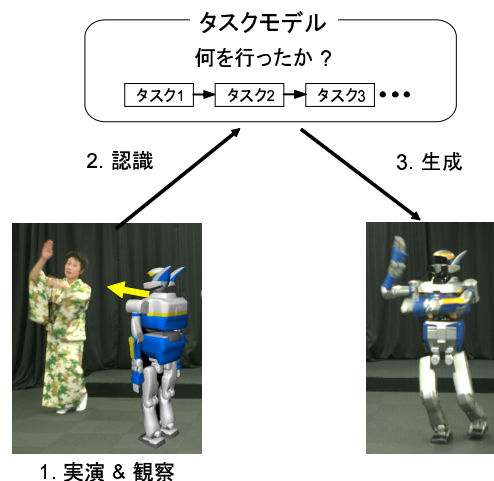


図 1: LFO パラダイムに基づく動作習得プロセス．

案し実機への適用を実現したが，この手法の扱う動作は常にある一方の脚によって支持されるものに限定される．また，黒木ら [9] は，小型のヒューマノイドにおいて脚も含めたダンスの動作を実現しているが，この動作は彼らが開発した動作編集支援ツール [15] を用いて，マニュアルで作成されたものである．

このように，ロボットが人の動作を自脚による身体支持も含めて習得することは今まで実現されておらず，困難な課題であった．この困難は主に脚の動作が担う床とのインタラクションに起因する．この部分をロボットの身体に合わせて適切に処理しなければロボットは容易に転倒してしまうが，一方で元の動作の特長も保持する必要がある．本研究では LFO のパラダイムに従って，脚の動作を抽象的な表現で理解した上で動作を実行することでこの課題を解決する．

以下では，2 節にて LFO パラダイムの詳細を述べ，本研究の課題を明確にする．3 節では本研究の枠組みで中心となる「脚タスクモデル」の設計を示す．このモデルに基づく動作認識の手法を 4 節で，動作生成の手法を 5 節にて解説する．これらの手法を用いた実験結果を 6 節で示し，枠組みの有効性を検証する．

2 LFOパラダイムとタスクモデル

2.1 タスクモデルを中心とした枠組み

図1は、LFOに基づく本研究の動作習得プロセスを示している。まず、人がロボットに対して教示したい動作を実演し、ロボットはこの動作を観察する。次に、観察した動作はタスクモデルが表す動作の基本単位の列として認識される。このようにしてタスクモデルによる動作の表現が得られると、ロボットはこれに基づいて動作を実行する。すなわち、ロボットの動作はモデルによる表現から新たに生成されることになる。

このように、プロセスを「認識」と「生成」の2つに切り分け、教示者とロボットの動作はこれらの中心に位置するタスクモデルを介して結び付けるのが、この枠組みの重要な特徴である。この構造において、タスクモデルは動作の本質を表現することに集中し、特定の身体や状況には依存しないものとする。

舞踊の習得においてこの枠組みは図2のように表される。ここでは、師範の舞踊を弟子が忠実に習得しようとする状況を想定している。この状況で、師範と弟子は身体に関して必ずしも同じ物理的特性をもっているとは限らない。多くの場合、身体部位の配置や形状、全身の質量配分、関節の運動能力などの点で異なる特性をもつ。特にロボットに関してはこれらの差異が大きい可能性が高く、また身体構造の差異も有りうる。このような差異があるため、弟子は師範と全く同一の動きを実現できるわけではない。この状況で弟子が目指すべきことは、まず師範の動きの意図を正しく知り、その意図を自身の身体で可能な限り表現することである。師範の意図はタスクモデルによる表現に相当し、異なる身体をもつ演者の間で共通のものとなる。

この枠組みにより以下の特徴を実現できる。

- 教示者とは異なる身体特性・構造をもつロボットに対応できる
- ロボットの動作は教示者の意図を自身の身体で可能な限り再現したものになる。身体能力の低いロボットへの対応も可能にしながら、身体能力の高いロボットによるより高度な表現も可能にする。
- 身体構造が大きく異なるロボットに対しては新たな生成プロセスが必要となることがあるが、

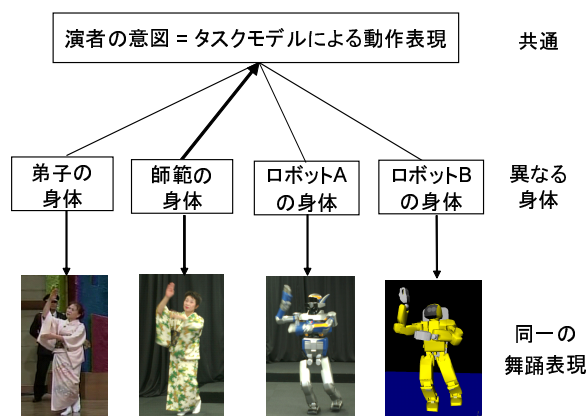


図2: 師範から弟子への忠実な動作習得

この場合でも認識のプロセスや教示結果は共有できる

- 動作観察のデバイスや認識プロセスは生成プロセスとは独立して様々な機器や手法を選択できる

このように、LFOに基づく枠組みは単に実演による教示を可能にするだけでなく、高い再利用性を実現し、システムの利用価値をより高めることができる。この特長を享受するためには、タスクモデルを適切に設計する必要がある。

2.2 タスクモデルへの要求

一般的に、タスクは外部の物体や情報とのインタラクションを含み、多くの場合この中に達成すべき目標がある。通常、インタラクションは不確定な要素や身体に左右される要素を含むため、タスクを実行したある特定の結果を再利用することはできず、そこでみられる動きそのものは目標に対して必ずしも本質的ではない。タスクを確実に実行するためには、タスクが含むインタラクションの対象と、インタラクションにおいて何を達成すべきかを知っている必要がある。LFOではこの情報をタスクモデルによって表現する。

一方で、タスクの種類によっては、動作の表現についても達成すべき目標がある。我々の扱う舞踊はそのようなタスクに分類される。この目標に対して、教示者とは異なる身体でよい結果を得るためには、表現上重要な特徴を左右する動作要素を明確にする必要があり、これもタスクモデルの役割となる。

以上述べたように、タスクモデルが表現すべき動作の本質は、次の2つに分類できる。

- インタクションの対象と目標
- 表現上重要な特徴に対応する動作要素

これらの要素はタスクドメインに依存するものである。LFOでは、対象とするタスクドメインを明確にし、それに対応するタスクモデルをトップダウンで設計するというアプローチをとる。以下では、全身動作において本研究が対象とするタスクドメインを上に挙げた2つの観点に基づいて明確にする。

2.3 身体と床のインタラクション

全身動作で必要となる最も基本的なインタラクションは、身体と床との間の力学的なインタラクションである。これに関して、身体と床への接地に着目して分類した身体動作の一般性を図3に示した。この図において、横軸は床へ直接接触する身体部位の一般性を特に足裏に着目して示しており、縦軸は接触形態の一般性を示している。また、各分類に対して典型的な動作を記した。この分類に従って、動作の実行にあたって必要となる要素を考察する。

分類(a)は、身体と床とのインタラクションを伴わない動作を示している。これは実際には身体が台座などによって安定に支えられている状況で実行される。このレベルの動作における本質は表現上の特徴のみにあると考えてよい。この特徴を身体の制約の中で表現することが動作の目標となる。

分類(b)では、ある一方の足裏のみが常に床上に接触しており、片足立ちを維持しながら行う動作に対応する。この運動では、足裏を介した身体と床との力のインタラクションに関して、転倒せずに足裏の接触を維持することが目標となる。これを達成するため、重心位置や全身のモーメントに関する拘束を新たに考慮する必要がある。

分類(f)では、接触の対象が両足裏となり、それぞれの接触の位置を変化させることがインタラクションの目標に加わる。これを達成するためには、足裏の着地を安定にこなす必要があり、また身体支持に関して接触変化に伴う床半力の変化に対応する必要がある。

さらに、接触形態の一般性があがるにつれ、考慮すべき要素も増える。図3縦軸の「滑り」は、意図的な滑りを含む動作を示しており、スピンなど対

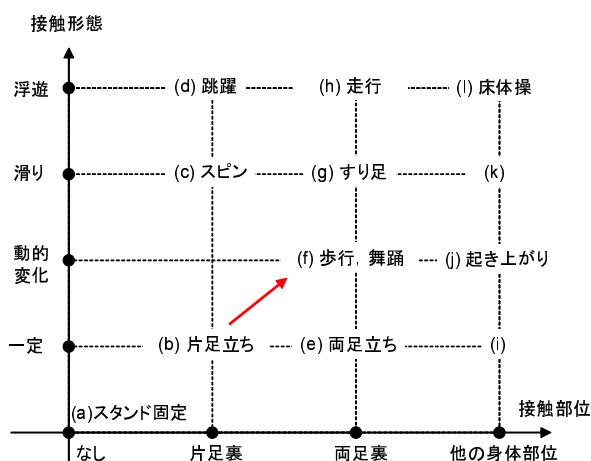


図3: 足裏と床との接触形態に基づく全身動作の分類

応する。これに対しては、ある一定の距離・角度の滑りをおこすことを、インタラクションの目標として達成する必要が生じる。また、全身が空中に浮く「浮遊」の達成がインタラクションの目標に含まれる場合、浮遊状態と接地状態の間の遷移に伴う大幅な床半力の変化に対応する必要がある。

このように、動作の一般性があがるにつれ、インタラクションの対象と目標も多様になり、動作の実行にあたって考慮すべき要素も多くなる。これに対応するため、タスクモデルはインタラクションの対象と目標を明確に表現する必要がある。

2.4 本研究のタスクドメイン

本研究では、以下の条件を満たす舞踊の動作をタスクドメインとして設定する。

1. 2.3節の分類において、(f)で表現可能な動作のみを含む
2. 定められた振り付けを定められたタイミングで実行する

従来、人の動作のロボット実機への適用を実現した例として最も一般的な動作を扱ったのは、図3-(b)を対象とした田宮らによる研究[14]であった。一般性が(b)から(f)に高まることで、脚を活用できるようになり、動作の多様性を飛躍的に高めることができる。

また、舞踊を対象とすることで、2.2節であげた表現上重要な特徴に対応する動作要素も考慮する必要がでてくる。舞踊に関しては共演者とのインタラク

ションによって演技の度に表現が変化するものもあるが、条件2によりこのような舞踊は対象外とする。

本研究ではこのタスクドメインを扱うため、脚の動作に着目したタスクモデルを設計する。

3 脚タスクモデルの設計

3.1 脚タスクモデル

本研究では図3の分類において(f)の動作を対象とすることを述べた。この動作では、上半身は床と接触しない。従って、上半身のみに着目すると、その動作は図3の分類(a)の動作としてとらえることができる。2.3節で述べたように、タスクモデルへの要求は図3の分類に依存するため、上半身を十分活用した動作を行うためには、上半身と下半身(脚)の動作をそれぞれ異なるモデルで表現するのが適切である。

本研究では、これを実現可能な枠組みを構築する。この枠組みで中心となるのが、脚の動作を表現する「脚タスクモデル」である。このモデルは、脚に関して必要となる要素を備えた上で、上半身の動作は脚の動作から分離して扱えるものとする。なお、上半身は腰より上部の身体部位とし、腰の位置の変化は下半身の動作として扱うものとする。

本節では、このような脚タスクモデルの条件と2.4節で設定した対象動作の条件に従って構築したタスクモデルの詳細を解説する。

3.2 タスクとスキル

動作のモデル化は、一連の動作を構成するにあたって基本単位となる動作のまとまりに対してなされる。この基本単位を「タスク」と呼び、同じ種類のタスクを表現するモデルごとにシンボルが与えられる。脚タスクモデルにおいては、図4に示す4種類の動作がタスクとしてモデル化される。各タスクは、脚の動作を構成するにあたって必要となる動作要素に対応して設計されている。この対応を図5に示す。

タスクが「何を行うか」を表すのに対して、各タスクを「どのように行うか」を表すのが「スキル」である。スキルは、各タスクに対して設定された「スキルパラメータ」によって表現される。

以下で、各タスクの詳細を説明する。

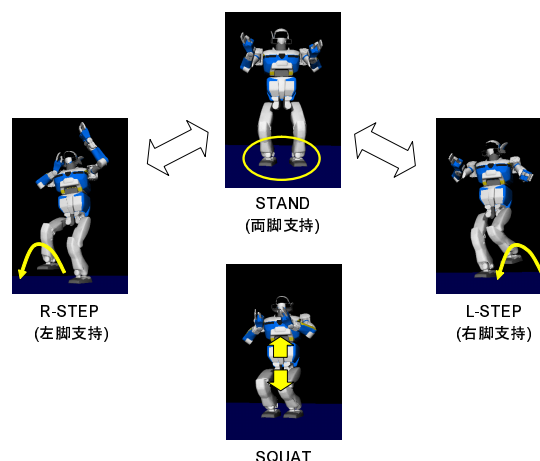


図4: モデル化する脚タスク

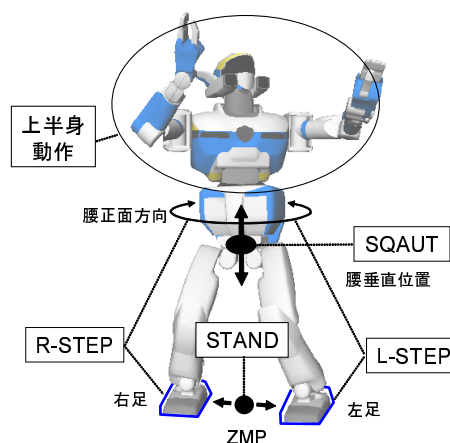


図5: 各タスクの扱う動作要素

3.3 STEP タスク

R-STEP, L-STEP はそれぞれ右足, 左足に関して足裏を床から離し再び接地させるまでの動作に対応する(両者をまとめてSTEPと呼ぶ)。床から離れる方の脚を「遊脚」と呼ぶ。2.4節で設定した対象動作の条件により、タスク実行中にもう一方の脚は「支持脚」として足裏を床の一点への接地を維持する。

STEP タスクは、対象動作が含む足裏と床との接触の変化に対応したものであり、床とのインタラクションにおいて接触を変化させるという目標を明確に示す役割をもつ。これによって、接触変化に伴う床反力の変化に対応して安定に身体を支持しながら動作を行うことが可能となる。

この接触変化の達成を基盤としたうえで、タスクは対象動作において表現上重要な特徴も示す必要が

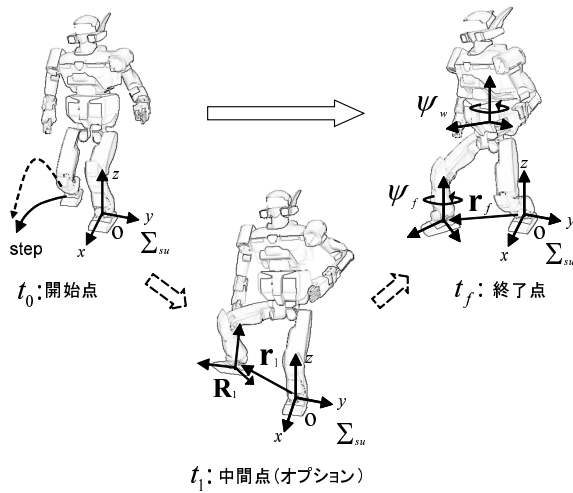


図 6: STEP タスクのスキルパラメータ

ある。これはスキルパラメータの役割であり、STEP タスクについては図 6 に示すパラメータを設定する。

2.4 節で示したように、対象とする舞踊は定められた振り付けを定められたタイミングで実行するものである。接触変化においてこの目的を達成するためには、接触変化の起こるタイミングと位置を振り付けと一致させる必要がある。このためのパラメータが $t_0, t_f, \mathbf{r}_f, \psi_f$ である。

t_0 はタスクの開始時刻を表し、この時刻に足裏を床から離すものとする。 t_f はタスクの終了時刻を表し、この時刻に足裏を床へ着地させる。 $\mathbf{r}_f$ は t_f で足裏が接地する位置を表しており、 ψ_f は接地したときの足先の向きを z 軸まわりの回転角度として表している。これら位置姿勢の値は、支持脚足底の座標系 Σ_{su} からの相対座標として記述される。ただし Σ_{su} の z 軸はグローバル座標の z 軸（鉛直上向きに対応）と一致させる。

このようにして遊脚足裏の目標点が定まれば、足先をタスクの開始時の位置から目標点へと定められたタイミングで移動させればよい。この移動を安定に実行可能な足先の動作軌道は身体に依存する要素を含むため、軌道の決定は動作生成プロセスの問題となる。ただし、遊脚足先の動作が単なる接地点の移動にとどまらない場合、これを動作の特徴として表現する必要がある。これに対応するため、遊脚の軌道に関して中間点を指定して特徴を表現することを可能とする。この場合、中間点の時刻 t_1 と、その時刻における遊脚足先の位置 $\mathbf{r}_1$ と姿勢 $\mathbf{R}_1$ がパラメータに追加され、遊脚足底の動作はこの点を経由

する軌道として表現される。

足裏接地の変化によって引き起こされる動作要素として、身体正面方向のグローバルな変化も考慮する必要がある。これは z 軸まわりの腰の回転角度を Σ_{su} に基づいて記述するパラメータ ψ_w によって表される。

3.4 STAND タスク

STAND タスクは両足を接地させて身体を支持している間の動作に対応する。この間に両足の床への接触を維持し、身体を安定に支持することと、次に実行する STEP タスクへの動作の接続を安定に行うことがタスクの役割となる。これを達成するにあたっては、体重を両足へどう配分してかけていくかが重要な要素となる。これに対応する動作要素として、STAND タスクは ZMP の遷移を行う。この詳細は 5.4 節にて述べる。STAND タスクの実行期間は、STEP と同様のパラメータ t_0 と t_f で表す。

対象動作では常にどちらかの足裏が床に接地している。従って、R-STEP, L-STEP, STAND の 3 種類のタスクに関しては、図 4 に矢印で示すように、STAND を中心とした遷移関係を持ち、どれか一つが時間的に排他的に実行されることになる。

3.5 SQUAT タスク

対象とする舞踊では、あるタイミングである姿勢を表現することが求められる。脚の姿勢に関わる要素として、足先の位置姿勢は STEP タスクによって表現される。これに加えて腰の位置が定まれば、脚の姿勢が決定する。

SQUAT はこれに対応して、腰の垂直位置を変化させるタスクであり、図 7 に示すスキルパラメータをもつ。時刻 t_0 から t_1 にかけて腰の垂直位置を d_1 だけ変化させ、その後時刻 t_f にかけて元の高さに戻す。これによって、腰を落として元に戻す動作を表現する。

SQUAT タスクは他の 3 つのタスクにおける遷移とは独立して機能する。

3.6 腰の水平動作の表現

腰の垂直動作は SQUAT によって直接表現されるが、腰の水平動作を直接表現するタスクは用意され

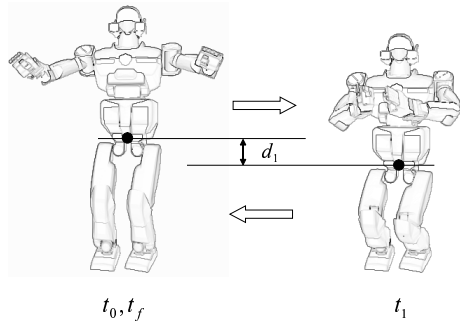


図 7: SQUAT タスクのスキルパラメータ

ない。これは、腰の水平動作が身体支持の力学的なバランスをとるにあたって果たす役割が大きいからである。

特に脚タスクモデルにおいては、3.1 節で述べたように、脚から分離して任意に設定した上半身の動作を扱う必要がある。上半身の動作を変えずにバランスをとるためには、上半身が及ぼすモーメントの影響を腰の水平動作によって吸収する必要がある。

この動作を決定する要素として本質的なのは ZMP であり、ZMP は STAND タスクが扱う要素となっている。この詳細については、5.4 節にて動作生成プロセスの問題として解説する。

3.7 タスク列

各タスクは基本単位となる動作を表現しており、舞踊の一連の動作は多数のタスクによって構成される。すべてのタスクはパラメータとして動作の開始時刻 t_0 と終了時刻 t_f をもつため、一連の動作はそれを構成するタスクが時間軸上に配置された「タスク列」として表されることになる。

すべてのタスクについて、開始時刻 t_0 における位置姿勢はパラメータとしてもたず、直前のタスクの実行結果を引き継ぐよう設計されている。また STEP の位置姿勢のパラメータは支持脚足底からの相対座標で記述されている。これらの枠組みによって、タスク列中の個々のタスクを局所的に変更することが容易になる。この性質は 5.5 節で解説するスキルリファインメントのプロセスにおいて重要となる。

4 動作認識

我々は認識プロセスを実現する手法のひとつとして、モーションキャプチャを入力デバイスとした手

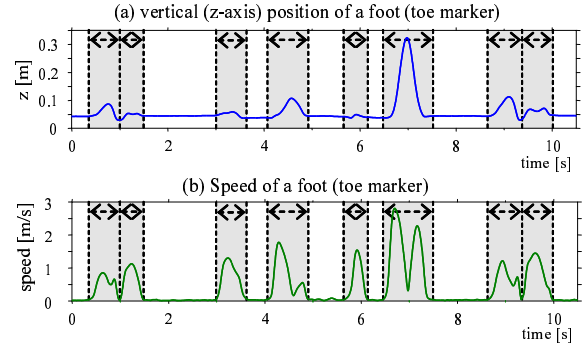


図 8: 足先の軌道の例。塗りつぶされた領域は適当な閾値において STEP タスクとして認識された部分を表す。

法を開発した。本節ではこの手法を解説する。この手法により、脚の各部の 3 次元軌道が得られれば、その軌道から脚タスクの列を認識することができる。

4.1 タスク領域の検出

タスクの認識においては、まず各タスクモデルごとに、そのタスクが機能している時間領域が検出される。

STEP の検出では、足先の速度に着目する。足先マーカの時刻 t における位置を $\mathbf{p}(t) = (p_x(t) \ p_y(t) \ p_z(t))^T$ とし、 $v_p(t) = |\dot{\mathbf{p}}(t)|$ とする。図 8(a), (b) のグラフは、それぞれ $p_z(t)$, $v_p(t)$ の例を示している。一つの STEP に対応する領域は、 $v_p(t)$ において以下の条件を満たす t_0 , t_f 間の領域として検出することができる。

$$v_p(t) \geq v_{step} \quad (t_0 \leq t \leq t_f), \quad \int_{t_0}^{t_f} v_p(t) dt \geq l_{step} \quad (1)$$

v_{step} と l_{step} はそれぞれ速度と移動距離に関する閾値になっており、これによって支持脚として接地している間の微小な滑りなどの動きを検出から除去する。以上の処理を用いて、左右の足先についてそれぞれ STEP に対応する区間の検出を行う。

STEP については、中間点が有効であるかを判定する必要がある。遊脚足先に関して STEP の開始点から終了点への補間軌道を想定し、この軌道と実際の軌道との間で開きがある場合には軌道の表現に中間点が追加される。

補間軌道は 3 次多項式を用いて生成する。時刻 t_i における値が $\mathbf{y}_i$ 、一階微分が $\dot{\mathbf{y}}_i$ である $n(\geq 2)$ 個の点の条件を満たすよう、隣り合う 2 点間の領域それ

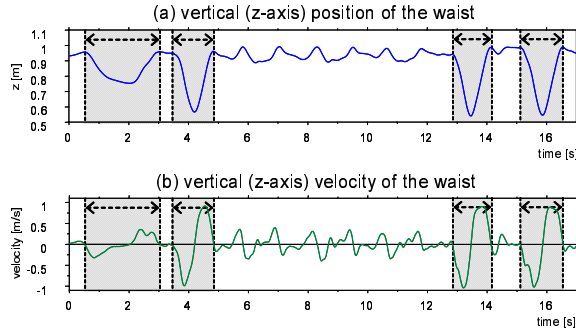


図 9: 腰の軌道の例. 塗りつぶされた領域は適切な閾値で SQUAT タスクとして認識された部分を表す.

それぞれに対して個別に 3 次多項式をあてはめた関数を、以下のように書くことにする.

$$f_n \langle (t_1, y_1, \dot{y}_1), \dots, (t_n, y_n, \dot{y}_n) \rangle (t) \quad (2)$$

ただし $\dot{y}_i$ 省略時は $\dot{y}_i = 0$ とする.

遊脚足先の補間軌道を

$$p'(t) = f_2 \langle (t_0, p(t_0)), (t_f, p(t_f)) \rangle (t) \quad (3)$$

として生成し、元の軌道と補間による軌道との差分 $d(t) = |p'(t) - p(t)|$ と、中間点検出の閾値 d_{step} に関して、

$$d(t_1) = \max_{t_0 < t < t_f} d(t), \quad d(t_1) > d_{step} \quad (4)$$

を満たす t_1 が存在する場合、この時刻で中間点を有効にする.

STAND は R-STEP と L-STEP が検出された後、そのどちらも実行中でない時間領域として検出される.

SQUAT の検出では、腰の垂直位置の軌道に着目する. 図 9(a), (b) のグラフは、それぞれ時刻 t における腰の垂直位置 $h(t)$ とその速度 $v_h(t) = \dot{h}(t)$ を表している. 腰の位置が 1 回下がって元に戻るという SQUAT に対応する動きは、 $v_h(t)$ に関して以下の条件を満たす t_0, t_f 間の領域として検出する.

$$\begin{cases} v_h(t) < 0 & (t_0 \leq t < t_1) \\ v_h(t) > 0 & (t_1 < t \leq t_f) \end{cases}, \quad \int_{t_0}^{t_f} |v_h(t)| dt \geq l_{squat} \quad (5)$$

t_1 は腰の位置が最も低くなる中間点の時刻に対応する. l_{squat} は腰の垂直移動距離に関する閾値で、これによって SQUAT とはみなせない微小な上下動を検出から除去する.

4.2 スキルパラメータの抽出

個々のタスクに関して、タスク検出時に得られた時刻 t_0, t_f , および t_1 はタイミングに関するスキルパラメータの値となる. そしてそれらの時刻におけるマーカの位置関係から、位置と姿勢に関するスキルパラメータの値が抽出される.

STEP で必要となる足底の位置姿勢のパラメータは、つま先、踵、膝などに付けたマーカの情報から得ることができる. 実際には人の足底は形状が柔軟に変化するが、タスクモデルでは単一の位置姿勢で代表して認識する. まずタスク開始点 t_0 における支持脚足底の位置姿勢から相対座標 Σ_{su} を設定する. ただし Σ_{su} の z 軸方向はワールド座標の z 軸と一致させる. そして時刻 t_f に関してマーカから得た遊脚足底の位置姿勢を Σ_{su} における座標に変換したものをスキルパラメータ r_f, ψ_f の値とする. 中間点が有効の場合は、時刻 t_1 におけるパラメータ r_f, R_f も同様にして得る. また、腰の姿勢も腰に付けたいくつかのマーカから算出し、 Σ_{su} における Yaw 角 ψ_f を得る.

SQUAT では t_0 と t_1 における腰の高さを腰のマーカから求め、その差分をスキルパラメータ d_1 として抽出する.

5 動作生成

5.1 概要

本節では、タスク列からロボットの動作データ生成する手法について述べる. ロボットの動作データは制御において最終的に必要となる低レベルなものを指し、各関節の目標角軌道などから構成される. この生成処理により、タスク列による動作表現をロボットで実行することが可能となる.

ロボットの身体は根本的な構造においても他のロボットと大きく異なる可能性がある. 本研究の枠組み自体は特定の構造をもつロボットに限定されるわけではないが、タスク生成手法に関してはロボットの身体構造をある程度特定して構築する必要がある. 本研究で我々が開発した手法は、身体構造に関して以下のような特徴をもつロボットを想定している.

- 角関節は単一回転軸かそれらの組み合わせであり、全身の動作は各軸の角度軌道として表現できる

- 脚の関節は足先が腰に対して6軸方向に動けるよう構築されている
- 各身体部位・関節軸は高い剛性をもつ
- 各関節は高トルクなアクチュエータと直結される
- 足裏は平面で構成される

二足歩行の安定性を飛躍的に高めたホンダのP2[7]をはじめとして、現在までに安定な二足歩行を実現したロボットの多くはこの構造に基づいており、これらのロボットが我々のタスク生成手法の対象となる。

図5に示したように、身体動作はそれを構成するいくつかの要素に分解され、各々の要素に対応するかたちで各タスクモデルが設計されている。タスク生成においては、まず各タスクがそれぞれ対応する動作要素を変化させる。対応するタスクが実行中ではないときは、各動作要素は直前の状態を維持するものとする。これによって定まった各動作要素の状態を統合することで、全身の動作が生成される。

以下では、各タスクの扱う動作要素に着目して、動作生成における課題とその解決について重要な点を述べる。なお、本節の手法の詳細については、我々の論文[16]にて解説している。

5.2 SQUAT タスク

SQUAT タスクは腰の垂直位置を制御する。通常ロボットの腰は定められた標準の高さを維持しているが、SQUAT 実行時にこれをスキルパラメータ d_1 の値に従って変化させる。

時刻 t における腰の垂直位置を $p_{wz}(t)$ とすると、この軌道は式(2)で表される補間関数を用いて以下のように生成する。

$$p_{wz}(t) = f_3((t_0, h_w), (t_1, h_w - d_1), (t_f, h_w))(t). \quad (6)$$

ここで、 h_w は腰の標準の高さを表し、 t_0 , t_1 , t_f , d_1 は SQUAT のスキルパラメータを表す。

このように、タスクに対応する動作要素の状態を、タスクが目標とする状態へと滑らかに遷移させることが、全てのタスクにおいて基本的な処理となる。

5.3 STEP タスク

STEP タスクは、対応する脚の足先を次に目標とする接地点へ移動させる。図6に示す各状態から補間によって足先の軌道を生成し、この軌道に従って足先の位置と姿勢を変化させる。この変化をロボットで安定に実現するにあたっては、足裏と床との接触に関していくつかの条件を考慮する必要がある。

まず、対象とするロボットの足裏は平面で構成されるため、足裏面と床との幾何的な条件として以下を満たす必要がある。

- 安定な身体支持を行うため、最終的に足裏は床への面接触を達成する
- 足先移動時に足裏面の床への干渉（貫通）を起こさない

タスク開始点・終了点間際の足裏の姿勢は、この条件を満たすよう決定する必要がある。

以上の幾何的な条件に加えて、足裏接地時に発生する衝撃も考慮する必要がある。床に対する速度が接地時に0になるように足裏の軌道を生成しても、ロボットの制御においては計画した動作からの多少の乱れが生じるため、足裏が速度を保ったまま床に接触することがある。この場合、接触に伴って衝撃が発生し、動作が不安定になってしまう。特に対象ロボットでは足裏も剛体で構成されるため、人の柔軟な足裏と比べはるかに衝撃が発生しやすい。

衝撃を起こさない安定な着地を行うためには、着地間隙で十分に速度が落ちるよう軌道を計画する必要がある。これを示したのが図10である。グラフ(a)は足先軌道の垂直成分を表しており、グラフ(b)はその速度を表している。この軌道は、着地直前の高さ h_v において速度が v_v を超えないように生成する。式(6)と同様の関数によって足先位置を補間すると、破線のようにこの条件を満たさないことがあるが、この条件を考慮した補間によって実線のような軌道を生成する。これによって、垂直方向の衝撃を抑えることができる。

接地時の摩擦によって発生する水平方向の衝撃を抑えるため、水平成分に関しても同様の軌道を生成する。ただしこの衝撃は垂直方向の衝撃とは特性が異なるため、速度抑制の閾値は垂直成分とは独立して設定する。

以上述べた接地の安定性を左右する足先軌道の要素は、ロボットの身体に依存するものであり、教示

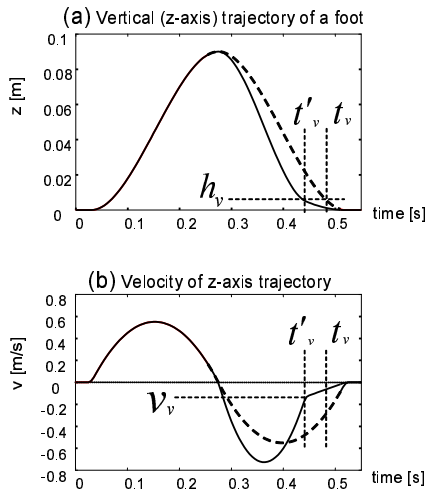


図 10: 衝撃を起こさない足先軌道の生成.

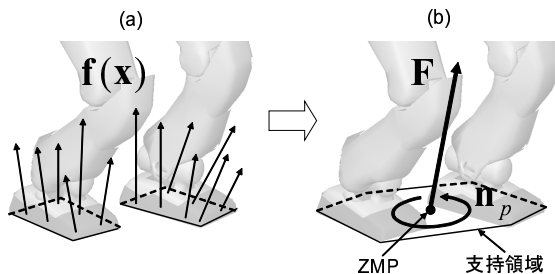


図 11: ZMP の概念

者の足先軌道から得られるものではない。タスクモデルによる表現から動作を生成することにより、元の動作の特徴を保持しながら、このような要素を適切に処理することが可能となっている。

5.4 STAND タスク

STAND タスクは両足を接地させて身体を支持する動作に対応する。この動作の際にタスクは“Zero Moment Point (ZMP)”という動作要素の遷移を行う。これは全身の安定を達成する上で重要な動作要素となる。

ZMP は足裏にかかる床反力を床面の一点で代表させた点である。床反力は通常、図 11-(a) に示すように足裏接触面に分布した力となるが、これは図 11-(b) に示すようにある一点にかかる単一の力と垂直軸まわりのモーメントとして表すことができる。この点が ZMP であり、その名が示すようにこの点で水平軸まわりのモーメントは 0 となる。

5.3 節で述べたように、身体を支持する際に足裏

は床との面接触を行うものとする。従って、支持脚足裏の床への面接触を維持することが、ロボットが転倒せずに計画どおり動作を実行するための条件となる。これに関する足裏の幾何的な条件は STEP タスクによる軌道生成によって満たされるが、これに加えて全身の力学的な条件も満たさなければ、面接触は維持できない。

この問題に対して、ZMP は足裏の面接触の維持を力学的に判定する指標となる。ZMP が図 11 に示す「支持領域」の境界を含まない内部にあれば、水平軸まわりのモーメントのつりあいによって、足裏は水平軸まわりに回転しない。すなわち面接触が保たれる。逆に、足裏が回転する場合、ZMP は支持領域の境界に位置する。従って、ZMP が支持領域内部で境界から離れた位置にくるよう全身の動作を計画できれば、ロボットはその動作を転倒せずに実行できることになる。

本研究の手法では、ZMP の条件を満たした動作を生成するにあたって、以下のプロセスをとる。

1. 目標とする ZMP を決定する
2. 目標 ZMP に従って腰の水平軌道を決定する

最初のプロセスとして、目標 ZMP を決定するのが STAND タスクの役割となる。STAND タスクは以下の 2 つの観点から ZMP の遷移を行う。

- 直前の STEP における ZMP を、STAND の実行において安定な点へと遷移させる
- 直後の STEP において安定な点へと ZMP を遷移させる

なお、STEP 実行時に目標 ZMP は STAND によって決定された点に留まるものとする。図 12 は、目標 ZMP の遷移の例を示している。

両足支持時に支持領域はある程度の大きさをもつため、条件を満たす ZMP の軌道は様々にとることができる。そして、実際に動作を実行する際の安定性はこの軌道にも依存する。より安定な動作を得るため、STAND タスクは以下の基準に基づいて目標 ZMP の軌道を決定する。

- 支持領域境界に近づけない
- 遷移は滑らかに行う
- 起こりうる挙動に近づける

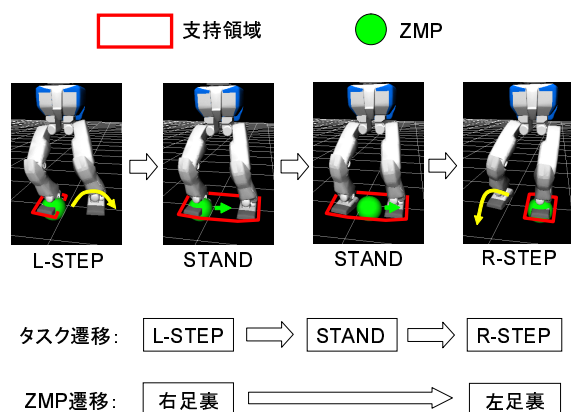


図 12: STAND タスクによる目標 ZMP の遷移

目標 ZMP が定まると、全身の動作によってこれを実現する必要がある。この際有効な動作要素が、腰の水平動作である。この要素は全身が床に及ぼすモーメントに大きな影響を及ぼすため、これを制御することで、実際の ZMP が目標 ZMP と一致する動作を得ることができる。目標 ZMP から腰の水平動作を決定する手法は西脇ら [17, 18] や、梶田ら [19] によって提案されており、本研究では、西脇らの手法を用いる。

以上述べた枠組みにより、様々なロボットで動作を安定に実行することが可能となる。この際、スキルパラメータによって表される脚動作の特徴と、任意に設定した上半身の動作は保存される。このようにして、脚タスクモデルに基づく動作生成の枠組みは効果的に機能する。

5.5 スキルリファインメント

タスク生成では、足裏の面接触とその変化の安定性に着目して、ロボットで実行可能な動作として生成している。しかし、足裏の接触とは別に、生成された動作においてロボットでは実行不可能となる障害が発生することがある。起こり得る障害としては、足先の到達可能範囲の逸脱や自己干渉の発生、関節角範囲や関節角速度リミットの超過などがある。これらの障害は、身体形状の差異やロボットの機構上の制約などにより、人の動作から得たスキルパラメータがそのままではロボットで実行できないことに起因する。このような場合、スキルパラメータをロボットの身体に合わせて修正する必要がある。この処理を「スキルリファインメント」と呼ぶ。

ロボットは自由度が高く形状も複雑であり、動作の生成は多くのプロセスによってなされるため、このような障害の発生は実際にロボットを動作させてみないと分からないことが多い。スキルリファインメントでは、実際にロボットを動かした結果をシミュレーションする。ここで障害の発生を検出すると、各障害の種類に対してあらかじめ与えられたルールによって関連するタスクのスキルパラメータを修正する。その後、タスク生成を修正したタスクからやり直すことで、最終的に障害が発生しない動作を得る。

この処理においては、表現上重要な特徴のみを表すタスクモデルの表現が大きな役割を果たしており、これによって修正候補が絞られていることが重要である。また、スキルパラメータの値は元々人が実行できたものなので、仮にロボットで障害が発生したとしても、多くの場合、障害を起こさないパラメータの解は元の値の近くに存在する。以上の性質より、多くの障害は比較的単純なスキルパラメータ修正ルールによって解消することが可能となる。

具体的なリファインメントのルールとして、今回実験対象とした舞踊動作で発生する障害とそれを回避する修正方法について 6.3 節にて述べる。

6 実験

本研究の枠組みを検証するため、実際の舞踊とロボットを対象として実験を行った。

今回実験で用いた舞踊は「会津磐梯山踊り」である。この舞踊は 2.4 節で設定した対象動作の条件を満たしており、脚を含む全身を活用した特徴的な動作を多数含むものである。この舞踊を女性の師範 A と男性の師範 B に同じ音楽に合わせて演じてもらい、その動きをモーションキャプチャを用いて取得した。取得したデータは 32 個の身体マーカの 3 次元軌道であり、分解能は 1 秒あたり 120 フレームとなる。師範 A, B それぞれのデータに対して、4 回の繰り返しパターンからなる冒頭の 35 秒間を抽出して実験データとした。

また、ロボットは HRP-2[10] を使用した。HRP-2 は全 30 自由度の関節で構成される全身からなる 2 足歩行可能なヒューマノイドロボットで、人と同程度のサイズ（全高 1.54[m]）と重量（56[kg]）を持つ。

実験を進めるにあたっては、我々の開発したロボットの全身動作を扱う統合ソフトウェア [20] を使用し

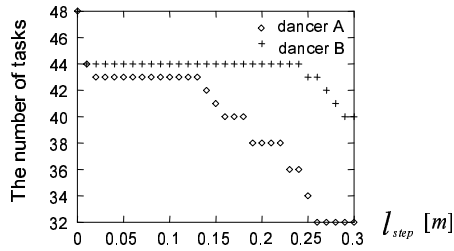


図 13: 閾値 l_{step} と STEP 検出数

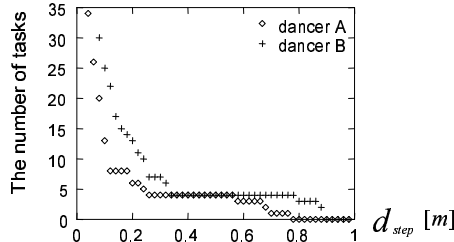


図 14: 閾値 d_{step} と中間点を含む STEP の検出数

た. このソフトウェアに本研究の手法を実装し, 各プロセスの自動化を行った.

6.1 タスク認識の結果

タスクの認識を行うに当たっては, 4.1 節で述べた閾値を適切に設定する必要がある.

図 13 のグラフは閾値 l_{step} と STEP の検出数との関係を示している. これによると, 師範 A の動作では $0.02[m] \leq l_{step} \leq 0.13[m]$ の範囲で検出数が 43 で安定している. l_{step} がこの範囲より小さいと微小な滑りも含んでしまい急激に検出数が多くなり, 逆に大きいとステップしている部分までふい落とされることになる. 同様に師範 B では, $0.02[m] \leq l_{step} \leq 0.24[m]$ の範囲で検出数 44 で安定している. この結果から, STEP を安定に検出できる値として, l_{step} を $0.04[m]$ と設定した. また, v_{step} は $0.04[m/s]$ と設定した.

図 13 のグラフは閾値 d_{step} と中間点が有効と検出された STEP の数の関係を示している. 師範 A では $0.26[m] \leq d_{step} \leq 0.56[m]$ の範囲で検出数 4 で安定しており, 師範 B では $0.34[m] \leq d_{step} \leq 0.78[m]$ の範囲で同じく検出数 4 で安定している. この結果から, d_{step} を $0.4[m]$ と設定した. この設定で検出された中間点は, すべて図 15- (a) に示す足先を大きくあげる振り付けに対応するもので, 出現数も一致している.

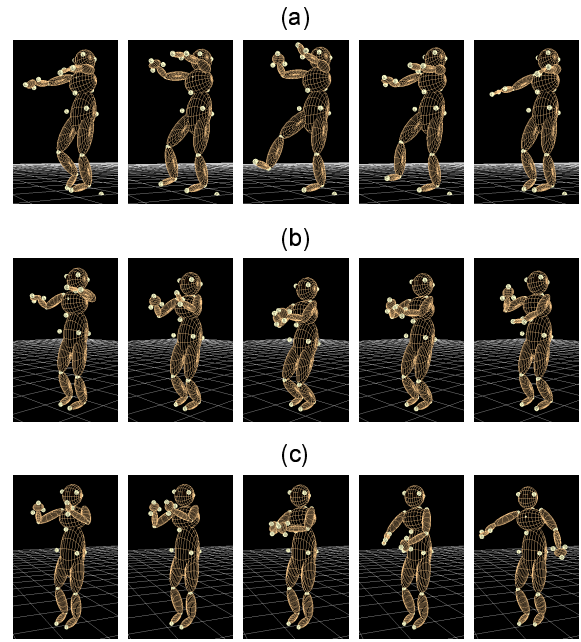


図 15: タスクとして認識された人の動作の例

SQUAT 検出の閾値 l_{squat} は腰の垂直動作の分解能を決めるものである. l_{squat} を $0.12[m]$ と設定して検出を行ったところ, 師範 A からは図 15-(b) に示すような動作が SQUAT として検出された. 一方師範 B は同じタイミングで図 15-(c) に示すような動作を行っており, こちらは SQUAT として検出されなかった. 検出数は, 師範 A が 7, 師範 B が 1 となった.

以上のように, 師範 A と師範 B ではタスクの検出数が異なる結果となったが, これは踊り手の裁量によって舞踊の細かな振り付けが変わっているためだと考えられる.

図 16 は, 師範 A から認識された脚タスク列を舞踊開始から 12 秒経過時まで表したものである.

6.2 上半身の動作生成

3.1 節で述べたように, 脚タスクモデルは上半身の動作を脚の動作から分離して扱えるように設計されている. このため, 人の動作を再現する際には, 上半身に関して人の動作軌道からロボットで実行可能な動作軌道を生成する手法が別に必要になる.

本研究はまず脚動作の枠組みを提案し検証することを目的としているため, 今回の実験では上半身動作に関しては多くを考慮していない. HRP-2 で実行可能な関節角軌道は, シンプルな軌道ベースの動作変換によって生成した. この処理の一部とし

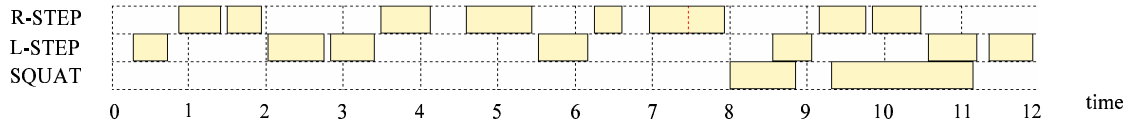


図 16: 師範Aから認識された脚タスク列

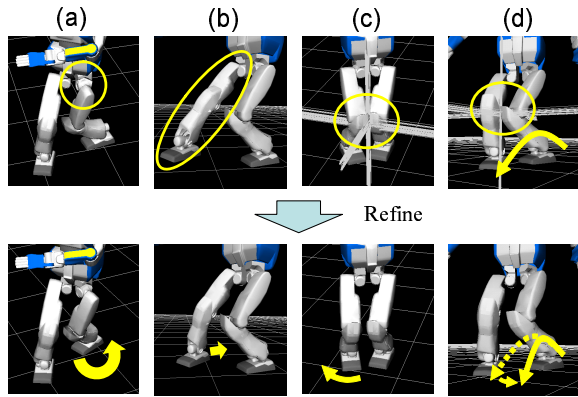


図 17: 発生した障害

て、Pollard ら [11] による関節角速度制限の手法を用いた。

生成された上半身の関節角軌道は、脚タスクからの動作生成時に脚の動作と統合される。

6.3 HRP-2 を対象としたタスク生成

師範 A, B から認識された脚タスク列から、HRP-2 の関節角軌道の生成を行った。

動作生成においては、5.5 節で述べたスキルリファインメントに関して、図 17(a)～(d) に示す障害が発生した。

図 17(a) は支持脚の股関節 Yaw 軸に関する可動範囲の超過である。これは、STEP のパラメータ ψ_w を範囲内に修正することにより解消できる。

図 17(b) は足先到達可能範囲の逸脱である。STEP において遊脚足先が終了点の位置 r_f まで到達できずに、膝関節が完全に伸びた脚の特異点になってしまっている。これは r_f を STEP 開始点の遊脚足先位置へ近づけることで解消できる。STEP の中間点へ向かう途中でこの症状が発生した場合は、中間点の位置 r_1 を開始点と終了点の双方に近づけることにより障害を解消する。

図 17(c) は両脚接地時における膝の干渉である。これは直前の STEP の終了点における遊脚姿勢 ψ_f を修正することにより解消できる。

図 17(d) は STEP の途中で発生した脚同士の干渉である。これは STEP 終了点の位置 r_f と姿勢 R_f を、開始点の遊脚足底から見た座標において支持脚から離れる方向へ回転させることによって解消できる。

また、以上の障害に加えて、脚の膝関節に関する角速度制限の超過も発生した。これに関しては、図 17(b) の障害と同じ修正を施すことで足先の移動距離を少なくし、制限内に収めることができる。今回の実験では、図 17(b) の障害に対する対処によって膝関節の速度超過も同時に解消することができた。

師範 A の動作データにおいては図 17(a) の障害が 3 件、図 17(b) が 8 件、図 17(c) が 1 件、図 17(d) が 2 件発生し、師範 B では図 17(a) が 0 件、図 17(b) が 20 件、図 17(c) が 2 件、図 17(d) が 0 件発生した。師範 B では図 17(b) の障害発生が多いが、これは師範 B が大腿でステップを行う傾向があるためである。

上で述べた障害の種類とその対処法をスキルリファインメントの修正ルールとして実装した。これにより、今回の実験データに関しては、すべての障害を自動的に解消することができた。

以上により、HRP-2 で実行可能な関節角軌道を自動的に生成することができた。この軌道は HRP-2 の身体形状や関節制約に適合し、支持脚足裏の接地時の条件を幾何的にも力学的にも満たしたものである。

6.4 HRP-2 による舞踊の再演

生成された関節角軌道を HRP-2 の制御システムに入力し、実機による動作の再現を行った。HRP-2 は人と同じ演技のテンポで師範 A, 師範 B 両者の舞踊を再演することに成功した。

会津磐梯山踊りは、片脚で立ちもう一方の足と両手を大きく振り上げるといった、不安定で激しい身体動作を含むものであるが、HRP-2 の演技では支持脚の足裏が床面から離れることもなく、安定な再現結果を得ることができた。

図 18 は最終的に実現した HRP-2 と師範 A の会津磐梯山踊りの共演を示している。この共演におい

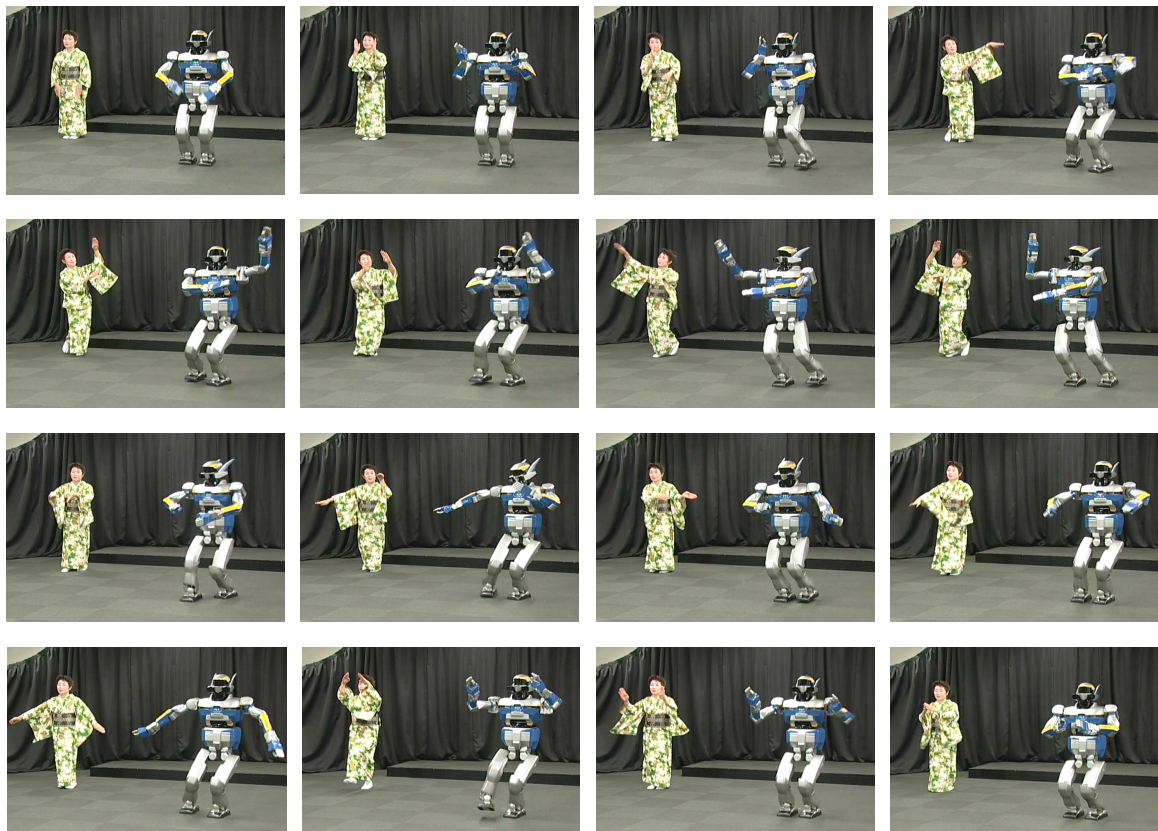


図 18: 師範と HRP-2 による会津磐梯山踊りの共演

て、HRP-2 の動作は師範 A の動作をもとにして生成されたものである。

HRP-2 の舞踊の表現に関して、師範はロボットの動きから動作の元になった演者がどちらであるかを判別した。さらに、脚に関してロボットが自分の動きの特徴をよく表現しているという感想を述べた。

7 おわりに

本論文では、2 足歩行ヒューマノイドロボットが Learning from Observation (LFO) のパラダイムに基づいて人の舞踊動作を習得・再現するための枠組みを提案した。本論文では特に脚の動作に着目し、枠組みの中心として脚動作の本質を表現する「脚タスクモデル」を構築した。また、人の動作軌道から脚タスク列を認識する手法と、脚タスク列からロボットで実行可能な動作データを生成する手法を開発した。この枠組みにより、制約の厳しい脚の動作において、ロボットは人の動作の本質的な要素を保存しつつ、自らの制約に適合したかたちで安定な動作を実現することが可能になった。

我々は本研究の手法を実装し、会津磐梯山踊りと HRP-2 を対象として実験を行った。まず、キャプチャされた人の動作軌道から、その動作に対応する脚のタスク列を安定して認識することができた。次にこの認識結果から、HRP-2 ロボットを対象として動作生成を行った。ロボットの脚の動作においては、足底と床との間の幾何的・力学的な接地の条件、各関節の可動範囲や速度の制限、足先到達可能範囲や自己干渉の回避といった様々な制約があり、人の動作軌道をロボットで実行しようとする、これらの制約に適合しない状況が頻繁に発生する。脚タスクモデルに基づく本研究の枠組みは、これらの制約すべてに適合し HRP-2 実行可能な全身の関節角軌道を、モーションキャプチャによって得た人の動作軌道から自動的に生成することができた。この関節角軌道を用いて、HRP-2 は人と同じ演技のテンポで安定して舞踊の再現を行うことができた。

等身大の 2 足歩行ヒューマノイドロボットが脚の動作も含めて人の舞踊動作を再現したことは、我々が初めて実現した画期的な成果である。また、2 足歩行ヒューマノイドロボットの全身動作に関して

LFO のパラダイムに基づく動作習得が実現可能であることを実証したことも、本研究の重要な成果である。

今後、様々な種類の舞踊の動作を対象とした実験を通して、本手法のさらなる検証と発展を行っていくことが課題である。このためには、舞踊動作の特徴を定量的に評価する枠組みを構築し、これに基づいて手法の比較や評価を行っていく必要がある。また、5.5 節で述べたスキルリファインメントにおいて、十分な一般性をもつ修正ルールを構築することも今後の課題である。これらとあわせて、2.3 節で述べた動作の分類に関してより一般的な動作を扱えるように、本手法を発展させていきたい。

本研究の技術によって、人の身体動作を再現する「メディア」としてヒューマノイドロボットを活用していくことが可能となる。これに関して我々は、ロボットによる実演技として鑑賞可能な舞踊のデジタルアーカイブを構築し、伝統的な舞踊の保存に貢献することを考えている [21]。

謝辞

本研究は、文科省科研費補助金特定領域研究 (C) 課題番号 16016218 および、独立行政法人科学技術振興機構・池内 CREST プロジェクトの補助を受けている。

HRP-2 の使用に関して、産業技術総合研究所ヒューマノイド研究グループの協力を受けた。また、舞踊の動作データ取得に当たっては、会津民謡玉水会と会津大学の協力を受けた。以上の協力に感謝する。

参考文献

- [1] Schaal, S.: Is Imitation Learning the Route to Humanoid Robots?, *Trends in Cognitive Science*, Vol. 3, pp. 233–242 (1999).
- [2] Ikeuchi, K. and Suehiro, T.: Toward an assembly plan from observation, Part I: Task recognition with polyhedral objects, *IEEE Transaction on Robotics and Automation*, Vol. 10, No. 3, pp. 368–385 (1994).
- [3] Kuniyoshi, Y., Inaba, M. and Inoue, H.: Learning by Watching: Extracting Reusable Task Knowledge from Visual Observation of Human Performance, *IEEE Transaction on Robotics and Automation*, Vol. 10, No. 6, pp. 799–822 (1994).
- [4] 高松 淳, 小川原光一, 木村 浩, 池内克史: ロボットによる実行を目的とした人の組み立て作業の理解, *日本ロボット学会誌*, Vol. 22, No. 6, pp. 62–73 (2004).
- [5] 高松 淳, 森田拓磨, 小川原光一, 木村 浩, 池内克史: ロボットによる実行を目的とした紐結び作業の記述, *日本ロボット学会誌*, Vol. 23, No. 5, pp. 572–582 (2005).
- [6] 稲邑哲也, 中村仁彦, 戸嶋巖樹, 江崎英明: ミメシス理論に基づく見まね学習とシンボル創発の統合モデル, *日本ロボット学会誌*, Vol. 22, No. 2, pp. 256–263 (2004).
- [7] Hirai, K., Hirose, M., Haikawa, Y. and Takenaka, T.: The Development of Honda Humanoid Robot, *Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Leuven, Belgium, pp. 1321–1326 (1998).
- [8] Kagami, S., Nishiwaki, K., Jr., J. J. K., Kuniyoshi, Y., Inaba, M. and Inoue, H.: Online 3D Vision, Motion Planning and Bipedal Locomotion Control Coupling System of Humanoid Robot: H7, *Proceedings of International Conference on Intelligent Robots and Systems*, EPFL, Lausanne, Switzerland, pp. 2557–2562 (2002).
- [9] Kuroki, Y., Fujita, M., Ishida, T., Nagasaka, K. and Yamaguchi, J.: A Small Biped Entertainment Robot Exploring Attractive Applications, *Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Taipei, Taiwan, pp. 471–476 (2003).
- [10] 五十棲隆勝, 赤地一彦, 平田 勝, 金子健二, 梶田秀司, 比留川博久: ヒューマノイドロボット HRP-2 の開発, *日本ロボット学会誌*, Vol. 22, No. 8, pp. 1004–1012 (2004).
- [11] Pollard, N. S., K. Hodgins, J., Riley, M. J. and Atkeson, C. G.: Adapting Human Motion for the Control of a Humanoid Robot, *Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Washington DC, pp. 1390–1397 (2002).
- [12] Yamane, K., Hodgins, J. K. and Brown, H. B.: Controlling a Marionette with Human Motion Capture Data, *Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Taipei, Taiwan, pp. 3834–3841 (2003).
- [13] Yamane, K. and Nakamura, Y.: Dynamics Filter - Concept and Implementation of Online Motion Generator for Human Figures, *IEEE Transaction on Robotics and Automation*, Vol. 19, No. 3, pp. 421–432 (2003).
- [14] 田宮幸春, 稲葉雅幸, 井上博允: 人間型ロボットの片足脚動作における全身を用いた実時間動バランス補償, *日本ロボット学会誌*, Vol. 17, No. 2, pp. 268–274 (1999).
- [15] Kuroki, Y., Blank, B., Mikami, T., Mayeux, P., Miyamoto, A., Playter, R., Nagasaka, K., Raibert, M., Nagano, M. and Yamaguchi, J.: Motion Creating System for A Small Biped Entertainment Robot, *Proceedings of the 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Las Vegas, Nevada, pp. 1394–1399 (2003).

- [16] 中岡慎一郎, 中澤篤志, 金広文男, 金子健二, 森澤光晴, 比留川博久, 池内克史: 脚タスクモデルを用いた2足歩行ヒューマノイドロボットによる人の舞踊動作の再現, 日本ロボット学会誌, Vol. 24, No. 3, pp. 112–123 (2006).
- [17] 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的高速生成 - 感覚行動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予稿集, 滋賀, pp. 721–722 (2000).
- [18] 稲葉雅幸, 加賀美聡, 西脇光一: ロボットアナトミー, chapter 5, pp. 282–286, 岩波書店 (2005).
- [19] Kajita, S., Kanehiro, F., Kaneko, K., Fujiwara, K., Harada, K., Yokoi, K. and Hirukawa, H.: Biped Walking Pattern Generation by using Preview Control of Zero-Moment Point, *Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Taipei, Taiwan, pp. 1620–1626 (2003).
- [20] Nakaoka, S., Nakazawa, A. and Ikeuchi, K.: An Efficient Method for Composing Whole Body Motions of a Humanoid Robot, *Proceedings of the Tenth International Conference on Virtual Systems and Multimedia*, Ogaki City, Japan, pp. 1142–1151 (2004).
- [21] 池内克史, 中澤篤志, 小川原光一, 高松 淳, 工藤俊輔, 中岡慎一郎, 白鳥貴亮: 民族芸能のデジタルアーカイブとロボットによる動作提示, 日本バーチャルリアリティ学会学会誌, Vol. 9, No. 2, pp. 14–20 (2004).