人のダンスモーションデータの多様な足の接地状態を保存する ヒューマノイド動作生成法

Humanoid Motion Generation Reserving Human Dance's Various Foot Touch States

小島 邦生 (東大)
岡田 慧 (東大)

野沢 峻一 (東大)
正 稲葉 雅幸 (東大)

Kunio Kojima, The University of Tokyo, k-kojima@jsk.t.u-tokyo.ac.jp
Shunichi Nozawa, The University of Tokyo
Kei OKADA, The University of Tokyo
Masayuki INABA, The University of Tokyo

We developed a generation system of a humanoid dance motion reserving three dance important elements : foot touch state, joint position, and Key-pose. First, the system recognizes 7 kinds of foot touch states in human dance motion using the height and velocity of ankles, the yaw angle velocity and pitch angle of feet, and the trajectory of ZMP. Second, the system calculates humanoid's postures from human's reserving joint positions by using the regression plane of the crotch, knee, ankle, and toe position of each leg. Finally, the trajectory, which is the sequence of the humanoid's postures, is modified not only to satisfy the physical restriction but also to reserve features of each foot touch state and Key-pose.

Key Words: Humanoid, Motion generation, Dance

1 はじめに

近年, ヒューマノイドによる人間のダンス動作を実現する研究が行われている [1, 2]. ヒューマノイドにおいてダンス動作を実現する手法には, ロボットの動作軌道を直接入力する方法と, 視覚教示する方法の 2 つがある. 前者は, 人のダンス動作の詳細を指定することができるが, その入力には時間と労力が必要である. 中岡ら [2] は, 後者の視覚教示により, 動力学のバランスを保つために人のダンス動作を修正する部分と, ダンスの表現として保存すべき重要な要素を切り分けることでヒューマノイドにより人のダンス動作を実現した. 本研究でもそれに習い, 人間のダンス動作を入力としヒューマノイドの動作列を出力とする手法を扱う.

一方, 「ダンスらしさ」に着目すると関節角度や手先足先位置だけでなく, キーポーズ, 関節位置, 足の多様な接地状態の 3 要素が重要であることが知られている. 以下にそれぞれについて概説する.

キーポーズ キーポーズとは全身がほぼ静止した状態の姿勢, 即ち止め動作であり, 白鳥らによってその重要性が示されている [3].

関節位置 ダンス動作の記譜法である舞踊譜 (Labanotation) [4] では, 手先足先の位置だけでなく各関節の位置が表現されており, これがダンスをダンスらしくさせる重要な要素の一つである.

足の多様な接地状態 舞踊譜 (Labanotation) では足先の位置だけでなく, 図 1 に示すように, 足裏の滑りや踵接地, 爪先接地などの多様な足の接地状態が含まれており, ヒューマノイドの動作生成時にはこの情報が重要である.

以上を踏まえて本研究では, 人間のダンス動作のキーポーズ, 関節位置, 多様な足の接地状態の 3 つを保存しながらヒューマノイドにおいてダンス動作を実現する. ただし, 実際に滑りを含む動作をヒューマノイドで実現するのは動力学のバランス補償の観点から難しい部分があるので, 本研究では, 足に体重が乗っている足裏の滑り, 踵・爪先接地等の接地状態は認識のみを行なった.

2 人の動作に基づくヒューマノイドの

Fig.1 Description of Foot Touch State in Labanotation[4]

Fig.2 System Configuration Diagram

動作軌道生成法

1 節で述べたダンスの特徴を保存しつつヒューマノイドの動作軌道を生成する手法のシステム構成図を図 2 に示す. 本研究では, 動力学のバランス補償に先立って 3 節「7 種類の足の接地状態認識」(図 2 (A)), 4 節「関節位置に基づくダンスらしい脚姿勢変換」(図 2 (B)), 5 節「ダンスソフィスティケーション」(図 2 (C)) の 3 段階によりダンスの特徴を保存しながら物理的制約を満たした軌道を生成した.

7 種類の足の接地状態認識では, 足首速度・高さに加え, 足のピッチ角と人の ZMP 軌道を利用することで, 「Ground」, 「Touch」, 「Point」, 「Slide」, 「Draw」, 「Fan」, 「Air」の 7 種類の接地状態を識別した.

関節位置に基づくダンスらしい脚姿勢変換では, 股関節, 膝関

節、足首、爪先の4点の3次元位置に対して重回帰分析を行い4点の回帰平面を求め、人間とヒューマノイドの間で各脚関節位置の誤差の2乗和が小さくなるように脚姿勢変換を行った。足先座標のみで脚姿勢を表現する従来の手法と異なり、本手法を用いることで人間とヒューマノイドの間で膝の位置誤差が小さくなった。

ダンスソフィスティケーションではダンス的制約と物理的制約を満たすように軌道を修正することで、実機で実現可能且つダンスの特徴が保存されたヒューマノイドの動作軌道を生成する。ダンス的制約とは、3節で認識した各接地状態に対応する特徴と、遊脚期に含まれる複数のキーポーズといった、ダンスの重要な要素を保存することである。

3 7種類の足の接地状態認識

ヒューマノイドによる人のダンス動作を実現する際に、中岡ら[2]は足先速度によって接地と非接地の2種類の接地状態を認識している。一方、米倉らは[5]はKinectの深度情報を用いて接地と非接地を認識している。また、ダンス動作の実現ではないが、三浦ら[6]は足首速度と足のヨー軸回りの角速度を用いて接地、非接地とターンの3種類の接地状態を識別している。

1節に示したようにダンスには多様な足の接地状態が含まれる。そこで本研究では「Labanotation」で定義されている足の接地状態の中から以下の7種類を抽出して識別する。

- Ground 足裏と床が面で接していて脚に体重が乗っている状態
- Touch 足裏と床が接触しているが脚に体重が乗っていない状態
- Point 踵や爪先で床に接する動作
- Draw 体重の乗っていない脚を滑らせる動作
- Slide 体重の乗った脚を滑らせる動作
- Fan 爪先ないし踵を中心に足を回転させる滑り動作
- Air 床と接触していない状態

これらの接地状態の特徴を表1に示す。

Table 1 Features of Foot Touch States

接地状態	足首高さ	足首速度	支持脚	その他
接地	Ground	一定以下	肯	
	Touch		否	
	Point		-	足のピッチ角が一定以上
滑り	Fan	-	-	足のヨー軸回りの角速度が一定以上
	Slide	一定以上	肯	並進運動
	Draw		否	
	Air	一定以上	-	否

表1の接地状態の特徴から、足首高さ、足首速度、足のヨー軸回りの角速度、人間のZMP軌道、足のピッチ角度を用いることで各接地状態を図3に示す手順で識別した。支持脚かどうかの判定には、人間の各リンクを質点で表現した多質点系における近似計算で求めたZMP軌道を用いる。右足が支持脚かどうか判断する場合、左足先から右足先までの距離に対する左足先からZMPまでの距離の割合により判定した。また、ダンスにおいて脚が接地している区間(接地区間)で「Ground」と「タッチ」の間で足の接地状態が変化することはないので、足先ないしZMPの平均位置を用いて支持脚かどうかの判定を行い、同一接地区間に対し1つ接地状態を割り当てた。「Slide」と「Draw」の判定も同様に行った。

4 関節位置に基づくダンスらしい脚姿勢変換

股関節に3自由度、膝関節に1自由度、足首関節にロールとピッチの2自由度で計6自由度であるヒューマノイドでは、膝関

Fig.3 Foot Touch State Recognition Method

Fig.4 Ground Fig.5 Touch Fig.6 Point Fig.7 Air

Fig.8 Draw Motion : The right leg's state is "draw".

Fig.9 Slide Motion : The left leg's state is "slide".

Fig.10 Fan Motion : The right legs' state is "fan"

節は股関節、足首、爪先の3点で決定する平面上に必ず存在するのに対し、人間の足首関節はピッチ、ロール、ヨーの3自由度なので、膝関節は股関節、足首、爪先の3点で決定する平面上に存在しない時がある(図11(A)). ヒューマノイドの脚軌道を足先座標のみで表現することがある。しかし、図11(A)の実線で表されるような人間の脚姿勢の場合、足先座標のみから上記のヒューマノイドの脚姿勢を計算すると、図11(B)のように人間とヒューマノイドの間で膝の位置が大きすぎてしまう。なぜならヒューマノイドの股関節、膝、足首、爪先は常に同一平面上にあるので、膝の位置が股関節、足首、爪先で決定する平面上に投影した点になってしまうからである。これはダンスにおける関節位置の重要性に反している。そこで本研究では股関節、膝関節、足首関節、爪先の4点に対して重回帰分析を行うことで求めた4点の回帰平面に各関節位置を投影した。投影された各関節位置での足先座標によりヒューマノイドの脚姿勢を計算することで、人間とヒューマノイ

ドの間で各関節位置の2乗誤差が最小となるように脚姿勢変換を行った(図11(C)). 脚姿勢変換で足先座標のみを用いた場合と回帰平面を用いた場合を比べると、回帰平面を用いた場合の方が人間とヒューマノイドの間で膝関節位置の誤差が小さいことが分かる。

Fig.11 Comparison of Two Posture Mapping Methods : The left lower shows a humanoid's posture calculated from foot end coordinate, and the right lower shows a humanoid's posture calculated from regression plane.

5 ダンスソフィスティケーション

実際のヒューマノイドで動作を実行するためには、物理的制約を満たさなければならない。一方、行う動作がダンスである以上1節で挙げたダンスで重要な要素を保存しなければならない。そこで本研究では以下のように物理的制約だけでなくダンス的制約を充足する脚軌道生成を行う。これを「ダンスソフィスティケーション」と呼ぶ。

物理的制約

1. 左右の脚が干渉していない
2. 接地脚が床から離れていたり床に食い込んだりすることがない

ダンス的制約

1. 3節で識別した各接地状態に対応する特徴を保存する
2. 遊脚期における複数のキーポーズを保存する

まず、ダンス的制約1の充足方法について説明する。「Point」と「Draw」における足の床への食い込み除去への対処を例に挙げる。「Point」は表1から分かるように足のピッチ角度が重要な特徴なので、足の位置を高くすることで床との干渉を回避する(図12(1))。一方、「Draw」は足の高さが低いことが特徴なので、足を床に平行な姿勢に近づけることで床との干渉を回避する(図12(2))。

このように足の床への食い込みを除去するという同一の物理的制約に対し、接地状態に応じて対処法を変えることで各接地状態の特徴を保存しつつ物理的制約を充足する。

Fig.12 Avoidance of Interference to Floor in "Point" and "Draw"

次にダンス的制約2について説明する。ヒューマノイドの遊脚軌道生成の際に遊脚期開始点、中間点、終了点の3点のスプライン補間を行うことがある。しかし、ダンス動作においては複数のキーポーズを含む遊脚期が存在し、そのような場合に上記のように軌道生成するとそれらのキーポーズが失われてしまう。そこで本研究では主にキーポーズを含まない区間を軌道修正することでキーポーズを損なわない軌道生成を行った。

図13に示すようなキック動作の生成を例に挙げる。キーポーズは手足や重心の速度極小点に現れる[3]ので、足首速度のグラフ(図13上段)からこのようなキック動作では

- 「足を引き上げる」(図13 キーポーズ①)
- 「足を前に蹴り出す」(図13 キーポーズ②)

の2つのキーポーズが抽出される。接地脚の床からの浮遊を除去する(物理的制約)ことで接地期と遊脚期の境界の足先軌道にギャップが生じてしまう(図13(a))。そのギャップを吸収する際に、キーポーズが含まれない遊脚期開始点-足首速度極大点間と遊脚期終了点-足首速度極大点間(図13(b))の軌道を修正する。これにより2つのキーポーズでの足首高さが保存されていることが分かる(図13下段)。足先高さ以外の成分も同様にして軌道生成することでキーポーズにおける各値を保存する。

Fig.13 Generation of Leg Trajectory Reserving Key-poses

6 生成したダンス動作の HRP-2 による実現

本研究では HRP-2 を用いて生成したダンス動作軌道を実現した。また、動力学的なバランスのとれた動作軌道生成するため

にロボットの統合GUIアプリケーション開発フレームワークである「Choreonoid」[7]のBalancerPluginを利用した。ChoreonoidのBalancerPluginは、足底が床と滑ることなく面で接地することを条件とした西脇らのZMP制御[8]を行なっている。そのため、識別した7種類の接地状態のうち、支持脚の滑り動作である「Slide」、「Fan」を除く、「Ground」、「Touch」、「Point」、「Draw」、「Air」の5種類の接地状態を含む動作を実機で行った。また、上記の条件を満たすため「Touch」、「Point」、「Draw」はヒューマノイドの足を床から少し浮かせた状態で行った。

本研究で行ったダンス動作軌道を図14に示す。1コマ毎に写っているものは、それぞれ左から順にモーションキャプチャにより足の接地状態を識別したもの、ダンス的制約と物理的制約を満たしたヒューマノイドの実現可能な軌道、HRP-2による実機実験の様子を表している。ダンス動作における多様な接地状態を識別し、それぞれの接地状態に対応する特徴が保存されていることが確認できる。

7 おわりに

本研究では、人間のダンス動作からヒューマノイドのダンス動作を生成するために、7種類の足の接地状態を認識し、脚関節位置を考慮した脚姿勢変換と、足の各接地状態の特徴とキーポーズを保存した脚軌道修正により動作を生成する手法を提案した。この手法を用いることで、1節で挙げた人のダンス動作の中で重要な3つの要素を保存したヒューマノイドの動作軌道を生成し、それをHRP-2により実現できることを示した。バランス補償方法を足の滑りに対応したものに拡張することで7種類の接地状態全てを含んだ、ターンや滑り動作といったより人間らしいダンス動作が実機にて実現できるようになることが期待され、本研究の手法はその布石となる。

文 献

- [1] 中澤篤志, 中岡慎一郎, 白鳥貴亮, 工藤 俊亮, 池内克史. 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-. 情報処理学会研究報告. CVIM, [コンピュータビジョンとイメージメディア], 第113巻, pp. 31-39, 2004.
- [2] Shin'ichiro Nakaoka, Atsushi Nakazawa, Fumio Kanehiro, Kenji Kaneko, Mitsuharu Morisawa, Hirohisa Hirukawa, and Katsushi Ikeuchi. Learning from observation paradigm: Leg task models for enabling a biped humanoid robot to imitate human dances. *International Journal of Robotics Research*, Vol. 26, No. 8, pp. 829-844, August 2007.
- [3] 白鳥貴亮, 中澤篤志, 池内克史. モーションキャプチャと音楽情報を用いた舞踊動作解析手法. 電子情報通信学会論文誌. D-II 情報・システムII-パターン処理, 第8巻, pp. 1662-1671, 2005.
- [4] Ann Hutchinson. *Labanotation: The System of Analyzing and Recording Movement*, chapter 7 and 8 and 13 and 14, pp. 65-98 and 179-217. Routledge, 2005.
- [5] 米倉健太, 中岡慎一郎, 横井一仁. 人の全身姿勢からヒューマノイドの全身姿勢を入力するインタフェースの開発 (その2). 第12回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会 (SI2011), 第1C1-1巻, 2011.
- [6] K. Miura, M. Morisawa, S. Nakaoka, K. Harada, K. Kaneko, and S. Kajita. Robot motion remix based on motion capture data - towards human-like locomotion of humanoid robots -. In *Proceedings of The 2009 IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots*, pp. 596-603, 2009.
- [7] Shinichiro Nakaoka, Shuuji Kajita, and Kazuhito Yokoi. Intuitive and flexible user interface for creating whole body motions of biped humanoid robots. In *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2010.
- [8] 西脇, 北川, 杉原, 加賀美, 稲葉, 井上. 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予稿集, pp. 721-722, 2000.

Fig.14 Dance Motion of Human and HRP-2 : The left shows a motion-capture data, the center shows the generated motion, the right shows the real machine motion.