学術・技術論文

# 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

**→**\*3 志\*2 男\*3 中 出 值一郎\*1 中 澤 筐 金広 文 余 子 久\*<sup>3</sup> 晴\*3 比留川 博 池内 克 中\*4 澤 光

# Leg Task Models for Reproducing Human Dance Motions on Biped Humanoid Robots

Shinichiro Nakaoka<sup>\*1</sup>, Atsushi Nakazawa<sup>\*2</sup>, Fumio Kanehiro<sup>\*3</sup>, Kenji Kaneko<sup>\*3</sup>, Mitsuharu Morisawa<sup>\*3</sup>, Hirohisa Hirukawa<sup>\*3</sup> and Katsushi Ikeuchi<sup>\*4</sup>

In this paper, we propose a method that enables a biped humanoid robot to reproduce human dance motions with its whole body. Our method is based on the paradigm of *Learning from Observation*. In this study, a robot uses its own legs to support the body during a dance performance. We propose *leg task models*, which can solve the problems caused by severe constraints in adapting human motions to the legs of a robot. First, elements of the leg task models are recognized from motion data captured from human performances. Then motion data of a robot is regenerated from the recognized elements so that the motion is stably executable on the robot. Our method was verified by experiments on a humanoid robot HRP-2 using a traditional folk dance. HRP-2 successfully performed dance motions that were automatically reproduced from motion data captured from human dance performances.

Key Words: Learning from Observation, Human Body Motion, Biped Humanoid Robot, Motion Capture, Dance

#### 1. 序 論

本研究では、人の舞踊動作を習得・再現することのできるヒュー マノイドロボットを、"Learning from Observation (LFO)"の パラダイム[1]を用いて実現する.ロボットは2足歩行型のもの とし、脚も含めた動作の再現に着目する.LFOは、作業対象を 特定したうえでロボットに何らかの作業手順を効率的に習得さ せるためのパラダイムで、Fig.1に示すような三つのステップ からなる.まず人がロボットに習得させたい作業を実演し、ロ ボットはこれを観察する.次にロボットは一連の動作をいくつ かの基本的な動作の列として認識する.そして、ロボットによる 作業の再現は、認識された動作列をロボットの身体や環境に合 わせて実行することで行われる.認識と実行で用いられる基本 動作の表現には、作業対象に関する知見に基づいてあらかじめ

原稿受付 2005 年 6 月 28 日

- \*3産業技術総合研究所知能システム研究部門
- \*4東京大学生産技術研究所
- \*<sup>1</sup>Graduate School of Information Science and Technology, The University of Tokyo
- <sup>\*2</sup>Cybermedia Center, Osaka University
- \*<sup>3</sup>Intelligent Systems Research Institute, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology
- $^{\ast\,4} \mathrm{Institute}$  of Industrial Science, The University of Tokyo



1. Demonstration and Observation

Fig. 1 Concept image of the LFO paradigm. A robot learns and executes a performance through the three steps shown. Recognition and execution are based on task models defined from the top down

トップダウンに設計したモデルを用いる.本論文ではこのモデ ルとして,全身を用いた舞踊動作における脚の動作を扱う「脚 タスクモデル」を提案し,LFOのパラダイムがこの種の動作の 習得に有効であることを示す.

身体動作の観察には,近年発達してきたモーションキャプチャ 機器を用いるのが有効であり,これにより身体各部の詳細な動 作軌道を得ることができる.ただし,この動作軌道をそのまま

<sup>\*1</sup>東京大学大学院情報理工学系研究科

<sup>\*2</sup>大阪大学サイバーメディアセンタ

ロボットで実行することはできない. ヒューマノイドロボットは 人体に似せて設計されてはいるものの,実際には関節構造(自 由度・可動範囲)や身体形状,組成などで人体と異なる部分も多 く、身体能力(関節アクチュエータ性能)の点でも制約が多い ためである. この問題に対して,ロボットを人体に近づけるべ くハードウェアを改良することも考えられる.しかし,動作習 得における教示者が異なればその身体特性や身体能力も異なっ てくるため,教示者を特定しないためには,身体の差異の問題 を本質的に解決する必要がある.

特にロボットが自らの脚で身体を支持しながら全身の動作を 再現しようとすると、この問題は難しくなる.ロボットが全身 のバランスをとって転倒しないために脚の動作は大きな役割を 担うが、これを人とは異なる重量配分や機構の下で行う必要が ある.また、人の足底は踵からつま先まで活かした柔軟で衝撃 の少ない接地が可能であるが、現在の一般的なロボットでは足 底は硬い板状のもので自由度も少なく、安定な接地や支持を行 うに当たって足底の動きは厳しく制限される.このような脚特 有の制約に加え、関節や身体形状の差異に起因する制約や元の 動作の特徴も考慮する必要がある.

このような厳しい制約の下では、人の動作軌道をロボットの 動作軌道へと変形させることは非常に複雑な問題となり、そも そも同じ動作を行うといっても、人とロボットで動作軌道の詳 細は変わらざるを得ない.しかし、動作においては保存すべき 本質的な部分と、身体の違いに適応していくべき部分があると 考えられる.LFOの枠組みでは、動作を表すモデルによって この両者を明確に区別する.保存すべき本質的な部分はモデル の要素として人の動作軌道から認識する.この情報を基盤とし て、ロボットは自らの身体を考慮しながら改めて動作を実行す る.この枠組みは厳しい制約の下にある脚の動作に関して効果 的に機能し、元の動作の特徴を表現しながらロボットで安定に 動作を再現することが可能となった.

本論文の構成を以下に示す.まず2章で関連研究について述 べる.次に3章で脚タスクモデルの詳細を示す.4章では脚タ スクモデルに基づいて人の脚の動作を認識する手法について,5 章では認識した結果からロボットの動作を生成する手法につい て解説する.6章ではまず再演に至るプロセスをまとめ,実際 の舞踊と実ロボットを対象とした実験の結果を示す.最後に7 章で考察を,8章で結論を述べる.

# 2. 関連研究

人型であることが表現にとって本質的に重要である動作を行わせることは、ヒューマノイドロボットの価値ある応用の一つである.そのような応用として、踊るヒューマノイドロボットに関する研究が多数存在する[2]~[7].

モーションキャプチャを用いた研究として, Pollard ら [4] は キャプチャした人の動作軌道をロボットの関節制約内に収める 手法を提案しており,山根ら [5] はキャプチャした動作データを もとに,マリオネットの紐を制御する手法を提案している.ま た池浦ら [8] は,人より取得した踊りの動作を表現できる最小の 自由度を求めるための解析を行っている.これらの研究は,そ れぞれ人の動作を人とは異なる機構に対し適用する問題を解決 しており有用なものであるが、自らの脚で身体を支えるロボットを対象としているわけではない.1章で述べたように脚への 動作適用に関しては制約が厳しく、これらの手法では解決でき ない困難がある.

一方,黒木らは小型の2足歩行ヒューマノイドにおいて,脚 も含めた全身を使ったダンスを実現している[6].ただしこの研 究では,ロボットの動作は人から取り込まれたものではなく,初 めからロボットに合わせて作成されている[9].

これらの踊るロボットの関連研究と比較して、本研究は以下 の特徴を同時に実現するという点で新規性をもつ.まず、ロボッ トの動作は実際に人が演じた既存舞踊の動作から生成される. そして、ロボットは等身大で2足歩行型のものとし、ロボット は自らの脚によって身体を支持しながら舞踊を行う.

人の動作を観察することでロボットに作業を習得させる観察学 習のパラダイムは、池内らによる LFO [1] と同時に國吉ら [10] によっても提唱された.これらの研究では、作業対象をある程 度特定した上で構築した動作のモデルを用いている.一方、一 般的な作業を対象としてボトムアップに動作要素を構築してい くアプローチがあり、稲邑ら [11] 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.ただしこの手法は他の物体 や環境とのインタラクションを十分考慮しておらず、組み立て 作業や脚による身体支持を伴う作業をこの手法だけで再現する のは難しい.

一般的に動作軌道を異なる身体へ適用する手法として、山根 らは力学的に不整合な動作軌道を整合のとれた動作軌道へと変 形する「ダイナミクスフィルタ」を提案している[12].ただし、 この手法は主に局所的な整合化の処理からなっており、身体差 異が大きくなると、大域的な面での動作の安定性や再現性が満 たされない可能性が高くなる.この性質により、舞踊の激しい 動作を身体差異の大きなロボットで安定に再現するという我々 の課題に対しては、この手法は適用しづらい.

#### 3. 脚タスクモデル

脚タスクモデルでは、いくつかの基本となる脚の動作が「タ スク」としてモデル化されシンボルが与えられる. 各タスクは 様々な動作のバリエーションを表現できるようになっており、そ の特徴は各タスクについて定義されたいくつかの「スキルパラ メータ」によって表される. タスクは「何を行うか」に対応し、 スキルは「どのようにタスクを行うか」に対応する. これらは 対象とする動作の本質に着目しトップダウンで設計する.

#### 3.1 タスク

タスクとしては **Fig.2**に示すものを定義している. R-STEP, L-STEP はそれぞれ右足, 左足に関して足底を床から離し再び 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). STAND 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.これら R-STEP, L-STEP, STAND のタスク は, Fig.2 の矢印で示す遷移関係をもち,どれか一つが時間的 に排他的に実行される.これらのタスクは足底と床の間の接触 変化と対応しており,脚の「支持状態」({左脚支持,右脚支持, 両脚支持})とその変化を明確に示す.これは脚の動作を安定 に実行するにあたって必要不可決な情報である.



390

SOUAT

Fig. 2 The defined tasks. Arrowheads indicate transition relationship between tasks. Labels in parentheses show the support state

SQUAT は、腰を落として元に戻す動作に対応する. これは、 他の三つのタスクにおける遷移とは独立して機能する. なお、 SQUAT は腰の垂直方向の動きに対応するが、水平方向の動き に直接対応するタスクは定義されない. 腰の水平動作は全身の バランス維持に関する拘束を受け、STAND タスクによって間 接的に制御される. この詳細は 5.2 節~5.3 節にて解説する.

本研究では以上のタスクを用いて、「床に接する身体部位は 足底のみ」で、「少なくとも片方の足底が常に接地」しており、 「接地している足底は床に対して滑らない」という条件を満たす 脚の動作を扱うものとする.

3.2 スキルパラメータ

各タスクの動作のタイミングと動きの特徴は,**Table 1**に示 すスキルパラメータによって表現される.

すべてのタスクは動作の開始時刻 $t_0$ と終了時刻 $t_f$ をパラメー タとしてもつ.これによって、各タスクの動作期間が決定され、 脚の一連の動作はいくつかの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.これらのタイミングをお さえ動きのリズムを正確に表現することは、舞踊の表現におい ては欠かすことができない.

STEP における位置姿勢のパラメータは、すべて支持脚足底からの相対座標  $\Sigma_{su}$  に基づいて記述される.なお、本論文における座標系は z 軸正方向が鉛直上向きに対応するものとする.ステップ中支持脚足底は床上で動かず、また  $\Sigma_{su}$  の z 軸は世界座標における z 軸と一致(足底面と床面が一致)するものと仮定する.**Fig.3**は STEP におけるスキルパラメータの位置関係を示したものである.

 $\mathbf{r}_f = (r_{f \cdot x} r_{f \cdot y})^T$ は遊脚足底がタスク終了時点  $t_f$ において 接地するときの水平位置を表す.また,  $\mathbf{R}_f$ はこの時点の足底 の姿勢を表す行列である.これらにより,遊脚足底の動作はタ スク開始前の位置姿勢からタスク終了点の位置姿勢への滑らか な軌道として表現される.ただし,STEPの最中に遊脚足先を 大きく上げるなどの特徴的な軌道を描くことがある.このよう な場合は中間点として、時刻  $t_1$  とその時刻における遊脚足先の

**Table 1** Skill parameters.  $\Sigma_{su}$  is the local coordinate from a<br/>support sole

Common	$t_0$	Beginning time
	$t_f$	Finishing time
STAND		-
STEP	Parameters of the swing sole	
	$\boldsymbol{r}_{f}$	Horizontal position on $\Sigma_{su}$ at $t_f$
	$R_{f}$	attitude on $\Sigma_{su}$ at $t_f$
	Parameters of the waist	
	$\psi_f$	Yaw orientation on $\Sigma_{su}$ at $t_f$
	Parameters of the mid-point (option)	
	$t_1$	Time of the mid-point
	$oldsymbol{r}_1,oldsymbol{R}_1$	Position and orientation of the swing
		sole on $\Sigma_{su}$ at $t_1$
SQUAT	$t_1$	Time of the mid-point
	$d_1$	Wairt height dittat The sauce



Fig. 3 Graphical representation of STEP parameters

位置  $\mathbf{r}_1 = (r_{1:x} | r_{1:y} | r_{1:z})^T$ 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.  $\mathbf{r}_1$ は  $\mathbf{r}_f$ と異なり垂直位置も含む.なお、中間点が有効である かどうかの判定については 4.1 節で述べる.

 $\psi_f$ は時刻 $t_f$ における腰のYaw 軸姿勢を表す角度であり、旋回などで腰の正面方向が変わる動作の表現に対応する.

SQUAT においては、腰の垂直位置が最も低くなる状態が中間点として設定され、その時刻  $t_1$  と開始点からの腰の垂直位置の差分  $d_1$  をパラメータとしてもつ.

すべてのタスクについて,開始時刻 t<sub>0</sub> 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メン トのプロセスにおいて重要となる.

# 4. タスク認識

モーションキャプチャによって得られた人のマーカ軌道から, 脚タスクの列が認識される.タスクの種類ごとに,まずそのタ スクが機能している時間領域が検出される.次に,検出された 個々のタスクに関して,位置姿勢のパラメータが抽出される.

#### 4.1 タスク領域の検出

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  $p(t) = (p_x(t) p_y(t) p_z(t))^T$  とし、  $v_p(t) = |\dot{p}(t)|$  とする、**Fig. 4**(a), (b) のグラフは、それぞれ



Fig. 4 Trajectories of a human foot motion. Each filled area corresponds to one STEP task in proper thresholds

 $p_z(t), v_p(t)$ 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.

$$v_p(t) \ge v_{step} \ (t_0 \le t \le t_f), \ \int_{t_0}^{t_f} v_p(t) dt \ge l_{step}$$

$$(1)$$

vstep と lstep 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 においては、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  $y_i$ ,一階微分が  $y_i$  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.

$$\boldsymbol{f}_n \langle (t_1, \boldsymbol{y}_1, \dot{\boldsymbol{y}}_1), \cdots, (t_n, \boldsymbol{y}_n, \dot{\boldsymbol{y}}_n) \rangle (t)$$
 (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 $p'(t) = f_2\langle (t_0, p(t_0)), (t_f, p(t_f)) \rangle (t)$ 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、

$$d(t_1) = \max_{t_0 < t < t_f} d(t), \ d(t_1) > d_{step}$$
(3)

を満たす t1 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. Fig. 5 (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.

$$\begin{cases} v_h(t) < 0 \ (t_0 \le t < t_1) \\ v_h(t) > 0 \ (t_1 < t \le t_f) \end{cases}, \ \int_{t_0}^{t_f} |v_h(t)| dt \ge l_{squat} \end{cases}$$



Fig. 5 Vertical motion trajectories of the waist. Each filled area corresponds to one SQUAT task in a proper threshold

 $t_1$ 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  $\Sigma_{su}$ を設定する。ただし  $\Sigma_{su}$ 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 $t_1$ (中間点が有効の場合)と $t_f$ に関してマーカから得た遊 脚足底の位置姿勢を $\Sigma_{su}$ における座標に変換したものをスキル パラメータの値とする。同様に腰の姿勢も腰に付けたいくつか のマーカから算出し、 $\Sigma_{su}$ における Yaw 角 $\psi_f$ 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. タスク生成

ロボットの動作軌道は,**Fig.6**に示すタスク生成システムに よって生成される.これはロボットの上半身の関節角軌道と脚 タスク列を入力とし,入力されたタスクの実行結果として,ロ ボットで実行可能な脚の関節角軌道と,実機の制御において安 定化を行うための目標 ZMP 軌道を出力する.なお,入力とし て与える上半身の関節角軌道はこのシステムとは独立して生成 する.これに関しては 6.1 節で述べる.

生成処理においては, Fig.6(b) に示す各種の動作要素が中 心的な情報となる.動作要素としては,「目標 ZMP」,「支持状 態」,「遊脚足底位置姿勢・腰 Yaw 軸姿勢」,「腰垂直位置」,「腰 水平位置」,「胴体 Yaw 軸姿勢」があり, 脚の動作はこれらの要 素によって決まる.この図では,動作要素への矢印によって各 処理が決定する要素を示している.

Fig. 6 (a) に示す「タスクプロセッサ」は、STAND、STEP、 SQUAT の各タスクに対応したものがそれぞれ存在する. これ らは入力タスク列中のタスクとそのスキルパラメータにしたがっ



Fig. 6 Overview of the task generation system

**Table 2**Execution parameters

- $h_h$  Reference sole height for horizontal impact reduction
- $h_v$  Reference sole height for vertical impact reduction
- $v_v$  Velocity threshold for vertical impact reduction
- $h_w$  Default waist height
- $h_s$  Default stepping height
- $t_z$  Time margin of ZMP transition
- $t_p$  Time threshold for pausing ZMP
- $\theta_s$  Angle margin of the knee joints for preventing the singular point
- $\Delta t$  Time resolution of motion trajectories

て、図に矢印で示す対象とする動作要素の制御を行うものである.

また,動作要素は Fig.6(d) に示す全身の力学フィルタ処理に よっても決定される.これはロボットが転倒しないための「ZMP 補償フィルタ」と,足底の滑りによるスピンを起こさないため の「Yaw 軸モーメント補償フィルタ」からなる.

以上の各処理は適当な時間分解能 △t (通常実機の制御システムが要求する値) のループからなり, ループの1フレームごと に各動作要素の値が決定される.これによって両足底と腰について位置姿勢が決定すると,逆運動学によって脚の各関節角が 求まる.入力タスク列中の最終タスクの終了時刻までループを 回すことで, タスク列に対応する脚の関節角軌道が得られる.

システムはロボットの関節機構・幾何形状および物理特性の モデル情報を,各リンクのツリー構造のデータとしてもつ(こ れを「リンクモデル」と呼ぶ).この情報は各処理において必要 に応じて参照される.また,Fig.6(c)において,リンクモデル を用いた運動学シミュレーションや逆動力学計算などが行われ る.これは力学フィルタ処理や障害チェックなどで必要となる.

タスクとは独立してロボットの挙動を決定するパラメータと して, **Table 2** に示す「実行時パラメータ」がある. これらは 人の動作から得るスキルパラメータとは異なり,ロボットの身体に依存し人の動作からは独立して設定される部分である.各 パラメータについては,以下の解説で適宜詳細を述べる.

#### 5.1 タスクプロセッサ

各タスクプロセッサは、生成ループにおいてフレーム時刻が 入力タスク列中の次のタスクの開始時刻に達したときに起動さ れ、一つのタスクを処理し、タスクが終了時刻に達したとき停 止する.生成ループにおいてこのプロセスが入力されたタスク の数だけ繰り返されることになる.

SQUAT プロセッサは腰の垂直位置を制御する. 時刻 t にお ける腰の垂直位置を  $p_{wt\cdot z}(t)$  とすると, この値は通常実行時パ ラメータ  $h_w$  の値に設定されているが, SQUAT 実行時にこの 値をスキルパラメータの値に従って上下させる. これは式 (2) で表される補間関数を用いて, スキルパラメータ  $t_0$ ,  $t_1$ ,  $t_f$ ,  $d_1$ から生成される以下の軌道に従って設定する.

$$p_{wt \cdot z}(t) = f_3 \langle (t_0, h_w), (t_1, h_w - d_1), (t_f, h_w) \rangle (t)$$
(5)

STEP プロセッサはタスク開始時にシステムの支持状態情報 を「右脚支持」(L-STEP) または「左脚支持」(R-STEP) に 更新し,実行中は遊脚足底の位置姿勢と腰の Yaw 軸姿勢を制御 する.また,支持脚足底の位置姿勢は直前の値を維持する.

 $p_{sw}(t) = (p_{sw\cdot x}(t) p_{sw\cdot y}(t) p_{sw\cdot z}(t))^T をタスク実行中の時$ 刻 t における遊脚足底の位置とする. この軌道は STEP のスキ $ルパラメータ <math>t_0, t_1, t_f, r_1, r_f$  より生成する. なお,以下の 説明において STEP プロセッサが扱う位置や姿勢の値は,すべ て支持脚足底の座標系で記述するものとする.

まず,STEP タスクの中間点が無効の場合の軌道生成につい て述べる.この場合, $t_1 = (t_0 + t_f)/2$ とし,実行時パラメー タのステップ高さ $h_s$ を垂直成分の補間に用いる.足底軌道の 垂直成分 $p_{sw\cdot z}(t)$ については,以下の関数によって足を浮かせ てまた接地させるという軌道を得る.

$$p_{sw\cdot z}(t) = f_3 \langle (t_0, 0), (t_1, h_s), (t_f, 0) \rangle (t)$$
(6)

ただしこの軌道では接地時に足底が床から受ける垂直反力の衝撃が大きくなり、ロボットの挙動が不安定になることがある.これは、実機実行時の誤差によって速度が十分落ちる前に足底が接地していまうのが原因である.実行時のこの挙動を軽減するため、実行時パラメータ $h_v(>0), v_v(>0)$ に関して、

$$p_{sw \cdot z}(t_v) = h_v \quad (t_1 < t_v < t_f)$$
  
$$\dot{p}_{sw \cdot z}(t_v) < -v_v \tag{7}$$

を満たす tv が存在する場合は、以下の軌道を用いる.

$$t_{v}' = t_{f} - \frac{2h_{v}}{v_{v}}$$

$$p_{sw\cdot z}(t) = \begin{cases} f_{3}\langle (t_{0}, 0), (t_{1}, h_{s}), (t_{v}', h_{v}, -v_{v}) \rangle(t) \\ (t_{0} \leq t \leq t_{v}') \\ \frac{v_{v}^{2}}{4h_{v}} (t - t_{f})^{2} \\ (t_{v}' < t \leq t_{f}) \end{cases}$$
(8)



Fig. 7 Graphs of generated foot trajectories. Dashed lines show normal trajectories and solid lines show trajectories to which the smooth factors are applied

これにより,接地直前において高さが $h_v$ のときの速度が $v_v$ となり,接地直前の速度を制御することができる. **Fig.7**(a)の グラフは式(6)による軌道(破線)と式(8)による軌道(実 線)を示しており, Fig.7(b)はそれらの速度を示している.

一方,足底軌道の水平成分については,以下の式によって足 底をタスク開始時の位置からステップの着地点へと動かす軌道 を得る(y軸についても同様).

$$p_{sw \cdot x}(t) = f_3 \langle (t_0, p_{sw \cdot x0}), (t_h, r_{f \cdot x}), (t_f, r_{f \cdot x}) \rangle (t)$$
(9)

 $p_{sw:x0}$  はタスク開始時の足底位置とし、 $t_h$  は $t_1, t_f$  間で実行時 パラメータ $h_h$  に関して $p_{sw:z}(t_h) = h_h$  となる時刻とする. こ の時刻における成分 ( $t_h, r_{f:x}$ ) によって接地時の水平方向の衝 撃を緩和する. この成分がない場合,実機の実行時において, 足底が水平方向に完全に停止する前に接地してしまい,水平方 向の床反力による衝撃が生じてしまうことがある. この成分に よって水平運動の停止と足底の接地の間にマージンをとること で,接地時の衝撃を抑えることができる. Fig.7(c), (d) のグ ラフはこの成分の有無による軌道の違いを示している.

STEP タスクの中間点が有効である場合は,式(6),(8) に おいて  $(t_1, r_{1,z})$  を補間の経由点とし,また式(9) においては  $(t_1, r_{1,x})$  を補間の経由点に追加する.

足底の軌道は姿勢に関しても生成する必要がある. 姿勢は Roll, Pitch, Yaw の3軸回転行列  $\mathbf{R}(\phi, \theta, \psi)$  で表すことができる. ス キルパラメータ  $\mathbf{R}_1$ ,  $\mathbf{R}_f$  について3軸回転成分を算出し,その値 から足底姿勢の3軸成分の軌道  $\phi_{sw}(t)$ ,  $\theta_{sw}(t)$ ,  $\psi_{sw}(t)$  を式 (9) と同様の補間で生成する. ただし足底面を床面と一致させるの がロボット足底接地の条件となるため,  $\phi_{sw}(t_f) = \theta_{sw}(t_f) = 0$ として補間する. 腰の Yaw 軸姿勢の軌道  $\psi_{wt}(t)$  についても, スキルパラメータ  $\psi_f$  を目標点とする補間によって生成する.

腰の位置の水平成分は最終的に ZMP 補償フィルタによって 決定されるが、STEP プロセッサはフィルタへの初期入力とな る暫定的な軌道として、腰の x 軸軌道  $p_{wt\cdot x}(t)$  を以下のように 設定する (y 軸についても同様).

$$p_{wt \cdot x}(t) = f_2 \left\langle \left( t_0, \frac{p_{sw \cdot x}(t_0)}{2} \right), \left( t_f, \frac{p_{sw \cdot x}(t_f)}{2} \right) \right\rangle (t)$$
(10)

STAND プロセッサは STEP プロセッサとは排他的に実行さ れ,目標 ZMP を制御する.この詳細は 5.3 節で述べる.STAND プロセッサは起動時にシステムの支持状態情報を「両脚支持」 に更新する.また,足底の位置姿勢についてはタスク開始時の 状態を維持するものとする.

# 5.2 ZMP 補償フィルタ

ロボットが転倒しないためには、全身のバランスを考慮する 必要がある.ロボットと人体は足底の柔軟性も身体の重量配分 も異なるため、人の動作軌道によってこの問題を解決すること はできず、ロボットが自らの身体にあわせて独自に解決する必 要がある.タスク生成システムでは腰の水平位置を全身のバラ ンスをとるための動作要素としており、この要素は ZMP 補償 フィルタによって決定する.

タスク生成システムでは「脚が支持脚である間は常に足底面 が床面と完全に接している(以下「接地条件」と呼ぶ)」こと を想定して動作を生成しており,力学的にもこの条件を満たせ ばロボットは転倒しない.このためには Zero Moment Point (ZMP)[13] を考慮すればよい.

動作計画において脚が支持脚である間は、その足底が床面に固 定されていると仮定する。その動作から計算した ZMP を「計算 上の ZMP」とすると、接地条件は力学的には「計算上の ZMP が支持脚足底で作られる床面上の凸包(支持領域)内に存在す る(以下「ZMP 条件」と呼ぶ)」ことに相当する.よって、この 条件を満たす目標 ZMP を用意し、計算上の ZMP が目標 ZMP と一致するような動作とすればよい.

目標 ZMP を実現する動作を得る手法は,西脇ら[14][15]や, 梶田ら[16]によって提案されている.本研究では,西脇らの手 法を用いる.この手法では,目標 ZMP 軌道と修正前の動作か ら得られる計算上の ZMP の軌道を入力として与えると,計算 上の ZMP を目標 ZMP と一致させるための,腰の水平位置の 修正量を近似的な解として出力する.これを繰り返し適用する ことで,十分な精度まで収束した解を得ることができる.

ZMP 補償フィルタは、以下のようにして腰の水平位置を修正 する.まず、Δtのフレームごとに、上半身の関節を含むすべて の関節の角度と角速度をリンクモデルに設定する.そして、シ ステムの支持状態が表す支持脚の足底を床に固定された起点と して、順運動学計算を行う.この結果得られる全身の重心位置、 運動量、角運動量の値から、ZMP を計算する[17].こうして得 られる計算上の ZMP 軌道と STAND プロセッサが生成する目 標 ZMP 軌道を西脇らの手法へ入力し、その出力に基づいて腰 軌道の水平成分を修正する.修正量が求まったら、足底と腰の 間の逆運動学を再度計算して脚の関節角軌道を更新する.

ZMP 補償フィルタは、上半身の関節角軌道とスキルパラメー タに対応する脚動作のタイミングや位置姿勢を完全に保つため、 舞踊の特徴を失うことなく効果的に機能する.

#### 5.3 目標 ZMP 軌道

支持領域がある程度の大きさをもつ中で ZMP 条件を満たす

目標 ZMP はいかようにもとれる.しかし,ロボットを安定に 制御するためには、力学的な乱れや制御対象となる目標 ZMP 軌道の乱れは少ないほうがよいため、軌道は整然としたものが 望ましい.また物理的なモデルの誤差や外乱がある中で安定性 を上げるためには、ZMP は支持領域の境界付近より中心部に 近い方が望ましい.以上を考慮して、時刻 t における目標 ZMP を表す軌道  $p_{zmp}(t)$  は以下のように生成する.

STAND の前後で実行される STEP の支持脚が異なる場合, STAND プロセッサはそれぞれの支持脚の足底中心の間を結ぶ 直線上を遷移する以下の軌道を目標 ZMP として設定する.

$$\boldsymbol{p}_{zmp}(t) = \boldsymbol{f}_{4} \langle (t_{0}, \boldsymbol{p}_{zmp \cdot 0}), (t_{0} + t_{z}, \boldsymbol{p}_{zmp \cdot 0}), \\ (t_{f} - t_{z}, \boldsymbol{p}_{zmp \cdot f}), (t_{f}, \boldsymbol{p}_{zmp \cdot f}) \rangle (t)$$
(11)

 $t_0$ ,  $t_f$  は STAND の開始時刻,終了時刻を示す.  $p_{zmp\cdot0}$  はタ スク開始前の目標 ZMP(直前の STEP における支持脚足底中 心)を, $p_{zmp\cdot f}$  は次の STEP における支持脚足底中心を示す. この式では,遷移の前後で実行時パラメータ  $t_z(>0)$  の時間だ け ZMP をとどめるようにしている. これは支持状態が切り替 わる不安定な点での安定性を向上させるためのものである. ま た,実行時パラメータ  $t_p(>0)$  に関して

$$(t_f - t_0) - 4t_z \ge t_p \tag{12}$$

を満たす場合は、式(11)の補間関数に以下の成分を追加する.

$$(t_0 + 2t_z, \boldsymbol{p}_c), (t_f - 2t_z, \boldsymbol{p}_c)$$
 (13)

 $p_c$ は両脚足底中心間の中心を表す.この場合,安定な点でいったん立ち止まる動作が挿入される.

STANDの前後で実行される STEP の支持脚が同じ場合,以下の式により目標 ZMP 軌道を生成する.

$$\boldsymbol{p}_{zmp}(t) = \boldsymbol{f}_{5} \left\langle (t_{0}, \boldsymbol{p}_{zmp\cdot0}), (t_{0} + t_{z}, \boldsymbol{p}_{zmp\cdot0}), \left(\frac{t_{0} + t_{f}}{2}, \boldsymbol{p}_{c}\right), (t_{f} - t_{z}, \boldsymbol{p}_{zmp\cdot0}), (t_{f}, \boldsymbol{p}_{zmp\cdot0}) \right\rangle (t)$$

$$(14)$$

この場合,目標 ZMP の遷移元と遷移先は同じ点であるが,ZMP をいったん支持領域の中心へと遷移させる.これは実機におい て遊脚接地時の衝撃による床反力によって ZMP が接地した遊 脚側によってしまう挙動を考慮したもので,目標 ZMP をあら かじめこの挙動に近づけておくことで安定性を高めることがで きる.式(14)においても,条件(12)を満たす場合には,経 由点( $(t_0 + t_f)/2, p_c$ )を(13)の二つの経由点に置き換え,立 ち止まる動作を挿入する.

このように,目標 ZMP の遷移は STAND タスクの役割であ り,その軌道は STAND プロセッサが決定する.一方,片脚支 持の間は目標 ZMP は支持脚足底の中心にとどまるものとする.

# 5.4 Yaw 軸モーメント補償フィルタ

ロボットが足底を介して床に及ぼす Yaw 軸モーメントが足底 と床との間の摩擦によるモーメントを上回った場合,足底が滑 り全身がスピンしてしまう.元の人の動作ではスピンしていな くても、生成するロボットの動作に関して新たにこのことを考 慮する必要がある.

田宮ら [18] は片脚で支持されたロボットの全身のバランスを とるため、全身のモーメントを補償し一定値以下に抑える手法 を提案している.この手法の Yaw 軸モーメント補償の部分を タスク生成システムにフィルタとして組み込み、実行時にスピ ンを発生しないような動作軌道を出力する.この手法では補償 のため修正する関節角とその重みを任意に設定することが可能 であり、本フィルタでは腰と胸の間の Yaw 軸関節(Fig.6では "Torso yaw"と表記)のみを補償に用いている.またこの手法 は片脚による支持のみを想定しているが、一般的に両脚支持の ときは摩擦モーメントが十分大きくなるため、片脚支持状態の 期間にのみ補償を適用するものとする.

5.5 スキルリファイメント

タスクプロセッサや力学フィルタは,主に 5.2 節で述べた 「接地条件」に着目してロボットの動作生成を行っている.しか し,この条件とは別に,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.

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。タス ク生成システムは、生成ループにおける運動学計算(Fig.6(c)) によって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(Fig.6(e))、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、生成ループを修正し たタスクの実行前に戻して新しいパラメータでタスク生成をや り直すことで、最終的に障害が発生しない動作を生成しようと する.この処理を「スキルリファイメント」と呼ぶ.

スキルパラメータの値はもともと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.またスキ ルパラメータの数はそれほど多いものではないため、修正候補 も絞られている.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

**Fig.8**に本研究における動作再現のプロセスを示す. まずモーションキャプチャを用いて,人体動作の取得を行う. 今回使用したのは,1秒間に120フレームの割合で34個のマー カの三次元位置を取得可能な光学式のシステムである.



Fig. 8 Overview process

今回対象とした舞踊は「会津磐梯山踊り」である.この舞踊 の動作速度は比較的穏やかなものであるが、全身を使った特徴 的な動作に富み、脚の動作も多数含む.この舞踊を女性の師範 Aと男性の師範 B が同じ音楽に合わせて演じ、その動きをマー カ軌道データとして取得した.それぞれ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.

取得したマーカ軌道から、4章の手法に従って脚タスク列が 認識される.次に、タスク列の認識結果とマーカ軌道から変換 された上半身関節角軌道がタスク生成システムに入力され、5 章の手法に従ってロボットで実行可能な脚の関節角軌道と、安 定化制御に必要な目標 ZMP 軌道を出力する.

最後に,生成された関節角軌道と安定化のための軌道はロボッ ト実機の制御システムに入力され,ロボットは人の演技を再現 した舞踊を行う.ロボットは HRP-2 [19] 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.

本研究の手法は,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]上に実装した.これはロボットのモデル ファイルや動作データに関して OpenHRP [21] と互換性をも つ.また,OpenHRPの力学シミュレーション機能や制御プロ グラムなども利用して実験を進めた.

#### 6.1 上半身の動作変換

ロボットの上半身の関節角軌道は、脚のタスクとは独立して 生成される [22]. ここでは今回適用した処理の概要を述べる.

まず,モーションキャプチャによって得られたマーカ間の相 関から,ロボットの関節構造における各関節角を算出する.次 に,得られた関節角軌道に対して,関節の角度範囲と角速度が ロボットの仕様を満たすように軌道を修正する.

角度制限に関しては、いくつかの多項式を組み合わせたマッ プ関数を用いて、時間と値双方に関して元の角度が限界値を超 えている領域の周辺に局所的なスケーリングを施す.また角速 度制限に関しては、Pollard らの手法[4]を用いている.これら の手法によって、大域的な軌道の特徴をなるべく保ちながら各 関節の制約を満たす軌道へと変換している.

このように、上半身の処理は脚とは異なり、各種フィルタに よる軌道ベースの変換となっている.これは上半身においては 環境との接触がないため制約が少なく、一方で動作の軌道その ものが表現として重要であるという性質を反映したものである. 以上の処理により、人の動作軌道から HRP-2 で実行可能な

48 tasks dancer A
dancer B 46 30 44 5 25 5 42 number 20 40 15 38 10 36 The The 34 5 32 0 0 0.05 0.1 0.15 0.2 0.25 0.3 0.2 0.4 0.6 0.8  $l_{step}[m]$  $d_{step}[m]$ (b) (a)

395

Fig. 9 Correlation between thresholds and detection results

上半身の関節角軌道を自動的に生成することができた.

#### 6.2 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.**Fig.9**(a)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 いる部分までふる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.

Fig. 9 (b) 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.これによると師範 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, $d_{step} \geq 0.4$  [m] と設定した. この設定で検出された中間点は、すべて Fig. 10 (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.

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 Fig. 10 (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 Fig. 10 (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.



(c)

Fig. 10 Motion examples. (a) is a kick-up motion, which is detected as a STEP with a mid-point. (b) is detected as a SQUAT. (c) is a motion of another dancer at the same timing as (b), which is not detected as a SQUAT



Fig. 11 The task sequence recognized from the dancer A

**Fig. 11** は師範A から認識されたタスク列を時間軸上に配置 したものの一部(舞踊開始0秒から12秒まで)を表している.

#### 6.3 HRP-2 を対象とした動作データの生成

タスク生成システムでは、まず実行時パラメータをロボット に応じて適切に設定する必要がある。腰の高さ(腰リンク原点 の垂直位置)の標準値を表す $h_w$ は、足底を床に接地させる際 の到達可能範囲に関わる重要なパラメータである。これは足底 を床に接地させた状態でとりうる腰の最大の高さよりある程度 低く設定する必要がある。 $h_w$ をより低く設定すれば足底の到達 可能範囲は広がるが、一方で脚の姿勢は膝を深く曲げた不自然 なものとなってしまう。以上を考慮し、HRP-2における最大値 0.71 [m] に対して、 $h_w$ の値を 0.61 [m] と設定した。また、ス テップの標準の高さを決めるパラメータ $h_s$ は 0.05 [m]、両足支 持時の挙動を決める  $t_p$ は 0.4 [s] と設定し、 $\Delta t$ は実機の制御シ ステムの制御周期とあわせて、0.005 [s] とした。他の実行時パ ラメータの設定については、6.4 節で述べる。

師範A,Bの動作に対して、タスクプロセッサによる動作軌道 生成は正常に機能した.全身の力学フィルタ処理は、まずZMP 補償を適用し、次にYaw 軸モーメント補償を適用し、その後も う一度ZMP 補償を適用するという手順をとったところ、十分 な収束結果が得られた.以上により、接地条件を幾何的にも力





#### 学的にも満たした HRP-2 の動作データが生成された.

ただし、5.5節で述べたスキルリファイメントに関して、 **Fig. 12**(a)~(d) に示す障害が発生した. Fig. 12(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 $\psi_f$ を範囲内に修正することにより解消できる. Fig. 12 (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 rf 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<sub>1</sub>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. なお,特異点の検出においては実行時パラメータθ<sub>s</sub>に設 定されたマージンをとり、膝関節の角度が特異点まで $\theta_s$ 以下と なった時点で障害として検出する.これにより関節角速度の発散 を抑え,また実行時安定化制御で必要な微修正のマージンを確保 することができる. 今回  $\theta_s$  は 38 [deg] に設定した. Fig. 12 (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 に おける終了点の遊脚姿勢  $R_f$  の Yaw 軸成分を修正することに より解消できる. Fig. 12(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、Fig. 12(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、Fig.12(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 Fig. 12 (a) の障害が 3 件, Fig. 12 (b) が 8 件, Fig. 12 (c) が 1 件, Fig. 12 (d) が 2 件発 生し, 師範 B では Fig. 12 (a) が 0 件, Fig. 12 (b) が 20 件, Fig. 12 (c) が 2 件, Fig. 12 (d) が 0 件発生した. 師範 B では Fig. 12 (b) の障害発生が多いが, これは師範 B が大股でステッ プを行う傾向があるためである. なお, この障害の発生頻度は 実行時パラメータ  $h_w$  の設定に強く依存する. 397







多くの労力を要した.し 設定が得られれば,その であると考えられる.実 ては同一の設定が有効で 値のパラメータも同一の 作の再現は,適切なパラ モーションキャプチャを よる再現に成功した.こ 可能であるため,一度適 効率的にロボットによる

,再現の安定性と効率に が有効に機能することが

である.まず,舞踊は音 が表現上重要な要素とな イミングはスキルパラメー によらず元の演技のタイ ズムに関してロボットは いえる.

考察が必要である.今回 ぞれの個性があり,この ているかが一つの指標に 動きから元の演者を見分 きの癖まで表現している 表現力が舞踊の専門家か だし,これは再現の一例 ,舞踊の表現における類

こ基づいて検証を

本研究で再現可能 のに限られる.こ 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



Fig. 13 A dance performance of Aizu-Bandaisan by HRP-2 and a human master

上で述べた障害の種類とその対処法をスキルリファイ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.

#### 6.4 HRP-2 による舞踊の再演

HRP-2 の制御には、与えられた全身の目標関節角軌道を追従 しつつ、センサによって得られる ZMP と与えられた目標 ZMP 軌道とのずれを修正するコントローラ [23] を用いる.物理モデ ルの誤差や外乱などがあるため、このような実行時の安定化制 御は、ロボットが転倒しないために必要不可欠である.

実行時パラメータのうちロボットの安定性にかかわるものは、 実験によって実機の挙動を検証し決定することになる。その結 果,足底の接地やバランス維持に関して安定な挙動を実現する 値として  $h_h = 0.006$  [m],  $h_v = 0.005$  [m],  $v_v = 0.13$  [m/s],  $t_z = 0.025$  [s] という設定を得た。

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. Fig.13 は最終的に実現した HRP-2 と師範 A との会津磐梯山踊りの共演を示している.

## 7.考察

今回対象とした舞踊は、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、一般的に不安定で激しい動作を含む ものであるが、HRP-2の演技では支持脚の足底が床面から離れ ることもなく、安定な再現結果を得ることができた.ただし 6.4 節で示した実行時パラメータの設定が適切でない場合、足裏着 地時の衝撃や、接地中に足裏の一部が床から離れる症状が発生 し、転倒に至るほど不安定になることがあった.これは、身体 動作の安定性を大きく左右する細かな動きの要素があり、それ はロボットの身体に合わせて適切に処理する必要があることを

る部分を切り分けることで、ロボットはそれぞれの要素を適切 に処理できることが確認できた. 今回、実行時パラメータを適切に設定するに当たって、ロボッ トの動作実験を何回も行う必要があり, かし,あるロボットに対して一度適切な 設定は他の動作データに対しても有効 際,師範AとBの動作データに対し あった.また、タスク認識における闘 設定が有効であった.今回師範Bの動 メータ値が求まった後で行われたため, 除けば数時間程度の作業でロボットに の作業自体は本質的にはすべて自動化 切なパラメータ値が求まれば、非常に 再現を実現できることになる.

以上のように,今回の実験を通して 関して LFO に基づく本研究の枠組み 確認できた.

舞踊では表現における再現性も重要 楽に合わせて踊るため、動きのリズム る.本研究では、脚の節々の動作のター タによって表現され、ロボットの制約 ミングが保存される.よって舞踊のリ 再現性の高い演技を実現できていると

総合的な再現性に関してはさらなる 対象とした師範A,Bの表現にはそれ 個性の違いをロボットが演じ分けられ なる.これに関して師範はロボットの け,脚に関してもロボットが自分の動 という感想を述べた.本研究の手法の ら好意的に評価されたことになる.た だけをみた主観的な評価である.今後

示している.タスクモデルによって動作の本質と身体に依存す 似性を定量的に評価する手法を確立し、それに ろ部分を切り分けることで、ロボットはそれぞれの要素を適切 進めていく必要がある.

> 様々な種類の動作への対応という点では、2 な脚の動作は 3.1 節で述べた条件を満たすもの

の条件で再現可能な舞踊も多数存在するが,両脚が浮く跳躍や 走行,足を滑らすスピンなどを含むより一般的な対象に対して は,現在定義されているタスクモデルの枠組みでは再現するこ とができない.このような動作に対応するためには、タスクモ デルの拡張や追加を行う必要があり、さらにロボットのハード ウェアの改良も必要になってくると考えられる.

また、スキルリファイメントの具体的な修正ルールについて は、今回実装したものは会津磐梯山踊りの動作データで発生し た障害事例からアドホックに構築したものであり、十分な一般 性をもつとはいえない、十分な一般性をもつ修正ルールの構築 は今後の課題である.

以上議論してきた安定性,効率性,再現性,汎用性に関して, 、今後多くの種類の動作データによる実験を通して,さらなる検 証を行っていきたいと考えている.

#### 8. 結 論

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.

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.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 ると、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 で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.ま た,本研究の成果により,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幅広く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 の保存に役立てたいと考えている [24].

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.また,舞踊の動 作データ取得に当たり,会津民謡玉水会と会津大学の協力を受 けた.

# 参考文献

- K. Ikeuchi and T. Suehiro: "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.
- [2] 松浦,藤城,山本,井口:"ダンスロボットの開発とその主観的評価", 日本ロボット学会誌, vol.9, no.2, pp.177-183, 1991.
- [3] 池浦,猪岡:"ダンシングロボット",日本ロボット学会誌,vol.14, no.2, pp.200-203, 1996.
- [4] N. S. Pollard, J. K. Hodgins, M. J. Riley and C. G. Atkeson: "Adapting human motion for the control of a humanoid robot." Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.1390-1397, 2002.
- [5] K. Yamane, J. K. Hodgins and H. B. Brown: "Controlling a marionette with human motion capture data," Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.3834-3841, 2003.
- [6] Y. Kuroki, M. Fujita, T. Ishida, K. Nagasaka and J. Yamaguchi: "A small biped entertainment robot exploring attractive applications," Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.471–476, 2003.
- [7] K. Kosuge, T. Hayashi, Y. Hirata and R. Tobiyama: "Dance partner robot-Ms DancerR---," Proceedings of the 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.3459-3464, 2003.
- [8] 池浦,中里,猪岡: "人間の舞踊動作に基づくダンシングロボットの 動作計画",日本ロボット学会誌,vol.15, no.6, pp.927-933, 1997.
- [9] Y. Kuroki, B. Blank, T. Mikami, P. Mayeux, A. Miyamoto, R. Playter, K. Nagasaka, M. Raibert, M. Nagano and J. Yamaguchi: "Motion creating system for a small biped entertainment robot," Proceedings of the 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.1394-1399, 2003.
- [10] Y. Kuniyoshi, M. Inaba and H. Inoue: "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.
- [11] 稲邑,中村,戸嶋,江崎:"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.
- [12] K. Yamane and Y. Nakamura: "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.
- [13] M. Vukobratović and D. Juricic: "Contribution to the synthesis of biped gait," IEEE Transaction on Biomedical Engineering, vol.16, no.1, pp.1-6, 1969.
- [14] 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.
- [15] 稲葉,加賀美,西脇: 'ロボットアナトミー',岩波講座ロボット学.第
   7 巻,第5章, pp.282-286,岩波書店,2005.
- [16] S. Kajita, F. Kanehiro, K. Kaneko, K. Fujiwara, K. Harada, K. Yokoi and H. Hirukawa: "Biped walking pattern generation by using preview control of zero-moment point," Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.1620–1626, 2003.
- [17] 梶田, 比留川, 横井, 原田, 梶田秀司 (編): ヒューマノイドロボット. 第 3 章, pp.93-95, オーム社, 2005.
- [18] 田宮, 稲葉, 井上: "人間型ロボットの片足立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.
- [19] 五十棲,赤地,平田,金子,梶田,比留川:"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.

- [20] S. Nakaoka, A. Nakazawa and K. Ikeuchi: "An efficient method for composing whole body motions of a humanoid robot," Proceedings of the Tenth International Conference on Virtual Systems and Multimedia, Ogaki, Japan, pp.1142–1151, 2004.
- [21] 金広,藤原,梶田,横井,金子,比留川,中村,山根:"ヒューマノイ ドロボットソフトウェアプラットフォーム OpenHRP",日本ロボッ ト学会誌, vol.21, no.7, pp.785-793, 2003.
- [22] S. Nakaoka, A. Nakazawa, K. Yokoi, H. Hirukawa and



# 中岡慎一郎 (Shinichiro Nakaoka)

1976年9月1日生.東京大学大学院情報理工学系 研究科博士課程在学中.2001年東京工業大学理学 部情報科学科卒業,2003年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修士課程修了. ロボットによる動き提示の研究に従事. (日本ロボット学会学生会員)

(日本日本)「于云于王云兵)



# 金広文男(Fumio Kanehiro)

1971年7月22日生、1999年東京大学大学院工学 系研究科情報工学専攻博士課程修了、博士(工学)、 1998年より日本学術振興会特別研究員、2000年 電子技術総合研究所入所、現在産業技術総合研究 所知能システム研究部門研究員、ヒューマノイドロ ボットのシステム構成法、全身行動制御に興味があ (日本ロボット学会正会員)

る.



# 森澤光晴(Mitsuharu Morisawa)

1976 年 7 月 17 日生. 2004 年 3 月慶應義塾大学 大学院理工学研究科総合デザイン工学専攻修了博 士課程修了.博士(工学).同年 4 月より独立行政 法人産業技術総合研究所知能システム研究部門研究 員.ヒューマノイドロボット,パラレルメカニズム, モーションコントロールなどの研究に従事.電気学 (日本ロボット学会正会員)

会の会員.



#### 池内克史(Katsushi Ikeuchi)

1949年5月29日生,1973年京都大学工学部機械 工学科卒業,1978年東京大学大学院工学系研究科 情報工学専攻博士課程修了。MUT人工知能研究所

電総研, CMU 計算機科学科を経て, 1996 年よ) 東京大学生産技術研究所教授, 2000 年より東京)

学人子院馆報告境教授兼担,人間の税見機能,两の さ解析,物体認識,人間による組み立て作業の自動認識などの研究に 従事,工学博士, D. Marr 賞 (ICCV:1990年), IEEE 優秀論文賞 (CVPR:1991年),最多引用論文賞 (AI Journal:1992年)等受 賞, IEEE Fellow. (日本ロボット学会正会員) K. Ikeuchi: "Generating whole body motions for a biped humanoid robot from captured human dances," Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.3905–3910, 2003.

- [23] 金子,金広,梶田,横井,藤原,原田,比留川:"HRP-2 の歩行安 定化制御",第 21 回日本ロボット学会学術講演会予稿集,p.3A34, 2003.
- [24] 池内,中澤,小川原,高松,工藤,中岡,白鳥: "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.



従事.

# 中澤篤志(Atsushi Nakazawa)

1974年3月6日生、1997年大阪大学基礎工学部 システム工学科卒業,2001年同大学院基礎工学研 究科博士課程修了,博士(工学),同年科学技術振 興事業団研究員(東京大学生産技術研究所),2003 年より大阪大学サイバーメディアセンター講師.画 像計測,分散視覚,動作解析,動作生成等の研究に (日本ロボット学会正会員)



# 金子健二(Kenji Kaneko)

1965 年 9 月 22 日生. 1990 年慶應義塾大学大学 院理工学系研究科電気工学専攻修士課程修了.同 年工業技術院機械技術研究所に入所. 1995 年 9 月 より半年間米国カーネギーメロン大学客員研究員, 1999 年 9 月より 1 年間仏国 CNRS パリロボット 研究所客員研究員. 2001 年より組織改変に伴い独

立行政法人産業技術総合研究所主任研究員,現在に至る.博士(工 学).モーションコントロール,マイクロマシン,遠隔制御,ヒュー マノイドロボット等の研究に従事.日本機械学会,電気学会の各会 員. (日本ロボット学会正会員)



# 比留川博久(Hirohisa Hirukawa)

1959年1月15日生、1987年3月神戸大学大学院 自然科学研究科システム科学専攻博士課程修了、学 術博士、同年4月通商産業省工業技術院電子技術 総合研究所入所、1994年3月~1995年3月米国 スタンフォード大学計算機科学科客員研究員、2001 年改組により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長,2004年7月知能 システム研究部門副研究部門長,現在に至る.ロボットの動作計画,

IEEE 等の会員.

(日本ロボット学会正会員)