

## 非線形状態空間写像を用いた力学的整合を持つ運動変換\*

岡田 昌史<sup>\*1</sup>, 宮崎 哲郎<sup>\*1</sup>

## Motion Transformation with Dynamic Consistency Using Nonlinear State-Space Mapping

Masafumi OKADA<sup>\*1</sup> and Tetsuro MIYAZAKI<sup>\*1</sup> Department of Mechanical Sciences and Engineering, Tokyo Institute of Technology  
2-12-1, Oookayama, Meguro-ku, Tokyo, 152-8552, Japan

This paper proposes a motion transformation method using nonlinear state-space mapping. A human motion is measured by a motion capture system and it is transformed to a “realizable” robot motion. “Realizable” requires existence of an input sequence that satisfies the dynamical consistency of the robot dynamics. The nonlinear state-space mapping is represented by a polynomial of power of state variable and its parameters are obtained so that the constraints of velocity and acceleration are satisfied, and the human motion is deformed simultaneously. Moreover, the transformed motion is decided by setting the reference kinetic energy. The proposed method is applied to a tap dancing robot and a robot motion is generated by an autonomous system based on orbit attractor.

**Key Words :** Motion Transformation, Attractor-Based Controller, Human Motion, Robot Motion Generation

## 1. は じ め に

ロボットの運動を生成するためには、安定化コントローラでフィードバック系を構成し、これに外部から目標軌道を与えるのが一般である。特に、多自由度系の複雑な運動を生成する場合、目標軌道を設計するために人間のモーションキャプチャデータを用いることが有効である。ただし、人間とロボットの力学特性は異なるため、人間の運動をロボットの運動へと変換する必要がある。これに関する研究が多くなされている。Dariushら<sup>(1)</sup>は、運動中にリンクの干渉を検出し、これを回避する運動をオンラインで生成する方法を提案した。Ijspeertら<sup>(2)</sup>は人間の運動を非線形力学系に記憶させ、衝突などにより運動が停止した場合でも、その後に運動を継続可能とするコントロールポリシーを提案した。Pollardら<sup>(3)</sup>はロボットの関節配置に基づいて、可動範囲、関節角速度などの制限を満たすよう、人間のデータを変換する方法を提案した。Nakaokaら<sup>(4)</sup>は運動のキーポーズを指定することでロボットの全身運動を設計する方法を提案した。これらの方法は主に運動学に基づいた方法である。一方、中岡ら<sup>(5)</sup>は、動力学に基づいて舞踊をロボットの運動へ変換した。この方法は上半身では舞踊動作、下半身では安定化のように役割を分けており、全身運動はロボットで舞踊を実現してはじめて得られるものである。Yamaneら<sup>(6)</sup>は人間のデータをアニメーションキャラクタの力学的整合性を満たす運動へ変換するための Dynamics filter を提案した。ここでの力学的整合性の満足とは、力学的拘束下で運動を実現する入力が存在することである。Tsaiら<sup>(7)(8)</sup>は人間のデータから見た目に自然なアニメーションを生成する方法を提案した。これらの方法は動力学を考慮することで、リアリティの高いアニメーションを生成するものである。また、参考文献<sup>(9)~(11)</sup>は人間の運動からヒューマノイドの全身運動をオンラインで生成する方法であるが、現在の時間ステップの情報のみを用いて運動を逐次変換するため、一連の運動を連続的に生成したとき、元の人間の運動によっては転倒する場合もある。これら従来研究の方法は、はじめに実現すべき運動の規範として人間の運動があり、この規範に見た目に近い運動をロボット

\* 原稿受付 2012年5月10日

<sup>\*1</sup> 東京工業大学大学院 理工学研究科 機械物理工学専攻  
(〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1)

E-mail: okada@mep.titech.ac.jp



やアニメーションキャラクタに行わせるものだが、制御対象が劣駆動系である場合、運動の軌道を自由に選べず、人間と見た目に近い運動の生成が難しい場合も考えられる。

そこで本論文では、はじめにロボットで実現する運動の満たすべき条件を与え、この条件を満たすロボットの運動を生成するために人間の運動を変換する方法を提案する。この方法では、モーションキャプチャデータから実現すべき運動の満たすべき条件を定める。実現する運動の条件は運動ごとに異なる。ロボットの運動は実現する運動の条件と力学的整合性を満たす拘束のもと人間の運動から変換され、ロボットが劣駆動系である場合も、ロボットの適切な運動パターンを得ることができる。また、運動の変換では、人間の運動データをロボットの運動パターンへと変換する非線形状態空間写像を得る。これは人間のデータが変換されることでロボットにおける速度・加速度の拘束を満たすよう状態空間写像と入力列を求めるものである。さらに、運動エネルギーを考慮することで、変換される運動の入力の大きさを調整する。得られる運動パターンが実現可能であることを確認するために、軌道アトラクタに基づいた自律系<sup>(12)</sup>を設計する。自律系の設計には力学的整合性を満たす運動パターンと入力が必要であるため、与えた運動パターンが自律系によって生成されれば、運動パターンは力学的整合性を満足しているといえる。提案する方法をタップダンスロボットへと適用し、従来法では実現が難しかった運動の生成を行い、本手法の有効性を示す。

## 2. 運動の変換

### 2.1 非線形状態空間写像

異なる二つの力学系

$$\dot{x} = F(x) + G(x)u \quad (1)$$

$$\dot{\xi} = f(\xi) + g(\xi)\mu \quad (2)$$

を考える。式(1)を力学系1、式(2)を力学系2とし、 $x$ 、 $\xi$ および $u$ 、 $\mu$ は状態変数と入力を表す。 $x$ 、 $\xi$ は

$$x = \begin{bmatrix} x^T & \dot{x}^T \end{bmatrix}^T, \quad \xi = \begin{bmatrix} \xi^T & \dot{\xi}^T \end{bmatrix}^T \quad (3)$$

のように一般化座標ベクトル $x$ 、 $\xi$ とそれらの時間微分 $\dot{x}$ 、 $\dot{\xi}$ で構成されているとし、 $\dim(x) = \dim(\xi)$ 、 $\dim(u) = \dim(\mu)$ を仮定する。力学系1の運動の時系列データ $X$ 、その時間微分 $\dot{X}$ 、および運動に必要な入力列 $U$ が

$$X = \begin{bmatrix} x_1 & \cdots & x_n \end{bmatrix}, \quad \dot{X} = \begin{bmatrix} \dot{x}_1 & \cdots & \dot{x}_n \end{bmatrix}, \quad U = \begin{bmatrix} u_1 & \cdots & u_n \end{bmatrix} \quad (4)$$

のように与えられているとする。ただし、式(4)中の添え字は時間ステップを表す。このとき、 $X$ を力学系2の力学的に整合する運動データ

$$\Xi = \begin{bmatrix} \xi_1 & \cdots & \xi_n \end{bmatrix} \quad (5)$$

へと変換する。すなわち、

$$\xi = T(x) \quad (6)$$

で表せる一階微分可能な非線形状態空間写像 $T$ と $\Xi$ を実現する入力列

$$M = \begin{bmatrix} \mu_1 & \cdots & \mu_n \end{bmatrix} \quad (7)$$

を求めることを考える。ここで $T$ を

$$\begin{bmatrix} \xi \\ \dot{\xi} \end{bmatrix} = T(x) = \Theta \phi(\hat{x}) = \begin{bmatrix} \Theta_1 \\ \Theta_2 \end{bmatrix} \phi(\hat{x}) \quad (8)$$

$$\hat{x} = T_x x \quad (9)$$

$$\phi(\hat{x}) = \begin{bmatrix} 1 & x^T & (\hat{x}^2)^T & \cdots & (\hat{x}^\ell)^T \end{bmatrix}^T \quad (10)$$

とする。ただし、 $T_x$  は定数の行列である。すなわち、非線形状態空間写像  $T$  は  $x$  を低次元化した空間での値  $\hat{x}$  のべき乗多項式で表せるとし、その係数からなる行列  $\Theta$  を求めることが写像  $T$  を求めることに相当する。ただし、式 (10) 中の  $\hat{x}^\ell$  は  $\hat{x}$  の要素をかけたあわせて  $\ell$  次のべき乗項を並べたベクトルであり、例えば

$$\hat{x} = [\hat{x}_1 \ \hat{x}_2]^T \in R^2 \quad (11)$$

とすると  $\hat{x}^\ell$  は

$$\hat{x}^\ell = [\hat{x}_1^\ell \ \hat{x}_1^{\ell-1}\hat{x}_2 \ \hat{x}_1^{\ell-2}\hat{x}_2^2 \ \cdots \ \hat{x}_2^\ell]^T \quad (12)$$

で定義する。また、式 (10) では  $x$  の一次の項は低次元化していない。これは  $\phi$  の中の全ての  $x$  を低次元化することで、状態空間におけるある方向への運動の情報が不足し、適切な写像が行えなくなることを避けるためのものである。

## 2.2 状態空間写像のための状態変数の低次元化

$x$  が高次元空間を張る場合、そのべき乗  $x^\ell$  の項数は極めて多くなる。そこで、先に  $x$  を  $\hat{x}$  へと低次元化する。式 (4) の  $X$  を以下のように特異値分解する。

$$X = [U_1 \ U_2] \begin{bmatrix} S_1 & 0 \\ 0 & S_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1^T \\ V_2^T \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$S_1 = \text{diag} \{ s_1 \ s_2 \ \cdots \ s_r \} \quad (14)$$

$$S_2 = \text{diag} \{ s_{r+1} \ s_{r+2} \ \cdots \} \quad (15)$$

ここで、 $s_r \gg s_{r+1}$  を仮定すると、 $X$  は低次元空間で  $S_1 V_1^T$  とみなすことができる。このとき  $T_x$  は

$$T_x = U_1^T \quad (16)$$

として得られる。

## 2.3 写像の条件

写像を求めるために、写像が満たすべき条件を与え、これを評価関数として最適化し、パラメータ  $\Theta$  と  $M$  を得る。満たすべき条件は、以下の (a) 実現する運動の条件、(b) 速度に関する条件、(c) 速度・加速度に関する条件、(d) キーポーズに関する条件、(e) 運動エネルギーに関する条件の 5 つを考える。(a) はロボットの運動の特性を定める条件、(b)、(c) はロボットの力学的整合性を満たすための条件、(d) はロボットが平衡点で静止し続けるという自明な解を避けるための条件、(e) は変換された運動の入力の大きさを調整するための条件である。

### (a) 実現する運動の条件

異なる身体間で運動が一致するためには、何らかの意味で運動の等価性を定義する必要がある。それは運動の見た目、効果、目的など、着目する点によって様々な定義がある<sup>(13)</sup>。そこで、所望の運動を得るために運動の一致の条件として、実現する運動の条件を与える。実現する運動の条件は運動の変換前後で人間とロボットの運動がともに満たす条件であり、ロボットの運動の特性を定めるものである。実現する運動の条件は運動によって異なり、例えばロボットの歩行運動を生成する場合、人間の歩行運動一周期における足の接地状態を実現する運動の条件として与え、これにならうロボットの歩行運動を得る、ということが考えられる。なお、具体例については 3 章で示す。

### (b) 速度に関する条件

式 (8) より

$$\xi = \Theta_1 \phi(\hat{x}) \quad (17)$$

$$\dot{\xi} = \Theta_2 \phi(\hat{x}) \quad (18)$$

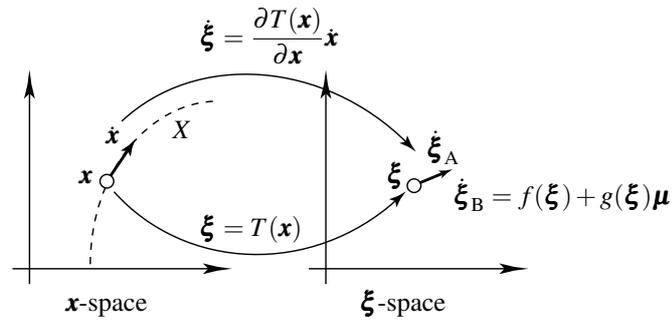


Fig. 1 State-space mapping

を得る．一方，式 (17) の時間微分から

$$\dot{\xi} = \Theta_1 \frac{\partial \phi(\hat{x})}{\partial x} \dot{x} \quad (19)$$

を得る．式 (18) と (19) を比べ， $\dot{\xi}$  に関して

$$\Theta_2 \phi(\hat{x}_k) = \Theta_1 \frac{\partial \phi(\hat{x}_k)}{\partial x} \dot{x}_k \quad (k = 1, 2, \dots, n) \quad (20)$$

が満たされる必要がある．

(c) 速度・加速度に関する条件

式 (6) を時間微分して得られる  $\dot{\xi}$  を  $\dot{\xi}_A$  とする． $\dot{\xi}_A$  は

$$\dot{\xi}_A = \frac{\partial T(x)}{\partial x} \dot{x} = \Theta \frac{\partial \phi(\hat{x})}{\partial x} \dot{x} \quad (21)$$

で表される．一方，力学系 2 の状態方程式 (2) より得られる  $\dot{\xi}$  を  $\dot{\xi}_B$  とする． $\dot{\xi}_B$  は

$$\dot{\xi}_B = f(\Theta \phi(\hat{x})) + g(\Theta \phi(\hat{x})) \mu \quad (22)$$

で表される．式 (21) と (22) を比べ， $\dot{\xi}$  に関して

$$\Theta \frac{\partial \phi(\hat{x}_k)}{\partial x} \dot{x}_k = f(\Theta \phi(\hat{x}_k)) + g(\Theta \phi(\hat{x}_k)) \mu_k \quad (23)$$

が満たされる必要がある． $\dot{\xi}_A$  と  $\dot{\xi}_B$  の関係を図 1 に示す． $\dot{\xi}_A$  は  $\dot{x}$  を  $\xi$  空間へ写像することで得られ， $\dot{\xi}_B$  は  $x$  を  $\xi$  空間へ写像した  $\xi$  から状態方程式によって得られる  $\dot{\xi}$  である．

(d) キーポーズの条件

上記 (a), (b), (c) の条件だけでは，自明な解，すなわち力学系 2 の一つの平衡点 ( $\xi \equiv 0$ ) への写像を許す場合も考えられる．そこで，自明な解を避けるために，キーポーズの条件を与える．ここでのキーポーズとは，写像を用いて  $X$  を  $\Xi$  に変換しても値が変化しない一般化座標のデータ  $x_k (= \xi_k)$  のことであり，運動一周から  $m$  点を指定する． $k = p_h$  ( $h = 1, 2, \dots, m$ ) のときをキーポーズとして指定し，写像に関して

$$x_{p_h} = \xi_{p_h} = \Theta_1 \phi(\hat{x}_{p_h}) \quad (24)$$

の条件を与える．これにより， $\xi$  は静止することなく，動き続けるものとなる．得られる  $\Theta$ ,  $M$  の一意性はキーポーズの数に依存するが，その数を知ることは難しい．キーポーズを多く与えることは運動の詳細を先に与えることとなるが，与えすぎれば解が存在しなくなる可能性が高い．そのため，キーポーズの設定は重要なパラメータとなる．

(e) 運動エネルギーの条件

力学系 2 の運動エネルギーを所望のものとするような条件を与える．運動エネルギー  $E$  は状態変数によって決まるため，

$$E_k = E(\Theta \phi(\hat{x}_k)) \quad (25)$$

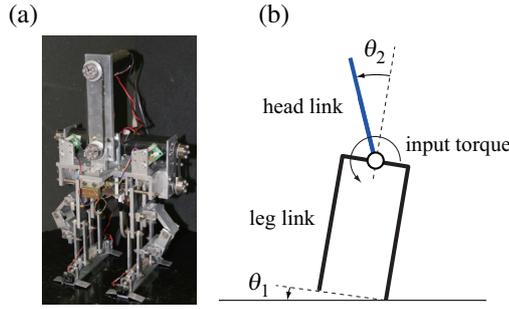


Fig. 2 Tap dancing robot and its dynamical model

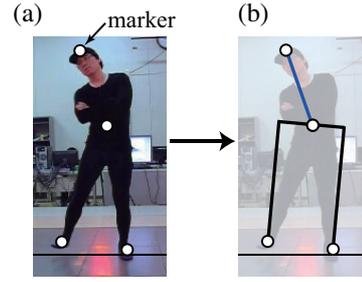


Fig. 3 Marker position and two links model for motion capture

で表される．そこで， $k$  における所望の参照運動エネルギーを  $E_{rk}$  とし，

$$E_{rk} = E(\Theta\phi(\hat{\mathbf{x}}_k)) \quad (26)$$

の条件を与える．このとき  $E_{rk}$  は運動の入力の大きさを調節するパラメータである．実際のロボットには，とくに衝突などにより，モデル化が難しいエネルギーの損失がある．このときロボットの運動エネルギーが大きければエネルギー損失が相対的に小さくなり，ロボットは運動を継続しやすくなる場合がある．ただし， $E_{rk}$  を大きくしすぎると，運動のロバスト性が失われる．

#### 2.4 写像と入力計算

本論文では写像を式 (8) の関数とした．そのため，前節で設定した条件を全て満たす写像が存在するとは限らない．そこで，実現する運動の条件の下で式 (20)，(23)，(24)，(26) に基づいて，以下の評価関数  $J$

$$J = \sum_{k=1}^n (\|J_{1k}\|^2 + \|J_{2k}\|^2 + \|J_{4k}\|^2) + \sum_{h=1}^m \|J_{3h}\|^2 \quad (27)$$

$$J_{1k} = \Theta_2\phi(\hat{\mathbf{x}}_k) - \Theta_1 \frac{\partial\phi(\hat{\mathbf{x}}_k)}{\partial\mathbf{x}} \dot{\mathbf{x}}_k \quad (28)$$

$$J_{2k} = \Theta \frac{\partial\phi(\hat{\mathbf{x}}_k)}{\partial\mathbf{x}} \dot{\mathbf{x}}_k - \{f(\Theta\phi(\hat{\mathbf{x}}_k)) + g(\Theta\phi(\hat{\mathbf{x}}_k))\boldsymbol{\mu}_k\} \quad (29)$$

$$J_{3h} = x_{ph} - \Theta_1\phi(\hat{\mathbf{x}}_{p_h}) \quad (30)$$

$$J_{4k} = E_{rk} - E(\Theta\phi(\hat{\mathbf{x}}_k)) \quad (31)$$

を設定し， $\Theta$  の  $i$  行  $j$  列要素  $\Theta_{ij}$ ， $\boldsymbol{\mu}_k$  の  $i$  要素  $\mu_{ki}$  での  $J$  の勾配を求め，

$$\Theta_{ij} \leftarrow \Theta_{ij} - \frac{\partial J}{\partial \Theta_{ij}} \delta \quad (32)$$

$$\mu_{ki} \leftarrow \mu_{ki} - \frac{\partial J}{\partial \mu_{ki}} \delta \quad (33)$$

によって  $\Theta$ ， $M$  を更新することで最適化する． $\delta$  は定数である．

### 3. タップダンスロボットへの適用

#### 3.1 タップダンスロボット

提案する方法の有効性を検証するために，人間の運動をタップダンスロボットの運動に変換する．式 (1) を人間の簡略化モデルとし，式 (2) をタップダンスロボットとする．タップダンスロボットを図 2-(a) に示す<sup>(12)</sup>．このロボットは頭部リンクを振り，その慣性力を利用して脚部リンクを左右交互に接地させて足踏み運動を行うものであり，図 2-(b) のように頭部リンクと脚部リンクの 2 リンク系でモデル化する．ロボットの状態変数  $\xi$  は

$$\xi = [\theta_1 \ \theta_2 \ \dot{\theta}_1 \ \dot{\theta}_2]^T \quad (34)$$

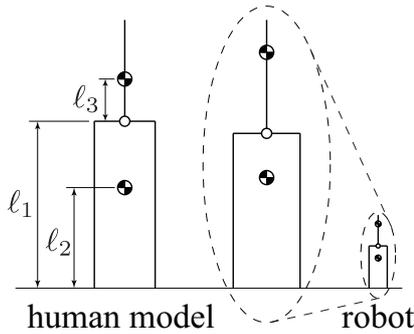


Fig. 4 Positions of the center of gravity

Table 1 Parameters of human model and robot

	human	robot
leg mass [kg]	31.8	2.8
head mass [kg]	41.8	0.5
length $l_1$ [m]	0.83	0.21
length $l_2$ [m]	0.50	0.15
length $l_3$ [m]	0.21	0.11

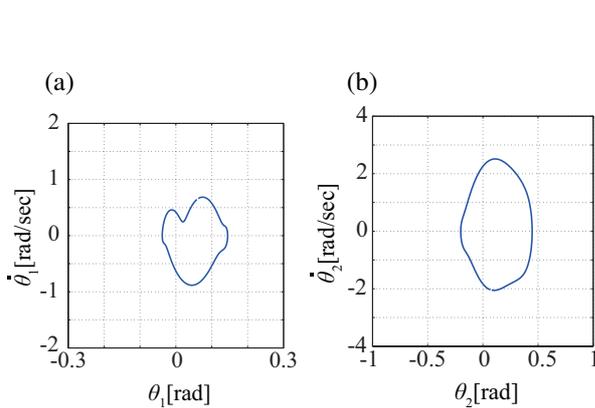


Fig. 5 Human motion data in phase-space

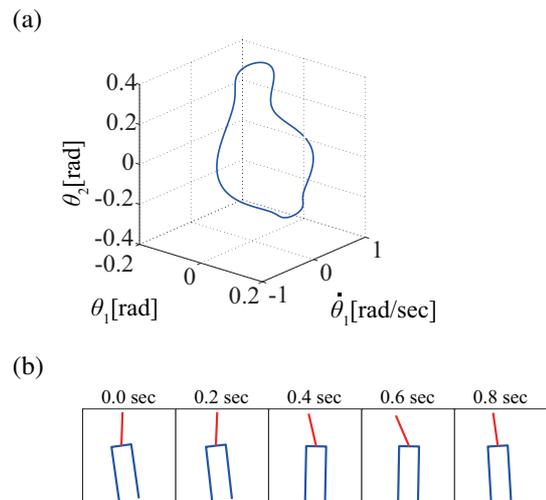


Fig. 6 Human motion data in state-space

のように脚部リンク，頭部リンクの回転角  $\theta_1, \theta_2$  [rad]，角速度  $\dot{\theta}_1, \dot{\theta}_2$  [rad/sec] で構成され，入力  $\mu (\in R^1)$  [Nm] は頭部リンクと脚部リンクをつなぐ関節に発生するトルクである．脚部リンクの足首はフリーであるため，このロボットは劣駆動系である．右脚接地状態と左脚接地状態に分けて運動方程式を求めるが，運動中，状態変数の軌道は連続となる．

### 3.2 人間の運動の計測

人間のモデルもタップダンスロボットと同じ2リンク系とし，モデルのリンクの質量と慣性モーメントを文献<sup>(14)</sup>の値を人間の体型に合わせてスケールリングして求める．人間モデルとタップダンスロボットの重心位置を図4に，力学パラメータを表1に示す．ただし， $l_1$  は脚の長さ， $l_2$  は地面から脚重心までの長さ， $l_3$  は頭の回転中心から頭重心までの長さである．図4のロボットは人間モデルに大きさを合わせて表示しており，ロボットは人間モデルと比較して脚部，頭部リンクの重心位置が高く，脚部リンクに対する頭部リンクの質量比が小さい．人間は上体を振って左右の足を交互に接地させる足踏み運動を行い，光学式モーションキャプチャシステムを使用してこの運動を計測する．図3に示すように四つのマーカが人間の頭頂部，腹部，両足つま先に付けられ，マーカの位置を元にモデルのリンク長さを決める．モーションキャプチャで得られたデータを二次元平面に射影し，逆運動学によってモデルの角度データを求める．さらに角度データから角速度と角加速度を差分で求め，人間モデルの状態変数  $x$  の軌道を得た．図5にそれぞれの位相空間での  $\theta_1$  と  $\theta_2$  の軌道を示す．人間の運動データはサンプリングタイム 5[msec] で計測され，一周 200点である．人間の運動データの状態空間における軌道を図6-(a)に示す．運動データは4次元空間で表されるが，ここでは表示の都合上， $\theta_1, \theta_2, \dot{\theta}_1$  の3次元空間で表した．図6-(b)は運動中のモデルの姿勢を表す．

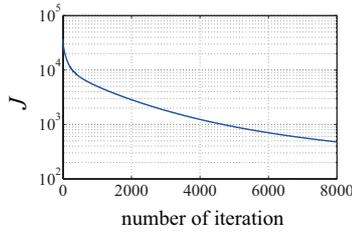


Fig. 7 Convergence of  $J$

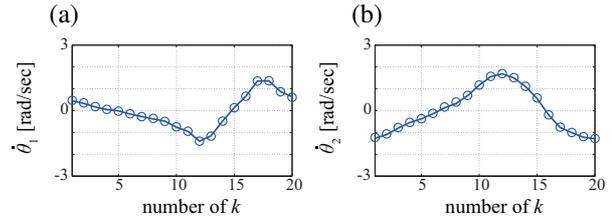


Fig. 8 Angular velocities using optimized coefficient matrix

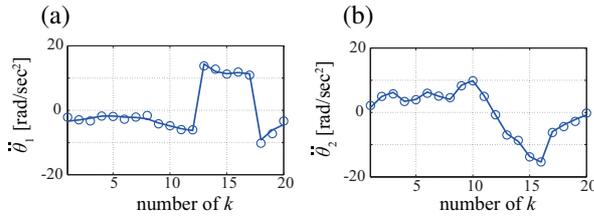


Fig. 9 Angular accelerations using optimized coefficient matrix and input sequence

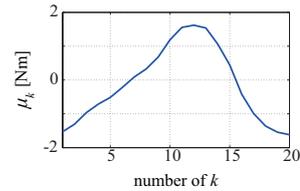


Fig. 10 Obtained input sequence  $M$

### 3.3 ロボットの力学的整合性を満たす運動への変換

まず、写像の条件と設計変数  $\Theta$ ,  $M$  の初期値について述べる．実現する運動の条件として、タップダンスロボットの運動一周期における左右脚の接地状態を人間の運動と同じとする．このために、例えば運動データ  $k$  で人間が右脚接地 ( $\theta_1$  が正) しているとき、 $J_{1k}$  の計算にはロボットの右脚接地時の運動方程式を用いる．左足接地時も同様である．実現する運動の条件に関連し、キーポーズは両足接地する瞬間の  $\theta_1$  とした．人間の運動一周期分のデータの軌道上で等間隔に選んだ 20 点にキーポーズの 2 点を加えたものを代表点  $X$  とし、これを  $\Theta$  と  $M$  の計算に用いる． $\Theta$ ,  $M$  の初期値をそれぞれ  $\Theta_0$ ,  $M_0$  とし、これらを

$$\Theta_0 = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & I & \mathbf{0} & \cdots & \mathbf{0} \end{bmatrix}, M_0 = U \tag{35}$$

とする． $I$  は単位行列であり、 $\Theta_0$  を用いた写像  $T$  では  $\Xi$  は  $X$  と同じ軌道となる． $U$  は逆動力学で求めた人間の運動の入力列である．人間の運動一周期分のデータの主成分の値は

$$s_1 = 7.50, s_2 = 1.26, s_3 = 0.625, s_4 = 0.325 \tag{36}$$

であり、 $T_x$  は  $\mathbf{x} \in R^4$  を  $\hat{\mathbf{x}} \in R^2$  に低次元化するものとした． $\phi(\hat{\mathbf{x}})$  は  $\ell = 5$  とする．写像の条件の一つである式 (23) は  $\Theta = \Theta_0$ ,  $M = M_0$  では満たされず、人間の運動そのままではロボットの力学的整合性は満たされない．

次に、所望の参照運動エネルギー  $E_{rk}$  を一定値  $0.1 \text{ J}$ 、式 (32), (33) の  $\delta$  を  $2 \times 10^{-7}$  とし、 $J$  を最小化する  $\Theta$ ,  $M$  を求めた．繰り返し計算における  $J$  の履歴を図 7 に示す．8000 回の繰り返しにより、 $J$  は  $1/100$  のオーダーまで小さくなった．ロボットの角速度  $\dot{\theta}_1, \dot{\theta}_2$  を図 8 に示す．図中  $k$  はキーポーズを除く代表点のラベル、 $\circ$  は式 (8) の  $\xi$ 、実線は式 (8) の  $\xi$  の時間微分を表す．また、ロボットの角加速度  $\ddot{\theta}_1, \ddot{\theta}_2$  を図 9 に示す．図中  $\circ$  は  $\xi_A$  の加速度項の値、実線は  $\xi_B$  の加速度項の値を表す．得られた  $M$  を図 10 に示す．これらの結果から以下のことが導かれる．

- (i) 図 8 より、 $\Xi$  は式 (20) を十分に満たす．
- (ii) 図 9 より、 $\Xi$  は式 (23) を十分に満たす．
- (iii) (ii) を満たすために、人間の運動データ  $X$  は図 11 に示すロボットの運動データ  $\Xi$  に変換され、運動の実現に必要な入力列  $M$  が図 10 に示すように得られる．

以上より、得られた  $\Xi$  はタップダンスロボットの力学的整合性を満たす運動のデータであり、 $\Xi$  と  $M$  は軌道アトラクタに基づいた自律制御系設計の目標運動データとして利用可能である．ロボットの運動データの状態空間における軌道と運動中のモデルの姿勢を図 12 に示す．図 6 と同様に  $\theta_1, \theta_2, \dot{\theta}_1$  の 3 次元空間として表した．キーポーズを両足接地の瞬間の  $\theta_1$  としたことにより、人間とロボットとで接地脚が切り替わるタイミングが一致して

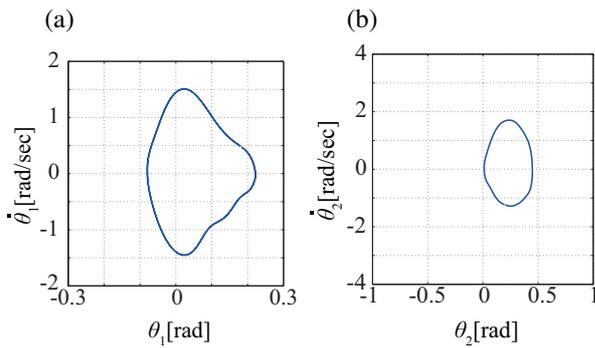


Fig. 11 Robot motion data in phase-space

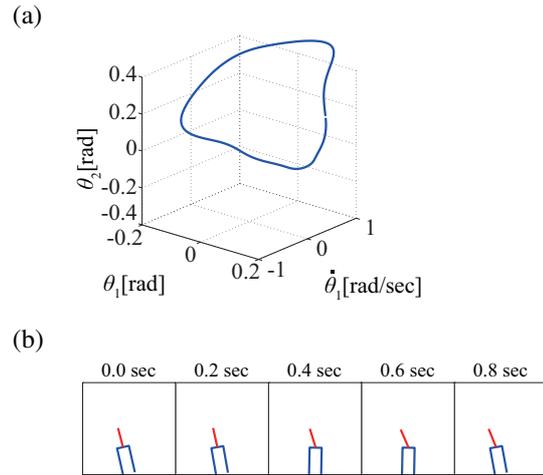


Fig. 12 Robot motion data in state-space

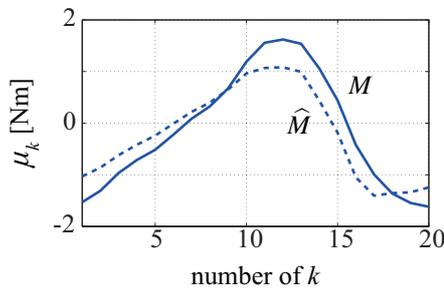


Fig. 13 Comparison of obtained inputs using different reference kinetic energies

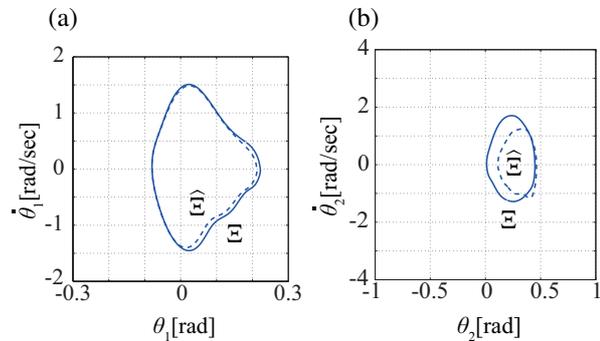


Fig. 14 Comparison of obtained robot motions using different kinetic energies in phase-space

いる．この場合，ロボットは人間と比べて脚部リンクが短いので，人間と左右脚の接地タイミングを合わせるために，脚部リンク傾きの振幅が人間よりも大きくなる傾向がある．タップダンスロボットは1つの入力で2つのリンクを動かす劣駆動系であるため，実現可能な足踏み運動の軌道およびその入力を得るためにこれまでは頭部リンクに三角関数の運動パターンを与え，周期運動となったときの軌道と入力を得ていた．この方法では図12のような左右非対称な足踏み運動の軌道およびその入力を得ることは難しかったが，本研究の方法を用いることでこれを容易に得ることが可能となった．

また，人間の運動データから得られるロボットの実現可能な運動は多数存在し，所望の参照運動エネルギー  $E_{rk}$  を変更することで異なる運動が得られる．ここでは運動エネルギーを最小化するように参照運動エネルギー  $E_{rk}$  を  $0\text{ J}$  とし，ロボットの運動の  $\hat{\theta}$ ,  $\hat{\Xi}$ ,  $\hat{M}$  を求めた． $\hat{M}$  と  $M$  の比較を図13に示す． $E_{rk}$  を小さくしたことにより，ロボットの運動に必要な入力トルクは小さくなる． $\hat{\Xi}$  と  $\Xi$  の比較を図14に示す． $\hat{\Xi}$  と  $\Xi$  とでは，とくに  $\theta_2$  の軌道が異なる．これは脚部リンクの回転中心が受動関節でありトルクを発生できず，接地脚の切り替わりタイミングの拘束が  $\theta_1$  の軌道を制限するのに対し，頭部リンクはモータで直接駆動でき， $\theta_2$  の軌道は拘束されずに冗長な自由度となっているためである．得られた運動の軌道と入力を目標運動データとして用いて軌道アトラクタに基づいた自律制御系を設計し，運動を生成するシミュレーションを行った． $\Xi$ ,  $M$  を用いた場合を図15に， $\hat{\Xi}$ ,  $\hat{M}$  を用いた場合を図16に示す．図中○は目標運動データ，実線はシミュレーションで生成されたロボットの運動の軌道である．どちらの場合も与えた軌道に近い安定な運動が生成された．

### 3.4 実験結果

$\Xi$ ,  $M$  を用いて軌道アトラクタに基づいた自律制御系を設計し，タップダンスロボット実機にて運動を生成した．実験の結果生成されたロボットの運動の状態空間における軌道を図17に示す．図17の○は目標運動データ，実線

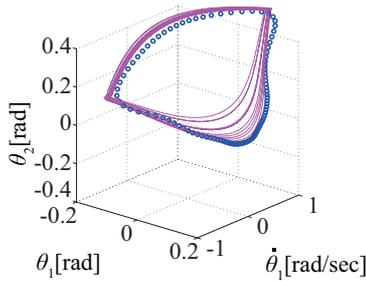


Fig. 15 Simulation result of the generated robot motion using  $\Xi$  in state-space

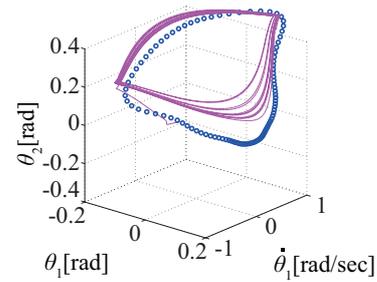


Fig. 16 Simulation result of the generated robot motion using  $\hat{\Xi}$  in state-space

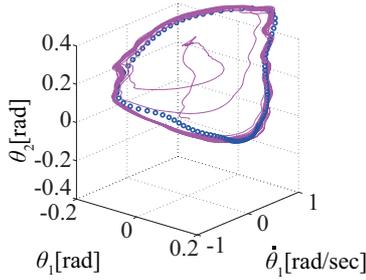


Fig. 17 Trajectory of the generated robot motion using  $\Xi$  in state-space

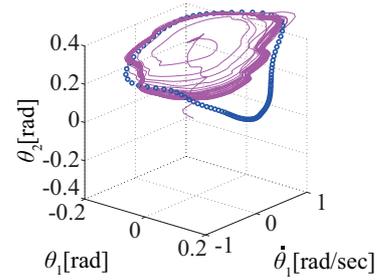


Fig. 18 Trajectory of the generated robot motion using  $\hat{\Xi}$  in state-space

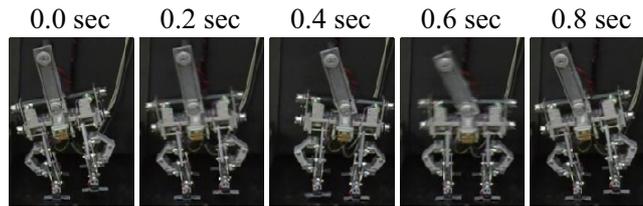


Fig. 19 Robot motion sequence realizing  $\Xi$

は実験で生成された運動の軌道である．生成されたロボットの運動を図 19 に示す．これは運動の様子を 0.2[sec] ごとに表した連続写真であり，人間の運動と同じように左右の脚の接地時間が異なる非対称な運動である．実験の結果，目標運動データに近い安定な運動が生成された．

また， $\hat{\Xi}$ ， $\hat{M}$  を用いて自律制御系を設計し，ロボット実機にて運動を生成した．実験の結果生成されたロボットの運動の状態空間における軌道を図 18 に示す．生成した運動は与えた軌道  $\hat{\Xi}$  へと十分に引き込まれなかった．

### 3.5 考察

1. 図 17 において， $\Xi$  に引き込まれる運動が生成されたことから，提案する方法で得られる運動パターンが力学的に実現可能であることが確かめられた．
2. 図 18 において， $\hat{\Xi}$  に引き込まれる運動が生成されなかったのは，図 18 の運動は図 17 の運動と比べてロボットの運動エネルギーが小さく，衝突によるエネルギー損失が相対的に大きいことが原因と考えられる．
3. さらに，ここでは  $\dim(x)=\dim(\xi)$ ， $\dim(u)=\dim(\mu)$  を仮定したが，運動の全てを表す変換という観点から  $\dim(x)>\dim(\xi)$ ， $\dim(u)>\dim(\mu)$  の場合も，高次元な側の運動が低次元な側の運動を表すのに十分な情報を持つならば本研究の方法は適用可能であると考えられる．

## 4. おわりに

本論文では，実現する運動の条件を満たすロボットの運動を生成するために，人間の運動を非線形状態空間写像を用いてロボットの力学的整合性を満たす運動へと変換する方法を提案した．以下に成果を示す．

1. 異なる力学系間で、速度と加速度の力学的な拘束に基づいて運動を変換する非線形状態空間写像とその計算方法を示した。
2. ロボットの運動は与える参照運動エネルギーの値によって変化し、力学的整合性を満たす運動は複数存在することを示した。
3. 提案する非線形状態空間写像を用いてモーションキャプチャによって計測した人間の運動データを変換し、タップダンスロボットの力学的整合性を満たす運動データを得た。
4. 得られた運動データを用いて軌道アトラクタに基づいた自律制御系を設計し、目標運動のデータに一致するタップダンスロボットの運動を生成した。これにより、提案する方法で得られる運動パターンが力学的に実現可能であることが確かめられた。

#### 謝 辞

本研究は、科学技術振興機構 CREST「パラサイトヒューマンネットによる五感情報通信と環境センシング・行動誘導」の支援を受けた。

#### 文 献

- (1) Dariush, B., Gienger, M., Arumbakkam, A., Zhu, Y., Jian, B., Fujimura, K., and Goerick, C., "Online Transfer of Human Motion to Humanoids", *International Journal of Humanoid Robotics*, Vol. 6, No. 2 (2009), pp. 265-289.
- (2) Ijspeert, A.J., Nakanishi, J., Shibata, T., and Schaal, S., "Nonlinear Dynamical Systems for Imitation with Humanoid Robots", *Proceedings of the IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots* (2001), pp. 219-226.
- (3) Pollard, N.S., Hodgins, J.K., 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*, Vol. 2 (2002), pp. 1390-1397.
- (4) Nakaoka, S., Kajita, S., and Yokoi, K., "Intuitive and Flexible User Interface for Creating Whole Body Motions of Biped Humanoid Robots", *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems* (2010), pp. 1675-1682.
- (5) 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 (2006), pp. 388-399.
- (6) Yamane, K., and Nakamura, Y., "Dynamics Filter - Concept and Implementation of On-line Motion Generator for Human Figures", *IEEE Transactions on Robotics and Automation* (2003), pp. 421-432.
- (7) Tsai, Y.Y., Chu, H.K., Chen, K.B., Lee, T.Y., and Yen, C.L., "Animation Generation and Retargeting Based on Physics Characteristics", *Proceedings of Third International Conference on Intelligent Information Hiding and Multimedia Signal Processing* (2007), pp. 349-352.
- (8) Tsai, Y.Y., Lin, W.C., Cheng, K.B., Lee, J., and Lee, T.Y., "Real-time Physics-based 3D Biped Character Animation Using an Inverted Pendulum Model", *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Vol. 16, No. 2 (2010), pp. 325-337.
- (9) Yamane, K., and Hodgins, J., "Simultaneous Tracking and Balancing of Humanoid Robots for Imitating Human Motion Capture Data", *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems* (2009), pp. 2510-2517.
- (10) Yamane, K., and Hodgins, J., "Control-aware Mapping of Human Motion Data with Stepping for Humanoid Robots", *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems* (2010), pp. 726-733.
- (11) Yamane, K., Anderson, S.O., and Hodgins, J.K., "Controlling Humanoid Robots with Human Motion Data: Experimental Validation", *Proceedings of IEEE-RAS International Conference on Humanoids Robots* (2010), pp. 504-510.
- (12) 岡田昌史, 村上健治, "軌道アトラクタを用いたロボットの同調運動制御によるコミュニケーション原理の表現", *日本ロボット学会誌*, Vol. 25, No. 4 (2007), pp. 545-553.
- (13) 國吉康夫, "模倣の適応性と創発性:実世界における人間的知性の基盤", *日本ロボット学会誌*, Vol. 25, No. 5 (2007), pp. 671-677.
- (14) Herron, R.E., Cuzzi, J.R., and Hugg, J., "Mass Distribution of the Human Body Using Biostereometrics", *Technical Report of Houston: Texas Institute for Rehabilitation and Research Biostereometrics Laboratory* (1976).