

非線形状態空間写像を用いた運動の変換とロボットの運動生成

Motion Transformation using Nonlinear State-space Mapping and Robot Motion Generation

○正 宮崎 哲郎 (東工大) 正 岡田 昌史 (東工大)

Tetsuro MIYAZAKI, Tokyo TECH, miyazaki.t.ac@m.titech.ac.jp

Masafumi OKADA, Tokyo TECH, okada@mep.titech.ac.jp

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 into a robot motion that satisfies 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 optimized so that the constraints of velocity and acceleration are satisfied. The proposed method is applied to a tap dancing robot and robot motion is generated by an attractor-based control method.

Key Words: motion transformation, robot motion generation, nonlinear state space mapping, human motion

1. はじめに

ロボットが運動を実現するために、ロボットを安定化するフィードバック系を構成し、これに目標値を与える方法が一般的である。これにより、ロボットは決められた時刻に決められた姿勢を取り、作業をスムーズに行うことが可能となる。これに対し著者らはこれまでにロボットの運動を所望の運動に引き込ませるような制御系の設計法を提案してきた [1]。この方法は、与えられた目標運動のデータを用い、これがロボットの状態空間の軌道アトラクタとなるよう自律制御系を設計することで外部からの目標値を用いずにロボットに運動を行わせる手法である。外部からの目標値がないことから運動が時間の拘束を持たず、特に劣駆動系の制御において姿勢を立て直す動作と目標の運動を継続することが独立に行え、環境に合わせて適切に運動を変化させながらこれを継続することが可能となる。しかし、この方法において先に与えられる目標運動のデータは力学的に実現可能、すなわち運動を継続するための入力が存在する必要がある、実際はこれを得ることが難しいことから、これまでは単純な運動への応用に留まっていた。そこで、例えばモーションキャプチャなどを利用して運動データを得て、これをロボットの実現可能な運動へと変換することができれば、様々な運動に対する自律制御系が設計可能となるであろう。

これまでに、モーションキャプチャから得られた運動をロボットの運動へ変換する方法の研究がなされてきた。Dariush ら [2] は、人間の運動に従ったロボットの運動において、リンク間の衝突検出を行いこれを回避するよう運動をオンラインで修正する方法を提案した。Ijspeert ら [3] は人間の運動を非線形力学系に基づく目標運動生成器 (コントロールポリシー) に記憶させる方法を提案した。ロボットは運動中に人間とロボットの身体の違いを含む外乱を受けた場合、コントロールポリシーによって目標運動を変化させる。これらの方法は運動学に基づく運動の変換であり、これに力学的な拘束を与えることは難しい。中岡ら [4][5] はヒューマノイドロボットに人の舞踊動作を再現させた。ロボット上半身の舞踊動作には人間の運動から運動学的に関節角軌道を得て、下半身の動作は ZMP に基づいて全身の運動を安定化する。この方法は人間の運動の一部を変換してロボットの運動としており、全身の運動は制御を実装してはじめて得られるものであり、先を得ることは難しい。一方、人間の運動を動力学的にモデルの運動へと変換する方法も提案されている。Yamane ら [6] は人間の運動をアニメーションのキャラクタの身体に力学的に整合する運動に変換する Dynamics filter を提案した。Tsai ら [7] は人型のキャラクタを倒立振り子モデルで表し、モデルの運動が力学的に実現可能となるように人間の運動を変換し、見た目に自然な運動のアニメーションを生成する方法を提案した。ただし、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ためのものであり、得られた運動を生成するためには現実的でない入力が必要になる可能性がある。

本研究では、軌道アトラクタに基づいた自律制御系設計に利用する実現可能な目標運動のデータを得るために、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に実現可能な運動へと変換する方法を提案する。写像によって人間の運動における速度と加速度はロボットの力学的な拘束を満たす速度と加速度に変換され、それに伴いロボットの運動も変化する。また、提案する方法を検証するために、モーションキャプチャによって得た人間の運動をタップダンスロボットの運動に変換し、それ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、ロボットの運動を生成する。

2. 非線形状態空間写像を用いた運動の変換

2.1 非線形状態空間写像

異なる二つの力学系

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

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

を考える。 \mathbf{x}, \mathbf{u} は力学系 1 の状態と入力、 $\boldsymbol{\xi}, \boldsymbol{\mu}$ は力学系 2 の状態と入力である。 $\mathbf{x}, \boldsymbol{\xi}$ は

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

$$\boldsymbol{\xi} = \begin{bmatrix} \xi^T & \dot{\xi}^T \end{bmatrix}^T \quad (4)$$

のように一般化座標 x, ξ とそれらの時間微分値 $\dot{x}, \dot{\xi}$ で構成されており、 \mathbf{x} と $\boldsymbol{\xi}$ の次元および \mathbf{u} と $\boldsymbol{\mu}$ の次元は等しいことを仮定する。力学系 1 の運動データ X 、その時間微分値 \dot{X} 、運動に必要な入力列 U が

$$X = \begin{bmatrix} \mathbf{x}_1 & \cdots & \mathbf{x}_N \end{bmatrix}, \dot{X} = \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{x}}_1 & \cdots & \dot{\mathbf{x}}_N \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$U = \begin{bmatrix} \mathbf{u}_1 & \cdots & \mathbf{u}_N \end{bmatrix} \quad (6)$$

のように与えられているとする。このとき、 X を力学系 2 の運動データ

$$\Xi = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\xi}_1 & \cdots & \boldsymbol{\xi}_N \end{bmatrix} \quad (7)$$

へと変換する、すなわち

$$\boldsymbol{\xi} = T(\mathbf{x}) \quad (8)$$

で表せる非線形状態空間写像 T と Ξ を実現する入力列

$$M = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\mu}_1 & \cdots & \boldsymbol{\mu}_N \end{bmatrix} \quad (9)$$

を求めることを考える。ここで T を

$$T(\mathbf{x}) = \Theta\phi(\hat{\mathbf{x}}) = \begin{bmatrix} \Theta_1 \\ \Theta_2 \end{bmatrix} \phi(\hat{\mathbf{x}}) = \begin{bmatrix} \xi \\ \dot{\xi} \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\hat{\mathbf{x}} = T_x \mathbf{x} \quad (11)$$

$$\phi(\hat{\mathbf{x}}) = \begin{bmatrix} 1 & \mathbf{x}^T & (\hat{\mathbf{x}}^2)^T & \cdots & (\hat{\mathbf{x}}^\ell)^T \end{bmatrix}^T \quad (12)$$

とする。すなわち、非線形状態空間写像 T は \mathbf{x} を低次元化した空間での値 $\hat{\mathbf{x}}$ のべき乗多項式で表せるとし、その係数からなる行列 Θ 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 (12) 中の $\hat{\mathbf{x}}^\ell$ は $\hat{\mathbf{x}}$ の要素をかけあわせて ℓ 次のべき乗項を並べたベクトルであり、例えば

$$\hat{\mathbf{x}} = [\hat{x}_1 \quad \hat{x}_2]^T \quad (13)$$

とすると $\hat{\mathbf{x}}^\ell$ は

$$\hat{\mathbf{x}}^\ell = [\hat{x}_1^\ell \quad \hat{x}_1^{\ell-1}\hat{x}_2 \quad \hat{x}_1^{\ell-2}\hat{x}_2^2 \quad \cdots \quad \hat{x}_2^\ell]^T \quad (14)$$

で定義する。

2.2 状態空間の低次元化写像

\mathbf{x} が高次元な空間を張る場合、そのべき乗 \mathbf{x}^ℓ の項数は極めて多くなる。そこで、先に \mathbf{x} を低次元な空間 $\hat{\mathbf{x}}$ へと低次元化する。状態空間を低次元化するために Watanabe ら [8] の提案する方法を用いる。式 (5) の X, \dot{X} を以下のように特異値分解する。

$$\begin{bmatrix} X \\ \dot{X} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_1 & U_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_1 & 0 \\ 0 & S_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1^T \\ V_2^T \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$S_1 = \text{diag} \{ s_1 \quad s_2 \quad \cdots \quad s_r \} \quad (16)$$

$$S_2 = \text{diag} \{ s_{r+1} \quad s_{r+2} \quad \cdots \quad s_n \} \quad (17)$$

ここで、 $s_r \gg s_{r+1}$ を仮定すると、 $\begin{bmatrix} X^T & \dot{X}^T \end{bmatrix}^T$ は低次元な空間 V_1^T で表されることを意味し、 T_x は

$$T_x = U_1^T \quad (18)$$

として得られる。ここで、式 (12) では、 \mathbf{x} の 1 乗項は低次元化していない。これは ϕ の中の全ての \mathbf{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。

2.3 写像の条件

式 (10) で $\xi, \dot{\xi}$ は異なる係数行列 Θ_1, Θ_2 を用いて \mathbf{x} を変換して得られる。 X を変換した Ξ が実現可能となるためには $\xi = \Theta_1 \phi(\hat{\mathbf{x}})$ と $\dot{\xi} = \Theta_2 \phi(\hat{\mathbf{x}})$ の間で

$$\Theta_2 \phi(\hat{\mathbf{x}}_k) = \Theta_1 \frac{\partial \phi(\hat{\mathbf{x}}_k)}{\partial \mathbf{x}} \dot{\mathbf{x}}_k \quad (19)$$

が満たされる必要がある。ただし、 k は $k = 1 \cdots N$ であり、運動データの順番を表す。また、 $\frac{\partial \phi(\hat{\mathbf{x}})}{\partial \mathbf{x}}$ は、 x_i, \hat{x}_i を $\mathbf{x}, \hat{\mathbf{x}}$ の i 行要素として

$$\frac{\partial \phi(\hat{\mathbf{x}})}{\partial \mathbf{x}} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \phi(\hat{\mathbf{x}})}{\partial x_1} & \cdots & \frac{\partial \phi(\hat{\mathbf{x}})}{\partial x_i} & \cdots \end{bmatrix} \quad (20)$$

$$\frac{\partial \phi(\hat{\mathbf{x}})}{\partial x_i} = \begin{bmatrix} 0 & \left(\frac{\partial \mathbf{x}}{\partial x_i} \right)^T & \left(\frac{\partial \hat{\mathbf{x}}^2}{\partial \mathbf{x}} T_x \frac{\partial \mathbf{x}}{\partial x_i} \right)^T & \cdots \end{bmatrix}^T \quad (21)$$

$$\frac{\partial \hat{\mathbf{x}}^j}{\partial \hat{\mathbf{x}}} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \hat{\mathbf{x}}^j}{\partial \hat{x}_1} & \cdots & \frac{\partial \hat{\mathbf{x}}^j}{\partial \hat{x}_i} & \cdots \end{bmatrix} \quad (j = 2, \dots, \ell) \quad (22)$$

で定義される。式 (19) は状態 ξ が一般化座標 ξ とその微分値 $\dot{\xi}$ で構成されているため必要な条件である。一方、式 (8) 両辺を時間微分し

$$\dot{\xi} = \frac{\partial T(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} \dot{\mathbf{x}} = \Theta \frac{\partial \phi(\hat{\mathbf{x}})}{\partial \mathbf{x}} \dot{\mathbf{x}} \quad (23)$$

を得る。ここで、式 (23) より求まる $\dot{\xi}$ を

$$\dot{\xi}_{Ak} = \Theta \frac{\partial \phi(\hat{\mathbf{x}}_k)}{\partial \mathbf{x}} \dot{\mathbf{x}}_k \quad (24)$$

とし、力学系 2 の状態方程式 (2) より求まる $\dot{\xi}$ を

$$\dot{\xi}_{Bk} = f(\Theta \phi(\hat{\mathbf{x}}_k)) + g(\Theta \phi(\hat{\mathbf{x}}_k)) \boldsymbol{\mu}_k \quad (25)$$

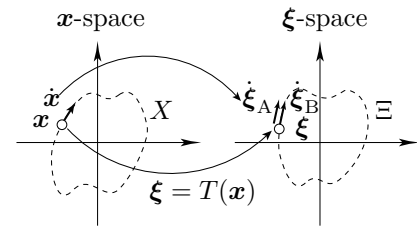


Fig.1 State-space mapping

とする。 Ξ が実現可能となるためには、Fig.1 に示すように $\mathbf{x} \rightarrow \dot{\mathbf{x}} \rightarrow \xi$ と $\mathbf{x} \rightarrow \xi \rightarrow \dot{\xi}$ で得られる 2 つの ξ である ξ_{Ak} と ξ_{Bk} が等しくなる、すなわち

$$\Theta \frac{\partial \phi(\hat{\mathbf{x}}_k)}{\partial \mathbf{x}} \dot{\mathbf{x}}_k = f(\Theta \phi(\hat{\mathbf{x}}_k)) + g(\Theta \phi(\hat{\mathbf{x}}_k)) \boldsymbol{\mu}_k \quad (26)$$

が満たされる必要がある。式 (19), (26) を満たす Θ, M を求めるために、評価関数 J を

$$J = \sum_{k=1}^N (\|J_{1k}\|^2 + \|J_{2k}\|^2) \quad (27)$$

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

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

として、これを最小化する Θ, M を勾配法で求める。

3. 人間からロボットへの運動の変換

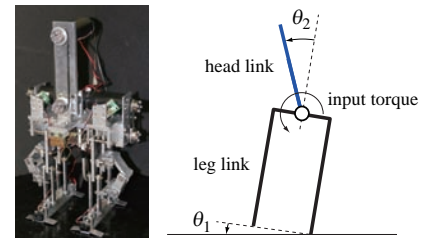


Fig.2 Tap dancing robot and its model

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。人間の状態変数を \mathbf{x} 、入力を \mathbf{u} とし、ロボットの状態変数を ξ 、入力を $\boldsymbol{\mu}$ とする。タップダンスロボットを Fig.2 左に示す。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、Fig.2 右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 ξ は脚部リンク、頭部リンクの回転角 θ_1, θ_2 [rad]、角速度 $\dot{\theta}_1, \dot{\theta}_2$ [rad/sec] を用いて

$$\xi = [\theta_1 \quad \theta_2 \quad \dot{\theta}_1 \quad \dot{\theta}_2]^T \quad (30)$$

となり、入力 $\boldsymbol{\mu}$ 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。

人間のモデルをタップダンスロボットと同じように 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 [9] の値を体型に合わせてスケールリングして求める。人間は Fig.3 左に示すキャブチャスーツを着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ブチャシステムを使用して運動を計測する。モーションキャブチャで得られる運動のデータはキャブチャスーツに付いたマーカ（頭部に 1 つ、腹部に 1 つ、左右つま先に 1 つずつ）の 3 次元位置の時系列データであり、これを二次元平面に射影し、逆運動学解析によって Fig.3 右に示す 2 リンクモデルの角度を得た。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 \mathbf{x} の軌道を得た。得られた人間の運動データの状態空間における軌道を Fig.4 に示す。実際には運動データ

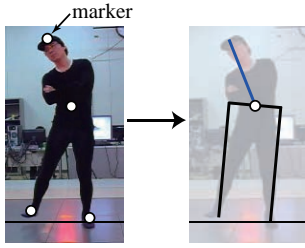


Fig.3 Capturing of human motion

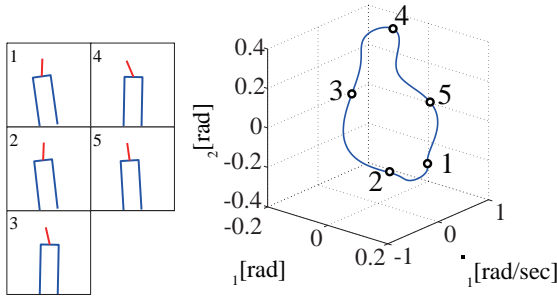


Fig.4 Human motion data in the state-space

は4次元空間で表されるが、ここでは表示上、 $\theta_1, \theta_2, \dot{\theta}_1$ の3次元空間として表示した。人間の運動データはサンプリングタイム5[msec]で計測された一周200点の時系列データ(周期1[sec])であり、1周期あたりの左右脚の接地時間が異なっている。

人間の運動データの軌道上で等間隔に20点選び、これらを代表点 X とする。 X を用いて式(27)の評価関数 J を最小化する非線形状態空間写像 T の係数行列 Θ とロボットの入力列 M を求める。 Θ, M の初期値をそれぞれ Θ_0, M_0 とし、ここでは、

$$\xi = \Theta_0 \phi(\hat{x}_k) = x \quad (31)$$

$$\Theta_0 = \begin{bmatrix} 0 & I & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix} \quad (32)$$

$$M_0 = \begin{bmatrix} 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix} \quad (33)$$

とした。ただし、 T_x は $x \in R^4$ を $\hat{x} \in R^2$ に低次元化するものとし、 $\phi(\hat{x})$ は $\ell=5$ とした。 $\Theta = \Theta_0, M = M_0$ としたときの Ξ と加速度 $\dot{\theta}_1, \dot{\theta}_2$ をFig.5に示す。Fig.5-(c),(d)において、実線は ξ_{Ak}

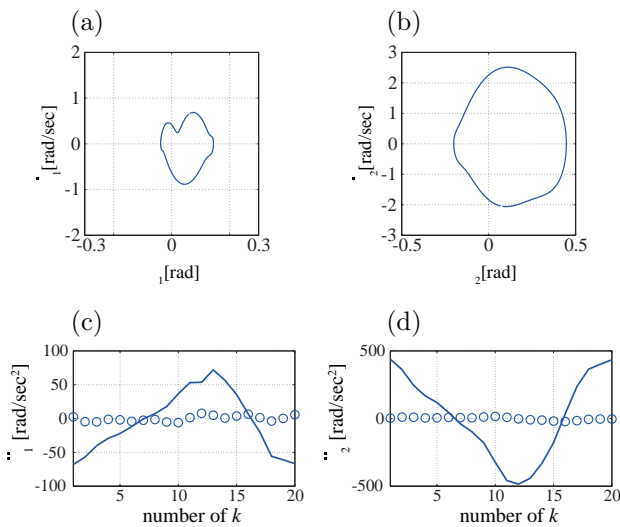


Fig.5 Transformed $\Xi, \dot{\theta}_1, \dot{\theta}_2$ using Θ_0 and M_0

の加速度項、丸印は ξ_{Bk} の加速度項を表す。 Ξ が実現可能となるためには ξ_{Ak} と ξ_{Bk} が一致する必要があるが、 $\Theta = \Theta_0, M = M_0$ では満たされていない。次に J を最小化する Θ, M を求め、それ

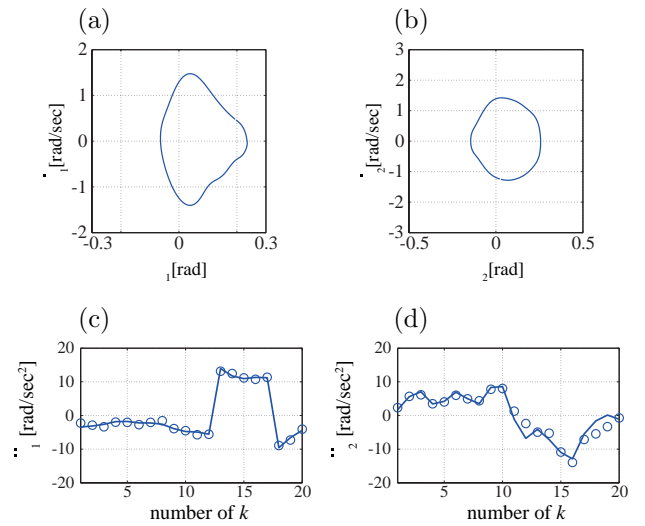


Fig.6 Transformed $\Xi, \dot{\theta}_1, \dot{\theta}_2$ using optimized Θ and M

らを用いて Ξ と $\dot{\theta}_1, \dot{\theta}_2$ を求めた結果をFig.6に示す。Fig.6-(c),(d)から、 ξ_{Ak} と ξ_{Bk} の加速度が一致していることが分かる。また、そのために Ξ も変化した、ロボットが実現可能な運動へと変換されたことが分かる。また、入力列 M はFig.7のような値となった。

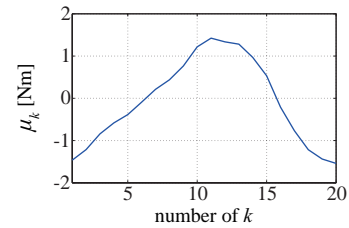


Fig.7 Obtained input sequence M

最大約1.5[Nm]という値はタップダンスロボットにおいて実現可能な値である。得られたロボットの運動データの状態空間における軌道をFig.8に示す。なお、Fig.4と同様に3次元空間で示した。

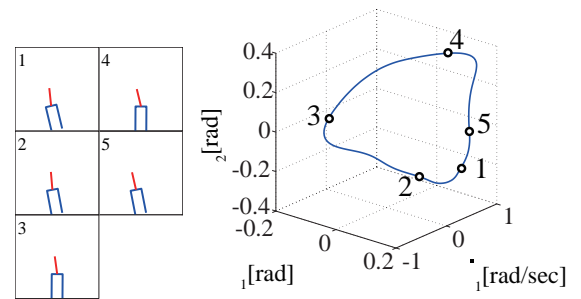


Fig.8 Robot motion data in the state-space

4. タップダンスロボットの運動生成

4.1 自律制御系の設計

Fig.8の運動データを用いて軌道アトラクタに基づく自律制御系を設計し、タップダンスロボットの運動を生成した。実験の結果生成されたタップダンスロボットの状態空間における運動の軌道をFig.9に示す。Fig.9の丸印は変換された目標運動のデータ、実線は実験で生成された運動の軌道である。実験の結果、目標運動のデータに近いロボットの安定な運動が生成されたことから、提案する方法で得られるロボットの運動データは実現可能な軌道であることが分かる。得られたタップダンスロボットの運動をFig.10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

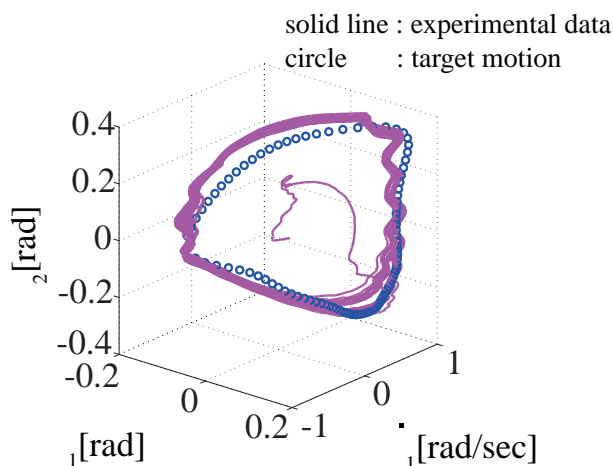


Fig.9 Trajectory of the robot motion in the state-space

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。

4.2 考察

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、このような左右非対称で実現可能な足踏み運動のデータ、およびその入力を得ることは難しく、実際、これまでは頭部リンクを三角関数で動かすような簡単な運動しか実現することができなかった。これに対し、本研究の手法を用いることで、より複雑な運動を人間の運動データから求めることが可能となった。

また、勾配法によって得られる Θ , M は初期値 Θ_0 , M_0 に依存する。そのため、人間の運動データから得られたロボットの実現可能な運動は多数存在し、実際、初期値によって主に θ_2 の振幅の異なる運動がいくつか得られた。一般に、任意の非線形関数を用いれば任意の運動へと写像可能であるが、本研究の方法は非線形関数は状態変数のべき乗多項式であるという制限、かつ人間のモデルはロボットのモデルと類似したものであるという制限のもとでの運動変換である。これらの制限により、今回生成したタップダンスロボットの運動が人間の運動と同様に非対称性を持っていたように、得られるロボットの運動は人間の運動にある程度類似したものになる。

さらに、ここでは $\dim(\mathbf{x})=\dim(\boldsymbol{\xi})$, $\dim(\mathbf{u})=\dim(\boldsymbol{\mu})$ を仮定したが、運動の全てを表す変換という観点から $\dim(\mathbf{x})>\dim(\boldsymbol{\xi})$, $\dim(\mathbf{u})>\dim(\boldsymbol{\mu})$ の場合においても適用可能であると考えられる。

5. おわりに

本研究では、軌道アトラクタに基づく自律制御系設計のための運動データを得るために、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に実現可能な運動へと変換する方法を提案した。以下に成果を示す。

- 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。
- 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実現可能な運動データを得た。
- 得られた運動データを用いて軌道アトラクタに基づく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ロボットの運動データは軌道アトラクタに基づく自律制御系を設計するために有効であることを示した。

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。

参考文献

- [1] 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, pp. 545-553, 2007.
- [2] B.Dariush, M.Gienger, A.Arumbakkam, Y.Zhu, B.Jian, K.Fujimura, and C.Goerick. Online transfer of human motion to humanoids. *International Journal of Humanoid Robotics*, Vol. 6, No. 2, pp. 265-289, 2009.
- [3] A.J.Ijspeert, J.Nakanishi, T.Shibata, and S.Schaal. Nonlinear dynamical systems for imitation with humanoid robots. In *Proceedings of the IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots*, pp. 219-226, 2001.
- [4] S.Nakaoka, A.Nakazawa, K.Yokoi, H.Himkawa, and K.Ikeuchi. Generating whole body motions for a biped humanoid robot from captured human dances. In *Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Vol. 3, pp. 3905-3910, 2003.
- [5] 中岡, 中澤, 金広, 金子, 森澤, 比留川, 池内. 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. 388-399, 2006.
- [6] K.Yamane, and Y.Nakamura. Dynamics filter - concept and implementation of on-line motion generator for human figures. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 19, No. 3, pp. 421-432, 2003.
- [7] Y.Y.Tsai, W.C.Lin, K.B.Cheng, J.Lee, and T.Y.Lee. Real-time physics-based 3d biped character animation using an inverted pendulum model. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Vol. 16, No. 2, pp. 325-337, 2010.
- [8] M.Watanabe, M.Okada, D.D.Ngyuen. Controller reduction for pseudo-reference in high-degree of freedom control system. In *Proc. of the 21st International Conference on Artificial Reality and Telexistence*, pp. 88-93, 2011.
- [9] R.E.Herron, J.R.Cuzzi, and J.Hugg. Mass distribution of the human body using biostereometrics. Technical report, Houston: Texas Institute for Rehabilitation and Research Biostereometrics Laboratory, 1976.

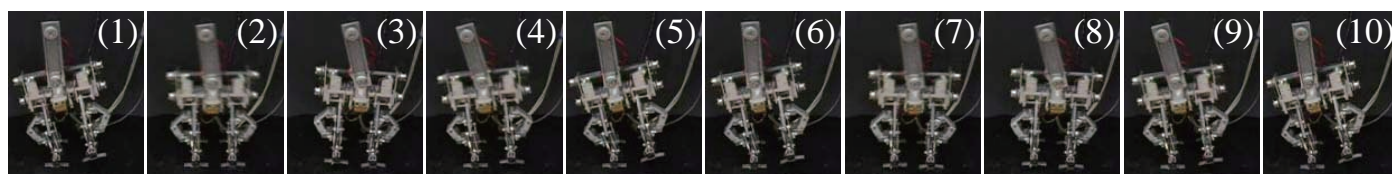


Fig.10 Robot motion sequence