

# 運動特性を保存した非線形状態空間写像とアナロジーに基づくコントローラ設計

## Nonlinear State Space Mapping That Uniforms Motion Dynamics and Controller Design Based on Analogy

学 宮崎 哲郎 (東工大) 正 岡田 昌史 (東工大)

Tetsuro MIYAZAKI, Tokyo Institute of Technology, 2-12-1 Ookayama, Meguro-ku, Tokyo  
Masafumi OKADA, Tokyo Institute of Technology

It is an effective way to use the information of the existing controller to generate a new robot motion from the point of view of calculation cost. So far, based on the attractor design method, a combination design method of a new controller has been proposed. In this method, the common elements of robot body and motion are abstracted from the existing controller parameters, and a new motion is generated by combining these elements. However, to abstract the motion elements, it requires the similarity of the different robots. In this paper, we proposed a state space mapping to uniform the similarity of the robot motions and a new controller design method. The effectiveness of the proposed method is evaluated by the experiments using tap dancing robots.

**Key Words** : attractor design, state space mapping, motion emergence

### 1. はじめに

ロボットを動かすためには、ロボットを安定化するコントローラとロボットの運動を定める目標運動パターンが必要である。しかし、所望の運動を実現するこれら得るには多大な時間と労力が要求される。これに関連し、これまでにロボットの運動を状態空間のアトラクタとして実現するコントローラを運動要素と身体要素に分離し、これらの組み合わせで新たなコントローラを設計する手法が提案された。しかし、この手法では力学特性の異なる複数のロボットに対して同一の運動を定義する必要があるため、類似したロボット間においては可能であるものの、異なる力学特性を持つロボット間では運動の同一性を定義することが難しい。本研究では、この方法を身体特性の異なるロボットへ適用するために、異なる力学特性を一致させる状態空間写像を求め、これに基づいたコントローラの組み合わせ設計法を提案し、実験によってその有効性を検証する。

### 2. 力学特性を保存する状態空間写像

いま、2つのロボットA, Bに対して、同じ運動1を生成するコントローラが

$$u = \Theta_1^A \phi(x) = (\Lambda_{A1} + \Gamma^A) \phi(x) \quad (1)$$

$$\mu = \Theta_1^B \phi(\xi) = (\Lambda_{B1} + \Gamma^B) \phi(\xi) \quad (2)$$

で得られているとする。ただし、 $u, x, \mu, \xi$  はそれぞれロボットA, Bの入力、状態変数であり、それぞれ状態空間内のある閉軌道  $X, \Xi$  をアトラクタとするように設計されている。 $\phi$  は状態変数からそのべき乗のベクトルを生成する関数であり、 $\Theta$  は各べき乗項の係数からなる定数行列である。また、 $\Gamma$  は  $\Theta$  の中の、ロボット身体に共通な要素、 $\Lambda$  は運動に共通な要素である。このとき、ロボットの運動は状態空間内の場として定義されているとも見なせ、この場を一致させる状態空間写像

$$x = F(\xi) = H\phi(\xi) \quad (3)$$

を考える。このとき、係数行列  $H$  の満たすべき条件を

$$\Lambda_{B1} \phi(\xi) = \Lambda_{A1} \phi(H\phi(\xi)) \quad (4)$$

とし、これを満たす  $H$  を求める。さらに、得られた  $F$  を用いれば Fig.A1 に示すように、新たなコントローラ (ロボットBの運動2) が設計可能となる。

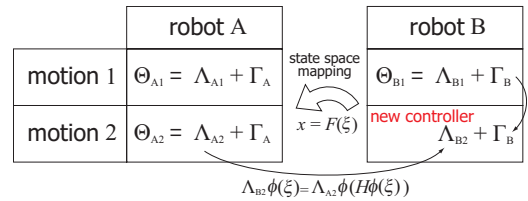


Fig.A1 New controller design with state space mapping

### 3. タップダンスロボットの運動生成

Fig.A2 にあるタップダンスロボットを用いて新たな運動の生成を行った。ただし、タップダンスロボットは相似な形状の Large, Small を用いた。既存のコントローラと状態空間写像から Fig.A3 のような新しい運動を得た。この結果から本手法の有効性が検証される。

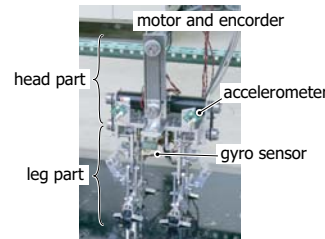


Fig.A2 Tap dancing robot

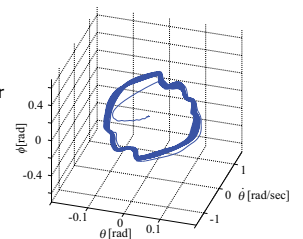


Fig.A3 New robot motion

## 1. はじめに

ロボットの運動を実現するためには、ロボットを安定化するコントローラと、ロボットの運動を定める目標運動パターンが必要である。しかし、所望の運動を実現するコントローラと目標運動パターンを得るには、多大な時間と労力が要求される。特に、ロボットに様々な運動をさせるのであれば、これらを個別に設計する必要があり、その労力は極めて大きい。これに関連し、渡辺らはロボットの運動を状態空間のアトラクタとして実現するコントローラ<sup>(2)</sup>を運動要素と身体要素に分離し、これらの組み合わせによって新たなコントローラを得る手法を提案した<sup>(1)</sup>。これにより、コントローラを設計する計算量が減り、容易にロボットの運動が実現される。しかし、この手法では、複数のロボットに対して同一の運動を定義しなければならない。そのため、類似した力学特性を持つロボット間において可能であるものの、異なる力学特性を持つロボット間で運動の同一性を定義することは難しい。そこで、もし2つのロボット間の力学特性を関連付ける写像が見つければ、これらの運動は同一の運動とみなせ、コントローラの組み合わせ設計を容易にすると考えられる。

2つの異なる身体間における運動の変換を扱った研究には、山根ら<sup>(5)</sup>によって提案されたダイナミクスフィルタがある。これは、人間のモーションキャプチャデータを逆力学に基づき、ZMPなどの力学的整合性を逸脱しないように補正し、ヒューマノイドロボットの運動パターンに変換するものである。しかし、ダイナミクスフィルタは運動の軌道上における力のつり合いを考慮するもので、運動の安定性に対する議論は難しい。

本研究では、渡辺らによって提案された方法を、身体の異なるロボットへ適用するために、異なる2つのロボットの力学特性を一致させる状態空間写像を求め、これに基づいたコントローラの組み合わせ設計法を提案し、実験によってその有効性を検証する。この方法では、ロボットの運動を状態空間における場として表現し、この場が一致するような写像を求める。また、得られるコントローラは、自己の状態変数を写像によって他者の状態空間へと写し、そのときの入力値を利用するものであり、自己を他者にたとえた(アナロジー)手法に基づくものである。

## 2. アトラクタを有するコントローラの設計

2.1 アトラクタを有するコントローラ 岡田ら<sup>(2)</sup>によって、アトラクタを有するコントローラの設計法が提案されている。本研究においてもアトラクタを有するコントローラ設計の考え方をを用いるため、まず、この手法を概説する。この方法は、ロボットの周期的な運動を状態空間における閉軌道 $\Xi$ で表し、これに引き込まれるような場を定義し、さらに、この場を実現するコントローラを

$$u = h(x) \quad (1)$$

のように、非線形状態フィードバックで実現するものである。 $x$ はロボットの状態変数、 $u$ は入力である。式(1)の入力はロボットの運動方程式

$$\dot{x} = f(x) + g(x, u) \quad (2)$$

と連立され、自律系を構成する。この方法の制御系はFig.1で表わされ、目標運動パターンを用いずに運動が生成さ

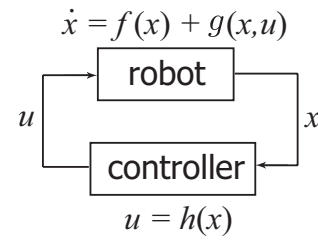


Fig. 1 Robot motion emergence using attractor of nonlinear dynamics

れるという特長を持つ。 $x$ が与えられた初期状態から時間経過とともに状態空間上のある閉軌道 $\Xi$ へと引き込まれるようなベクトル場が、このコントローラによってFig.2のように状態空間上に定義されている。この特長により、

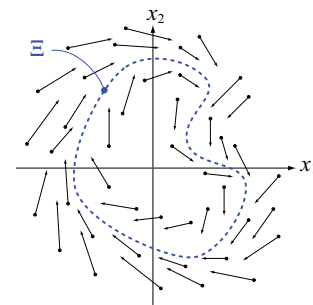


Fig. 2 Vector field in state space

外部環境の変化に対して、柔軟に適應する運動が実現できる。目標運動パターンを持たずに、環境と身体の相互作用から創発される運動を実現する方法として、森本ら<sup>(3)</sup>は結合位相振動子を用いて環境と同期する歩行制御を実現している。しかし、運動は創発されるものの、その安定性を陽に設計することは難しい。

岡田らの方法<sup>(2)</sup>で設計されるコントローラは

$$u = h(x) = \Theta\phi(x) \quad (3)$$

のように $x$ のべき多項式で表される。 $\phi(x)$ は $x$ をべき乗に展開したベクトルであり、例えば

$$x = \begin{bmatrix} x_1 & x_2 \end{bmatrix}^T \quad (4)$$

として、べき乗の次数を2とすると、

$$x = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & x_2 & x_1^2 & x_1x_2 & x_2^2 \end{bmatrix}^T \quad (5)$$

で表される。 $\Theta$ は多項式の係数行列であり、これをコントローラ行列と呼ぶことにする。

2.2 コントローラの分解 渡辺ら<sup>(1)</sup>は、コントローラ行列 $\Theta$ を、ロボットの運動に共通な要素 $\Lambda$ (運動要素)と、身体に共通な要素 $\Gamma$ (身体要素)とに分解する方法を提案した。ロボットの運動方程式を

$$x[k+1] = x[k] + Ax[k] + Bu[k] + C \quad (6)$$

のようにある点まわりで離散線形化する．これを状態空間内のベクトルで表現すると Fig.3 のように表される．式

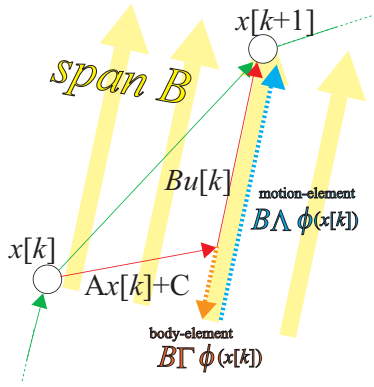


Fig. 3 Decomposition of  $x[k+1] - x[k]$

(6) を変形し， $u$  について解くと

$$u[k] = B^\#(x[k+1] - x[k]) - B^\#(Ax[k] + C) \quad (7)$$

を得る．このとき入力  $u[k]$  は状態変数の変化  $x[k+1] - x[k]$  を含む項と，含まない項に分離されており，これを

$$u_1[k] = B^\#(x[k+1] - x[k]) = \Lambda\phi(x) \quad (8)$$

$$u_2[k] = -B^\#(Ax[k] + C) = \Gamma\phi(x) \quad (9)$$

のように  $x$  のべき多項式で表せるとする．これは式 (6) の入力に関する項  $Bu[k]$  が，Fig.3 のように  $B\Lambda\phi(x[k])$  と  $B\Gamma\phi(x[k])$  に分離されることを意味している． $B\Lambda\phi(x[k])$  と  $B\Gamma\phi(x[k])$  は，それぞれ  $x[k+1] - x[k]$  と  $Ax[k] + C$  を  $\text{span}B$  上に射影したものであり，運動要素  $\Lambda$  は式 (8) より，状態変数の変化  $x[k+1] - x[k]$ ，すなわち運動から求まるため，運動に固有である．一方，身体要素  $\Gamma$  は式 (9) より，運動とは関係なく求まるため，ロボットの身体に固有であるといえる．これを複数ロボットの複数運動に拡張し，複数ロボットの同じと定義した運動から  $\Lambda$  を，共通な身体要素のロボットの複数の運動から  $\Gamma$  を，それぞれ共通の値になるように求める．この方法により，Fig.4 に示されるように，ロボットの身体が類似していればロボット A, B の状態空間におけるそれぞれの運動は類似の軌道を描き， $B\Lambda\phi(x)$  は同様のベクトルで表されるため， $\Lambda$

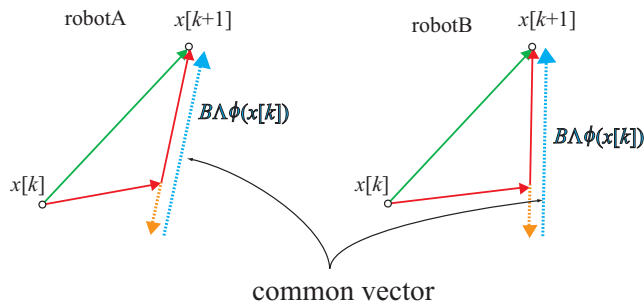


Fig. 4 Calculation of common  $\Lambda$  (for similar robots)

は運動の共通要素として得られる．この方法によってコ

ントローラの分解が行われ，要素間の組み合わせによるコントローラ的设计が可能となる．

しかし，実際にはこの仮定は満たされにくく，力学的に類似したロボット間では成り立つものの，Fig.5 の場合のように，大きく異なる身体を持つロボット間では  $\Lambda$  を共通化できない．すなわち，同一の運動は異なる軌道を

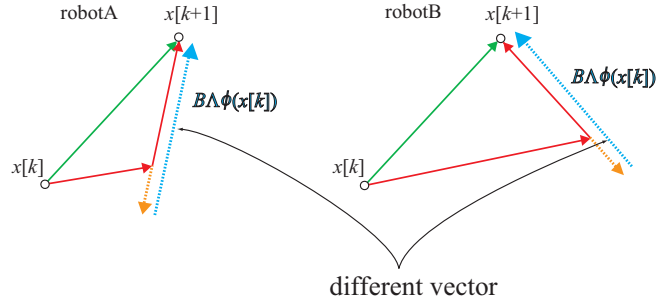


Fig. 5 Calculation of common  $\Lambda$  (for different robots)

描くため， $B\Lambda\phi(x)$  の同一性が保障されない．この場合，運動の力学特性の違いを補正し，座標変換によって，同一の運動が同一の軌道を描くようにする状態空間の写像が必要であろう．

### 3. 状態空間写像による運動のアナロジー

3.1 運動の力学的特性を保存する状態空間写像 運動の同一性を表現する状態空間写像が満たすべき条件を考える．入力の数が共通のロボット A, B が共通の運動 1 を行うとする．以下の記述では，ロボット A の状態変数を  $x$ ，入力を  $u$ ，ロボット B の状態変数を  $\xi$ ，入力を  $\mu$  とする． $\Lambda_{A1}$  はロボット A の運動 1 の運動要素であり， $\Lambda_{B1}$  はロボット B の運動 1 の運動要素であるとする．

Fig.6 に写像の概念図を示す．ロボット B の状態空間における  $\xi$  が，

$$\hat{x} = F(\xi) \quad (10)$$

で表される写像関数  $F$  によって，ロボット A の状態空間における状態変数  $\hat{x}$  に写像されるとする．これを，ロボット B の状態  $\xi$  をロボット A の状態  $\hat{x}$  に例えた表現であると解釈して， $\hat{x}$  を仮想状態変数と呼ぶことにする．ロボット B の状態  $\xi$  が  $\Lambda_{B1}$  から得る入力を  $\mu_1$ ，状態  $\hat{x}$  が  $\Lambda_{A1}$  から得る入力を  $\hat{u}_1$  とし，

$$\mu_1 = \Lambda_{B1}\phi(\xi) = \Lambda_{A1}\phi(\hat{x}) \quad (= \hat{u}_1) \quad (11)$$

のように  $\mu_1$  と  $\hat{u}_1$  を一致させることを考える．式 (10) と式 (11) をまとめ，

$$\Lambda_{B1}\phi(\xi) = \Lambda_{A1}\phi(F(\xi)) \quad (12)$$

が得られる． $\Lambda_{A1}$  と写像  $F$  の定める入力が， $\Lambda_{B1}$  の定める入力と一致する場合，ロボット A, B 間の運動要素  $\Lambda$  の違いに起因する入力の違いが，写像  $F$  によって取り除かれ， $\Lambda_{B1}$  を用いずに， $F$  と  $\Lambda_{A1}$  とからロボット B の入力  $\mu_1$  が得られることになる．すなわち，身体の力学特性の違いが，状態空間における写像で保存されていると言える．

本稿では，写像関数  $F$  を

$$F(\xi) = H\phi(\xi) \quad (13)$$

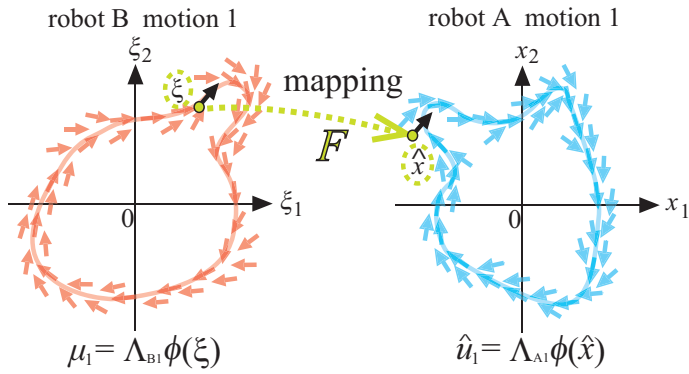


Fig. 6 State space mapping

のように定めた． $H$  は定数行列であり，これを写像行列と呼ぶことにする．

3.2  $H$  の計算法  $H$  の計算法について述べる．まず  $H$  の初期値を適当に定め，評価関数を

$$J = \sum_i \|\Lambda_{B1}\phi(\xi_i) - \Lambda_{A1}\phi(H\phi(\xi_i))\|^2 \quad (14)$$

のように定める．これより， $\partial J/\partial H$  から評価関数の勾配を求め， $J$  を最小化する  $H$  を収束計算で求める．

3.3 写像を利用した新しいコントローラ的设计  $H$  の計算に用いた運動 1 とは異なる運動 2 のコントローラが，ロボット A のみで得られているとする． $H$  がロボット間の力学的特性の違いを正しく保存していれば，Fig.7 のようにロボット A の既知の運動 2 の運動要素  $\Lambda_{A2}$  と  $H$  から，ロボット B の未知の運動 2 の運動要素  $\Lambda_{B2}$  による入力  $\mu_1$  に等しい入力  $\hat{u}_1$  が求まる．これにより， $\Lambda_{A2}$ ，

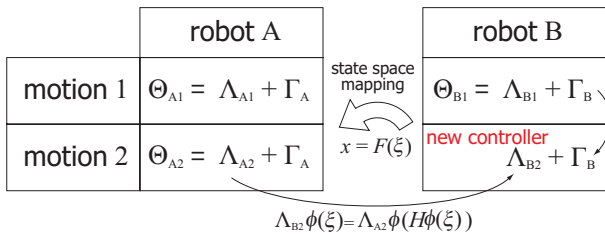


Fig. 7 New controller design with state space mapping

$H$ ， $\Gamma_B$  から，運動 2 を行うロボット B の新たなコントローラを作ることができる．このコントローラによって計算される入力  $\mu$  は，

$$\mu = \Lambda_{A2}\phi(H\phi(\xi)) + \Gamma_B\phi(\xi) \quad (15)$$

のようになる．

#### 4. タップダンスロボットのコントローラ設計

4.1 タップダンスロボット Fig.8 に表されるタップダンスロボットを用いて，提案する手法の有効性を検証する．ロボットは Small，Large(以下 S，L) の 2 体があり，Large は写真の Small と同じ構造を持つが，胴体が大きい．このロボットの機構は，Fig.9 のように頭部リン

クと脚部リンクの 2 リンク系にモデル化できる．頭部リンクをモータで振り，その慣性力を利用して脚部リンクに付いている 2 本の足を左右交互に接地させ，その場で踏み運動を行う．状態変数は

$$x = [\theta \quad \dot{\theta} \quad \phi \quad \dot{\phi}]^T \in R^4 \quad (16)$$

のように，胴体の傾き  $\theta$ ，その角速度  $\dot{\theta}$ ，頭部の傾き  $\phi$ ，その角速度  $\dot{\phi}$  からなる． $\theta$ ， $\dot{\theta}$  を脚部リンクにあるジャイロセンサ・加速度センサの情報から， $\phi$ ， $\dot{\phi}$  を頭部モータのエンコーダの情報から得ている．2 体のロボットの運動の類似性を，足踏み運動の周波数で評価することとした．

コントローラによって安定化された足踏み運動を行うとき，ロボットの状態  $x$  の軌跡は Fig.11 のような閉軌道を描く．ただし，実態の状態空間は 4 次元であるが，簡単のためここでは  $\theta$ ， $\dot{\theta}$ ， $\phi$  の 3 次元のみを表示している．また，運動は Fig.10 のようなものとなる．この図はロボットが頭部を振り，2 本の足を交互に接地させている様子の写真である．

4.2 写像の計算に用いる運動 写像行列  $H$  の計算に必要な，規範となる運動のコントローラを設計した．この方法では，タップダンスロボットの頭部リンクを一定周期で振り，転倒しない場合の運動を目標軌道とし，これをアトラクタとするコントローラを設計する．Table 1 に，設計したコントローラによるロボットの足踏み運動

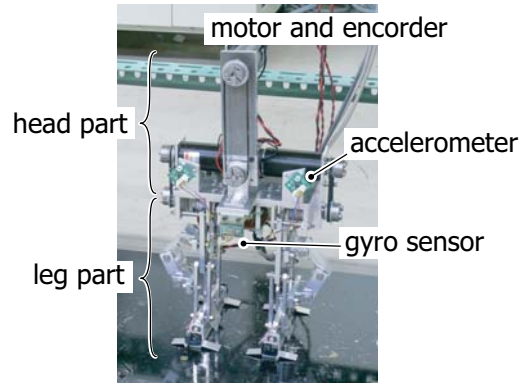


Fig. 8 Tap dancing robot

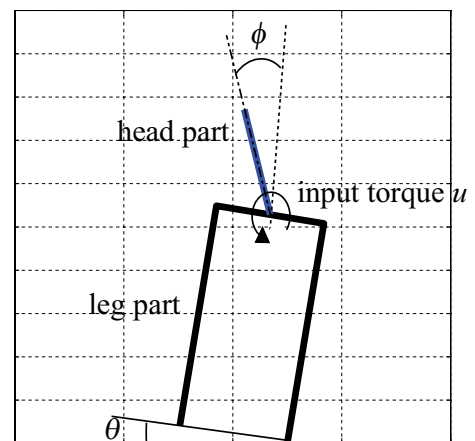


Fig. 9 Dynamic model of tap dancing robot

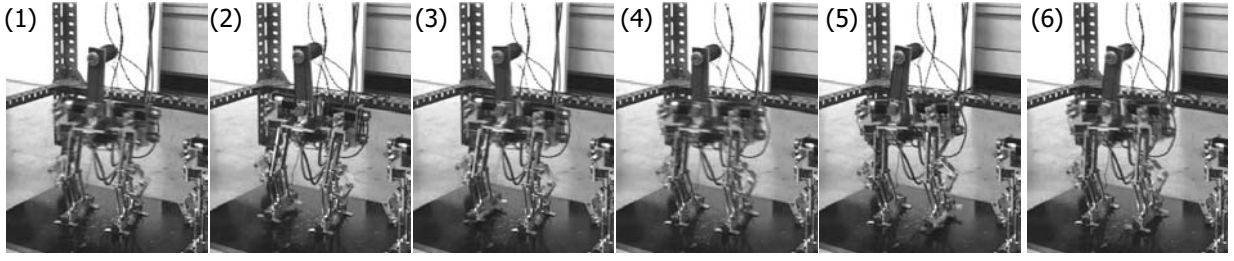


Fig. 10 Motion of tap dancing robot

の周波数を示す．この表は設計時の目標周波数に対して，

Table 1 Frequency of robot motions

Target frequency	robot S	robot L
motion 1 (1.5Hz)	1.31	1.50
motion 2 (1.0Hz)	1.10	

ロボットS, Lで実際に生成された運動の周波数を示している．コントローラ的设计を行って，それぞれについて運動要素  $\Lambda$  を得た．また，ロボットSの運動1と，Lの運動1を用いて写像行列  $H$  を求めた．計算時の評価関数  $J$  は空間全体で最小化されるべきだが，計算量の問題からLの運動1の軌道上の点と軌道近傍の代表点を選び計算に用いた．

4.3 写像の検証実験 計算した写像行列  $H$  が正しく求められていることを実験によって検証する．以下の式のように，ロボットSの運動1と写像行列  $H$  から求めたロボットLの運動1の入力

$$\mu = \Gamma_L \phi(\xi) + \Lambda_{S1} \phi(H\phi(\xi)) \quad (17)$$

と直接設計したコントローラを用いた場合の入力

$$\mu = \Theta_{L1} \phi(\xi) \quad (18)$$

を用いた運動を比較する．

式(18)を用いた場合の状態変数の軌跡はFig.11で表され，一方，式(17)を用いた場合の状態変数の軌跡はFig.12で表される．また，後者の運動の周波数は1.48Hzであった．これら2つの運動は，軌跡，周波数共に極めて類似することからロボットの力学特性を保存する  $H$  が求められていることがうかがえる．

4.4 新しい運動の生成 次に，ロボットSの運動2と写像行列  $H$  を用いて，ロボットLの新しいコントローラを求め，ロボットLの運動2を

$$\mu = \Gamma_L \phi(\xi) + \Lambda_{S2} \phi(H\phi(\xi)) \quad (19)$$

によって生成した．式(19)を用いた結果，ロボットLの1.30Hzの運動を生成した．生成された運動における，状態変数の軌跡をFig.13に示す．新しいコントローラの周波数が1.30Hzとなったことについて考察する．このコントローラによって生成される運動は， $H$  を求めるために規範とした運動ではないため，生成される運動の周波数

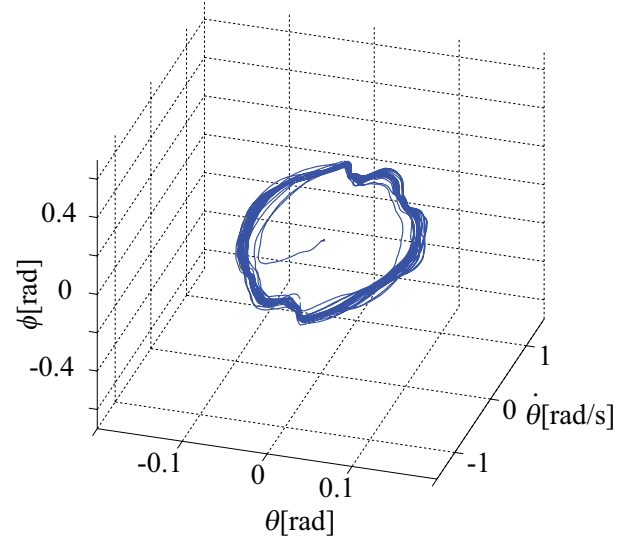


Fig. 11 Locus of state vector of Robot L with input in (18)

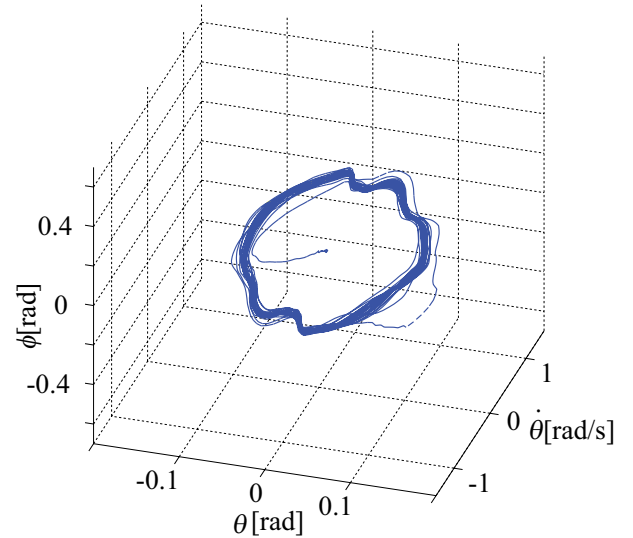


Fig. 12 Locus of state vector of Robot L with input in (17)

を定めることはできない．しかし，実際にロボットLの運動が生成されたこと，また，ロボットSにおいて，運動2は運動1よりも速い運動であり，ロボットLにおいても同様に運動1よりも速い運動が生成されていること

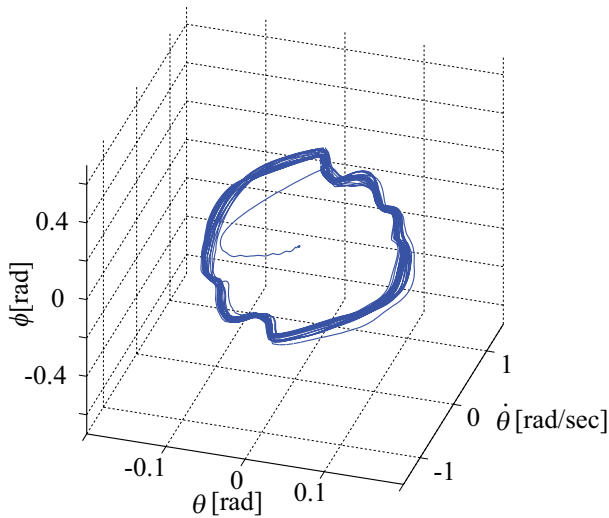


Fig. 13 Locus of state vector of Robot L with input in (19)

を考慮すると、 $H$  は力学的特性を保存した写像であることが理解できる。

## 5. おわりに

本研究では、力学的特性を保存した状態空間写像の導出方法と、その写像を用いて既存のコントローラから新しいコントローラを設計する方法を提案した。また、写像を用いて設計したコントローラでタップダンスロボットを制御する実験を行い、提案した方法の検証を行った。主な成果を以下に示す。

1. 規範となる運動の場に基づき、場を一致させる状態空間写像を求めた。
2. 写像された仮想状態変数と他者のベクトル場から入力を求め、これを自己の運動に利用するというアナロジーから、新しいコントローラを設計する手法を提案した。
3. タップダンスロボットを用いて、本手法の有効性を検証し、運動を周波数で評価することで、類似の運動が生成されることを示した。

## 謝辞

本研究は科学研究費補助金若手研究 (A) 「力学的観点に立ったロボットの身体と知能の相互発達と運動の創発」の支援を受けた。

## 文献

- (1) 渡辺, 岡田: 軌道アトラクタに基づくコントローラの身体・運動要素への分解と組み合わせによる設計, 第 26 回日本ロボット学会学術講演会, 3F1-07(CD-ROM), 2008
- (2) 岡田, 大里, 中村: 非線形力学系のアトラクタ設計によるヒューマノイドロボットの運動創発, 計測自動制御学会論文誌, Vol.41, No.6, pp.533-540, 2005
- (3) J.Morimoto, G.Endo, J.Nakanishi, S.Hyon, G.Cheng, C.G.Atkeson and D.Bentivegna: "Modulation of simple sinusoidal patterns by a coupled oscillator model

for biped walking," Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.1579-1584, 2006.

- (4) 原田, 高松, 田岡, 森, 佐藤: 動作困難性と必要提示部位の人の動作模倣への関連性の検証と実験手法日本ロボット学会誌, Vol24, No.3, pp339-348, 2006
- (5) 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.