

# 軌道アトラクタ設計によるロボットの運動創発と タップダンスロボットの制御

— 力学特性の大きな変化を伴う運動への適用 —

○ 村上健治, 岡田昌史, 岩附信行  
東京工業大学, 〒 152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1

## Robot Motion Emergence by Orbit Attractor Design for Tapping Dance Robot Control

— Application for Robot Motion With Drastic Change of Dynamic Property —

\*Kenji MURAKAMI, Masafumi OKADA and  
Nobuyuki IWATSUKI (Tokyo TECH)

**Abstract**— Robots are stabilized by a controller and generate their motions based on reference motion patterns. The robot only replays the given motion pattern without considering its environment and works as an instrument e.g. industrial robots. On the other hand, the human motions are generated through the interaction between body dynamics, environments and controller. The motion patterns are not prepared a priori, but emerges as the results of the interaction autonomously, which means the intelligence yields our motion from the "embodiment" point of view. In this paper, we design a robot motion emergence system based on an orbit attractor for the robot intelligence. The problems of the conventional method are declared and the modified methods are proposed for motion emergence with large change of the dynamic property of the robot body through the motion. A tapping dance robot is designed and the proposed methods are applied.

**Key Words:** Attractor design, Dynamics-based information processing, Motion emergence, Mechanical design

### 1. はじめに

本研究では、ロボットの運動生成の原理に焦点を当て、知的ロボットの制御系構成法を提案する。一般に、ロボットはコントローラによって安定化され、これに目標運動パターンを与えることで運動を生成してきた。この場合ロボットは単なる運動再生機構に過ぎず、環境と切り離されて存在する。これは精密なタスクの実行を目的とした産業用ロボットにおいて有効な結果をもたらす。一方、人間の歩行の場合運動パターンは先には存在せず、身体を通じた環境との相互作用の中から然るべき運動が逐次決定される。このとき目標運動パターンは存在せず、身体と環境との相互作用の結果として運動が現れる。この概念は知能と身体との密接な関係を表す「身体性 [1]」の考えと合致し、現れた運動は身体に宿った知能の結果としてとらえることができる。このようなロボットの知能の設計のためには、先にパターンを埋め込むのではなく、ロボットに運動を創発させることが必要である。また、このような身体と環境との相互作用による運動生成法は、ロボットの未知の環境への適応をもたらす有効な手段でもある。

これまでに、ロボットの運動創発に関する研究がいくつか報告されてきた。Ijspeertらは神経振動子を利用した見まね学習の方法を提案した [2]。これは神経振動子の引き込み現象を利用して学習した運動の生成を行うものである。琴坂らは神経振動子を用いてリズム的な運動の生成を行った [3]。これらの方法は、主に運動パターンの発生器であり環境とは切り離された世界での設計となっている。Tani はリカレントニューラルネットワーク (RNN) を用いてロボットのナビゲーションシステムを設計し、引き込み現象のもつ記号操作、記号創発の可能性を示し、知能との関連を示した [4]。Tsujitaら [5] や木村ら [6] は神経振動子にセンサ信号をフィードバックすることで2足、4足ロボットの歩行動作生成を実現した。これらの方法は既存の力学系（神経振動子）の状態空間とロボットの運動の状態空間内におけるマッピングによるものであり、現象論的な解析が中心である。そのため、運動の生成はヒューリスティックなパラメータの調整を必要とする。我々はこれまでにロボットの運動を軌道アトラクタとして表現し、これを実現する情報処理系を力学系を用いて設計する手法を提案し [7]、これにロボットの運動方程式を埋め込

み, 安定な運動をし続けるコントローラ的设计法を示した [8]. 本研究は参考文献 [8] を基礎にして, 力学特性の大きな変化を伴うダイナミックな運動へと適用し, 軌道アトラクタ設計によるロボットの自律的な運動創発を実現するものである.

## 2. 軌道アトラクタ的设计法

### 2.1 力学的情報処理による軌道アトラクタ的设计

本章では参考文献 [8] で提案した軌道アトラクタ的设计法を示す. この方法では,

【仮定 1】ロボットの運動方程式が既知である.

【仮定 2】ロボットの状態変数  $x \in R^n$  がアトラクタとすべき目標運動パターン  $\Xi$

$$\Xi = \begin{bmatrix} \xi_1 & \xi_2 & \cdots & \xi_N \end{bmatrix} \in R^{n \times N} \quad (1)$$

が与えられている. ただし,  $N$  はデータの数である.

【仮定 3】 $\Xi$  は実現可能である. すなわち,  $\Xi$  を実現する入力列  $u[k]$  ( $k = 1, \dots, N$ ) が存在する.

を仮定する. ただし, 【仮定 2】は希望の運動を定めるものであり生じる運動の創発の種として与えるものである.

ロボットの運動方程式を状態変数を  $x[k]$  として

$$x[k+1] = f(x[k]) + g(x[k], u[k]) \quad (2)$$

とする. これを各  $\xi_i$  周りでテイラー展開し, 二次以上の項を無視した線形近似システムを

$$x[k+1] = A_i x[k] + B_i u[k] + C_i \quad (3)$$

とする. ただし,  $A_i, B_i, C_i$  ( $i = 1, 2, \dots, N$ ) は既知とする. このとき, 式 (2) の力学系が  $\Xi$  をアトラクタとするための入力  $u[k]$  を  $x[k]$  の  $\ell$  次多項式として

$$u[k] = \Theta \phi(x[k]) \quad (4)$$

によって設計する. ここで  $\phi(x[k])$  は  $x[k]$  を多項式に展開したベクトルであり, 例えば  $x[k] \in R^2, \ell = 2$  であれば

$$x[k] = \begin{bmatrix} x_1 & x_2 \end{bmatrix}^T \quad (5)$$

$$\phi(x[k]) = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & x_2 & x_1^2 & x_1 x_2 & x_2^2 \end{bmatrix}^T \quad (6)$$

と表される.  $\Theta$  は多項式の各項にかかる係数で構成される行列である.  $\Theta$  の設計法を付録付録 A に示す. 式 (4) の関数は力学系にアトラクタへの引き込み (entrainment) を生じさせることから, 安定化を行うコントローラと区別するためエントレーナ (entrainer) と呼ぶことにする.

この設計法において式 (35) では入力, すなわち  $\|U_i^{i+j-1}\|$  の最小化によって入力列が求められている. そのため,  $x[i]$  の経路は後から決まり, 付録付録 A にある【仮定 4】が満たされない. 実際,  $x[i]$  の経路は軌道をショートカットする傾向にあり, 得られた  $(x_i, u_i)$  の組は  $\Xi$  をアトラクタとする場の定義にはなっていない. そのため, これから求めたエントレーナを用いて得られたアトラクタは  $\Xi$  とは大きく異なる. これは, 運動途中にロボットの力学特性が大きく変化する場合 (歩行など) に致命的となる, といった問題を引き起こす. そこで, 以下に示すように設計法を改良し, 目標の運動と実現される運動が類似のものとなるようにする.

2.2 経路を考慮したアトラクタ設計法

従来では  $(x_i, u_i)$  を求める際に経路が考慮されていなかった. そこで, これを経路を考慮した方法へと改良する. 従来では式 (30) により  $j$  ステップ先の  $x[i+j]$  だけが考慮されていた. これを 1 から  $j$  ステップ先全てを考慮するよう, 式 (30) を以下のように変形する.

### 2.2 経路を考慮したアトラクタ設計法

従来では  $(x_i, u_i)$  を求める際に経路が考慮されていなかった. そこで, これを経路を考慮した方法へと改良する. 従来では式 (30) により  $j$  ステップ先の  $x[i+j]$  だけが考慮されていた. これを 1 から  $j$  ステップ先全てを考慮するよう, 式 (30) を以下のように変形する.

$$X_{i+1}^{i+j} = A x[i] + B U_i^{i+j-1} + C \quad (7)$$

$$X_{i+1}^{i+j} = \begin{bmatrix} x^T[i+1] & \cdots & x^T[i+j] \end{bmatrix}^T \quad (8)$$

$$A = \begin{bmatrix} A_i^T & \cdots & \left( \prod_{k=i}^{i+j-1} A_k \right)^T \end{bmatrix}^T \quad (9)$$

$$B = \begin{bmatrix} B_i & & 0 \\ \vdots & \ddots & \\ \left( \prod_{k=i+1}^{i+j-1} A_k \right) B_i & \cdots & B_{i+j-1} \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$C = \begin{bmatrix} C_i \\ \vdots \\ C_{i+j-1} + \sum_{k=i}^{i+j-2} \left( \left( \prod_{\ell=k+1}^{i+j-1} A_\ell \right) C_k \right) \end{bmatrix} \quad (11)$$

$U_i^{i+j-1}$  は式 (33) で定義される. これは, 線形系の場合 ( $A_i, B_i, C_i$  が一定の場合)

$$X = \begin{bmatrix} A \\ \vdots \\ A^{j-1} \end{bmatrix} x[i] + \begin{bmatrix} B & & 0 \\ \vdots & \ddots & \\ A^{j-1} B & \cdots & B \end{bmatrix} U_i^{i+j-1} + \begin{bmatrix} C \\ \vdots \\ C + \cdots + A^{j-1} C \end{bmatrix} \quad (12)$$

であることに相当する．これより，軌道を考慮した入力列は

$$U_i^{i+j-1} = B\# \left( \Xi_{i+1}^{i+j} - Ax[i] - C \right) \quad (13)$$

$$\Xi_{i+1}^{i+j} = \left[ \xi_{i+1}^T \quad \xi_{i+2}^T \quad \cdots \quad \xi_{i+j}^T \right]^T \quad (14)$$

によって与えられる．これは，

$$J = \sum_{k=i+1}^{i+j} \|\xi_k - x[k]\| \quad (15)$$

の最小化に相当し， $x[k]$  ( $k = i+1, \dots, i+j$ ) が  $\Xi$  に沿って移動するための入力列  $U_i^{i+j-1}$  を求めていることに相当する．また，式 (13) を適当な重み行列  $W \in R^{n \times n}$  を用いて

$$U_i^{i+j-1} = (WB)\# W \left( \Xi_{i+1}^{i+j} - Ax[i] - C \right) \quad (16)$$

とすることで

$$J_w = \sum_{k=i+1}^{i+j} \|W(\xi_k - x[k])\| \quad (17)$$

の最小化問題となり状態変数の各要素別に収束の度合いを変化させる設計も可能となる．

### 3. アトラクタ設計によるタップダンス動作生成

#### 3.1 タップダンスロボット

ここでは，Fig.1 に表されるロボットを対象とする．全高 450[mm] 重量 3.4[kg] のこのロボットは左右足の

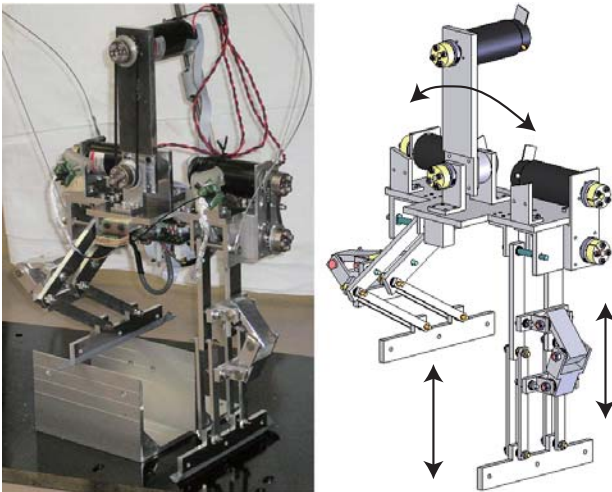


Fig.1 Tap dance robot

長さとして上部揺動の 3 自由度を有する．上体でバランスをとり安定化しながら左右の足を切り換えて足踏み動作を行うものである．特に脚部は

1. 足底は常に下を向いたまま足底面と垂直に直線運動をする．これは地面に対して鉛直方向上向きに反力を与え，その場でのタップダンスを実現するためである．
2. タップダンス動作では地面から大きな衝撃力を受ける．このとき脚部の運動におけるバックラッシュはリンクの破壊を生じさせるため，歯車を使わずにリンク機構とする．

を配慮した．これより Fig.2 に表されるような空間閉リンク機構を用いて設計した．この機構は二組の平行

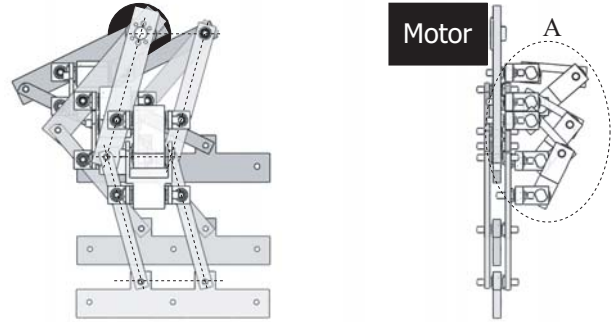


Fig.2 Leg mechanism with 3D closed loop chain

リンクの動きを図の A 部によってカップリングさせるものである．これにより，モータの回転運動を足底の鉛直運動に変換し，しかもバックラッシュのない直線運動を実現した．

#### 3.2 ロボットのモデル化と状態変数の計測

次に上記の方法を用いてロボットのタップダンス動作を生成する．このロボットを Fig.3 のように右足接地状態，左足接地状態の 2 通りに場合分けて運動方程式を求めた．ただし，簡単のため  $l_r, l_l$  は  $\theta$  の関数と

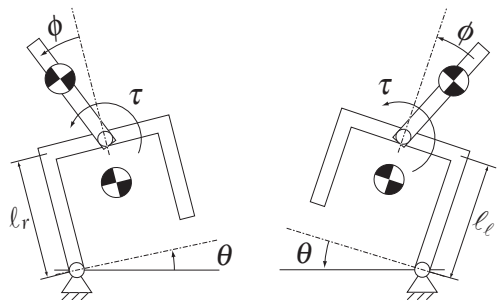


Fig.3 Dynamical model of tap dance robot

し，タップダンス動作をやすくした．これによりロボットの状態変数  $x[k]$  は

$$x[k] = \left[ \theta[k] \quad \dot{\theta}[k] \quad \phi[k] \quad \dot{\phi}[k] \right]^T \quad (18)$$

であり，入力トルク  $\tau$  である． $\theta, \dot{\theta}$  はロボットに搭載したジャイロセンサ・加速度センサを用いて以下の方法により計測した． $\theta$  は初期値を零としジャイロセンサから得られる角速度  $\omega_g$  を積分することで求められる．離散時間系ではサンプリングタイムを  $T$  として

$$\theta[k+1] = \theta[k] + \omega_g T \quad (19)$$

によって得られる．ジャイロセンサ値は温度ドリフトを持ち，また，式 (19) は積分のオイラー近似であるため誤差によるドリフトを発生する．そこで，加速度センサを用いてドリフトの補正を行う．機体に働く加速度は重力のみとして加速度センサから得られた情報に基づき  $\theta$  を求める．これを  $\theta_{acc}$  とする．実際には  $\theta_{acc}$  には重力加速度だけでなく運動によって発生する加速度も含まれるため，式 (19) を

$$\theta[k+1] = \theta[k] + \omega_g T + K(\theta_{acc}[k] - \theta[k]) \quad (20)$$

として  $\theta$  を求めた．ただし， $K$  は適当な定数である．これにより，ドリフト項を除去した角度が得られる．また，このときの  $\dot{\theta}$  は

$$\dot{\theta}[k] = \frac{\omega_g + K(\theta_{acc}[k] - \theta[k])}{T} \quad (21)$$

によって得られる．なお， $\phi[k], \dot{\phi}[k]$  はモータに搭載したエンコーダによって測定する．

### 3.3 目標パターンの獲得

タップダンス動作は動作中にロボットの力学特性が大きく変化する．そのため【仮定 3】を満たす目標パターン  $\Xi$  を定めにくい．そこで， $\phi$  に対して目標角度  $\phi_{ref}$

$$\phi_{ref}(t) = a \sin(\omega t) \quad (22)$$

を定め，入力  $\tau$  を

$$\tau = K_\phi (\phi_{ref}(t) - \phi) \quad (23)$$

としてロボットを動かした．ただし， $a, \omega, K_\phi$  は適当な定数として与えた．このとき，適当な初期値を与えることでロボットは Fig.4 に示されるような動きをとった．単に上体を振っているのみなので，タップダンスの成立・不成立は初期姿勢に大きく依存する．また，この運動はタップダンスを実現しているもののその周期は一定ではない．特に初期値に比べ最終値が軌道の中心から外へ向かっているような場合，これを規範として設計されたアトラクタは外へと広がる形態を持ち，系を不安定化する．そこで，初期値と最終値が一致するよう得られたデータから目標パターン  $\Xi$  を以下の方法によってフィルタリングし獲得した．

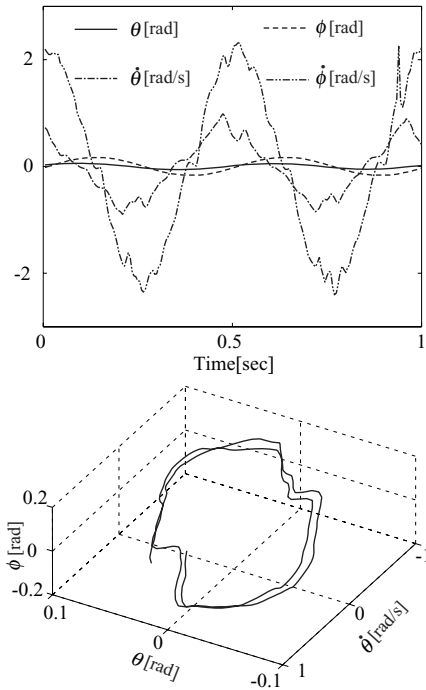


Fig.4 Experimental data with sine pattern input

Step 1 得られたデータ  $x[k]$  を次式のようにフーリエ級数展開する．

$$x[k] = \sum_{i=1}^{N/2} a_i \sin(\omega_i k + \phi_i), \quad \omega_i = \frac{2\pi i}{N} \quad (24)$$

Step 2 式 (22) における  $\omega$  の整数倍の周波数成分のみを取り出して  $x[k]$  を再生し，これを  $\hat{x}[k]$  とする．

Step 3 得られた  $\hat{x}[k]$  を  $\xi_i$  とし， $\Xi$  を獲得する．入力  $\tau[k]$  にも同様のフィルタを施す．これは  $C_i$  を求めるときに用いる．

このフィルタリングにより，Fig.4 の結果は Fig.5 のように周期的な運動（初期値と最終値が一致する）となった．さらに，Fig.5 から分かるように  $\theta, \phi$  に比べ  $\dot{\theta}, \dot{\phi}$  の数値的なオーダは大きく異なる．これはエンターレーナを設計する際，式 (6) の多項式展開において  $n$  次の項に大きな差をもたらし望ましくない．そこで，主成分分析による座標変換によって状態変数の各要素の大きさをそろえた空間を求め，この状態空間内でエンターレーナを設計するものとする．この座標変換行列  $T$  は以下のように得られる．得られた  $\Xi$  を以下のように特異値分解する．

$$\Xi = USV^T \quad (25)$$

$$U \in R^{n \times n}, \quad S \in R^{n \times n}, \quad V \in R^{N \times n} \quad (26)$$

このとき，

$$V^T V = I \quad (27)$$

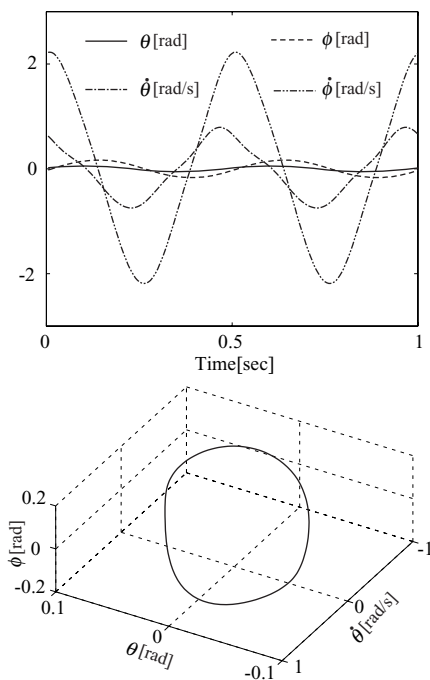


Fig.5 FFT filtered data

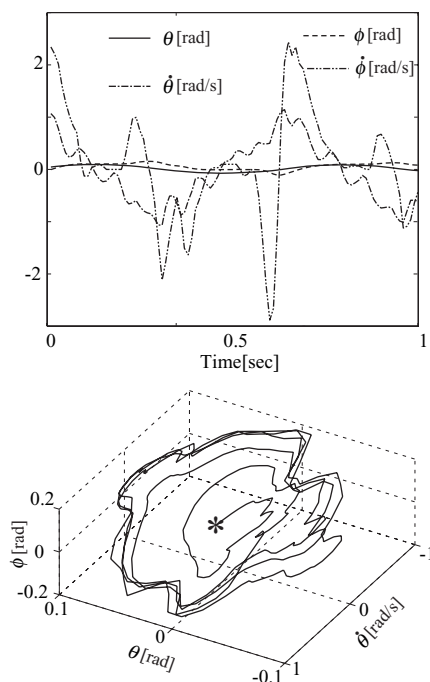


Fig.6 Experimental data of tap dance via attractor design

であることから， $V^T$  の横ベクトルは大きさ 1 となるので求める座標変換行列  $T$  を

$$T = \frac{1}{N}US \quad (28)$$

とする．これによって得られた  $\hat{x}[k]$

$$\hat{x}[k] = Tx[k] \quad (29)$$

は状態ベクトルの各要素の大きさが正規化されたものとなり，エントレーナの多項式設計を容易にする．

Fig.5 で得られたデータは【仮定 3】を満たすことを保証しない．【仮定 3】はアトラクタ設計における実現可能性を示すための仮定であり，これを満たす軌道が先に与えられる場合は少ない．これは目標パターン  $\Xi$  はエントレーナから運動が創発されるための種であることを意味している．

### 3.4 アトラクタの実現

上記  $\Xi$  を用いてアトラクタの設計を行い，タップダンス動作を実現した．この結果を Fig.6 に示す．図中 \* は初期値を表す．また，実験の様子（一周期分の動き）を Fig.7 に示す．このように，運動途中にロボットの力学特性が大きく変化するシステムに対して，目標の運動を実現させることが可能となった．

## 4. おわりに

本研究ではダイナミックな運動に軌道アトラクタ設計を行い，ロボットの身体と環境との相互作用による運動創発を実現した．本研究の成果を以下に示す．

- 従来のアトラクタ設計法の問題点を明確化し，これを改善する方法を提案した．具体的には，従来法では入力最小化によって入力列を定めていたため，得られる軌道は目標軌道と大きく異なることを指摘し，これを軌道を考慮した設計法に改良した．
- 初期姿勢に大きく依存する非線形な運動に対して，FFT を用いた目標パターン獲得の手法を示した．
- 上記をタップダンスロボットへ適用し，運動途中にロボットの力学特性が大きく変化する運動を軌道アトラクタによって実現した．

### 謝辞

本研究は文部科学省科学研究補助金特定領域研究 (A03)「力学的情報処理による記号空間と運動空間の結合設計」(研究代表者：岡田昌史)，および東京工業大学研究助成 (若手教員研究基盤整備助成) の支援を受けた．

### 参考文献

- [1] 土井, 藤田, 下村: 脳・身体性・ロボット インテリジェンス・ダイナミクス, シュプリングー・フェアラーク東京, 2005.
- [2] A.J.Ijspeert, J.Nakanishi and S.Schaal: Movement Imitation with Nonlinear Dynamical Systems in Humanoid Robots, Proc. of the 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.1398-1403, 2004.
- [3] S.Kotosaka and S.Schaal: Synchronized robot drumming by neural oscillators, Proc. of the International

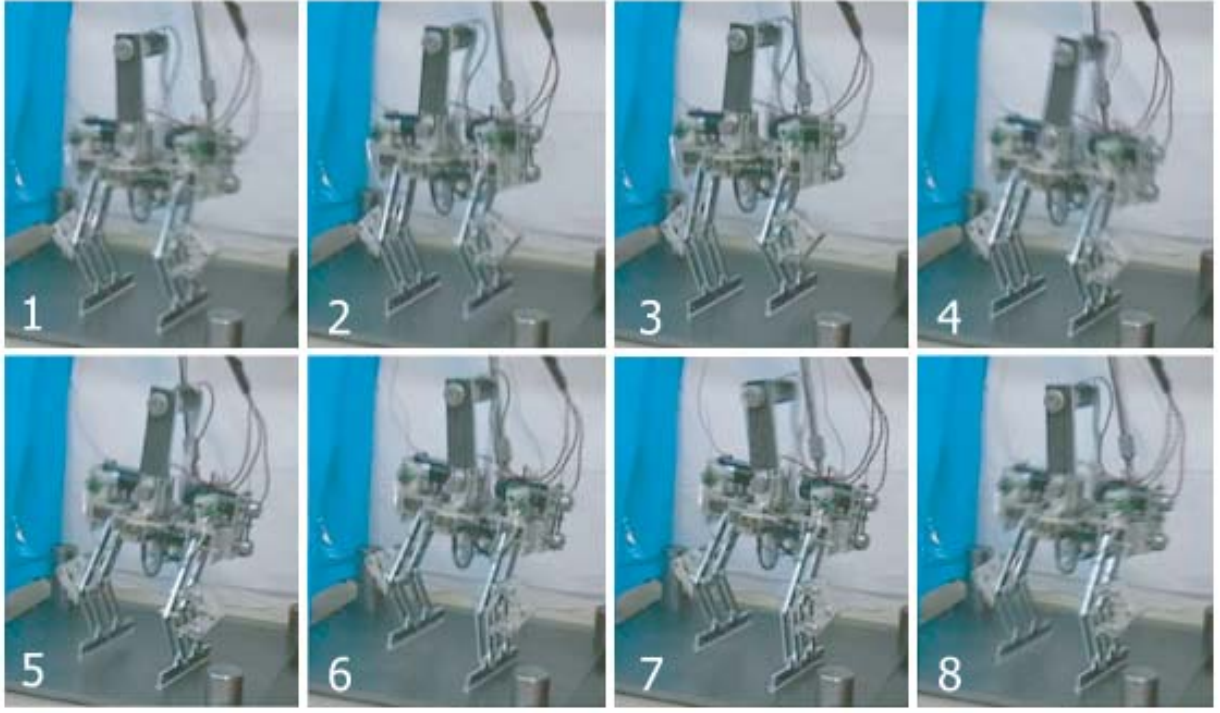


Fig.7 Realization of tap dance

Symposium on Adaptive Motion of Animals and Machines, pp.8-12, 2000.

- [4] J.Tani : Symbol and Dynamics in Embodied Cognition: Revisit a Robot Experiment, Anticipatory Behavior in Adaptive Learning Systems, M.V.Butz, O.Sigaud and P.Gerard(Eds.) Springer-Verlag, pp.167-178, 2003.
- [5] K.Tsujita, K.Tsuchiya and A.Onat : Decentralized Autonomous Control of a Quadruped Locomotion Robot, Proc. of 3rd International Symposium on Adaptive Motion of Animals and Machines, WeA-I-2, 2003.
- [6] 木村 浩 : 生物規範型ロボット-制御筋骨格系と神経系のカップリング-, 計測と制御, Vol.40, No.6, pp.441-447, 2001.
- [7] 岡田, 中村 : 脳型情報処理を行う力学系の多項式設計法とそのヒューマノイドの全身運動生成への応用, 日本ロボット学会誌, Vol.22, No.8, pp.1050-1060, 2004.
- [8] 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.

## 付録 A $\Theta$ の設計法

式 (3) の力学系において,  $\xi_i$  の近傍の点  $x[i]$  を考える. 入力  $u[k]$ , ( $k = i, i+1, \dots, i+j-1$ ) を施すことで,  $x[i]$  は  $j$  ステップ先で

$$x[i+j] = Ax[i] + BU_i^{i+j-1} + C \quad (30)$$

$$A = \prod_{k=i}^{i+j-1} A_k \quad (31)$$

$$B = \left[ B_i \quad \dots \quad \left( \prod_{k=i}^{i+j-1} A_k \right) B_{i+j-1} \right] \quad (32)$$

$$U_i^{i+j-1} = \left[ u^T[i] \quad \dots \quad u^T[i+j-1] \right]^T \quad (33)$$

$$C = \left[ C_{i+j-1} + \sum_{k=i}^{i+j-2} \left( \left( \prod_{\ell=k+1}^{i+j-1} A_\ell \right) C_k \right) \right] \quad (34)$$

と表される. ただし, ここで

【仮定 4】  $x[k]$  ( $k = i, \dots, i+j-1$ ) は三に沿って移動する.

を仮定している. この関係を用いて,  $x[i+j]$  を  $\xi_{i+j}$  に一致させるための入力列は

$$U_i^{i+j-1} = B^\# (\xi_{i+j} - Ax[i] - C) \quad (35)$$

で得られる. また, そのときの経路は式 (3) に得られた入力を順次加えることで得られる. 全ての  $\xi_i$  ( $i = 1, 2, \dots, N$ ) の周りで  $m$  個の  $x[i]$  を定義することで,  $x$  と  $u$  の組  $(u_k, x_k)$  ( $k = 1, 2, \dots, iN$ ) が得られ, これらを用いて

$$U = \Theta \Phi \quad (36)$$

$$U = \left[ u_1 \quad u_2 \quad \dots \quad u_{iN} \right] \quad (37)$$

$$\Phi = \left[ \phi(x_1) \quad \phi(x_2) \quad \dots \quad \phi(x_{iN}) \right] \quad (38)$$

の関係が得られるので,  $\Theta$  は

$$\Theta = U\Phi^\# \quad (39)$$

によって得られる.