

# 力学的情報処理における智能ロボットの連続的記号空間の設計

岡田昌史 (東京大学) 中村仁彦 (東京大学, CREST)

## Design of Continuous Symbol Space for Intelligent Robots using Dynamics-based Information Processing

\*Masafumi OKADA (Univ. of Tokyo) and Yoshihiko NAKAMURA (Univ. of Tokyo, CREST)

**Abstract**— In this paper, we design continuous symbol space for the dynamics-based information processing system. One point in the symbol space decides a vector field in the motion space that generates the cyclic motion continuous and motion transition of the robots. Because the motion of a state vector in symbol space is defined by a dynamical system, spatio-temporal continuous information processing system is realized.

**Key Words:** brain-like information processing, dynamical system, continuous system

### 1. はじめに

これまで、ロボットの行動決定のための情報処理系はオートマトンやモジュールのネットワークとして記述される離散事象システムとして表現されてきた。ここでは、各ノードやモジュールが個々の処理を行い、せいぜいこれらの組み合わせの数の情報処理しか実現できない。これはフレーム問題として、実世界に対応した情報処理系の実現に向けた大きな問題となっている。これに対し、Freemanらによって示されたウサギの嗅球における力学現象<sup>1)</sup>や津田らが提唱するカオスの遍歴<sup>2)</sup>といった結果から、力学現象と知能の密接な関係が注目されるようになり、力学系を用いた情報処理系の設計が行われるようになってきた。特に、我々はこれまでに<sup>3)</sup> $N$ 次元空間内の交点を持たない任意の曲線をアトラクタとするような力学系の設計法を示し、これを用いたヒューマノイドの全身運動を扱う力学的情報処理系の設計論を展開した。この方法は力学系を用いることで時間的・空間的に連続な情報処理を可能とするため、リアルタイムに環境の情報を取り入れた運動生成を実現可能であることが示唆されている。

本研究では、力学的情報処理系を基礎として、これを扱う記号空間の構成法を示す。これは運動を決定する運動空間のベクトル場を定める上層の空間が存在し、この中の点が力学系に従って移動することにより、運動空間でのベクトル場が連続的に変わり、ロボットの運動の生成と遷移を実現するものである。1つの運動を記号空間での1点として表現し、これが時空間的に連続に動くことでロボットの運動を定める。

### 2. 力学的情報処理

#### 2.1 力学系とロボットの運動

本章では、力学的情報処理<sup>3)</sup>について説明する。いま、 $N$ 個の関節を有するロボットの周期的な全身運動  $M$  を考える。ある時刻におけるロボットの姿勢  $\theta[k]$  は関節角空間での表現として、 $N$ 次元空間の点となる。これより、全身運動  $M$  は  $\theta[k]$  の系列として

$$M = \left[ \theta[1] \quad \theta[2] \quad \cdots \quad \theta[m] \right] \quad (1)$$

となり、Fig.1のように閉曲線  $C$  を表す。ただし、 $m$  はデータの個数である。

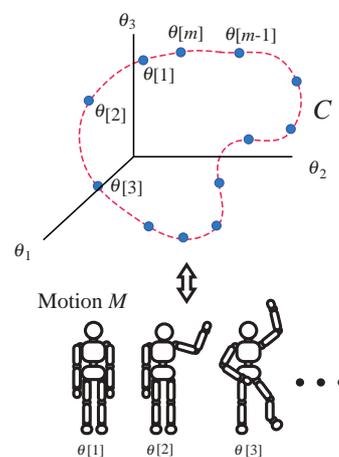


Fig.1 Robot posture, motion and joint angle space

一方、次式で表される離散時間力学系

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

が閉曲線  $C$  をアトラクタとするとき、すなわち、ある初期値  $x_0$  から出発した力学系がある定数  $k_0$  を用いて

$$\lim_{k \rightarrow \infty} x[k] = \theta[k + k_0] \quad (3)$$

となるとき、この力学系は全身運動  $M$  を記憶しており、これを生成するといえる。

式(2)の力学系の設計法では、 $f(x[k])$  をベクトル場と見なし、力学系がアトラクタを有するように定義したベクトル場を表現するよう、多項式を用いて最小二乗近似するがここでは具体的な内容に関しては省略する。

力学系が複数の運動  $M_1, M_2, \dots$  を記憶する場合、式(2)の  $f(x[k])$  は

$$f(x[k]) = \sum_i w_i f_i(x[k]) \quad (4)$$

のように場の足し合わせで表現され、 $w_i$  の調整により各アトラクタの引き込みを変化させる。

## 2.2 非線形写像による運動の低次元化

ヒューマノイドロボットのような大自由度系の場合、力学系の状態ベクトル  $x[k]$  の次元も大きくなり、力学系を設計するのに多くの時間を費やす。本研究では、非線形写像関数を用いて運動を低次元化する。参考文献<sup>3)</sup>では、特異値分解を用いた方法によって運動の低次元化がなされた。ここでは、状態ベクトル  $x[k] \in \mathbf{R}^n$  から

$$\theta[k] = \sum_i w_i F_i x[k], \quad F_i \in \mathbf{R}^{N \times n} \quad (5)$$

によって関節角度  $\theta[k] \in \mathbf{R}^N$  が計算された。ここでは、これを

$$\theta[k] = F(x[k]) \quad (6)$$

となる非線形写像関数を求める。これは、全ての  $i, k$  に関して共通な  $F_i$  を非線形写像を用いて求めるものである。これにより、全ての空間を移動する  $x[k]$  に対して関節角度  $\theta[k]$  が定義されるようになる。多谷らは<sup>4)</sup> 砂時計型ニューラルネットワークによる非線形主成分分析法を用いた低次元化法を提案している。ここでは、運動  $M$  に対応した低次元空間での閉曲線  $C$  は自動的に与えられる。本研究では、多項式を用いた関数近似を行うことで、運動  $M_i$  に相当する低次元化空間での曲線  $C_i$  の概形を与え、式(2)の力学系の設計を容易にする。

いま、 $N$  関節を有するロボットの運動  $M$

$$M = \begin{bmatrix} \theta[1] & \theta[2] & \cdots & \theta[m] \end{bmatrix} \in \mathbf{R}^{N \times m} \quad (7)$$

を考える。また、この低次元化空間における表現を

$$C = \begin{bmatrix} x[1] & x[2] & \cdots & x[m] \end{bmatrix} \in \mathbf{R}^{n \times m} \quad (8)$$

とする ( $n < N$ )。このとき、 $x[k]$  から  $\theta[k]$  を計算する式(6)の写像関数  $F(x[k])$  を  $x$  の各要素  $x_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) の多項式として近似する。例えば、 $n = 2$  の場合に  $\ell$  次の多項式で近似するならば、

$$\theta = A\xi \quad (9)$$

$$A = \begin{bmatrix} a_{\ell 0} & a_{(\ell-1)1} & a_{(\ell-1)2} & \cdots & a_{01} & a_{00} \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\xi = \begin{bmatrix} x_1^\ell & x_1^{(\ell-1)}x_2 & x_1^{(\ell-2)}x_2^2 & \cdots & x_2 & 1 \end{bmatrix}^T \quad (11)$$

となる。このとき、 $n$  次元空間内に  $C$  を与えることで、 $A$  を求める問題は最小二乗問題となる。 $F(x[k])$  と  $C$  の求め方について以下に述べる。

**Step1**  $M$  上の点  $\theta[k]$  から次の行列を求める。

$$\Theta = \begin{bmatrix} \theta[1] & \theta[2] & \cdots & \theta[m] \end{bmatrix} \quad (12)$$

また、 $M$  に対応する低次元化空間の曲線  $C$  上の点  $x[k]$  を定義し、これから次の行列を求める。

$$\Xi = \begin{bmatrix} \xi[1] & \xi[2] & \cdots & \xi[m] \end{bmatrix} \quad (13)$$

**Step2**  $\Theta, \Xi$  から、

$$A = \Theta \Xi^\# \quad (14)$$

によって  $A$  を求める。

**Step3** 実際には、このままでは近似精度が高くないため、 $x[k]$  を移動させて近似精度を高くする。評価関数を

$$J[k] = \frac{1}{2} \|\theta[k] - A\xi[k]\|^2 \quad (15)$$

として、

$$x[k] = x[k] - \frac{\partial J}{\partial x} \delta \quad (16)$$

$$\frac{\partial J}{\partial x} = \left( -A \frac{\partial \xi}{\partial x} \right)^T (\theta[k] - A\xi[k]) \quad (17)$$

によって  $x[k]$  を更新する。ただし、 $\delta$  は定数である。

**Step4** Step2, Step3 を繰り返し計算する。

Fig.2 は、繰り返し計算によって  $C$  と  $A$  を計算した例である。左図が  $M \in \mathbf{R}^3$ 、右図が  $C \in \mathbf{R}^2$  を表している。左図における鎖線はロボットの運動であり、 $C$  の初期値として右図の点線で示される円を与えた。繰り返し計算を行うことで、 $C$  は実線のように変化し、これを用いて近似された運動  $M$  は実線のように近似されたことを示している。

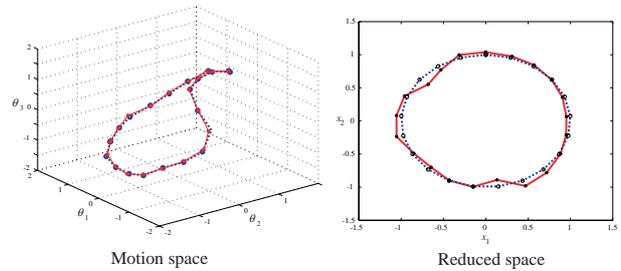


Fig.2 Projection to reduced space

## 3. 連続的記号空間の設計

本章では、運動空間のベクトル場を操作する記号空間とその空間における力学系の設計について述べる。概念図を Fig.3 に示す。記号空間における1点は運動空間のベクトル場を定義する。記号空間で状態ベクトルが力学系に従い、時空間的に連続的に動くことで運動空間のベクトル場が連続的に変化し、ロボットの運動が生成されたり、遷移を行ったりする。

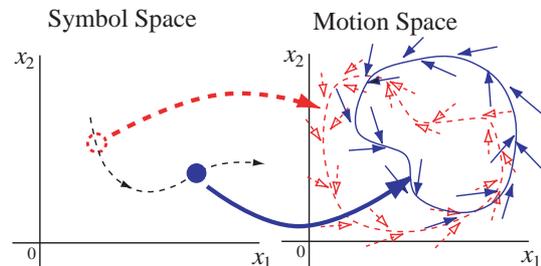


Fig.3 Symbol Space and Motion Space

以下では、記号空間とその空間内の点の動きを定義する力学系の設計法について述べる。

Step1 いま，二つの運動  $M_1, M_2$

$$M_1 = \begin{bmatrix} \theta_1[1] & \theta_1[2] & \cdots & \theta_1[m] \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$M_2 = \begin{bmatrix} \theta_2[1] & \theta_2[2] & \cdots & \theta_2[m] \end{bmatrix} \quad (19)$$

が得られているものとする．

Step2 運動  $M_1$  と  $M_2$  に対して複数の中間的な運動を求め．例えば，

$$M_i = (1 - \alpha_i)M_1 + \alpha_i M_2 \quad (i = 3, 4, 5, \dots) \quad (20)$$

から設計する．ただし， $0 < \alpha_i < 1$  である．

Step3 運動  $M_i$  に対応する  $C_i$

$$C_i = \begin{bmatrix} x_i[1] & x_i[2] & \cdots & x_i[m] \end{bmatrix} \quad (21)$$

を求め．ただし，全ての  $i, k$  に対して

$$\theta_i[k] = F(x_i[k]) \quad (22)$$

を満たす  $F(\cdot)$  が存在するものとする．

Step4  $C_i$  をアトラクタとする力学系

$$\lambda_i[k+1] = \lambda_i[k] + g_i(\lambda_i[k]) \quad (23)$$

を多項式で設計する．このとき  $g_i(\lambda_i[k])$  は

$$g_i(\lambda_i[k]) = \Phi_i \xi(\lambda_i[k]) \quad (24)$$

の形で表現される． $\Phi_i$  式 (9) の  $A$  と同様に多項式の係数からなるパラメータ行列である．

Step5 複数個の  $\Phi_i$  から

$$\begin{bmatrix} \Phi_1 \\ \Phi_2 \\ \vdots \\ \Phi_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda_{11}I & \lambda_{12}I & \cdots & \lambda_{1q}I \\ \lambda_{21}I & \lambda_{22}I & \cdots & \lambda_{2q}I \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \lambda_{p1}I & \lambda_{p2}I & \cdots & \lambda_{pq}I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_1 \\ \vdots \\ \phi_p \end{bmatrix} \quad (25)$$

となる  $\lambda, \phi$  を求める．これは，

$$\Phi_i = \begin{bmatrix} \Phi_{1i}^T & \cdots & \Phi_{Ni}^T \end{bmatrix}^T \quad (26)$$

としたときに，以下の行列

$$\Phi = \begin{bmatrix} \Phi_{11} & \Phi_{21} & \cdots & \Phi_{N1} \\ \Phi_{12} & \Phi_{22} & \cdots & \Phi_{N2} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \Phi_{1p} & \Phi_{2p} & \cdots & \Phi_{Np} \end{bmatrix} \quad (27)$$

の特異値分解から得られる以下の形式

$$\Phi = \begin{bmatrix} \lambda_{11} & \cdots & \lambda_{1q} \\ \lambda_{21} & \cdots & \lambda_{2q} \\ \vdots & & \vdots \\ \lambda_{p1} & \cdots & \lambda_{pq} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_1 \\ \vdots \\ \phi_q \end{bmatrix} \quad (28)$$

によって求めることができる．

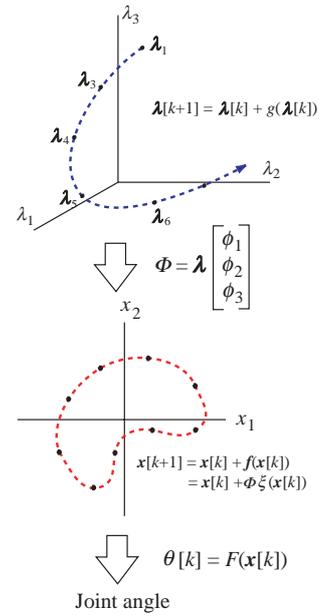


Fig.4 Symbol space and motion space

Step6 ここで，

$$\lambda_i = \begin{bmatrix} \lambda_{i1} & \cdots & \lambda_{iq} \end{bmatrix}^T \quad (29)$$

は  $q$  次元空間内の点であり，この点によって

$$\Phi_i = \lambda_i^T \begin{bmatrix} \phi_1 & \cdots & \phi_q \end{bmatrix}^T \quad (30)$$

から運動空間のベクトル場  $\Phi_i$  が定義される．これにより，記号空間によって運動空間が決定され，これによりロボットの運動が決定するといった空間的に連続な記号空間が設計された． $\lambda_i$  の動きを定義する力学系を設計することで時間的に連続な情報処理系が達成される．

この結果を模式的に表すと Fig.4 のようになる． $\Phi$  は  $\lambda$  の各成分  $\lambda_i$  の比率で  $\phi_i$  を足しあわせることで決定される．さらに，これが  $x[k]$  の動きを決定する．ロボットの関節角  $\theta[k]$  は  $F$  によって  $x[k]$  から変換される．ここで，記号空間は連続的であり，この空間の力学系も時空間的に連続であるため，運動空間における時空間的に連続な場の変化，および運動の生成・遷移が実現される．

#### 4. ヒューマノイドロボットの運動生成

ここでは，Fig.5 に表されるヒューマノイドロボットを想定する．このロボットは合計 20 個の関節を有し，関節角空間は 20 次元を成す．このロボットに対して歩行とスクワットの 2 種類の運動  $W_1, W_2$  を設計した．この動きを Fig.6 に示す．上段が歩行動作，下段がスクワット動作である．この動きを補間して合計 22 個の運動を作成し，3 次元の  $x[k]$  とこれを復元する関数  $F(x[k])$  を求めて低次元化した．また，それぞれの  $M_i$  に対して  $C_i$  ( $i = 1, 2, \dots, 22$ ) を求め，この閉曲線をアトラクタとする力学系

$$x[k+1] = x[k] + \Phi_i \xi(x[k]) \quad (31)$$

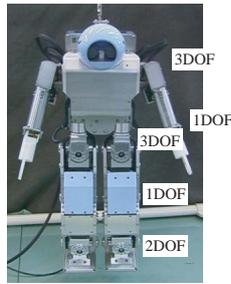


Fig.5 Humanoid robot HOAP-1

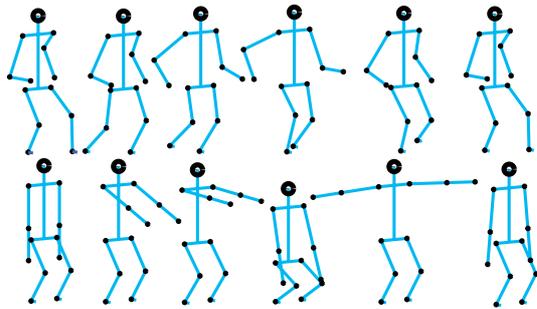


Fig.6 Motion of the humanoid robot

を求めた．さらに，Step5の方法に基づいて，8次元の記号空間を設計した．これを用いたヒューマノイドロボットの動きを Fig.7に示す．ここでは，記号空間の力学系によって歩行からスクワットに連続的に遷移する動作を設計した．左が記号空間における力学系の動き，中央が運動空間における力学系の動き，右がヒューマノイドロボットの動きを表している．記号空間は8次元空間であるが，ここではそのうちの3次元だけ示した．記号空間における1点が1つの運動を示しており，記号空間における力学系の動きが連続的なロボットの運動遷移を表している様子が理解できる．

## 5. おわりに

本研究の結果を以下に示す．

- ロボットの運動を定める力学系のパラメータを空間の1点として表現することで連続的な記号空間の設計を行った．
  - － 記号空間のある1点は運動空間におけるベクトル場を定めるため，記号空間は空間的に連続的なものとなっている．
  - － 記号空間内の点は力学系に従って移動するため，時間的に連続な情報処理系となっている．
- 非線形な関数によってロボットの全身運動を低次元空間へ写像する方法を提案した．
- 20自由度のロボットに対して，記号空間を設計し，ロボットの運動の連続的な遷移を実現した．

## 謝辞

本研究は

- 科学技術振興事業団「自律行動単位の力学的結合による脳型情報処理機械の開発」(プロジェクトリーダー：中村仁彦)

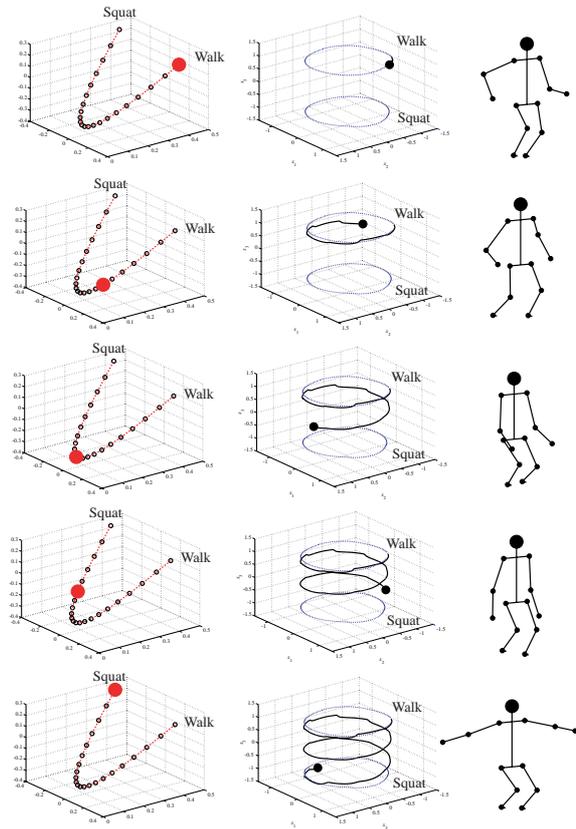


Fig.7 Motion generation of the humanoid robot

- 文部科学省科学研究補助金(特定領域研究 A03)「力学的情報処理の階層化に基づく知能ロボットのリアルタイムカーネルの構築」(研究代表者:岡田昌史)の支援を受けた．

## 参考文献

- 1) Y.Yao and W.J.Freeman: Model of Biological Pattern Recognition with Spatially Chaotic Dynamics, Neural Networks, Vol.3 pp.153-160, 1990.
- 2) 津田 一郎: カオスの脳観, サイエンス社, 1990.
- 3) Masafumi OKADA, Koji TATANI and Yoshihiko NAKAMURA: Polynomial Design of the Nonlinear Dynamics for theBrain-Like Information Processing of Whole Body Motion, Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp1410-1415, 2002.
- 4) Koji Tatani and Yoshihiko Nakamura: Reductive Mapping for Sequential Patterns of Humanoid Body Motion, Proc. of The 2nd International Symposium on Adaptive Motion of Animals and Machines, SaP III - 2, 2003.