

# 力学的情報処理系の階層化によるヒューマノイドロボットの行動生成

岡田 昌史 中村 大介 (東京大学) 中村 仁彦 (東京大学, CREST JST)

## Hierarchical Design of Dynamics-based Information Processing System for Humanoid Motion Generation

Masafumi OKADA, Daisuke NAKAMURA (Univ. of Tokyo)  
and Yoshihiko NAKAMURA (Univ. of Tokyo, CREST JST)

**ABSTRACT:** In this paper, we develop the hierarchical design method of the dynamics-based information processing system. This system has a sensor space that recognizes sensor signals and motor space that generates humanoid motions. These two spaces are connected with parameters that define the basin of attractors. Through the interaction with environment, the humanoid robot generates and transmits its motion depending on the internal state.

**Key Words:** Dynamics based information processing, Hierarchical design, Whole body motion, Humanoid robot

### 1 はじめに

生体内における記憶や連想といった情報処理において、カオスや引き込み現象に代表される非線形力学現象が深く関連していることが、Freemanら [1, 2, 3] の実験的な結果により示された。この結果に基づき、情報処理系を力学系を用いて数学的に表現し、ロボットへ応用する研究がなされてきた [4, 5]。ここでは主にカオス力学系を用いてロボットと環境のインタラクションによる運動生成がなされている。マッチングや If の論理式で表される情報処理は、各モジュールがアルゴリズムとして表現され次のモジュールへ解を渡すことで情報処理が進む。これに対し、力学系は時間の中で連続的に動くため外部からの刺激を連続的に処理する。このため、環境から得られた膨大な量の情報を処理し、連続的な出力 (運動) の生成を可能とする。これより、力学系による情報処理系が知能と密接な関係を持つと言える。

我々はこれまでに  $N$  次元空間上の任意の閉曲線をアトラクタとする力学系の設計論を提案し、ヒューマノイドロボットの全身運動を記憶、再生、認識する力学的情報処理システムの設計を行った [6]。このシステムではアトラクタを空間内のベクトル場として定義し、これを近似する力学系を多項式の表現によって設計するものであり、アトラクタへの引き込み領域の設定と変更が可能なものとなっている。本研究では、この力学的情報処理システムの階層化設計を行い、ヒューマノイドロボットの運動生成を行う。ここでは外部センサ信号を認識するセンサ空間と行動を生成する行動空間を設定し、この間の結合を引き込み領域の変更によって行い、ロボットの運動生成と環境を通じた行動の自律的遷移を行うシステムである。また、このシステムをヒューマノイドロボットへ適用し、センサ信号の連続的な処理とロボットの内部状態に依存した運動遷移の様子を検証する。

### 2 引き込み領域の設定

本章では力学的情報処理システム [6] に対して、引き込み領域の設定を行う方法を示す。次の差分方程式で表され

る離散時間非線形力学系を考える。

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

ここで、 $x \in \mathbf{R}^N$  とし、この力学系が  $N$  次元上の閉曲線  $C$  をアトラクタとすると仮定する。式 (1) を

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

$$F(x[k]) = w_1 f(x[k]) + (1 - w_1)w_2(x_0 - x[k]) \quad (3)$$

$$w_i = 1 - \frac{1}{1 + \exp\{\alpha_i(h_i - 1)\}} \quad (4)$$

$$h_i = \frac{1}{\kappa_i} \sqrt{(x[k] - x_0)^T Q_i (x[k] - x_0)} \quad (5)$$

と書き換える。ここで、 $\alpha_i, \kappa_i$  は定数であり  $x_0$  はアトラクタの中心、 $Q_i$  は楕円  $E_i$  を定義する正定行列である。このとき、 $F(x[k])$  は Fig.1 に表されるベクトル場として表現できる。 $E_1$  は  $f(x[k])$  の有効領域、 $E_2$  は引き込み領域

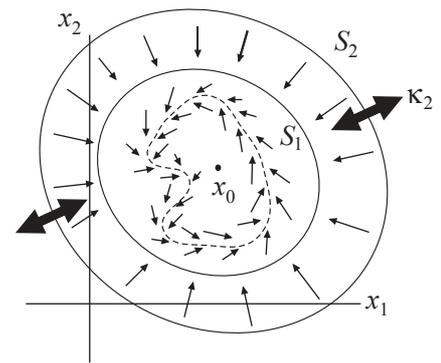


Fig. 1: Vector field defined by  $F(x[k])$

を定義しており  $\kappa_2$  の値を変化させることで引き込み領域を変化させることが可能である。さらに、 $h_1$  の値を調べることで状態変数  $x[k]$  が楕円体  $E_1$  の内部に存在することを判定できる。空間内に複数のアトラクタが存在する場合には、式 (2) を以下のように変形する。

$$x[k+1] = x[k] + \sum_j F_j(x[k]) \quad (6)$$

### 3 力学系の階層化

力学系の情報処理系を階層化し，各階層での機能を定義する．ここでは，センサ空間と運動空間を考える．Fig.2に示されるようにそれぞれの空間には複数のアトラクタ  $C_i^s, C_i^m$  が存在する．外部からのセンサ信号によってセン

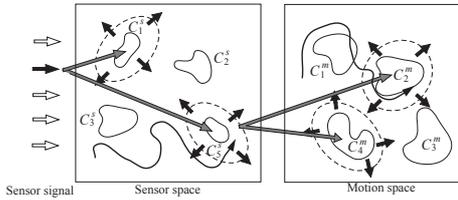


Fig. 2: Hierarchical design

サ空間内のいくつかのアトラクタの引き込み領域が拡大し，力学系 (状態変数) はいずれかのアトラクタに引き込まれる．さらに，どのアトラクタに引き込まれたかを  $h_1$  の値に基づいて判断し，行動空間内のアトラクタの引き込み領域の大きさを決定する．行動空間での力学系から参考文献 [6] の方法に基づいて，ロボットは運動を発現する．  
 ここでの階層化の意味について述べる．ある一定のセンサ信号に対して，センサ空間内の力学系は異なるアトラクタへと引き込まれる．これはロボットの内部状態に依存してセンサ信号の理解が異なると判断できる．また，センサ信号がない場合や引き込み領域に入っていない場合に力学系をカオス的に動かし，ロボットは探索を行う．

### 4 ヒューマノイドの運動生成

ヒューマノイドロボットに階層化された力学的情報処理系を実装し，その運動を観察する．ここで用いたロボットを Fig.3 に示す．このロボットは 11 自由度を有し，10 個

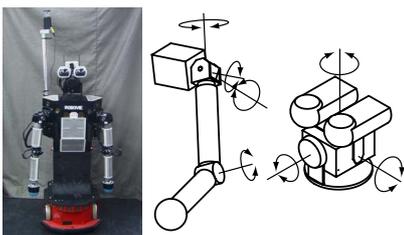


Fig. 3: Humanoid robot Robovie

のタッチセンサを持つ．タッチセンサからの信号に基づき，行動を決定する力学的情報処理系を設計して実装した．行動は 10 種類記憶させている．Fig.4 にこのときの行動空間における力学系の動きを示す．Case1 と Case2 のどちらも右肩 → 頭部右側 → 右腕の順にタッチセンサの入力を加えた．このときの時間のタイミングが異なるため，異なる運動が生成されている．また，Fig.5 に引き込み領域の大きくなったアトラクタと実際に発現された運動の時間変化を示す．引き込み領域の大きさのパターンは同じであるが，異なる行動が発現されることが理解できる．これは，行動空間における力学系の状態 (内部状態) に依存した行

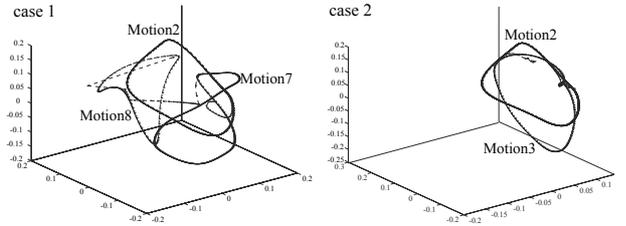


Fig. 4: Trajectory of dynamics in motor space

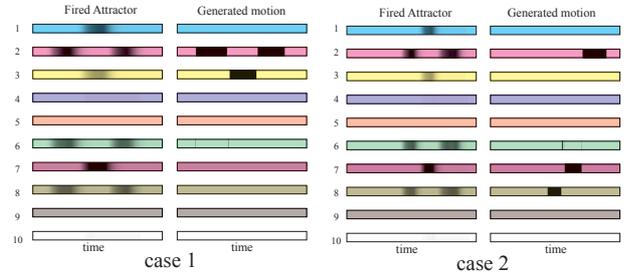


Fig. 5: Associated motion

動が発現されていることを示している．

### 5 おわりに

本研究では，力学的情報処理系の階層化設計を行いロボットの運動生成を行った．これにより以下の結果を得た．

- 力学系の引き込み領域を設定し，一つのパラメータによってこれを変化させる方法を提案した．
- センサ空間と運動空間によって階層化し，二つの間の結合を引き込み領域によって定義した．
- ヒューマノイドロボットへ実装することで，内部状態に依存した異なる行動の生成が確認された．

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」の支援を受けた．

### 参考文献

- [1] W.Freeman and W.Schneider : Changes in Spatial Patterns of Rabbit Olfactory EEG with Conditioning to Odors, Psychophysiology, Vol.19, pp.44-56, 1982.
- [2] W.J.Freeman: Simulation of Chaotic EEG Patterns, Nonlinear Dynamic model of the Olfactory Systems, Biological Cybernetics, Vol.56, pp.139-150, 1987.
- [3] Y.Yao and W.J.Freeman: Model of Biological Pattern Recognition with Spatially Chaotic Dynamics, Neural Networks, Vol.3 pp.153-160, 1990.
- [4] A.Sekiguchi and Y.Nakamura : The Chaotic Mobile Robot, Proc. of Systemics, Cybernetics and Informatics 2000 Vol.9, pp.463-468, 2000
- [5] A.Sekiguchi and Y.Nakamura : Behavior Control of Robot Using Orbits of Nonlinear Dynamics, Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp1647-1652, 2001
- [6] Masafumi OKADA, Yoshihiko NAKAMURA and Koji TATANI: Polynomial Design of the Nonlinear Dynamics for the Brain-Like Information Processing of Whole Body Motion, Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp1410-1415, 2002