

軌道アトラクタによるロボットの運動記号と身体記号の設計

岡田昌史 (東京工業大学)

Robot Body and Motion Symbol Design based on Orbit Attractor

Masafumi OKADA (Tokyo TECH)

Abstract— For systematic information processing in the real world, the employment of symbols is an effective way. Because the human might execute symbol manipulations, it is necessary for intelligent robots to design an information processing system based on symbols and symbol manipulations. So far, some researchers have challenged to design a symbol emergence system using motion data. However as long as using motion data that contains information of body, motion and environments, it is difficult for signal processing to emerge symbols that corresponds to the concept of objects. In this paper, we propose the body and motion symbol abstraction method for robots, based on dynamics-based information processing. The robot motion is represented by an attractor of the nonlinear dynamics, and the parameters of the controller are divided into two parts, one is the robot body stabilizing controller (body symbol) and another is the motion defining element (motion symbol).

Key Words: dynamics-based information processing, motion symbol, body symbol, attractor design, orbit attractor

1. はじめに

実世界の中の膨大な情報量を体系的に扱うために記号を用いることは有効な手段である。記号とはデータを圧縮し概念的な扱い(いわゆる記号操作)を目的としたもので、データを低次元空間へ射影した結果とも言い換えられる。これにより詳細や雑音が除去され扱いやすいものになり、人間もこのようなデータの圧縮と記号操作を行っていると考えられることから、知的な情報処理系を設計するためには記号とそれに基づく情報処理系の設計が必要であろう。人工知能が基礎とするオートマトンはその各ノードが抽象化された概念とみなせることからひとつの記号の表現を与えてきた。この成果をロボットに適用しようとした場合、記号接地[1]の問題が挙げられる。ロボットは実世界の中で動くため記号とその実体(運動データ)の結び付けを行う必要がある。しかし、ノードと実体との結び付けは設計者によって行うことで、ノードは概念としての役割を失い、運動データとの1対1対応であるアイコン[2]としての役割しか果たさない。結果としてロボットは理想的な環境を決められたパターンの組み合わせによって動き続けるに留まり、これは離散事象システムと連続時間世界の結び付けの問題として記号接地問題の本質に関わる部分である。この問題は従来の人工知能の限界とされてきた。

この問題の解決法を探るため、運動データに基づいて記号を創発させる研究がなされてきた。近年の成果として、谷らはパラメトリックバイアスを持ったニューラルネットワークを用いてロボットの運動を学習させ[3]、尾形らはこの方法を用いて音声やタスクを擬似シンボルとして抽象化した[4]。稲邑らは隠れマルコフモデルを用いたミメシループにおいて運動パターンの適切な区切り方を提案し、原始シンボルの獲得を行った[5]。これらはロボットの運動パターンの低次元化とクラスタリング、ニューラルネットワークを用いた信号のモ

デル化であり、運動パターンの共通要素を抽出することで記号の創発を目指しているものの、運動パターンのみを扱うため信号処理の域を脱し得ない。これらの手法により得られる結果は類似性を定めるスレッシュホールドなどの設計パラメータに依存し、その定め次第で全ての結果が導かれる。さらに、運動パターンは運動だけでなく環境や身体などの様々な情報を含んでおり、これらの「共通要素」の意味するものは不明確であることから、ある特定の条件下での抽象化を可能としても、いわゆる概念に相当するシンボルへの到達には無限のデータが必要であることを示唆している。

一方、人間の情報処理では運動パターンではなく、概念に基づいて運動を抽象化したまま処理している考えられる。Fig.1 に表されるように、運動パターンは概念

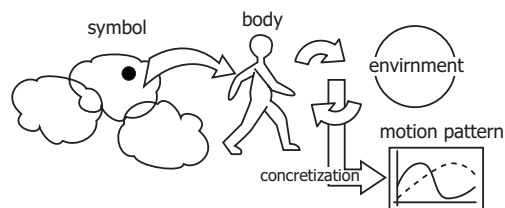


Fig.1 Human intelligence and motion generation

が身体を通じて環境と相互作用することで生じた結果であり、概念を身体・環境を用いて具体化した「実体」とであると言える。ここで、概念とは実体を持たない仮想的なもので、計算機上ではこれをパラメータ化・数値化したものがシンボルであると言えるであろう。人間のように概念と身体・環境を抽象化レベルでつなぎ合わせこれを実体化させることで運動パターンを生成する系を構成するためには、運動パターンの存在が前提となった記号創発ではなく、運動を概念として扱い、シンボルを身体を通して環境と結合させるような新たな制御系の構成法から構築し直す必要がある。

我々はこれまでにロボットの運動を力学系の軌道アトラクタとして表現し、これを実現するコントローラ的设计法を提案してきた [6]。この方法では、軌道アトラクタとして実現された運動パターンは環境・身体・コントローラの結合から生まれる結果であり、パターンベースの運動生成とはその質を大きく異にしている。本研究では、上記手法をベースとしてコントローラのパラメータに基づいた記号的设计手法を提案する。特に、複数のコントローラのパラメータから共通する部分を抽出し、身体に依存する部分と運動を決定する部分に分離することで、身体記号と運動記号的设计を行う。さらに、運動記号からこの物理的な意味、すなわちインデクスを求める方法を制御理論をベースとして解析する。分離された記号はそれ自体では意味をなさず、ロボットの身体・環境と結合することで初めて運動を具体化することから、シンボルとしての役割を持っていると言える。

2. 記号の抽出

2.1 運動の記号と身体記号

いま、力学特性の異なる複数のロボット B_i ($i = 1, 2, \dots, n$) を考え、その運動方程式が次の差分方程式で表されるものとする。

$$x_i[k+1] = f_i(x_i[k]) + g_i(x_i[k], u_i[k]) \quad (1)$$

ただし、 $x_i[k]$ は i 番目のロボットの状態変数、 $u_i[k]$ は入力である。ロボット B_i に対し、運動 \mathcal{M}^j ($j = \alpha, \beta, \dots$) を軌道アトラクタとして実現するコントローラを

$$u_i[k] = \Theta_i^j \phi(x_i[k]) \quad (2)$$

とする。コントローラ的设计法に関しては参考文献 [7] に詳しいのでここでは省略する。このとき、ある演算子 \oplus を用いて全ての Θ_i^j が

$$\Theta_i^j = \tilde{\Theta}_i \oplus \hat{\Theta}^j \quad (3)$$

と表されたとき、 $\tilde{\Theta}_i$ はロボットの身体の安定化に相当する部分であり、これはロボットの身体記号のひとつの表現であると言える。また、 $\hat{\Theta}^j$ はロボットの運動を定める要素であり、これは運動記号のひとつの表現であると言える。これは Θ_i^j の、身体記号 $\tilde{\Theta}_i$ と運動記号 $\hat{\Theta}^j$ への分解、身体記号と運動記号の結合によるコントローラ的设计に相当する。ここでは、 \oplus を行列のかけ算とし Θ_i^j を

$$\Theta_i^j = \tilde{\Theta}_i \hat{\Theta}^j \quad (4)$$

と分解することを考える。この分解は設計された Θ_i^j が

$$\begin{bmatrix} \Theta_1^\alpha & \Theta_1^\beta & \dots \\ \vdots & \vdots & \\ \Theta_n^\alpha & \Theta_n^\beta & \dots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{\Theta}_1 \\ \vdots \\ \tilde{\Theta}_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\Theta}^\alpha & \hat{\Theta}^\beta & \dots \end{bmatrix} \quad (5)$$

と表されることで実現可能である。式 (5) の計算は特異値分解を用いて実現される。いま、 $\Theta_i^j \in R^{\ell \times m}$ とす

る。このとき、

$$\begin{bmatrix} \Theta_1^\alpha & \Theta_1^\beta & \dots \\ \vdots & \vdots & \\ \Theta_n^\alpha & \Theta_n^\beta & \dots \end{bmatrix} = USV \quad (6)$$

$$U \in R^{n\ell \times r}, \quad S \in R^{r \times r}, \quad V \in R^{r \times mj} \quad (7)$$

$$r = \text{rank} \begin{bmatrix} \Theta_1^\alpha & \Theta_1^\beta & \dots \\ \vdots & \vdots & \\ \Theta_n^\alpha & \Theta_n^\beta & \dots \end{bmatrix} \quad (8)$$

と特異値分解されたとする。この結果から

$$\begin{bmatrix} \tilde{\Theta}_1 \\ \vdots \\ \tilde{\Theta}_n \end{bmatrix} = US \quad (9)$$

$$\begin{bmatrix} \hat{\Theta}^\alpha & \hat{\Theta}^\beta & \dots \end{bmatrix} = V \quad (10)$$

とすることで、運動の記号と身体記号が得られる。ここで得られた $\tilde{\Theta}_i$ 、 $\hat{\Theta}^j$ は特異値分解による分離によるものなので式 (4) を満たす。すなわち、分離された記号から Θ_i^j を再生してもコントローラは変化しないためアトラクタが形成されていることは自明である。

2.2 運動の記号から運動のインデクスの生成

分離された $\tilde{\Theta}_i$ 、 $\hat{\Theta}^j$ はそれ自体は意味をなさない。ロボットと共に閉ループ系を構成することで初めて運動を生み出す。さらに、 $\tilde{\Theta}_i$ はロボットの力学固有の値であり、 $\hat{\Theta}^j$ は運動固有の値であることからそれぞれ身体・運動の記号ということが出来る。ここでは $\hat{\Theta}^j$ に基づいて運動を実体化し、運動のインデクスとして参照目標値を生成することを試みる。

簡単のため線形システムで考える。ロボットの運動 ξ は Fig.2 に表されるモデルマッチングによる 2 自由度制御系で実現することができる [8]。ここで P は制御対象、 K は P を安定化するコントローラである。実際 ξ

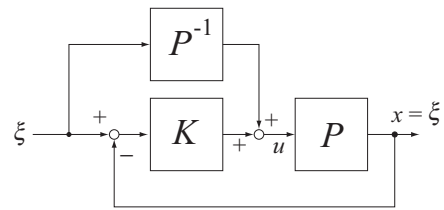


Fig.2 Two DOF control system

から x までの伝達関数は 1 となり、初期値 x_0 が ξ_0 に一致し、さらに外乱がなければ x は ξ に一致する。また、入力 u は

$$u = P^{-1}\xi + K(\xi - x) \quad (11)$$

で表され、 $P^{-1}\xi$ がロボットの推進力を決定し、 $K(\xi - x)$ が x を ξ 周りで安定化していると言える。一方、Fig.3 に表される 1 自由度制御系において、 ξ を実現するた

めの適当な x_{ref} が存在する．実際， x_{ref} は

$$x_{ref} = \frac{1+PK}{PK}\xi \quad (12)$$

によって得られる．ここで，Fig.2 と Fig.3 のコントロー

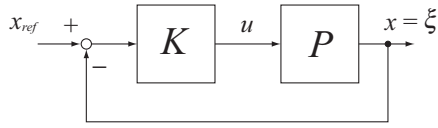


Fig.3 One DOF control system

ラ K は共通で，どちらも P の安定化に貢献するものである．入力 u は

$$u = K(x_{ref} - x) \quad (13)$$

で表され， x_{ref} は運動を定める参照目標値でロボットの身体には依存しない関数である．

この考え方を式 (2) のコントローラに適用する． $x[k]$ は実現された軌道アトラクタ Ξ 上の点 ξ_k に十分近いとして $x[k]$ を ξ_k 周りでテイラー展開し，2 次以上の微量を無視すると

$$\phi(\xi_k) = \phi(x[k]) + \frac{\partial\phi(x[k])}{\partial x}(\xi_k - x[k]) \quad (14)$$

の関係から

$$u = \Theta_i^j \phi(x[k]) = \Theta_i^j \phi(\xi_k) - \Theta_i^j \frac{\partial\phi(x[k])}{\partial x}(\xi_k - x[k]) \quad (15)$$

が成り立つ．式 (11) と式 (15) を見比べて右辺第一項，第二項がそれぞれ対応したものと見なすことができる．すなわち，第一項は点 ξ_k における推進力を定めており，第二項は $x[k]$ に依存したフィードバックコントローラ

$$K(x) = -\Theta_i^j \frac{\partial\phi(x)}{\partial x} \quad (16)$$

に関する項である．この式は状態フィードバックゲインが x の関数となった非線形制御であることを表している．そこで，式 (11)，(13) の関係と同様に式 (15) が

$$u = \Theta_i^j \phi(x[k]) = -\Theta_i^j \frac{\partial\phi(x[k])}{\partial x}(x_{ref}^j - x[k]) \quad (17)$$

で表されるとして x_{ref}^j を求める．式 (5) を用いると，

$$\tilde{\Theta}_i \hat{\Theta}^j \phi(x[k]) = -\tilde{\Theta}_i \hat{\Theta}^j \frac{\partial\phi(x[k])}{\partial x}(x_{ref}^j - x[k]) \quad (18)$$

で表される．ここで，式 (18) から身体に関連する要素 ($\tilde{\Theta}_i$) を取り除くと

$$\hat{\Theta}^j \phi(x[k]) = -\hat{\Theta}^j \frac{\partial\phi(x[k])}{\partial x}(x_{ref}^j - x[k]) \quad (19)$$

の関係が得られ，これより x_{ref}^j は

$$x_{ref}^j = - \left(\hat{\Theta}^j \frac{\partial\phi(x[k])}{\partial x} \right)^{\#} \hat{\Theta}^j \phi(x[k]) + x[k] \quad (20)$$

として求められる．この式は，式 (2) のコントローラは式 (20) に基づいて現在のロボットの状態 $x[k]$ から目標の軌道 x_{ref}^j を生成し，式 (17) に基づいて入力を決していることを表している．さらに，式 (20) はロボットの身体の要素を含んでいないことから全てのロボットの運動 j において共通である．これより， x_{ref}^j は運動の記号 $\hat{\Theta}^j$ を実体化し，運動 j のインデクスであると言える．

3. 倒立振子を用いたシミュレーション

3.1 モデルの定式化とコントローラ的设计

上述の内容を倒立振子を用いたシミュレーションによって検証する．ここでは，

1. 式 (20) に基づいて x_{ref} を求めること．
2. 求めた x_{ref} を用いて，入力 u を式 (17) から求め，軌道アトラクタが形成されること．

を確認する．Fig.4 に表される倒立振子を考える．振子

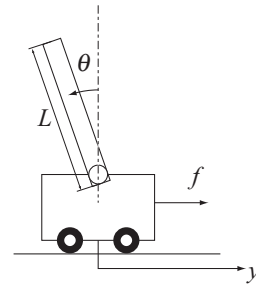


Fig.4 Inverted pendulum system

長さ L を変化させることで 4 つのシステムを設定し， $\theta \ll 1$ ， $y \ll 1$ として線形な状態方程式を求めた．状態変数は

$$x[k] = \begin{bmatrix} \theta & \dot{\theta} & y & \dot{y} \end{bmatrix}^T \quad (21)$$

である．さらに，6 つの目標パターン Ξ^j を設計した．これにより，合計 24 個の Θ_i^j を求め，式 (9)，(10) に基づいて $\tilde{\Theta}_i$ ($i = 1, \dots, 4$)， $\hat{\Theta}^j$ ($j = 1, \dots, 6$) を求めた．得られた軌道アトラクタの結果を Fig.5 に示す．こ

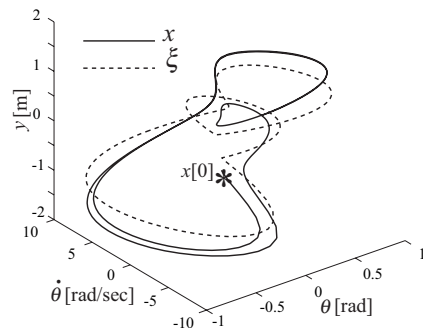


Fig.5 Generated orbit attractor

こでは $i = 1$ ， $j = \alpha$ を示しており，点線が ξ ，実線が $x[k]$ で * は初期値を表す．

3.2 x_{ref} の生成

式 (20) に基づいて、 x_{ref}^j を求めた。この結果を Fig.6 に示す。ただし、ここでは ξ^α を用いて x_{ref}^α を求めた

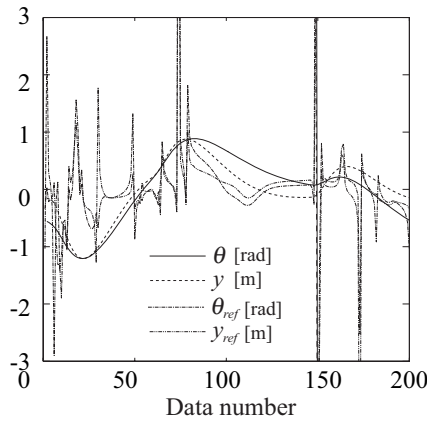


Fig.6 Generated x_{ref}

た。すなわち、 $x[k]$ がアトラクタの軌道上に存在するときの参照目標値を示している。また、見やすさのため $\dot{\theta}$, \dot{y} に関するデータは省略した。これより、運動のインデックス x_{ref} が計算されることが検証される。

x の動きに比べ、 x_{ref} の変化は激しいものとなった。これは x_{ref} が $\hat{\theta}^j \frac{\partial \phi(x)}{\partial x}$ の補空間分の自由度を持っており一意には定まらないことに大きな原因があると考えられる。ここでは式 (20) において擬似逆行列を用いたことで、その 1 つの解が得られている。解の選択法に関する考察が今後必要であろう。

3.3 軌道アトラクタの生成

次に、 $x[0]$ に適当な初期値を与え、式 (20) に基づいて x_{ref}^α を求めながら、式 (17) によって入力 u を計算し、倒立振子を動かした。この結果を Fig.7 に示す。上図では見やすさのため θ の動きと y の動きおよび、 θ_{ref} , y_{ref} のみを示した。下図は ξ^α と $x[k]$ をプロットしたもので * は初期値を表す。この結果から x_{ref} を生成しながら式 (18) に基づいて入力を決定することで軌道アトラクタが形成されている様子が理解できる。異なる振子長さ L を持つ他の倒立振子システム、他の運動に対しても同様の結果が得られた。これより、式 (20) によって得られた x_{ref} は運動の記号 $\hat{\theta}^j$ を実体化したものであるといえる。

4. おわりに

本研究ではロボットに対して軌道アトラクタへのコントローラを設計し、これに基づいて運動の記号と身体の記号を分離抽出した。本研究の成果を以下に示す。

- 複数のロボットに複数の運動を実現するコントローラを設計し、特異値分解に基づいて身体を安定化する要素、運動を決定する要素を分離抽出し、身体の記号と運動の記号を設計した。
- 得られた運動の記号からこれを実体化し、運動の参照値を求める方法を提案した。

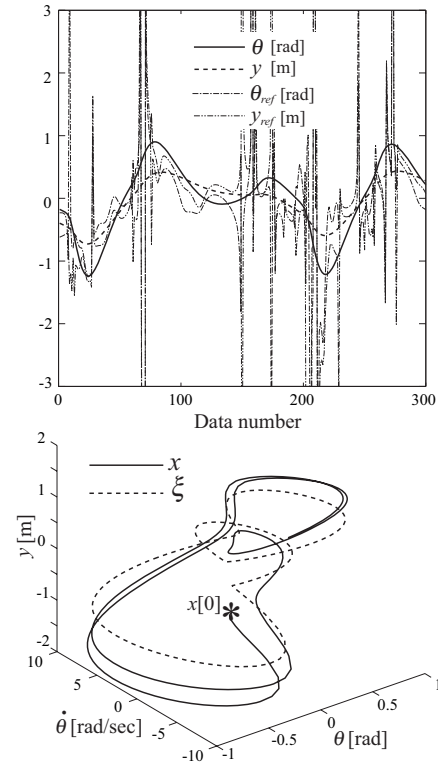


Fig.7 Generated orbit attractor

謝辞

本研究は文部科学省科学研究補助金若手研究(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」、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] S.Harnad: The Symbol Grounding Problem, Physica D, Vol. 40, pp.335-346, 1990.
- [2] T.W.Deacon: The Symbolic Species - The Co-evolution of Language and the Brain -, W. W. Norton & Company, 1997.
- [3] J. Tani, M. Ito, and Y. Sugita: Self-organization of distributedly represented multiple behavior schemata in a mirror system: reviews of robot experiments using RNNPB", Neural Networks, Vol.17, pp.1273-1289, 2004.
- [4] T. Ogata, S. Sugano, and J. Tani: Acquisition of Motion Primitives of Robot in Human-Navigation Task: Towards Human-Robot Interaction based on "Quasi-Symbol", 人工知能学会論文誌, Vol.20, No.3, pp.188-196, 2005.
- [5] 稲邑, 中村, 戸嶋, 江崎: ミメシス理論に基づく見まね学習とシンボル創発の統合モデル, 日本ロボット学会誌, Vol.22, No.2, pp.256-263, 2004.
- [6] 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
- [7] 岡田昌史: 状態空間のエネルギー距離に基づく力学系のアトラクタ設計法, 第 23 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 2E15, 2005.
- [8] 前田, 杉江: アドバンスト制御のためのシステム制御理論, 朝倉書店, 1990