

軌道アトラクタに基づく身体・運動記号の設計とその物理的意味表現

渡辺将旭 岡田昌史 (東京工業大学)

Design and Embodiment of Body / Motion Symbol based on Orbit Attactor Design

*Masaaki WATANABE, 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. The previous research proposed motion emergence method for robots based on orbit attractor of nonlinear dynamics. In this paper, we propose the design method of symbols and embodiment method of the body and motion symbols based on orbit attractor design. The proposed method is applied to the tapping dance robots.

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

1. はじめに

一般に、ロボットの制御系は個々のロボット、運動、環境に依存した安定化コントローラと目標運動パターンによって構成されている。そのため、ロボットの数、運動、環境の数だけのコントローラ、運動パターンを用意する必要があり、実世界の中で動くロボットの制御系を設計するためには膨大な情報量を必要とする。既存の運動パターン、コントローラの組み合わせによって新たな制御系が構築できれば、情報量を大幅に減少させ、圧縮を行うことができるであろう。

人間の情報処理手法と関連させると、これは記号の設計とその操作 [1] に相当する。記号とは情報の集合の中からその共通性を抽出し概念として獲得した、集合を端的に表すものであり、例えば、我々は「歩く」、*「walk」* に共通する概念をすでに獲得しており、これと人間の身体に相当する概念を結びつけることで「人間が歩く」様子を想定することができる。これらは記号創発 (概念の獲得)、記号操作 (記号の結びつけ)、記号接地 (物理的なものとの結びつけ) によって行われている。

この実現を目指し、これまでに記号の創発・操作・接地に関する多くの研究がなされてきた。前山ら [2]、竹内ら [3] はランドマークを見つけながら運動を選択する移動ロボットに応用し、Doya らの MOSAIC [4] も基本的な構造は同一である。しかし、これらの方法では記号と運動が一对一に結びついており、記号が概念ではなく一つの情報を直接指し示すラベルに過ぎないものとなっている。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 [5]、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 [6]。稲邑らは隠れマルコフモデルを用いたミメシス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 [7]。これらは実験によって得られたロボットの運動データ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すものである。しかし、運動データは環境や身体、コントローラ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り、いわゆる概念に相当する記号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、我々はロボットの運動を力学系の軌道アトラクタとして設計する力学的情報処理を提案した [8]。ここではコントローラは数値で構成される行列となり、その物理的意味は見えないもののこれがロボット身体と結合することでロボットの運動が実体化するものである。そのため、目標運動パターンは存在せず運動データはコントローラと身体の相互作用の中から生まれる構造を持っている。これにより、コントローラの数値は抽象度が高く、概念に相当すると言えるであろう。

本研究では、タップダンスロボットを対象とし設計されたコントローラから身体の情報を含んだ要素と運動を生成する要素を分離し、その意味づけを行うことで身体記号と運動記号を設計する。これらは記号の組み合わせによって他のコントローラが設計され記号操作を実現する。また、それら記号の物理的意味を探り、これらを実体化する方法を探る。

2. 記号の設計

参考文献 [9] ではロボットの運動方程式の解を軌道アトラクタに引き込ませることで、ロボットの運動創発を実現する手法が提案された。離散時間におけるロボットの運動方程式を

$$x_{k+1} = f(x_k) + g(x_k, u_k) \quad (1)$$

とし、コントローラを

$$u_k = h(x_k) \quad (2)$$

とする。式 (1) と式 (2) の連立方程式の解 x_k が

$$\Xi = \begin{bmatrix} \xi_1 & \xi_2 & \xi_3 & \cdots \end{bmatrix} \quad (3)$$

$k \rightarrow \infty$ で Ξ に収束するように、すなわち、 Ξ がアトラクタとなるように $h(x)$ を設計する。実際には式 (2) は x_k の多項式により

$$u_k = \Theta \phi(x_k) \quad (4)$$

として設計される． Θ は多項式の係数行列， $\phi(x)$ はベクトル x を x の l 次べき乗のベクトルへと拡張する関数である．例えば $x \in \mathcal{R}^2$ ， $l = 2$ ならば，

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

である．設計された Θ を用い，運動に関する部分と身体に関する部分に分解する．今，複数のロボット $i = A, B, \dots$ に対して，複数の運動 $j = 1, 2, \dots$ それぞれに対し Θ_i^j が設計されたとする．例えばロボット B の 1 という運動を生成するコントローラを Θ_B^1 とする．それぞれの Θ_i^j を Γ_i ， Λ^j を用いて

$$\Theta_i^j \phi(x_k) = \Gamma_i \phi(\Lambda^j x_k) \quad (6)$$

と分解することを考える．このとき， Γ_i はロボット i に共通な要素であり， Λ^j は運動 j に共通な要素である． Γ_i と Λ^j は数値を持った行列であり，それ自体から意味を見出すことは難しく，抽象度が高い．また，組み替えが行えることから， Γ_i と Λ^j は共に記号であり，それぞれ Γ_i は身体記号， Λ^j は運動記号であるといえる．以降は i, j を省略して表記する．

3. 記号の物理的意味表現

3.1 運動記号の物理的意味表現

軌道アトラクタによって運動が創発されている場合，運動の目標パターンは存在しないが，ここでは，運動記号の物理的意味を運動の擬似的な目標値として表わす．ロボットへの入力 u_k

$$u_k = \Gamma \phi(\Lambda x_k) \quad (7)$$

を $\xi = x + \delta$ として x 周りでテイラー展開をし，二次以上の微小量を無視すると，

$$u_k = \Gamma \phi(\Lambda \xi_k) - \Gamma \frac{\partial \phi(\Lambda x_k)}{\partial \Lambda x} \Lambda (\xi_k - x_k) \quad (8)$$

が得られる．一方，線形システムで考えた場合，Fig.1 に表されるような 2 自由度制御系で x_k を ξ_k に一致させることができる．ただし 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，この系の ξ から x までの伝達関数は 1 となる．このときの入力 u_k は

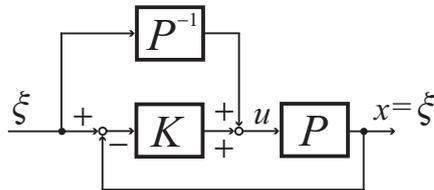


Fig.1 Two DOF control system.

$$u_k = P^{-1} \xi_k + K(\xi_k - x_k) \quad (9)$$

で表される．式 (8) と式 (9) を見比べて，右辺の第一項同士と第二項同士が対応したものとみなすことができる．つまり

$$K = -\Gamma \frac{\partial \phi(\Lambda x_k)}{\partial \Lambda x} \Lambda \quad (10)$$

であり，これははコントローラ K が x の関数になった非線形制御系であることを示している．ここでさらに，Fig.2 に表される 1 自由度制御系を考えると， x が ξ に一致するような x^{ref} が存在する．このとき入力 u_k は

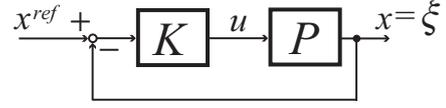


Fig.2 One DOF control system.

$$u_k = K(x_k^{ref} - x_k) \quad (11)$$

で表される．式 (11) のコントローラに対しても同様に K に式 (10) を代入したものを当てはめて

$$u_k = -\Gamma \frac{\partial \phi(\Lambda x_k)}{\partial \Lambda x} \Lambda (x_k^{ref} - x_k) \quad (12)$$

が得られる．式 (7) と式 (12) からロボットの入力 u_k は

$$u_k = \Gamma \phi(\Lambda x_k) - \Gamma \frac{\partial \phi(\Lambda x_k)}{\partial \Lambda x} \Lambda (x_k^{ref} - x_k) \quad (13)$$

とすることができる．ここで，身体記号 Γ を消去すれば，

$$x_k^{ref} = - \left(\frac{\partial \phi(\Lambda x_k)}{\partial \Lambda x} \Lambda \right)^{\#} \phi(\Lambda x_k) + x_k + \alpha \left[\Theta \frac{\partial \phi(x_k)}{\partial x} \Lambda \right]^{\perp} \quad (14)$$

で表わされる．ここで $[\cdot]^{\perp}$ は補空間の基底を意味し， $\alpha[\cdot]^{\perp}$ は補空間に属するベクトルを意味する．この式はロボットの状態変数 x_k と運動記号 Λ からなり，擬似目標値 x^{ref} を結果として出すので， x^{ref} は Λ を実体化したものであるといえる．また身体記号 Γ を含んでいないことでロボットの形状にかかわらず，同一の運動に対して共通のアルゴリズムから導かれる値である．

3.2 身体記号の物理的意味表現

次に身体記号の物理的意味表現方法を述べる．ここでは閉ループ系の安定性，すなわち運動の瞬間における身体の安定性として数値化することで，身体記号の物理的意味表現とする．

まず，ある軌道へ引き込まれるような Θ が設計されているとする．ここでは簡単のために線形系で考え，

$$x_{k+1} = Ax_k + Bu_k = Ax_k + B\Gamma \phi(\Lambda x_k) \quad (15)$$

とする．これを $\xi = x + \delta$ として， x からの誤差 δ に関する

$$\delta_{k+1} = A\delta_k - B \left(-\Gamma \frac{\partial \phi(\Lambda x_k)}{\partial \Lambda x} \right) \Lambda \delta_k \quad (16)$$

が導かれる．このとき，

$$\hat{\delta}_k = \Lambda \delta_k, \quad \hat{x}_k = \Lambda x_k \quad (17)$$

とおくと，式 (16) は

$$\hat{\delta}_{k+1} = \Lambda A \Lambda^{-1} \hat{\delta}_k - \Lambda B \left(-\Gamma \frac{\partial \phi(\hat{x}_k)}{\partial \hat{x}} \right) \hat{\delta}_k \quad (18)$$

となる．ここで A と B を座標変換したものを新たに

$$\hat{A} = \Lambda A \Lambda^{-1}, \hat{B} = \Lambda B \quad (19)$$

とおくと，

$$\hat{\delta}_{k+1} = \left(\hat{A} - \hat{B} \left(-\Gamma \frac{\partial \phi(\hat{x}_k)}{\partial \hat{x}} \right) \right) \hat{\delta}_k \quad (20)$$

となるので，このときロボットの瞬間の安定性は，

$$Ac = \hat{A} - \hat{B} \left(-\Gamma \frac{\partial \phi(\hat{x}_k)}{\partial \hat{x}} \right) \quad (21)$$

の極によって評価される．これはロボットの状態変数を Λ によって座標変換し，これに

$$K(x_k) = -\Gamma \frac{\partial \phi(\hat{x}_k)}{\partial \hat{x}} \quad (22)$$

となる非線形フィードバック則を用いたものとみなすことができる．このとき，すべての極が複素平面上の単位円内にある場合には安定であり，その1つでも単位円の外にあれば不安定である． Ac は運動記号 Λ を含んでいるが，ある姿勢における安定性は運動に依存しており，ここでは， Λ は運動に依存した座標変換として扱われる．

また，式 (20) はアトラクタとなる軌道からの誤差に関するもので， Ac が常に安定であることは，ロボットが常にアトラクタに向けて収束していくことを意味しており，不安定となる場合は運動が安定と不安定の繰り返しにより，結果として安定な運動をし続けることを表わしている．

4. タップダンスロボットによる記号の設計

4.1 アトラクタの設計

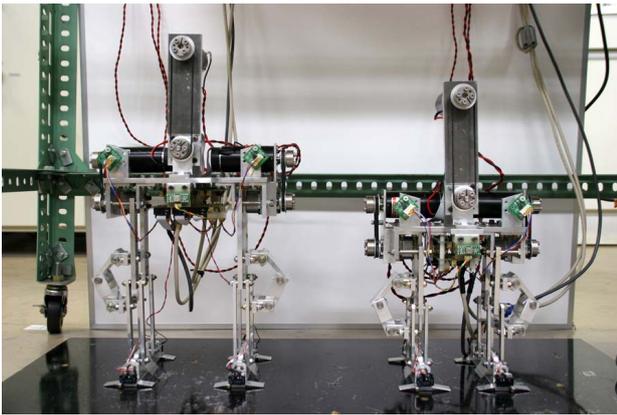


Fig.3 Tapping dance robots(Large and Small).

ここでは Fig.3 に示すタップダンスロボットを用い，記号の設計を行う．なお，ロボットの仕様は参考文献 [9] に詳しい．左がロボット (L)，右がロボット (S) である．これら二つのロボットを用いて，1.0Hz から 2.5Hz までの間の周波数でタップダンス運動を行うコントローラ θ を設計した．

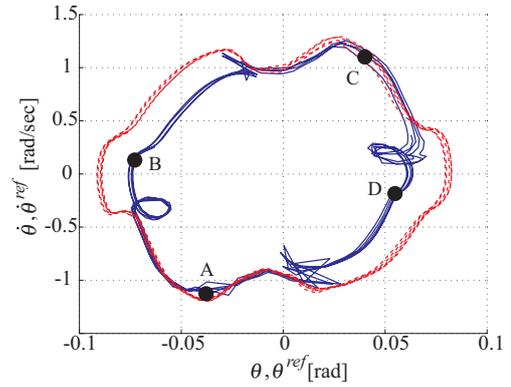


Fig.4 Pseudo reference value of θ and $\dot{\theta}$ for RobotL, solid line is RobotL's value and dash line is pseudo reference value.

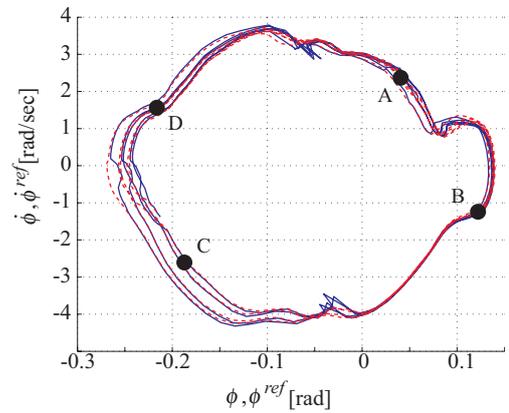


Fig.5 Pseudo reference value of ϕ and $\dot{\phi}$ for RobotL, solid line is RobotL's value and dash line is pseudo reference value.

4.2 タップダンスロボットによる運動記号の物理的意味表現

θ から Γ , Λ を求め，実験データを式 (14) に代入して運動記号の物理的意味表現を行う．物理的意味表現は記号を獲得できた両ロボットの 1.5Hz, 2.0Hz, 2.5Hz について行い，ロボット L の 2.0Hz の場合を Fig.4 と Fig.5 に示す．グラフは実際にロボットの胴体部の傾き θ と上体部の傾き ϕ に対して，運動記号 $\Lambda^{2.0Hz}$ を用いて，擬似目標値を求めたものである．実線は θ と ϕ を表し，破線はそれぞれの擬似目標値を示している．

タップダンスにおける体の回転方向が変わる少し前から，動き出すために擬似目標値を安定軌道から大きく外れて設定し，自分から動き出そうとしていることがわかる．また全体としてアトラクタへ引き込まれているために，運動中のほとんどの場合は状態変数の値と擬似目標値に大きな違いはないが，その時々状態変数の値により擬似目標値が先に存在（推進力の発生）したり，後ろに存在（ブレーキの効果）している．これは，運動を行わせるために擬似目標値を調整して運動させているためである．

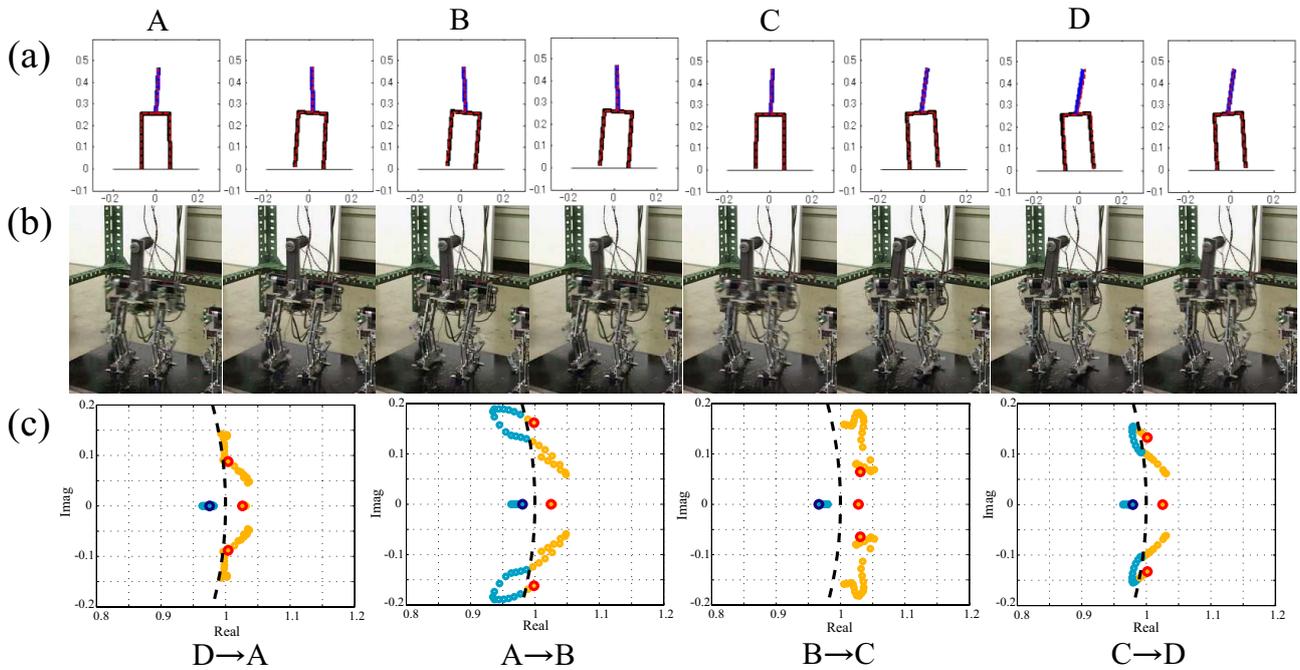


Fig.6 Embodiment of Robot L's body symbol.

4.3 タップダンスロボットによる身体記号の物理的意味表現

次に身体記号の物理的意味表現を式 (21) により求める．Fig.6では実際にロボットLで参照軌道を 2.0Hz とした場合に，作成したコントローラから Γ_{RobotL} を求めた．(a) と (b) の図は一周期のタップダンスロボットの姿勢を示し，(c) は身体記号の物理的意味表現を示している．タップダンスロボットの姿勢が A, B, C, D の各時点での極を大きい点で示し，また各区間における極の軌跡を示した．なお，単位円を破線で示し，左側が安定領域，右側が不安定領域である．

この結果から，不安定極が常に一つ存在していることが分かる．これは，タップダンスロボットが常に動き続けているため，不安定の連続の結果，安定な運動を続けていることを示している．

5. おわりに

本研究ではアトラクタ軌道に引き込まれる多数の運動の設計と，設計した運動のコントローラから得られる運動記号と身体記号の物理的意味表現を目指す研究を行った．以下に，研究の結果を示す．

1. 設計したアトラクタから運動記号を抽出し，運動記号を運動の擬似目標値として物理的意味表現を求めた．
2. 設計したアトラクタから身体記号を抽出し，身体記号を閉ループ系の安定性 (閉ループの極) として物理的意味表現を求めた．

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」の支援を受けた．

参考文献

- [1] T.W.Deacon : The Symbolic Species – The Co-evolution of Language and the Brain –, W. W. Norton & Company, 1997.
- [2] 前山, 大矢, 油田: 移動ロボットの屋外ナビゲーションのためのオドメトリとジャイロセンサ融合によるデッドレコニング・システム, 日本ロボット学会誌, Vol.15, No.8, pp.1180-1187, 1997.
- [3] 竹内, 太田, 池田, 相山, 新井: 人工ランドマークを用いた移動ロボットのナビゲーション, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.66, No.647, pp.2239-2246, 2000 .
- [4] K. Doya and K. Samejima and K. Katagiri and M. Kawato: "Multiple model-based reinforcement learning", Neural Computation, Vol. 14, pp. 1347-1369, 2002.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [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
- [9] 岡田, 村上: 軌道アトラクタを用いたロボットの同調運動制御によるコミュニケーション原理の表現, 日本ロボット学会誌, Vol.25, No.4, pp.545-553, 2007