

# 力学系の引き込みによる記号接地

門根 秀樹 (東京大学) 岡田 昌史 (東京大学) 中村 仁彦 (東京大学, CREST)

## Symbol Grounding by Entrainment of Dynamical Systems

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

**Abstract**— We propose a model which enables symbol grounding through dynamical interaction between a symbol system and its environmental physical system. Through the interaction, entrainment to an attractor is induced and as a result, correspondences between symbols and physical situations are generated. In this paper, the model and the result of a simple numerical simulation are described.

**Key Words:** Dynamical Systems, Symbol Grounding, Entrainment, Dynamical Interaction

### 1. はじめに

ロボットが人間と同じ複雑な環境の中で有益な行動を生成していくためには、ロボットはその環境について多くの知識を持っている必要がある。この膨大な知識をセンサ情報からの学習によって獲得していけば、物理的実体との対応としての記号接地<sup>3)</sup>は問題にならない。しかし、人間について考慮すればわかるようにこの学習には大変多くの時間がかかり、工業製品としてのロボットがこれを行うのは非現実的である。よってロボットの経験とは関係なく具体的な知識を記述して与えなければならない。この知識は局所的にしか適用できないのではなく、どのような状況でも対応できる汎用的、普遍的なものであるべきであるので、現実世界を抽象化し簡潔に記述することのできる記号系として与えることが必要である。ゆえに記号接地が問題となる。

中村<sup>1)</sup>の提案する力学系の階層化設計に基づいて、Okadaら<sup>2)</sup>は多項式で表現された力学系を用いて運動を記憶、認識、生成するモデルを提案した。これは運動の軌道を抽象化する力学系の設計論である。一方、Tani<sup>4)</sup>はリカレントニューラルネットワークを用いて、環境との力学的な相互作用による引き込みの結果として力学系が記号的な挙動を示すことを確認した。そこでの記号的構造は学習によって組織化されるものであり、与えることのできるものではない。本研究では、環境との力学的な相互作用による引き込みの結果として与えた記号系が接地されるモデルを提案する。

### 2. 相互作用による引き込みと記号接地

本研究では Fig.1 のようなモデルを提案する。ロボットは Brain と Body からなる。Brain は知識として与えられた記号系と系全体の運動を安定化する Stabilizer とからなる。記号系は Stabilizer から受け取る入力をもとに自身の規則に基づいて動作し、出力を Stabilizer に返す。Stabilizer はセンサ情報をもとに記号系への入力を計算し、また記号系からの出力をもとにモータ駆動の指令値を計算する。Body はモータとセンサとからなり、Brain からの指令に従って実際にモータを駆動し、

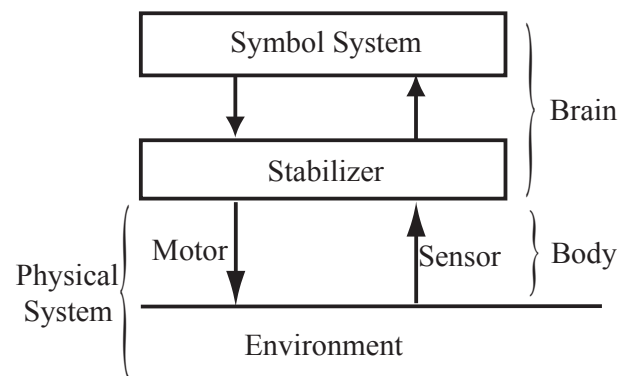


Fig.1 Model of a System that Causes Entrainment through Dynamical Interaction Between Symbol System and Physical Environment, to Ground Some of the Symbols

センサからの情報を Brain に伝達する。記号系からの出力が Stabilizer を通してモータを駆動することで環境に作用し、環境からの作用がセンサから Stabilizer を通して記号系に入力されるという情報のループが存在する。

Stabilizer の目的は矢印で示したループ状の情報の流れのなす軌道を安定化させ、アトラクタへと収束させることである。これによって全体の運動の自由度を低減し秩序的な運動がもたらされる。このアトラクタはあらかじめ与えられるものではなく、相互作用によって結合した全体としての力学系に潜在的に存在する安定軌道が発現したものである。このような引き込みを起こすことによって、Body と環境とからなる物理系と記号系とがほぼ 1 対 1 の対応関係になり、記号は接地する。

ここでもたらされる接地は記号系における記号間の関係に基づくものである。知識として与えられる記号系の各々の記号は接地していないので、各記号の本質的な意味は他の記号との関係のあり方にしかない。記号間の関係と物理的実体の関係に何らかの相関の可能性が見いだされたとき引き込みが起これば接地が起こる。そして、その引き込まれ方は一意ではなく、状況に応じ

て各記号と物理的実体との対応は変化する．これは記号が物理的実体を捨象したものであることから妥当であると考えられる．

### 3. 振り子と FSA との相互作用

モデルの一例として Fig.2 のような系を考え数値計算を行った．この系は記号系，物理系，それらをつなぐ写像からなる．記号系は Q1, Q2 の 2 つの状態を持つ決定性有限オートマトンであり，入力  $a$  の値によって遷移する． $a$  がある閾値  $a_0$  よりも大きければもう一方に遷移し，小さければ遷移せずにとどまるものとした．また，遷移した直後は  $a$  が  $a_0$  より大きくても遷移しない時間を設けた．これは  $a$  が連続値であるため，このような時間を設けないと遷移が立て続けに起こってしまうからである．記号系からの出力  $q$  はそのときの状態 Q1 または Q2 である．数値化するために，Q1 のとき  $q = 1$ ，Q2 のとき  $q = -1$  とした．

物理系は， $0.002$  [kgm<sup>2</sup>/s] の減衰を持ち先端に質点のある質量の無視できる棒からなる振り子であり，支点周りの慣性モーメントは  $0.025$  [kgm<sup>2</sup>] である．振り子と鉛直線のなす角を  $x$  [rad] とし，物理系への入力  $u$  [Nm] によってトルクを与える．物理系からの出力は  $x$  である．また，振り子が 1 回転してしまわないように，水平より上に来たときは大きなトルクで戻すようにした．

写像 A は  $x$  から  $a$  を計算し，写像 B は  $q$  から  $u$  を計算する．それぞれを 3 次多項式で表現した．

$$a[k] = \Theta_A \Phi_A(x[k], x[k-1], x[k-2]) \quad (1)$$

$$u[k] = \Theta_B \Phi_B(q[k]) \quad (2)$$

とした． $k$  は時間を表す変数である．ただし  $\Theta_A, \Theta_B$  はそれぞれ多項式の係数， $\Phi_A, \Phi_B$  は多項式の基底を生成する作用素であり，

$$\Theta_A = [\theta_{A1}, \theta_{A2}, \dots] \quad (3)$$

$$\Phi_A(x, y, z) = [1, x, y, z, x^2, \dots, z^3]^T \quad (4)$$

$$\Theta_B = [\theta_{B1}, \theta_{B2}, \dots] \quad (5)$$

$$\Phi_B(x) = [1, x, x^2, x^3]^T \quad (6)$$

である． $\Theta_A, \Theta_B$  をサンプリングステップごとに，出力が周期  $T$  ステップ前と同じ値を取るように次式で更新した． $T$  は物理系の固有周期より若干小さい値とした．

$$\Theta_A \rightarrow \Theta_A - \alpha_A (a[k] - a[k-T]) \Phi_A^\# \quad (7)$$

$$\Theta_B \rightarrow \Theta_B - \alpha_B (u[k] - u[k-T]) \Phi_B^\# \quad (8)$$

$\Phi_A^\#, \Phi_B^\#$  は， $\Phi_A(x[k], x[k-1], x[k-2])$ ， $\Phi_B(q[k])$  の擬似逆行列である．これによって写像の出力が  $T$  ステップ前と同じになったとき  $\Theta_A, \Theta_B$  は収束する． $\Theta_A, \Theta_B$  の初期値及び更新時の係数  $\alpha_A, \alpha_B$  は試行錯誤によって適当な値を選定した．特に写像 B は，想定される引き込まれた状態に近い初期値を与える必要があった．

結果を Fig.3 に示す．もともと Q1, Q2 はそれぞれ単に遷移し合う状態であるというだけであり，「右」「左」「正」「負」などを意味してはいない．しかし相互作用と写像の更新による引き込みの結果，Fig.3 の  $x$  と  $q$  に

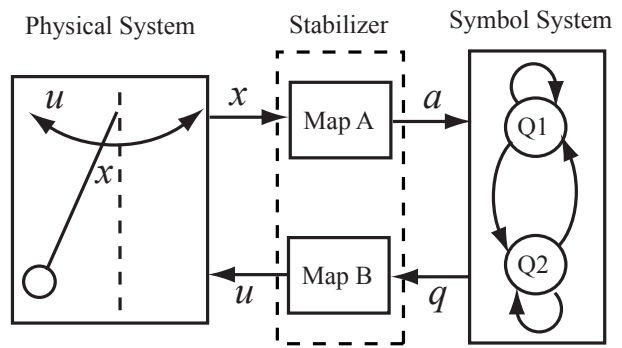


Fig.2 Dynamical Interaction Between Symbol System and Physical System

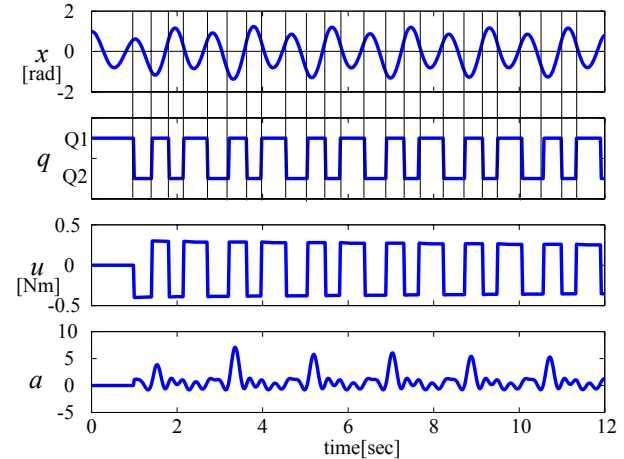


Fig.3 Result of Numerical Simulation of the Simple Model

示されるように， $x$  が負の状態が Q1，正の状態が Q2 というように，記号系の状態  $q$  は物理的状態  $x$  の挙動とのほぼ 1 対 1 の関係を持つようになった．これによって Q1 が「左」，Q2 が「右」として接地したと言える．

### 4. おわりに

知能的主体と環境との力学的相互作用を通しての引き込みによって記号接地が行われるモデルを提案した．また単純な系での数値計算によって，力学系の引き込みによる記号接地が行われる様子を確認した．

この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) 中村，「行動から知能の力学的設計論にむけて」，システム/情報/制御，Vol.46, No.1, pp.3-8, 2002.
- 2) M.Okada, K.Tatani and Y.Nakamura, "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(ICRA2002), Vol.2, pp.1410-1415, Washington D.C., U.S.A., May, 2002.
- 3) S.Harnad, "The Symbol Grounding Problem", Physica D, 42, pp.335-346, 1990.
- 4) J.Tani, "An Interpretation of the "Self" From the Dynamical Systems Perspective: A Constructivist Approach", J. of Consciousness Studies, 5(5-6), 1998.