

軌道アトラクタに基づくコントローラの身体・運動要素への分解と 組み合わせによる設計

渡辺将旭 岡田昌史 (東京工業大学)

Controller Decomposition and Combination Design of Body / Motion Elements based on Orbit Attactor

*Masaaki WATANABE, Masafumi OKADA (Tokyo TECH)

Abstract— Robot control system consists of a feedback controller and reference motion pattern. They are designed based on the robot dynamics and coupled with each other, and it requires lots of calculation to obtain them. So far, we have proposed controller design method based on orbit attractor of nonlinear dynamics. Because the controller yields one motion for one robot, we can assume that the controller includes informations of motion and body. Previous researches gave some solution to design body and motion elements based on attractor design. For easy controller design of various motions for many robots, it is effective to design new controllers from motion and body information elements. In this paper, we propose motion and body elements design method with Lagrange's method of undetermined multipliers based on robot dynamics. And we verify new controller design method by simulation with decomposed elements of motion and body from controllers.

Key Words: dynamics-based information processing, motion element, body element, controller design, attractor design, nonlinear dynamics

1. はじめに

一般に、ロボットの運動制御では Fig.1 にあるように、安定化コントローラ K と目標運動パターン x_{ref} を設計する必要がある。 K はロボットのダイナミクス

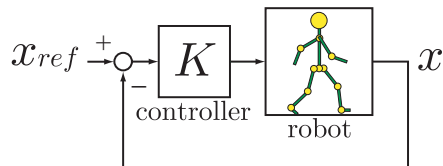


Fig.1 Robot motion control

に基づいて設計され、 x_{ref} は例えば歩行ロボットであれば ZMP のようなロボットの力学的な整合性を脱しないように設計する必要がある、その計算コストは大きい。また、異なる運動を生成させるためにはこれらを設計し直す必要がある、大きな手間を要する。

これに対し、岡田ら [1] はロボットの状態変数を軌道に引き込ませるようなコントローラを設計する方法を提案しており、これにより安定化コントローラと目標運動が同時に設計される。この方法では、ロボットの運動を場として定義し、引き込み (アトラクタ) によって運動が創発されるため、高いロバスト性、環境への柔軟性を有しており、人間との協調動作 [2, 3] や手術ロボット [4] への応用も試みられている。しかし、この方法は非線形力学に基づくことから容易とは言えず、多くの設計パラメータが存在するため、ひとつのコントローラを設計する計算量は少なくない。これが原因となり、様々な運動を実現するためには多くの手間を要するのが現状である。この問題に対処するため、これまでに我々はコントローラを分解し、分解された要素の組み

合わせによって新たなコントローラを設計する方法を提案してきた [5, 6]。この方法は、参考文献 [7, 8] と同様に、シンボルの概念に基づき、データの共通要素を抽出することを目的としたものである。しかし、この方法によりコントローラ設計のための計算コストは小さくなるものの、分解の方法が設計されたコントローラを単なる関数とみなした数学的な方法に基づいて共通要素を抽出するものであったため、結合による新たなコントローラの設計が確実なものとは言い難い。

そこで本研究では、ロボットの運動方程式とコントローラから発生する入力との関係となる物理的な考察に基づいて、設計されて複数のコントローラから運動に関する共通部分と身体に関する共通部分を分離し、これらの組み合わせによって新たなコントローラを設計する手法を提案する。また、タップダンス動作を行うロボットのシミュレーションによって、提案された方法の有効性を検証する。

2. 軌道アトラクタの設計法

参考文献 [1] 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設計する手法が提案された。これについて簡単に説明する。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) の連立方程式の解が

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

に引き込まれるように、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、式 (2) は x の多項式を用いて、

$$u[k] = \Theta \phi(x[k]) \quad (4)$$

として設計される。 Θ は多項式の係数行列、 $\phi(x)$ は x を多項式に展開したベクトルである。この方法では、環境を含めたロボットの運動方程式 (1) とコントローラ (2) の相互作用により物理現象として運動が現れていると言える。また、運動の目標パターンを与える必要がない利点により、環境の変化によってそれに適応した運動へと自動的に遷移する。

Θ の設計では $(x[k], u[k])$ の組を多く求め、これを関数近似する。そのため、現実的な $(x[k], u[k])$ の組 (力学的に整合性の取れた組) を求める必要がある。ある初期値 $x[1]$ から出発した状態変数の時間遷移は、式 (1) を $x[k]$ 周りで線形近似した系

$$x[k+1] = A(x[k])x[k] + B(x[k])u[k] + C(x[k]) \quad (5)$$

を用いて (ただし、以後簡単のため $C(x[k]) = 0$ とする)、

$$\begin{bmatrix} x[2] \\ \vdots \\ x[k+1] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A(x[1]) \\ \vdots \\ \prod_{i=1}^{k-1} (A(x[i])) \end{bmatrix} x[1] \quad (6)$$

$$+ \begin{bmatrix} B(x[1]) & & 0 \\ \vdots & \ddots & \\ \prod_{i=1}^{k-2} (A(x[i]))B(x[1]) & \cdots & B(x[k]) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ \vdots \\ u_k \end{bmatrix}$$

で表される。これを改めて

$$X = Ax[1] + BU \quad (7)$$

と書くことにする。これより、 x の時間遷移を Ξ に沿わせ、しかも、 Ξ に収束させるための入力列は

$$U = B^\# (\Xi - Ax[1]) \quad (8)$$

によって得られる。また、実際に得られた U を式 (7) に代入することで、 x の時間遷移 X が得られ、これより (x, u) の組が得られる。さらに、多くの初期値 $x[1]$ を設定することで、多くの (x, u) の組が得られ、これを複数の身体 $j = A, B, \dots$ と多数の運動 $i = 1, 2, \dots$ それぞれについて

$$\Theta_i^j = \arg \min_{\Theta_i^j} J_{\Theta_i^j} \quad (9)$$

$$J_{\Theta_i^j} = \sum_k \left\| u_i^j[k] - \Theta_i^j \phi(x_i^j[k]) \right\| \quad (10)$$

として最小となるように関数近似することで、式 (4) の Θ が設計される。

3. 運動要素と身体要素の設計

3.1 既存のコントローラの分解

前章で設計したコントローラ Θ によって得られる入力 u を考える。ロボットが運動 1 と運動 2 をするコントローラ Θ_1, Θ_2 が得られていたとすると、ある状態 $x[k]$ からの入力 $u_1[k], u_2[k]$ は運動方程式 (5) を用いてそれぞれ、

$$u_1[k] = \Theta_1 \phi(x[k]) \quad (11)$$

$$= B(x[k])^\# (x_1[k+1] - A(x[k])x[k] - C(x[k]))$$

$$u_2[k] = \Theta_2 \phi(x[k]) \quad (12)$$

$$= B(x[k])^\# (x_2[k+1] - A(x[k])x[k] - C(x[k]))$$

で表される。ただし、 $x_i[k+1]$ ($i = 1, 2$) は離散系においてある状態 $x[k]$ から移動した次の状態を表す。ここで、 $B(x[k])^\# x_i[k+1]$ は $x[k]$ を $x_i[k+1]$ へと運ぶための入力で、これは軌道 (運動) に依存した項である。一方、 $B(x[k])^\# (-A(x[k])x[k] - C(x[k]))$ は軌道には依存せず、ロボットの身体に依存した項である。そこでこれらが

$$B(x[k])^\# x_1[k+1] = \Lambda_1 \phi(x[k]) \quad (13)$$

$$B(x[k])^\# x_2[k+1] = \Lambda_2 \phi(x[k]) \quad (14)$$

$$B(x[k])^\# (-A(x[k])x[k] - C(x[k])) = \Gamma \phi(x[k]) \quad (15)$$

のように $x[k]$ の多項式で表せるとすると、 Θ_i は Λ_i と共通の Γ の和として以下のように表わされる。

$$\Theta_1 \phi(x[k]) = (\Lambda_1 + \Gamma) \phi(x[k]) \quad (16)$$

$$\Theta_2 \phi(x[k]) = (\Lambda_2 + \Gamma) \phi(x[k]) \quad (17)$$

このときの $\Lambda \phi(x[k])$ と $\Gamma \phi(x[k])$ は Fig.2 の状態空間において、それぞれ運動を続けようとする力とロボット自身が物理法則により動こうとする力に相当する。つ

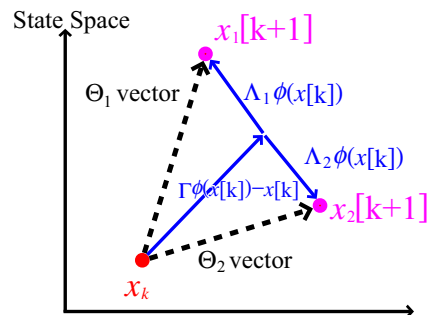


Fig.2 Input vector of Λ and Γ in state space.

まり、 Θ はそれぞれ Λ が運動に固有な要素、 Γ が身体に固有な要素に分解され、またそれらの結合により表わされたことになる。

3.2 運動・身体要素の設計方法

次に Λ と Γ の設計方法を示す。 Λ は式 (13), (14) で表わされるため、2章で得られた $x[k]$ の集合を用いて

$$\Lambda_i = \arg \min_{\Lambda_i} J_{\Lambda_i} \quad (18)$$

$$J_{\Lambda_i} = \sum_k \left\| \left\{ B(x_i^j[k]) \right\}^\# x_i^j[k+1] - \Lambda_i \phi(x_i^j[k]) \right\| \quad (19)$$

として求めることができる。しかし、式 (9) で得られた Θ と式 (19) で得られた Λ は式 (16), (17) の拘束条件, すなわち

$$\Theta_1 - \Lambda_1 = \Theta_2 - \Lambda_2 (= \Gamma) \quad (20)$$

を満たさない。これは、 Ξ をアトラクタとするコントローラ Θ と Λ は場の定義方法, 関数近似方法により複数存在するため, 適当に選ばれた Θ , Λ は拘束条件を満たしにくい。そこでこれらの要素をラグランジュの未定係数法を用いて拘束条件付きの最適解として求めることにする。

3.3 ラグランジュの未定係数法を用いた要素の設計方法

ラグランジュの未定係数法を用いるにあたり, コントローラと要素を評価する必要がある。いま, ロボット A, B に対し運動 1, 2 を与えるための Θ_i^j, Λ_i の設計問題を考える。 Θ については式 (10) と同様の最小化でよいが, Λ については同じ運動に対して共通である必要があるため, 式 (19) の J_{Λ_i} は

$$J_{\Lambda_i} = \sum_j \sum_k \left\| \left\{ B(x_i^j[k]) \right\}^\# x_i^j[k+1] - \Lambda_i \phi(x_i^j[k]) \right\| \quad (21)$$

となる。さらに式 (20) の拘束条件を加え, 以下の評価関数

$$J = J_{\Theta_i} + J_{\Lambda_i} + \sum_{j,i \neq k,l} (\Theta_i^j - \Lambda_i - \Theta_k^j + \Lambda_k) \lambda_l^T \quad (22)$$

$$\lambda = \begin{bmatrix} \lambda_1 & \lambda_2 & \dots \end{bmatrix} \quad (23)$$

を最小化する解として Θ, Λ を得る。ただし, λ はラグランジュの未定係数である。

4. タップダンスロボットによる運動創発の検証

4.1 Θ, Λ の設計

前章で提案した運動創発の方法について, タップダンスロボットのシミュレーションを用いて検証を行う。制御対象としては, Fig.3 にあるタップダンスロボット A と, これよりやや寸法の大きいタップダンスロボット B を用い, 足踏み動作に対して動作の周波数によって運動を分類した。なお, このロボットの運動方程式等については参考文献 [1] に詳しい。運動方程式の状態変数は, 頭の回転角 ϕ , 腰の回転角 θ を用いて,

$$x = \begin{bmatrix} \theta & \dot{\theta} & \phi & \dot{\phi} \end{bmatrix}^T \quad (24)$$

となる。これらのロボット A, B について運動 1~3 を生成するコントローラ $\Theta_i^A, (i=1 \sim 3)$ および Θ_i^B, Θ_2^B を設計した。このときの運動の周波数の対応を Table.1 に示す。ただし, アトラクタ設計法ではモデル化されない外乱 (ここでは足の踏み替えによる衝撃) の影響により, 運動の周期は一定ではないので, 平均を求めることで周波数とした。

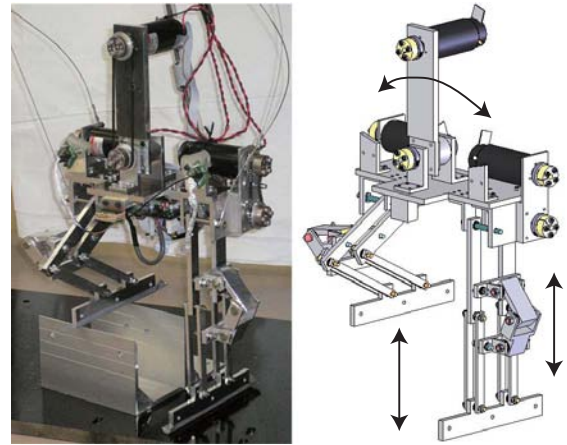


Fig.3 Tapping dance robot

Table 1 Robot motion and its frequency

Robot	Motion No.	Controller	Frequency
A	1	Θ_1^A	0.96Hz
	2	Θ_2^A	1.49Hz
	3	Θ_3^A	2.07Hz
B	1	Θ_1^B	0.97Hz
	2	Θ_2^B	1.50Hz

まず, 既知のコントローラ $\Theta_1^A, \Theta_2^A, \Theta_1^B, \Theta_2^B$ から Λ_1, Λ_2 を設計し, 提案した方法により共通要素が適切に設計できることを示す。得られた Λ_1, Λ_2 を用い, 入力を

$$u_2^B = (\Theta_1^B - \Lambda_1 + \Lambda_2) \phi(x) \quad (25)$$

として制御を行った結果を Fig.4 に示す。ただし, 図中の黒い点は参照軌道 Ξ であり, 赤い点を始点として x の辿った軌跡が青い実線である。

また比較として, 式 (9) のみを用いて求めた

$$u_2^B = \Theta_2^B \phi(x) \quad (26)$$

を入力としたときのシミュレーションを行い, 結果を Fig.5 に示す。この結果, Fig.4 では 1.56Hz の運動が生成され, Fig.5 では 1.50Hz の運動が生成され, 多数の点から同じ軌道へ収束していることが確認された。これは, Λ の入れ替えのみによりアトラクタが設計できていることが分かり, 今回提案した方法による要素の設計が有効であることを示している。

4.2 要素への分解とその結合によるコントローラ設計

次に, 新しい運動を創発させるためにロボット A に共通な Γ^A を用いて Θ_3^A と Λ_3 を設計し, 既知の $\Theta_i^B, \Lambda_i (i=1, 2)$ と組み合わせることで運動が創発されるかを示す。 Θ_3^A と Λ_3 は前述方法と同様に,

$$\Theta_3^A - \Lambda_3 = \Gamma^A \quad (27)$$

の拘束条件を満たす最適解としてラグランジュの未定係数法によって求めた。そして設計した要素を用いて

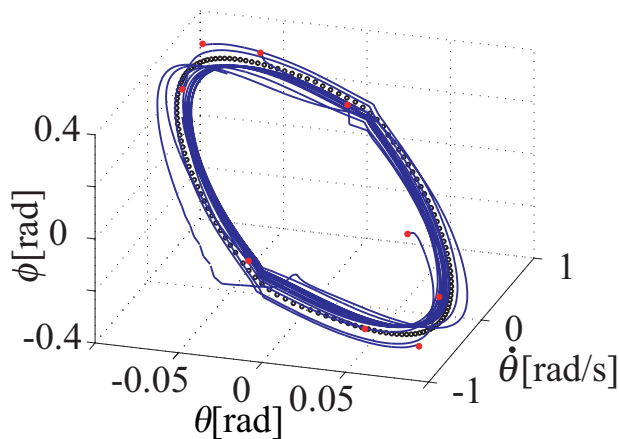


Fig.4 Simulation from 9 various start points with $\Theta_1^B - \Lambda_1 + \Lambda_2$ controller.

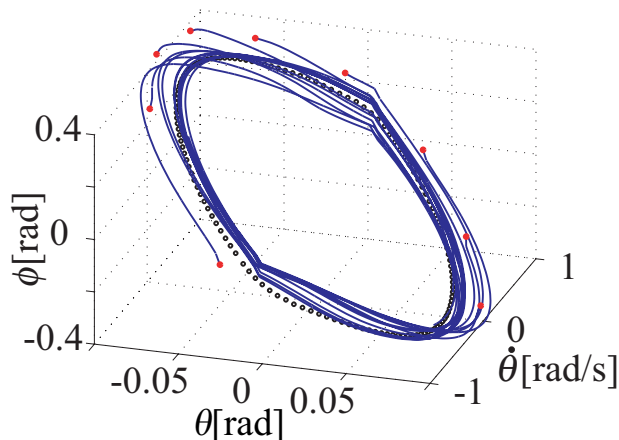


Fig.5 Simulation from 9 various start points with only Θ_2^B controller.

新しいコントローラを,

$$u_3^B = (\Theta_i^B - \Lambda_i + \Lambda_3)\phi(x) \quad (28)$$

として Fig.6 に示すシミュレーションを行った。この結果、ロボット A において 2.0Hz の運動を続ける要素として設計した Λ_3 を用いると、2.0Hz の運動ではないもののロボット B において 1.6Hz の運動を成すコントローラを設計することができた。これにより、既知の要素の組み合わせにより新しい運動が創発され、提案した方法が有効であることが示された。

5. おわりに

本研究では、アトラクタを成すコントローラだけでなく運動に固有な要素と身体に固有な要素を分離設計することで、組み合わせによる新たな運動の生成法を提案した。以下に、研究の成果を示す。

1. ロボットの入力を運動要素と身体要素に分離する事を考え、それぞれ運動と身体に共通な要素として設計する方法を提案した。
2. アトラクタを成すコントローラと運動要素、身体要素をラグランジュの未定乗数法を用いることで

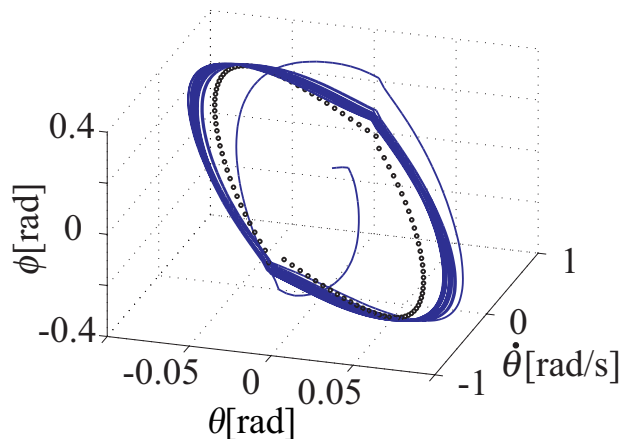


Fig.6 Motion emergence simulation with $\Theta_1^B - \Lambda_1 + \Lambda_3$ controller.

一意に設計し、これを用いて新たな運動を創発させるコントローラの設計法を提案した。

3. これらの方法をタップダンスロボットの足踏み動作に応用し、シミュレーションによって有効性を検証した。

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] 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
- [2] 小笠原, 田島, 畠山, 西田: 引き込み現象に基づく人間とロボットの暗黙情報のコミュニケーション, 第 18 回人工知能学会全国大会, 2B3-05, 2004.
- [3] T.Sato, M.Hashimoto and M.Tsukahara: Synchronization Based Control using Online Design of Dynamics and Its Application to Human-Robot Interaction, Proc. of the 2007 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, pp.652-657, 2007.
- [4] H.Mayer, I.Nagy, A.Knoll, E.U.Braun, R.Bauernschmitt and R.Lange: Adaptive Control for Human-Robot Skilltransfer : Trajectory Planning Based on Fluid Dynamics, Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.1800-1807, 2007.
- [5] 渡辺, 岡田: 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, 第 25 回日本ロボット学会学術講演会, 1D14(CD-ROM), 2007.
- [6] 渡辺, 岡田: 場の重ね合わせと状態空間写像に基づくロボットの運動創発, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 (Robomec2008), 2P2-I21(CD-ROM), 2008
- [7] 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.
- [8] 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.