

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結合による運動創発

岡田 昌史* 渡辺 将旭*

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

Masafumi Okada* and Masaaki Watanabe*

Robot control systems consist of a feedback controller and reference motion pattern. They are designed based on robot dynamics and coupled with each other. 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 information of motion and body elements. If those elements can be decomposed from the controller, a new controller will be easily designed by combination of the these elements. In this paper, we propose a motion and body elements design method with Lagrange's method of undetermined multipliers based on robot dynamics, and combination design method of the new controller using the elements. Effectiveness of the proposed method is evaluated by experiments with tapping dance robots.

Key Words: Dynamics-based Information Processing, Nonlinear Dynamics, Attractor Design, Controller Decomposition and Combination, Body Element and Motion Element

1. はじめに

一般的なロボットの運動制御系は、Fig. 1 に表されるように、安定化コントローラ K と目標とする運動パターン x^{ref} によって構成されている。例えば、歩行ロボットであれば x^{ref} は ZMP がロボットの力学的な整合性を脱しないように設計され、 K はロボットのダイナミクスに基づいて運動を安定化するように設計される。このとき、 x^{ref} は希望の運動と対象とするロボットの種類ごとに固有の軌道として設計され、 K は x^{ref} に付随して調整が必要となる場合が多い。

これに対し、運動パターンを用いずに自律力学系の結合によって運動を生成させる方法が提案されている。琴坂ら [1] は、神経振動子が外部からの入力に同調する効果を利用し、リズムカルな運動を実現した。清水ら [2] はモジュラーロボットを用いて、機構系、制御系、環境からの相互作用から創発される運動の実現を行った。しかし、いずれの場合も複雑な非線形力学系を利用することから、ロボットの様々な運動を自律系を用いて設計することは難しい。一方、岡田ら [3] はロボットの状態変数を軌道に引き込ませるような自律系のコントローラを設計することでロボットの運動を創発させる方法を提案している。こ

の方法は非線形フィードバック則を用いて、Fig. 2 に表される閉ループ系をなす力学系の解が所望の運動へと引き込まれるように、 $h(x)$ を設計するものである。このとき設計されたコントローラを用いることで、運動パターンを必要とせずに、ロボットを制御し運動を創発させることができる。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環境への柔軟性を有している。この方法は運動に対する時間の拘束がないため、モデル化が難しい不確定要素がある実世界でのダンス・歩行・走行などの運動に適している。同様のコンセプトから人間との協調動作 [4] [5] や手

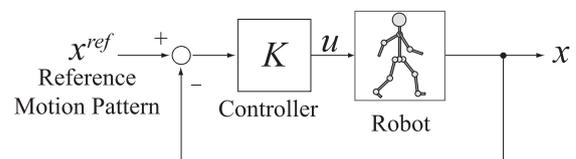


Fig. 1 Robot motion control

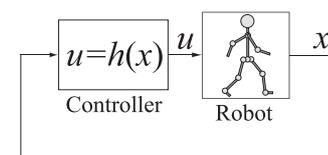


Fig. 2 Robot motion emergence

原稿受付 2009年1月19日

*東京工業大学

*Tokyo TECH

■ 本論文は学術性で評価されました。

術ロボット [6] への応用も試みられるようになってきている。しかし、コントローラ設計には先にアトラクタとすべき、力学的整合性のとれた軌道を得る必要がある。これは一般には難しく、すでに運動が実現できている他のロボットの情報が流用できれば、コントローラの設計が容易になるであろう。

この問題に対処するため、これまでに運動を生成する過程で様々な要素を設計し、それらの組み合わせによって新たな運動を生成する方法が提案されている。Farhad [7] は擬似速度、擬似力を用いて拘束条件のあるマニピュレータの運動方程式を運動に関する要素と拘束力に関する要素に分離し、簡単に力制御する方法を提案している。また、稲邑ら [8] は HMM を用いて分類した運動パターンを原始シンボルとして空間へ配置し、既知の原始シンボルの補完によって様々な運動パターンを生成する方法を提案している。一方、我々はアトラクタをなす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 [9]。この方法は、参考文献 [10] [11] にあるシンボルの概念と同様に、特定の運動を生成するコントローラから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、この方法では要素の抽出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により意味のあるコントローラが実現できているとは言い難い。

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物理的な関係の考察に基づき、設計された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を用いた実験により、提案された方法の有効性を検証する。

2. 非線形力学のアトラクタに基づくコントローラ設計

2.1 軌道アトラクタの設計

参考文献 [3] では軌道アトラクタに基づいてロボットの運動を創発する方法が提案されている。本章ではまず、アトラクタをなすコントローラの設計法を示し、その改良法を提案する。離散時間の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 $x[k]$ の非線形関数を用いて

$$u[k] = h(x[k]) \quad (2)$$

とする。ここで、 $x[k]$ はロボットの状態変数、 $u[k]$ はロボットへの入力である。適当な入力列

$$M = \begin{bmatrix} \mu_1 & \mu_2 & \cdots & \mu_N \end{bmatrix} (\mu_{N+1} = \mu_1) \quad (3)$$

を与えることで、式 (1) と式 (2) の連立方程式の解 x が、状態空間におけるある閉軌道

$$\Xi = \begin{bmatrix} \xi_1 & \xi_2 & \cdots & \xi_N \end{bmatrix} (\xi_{N+1} = \xi_1) \quad (4)$$

に引き込まれるように、 $h(x[k])$ を設計する。式 (2) は $x[k]$ の ℓ 次のべき多項式を用いて

$$u[k] = \Theta \phi(x[k]) \quad (5)$$

として設計される。ただし $\phi(x[k])$ は $x[k]$ をべき乗に展開したベクトル、 Θ は多項式の係数行列である。例えば、 $x[k] \in \mathcal{R}^2$ 、 $\ell = 2$ のとき $\phi(x[k])$ は

$$\phi(x[k]) = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & x_2 & x_1^2 & x_1 x_2 & x_2^2 \end{bmatrix}^T \quad (6)$$

$$x[k] = \begin{bmatrix} x_1 & x_2 \end{bmatrix}^T \quad (7)$$

となる。ここで、あるロボット j に運動 i を実現させるコントローラ Θ_i^j の設計を考える。このとき、 Θ_i^j は以下の評価関数 $J_{\Theta_i^j}$ を最小化するように、多数の実現可能な $(x[k], u[k])$ ($k = 1, 2, \dots$) の組 (力学的に整合性の取れた組) を用いて設計される。

$$\Theta_i^j = \arg \min J_{\Theta_i^j} \quad (8)$$

$$J_{\Theta_i^j} = \sum_k \left\| u_i^j[k] - \Theta \phi(x_i^j[k]) \right\|^2 \quad (9)$$

$(x[k], u[k])$ の詳細な設計法は付録 A に述べる。これは、 x 空間で定義されたベクトル場を関数近似するものである。ただし、式 (1) を $(x[k], u[k]) = (\xi_a, \mu_a)$ 周りでテイラー展開し、以下の状態方程式

$$x[k+1] = A(\xi_a, \mu_a)x[k] + B(\xi_a, \mu_a)u[k] + C(\xi_a, \mu_a) \quad (10)$$

を用いた設計を行っている。この方法では、運動は環境を含んだロボットの運動方程式とコントローラの相互作用により創発される。このとき、 Θ が x を安定な軌道へと引き込ませることで運動を生成しているので、陽に運動パターン x^{ref} は現れていないが、 Θ が運動パターンの情報とロボットの身体の情報に陰に含んでいると考えることもできる。

2.2 コントローラ設計方法の改良

上記のアルゴリズムによって設計されたコントローラを用いて運動を創発させた場合、目標の運動と大きく異なる運動が現れる場合がある。これは、式 (A.7), (A.8), (A.9) を求めるために、 x の通る軌道が必要であるが、 $x[k]$ は後から式 (A.4) に基づいて決まるためこれを先に用いることはできないことによるものである。そこで、参考文献 [3] [9] ではある点 $x[a]$ から出発した x が Ξ に沿って動くことを仮定し、 $A(\xi_k, \mu_k)$, $B(\xi_k, \mu_k)$, $C(\xi_k, \mu_k)$ を用いた。しかし、実際にはこの仮定は満たされにくく、 $x[k]$ が ξ_k から大きく離れる場合が多々ある。そのため、 (x, u) が力学的な整合性を満たさず、コントローラを設計しにくかった。本論文では次章の設計を行うために、創発される運動をより厳密にする必要があり、以下のように変更する。

- (1) 式 (A.11) より得られた入力列 U を式 (A.4) へ代入し、 U により実現される状態変数列 \widehat{X} を求める。
- (2) \widehat{X} に基づいて、 A , B , C を計算し直し、新たに \widehat{U} を求める。
- (3) これを繰り返し、現実的な (x, u) の組を求める。

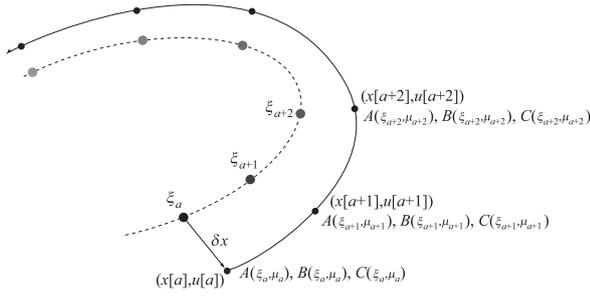


Fig. 3 Conventional controller design method

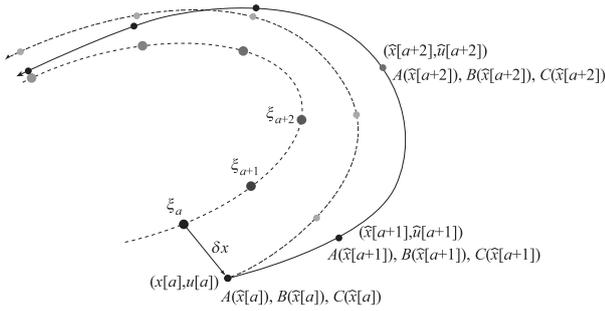


Fig. 4 Modified controller design method

この方法を概念的に表すと、従来の方法は **Fig. 3** のように $x[a+k]$ ($k = 0, 1, \dots, b$) が ξ_k に十分近いことを仮定し、 ξ_k に基づいた $A(\xi_k, \mu_k)$, $B(\xi_k, \mu_k)$, $C(\xi_k, \mu_k)$ を用いて (x, u) の組を求めていたのに対し、新たな方法では、**Fig. 4** のように実現される \hat{x} に基づいた $A(\hat{x}, \hat{u})$, $B(\hat{x}, \hat{u})$, $C(\hat{x}, \hat{u})$ を用いて現実的な (\hat{x}, \hat{u}) の組を求めるものである。この方法は、ロボットの運動方程式の非線形性が強い場合に有効である。

3. 運動要素・身体要素の設計

3.1 コントローラの分離

前章でコントローラが運動の情報と身体の情報を含んでいることを述べた。そこで、コントローラを運動要素と身体要素に分離する方法を提案する。状態空間において、 $x[k+1]$ と $x[k]$ の差 δ_k

$$\begin{aligned} \delta_k &= x[k+1] - x[k] \\ &= (A - I)x[k] + Bu[k] + C \end{aligned} \quad (11)$$

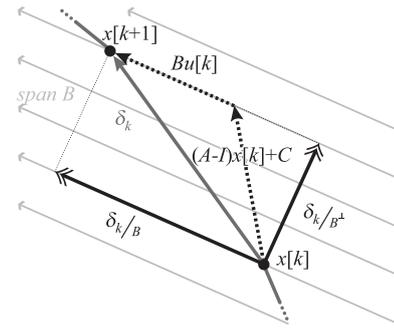
を **Fig. 5** に示すように、 $\text{span}(B)$ に平行で入力により操作可能な成分 δ_k/B と、それに垂直で入力では操作できない成分 δ_k/B^\perp に分けることを考える。ここで、 δ_k/B は δ_k を B に垂直射影したベクトル、 δ_k/B^\perp は δ_k を δ_k/B に垂直射影したベクトルであり、

$$\delta_k/B = BB^\# \delta_k, \quad \delta_k/B^\perp = (I - BB^\#) \delta_k \quad (12)$$

で得られる。このとき、 δ_k は

$$\delta_k = \delta_k/B + \delta_k/B^\perp \quad (13)$$

で表される。ここで焦点を当てるのはコントローラによる入力の

Fig. 5 Decomposition of δ_k

要素分解であるため、入力で操作できない成分 δ_k/B^\perp は無視し、入力で操作可能な成分 δ_k/B のみについて考える。 δ_k/B は

$$\begin{aligned} \delta_k/B &= BB^\#(x[k+1] - x[k]) \\ &= BB^\#((A - I)x[k] + C) + Bu[k] \end{aligned} \quad (14)$$

であるので、 $u[k]$ について整理すると、入力は以下のように二つの要素で表される。

$$u[k] = u_b[k] + u_m[k] \quad (15)$$

$$\begin{aligned} u_b[k] &= -B^\#BB^\#((A - I)x[k] + C) \\ &= -B^\#((A - I)x[k] + C) \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} u_m[k] &= B^\#BB^\#(x[k+1] - x[k]) \\ &= B^\#(x[k+1] - x[k]) \end{aligned} \quad (17)$$

このうち $u_b[k]$ はロボットの身体力学に影響を与える成分である。一方、 $u_m[k]$ は x に遷移をもたらす入力であり、 $u[k]$ のうち運動を決定する成分であることを示している。よって $u_b[k]$ と $u_m[k]$ はそれぞれ入力の身体成分、運動成分であると考えられる。また、式 (16) (17) が $x[k]$ の ℓ 次のべき多項式を用いて、次のように表せるとすると、

$$u_b[k] = \Gamma \phi(x[k]) \quad (18)$$

$$u_m[k] = \Lambda \phi(x[k]) \quad (19)$$

コントローラは

$$u[k] = \Theta \phi(x[k]) = (\Gamma + \Lambda) \phi(x[k]) \quad (20)$$

として表される。このとき、 Γ と Λ はそれぞれコントローラの中から抽出された身体要素と運動要素である。これより、 Θ は

$$\Theta = \Gamma + \Lambda \quad (21)$$

のように、身体と運動の二つの成分の和で表される。

3.2 運動要素の違いによる創発運動の違い

ここでは、あるロボットにおいて運動 1 と運動 2 を生成する二つのコントローラ

$$u_1 = \Theta_1 \phi(x[k]) \quad (22)$$

$$u_2 = \Theta_2 \phi(x[k]) \quad (23)$$

を考える。これらのコントローラはそれぞれ

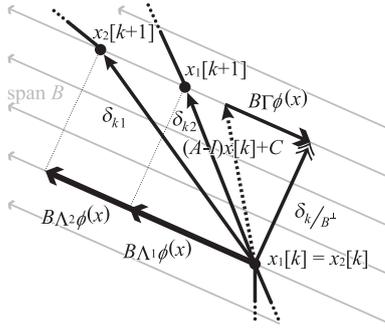


Fig. 6 Difference of motion depending on the controller input

$$\Theta_1 = \Gamma + \Lambda_1 \quad (24)$$

$$\Theta_2 = \Gamma + \Lambda_2 \quad (25)$$

として分離できるとする. これらのコントローラはある一つのロボットに対して設計されているので, Θ_1 , Θ_2 , Λ_1 , Λ_2 は拘束条件

$$\Theta_1 - \Lambda_1 = \Theta_2 - \Lambda_2 (= \Gamma) \quad (26)$$

を満たしている. Fig. 6 は運動 1 と運動 2 を生成する入力の違いを示している. ある同じ状態 $x[k] = x_1[k] = x_2[k]$ のとき, $x[k]$ はロボットのダイナミクスに従って $(A-I)x[k] + C$ だけ進む. $(A-I)x[k] + C$ の $\text{span}(B)$ 上への射影ベクトルは, 二つの運動に共通な成分として,

$$BB^\# \{(A-I)x[k] + C\} = -B\Gamma\phi(x[k]) \quad (27)$$

と表される. このとき, 二つの運動 1, 2 の違いは, $\delta_{k1/B}$ と $\delta_{k2/B}$

$$\delta_{k1/B} = B\Lambda_1\phi(x[k]) \quad (28)$$

$$\delta_{k2/B} = B\Lambda_2\phi(x[k]) \quad (29)$$

の違いにより生じるものであり, コントローラの運動要素の違いによるものである. これより, 二つの運動の違いは Γ には影響されず, Λ の違いによってのみ決定されるため, Λ が運動の要素を表していることが理解できる.

3.3 身体要素・運動要素の設計方法

Λ は式 (19) により表されるので, 付録 A で得られた $x[k]$ を用いて以下の式により得られる.

$$\Lambda_i = \arg \min J_{\Lambda_i} \quad (30)$$

$$J_{\Lambda_i} = \sum_k \left\| \{B(x_i[k])\}^\# (x_i[k+1] - x_i[k]) - \Lambda\phi(x_i[k]) \right\|^2 \quad (31)$$

Θ_i は式 (8) (9) により得られるが, 対象が同じロボット j であるので Θ_i^j と Λ_i は次の拘束条件式

$$\Theta_i^j - \Lambda_i = \text{Common value} (= \Gamma^j) \quad (32)$$

を満たす必要がある. そこでラグランジュの未定定数法を用いて, 拘束条件付の最適解として Θ_i^j と Λ_i を求める. Θ_i^j と Λ_i

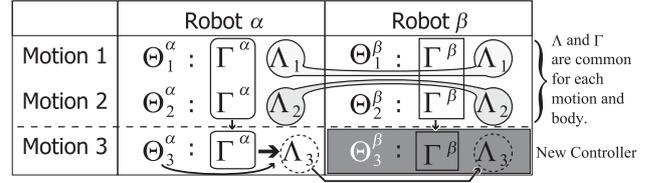


Fig. 7 New controller design using Γ and Λ

を求める評価関数 J は次のように表される. ただし, λ_ℓ はラグランジュの未定定数である.

$$J = J_{\Theta_i^j} + J_{\Lambda_i} + \sum_{j,i \neq k,\ell} (\Theta_i^j - \Lambda_i - \Theta_k^j + \Lambda_k) \lambda_\ell^T \quad (33)$$

$$J_{\Lambda_i} = \sum_j \sum_k \left\| \{B(x_i^j[k])\}^\# (x_i^j[k+1] - x_i^j[k]) - \Lambda\phi(x_i^j[k]) \right\|^2 \quad (34)$$

3.4 運動と身体要素の組み合わせによるコントローラ設計

前節までに, あるロボット j について Θ_i^j と Λ_i を設計してきた. これを, 身体の種類が異なる複数のロボットについても設計すると, Γ^j と Λ_i の多数の組み合わせが得られる. この多数の Γ^j と Λ_i の組を用いて, 新しいコントローラを設計可能である.

Fig. 7 はコントローラ Θ_3^β に相当する新しいコントローラの設計例である. まず, 式 (33) から Γ_α , Γ_β と Λ_1 , Λ_2 はそれぞれ身体と運動の共通要素として設計される. Γ_α , Γ_β はそれぞれ身体 α , β の差異と運動 1, 2 の共通情報を含み, Λ_1 , Λ_2 はそれぞれ運動 1, 2 の差異と身体 α , β の共通情報を含んでいる. また, 身体と運動の種類を無数に扱う場合には, すべての身体や運動に共通な情報はなくなり, Γ は身体, Λ は運動のみを表す要素となる. そして, 既知の多数の要素の中で, ロボット α が運動 3 を行うコントローラ Θ_3^α から運動要素 Λ_3 を取り出し, Θ_3^β に相当する新しいコントローラは次のように設計することができる.

$$\hat{u}_3^\beta = (\Gamma^\beta + \Lambda_3)\phi(x) \quad (35)$$

$$= (\Theta_2^\beta - \Lambda_2 + \Lambda_3)\phi(x) \quad (36)$$

4. タップダンスロボットにおける要素の組み合わせ

4.1 タップダンスロボット

本章では Fig. 8 に示すタップダンスロボットを用いて, 提案した分離と結合によるコントローラ設計方法を検証する. タップダンスロボットは大きなロボット α と, それよりやや小さいロボット β があり, Fig. 9 のように上体部に設置したモータによりトルク τ を発生させて上体部を回転させ, その反力により胴体部を左右に振る動作により, 接地する足を踏み変えるタップダンス運動をするものである. また状態変数 x は, 胴体部回転角 θ_1 , 胴体部回転角速度 $\dot{\theta}_1$, 上体部回転角 θ_2 , 上体部回転角速度 $\dot{\theta}_2$ を用いて,

$$x = \begin{bmatrix} \theta_1 & \dot{\theta}_1 & \theta_2 & \dot{\theta}_2 \end{bmatrix}^T \quad (37)$$

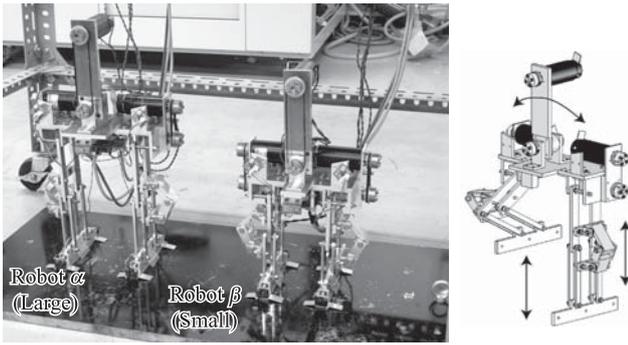


Fig. 8 Tapping dance robots

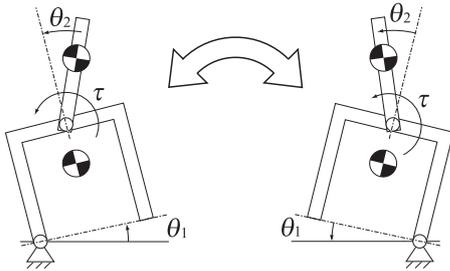


Fig. 9 Motion and modeling of tapping dance robots

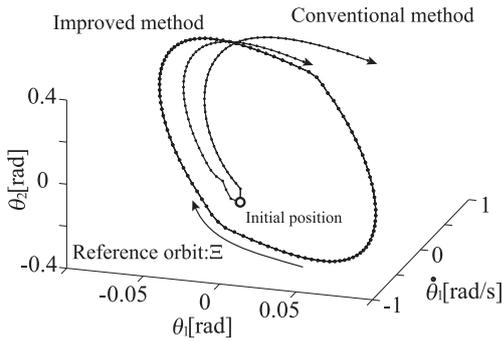


Fig. 10 Locus of the obtained state value

により構成される。足の接地条件が変わっても、これらの変数は連続値を取る。このタップダンスロボットの運動方程式は、参考文献 [3] に詳しい。またこれらのロボットはダイナミクスが異なるため、概観で似たような運動であっても状態空間では異なる軌道を描く。そこで、ここでは実現される運動の周波数をもって、運動の類似性を評価する。

まず、2.2 節で提案した方法を用いて、ロボットのコントローラ設計の改良方法を検証した。Fig. 10 では、本論文で提案した手法を用いてコントローラを設計し、Fig. 3, 4 に示す x , \hat{x} の差の一例を表している。従来の方法では、 ξ に基づいてコントローラを設計していたのに対し、新たな方法を用いることで目標の軌道に沿った軌跡が得られている。ここでは、四次元の x 空間のうち θ_1 , θ_1 , θ_2 の三次元空間で x の軌道を描いている。また、提案した方法により設計したコントローラを用いてシミュレーションを行った結果を Fig. 11 に示す。この設計法により、アトラクタに収束する正確な場を定義することができ、従来より目標となる軌道へ収束するコントローラが設計可能と

Table 1 Robot motion and its frequency

Robot	Motion number	Target frequency	Actual frequency
α	1	2 [Hz]	1.9 [Hz]
	2	1.5 [Hz]	1.5 [Hz]
	3	1 [Hz]	0.95 [Hz]
β	1	2 [Hz]	1.9 [Hz]
	2	1.5 [Hz]	1.5 [Hz]

なった。

4.2 Θ と Λ の設計

ここではロボット α に運動 1~3 とロボット β に運動 1, 2 をさせるコントローラ $\Theta_i^\alpha (i = 1 \sim 3)$, Θ_1^β , Θ_2^β を設計する。Table 1 に、今回用いた運動の番号と対応するタップダンス運動の目標周波数と実際の周波数を示す。ただし、足の踏み変え時における衝撃などの外乱によりロボットのタップダンス運動は一定ではないため、一連の運動の周期を平均することで運動の周波数としている。

まず、提案した運動要素 Λ の設計方法の妥当性を検証する。先に、コントローラ Θ_1^α , Θ_2^α , Θ_1^β , Θ_2^β と運動要素 Λ_1 , Λ_2 を求め、このときロボット β が運動 1 をするコントローラ

$$u_1^\beta = \Theta_1^\beta \phi(x) \quad (38)$$

を用いた実験結果を Fig. 12 に示す。実線がロボットの状態変数の軌跡を表し、その動作中の連続写真を載せている。なお、軌道上の番号と写真の番号が対応している。これによりロボットの運動がある特定の軌道に収束していることが分かる。一方、Fig. 13 に Θ_2^β と運動要素 Λ_1 , Λ_2 を用いて、ロボット β が運動 1 をするための入力

$$\hat{u}_1^\beta = (\Theta_2^\beta - \Lambda_2 + \Lambda_1) \phi(x) \quad (39)$$

として求めて実験を行った結果を示す。Fig. 12 と 13 は同様の結果を示しており、コントローラの分離と結合による設計方法は有効であることが示される。なお、このときのタップダンス運動の周波数はどちらも 1.9 [Hz] となった。

4.3 要素の組み合わせによる新しいコントローラの設計

次に、ロボット α が運動 3 をするコントローラ Θ_3^α と、前節で設計した身体要素 Γ^α を用いて運動要素 Λ_3 を得た。そしてロボット β が運動 3 をする新しいコントローラを、 Θ_2^β と運動要素 Λ_2 , Λ_3 を用いて次のように求め、

$$\hat{u}_3^\beta = (\Theta_2^\beta - \Lambda_2 + \Lambda_3) \phi(x) \quad (40)$$

これを用いてロボット β の運動を生成した。 \hat{u}_3^β により実現された運動を Fig. 14 に示す。このとき創発された運動の周波数は 1.15 [Hz] となり、Table 1 にあるロボット α の運動 3 と同様の周波数の運動が得られた。この結果、運動要素と身体要素の組み合わせによる新しいコントローラ設計が有効であることが示された。

さらに、提案した方法を単純な運動 1~3 だけではなく、複雑な運動 4 についても実験を行った。Fig. 15 はタップダンス運動中におけるロボットの各足の接地時間を表しており、運動 1~3 は一定のリズムなのに対し、運動 4 は各足の接地時間に

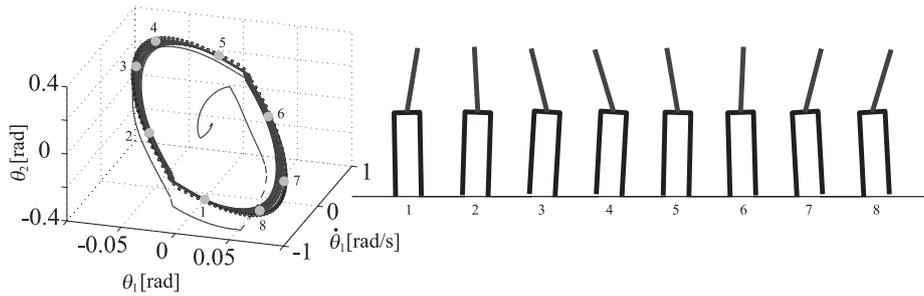


Fig. 11 Simulation result of attractor design for the tapping dance robot

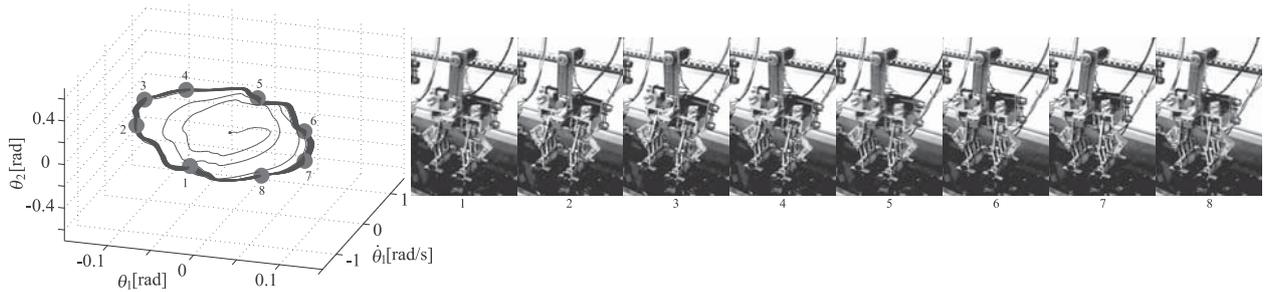


Fig. 12 Tapping dance emergence using Θ_1^β

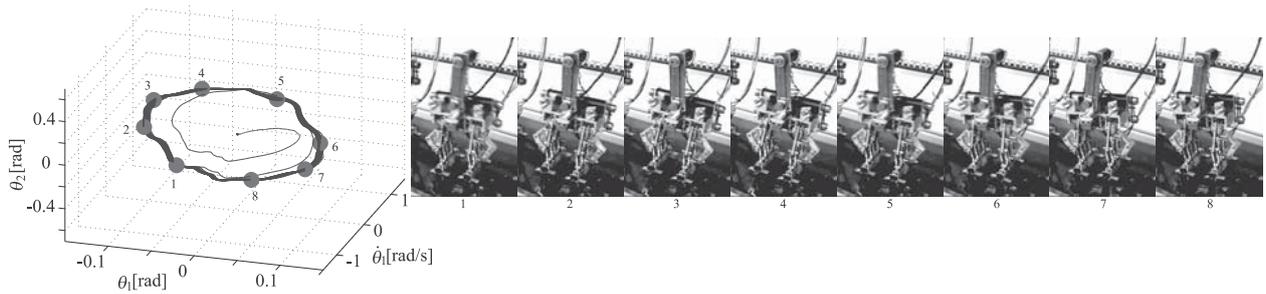


Fig. 13 Tapping dance emergence using $\Theta_2^\beta - \Lambda_2 + \Lambda_1$

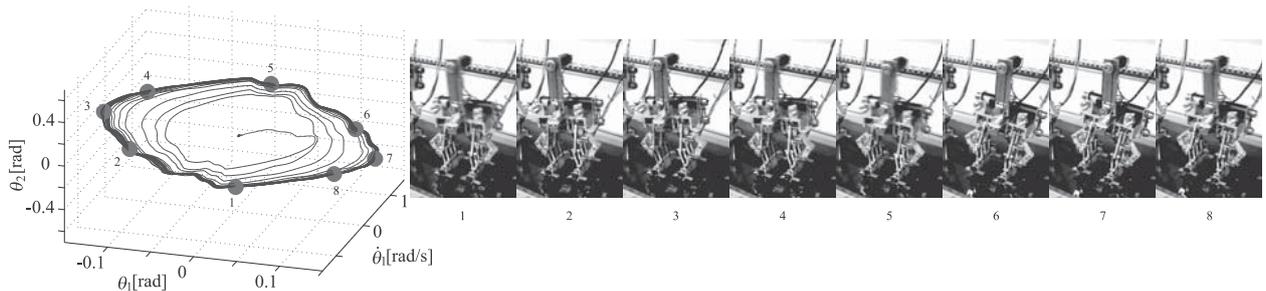


Fig. 14 New motion emergence using $\Theta_2^\beta - \Lambda_2 + \Lambda_3$

化を持つという違いがある。ロボット α が運動 4 を実現したときの状態変数の軌跡は Fig. 16 で表される。ただし、状態空間は四次元であり、Fig. 16 はこれを三次元で表示しているものなので、実際には軌跡は交差していない。運動 3 の場合と同様に Θ_4^α から運動要素 Λ_4 を獲得し、ロボット β の新しいコントローラを Θ_2^β と運動要素 Λ_2, Λ_4 を用いて次のように求め、

$$\hat{u}_4^\beta = (\Theta_2^\beta - \Lambda_2 + \Lambda_4)\phi(x) \quad (41)$$

これを用いてロボット β の運動を生成した結果を Fig. 17 に示す。その結果、このような複雑な軌道を持つ運動に対しても運動要素と身体要素の組み合わせによるコントローラ設計が有効であることが示された。また、 Θ_4^α をそのままロボット β のコントローラとして用いても、安定した運動をさせることはできなかった。これは、Fig. 17 の実験で生成された運動が、コントローラを持つロバスト性によるためではないことを表している。よって、提案した要素の設計手法を用いることで、コントローラ

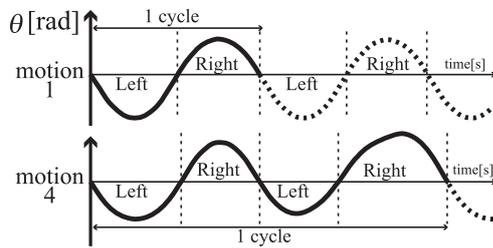


Fig. 15 Step comparison between motion1 and motion4 of tapping dance robot

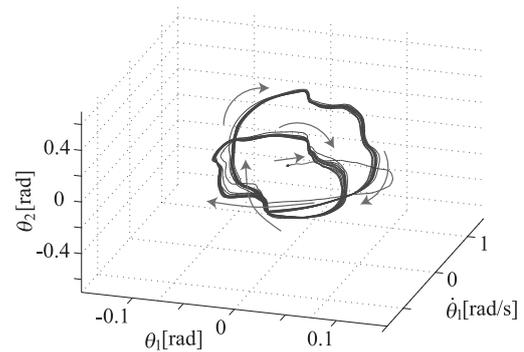


Fig. 16 Tapping dance emergence using Θ_4^α for Robot α

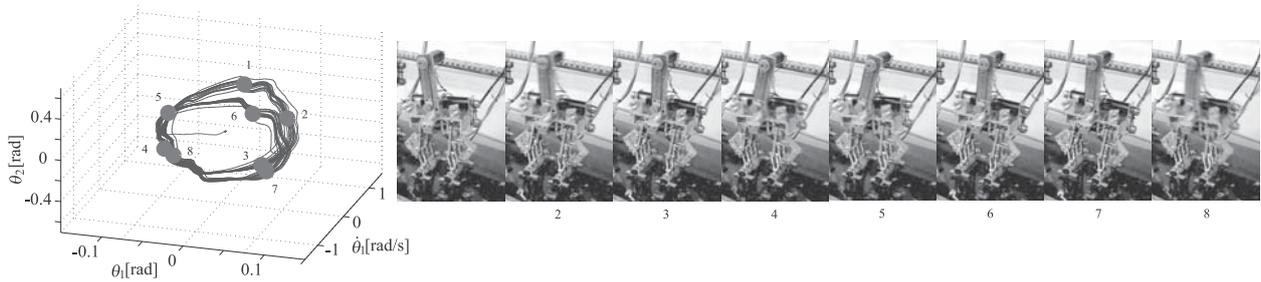


Fig. 17 New motion emergence using $\Theta_1^\beta - \Lambda_1 + \Lambda_4$

ラが内包している情報から有意な情報である運動要素と身体要素へ分離できていることが示された。

「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。

5. おわりに

本研究では、軌道アトラクタに基づきコントローラを分解し、組み合わせることでコントローラを設計する方法を提案した。その結果を以下に示す。

- (1) 軌道アトラクタをなすコントローラ的设计方法に対して、実現可能な場の生成法を与え、新たなコントローラ設計法を示した。
- (2) コントローラを状態空間におけるロボットの身体力学に基づいて、身体と運動の要素へと分離する方法を提案した。
- (3) コントローラの変離の条件について述べ、ラグランジュの未定数法を用いた計算方法を提案した。
- (4) 変離された要素に基づき、新しいコントローラ的设计方法を身体要素と運動要素の単純な和として提案した。
- (5) タップダンスロボットを用いた実験によりコントローラの変離・結合が可能であることと、新たなコントローラ設計が有効であることを検証した。

本論文では、大きさは異なるものの構造の似た二つのロボットの類似した運動を用いて検証を行った。これは、提案手法における運動要素の考え方に状態空間が等しいことを前提としているためである。Fig. 16の結果は大きく異なる運動の実現可能性を示した結果ではあるものの、理論的根拠は薄い。今後、二つのロボットの状態空間における対応（写像など）考慮することで、異なるロボット間への適用が期待される。

謝辞 本研究は文部科学省科学研究補助金若手研究（A）

参考文献

- [1] 琴坂, Schaal: “神経振動子を用いたロボットのリズム的な運動生成”, 日本ロボット学会誌, vol.19, no.1, pp.116–123, 2001.
- [2] 清水, 川勝, 石黒: “制御系と機構系間の相互作用に着目した移動知の力学的理解”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2006, pp.1A1–D05(CD-ROM), 2006.
- [3] 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.
- [4] 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, pp.2B3–05(CD-ROM), 2004.
- [5] 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.
- [6] 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 the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA’07), pp.1800–1807(CD-ROM), 2007.
- [7] F. Aghili: “Dynamics and control of constrained mechanical systems in terms of reduced quasi-velocities,” Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA’08), pp.1225–1232(CD-ROM), 2008.
- [8] 稲邑, 柴田: “原始シンボル空間を用いた外挿動作パターンの認識に対する距離計量に関する考察”, 第26回日本ロボット学会学術講演会予稿集 CD-ROM, 2L1–04, 2008.
- [9] 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予稿集 CD-ROM, 1D14, 2007.

- [10] 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," Journal of Japanese Society of Artificial Intelligence, vol.20, no.3, pp.188-196, 2005.
- [11] T. Inamura, H. Tanie, I. Toshima and Y. Nakamura: "An approach from motion generation/recognition to intelligence based on mimesis principle," Proc. of the 2nd International Symposium on Adaptive Motion of Animals and Machines (AMAM2003), pp.SaA-II-1(CD-ROM), 2003.

付録 A. 実現可能な (x, u) の設計法

式 (1) を $x[k] = \xi_k$, $u[k] = \mu_k$ の周りでテイラー展開して二次以上の微小量を無視することで, 式 (10) の $A(\xi_k, \mu_k)$, $B(\xi_k, \mu_k)$, $C(\xi_k, \mu_k)$ は

$$A(\xi_k, \mu_k) = \left. \frac{\partial f(x)}{\partial x} \right|_{x=\xi_k} + \left. \frac{\partial g(x, \mu_k)}{\partial x} \right|_{x=\xi_k} \quad (\text{A.1})$$

$$B(\xi_k, \mu_k) = \left. \frac{\partial g(\xi_k, u)}{\partial u} \right|_{u=\mu_k} \quad (\text{A.2})$$

$$C(\xi_k, \mu_k) = f(\xi_k) + g(\xi_k, \mu_k) - \left. \frac{\partial g(\xi_k, u)}{\partial u} \right|_{u=\mu_k} \mu_k - \left(\left. \frac{\partial f(x)}{\partial x} \right|_{x=\xi_k} + \left. \frac{\partial g(x, \mu_k)}{\partial x} \right|_{x=\xi_k} \right) \xi_k \quad (\text{A.3})$$

として求められる. 今, 入力列 $\{u[a], u[a+1], \dots, u[a+b-1]\}$ を考えると, 状態変数列 $\{x[a], x[a+1], \dots, x[a+b]\}$ は次のように表される.

$$\mathbf{X}_{a+1}^{a+b} = \mathbf{A}x[a] + \mathbf{B}U_{a+1}^{a+b-1} + \mathbf{C} \quad (\text{A.4})$$

$$\mathbf{X}_{a+1}^{a+b} = \begin{bmatrix} x[a+1]^T & \dots & x[a+b]^T \end{bmatrix}^T \quad (\text{A.5})$$

$$U_{a+1}^{a+b-1} = \begin{bmatrix} u[a]^T & \dots & u[a+b-1]^T \end{bmatrix}^T \quad (\text{A.6})$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} A(\xi_a, \mu_a)^T & \dots & \left(\prod_{m=a}^{a+b-1} A(\xi_m, \mu_m) \right)^T \end{bmatrix}^T \quad (\text{A.7})$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} B(\xi_a, \mu_a) & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \left(\prod_{m=a+1}^{a+b-1} A(\xi_m, \mu_m) \right) \dots & \dots & B(\xi_{a+b-1}, \mu_{a+b-1}) \\ \dots & \times & B(\xi_a, \mu_a) \end{bmatrix} \quad (\text{A.8})$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} C(\xi_a, \mu_a) \\ \vdots \\ \dots + \sum_{n=a}^{a+b-2} \left(\prod_{m=a+1}^{a+b-1} A(\xi_m, \mu_m) \right) C(\xi_n, \mu_n) \end{bmatrix} \quad (\text{A.9})$$

この関係から, 評価関数

$$J_{U_{a+1}^{a+b-1}} = \|\mathbf{U}\mathbf{B} - (\Xi_{a+1}^{a+b} - \mathbf{A}x[a] - \mathbf{C})\|^2 \quad (\text{A.10})$$

を用いて, 初期値 $x[a]$ から出発した状態変数が, 目標の運動に添って進むための入力列 U_{a+1}^{a+b-1} は

$$U_{a+1}^{a+b-1} = \mathbf{B}^\# (\Xi_{a+1}^{a+b} - \mathbf{A}x[a] - \mathbf{C}) \quad (\text{A.11})$$

$$\Xi_{a+1}^{a+b} = \begin{bmatrix} \xi_{a+1} & \xi_{a+2} & \dots & \xi_{a+b} \end{bmatrix}^T \quad (\text{A.12})$$

として得られる. さらに得られた U_{a+1}^{a+b-1} を用いて, 式 (A.4) より実際の動き \mathbf{X}_{a+1}^{a+b} が得られる. これにより, (x, u) の組み合わせが b 組得られる. 以上で得られた実現可能な (x, u) の組に基づいて, 状態空間における状態ベクトルの場が計算される.

さらに, Ξ の周りで多くの初期値 $x[a]$ を定義することで, 多数の (x, u) の組が得られる. これらの組を用いて, 式 (8) (9) より Θ が得られる.



岡田昌史 (Masafumi Okada)

1992年3月京都大学工学部精密工学科卒業. 1996年9月同大学大学院応用システム科学専攻博士課程修了, 博士(工学). 1996年10月日本学術振興会特別研究員(PD). 1997年2月同大学大学院工学系研究科リサーチ・アソシエイト. 2000年4月同大学大学院工学系研究科講師. 2004年4月東京工業大学大学院理工学系研究科助教授. 2007年4月准教授となり現在に至る. ヒューマノイドロボットの機構開発, 力学系を用いた情報処理システムの研究に従事. 計測自動制御学会, IEEEの会員. (日本ロボット学会正会員)



渡辺将旭 (Masaaki Watanabe)

2007年3月東京工業大学工学部機械知能システム学科卒業. 2009年3月同大学大学院理工学研究科機械物理学専攻修士課程修了. 2009年4月同大学大学院理工学研究科機械物理学専攻博士課程進学. 現在に至る. 力学系を用いたロボットの知的制御と, 人間の運動解析の研究に従事. 日本機械学会の会員. (日本ロボット学会学生会員)