

運動の力学的意味を考慮したコントローラの身体・運動要素への分解と運動の類似性評価

渡辺将旭, 岡田昌史 (東京工業大学)

Controller Decomposition of Body / Motion Elements and Similarity Evaluation of Motion based on Dynamical Characteristics of Robot Motion

*Masaaki WATANABE and Masafumi OKADA (Tokyo TECH)

Abstract— Robot control system that consists of a feedback controller and reference motion pattern is widely used. High calculation cost is also required to design the control system. So far, we have developed a controller design method based on an orbit attractor of nonlinear dynamics. The controller is decomposed into motion and body elements, and a new controller can be easily obtained by the combination of these elements. However, in the decomposition stage of the controllers, "same motions" for several robots have to be prepared a priori. Because it is not easy for us to define which motions are identical for a number of robots with different dynamical characteristics, a heuristic way is employed and the appropriate controller is not obtained sometimes. In this paper, we propose a verifying method of identifying various motions. This method is based on the vector field in the state-space, and makes use of the motion elements. The effectiveness of the proposed method is evaluated by simulations using tapping dance robots.

Key Words: attractor design, vector field, motion emergence

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 と目標運動パターン x^{ref} から構成されている. K はロボットを安定化する

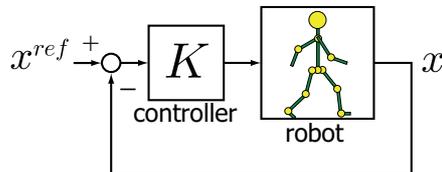


Fig.1 Robot motion control system

ように設計され, 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り, その計算コストは小さくない.

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 (アトラクタを形成する) ような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, 目標運動パターンを用いずに, ロボットの運動を場として定義し, 非線形状態フィードバック則によってロボットの状態変数を所望の軌道へと引き込ませるものであり, 高いロバスト性, 環境への柔軟性を有している. また, 我々はこの方法を発展させ, アトラクタを形成するコントローラをロボットの運動方程式とコントローラが発生する入力の物理的な関係に基づいてコントローラのパラメータから運動要素と身体要素を抽出し, これらの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 [2]. この方法では, 身体の共通性, 運動の共通性を事前に定義する必要がある. しかし, 身体の共通性は容易に定義可能であるが, 力学

特性の異なる複数ロボット間での運動の共通性を定義することは難しい. 実際, 運動の共通性の定義は発見的な方法によって設計者が行っているが, このためにコントローラの適切な分離が行えず, 新たなコントローラが設計できない場合も少なくない. そのため, 運動の共通性を見出すための評価方法を検討する必要があるであろう.

本研究では, 分離された運動要素に基づいて, 運動の共通性を評価する方法を提案する. この方法は状態空間内で入力もたらす運動のベクトルと実際に生成される運動のベクトルを比較することで運動の共通性を評価するものであり, 得られた運動要素の評価を行うものである. また, この方法をタップダンスロボットの運動に適用し, 評価が妥当であることの検討を行う.

2. コントローラの分解と結合設計

2.1 アトラクタを成すコントローラ的设计法

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ている. 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. ここで, x はロボットの状態変数, u は入力である. 式 (1) と式 (2) の連立方程式の解が状態空間内の所望の軌道

$$\Xi = \left[\xi_1 \quad \xi_2 \quad \xi_3 \quad \cdots \right] \quad (3)$$

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。式 (2) は x の ℓ 次べき多項式を用いて、

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

として設計される。 Θ は多項式の係数行列、 $\phi(x)$ は x の要素のべき乗からなるベクトルである。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 は評価関数 J_i^j を最小化する

$$\Theta_i^j = \arg \min_{\Theta} J_i^j \quad (5)$$

$$J_i^j = \sum_k \left\| u_i^j[k] - \Theta \phi(x_i^j[k]) \right\| \quad (6)$$

として与えられる。ただし、 $(x_i^j[k], u_i^j[k])$ は実現可能な状態変数と入力の組である。これを Ξ がアトラクタとなるように式 (1) から得られる線形状態方程式

$$x[k+1] = A(x)x[k] + B(x)u[k] + C(x) \quad (7)$$

を利用するが、その方法については参考文献 [1] に詳しいのでここでは割愛する。

2.2 コントローラの分離

我々は上記の方法を発展させ、参考文献 [2] において、コントローラを運動に共通な要素と身体に共通な要素に分離する方法を提案した。この方法について説明する。Fig.2 にあるように、状態空間における $x[k+1]$ と $x[k]$ の差 δ_k

$$\delta_k = x[k+1] - x[k] \quad (8)$$

$$= (A - I)x[k] + Bu[k] + C \quad (9)$$

を考える。さらに、 δ_k を $\text{span} B$ の成分 (入力により変

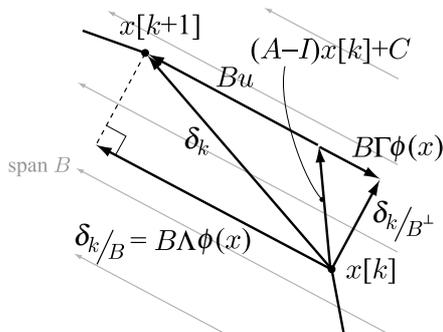


Fig.2 Decomposition of δ_k

化可能な成分) δ_k/B とそれに直交する成分 δ_k/B^\perp に分解する。ここで、 W/B はベクトル W を B の張る空間に直交射影した成分を意味し、

$$\delta_k/B = BB^\# \delta_k \quad (10)$$

$$\delta_k/B^\perp = (I - BB^\#) \delta_k \quad (11)$$

により求められる。ここで、式 (10) が x のべき多項式で表されると仮定すると、その係数行列 Λ 、 Γ を用いて

$$B\Lambda\phi(x) = \delta_k/B = (x[k+1] - x[k])/B \quad (12)$$

$$B\Gamma\phi(x) = -\{(A - I)x[k] + C\}/B \quad (13)$$

が得られる。このとき、式 (12) は運動のみから決まる要素であり、式 (13) は身体のみから決まる要素である。さらに、図より

$$Bu[k] = B\Theta\phi(x) = B\Lambda\phi(x) + B\Gamma\phi(x) \quad (14)$$

が導かれ、結果として

$$\Theta = \Lambda + \Gamma \quad (15)$$

が得られる。これより、コントローラ Θ が運動要素 Λ と身体要素 Γ に分離された。

式 (12) の関係から、 Λ は

$$\Lambda_i = \arg \min_{\Lambda} J_{\Lambda_i} \quad (16)$$

$$J_{\Lambda_i} = \sum_k \left\| B^\#(x_i[k+1] - x_i[k]) - \Lambda\phi(x) \right\| \quad (17)$$

から得られるが、式 (15) の関係から同一のロボットの全ての運動において Γ^j は共通である必要があるので、

$$\Theta_i^j - \Lambda_i = \text{Common value} = \Gamma^j \quad (18)$$

が満たされなければならない。そこで、 Θ 、 Λ は以下の評価関数

$$J = J_i^j + J_{\Lambda_i} + \sum_{j,i \neq k,\ell} (\Theta_i^j - \Lambda_i - \Theta_k^j + \Lambda_k) \lambda_\ell^T \quad (19)$$

を最小化するように求める。ただし、 λ はラグランジュの未定定数である。

3. 運動の同一性評価

2. 章の方法では、先に複数ロボットのある運動を同一と見なさなければならない。しかし、力学特性の異なるロボット間で特定の運動を同一と定義することは難しく、その評価が必要であろう。そこで、本章では得られた Λ に基づいて運動の同一性を評価する方法を提案する。同一と見なした運動が適切であった場合、2.1 章の式 (5) から得られる Θ と、2.2 章の式 (19) を最小化により得られる $\hat{\Theta}$ はロボットに同一の運動を生み出し、不適切な場合は異なる運動を生成する。そこで、これらの運動の差を評価指標とし、運動の同一性の評価を行う。特に、運動の差は Λ によって決定されるため、以下の評価方法を考える。

いま、状態が x_0 のとき、 Θ によって

$$x_1 = Ax_0 + Bu + C \quad (20)$$

$$u = \Theta\phi(x_0) \quad (21)$$

に移動したとする。一方、 $\hat{\Theta}$ によって

$$\hat{x}_1 = Ax_0 + B\hat{u} + C \quad (22)$$

$$\hat{u} = \hat{\Theta}\phi(x_0) \quad (23)$$

に移動したとする。このとき、 x_1 と \hat{x}_1 の差が運動の差であり、同一のロボットによって生成されていることから、この差を

$$V = \|v - \hat{v}\| \quad (24)$$

$$v = (x_1 - x_0)/B \quad (25)$$

$$\hat{v} = (\hat{x}_1 - x_0)/B = B\Lambda\phi(x_0) \quad (26)$$

として評価する． V が小さければ運動の同一性が適切であり，大きければ不適切である．これは Fig.3 で表される Δ のノルムの評価に相当している．

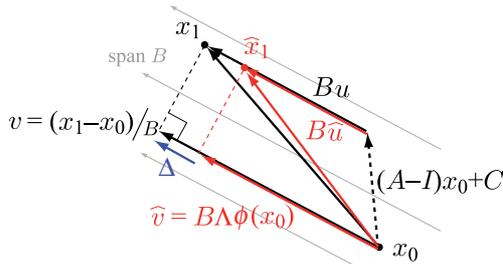


Fig.3 Motion evaluation

4. タップダンスロボットによる運動評価

4.1 タップダンスロボット

本章では Fig.4 に示すタップダンスロボットを想定し，シミュレーションから運動の評価を行う．この口

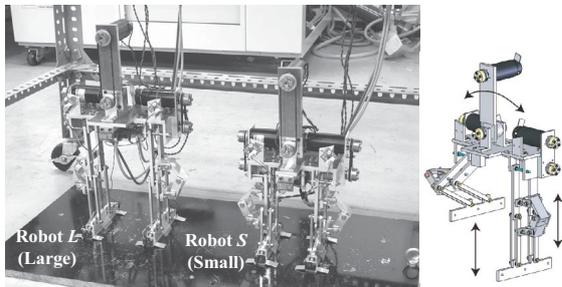


Fig.4 Tapping dance robots

ボットは左右の接地脚を切り替えながら足踏み動作を行うロボットで，頭部関節を駆動するモータによってバランスをとり安定な運動を行うものである．大きなロボット L と小さなロボット S を用意し，それぞれに周波数の異なる運動を生成した．なお，ここでは運動の同一性を運動の周波数を用いて評価するものとする．このロボットの状態変数は，胴体の回転角 θ ，角度速度 $\dot{\theta}$ ，頭部の回転角度 ψ ，角速度 $\dot{\psi}$ より，

$$x = \begin{bmatrix} \theta & \dot{\theta} & \psi & \dot{\psi} \end{bmatrix}^T \quad (27)$$

となる．

4.2 基準運動の生成

2.1 章の方法を用いて， $\Theta_1^L, \Theta_2^L, \Theta_1^S, \Theta_2^S$ および $\Theta_{1.5}^S, \Theta_{2.5}^S$ を設計した．これを基準の運動とする．なお，添字は周波数を表し Θ_i^j はロボット j の i Hz の運動を生成するコントローラを意味している．ただし，ロボットの運動はアトラクタとして生成されているため，運動の周期は一定ではない．そこで，平均をもって運動の周期とした．実際に生成された運動の周期は Table 1 のようになった．ロボットの運動における状態変数の軌跡を Fig.5, 6 に示す．Fig.5 は Θ_1^L を用いたときの運動であり，Fig.6 は Θ_2^L を用いたときの運動である．ど

Table 1 Base motion frequency

	Robot L	Robot S
Motion 1	1.077Hz	1.034Hz
Motion 1.5	—	1.632Hz
Motion 2	2.196Hz	2.217Hz
Motion 2.5	—	2.892Hz

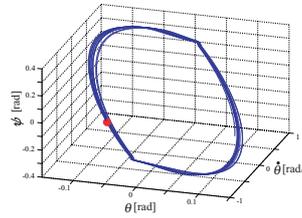


Fig.5 Locus of state variable using Θ_1^L

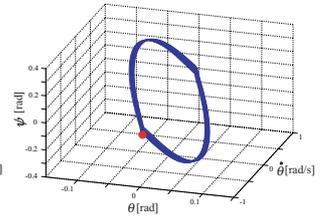


Fig.6 Locus of state variable using Θ_2^L

ちらも，初期値 (図の丸印) から出発し，所望の運動に引き込まれている様子が理解できる．この運動を基準運動とし，以後この運動との比較を行う．

4.3 コントローラの分離と結合による運動生成

2.2 章の方法の基づき，得られたコントローラから Table 2 に示す組み合わせによって $\hat{\Theta}_1^L, \hat{\Theta}_2^L, \hat{\Theta}_1^S, \hat{\Theta}_2^S$ を得た．この場合，周波数が近い運動を同一と見なし

Table 2 Combination of new controller (Case 1)

	Robot L	Robot S	
Motion 1	$\hat{\Theta}_1^L$	$\hat{\Theta}_1^S$	$\rightarrow \Lambda_1$
Motion 2	$\hat{\Theta}_2^L$	$\hat{\Theta}_2^S$	$\rightarrow \Lambda_2$
	$\rightarrow \Gamma^L$	$\rightarrow \Gamma^S$	

ている．このとき，得られた $\hat{\Theta}_1^L, \hat{\Theta}_2^L$ を用いてロボットの運動を生成したときの，状態変数の軌跡を Fig.7, 8 の赤線で示す．比較のため基準運動も青線で示した．

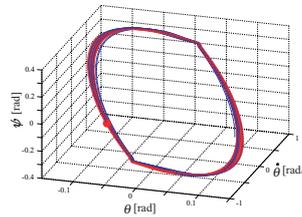


Fig.7 Locus of state variable using $\hat{\Theta}_1^L$ (Case 1)

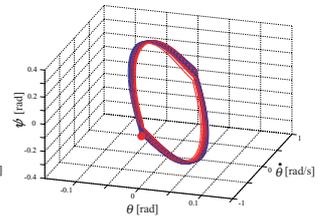


Fig.8 Locus of state variable using $\hat{\Theta}_2^L$ (Case 1)

また，このとき得られた運動の周波数は Table 3 のようになった．

次にロボット S の運動を入れ替え，Table 4 に示す組み合わせから新たなコントローラ $\hat{\Theta}_1^L, \hat{\Theta}_2^L, \hat{\Theta}_{1.5}^S, \hat{\Theta}_{2.5}^S$ を得た．このときのロボットの運動における状態変数

Table 3 Obtained motion frequency (Case 1)

	Robot L	Robot S
Motion 1	1.057Hz	1.018Hz
Motion 2	2.260Hz	2.289Hz

Table 4 Combination of new controller (Case 2)

	Robot L	Robot S	
Motion 1	$\hat{\Theta}_1^L$	$\hat{\Theta}_{1,5}^S$	$\rightarrow \Lambda_1$
Motion 2	$\hat{\Theta}_2^L$	$\hat{\Theta}_{2,5}^S$	$\rightarrow \Lambda_2$
	$\rightarrow \Gamma^L$	$\rightarrow \Gamma^S$	

の軌跡を Fig.9, 10 に示す. Fig.7, 8 のときと同様に,

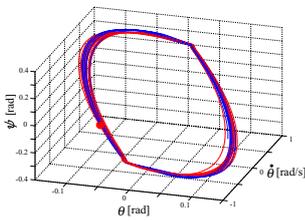


Fig.9 Locus of state variable using $\hat{\Theta}_1^L$ (Case 2)

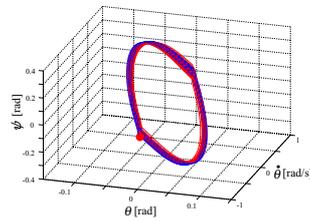


Fig.10 Locus of state variable using $\hat{\Theta}_2^L$ (Case 2)

基準運動を青線で示している. また, このときの運動の周波数を Table 5 に示す. これらの結果のみから判断

Table 5 Obtained motion frequency (Case 2)

	Robot L	Robot S
Motion 1	1.039Hz	1.660Hz
Motion 2	2.226Hz	2.920Hz

すると, どちらの場合も基準運動とほぼ同じ軌跡, 周波数が得られ, 運動の同一性には差がないように見える. 一方, これら 2 通りのシミュレーションにおける, 式 (24) の値を Fig.11, 12 に示す. ただし, ここでは基準運動の軌道上における値を示しており, 青の * が Case 1, 赤の o が Case 2 を表している.

この結果から, どちらの Case の場合でもコントローラの分離はできたものの, Case 1 に比べ Case 2 のときは V の値が小さく, 運動の同一性が高いことが判断される. これは, Case2 の場合の方が理想的な共通の運動要素が設計できていると判断され, Λ と Γ の結合によって新たなコントローラ (例えば $\hat{\Theta}_{1,5}^L$) を設計する際に, Case2 の組み合わせを用いることでより適切な結果が得られることが予想される. また, ロボットの運動を単に周波数で評価するのではなく, 固有周波数などの関係から, 小さなロボットは早く動きやすいといった我々の感覚とも一致している.

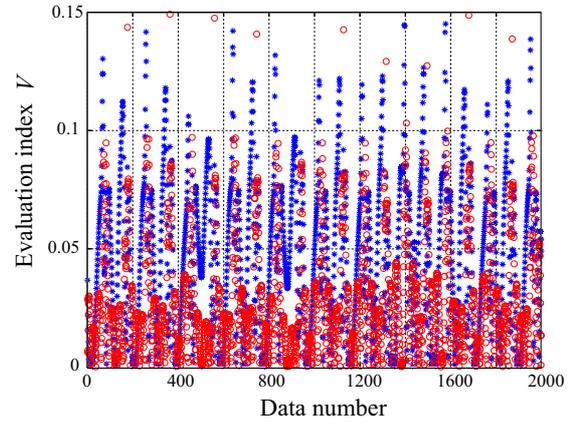


Fig.11 Motion evaluation index of Motion 1 for robot L

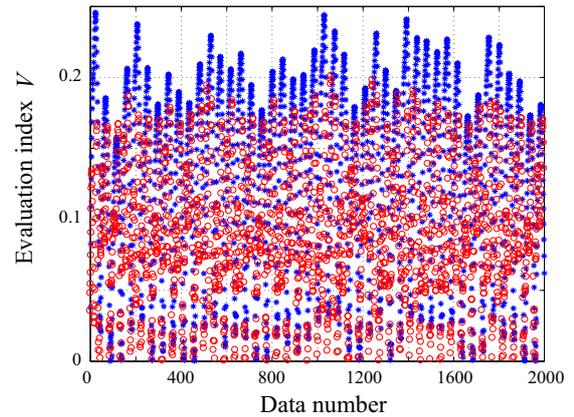


Fig.12 Motion evaluation index of Motion 2 for robot L

5. おわりに

本研究では, これまでに提案してきたアトラクタを成すコントローラの分離・結合設計を基礎として, 分離された運動要素に基づいた運動の同一性の評価方法を提案した. 以下に本研究の成果を示す.

1. 運動要素から得られる場をもとにした, 運動の同一性評価を与える方法を提案した.
2. タップダンスロボットを用いたシミュレーションにより, 提案する評価方法に基づいた運動の適切な同一視が評価できることを示した.
3. 特に, この結果はロボットの力学特性から生まれる固有周波数などの違いによる運動の同一性に関して, 我々の感覚と一致している結果を得た.

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] 渡辺, 岡田: 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, 第 26 回日本ロボット学会学術講演会, 2F1-07(CD-ROM), 2008