

軌道アトラクタを用いた自律制御系に基づく運動伝達のための擬似目標値

Pseudo-reference for Motion Transfer
based on Autonomous Control System with an Orbit Attractor

正 渡辺将旭 (東京工業大学), 正 岡田昌史 (東京工業大学)

WATANABE Masaaki, Tokyo TECH, watanabe@micro.mep.titech.ac.jp

OKADA Masafumi, Tokyo TECH, okada@mep.titech.ac.jp

We aim at developing a motion transfer method with implicit knowledge. The method includes dynamical characteristics of motion, which are not only kinematic postures but also their velocities, to realize an efficient motion transfer. Actually in the textbook of gymnastics, motions are illustrated both kinematic postures and some dynamical complements. However the complements are designed based on athlete's instincts and it is not easy to embody the implicit instincts for us. To overcome this problem, we propose the embodiment method of the complements. The human autonomous system is modeled by the autonomous control system, and the complements are realized by the virtual target posture including velocity information as the 'pseudo-reference' in the autonomous control system. The proposed method is applied to the tap dancing robot. The obtained pseudo-reference can realize the same motion to be used as an explicit reference in the robot control system.

Key Words: motion transfer, pseudo-reference, attractor design, motion emergence

1. はじめに

人間の動作についての知識は、大きく形式知と暗黙知に分類される [1, 2]. 形式知は明文化されている知識であり他者への伝達が容易なのに対し、暗黙知は言語や絵では表現しにくく経験による運動のコツやスキルが該当する. この暗黙知を明文化することができれば、従来の形式知だけでは表しきれない運動のコツの運動伝達が効果的に行える. その暗黙知を用いた運動伝達の例として、体操の教科書で描かれている走り幅跳びの表現を Fig.1 に示す. 連続写真で表される一連の姿勢は形式知である人間の運動学のみを表しているため、より効果的に運動伝達を行うためには、それらの間にある暗黙知を補完する力学特性を表す方法が必要となる. ここでは例えば、Fig.1-(1) は“階段を駆け上がるようにジャンプする”, (2) では“頭を突き出すように”という動きの情報を言葉で加えることで、暗黙知の部分を補完し運動を伝達しようとする. これらの言葉を、図の中で示されている姿勢を表現できれば効果的に運動することができるので暗黙知の形式化となっているが、アスリートの直感である暗黙知を形式知に変換することは簡単ではない. 本研究では、力学の観点から暗黙知を、姿勢や概念的なイメージとして実体化して形式知に変えることを目的とする.

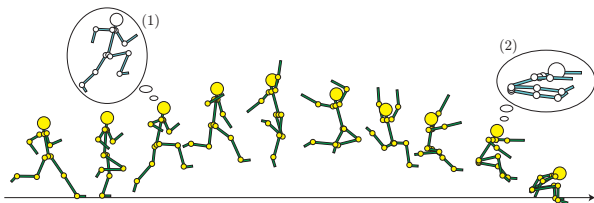


Fig.1 The sequence posture of long jump motion

これまでに、ロボット制御のための運動伝達の方法がいくつか研究されてきている. Hasegawa ら [3] と Cortesao ら [4] は、はめ合い運動の人間のスキルを (i) 表面に接触するまで移動する, (ii) 接触したまま回転させる, (iii) 穴と

平行にしロボットでタスクを実現する動作へと分割している. Hirana ら [5] は HiddenMarkovModel により人間の運動を要素へと分割しスキルを獲得している. Dordevic ら [6] はエキスパートの運動を学習することで、人間の運動からスキルを定義した. これらの方法は与えられたタスクを効果的に実行するために必要な、代表的運動に注目している. また、Kuniyoshi ら [7] はロボットの起き上がり動作について、多数の試行データの分散から運動のコツを提案した. Kawamura ら [8] は運動データの角度や角速度、角加速度が大きく変化する点に注目し、別のアプローチによる運動のコツを提案している. ここで得られた運動のコツは、明示的に計測できる姿勢から選択しているため、舞踏家やアスリートが獲得している抽象的感覚の暗黙知を実体化するものではない.

一方、我々はこれまでに運動を分節化することを目的として擬似目標値を提案してきた [9]. 参考文献 [9] では運動の分節のために得られた擬似目標値が集合している領域に注目しているが、ここでは暗黙知を利用した運動伝達の手法としてとらえる. まず、これまでに提案している (i) 自律制御系のアトラクタを用いたロボットの制御 [10] を用いて人間の自律運動系のモデル化を行う. この制御系では、状

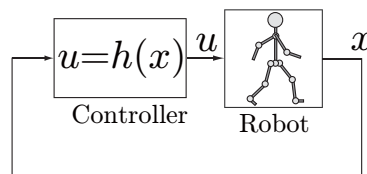


Fig.2 Autonomous control system

態変数を状態空間における特定の軌道に引き込ませるように非線形コントローラを設計するもので、ロボットと非線形コントローラは Fig.2 に示す自律制御系を構成する. (ii) 速度情報まで含んだ仮想的な目標姿勢を擬似目標値として実体化する. この擬似目標値は明示的な運動データに一致するわけではなく、力学的観点から目標とすべき姿勢を表

現している．そのため，暗黙知を形式化したものとみなすことができる．最後に，(iii) 提案手法の効果をタップダンスロボットのシミュレーションを用いて評価を行う．

2. 自律制御系を用いた自律運動のモデル化

2.1 軌道アトラクタに基づいた自律制御系の設計

参考文献 [10] 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，軌道アトラクタを成すコントローラの設計法を簡単に示す．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 の非線形関数を用いて

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

とする．ここで， x はロボットの状態変数， u はロボットへの入力である．このとき，式 (1) のロボットのダイナミクスと式 (2) のコントローラは Fig.2 に表わされる閉ループ系を構成し，これらの連立方程式の解 x が状態空間におけるある閉軌道

$$\Xi = \left[\xi_1 \quad \xi_2 \quad \cdots \quad \xi_N \right], (\xi_{N+1} = \xi_1) \quad (3)$$

に引き込まれるように $h(x)$ を設計する． Ξ が実現可能な運動であるならば，この運動を実現する動力学の入力列もまた存在する．このとき， Ξ は閉ループ系におけるアトラクタとなる．なお，後述のシミュレーションでは式 (2) は x の ℓ 次のべき多項式を用いて

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

として設計する．ここで， $\phi(x)$ は x 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， $x \in \mathcal{R}^2$ ， $\ell = 2$ のとき ϕ は

$$\phi(x) = \left[1 \quad x_1 \quad x_2 \quad x_1^2 \quad x_1 x_2 \quad x_2^2 \right]^T \quad (5)$$

$$x = \left[x_1 \quad x_2 \right]^T \quad (6)$$

となる．このとき Θ は，状態空間内に多数の実現可能な $(x[k], u[k])$ の組を用い，以下の評価関数を最小化することで得られる．

$$\Theta = \arg \min_{\Theta} J_{\Theta} \quad (7)$$

$$J_{\Theta} = \sum_k \|u[k] - \Theta \phi(x[k])\|^2 \quad (8)$$

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，以下の章では，簡単のためにコントローラは $h(x)$ のまま表記する．

2.2 自律運動系のモデル化

アトラクタの設計方法を用いることで Fig.2 に表される自律制御系を獲得し，ロボットは明示的な目標パターンを用いずに自律的に運動を実現する．これは，人間の自律運動の創発をアトラクタを用いた自律制御系のコントローラによりモデル化することを表す．Fig.2 の制御系は明示的な目標運動パターンは必要ないため，コントローラは運動を創発するための情報を内包している．コントローラの式を変形させることで，コントローラの中に内包していると考えられる非明示的な目標パターンを擬似目標値として導出する．

3. 擬似目標値の設計

軌道アトラクタにより運動を創発する制御系の場合には，運動の目標パターンは陽に存在しない．そこで，Fig.2 の自律制御系を線形系と比較をすることで擬似的な目標値を導く方法 [9] を簡単に示す．アトラクタを用いた制御系では $t \rightarrow \infty$ で状態変数 x が Ξ に一致するが，線形制御系を用いても $t \rightarrow \infty$ において $x = \xi$ となるような方法が二つ存在する．Fig.3 に表されるような 2 自由度モデルマッチング制御系 [11] を考える．ただし P は制御対象， P_m^{-1} は

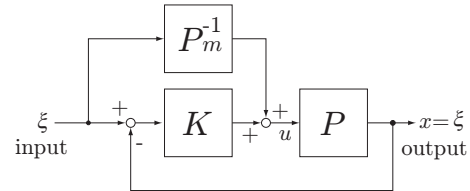


Fig.3 Two DOF model matching control system

P の逆ダイナミックモデル， K は P を安定化するフィードバックコントローラ， u は入力を表す． P と P_m が等しいとき入力から出力までの伝達関数は 1 となり， $k \rightarrow \infty$ において x は ξ に収束する．このときの入力 u は

$$u = P_m^{-1} \xi + K(\xi - x) \quad (9)$$

で表される．

一方，Fig.4 に表される 1 自由度制御系を考えると， x が ξ に一致するような適当な x^{ref} が存在する．ここで K は

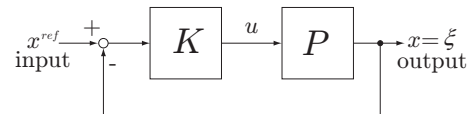


Fig.4 One DOF control system

Fig.3 と同じフィードバックコントローラ， x^{ref} は参照目標パターンを表す．このとき， u は

$$u = K(x^{ref} - x) \quad (10)$$

として表される．

ところで，軌道アトラクタを成すコントローラを用いて制御されているロボットの状態変数 x は， t が十分大きいときに $x \cong \xi$ となる．このとき，式 (2) の入力を $\xi = x + \delta$ として x 周りでテイラー展開し，さらに $\delta \ll 1$ を考えて二次以上の微小量を無視すると，

$$u = h(\xi) - \frac{\partial h(x)}{\partial x} (\xi - x) \quad (11)$$

が得られる．式 (9) と式 (11) を見比べて，右辺の第一項は ξ に関する項，第二項は $\xi - x$ に関する項なので，コントローラ K は

$$K = -\frac{\partial h(x)}{\partial x} \quad (12)$$

とみなすことができる．式 (12) を式 (10) に代入し，式 (2) と式 (10) の入力 u が同じであるとするならば，

$$h(x) = -\frac{\partial h(x)}{\partial x} (x^{ref} - x) \quad (13)$$

が成り立つので、これを x^{ref} について解くと、

$$x^{ref} = - \left(\frac{\partial h(x)}{\partial x} \right)^{\#} h(x) + x + \left(\frac{\partial h(x)}{\partial x} \right)^{\perp} \alpha \quad (14)$$

となる．ここで、 $(\partial h/\partial x)^{\#}$ は Moore-Penrose 型の擬似逆行列、 $(\partial h/\partial x)^{\perp}$ は補空間の基底、 $(\partial h/\partial x)^{\perp} \alpha$ は補空間に属する任意のベクトルである．この x^{ref} が自律系における擬似目標値となる．擬似目標値を用いることで、Fig.2 の自律制御系は Fig.5 として書き表される．この系では、コントローラ $h(x)$ の中に非明示的な目標パターン x^{ref} が現在の状態 x に基づいて決定され、入力は x^{ref} と x の差と非線形フィードバックコントローラにより計算される構造を有する．ただし、 x^{ref} はダイナミクスの観点から仮想的な目標値として得られるため、 x^{ref} は常に ξ に一致するわけではない．

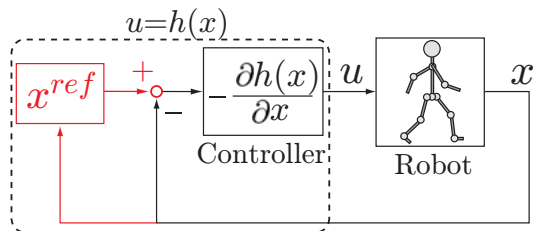


Fig.5 Robot control system using the pseudo-reference

4. タップダンス運動における擬似目標値

4.1 タップダンス運動のモデル化

本章では擬似目標値を Fig.6-(a) のタップダンスロボットに応用する．このロボットは参考文献 [10] において開発されたもので、ダイナミクスモデルを Fig.6-(b) に示す．ロボットは頭部を揺動させることで、接地脚を切り替えながら連続的に運動を継続する．入力はトルク τ 、状態変数 x

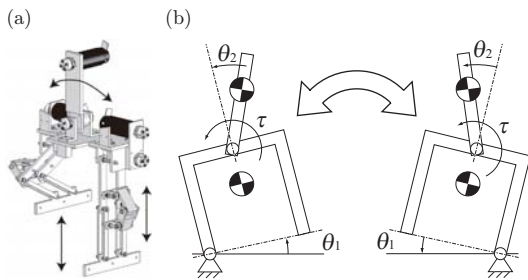


Fig.6 (a) Tap dancing robot [10], and (b) Motion and modeling of tap dancing robot

は胴体部回転角 θ_1 、胴体部回転角速度 $\dot{\theta}_1$ 、上部部回転角 θ_2 、上部部回転角速度 $\dot{\theta}_2$ を用いて、

$$x = \left[\theta_1 \quad \dot{\theta}_1 \quad \theta_2 \quad \dot{\theta}_2 \right]^T \in \mathcal{R}^4 \quad (15)$$

により構成される．また、脚の接地条件は非弾性衝突と仮定し、タップダンスロボットの運動方程式の詳細は参考文献 [10] に詳しい．式 (3) を得るための運動は、頭部へ大き

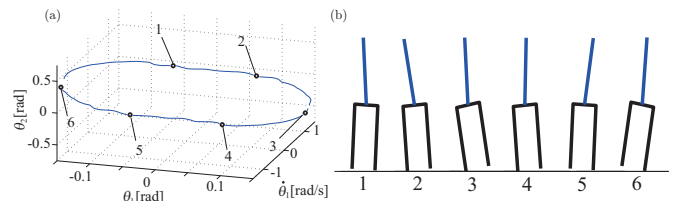


Fig.7 Original motion of the tap dancing robot

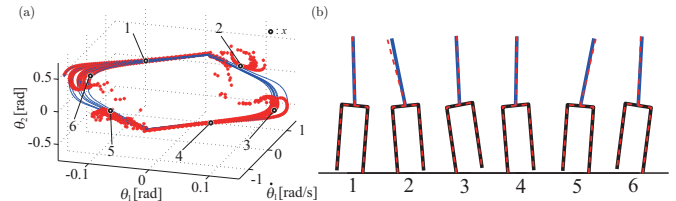


Fig.8 Pseudo-reference of the tap dancing motion

さ A のステップ入力を時間 t で切り替えるようにトルク τ

$$\tau(t) = \begin{cases} K_{\theta_2}(A - \theta_2), & nF \leq t < (n + \frac{1}{2})F \\ K_{\theta_2}(-A - \theta_2), & (n + \frac{1}{2})F \leq t < (n + 1)F \end{cases} \quad (n = 0, 1, 2, \dots) \quad (16)$$

を決定し、ロボットを制御して獲得している．ここで、 K_{θ_2} は PD フィードバックコントローラを表し、 F はタップダンス運動の周波数を与える．これにより、タップダンスロボットは Fig.7 に示すダイナミックなステップ運動を全身を使って実現できる．しかし、胴体部角度 θ_1 は安定化フィードバックに用いていないためにタップダンス運動は不安定であり、実現した運動の中から一周期分を切り取ることで Ξ とした．

4.2 タップダンス運動の擬似目標値

次に、2. 章で示した方法を用いてタップダンス運動を行うコントローラを設計しシミュレーションを行うと共に、その時の擬似目標値を設計した．式 (14) で擬似逆行列を用いているため x^{ref} は補空間分の自由度があるので、以下の評価関数

$$J = \|W(x - x^{ref})\|^2 \quad (17)$$

を最小化するように擬似目標値を決定している．ただし、 x は状態変数、 W は重み行列を表す．これは、ダイナミックな運動中に x^{ref} が大きく変化することを避けるために、 x と x^{ref} の距離を最小化するようにしている．Fig.8-(a) はロボットの状態変数軌道を実線で表記し、そのときの擬似目標値を点で表している．また Fig.8-(a) の軌道上の数字は運動の順番を表し、Fig.8-(b) に対応するロボットの姿勢とそのときの擬似目標値が示す姿勢をそれぞれ実線と点線で描いている．ロボットへの入力はステップで与えられているために、入力が大きく加わる状態と入力が小さい状態が存在する．その結果、軌道の半分においては状態変数軌道と擬似目標値の値が一致し、Fig.5 の制御系からわかるように入力がゼロとなる．それ以外の軌道上では、頭部角度 θ_2 と擬似目標値の頭部角度 θ_2^{ref} に差が生じている．これらの結果から、以下のことが言える．

1. それぞれの脚が接地することでロボットの運動エネルギーが消費され、運動を続けるためにコントローラがエネルギーを与える働きをしている．

2. ロボットが運動を続けるために必要なエネルギーが加わった時点で入力トルクはゼロとなり、その後は身体のダイナミクスに従ってロボットは動き続ける。

よって、制御入力は常に必要ではなく、タップダンス運動を続けるために必要なエネルギーの注入タイミングが重要となり、擬似目標値はそのタイミングと大きさを与えている。

4.3 擬似目標値を用いたロボット制御

運動伝達の可能性を評価するために、Fig.9 に示すフィードバックシステムに基づいてタップダンスロボットを制御した。このシステムは Fig.5 と同じ非線形フィードバックコントローラを用いているが、 x^{ref} として与える擬似目標値はオンラインで計算されるものではなく、Fig.8 であらかじめ獲得されたものである。これは、 x^{ref} が他のロボットへの非明示的な目標パターンの実体化であるとして、ロボットは与えられた x^{ref} に基づいて運動を実現する。Fig.10 に運動の結果を示す。このシミュレーションでは、Fig.8 で得られた擬似目標値のうち1周期分を切り取り、 x^{ref} として繰り返し与えている。ところが、運動の周期は一定でないために x^{ref} を繰り返し与えるだけでは位相が徐々にずれて運動が継続できなくなる。ここでは入力トルクがゼロとなる軌道上の点を利用し、1周期毎に x との差が最も小さくなる擬似目標値の点へ x^{ref} が移動するようにリセットをした。その結果、タップダンスロボットは元々の動きを連続的に実現することができ、非明示的な目標パターンの実体化として擬似目標値を用いることは運動伝達のために有効であることが示された。しかし、Fig.10 で得られた状態変数軌道はステップ入力が入るタイミングにおいて Fig.8 の軌道と少し異なる。これは、

1. Fig.9 のフィードバックコントローラは常に常に安定化しているわけではなく、式 (2) の多項式の次数が高いためにフィードバックゲインも非常に高くなっている。
2. 高いゲインのコントローラは状態変数の違いにセンシティブであり、なおかつ衝撃が加わる脚の接地現象は非線形性が強いいため、接地のタイミングはシミュレーションのサンプリングタイムにより変わってしまう。

これらは式 (2) のコントローラにおける多項式の次数を最適化することで解決することができると考えられ、コントローラと擬似目標値を連立して設計することが必要となる。

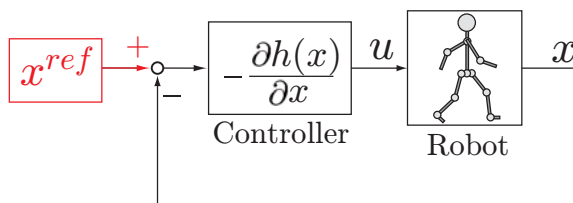


Fig.9 Robot control system with the explicit reference obtained from the pseudo-reference

5. おわりに

本研究では、自律運動系をアトラクタを用いた自律制御系を用いてモデル化を行い、運動伝達のための非明示的な目標パターンの実体化として擬似目標値を導入した。ここで得られた結果を以下に示す。

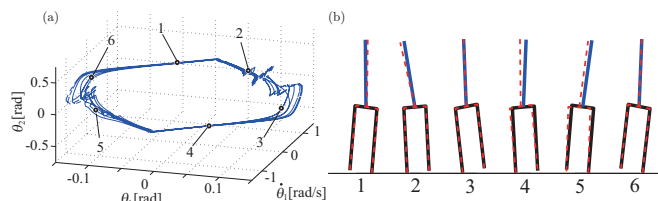


Fig.10 Robot control simulation of the tap dancing robot with the explicit pseudo-reference

1. 擬似目標値をタップダンスロボットのステップ運動を用いて評価を行った。シミュレーションの結果から、運動を継続するためにエネルギーを加えるタイミングが重要であり、擬似目標値はこれを姿勢によって与えることを示した。
2. 擬似目標値を明示的な目標パターンとして用いることで、ロボットは同じ運動を再現することができ、擬似目標値を用いた運動伝達ができることを示した。これは暗黙知を明文化できていると考えられる。

謝辞

本研究は、科学技術振興機構 CREST「パラサイトヒューマンネットによる五感情報通信と環境センシング・行動誘導」の支援を受けた。

文献

- [1] マイケル・ボランニー, 訳:高橋勇夫. 暗黙知の次元. 筑摩書房, 2003.
- [2] 野中, 竹中, 訳:梅本. 知識創造企業. 東洋経済新報社, 1996.
- [3] T.Hasegawa, T.Suehiro, and K.Takase. A model-based manipulation system with skill-based execution. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 8, No. 5, pp. 535–544, October 1992.
- [4] R.Cortesa, R.Koeppel, U.Nunes, and G.Hirzinger. Data fusion for robotic assembly tasks based on human skills. *IEEE Transactions on Robotics*, Vol. 20, No. 6, pp. 941–952, December 2004.
- [5] K.Hirana, T.Nozaki, T.Suzuki, S.Okuma, K.Itabashi, and F.Fujiwara. Quantitative evaluation for skill controller based on comparison with human demonstration. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, Vol. 12, No. 4, pp. 609–619, July 2004.
- [6] G.S.Dordevic, M.Rasic, D.Kostic, and V.Potkonjak. Representation of robot motion control skill. *IEEE TRANSACTIONS ON SYSTEMS, MAN, AND CYBERNETICS - PART C*, Vol. 30, No. 2, pp. 219–238, May 2000.
- [7] Y.Kuniyoshi, Y.Ohmura, K.Terada, A.Nagakubo, S.Eitoku, and T.Yamamoto. Embodied basis of invariant features in execution and perception of whole body dynamic actions — knacks and focuses of roll-and-rise motion. *Robotics and Autonomous Systems*, Vol. 48, No. 4, pp. 189–201, 2004.
- [8] Y. Kawamura and Y. Sankai. Humanoid control method based on human knack for human care service. In *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics 2002(SMC'02)*, pp. TP1B4(CD-ROM), 2002.
- [9] 渡辺, 岡田. 軌道アトラクタに基づく運動の分節化のための仮想目標値. 第 27 回日本ロボット学会学術講演会 (RSJ 27th), pp. 1L3–03(CD-ROM), 2009.
- [10] M. Okada and K. Murakami. Robot communication principal by motion synchronization using orbit attractor. In *Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA'07)*, pp. 2564–2569(CD-ROM), 2007.
- [11] T.Sugie and T.Yoshikawa. General solution of robust tracking problem in two-degree-of-freedom control system. *IEEE Transaction on Automatic Control*, Vol. AC-31, No. 6, pp. 552–554, June 1986.