

自律制御系設計のための動力的運動変換

岡田 昌史^{*1}, 宮崎 哲郎^{*1}

Dynamical Motion Transformation for Autonomous Control Design

Masafumi OKADA^{*1} and Tetsuro MIYAZAKI^{*1}^{*1} Dept. of Mechanical Sciences and Engineering, Tokyo Institute of Technology
2-12-1 Ookayama Meguro-ku Tokyo 152-8552, JAPAN

A robot control system requires a feedback controller and reference motion pattern. However, because of the phase lag of the closed loop system, the generated motion does not coincide to the reference pattern. Moreover, the reference pattern has time-constraint. Because of these reasons, the robustness of the motion will be low. On the other hand, the autonomous controlled system based on an orbit attractor overcomes these problems, however, it requires a realizable motion pattern that satisfies dynamical consistency. In this report, we introduce a motion transformation method to obtain the realizable motion pattern. The relationships between joint angles, angular velocities and accelerations are represented by a product of a matrix, and the motion capture data is transformed to the robot motion.

Key Words : Autonomous Controlled System, Motion Capture Data, Motion Transformation

1. はじめに

ロボットの制御では、一般に図1にあるように安定化されたフィードバック系に対して外部より目標姿勢 r (関節角度データなど)を与え運動を生成させる。しかし、この場合 (a) ロボットの安定性は全てフィードバックコン

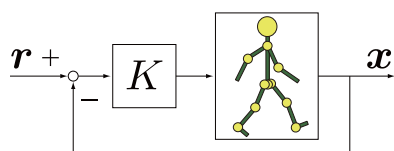


Fig. 1 Feedback system for robot motion generation

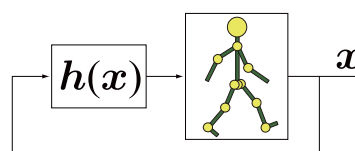


Fig. 2 Autonomous controlled system

トローラ K に依存し、ロボットの非線形性から K が設計にくい。また、(b) 目標姿勢 r は時間の関数であるため、生成される運動が時間の拘束を持つ。さらに、(c) フィードバック系の遅れから目標通りの運動は生成されない。(b) のため、例えば外乱により運動が乱れた場合でも目標姿勢は時間に従って先に進むため、ロボットは無理な動きをする。(c) を解決するためにハイゲインフィードバックが仮定されるが、これはフィードバック系のロバスト性を著しく低下させるうえ、(a) の理由からそのようなコントローラの設計は容易ではない。これに対し、我々はこれまでに図2にあるような自律制御系の設計法を提案してきた⁽¹⁾⁽²⁾。これはロボットの周期的な運動がその状態空間内で1つの閉軌道を描くことに着目し、状態変数 x を所望の運動 Ξ に引き込むような非線形コントローラ $h(x)$ を設計するものである。このとき、所望の運動 Ξ は状態空間内でのアトラクタとなり、ロボットは外部からの信号を必要とせずに運動を生成する。外部からの信号を必要としないことから運動は時間の拘束を持たない。え、 Ξ がアトラクタとなることから閉ループ系は安定となる。非線形力学系の引き込みを利用してロボットの運動

^{*1} 正員, 東京工業大学 大学院理工学研究科 機械物理工学専攻 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1)

Email: okada@mep.titech.ac.jp

制御を行う方法として、神経振動子の引き込みを利用した方法が従来より数多く報告されてきた^{(3)~(5)}。これらは幅を持った固有振動数を持つ非線形振動子の結合から生まれる引き込み現象を利用して、ロボットの運動パターンを生成するものであるが、既存の力学系を利用するため結合の設計論が導きにくい。これに対し、我々の方法は非線形振動子も含めて設計を行うものである。

一方、ロボットは Ξ の運動を実現することから、 Ξ は実現可能な軌道であること、すなわち、角度、角加速度、角加速度の微分関係が成り立ち、さらに、 Ξ を実現する入力が存在することが必要である。特に、系が非ホロノミック系である場合には、関節角度は非ホロノミックな拘束を満たさなければならないため独立に選べない。簡易な系の簡単な運動であれば Ξ は比較的容易に得られるが、一般にこれは困難である場合が多い。ヒューマノイドロボットのような多自由度系の運動を得る方法としてモーションキャプチャデータが用いられる。しかし、人間とロボットの力学特性は異なるため、得られたデータをそのままロボットに用いることは困難であり、これを変換する方法がいくつか提案されてきた。Pollardらは⁽⁶⁾運動学の観点から可動範囲、関節角速度の制約を入れた変換方法を、Yamaneらは⁽⁷⁾力学的な拘束を満たすようロボットをモーションキャプチャデータに追従させる Dynamics Filter を提案した。一方、Suleimanらは⁽⁸⁾基底関数を設定し、関節角度の軌道がその線形和で表されるとして係数の最適化を行った。この方法では、角度、角速度、角加速度の微分関係が満たされた運動が容易に得られ、しかも、最適化パラメータは少ないが、関節角軌道が基底関数によって制約を受けることもあり激しく変化する動きが得られにくい。これに対し、我々はモーションキャプチャデータを初期値とし、これをロボットの実現可能なデータに変換する方法を提案してきた⁽⁹⁾。この方法の特徴は、信号の微分関係を微分フィルタのインパルス応答のたたみ込み積分によって表している点にあり、任意の関節角度軌道を得ることができることにある。

本報告では、軌道アトラクタに基づいた自律制御系の設計法を紹介し、その問題点を指摘する。また、これを解決する方法の紹介を行う。

2. 自律制御系の設計法

2.1 設計法

本章では、参考文献⁽²⁾に基づいて自律制御系の設計法を紹介する。ロボットの運動方程式が

$$x[k+1] = f(x[k]) + g(x[k])u[k] \quad (1)$$

の離散時間状態方程式で表されるとし、状態変数 x が所望の周期的な運動 Ξ

$$\Xi = [\xi_1 \ \xi_2 \ \dots \ \xi_N] \quad (\xi_{N+1} = \xi_1) \quad (2)$$

に引き込まれるよう、図2のコントローラ

$$u[k] = h(x[k]) \quad (3)$$

を設計する問題を考える。ただし、 Ξ は実現可能、すなわち、 ξ は角度、角速度の微分関係を満たし、 Ξ を実現する入力列 u が存在することを仮定する。コントローラの設計法は参考文献⁽²⁾に詳しいため、ここでは概要のみを述べる。図3にあるように、状態空間内で ξ_k の近傍に x_s を設定し、 Ξ に沿ってこれに収束する軌道を求めて各

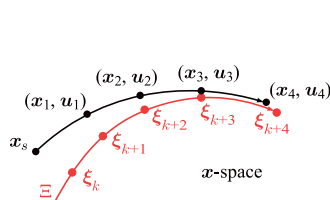


Fig. 3 Definition of the trajectory

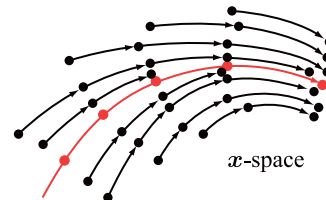


Fig. 4 Vector field

点における x と u の組を求める。多くの x_s を設定することで図4に表されるベクトル場が得られ、多くの x と u の組が得られるので、関数近似によって式(3)のコントローラが得られる。

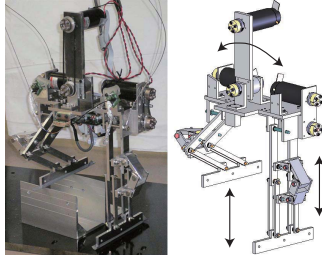


Fig. 5 Tap dancing robot

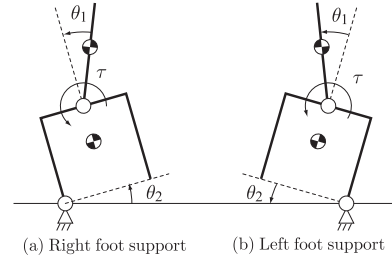


Fig. 6 Dynamical model of the robot

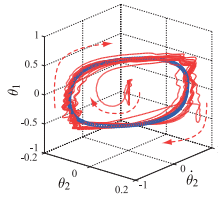
2.2 タップダンスロボットの運動制御

前節の方法を利用してロボットの運動を生成する．ここでは，図5に表されるタップダンスロボットを対象とする．このロボットは頭部を左右に振りながら，足踏み動作を行うものである．このロボットの状態を，右足接地時，左足接地時に分け，頭部の傾き θ_1 ，胴体の傾き θ_2 を図6のように定義すると，状態変数 x

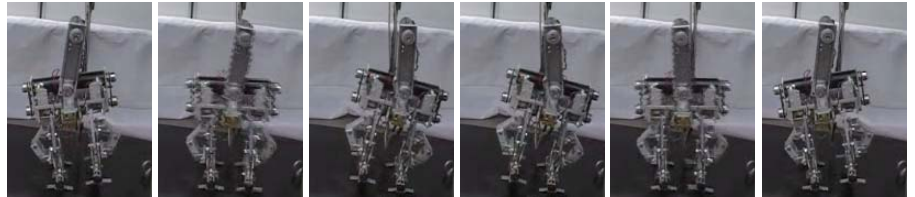
$$x = [\theta_1 \ \theta_2 \ \dot{\theta}_1 \ \dot{\theta}_2]^T \quad (4)$$

は運動中で連続な値をとる．また，入力は頭部と胴体部の関節に発生するトルク τ であり，脚部と地面との設置がフリーな関節であるため，ロボットは非ホロノミックな系である．まず，トルク τ に正弦波入力を与えて頭部を振らせたところ，このロボットは足踏み動作を行った．ただし，安定化制御を行っていないため運動は不安定であるが，数回の足踏みが可能であったため，このデータを三とした．なお，この三はロボットが実現した運動であるため実現可能な運動である．

得られた三に基づいてコントローラ的设计を行った．この結果生成された運動を図7に示す．(a)は状態変数の



(a) Trajectory in the state space



(b) Motion of the robot

Fig. 7 Motion of the tap dancing robot

動きを θ_1 ， θ_2 ， $\dot{\theta}_2$ の3次元での状態空間内で表したものである．青は三，赤は x の軌道を表しており，原点から出発した x が三へと引き込まれ，(b)にある運動を実現している．

3. モーションキャプチャデータに基づいた運動の変換

3.1 力学的拘束を満たす運動の獲得

2.2節で示した運動では，三を獲得するために実際にロボットを動かした．しかも，ロボットは安定化されていない状態で動かしたものであるため，左右対称な運動しか得られなかった．足踏みの周波数を変えることは可能であったが，左右非対称となるような運動は得られにくい．これは，タップダンスロボットが非ホロノミック系であり， θ_1 と θ_2 が独立に設定できないことに大きな要因がある．このような系の運動を容易に得る方法としてモーションキャプチャがある．人間がロボットと同様の動きをすることで，容易に運動データが得られる．しかし，人間とロボットの力学特性は大きく異なるため，得られたデータはロボットに実現可能ではない可能性が高く，そのままロボットに用いることはできない．そこで，データをロボットが実現可能なものへと変換することを考える．問題設定

モーションキャプチャデータを次式の運動方程式で表されたロボット

$$M(\theta)\ddot{\theta} + C(\theta, \dot{\theta}) + K(\theta) = \tau \quad (5)$$

の力学的に実現可能なデータ

$$\Theta = [\theta_1 \ \theta_2 \ \dots \ \theta_N], \quad \dot{\Theta} = [\dot{\theta}_1 \ \dot{\theta}_2 \ \dots \ \dot{\theta}_N], \quad \ddot{\Theta} = [\ddot{\theta}_1 \ \ddot{\theta}_2 \ \dots \ \ddot{\theta}_N], \quad T = [\tau_1 \ \tau_2 \ \dots \ \tau_N] \quad (6)$$

へ変換することを考える．ただし， Θ は関節角度の時系列データ， $\dot{\Theta}$ ， $\ddot{\Theta}$ はその 1 階，2 階微分値， T は入力の時系列データであり，以下の条件を満たす．

- (i) 運動の条件 運動の条件は，運動の変換前後で人間とロボットの運動がともに満たす条件であり，運動の特性を定める．これは実現する運動によって異なり，例えば，タップダンスロボットであれば，人間とロボットの運動中の接地足の時間変化が同一であることとする．
- (ii) 運動方程式を満たす 得られる θ_k ， $\dot{\theta}_k$ ， $\ddot{\theta}_k$ ， τ_k は式 (5) を満たす．これは非線形方程式で表された拘束条件であるため厳密解が得られにくいことから，評価関数 J を次式で設定し，これを最小化することとする．

$$J = \sum_{k=1}^N \left\| \ddot{\theta}_k - \ddot{\theta}_k \right\|^2, \quad \ddot{\theta}_k = M^{-1}(\theta_k) \left\{ \tau_k - C(\theta_k, \dot{\theta}_k) - K(\theta_k) \right\} \quad (7)$$

- (iii) 入力の制限 ロボットが生成可能な入力を求め，これを用いて次式の拘束条件を与える．

$$\tau_{min} \leq \tau_{ki} \leq \tau_{max} \quad (8)$$

ただし， τ_{ki} は τ_k の i 要素を意味する．

タップダンスロボットの場合，条件 (i) についてはある時刻 k において，右足接地状態の運動方程式を用いるのか，左脚接地状態の運動方程式を用いるのかによって人間とロボットの接地状態を共通にすることができる．条件 (ii) については，評価関数 J の θ_k ， τ_k に関する勾配を求め，

$$\theta_k \leftarrow \theta_k - \frac{dJ}{d\theta_k} \delta, \quad \tau_k \leftarrow \tau_k - \frac{dJ}{d\tau_k} \delta \quad (9)$$

のように，全ての時刻の θ_k ， τ_k について繰り返し計算することで Θ ， T を求める．条件 (iii) については，不等式拘束条件であるため，式 (9) において τ_{ki} が上限・下限に近づいた場合に，そこから離れるような δ_τ を与えて条件を満たすようにする．

さて， Θ は一連の動きであることから， θ を変化させれば $\dot{\theta}$ ， $\ddot{\theta}$ も変化する．すなわち，式 (9) において

$$\frac{dJ}{d\theta_k} = \frac{\partial J}{\partial \theta_k} + \sum_{j=1}^N \frac{\partial J}{\partial \dot{\theta}_j} \frac{\partial \dot{\theta}_j}{\partial \theta_k} + \sum_{j=1}^N \frac{\partial J}{\partial \ddot{\theta}_j} \frac{\partial \ddot{\theta}_j}{\partial \theta_k} \quad (10)$$

が成り立つ．そのため， $\dot{\theta}$ ， $\ddot{\theta}$ と θ の関連づけを行い， $\partial \dot{\theta}_j / \partial \theta_k$ ， $\partial \ddot{\theta}_j / \partial \theta_k$ を求めなければならない．そこで，微分作用をローパスフィルタ，微分器，零位相フィルタによって実現することを考える．次式の伝達関数を考える．

$$F_1(s) = \frac{sf}{s+f} \quad (11)$$

これは交差周波数が f のローパスフィルタと微分器で構成されており，擬似微分である．この伝達関数のインパルス応答列を

$$\mathbf{g} = [g_1 \ g_2 \ \dots \ g_N] \quad (12)$$

とすると， $\dot{\Theta}$ は Θ が周期的なデータであることを利用して

$$\dot{\Theta} \simeq \Theta G_1, \quad G_1 = \begin{bmatrix} g_1 & g_2 & \dots & g_N \\ g_N & g_1 & \dots & g_{N-1} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ g_2 & g_3 & \dots & g_1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

で近似できる．なお，式 (13) は信号とインパルス応答のたたみ込み積分に相当する．しかし，ここで求めた $\dot{\Theta}$ はローパスフィルタによる時間遅れを生じる．そこで，零位相フィルタを用いてこれを解消する．零位相フィルタ

とは、フィルタを施したデータの時間的な順序を入れ替え、もう一度同じフィルタを施し、さらに順序を入れ替えることで位相遅れを相殺させるフィルタである。これにより、 $\dot{\theta}$ は次式で表せる。

$$\dot{\theta} \simeq \Theta G_1 L G_0 L, \quad L = \begin{bmatrix} 0 & \cdots & 1 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & \cdots & 0 \end{bmatrix} \quad (14)$$

L は順序を並びかえる行列で、 G_0 は式 (13) と同様に $f/(s+f)$ で表される伝達関数のインパルス応答列から構成される行列である。さらに、 $\ddot{\theta}$ は

$$\ddot{\theta} \simeq -\Theta G_1 L G_1 L \quad (15)$$

と表される。これらを用いることで、 $\partial \dot{\theta}_j / \partial \theta_k$, $\partial \ddot{\theta}_j / \partial \theta_k$ が定義できる。

3.2 運動の変換

3.1 節の方法を用いて、人間のモーションキャプチャデータをタップダンスロボットの実現可能な運動へと変換し、さらに、自律制御系を設計することで運動の生成を行う。図 8 のように人間にマーカを設置し左右の足踏み動作を行った様子をモーションキャプチャした。人間をタップダンスロボットと同じ 2 リンク系と見なし、 θ_1, θ_2

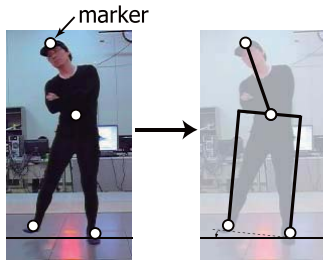


Fig. 8 Motion capture of the human motion

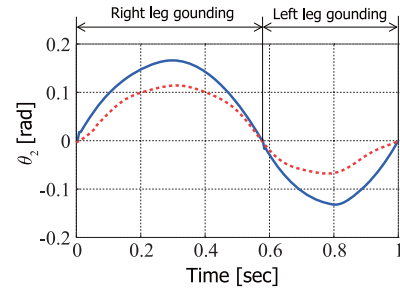


Fig. 9 Captured data and obtained data

を求めたところ、これは図 9 の青色実線のようになった。右足接地時間と左脚接地時間の異なる、左右非対称な運動である。この運動に $\|\tau\| \leq 1.5$ の制約を設定し、提案する手法を適用したところ、図 9 の赤色鎖線の結果を得た。運動の条件、すなわち、接地足の一致が満たされている。また、このときの $\ddot{\theta}_1, \ddot{\theta}_2$ のデータを図 10 に、得

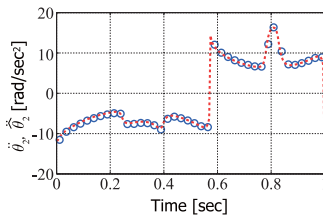


Fig. 10 Comparison between $\ddot{\theta}_1$ and $\ddot{\theta}_2$

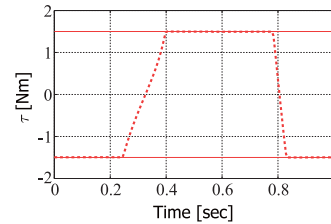


Fig. 11 Obtained torque

られた τ のデータを図 11 に示す。図 10 から運動方程式が満たされていることが分かる。また、図 11 から入力力の制限が満たされていることが分かる。これらの結果から、変換された運動はタップダンスロボットに実現可能であると言える。

ここで得た運動を Ξ として自律制御系の設計を行った。このときのロボットの運動を図 12 に示す。ロボットによってこの運動が実現できたことから、得られた左右非対称な運動は実現可能であることが分かる。また、比較としてモーションキャプチャデータを変換せずに Ξ として自律制御系の設計を行った。このときの結果を図 13 に示す。本来、データが実現可能ではなく、これに引き込ませるような制御系は設計できなかった。これより、運動を変換する提案手法の有効性が理解できる。

4. おわりに

本報告では、自律制御系の設計のために必要なロボットの実現可能な運動を、モーションキャプチャデータに基づいて獲得する方法について述べた。

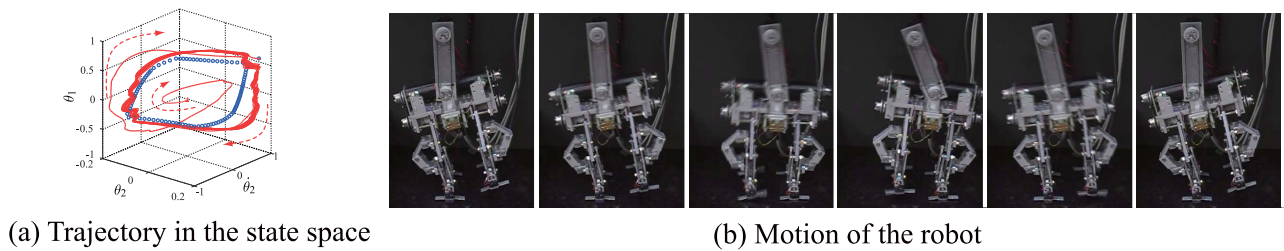


Fig. 12 Motion of the tap dancing robot using the transformed motion

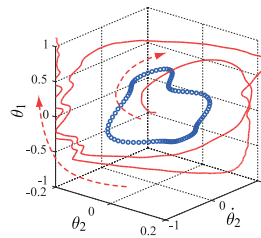


Fig. 13 Motion of the tap dancing robot using motion capture data

1. 従来の自律制御系設計法を紹介し、そのためには実現可能な運動が先に得られている必要があること、また、これが得にくいことをタップダンスロボットを例にして示した。
2. 実現可能な運動を得るために、モーションキャプチャデータを変換する方法を示した。ここでは、運動方程式を満たすことを等式の条件として表し、角度、角速度、角加速度の微分関係を行列のかけ算として表し、入力制限を不等式の条件として与えた。
3. これらを用いて、運動の変換を行うことで、実現可能な運動が得られることをタップダンスロボットを用いて示した。

文 献

- (1) Okada M., Tatani K. and Nakamura Y., “Polynomial Design of the Nonlinear Dynamics for the Brain-Like Information Processing of Whole Body Motion”, *Proc. of the 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, (2002), pp.1410–1415.
- (2) 岡田昌史, 村上健治, “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, (2007), pp.545–553.
- (3) 琴坂信哉, Schaal S., “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, (2001), pp.116–123.
- (4) Ijspeert A.J., Nakanishi J. and Schaal S., “Movement Imitation with Nonlinear Dynamical Systems in Humanoid Robots”, *Proc. of the 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, (2002), pp.1398–1403.
- (5) 清水正宏, 川勝年洋, 石黒章夫, “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*, (2006), 1A1-D05(CD-ROM).
- (6) Pollard N.S., Hodgins J.K., Riley M.J., and Atkeson C.G., “Adapting human motion for the control of a humanoid robot”, *Proc. of the 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, (2002), pp.1390–1397.
- (7) Yamane K., and Nakamura Y., Dynamics filter – Concept and Implementation of On-line Motion Generator for Human Figures –, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol.19, No. 3, (2003), pp.421–432.
- (8) Suleiman W., Yoshida E., Kanehiro F., Laumond J.P. and Monin A., On Human Motion Imitation by Humanoid Robot, *Proc. of the 2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, (2008), pp.2697–2704.
- (9) 宮寄哲郎, 岡田昌史, “位置・速度・加速度の微分関係と力学的整合性を満たす運動パターンの生成”, 第 13 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, (2012), 2N3-5(CD-ROM).