

力学的整合性を満たす運動パターンの獲得

○宮寄哲郎 岡田昌史 (東京工業大)

1. はじめに

ヒューマノイドなどの多自由度系の運動を生成する場合、目標運動を設計するために人間のモーションキャプチャデータを用いることが有効である。ただし、人間とロボットの力学特性は異なるため、人間の運動をロボットの運動へと変換する研究が多くなされている。Dariushら [1] は、運動中にリンクの干渉を検出し、これを回避する運動をオンラインで生成する方法を提案した。Ijspeertら [2] は人間の運動を非線形力学系に記憶させ、衝突などにより運動が停止した場合でも、その後に運動を継続可能とするコントロールポリシーを提案した。Pollardら [3] はロボットの関節配置に基づいて、可動範囲、関節角速度などの制限を満たすよう、人間のデータを変換する方法を提案した。これらの方法は運動学に基づいた方法である。一方、中岡ら [4] は、動力学に基づいて舞踊をロボットの運動へ変換した。この方法は上半身では舞踊動作、下半身では安定化のように役割を分けており、ロボットの下半身動作は人間の運動とは独立に生成される。Yamaneら [5] は人間のデータをアニメーションキャラクターの力学的整合性を満たす運動へ変換するための Dynamics filter を提案した。ここでの力学的整合性の満足とは、力学的拘束下で運動を実現する入力が存在することである。また、Tsaiら [6] は人間のデータから見た目に自然なアニメーションを生成する方法を提案した。これらの方法では、動力学を考慮することでリアリティの高いアニメーションを生成するものであるが、ロボットで得られた運動を生成するためには実現できない大きなトルクが要求される場合も考えられる。また、参考文献 [7][8] は人間の運動からロボットの全身運動をオンラインで生成する方法であるが、現在の時間ステップの情報を用いて逐次運動を変換するため、一連の運動全体が安定とならない場合がある。一方、著者ら [9] は人間の運動データをロボットの力学的整合性を満たす運動へと変換する非線形状態空間写像を得る方法を提案した。この方法は状態空間内の場を写像することで、運動パターンとともに運動の安定性も同時に変換することを目的としていたが、ロボットの状態変数が増えると写像の計算量が膨大となる。

そこで本研究では、ロボットの運動パターンを得ることを目的とし、人間の運動データをロボットの力学的整合性を満たす運動へと変換する方法を提案する。ここではロボットの周期運動を対象とし、一周期における一般化座標、速度、加速度、入力を設計パラメータとし、これらが力学的整合性に関する条件、速度・加速度の微分関係、運動の一致の条件を満足するように最適化する。特に、入力の大きさの制限も加え、ロボットで実現可能な運動を求める。提案する方法で得られる運動パターンが力学的整合性を満足することを確認す

るために、軌道アトラクタに基づいた自律系 [10] を設計する。自律系の設計には力学的整合性を満たす運動パターンと入力が必要であるため、与えた運動パターンに近い運動が自律系によって生成されれば、運動パターンは力学的整合性を満足しているといえる。提案する方法をタップダンスロボットの運動生成に適用し、手法の有効性を示す。

2. 運動の変換

2.1 問題の設定

モーションキャプチャで計測して得られた人間の運動データを元に、ある力学系の運動方程式

$$M(\mathbf{x})\ddot{\mathbf{x}} = C(\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}}) + B\mathbf{u} \quad (1)$$

に対して、力学的整合性を満たす

$$X = \begin{bmatrix} \mathbf{x}_1 & \mathbf{x}_2 & \cdots & \mathbf{x}_k & \cdots & \mathbf{x}_n \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$U = \begin{bmatrix} \mathbf{u}_1 & \mathbf{u}_2 & \cdots & \mathbf{u}_k & \cdots & \mathbf{u}_n \end{bmatrix} \quad (3)$$

および \dot{X} , \ddot{X} を求める問題を考える。ただし、 \mathbf{x} は一般化座標、 $\dot{\mathbf{x}}$, $\ddot{\mathbf{x}}$ はその速度、加速度、 \mathbf{u} は入力、 M は慣性行列、 C はコリオリ力・遠心力・重力、 B は入力の係数を表す。 X は周期運動の軌道とし、 $\mathbf{x}_{n+1} = \mathbf{x}_1$, $\mathbf{u}_{n+1} = \mathbf{u}_1$ とする。

2.2 運動データの満たすべき条件

運動データの満たすべき条件を挙げ、これらを満たす運動データを求めるために条件ごとに評価関数を設定し、これらの総和を最小化することで運動の変換を行う。満たすべき条件として、以下の (a) 力学的整合性に関する条件、(b) 速度・加速度の微分関係、(c) 運動の一致の条件、(d) 入力の大きさの制限を考える。

(a) 力学的整合性に関する条件

X , \dot{X} , \ddot{X} , U は力学的整合性を満たすために、式 (1) を満たす必要がある。そこで評価関数 J_1 を

$$J_1 = \sum_{k=1}^n \mathbf{d}_k^T \mathbf{d}_k \quad (4)$$

$$\mathbf{d}_k = \ddot{\mathbf{x}}_k - \ddot{\hat{\mathbf{x}}}_k \quad (5)$$

$$\ddot{\hat{\mathbf{x}}}_k = M(\mathbf{x}_k)^{-1}(C(\mathbf{x}_k, \dot{\hat{\mathbf{x}}}_k) + B\mathbf{u}_k) \quad (6)$$

$$\ddot{\hat{X}} = \begin{bmatrix} \ddot{\hat{\mathbf{x}}}_1 & \ddot{\hat{\mathbf{x}}}_2 & \cdots & \ddot{\hat{\mathbf{x}}}_k & \cdots & \ddot{\hat{\mathbf{x}}}_n \end{bmatrix} \quad (7)$$

とし、これを最小化する。

(b) 速度・加速度の微分関係

X , \dot{X} , \ddot{X} の間には微分関係が成り立つ. ここで伝達関数

$$G(s) = \frac{sf}{s+f} \quad (8)$$

を考える. G は公差周波数 f のローパスフィルタと微分器を持つため, \mathbf{x} と $\dot{\mathbf{x}}$ の間には

$$\dot{\mathbf{x}} \simeq G(s)\mathbf{x} \quad (9)$$

が成り立つ. 一方, G のインパルス応答列

$$\mathbf{g} = [g_1 \quad g_2 \quad \cdots \quad g_n] \quad (10)$$

から以下の行列

$$F = \begin{bmatrix} g_1 & g_2 & \cdots & g_n \\ g_n & g_1 & \cdots & g_{n-1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ g_2 & g_3 & \cdots & g_1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

を定義すると, X は周期運動の軌道であるため

$$\dot{X} \simeq XF \quad (12)$$

の関係が成り立つ. これは信号とインパルス応答のたたみ込み積分に相当する. これより, X と \dot{X} , \dot{X} と \ddot{X} の間には

$$\dot{X} = XF, \quad \ddot{X} = \dot{X}F \quad (13)$$

が満たされるように, 評価関数 J_2, J_3 を

$$J_2 = \sum_{k=1}^n \mathbf{v}_k^T \mathbf{v}_k, \quad J_3 = \sum_{k=1}^n \mathbf{a}_k^T \mathbf{a}_k \quad (14)$$

$$\mathbf{v}_k = \dot{\mathbf{x}}_k - XF_k \quad (15)$$

$$\mathbf{a}_k = \ddot{\mathbf{x}}_k - \dot{X}F_k \quad (16)$$

とし, これらを最小化する.

(c) 運動の一致の条件

所望の運動を得るために, ロボットの運動に条件を与える. ただし, 与える条件は実現したい運動によって異なる. 例えば, ロボットの歩行運動を生成したい場合, 人間とロボットの運動一周期で接地脚を共通とする条件を与えれば, ロボットの歩行運動が得られる. なお, 具体例については3-3章で示す. この条件の評価関数を J_4 とする.

(d) 入力の大さきの制限

ロボットの運動を生成するとき, ロボットのアクチュエータによって発生可能な力・トルクには上限がある. そこで, 入力列 U の上限(下限)値をアクチュエータの発生可能な範囲に収めるために

$$U_{ij} \leftarrow U_{ij} - K_u |U_{ij} - U_i^{max}| \quad (U_{ij} > U_i^{max}) \quad (17)$$

$$U_{ij} \leftarrow U_{ij} + K_u |U_{ij} - U_i^{min}| \quad (U_{ij} < U_i^{min}) \quad (18)$$

の制限を加える. ただし, U_{ij} は U の i 行 j 列, K_u はゲイン, U_i^{max} , U_i^{min} は U の i 行目の上限値, 下限値を表す.

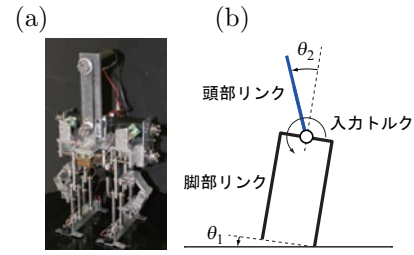


図1 タップダンスロボットと力学モデル

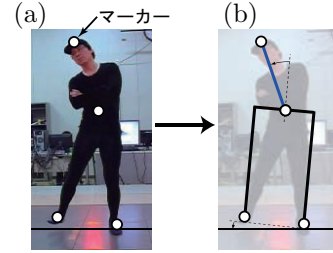


図2 モーションキャプチャにおけるマーカー位置と人間のモデル

2.3 運動データの最適化

条件 (a), (b), (c)をまとめた以下の評価関数 J

$$J = w_1 J_1 + w_2 J_2 + w_3 J_3 + w_4 J_4 \quad (19)$$

を設定し, これを最小化する. ただし, w_i ($i = 1, 2, 3, 4$)は重み係数である. X, \dot{X}, \ddot{X}, U の i 行 j 列要素 $X_{ij}, \dot{X}_{ij}, \ddot{X}_{ij}, U_{ij}$ での J の勾配 $\frac{\partial J}{\partial X_{ij}}, \frac{\partial J}{\partial \dot{X}_{ij}}, \frac{\partial J}{\partial \ddot{X}_{ij}}, \frac{\partial J}{\partial U_{ij}}$ を用い, 勾配法によって評価関数を最小化する. ただし, 最適化の途中で U_{ij} が入力の制限値を超える場合, 条件 (d)の式 (17), (18)を用いて U_{ij} を修正する.

3. タップダンスロボットへの適用

3.1 タップダンスロボット

人間の運動をタップダンスロボットの運動に変換する. タップダンスロボットを図1-(a)に示す [10]. このロボットは頭部リンクを振り, その慣性力を利用して脚部リンクを左右交互に接地させて足踏み運動を行うものであり, 図1-(b)のように頭部リンクと脚部リンクの2リンク系でモデル化する. ロボットの角度データ \mathbf{x} は

$$\mathbf{x} = [\theta_1 \quad \theta_2]^T \quad (20)$$

のように脚部リンク, 頭部リンクの回転角 θ_1, θ_2 [rad]で構成され, 入力 u [Nm]は頭部リンクと脚部リンクをつなぐ関節に発生するトルクである. ロボットの足首は受動関節であり, 運動にノンホロノミックな拘束を与えるため, 運動中のロボットの角度データの軌道は自由に選べない. また, 右脚接地状態と左脚接地状態に分けて運動方程式を求めるが, 運動中 θ_1, θ_2 は連続となる.

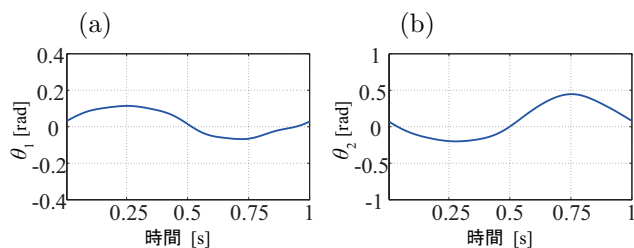


図3 人間の角度データ

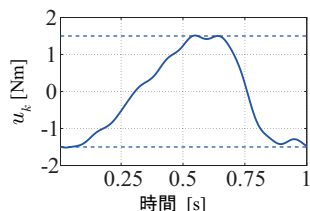


図4 ロボットの入力列

3.2 人間の運動の計測

ロボットの所望の運動を得るために、人間をタップダンスロボットと同じ2リンク系でモデル化する。人間は上体を振って左右の足を交互に接地させる足踏み運動を行い、光学式モーションキャプチャシステムを使用してこの運動を計測する。図2に示すように四つのマークが人間の頭頂部、腹部、両足つま先に付けられ、マークの位置を元にモデルのリンク長さを決める。モーションキャプチャで得られたデータを二次元平面に射影し、逆運動学によって人間モデルの角度データを求めた。図3に θ_1 と θ_2 の軌道を示す。人間の運動データはサンプリングタイム5msで計測され、一周期200点である。

3.3 ロボットの運動への変換

人間の角度データを X の初期値とし、この値と式(13)を用いて \dot{X} 、 \ddot{X} の初期値を求め、逆力学解析で求めたロボットの運動の入力列を U の初期値とする。また、運動の一致の条件として、タップダンスロボットの運動一周期における左右脚の接地状態を人間の運動と同じにするために、例えば運動データ k で人間が右脚接地(θ_1 が正)しているとき、 J_{1k} の計算にはロボットの右脚接地時の運動方程式を用いる。左足接地時も同様である。入力制限は $\pm 1.5\text{Nm}$ とした。

以上の条件下で、 J を最小化する X 、 \dot{X} 、 \ddot{X} 、 U を求めた。式(1)を満たすために、ロボットの運動の実現に必要な入力列 U が図4に示すように得られる。図中実線は U 、破線は入力制限値を表し、 U が制限値内に収まるように求められている。 \ddot{X} と \ddot{X} の比較を図5に示す。図中実線は \ddot{X} 、破線は \ddot{X} を表し、これらが近い値となっていることから、得られた運動データは式(1)を満たす。ただし、破線の軌道が不連続となるのは、接地脚が変化する瞬間に運動方程式が切り替わるためである。ロボットの角速度 $\dot{\theta}_1$ 、 $\dot{\theta}_2$ を図6に示す。図中の実線は \dot{X} 、破線は $\dot{X}F$ を表す。図6より、 X 、 \dot{X} は微分関係を満たす。また、ロボットの角加速度 $\ddot{\theta}_1$ 、 $\ddot{\theta}_2$ を図7に示す。図中の実線は \ddot{X} 、破線は $\ddot{X}F$ を表

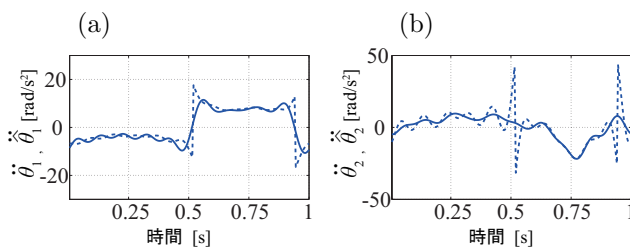


図5 運動方程式に関する条件

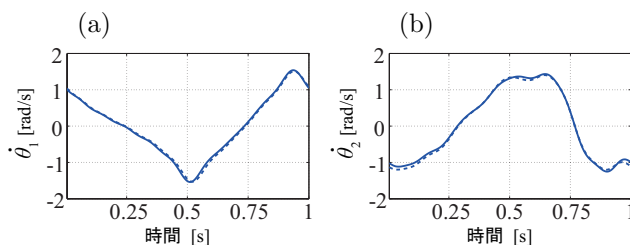


図6 速度の微分関係

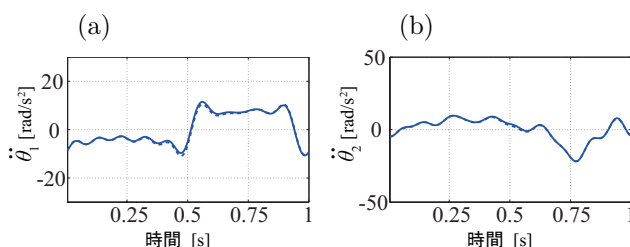


図7 加速度の微分関係

す。図7より、 \dot{X} 、 \ddot{X} は微分関係を満たす。ロボットの角度データ θ_1 と θ_2 の軌道を図8に示す。図中実線はロボットの角度データ、破線は人間の角度データを表す。 θ_1 の軌道より、人間とロボットの接地脚を同じにする拘束条件を加えたために、人間とロボットで接地脚が切り替わるタイミングが一致していることがわかる。また、以上より、得られた運動データはタップダンスロボットの力学的整合性に関する条件、速度・加速度の微分関係、運動の一致の条件、入力の大きさの制限を満たしている。

4. タップダンスロボットの運動生成

得られたロボットの運動が力学的に実現可能であることを、軌道アトラクタに基づいた自律制御系を設計して確認する。まず、最適化前の人間の運動データ X 、 \dot{X} 、 \ddot{X} と、逆力学解析で求めたロボットの運動の入

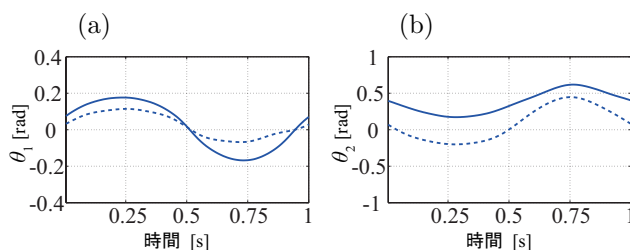


図8 ロボットの角度データ

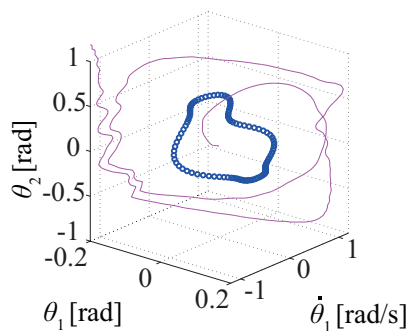


図9 生成したロボットの運動の軌道（最適化前）

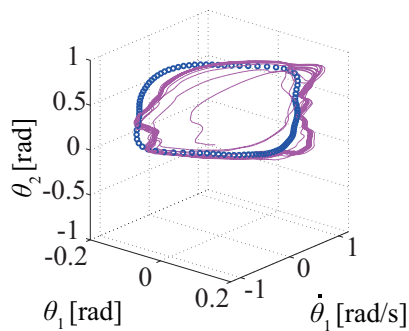


図10 生成したロボットの運動の軌道（最適化後）

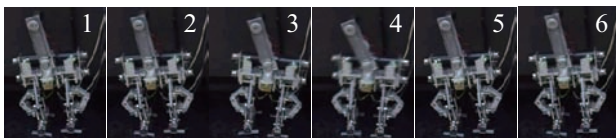


図11 運動中のロボットの姿勢

力列 U を目標運動パターンとして自律制御系を設計し、タップダンスロボット実機の運動を生成した。生成されたロボットの運動の状態空間における軌道を図9に示す。図中○は目標運動データ、実線は生成された運動の軌道である。この場合、目標運動パターンがロボットの力学的整合性を満たしていないために、生成される運動は目標運動パターンと異なる不安定なものとなる。次に、最適化で得られた運動データを目標運動パターンとして自律制御系を設計し、タップダンスロボット実機の運動を生成した。実験の結果生成されたロボットの運動の状態空間における軌道を図10に示す。図中○は目標運動データ、実線は生成された運動の軌道である。また、運動中のロボットの姿勢を図11に示す。これは運動の様子を0.2sごとに表した連続写真であり、人間の運動と同じように左右の脚の接地時間が異なる非対称な運動である。実験の結果、目標運動データに近い安定な運動が生成され、得られた運動データが力学的に実現可能であることが確かめられた。

5. おわりに

本研究では、人間の運動データをロボットの力学的整合性を満たす運動へと変換する方法を提案した。以下に成果を示す。

1. ロボットの運動における一般化座標、速度、加速度、入力を設計パラメータとし、これらが力学的

整合性に関する条件、速度・加速度の微分関係、運動の一致の条件、入力の大さの制限を満たすように最適化する方法を示した。

2. 提案する方法を用いてモーションキャプチャによって計測した人間の運動データを変換し、タップダンスロボットの運動データを得た。
3. 得られた運動データを目標運動パターンとして用いて軌道アトラクタに基づいた自律制御系を設計し、目標運動パターンに近いタップダンスロボットの運動が生成されたことで、運動データが力学的に実現可能であることが確かめられた。

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。

参考文献

- [1] B.Dariush, M.Gienger, A.Arumbakkam, Y.Zhu, B.Jian, K.Fujimura, and C.Goerick: "Online transfer of human motion to humanoids," *International Journal of Humanoid Robotics*, vol. 6, no. 2, pp. 265-289, 2009.
- [2] A.J.Ijspeert, J.Nakanishi, T.Shibata, and S.Schaal: "Nonlinear dynamical systems for imitation with humanoid robots," In *Proceedings of the IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots*, pp. 219-226, 2001.
- [3] N.S.Pollard, J.K.Hodgins, M.J.Riley, and C.G.Atkeson: "Adapting human motion for the control of a humanoid robot," In *Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, vol. 2, pp. 1390-1397, 2002.
- [4] 中岡, 中澤, 金広, 金子, 森澤, 比留川, 池内: "脚タスクモデルを用いた2足歩行ヒューマノイドロボットによる人の舞踊動作の再現", *日本ロボット学会誌*, vol. 24, no. 3, pp. 388-399, 2006.
- [5] K.Yamane, and Y.Nakamura: "Dynamics filter - concept and implementation of on-line motion generator for human figures," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 19, no. 3, pp. 421-432, 2003.
- [6] Y.Y.Tsai, W.C.Lin, K.B.Cheng, J.Lee, and T.Y.Lee: "Real-time physics-based 3D biped character animation using an inverted pendulum model," *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, vol. 16, no. 2, pp. 325-337, 2010.
- [7] K.Yamane, and J.Hodgins: "Simultaneous tracking and balancing of humanoid robots for imitating human motion capture data," *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 2510-2517, 2009.
- [8] K.Yamane, and J.Hodgins: "Control-aware mapping of human motion data with stepping for humanoid robots," *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 726-733, 2010.
- [9] 宮寄, 岡田: "非線形状態空間写像を用いた運動の変換とロボットの運動生成", *日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会*, 2A1-Q01, 2012.
- [10] 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.