

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

○宮寄哲郎 岡田昌史 (東京工業大学)

Motion Pattern Generator

Satisfying Dynamical Consistency and Differential Relations between Position, Velocity and Acceleration

○Tetsuro MIYAZAKI, and Masafumi OKADA (Tokyo TECH)

Abstract: This paper proposes a motion pattern generator. A human motion is measured by a motion capture system, and it is transformed to a robot motion that satisfies the dynamical consistency and the differential relations between position, velocity and acceleration. The proposed method is applied to two tap dancing robots with different dynamical property, and the obtained motions are discussed.

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必要がある、これに関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。これらの方法は主に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^{6,7)}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。また、参考文献^{8,9,10)}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を提案している。

これら従来研究の方法は、はじめに実現すべき運動の規範として人間の運動があり、この規範に見た目に近い運動をロボットやアニメーションキャラクタに行わせるものだが、ロボットにノンホロノミックな拘束がある場合、運動の軌道を自由に選べず、人間と見た目に近い運動の生成が難しい場合も考えられる。そこで著者ら¹¹⁾は、ロボットで実現する運動の満たすべき条件を与え、この条件を満たすロボットの運動を生成するために人間の運動を変換する方法を提案した。この方法では、モーションキャプチャデータから実現すべき運動の満たすべき条件を定め、これとロボットの力学的整合性を満たす拘束のもと人間の運動

を変換し、ロボットにノンホロノミックな拘束がある場合も、ロボットの適切な運動パターンを得ることができる。運動の変換ではロボットの周期運動を対象とし、一周期における位置、速度、加速度、入力の時系列データ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、位置・速度・加速度の微分関係、運動の一致の条件を満たすように最適化した。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ことが可能であった。ただし、この方法では位置・速度・加速度の微分関係を評価関数で表し、これを最小化するように運動を求めるため、この条件が必ずしも満たされない場合が考えられる。

本論文では、位置・速度・加速度の関係を与え、位置と入力の時系列データのみを設計パラメータとする方法を提案する。これは運動の周期性を利用することで、ローパスフィルタ、微分、零位相フィルタが行列のかけ算で表されることを利用している。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たすことを確認するために、軌道アトラクタに基づいた自律制御系¹²⁾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たしているといえる。提案する方法を大きさの異なる二体のタップダンスロボットの運動生成に適用し、これらの運動を比較することで、ロボットの力学特性が反映された運動であることを示す。

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運動の時系列データ

$$X = [\mathbf{x}_1 \quad \mathbf{x}_2 \quad \cdots \quad \mathbf{x}_k \quad \cdots \quad \mathbf{x}_n] \quad (2)$$

$$U = [\mathbf{u}_1 \quad \mathbf{u}_2 \quad \cdots \quad \mathbf{u}_k \quad \cdots \quad \mathbf{u}_n] \quad (3)$$

および \dot{X} , \ddot{X} を求める問題を考える。ただし、 \mathbf{x} は一般化座標ベクトル、 $\dot{\mathbf{x}}$, $\ddot{\mathbf{x}}$ はその速度、加速度、 \mathbf{u} は入力ベク

トル, M は慣性テンソル, C はコリオリ力・遠心力・重力ベクトル, B は入力係数行列を表す. また, 式 (2), (3) 中の添え字は時間ステップを表す. 運動データ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評価関数を設定し, これ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) 実現する運動の条件, (b) 力学的整合性に関する条件, (c) 入力の大きさの制限を考える.

(a) 実現する運動の条件

異なる身体間で運動が一致するためには, 何らかの意味で運動の等価性を定義する必要がある, それは運動の見え目, 効果, 目的など, 着目する点によって様々な定義がある¹³⁾. そこで, 所望の運動を得るために運動の一致の条件として, 実現する運動の条件を与える. 実現する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, ロボットの運動の特性を定めるものである. 実現する運動の条件は運動によって異なり, 例えばロボットの歩行運動を生成する場合, 人間の歩行運動一周期における足の接地状態を実現する運動の条件として与え, これにならうロボットの歩行運動を得る, ということが考えられる. 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_1 とする.

(b) 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_2 を

$$J_2 = \sum_{k=1}^n \mathbf{d}_k^T \mathbf{d}_k \quad (4)$$

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

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

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

とし, これを最小化する.

また, ロボットが環境に固定されていない場合, ロボットが受ける外力 (床反力など) の方向は限定される. このように, ロボットの運動パターンは外力に関する拘束条件も満たす必要がある.

(c) 入力の大きさの制限

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・トルクには制限がある. 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

$$U_i^{\min} \leq U_{ij} \leq U_i^{\max} \quad (8)$$

の制限を設ける. ただし, U_{ij} は U の i 行 j 列, U_i^{\max} , U_i^{\min} は U の i 行目の上限値, 下限値を表す. 式 (8)

を満たすために, U の計算では以下のアルゴリズム

$$U_{ij} \leftarrow U_{ij} - K_u |U_{ij} - U_i^{\max}| \quad (U_{ij} > U_i^{\max}) \quad (9)$$

$$U_{ij} \leftarrow U_{ij} + K_u |U_{ij} - U_i^{\min}| \quad (U_{ij} < U_i^{\min}) \quad (10)$$

を用いて値を修正する. ただし, K_u はゲインを表す.

2.3 運動データの最適化

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

$$G_1(s) = \frac{sf}{s+f} \quad (11)$$

$$\mathbf{y} = G_1(s)\mathbf{x} \quad (12)$$

を考える. G_1 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{y} は時間遅れのある \mathbf{x} の時間微分値である. 一方, G_1 のインパルス応答列

$$\mathbf{g} = [g_1 \quad g_2 \quad \cdots \quad g_n] \quad (13)$$

から以下の行列

$$F_1 = \begin{bmatrix} g_1 & g_2 & \cdots & g_n \\ g_n & g_1 & \cdots & g_{n-1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ g_2 & g_3 & \cdots & g_1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

を定義すると, X は周期運動の軌道であるため

$$Y \simeq XF_1 \quad (15)$$

$$Y = [\mathbf{y}_1 \quad \mathbf{y}_2 \quad \cdots \quad \mathbf{y}_k \quad \cdots \quad \mathbf{y}_n] \quad (16)$$

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. さらに, 時間遅れのない \mathbf{x} の時間微分値を得るために, 零位相フィルタを用いる. まず, 以下のローパスフィルタ

$$G_2(s) = \frac{f}{s+f} \quad (17)$$

$$\tilde{\mathbf{x}} = G_2(s)\mathbf{x} \quad (18)$$

を G_1 同様に行列で表して

$$\tilde{X} \simeq XF_2 \quad (19)$$

$$\tilde{X} = [\tilde{\mathbf{x}}_1 \quad \tilde{\mathbf{x}}_2 \quad \cdots \quad \tilde{\mathbf{x}}_k \quad \cdots \quad \tilde{\mathbf{x}}_n] \quad (20)$$

とし, 時系列データを反転する行列を

$$[\mathbf{x}_n \quad \mathbf{x}_{n-1} \quad \cdots \quad \mathbf{x}_1] = XR \quad (21)$$

とすると, 最終的に微分器, ローパスフィルタ, 零位相フィルタは

$$\dot{X} \simeq XF_1RF_2R = XF \quad (22)$$

のように行列の掛け算で表せる. 式 (22) で得られる \dot{X} は零位相フィルタによって時間遅れを解消している. これより, X と \dot{X}, \ddot{X} の微分関係を

$$\dot{X} = XF \quad , \quad \ddot{X} = XF^2 \quad (23)$$

とし、これを評価関数の計算に利用する。過去の報告¹¹⁾では位置・速度・加速度の微分関係を評価関数 J の一部として評価し、 X, U とともに \dot{X}, \ddot{X} も設計パラメータとして計算していたが、今回は位置・速度・加速度の微分関係を式 (23) で与えることでこの条件は必ず満たされ、設計パラメータは X, U のみとなり、運動変換アルゴリズム全体の計算量が低減している。

条件 (a), (b) をまとめた以下の評価関数 J

$$J = w_1 J_1 + w_2 J_2 \quad (24)$$

を設定し、これを最小化する X, U を求める。ただし、 w_i ($i = 1, 2$) は重み係数である。 X, U の i 行 j 列要素 X_{ij}, U_{ij} での J の勾配は

$$\frac{\partial J}{\partial X_{ij}} = w_1 \frac{\partial J_1}{\partial X_{ij}} + w_2 \frac{\partial J_2}{\partial X_{ij}} \quad (25)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial J_2}{\partial X_{ij}} &= \sum_{k=1}^N 2d_k^T \frac{\partial d_k}{\partial X_{ij}} \\ &= 2d_j^T \left\{ -\frac{\partial M(\mathbf{x}_j)^{-1}}{\partial X_{ij}} (C(\mathbf{x}_j, \dot{\mathbf{x}}_j) + B\mathbf{u}_j) \right. \\ &\quad \left. - M(\mathbf{x}_j)^{-1} \frac{\partial C(\mathbf{x}_j, \dot{\mathbf{x}}_j)}{\partial \mathbf{x}_j} \frac{\partial \mathbf{x}_j}{\partial X_{ij}} \right\} \\ &\quad + 2 \sum_{k=1}^N d_k^T \frac{\partial \ddot{\mathbf{x}}_k}{\partial X_{ij}} - 2 \sum_{k=1}^N c_k^T \frac{\partial \dot{\mathbf{x}}_k}{\partial X_{ij}} \end{aligned} \quad (26)$$

$$c_k = d_k^T M(\mathbf{x}_k)^{-1} \frac{\partial C(\mathbf{x}_k, \dot{\mathbf{x}}_k)}{\partial \dot{\mathbf{x}}_k} \quad (27)$$

$$\frac{\partial \dot{\mathbf{x}}_k}{\partial X_{ij}} = [0 \ \cdots \ 0 \ F_{jk} \ 0 \ \cdots \ 0]^T \quad (28)$$

$$\frac{\partial \ddot{\mathbf{x}}_k}{\partial X_{ij}} = [0 \ \cdots \ 0 \ F_{jk}^2 \ 0 \ \cdots \ 0]^T \quad (29)$$

$$\frac{\partial J}{\partial U_{ij}} = w_1 \frac{\partial J_1}{\partial U_{ij}} + w_2 \frac{\partial J_2}{\partial U_{ij}} \quad (30)$$

$$(31)$$

$$\frac{\partial J_2}{\partial U_{ij}} = -2d_j^T M(\mathbf{x}_j)^{-1} B \frac{\partial \mathbf{u}_j}{\partial U_{ij}} \quad (32)$$

で得られる。ただし、式 (28), (29) 中の F_{jk}, F_{jk}^2 は $\frac{\partial \dot{\mathbf{x}}_k}{\partial X_{ij}}, \frac{\partial \ddot{\mathbf{x}}_k}{\partial X_{ij}}$ の i 行目に入る。 $\frac{\partial J}{\partial X_{ij}}, \frac{\partial J}{\partial U_{ij}}$ 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} が入力のリミット値を超える場合、条件 (c) の式 (9), (10) 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。二体のタップダンスロボット Small と Large を Fig.1-(a) に示す¹²⁾。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、Fig.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

$$\mathbf{x} = [\theta_1 \ \theta_2]^T \quad (33)$$

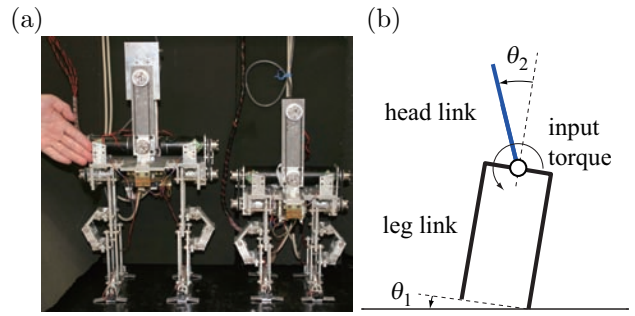


Fig. 1: Tap dancing robots and their dynamical model

Table 1: Parameters of tap dancing robots

	large	small
leg mass [kg]	2.9	2.8
head mass [kg]	0.7	0.5
length ℓ_1 [m]	0.26	0.21
length ℓ_2 [m]	0.19	0.15
length ℓ_3 [m]	0.12	0.11

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 の軌道は連続となる。ロボット Small, Large の力学パラメータを Table1 に示す。ただし、 ℓ_1 は脚の長さ、 ℓ_2 は地面から脚重心までの長さ、 ℓ_3 は頭の回転中心から頭重心までの長さである。ロボット Large はロボット Small と比較して脚が長く、頭部リンクの質量が大きい。

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。Fig.2 に示すように四つのマーカーが人間の頭頂部、腹部、両足つま先に付けられ、マーカー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。人間の角度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。

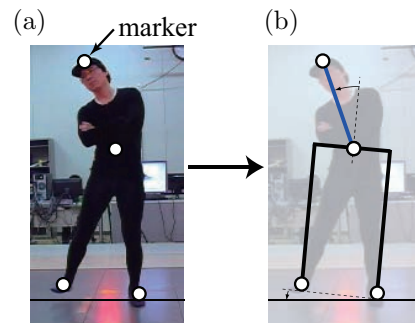


Fig. 2: Marker position and two links model for motion capture

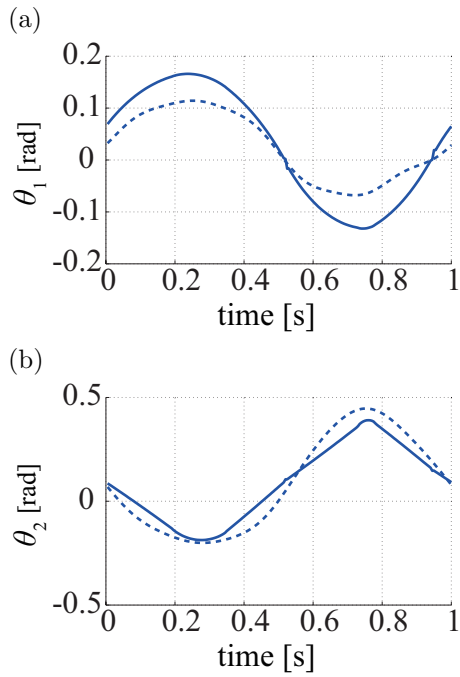


Fig. 3: Motion data of tap dancing robot small

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、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、実現する運動の条件として、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とする。このために、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、ロボット Small に関して J を最小化する X , U を求めた。ロボット Small の角度データの軌道を Fig.3 に示す。図中青い実線はロボット Small の角度データ、破線は人間の角度データを表す。実現する運動の条件として運動一周期における左右足の接地状態を指定したため、人間とロボット Small 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 θ_1 の軌道からわかる。ロボット Small の \ddot{X} と $\ddot{\tilde{X}}$ の比較を Fig.4 に示す。図中実線は \ddot{X} 、 \circ は $\ddot{\tilde{X}}$ 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。ロボット Small の運動一周期における床反力を Fig.5 に示す。運動中のロボットの床反力は常に正であることから、接地は維持される。式 (1) を満たすために、ロボット Small の運動の実現に必要な入力列 U が Fig.6 に示すように得られる。図中青い実線はロボット Small の U 、破線は入力制限値を表す。 U が与えた制限値内に収まるように求められている。以上より、得られた運動データはタップダンスロボット Small の実現する運動の条件、力学的整合性に関する条件、入力の大さきの制限を満たしている。

3.4 タップダンスロボットの運動生成

得られたロボット Small 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¹²⁾を設計して確認する。まず、最適化前の運動データ X , 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

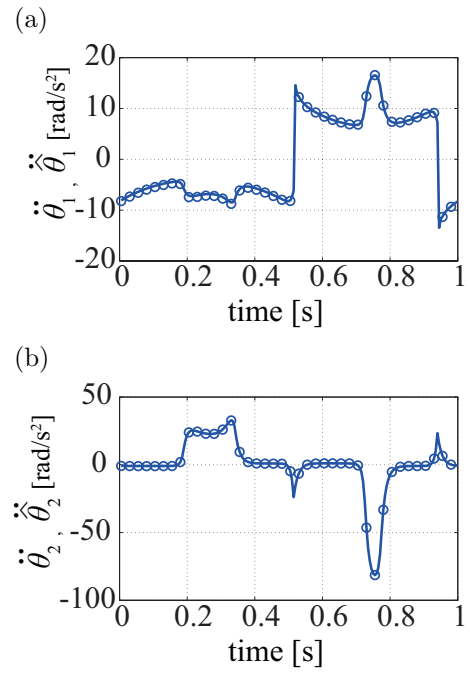


Fig. 4: Angular accelerations of tap dancing robot small

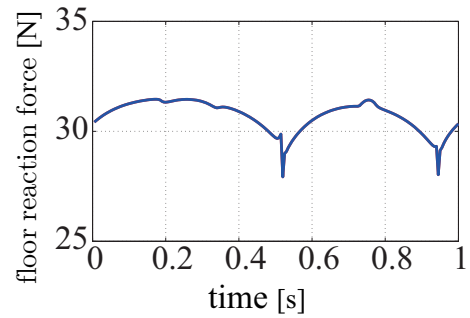


Fig. 5: Floor reaction force of tap dancing robot small

スロボット Small 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 Fig.7 に示す。図中 \circ は目標運動パターン、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 Small 実機の運動を生成した。実験の結果生成されたロボット Small の運動の状態空間における軌道を Fig.8-(a) に示す。図中 \circ は目標運動パターン、実線は生成された運動の軌道である。Fig.8-(b) は

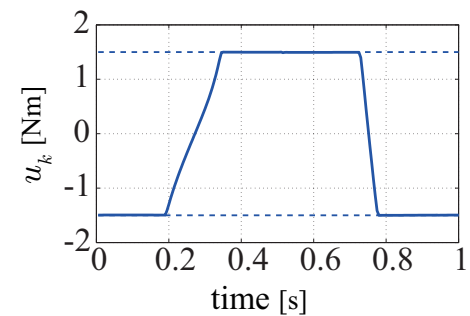


Fig. 6: Obtained input sequence of tap dancing robot small

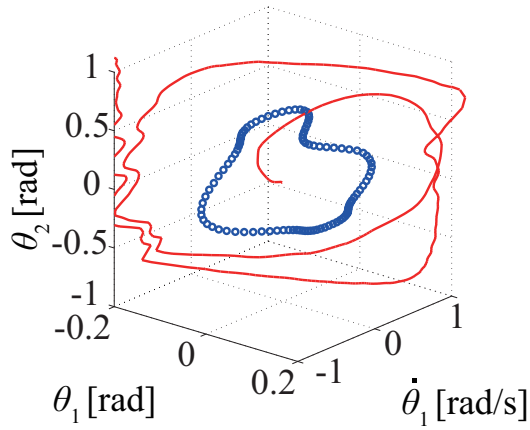
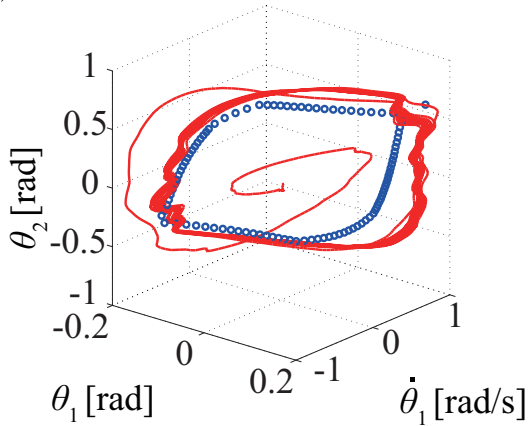


Fig. 7: Generated motion of tap dancing robot small (before optimization)

(a)



(b)

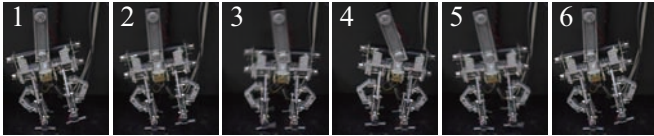
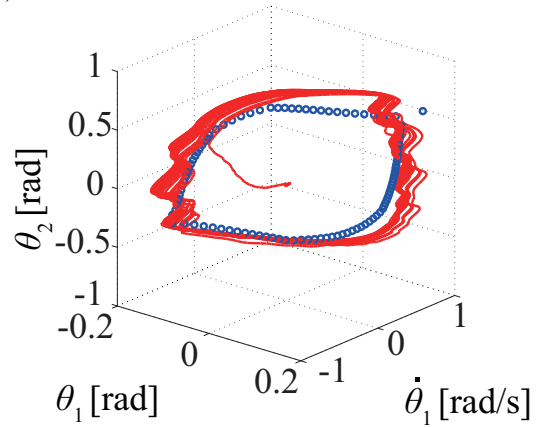


Fig. 8: Generated motion of tap dancing robot small (after optimization)

運動の様子を 0.2s ごとに表した連続写真であり、生成されたロボット Small の運動は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、与えた目標運動パターン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。

また、ロボット Small と同様の条件で人間の運動データを変換し、ロボット Large の運動データを得た。この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 Large 実機の運動を生成した。実験の結果生成されたロボット Large の運動の状態空間における軌道を Fig.9-(a) に示す。図中○は目標運動パターン、実線は生成された運動の軌道である。ロボット Large でも目標運動パターンに近い安定な運動が生成された。過去の報告¹¹⁾ではロボット Small のみを用いて提案する方法の検証を行ったため、制御対象が変わったときも実現可能な運動データが得られることは検証できていなかった。今回、新たに異なるロボット二体の運動を生成したことで、

(a)



(b)

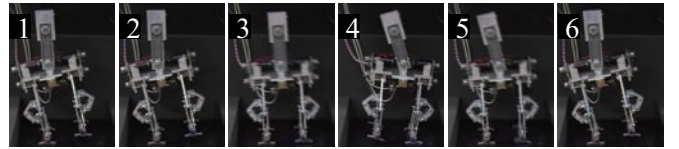
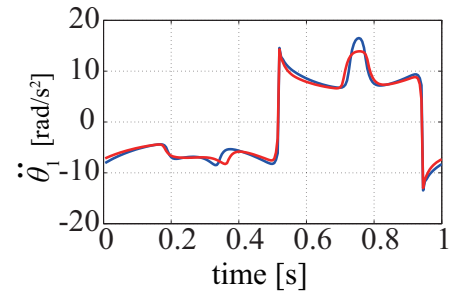


Fig. 9: Generated motion of tap dancing robot large (after optimization)

(a)



(b)

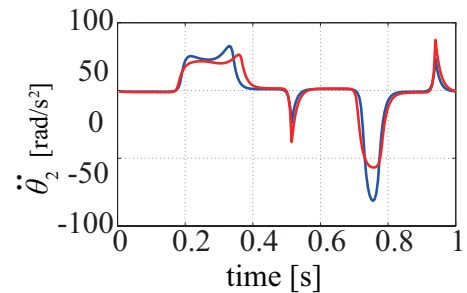


Fig. 10: Angular accelerations of tap dancing robot large

提案する方法を用いて制御対象ごとに力学的に整合する運動データが得られることを検証した。ロボット Small と Large の運動を比較する。ロボット Large の運動一周における角加速度を Fig.10 に示す。図中赤い実線はロボット Large の角加速度、青い実線はロボット Small の角加速度を表し、ロボット Small の頭部角加速度は最大 80rad/s^2 以上であるのに対し、ロボット Large の頭部角加速度は 60rad/s^2 以下である。ロボット Large はロボット Small より頭部リンクの質量が大きく、各リンクの床からの重心位置が高いため、脚部リンクを揺動させるための力が比較的小さな頭部角加速度で得られる。ロボット Large の入力列

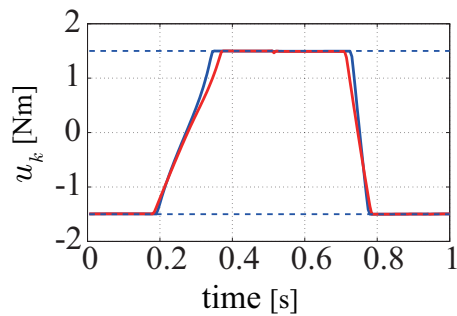


Fig. 11: Obtained input sequence of tap dancing robot large

を Fig.11 に示す. 図中赤い実線はロボット Large の入力列, 青い実線はロボット Small の入力列を表し, 運動に比較的大きな頭部角加速度を要するロボット Small の方が最大トルク 1.5Nm を発生している時間が長い.

4 おわりに

本論文では, 実現する運動の条件を満たすロボットの運動を生成するために, 位置・速度・加速度の微分関係を与え, 人間の運動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と入力を設計パラメータとし, 実現する運動の条件, 力学的整合性に関する条件, 入力の大さの制限を満たすように設計パラメータを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 Small, Large 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, 力学的に実現可能な運動データが制御対象ごとに得られていることを確認した.
4. 生成したタップダンスロボット Small と Large の運動を比較し, 頭部リンクの質量が大きく, 各リンクの床からの重心位置が高いロボット Large では比較的小さな角加速度, 発生トルクで運動が生成されていることを確認した.

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, 265/289 (2009)
- 2) A.J.Ijspeert, J.Nakanishi, T.Shibata, and S.Schaal : Non-linear dynamical systems for imitation with humanoid robots, In *Proceedings of the IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots*, 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, 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, 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, 421/432 (2003)
- 6) Y.Y.Tsai, H.K.Chu, K.B.Chen, T.Y.Lee, and C.L.Yen : "Animation generation and retargeting based on physics characteristics," In *Proceedings of Third International Conference on Intelligent Information Hiding and Multimedia Signal Processing*, pp. 349-352, 2007.
- 7) 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, 325/337 (2010)
- 8) 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*, 2510/2517 (2009)
- 9) 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*, 726/733 (2010)
- 10) K.Yamane, S.O.Anderson, and J.K.Hodgins : Controlling humanoid robots with human motion data: Experimental validation, *Proceedings of IEEE-RAS International Conference on Humanoids Robots*, 504/510 (2010)
- 11) 宮寄, 岡田 : 力学的整合性を満たす運動パターンの獲得, *日本ロボット学会学術講演会*, 4N3-8, (2012)
- 12) 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, 545/553 (2007)
- 13) 國吉 : 模倣の適応性と創発性:実世界における人間的知性の基盤, *日本ロボット学会誌*, vol. 25, no. 5, 671/677 (2007)