

運動低次元化を用いた 多自由度ロボットの力学的拘束を満たす運動パターン生成

Motion Generation of Multi Degrees of Freedom Robot with Dynamical Consistency
Using Motion Reduction

正 宮 寄 哲 郎 正 岡 田 昌 史 (東工大)

Tetsuro MIYAZAKI, Tokyo TECH, miyazaki.t.ac@m.titech.ac.jp

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

This paper proposes a motion pattern generator using dimensional reduction. A human motion pattern is measured by a motion capture system, and it is projected onto a low dimensional space based on principal component analysis. The low dimensional motion pattern is modified, so that the high dimensional motion pattern satisfies the motion condition, the dynamical consistency and the joint angle or torque limitation. The proposed method is applied to the motion pattern generation of the planar bipedal robot. The moon-walk performed by a human is transformed to the robot motion pattern. The ground contact states of foot links and a kinematic closed loop condition are given as the motion condition, and a floor reaction force condition is given for the dynamical consistency.

Key Words: Motion Generation , Multi Degrees of Freedom Robot , Motion Reduction , Human Movement

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に実現可能な運動パターンへと変換する必要があり、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。Pollardら [2] 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 [3] は、動力学に基づいて人間の舞踊をロボットの運動へ変換した。この方法では上半身は舞踊動作、下半身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 [4] は人間の運動データをキャラクタの力学的整合性を満たす運動へ変換し、Suleiman [5] らは人間の運動を低速化してヒューマノイドの力学的な拘束条件を満たす運動を生成する方法を提案した。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。Kanounら [7] は、ロボットの運動計画において制約を重要なものから順位づけし、順位の高い制約条件から優先的に満たすように運動パターンを生成する方法を提案した。Saabら [8] は、ロボットの力学的な拘束を二次計画問題としてまとめ、運動パターンを得る方法を提案した。これらの方法は主に動力学に基づいた方法である。これら従来研究の方法は、はじめに規範となる実現すべき運動パターンがあり、規範に見た目に近い運動をロボットや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 [9] 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、周期運動を対象とし、位置・速度・加速度の関係をローパスフィルタ、微分器、零位相フィルタのインパルス応答の畳み込み積分で与え、位置と入力の時系列データを設計パラメータとする。実現する運動の条件、ロボットの力学的整合性に関する条件、入力トルク制限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、ロボットの力学的に実現可能な運動パターンを得る。

文献 [9] では 2 リンクのノンホロノミック系を用いて方法の検

証を行っているが、ロボットの自由度が多い場合、設計パラメータの探索次元が増え、運動パターン最適化における解の収束性が悪化することも考えられる。そこで、本研究では人間の運動パターンを主成分分析に基づいて低次元化し、復元した運動パターンがロボットの力学的拘束を満たすように、運動パターンの低次元化軌道を修正する方法を提案する。人間の運動を多自由度なロボットの運動生成に利用するための検証として、人間のムーンウォークを平面二足歩行ロボットの運動へと変換する。実現する運動の条件として足リンク接地状態の指定、および閉ループの条件を与え、力学的整合性に関する条件として床反力の条件を与える。さらに、関節角度の制限をロボット実機の可動範囲に準じて与える。

2. 運動の変換

2.1 運動データの満たすべき条件

ロボットの実現可能な周期運動パターン

$$\Theta = [\theta_1 \quad \theta_2 \quad \cdots \quad \theta_k \quad \cdots \quad \theta_n] \quad (1)$$

$$U = [u_1 \quad u_2 \quad \cdots \quad u_k \quad \cdots \quad u_n] \quad (2)$$

を求める問題を考える。ただし、 $\theta_k \in R^m$ 、 $u_k \in R^\ell$ は時間ステップ k における角度、入力トルクのベクトルである。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パターン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) 角度と入力の制限を考える。

(a) 実現する運動の条件

ロボットの所望の運動を得るために、人間とロボットの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ロボットや運動によって異なる。この条件の評価関数は J_r とする。平面二足歩行ロボットの場合については、3.3 章で詳しく述べる。

(b) 力学的整合性に関する条件

運動方程式の満足

ロボットがノンホロノミック系であるとき、 Θ を実現する U が存在しない場合があり、このとき Θ は力学的に実現不

可能な運動パターンである．運動パターンが力学的に実現可能となるために， θ ， U はロボットの運動方程式

$$M(\theta_k)\ddot{\theta}_k = C(\theta_k, \dot{\theta}_k) + Bu_k \quad (3)$$

を満たす必要がある．そこで評価関数 J_m を

$$J_m = \sum_{k=1}^n (\ddot{\theta}_k - \ddot{\theta}_k^T) W_m (\ddot{\theta}_k - \ddot{\theta}_k^T) \quad (4)$$

$$\ddot{\theta}_k = M(\theta_k)^{-1} (C(\theta_k, \dot{\theta}_k) + Bu_k) \quad (5)$$

とし，これを最小化する．ただし， W_m は重み行列である．さらに，運動方程式の満足以外にも力学的整合性に関する条件は存在し，その条件はロボットや運動によって異なる．

(c) 角度と入力制限

ロボットの関節角度の可動範囲や，アクチュエータで発生可能なトルクには制限がある．そこで， θ ， U を制限値内に収めるために

$$\theta_i^{min} \leq \theta_{ik} \leq \theta_i^{max}, \quad u_i^{min} \leq u_{ik} \leq u_i^{max} \quad (6)$$

の制限を設ける．ただし， θ_{ik} は θ_k ($k = 1, \dots, n$) の i 行要素であり， θ_i^{max} ， θ_i^{min} はそれらの角度上限値，下限値を示し， u_{ik} についても同様である．式 (6) を満たすために，以下のアルゴリズム

$$\theta_{ik} \leftarrow \theta_{ik} - K_\theta (\theta_{ik} - \theta_i^{max}) \quad (\theta_{ik} > \theta_i^{max}) \quad (7)$$

$$\theta_{ik} \leftarrow \theta_{ik} - K_\theta (\theta_{ik} - \theta_i^{min}) \quad (\theta_{ik} < \theta_i^{min}) \quad (8)$$

$$u_{ik} \leftarrow u_{ik} - K_u (u_{ik} - u_i^{max}) \quad (u_{ik} > u_i^{max}) \quad (9)$$

$$u_{ik} \leftarrow u_{ik} - K_u (u_{ik} - u_i^{min}) \quad (u_{ik} < u_i^{min}) \quad (10)$$

を用いて値を修正する．ただし， K_θ ， K_u (> 0) は定数である．

2.2 運動データの最適化

条件 (a)，(b) をまとめた以下の評価関数 J

$$J = J_r + J_m \quad (11)$$

を設定し，これを最小化する θ ， U を勾配法で求める．ただし，最適化の途中で θ ， U が制限値を超える場合，条件 (c) を用いて値を修正する． θ の k 列要素 θ_k での J の勾配は

$$\frac{dJ}{d\theta_k} = \frac{\partial J}{\partial \theta_k} + \sum_{j=1}^n \left(\frac{\partial J}{\partial \theta_j} \frac{\partial \theta_j}{\partial \theta_k} + \frac{\partial J}{\partial \ddot{\theta}_j} \frac{\partial \ddot{\theta}_j}{\partial \theta_k} \right) \quad (12)$$

である．式 (12) 中の $\frac{\partial \theta_j}{\partial \theta_k}$ ， $\frac{\partial \ddot{\theta}_j}{\partial \theta_k}$ を計算するために，文献 [9] の方法を用いて θ ， $\dot{\theta}$ ， $\ddot{\theta}$ の間の微分関係をローパスフィルタ，微分器，零位相フィルタのインパルス応答の畳み込み積分で与える． θ ， $\dot{\theta}$ ， $\ddot{\theta}$ の間の微分関係は行列の掛け算で表せ

$$\dot{\theta} \simeq \Theta F_1 \quad (13)$$

$$\ddot{\theta} \simeq \Theta F_2 \quad (14)$$

となる． F_1 ， F_2 は θ ， $\dot{\theta}$ ， $\ddot{\theta}$ の間の微分関係を表す行列である．式 (13) (14) より θ ， $\dot{\theta}$ ， $\ddot{\theta}$ が関連付けられ， $\frac{\partial \theta_j}{\partial \theta_k}$ ， $\frac{\partial \ddot{\theta}_j}{\partial \theta_k}$ が求められる．

2.3 運動低次元化を用いた軌道修正

ロボットの自由度が多い場合，設計パラメータの探索次元が増え，運動パターンを最適化するときの解の収束性が悪化することも考えられる．設計パラメータの探索次元を減らすため，運動パターンを主成分分析に基づいて低次元化し，復元した運動パター

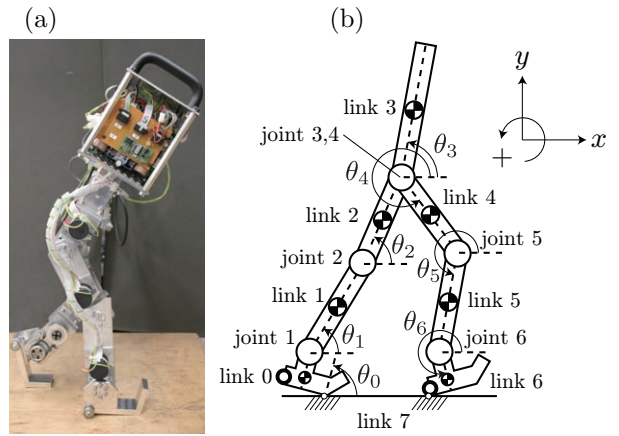


Fig.1 Planar bipedal robot and its model

ンがロボットの力学的拘束を満たすように，運動パターンの低次元化軌道を修正する． θ を主成分分析し

$$\theta = QSV^T = [Q_1 \quad Q_2] \begin{bmatrix} S_1 & 0 \\ 0 & S_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1^T \\ V_2^T \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$S_1 = \text{diag} \{s_1 \quad s_2 \quad \dots \quad s_r\} \quad (16)$$

$$S_2 = \text{diag} \{s_{r+1} \quad s_{r+2} \quad \dots \quad s_m\} \quad (17)$$

となる． $s_r \gg s_{r+1}$ が成り立つとき， $\theta \in R^m$ を低次元化した $\hat{\theta} \in R^r$ ($m > r$) は

$$\hat{\theta} = S_1 V_1^T \quad (18)$$

のように得られ， θ は $\hat{\theta}$ を用いて

$$\theta = Q_1 \hat{\theta} \quad (19)$$

のように復元できる．運動パターンの低次元化により設計パラメータは θ から $\hat{\theta}$ となり，探索次元は減る． $\hat{\theta}$ での J の勾配は

$$\frac{\partial J}{\partial \hat{\theta}_k} = \frac{\partial J}{\partial \theta_k} \frac{\partial \theta_k}{\partial \hat{\theta}_k} = \frac{\partial J}{\partial \theta_k} Q_1 \quad (20)$$

となり，低次元化軌道 $\hat{\theta}$ を

$$\hat{\theta}_k \leftarrow \hat{\theta}_k - \frac{\partial J}{\partial \hat{\theta}_k} Q_1 \delta_{\hat{\theta}} \quad (21)$$

のように修正する．ただし， $\delta_{\hat{\theta}}$ は微小係数である． U についても同様に低次元化する．

3. 平面二足歩行ロボットへの適用

3.1 平面二足歩行ロボット

提案する方法を用いて，人間のムーンウォークを平面二足歩行ロボットの運動に変換する．ムーンウォークを行う平面二足歩行ロボットを図 1 に示す．このロボットの力学パラメータや制御法は文献 [10] に詳しい．図 1-(b) はロボットのモデルを表し， θ_i ($i = 0, 1, \dots, 6$) は各リンク i の姿勢角を表す．ロボットは片足のつま先を面接地で地面に固定し，反対側の足をかかとのローラで接地させ後方へ滑らせてムーンウォークを行う．ムーンウォークの運動パターン生成では，実現する運動の条件として接地状態の指定，および閉ループの条件を与え，力学的整合性に関する条件として床反力の条件を与える．これらの条件については 3.3，3.4 章で詳述する．

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，人間のムーンウォークをモーションキャプチャで計測した．図 2 に示すようにマーカが人間の頭頂部，腰，膝，足首，両足つま先とかかたとに付けられ，マーカの位置を元にモデルのリンク長さを決めた．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，逆運動学解析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 FFT を用いて閉軌道とした人間の運動一周分である．

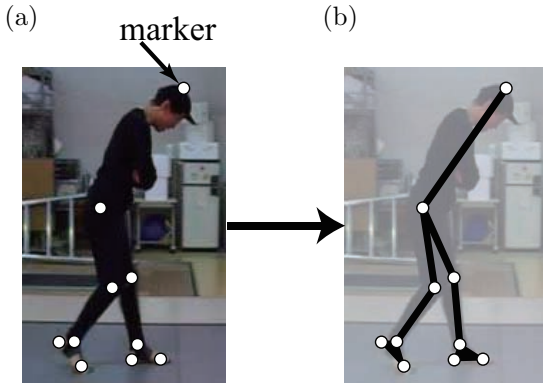


Fig.2 Marker position and human model for motion capture

3.3 実現する運動の条件

3.3.1 接地状態の指定

接地状態は各時間ステップでロボットの運動方程式を決定するために必要である．本研究では人間の足リンク 0 と 6 の角度データ θ_0 と θ_6 からロボットの接地状態を与える．地面に固定する足リンクを基準リンク，滑らせる足リンクを移動リンクとし，これら

- ・ $\theta_0 \leq \theta_6 - \pi$ のとき 基準リンク 0, 移動リンク 6
- ・ $\theta_0 > \theta_6 - \pi$ のとき 基準リンク 6, 移動リンク 0

のように判定する．足リンクの接地状態は

- ・ 基準リンクがつま先で面接地，移動リンクがローラで接地
- ・ 基準リンクがつま先で点接地，移動リンクがローラで接地
- ・ 両足がつま先で点接地（基準・移動リンクの交代期間）

の 3 パターンを考慮する．与えた接地状態を満たすように，足リンクの角度 θ_0, θ_6 , 角速度 $\dot{\theta}_0, \dot{\theta}_6$, 角加速度 $\ddot{\theta}_0, \ddot{\theta}_6$ の軌道を与える．

3.3.2 閉ループの条件

ロボットは運動中に両足を常に接地させており，両脚部と地面で閉ループを形成する．基準リンクが接地する点の y 座標を $y_b = 0$, 移動リンクが接地する点の x, y 座標を x_m, y_m とし，接地状態ごとに以下の閉ループの条件を与える．移動リンクがローラで接地するとき

$$y_{m\ k} = 0, \dot{y}_{m\ k} = 0, \ddot{y}_{m\ k} = 0 \quad (22)$$

$$\mathbf{y}_{m\ k} = [y_{m\ k} \ \dot{y}_{m\ k} \ \ddot{y}_{m\ k}]^T \quad (23)$$

とする．両足がつま先で点接地するとき，式 (22) に加えて

$$\dot{x}_{m\ k} = 0, \ddot{x}_{m\ k} = 0 \quad (24)$$

$$\mathbf{y}_{m\ k} = [y_{m\ k} \ \dot{y}_{m\ k} \ \ddot{y}_{m\ k} \ \dot{x}_{m\ k} \ \ddot{x}_{m\ k}]^T \quad (25)$$

とする．閉ループの条件を全ての時間ステップで満たすために，以下の評価関数

$$J_r = \sum_{k=1}^n \mathbf{y}_{m\ k}^T W_{y_m} \mathbf{y}_{m\ k} \quad (26)$$

を最小化する．ただし， W_{y_m} は重み行列である．

3.4 力学的整合性に関する条件（床反力の条件）

足リンク 0, 6 に働く床反力 f_{y0}, f_{y7} は

$$f_{y0}, f_{y7} > 0 \quad (27)$$

でなければならない．この条件が全ての時間ステップで満たされれば，運動中にロボットは転倒しない．式 (27) を満たすために，

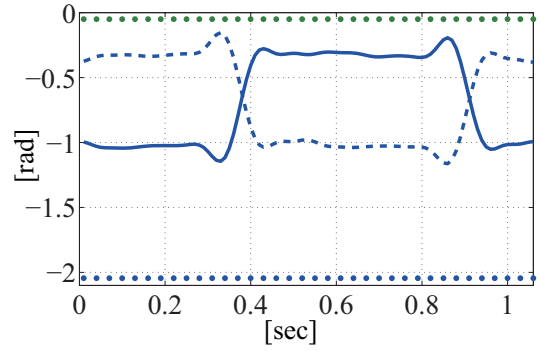


Fig.3 Relative angles of knee joints (solid line : left leg, dash line : right leg, dot line: angle limit)

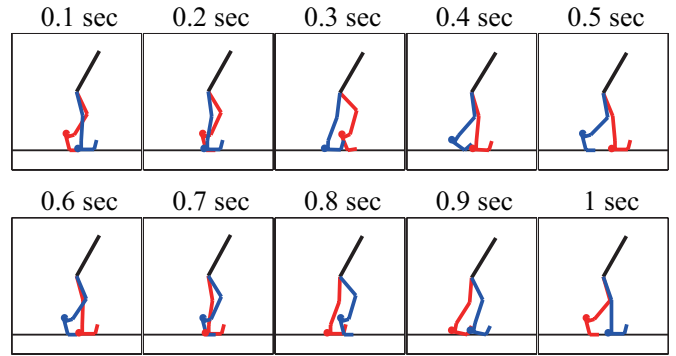


Fig.4 Robot motion sequence

以下のアルゴリズム

$$\theta_k \leftarrow \theta_k + \frac{df_{y0j}}{d\theta_k} \delta_f \quad (f_{y0j} \leq f_{min}) \quad (28)$$

$$\theta_k \leftarrow \theta_k + \frac{df_{y7j}}{d\theta_k} \delta_f \quad (f_{y7j} \leq f_{min}) \quad (29)$$

を用いて値を修正する．ただし， $\delta_f (> 0)$ は微小係数である．

3.5 ロボットの運動パターン生成

平面二足歩行ロボットの θ, u は

$$\theta = [\theta_0 \ \theta_1 \ \theta_2 \ \theta_3 \ \theta_4 \ \theta_5 \ \theta_6]^T \quad (30)$$

$$u = [u_1 \ u_2 \ u_3 \ u_4 \ u_5 \ u_6]^T \quad (31)$$

である．ただし， $u_i (i = 1, \dots, 6)$ は関節 i のモータが発生するトルクである．運動パターンが閉ループの条件を満たすとき，ロボットは常に両足で接地するため閉リンク機構とみなせ，逆力学解析により $\Theta, \dot{\Theta}, \ddot{\Theta}$ を実現する U が求まる．本研究ではモンテカルロを行う平面二足歩行ロボットの運動パターン生成における設計変数は Θ のみとする．実現する運動の条件，力学的整合性に関する条件，角度の制限を与え，人間の運動データを平面二足歩行ロボットの運動パターンに変換した．今回，入力の変数は考慮しないものとする． Θ の内， θ_0, θ_6 は足リンクの接地状態を指定して軌道を与え， $\theta_1, \dots, \theta_5$ は 5 次元から 3 次元に軌道を低次元化して修正した．また，角度の制限は実機の可動範囲に準じて与えた．得られたロボットの運動パターン内，ひざ関節相対角の軌道を図 3 に，運動パターン一周期をモデルの姿勢で表したものを図 4 に示す．図 3 中，実線は左脚，破線は右脚の軌道を表し，点線はひざ関節の角度上限・下限値を表す．得られた運動パターンは与えた角度制限を満たす．図 4 では青・赤線がロボットの左右脚，黒太線がロボットの胴，黒細線が地面を表し，与えた接地状態を満たすように運動パターンが得られたことがわかる．閉ループの条件に関係する y_m の軌道を図 5 に示す．運動一周期で $y_m \approx 0$ となり，誤差は 1mm 以下であった．ロボット

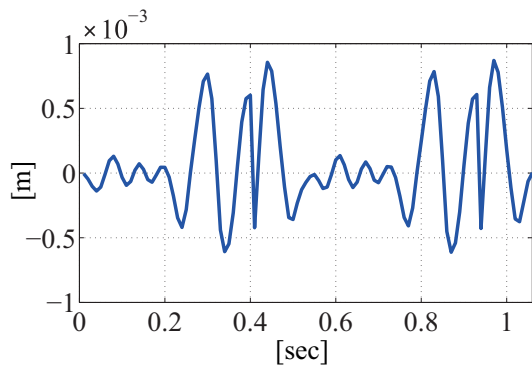


Fig.5 Index of closed loop condition (trajectory of y_m)

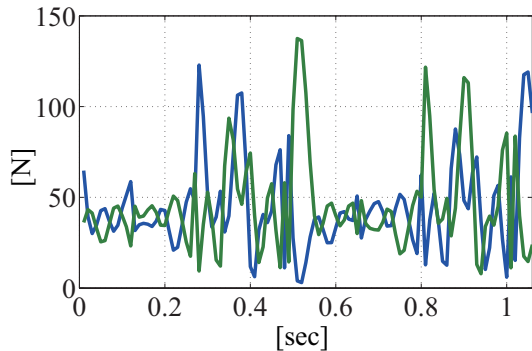


Fig.6 Floor reaction forces

が受ける床反力の y 成分を図 6 に示す。図中、青線はリンク 0 が受ける床反力、緑線はリンク 6 が受ける床反力を表す。運動一周期で床反力は正であり、与えた床反力の条件を満たしている。

4. おわりに

本論文では、これまでに提案した運動変換法を多自由度なロボットの運動生成に利用するために、運動低次元化を用いて人間の運動を平面二足歩行ロボットの運動パターンに変換した。以下に成果を示す。

1. 人間の運動パターンを主成分分析に基づいて低次元化し、復元した運動パターンがロボットの力学的拘束を満たすように、運動パターンの低次元化軌道を修正する方法を提案した。運動低次元化により、設計パラメータの探索次元が減る。
2. 運動低次元化を用いて、人間のムーンウォークの運動パターンを平面二足歩行ロボットの運動パターンに変換した。運動の変換では、実現する運動の条件として接地状態の指定、および閉ループの条件を与え、力学的整合性に関する条件として床反力の条件を与えた。さらに、関節角度の制限を与えた。得られた運動パターンは指定した足リンク接地状態と床反力の条件、関節角度の制限を満たし、閉ループの条件の誤差は 1mm 以下となった。

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。また、カリヤンゴ・アンドリュウ氏には平面二足歩行ロボットの足部を製作して頂いた。

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*, 2009.

[2] 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*, pp. 1390–1397, 2002.

[3] 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.

[4] 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.

[5] W.Suleiman, E.Yoshida, F.Kanehiro, J.P.Laumond, and A.Monin. On human motion imitation by humanoid robot. In *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 2697–2704, 2008.

[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] O.Kanoun, F.Lamiriaux, P.B.Wieber, F.Kanehiro, E.Yoshida, and J.P.Laumond. Prioritizing linear equality and inequality systems: Application to local motion planning for redundant robots. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 724–729, 2009.

[8] L.Saab, O.Ramos, N.Mansard, P.Soueres, and J.Y.Fourquet. Generic dynamic motion generation with multiple unilateral constraints. In *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 4127–4133, 2011.

[9] 宮崎, 岡田. 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. 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.

[10] 渡辺, 岡田. 軌道アトラクタを用いた自律制御のための力学系次元拡張と平面脚ロボットへの応用. 第 17 回ロボティクス・シンポジウム予稿集, 2012.