

NURBS による人型ロボットのインタラクティブ動作設計

I: NURBS の構造を用いた ZMP 制約を満たす高速軌道修正

田中健也 (大阪大学) ○杉原知道 (大阪大学)

1. はじめに

人型ロボットに作業を行わせるためには、環境や自己との接触解決に関わる幾何学的制約、可動範囲に関わる運動学的制約、駆動力や接触力の発生可能範囲に関わる力学的制約の下で、多数の関節を協調させ意味のある動作を設計しなければならない。このような困難さを意識させず直感的に使用できるツールを提供することが、ロボット普及のために重要である。CG の分野で実用されている、複数の代表的姿勢の補間によって動作を表現する方法、いわゆるキーフレームアニメーション [1] は、そのようなツール構成の枠組として有望であり、人型ロボットにおいてもこれを応用する試み [2, 3, 4, 5] が行われている。

補間によって生成される動作の全体を、計算機上でどのように表現するかが問題である。例えば一定の微小時間間隔ごとの姿勢列でこれを表現した場合 [6, 7, 8], 各々の姿勢を独立に編集できるので様々な制約を満たすために十分な自由度を持たせることができる一方、大きな記憶領域を必要とする上に、時間間隔の変更や動作の部分的修正が困難になる。動作軌道をパラメトリック曲線で表現できれば記憶領域の消費を抑えられるが、軌道設計の自由度も小さくなる。一般的に動作表現の自由度と計算や記憶操作の煩雑さはトレードオフとなるため、曲線の選択には注意が必要である。

筆者ら [5] は、形状設計の自由度が比較的高いパラメトリック曲線である NURBS (Non-Uniform Rational B-spline) を用いて ZMP の制約条件を満たす動作軌道の設計方法を提案した。具体的には、キーフレーム列で表現された支持状態遷移と整合するよう定められた目標 ZMP 軌道からの実際の ZMP 軌跡の誤差が最小化される動作軌道を、反復計算によって求めるアルゴリズムである。これは重心-ZMP モデル [9] に基づいて厳密な力学計算の回数を抑える工夫がされており、インタラクティブな動作設計に適するが、軌道修正に最急降下法を用いており十分な計算高速化が図られたものではなかった。本稿では、NURBS が基底関数を結合係数とした制御点の線形和であることを利用し、最小二乗法によって最適な制御点列を高速に求める方法を提案する。

2. NURBS を用いた動作軌道設計

2.1 キーフレーム補間による動作表現

キーフレームアニメーションでは図 1 のように、複数の代表的姿勢の補間によって動作を表現する。松本ら [10, 11, 4] は、ピン・ドラッグインタフェース [12] を用いてキーフレームとなる姿勢をインタラクティブに編集し、補間計算において幾何学的制約と運動学的制約を自動的に満足する、すなわち動作中に生じた身体と環境

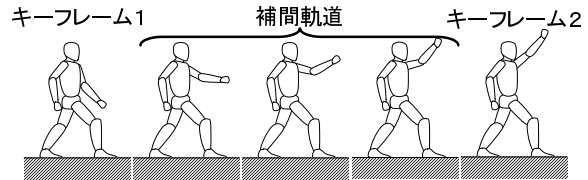


図 1: キーフレーム補間による動作表現

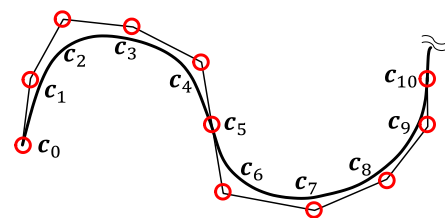


図 2: 重複ノットに対応する制御点を經由する NURBS

の干渉を自動解決する方法を開発した。この方法において、ロボットの姿勢を \mathbf{q} とすると k 番目キーフレーム \mathcal{F}_k は次のように定義される。

$$\mathcal{F}_k = \{c_i(\mathbf{q}) = c_{i,k} | i \in \mathcal{I}_k\} \quad (1)$$

ただし、 $c_i(\mathbf{q})$ は任意の身体部位の位置ないし姿勢にインデックス i を割り当てたもの、 $c_{i,k}$ はキーフレームにおけるその値、 \mathcal{I}_k は上記拘束条件インデックスの集合である。拘束条件には、具体的には重心や手足先の位置、胴体姿勢等が含まれる。動作軌道はこれらを補間するパラメトリック曲線の組で定義され、時刻 t におけるロボットの姿勢 $\mathbf{q}(t)$ は、同軌道上の点から逆運動学によって求める。一般的に \mathcal{I}_k は全キーフレームで一貫するとは限らないが、松本ら [10] はこれらを自動整合させる方法を提案している。本稿も上記の表現に準じる。

2.2 NURBS による身体軌道の表現

人型ロボットの巨視的な振舞に着目すると、重心の軌道は双曲線関数 [13] や変形ベッセル関数 [14] で近似できることが知られている。しかし体幹や四肢の大きな振りを伴う場合、上記の関数による軌道の近似精度は低下する。より形状自由度の高いフーリエ級数を用いる方法 [15] も提案されているが、非周期的振舞を含む動作の表現には適さない。本研究で用いる NURBS は、次数 d 、制御点 \mathbf{p}_i とその重み w_i ($i = 0 \dots n$)、単調増加するノット列 $\{s_j\}$ ($j = 0 \dots n + d$) によって次式で定義さ

れるパラメトリック曲線である.

$$\mathbf{p}(s) = \frac{\sum_{i=0}^n w_i N_{i,d}(s) \mathbf{p}_i}{\sum_{i=0}^n w_i N_{i,d}(s)} \quad (s_d \leq s \leq s_n) \quad (2)$$

ただし s は媒介変数であり, $N_{i,j}(s)$ は次で定義される.

$$N_{i,0}(s) \equiv \begin{cases} 1 & (s_i \leq s < s_{i+1}) \\ 0 & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (3)$$

$$N_{i,j}(s) \equiv \frac{s - s_i}{s_{i+j} - s_i} N_{i,j-1}(s) + \frac{s_{i+j+1} - s}{s_{i+j+1} - s_{i+1}} N_{i+1,j-1}(s) \quad (4)$$

制御点に対応するノットを重複させると, 図 2 のように NURBS はその制御点を経由する. さらに重複度を上げることで, 経由点において微分不可能となる曲線も表現可能である. キーフレームを経由点とし, 隣接経由点間に複数の制御点を挿入することで軌道設計の自由度を与えられる.

空間曲線である NURBS に時間情報を持たせるためには, 媒介変数 s を時間の関数としなければならない. $d \geq 5$ として s をそのまま時刻 t と読み替えれば, 力学的制約条件を考慮した加速度次元まで及ぶ軌道設計が可能になる. 一方, 次数を上げると設計の計算は複雑になる. また実用上 3 次であれば, 空間曲線の形状設計自由度としては十分であることが多い. そこで, 重心軌道は t を媒介変数とする 5 次の NURBS で, その他の身体部位の軌道は s を t の 5 次多項式とする 3 次の NURBS でそれぞれ表現する.

2.3 NURBS による目標 ZMP 軌道の表現

各キーフレームにおいて, ロボット身体と環境とは複数の孤立領域 $\mathcal{S}_{i,k}$ ($i = 1, \dots, N_S$, N_S は孤立領域の個数) で接触する. $\mathcal{S}_k \equiv \bigcup_{i=1}^{N_S} \mathcal{S}_{i,k}$ とすると, \mathcal{F}_k から \mathcal{F}_{k+1} へは $\mathcal{S}_k \cap \mathcal{S}_{k+1}$ を軸として身体上の接触部位を切り替えることになる. そこで k 番目キーフレームと $k+1$ 番目キーフレームを補間する動作軌道の目標 ZMP 軌道は, ${}^d\mathbf{p}_{Z,k} = \mathbf{p}_C(\mathcal{S}_k - (\mathcal{S}_k \cap \mathcal{S}_{k+1}))$ から ${}^d\mathbf{p}_{Z,k+1} = \mathbf{p}_C(\mathcal{S}_k \cap \mathcal{S}_{k+1})$ へと直線的に向かう単調関数によって設計する. ただし $\mathbf{p}_C(\mathcal{S})$ は, 領域 \mathcal{S} の重心を意味する. 例えば図 3 上のように足を交互に踏み出す動作の場合, 目標 ZMP 軌道は同図下のようなになる. 前報 [5] では時刻 t の多項式関数を用いてこれを設計した. 本稿では, ノット列, 制御点列, 重みをそれぞれ次のように与えた 3 次の NURBS を用いる.

$$\begin{aligned} \text{ノット列} & \{T_0, T_0, T_0, T_0, T_1, T_1, T_1, \dots, \\ & T_{N-1}, T_{N-1}, T_{N-1}, T_{N-1}\} \\ \text{制御点列} & \{{}^d\mathbf{p}_{Z,0}, {}^d\mathbf{p}_{Z,1}, {}^d\mathbf{p}_{Z,1}, {}^d\mathbf{p}_{Z,1}, \\ & {}^d\mathbf{p}_{Z,2}, {}^d\mathbf{p}_{Z,2}, {}^d\mathbf{p}_{Z,2}, \dots, \\ & {}^d\mathbf{p}_{Z,N-1}, {}^d\mathbf{p}_{Z,N-1}, {}^d\mathbf{p}_{Z,N-1}\} \\ \text{重み} & \{1, w_0, w_0, 1, w_1, w_1, \dots, w_{N-2}, w_{N-2}, 1\} \end{aligned}$$

この概形は図 4 のようになる.

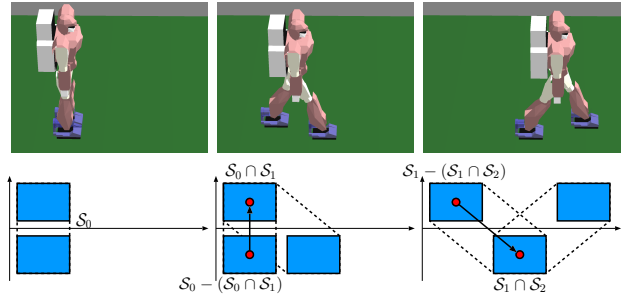


図 3: 接触領域遷移と目標 ZMP 軌道

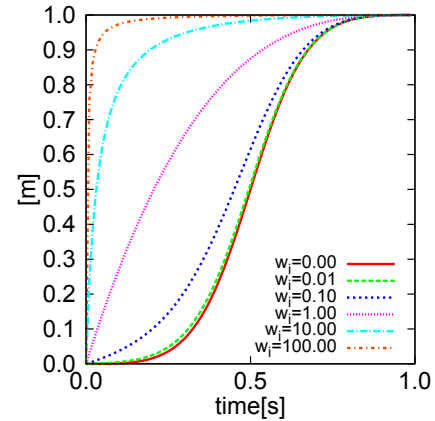


図 4: 3 次の NURBS による目標 ZMP 軌道

3. 重心軌道の最適化

3.1 NURBS の構造を利用した効率的求解

前節で定めた目標軌道に ZMP 軌跡が近づくよう, 動作軌道を修正したい. 2.1 節に述べた通り, 全身運動は重心や手先足先等の軌道から逆運動学により決定される. 簡単のため, 手先足先軌道は支持状態遷移に合わせて先に決定し, 残る重心の軌道のみを最適化することを考えよう.

重心を $\mathbf{p}_G = [x_G \ y_G \ z_G]^T$, 目標 ZMP 位置を ${}^d\mathbf{p}_Z = [{}^d x_Z \ {}^d y_Z \ {}^d z_Z]^T$ とそれぞれおく. ただし, 鉛直方向上向きを z 軸の正方向とする. 重心まわり角運動量変化を無視すると, 両者の関係は次式で表される.

$$m(z_G - {}^d z_Z) \ddot{x}_G - m(\ddot{z}_G + g)(x_G - {}^d x_Z) = \tilde{n}_{Zy} \quad (5)$$

$$m(z_G - {}^d z_Z) \ddot{y}_G - m(\ddot{z}_G + g)(y_G - {}^d y_Z) = -\tilde{n}_{Zx} \quad (6)$$

ただし, m はロボット質量, g は重力加速度, \tilde{n}_{Zx} , \tilde{n}_{Zy} はそれぞれ目標 ZMP まわりに発生するトルクの x 成分, y 成分である. 両式の類似性から, 以降は x 軸方向の運動のみ考える. y 軸方向の運動についても同様の議論が行える.

重心軌道に補正量 Δx_G を加え, $\tilde{n}_{Zy} = 0$ としたい. すなわち,

$$\begin{aligned} m(z_G - {}^d z_Z)(\ddot{x}_G + \Delta \ddot{x}_G) \\ - m(\ddot{z}_G + g)(x_G + \Delta x_G - {}^d x_Z) = 0 \quad (7) \end{aligned}$$

式 (5) (7) より, 次を得る.

$$m(z_G - {}^d z_Z)\Delta\ddot{x}_G - m(\ddot{z}_G + g)\Delta x_G = \tilde{n}_{Zy} \quad (8)$$

今, 5 次の NURBS で設計した重心軌道の各制御点に補正量 Δx_{Gi} ($i = 0, \dots, n$) を加え, 補正軌道 $\Delta x_G(t)$ とする. すなわち,

$$\Delta x_G(t) = \frac{\sum_{i=0}^n w_i N_{i,5}(t) \Delta x_{Gi}}{\sum_{i=0}^n w_i N_{i,5}(t)} \quad (9)$$

ただし境界条件を満たすために, 両端点においては $\Delta x_{G0} = 0$, $\Delta x_{Gn} = 0$ とする. $\Delta\ddot{x}_G(t)$ は $\dot{N}_{i,d}(t)$, $\ddot{N}_{i,d}(t)$ を含む有理関数となるが, 次の通り Δx_{Gi} については線形となる.

$$\frac{\partial \Delta x_G}{\partial \Delta x_{Gj}} = \frac{w_j N_{j,5}(t)}{B_0(t)} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Delta \ddot{x}_G}{\partial \Delta x_{Gj}} &= \frac{w_j \ddot{N}_{j,5}(t)}{B_0(t)} - 2 \frac{B_1(t) w_j \dot{N}_{j,5}(t)}{B_0(t)^2} \\ &+ \left\{ 2 \left(\frac{B_1(t)}{B_0(t)} \right)^2 - \frac{B_2(t)}{B_0(t)} \right\} \frac{w_j N_{j,5}(t)}{B_0(t)} \end{aligned} \quad (11)$$

$$B_r(t) = \sum_{i=0}^n w_i \frac{d^r N_{i,5}(t)}{dt^r} \quad (12)$$

このことを利用し, 式 (8) を適当なステップ数 S で離散化すれば, 次式を得る.

$$\mathbf{A}_x \Delta \mathbf{x}_G = \mathbf{b}_x \quad (13)$$

ただし,

$$\mathbf{A}_x = \begin{bmatrix} a_1(t_1) & \cdots & a_{n-1}(t_1) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_1(t_{S-1}) & \cdots & a_{n-1}(t_{S-1}) \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$a_j = m(z_G - {}^d z_Z) \frac{\partial \Delta \ddot{x}_G}{\partial \Delta x_{Gj}} - m(\ddot{z}_G + g) \frac{\partial \Delta x_G}{\partial \Delta x_{Gj}} \quad (15)$$

$$\Delta \mathbf{x}_G = [\Delta x_{G1} \cdots \Delta x_{Gn-1}]^T \quad (16)$$

$$\mathbf{b}_x = [\tilde{n}_{Zy}(t_1) \cdots \tilde{n}_{Zy}(t_{S-1})]^T \quad (17)$$

$$t_i = T_0 + \frac{i}{S}(T_n - T_0) \quad (18)$$

とそれぞれ置いた. $S \gg n$ と考えてよく, 式 (13) は変数よりも式の数が多くなるため, 次のように最小二乗解を求める.

$$\Delta \mathbf{x}_G = (\mathbf{A}_x^T \mathbf{A}_x)^{-1} \mathbf{A}_x^T \mathbf{b}_x \quad (19)$$

$N_{i,j}(t)$ の定義より \mathbf{A}_x が疎行列となることを利用すれば, 上記の計算は効率的に行うことができる.

3.2 角運動量変化の影響による ZMP 誤差補正

体幹や四肢の大きな運動を伴う動作では, 前節の計算において無視した重心まわり角運動量変化が, ZMP 軌跡の目標軌道からの逸脱を生じさせる. この逸脱量を求めるには, ロボットの全身質量分布を考慮した逆動力学

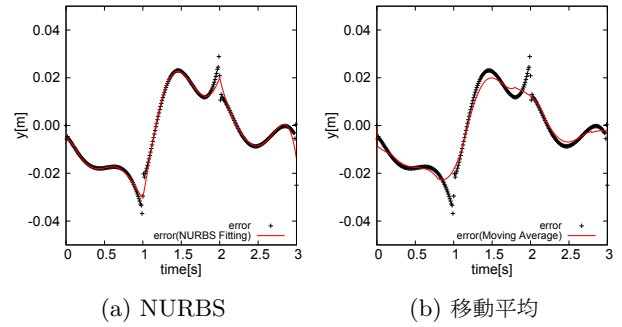


図 5: 目標 ZMP 軌道からの誤差

計算が必要である. インタラクティブな動作設計を行う上でこれはボトルネックになるため, 計算回数は最小限に止めたい. 前報 [5] において, 逆動力学を 1 回だけ行って求めた ZMP 誤差の軌跡を目標 ZMP 軌道に足しこみ, 再度質量集中モデルに基づく軽量な計算を行うことで誤差補償精度を向上する方法を提案した. 本稿ではこの方法を以下のように改良して使用する.

ZMP の逸脱は, 支持領域が変化した瞬間に大きく不連続に発生しがちである. これを直接反映して目標 ZMP 軌道を補正すると, 再度計算された重心軌道にもしばしば大きな変動が生じる. そこで, 離散化された ZMP 誤差の履歴に対し, 重心軌道と同じ 5 次の NURBS を最小二乗法によってフィッティングしたものを補正量とする. その際, 誤差が不連続に変化する箇所の影響を抑えるよう, 離散近似によって求めた曲率の逆数を重みとして利用する.

図 5(a) は, ある ZMP 誤差の履歴を本方法によって NURBS で近似した例である. 同図 (b) は単純な移動平均で不連続な箇所を緩和した例であり, 前者に比べ近似精度が低下していることが分かる.

4. 動作設計例

油圧駆動人型ロボット Hydra[16] を想定し, 図 6 に示す 4 個のキーフレームで表される動作設計を行った. 両足による全身支持を維持しながら, 体幹を左右に大きく傾斜・揺動させる動作であり, 重心まわり角運動量変化が比較的大きい. 図 7(a) は質量集中モデルに基づく 3.1 節の方法のみで最適化された y 軸方向重心軌道, およびそれに対応する y 軸方向 ZMP 軌跡をプロットしたものである. 傾斜角度が大きくなったときの, 緑色の目標 ZMP 軌道からの逸脱が顕著であることが分かる. これに対し図 7(b) は, 3.2 節に示した 2 段階計算による方法を用いて最適化された重心軌道, およびそれに対応する ZMP 軌跡をプロットしたものである. 図 7(a) と比較すると, 目標 ZMP 軌道をより高精度に再現できていることが分かる.

前報 [5] では, 5 秒の動作軌道に対して ZMP 誤差補償に約 10 秒を要した. 本稿で示した方法では, 約 0.5 秒でこれを行うことができた.

5. おわりに

キーフレームアニメーションを枠組とし, 人型ロボットの動作を直感的かつインタラクティブに設計するため

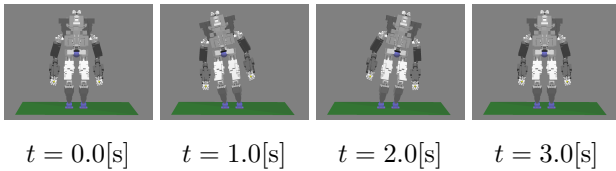
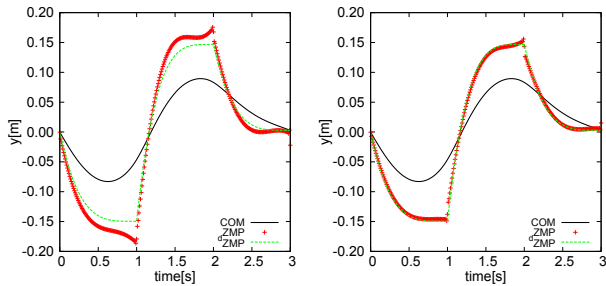


図 6: 体幹の振りの大きい左右揺動動作



(a) 目標 ZMP 軌道補正なし (b) 目標 ZMP 軌道補正あり

図 7: 重心軌道最適化による ZMP 誤差補償の結果

の機能として、ZMP 制約を満たすよう動作軌道を自動修正する計算方法を提案した。形状自由度が比較的高い NURBS をキーフレームの補間に用いているため、体幹や四肢の振りによる重心まわり角運動量変化の影響が大きい動作であっても、その影響を補償可能なことが特長である。目標 ZMP 軌道からの誤差補償は、前報と同様に重心-ZMP モデルに基づく軽量の計算を基本とし、詳細な質量分布モデルによる誤差計算を 1 回だけ用いることで計算時間の短縮と精度の向上を両立した。前者においては、NURBS が制御点の線形形で定義されることを利用した、効率の良い最小二乗法による計算方法を示した。なお次報 [17] にて、3 次元的な接触を伴う動作の設計において ZMP 制約の他の接触力に関わる条件（摩擦力の制約）を満たす方法、ならびにそれに基づいた幾つかの動作設計事例を示す。

本研究は、科学研究費補助金挑戦的萌芽研究（課題番号#26540135）、科学研究費補助金基盤研究（B）（課題番号#15H02762）および新エネルギー・産業技術総合開発機構環境・医療分野の国際研究開発・実証プロジェクト/ロボット分野の国際研究開発・実証事業「災害対応ロボット・オープンプラットフォームの研究開発」（代表：中村仁彦）の支援で行われた。

参考文献

- [1] S. Steketee and N. Badler. Parametric keyframe interpolation in incorporating kinetic adjustment and phrasing control. *ACM SIGGRAPH Computer Graphics*, Vol. 19, No. 3, 1985.
- [2] Y. Kuroki et al. Motion Creating System for A Small Biped Entertainment Robot. In *Proceedings of the 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 1394–1399, 2003.
- [3] S. Nakaoka, S. Kajita, and K. Yokoi. Intuitive and Flexible User Interface for Creating Whole Body Mo-

tions of Biped Humanoid Robots. In *Proceedings of 2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 1675–1682, 2010.

- [4] 松本恭典, 杉原知道. 人型ロボットのインタラクティブ動作設計における干渉の自動解決. 第 31 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 1C3-05, 2013.
- [5] 田中健也, 杉原知道. NURBS を用いた人型ロボットの力学的制約を満たすキーフレーム補間動作設計. 第 32 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 1B3-02, 2014.
- [6] 長阪憲一郎. 動力学フィルタによる人間型ロボットの全身運動生成. 博士論文, 東京大学大学院工学系研究科, 2000.
- [7] Katsu Yamane and Yoshihiko Nakamura. Dynamics Filter — Concept and Implementation of On-Line Motion Generator for Human Figures. In *Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Robotics & Automation*, pp. 688–695, 2000.
- [8] 梶田秀司, 原田研介, 金広文男, 金子健二, 藤原清司, 横井一仁, 比留川博久. 予見制御を用いた ZMP 補正用動力学フィルタ. 第 21 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, p. 3A18, 2003.
- [9] K. Mitobe, G. Capi, and Y. Nasu. Control of walking robots based on manipulation of the zero moment point. *Robotica*, Vol. 18, pp. 651–657, 2000.
- [10] 松本恭典, 杉原知道. 人型ロボットのインタラクティブ動作設計における運動拘束条件の自動整合. 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'12 予稿集, 1A2-O04, 2012.
- [11] 松本恭典, 杉原知道. 人型ロボットのインタラクティブ姿勢編集における干渉の自動解決. 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2013 予稿集, 2P1-A11, 2013.
- [12] K. Yamane and Y. Nakamura. Natural Motion Animation through Constraining and Deconstraining at will. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Vol. 9, No. 3, pp. 352–360, 2003.
- [13] S. Kajita, T. Yamaura, and A. Kobayashi. Dynamic Walking Control of a Biped Robot Along a Potential Energy Conserving Orbit. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 8, No. 4, pp. 431–438, 1992.
- [14] K. Terada and Y. Kuniyoshi. Online Gait Planning with Dynamical 3D-Symmetrization Method. In *Proceedings of 2007 IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots*, 2007.
- [15] 高西淳夫. 上体の運動によりモーメントを補償する 2 足歩行ロボット. 日本ロボット学会誌, Vol. 11, No. 3, pp. 348–353, 1993.
- [16] 神永拓, 中村仁彦. 油圧駆動ヒューマノイドロボット Hydra のエレクトロニクス. 第 33 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 3I1-07, 2015.
- [17] 田中健也, 杉原知道. NURBS による人型ロボットのインタラクティブ動作設計 II: 環境との 3 次元接触を伴う動作の高速設計. 第 34 回日本ロボット学会学術講演会予稿集 (発表予定), 2016.