

# 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

田中健也 (大阪大学) 杉原知道 (大阪大学)

## 1. はじめに

人型ロボットの動作設計は、関節可動範囲の制限や干渉防止等の幾何学的制約、駆動トルクや接触力(垂直抗力・摩擦力)に関する力学的制約を満たしながら、多数の関節変位の時間軌道を求める大規模境界値問題である。このような困難さを感じさせず、直感的な動作設計を可能にするツールを提供することが、本研究の目的である。松本ら [1-3] は一連の動作を特徴づける幾つかの姿勢をキーフレームとしてインタラクティブに作成し、幾何学的制約を自動的に満足するようにそれらを NURBS(Non-Uniform Rational B-Spline) により補間する方法を開発した。ただし、力学的制約については考慮していなかった。

力学的制約を満たす人型ロボットの動作設計方法は、幾つか提案されている。長阪 [4], Yamane ら [5], 梶田ら [6] は離散化された動作軌道の全時刻における姿勢を、厳密な運動方程式と制約条件に基づきながら修正する力学フィルタを提案している。これらの方法では、軌道のデータ量が動作時間や離散時間幅に依存し、しばしば膨大となる。軌道をパラメトリック曲線で設計することで、データ量を抑えることができるが、運動表現の自由度は減るため、制約を満たすためには適切な曲線表現を選択しなければならない。ロボット全身のダイナミクスを重心-ZMP モデル [7] で近似し、重心軌道を双曲線関数 [8-11] や変形ベッセル関数 [12] で表現する方法は多く取られている。四肢や体幹の傾きを駆使した多様な動作表現を意図した場合、これらの近似精度は必ずしも十分ではなくなる。倉爪ら [13] は双曲線関数を使いながらも全身のダイナミクスを考慮して ZMP 誤差を補償する方法を提案しているが、境界条件すなわちキーフレームの時刻を陽に設計することができない。Huang ら [14] は動作軌道を 3 次スプライン曲線で表現し、曲線パラメータを試行錯誤的に調整する方法をとっている。近藤ら [15] は転倒トルク補償が比較的容易なフーリエ級数表現を用いているが、非周期的な動作との親和性は必ずしも良くない。

そこで本稿では、形状表現の自由度が比較的高い NURBS を用いて人型ロボットの重心軌道を設計する方法を提案する。まず、参照となる軌道を寺田ら [12] の方法で求め、NURBS をこの軌道にフィッティングし初期軌道とする。そして制御点を修正することで、ZMP 軌跡の目標 ZMP 軌道からの誤差を最小化する。厳密モデルに基づいた逆運動学や逆動力学など高コストな計算を多数行うことは、インタラクティブな動作設計には採用できない。そこで、ZMP 軌跡は厳密な逆動力学に基づいて計算するが、制御点の修正は重心-ZMP モデルに基づいて行う。これによって、高コストな計算の回数を減らし高速な計算を可能にする。

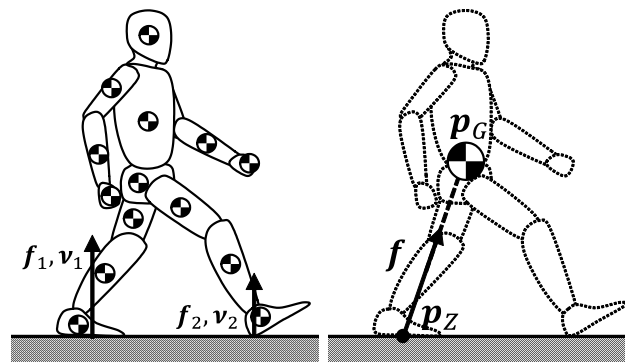


図 1 厳密モデル

図 2 重心-ZMP モデル

## 2. NURBS を用いた重心軌道表現

### 2.1 重心-ZMP モデルの運動方程式

図 1 に示すような人型ロボットの運動方程式は、一般的に次のように表せる。

$$\begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} \\ H_{12}^T & H_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \tau \end{bmatrix} + \sum_{k=1}^{N_C} \begin{bmatrix} J_{k1}^T \\ J_{k2}^T \end{bmatrix} f_k \quad (1)$$

ただし、 $H_{ij} (i=1, 2, j=1, 2)$  は慣性行列、 $q_1$  は体幹の位置と姿勢を表す 6 次元ベクトル、 $\theta$  は全関節変位、 $b_i (i=1, 2)$  は遠心力・コリオリ力・重力等、 $\tau$  は全関節に働くトルク、 $J_{ki} (i=1, 2)$  は  $k$  番目接触点に関するヤコビ行列、 $f_k$  は  $k$  番目の接触点において働く反力、 $N_C$  は接触点の数である。人型ロボットの関節数  $n$  は通常数十個あり、慣性行列は全体で  $(n+6) \times (n+6)$  の大きなものとなる。 $\tau$  の次元は  $n$  であるため、入力の数より制御量の数の方が多いため劣駆動系である。また、 $N_C, J_{ki}, f_k$  は運動に伴い不連続に変化する構造可変系である。さらに、力学的制約は次のような不等式で表される。

$$\nu_k^T f_k \geq 0, \quad \|f_k - (\nu_k^T f_k) \nu_k\| \leq \mu_k \nu_k^T f_k \quad (2)$$

ただし、 $\nu_k$  は  $k$  番目接触点における単位法線ベクトル、 $\mu_k$  は  $k$  番目接触点における摩擦係数である。これらの式は、反力が摩擦円錐の内側に収まらなければならないという制約を表している。式 (1)(2) および与えられた境界条件  $[q_1^T(T_i) \ \theta^T(T_i)]^T = [q_1^T(t_i) \ \theta^T(t_i)]^T$  を満たすパラメトリック曲線  $q_1(t; c_1), \theta(t; c_2)$  を求めることが目的である。

重心まわりの角運動量は十分小さいと仮定し、図 2 のように全質量が重心に集中したモデル(重心-ZMP モデル)を考えれば、運動方程式は次式で表される。

$$\ddot{x}_G = \omega_G^2 (x_G - x_Z) \quad (3)$$

$$\ddot{y}_G = \omega_G^2 (y_G - y_Z) \quad (4)$$

$$\ddot{z}_Z = \frac{f_z}{m} - g \quad (5)$$

ただし,

$$\omega_G \equiv \sqrt{\frac{\ddot{z}_G + g}{z_G - z_Z}} \quad (6)$$

$m$  はロボットの全質量,  $p_G = [x_G \ y_G \ z_G]^T$  は重心の位置,  $g$  は重力加速度,  $f = [f_x \ f_y \ f_z]^T$  はロボットに働く全並進外力,  $p_Z = [x_Z \ y_Z \ z_Z]^T$  はZMPの位置である.  $z_Z$  は地面の高さであり, 既知であるとする. また, 力学的制約式 (6) は次のように表すことができる.

$$p_Z \in S, \quad f_z \geq 0 \quad (7)$$

ただし  $S$  は水平面  $z = z_Z$  上にある凸領域 (支持領域) であり, ロボットと環境との接触状態から決定される.

この重心-ZMP モデルによれば, 重心軌道は双曲線関数や変形ベッセル関数によって解析的に表現できる [8-12]. しかし, 全身を活用した多様な動作を設計する際, このモデルは必ずしも良い近似とならない. 体幹や四肢の運動による角運動量変化に対応可能な表現自由度を持った, 別のパラメトリック曲線が必要である.

## 2.2 NURBS

重心軌道を, 形状表現の自由度が比較的高い NURBS (Non-Uniform Rational B-Spline) によって表現する事を考える. NURBS は次数  $d$ , 制御点  $c_i (i = 0 \sim n)$ , 制御点の重み  $w_i (i = 0 \sim n)$ , 単調増加するノット列  $t_j (j = 0 \sim n + d)$  によって次式で定義される.

$$P(t) = \frac{\sum_{i=0}^n w_i N_{i,d}(t) c_i}{\sum_{i=0}^n w_i N_{i,d}(t)} \quad (t_d \leq t \leq t_n) \quad (8)$$

ただし,  $N_{i,d}(t)$  は B スプライン基底関数であり, 次式で定義される.

$$N_{j,0}(t) \equiv \begin{cases} 1 & (t_j \leq t < t_{j+1}) \\ 0 & (t < t_j, t_{j+1} \leq t) \end{cases} \quad (9)$$

$$N_{j,k}(t) \equiv \frac{t - t_j}{t_{j+k} - t_j} N_{j,k-1} + \frac{t_{j+k+1} - t}{t_{j+k+1} - t_{j+1}} N_{j+1,k-1} \quad (10)$$

一般に NURBS 曲線は制御点を通過するとは限らないが, ノットを重複させる事で制御点を通過させることができる. 例えば, 両端ノットを  $d+1$  重複, その他を  $d$  重複させれば, B スプライン基底関数は Bernstein 基底関数と一致し, NURBS は有理 Bezier 曲線となる.

$$(t_0, \dots, t_d, t_{d+1}, \dots, t_{2d}, \dots, t_n, \dots, t_{n+d}) \\ = (T_0, \dots, T_0, T_1, \dots, T_1, \dots, T_{N-1}, \dots, T_{N-1}) \quad (11)$$

このようにノット列を設定した場合, 補間軌道は離散時刻  $T_k$  において図 3 のように  $k \times d$  番目の制御点を通過する. 以降ではこのような制御点を経由点と呼ぶ. 経由点の間には,  $d-1$  個の制御点が存在する. NURBS の曲線はノットの重複が無ければ  $C^{d-1}$  級連続であることが保証される. しかしノットが  $s$  重複すると,  $C^{d-s}$  級連続となる. そのため, ノットが  $d$  重複する点にお

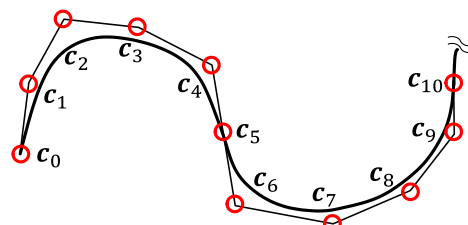


図 3 5 次の NURBS

いて, 一回微分が不連続となる可能性がある. ただし, 制御点の位置を修正することでこの問題は解決できる. 以上のことから, 経由点間には (i) NURBS の形状を変化させる制御点 (ii) 経由点において補間軌道の形状を滑らかに保つための制御点の少なくとも 2 点が必要となる. また運動方程式から, ZMP 軌道は重心の位置と加速度に依存する事が分かる. このことから, 経由点における加速度を担うような制御点が前後に 1 つずつ必要であると考えられる. 以上のことから NURBS の次数は  $d = 5$  とする. また, 簡単のためすべての制御点の重みは  $w_i = 1$  とする.

## 2.3 目標 ZMP 軌道

目標 ZMP 軌道は, 寺田ら [12] の方法で設計する. ZMP は  $z = 0$  の水平面上に定義し  $p_Z(t) = [x_Z(t) \ y_Z(t) \ 0]^T$  とする. 目標 ZMP 軌道  ${}^d p_Z(t) = [{}^d x_Z(t) \ {}^d y_Z(t) \ 0]^T$  は,  $t = 0$  において蹴足で地面を蹴り  $t = T$  までに支持足裏に ZMP を移すことを意図し, 次のような多項式関数で与える.

$$\begin{bmatrix} {}^d x_Z(t) \\ {}^d y_Z(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_S \\ y_S \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x_S - x_K \\ y_S - y_K \end{bmatrix} \left( \frac{t}{T} - 1 \right)^N \quad (12)$$

ただし  $p_S = [x_S \ y_S \ 0]^T$ ,  $p_K = [x_K \ y_K \ 0]^T$  はそれぞれ支持脚と蹴足の足裏中心位置である. また,  $N$  は ZMP の変化の度合いを決定するための多項式の次数であり, 正の偶数とする. この多項式は  $0 \leq t \leq T$  において単調なので, この期間において目標 ZMP 軌道が支持領域内にあることが保証される.

## 2.4 制御点の最適化

NURBS で定義した重心軌道に従い設計された動作の ZMP 軌道が前節の目標 ZMP 軌道に近づくよう, 制御点を最適化する. 寺田ら [12] の方法は目標 ZMP 軌道に対応する重心軌道も, 変形ベッセル関数と多項式の和として同時に与えるので, これにフィッティングさせることで制御点の初期値を得る. その後, 次のように制御点の最適化を行う.

目的関数を次のように定める.

$$f = \int \| {}^d p_Z - p_Z \|^2 dt \quad (13)$$

最適化には, 勾配法などを用いれば良い. 最適勾配法を用いた場合のアルゴリズムを以下に示す.

1. 制御点列  $c = [c_0^T \dots c_n^T]^T$  の初期解  $c^{(0)}$  を寺田ら [12] の方法によって得られた目標重心軌道へのフィッティングによって定める.
2. 現在の制御点列  $c^{(k)}$  に対する目的関数の値  $f(c^{(k)})$  を求める.
3. 目的関数の勾配ベクトル  $\nabla f(c^{(k)})$  を, 次の擬似微

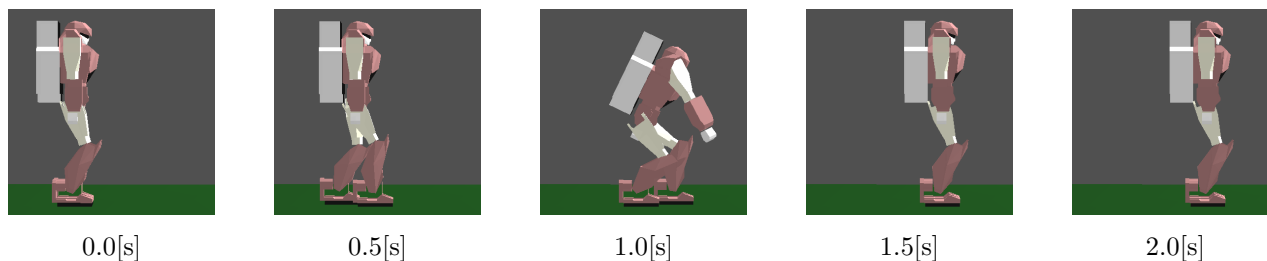


図4 キーフレーム

表1 目標 ZMP 軌道と ZMP 軌跡との平均二乗誤差 [mm] と計算時間

	重心-ZMP モデル に基づいた最適化	厳密モデル に基づいた最適化	提案 方法	寺田ら [12] の方法 のみ	フィッティング のみ
$x$ 方向	14.1	6.8	6.9	12.9	25.9
$y$ 方向	10.0	8.4	9.4	9.5	10.3
計算時間	約 5 秒	約 30 分	約 10 秒		

分によって求める．

$$\frac{\partial f}{\partial c_i^{(k)}} = \frac{f(c^{(k)} + \delta c_i) - f(c^{(k)})}{\epsilon} \quad (14)$$

ただし、 $\epsilon$  は微量、 $\delta c_i$  は  $i$  番目要素のみ  $\epsilon$  で他は全て 0 のベクトルである．

4.  $|\nabla f(c^{(k)})| < \xi$  となったら  $c^{(k)}$  を解として終了する．ただし  $\xi$  は微量である．
5. 新たな制御点列  $c^{(k+1)}$  を以下の更新式で求める．

$$c^{(k+1)} = c^{(k)} - \alpha \nabla f(c^{(k)}) \quad (15)$$

$\alpha$  はスカラー値であり、 $f(c^{(k+1)})$  の値を最小化するように、次元探索によってその値を定める．

6.  $k = k + 1$  として 2 へ戻る．

ステップ 2, 3, 5 において ZMP 軌跡を計算する必要がある．これを厳密に行うためには、逆運動学や逆動力学など高コストな計算を多数回行わなければならない．そこで、重心-ZMP モデルと厳密モデルを組み合わせた次のような方法によって、高速に計算する．

1. 重心-ZMP モデルに基づいて上に示したアルゴリズムで制御点を最適化する．
2. 厳密モデルに基づいた逆動力学によって ZMP 軌跡を計算する．
3. ZMP 軌跡と目標 ZMP 軌道の差を、目標 ZMP 軌道から差し引く．

$${}^d p'_Z = {}^d p_Z - (p_Z - {}^d p_Z) \quad (16)$$

4. 補正した目標 ZMP 軌道  ${}^d p'_Z$  を用いて、再度重心-ZMP モデルに基づいて最適化を行う．

すなわち厳密モデルによって求められる ZMP 軌跡と目標 ZMP 軌道の差によって目標 ZMP 軌道の方を補正し、再度最適化を行うという単純な方法である．最適化の際の繰り返し計算には厳密モデルを用いていないので、計算コストは小さく、高速に計算することができる．

### 3. 動作設計例

ベースリンク 6 自由度を含めた、26 自由度の人型ロボットモデル [16] の動作設計例を示す．設計したキーフレームを図 4 に示す．重心軌道は 5 次の NURBS を

用いて補間する．計画された重心及び全身の軌道を同時に満たす全身の逆運動学には、杉原ら [17] の方法を用いる．制御点の最適化には (i) 重心-ZMP モデルに基づいた最適化、(ii) 厳密モデルに基づいた最適化、(iii) 提案方法の 3 つについて示す．実際に計算された重心軌道と ZMP 軌道を図 5~7 に示す．比較対象として (iv) 寺田ら [12] の方法、(v) 寺田ら [12] の方法の解にフィッティングしただけのものを図 8, 9 に示す．それぞれの目標 ZMP 軌道と ZMP 軌跡との平均二乗誤差と計算時間を表 1 に示す．

表 1 より、厳密モデルに基づいた最適化を行った場合が最も誤差が小さい．しかし計算時間が長く、インタラクティブな動作設計には採用できない．計算時間の短い重心-ZMP モデルを用いた最適化の場合は、ZMP 軌跡と目標 ZMP 軌道との誤差が大きい．提案方法では、重心-ZMP モデルに基づいた最適化に近い計算時間で、厳密モデルに基づいた最適化に近い軌道を得ることができていることが分かる．図 6, 7 を見比べてみても、その差はほとんど無いことが分かる．

### 4. おわりに

本稿では、インタラクティブな人型ロボットのキーフレーム補間動作設計のための、NURBS を用いた重心軌道表現を提案した．まず、参照となる軌道を寺田ら [12] の方法で求め、NURBS をこの軌道にフィッティングし初期軌道とする．そして制御点を修正することで、ZMP 軌跡の目標 ZMP 軌道からの誤差を最小化する．最適化の際には、重心-ZMP モデルに基づいて最適化を行い、厳密モデルに基づく逆動力学によって求められる ZMP 軌跡と目標 ZMP 軌道の差によって目標 ZMP 軌道を補正し、再度最適化を行うという方法で高速に計算する方法を示した．求められた ZMP 軌跡と目標 ZMP 軌道との間には多少の誤差が残っているが、支持領域の十分内部に収まっている．本手法により、キーフレーム補間動作設計において力学的制約を満足した軌道を高速に計算する事が可能となる．

謝辞 本研究は科学研究費補助金挑戦的萌芽研究課題番号 #26540135(研究代表者:杉原知道) の支援を受けた．

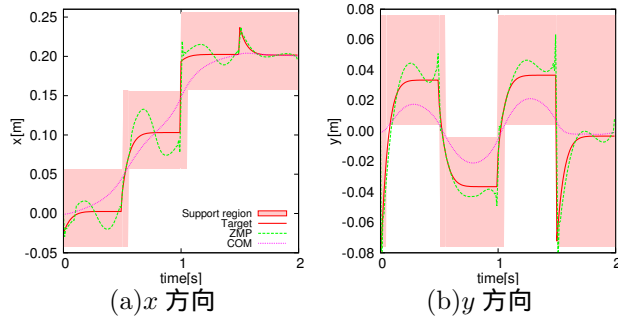


図5 重心-ZMPモデルに基づいた最適化

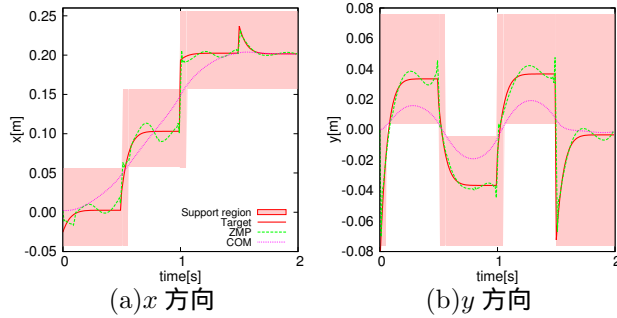


図6 厳密モデルに基づいた最適化

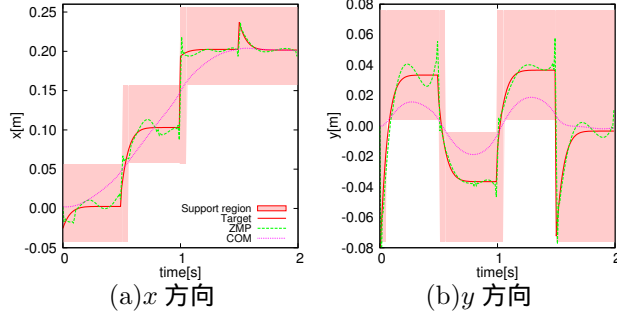


図7 提案方法

## 参考文献

- [1] 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, 1A2-O04, 2012.
- [2] 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, 2P1-A11, 2013.
- [3] 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, 1C3-05, 2013.
- [4] 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” 東京大学工学部情報工学専攻博士論文, 1999.
- [5] K. Yamane and Y. Nakamura: “Dynamics Filter — Concept and Implementation of On-Line Motion Generator for Human Figures,” in Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2000.
- [6] 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, 3A18, 2003.
- [7] 水戸部和久, 矢島克知, 那須康雄: “ゼロモーメント点の操作による歩行ロボットの制御” 日本ロボット学会誌, vol.18, no.3, pp.359–365, 2000.
- [8] S. Kajita, O. Matsumoto, and M. Saigo: “Real-time 3D walking pattern generation for a biped robot with

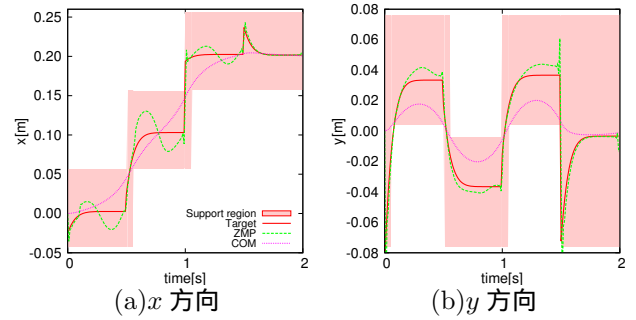


図8 寺田ら [12] の方法のみ

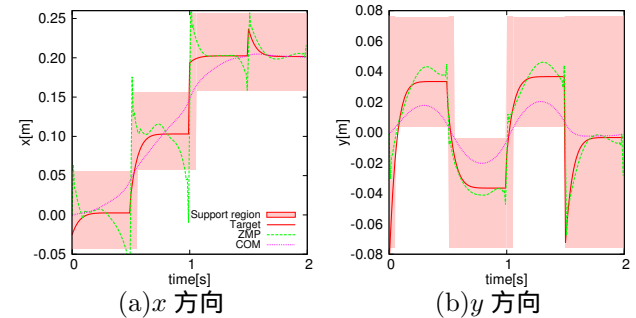


図9 フィッティングのみ

telescopic legs,” in Proceedings of the 2001 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.2299–2306, 2001.

- [9] 長阪憲一郎, 黒木義博, 鈴木伸也, 伊藤禎洋, 山口仁一: “小型二足歩行エンターテインメントロボットによる歩行・跳躍・走行運動統合制御” 第9回ロボティクスシンポジウム予稿集, pp.386–391, 2004.
- [10] 原田研介, 梶田秀司, 森澤光晴, 金広文男, 藤原清司, 金子健二, 比留川博久: “ヒューマノイドロボットの長時間歩容計画における解析的アプローチ” 日本ロボット学会誌, vol.23, no.6, pp.752–760, 2005.
- [11] T. Sugihara and Y. Nakamura: “Boundary Condition Relaxation Method for Stepwise Pedipulation Planning of Biped Robots,” IEEE Transaction on Robotics, vol.25, no.3, pp.658–669, 2009.
- [12] 寺田耕志, 杉原知道, 國吉康夫: “境界条件緩和と運動方程式の力学的三次元対称化による二脚ロボットのオンライン運動計画法” 第25回日本ロボット学会学術講演会, 1G26, 2007.
- [13] 倉爪亮, 米田完, 田中俊太郎, 玉木達也, 太田祐介, 長谷川勉: “2足歩行機械の3D揺動歩容” 日本ロボット学会誌, vol.21, no.7, pp.811–818, 2003.
- [14] Q. Huang, K. Yokoi, S. Kajita, K. Kaneko, Hirohiko Arai, Noriho Koyachi, and Kazuo Tanie: “Planning Walking Patterns for a Biped Robot,” IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol.17, no.3, pp.280–289, 2001.
- [15] H. Kondo, A. Takanishi, and K. Hashimoto: “FFT-based Short Period Walking Pattern Generation for Humanoid Robot Having Predictability of Environment,” Workshop on Predictive Models in Humanoid Gaze Control and Locomotion in the 2010 Robotics: Science and Systems, 2010.
- [16] T. Sugihara, K. Yamamoto, and Y. Nakamura: “Hardware design of high performance miniature anthropomorphic robots,” Robotics and Autonomous Systems, vol.56, pp.82–94, 2007.
- [17] T. Sugihara: “Solvability-Unconcerned Inverse Kinematics by the Levenberg-Marquardt Method,” IEEE Transaction on Robotics, vol.27, no.5, pp.984–991, 2011.