

# 人間型ロボットの関節トルク最小化に基づく目標 ZMP 軌道の生成

東京大学工学部 ○学 杉原知道 学長 阪憲一郎 正 稲葉雅幸 正 井上博允

## Generation of Referential ZMP Trajectory Based on Minimization of Joint Torque

Univ. of Tokyo ○T.Sugihara, K.Nagasaka, M.Inaba, H.Inoue

**Abstract :** This paper proposes a method for making the referential ZMP (Zero Moment Point) trajectory for humanoid based on a minimization of joint torque. How to design the trajectory usually depends on the intention of designer. But, it is natural to think the ZMP trajectory should be physically optimized. The result of numerical experiment shows the validity of the method.

**Keywords :** Humanoid, Biped locomotion, Motion Design, Numerical Optimization, ZMP

### 1 はじめに

脚ロボット動作の安定性の指標を記述するために ZMP (Zero Moment Point)<sup>[1]</sup> を用いることが有効である。予め設定した ZMP の目標軌道に実際の ZMP が追従するような制御を行なうことで、安定性の高い動作を可能にする方法がこれまでに考案され、それによって極めて安定な歩行動作も実現されている<sup>[2]</sup> が、この目標 ZMP 軌道自体の設計方法に関しては未だ十分な研究がなされていない。

従来の研究では、目標 ZMP 軌道は人間のものを参考に設計者が経験的に定めている例が多い<sup>[3]</sup> が、人間の ZMP 軌道は何らかの物理的評価 (例えば動作効率など) に従う最適化の結果得られると推測され、ロボットにおいてもそのような方法でこれを設計するのが相応しいと考える。

本研究では物理的評価として動作時の関節トルクを最小化するように、オフライン計算によって目標 ZMP 軌道を設計する手法を提案する。また、その手法を用いて実際に軌道を生成する。

### 2 関節トルク最小化に基づく目標 ZMP 軌道の生成

#### 2.1 目標 ZMP 軌道に対する動作決定と関節トルク算出

最適な目標 ZMP 軌道を解析的に得るのは困難なので、反復法によってこれを求める。そのためには、目標 ZMP 軌道に対して評価指標 (ここでは関節トルク) が一意に定まらなくてはいけない。本研究では、動作軌道から計算される ZMP が目標 ZMP に近づくよう動作軌道を変更する際に、足先軌道と上半身軌道は変えずに、体幹の並進のみ変化させる方法を採用する<sup>[4]</sup>。このとき全身の軌道は初期軌道と目標 ZMP 軌道の与え方のみで決定され、逆力学から各関節トルクが求まる。

具体的には関節トルクは、機構モデルの支持脚側足先リンクに全身動作を支える力を与えた下で、Newton-Euler の運動方程式から再帰的に求める。

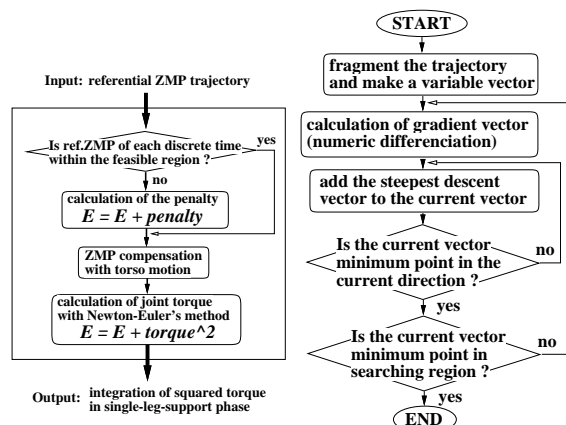
#### 2.2 ペナルティ法を用いた不等式制約条件付き最適化

目標 ZMP 軌道には、常に接地多角形の内部に含まれるという制約が付されるので、次に述べるペナルティ法を用いる。

設計軌道  $\mathbf{x}$  に不等式制約条件  $g(\mathbf{x}) \leq 0$  が課されているとき、評価関数に  $\xi \Phi(\mathbf{x})$  (ただし  $\xi$  は十分大きな定数、 $\Phi$  は  $g(\mathbf{x}) \leq 0$  ならば 0、 $g(\mathbf{x}) > 0$  ならば  $\{g(\mathbf{x})\}^2$ ) を加える。こうして制約条件を満たさない  $\mathbf{x}$  に対し評価関数値に大きなペナルティを課せば、最適解は自ずと制約条件を満たすことになる。

#### 2.3 評価関数の設定と時系列離散化による最適化計算

以上を踏まえて、評価関数を次式のように定める。



(A) Evaluation function (B) Optimal Gradient Method Algorithm

図 1: 評価関数と最適勾配法アルゴリズム

$$E = \int_0^T \left\{ \sum_{i=1}^N \{\tau_i(\mathbf{x}_{zmp}, t)\}^2 + \xi \Phi(\mathbf{x}_{zmp}) \right\} dt \quad (1)$$

但し、

$T$ : 動作時間

$N$ : ヒューマノイドの下肢自由度

$\tau_i$ :  $i$  番目の下肢関節トルク

$\mathbf{x}_{zmp}(t)$ : 目標 ZMP 軌道 (設計変数)

であり、 $\Phi$  は時刻  $t$  における目標 ZMP が接地多角形の内部にあれば 0、外部にあれば接地多角形の境界からの距離の自乗となるような関数とした。

この  $E$  を最小化させるような  $\mathbf{x}_{zmp}(t)$  を求めることが目的となるが、この曲線を  $n$  個の要素からなる時系列ベクトル  $\mathbf{q} = [q_1, \dots, q_n]$  に離散化すれば、評価関数  $E$  は次式のようにベクトル  $\mathbf{q}$  を変数にとる関数とみなせる。

$$E = E(\mathbf{q}) = E(q_1, q_2, \dots, q_n) \quad (2)$$

従ってこの問題は非線形  $n$  変数関数の最適化問題として扱うことができる。本研究ではこれに最適勾配法を適用する<sup>[4]</sup>。最適勾配法に用いる評価関数と反復計算アルゴリズムのフローチャートをそれぞれ図 1 の (A)、(B) に示す。

### 3 ヒューマノイド H5 前進歩行動作への適用

提案した手法を実際に用いて、ヒューマノイド H5 (図 2)<sup>[5]</sup> の前進動作 (歩行開始から停止まで 4 ステップ、歩行速度 15 [cm/sec]) における目標 ZMP 軌道を生成した。

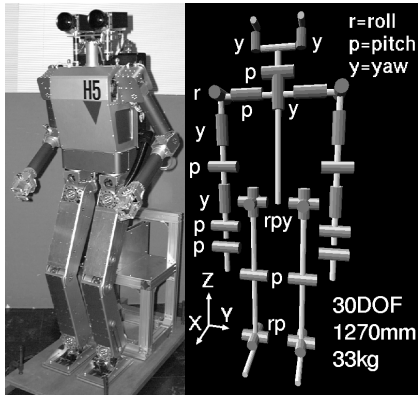


図 2: H5 の全身と自由度配置

ロボットの動作記述は、絶対座標系内での両足先軌道、両手先軌道、頭部姿勢、体幹軌道、目標 ZMP 軌道の時系列ベクトルを以て行なう。H5 では、目的に応じてこれらのパラメータを最適化する動力学的動作変換フィルタ [6] という考え方を導入しており、本研究で提案するアルゴリズムも、目標 ZMP 軌道最適化フィルタとして実装されている。

図 3は設計した動作における足先軌道である。進行方向を  $x$  軸、左右方向を  $y$  軸、鉛直方向を  $z$  軸とした。軌道生成の結果を図 4に示す。このとき、反復計算の収束に要した時間は 10 分強であった。図 4(A) のように、 $x$  方向に関しては体幹を早めに前方に送り出すような軌道、 $y$  方向に関しては大きめに体幹を振るような軌道が得られた。これは関節出力でなく転倒モーメントによって駆動力の多くを得ようとしたためだと考えられる。

また、式 1において  $\tau_i^2$  を  $\tau_i \theta_i$  に置き換えれば、これは運動エネルギーに着目した評価関数となる。これを用いて同様の計算を行なった。その結果は図 5であり、脚軌道と体幹軌道の間にやや位相差があるような結果が得られた。

得られた軌道を用いて H5 による歩行実験を行ない、動作を確認した。

#### 4 結論

従来の研究で物理的根拠の薄かった目標 ZMP 軌道を、与えられた条件下で関節トルクを最小化するように設計する手法を考案した。実際にその手法を用いて、平地での歩行動作のための目標 ZMP 軌道を設計し、実機 (H5) による動作検証を行なった。

人間の ZMP 軌道は何に基づいて生成されるのか、これが現在の関心の的であり、本論文では試験的に関節トルク及び運動エネルギーに着目した。他にも、重心の並進加速度や床反力など、色々な評価方法が考えられる。今後、様々な評価関数について同様の手法により目標 ZMP 軌道を生成し、比較検討していく予定である。

なお、本研究の環境は、日本学術振興会未来開拓推進事業 JSPS-RFTF96P00801 の補助を受けた。

#### 参考文献

[1] M.Vukobratović and A.A.Frank and D.Juricic. On the Stability of Biped Locomotion. In *IEEE T.on Biomed.Engg.BME-17*, No. 1, pp. 25-36, 1970.  
 [2] Kazuo Hirai. Current and Future Perspective of Honda Humanoid Robot. In *In Proceeding of 1997 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS'97)*, pp. 500-508, 1997.

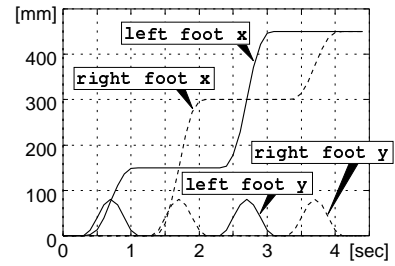


図 3: 設定した足先軌道

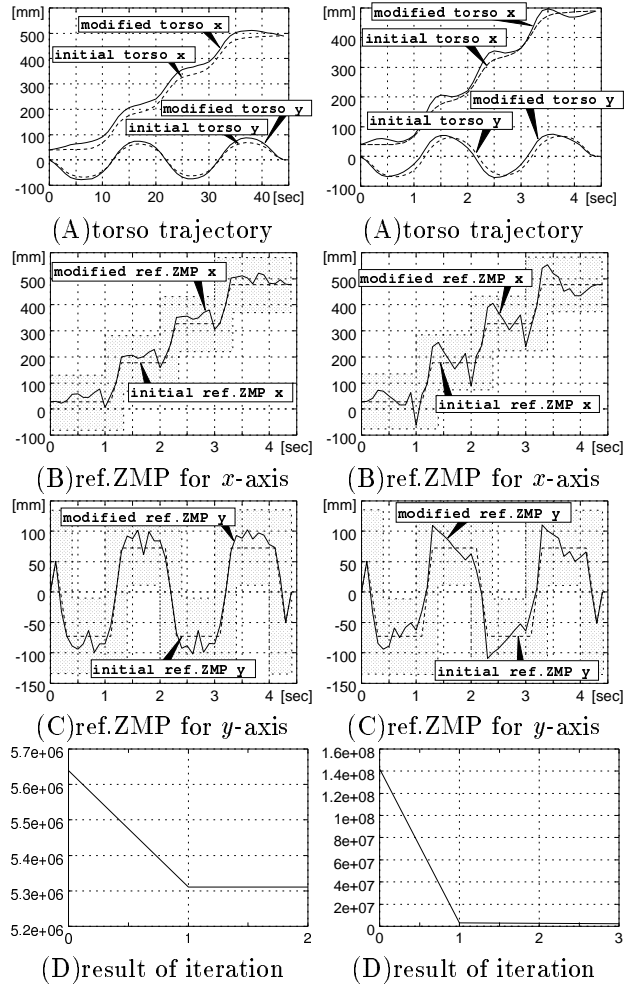


図 4: 関節トルク最小化による最適化

[3] A.DasGupta and Yoshihiko Nakamura. On the Synthesis of Motion for a Humanoid Robot using Human Motion Data. 第 16 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. 1351-1352, 1998.  
 [4] 長阪憲一郎, 稲葉雅幸, 井上博允. 最適勾配法を用いた人間型ロボットの動歩行パターン生成. ロボティクス・メカトロニクス講演会'99 講演会論文集, 2P1-78-110, 1999.  
 [5] 長阪憲一郎, 近野敦, 西脇光一, 北川知伸, 杉原知道, 稲葉雅幸, 井上博允. ダイナミックヒューマノイド H5 の開発. 第 16 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. 837-838, 1998.  
 [6] 長阪憲一郎, 稲葉雅幸, 井上博允. 動力学的動作変換フィルタ群を用いた人間型ロボットの全身行動設計. 第 17 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 1999.