

倒立振子に基づいた ZMP 操作によるヒューマノイドの実時間動作生成

○学 杉原知道 (東大) 正 井上博允 (東大)

Real-Time Motion Generation of Humanoid with ZMP Actuation based on Inverted Pendulum

*Tomomichi SUGIHARA (Univ. of Tokyo), Hirochika INOUE (Univ. of Tokyo)

Abstract— Humanoids must have much better reflexes to act in the real environment with people. We suppose the real-time motion generation method for humanoids with ZMP actuation based on the inverted pendulum control, which can give humanoids such higher activities. The algorithm, and the validity of it are shown.

Key Words: Humanoid, Real-Time Motion Generation, ZMP actuation, Inverted Pendulum Control

1. はじめに

全身型ヒューマノイドは人間と相似な形態を有することから、人間の為に設計されたインフラ内での運用に適し、共存する人間への高い親和性が期待されている。このような期待に応えるには、

- 環境との干渉・衝突などの突発的な外乱
- 操縦者による急激な指令変更

などに即座に反応し、転倒せず動作を継続出来る高い運動能力が不可欠である。そのためには、系が本質的に有するダイナミクスを積極的に活用し、瞬間瞬間の状態に応じて適切に重心の運動を制御することが求められる。

本研究では、上記のような要求に応え、ヒューマノイドに高い運動能力を付与することを目的とし、脚動作系が ZMP (Zero Moment Point; 系が受ける床反力の重心)¹⁾ を支持点とした倒立振子と同様のダイナミクスを有することに基づいて、ZMP を操作することにより重心速度を制御する実時間動作生成手法を提案する。

同様の思想に基づいた研究例もあるが^{2, 3)}、脚質量が体幹と比較して無視出来るようなボディを仮定している、或いは特定の脚機構に特化しているなど、実用性・汎用性の点で問題があった。本研究で提案する手法は、制御対象となる脚ロボットのモデルを簡略化することなく、また特定の機構に限定せず、十分な実用性と汎用性を有している。

2. 実時間動作生成アルゴリズム

脚動作系は通常、環境と複数の点で 3 次元的に接触するが、全ての外力の合力が仮想的な床面上のある一点から系に作用していると思えることも出来る。そのような仮想的な床面上における外力の作用点が ZMP である。このとき運動方程式は、重心を x_G , ZMP を x_{ZMP} , 重力加速度を g とおくと、床面の高さ $z = z_{ZMP}$ を与えることによって近似的に次のように表される。

$$\ddot{x}_G = \omega_G^2 (x_G - x_{ZMP}) \quad (1)$$

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

$$\left(\text{ここで } \omega_G \equiv \sqrt{\frac{\ddot{z}_G + g}{z_G - z_{ZMP}}} \text{ とおいた。} \right)$$

これは脚ロボットが、Fig.1 のように ZMP を支持点とする倒立振子と見なせることを意味している。従って、倒

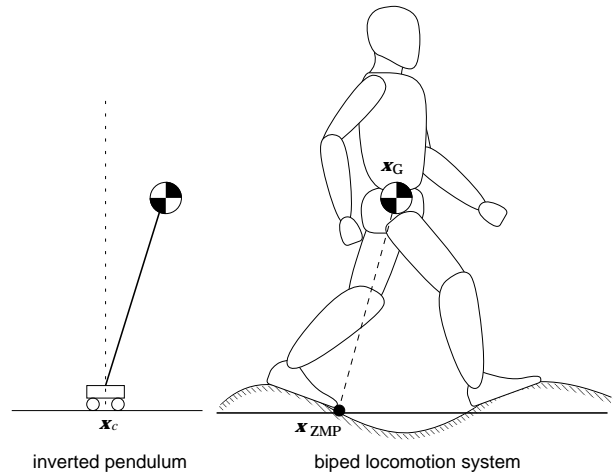


Fig.1 Inverted Pendulum and Legged Robot

立振子の制御を応用して能動的に ZMP を操作し、重心を制御することが可能である。具体的には、次のようなアルゴリズムに従って脚ロボットの重心速度を制御しつつ、全身動作を実時間で生成する。

1. 目標 ZMP の決定

倒立振子の速度制御を応用し、与えられた目標速度と現在の重心の運動状態から操作量としての目標 ZMP ${}^{ref}x_{ZMP}$ を決定する。その際、目標 ZMP が接地多角形内に維持されるようにする。

2. ZMP 制御

実 ZMP が目標 ZMP に一致するよう

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

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

とする (${}^{ref}\omega_G$ は鉛直方向の目標運動より独立に決まる)。これを制御周期で積分し、瞬間的な重心の目標速度 (厳密目標重心速度) ${}^{ref}\dot{x}_G$ を決定する。

3. 厳密目標重心速度の全自由度への分配

重心速度が厳密目標重心速度に一致するように全関節角の目標速度を定める。重心 x_G は全身関節角ベクトル θ の関数であり、次のような全身重心

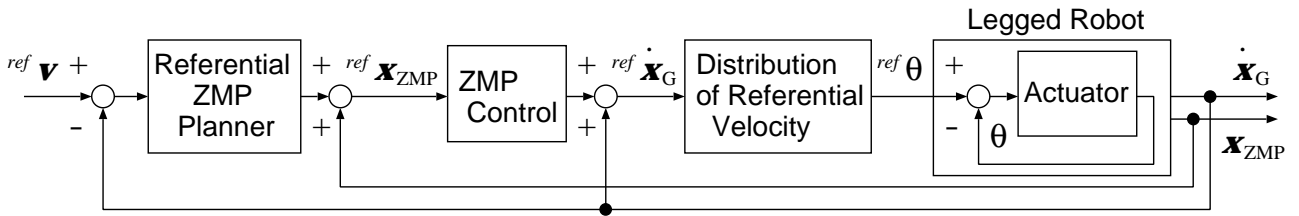


Fig.2 Block chart of real-time motion generation method for legged robot

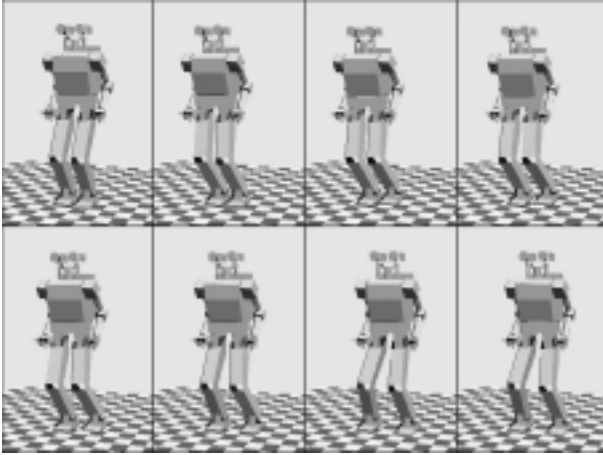


Fig.3 A stepping motion with an impact

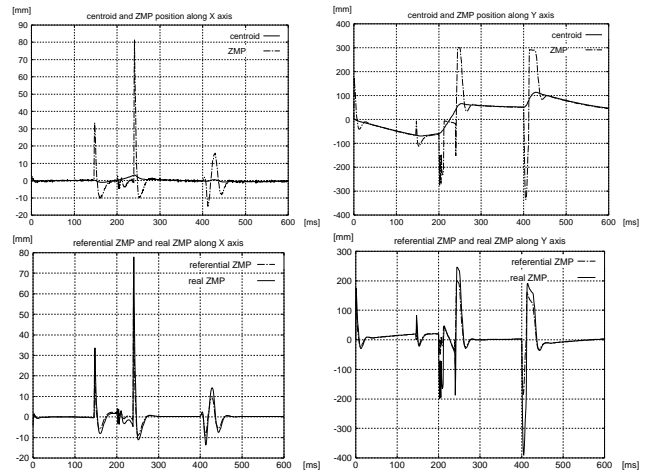


Fig.4 Loci of COG, ref.ZMP and real ZMP

Jacobian J_G が存在する.

$$\dot{x}_G = \frac{\partial x_G}{\partial \theta} \dot{\theta} \equiv J_G \dot{\theta} \quad (5)$$

式 (5) と手先や足先の動作等に関する条件式を連立すれば、関節角速度の満たすべき式が得られる。これを重み付き一般化逆行列を用いて解くことにより、全関節角の目標速度 ${}^{ref}\dot{\theta}$ が求まる。

4. ロボットの全身動作生成

各関節が目標速度に追従するように制御し、その結果としてロボットの全身動作が生成される。

以上をまとめた制御ブロック図を Fig.2 に示す。

3. シミュレーションによる検証

提案する手法の正当性を検証するため、

- 両足接地時の 3 次元的重心移動動作
- 片足昇降動作及び両足踏み換え動作
- 足の前方踏み出し動作及び前進動作

などの動作をシミュレータ上で生成した。実ヒューマノイドとしては H5⁴⁾ を想定した。

また、動作中に強い力積を与え、そのような場合でも転倒することなく動作を継続出来ることを確認した。Fig.3 は、片足昇降動作中に横方向に強い力積を与えたときの動作を示す動画のスナップショットである。またこの動作における重心、目標 ZMP 及び実 ZMP の軌跡を Fig.4 に示す。ZMP 軌跡は体幹から見た座標系に変換されている。実 ZMP が目標 ZMP に比較的精度良く追従していることが分かる。

4. おわりに

実環境中におけるヒューマノイドの運用を考えたときに生じ得る突発的な外乱や指令変更にも即座に対応出来るような、高い運動能力を付与すべく、ZMP 操作による重心速度制御を基軸とした実時間動作生成アルゴリズムを開発した。またそのアルゴリズムの正当性をシミュレーションにて検証し、強い外乱を受けても転倒することなく動作を維持出来ることを示した。

今後は、i) より高精度な ZMP 操作手法 ii) 自在な脚動作を実現する遊脚制御法 iii) 提案手法を組み込んだ操縦・制御システム等の開発に取り組み、跳躍や走行などの、より自在な全身動作を実現出来るような方法へと拡張していく予定である。

参考文献

- 1) Miomir Vukobratović, B.Borovac, D.Surla, D.Stokić. *Biped Locomotion: Dynamics, Stability, Control and Application*, Vol. 7 of *Scientific Fundamentals of Robotics*. Springer-Verlag, 1990.
- 2) 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.
- 3) 小幡智, 藤本康孝, 河村篤男. 床反力制御による二足歩行ロボットの姿勢制御実験. 第 16 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. 1117-1118, 1998.
- 4) 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.