

加速度補正によるヒューマノイドロボットの高精度 ZMP 操作

○正 杉原知道 (東大) 正 中村仁彦 (東大)

Precise ZMP Manipulation on Humanoid Robots with Acceleration Offset

*Tomomichi Sugihara (Univ.of Tokyo) and Yoshihiko Nakamura (Univ.of Tokyo)

Abstract— This paper refines a whole-body cooperative ZMP manipulation. An acceleration offset due to the effect of moment around COG is estimated from the error between the desired ZMP and the real, and enables more precise manipulation. The efficacy of proposed particularly appears in responsive motion.

Key Words: Humanoid robot, ZMP manipulation, Legged motion control, COG Jacobian

1. はじめに

脚ロボットは慣性系に直結した駆動源を持たず、環境との相互作用を通して関節力を反力に変換することで初めて運動できる。従って反力をいかに操作するかが制御の要となる。このとき、環境との接触状態に応じて課せられる力学的制約を比較的簡単に考慮するため、床面上の圧力中心である ZMP[1] および垂直反力と鉛直軸回りモーメントの組で反力を置換することが有効である。特に ZMP は水平方向運動との関係が深く、脚ロボットの移動制御において重視されている。

ZMP の操作に関してはこれまでに、足首トルクを用いる方法 [2, 3, 4] や体幹加速を用いる方法 [5, 6] などが提案されているが、大自由度を有するヒューマノイドロボットにおいては更に、系全体の振舞いを破綻させないよう、全身運動と ZMP の挙動とを見通しよく関連付けることが望ましい。ZMP を制御対象と捉える方法 [7, 8] もあるが、本来 ZMP は力と同一の次元を有するため躍度やトルク変化率の操作を要求し、実用上困難である。

筆者ら [9] は、重心ヤコビアンを用いた全身協調 ZMP 操作法を提案している。これは質量集中モデルに基づくため、必ずしも良好な近似とはなっていない。大きな加速を伴う即応的な運動になると、ZMP に関する制約はより厳しくなり、精密な操作が求められる。本稿では、重心回りモーメントの影響をオンラインで評価し、重心加速度を補正することによって、より高い ZMP 操作精度を簡単に実現する方法を提案する。

2. 全身協調 ZMP 操作 [9]

重心を $\mathbf{p}_G = [x_G \ y_G \ z_G]^T$, ZMP を $[x_Z \ y_Z \ z_Z]^T$ とし、近似的に全質量が重心に集中したモデルを仮定すると、水平方向の運動方程式は次式で表される。

$$\ddot{x}_G \simeq \omega_G^2 (x_G - x_Z) \quad (1)$$

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

ただし

$$\omega_G^2 \equiv \frac{\ddot{z}_G + g}{z_G - z_Z} \quad (3)$$

g は重力加速度であり、 \ddot{z}_G は独立に与える。目標 ZMP 及び現在の重心位置を Eq.(1)(2) の右辺に代入すれば、目標 ZMP を実現する重心加速度が得られる。

また重心の運動は次式のように、重心ヤコビアン \mathbf{J}_G によって全関節角 $\boldsymbol{\theta}$ の運動と関係付けられる。

$$\dot{\mathbf{p}}_G = \mathbf{J}_G \dot{\boldsymbol{\theta}} \quad (4)$$

従って、Eq.(1)(2) を 1 階積分して Eq.(4) に代入した後、 $\boldsymbol{\theta}$ について解けば、近似的ではあるが、比較的低い計算コストで所望の外力あるいは ZMP を全身の運動に還元することが可能となる。

3. モーメントを考慮した加速度補正

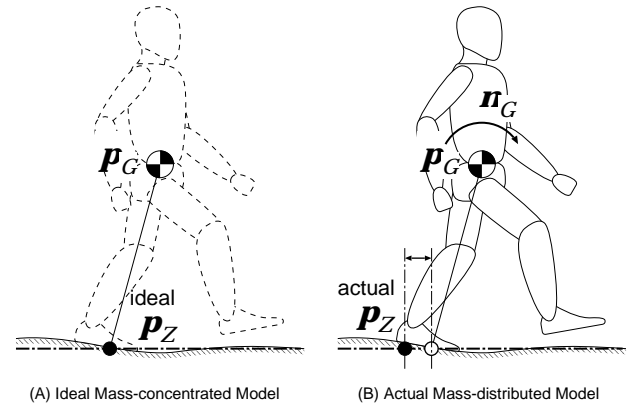


Fig.1 ZMP offset due to moment around COG

実際のロボットにおいては、Eq.(1)(2) で仮定したモデルとは異なり、質量は全身に分布しているために、重心回りにはモーメント $[n_{Gx} \ n_{Gy} \ n_{Gz}]^T$ が生じる。これを考慮した厳密な運動方程式は次のようになる。

$$\ddot{x}_G = \omega_G^2 (x_G - x_Z) + \alpha_x \quad (5)$$

$$\ddot{y}_G = \omega_G^2 (y_G - y_Z) + \alpha_y \quad (6)$$

ただし

$$\alpha_x \equiv -\frac{n_{Gy}}{m(z_G - z_Z)} \quad (7)$$

$$\alpha_y \equiv \frac{n_{Gx}}{m(z_G - z_Z)} \quad (8)$$

で、 m はロボットの質量である。Fig.1 に示すように、オフセット α_x, α_y が原因となり、Eq.(1)(2) の重心加速度を発生した場合であっても目標 ZMP と実 ZMP との間には誤差が生じる。

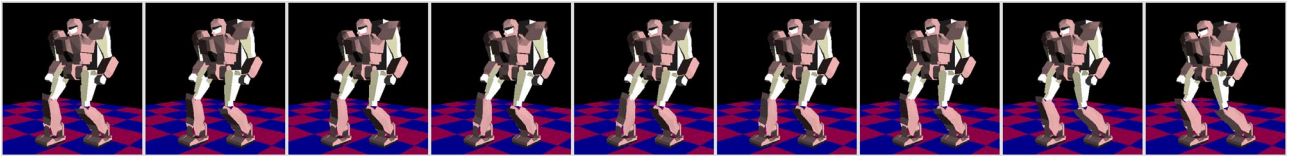


Fig.2 Snapshot of a rock'nroll motion through ZMP manipulation

ここで重心回りの回転運動が並進運動に比べ緩慢で、 α_x, α_y は十分短い時間 Δt ではほぼ定数と見なせると仮定し、その見積値をそれぞれ $\tilde{\alpha}_x, \tilde{\alpha}_y$ とすると、目標 ZMP $[\text{ref } x_Z \text{ ref } y_Z \text{ ref } z_Z]^T$ と等価な水平重心加速度 $\text{ref } \ddot{x}_G, \text{ref } \ddot{y}_G$ は次式で計算される。

$$\text{ref } \ddot{x}_G = \text{ref } \omega_G^2 (x_G - \text{ref } x_Z) + \tilde{\alpha}_x \quad (9)$$

$$\text{ref } \ddot{y}_G = \text{ref } \omega_G^2 (y_G - \text{ref } y_Z) + \tilde{\alpha}_y \quad (10)$$

ただし

$$\text{ref } \omega_G^2 \equiv \frac{\text{ref } \ddot{z}_G + g}{z_G - \text{ref } z_Z} \quad (11)$$

$\text{ref } \ddot{p}_G$ に十分近い \ddot{p}_G を発生できるならば、 α_x, α_y は Eq.(5)(6) (9)(10) から次のように求まる。

$$\alpha_x = \tilde{\alpha}_x - \omega_G^2 (\text{ref } x_Z - x_Z) \quad (12)$$

$$\alpha_y = \tilde{\alpha}_y - \omega_G^2 (\text{ref } y_Z - y_Z) \quad (13)$$

すなわち、目標 ZMP と実 ZMP の差から見積値 $\tilde{\alpha}_x, \tilde{\alpha}_y$ をより正確な値に更新し、重心加速度を Eq.(9)(10) によって補正すれば、ZMP 操作精度の向上が期待できる。

4. シミュレーション

小型ロボット [10] を想定し、Fig.2 に示すような、両足支持を維持した状態での重心運動制御をシミュレート (逆力学) した。ZMP 操作量決定には PD 制御を適用し、比例ゲインは x, y 方向共に -5 とした。これは比較的高い値であり、大きな瞬発力を得られるようになるが、反面、目標 ZMP が頻繁に支持領域外に出てしまう (その場合は支持領域上の最近傍点で置き換える)。このため、許容できる ZMP の誤差範囲が小さくなる。

Fig.3 において、(A) は質量集中モデルに基づく場合、(B) は提案方法に基づく場合の ZMP の軌跡であり、また (C) は目標 ZMP と実 ZMP との差である。前者の場合は目標 ZMP が支持領域縁にあるときに ZMP が支持領域外に出てしまう期間が長い。実際の運動においてはこれが領域縁回りのモーメントに変化し、転倒の可能性が高くなる。一方後者の場合、立ち上がりの瞬間は誤差が大きいが、その後すぐに差が減少しており、より良好な近似となっていることを確認できる。

5. おわりに

全身協調 ZMP 操作において、ZMP の誤差から重心回りのモーメントの影響を評価し重心加速度を補正することで、高精度な操作を実現する方法を提案した。ZMP に関する制約がより厳しい、大きな加速を伴う運動の制御に特に効力を発揮すると期待される。

なお本研究は、科学研究費補助金基盤研究 (S) (課題番号: 15100002) の支援を受けた。

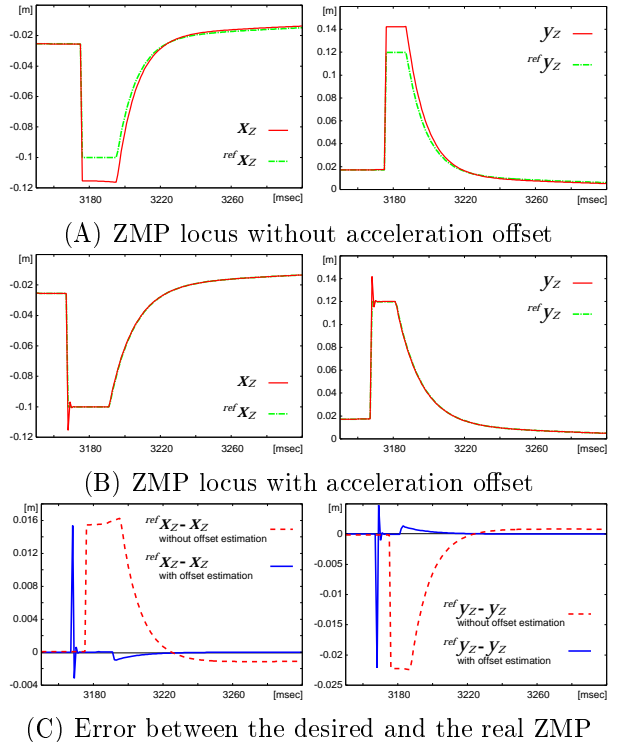


Fig.3 Loci of the desired and the real ZMP

参考文献

- [1] M. Vukobratović and J. Stepanenko. On the Stability of Anthropomorphic Systems. *Mathematical Biosciences*, Vol. 15, No. 1, pp. 1–37, 1972.
- [2] 空尾ら. ZMP と重心制御の融合による 2 足歩行ロボットの安定動作歩行. 電気学会産業計測制御研究会, pp. 35–40, 1997.
- [3] 梶田ら. 高精度 ZMP 制御に基づくヒューマノイドロボットのバランス維持方式 (HRP 仮想プラットフォーム基本動作ライブラリ). 第 17 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. 1215–1216, 1999.
- [4] 野村ら. 足首トルク制御による歩行ロボットの ZMP 操作. 第 20 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 2002.
- [5] K. Hirai et al. The Development of Honda Humanoid Robot. In *Proc. of the 1998 IEEE Int. Conf. on Robotics & Automation*, pp. 1321–1326, 1998.
- [6] 長阪ら. 体幹位置コンプライアンス制御を用いた人間型ロボットの歩行安定化. 第 17 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 1999.
- [7] 梶田ら. 予見制御理論を応用した 2 足歩行パターン生成. 第 20 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 2002.
- [8] ナポレオンら. 人間型ロボットにおける ZMP 制御問題に関する解析. 第 21 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 2003.
- [9] T. Sugihara et al. Realtime Humanoid Motion Generation through ZMP Manipulation based on Inverted Pendulum Control. In *Proc. of the 2002 IEEE Int. Conf. on Robotics & Automation*, pp. 1404–1409, 2002.
- [10] 杉原, 中村. 高機動性獲得に向けた運動制御実験のための小型ヒューマノイドロボットの開発. 第 21 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 2003.