

# 接触状態変化に対し低感度な重心-ZMP モデルに基づく二脚ロボット制御

土壁創一 (キヤノン株式会社) † ○杉原知道 (大阪大学)

## 1. はじめに

人型ロボットの運動においては、大自由度を有する全身を巧みに協調させながら、外界との接触力を操作し、また接触状態を不連続に切り替えることが要求される。上記のうち大自由度に起因する困難さを残りの二つの問題から分離する方法として、重心と ZMP[1] の関係に着目することの有効性が知られている [2, 3, 4]。これにより、複雑な全身運動の巨視的な振舞を比較的低次の力学系 (重心-ZMP モデル) でとらえることが可能になる。低次元化された空間にあってさえ制御器の設計は決して簡単ではないが、筆者ら [5] によるものなど、これまでに幾つかの方法が提案されてきた。

上記のアプローチにおいて、ZMP は二つの役割を持つ。一つは、力学的に許容される重心加速度を決定する役割である。ZMP をあたかも入力のように扱うことで、これが支持領域内に拘束されるという条件を直接的に考慮することができる。いま一つは、足昇降制御における指標としての役割である。ZMP が一方の足裏内にあれば、反対足を離床させることが可能である。しかし、ZMP は接触状態変化に敏感であるため、これを直接参照し足昇降すると挙動がしばしば不安定化する。

そこで本稿では、実測 ZMP を直接足昇降制御に用いるのではなく、期待する ZMP の位置 (目標 ZMP) に基づいて足昇降制御し、その一方で、目標 ZMP からの誤差補償 [6] を併用し、実際の接触状態との整合を図る方法を提案する。これにより、チャタリング等の接触状態変化に対しロバストな足先制御が達成される。

## 2. 重心-ZMP モデルに基づく人型ロボット制御系の設計と問題

人型ロボット重心の運動方程式は、次式で表される。

$$\ddot{\mathbf{p}} \times (\mathbf{p} - \mathbf{p}_Z) + \mathbf{n} = \mathbf{n}_Z \quad (1)$$

ただし、 $\mathbf{p}$  は重心位置ベクトル、 $\mathbf{p}_Z$  は ZMP 位置ベクトル、 $\mathbf{n}$  は重心まわり角運動量変化および地面以外から受ける外力によるトルク、 $\mathbf{n}_Z$  は ZMP まわりに作用する地面から受けるトルクであり、重力加速度を  $\mathbf{g}$  とすると、 $\mathbf{n}_Z \times \mathbf{g} = \mathbf{0}$  が成り立つ。これに対し重心-ZMP モデルは、次のように表現される。

$$\mathbf{g} \times (\ddot{\mathbf{p}} \times (\mathbf{p} - \mathbf{p}_Z)) = \mathbf{0} \quad (2)$$

$$\mathbf{p}_Z \in \mathcal{CH}(\mathcal{S}_L \cup \mathcal{S}_R) \quad (3)$$

ただし、 $\mathcal{S}_L$  および  $\mathcal{S}_R$  はそれぞれ左足および右足の接地領域であり、 $\mathcal{CH}(\dots)$  は  $\dots$  の凸包を意味する。式 (2) は式 (1) において  $\mathbf{n} \simeq \mathbf{0}$  と近似したものであり、2本の独立な式を持つ。例えば重心鉛直方向の加速度を別途与えることで、ZMP と重心加速度との関係が一

意に決定される。また式 (3) は、ZMP が支持領域内に拘束されることを表しているが、同時に、 $\mathbf{p}_Z \in \mathcal{S}_L$  ならば右足を、 $\mathbf{p}_Z \in \mathcal{S}_R$  ならば左足をそれぞれ離床可能であることも意味している。

重心-ZMP モデルを規範とした人型ロボット全身制御系の典型的な構成は、次のようである。i) ZMP を入力と見なし、支持領域内に収まる範囲で、重心に所望の振舞をとらせるための目標 ZMP を決定する。ii) 目標 ZMP と等価な重心運動を決定する。iii) 同時に、運動を安定に継続するための足の運びを決定する。iv) 重心と足および手先等の目標運動を、各関節の目標運動に分解する。v) 各関節をサーボ制御し目標運動に追従させ、全身運動を創出する。vi) ZMP および重心運動を推定し、制御器にフィードバックする。図 1(a) はこれを示したものである。i)~iii) を設計する上で、重心-ZMP モデルは有用な示唆を与える。すなわち、支持領域に整合する重心の振舞、および重心の長期的安定性を保証する支持領域変化を、ZMP を介することで直感的に決定することが可能になる。現実には ZMP を直接操作することはできないので、目標 ZMP を式 (2) に代入して等価な重心加速度を得る。また ZMP を参照することで、各足の離床の可否を判定できる。

ここにおいて、次の 2 つの問題がある。

1. 全身に質量が分布し外乱にさらされる人型ロボットにおいて、式 (2) は必ずしも良い近似とはならない。仮に重心に式 (2) で決まる加速度を高精度に与えられたとしても、角運動量変化や外力の影響で、ZMP は目標 ZMP と一致しない。
2. ZMP は接触状態の変化に敏感である。これを指標に足の離床・着床を制御した場合、支持状態が頻繁に切り替わり、ZMP はさらに激しく変化する。結果的にロボットの振舞は不安定になる。

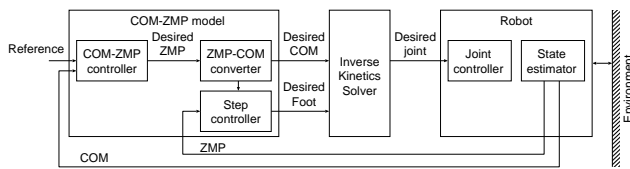
## 3. 接触状態変化に低感度な足昇降制御

前章で挙げた 2 つの問題に対処するため、制御系を図 1(b) のように構成する。以下はその説明である。

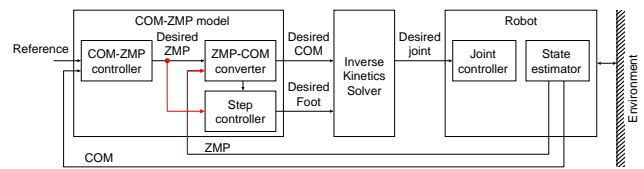
まず足昇降制御において、実測 ZMP でなく目標 ZMP を指標とする。目標 ZMP は、左右足でどのように地面に力を作用させたいかという意志を明確に反映している。実測された反力情報を頼りに足離床の可否を判断するのではなく、足を離床することが制御系にとって所望の挙動か否かを制御の拠り所にするということである。接触状態の情報を直接用いないため、結果的に、チャタリング等による接触状態の頻繁な変化に対しロバストな足先制御が達成される。

一方で、式 (2) のみに基づいて目標 ZMP から得た重心運動は角運動量変化や外力の影響を反映していないため、これに従って運動することが実際の接触状態との乖離を招く可能性がある。角運動量変化や外力の影響は、実測 ZMP と目標 ZMP との誤差として顕れる

†本研究は、第一著者が大阪大学において修士研究として行った。

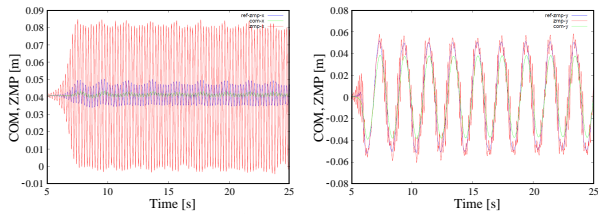


(a) 実測 ZMP に基づく足制御, ZMP 誤差補償なし

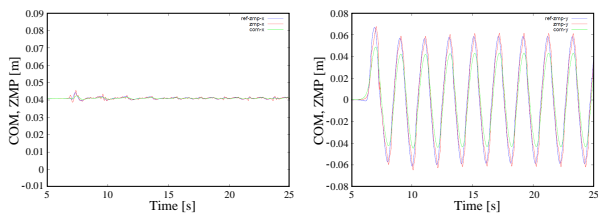


(b) 提案方法:目標 ZMP に基づく足制御, ZMP 誤差補償あり

図 1 重心-ZMP モデルに基づく二脚ロボット制御スキーム

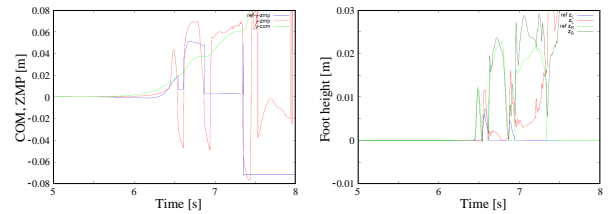


(a) ZMP 誤差補償なし, 左:前後, 右:左右

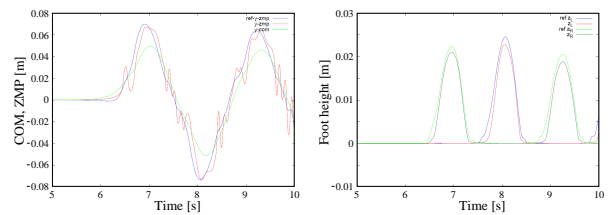


(b) ZMP 誤差補償あり, 左:前後, 右:左右

図 2 左右揺動運動時の重心, ZMP 軌跡



(a) 従来方法, 左:重心左右方向, 右:足鉛直方向



(b) 提案方法, 左:重心左右方向, 右:足鉛直方向

図 3 足踏運動時の重心, ZMP, 足先軌跡

ため, ZMP 誤差に基づいてこれを推定することが可能である. 仮にこれが ZMP まわりに重心を加速させるトルクに対して比較的緩やかに変化するならば, 目標重心加速度に推定された外乱の影響分を足し込み, 補正することが可能である. これは杉原ら [6] の方法の応用である. 詳細は上記の文献を参照されたい.

上記の二つは対になって機能する, すなわち後者によって ZMP の誤差をフィードバックし, 意図した接触状態と実際のそれとを整合させようとする機能が働いて初めて, 実測 ZMP でなく目標 ZMP を足昇降制御の指標に用いることが意味を持つことに注意されたい.

#### 4. シミュレーション

提案方法を人型ロボット [7] の足踏制御 [5] に適用し, Choreonoid [8] 上で効果を確認した. まず, 足踏を伴わない左右方向重心揺動制御を行った. 結果を図 2 に示す. 比較的低ゲインで各関節制御したため, ZMP 誤差補償を行わなかった場合, 重心揺動に伴って腕の受動的振りが発生し, (a) のように前後左右方向とも挙動が振動的になった. ZMP 誤差補償を行うと, (b) のように振動が抑制された. また図 3 は, 重心揺動に同期した足踏制御の結果である. 実測 ZMP に基づいて足踏を行わせようとした場合, (a) のように挙動が不安定となり 1 歩と継続できなかったが, 目標 ZMP に基づく提案方法では (b) のように安定に運動を継続できた.

#### 5. おわりに

重心-ZMP モデルに基づいた全身運動制御系の実装方法を提案した. 実測 ZMP を直接参照するのではなく, ZMP 誤差補償制御を併用して意図した接触状態と

実際のそれとを整合させようとしながら, 目標 ZMP に基づいて足昇降することで, 接触状態変化に対し低感度かつ安定な脚運動制御が可能となることを示した.

本研究は, 科学研究費補助金基盤研究 (B) (課題番号 #15H02762, 代表:杉原知道) の支援で行われた.

#### 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] 宮崎, 有本. 人間型二足歩行制御系の一設計法. 日本機械学会論文集 (C 編), Vol. 46, No. 408, pp. 913–921, 1980.
- [3] 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.
- [4] 杉原, 中村. ZMP-重心モデルと台車型倒立振りモデルのアナロジーによるヒューマノイドロボットの高機動化制御. 日本ロボット学会誌, Vol. 23, No. 8, pp. 74–83, 2006.
- [5] T. Sugihara. Consistent Biped Step Control with COM-ZMP Oscillation Based on Successive Phase Estimation in Dynamics Morphing. In *Proceedings of the 2010 IEEE International Conference on Robotics & Automation*, pp. 4224–4229, 2010.
- [6] 杉原, 中村. 非駆動自由度の陰表現を含んだ重心ヤコビアンによる脚型ロボットの全身協調反力操作. 日本ロボット学会誌, Vol. 24, No. 2, pp. 222–231, 2006.
- [7] T. Sugihara, K. Yamamoto, and Y. Nakamura. Hardware design of high performance miniature anthropomorphic robots. *Robotics and Autonomous System*, Vol. 56, pp. 82–94, 2007.
- [8] 中岡. 拡張可能なロボット用統合 GUI 環境 Choreonoid. 日本ロボット学会誌, Vol. 31, No. 3, pp. 226–231, 2013.