

2足歩行ロボットの歩行安定化のためのZMP外乱オブザーバ ZMP Disturbance Observer for Walking Stabilization of Biped Robot

80716399 佐藤智矢 (Tomoya Sato) Supervisor : 大西公平 (Kouhei Ohnishi)

1 序論

人型ロボットは人間環境への適応性が高く、実用化が期待されている。しかし、人型ロボットを実用化するためには、どのような地面でも安定に歩行できる必要がある。そこで、2足歩行ロボットの歩行安定化性能の向上を目指した研究を行った。

現在、2足歩行における安定性の指標として、Zero Moment Point (ZMP)[1]が広く用いられている。ZMPは床反力の中心点と一致し、ZMPが支持多角形の境界より内側に存在するとき、足裏は床面から離れることがない。したがって、ZMPを元に2足歩行ロボットを制御することで、転倒させずに動作を行うことが可能となる。これまで、ZMPを規範とした2足歩行の軌道計画法が研究されてきた。もし、モデル化誤差がなく外力が存在しなければ、目標としたZMPと実際のZMPが一致し、安定な歩行が実現される。しかし、実際にはモデル化誤差と外力の影響が存在する。本論文では、実際のZMPに対するモデル化誤差と外力の影響を「ZMP外乱」と定義する。目標軌道への追従を目的とした制御だけでは、ZMP外乱により不安定な歩行になってしまう可能性がある。そこで、実際のZMPの情報を元に軌道を補正し、歩行を安定化させる「歩行安定化制御」の研究が行われてきた。

従来の歩行安定化制御において、重心軌道を補正する手法は「位置補償」[2]と「加速度補償」[3]に分けることができる。位置補償は低周波のZMP外乱にのみ効果があり、加速度補償は高周波のZMP外乱にのみ効果がある。したがって、どちらを用いたとしても十分な歩行安定化制御を実現することは困難である。そこで本研究では、より補償帯域の広い歩行安定化制御手法の実現を目指す。

本論文では、外乱オブザーバ[4]と同様の構造を用いてZMP外乱を推定し、位置補償と加速度補償の両方を行うZMP外乱オブザーバを提案する。提案手法はフィルタを用いて補償する周波数帯域を分け、両補償法を用いるため補償帯域が広い。また、ZMP外乱オブザーバを不整地でも用いるために、不整地における安定性指標を提案する。2足歩行のシミュレーションと実験により提案手法の有効性を確認する。

2 歩行の安定性指標

本研究では、歩行の安定性指標としてZMPを用いる。ZMPは平面上に定義されるため、整地における安定性指標として使用されてきた。本研究では、ZMPを仮想的な平面上に定義することで、不整地における安定性指標を提案する。Fig. 1に仮想面に設定する仮想ZMPと仮想支持多角形の様子を示す。不整地を仮想面に変換することでZMPを整地と同様に扱うことが可能となる。

ここでZMPと2足歩行ロボットの重心の関係について述べる。ロボットを一質点系としてモデル化し、地面を平らと仮定して重心の高さを一定すると、ZMPと重心の関係は次式で表される[5]。

$$p_x = x - \frac{z_c}{g} \ddot{x} \quad (1)$$

p_x はZMPの進行方向の位置、 x は重心の進行方向の位置、 z_c は一定な重心の高さである。(1)式を用い、重心軌道を補正することで、ZMPを補正できる。

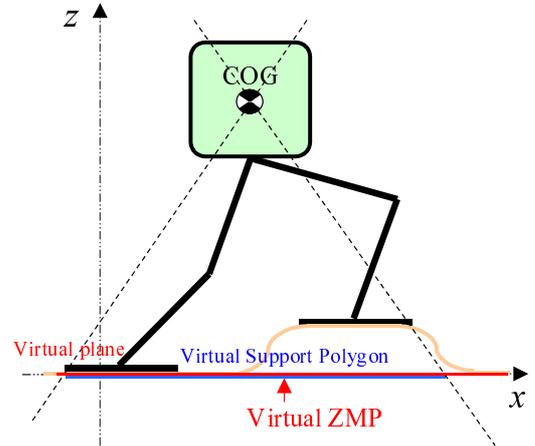


Fig. 1: Virtual ZMP on rough terrain.

3 歩行安定化制御

Fig. 2にZMP外乱オブザーバの構造を示す。まず、制御器への重心指令値と力センサからのZMP応答値からZMP外乱を推定する。そして、フィルタを用いてZMP外乱を周波数帯域ごとに分ける。低周波のZMP外乱に対しては位置補償を用い、高周波のZMP外乱に対しては加速度補償を用いる。

ZMP外乱オブザーバにおけるZMP外乱値からZMP補償値への周波数特性としてゲイン線図(Fig. 3(a))と位相線図(Fig. 3(b))を示す。ZMP外乱オブザーバは、低周波と高周波のZMP外乱の補償に効果があることがわかる。歩行安定化制御では、(1)式の特長により全帯域において補償を行うと重心補償値が発散する[3]。ZMP外乱オブザーバは重心補償値が発散しない補償を行うため、Fig. 3のような周波数特性となる。

ZMP外乱オブザーバは、モデル化誤差、外力、ZMPの規範誤差の影響等をすべてZMP外乱とみなし補償する。また、従来法より広い周波数帯域での補償が可能である。したがって、高性能な歩行安定化が実現できる。

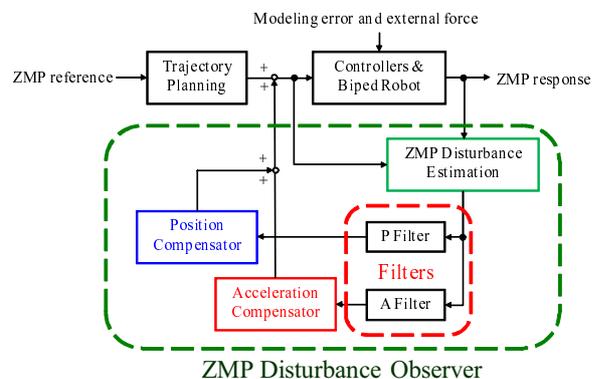


Fig. 2: Structure of ZMP disturbance observer.

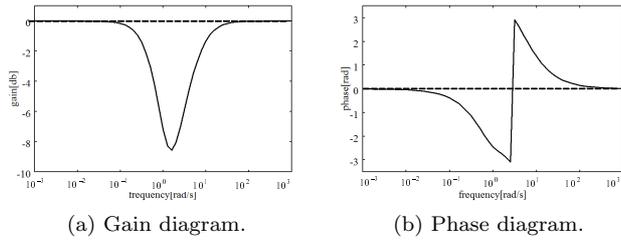


Fig. 3: Frequency characteristics of ZMP disturbance observer.

4 シミュレーション

整地において従来法と ZMP 外乱オブザーバを用いた歩行のシミュレーション結果を示す。Fig. 4(a) に歩行安定化制御を用いていない場合、Fig. 4(b) に位置補償のみを用いた場合、Fig. 4(c) に加速度補償のみを用いた場合、そして Fig. 4(d) に ZMP 外乱オブザーバを用いた場合の ZMP の結果をそれぞれ示す。各グラフでは、ZMP の応答値、支持多角形の前方位、支持多角形の後方位、ZMP の参照値を示している。ZMP の応答値が支持多角形の内側であれば、足裏が床面から離れる可能性がなく安定な歩行が可能である。また、ZMP の誤差値が少ない方がより安定な歩行が可能であるといえる。

Fig. 4(b) では、定常的な誤差は減らせているが、変動的な誤差は減らせていない。Fig. 4(c) では、変動的な誤差は抑えられているが、定常的な誤差は減らせていない。Fig. 4(d) では、定常的な誤差と変動的な誤差の両方を減らせている。また、Fig. 4(d) の結果が最も ZMP の誤差値が少ない。したがって、ZMP 外乱オブザーバの有効性が確認できた。

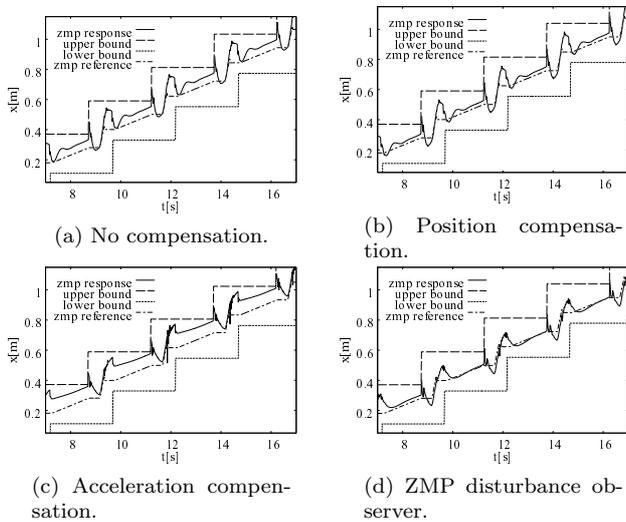


Fig. 4: ZMP results in simulation.

5 実験

整地において ZMP 外乱オブザーバを用いた歩行の実験結果を示す。Fig. 5(a) に ZMP 外乱オブザーバを用いていない場合、Fig. 5(b) に ZMP 外乱オブザーバを用いた場合の ZMP の結果をそれぞれ示す。Fig. 5(a) では、ZMP の誤差値が大きく、ZMP の応答値が支持多角形の境界まで移動している箇所がある。つまり、不安定な歩行となっている。Fig. 5(b) では、ZMP の誤差値が少なく、安定な歩行が実現できている。したがって、整地の実験において ZMP 外乱オブザーバの有効性が確認できた。

不整地において ZMP 外乱オブザーバを用いた歩行の実験結果を示す。本実験では不整地として、0.1m の段差を用意した。ま

た、提案した不整地における安定性指標を用いた。Fig. 6(a) に ZMP 外乱オブザーバを用いていない場合、Fig. 6(b) に ZMP 外乱オブザーバを用いた場合の ZMP の結果をそれぞれ示す。Fig. 6(a) と Fig. 6(b) では、9s-12s のところで段差を踏んでいる。Fig. 6(a) では、ZMP の誤差値が大きく、ZMP の応答値が支持多角形の境界まで移動している箇所がある。つまり、不安定な歩行となっている。Fig. 6(b) では、ZMP の誤差値が少なく、安定な歩行が実現できている。したがって、不整地の実験において ZMP 外乱オブザーバの有効性が確認できた。

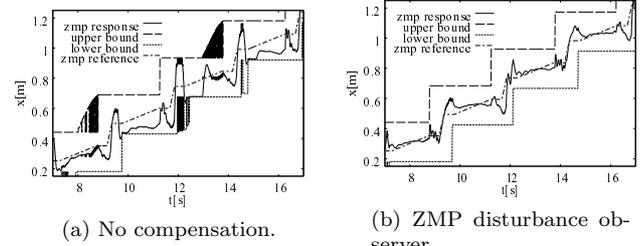


Fig. 5: ZMP results in experiment.

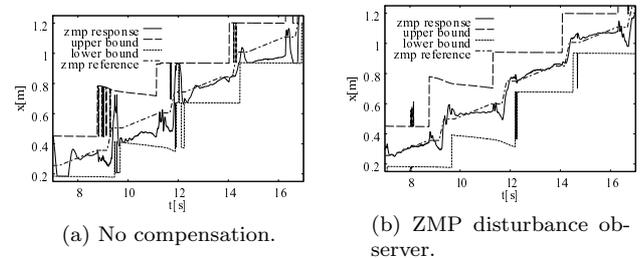


Fig. 6: ZMP results on uneven terrain in experiment.

6 結論

本論文では、2 足歩行ロボットの歩行安定化のための ZMP 外乱オブザーバを提案した。ZMP 外乱オブザーバは、従来の歩行安定化制御より補償帯域が広い。ZMP 外乱オブザーバを用いることで、ZMP 外乱下においても安定な 2 足歩行が可能となる。また、ZMP 外乱オブザーバを不整地でも用いるために、不整地における安定性指標を提案した。2 足歩行のシミュレーションと実験により提案手法の有効性を確認した。

参考文献

- [1] M. Vukobratovic, B. Borovac, D. Surla and D. Stokic: "Biped Locomotion – Dynamics, Stability, Control and Application –", Springer-Verlag (1990).
- [2] N. Napoleon, S. Nakaura and M. Sampei: "Balance Control Analysis of Humanoid Robot based on ZMP Feedback Control", Proceedings of the 2002 IEEE/PSJ Intl. Conference on Intelligent Robots and Systems FPFL, Lausanne, Switzerland, pp. 2437-2442 (2002-10).
- [3] 長坂憲一郎, 稲葉雅幸, 井上博允: 「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, pp. 1193-1194 (1999-09).
- [4] K. Ohnishi, M. Shibata and T. Murakami: "Motion Control for Advanced Mechatronics", IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol. 1, No. 1, pp. 56-67 (1996).
- [5] 梶田秀司: 「ヒューマノイドロボット」, オーム社 (2005-04).