

両脚支持期におけるメモリ・ベースト二足歩行制御

産業技術総合研究所 デジタルヒューマン研究センター 宮腰 清一

Memory based biped walking control during the double support phase

Seiichi MIYAKOSHI Digital Human Research Center, AIST

Abstract: Walking speed is to be controlled in the double support phase, than in the single support phase, because of the expanse of foot-ground contact convex hull as a basis. However, at the initial and terminal moment of the double support phase, drastic structural change of the system occurs accompanied by foot-ground contact, beside that the time period of double support has only about twenty percent of the whole walk cycle time. It is also not so easy to derive advantage of closed link structure of the double support since its degenerate degrees of freedom. In this research, parameterized set of periodic trajectories are generated and stored to a data base in advance through the use of a dynamical simulator. An actual state is the key to search the corresponding motion parameters in the data base, and balancing locomotion control is performed in real time by replaying the motion generation through the motion parameters. This report shows the result that the memory based technique, which is effective in the single support phase, is also applied to the control in the double support phase.

1 緒言

近年、ヒューマノイド・ロボットの開発と共に、二足歩行のための機構・制御の研究が進められ、大きな進展を見せている。しかし、目標としているヒトの歩行とは、安定性・歩行効率・動作の外見的洗練度において、まだ大きな違いがある [1][2]。

本研究においては、目標軌道とするための周期軌道をオフラインで多数用意しておき、状態空間内のそれらの多数軌道群による帯状の軌道上を、実際の状態に応じて遷移していく事で歩行制御を行う方法を提案してきた [3]。この方法は、オフラインで軌道(群)を用意するのでメモリ・ベースト運動制御の一手法と言えるが、求める軌道(群)は周期軌道であれば良い¹ので、ZMPベースの運動制御のように、全時間での(全方向への)可制御性を前提としない。また、軌道(群)を求めておく時に、アクチュエータと制御系を含んだシステムを用いれば、受動歩行のように軌道(運動パターン)が一つに拘束されてしまうことなく、様々な運動パターン(例: 歩幅の広い・狭い、歩調の速い・遅い)を生成することができる。また、軌道を自由に設定できる事は、システムを簡素化するために特殊な仮定や拘束を置く必要が殆ど無くなる、と言う事を意味するため、[4][5]の手法よりも自由度が高い。また、モデル化が可能であれば、制御系やアクチュエータの遅れや非線形性も含めておく事ができる。

二足歩行には、バランス維持制御と目標値(歩行速度等)に向かっての運動制御の二者の両立が必要である。これまで、単脚支持期の制御に、本手法を導入し、バランス維持性能において良い結果を得る事ができた [3] が、その時には、両脚支持期において有効な制御を行っていなかったため、目標値に向かっての運動が行えず、結果的に歩行速度が一定しない酔歩のようになってしまっていた。今回、両脚支持期においても、本手法を適用したので、報告する。

本研究の枠組みは、また「教師あり学習」制御の一手法(前段階)である、と見る事ができるが、情報の表現、圧縮、検索、学習等については今後の課題として、現時点では、軌道の時系列データを直接保存する形の最も直接的な実装を行っている。

2 シミュレーション・モデル

コンパス状二足歩行モデル [6] で、矢状面内における二足歩行機構をモデル化した [7]。Fig. 1 右のモデルは、脚が分布質量、上体が股関節部への集中質量、回転型股関節、脚部直動関節と点状足先から成る。こうした「竹馬」型のロボットの制御は、三浦、下山によって、先駆的な研究が行われた [8]。

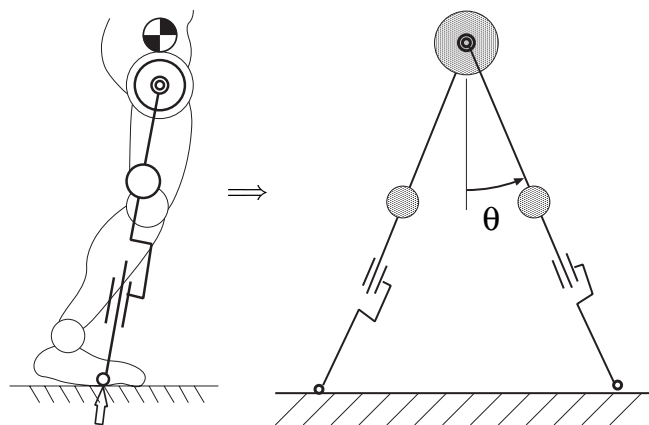


Fig. 1: Biped walker model: a compass-like leg configuration provides a simplified and equivalent human-leg like mechanism

シミュレーションは、制御系に MaTX, 機械系に DADS を用いた。サンプリング・インタバルは 1[ms] で行った。DADS 内部での計算は可変刻み幅であるため、さらに平均的に 4 倍程度細かい刻みで計算されている。

¹この方法を歩行開始・停止に用いる場合には、周期軌道(群)ではなく、指定の初期状態と最終状態との間を結ぶ、一過性の軌道(群)

3 多重軌道推移制御

3.1 単脚支持期

単脚支持期において、様々な歩幅と歩行周期での事前のシミュレーション・データから、時々刻々の状態（支持脚の角度・角速度）をキーに、適切な姿勢目標値の検索を行う形の制御を行い、転倒回避の意味でのロバスト性において、良好な結果を得た [3]。

しかし、単脚支持期のみでの制御（着地点制御）であったためバランスを維持する事はできても歩行速度や歩調が一定せず、その高いロバスト性のために転倒は避けられているが、酔歩のように時には前後にふらつく歩き方となった。

Fig. 2 に、脚の絶対角・角速度を示す（以降の図も同様）。

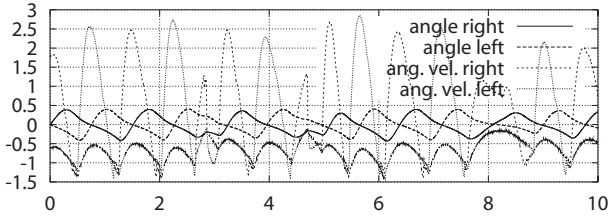


Fig. 2: Biped walking simulation by “multi-trajectory shifting control” with constant push off motion

3.2 両脚支持期

両脚支持期においては、ballistic 歩行 [9] を行わせるため、歩幅に応じて、蹴り出し (push-off) を適切に行う必要がある [7]。

ここでは、直接、速度制御を行う事はせずに、蹴り出し（脚長）の目標変位量を変える事で、間接的に速度制御を行う方法を用いた。目標値生成要素と位置制御要素の間は、ローパス・フィルタを介して接続されている。

$$d = d_0 + a(\dot{\theta}_i - \dot{\theta}_d) \quad (1)$$

$$\dot{\theta}_d = M(\theta) \quad (2)$$

d は、脚の自然長からの目標変位量。 d_0 は固定的変位量で、本来は歩幅によって変化するが、ここでは定数とした。 a は調整係数、 $\dot{\theta}_i$ は前方の脚の角速度、 $\dot{\theta}_d$ は角速度目標値。この角速度目標値 $\dot{\theta}_d$ が、事前のシミュレーションのデータにより、歩幅²に対する適切な目標速度を対応づけるメモリ関数 $M(\theta)$ によって決定される。

Fig. 3 より、ほぼ定常歩行が行っている事が分かる。

また、Fig. 4 より、歩行開始後 1.5[s] から 0.1[s] 間、上体に前方へ 500[N] の大きさの外乱を加えた場合でも、定常状態へと収束している事が分かる。

4 結言

様々な条件を変えた（歩幅、歩行周期等）事前のシミュレーション・データによるメモリ・ベース運動制御により、二足歩行の制御を行う方法を提案した。単脚支持期において、既に効果を確認していた方法だが、両脚支持期においても、蹴り出し (push-off) 初速度の目標値を時々刻々メモリ・ベースで検索し、歩行の定常化を行う事ができた。

しかし、地面の反発係数等、環境のパラメータが変化した場合の安定化には成功していない。地面へのめり込みに対応する脚長の違い、または足裏の反力をキーとしたメモリ・ベース運動制御を行う予定である。

²脚長が決まっている場合、股関節角度、または脚の絶対角と対応づけられるので、ここでは（前側）脚の絶対角を用いている

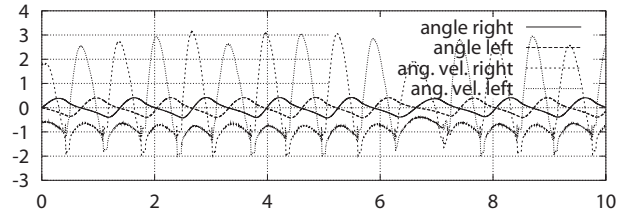


Fig. 3: Biped walking simulation by “multi-trajectory shifting control” with memory based push off control

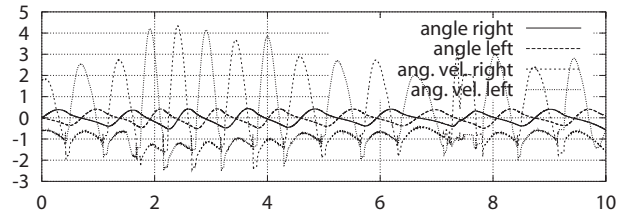


Fig. 4: Under perturbation force to the body

参考文献

- [1] S. Kagami and M. Mochimaru and Y. Ehara and N. Miyata and K. Nishiwaki and T. Kanade and H. Inoue, “Measurement and comparison of humanoid H7 walking with human being,” Robotics and Autonomous Systems, (2004).
- [2] 木村 浩, “生物を規範とした脚式ロボットの不整地適応,” 計測と制御, Vol. 42, No. 9, pp. 705–711, (2003).
- [3] S. Miyakoshi, and G. Cheng, “Utilizing Physical Relationships for Biped Walking Control: a preliminary study in identifying key essential properties for the two support phases,” proc. of CLAWAR, pp. 543-550,(2003).
- [4] “Legged Robot that Balance,” The MIT Press, (1986).
- [5] 梶田 秀司, 谷 和男, “凹凸路面における動的 2 足歩行の制御について,” 計測自動制御学会論文集, Vol. 27, No. 2, pp. 177-184, (1991).
- [6] A. Goswami and B. Espiau and A. Keramane, “Limit cycle and their stability in a passive bipedal gait,” Proc. of IEEE Conf. on Robotics and Automation, pp. 246–251, (1996).
- [7] 宮腰 清一, 山本 知幸, 多賀 巖太郎, 國吉 康夫, “脚伸縮機構による二足歩行シミュレーション,” 日本ロボット学会予稿集, Vol. 3, pp. 1107–1108, (2000).
- [8] H. Miura, and I. Shimoyama, “Dynamic Walk of a Biped,” IJRR, Vol. 3, No. 2, pp. 60-74, (1984).
- [9] S. Mochon and T. A. McMahon, “Ballistic Walking,” Journal of Biomechanics, Vol. 13, pp. 49-57, (1980).