

メモリ・ベースト二足歩行制御における倒立振り状の上体の付加

宮腰 清一 (産総研)

Memory-based Bipedal Walking Control with an Inverted Pendulum as a Torso

*Seiichi MIYAKOSHI (AIST)

Abstract— The compass-like bipedal walking model is expanded to a humanoid model by added a torso link. The torso is modeled by an inverted pendulum, to be expected to its lower torque requirement (small energy consumption). We show the nominal motion trajectories and the comparison of the energy consumption among those trajectories.

Key Words: passive dynamic walking, inverted pendulum, upper body

1. 始めに

二足歩行ロボットやその発展形としてのヒューマノイド・ロボットの研究が行われてきている。しかし、上体の動かし方について、考察を加えた研究は少ない。

歩行中のバランス維持のために上体をカウンタバランス型で動かす研究がある [1] [2]。また、上体は制御対象として、通常は直立させているものもある [3] [4][5]。

一方、リンク機構を単なる制御対象ではなくそれ自体のダイナミクスに従って動かす受動歩行においても、上体を付加する試みがある [6] [7]。

本研究では、受動歩行を運動モデルとしたメモリ・ベースト運動制御により、平面上二足歩行モデルの歩行運動生成・制御を行った。前半では、受動歩行と倒立振り子を規範とした望ましい運動パターンについて論じ、後半では、規範運動パターンを用いたメモリ・ベースト運動制御の可能性について、検討した。

2. モデル

コンパス状二足歩行モデル [8] [9] に上体を付加して、3リンクに拡張した。模式図と動力学シミュレータ DADS¹内に構成したモデルの概要図を Fig. 1 に示す。腰関節と股関節は、簡単化のために同一軸状にあるとした。

モデルの物理パラメータを Table 1 に示す。

Table 1 Physical parameters of the biped model

Torso mass	40.0	[kg]
Leg mass	10.0	[kg]
Foot mass	1.0	[kg]
Torso length	1.0	[m]
Thigh neutral length	0.5	[m]
Shank neutral length	0.5	[m]
Restitution coefficient	0.0	
Floor young's modulus	2.058×10^7	[N/m ²]

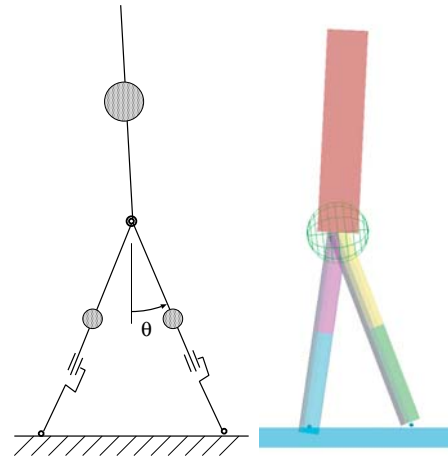


Fig.1 Compass-like bipedal walking model with a torso, and its model in the dynamical simulator DADS

3. 腰関節フリーでの上体の運動パターン

上体と脚の間の腰関節にトルクを加えない場合の運動パターンが分かれば、(外乱の無い理想状態では、)腰関節にトルクを必要としない歩行運動パターンを求められる。また、トルクを必要としない事による省エネルギー性を期待できる。

腰関節にトルクを加えない場合、上体は倒立振り子と同じ挙動を示す。よって揺れ動く、この上体運動の周期軌道は、存在しても不安定であり、受動歩行の軌道のようにそれ自体に収束性があるものではない。しかし、不安定平衡な軌道であれ、周期軌道として存在する事の確認ができれば、腰関節にサーボを入れた場合の目標軌道として利用できる。

上体の無いコンパス状モデルにおいて、脚の振りの3倍の周波数で脚伸縮を正弦波状に行うと、股関節がフリーであっても、歩行の推進力が脚の伸縮のみにより得られ、この時の床反力はヒトと類似となる [9]。

このコンパス状モデルに、腰関節と棒状の上体を付加する。まず、腰関節フリーで歩行させた場合の歩行を、動力学シミュレータを用いて求めた。腰関節だけではなく股関節フリーで脚伸縮のみで駆動した場合と脚

¹LMS International 社の製品

伸縮に加えて股関節に余弦関数を目標軌道とするサーボを掛けた場合 [10] とでは、ほぼ同じ結果が得られた。Fig.2 に、股関節にサーボを掛けた場合の結果を示す。

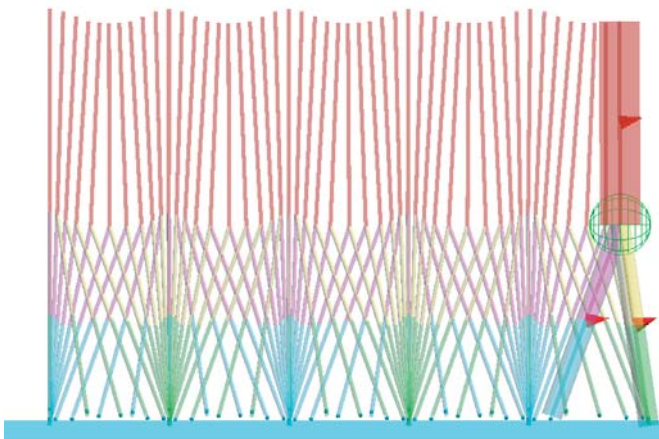


Fig.2 Stick picture of walking motion with the upper body as an inverted pendulum (free waist joint)

上体の絶対角の時間変化は、両脚支持期に鉛直から始まったとして、一旦後ろに傾いた(腰が先行した)後、立脚中期で上半身上部が腰を追い越して前方に傾き、着地後の両脚支持期に再び腰に追い越される形で後ろに戻り、立脚中期に鉛直になる、と言う経過をたどる。

4. 開ループ規範軌道とエネルギー消費

腰関節フリーの場合でも、上体の運動に関して、周期軌道が存在する事が分かった。この軌道は不安定平衡点の集合であるために、現実には、腰関節にサーボを掛けての運用が必要となる。

上体(腰関節)は、腰関節フリーの時の軌道を目標軌道として、サーボを掛ける事にする。この時、上体(腰関節)の角度・角速度を直接メモリ・ペースト等で完全に再現するのではなく、目標軌道の近似を行った上でサーボを掛けた。

近似を行うために、上体や支持脚・遊脚の角度・角速度の関係を検討した結果、以下に示す2つの方法が簡便である事が分かった。

1. 支持脚に対して、股関節の角度を直線的に動かす。
2. 股関節の二等分角に対して、正弦波状に動かす。

Fig.3 に、上体と支持脚の絶対角(それぞれ、振幅の小さな/大きな点線)とそれ等の差の値を示す。点線で囲んだ部分に直線的な変化が見られる事が分かる。

Fig.4 に、上体と両脚の二等分角の絶対角(それぞれ、振幅の小さな/少し大きな点線)とそれ等の差の値を示す。差の値に正弦波状の変化が見られる事が分かる。

比較対象として、股関節フリーと一般に行われる上体を鉛直に立てるものを加えた4者とし、消費エネルギーを比較した。

1. 腰関節フリー。
2. 支持脚に対して、直線的に動かす。
3. 股関節の二等分角に対して、正弦波状に動かす。
4. 上体を鉛直に立てる。

消費エネルギーに相当する量は、脚の伸縮アクチュエータの発生力、股関節の回転アクチュエータの発生トルク、(腰関節フリーのもの以外)腰関節の回転アクチュエータの発生トルクのそれぞれの時間積分を合計する事により求めた。

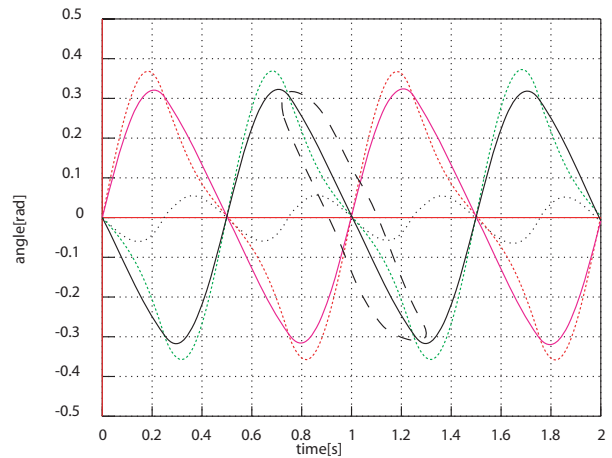


Fig.3 Approximation by a line at the transition on single support phase. The bigger amplitude dotted curves are the absolute angles of the two legs, and the smaller dashed curve is the absolute angle of the upper body. The each solid curves show the difference of the upper body and the leg.

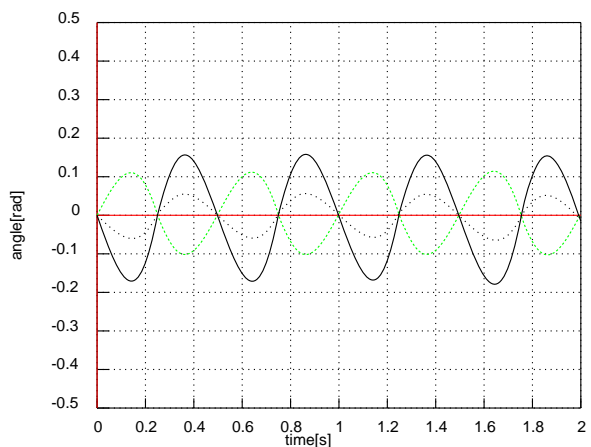


Fig.4 Approximation by a sinusoid. The bigger amplitude dotted curve is the absolute angle of the middle of the two legs, and the smaller dashed curve is the absolute angle of the upper body. The solid curve shows the difference of the upper body and the middle of the legs.

Fig.5 に、示した曲線は、消費エネルギーの小さい順に、フリー股関節、直線での近似、正弦波での近似、絶対空間に対して直立の順になった。わずかな差ではあるが、腰関節をフリーに近い状態に保ち、上体を倒立振り子のように動かす事により、消費エネルギーの節約を図れる事が分かる。

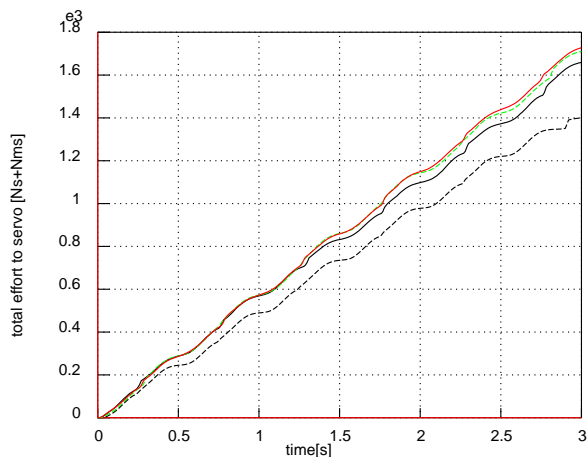


Fig.5 Energy consumption plots of each different waist control type. The smallest is the free joint. The second smallest uses the linear approximation to generate the desired trajectory for the waist servo controller, and the third smallest uses the sinusoidal approximation. The biggest curve shows the servo to keep the upper body upright.

5. メモリ・ベースト運動制御 [10]

上体を支持脚に対して直線的に動かすやり方を取る。目標軌道を直線で近似し、腰関節サーボの目標軌道とする。

Fig.6 に、シミュレーションの結果を示す。現在の所、着地でばたつきが出る等の理由で、定常歩行は行えていない。

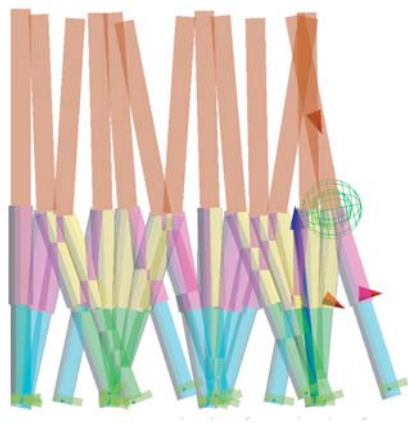


Fig.6 Few steps with the memory based control.

6. 終わりに

上体を倒立振りと同様に動かすモデルでの運動パタンの存在を示した。この運動パターンは、(理想状態では、)腰関節にトルクを必要としないので、省エネルギーな運動を行わせる事が期待できる。

メモリ・ベースト運動制御に関しては、規範運動パタンの集合を示した。実際の運動制御は、今後の課題である。

参考文献

- [1] 有本 卓, 宮崎文夫: “二足歩行ロボットの階層制御”, 日本ロボット学会誌, Vol.1, No.3, pp.7-15, 1983.
- [2] A. Takanishi, H. Lim, M. Tsuda, I. Kato: “Realization of Dynamic Biped Walking Stabilized by Trunk Motion on a Sagittally Uneven Surface”, Proc. of IROS, pp. 323-330, 1990.
- [3] K. Hirai: “Current and Future Perspective of Honda Humanoid Robot”, Proc. of IROS, pp. 500-509, 1997.
- [4] K. Nagasaka, M. Inaba, H. Inoue: “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”, 日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. 1193-1194, 1999.
- [5] Y. Kuroki, T. Ishida, J. Yamaguchi, M. Fujita, T. Doi: “A small biped entertainment robot”, Proc. of Humanoid, pp. 181-186, 2001.
- [6] S. H. Collins, M. Wisse, A. Ruina: “A 3-D Passive Dynamic Walking Robot with Two Legs and Knees”, IJRR, Vol. 20, No. 7, pp. 607-615, 2001.
- [7] M. Haruna, M. Ogino, K. Hosoda, M. Asada: “Passive Dynamic Walking of a Biped with a Torso Supported by Springs”, Proc. of CLAWAR, pp. 185-191, 2002.
- [8] A. Goswami, B. Thuilot, B. Espiau: “A study of the passive gait of a compass-like biped robot: symmetry and chaos”, IJRR, vol. 17, no. 15, 1998.
- [9] 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”, 第 18 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. 1107-1108, 2000.
- [10] Seiichi Miyakoshi, Gordon 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.