

二足歩行における倒立振子を規範とする上体の付加

宮腰 清一 (産総研)

A Bipedal Walking Model with an Inverted Pendulum as a Torso

*Seiichi MIYAKOSHI (AIST)

Abstract— The compass-like bipedal walking model is expanded to a humanoid model by an additional torso link. The torso is modeled by an inverted pendulum, to be expected to its lower torque requirement (small energy consumption). The existence of a nominal motion trajectory, the comparison of the energy consumption among different nominal trajectories, and the commonality to human walking are shown.

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

1. 始めに

二足歩行ロボットやヒューマノイド・ロボットの研究が行われてきている。しかし、あるべき上体の動かしか方について考察を加えた研究は少ない。

これまでも、歩行中の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、脚伸縮を併用する受動歩行様の平面状二足歩行モデルの歩行運動生成を行った。受動歩行と倒立振子を規範とした望ましい運動パターンについて論じ、規範運動パターンを用いた場合の運動の効率とヒトとの類似性について比較検討した。

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 DADS (LMS International 社の製品) 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上にあるとした。

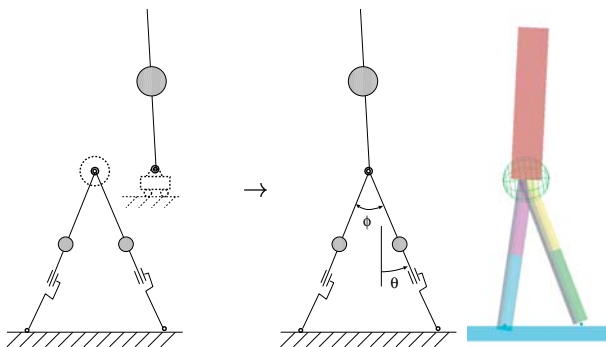


Fig.1 Compass-like biped walking model with a torso, and its model in the dynamical simulator DADS (LMS International)

モデルは、脚長 1[m]、上体が 40[kg]、各脚が 10[kg]、各足部が 1[kg] の分布質量を持つ。

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、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、上体は揺れ続ける倒立振子と同じ挙動を示し、不安定である。しかし、周期軌道の存在が確認できれば、その軌道は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 [11] とでは、ほぼ同じ結果が得られた。Fig.2 に、股関節にはサーボを掛けた場合の結果を示す。

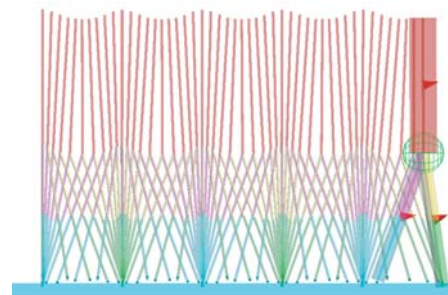


Fig.2 Stick picture of walking motion with the upper body as an inverted pendulum (free waist joint)

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て後ろに戻り、再び鉛直になる、と言う経過をたどる。

4. 腰関節サーボのための上体の運動パターン

腰関節にサーボを掛ける場合に、倒立振り規範軌道を目指軌道として近似する方法を示す。

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、支持脚に対する上体の絶対角が直線的に変化する事が分かった。また、脚の二等分絶対角（股関節の開き角度の半分）に対しても、股関節の角度で補正を行うと、同様の变化をする事が分かった。

$$\begin{aligned}\theta_u &\simeq \phi_0(t/(0.5T) - 0.5) + \theta_s \\ &\simeq \phi - \phi_0(t/(0.5T) - 0.5) + \theta_p\end{aligned}$$

ただし、 t は時刻、 T は歩行周期、 θ_u は上体絶対角、 ϕ_0 は股関節振幅角、 θ_s は支持脚絶対角、 θ_p は股関節二等分線の絶対角、股関節角 $\phi = \phi_0 \cos(2\pi t/T)$ である。

4.1 エネルギー消費の比較結果

前記の近似（以下の2.）に比較対象を加えた4者とし、消費エネルギーを比較した。

1. 腰関節フリー。
2. 股関節の二等分角に対する、前記の近似。
3. (直線的ではなく) 正弦波状に動かす近似。
4. 上体を(絶対空間に)鉛直に立てる。

全身の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して求めた。

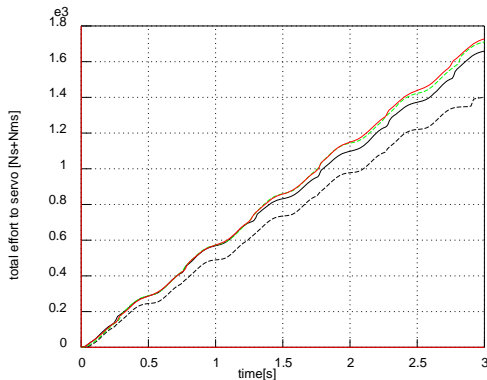


Fig.3 Energy consumption plots of each different waist control type. The smallest is the free joint. The second smallest uses the linear approximation to generate the desired trajectory for the waist servo controller, and the third smallest uses the sinusoidal approximation. The biggest curve shows the servo to keep the upper body upright.

Fig.3 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。

4.2 ヒトとの類似性の比較結果

ヒトの上体運動との類似性を調べた。歩行中の角度変化に関し、シミュレーション結果を Fig.4 上に、ヒトの測定データを Fig.4 下 [10] に示す。振幅や位相関係において、共通性が見出せる。

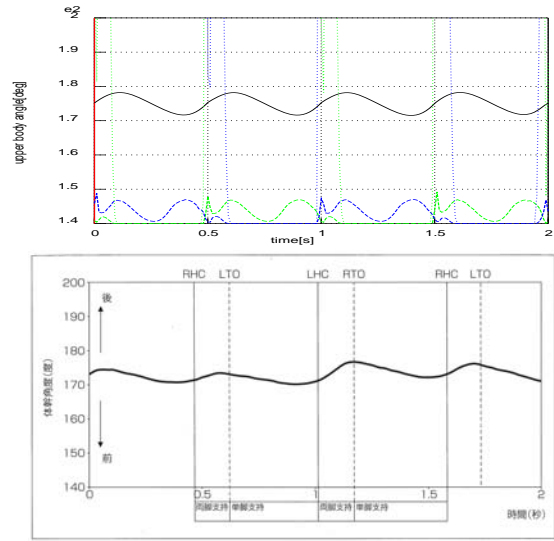


図 4-12 歩行中の体幹前後傾角度時間変化

Fig.4 The upper body angle plots of the simulation (upper) and measured human data (lower) [10]. The top part of the simulated ground reaction forces are also plotted at the lower part of the simulation plot.

5. 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せず、省エネルギーな運動を期待できる。また、ヒト歩行との類似性も示した。

メモリ・ベースト運動制御 [11] による安定化制御は、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: Proc. of IROS, pp. 323-330, 1990.
- [3] K. Hirai: Proc. of IROS, pp. 500-509, 1997.
- [4] K. Nagasaka, M. Inaba, H. Inoue: 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: Proc. of Humanoid, pp. 181-186, 2001.
- [6] S. H. Collins, M. Wisse, A. Ruina: IJRR, Vol. 20, No. 7, pp. 607-615, 2001.
- [7] M. Haruna, M. Ogino, K. Hosoda, M. Asada: Proc. of CLAWAR, pp. 185-191, 2002.
- [8] A. Goswami, B. Thuilot, B. Espiau: IJRR, vol. 17, no. 15, 1998.
- [9] 宮腰 清一, 山本 知幸, 多賀 徹太郎, 國吉 康夫: 日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. 1107-1108, 2000.
- [10] 江原 義弘, 山本 澄子: “ボディダイナミクス入門 歩き始めと歩行の分析”, 医歯薬出版株式会社, 2002.
- [11] S. Miyakoshi, G. Cheng: Proc. of CLAWAR, pp. 543-550, 2003.