3次元可変速二足歩行に関する実験的研究

正員 南方英明 (千葉工業大学), 正員 堀 洋一 (東京大学)

Experimental Study on 3-D Speed-variable Biped Walking
Hideaki Minakata, Member, Yoichi Hori, Member
(Chiba Institute of Technology, The University of Tokyo)

In this paper, we present an experimental result of 3-D real-time speed-variable biped walking using our second prototype Ostrich-II. Ostrich-II has 10 degrees of freedom; 6 for sagittal plane and 4 for lateral plane. The synchronization of motions in both planes is very important to realize stable walking. We propose Virtual Inverted Pendulum(VIP) method as the solution. We introduce following two techniques; (a) synchronization of the motions in both planes, (b) realization of synchronized acceleration/deceleration. We made an actual biped machine and its control system. We confirmed the effectiveness of VIP method by laboratory experiment. Ostrich-II realizes variable real-time biped walking, such as steady walking (0.5s/step, 0.1m/s), acceleration(from 0.1m/s to 0.2m/s, etc.), and so on.

キーワード: 二足歩行, 仮想倒立振子, 運動の同期

1. はじめに

<1.1> 背景・目的 二足歩行は、高齢化社会における医療用、看護用ロボットの移動手段などとして注目すべきポテンシャルをもっている。しかしながらその実用化に関してはいくつかの課題が残されている。人間と同様に動的なバランスをとりながら歩行を実現する研究については、動力学的な安定規範をもとに適切な関節軌道を求め実現するもの⁽¹⁾、歩行持続性に着目し足首周りの角運動量を補償しながら歩行を行うもの⁽²⁾、倒立振子モードへの拘束制御を行い、歩行の全エネルギーを見通し良く扱うもの⁽³⁾、などにより解決されてきた。環境への適応性についても、路面形状の変化に実時間で対応する研究⁽⁴⁾もなされている。

しかしながら、状況に応じて「歩容そのもの」を変化させ、柔軟に対応することに着目した研究は始まったばかりである⁽⁵⁾。文献[5]は着地位置に着目したものであるが、足の裏の内側の飛び出しにより、運動は矢状面に拘束されており、3次元歩行には対応していない。

本論文では、3次元歩行をおこないながら、操作者の指令に応じてバランスを保って歩行速度を変化させるシステムの構築、実機実験について述べる。その応用としては、義足やリモートブレインタイプの家庭用ロボット、極限作業用の移動機構(搭乗用、およびスレーブマシン)などを想定している。

<1.2> 歩行ロボットの階層制御 歩行ロボットの制御に関しては、数層程度の制御階層が必要であると考えら

れており、本論文では図1に示す階層モデルをベースにする。上位レベルはナビゲーションを司り、歩行状態を指示するパラメータを中位レベルに送る。本論文では、操作者がこれをおこない、パラメータとして歩行速度指令を中位レベルに送る。中位レベルは歩行現象の制御を司る。歩行持続性や安定性などのグローバル状態変数を制御する部分であり、歩行速度制御方法として「仮想倒立振子法」を提案する。下位レベルは実際の関節動作の制御を司る部分である。このように制御を階層化し、役割分担を明確にすることは問題を見通し良く解決するのに有効と考えられる。なお、センシングや中位から上位レベルへの情報の伝達などは、ハードウェアの制約などにより本論文では実装しておらず、今後の課題としたい。

図1: 歩行の階層制御

Fig. 1: Hierarchical architecture for walking control.

2. システム構成

<2.1> 実験機の概要 実験に用いたロボット Ostrich-

IIの諸元を表1に、モデルを図2に示す。全高60cm、質量15kg、自由度は矢状面6、前額面4である。各関節軸はDCサーボモータ(30W)をハーモニックドライブで100倍に減速したものにより駆動される。

図2: Ostrich-IIの関節構成, 質量モデル
Fig. 2: Configuration of Ostrich-II.

図3: 実験装置の構成
Fig. 3: Hardware configuration.

図3は製作した実験装置の構成図である。メインプロセッサとしてDSPμPD77240を用い、DSP外部バスにAD, DA, カウンタボードを接続している。可変抵抗ボリュームより歩行速度指令を取り込み、DSPで歩行速度指令に応じた軌道生成、関節軸の位置制御などを行うシステムになっている。全体の制御周期は1msである。

表1: Ostrich-IIの諸元
Table 1: Constants of biped robot Ostrich-II.

$a = 0.06\text{m}$	$b = 0.13\text{m}$	$c = 0.07\text{m}$	$d = 0.15\text{m}$
$D = 0.085\text{m}$	$e = 0.22\text{m}$	$f = 0.44\text{m}$	
$m' = 7\text{kg}$	$m = 2\text{kg}$	$m_l = 6\text{kg}$	$M = 3\text{kg}$

3. 中位レベル制御

<3.1> 歩行パラメータの設定 中位レベルは歩行状態のグローバルな制御を司る。ここでは、直線歩行現象を以下のようにとらえるものとする。

- ・ 胴体の移動速度が、指示速度にほぼ追従する
- ・ 胴体が支持点から一定角度前方に倒れこんだら支持脚を切り替える
- ・ 支持脚交換直後に胴体は支持点から一定角度後方に倒れこんでいる
- ・ 支持脚切り替えは瞬時に行われる

これを、胴体と支持点がなす矢状面での倒れこみ角度 θ_s 、歩行速度 w 、歩幅パラメータ $\theta_{\max p}$ 、 $\theta_{\max n}$ 、ロボットの脚長 L 等を利用して説明すると、以下のようになる。

- ・ $w = \dot{\theta}_s L$ (1)
- ・ $-\theta_{\max p} \leq \theta_s \leq \theta_{\max n}$ (2)
- ・ 支持脚切り替え時に $\theta_s = \theta_{\max n}$ から $\theta_s = -\theta_{\max p}$ への置き換えが行われる

中位レベルでは、 w を受け取り、 θ_s 、 $\theta_{\max p}$ 、 $\theta_{\max n}$ を下位レベルに送る。なお、急激な加減速は安定性やアクチュエータ性能から実現不可能なことも考えられるので、上位レベルから受け取った w に適当な制限とフィルタリングを行うのも中位レベルの仕事である。例えば、急激な加速も数歩に分ければ実現できる可能性があるので、速度指令に対する加速度リミタのようなものを用意すればよい。

<3.2> 仮想倒立振り子法 θ_s を、胴体部に質量を集中させた倒立振り子モデルの運動で与えようというのが、仮想倒立振り子法である。ここで、矢状面、前額面の運動は互いに干渉しないとの仮定をおいている。式(3)は、理想的な倒立振り子の運動方程式を鉛直近傍で線形近似したもので、これを式(4)の初期条件を与えると、解として式(5)を得る。

$$M l^2 \ddot{\theta} = M g l \theta \quad (3)$$

$$\left. \begin{aligned} \theta_s(t=0) &= 0, \theta_L(t=0) = \theta_{0L} \\ \dot{\theta}_s(t=0) &= \omega_0, \dot{\theta}_L(t=0) = 0 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

ここで、 l は振り子の長さであり、 g は重力加速度、パラメー

タ ω_0 は振子の鉛直時の矢状面での角速度, θ_{0L} は、鉛直時の前額面での角度である。添え字Sは矢状面、Lは前額面を表す。

$$\left. \begin{aligned} \theta_S &= \frac{\omega_0}{\alpha} \sinh(\alpha t) \\ \theta_L &= \theta_{0L} \cosh(\alpha t) \end{aligned} \right\} \alpha = \sqrt{\frac{g}{l}} \dots\dots\dots (5)$$

図4: 仮想倒立振子の振る舞い
Fig.4: Motion of the inverted pendulum.

<3.3> 着地の同期 安定な二足歩行を実現するためには両平面において着地タイミングを同期させる必要がある。矢状面については、 $\theta_S = \theta_{\max}$ にて支持脚の切り替えをするものとし、前額面においては、 $\theta_L = \theta_{Ln}$ にて切り替えるものとする。 θ_{Ln} は両足支持時の質量構成によって、一意に決定される。また、 $\theta_{\max}$ は、どの程度の歩幅で歩行するかを表すパラメータである。パラメータと仮想振子の振る舞いの関係は図4ようになる。

さて、同時に着地するための条件を導こう。 $t = t'$ にて着地すると仮定すると、式(6)が得られる。

$$\left. \begin{aligned} \theta_{\max} &= \frac{\omega_0}{\alpha} \sinh(\alpha t') \\ \theta_{Ln} &= \theta_{0L} \cosh(\alpha t') \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (6)$$

詳細は省略するが、双曲線関数の性質を利用することにより、最終的に式(7)の条件が導かれる。

$$\left. \begin{aligned} \theta_{0L} &= \frac{\omega_0}{\alpha} \\ \theta_{Ln} &= \sqrt{\omega_0^2 + (\alpha \theta_{\max})^2} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (7)$$

$$\left. \begin{aligned} \theta_S &= \frac{\omega_0}{\alpha} \sinh(\alpha t) \\ \theta_L &= \theta_{Ln} \cosh(\alpha t) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (8)$$

ゆえに、式(8)に従って各平面の動きが制御できれば、この倒立振子を規範とした二足歩行ロボットの単脚支持期の振る舞いは、重力をうまく使い、左右のバランスもとれ

たものとなる。このときの角度-角速度軌跡を描くと、図5ようになる。この位相軌跡をみれば明らかであるが、ゆっくり歩く時は、大きくからだを左右に振り、速く歩く時はあまり体を左右に振らないという、常識的な解が導かれていことがわかる。

図5: 仮想倒立振子の位相軌跡
Fig.5: Phase trace of Virtual Inverted Pendulum.

<3.4> 加減速制御 簡単のため、加速についてのみ考える。なお、位相軌跡上にてより歩行速度が高い軌跡に移行することを加速と定義する。理想的な倒立振子の軌跡は互いに交わらないため、(a) 足首トルクの利用、(b) 歩幅の調整、等なんらかの外因を与えなければならない。

着地時刻の同期と振子運動の角速度の連続性を考慮すると、図6の点線に示すように(a),(b)を併用する必要がある。A→Bは、足首トルク無しの定常歩行である。B→C間は足首トルクを入力し、点線の軌跡を通らせる。このとき、若干歩幅を伸ばし、B→C間の所用時間を矢状面と前額面で一致させる。これによってC→C'での支持脚切り替え時に、接地時の衝撃による損失を無視すれば、角速度の連続性が厳密に保たれる。

ここで、足首トルクの入力方法について触れる。軌跡を与えて必要トルクを計算することは逆問題となり、解析的に解くのが困難となる。しかるに、図6の点線の軌跡は振子モードの倒れこみ時定数を調節することにより実現できる。矢状面においては短足振子に、前額面では長足振子モードに追従させれば良い。ロボットの実際の倒れこみ時定数

と異なる値を設定することにより、適切なトルクを自動発生させるシステムとすることができる。

図6: 加速時における位相軌跡
Fig.6: Traces in acceleration phase.

なお、モデルの足の長さの決定は、以下のように行う。加速時の位相軌跡と、高速歩行時の位相軌跡から式(9)から式(12)の条件が導かれる。ここで、 θ_{high} は、加速時および高速歩行時の歩幅を決めるパラメータで、着地時に $\theta_s = \theta_{high}$ である。 θ_{low} は、低速時のものである。 ω_{low} と ω_{high} は歩行速度を決めるパラメータで、それぞれ低速歩行と高速歩行時のものとする。 t_{acc} および t_{high} は、加速時および高速歩行時の着地時点である。 α_{Sacc} および α_{Lacc} は、加速時に各平面の振子モデルで用いるパラメータであり、定常歩行時にはノミナル値 α_n を用いる。

$$\theta_{high} = \frac{\omega_{low}}{\alpha_{Sacc}} \sinh(\alpha_{Sacc} t_{acc}) = \frac{\omega_{high}}{\alpha_n} \sinh(\alpha_n t_{high}) \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \theta_{Ln} &= \theta_{Ln} \sqrt{\frac{\omega_{low}^2 + (\alpha_n \theta_{low})^2}{\omega_{high}^2 + (\alpha_n \theta_{high})^2}} \cosh(\alpha_{Lacc} t_{acc}) \\ &= \theta_{Ln} \sqrt{\frac{\omega_{low}^2 + (\alpha_n \theta_{low})^2}{\omega_{high}^2 + (\alpha_n \theta_{high})^2}} \cosh(\alpha_n t_{high}) \end{aligned} \quad (10)$$

$$\omega_{Shigh} = \omega_{low} \cosh(\alpha_{Lacc} t_{acc}) = \omega_{high} \cosh(\alpha_n t_{high}) \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \omega_{Lhigh} &= \theta_{Ln} \sqrt{\frac{\alpha_{Lacc} \omega_{low}}{\omega_{low}^2 + (\alpha_n \theta_{low})^2}} \sinh(\alpha_{Lacc} t_{acc}) \\ &= \theta_{Ln} \sqrt{\frac{\alpha_n \omega_{high}}{\omega_{high}^2 + (\alpha_n \theta_{high})^2}} \sinh(\alpha_n t_{high}) \end{aligned} \quad (12)$$

詳細は省略するが、双曲線関数の性質などを利用することによって、最終的に加速時に用いる α の値（モデルと

なる振子の足の長さによって決定される）を求めることができる。

$$\alpha_{Sacc}^2 = \alpha_n^2 + \frac{\omega_{high}^2 - \omega_{low}^2}{\theta_{high}^2} \quad (13)$$

$$\alpha_{Lacc}^2 = \alpha_n^2 \frac{\omega_{low}^2 + (\alpha_n \theta_{low})^2}{\omega_{high}^2 + (\alpha_n \theta_{high})^2} \frac{\theta_{high}^2}{\theta_{low}^2} \quad (14)$$

式(13)などで明らかのように、 α の値は加減速の度合いが大きければ大きいほどノミナル値からずれることになる。これは、「もっと加速したければもっと短足のふりをしろ」と言うことであり、直感とも一致する。また、基本式の内部パラメータを変更する方式なので、加減速だからといってプログラムを切り替える必要もなく、非常に見通しがよい。なお、歩幅パラメータ θ_{high} は、解析的に求めるのは非常に困難であるので、収束計算を利用して求めている。DSPに代表される最新の高速度演算プロセッサを用いれば、1 ms 程度の制御周期内に10軸全部のサーボ計算や、上記のパラメータ計算を行うことが十分可能である。

4. 下位レベル制御

<4.1> 構成 下位レベル制御は、軌道生成とサーボシステムからなり、本論文では支持面の接地が理想的に行われているものとして、衝撃制御などの安定化はとくに考慮していない。これは歩幅、歩行速度の変化に対して汎用的な安定化が非常に困難と思われるため、ベースケースとしてとくに考慮しないものを採用している。しかし、プロセッサの高速化により歩行パラメータ変動に対してロバストな安定化手法も実装可能になっていくと考えられる。また、本論文では計算コスト等の問題から、関節角度を直接生成し逆運動学を省いている。今後は上位レベルの歩行ナビゲーションを考慮し、胴体位置や足先位置を状況に応じて生成するものへと改善していく予定である。

<4.2> 軌道生成 各関節の軌道指令値は、中位レベルから送られてくる θ_s , θ_L , $\theta_{max p}$, $\theta_{max n}$ をもとに式(15)に従って作成される。

$$\left. \begin{aligned} \theta' &= \frac{2\beta}{\theta_{max n} + \theta_{max p}} (\theta_s + \theta_{max p})(\theta_s - \theta_{max n}) \\ \theta' &= 2\theta' \\ q_1 &= \theta_s, \quad q_2 = 0, \quad q_3 = -\theta_s \\ q_4 &= \theta_s + \theta', \quad q_5 = \theta', \quad q_6 = \theta_s + \theta' - \theta' \\ Q_1 &= \theta_L - \theta_{Ln} \\ Q_2 &= \frac{\pi}{2} - 0.5 Q_1, \quad Q_3 = \frac{\pi}{2} + 0.5 Q_1 \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

ここで、 β は遊脚の膝関節の曲げ具合を指定するパラメータである。式(15)は以下の観点から試行錯誤的に決定した。

- ・胴体運動はなるべくモデルと合致させる
- ・ZMP⁽¹⁾が支持多角形をなるべくみ出さない

ZMPに関してはあらかじめ計算機シミュレーションをお

こなつて確認している。なお、下位レベルからロボットの実際の倒れこみ角度 q_1 、 Q_1 が中位レベルに送られ、支持脚交換のトリガとなっている。

<4.3> サーボシステム 式(15)で明らかのように、重心位置の振子モードへの追従は、 q_1 、 Q_1 などの関節剛性によって保証される。ゆえに、各関節のサーボシステムに外乱オブザーバを利用した位置制御サーボを採用した⁽⁶⁾。関節間の非干渉化、およびモデル拘束制御の外乱抑圧特性の向上などに効果的と考えられる。

図7: 歩行実験時の正面からの連続写真(0.3 s 間隔)
Fig. 7: Front view of walking experiment.

5. 実験

<5.1> 歩行実験 図7は歩行実験の様子を撮影したもので歩行周期 0.5 s、歩幅 0.06 m、平均速度 0.1 m/s の歩行を実現している。写真から明らかのように、体を左右にゆすりながら支持脚に重心を乗せた形で単脚支持をおこなっている。

表 2: 実験時のパラメータ設定
Table 2: Parameters for experiment.

$\alpha_n = 6 \text{ s}^{-1}$	$\beta = 2.0$
$\theta_{\max} = 0.1 \text{ rad}$	$\theta_{LH} \approx 0.22 \text{ rad}$
$\omega_{\text{low}} = 0.2 \text{ rad/s}$	$\omega_{\text{high}} = 0.4 \text{ rad/s}$

図8: 歩行実験時の位相軌跡
Fig. 8: Phase trace of body angle.

図8は歩行中に加速指令を出した場合の胴体の支持点からの倒れこみ角度の位相軌跡である。歩行速度指令などの実験パラメータを表2に示す。図8の上が矢状面のものであり、下が前額面のものである。3節などで示したように定常歩行の軌跡が2本描かれていることがわかる。低速歩行から高速歩行へと移行するにあたって、

- ・歩幅（矢状面の振幅）が若干伸びている
- ・左右に体をゆする幅（前額面の振幅）が減っている

などのことが確認できる。また、各々の軌跡をつなぐ軌跡も確認できる。以上のように、左右のバランスをとりながら実時間で加減速を行う二足歩行の実現に成功した。

<5.2> 歩行パラメータに関する考察 3節で示した

ように、矢状面と前額面の運動の同期を考慮した場合、歩行速度に応じて歩幅および、歩行周期を適切に調整していく必要がある。歩行速度を変更する実験をおこないながら、実現された歩行周期を人間の歩行特性と比較したものが図9である。理想的には、実機実験は図中の任意の点を取りうる。例えば、その場足踏みをおこなわせれば、歩行速度0の動作点として、様々な歩行周期のものが得られる。しかしながら、物理的な制約により Ostrich-II にとって歩きやすい動作点が存在する。本論文では、基準点として周期0.7sのものを試行錯誤的に選び、この動作点からの加減速をおこなわせた結果を採用した。

人間の歩行特性については、式(16)⁽⁸⁾を参考とし、脚長はOstrich-IIの矢状面でのリンク間長を採用した。

$$S/L = 2.5 (v^2/gL)^{0.3} \dots\dots\dots (16)$$

ここで、Sは歩幅、vは歩行速度である。

図9: 歩行速度と歩行周期との関係

Fig. 9: Relationship between walking speed and step cycle

実機実験での歩行周期の推移は人間の特性と似たような傾向を示し、仮想倒立振り子法から導出される同期条件が現実的であることが確認できる。実験結果の方が歩行周期が短いところを通っているが、これはハードウェアの制約が大きく起因している。人間は前額面運動のバランスをとる際に腕を振るなどの手段を用いており、足首関節に負担をかけずにゆったりとした歩行が可能である。Ostrich-IIにおいては、ゆっくり歩く際に足首や股関節の負担が大きく、アクチュエータトルク不足から、単脚支持が維持できなくなる。このためOstrich-IIの歩行は歩行周期が短めにならざるをえない。

6. おわりに

実時間で歩行速度を変化させる二足歩行システムの構築について検討し、実機実験において実時間加減速を行うことに成功した。この成功は、階層制御による役割分担と、外乱オブザーバを代表とする関節動作のロバスト化によるところが大きい。歩行安定化や衝撃力低減に関してはなお改善の余地があり、今後の研究課題としたい。

(平成9年5月12日受付, 平成9年7月16日再受付)

文 献

- (1) 高西, 他: 「2足歩行ロボットWL10-RDによる動歩行の実現」, 日本ロボット学会誌, Vol.3, No.4, pp.82-95, 1985
- (2) 佐野・古荘: 「角運動量制御による2足歩行ロボットの3次元動歩行」, 計測自動制御学会論文集, 26-4, 1990
- (3) 梶田・谷: 「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, 27-2, 1991
- (4) 山口, 他: 「路面形状に偏差のある環境に対する適応能力を持つ2足歩行ロボットの開発」, 日本ロボット学会誌, Vol.14, No.4, pp.546-559, 1996
- (5) 梶田・谷: 「実時間路面形状計測に基づく動的2足歩行の制御」, 日本ロボット学会誌, Vol. 14, No. 7, pp. 1062-1069, 1996
- (6) T. Umeno, T. Kaneko and Y. Hori, "Robust Servosystem Design with Two Degrees of Freedom and its Application to Novel Motion Control of Robot Manipulators," IEEE Trans. on IE, Vol. 40, No. 5, pp.473-485, 1993.
- (7) F. Gubina, H. Hemami and R. B. McGhee: "On the Dynamic Stability of Biped Locomotion", IEEE Trans., BME-21-2, pp.102-108, 1974
- (8) R. McN. Alexander et al.: "A model of locomotion on compliant legs," Phil. Trans. roy. Soc. B. 338, pp189-198, 1992

南方 英明 (正員) 1992年東京大学工学部電子工学科卒業, 1997年同大学大学院工学系研究科博士課程修了。1997年より千葉工業大学助手。ロボットモーションコントロール, 特に二足歩行ロボットに関する研究に従事。日本ロボット学会, IEEEなどの会員。

堀 洋一 (正員) 1978年東京大学工学部電気工学科卒業, 1983年博士課程修了。助手, 講師を経て1988年より同電気工学科助教授。制御工学とその産業応用, とくに, モーションコントロールやメカトロニクス分野への応用研究, 電気自動車などの研究に従事。計測自動制御学会, 日本ロボット学会, IEEEなどの会員。