

# 上体を持つ二足歩行ロボットの三次元歩行の動的安定化

## Stabilization of 3-D walking for Bipedal Robot with Torso

月野木 一精 (阪大)      ○正 荻野 正樹 (阪大)  
正 細田 耕 (阪大, 阪大FRC)      正 浅田 稔 (阪大, 阪大FRC)  
Issei TSUKINOKI, Osaka University, 2-1, Yamadaoka, Suita, Osaka  
Masaki OGINO, Osaka University  
Koh HOSODA, Osaka University, HANDAI Frontier Research Center  
Minoru ASADA, Osaka University, HANDAI Frontier Research Center

This paper proposes a controller which enables stable lateral step of a biped robot with torso. The torso changes the control phases according to touch sensor signals. We control the period of lateral stepping utilizing the fact that the swing amplitude of the torso affects the period of lateral stepping.

**Key Words:** biped walk, torso, lateral step

### 1 はじめに

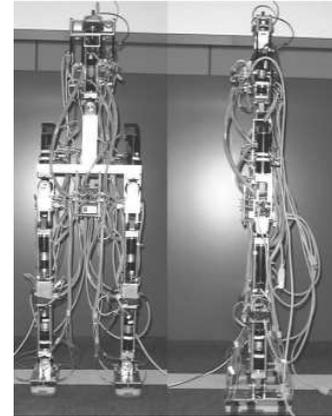
二足歩行を実現する手法として、身体と制御器を適切に設計し、それらのダイナミクスと環境のダイナミクスの引き込み現象を利用するアプローチが最近盛んに研究されている。受動歩行は緩やかな勾配をアクチュエータ無しに重力と慣性力のみを利用して歩行することが可能な歩行形態であり<sup>1)</sup>、受動歩行にアクチュエータを加えることで平地での安定な歩行を目指した研究が行われている<sup>2, 3, 4, 8)</sup>。生物が生得的に持つ神経回路振動子 (Central Pattern Generator, CPG) を非線形振動子によってモデル化した制御器は、環境の変動に対してある程度安定な歩行を実現できることが示されている<sup>6, 7)</sup>。これらの歩行ではロボット自身の持つダイナミクスを積極的に利用することで制御を簡単化することができ、環境との相互作用を利用することで環境変動に対して適応的であることが期待されている。しかし一方で、環境との相互作用が複雑になると身体や制御器のダイナミクスを適切に設計することは簡単ではなく、これらのアプローチによって実現されている実ロボットでの二足歩行も、歩行を矢状面内に限定したものがほとんどである。

3次元における2足歩行を実現するためには、前額面内の運動と矢状面内の運動を適切に組み合わせる必要がある。すでに長谷川らは前額面内に着目して安定な揺動運動を実現している<sup>5)</sup>。しかし、矢状面内の運動と前額面内の運動を組み合わせるためには、前額面内の運動において安定性を保ちつつも制御できることが重要である。その端緒として、本研究では前額面内の揺動運動の周期を上半身によって制御する手法を提案する。上半身の姿勢を遊脚の着地のタイミングによって切り替えることで、前額面内の揺動運動の安定なリミットサイクルを構成することができる。この手法ではロボットが重力によって倒れ込む受動状態を利用しているため、歩行周期を直接的に制御パラメータとして制御することができないが、上半身の振幅を変化させることで目的とする歩行周期への収束を可能とした。さらに提案手法と単純な矢状面内歩行制御を組み合わせることで初期的な3次元2足歩行を実現した。

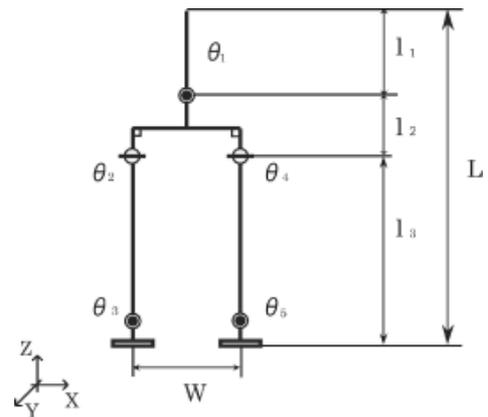
### 2 環境との相互作用を利用した前額面内の揺動運動

#### 2.1 実験で使用したロボット

Fig.1(a) に本研究で使用したロボットを示す。このロボットは、全長 0.88 [m]、重量 6.55 [kg] で7自由度の構成となっているが、本研究では Fig. 1(b) に示すように腰関節、股関節、足首関節の5自由度のみを用いる。各部の寸法および重量を Table 1 に示す。脚底には床面との衝突時の衝撃を和らげるための厚さ 5 [mm] のシリコンが取り付けられている。



(a) The photo of the biped robot



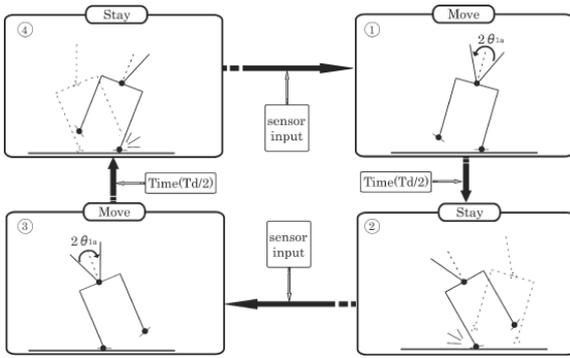
(b) Joint configuration

**Fig.1** The biped robot with a torso used for the experiments

**Table 1** Parameters of the biped robot

	length [mm]	weight [kg]
$L$	880	6.55
$l_1$	210	2.35
$l_2$	190	1.40
$l_3$	480	$1.40 \times 2$
$W$	200	*

## 2.2 前額面内の揺動制御



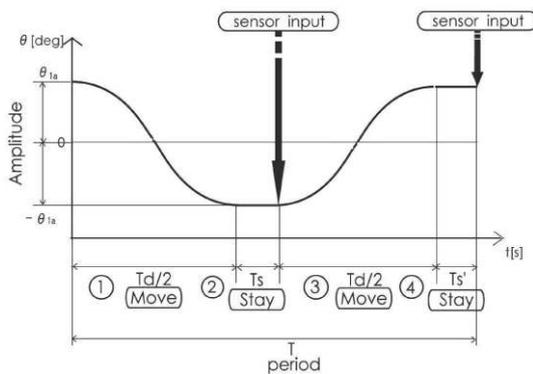
**Fig.2** Control algorithm for the lateral stepping of the biped robot

足首関節については外反させたまま固定し、腰関節のみを駆動して上体を左右に振らせ、前額面内の揺動運動を実現する。腰関節は Fig.2 に示すように、接地情報に基づいて位相を変化させる。

- *Move* 相 (予め決められた軌道に沿って腰関節を動かす相 ① ③) から *Stay* 相 (腰関節を一定角度に保持し重力と慣性力のみを利用してロボットを動かす相 ②, ④) への時間に応じた位相変化
- *Stay* 相 (②, ④) から *Move* 相 (①, ③) への外側の接触センサの接地情報に基づく位相変化

提案する前額面内の揺動制御手法は、環境との相互作用により位相を変化させるので、ダイナミクスモデルに基づいて関節軌道を計算し、その計算された軌道に追従するように制御を適用する手法と比較して、外乱に対して頑健な揺動運動が期待できる。

## 2.3 パラメータ変更による揺動制御



**Fig.3** The desired angle of the hip joint  $\theta_1$ : the phase shifts by the touching information from the foot sensors

それぞれの相における、腰関節の目標軌道は、式 (1) のように与える (Fig.3).

$$\theta_{1d}(t) = \begin{cases} \pm\theta_{1a} \cos \frac{\pi t}{T_d} & (0 \leq t < \frac{T_d}{2}) \\ \mp\theta_{1a} & (\frac{T_d}{2} \leq t \leq \frac{T_d}{2} + T_s \text{ (or } T'_s)) \end{cases} \quad (1)$$

ここで  $\frac{T_d}{2}$  は *Move* 相区間の時間を、 $T_s, T'_s$  は *Stay* 相区間の時間を示す。また  $\frac{T_d}{2}$  は、上体を揺動させている間に脚裏が接地してしまわない程度に十分に短い値を用いることとする。腰関節には、式 (2) で示される PID 制御を適用し、与えられた目標値に追従させる。

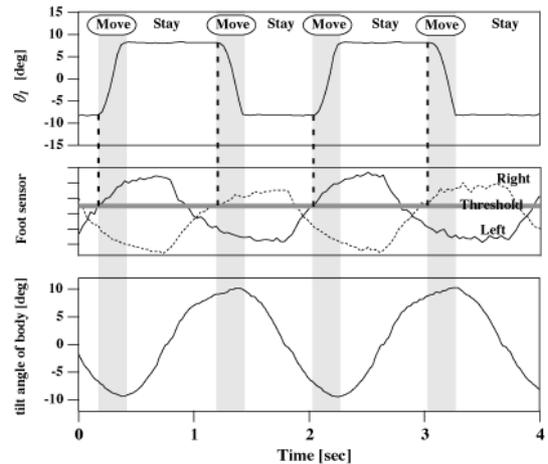
$$\tau_1 = -K_P(\theta_1 - \theta_{1d}) - K_D(\dot{\theta}_1 - \dot{\theta}_{1d}) - K_I \int_0^t (\theta_1 - \theta_{1d}) dt \quad (2)$$

前述のように、*Stay* 相から *Move* 相への移行は、外側の接触センサから得られる接地情報を用いているため、床面との相互作用によりロボットの揺動周期  $T (= T_d + T_s + T'_s)$  が決まる。

## 2.4 パラメータ変化による揺動周期の変化に関する実験

Fig.4 は、腰関節の振幅  $\theta_{1a} = 9.4$  [deg], 足首関節角度  $\theta_{3,5} = 3.0$  [deg], 上体の振れ時間を  $T_d = 0.25$  [sec] とした時の揺動運動の腰関節角度  $\theta_1$  と腰関節角度の目標軌道を示している。Fig.5 は、ロボットが揺動運動する様子を写した連続写真である。

次に足首関節角度  $\theta_{3,5}$  を  $3.0$  [deg] に固定した場合について、腰関節の振幅  $\theta_{1a}$  を変化させた (各間隔  $0.2$  [deg]) 時に生じるロボットの揺動周期  $T$  を Fig.6 に示す。図中では、腰関節の各振幅ごとに周期の広がりや線分を線分としており、周期に揺れが無い場合には線分は短く、逆に周期に揺れが生じる場合には線分は長くなる。同一軸上には分散もボックスで表記してある。但し、これら周期の広がりや分散は、3 回行なった測定結果の平均となっている。また、図中上部に示されている揺動運動の安定 (Stable stepping), 不安定 (Unstable stepping) の判定については、腰関節の各振幅ごとに 3 回行なう測定において 1 回でも揺動運動が不可能となる場合があった時、その振幅では揺動運動は不安定 (Unstable stepping) であると判定した。一連の実験において *Move* 相区間の時間  $\frac{T_d}{2}$  は、前述のように周期と干渉しない程度に短くするため  $0.25$  [s] とした。



**Fig.4** The angle of the hip joint  $\theta_1$

Fig.6 より、腰関節の振幅  $\theta_{1a}$  が増すとロボットの揺動周期  $T$  も増すという傾向が分かる。腰関節の振幅  $\theta_{1a}$  を変化させることにより、安定した揺動運動を周期  $T$  を約  $1.45$  [s] ~  $2.53$  [s] の範囲で変化させることが可能であった。

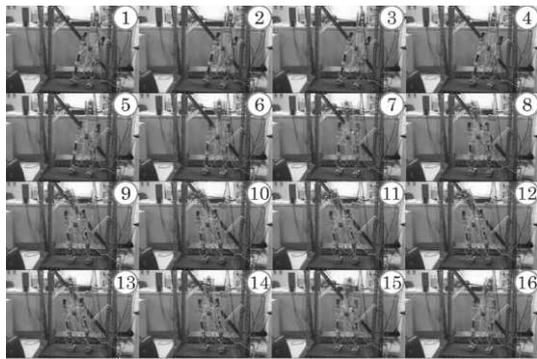


Fig.5 Realized lateral stepping

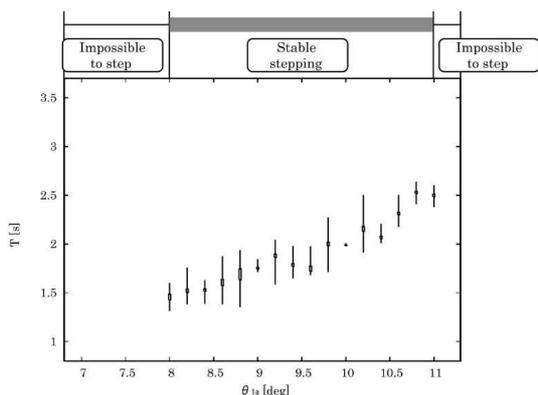


Fig.6 The relationship between the amplitude of angle of the hip joint  $\theta_{1a}$  and the period of stepping  $T$

### 3 前額面の揺動周期を変更するフィードバック制御

#### 3.1 前額面内の揺動周期制御

足首関節角度  $\theta_{3,5}$  を固定し、腰関節の振幅  $\theta_{1a}$  のみを目標揺動周期  $T^*$  へ揺動周期  $T$  が近づくようにフィードバック制御する。

$$\theta_{1a} = \theta_{1a}^* + k(T^* - T) \quad (3)$$

$$\begin{cases} \max = \theta_{1amax} \\ \min = \theta_{1amin} \end{cases}$$

ここで、 $k$  はフィードバックゲイン、 $\theta_{1a}^*$  は目標揺動周期  $T^*$  時の腰関節の振幅である。また、腰関節の振幅  $\theta_{1a}$  には、上限  $\theta_{1amax}$  と下限  $\theta_{1amin}$  が設けられている。

#### 3.2 揺動周期変更に関する実験

Fig.6 で示した安定に揺動運動が可能領域において、揺動周期  $T$  と腰関節の振幅  $\theta_{1a}$  の関係を以下のように線形近似する。

$$\theta_{1a} = kT + a \quad (4)$$

$$(k = 2.74, a = 4.18)$$

$$(8.0 \leq \theta_{1a} \leq 11.0)$$

線形近似した値を用いて式 (4) のパラメータを決定する。 $\theta_{1a}^*$  は、式 (4) に目標揺動周期  $T^*$  を代入した時の  $\theta_{1a}$  の値、 $\theta_{1amax}$ 、 $\theta_{1amin}$  は、式 (4) での  $\theta_{1a}$  の上限と下限、11.0, 8.0 [deg] とする。これらの値は、以下の一連の実験において共通である。

Fig.7 は、目標揺動周期  $T^*$  を  $1.6 \Rightarrow 2.0$  [s] に変化させた時の揺動周期  $T$  を示している。目標揺動周期  $T^*$  を切り換えたのは、31 [s], 11step 目<sup>1</sup>の時である。これより、

<sup>1</sup>0step 目から開始

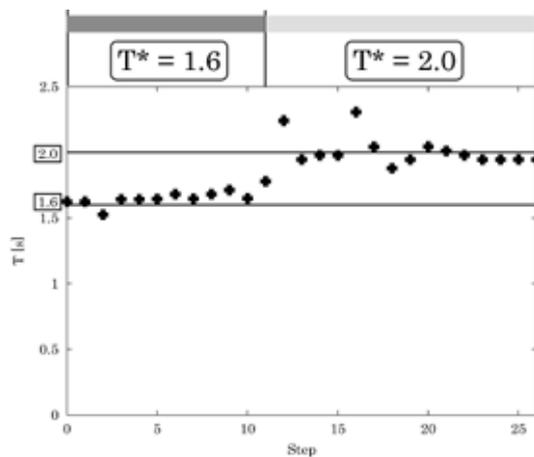


Fig.7 The period of stepping  $T$  when the reference period of stepping changes.

揺動周期  $T$  は切り換え前は目標揺動周期  $T^* = 1.6$  [s], 切り換え後は目標揺動周期  $T^* = 2.0$  [s] が実現されていることがわかる。

### 4 上体を利用した動的3次元2足歩行

#### 4.1 環境との相互作用を利用した矢状面内制御

動的3次元2足歩行を実現するために、前額面内制御には前章で示したものを適用し、矢状面内制御には以下のものを適用する (Fig.8)。

矢状面内では、ロボットを坂道に置き位相を変化させ制御する<sup>2</sup>。

- Move 相 (①, ③)  $\Rightarrow$  制御をかけ、 $\theta_{2a,4a}$  を一定角度で駆動
- Stay 相 (②, ④)  $\Rightarrow$  制御をかけ、 $\theta_{2a,4a}$  を一定角度で固定

Move 相 (①, ③) の時、ロボットは支持脚と床面との間で、受動状態 (倒れ込み) になる。また、股関節の目標軌道は式 (1) と同様の式で与えられる。

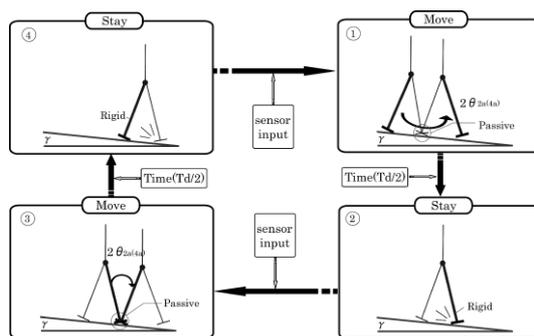


Fig.8 Control algorithm for sagittal stepping

#### 4.2 動的3次元2足歩行の安定性と目標歩行周期への追従に関する実験

Fig.9(a)-(c) に、股関節角度の振幅  $\theta_{2a,4a} = 1.0$  [deg] で3次元2足歩行させた場合の腰関節角度  $\theta_1$  の変化、股関節  $\theta_2$  の変化、そして歩行周期  $T$  の変化を示す。本実験では最初に腰関節を周期  $T = 0.5$  [s],  $\theta_{1a} = 8.0$  [deg] で  $5T^* = 1.8$  回振ってから自動的に動的3次元2足歩行を開始させている。また、目標歩行周期を  $1.8$  [s], 坂道の

<sup>2</sup>Fig.8 中の番号は、Fig.2 中の番号に対応している

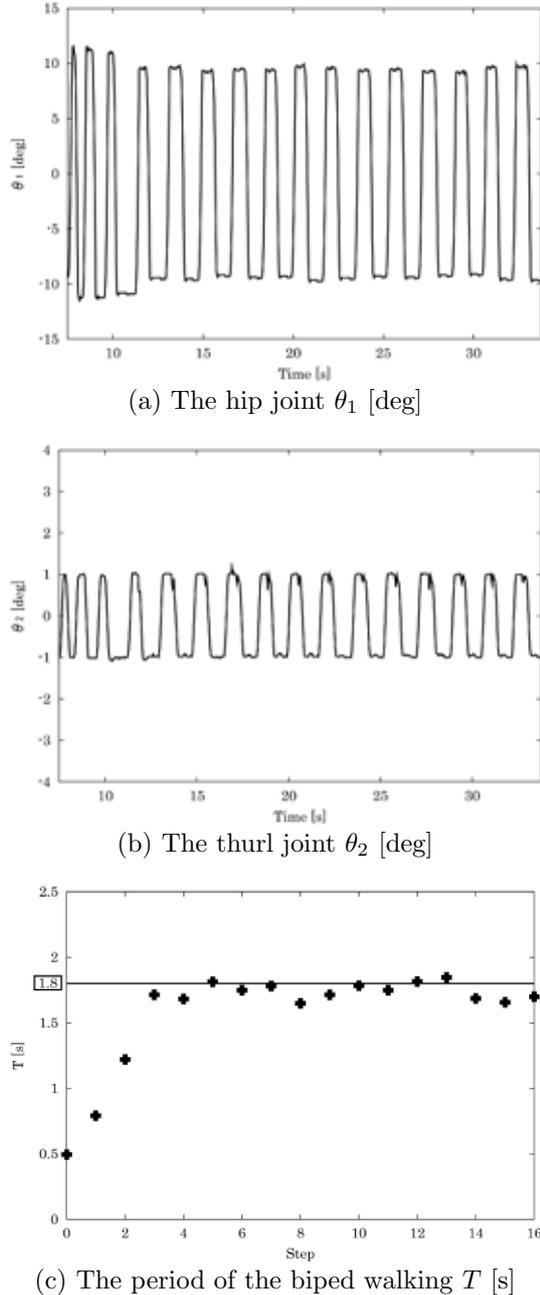
勾配  $\gamma = 4.0[\text{deg}]$  とした。このときの歩幅は  $1.7 [\text{cm}]$  であった。股関節角度の振幅は  $2 [\text{deg}]$  まで歩行可能 (歩幅  $3.4 [\text{cm}]$ ) であったが、 $3 [\text{deg}]$  では着地姿勢が不安定となり、 $4 [\text{step}]$  以上歩行することができなかった。

## 5 おわりに

本研究では、3次元2足歩行を実現するために前額面内の揺動運動の周期を上半身によって制御する手法の提案を行った。上半身の姿勢を遊脚の着地のタイミングによって切り替えることで、前額面内の安定な揺動運動を実現した。さらに上半身の振幅を変化させることにより、目的とする歩行周期への収束させることができ、このことを利用して足幅の短い3次元2足歩行を実現した。しかし、本研究では膝関節を固定としたために安定な着地姿勢をとることができず、歩幅の長い歩行は実現することができなかった。これまでに提案されている弾道学的歩行などの矢状面内の歩行と組み合わせることにより、より動的な歩行を実現することが今後の課題である。

## 参考文献

- [1] Tad McGeer. Passive Dynamic Walking. The International Journal of Robotics Research, No. 3 (1990), pp. 62–82.
- [2] Fumihiko Asano, Masaki Yamakita, and Katsuhisa Furuta. Virtual Passive Dynamic Walking and Energy-based Control Laws. In Proceeding of the 2000 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, (2000), pp. 1149–1154.
- [3] K.Osuka and Y.Saruyta. Development and Control of New Legged Robot QUARTET III. In Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, (2000), pp. 991–995.
- [4] Steven H. Collins, Martijn Wisse, and Andy Ruina. A 3-d passive-dynamic walking robot with two legs and knees. The International Journal of Robotics Research, Vol. 20, (2001), pp. 607–617.
- [5] 長谷川 泰久, 土井 将弘, 福田 敏男. 受動関節に基づく動的歩行制御ロボティクスメカトロニクス講演会'03 講演論文集, (2003), CDROM, 1P1-1F-D7.
- [6] G. Taga. A model of the neuro-musculo-skeletal system for human locomotion. I emergence of basic gain. Biol. Cybern., Vol. 73, (1995). pp. 97–111.
- [7] 宮腰 清一, 多賀 厳太郎, 國吉 康夫, 長久保 晶彦. 神経振動子を用いた三次元2足踏みシミュレーション日本ロボット学会誌, Vol. 18, No. 1, (2000), pp. 87–93.
- [8] Masaki Ogino, Koh Hosoda, and Minoru Asada. Learning Energy Efficient Walking with Ballistic Walking Proceeding of the 2nd International Symposium on Adaptive Motion of Animals and Machines, (2003), CDROM, ThP-I-5.



**Fig.9** The angle of the hip joint  $\theta_{1a}$  and the thurl joint  $\theta_2$ , the period of the biped walking  $T$  when the angle of the thurl joint  $\theta_{2a}$  is  $1.0 [\text{deg}]$