

上体を持つ2足歩行ロボットの前後面内運動の動的安定化

月野木一精[†], 荻野正樹[†], ○細田耕^{‡†}, 浅田稔^{‡†}
[†] 大阪大学大学院工学研究科, [‡] 阪大FRC

Dynamic Stability of Lateral Motion of a Bipedal Robot

Issei TSUKINOKI[†], Masaki OGINO[†], ○Koh HOSODA^{‡†}, and Minoru ASADA^{‡†}
[†]Graduate School of Engineering, Osaka University, [‡]Handai FRC

Abstract—In this paper, we experimentally investigate the dynamic stability of lateral stepping motion of a biped robot. The stepping of the biped is stabilised by the phase shift based on the touching information of foot sensors. Experimental results show that the stepping frequency is controlled by changing the amplitude of the torso swing and the angles of ankles.

Key Words: biped locomotion, phase shift, lateral stepping, torso driven

1. はじめに

近年開発されているヒューマノイドの代表的な2足歩行の制御方法は、ZMP(Zero Moment Point)を規範として関節軌道を生成し、その関節軌道に追従させる方法であった [1]。この方法を用いる場合、関節軌道はロボットのダイナミクスモデルから計算されるため、モデル化誤差や外部環境からの外乱の影響を受けやすい。

一方で、身体を適切に設計することで、緩やかな勾配をアクチュエータなしに重力と慣性力のみを利用して受動歩行させることができる Passive Dynamic Walking [2] や、制御系として生物が生得的に持つ神経回路CPG(Central Pattern Generator)を模した振動子を用いた歩行 [3, 4, 5] など、身体あるいは制御系のダイナミクスを適切に設計し、これらと環境との相互作用を利用して適応的な歩行を実現する方法が提案されている。これらの方法によって実現される歩行は、環境との相互作用を利用するため環境変動に対して適応的であることが期待される。土屋ら [4] は脚先の接地情報によって振動子の位相をシフトさせることにより環境との相互作用を導入し、安定な歩行(足踏み)を実現している。また、長谷川ら [5] は、足首関節に受動性を持たせ、その値に制限を加えることにより安定な歩行を実現している。しかし、これらの研究において、身体と制御系の持つダイナミクスは基本的に固定であるため、環境との相互作用によって生み出される歩行周波数は単一になる。より柔軟な歩行を実現するためには、環境の状況に応じて歩行周波数を変化させる必要があるが、身体や制御のダイナミクスを変化させた時に、環境との相互作用によって生み出される歩行の変化について調べておく必要があると考えられる。

本報告では、2足歩行ロボットの前後面内での足踏み動作を対象とし、接地情報から運動位相を変化させることによって生み出される安定な足踏み動作について、身体と制御系のパラメータの変化に対する周期の変化を実験的に確かめた。

2. 上体を持つ2足歩行ロボットの試作

Fig.1に実験に使用したロボットを示す。このロボットは、身長0.88[m]、本体重量6.55[kg]で7自由度を持っているが、今回の実験ではFig.2に示すように両脚の足首関節と腰関節の3自由度のみを用いる。腰関節と足首関節には、それぞれmaxon製RE25(減速比36:1)、maxon製RE25(減速比46:1)を用いた。各部の寸法及び重量をTable 1に示す。ロボットには、腰部に加速度センサ、各関節にエンコーダ、各脚裏に接触センサを取り付け、それぞれ胴体の傾き、関節角、及び脚裏の接触を検出することができる。また、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。

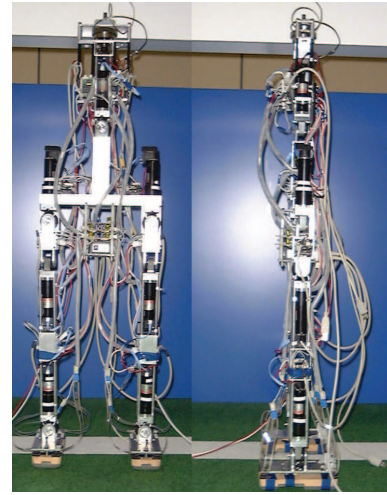


Fig.1 A biped robot with a torso used for the stepping experiments

3. 前後面内での足踏みの実現

3.1 腰関節の制御アルゴリズム

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、前後面内の足踏

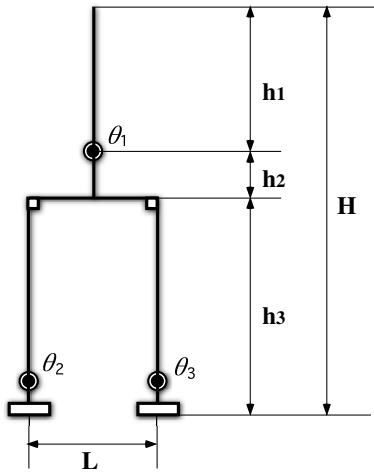


Fig.2 Degrees of freedom used for the stepping experiments

Table 1 Parameters of the biped robot

	Length [mm]	Mass [kg]
H	880	6.55
h_1	210	2.35
h_2	140	1.40
h_3	480	1.40×2
L	200	*

みを実現する。腰関節は Fig.3 に示すように、

- Move(= 姿勢変化) 相から Stay(= 一定) 相への時間に応じた位相変化
- Stay(= 一定) 相から Move(= 姿勢変化) 相への外側の接触センサの接地情報に基づく位相変化

というように位相を変化させ駆動する。Stay 相では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ので、身体のダイナミクスと環境とが相互作用して安定で効率の良い足踏みが期待できる。

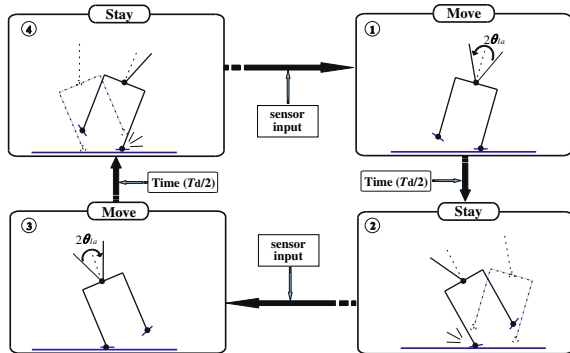


Fig.3 Control algorithm for the lateral stepping of the biped

3.2 軌道生成及び実験設定

それぞれの相に応じて、腰関節の目標軌道として

$$\theta_{1d}(t) = \begin{cases} \pm\theta_{1a} \cos \frac{\pi t}{T_d} & (0 \leq t < \frac{T_d}{2}) \\ \mp\theta_{1a} & (\frac{T_d}{2} \leq t \leq \frac{T_d}{2} + T_s) \end{cases} \quad (1)$$

を与える (Fig.4). ここで T_d は、上体を振動させている間に脚裏が接地してしまわない程度に、ロボットの固有周波数よりも十分に短い値を用いることとする。腰関節には PID 制御

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

を適用し、与えられた目標値に追従させる。ただし前述のように、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、地面との相互作用によりロボット全体の周波数が決まる。

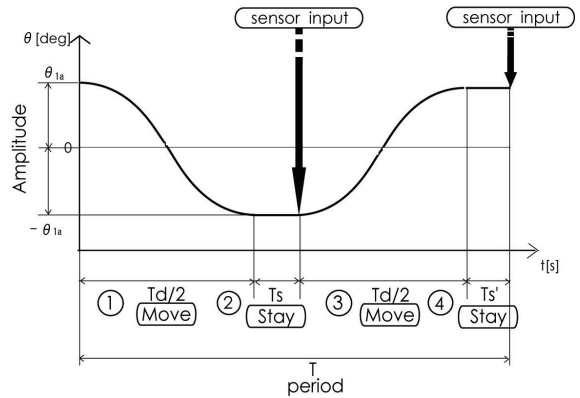


Fig.4 The desired angle of the hip joint: the phase shift is brought by the touching information from the foot sensors.

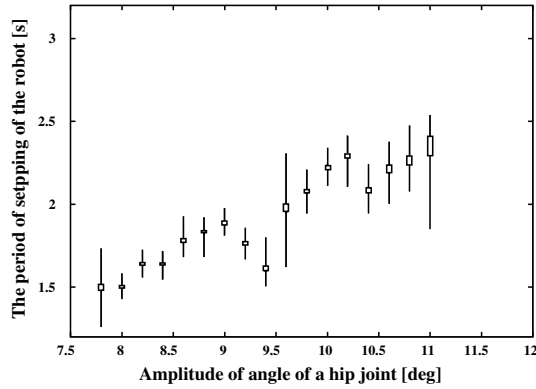
本報告では、身体と制御系のパラメータを変更することにより、前額面内の足踏みの周期がどのように変化するかを調査するために、以上の制御アルゴリズムを2足歩行ロボットに適用し、

- 腰関節の振幅 θ_{1a} (制御系のパラメータの変更に対応)
- 足首関節の角度 $\theta_2 (= \theta_3)$ (身体のパラメータの変更に対応)

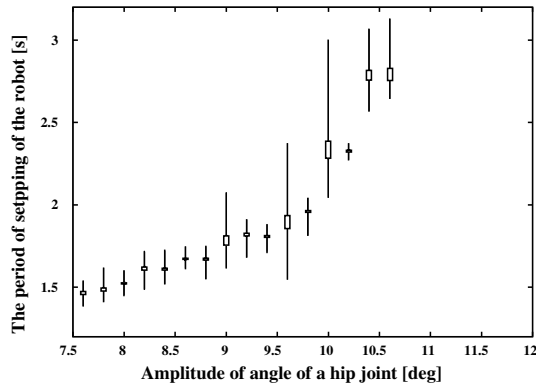
を変えた場合のロボット全体の振動について調べる。

4. 実験結果

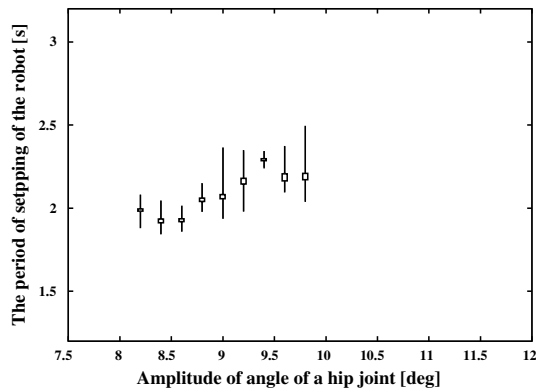
提案する制御手法を用いてロボットを制御し、足踏み運動の安定性について調べた。足首関節角 $\theta_2 (= \theta_3)$ を 1.0, 5.0, 10.0 [deg] に固定した場合それぞれについて、腰関節角度の振幅 θ_{1a} を変化させた時に生じるロボットの周期 T を Fig.5(a)-(c) に示す。図中では、各振幅ごとに周期の広がり線を線で表している。従って、より安定な、つまり周期に揺れがない場合には線分が



(a) the ankle joints $\theta_2(=\theta_3) = 1.0$ [deg]



(b) the ankle joints $\theta_2(=\theta_3) = 5.0$ [deg]



(c) the ankle joints $\theta_2(=\theta_3) = 10.0$ [deg]

Fig.5 The relationship between amplitude of angle of a hip joint and the period of stepping of the robot

短く、逆に周期に揺れが生じる場合には線分が長くなる。また、同一軸上に分散もボックスで表記してある。一連の実験において、前述のように周期と干渉しない程度に上体の振れ時間 T_d を短くするため、0.5 [s] とした。

4.1 制御系のパラメータ変更が周期に及ぼす影響

Fig.5(a)-(c)より、足首関節の角度の大小に関わらず、腰関節の振幅 θ_{1a} が増すとロボット全体の振動周期 T も増すという傾向がわかる。特に、足首関節角 $\theta_2(=\theta_3)$ が 5.0 [deg] の場合は、振幅 θ_{1a} を変化させることによ

り、周期 T を 1.4 [s]~2.8 [s] の範囲で変化させることが可能である。

4.2 身体のパラメータ変更が周期に及ぼす影響

足首関節の角度 θ_2 が 1.0, 5.0, 10.0 [deg] と増加するにつれて、安定な振幅 θ_{1a} の領域が減少する傾向にある。但し、1.0 [deg] の場合には、5.0 [deg] の場合と比較して、振幅の変化が振動周期により大きな影響を及ぼしていることが分かる。つまり、足首関節の角度が大きいほど、上体の振幅が振動周期に与える影響が大きいのが、それと同時に不安定になってしまうと考えられる。

4.3 接触センサの位置が周期に及ぼす影響

ここまで示したのは、脚裏部の外側の部分の接触センサの情報を基に、位相を変化させた実験結果である。脚裏部は広がりを持ち、接触センサは複数ついているので、内側の接触センサを用いて同様の実験を行い、接触センサの位置によって周期にどのような影響を与えるかを調べた。結果を Fig.6 に示す。

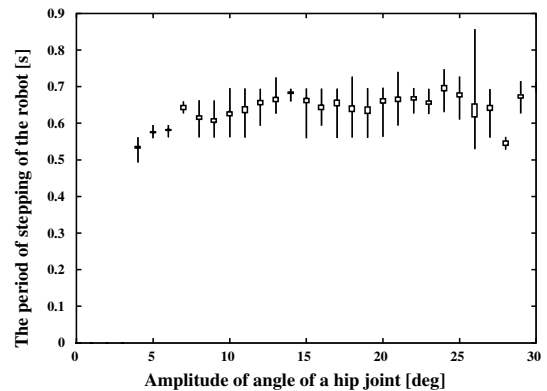


Fig.6 The relationship between amplitude of angle of a hip joint and the period of stepping of the robot utilizing signals from “medial” foot sensors

非常に興味深いことに、内側の接触センサを用いた場合には、上体の振幅が全体の周期に及ぼす影響が極めて少なく、0.65 [s] でほとんど同じ周期となる。これは、身体的设计によっては、環境との相互作用によって生じる振動にバリエーションが生じないということの意味している。本報告でのケースのように、足首関節の角度や上体の振幅によって周期を変更し、タスクや環境の変化に対応するためには、身体的设计に注意をする必要があることが示唆されていると考えられる。

5. おわりに

本報告では、2足歩行ロボットの顔面内での足踏み動作を対象とし、腰関節の振幅と足首関節の角度、さらには使用する接触センサを変更することによって、安定な振動の周期がどのように変化するかについての調査を行った。

まず、振動の周期を身体や制御のパラメータによって制御するためには、例えば接触センサの位置など、身体的设计に注意する必要があるということが分かった。この条件が満たされている場合には、上体の振幅や、足

首関節の角度を変更することにより全身の振動数をある程度制御することができた。但し、振幅が振動数に影響を与えるように足首関節の角度を大きくすると、それに伴って全体的に不安定になる傾向が観察された。

本報告で実現されたのは、前額面内の足踏み動作のみである。ロボットが前進するためには、矢状面内の運動に同期して、このような前額面内の足踏みが実現される必要がある。土屋ら [4] や長谷川ら [5] の方法では、単一周期の振動しか実現できないため、矢状面内の動作に同期することは困難であると考えられるが、本報告で提案する手法を導入することにより、矢状面内では受動歩行（あるいは省エネルギー歩行）を実現し、それに同期した前額面内の運動を実現できるのではないかと考えている。

参考文献

- [1] 梶田秀司：ゼロモーメントポイント (ZMP) と歩行制御, 日本ロボット学会誌, Vol.20, No.3, pp.229-232, (2002).
- [2] Tad McGeer: Passive Dynamic Walking, The International Journal of Robotics Research, No.2, pp.62-82, (1990).
- [3] G. Taga: A model of the neuro-musculo-skeletal system for human locomotion. I emergence of basic gain, Biol. Cybern., Vol.73, pp.97-111, (1995).
- [4] 土屋和雄, 辻田勝吉: Central Pattern Generator モデルに基づく 4 脚歩行ロボットの歩行制御, 日本ロボット学会誌, Vol.20, No.3, pp.243-246, (2002).
- [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 pp.CD-ROM 1P1-1F-D7, (2003).