

上体姿勢を鉛直に保った2脚ロボットの動的動作制御

Dynamic Motion of Biped Robot with Body Attitude Control

○熊谷 正朗*, 江村 超*, 富田 裕明*

○Masaaki Kumagai*, Takashi Emura* and Hiroaki Tomita*

* 東北大学大学院 工学研究科

* Faculty of Engineering, Tohoku Univ.

キーワード: 歩行ロボット (Walking robot), 姿勢制御 (Attitude control),
姿勢センサ (Attitude sensor),

連絡先: 〒980-77 東北大学大学院 工学研究科 機械電子工学専攻 メカトロニクス設計学
熊谷 正朗, Tel. (022) 217-6969, Fax. (022) 217-7027,
E-mail kumagai@emura.mech.tohoku.ac.jp

1. はじめに

車輪やクローラなどが適さない環境におけるロボットの移動手段として、脚移動機構が挙げられる。産業用としては、より安定な4脚、6脚ロボットが有用であると考えられるが、接地面積が小さく、人間に近い形態である2脚ロボットは人間に近い環境での応用が期待できる。また、医療分野への応用も考えられる。

現在なされている研究は、ロボットの自由度の観点から大きく2つに分けられる。一方は運動をsagittal面¹に拘束するなどした低自由度のロボットに関するもの¹⁾²⁾であり、他方は人間に近い多くの自由度を持たせたロボットに関するもの³⁾である。本研究は後者に属するものであり、用いたロボットは人間のような歩行を実現することを目的として設計製作された多自由度のものである。多くの場合、前者はセンサ情報に基づいた歩行を実

現しており、後者はロボットのモデルと動力学を用いてZero moment point (ZMP)などを基準にあらかじめ歩行パターンを作成しておき、これにセンサによる補正を加えて歩行を実現している。

あらかじめ歩行パターンを準備しておく制御方法も試みられたが、この方法では定常状態における歩行においては、安定した歩行を行なうものの、大きな外乱により歩行周期そのものに乱れが生じた場合などには十分対処できないものであった。

そのため、昨年度より低自由度のロボット同様、センサ情報に基づいた制御を試みている。昨年度は簡単のために、ロボットの股関節のroll軸を固定しロボット全体を傾斜させるという歩容を採用し、歩行に成功した⁴⁾。しかし、現実の人間を観察すると、股関節や腰を利用し、上体を傾斜させることなく歩行している。これは視覚や平衡感覚を有する頭部の周期的な傾斜を避けるためと思われる。そこで、本研究ではロボットの上体を鉛直に保ったま

¹矢状面: pitch 軸に垂直な平面

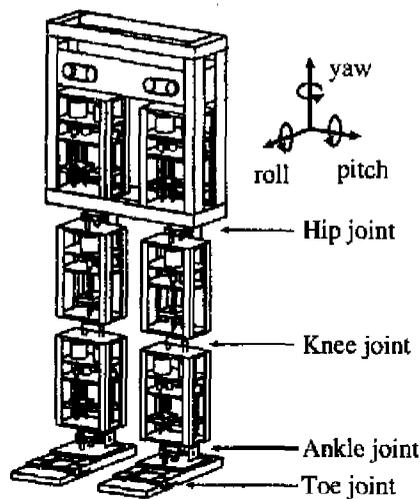


Fig.1 The biped robot "Monroe".

まの歩行動作を試みた。

2. 実験装置

まず、本研究で用いた2脚ロボット "Monroe" について解説する。

2.1 ロボットの機構

このロボットは Fig.1 に示すような、身長約 1.2m 質量約 22kg の人間型 2 脚ロボットであり、人間のような動歩行を実現するために 1988 年に設計・製作されたものである。脚の長さ等の寸法は身長 1.6m の人間にほぼ等しい。股には pitch, roll, yaw の 3 自由度の、膝に pitch の 1 自由度の、足首に pitch, roll の 2 自由度の能動関節を有する。また、蹴りだし動作時に安定した爪先接地を得られるように爪先に pitch の 1 自由度の受動関節を有する。これにより爪先接地時に ZMP を安定して検出することが可能である。片足あたり 7 自由度、全体で 14 自由度（うち受動 2）を有するロボットである。

足首および股関節の pitch, roll 自由度には江村によるパラレルクランクスライダ機構を用いており、これにより非常にスタイルの良く設計されている。その他の能動自由度は、それぞれクランクスライダ機構により駆動されている。アクチュエータは DC サーボモータであり、電流制御、速度制御が可能なサーボアンプを用いている。

2.2 ロボットのセンサ系

本ロボットには、多種複数のセンサが取り付けられている。これらは姿勢センサ系、床反力センサ系にわけられる。センサ信号はセンサプリアンプの直後で即 AD 変換を行ない、耐ノイズ性の向上をはかっている。

2.2.1 姿勢センサ系

ロボットの pitch 軸および roll 軸回りの傾斜角、角速度を検出できるように、振動型圧電ジャイロを装備している。ジャイロはそれぞれの軸に 2 種類を配置し、合成ジャイロ⁵⁾を構成している。これにより、ロボットに必要な応答性、歩行衝撃への耐性を確保している。さらに姿勢角のゼロ点の安定性を確保するために両軸に傾斜計を装備している。得られた角度信号は減算型フィルタ⁵⁾により合成ジャイロから得られる信号と合成している。

2.2.2 接地力センサ系

実際のロボットの足底の接地状況、および、足底重心 (ZMP) の検出のため、足底に 1 軸の力センサを 6 個を取り付けている。爪先立ちになった場合にも安定に検出できるように、爪先に 4 個、踵に 2 個配置している。これにより、脚接地力、足底面内の重心位置、両脚の間の重心移動を検出することができる。

2.3 制御システム

ロボットの制御には 3 台のパーソナルコンピュータを用いている。1 台 (PC9821-Ap) は全体の運動計画、脚の運動学、逆運動学計算を行なう マスタコンピュータであり、他の 2 台 (PC9821-Bp/PC9821-RA) はセンサ情報処理、12 個のサーボモータの位置制御を行なう スレーブコンピュータである。これらは共有メモリを通じて情報交換を行なっている。

マスタコンピュータの運動計画部は、センサ処理用スレーブから得られる姿勢情報、接地力情報を

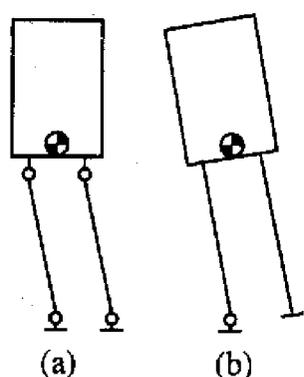


Fig.2 Two methods of oscillatory motion.

もとに、以下で述べる制御則を用いて、ロボットに固定した座標系における脚の足首関節の座標、および足底面の法線ベクトルを決定する。脚、関節の逆運動学計算を行なうことにより、これらをモータの回転角に変換し、スレーブの位置サーボプログラムへの指令値とする。逆運動学計算は実時間で行なっている。

3. 制御方法

3.1 体重移動方法

歩行動作を行なうためには、その第一段階としてロボットの体重を一方の足に移動させる必要がある。その後、他方の足を離地させ、適切な場所に移動、接地させる。この体重の移動方法として、大きく分けて

- 上体の姿勢を保ったまま股関節を内転させ、支持脚²の上に重心を移動させる (Fig. 2 (a))
- 股関節を固定したまま、足首を軸に全体的に傾斜させ、支持脚の上に重心を移動させる (Fig. 2 (b))

という二つの方法、およびこれらを複合した動作が考えられる。

人間を含めた動物の歩行を観察すると、上体を Fig. 2 (b) のように傾斜させることで体重移動することは稀であり、(a) のようにほぼ鉛直を保つこ

²片脚で支持している期間に体を支持している脚

とが多く、またさらに股関節を屈曲させ上体を内側に若干傾斜させる例も見られる。これには多くの重要な感覚器 (視覚・平衡感覚) や脳に周期的な傾斜の変動を与えることを避ける、という目的があると思われる。

ロボットの制御という面からこれらの方法を比較すると、(b) が (a) より制御し易いといえる。まず、第一に (a) の方法はロボットの全荷重が加わった状態で支持脚を大幅に運動させる必要があるため、支持脚の股関節にかなりの負担を強いるという構造的な問題点がある。第二に安定性の問題がある。(b) の方法では体重の移動は両脚で支持している極短い期間に瞬時に行なわれ、ロボットが若干でも傾斜した段階で、体重は傾斜している側の脚に移動している。そのため体重移動を完了した段階では、傾斜の復元力が作用し周期性が保たれる限界³までかなりの余裕が存在する。それに対して (a) の方法を用いた場合、体重の移動が終了した状態では、当然内側に移動させた足の上にロボットの重心が存在する。そのため、Fig. 2(a) で左方向へ転倒する限界までほとんど余裕が存在しないことになり、安定性を確保しつつ十分な体重移動を行なうことには容易ではない。これは慣性力を考慮した場合にも同様である。

昨年度はセンサ情報に依存した制御方法を検討することが目的であり、以上のように制御のより容易な (b) の方法を使用した。しかし、(b) の方法は生物的ではないという理由の他に静的な動作が不可能であるという欠点も存在する。そこで、本年度は (a) の方法により歩行に必要な動作が可能かを検証した。

3.2 単脚支持期における姿勢制御

ロボットが歩行動作をする上でもっとも重要なことは単脚支持期、すなわち片方の脚のみで支持した状態で安定に制御することである。単脚支持

³静的にはロボットの重心が支持脚の足の直上にある状態

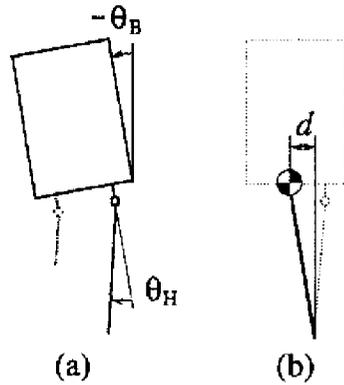


Fig.3 Supporting with single leg.

期に生じた不安定要素はある程度は両脚支持期に取り除くことが可能であるが、それには限界があるためである。本制御法ではもっとも注意すべき点は上体の姿勢である。

単脚支持状態における上体姿勢の制御は股関節の角度の操作により行なう。以下、この制御について述べる。ロボットの roll 軸回りの状態を単純化したモデルを Fig.3 に示す。(a) に示すようにロボットの上部が傾斜した状態における基本的な制御方法は

$$\theta_H[t+T] = \theta_H[t] + K_a \theta_B[t] \quad (1)$$

とした。ここに $\theta_H[t]$, $\theta_B[t]$ はそれぞれ時刻 t における股関節の上体に対する角度、上体の傾斜角であり時計回りを正とする。 K_a はゲインであり、 T は制御のサンプリング周期である。この制御則は“上体姿勢を補正するように現在の股関節角度の修正を行なう”というものである。この制御において支持脚の脚長は一定に固定した。ロボットの重心を一定の高さに固定する方法もあるが²⁾、人間の場合は脚をほぼ伸ばし切った状態で歩行しており、可変長にした場合には膝関節への負担も大きくなるため、ここでは固定長とした。

この方法によってもある程度は上体の姿勢が鉛直に制御されるが、偏差が生じる(この過程で θ_H は時間とともに大きくなることは明らか)。 K_a を大きくすることで偏差を小さくすることは可能であるが、ある点を境に発振を起こすため、あまり大

きくはできない。そこで、式(1)を変更する。

$$\theta_H[t+T] = \theta_H[t] + K_a \theta_B[t] + T(K_d \dot{\theta}_H[t] - K_c T A_c[t]) \quad (2)$$

$$A_c[t] = Mg d[t]/I \quad (3)$$

ここに、 M , I はそれぞれロボットの質量および接地点まわりの慣性モーメント、 g は重力加速度、 d は Fig.3(b) に示したように接地点から重心までの水平距離であり、 K_d, K_c はあるゲインである。式(2)で追加された項は現在の股関節屈曲速度の維持、および重力補償を目的としている。ロボットを下端が自由である倒立振子とみなした場合、重心と接地点の位置関係は時間とともに変化するものの、加速度的に傾斜することは明らかである。これが式(1)を用いた際に生じる偏差を大きくする原因でもある。そこで、現在の股関節の速度をある程度維持し、かつ重力による加速度(式(3))をある程度補償することで動作を改善した。厳密には倒立振子モデルより上体の傾斜を予測し、遊脚⁴を含めた上体と支持脚のモデルより計算される量を股関節に指令すべきであるが、本制御方法は基本的にはフィードバック制御であり、また、バックラッシュなどモデル化が困難である要素の存在を考慮すると式(2)で十分であると考えられる。なお、実際の制御に際しては同様な理由により、慣性モーメントには大きな変化はないため固定値を採用し、重心位置は脚の関節角度より大まかに算出することとした。

3.3 その他の制御

3.3.1 足底ならい制御

制御時に支持脚の足底が浮き上がり、線接地状態になることは一般に制御上不都合を生じさせることが多い。面接地している限りは足首関節を用いて上体に適当なトルクを作用させることが可能

⁴接地していない脚

である。そこで、可能な限り足底を面接地させておく必要があると考えられる。

本制御では接地力センサから得られる実際の重心位置を、目標点に一致させるように足首を制御した。この制御により、足底を面接地に保つことが可能である。また、目標点を足底内の任意の点に設定することで、足首関節からのこの点の距離と接地力の合計値の積により計算されるトルクを足首関節に発生させることができ、姿勢の安定化などにも使用可能である。

3.3.2 体重移動

ロボットの静止状態から、前述の単脚支持期における姿勢制御に移行するためには、片方の脚を離地させる必要がある。前述の制御則自体は直立両脚支持状態 ($\theta_H = 0$) から単脚支持に移行した場合にも適用可能であるが、Fig. 3(b)における d がすでに大きく、急激に傾斜が増大するため、脚を上げておくことが可能な時間は極短い。支持脚股関節が可動限界に達してロボットが転倒する前に遊脚を接地しなければならないためである。そこで、離地の前のある程度 d を小さく、すなわち支持脚側にロボットの重心を移動させることが必要である。

この移動を行なう際には脚の接地力の比を基準として目標値に達するまで等速で両脚の股関節角度を変化させた。脚長は変化させないとしたため、脚が並行でない場合(実際に脚の衝突を避けるために若干股を開いている)、股関節角度の変化に伴って幾何学的に上体が傾くことになる。この問題は足首関節の pitch 自由度を利用し、遊脚になる側を“爪先立ち”にし、仮想的に脚長を伸ばすことで対処した。具体的には上体の傾斜角に比例した速度で足首を屈曲させるというフィードバックを行なった。

なお、一方の脚の接地力がほぼゼロとなるまで移動した場合には静的に脚を上げることが可能となり、静歩行動作が実現できた。

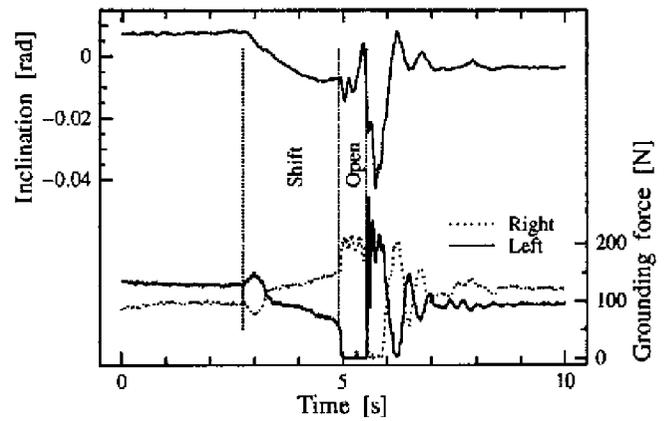


Fig.4 Change of roll-inclination of body and grounding force of each leg in one step

3.3.3 全体の動作

上述の動作を組合せることで、足踏み動作を行なうことが可能である。この動作は両脚支持による体重移動期と単脚支持による脚の踏み替え期からなる。後者はさらに離地させる足の上昇、停止、下降の3期間に分割される。

第一段階として、初期状態の両脚支持状態から体重移動を行なう。これによりロボットの荷重が一方の脚に偏り、両脚の接地力が指定した比率になった段階で遊脚側の足を指定した高さに上昇させ、単脚支持に移行する。単脚支持期の制御により支持脚股関節角度が変化するため、これを基準として遊脚の股関節角度、足の下降時期を決定する。単脚支持期の終了はこの足の接地による。

4. 実験

以上の制御則を基本として動作確認の実験を行なった。各種ゲインパラメータは実験により決定した。行なった実験は、(1) 動的に開脚する、(2) 2歩の足踏み、(3) 足踏みと同時に脚を前に送り出す(歩行開始)、である。

(1)は短脚支持期に制御が動作しているかを確認するものであり、Fig. 4に roll 軸回りの姿勢角および左右脚の接地力の推移を、Fig. 5に動作をスティック線図化して(a) 体重移動、(b) 単脚支持期に分けて示す。この時の足上げ量は 20[mm]、脚先間距離は

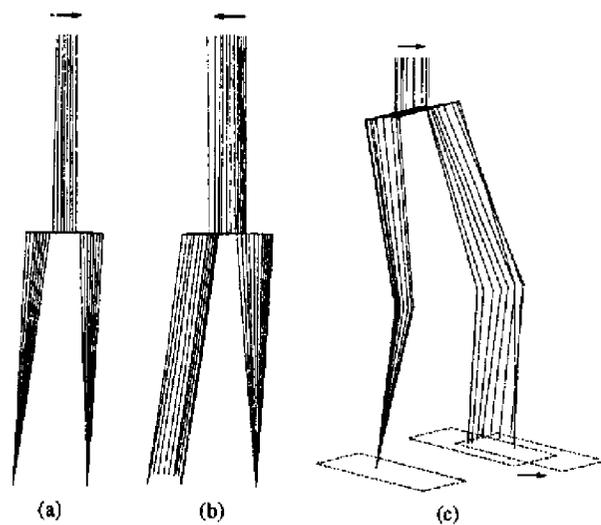


Fig.5 Stick diagram of step motion.

200⇒290 [mm] である (股関節間距離は 140 [mm]). 時刻 2.8 [s] に体重移動制御を開始し (Shift), 4.9 [s] に単脚支持へ移行している (Open). これは脚の支持荷重が 3:7 になることを条件とした. この後, 5.5 [s] に遊脚が接地している. ここで制御を停止しロボットの関節を固定したため, 慣性によりロボット全体が左方向への大きく傾き, 右脚が一時離地している. この結果より, 制御中の姿勢角の変動は ± 0.02 [rad] 以下であることが確認できる. 昨年度のロボット全体を傾斜させる制御方法では十分な足上げを確保するには, $\pm 0.05 \sim 0.10$ [rad] 程度の傾斜を必要としていた. これに比較すると上体の傾斜変動は小さく押えられているといえる. Fig. 5(b) からも, 姿勢角に大きな変動がないことが確認できる.

(2) は (1) の動作を継続して行なうことが可能かを検証するものである. ただし, 脚先間距離は約 200 [mm] で固定した. 動作が可能であることは確認したが, 安定性, 速度に不十分な点があった.

(3) は歩行を含めた前後方向への動作の拡張の可能性を確認するものである. 具体的には (1) の動作の単脚支持期の動作に支持脚を後方へ, 遊脚を前方へ等速で振る動作を加えたものである. Fig. 5(c) に実際の動作をスティック線図で示す. このときの前進量は約 100 [mm] であった.

5. おわりに

本研究では, 人型 2 脚ロボットの上体の姿勢制御をともなった, 歩行に必要な動作をセンサ情報により行なうことを目的とし, 以下の成果を得た.

- 脚長一定の状態では股関節角度を操作することにより単脚支持状態において上体を垂直を保つことに成功した. この際, ロボットの姿勢より計算されたフィードフォワード項を加えることで制御を改善した.
- 単脚支持期の制御に体重移動, 遊脚の運動を加えることで動的な開脚動作を実現した. また, これを組み合わせることで十分な安定性は得られていないものの足踏み動作を行なわせることに成功した.
- 単脚支持期に脚の前後方向の自由度を利用することで前方に足を踏み出す動作を行なわせることに成功した.

今後の課題として, 現在ほぼ静的に行なっているために時間を必要とする体重移動動作をより高速化すること, また, 着地時の衝撃の吸収および着地後の姿勢の不安定性の改善が必要であると考えられる. これらを改善することで, より人間に近い歩行動作が可能になると考えられる.

参考文献

- 1) 渡辺, 井上, 山田: 慣性センサを用いて姿勢を安定化する竹馬型 2 足歩行ロボットの開発, 第 14 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, No.1, 195/196(1996)
- 2) 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, 1062/1069(1996)
- 3) 山口, 木下, 高西, 加藤: 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, 546/559(1996)
- 4) 熊谷, 江村: センサ情報による人型 2 脚ロボットの動歩行に関する研究, ロボティクス・メカトロニクス講演会'97 予稿集, 839/840(1997)
- 5) 江村, 熊谷, 小川, 郷古: 移動ロボット用姿勢センサのマルチセンサ法による特性向上, 第 5 回ロボットセンサシンポジウム予稿集, 33/38(1996)