

# マルチセンサによる 2 脚ロボットの姿勢制御に関する研究

## Attitude Control of Biped Robot by using Multiple Sensors

○熊谷 正朗\*, 江村 超\*, 笠井 紀昭\*\*

Masaaki Kumagai\*, Takashi Emura\* and Noriaki Kasai\*\*

\* 東北大学 工学部 \*\* 株式会社ニコン 精機事業部

\* Faculty of Engineering, Tohoku Univ.

\*\* Nikon Corporation

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 ), ジャイロ ( Gyroscope )

連絡先: 〒 980 - 77 東北大学工学部 機械電子工学科 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](mailto: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。

その 2 脚ロボットにもいくつか種類がある。竹馬型のロボット<sup>1)</sup>や、鳥のように胴体に比較して軽量の脚を持つロボット<sup>2)</sup>、そして、人間型の 2 脚ロボット<sup>3)</sup>である。さらに、そのなかでも、sagittal 面<sup>1)</sup>のみに動きを拘束し、制御を容易にしたロボットと、lateral 面<sup>2)</sup>の自由度も加えた複雑なロボットがある。

本研究で用いた 2 脚ロボットは、人間のような

<sup>1)</sup>矢状面: pitch 軸に垂直な平面

<sup>2)</sup>前額面: roll 軸に垂直な平面

歩行を実現することを目的として設計製作されており、lateral 面内の運動も考えた複雑なロボットである。同様な人間型の自由度を有するロボットは複数研究されているが、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行っているものが多い。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が、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と考えられる。また、モデルと実際の食い違いの影響も大きいと考えられる。

そこで、本研究においては固定した歩行パターンを廃し、センサからの情報によって自律揺動を生成した上で脚を動かし、歩行等を試みた。非常に単純なルールを用いたにもかかわらず歩行することが確認されたので報告する。

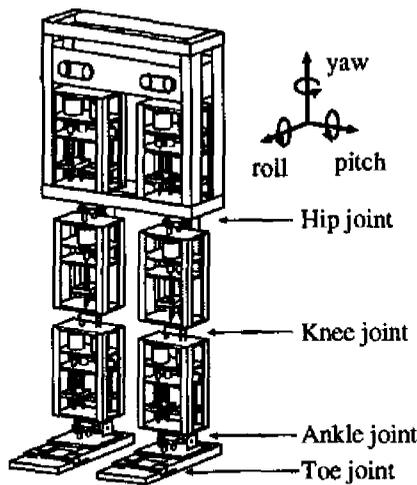


Fig.1 The biped robot "Monroe".

## 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21kg 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。本年、安定した爪先離地を目的として、あらたに受動の爪先関節を追加した。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

系に属している。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<sup>4)</sup>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。また、今回は使用していないが長時間の安定性の確保のために、傾斜計を装備することが可能である。

#### 2.2.2 床反力センサ系

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、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 Master Computer であり、他の2台(PC9801-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 Slave Computer 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。

Master Computer の運動計画部は、Slave1 から得られる姿勢情報、反力情報をもとに、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踵の座標、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、Slave2 の位置サーボプログラムへの指令値とする。以前

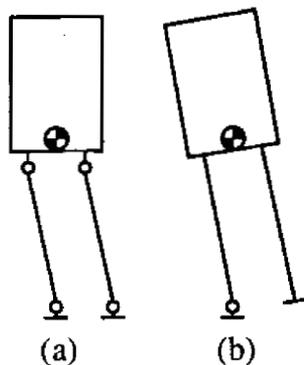


Fig.2 Two methods of oscillatory motion.

は、歩行前に脚先軌道を関節角軌道に変換しておいたが、今回は計算方法を見直し、実時間で計算するように改めた。

### 3. 足 踏

#### 3.1 足底ならい制御

足首を通して、上体から支持脚に過大なモーメントが加わった場合、場合によっては足底面が地面から浮き上がり、線接地となって、下端が自由な倒立振り子と等価となり、その結果、制御が困難となる。そこで、できる限り足底を面接地させておく必要があると考えられる。

インピーダンス制御など、いくつか方法は考えられるが、ここでは反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。この方法の利点は、足底を面接地に保ちつつ足首にトルクを発生させることができる点にある。目標点を足底内に設定するかぎりは足底が浮き上がることはない。また、目標点を足首直下に設定することにより、疑似的に自由関節とすることもでき、目標点を足首の直下から離すことにより、その距離と足に加わっている荷重とに比例したトルクを発生させることができる。

#### 3.2 体重移動

足踏み動作は体重移動と遊脚の運動に分けられる。体重の移動方法として、

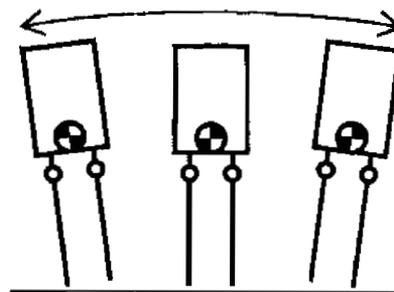


Fig.3 Oscillatory motion in lateral plane.

- 上体の姿勢を保ったまま股関節を内転させ、支持脚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))

動物を観察すると前者の形態が多く、上体が傾かないという点は評価できる。制御の点から見ると、前者は股関節に負荷がかかるため、後者の方が比較的容易に実現できる。そこで本研究では後者を採用した。

Fig.3 に示すような揺動運動を行なう場合、無制御では振動が減衰する。そのため、何らかの方法でエネルギーを追加する必要がある。この場合、各周期で一定量のエネルギーを追加し、リミットサイクルを生成することで振動を持続させることもできるが、ロボットは複雑で摩擦なども大きいため、安定性を保証できない。

そこで、本研究では lateral 平面内で考えた力学的エネルギーを一定値にするように制御した。これは、Fig.4 に示すような、ロボットが支持脚足首を中心に回転して生じる位置エネルギーと、角速度による運動エネルギーからなり、次式のようになる。

$$E = \frac{1}{2}I\dot{\theta}^2 + \frac{1}{2}M(l\dot{\theta})^2 + Mgl(\cos(\theta - \theta_0) - \cos(\theta_0)) \quad (1)$$

ここに、 $I, M, l$  はロボットを振り子とみなした場合の、足首を中心とした慣性モーメント、質量、重心までの距離であり、 $\theta_0$  はロボットの重心が支持脚の真上

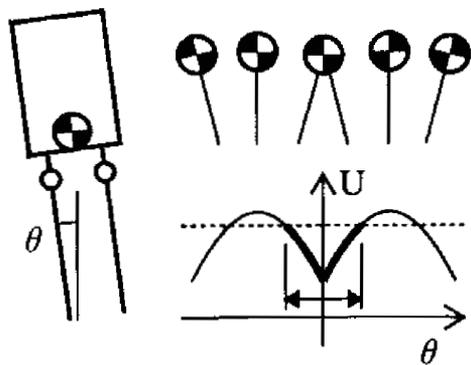


Fig.4 Potential energy in lateral plane.

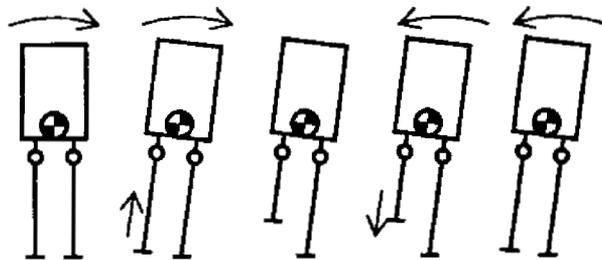


Fig.5 Sequence of stepping motion.

になる状態のロボットの傾斜角度である。ロボットが直立状態では  $E = 0$  となる。この両者の総和が運動時に保存されると考えた。つまり、このエネルギーを一定に保つようにすることで、適当な幅の振動を保つことができる。この制御の操作量としては、前述の足底重心位置の指令を用いる。これにより、支持脚の足底を面接地した状態を保ちつつ、揺動を維持することができる。

### 3.3 足踏

上述の方法による体重移動は、移動が完了した段階で、幾何学的に遊脚側は離地する。足踏み動作を行なうためには、さらに遊脚の伸縮を行なう必要がある。姿勢角を基準にして、足上げ量を制御する方法もあるが、脚を動かすことで姿勢角に影響を与え、足上げ量を大きくすると発振状態におちいる。そのため、姿勢角の数値は使用せず、等速で足の伸縮を行なった。

体重が移動したことを脚荷重より判定し、脚の上昇を開始する。前述のエネルギーを一定に制御している場合、いずれすべて位置エネルギーになり lateral 面内で停止、roll 軸傾斜角速度の符号が

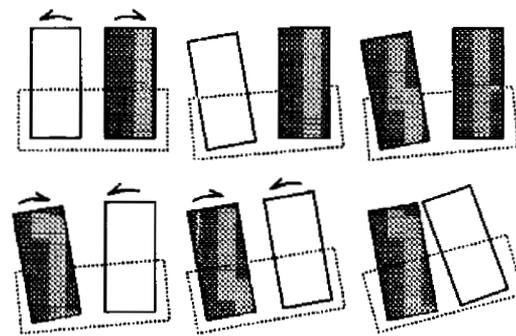


Fig.6 Foot motion in turning. The hatched rectangles are supporting leg. The white rectangles are floating leg.

反転する。この反転を検出し、脚の下降を行なう。この時の速度と体重移動の周期によって、足上げ量は決定される。一連の動作を Fig.5 に示す。

この方法により、足上げ量 30 mm 程度の安定した足踏みが可能である。

## 4. 旋回および歩行

足踏みを安定に持続している間に、足踏みに使用していない脚の自由度を用いることで、旋回や歩行を行なうことができる。ここでは、脚の切替えに合わせて脚先を動かし、これらを実現した。

### 4.1 旋回

旋回をする際の脚先の運動を Fig.6 に示す。この図では左旋回を示している。左脚が遊脚になった時に、両股関節の yaw 自由度を使い、爪先を開く。次に、右脚が遊脚になった段階で、今度は爪先を閉じる。これにより、旋回が可能であり、歩行と組み合わせることで曲線歩行が実現できる。また、ロボットの直進性が悪い場合に、若干の旋回動作を加えることで補正をすることが可能である。

この旋回のための yaw 軸運動は、平木が 6 年前に使用した方法であるが、当時は固定パターンを用いていたため、開脚先量は 10 度と小さいものだった。今回の足踏み運動の使用により 30 度以上とすることが可能である。

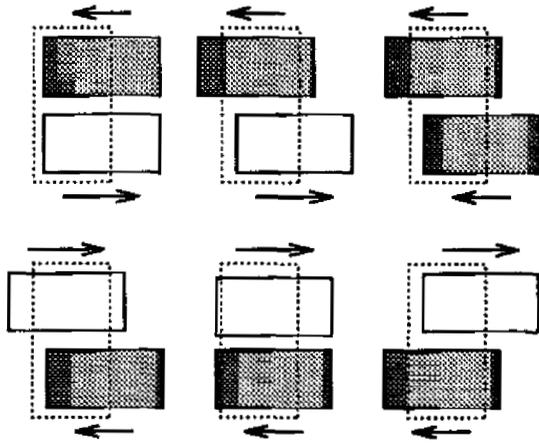


Fig.7 Foot motion in walking. The hatched rectangles are supporting leg. The white rectangles are floating leg.

## 4.2 歩行

旋回と同様に、支持脚、遊脚で脚先の運動を行なうことで、歩行を行なうことができる。ここでは、Fig.7に示すように、脚に荷重がかかった状態では脚を等速で後方に押しだし、かかっていない状態では、支持脚時の数倍の速度で脚を前に出す、という方法を用いた。足踏みが安定に行なわれている限りは、この方法で歩行することが可能である。

## 5. 実験

上述の方法を用いて歩行実験を行なった。実験はベルトコンベア上で行ない、長時間の歩行を可能とした。歩行時のデータを Fig.8, 9, 10 に示す。それぞれ、歩行時の姿勢角、足上げ量、足の前後移動量を示している。

定常的な歩行中は Fig.8 の前半部分に示すように、姿勢の傾斜振幅は  $0.1[\text{rad}]$  ( $5[\text{deg}]$ ) に収まっている。下は roll 軸の角度、角速度から計算された lateral 平面内エネルギーである。Fig.4 で示した、位置エネルギーのピークは、本ロボットの場合  $0.9[\text{J}]$  程度であるため、目標値は  $0.6[\text{J}]$  としている。衝撃による急激な変化などは観測されるものの、目標値にはほぼ正確に制御されている。

本方法では、足上げ量は、自律的に生成された足踏みの周期と、足上げ速度によって決定される。こ

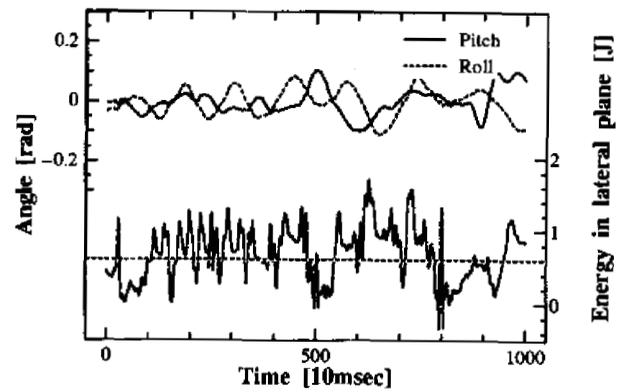


Fig.8 Inclination angle of robot and kinetic energy in lateral plane while walking.

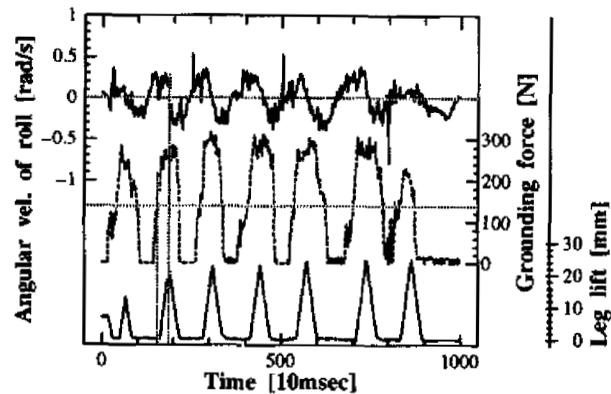


Fig.9 Stretching motion of a leg while robot is walking

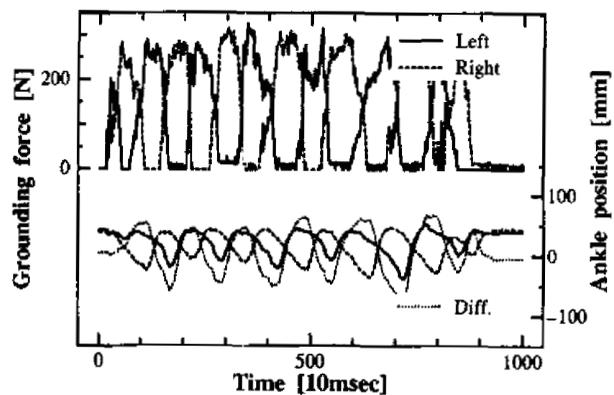


Fig.10 Motions of legs along walking direction. The positive of ankle position indicates forward

の実験では, Fig. 9 に示すように 25[mm] 程度である. これは, ロボットに固定した座標系で計算しているため, ロボットの roll 軸傾斜の効果も加えると, 30[mm] 以上の足上げ量を確保している. 足上げ量の上を示したデータはロボットの roll 軸角速度, 支持脚側の接地力である. 重心の移動とともに, 脚を上げ始め, 角速度の反転で脚を下ろし始めていることが確認できる.

Fig. 10 は歩行時の左右の脚の接地力と, 踵の前後方向の実際の移動量を示している. 踵位置は, 正值が前方への脚の振り出しを示している. 脚は 80[mm] 程度の振幅で前後しており, 脚に荷重がかかっている状態では後方に, 遊脚の状態で前方に移動していることがわかる. 点線は左右の脚の差をとったものであり, この絶対値が歩行時の前後の開脚量 (ステップ長) を示している. この歩行では 50~70[mm] である.

以上の歩行実験の結果は, 周期的であるものの一定周期ではない. これは, 本方法が固定周期を持たないため, 当然の結果である.

## 6. おわりに

本研究では, 人型 2 脚ロボットの動歩行を, 歩行パターンを定義せずに行なうことを目的とし, 以下の成果を得た.

- ロボットに必要と思われるセンサ類を考察し, ロボットの要求する性能を満足するセンサを開発, 搭載した.
- lateral 平面内の力学的エネルギーに着目し, 足踏みを安定に持続することに成功した.
- 足踏み動作を利用し, ストライド長 100 ~ 120[mm] の動歩行を実現した.
- 足踏み動作を利用し, 過去の研究を大幅に上回る速度での旋回を実現した.

- 従来, 歩行ロボットに不可欠であったモデル化を極力単純におさえ, 単純なアルゴリズムによる動作を実現した.

今後の課題として, 人間の歩行に近付けるために, 歩幅をより大きくし, 爪先も利用し, より安定なものにすることが挙げられる. また, 歩行と旋回の動作は独立であるため, これらを組み合わせることで, 従来は直線的であった 2 脚ロボットの歩行の研究を, 2 次元平面内での移動に拡張することも考えている.

## 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) 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)