

## 四足受動歩行ロボットの研究

東京大学 工学部 ○ 中西 泰人, 浜田 陽一, 下山 勲, 三浦 宏文

Study on Quadrupedal Passive Dynamic Walker

○ Yasuto Nakanishi, Youichi Hamada, Isao Shimoyama, Hirofumi Miura

Faculty of Engineering, The University of Tokyo

### 1. はじめに

これまでの動歩行を実現した歩行ロボットの多くは、コンピュータを用いた能動的な制御によって計画された軌道を実現させるものであった。しかし、本研究においては、コンピュータおよびモータを用いずに、重力と慣性のみによって動くロボットの実現を目的としている。

遊脚を単振り子または二重振り子、支持脚を倒立振り子と考え、坂道を下りることによって得られる重力エネルギーが、衝撃や摩擦で失われるエネルギーを補填することで歩行を成立させる。このような歩行を受動歩行と呼ぶことにする。

McGeer は松葉杖型の二足の受動歩行ロボットを製作し [1]、比留間らは四足のひざのないタイプのロボットを製作した [4]。本研究の目的は、ひざのある四足受動歩行ロボットの実現である。

### 2. 受動歩行

受動歩行のイメージを得るために、まず車輪を考える。摩擦を考えなければ、車輪は水平な床の上をエネルギーを失わずに回転していく (図 2.1)。

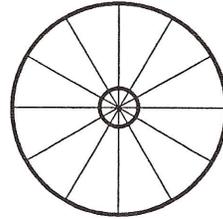


図 2.1 車輪

受動歩行の特徴としてエネルギー効率が良いということが挙げられるが、それは車輪の回転を歩行に変形させたものであるからである。以下に、どのような変形によって車輪の回転を歩行へ変えられるかを示す。

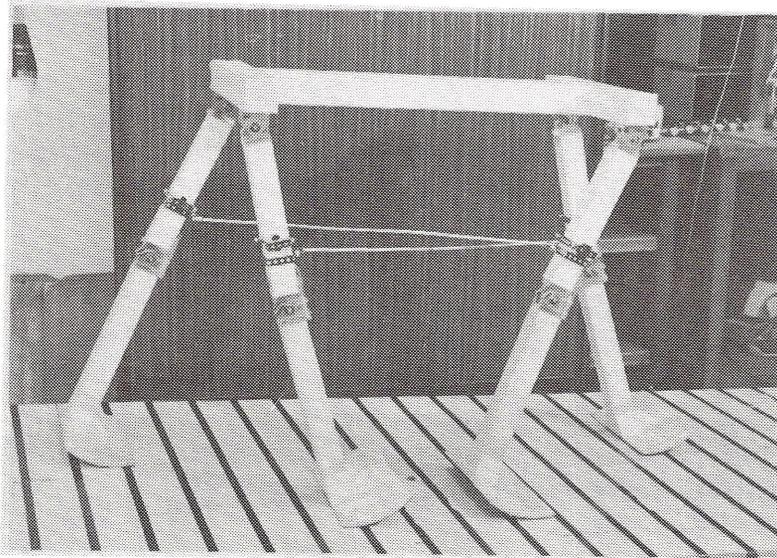


図 1.1 四足受動歩行ロボット Lucy-2

まず、車輪からリムを取り外す（図1.2）。回転してスポークが床に衝突する度に運動エネルギーを失うので、車輪と同じように水平な床の上で回転を継続させることはできない。しかし、衝突で失ったエネルギーを、坂道を下りることによって得られる位置エネルギーで補うことができれば、回転を継続させることができる。

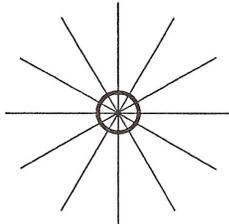


図 2.2 リムのない車輪

さらに、スポークを二本だけ残し、その先に円弧の一部を取付け、ピンジョイントでつないだものを考える。片方の脚が支持脚として下り坂の上を転がり、もう片方が遊脚として前に振り出される。この時、支持脚は倒立振り子として、遊脚は単振り子として運動する。二本の脚の相対角度が一步前の状態と同じになったときに支持交替が起こり、支持脚が同じ角速度を再現出来れば、歩行が継続する [1]。これがひざなし受動歩行ロボットのモデルである。（図 2.3）。

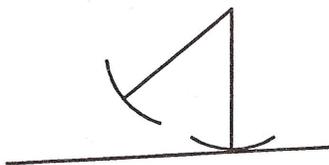


図 2.3 基本モデル

このモデルは脚の長さが同じなので、足先が床にぶつかってしまうという問題がある。この問題の解決方法としては、着地点に台を置いたり、足先をモータによって持ち上げるといったものが挙げられるが、前者は発展性に欠け、後者はエネルギーの供給が必要となるので [1]、本研究においては、ひざを付けて遊脚を二重振り子として機能させることで問題を解決することにした。

MacMahon によれば [2]、人間の歩行の数学的モデルは弾性エネルギーと重力エネルギーを筋肉に蓄えるものであり、支持脚を倒立振り子、遊脚を二重振り子として扱えるという。そうした観点からも、ひざを付けることで歩容が人間に近づくと考えられる。

### 3. シミュレーション

動物等が行なっている歩行には様々なパターンが存在するが、対称的な四足の歩行パターンとしては、Pace、Trot、Bound が挙げられる（図 3.1）。ひざのある受動歩行機構は運動を二次元に拘束しながらも、脚を振り抜くことが特徴であるので、ロールの生じない歩行パターンを採用することにした。このことから、Trot か Bound ということになるが、Bound は移動速度が大きい時に現われる歩行パターンなので、Trot を採用することにした。Trot は対角にある脚が同位相となる歩行パターンであるので、実験においては、対角の脚をアルミパイプとユニバーサルジョイントで拘束し合うことで Trot を実現させた。

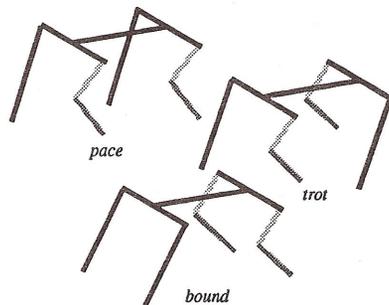


図 3.1 歩行パターン

四足受動歩行のシミュレーションを行なうために、以下のような仮定に基づき四足受動歩行ロボットのモデルを設定する。

1. 四本の足は同じものとする。
2. 対角の足が完全に同調し、Trot を行なうものとする。従って、胴体は床面に対して平行移動するので、ヨー方向およびピッチ方向の運動は考えない。
3. 実験機の足先が十分な幅を持っているので、ロール方向の運動は考えない。
4. 胴体の質量は前足と後ろ足の付け根に半分ずつ集中しているものとする。

以上のことから、力学的解析を行なうにあたっては、四足受動歩行ロボットを二次元的な運動をする二足受動歩行ロボットとして考える（図 3.2）。

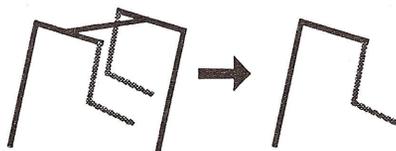


図 3.2 モデル化

## 遊脚

ここで対象とする遊脚は腿とすねからなる2リンク機構とし、以下の条件を満たすものとする。

各リンクの重心はリンクの両端のジョイントを結ぶ直線上にあり、各ジョイントのまわりには、トルクは働かない。また、ジョイントは回転のみが許され、すべてのリンクは同一平面内に拘束される。

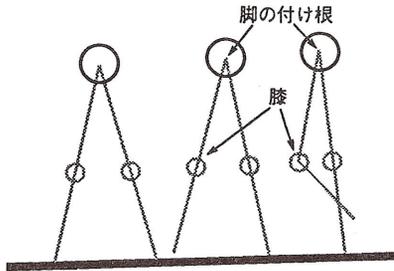


図 3.3 運動

遊脚が二重振り子から単振り子になるとときには、腿とすねは非弾性的に衝突するものとし、跳ね返ることはないと仮定する。また、ひざがロックすることにより歩行ロボットの他の部分の運動に影響を与えることはないとする。

遊脚の運動には、支持脚の影響は腿の付け根の位置が変わる以外にないとした。ただし、ジョイントにかかるトルクとして粘性抵抗を与えることにした。粘性係数は実験により求めた値を使用した。

## 支持脚

支持脚は胴体の質量が脚の付け根に集中していると考えた倒立振子と近似する。支持脚の運動には、遊脚の運動の影響はないものとし、遊脚の重量は胴体の重量に含まれた倒立振子として考えた。

PC-9801DA を用いてコンピュータシミュレーションを行った。プログラムの記述にはC言語を用い、傾斜台に垂直な方向に対する遊脚の腿の角度、遊脚のすねの角度、および支持脚の角度を、0.01秒間隔で求めることにした。

運動方程式は、打ち切り誤差の少ないルンゲ・クッタ・ジルの公式を用い解くことにした。

ひざ付きの受動歩行ロボットとひざなしの受動歩行ロボットの運動解析上の大きな違いは、遊脚の運動が途中で変化するかしないかである。ひざ付きの場合、腿がすねよりも早く曲がり、着地前にすねが腿に追いつくように運動させる。

ただし、遊脚のひざがロックする前に着地した場合は、着地時にひざが折れ曲がり、遊脚が支持脚になることができなくなるので、歩行が中断したとする。

なお、初期条件である胴体の角速度と股の開き角度は、一歩目はあらかじめ設定された値が与えられ、二歩目以降は支持交替の際の力学的考察により与えられる。

しかし、これだけの条件だけでは実験の結果とシミュレーションの結果は大きな差が出てしまった。特に異なるのはすねの曲がり方であった。そこでビデオで観察し、考察を加えた結果、以下のように境界条件を変更することにした。

まず、支持脚から遊脚へ移行する脚の足先は、瞬間的に床面に対して相対速度がゼロであるとする。つまり、胴体は速度を持っているから、遊脚になった脚の足先は、胴体に対して逆向き速度を持つことになる。そのとき、 $\theta_1$  は変化しないとすると、 $\dot{\theta}_2$  が決まる。

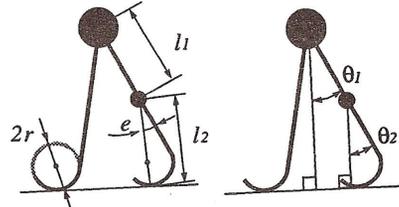


図 3.4 パラメータ

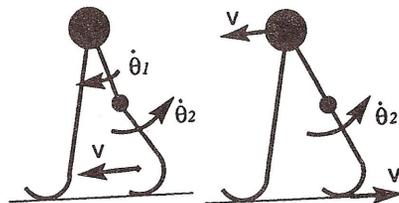


図 3.5 着地後の速度の変化

このとき、胴体の速度  $v$  は歩行面に平行とすると、足先の胴体に対する速度は  $-v$  となる。足先の曲率半径が  $r$  なので、

$$\dot{\theta}_2 = \frac{v}{r} \quad (1)$$

となる。

その直後、遊脚になる脚の足先が接地したままでいると仮定する。このとき足先の地面に対する速度がゼロ、すなわち滑らないとする。すると、足先の曲率中心の歩行面に対する速度が  $v$  となって、胴体に対する速度がゼロとなり、腿が曲がることになる。そこで決定される  $\dot{\theta}_1$  を腿の初期角速度とする。

ここで、

$$\dot{\theta}_1 = \frac{l_2 - r}{l_1} \dot{\theta}_2 \quad (2)$$

と近似する。

以下にシミュレーションの結果を示す。これらは4%の傾斜角における結果である。

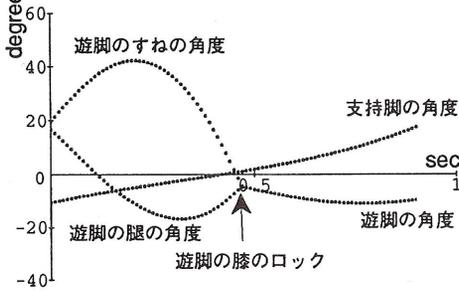


図 3.6 1 サイクルのシミュレーションの結果

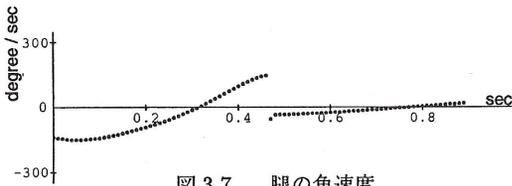


図 3.7 腿の角速度

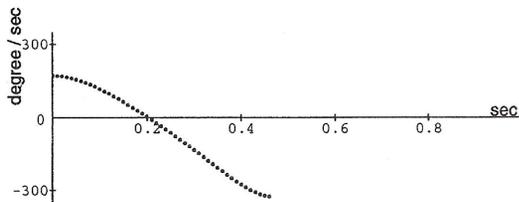


図 3.8 すねの角速度

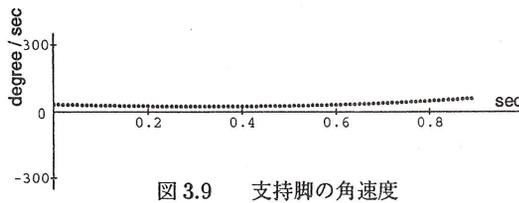


図 3.9 支持脚の角速度

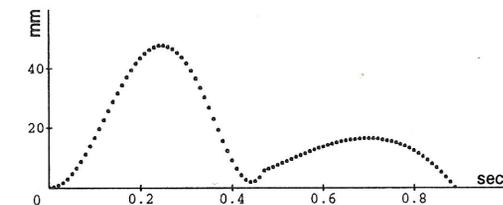


図 3.10 クリアランスの変化

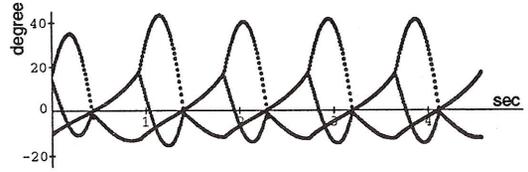


図 3.11 5 サイクルのシミュレーションの結果

表 3.1 移動の様子

| 歩数 | 胴体の速度 (m/s) | 股の開き角 (deg) |
|----|-------------|-------------|
| 1  | 0.400       | 32.0        |
| 2  | 0.409       | 33.4        |
| 3  | 0.405       | 32.8        |
| 4  | 0.410       | 33.6        |
| 5  | 0.407       | 33.0        |
| 6  | 0.401       | 32.4        |

以上の結果は、実験に用いた Lucy-2 のパラメータを実際に計測してシミュレーションに代入したものである。このパラメータを基本にして、腿、すねの長さを変化させたモデルや、足先の曲率中心や取り付け角度を変化させたモデルのシミュレーションを試みた。実験モデルから一つだけパラメータを変化させてみたところ、それぞれにおいても、周期的な歩行の存在が確認された。

歩行を継続させる上で一番問題となるのは、遊脚のクリアランスであり、これは質量や慣性モーメント、長さ等によって決まる角速度や周期に依存しているのも、一概にどのパラメータが優れているということは言えない。しかし、この比較において遊脚のクリアランスを評価関数としたならば、基本モデルの腿を 10cm 長くしたモデルが一番良い結果をだすことができた。

#### 4. 実験

比留間らが試作したひざ付きの受動歩行ロボットは、その運動を二次元に拘束するために足先に横幅を持たせた。そのために使用していた鉄の軸のせいで、脚の先端に質量が集中し、すねの質量に比べて腿の質量が小さくなっていましたので、脚が二重振り子として機能せず単振り子のような運動をしていた。

そこで本研究においては、軽い材料を用いて一体成型をすることを目的に、繊維強化プラスチックを使って製作することにした。発泡スチロールを芯材にしてエポキシ樹脂を積層した。軽量なので、製作後に重りを付ける

ことで、重心の位置や慣性モーメントを容易に変化させることが可能である。

パラメータとしては、腿の長さ ( $l_1$ )、質量、慣性モーメント、重心の位置、すねの長さ ( $l_2$ )、質量、慣性モーメント、重心の位置、足先の半径 ( $r$ )、取付け角度 ( $e$ ) が考えられる。足先の半径を脚全体の長さの2割程度にすることにして [3]、腿とすねの長さは人間に近い値を採用することにした。

パラメータの決定のために予備実験を行なった。腿は同一のものを使用することにして二種類のすねを用意した。一方は足先の取り付け角度が  $0.2\text{rad}$  でつま先が上がっているもので、もう一方は足先の取り付け角度が  $0.27\text{rad}$  でつま先が下がっているものである。

歩行を継続させるには、遊脚の支持脚に対するクリアランスがより大きいものが望ましい。それぞれを二重振り子として振らせ、腿とすねの関節にポテンショメータを取り付けて、遊脚の最下点におけるクリアランスを計算した。その結果、 $0.2\text{rad}$  のほうのすねを採用することにした。以下に Lucy-2 のパラメータを示す。

表 4.1 Lucy-2 のパラメータ

|               |                   |
|---------------|-------------------|
| 腿の長さ          | 35cm              |
| 腿の質量          | 160g              |
| 腿の慣性モーメント     | $3.18\text{gm}^2$ |
| 軸から腿の重心までの距離  | 17.5cm            |
| すねの長さ         | 41.7cm            |
| すねの質量         | 244.5g            |
| すねの慣性モーメント    | $8.14\text{gm}^2$ |
| 軸からすねの重心までの距離 | 18.4cm            |
| 足先の半径         | 15cm              |
| 足先の取付け角度      | $0.2\text{rad}$   |

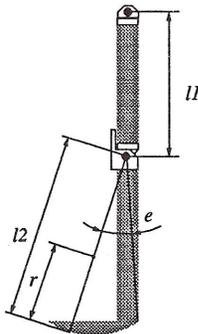


図 4.1 設計上のパラメータ

ひざおよび腿の関節にポテンショメータを付けてデータをとった。以下に角度の取り方と実験結果を示す。実験結果は  $4\%$  の傾斜角における結果である。

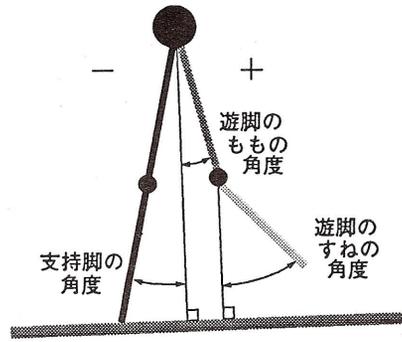


図 4.2 角度の取り方

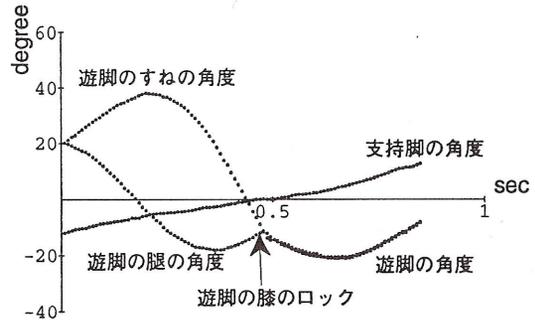


図 4.3 1 サイクルの実験結果

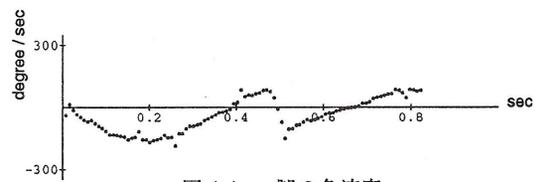


図 4.4 腿の角速度

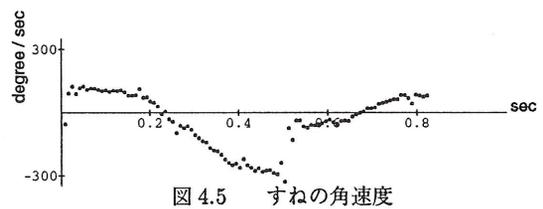


図 4.5 すねの角速度

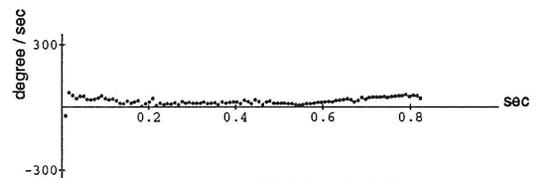


図 4.6 支持脚の角速度

以下の実験結果は6%の傾斜角における結果である。

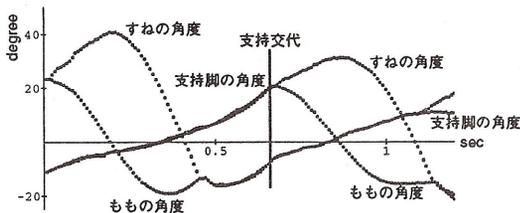


図 4.7 2 サイクルの実験結果

シミュレーションの境界条件を変更することで、シミュレーションの結果と実験結果を非常に近くすることができた。シミュレーションから得られた胴体の移動速度や股の開き角度のデータを参考することで、歩行実験における初期条件の目安を付けることができた。

### 5. 結論

実験において、ひざ付きの受動歩行が成立することが確認できた。ロボットにひざを付けて遊脚を二重振り子として機能させることで、ひざなしの受動歩行の問題点であった足先が床におつかってしまうということを解決できた。支持脚を接地点まわりの倒立振り子と考え、遊脚をその支持脚の腿の付け根まわりの二重振り子と考えることにより、二次元に拘束された運動のなかでも脚を振り抜くことができるということが確認できたのである。

実験データとシミュレーションの結果を比較することで、シミュレーションにおける摩擦や境界条件の変更をすることができた。その結果シミュレーション上において定量的な分析を行なうことができ、歩行実験においても初期条件の設定の目安を得ることができた。

以上のことから、腿およびすねの質量、長さ、慣性モーメント、足先の半径および取付け角度のそれぞれのパラメータを適切に設計することによって、制御と外部からのエネルギー入力を用いずに、慣性と重力だけで歩行を成立させることができるということがわかった。

### 参考文献

- [1] Tad McGeer, "Passive Dynamic Walking," The International Journal of Robotics Research, Vol.9, No.2, pp.62-82, 1990.
- [2] T.A.McMahon, "Mechanics of Locomotion," The International Journal of Robotics Research, Vol.3, No.2, pp.4-28, 1984.
- [3] Tad Mcgeer, "Passive Walking with Knees," Proc. IEEE Int. Conf. robotics & automation, Cincinnati, pp.1640-1645, May, 1990.
- [4] 比留間 茂晴, 首藤 孝夫, "四足受動歩行機構の力学," 東京大学卒業論文, 1991.