

# 動的二足歩行ロボットの制御\*

## —その低次モデルおよび階層制御策—

古 荘 純 次

### 1. はじめに

人間にできるだけ近い機械を実現することは工学者の一つの夢である。その一つとして歩行を考えると、人間の自然な歩行は足底の範囲内に重心をとどめ、静的な安定を保ちながらゆっくり歩くのではなく、重力場の中で前方へ倒れ込む動作を連続的に繰返す動的な歩行である。大阪大学工学部の増淵研究室の歩行ロボットグループは、人間の歩行に近い動的歩行を行うロボットを製作し、制御工学の立場から研究してきた。筆者もその一員として参加してきたこのグループが、現在までに得た結果をここに報告する。さらに、現在筆者が岐阜大学で研究中の歩行ロボットについても追記する。

機械システムの制御という観点から、歩行の制御について検討した多くの研究がある<sup>1)~7)</sup>。これらの研究において種々の制御方式が考えられているが、歩行システムが非常に複雑であるため、階層制御方式がしばしば採用されている<sup>8)~7)</sup>。実際、人間の運動の制御も階層的な構造となっており、その最下位レベルでは脊髄と筋肉の間で局所フィードバック制御がなされていることが、生理学的な研究から指摘されている<sup>9)</sup>。しかし一般的に階層制御方式といっても、これは制御方式の一つの概念に過ぎず、具体的に構成するとすると種々の方法が考えられる。

階層制御の一つの考え方として、システムを記述する低次の近似モデルを導き、上位レベルにおける制御策の決定は、この低次モデルを用いて行うという方法がある。この制御方式をとるとき、低次モデルが元の高次モデル(歩行ロボットの場合運動方程式)をどの程度近似できるかが非常に重要となる。また、この低次モデルは物理的考察から概念的に誘導されるものではなくて、元の高次モデルから数学的な処理によって誘導されるものである必要がある。というのは、数学的な処理によって誘導

された低次モデルを使うと、低次モデルの軌跡から元の高次モデルの軌跡が、近似的にはあるが簡単に復元できるからである。

宮崎・有本は、歩行システムに対してこのような観点から階層制御方式を最初に提案し、さらに特異摂動法を用いた低次モデルの誘導法について提案した<sup>6)7)</sup>。しかし、その方法で得られる低次モデルは、支持脚の足首のトルクだけを入力として持つ倒立振子型モデルである。そのため例えば、直立静止状態から支持脚足首のトルクを使わずに、遊脚を前方に振り出すことによって重心を前方に移し、重力効果で前方に倒れ出すことによって行われる歩行の開始を近似するとき、その低次モデルは直立静止状態を保持し、実際の歩行とは異なった応答を示す。

筆者らは、各関節ごとに局所フィードバックが行われている歩行システムに対して、閉ループ固有値の漸近的性質を明らかにし、次に文献6)の低次モデルと異なり、歩行において重要な遊脚による重力効果をも保存する低次モデルを導いた<sup>10)</sup>。下位レベルにおいて局所フィードバックを施すことは、システムをロバスト(頑健)にするので階層制御ではしばしば採用されている<sup>14)</sup>。そこで、歩行システムの下位レベルにおける制御として、各関節における局所フィードバックを採用することは妥当と考えられる。筆者らの低次モデルは、上述の歩行の開始の場合も含めて元の高次モデルを非常によく近似するものであり、しかも宮崎らのモデルと同様、元の高次モデルと定量的な関係を持つため、上位レベルでの制御決定に容易に使うことができる。

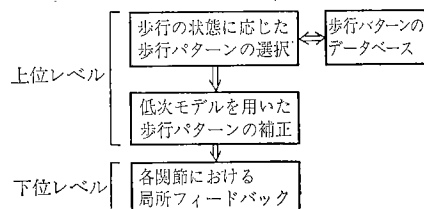


図1 階層制御

原稿入稿 1983年6月27日

\* A Control Study of Dynamical Locomotion Robot—A Low Order Model and a Hierarchical Control Strategy—

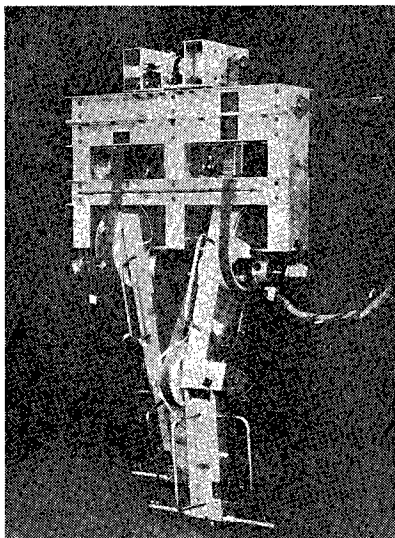


写真 1 健脚 1号

筆者らの研究では、下位レベルでの制御としては各関節における局所フィードバックを行い、上位レベルでは低次モデルを用いて制御策を決定する、図1に示す階層制御によって歩行ロボットの制御を考えていく。

まず2節では、歩行ロボットのメカニズムの概要およびその運動方程式を与える。3節では局所フィードバックを施したときの閉ループ固有値の挙動について論じ、2つの支配モードが存在することを示す。さらに、多入力多出力システムに対する根軌跡の理論<sup>13)</sup>を用いて、高ゲインフィードバック時における閉ループ固有値の挙動について一つの定理を与える<sup>14)</sup>。

4節では、3節で得た支配モードを用いて低次モデルを導く。5節では、歩行の安定性についてこの低次モデルを用いて解析する。そして、上位レベルから同一の歩行パターンを局所フィードバックループへの目標値として繰返し与える制御でも安定な歩行が可能であることを示す。6節ではまず最初に、5節で述べた制御方式を歩行ロボットシステムに適用すると、安定な歩行がロボットで実現できることを示す<sup>15)</sup>。得られた歩行は一步 0.4~0.5 秒、速度 0.7~0.8m/sec であり、歩行ロボットとしては高速なものでかつ完全に動的なものである。次に、低次モデルを上位レベルで用いた階層制御によって、着地時の角運動量を制御する実験の結果<sup>12)</sup>を示す。

7節では、蹴り効果を持たせた歩行ロボットについて簡単に述べる。最後に8節では、歩行ロボットの制御実験を行って感じたことを若干述べる。

## 2. 歩行ロボット

写真1および図2に示す歩行ロボットは、上体、左右

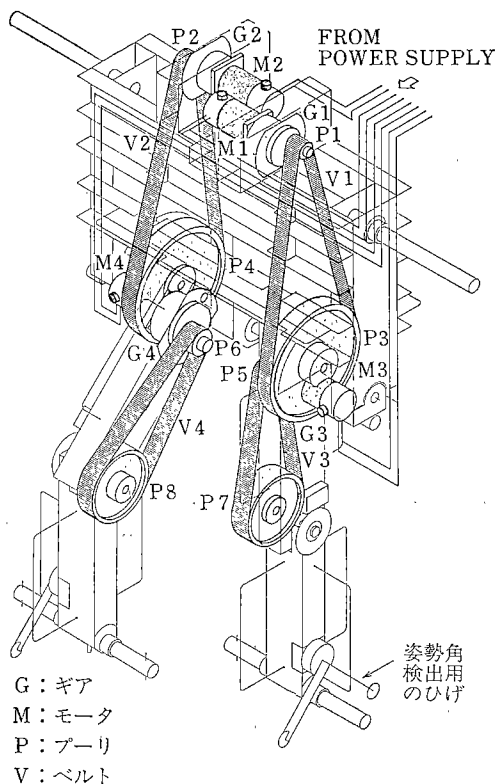


図 2 駆動系の見取図

大腿部および左右脛部の5つのリンクよりなる。腰および膝の関節は4台の直流サーボモータで駆動されている。重量配分を人間のそれと近づけるため、サーボモータおよび減速器はできるだけ上方に取り付け、タイミングベルトを介して各関節を駆動する。例えば、膝を駆動するサーボモータおよび減速器は、腰に取り付けたプラスチック製の大型プーリの中に埋め込まれている。

また姿勢角検出のため、図2の下部に示すように左右脛部には地面と接触するひげ型の角度センサが取り付けられている。写真からわかるように、着地は脛の下端に横向きに取り付けたパイプによって行われるため、片足だけを着地した状態では前後方向には不安定であり、左右方向には安定である。このロボットが直立静止するためには、脚をすこし前後に開いて立つ必要がある。このように足首を持たない構造では、つま先による蹴り効果を持たせることができない。しかし足底を持たせた場合には、足首トルクを利かせることができるため、自然な歩行とかけ離れた操作入力でも歩行が可能になり、人間型歩行を実現しようとする上では問題がある。

そこで、動的歩行研究の第1段階では、このような足首を持たない構造にした。表1に各部の質量および慣性モーメントを示す。ロボットの重量は 30 kg、高さは

表 1 ロボットの各リンクの係数値

	質量 (kg)	慣性モーメント (kg・m <sup>2</sup> )	関節から関節ま での部材の長さ (m)	下部関節から重 心までの距離 (m)
上 体	14.79	3.30×10 <sup>-2</sup>	—	0.282
大 腿 部	5.28	5.40×10 <sup>-2</sup>	0.302	0.236
脛 部	2.23	4.14×10 <sup>-2</sup>	0.332	0.189

1.1m である.

このロボットでは、歩行は進行方向を含む2次元平面内で行われるので、図3のようにモデル化できる。この座標系を用いると、片足着地時の運動方程式は次のようになる。

$$A\ddot{\theta} + B\dot{h}(\dot{\theta}) + Cg(\theta) = DT \quad (1)$$

ここで、

$$\left. \begin{aligned} \theta &= [\theta_1, \dots, \theta_5]^T, \quad h(\dot{\theta}) = [\dot{\theta}_1^2, \dots, \dot{\theta}_5^2]^T \\ g(\theta) &= [\sin\theta_1, \dots, \sin\theta_5]^T, \quad T = [T_1, \dots, T_4]^T \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

$$\left. \begin{aligned} A &= \{q_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j) + p_{ij}\} \\ B &= \{q_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j)\} \quad C = \text{diag}\{-h_i\} \\ D &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad \left. \begin{aligned} i &= 1, \dots, 5, \\ j &= 1, \dots, 5, \end{aligned} \right\} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

$q_{ij}, p_{ij}, h_i$  は各部材の質量, 寸法, 慣性モーメントなどによってきまる係数である。また  $T_k$  は次に示すように各関節に働くトルクである。

- $T_1$ : 支持脚膝
- $T_2$ : 支持脚脛
- $T_3$ : 遊脚膝
- $T_4$ : 遊脚脛

運動方程式を  $\theta=0, \dot{\theta}=0$  のまわりで線形化すると、

$$A_s \ddot{\theta} - C\theta = DT \quad (4)$$

ここで

$$A_s = \{q_{ij} + p_{ij}\} \quad (5)$$

$\theta$  はそれほど小さくはないので、上述の線形化で消去された  $Bh(\dot{\theta})$  の項についてすこし考察しておく。写真1に示すような歩行ロボットでは、各部材はほぼ直線状に並び  $\theta_i - \theta_j$  が比較的小さいため  $B$  の各要素も小さくなり、この項を無視しても応答がほとんど変わらないことを多くの計算により確認した。しかし、写真4に示すロボットにおいては、くるぶし関節の曲げ角が大きいためこの項を無視できない場合がある。

さらに、 $x = (\theta^T, \dot{\theta}^T)$  と置いて線形システムの標準的な表記法に書き直すと次のようになる。

$$\dot{x} = Fx + GT \quad (6)$$

ここで、

$$F = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -A_s^{-1}C & 0 \end{bmatrix}, \quad G = \begin{bmatrix} 0 \\ A_s^{-1}D \end{bmatrix} \quad (7)$$

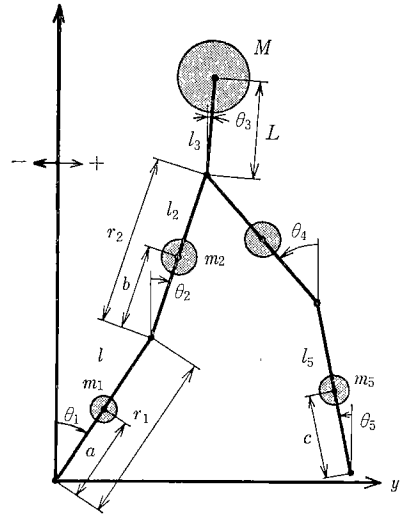


図 3 5リンクモデル

### 3. 局所フィードバック制御と支配モード

モデルの低次元化は支配モードを用いて行われることが多い。そこで、(6)式の  $F$  の固有値を求めてみると次のようになる。

$$\pm 5.3j, \pm 4.2j, \pm 3.5, \pm 7.7, \pm 19.3$$

このような固有値分布では、支配モードによる低次元化はできない。そこで、次に各関節に局所フィードバックを施すと閉ループ固有値がどのようになるかを根軌跡を描いて調べてみる。各関節に対する局所フィードバックとしては比例・微分制御を用いた。人体の関節における局所フィードバック制御も一種の比例微分制御となっていることが指摘されているので<sup>8)9)</sup>、ここでもこの制御を用いたのである。このとき例えば、支持脚膝関節制御における制御側は次のようになる。

$$T_1 = -f \cdot k_{p1} \{\theta_{r1} - (\theta_2 - \theta_1)\} + f \cdot k_{d1} (\dot{\theta}_2 - \dot{\theta}_1) \quad (8)$$

ここで、 $\theta_{r1}$  は膝関節の曲げ角に対する目標値である。その結果、閉ループシステムは次のようになる。

$$\dot{x} = \bar{F}x + \bar{G}\theta_r \quad (9)$$

ここで、

$$\left. \begin{aligned} \bar{F} &= \begin{bmatrix} 0 & I \\ A_s^{-1}(-C + fDK_p) & fA_s^{-1}DK_d \end{bmatrix} \\ \bar{G} &= \begin{bmatrix} 0 \\ fA_s^{-1}DK_p \end{bmatrix} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

$\theta_r$ : 各関節に対する目標値を表わす4次元ベクトル  
 $K_p$ : 比例フィードバックに関する4×5行列  
 $K_d$ : 微分フィードバックに関する4×5行列  
 図4に  $f$  を変化させたときの  $\bar{F}$  の固有値の軌跡を示す。 $f$  が11より小さいときの軌跡は、今後の議論に關

係がなく、また図が複雑になるので省略した。このとき  
 図中の×印で示す位置に  $f$  の値にほとんど影響を受けず  
 にはぼ定まった値をとる固有値が存在する (表2参照)。  
 図からわかるように、 $f$  を大きくしていくと、この2つ  
 の固有値を除く他の固有値は複素平面の左へ移動してい  
 くため、この2つの固有値が支配モードとなる。この支  
 配モードを用いて次節では低次モデルを導く。

この支配モードが、物理的にどのような意味を持って  
 いるかを次に考えてみよう。各関節の局所フィードバック  
 を強めてゆくと、固有値の軌跡は次の性質を持つ。

〔定理〕 微分フィードバック係数  $k_{di}$  はすべて正と  
 する。このとき、 $f \rightarrow \infty$  とすると  $\bar{F}$  の固有値は次のよ  
 うになる。

- 1) 2個の固有値は  $\pm\sqrt{\bar{M}\bar{y}g/\bar{I}}$  に漸近する。

$\bar{M}$ : ロボットの全質量、 $\bar{y}$ : ロボットの重心の高さ、  
 $\bar{I}$ : ロボットの着地点まわりの慣性モーメント

- 2) 4個の固有値は  $-k_{pi}/k_{di}$ ,  $i=1, 2, 3, 4$  に漸近す  
 る。

- 3) 4個の固有値は実軸に沿って  $-\infty$  に漸近する。

(多変数根軌跡の理論<sup>13)</sup>その他を用いて証明できる。

文献11)参照)

筆者らの歩行ロボットでは  $\sqrt{\bar{M}\bar{y}g/\bar{I}}=3.48$  であり、  
 フィードバック係数は  $-k_{p1}/k_{d1}=-k_{p4}/k_{d4}=-76$ ,  
 $-k_{p2}/k_{d2}=-k_{p3}/k_{d3}=-30$  とした。図4の軌跡は確か  
 にこれらの点に漸近している。

歩行ロボットを一つの倒立振子と考えたとき、その固  
 有値として  $\pm\sqrt{\bar{M}\bar{y}g/\bar{I}}$  を持つ。上の定理の1) で述べ  
 たように、局所フィードバックによって表われてくる2  
 つの支配モードが漸近する先も  $\pm\sqrt{\bar{M}\bar{y}g/\bar{I}}$  である。す  
 なわち、局所フィードバックを行なうことにより、得ら  
 れた支配モードを用いて次節で導く筆者らの低次モデル  
 も、一種の倒立振子モデルと言える。

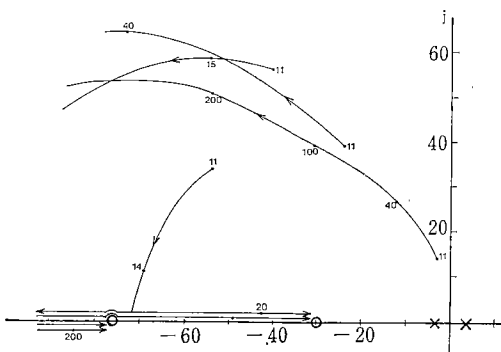


図4  $f$  に関する固有値軌跡

$f$	支配モード	
4	-3.51	3.50
8	-3.50	3.50
20	-3.49	3.49
50	-3.48	3.48
100	-3.48	3.48

#### 4. 低次モデル

前節で得た支配固有値を  $\lambda_1, \lambda_2$ , 残りの応答の速い固  
 有値を  $\lambda_3, \dots, \lambda_{10}$  とし、(9) 式を対角化すると次の  
 ようになる。

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \xi_1 \\ \xi_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 & 0 \\ 0 & A_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \xi_1 \\ \xi_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Gamma_1 \\ \Gamma_2 \end{bmatrix} \theta_r \quad (11)$$

ここで  $\xi_1, \xi_2$  はそれぞれ2次および8次ベクトルで  
 あり、 $A_1$  は  $\lambda_1, \lambda_2$  をその対角要素とする行列であり、  
 $A_2$  は  $\lambda_3, \dots, \lambda_{10}$  をその対角要素とする行列である。また  
 対角化のための座標変換を次のように表わすことにする。

$$\begin{bmatrix} \xi_1 \\ \xi_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_{11} & U_{12} \\ U_{21} & U_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} \quad (12)$$

$A_2$  の固有値は応答の速いものなので、目標値  $\theta_r$  の  
 変化がゆるやかなものであれば  $\dot{\xi}_2$  を省略でき、(11) 式  
 は次のように近似できる。

$$\dot{\xi}_1 = A_1 \xi_1 + \Gamma_1 \theta_r \quad (13)$$

$$\xi_2 \doteq -A_2^{-1} \Gamma_2 \theta_r \quad (14)$$

(13)式で表わされる2次の低次モデルは、その入力と  
 して各関節に対する目標曲げ角  $\theta_r$  を持つものである。  
 (14) 式は代数式なので  $\xi_2$  は簡単に求めることができ、  
 $\theta, \dot{\theta}$  は(12)式より求めることができる。

この低次モデルの近似の程度を調べるため、一例とし  
 て図5に示す歩行停止過程について考える。このシミュ

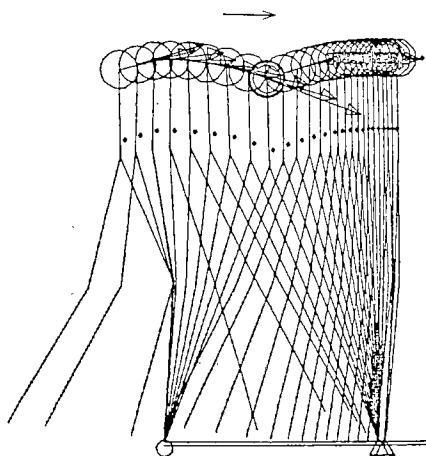


図5 歩行停止過程 (計算機シミュレーション)

レーションは各関節に局所フィードバックを施し、適当な目標曲げ角  $\theta_r$  を与えて行った。この歩行では図からわかるように、角運動量を減らすため遊脚をできるだけ後方に残しておき、その後ゆっくりと前方へ振り出している。歩行においては、重心の位置と角運動量は非常に重要な量であり、例えば歩行の停止は重心が着地点の真上に来たときに角運動量を零にすることによって行われる。そこで、図5の歩行における重心の動きと角運動量の変化を図6に示す。実線は元の高次モデルである(1)式を用いてシミュレーションした結果であり、破線は(13)、(14)式の低次モデルを用いてシミュレーションした結果である。

図よりわかるように、低次モデルは元の高次モデルをよく近似している。他の各種の歩行状態に対しても(13)、(14)式の低次モデルは元の高次モデルをよく近似する。ここで述べた低次モデルは、各関節において局所フィードバックが行われている特徴をいかし、各関節の曲げの効果をも保存したモデルであるため、元の高次モデルとよく一致している。

(13) 式の低次モデルは、 $A_1$  の固有値が倒立振子モードからなっているので、入力  $\theta_r$  を持つ倒立振子という形になっている。各関節の曲げ角は、目標曲げ角  $\theta_r$  に比較的速く追従するので、(13)式の低次モデルは、倒立振子モデルに各関節の曲げ効果を加えたものと言える。

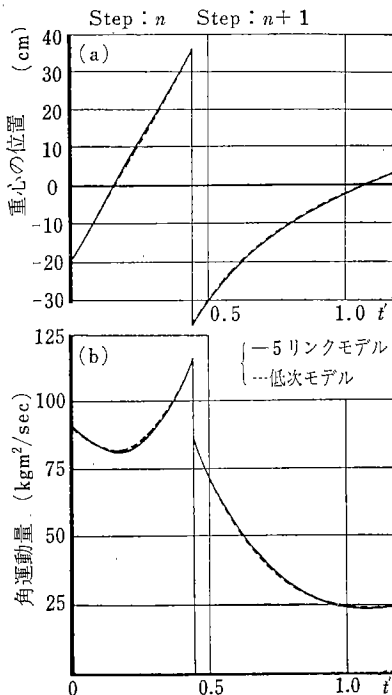


図6 重心の位置および角運動量

## 5. 安定な歩行のための一制御法

今までの議論は、階層制御を行うのに必要な低次モデルの導出に関するものであった。次に安定な歩行を実現するための制御方法について検討する。

歩行が安定であるという言葉は厳密には定義されておらず、一般的な意味としては連続的に歩行が可能であるという状態を示しているにすぎない。そこでここでは、各歩ごとに同じ状態を繰返す定常歩行軌道というものを考え、その定常歩行軌道からのずれについて考える。そして、そのずれが何らかの理由で発生しても、時間の経過とともに減少し、定常歩行軌道に復帰していくとき「歩行は安定である」と呼ぶことにする。

写真1に示す歩行ロボットのように蹴り効果を持たないロボットでは、着地時の支持脚の切換によって角運動量の損失がおきるので、歩行を継続するためには、重力場をうまく利用して角運動量の補給をする必要がある。角運動量保存側からわかるように、一步区間において角運動量を変化させる原因はただ外部からのモーメントだけであり、このロボットの場合には重力によって着地点のまわりに生じるモーメントだけである。すなわち、各関節に対する曲げ角目標値  $\theta_r(t)$  は、重力場をうまく利用して角運動量を補えるよう与える必要がある。この要求および安定性の要求を満たす歩行として次のような歩行を考える。

(1) 遊脚が着地した瞬間に、それまでの支持脚を地面から離すという両脚支持期のない歩行とする。

(2) 各歩毎に同じ目標角  $\theta_r(t)$  を与える。すなわち歩行ロボットの状態にかかわらず、各関節の局所フィードバック・ループへの目標曲げ角の補正は行われぬ。

(3)  $\theta_r(t)$  は時間の関数であるが、着地時刻以前に十分時間的余裕を持って定数ベクトルに固定される。その結果、相対外形がほぼ一定角度に固定されてから遊脚

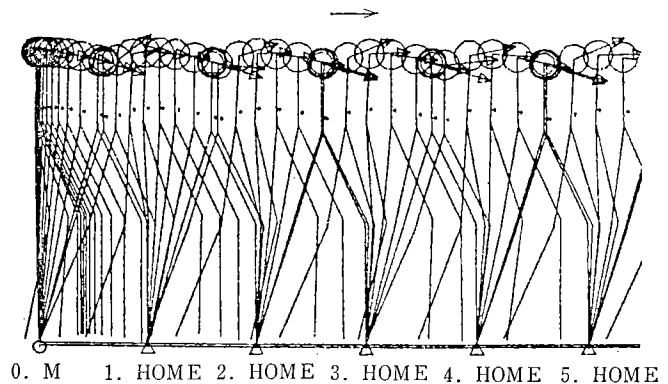


図7 直立静止状態から定常歩行へ(計算機シミュレーション)

の着地が起きる。この着地時の外形を  $\theta_s$  とする。このように  $\theta_r$  を与えるのは歩幅をできるだけ一定にするためである。

(4) 図7に示すように、遊離膝をすこし曲げて着地するように目標曲げ角  $\theta_r(t)$  はまた与えられる。膝をすこし曲げて着地すれば、重心が着地点の後方にある時間より前方にある時間のほうが長くなり、着地時の角運動量を初期の角運動量より大きくすることができる。その結果、着地時の角運動量の損失を補うことができる。

上述のように、各歩に対して上位レベルから同じ目標角  $\theta_r$  を繰返し与えた場合の歩行の安定性を、前節で求めた低次モデルを用いて検討する。 $i$  歩目を表わすために変数に添字  $i$  をつけ、 $\theta^i, \xi^i, t_i, \tau_i$  などと記す。 $t_i$  は  $i$  歩目の開始時間を零とした時間軸であり、 $\tau_i$  はこの時間軸を用いて表わした  $i$  歩目の遊脚着地時刻である。支持脚切換後の各リンクの角速度を求める式は、衝撃運動に関するラグランジュの運動方程式より、 $i-1$  歩目の遊脚着地時に対して次のように与えられる<sup>2)0)</sup>。

$$A(\theta_s)\dot{\theta}^i(0) = E(\theta_s)\dot{\theta}^{i-1}(\tau_{i-1}) \quad (15)$$

ここで、 $\theta_s$  は着地時の各リンクの角度を示すベクトルであり、 $E(\theta_s)$  は衝撃方程式より導かれる  $5 \times 5$  行列である。

定常歩行からのずれについて議論するため、定常歩行軌道に関する変数にはその上部に横棒を付加し、定常歩行軌道からのずれを示すにはその左側に  $\Delta$  を付加する。すなわち  $\xi_1$  および  $\tau_i$  については、

$$\xi_1^i(t_i) = \bar{\xi}_1(t_i) + \Delta \xi_1^i(t_i), \quad \tau_i = \bar{\tau} + \Delta \tau_i$$

となる。また、 $i$  歩目における低次モデルは、

$$\dot{\xi}_1^i = A_1 \xi_1^i + \Gamma_1 \theta_r \quad (16)$$

と表わされる。このとき、 $i$  歩目の着地時における低次モデルの状態と、定常歩行の着地時における状態との差は、2次の微小量を無視すると次のようになる。

$$\xi_1^i(\tau_i) - \bar{\xi}_1(\bar{\tau}) = e^{A_1 \bar{\tau}} \Delta \xi_1^i(0) + b \Delta \tau_i \quad (17)$$

ここで、

$$b = e^{A_1 \bar{\tau}} A_1 \bar{\xi}_1(0) + \int_0^{\bar{\tau}} e^{A_1(\bar{\tau}-\zeta)} A_1 \Gamma_1 \theta_r(\zeta) d\zeta + \Gamma_1 \theta_r(\bar{\tau})$$

相対外形がほぼ固定された後に遊脚の着地がおきるため、歩行ロボットを1つの倒立振子と考慮して着地時の角速度を  $\eta_i$  とすると、各リンクの着地時の角速度は次のように近似できる。

$$\dot{\theta}^i(\tau_i) = e \eta_i, \quad \bar{\dot{\theta}}(\bar{\tau}) = e \bar{\eta} \quad (18)$$

ここで、

$$e = [1, 1, 1, 1, 1]^T$$

また、着地時に対して (12) 式より次式が成り立つ。

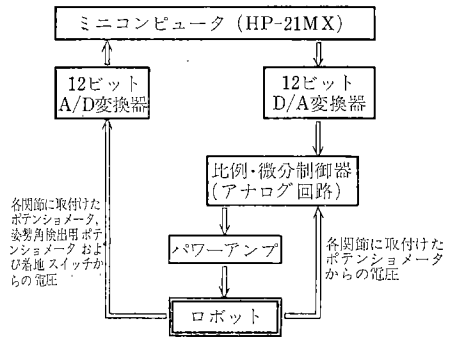


図8 制御システム

$$\left. \begin{aligned} U_{11}\theta^i(\tau_i) + U_{12}\dot{\theta}^i(\tau_i) &= \xi_1^i(\tau_i) \\ U_{11}\bar{\theta}(\bar{\tau}) + U_{12}\bar{\dot{\theta}}(\bar{\tau}) &= \bar{\xi}_1(\bar{\tau}) \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

$\theta^i(\tau_i) = \theta(\bar{\tau}) = \theta_s$  であるから、(18)、(19) 式より、

$$\xi_1^i(\tau_i) - \bar{\xi}_1(\bar{\tau}) = U_{12} e \Delta \eta_i \quad (20)$$

次に  $\Delta \xi_1^i(0)$  を  $\Delta \eta_{i-1}$  により表わすことを考える。 $\Delta \theta^{i-1}(\tau_{i-1})$  は (18) 式からわかるように  $e \Delta \eta_{i-1}$  で近似できるので、(15) 式より次式が成り立つ。

$$\Delta \dot{\theta}^i(0) = A^{-1}(\theta_s) \cdot E(\theta_s) e \Delta \eta_{i-1} \quad (21)$$

また (12) 式より次式が成り立つ。

$$U_{11} \Delta \theta^i(0) + U_{12} \Delta \dot{\theta}^i(0) = \Delta \xi_1^i(0) \quad (22)$$

着地時の外形は一定であるとしたので、 $\Delta \theta^i(0) = \mathbf{0}$  である。そこで (21)、(22) 式より、

$$\Delta \xi_1^i(0) = U_{12} A^{-1}(\theta_s) E(\theta_s) e \Delta \eta_{i-1} \quad (23)$$

(20)、(23) 式を (17) 式に代入することにより次式が得られる。

$$[U_{12} e : -b] \begin{bmatrix} \Delta \eta_i \\ \Delta \tau_i \end{bmatrix} = e^{A_1 \bar{\tau}} U_{12} A^{-1}(\theta_s) E(\theta_s) e \Delta \eta_{i-1} \quad (24)$$

上式は、 $i-1$  歩目における着地時の角速度のずれ  $\Delta \eta_{i-1}$  が、 $i$  歩目の着地時の角速度のずれ  $\Delta \eta_i$  および着地時刻のずれ  $\Delta \tau_i$  に与える影響を示している。

図7は、直立静止状態から定常歩行へ入るまでの、(1)式による計算機シミュレーションの結果である。各関節は局部的に比例・微分制御され、各関節に対する曲げ目標角は、一歩目を除いて本節の前半に簡条書で述べたように与えた。このように目標角  $\theta_r(t)$  が与えられるとき、(24)式を具体的に計算すると次のようになる。

$$\Delta \eta_i = 0.51 \Delta \eta_{i-1}, \quad \Delta \tau_i = -0.45 \Delta \tau_{i-1} \quad (25)$$

上式からわかるように、 $i \rightarrow \infty$  のとき  $\Delta \eta_i \rightarrow 0$  となるので、この制御方式によって安定な定常歩行が可能であることが予想される。実際、図7の高次モデルによるシミュレーションにおいても、 $\Delta \eta_i$  は  $-0.249, -0.121, -0.056, -0.031, \dots$  と徐々に零に漸近し、低次モデルにおける考察が妥当であることを示している。

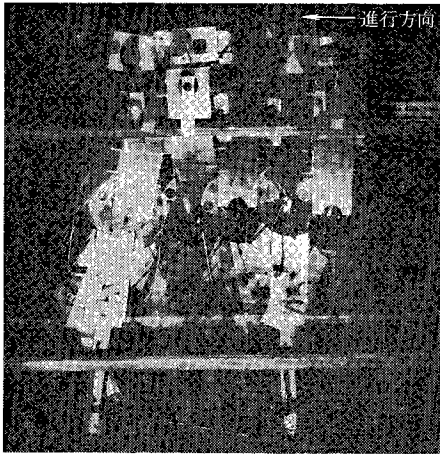


写真 2 ストロボ写真 (連続歩行)

## 6. 歩 行 実 験

前節で述べた制御方式による定常歩行実験、および低次モデルによる予測を用いて行う着地時の角運動量制御実験について本節では述べる。図8に制御システムの概略図を示す。各関節における局所フィードバックはアナログ回路で構成されており、局所フィードバック・ループへの目標値はミニコンピュータから与えられる。ミニコンピュータは着地信号を検出すると、次のステップの目標値信号を出力する。

最初に、前節で述べた定常歩行をこの歩行システムで実現した実験について述べる。一步目を除いて、同じ目標値をミニコンピュータは繰返し出力する。定常歩行実験の様子を写真2のストロボ写真で示す。ストロボの周期は0.25秒である。写真中、水平方向に走っているアングル材は、ロボットがつまずきをしたときロボットを保護するものであり、正常な歩行実験においてはロボットとの物理的な接触はなく、実験に影響を与えない。

この歩行では、歩行の周期は0.4~0.45秒であり、一步は約30cm、歩行速度は約0.7m/secである。その歩行は、計算機シミュレーションの場合ほど安定なものではなく、一步にかかる時間、歩幅がふらつき、完全な定常歩行には入らない。しかし、歩行コースの端から端まで10歩の歩行実験に成功しており、前節で述べた制御方法、すなわち同じ目標曲げ角 $\theta_r$ を繰返し与えることによって、連続的な歩行が可能なが実証できた。

図9に直立静止状態から1歩目、2歩目における、各関節を駆動するモータへの供給電流を示す。供給電流はトルクに比例するので、この図は各関節にかかるトルクをほぼ表わしている。1歩目は左足が支持脚であり、2歩目は右足が支持脚である。図よりわかるように、支持

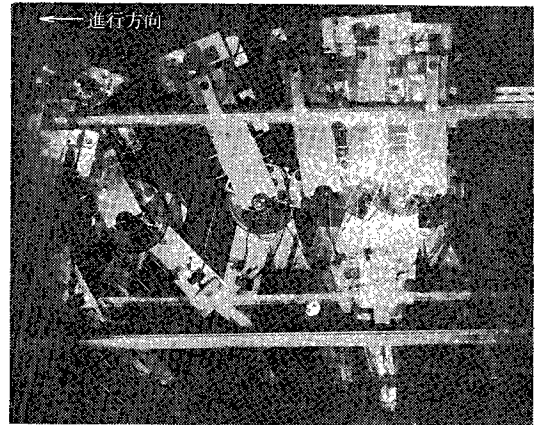


写真 3 ストロボ写真 (つまずいて転倒)

脚膝は最初のうちは曲がった状態であるため、非常に大きなトルクがかかっている。

歩行がふらつく原因は2つ考えられ、1つはサーボメカニズムのバックラッシュなどのため、目標値 $\theta_r$ に正確に追従しないため起きると考えられる。他の一つは、ロボットが左右に傾くことによって起こると考えられる。すなわち、支持脚下端に横向きに取り付けられたパイプの一方の端が歩行路から浮き上がるため、ロボットが左右に回転を起こしはじめたり、あるいは遊脚が下がりすぎて歩行路と接触し、その結果つまずきを起こしたりする。写真3はその典型的な場合で、2歩目につまずきを

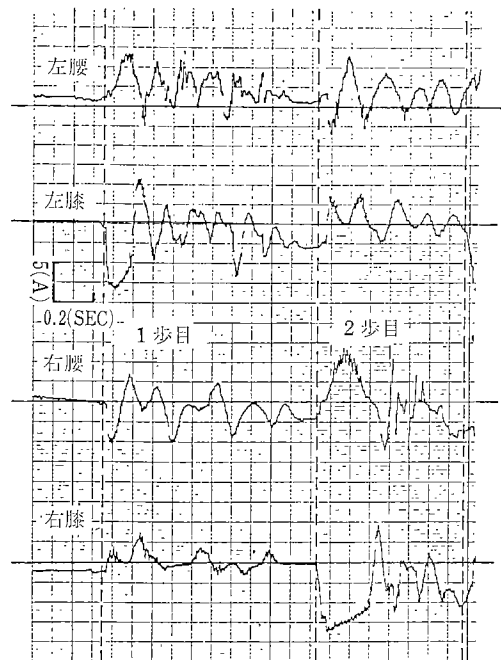


図 9 モータへの供給電流

表 3 着地時の角運動量

	予測制御を行うことによって得られた着地時角運動量 (実験値) (kgm <sup>2</sup> /sec)	予測制御を行わなかった場合の予想着地時角運動量 (推定値) (kgm <sup>2</sup> /sec)
実験 1	20.5	16.9
実験 2	20.4	18.0
実験 3	19.5	16.1

起こして歩幅が短くなりすぎたため、ロボットは加速され、ついには転倒にいたっている。

歩行の開始、停止あるいは外乱（つまづきも外乱の一種と考えることもできる）からの復帰は、角運動量を制御することによって行うことができる。4節で導いた低次モデルを用いて上位レベルで予測を行い、下位レベルへの目標値信号を補正して角運動量を制御する階層的予測制御について文献12)に報告した。表3には、遊脚着地時の角運動量が 19.8 kg·m<sup>2</sup>/sec となるように階層的予測制御を行ったときの実験結果を示す。

実験はオンラインで行なわれ、1歩の最初の1/3の時刻にミニコンピュータにデータを取入れ、低次モデルを使って目標曲げ角の補正量を計算することにより行なわれた。表には予測制御による目標曲げ角  $\theta_r$  の補正を行わず、そのまま制御して着地した場合の角運動量の推定値も示す。表からわかるように、予測制御によって着地時の角運動量は希望値の 19.8 kg·m<sup>2</sup>/sec に近づいている。

### 7. 蹴り効果を持つロボット

写真4に示す歩行ロボットは、著者が現在岐阜大学工学部で研究中のもので、腿脚1号を改造したものである。このロボットは腿脚1号ではなかった蹴りの効果を持ち、重量 40 kg、高さ 1.2 m である。足底は前後の長が 22 cm であり、前後にそれほど長くないため、足首の力に

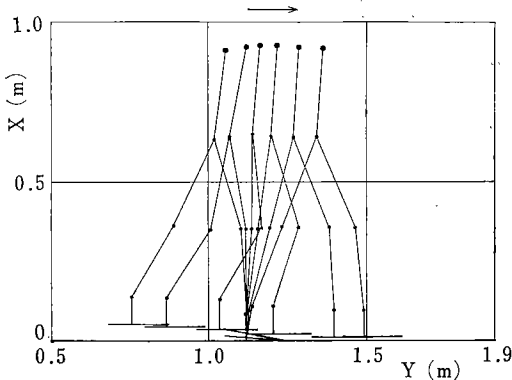


図 10 蹴りのある歩行 (計算機シミュレーション)

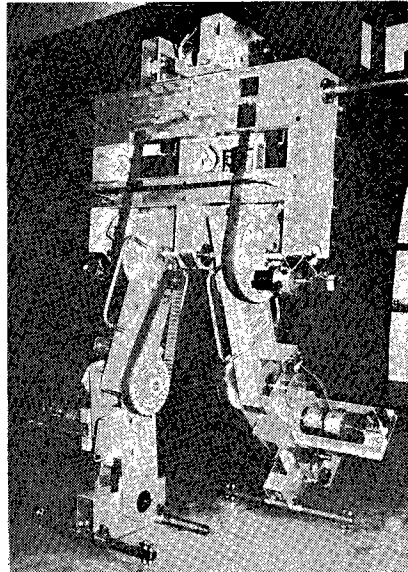


写真 4 腿脚 1 号

よって強引に歩行速度を上げたり歩行を止めたりすることは不可能である。安定な歩行を与える歩行パターンが計算機シミュレーションにより得られており、本年度から実験にはいる。図10には計算機シミュレーションの一步分を示す。

### 8. む す び

人間の自然な歩行である動的歩行をロボットによって実現したが、その動きは現在のところそれほど滑らかなものではなく、歩き始めた赤ん坊のようなものである。本研究では、下位レベルにおける制御としては、最も単純な形の局所フィードバック制御を採用したが、歩行をより自然なものとするためには、可変ゲイン型の局所フィードバックあるいは力フィードバック、さらには状態フィードバックをも含むその他の制御策の採用も必要と考えられる。

重量の軽減、動的歩行状態での各種状態量の測定、制御用計算機の計算能力増大など歩行にとって解決すべき問題は多いが、筆者が歩行の実験を通じて痛切に感じたことを一つだけ最後に挙げておく。それは、支持足底による歩行路のグリップの不足であり、このグリップ不足のため、筆者らのロボットは左右方向への回転を起こし、歩行を不安定にしていた。人間の足首のようにしなやかな足首で地面をグリップすることが、動的歩行を安定に行うため必要であると考えられる。

〔謝 辞〕 日本ロボット学会より、大阪大学増潤研究室の歩行ロボットグループに歩行ロボットに関する執筆依頼があった際、筆者に執筆をすすめて下さり、また終



始御意見をいただいた大阪大学工学部増淵正美教授に深く感謝いたします。また本研究は、森塚秀人（現電力中研）、田村博幸（現東芝）の両君をはじめとする大阪大学の卒業生および山田誠（現岐阜大学大学院）、馬淵厚（現岐阜大学4年生）の両君の協力なしには遂行できなかったことを記し、さらに本研究の実施にあたり終始はげまして下さった岐阜大学工学部大川善邦教授、大阪大学工学部嘉納秀明助教授に深く感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) M. Vukobratovic, 加藤・山田訳, “歩行ロボットと人工の足”, 日刊工業新聞社, 1975
- 2) C. L. Golliday and H. Hemami, “An Approach to Analyzing Biped Locomotion Controls”, IEEE Automatic Control, AC-22, No.6, pp.963-972, 1977
- 3) K. Ogo, A. Ganse and I. Kato, “Quasi Dynamic Walking Machine, Aiming at Completion of Steady Walking”, Proc. of RO. MAN. SY. Symp., Udine, pp.340-356, 1978
- 4) 伊藤宏司, 藤井久一, 伊藤正美, “二足歩行のサーボモデルによる解析”, バイオメカニズム 4, 東京大学出版会, pp.263-270, 1978
- 5) 美多, 柏瀬, 山口, “高速二足歩行機械の制御と実験”, システムと制御, 26-6 別冊, pp.27-30, 1982
- 6) 宮崎, 有本, “特異振動法による多自由度二足歩行系の解析”, 計測自動制御学会論文集, 15 巻, 4号, pp.84-90, 1979
- 7) F. Miyazaki and S. Arimoto, “A Control Theoretic Study on Dynamical Biped Locomotion”, ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, Vol.102, pp.223-239, 1980
- 8) R. Gawronski, “筋制御系の構造について, 続人間の手足の制御”(加藤一郎監訳), 学献社, pp.24-34, 1973

- 9) 赤沢, 梶山, 藤井, “神経一筋制御系のシミュレーション”, バイオメカニズム 2, 東京大学出版会, pp.71-81, 1973
- 10) 古庄, 森塚, 増淵, “局所フィードバックの概念を考慮した2足歩行の低次元モデル”, 計測自動制御学会論文集, 17 巻5号, pp.596-601, 1981
- 11) J. Furusho and M. Masubuchi, “A Theoretic Basis of a Low Order Model for the Control of Dynamic Biped Locomotion Systems”, ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control (投稿中)
- 12) J. Furusho, H. Tamura and M. Masubuchi, “A Hierarchical Forecast Control of a Dynamical Biped Locomotion System”, 第9回IFAC World Congress (ハンガリー) (投稿中)
- 13) B. Kouvaritakis and U. Shaked, “Asymptotic Behavior of Root-Loci of Linear Multivariable Systems”, Int. J. Control, Vol.23, No.3, pp.297-340, 1976
- 14) M. D. Mesarovic 他, 研野和人監訳, “階層システム論”, 共立出版株式会社, 1974
- 15) J. Furusho and M. Masubuchi, “Control of Dynamic Biped Locomotion System for Steady Walking”, 投稿予定



古庄純次 (Junji FURUSHO)

昭和45年大阪大学工学部機械工学科卒業。昭和50年大阪大学大学院工学研究科機械工学専攻博士課程了。昭和51年4月より大阪大学工学部助手。昭和56年10月より岐阜大学工学部講師。現在同精密工学科助教授。歩行の制御, マニピュレータ制御系の設計, 多変数制御理論などに現在興味を持っている。機械学会, 計測自動制御学会, バイオメカニズム学会などの会員。

第 10 回 機械技術研究所研究講演会のお知らせ

テーマ: 高度ロボット技術  
 日 時: 昭和 58 年 11 月 16 日 (水)  
 場 所: 三会堂ビル 石垣記念ホール  
 東京都港区赤坂 1-9-13 TEL 03-582-7451  
 主 催: 工業技術院機械技術研究所  
 (財)日本産業技術振興協会  
 協 賛: 日本ロボット学会他  
 参加費: 無料  
 申込先: (財)日本産業技術振興協会 TEL 03-591-6271  
 〒105 東京都港区西新橋 2-7-4 第10森ビル  
 8 F  
 (午前の部)  
 (司会) 機械技術研究所 自動車安全公害部長 阿部 稔  
 9:30~9:43 開会のあいさつ  
 ……………(財)日本産業技術振興協会  
 専務理事 鈴木 三男  
 機械技術研究所長 金井 実徳  
 9:45~10:10 極限作業ロボットの研究開発  
 ……………機械技術研究所次長兼極限作業  
 ロボット特別研究室長 木村 誠  
 10:10~10:55 マニピュレーション技術の現状と将来  
 ……………機械部 メカニズム課主任研究官 谷 和男

10:55~11:40 移動技術の現状と将来  
 ……………生産工学部 ロボット工学課長 中野 栄二  
 (午後の部)  
 (司会) 機械技術研究所 生産工学部長 尾崎省太郎  
 13:00~13:30 フィルム セッション(機械技術研究所  
 におけるロボット研究の最新フィルムを上映)  
 13:30~14:30 特別講演(演題未定)  
 ……………東京大学教養学部 助教授 村上陽一郎  
 14:30~14:40 休 憩  
 14:40~15:25 駆動機構の現状と将来(特に制御技術を  
 中心として, システム部計測制御課長 光岡 豊一  
 15:25~16:10 環境認識とロボット技術の現状と将来  
 ……………システム部 バイオメカニクス課  
 主任研究官 谷江 和雄  
 16:10~16:55 人間・ロボットシステムの現状と将来  
 ……………システム部 バイオメカニクス課  
 主任研究官 館 暲  
 16:55~17:00 閉会のあいさつ  
 ……………機械技術研究所次長 木村 誠

<詳細問合せ先> 〒305 茨城県新治郡桜村並木 1-2  
 工業技術院機械技術研究所 企画室 近藤孝之  
 TEL 0298-54-2521~4