

# 反復跳躍運動の機械モデル

(九州工業大学) 松岡清利

## 1. まえがき

近年、人間の下肢運動を制御工学的手法を用いて解析し、その運動原理を明らかにしようとする研究が数多くなされてきた。その中で特に歩行運動に研究の重点が置かれてきた。一方、より激しい運動である走行運動や跳躍運動に関しては工学的な立場からの研究はほとんどないようである。

走行・跳躍運動が歩行運動と異なる点は、第1には前者は後者にくらべてはるかに大きな瞬発力を必要とすることであるが、制御工学の観点からすると、一時的に体全体が宙に浮き上りその間系が非可制御になることに特徴がある。すなわち足が地面から離れている間は体全体の運動量・角運動量を制御することができない。このことは一見走行・跳躍中の姿勢制御を困難にさせるように思われる。また人間が走行や跳躍のような速い運動を行わなければならぬ事態は、主に外乱の多い環境下で生じる。たとえば溝や障害物を跳び越えるとか、危険から逃がれるとか、スポーツの競技中とかである。これらのことを考えると、走行・跳躍中の運動制御、とくに姿勢を安定に維持するための制御は歩行に比してはるかに困難となることが予想される。しかるに通常の歩行状態において、あるいはサッカーやバスケットのように人間どうしが互に接触するような外乱の多い運動競技中においてさえ、人間は楽々と姿勢を維持し、歩行に比べて特に転倒しやすいといったことは認められない。

筆者は先に、走行・跳躍運動中の姿勢制御に関する基礎的研究を報告し、そこで簡単な反復跳躍(走行)モデルを提案した<sup>1), 2)</sup>。それによると反復の跳躍運動中の姿勢制御は、着地にそなえて脚を適当な方向に動かすことと、着地のときに脚を横(前後)に動かすこと

との2つの操作で行われ、反復跳躍運動は大まかには着地時をサンプル時刻とするサンプル値制御系として記述できる。サンプル値制御系の特徴として、線形フィードバック制御により時間最適な制御が実現される。すなわち反復跳躍運動においては、姿勢がくずれたとき2回の跳躍で姿勢を完全にもとの状態に戻すこと(実際の人間においても同じことが観察される)が、単純な制御論理で可能となる。しかしこの数式モデルは、無質量脚、着地時間無限小などの仮定を置いたため着地の一瞬の状態のみに注目することになり、連続的な動きが記述されず、人間の自然の運動と類似しているか判断しにくい。したがってそのような簡単な制御で本当に安定な姿勢制御が可能かどうか疑問がある。

本論文で報告するロボットは、もしそのように簡単な制御で安定な反復跳躍運動が可能ならばそれを機械モデルとして実現することができるであろうという見通しのもとに製作されたものである。このようなロボットを製作する際の最大の困難は重力に打ち勝って跳躍するだけの軽量・高パワーのアクチュエータが得がたいことである。そこで本ロボットは斜面上をすべるように動くようになっている(摩擦力は極力小さくしてある)。このロボットは上体と1本脚からなり、(1)脚を伸縮し跳躍をする、(2)着地に備えて脚を適当な角度だけ動かす、(3)着地と同時に地面を横にける、という3つの機能を持っている。試作したロボットを動作させたところ、安定な反復跳躍を持続し、外乱に対する強い安定性を示した。また跳躍をしながら横に移動する(走行)ことも可能であった。

## 2. 安定反復跳躍運動の原理\*

人間の大ざっぱな運動を考案するため、極力単純化

\*以下の説明のより詳しい記述は文献1), 2)を参照されたい。

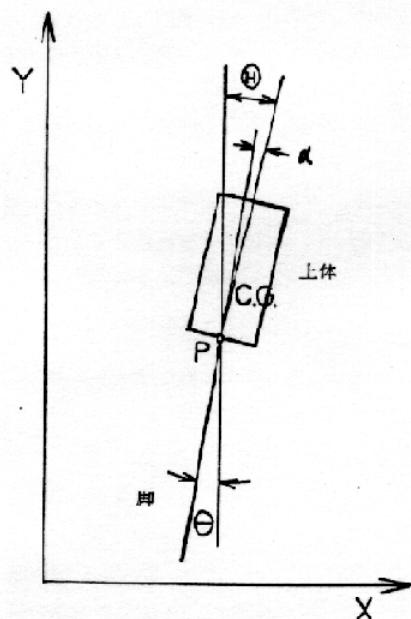


図1 跳躍モデル。

したモデルとして図1の機構を考える。モデルは上体と1本脚からなり、両者の相対的な回転により姿勢の制御を行う。脚の急激な伸縮により跳躍をする。モデルのパラメータおよび状態変数を以下のように定める。

$m$ =上体の質量

$I$ =上体の慣性モーメント

$l$ =脚の長さ

$d$ =脚の接合部と上体の重心の距離

$(x, y)$ =上体の重心の位置

$θ$ =上体の傾き

$θ̇$ =脚の傾き

$α$ =上体と脚のなす角 ( $=θ - θ̇$ )

モデルの運動に関して以下のことを仮定する。

(1) 運動は鉛直2次元平面内で行われるものとする。

(2) 脚の質量は無視する。

(3) 着地の際の衝撃力を、空中から着地に移行するときの受動的な衝撃力と跳躍のための能動的な衝撃力を分離して考え、後者は脚の方向に一定の衝撃力 ( $mV$ ) 作用すると考える。反復跳躍の周期は  $2[Y/g]$  となる。また接地の時間は非常に短いとする。

(4) 姿勢の制御は腰角  $α$  の操作で行う。すなわち着地時の  $α$  および  $α$  (横方向のけりに相当) を

上体の姿勢角・角速度・横方向速度の関数として与える。 $α$  は着地直前から離陸直後にかけて一定とする。

以上の仮定のもとに、状態の遷移を求める。以下の計算はすべて線形近似をしている。

(1)  $i$  回目の跳躍の離陸直前の状態を  $(\theta_1, \dot{\theta}_1, \theta_{1z}, \theta_{1y}, \dot{\theta}_{1z}, \dot{\theta}_{1y}, x_1, z_1) \equiv (\theta^{(i)}, \dot{\theta}^{(i)}, \theta^{(i)}, \dot{\theta}^{(i)}, x^{(i)}, z^{(i)})$  とおく (着地時点に注目すると  $y, \dot{y}$  を考える必要はない)。

(2) 離陸直後の状態を  $(\theta_2, \dot{\theta}_2, \theta_{2z}, \dot{\theta}_{2z}, x_2, z_2) \equiv (\theta^{(i+1)}, \dot{\theta}^{(i+1)}, \theta^{(i+1)}, \dot{\theta}^{(i+1)}, x^{(i+1)}, z^{(i+1)})$  とおく。接地時間は短いとする。

$$\theta_2 = \theta_1, \quad \dot{\theta}_2 = \dot{\theta}_1, \quad z_2 = x_1$$

跳躍のための衝撃は脚の方向に働くとすると、それに伴う運動量・角運動量の変化を考える。

$$m\dot{x}_2 = m(\dot{\theta}_1 + d\dot{\theta}_2) + mV\theta_1$$

$$I\dot{\theta}_2 = I\dot{\theta}_1 + mVd(\theta_1 - \theta_2)$$

(3)  $(i+1)$  回目の跳躍の着地直前の状態を  $(\theta_3, \dot{\theta}_3, \theta_{3z}, \dot{\theta}_{3z}, x_3, z_3) \equiv (\theta^{(i+1)}, \dot{\theta}^{(i+1)}, \theta^{(i+1)}, \dot{\theta}^{(i+1)}, x^{(i+1)}, z^{(i+1)})$  とする。体が空中にあるときは上体の運動量・角運動量が変化しないので、

$$I\dot{\theta}_3 = I\dot{\theta}_2, \quad \theta_3 = \theta_2 + \dot{\theta}_2 \frac{2V}{g}$$

$$m\dot{x}_3 = m\dot{x}_2, \quad x_3 = x_2 + \dot{x}_2 \frac{2V}{g}$$

$\theta_3, \dot{\theta}_3$  は腰角・角速度  $\alpha^{(i+1)}, \dot{\alpha}^{(i+1)}$  の操作で決まり

$$\theta_3 = \theta_2 - \alpha^{(i+1)}, \quad \dot{\theta}_3 = \dot{\theta}_2 - \dot{\alpha}^{(i+1)}$$

(4) 着地直後の状態を  $(\theta_4, \dot{\theta}_4, \theta_{4z}, \dot{\theta}_{4z}, x_4, z_4) \equiv (\theta^{(i+1)}, \dot{\theta}^{(i+1)}, \theta^{(i+1)}, \dot{\theta}^{(i+1)}, x^{(i+1)}, z^{(i+1)})$  とする。再び接地時間は短いとする。

$$\theta_4 = \theta_3, \quad \dot{\theta}_4 = \dot{\theta}_3, \quad z_4 = x_3$$

接地点回りの角運動量は保存されるので、

$$I\dot{\theta}_4 + m(i+d)(\dot{\theta}_4 + d\dot{\theta}_4) \\ = I\dot{\theta}_3 + m\dot{x}_3(i+d) + mV(I\theta_3 + d\theta_3)$$

また

$$\dot{\theta}_4 - \dot{\theta}_3 = \dot{\alpha}^{(i+1)}$$

(1)…(4) より  $i$  回目の離陸直前の状態と  $(i+1)$  回目のそれの関係を求めると、

$$\phi^{(i+1)} = A\phi^{(i)} + BU^{(i+1)} \quad (1)$$

$$\bar{z}^{(i+1)} = \bar{z}^{(i)} + C\phi^{(i)} \quad (2)$$

ここで、

$$\phi^{(i)} = \begin{bmatrix} \theta^{(i)} \\ \dot{\theta}^{(i)} \\ \theta_{iz}^{(i)} \\ \dot{\theta}_{iz}^{(i)} \\ \theta_{iy}^{(i)} \\ \dot{\theta}_{iy}^{(i)} \end{bmatrix}, \quad U^{(i)} = \begin{bmatrix} \alpha^{(i)} \\ \dot{\alpha}^{(i)} \end{bmatrix}$$

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{se}{r} & 0 \\ 1-(1+\varepsilon)\frac{se}{r} & \frac{1+\varepsilon}{(1+\varepsilon)^2+r} \\ -\frac{se}{r} & 0 \\ 1-(1+\varepsilon)\frac{se}{r} & \frac{1+\varepsilon}{(1+\varepsilon)^2+r} \\ 1+\frac{se}{r} & s \\ \frac{(1+\varepsilon)(1+\frac{se}{r})+\varepsilon}{(1+\varepsilon)^2+r} & \frac{(1+\varepsilon)(\varepsilon+s)+r}{(1+\varepsilon)^2+r} \\ 1+\frac{se}{r} & s \\ \frac{(1+\varepsilon)(1+\frac{se}{r})+\varepsilon}{(1+\varepsilon)^2+r} & \frac{(1+\varepsilon)(\varepsilon+s)+r}{(1+\varepsilon)^2+r} \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ -1 & \frac{(1+\varepsilon)\varepsilon+r}{(1+\varepsilon)^2+r} \\ 0 & 0 \\ -1 & \frac{1+\varepsilon}{(1+\varepsilon)^2+r} \end{bmatrix}, C = \begin{bmatrix} s \\ s \\ 0 \\ se \end{bmatrix}$$

パラメータおよび変数は次のように無次元化されている。

$$r = \frac{I}{ml^2}, s = \frac{2V^2}{gl}, \varepsilon = \frac{d}{l}, (\cdot)' = \frac{l}{V}(\cdot), \bar{x} = \frac{x}{l}$$

$(\cdot)'$  は無次元時間  $(V/l)t$  に関する微分である。定常的な反復跳躍運動を行っているときの姿勢状態および 1 跳躍当たりの横方向移動量は  $\phi^{(i+1)} = \phi^{(i)} = \phi_0(\text{const.})$  として、

$$[\theta_0, \theta_0', \Theta_0, \Theta_0'] = \left[ -\frac{\varepsilon}{1+\varepsilon} \alpha_0, -\frac{\varepsilon}{r} \alpha_0 - \alpha_0', \frac{1}{1+\varepsilon} \alpha_0, -\frac{\varepsilon}{r} \alpha_0' \right], \quad (3)$$

$$\bar{x}^{(i+1)} - \bar{x}^{(i)} = -\left(\frac{\varepsilon s}{1+\varepsilon} + \frac{s\varepsilon(1+\varepsilon)}{r}\right) \alpha_0 - s \alpha_0' \quad (4)$$

となる。

(1) 式の入力変数  $U^{(i+1)}$  の操作により姿勢を安定に維持するわけであるが、姿勢がくずれたとき人間がどのように  $U^{(i+1)}$  を操作し姿勢をもとにもどすのかは、はっきりしたことはわからない。ただ通常、人間の運動を観察すると、かなり遠く姿勢を立て直しているように思われる。(1) 式の可制御性を検討すると、任意の状態から 2 ステップで系を定常状態に移行させ

ることができる<sup>2)</sup>。系がシンプル値系であるので、このような制御は線形フィードバック制御で実現できる。

そこで線形フィードバック制御、

$$U^{(i+1)} = F\phi^{(i)} + V^{(i+1)}, \quad V^{(i+1)} = [v_1^{(i+1)}, v_2^{(i+1)}]^T \quad (5)$$

を考える。姿勢がくずれたときにできるだけ姿勢を早く(2回)立て直すという意味で最適なフィードバックパラメータはサンプル値制御理論によると、

$$\left[ \frac{F}{F(A+BF)} \right] = -[AB, B]^{-1} A^2$$

より求まる。この結果はかなり複雑な式になるが<sup>2)</sup>、 $\varepsilon$ が無視できるときは簡単になり、

$$F = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & 1 & s + \frac{1}{2}r \\ -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} & -\frac{1+r}{s} & -\left(1 + \frac{3}{2}r\right) \end{bmatrix} \quad (6)$$

となる。(5)式では  $(i+1)$  回目の跳躍時の操作量  $\alpha^{(i+1)}, \alpha'^{(i+1)}$  を  $i$  回目の跳躍の離陸直前の状態の関数として与えているが、 $i$  回目の跳躍の離陸直前の状態と  $(i+1)$  回目の跳躍の着地直前の状態の間には、

$$\Theta_3 = \Theta_1 + s\Theta_1'$$

$$\Theta_3' = \Theta_1'$$

$$\bar{x}_3' = \bar{x}_1' + \theta_1$$

なる関係があるので、これを用いると  $\alpha^{(i+1)}, \alpha'^{(i+1)}$  は  $(i+1)$  回目の跳躍の着地直前の状態  $(\Theta_3, \Theta_3', \bar{x}_3')$  の関数として与えることもできる。すなわち、

$$U^{(i+1)} = \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{2}r & \frac{1}{2} \\ -\frac{1+r}{s} & -\frac{1}{2}r & -\frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Theta_3 \\ \Theta_3' \\ \bar{x}_3' \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_1^{(i+1)} \\ v_2^{(i+1)} \end{bmatrix} \quad (7)$$

となる。ここで  $v_1^{(i+1)}$  は 1 跳躍当たりの横方向の移動量を与えるもので、定常反復跳躍においては、 $\bar{x}^{(i+1)} - \bar{x}^{(i)} = -2sv_1^{(i+1)} = \text{const.}$  である。 $v_2^{(i+1)}$  は姿勢を決める変数で、これを変えることにより上体が起きたり傾いたりする。次節で述べるロボットの制御には(7)式の方式を用いた。

### 3. 反復跳躍運動の機械モデル

#### 3.1 ロボットの外形

試作したロボットは図1の形状をしており、高さ 428[mm]、横 510[mm]、幅 148[mm]、重量 4.1 [kg]、重心回りの慣性モーメント 0.10[kgm<sup>2</sup>] であ

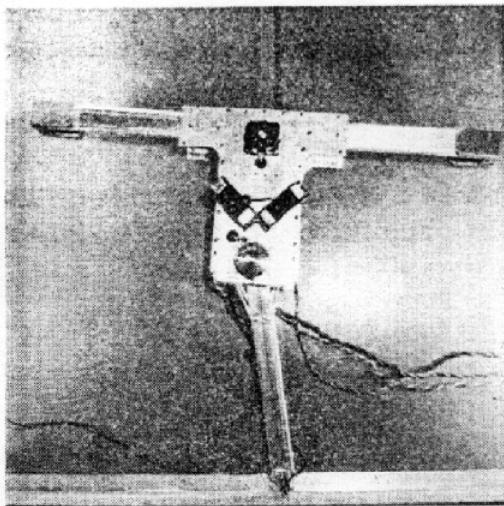
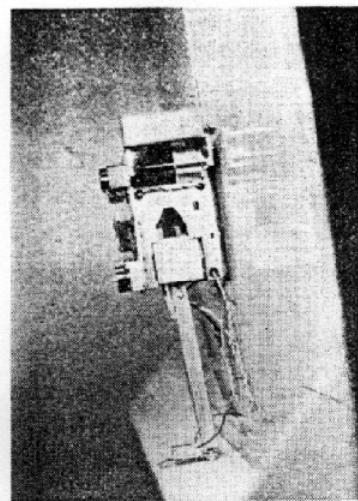


図 2 試作ロボット。

る。上体と1本脚からなり、両者が相対的に動く。脚に取り付けられたリレノイドにより脚が伸縮し跳躍を行う。自重に打ち勝つだけの跳躍力を得るのが困難であるので、このロボットは水平面に対して約10度の斜面をすべるように動く。等価的に重力加速度を( $\sin 10^\circ g$ )にしたことになる。摩擦の影響を極力小さくするために上体の背面に自由にころがるころがつけてあ



る。上体の両側に長い腕がつけてあるが、これは上体の慣性モーメントを大きくするためのものである。十分な安定を得るには、ロボットが跳び上がっているとき腰角を操作した場合、上体よりも脚の方が主に動く必要があり、これが逆になると制御が不能になる。実験装置の全景を図3に示す。

### 3.2 全体の制御システム

本ロボットの姿勢制御システムは、着地時における腰角 $\alpha$ 、角速度 $\dot{\alpha}$ を着地直前の状態の姿勢角 $\theta$ 、角速度 $\dot{\theta}$ 、横方向速度 $\omega$ の線形結合として与えるものである。全体の制御システムのブロック線図を図4に示す。図の HOLD はロボットが空中にあるときは入力をそのまま出力し、着地の間は着地直前の入力を保持し出力するものである。ロボットが跳び上がっているときはIの経路が動き、着地に備えて脚を適当な角度に動かす。着地と同時にIIの経路が動き脚を急激に横に振るのである。BIAS 1 は1跳躍当たりの移動量を与えるもので、これにより反復跳躍をしながら横に移動することが可能になる。BIAS 2 は上体の姿勢角を変えるものである。

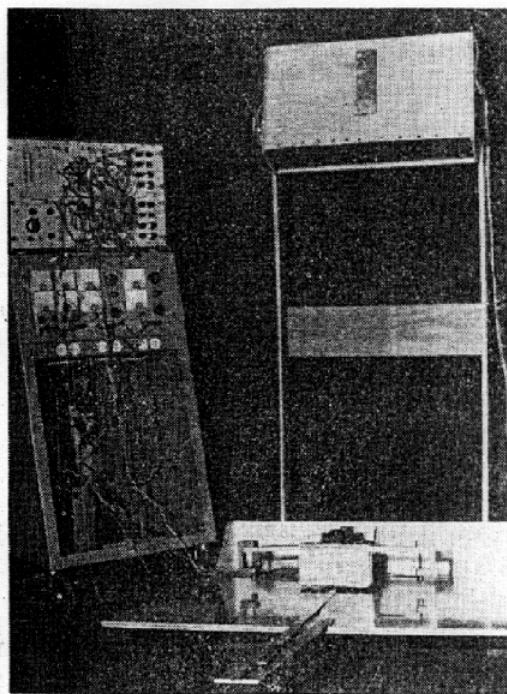


図 3 実験装置。

### 3.3 上体の角度・角速度・横方向速度の検出

上体の角度は偏光を用いて検出する。ロボットの正面に一様な偏光(図3の右上部)を当て、偏光板を前面に取付けたフォトダイオード(図5)で受光する。受光部の偏光板は鉛直線に対して反対方向に45度ず

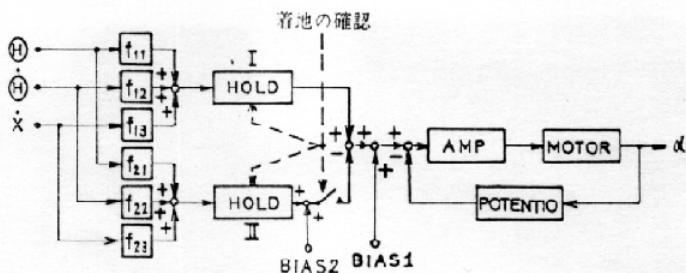


図 4 制御システム。

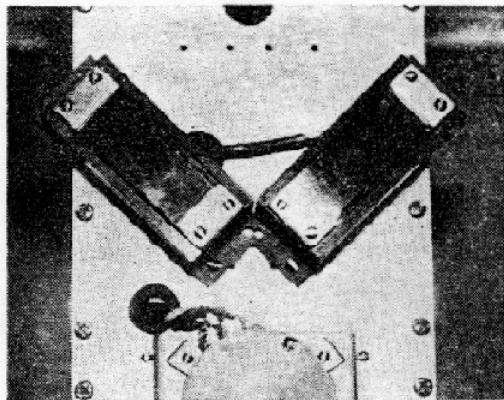


図 5 角度検出装置。

つ傾けてあり、この出力を差動的に加算して上体の姿勢角を求める。これにより偏光以外の光があっても角度の検出が可能になった。この装置の回路図を図 6 に示す。偏光のみを用いて角度を検出した場合の角度と出力電圧の関係は図 7 のようになる。約 ±20 度の範囲では線形な関係が得られるが、場所によりオフセットがある。これは投射した光が一様でないためで、 $\theta = 0$  の状態での横方向位置と出力電圧の関係を図 8 (●) に示す。これを補正するために、後に示す方法で横方向の位置  $x$  を測定し、出力に加算した。その結果、図 8 (○) に示すように位置による影響を数分の一に小さくできた。なお跳躍の高さの範囲内では上下

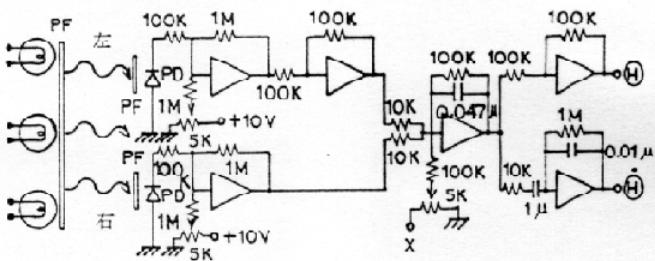


図 6 角度検出装置の回路図。

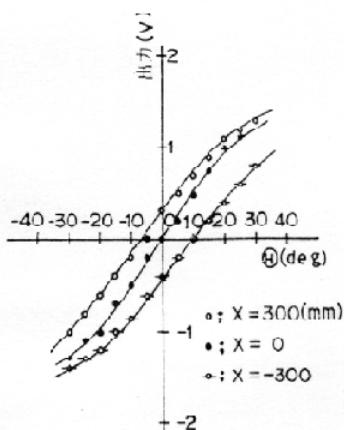


図 7 上体の角度と出力電圧の関係。

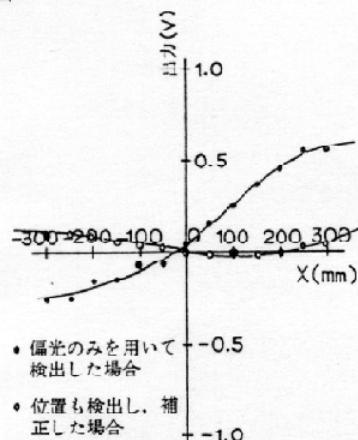


図 8 位置による出力の影響。

方向の位置の影響はほとんどない。角速度はこの信号を微分回路に通して得る。

ロボットの横方向の位置は図9の装置で検出する。図10はその原理図である。 $\sin \varphi$  が求めればよいので正弦出力ポテンショメータを用いる。横方向速度

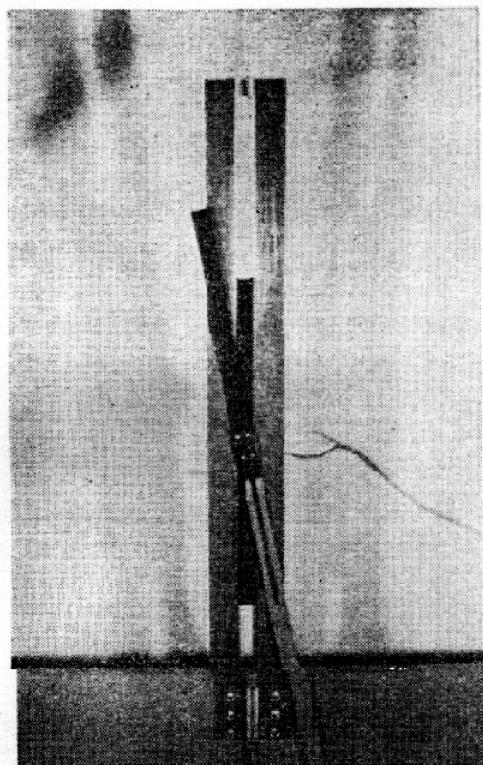


図9 横方向の位置・速度の検出装置。

もはこの出力を微分回路を通して得る。なおこの装置の可動部分の重量はロボットのそれの約3.5%であるが、ロボットの運動に対してほとんど影響は認められなかった。

### 3.4 腰角の設定

腰角 $\alpha$ および着地時のけり $\dot{\alpha}$ を設定する演算、離着陸による操作の切換えはすべてアナログ計算機(図3左上部)を用いた。図11にその回路図を示す。図のブランチIはロボットが跳び上がっているとき着地に備えて脚を適当な角度に動かす回路である。ブランチIIは着地の際の横方向のけりを与えるものである。 $\dot{\alpha}$ に関しては特別な速度制御をしているわけではなく、

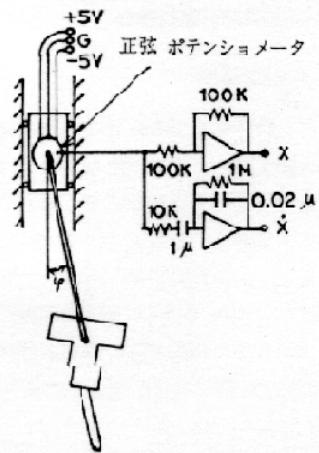


図10 原理図。

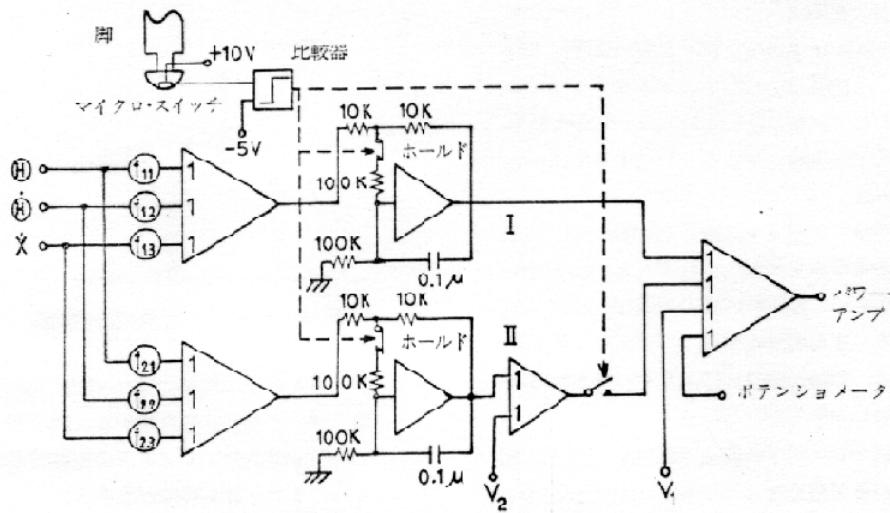


図11 腰角制御回路。

着地と同時にステップ入力を加えているだけである。着地の時間が比較的短いため、ステップの大きさとステップ応答の立ち上り速度がほぼ比例すると考えた。理想化されたモデルに対しては最適なパラメータ  $F$  は計算できるが、実際のロボットに対してはそれを一応の目安にし、最終的にはできるだけ安定になるように調整をした。設定した  $\alpha, \dot{\alpha}$  をパワーアンプに入力しモータを駆動して腰角を制御する。脚の動きが滑らかになるようにアンプのゲインを適切に抑えた。

### 3.5 跳躍機構

脚の伸縮には電磁ソレノイドを用いる。脚の先端にマイクロスイッチが付けてあり、着地直前にスイッチが ON し脚が急激に伸びる。離陸するとスイッチが OFF になりゴムの力で脚が縮む。

### 3.6 ロボットの運動

本ロボットを動作させてみたところ、適当な制御パラメータを設定すると、十分安定な反復跳躍を持続した。上体を指でつついで姿勢をくずしても 2, 3 回の跳躍で姿勢を立て直す。また図 4 の BIAS をランダムに変動させるとふらふら動くが、それでも倒れずに反復跳躍を続けた。また BIAS1 を一定に保つと脚を左右に振らしながら横に移動する。図 12 はロボットが跳躍しながら横に移動する様子を 8 ミリカメラで撮影し 1/8 秒間隔でサンプルし描いた図である。離陸と同時に脚を進行方向に動かし始め、着地と同時に反対方向に脚をけることを繰り返している。

以上のように、適切なフィードバックパラメータを選ぶと、このロボットはかなり強い安定性を持っていると言えよう。また図 12 に示すように大ざっぱには人間的な動きをしているように思われる。しかしそれを人間の反復跳躍と類似していると断定するにはいくつかの問題がある。

(1) 第 1 には、ロボットは斜面上を動いているために、通常の直立状態にくらべてもともと不安定度が小さい。等価的に重力加速度が小さくなっている。また斜面の摩擦も不安定性を緩和している。同時に跳躍周期が長くなるため腰角の制御がしやすくなっている。

(2) 跳躍にソレノイドの瞬発力を利用したため接地時間が若干短くなっている。人間の通常の反復跳躍の場合接地時間は全体の約 40% である

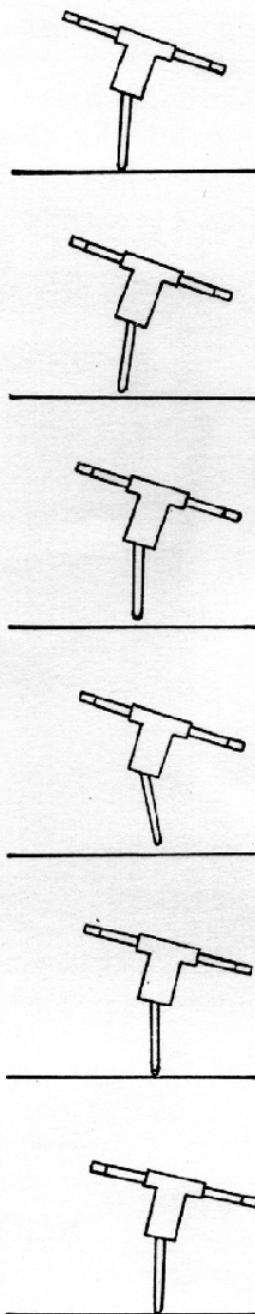


図 12 ロボットの定常反復跳躍運動。

が、本ロボットの場合 25~30% である。足首、膝、腰など体全体を利用する人間のダイナミックな跳躍運動をソレノイドの直線的な動きに置きかえることにも疑問があろう。

(3) 本ロボットは跳躍力については何ら操作をせ

す、姿勢の制御はもっぱら  $\alpha, \dot{\alpha}$  の操作によっているが、実際の人間の走行・跳躍においては跳躍力の操作も利用しているのかもしれない。

#### 4. 結 論

3.6 で述べたいいくつかの問題点にもかかわらず、本機械モデルは人間の反復跳躍中における姿勢制御の基本的機能は具現していると考えてよいであろう。注目すべきことは、かなり強い安定性が簡単な制御論理で得られていることである。このことは跳躍・走行中の姿勢制御には必ずしも複雑な制御を要しないことを示唆しているように思われる。

最後に、本研究は筆者が東京大学大学院在学中に行った研究を基礎にしたもので、当時指導教官であった渡辺茂教授・三浦宏文教授に感謝いたします。またロボットの製作や図面の作成に協力していただいた九州工大技官浦本拡輝君に謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) 松岡清利：跳躍・走行機構に関する基礎的研究、日本機械学会論文集, 43-376, (1977. 12), 4501-4509.
- 2) Matsuoka, K.: "A Model of Repetitive Hopping Movements in Man", Proceedings of 5th World Congress of Theory of Machines and Mechanisms, (1979. 7).
- 3) Takahashi, Y.: Control and Dynamic Systems, (1970), 491, Addison-Wesley.