

### 器械体操をするロボット

高島, 俊 / TAKASHIMA, Suguru

---

(出版者 / Publisher)

バイオメカニズム学会

(雑誌名 / Journal or Publication Title)

バイオメカニズム学会誌 / バイオメカニズム学会誌

(号 / Number)

4

(開始ページ / Start Page)

190

(終了ページ / End Page)

197

(発行年 / Year)

1991-11-01

## 解説

## 器械体操をするロボット

高島 俊\*

## 1. はじめに

人間の行なう運動の中で、歩行や走行は古くから解析や研究がなされ、現在では動的歩行が実現されつつある。歩行はロボットの移動手段としての意義があるため、古くから多くの研究者が研究に携わっているが、その他の全身を用いる運動は工学的な利用価値が希薄なため工学的な研究はあまり行なわれていない。しかし、体操などにみられる跳躍や空中での姿勢変化などの運動は、力学的に興味深いだけでなく、宇宙空間での無重力状態でのロボットマニピュレータなどの姿勢制御のためのヒントを与えてくれることもあり、最近になってロボット工学からみた研究も見かけられるようになってきた。すなわち、そのような運動を行なう人工的な機械を作ろうとすることによって、人間や動物に備わっている物理学的な自然法則を効率的に利用する能力の生じる原理を解析し、現在少々頭打ちになっているより人間に近い知能ロボットと呼ばれるものを作るためのなんらかのヒントを得ようとする研究である<sup>1),2),3),4),5)</sup>。

さて、人間の行なう動作の中でも体操選手が行なっている器械体操を考えてみると、オリンピック競技では鉄棒運動、床運動、平行棒、吊り輪、跳馬、鞍馬が種目になっているが、近年、各選手の技が高度になっており、いったいどうしたらあのような技ができるのだろうかと思惑に思えるものが多い。特に3次元のひねり動作については簡単な力学的な考察から結果を予測することは不

可能に思える。そこでなんとか運動方程式を立て、シミュレーションによって目的とする動作を実現すべく制御の手順を推定することになる。しかし、3次元のひねり動作は *cat's problem* と呼ばれ、現在もまだ明確な解答は得られていない。まだまだ残された研究課題は多いのである。

ところで、オリンピックの種目の中では鉄棒が最もシミュレーションがしやすい種目であろう<sup>6),7),8)</sup>。鉄棒運動の技の多くは2次元平面内での運動と見なすことができ、また、人間を多リンク系とみた場合には、一端が鉄棒に拘束されて回転する運動であるため、周囲環境との接触が鉄棒からの反力と重力のみであることにより、他の床運動や吊り輪などに比べて扱い易いということがある。鉄棒運動の平面内での基本的な技は、人間を3リンクまたは4リンクでモデル化することにより実現できる。ただし、手首の返しとか顎を引き付けるとか背骨を伸ばすなどの動作は含むことはできない。筆者はこれまで、鉄棒運動のシミュレーションを3リンクまたは4リンクのモデルに対して行い、大車輪や蹴上がりが比較的簡単な制御則により実現可能であり<sup>9),10)</sup>、また、着地のための空中姿勢の制御が慣性モーメントを操作することにより可能であることを示した<sup>11)</sup>。さらに、実際に鉄棒運動をするロボットを製作し、いくつかの技を行なわせることができた<sup>12),13)</sup>。以下では主として鉄棒運動をするロボットを実現するためのシミュレーションの方法および制御方法について述べる。

## 2. 運動のシミュレーションのために

人間や動物の動作について解析しようとするとき、その動作をシミュレートすることにより多くの情報が得られることが多い。シミュレーションを行なうためには、まず人間や動物をモデル化す

平成3年8月19日受付

\*法政大学工学部

〒184 東京都小金井市梶野町 3-7-2

キーワード：体操ロボット (Gymnast Robot) 運動のシミュレーション (Simulation of Motion) 鉄棒 (Horizontal Bar) 蹴上がり (Kip Motion) 大車輪 (Giant Swing)

ることになるが、この段階で、その動作を成し得る最小限の構成要素を見いだす必要がある。すなわち、どこまでモデルを単純化してもその動作が実現されるかを考察する中で、その動作の本質的な部分を抽出することができる。たとえば、歩行について考えてみると、Raibert<sup>14)</sup>は歩行、または走行の本質的な部分はびよんびよんと跳ぶことであるとし、1足、2足、4足の移動ロボットに動的な歩行を行なわせることに成功した。また、Simon Fraser 大学の McGeer<sup>15)</sup>は動力のないモデルを研究することにより物理的な問題の多くが解決可能であるとの見地から、歩行が倒立振子の倒れ込みと振子の固有振動による振りの組合せであると大胆に単純化し、動力もセンサもない歩行機械を製作し、解析を行なった。もちろんモデルの単純化の際のこれらの洞察は、人間の歩行についての詳細な観察と解析に負うところが多いが、実際に人間が行なっている動作の複雑さにあまり捕らわれず思い切った単純化をすることが時には必要であろう。

単純化ができれば、次にはラグランジュ法やニュートン・オイラー法などによって運動方程式を導出することになる。ここまでの作業はある程度機械的に進めることができるが、各関節に加えるトルクをいかにして与えるかは非常に困難な問題であり、通常は人間の運動をビデオなどで撮影し、各関節の角度、角速度、角加速度から逆動力学により各関節のトルクを導き出すことが行なわれている<sup>16)</sup>。しかし、この方法では誤差が多く、また、撮影された運動以外の動作を生じるトルクを得ることはできない。一方、制御工学の立場から考えると、各関節には各種のセンサから得られた状態に関する情報に基づき、上位のレベルから関節曲げ角やトルクの指令が出されて動作が決定されていると考えられることから、制御ループもモデル化することにより、様々な運動をシミュレーションにより生成することができる。しかし、そのためには、検出すべき状態は何か、制御すべき量は何か、制御動作はどうするのかを決定する必要がある。

このような運動のシミュレーションはアニメー

ションで表現するのが最適であり、アニメーションを人間の目で見ることにより、不自然な動きかどうか適切に判断でき、方程式やプログラムの間違いのチェックも可能である。筆者は主としてパーソナルコンピュータのパスカル言語により運動方程式を解き、簡単なワイヤフレームによるアニメーション表示をしている。

### 3. 鉄棒運動をする人間のモデル化

#### 3.1 構造のモデル化

人間を剛体リンクの結合したシステムで表現した場合、各リンクの長さ、質量、重心位置、慣性モーメントを求める必要がある。ここでは、左右の腕、頭部と頸部、胴体、左右の上腿、左右の下腿の8個の部分に分け、各リンクの物理量などについて次のような仮定を置く。

- 1) 密度は一定である
- 2) 長さ、質量は平均的な人間のものをを用いる。
- 3) 重心位置は平均的な人間のそれと一致させる。
- 4) 形状は円錐台とする。
- 5) 慣性モーメントは円錐台の形状から計算する。
- 6) 3リンクモデルでは左右の腕、頭部と頸部と胴体、左右の上腿と下腿は合成して1つのリンクとする。
- 7) 4リンクモデルでは上腿と下腿は別のリンクとする。

各リンクの形状を円錐台とすることにより、重心位置を自由な位置に設定することができる。図1には人間の各部を円錐台としたモデルを示し、図2には3リンクモデルを示す。

#### 3.2 関節のモデル化

次に各関節に装着するアクチュエータにどのような特性を持たせるかを求めなければならないが、人間の筋肉および関節には次のような特徴がある。各関節ではここにより力を発生しているため、関節の曲げ角により最大の発生トルクが異なる。筋自体の発生力は収縮速度に大いに依存する。また、制御動作として瞬間的な力を必要とするときには脊髄反射によりフィードフォワード的な動作で外乱に対処する。などであるが、モデル化するに当たって、これらの制限や特徴は必要とあればソフ

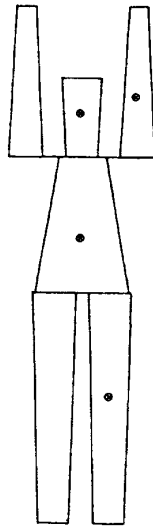


図1. 各部のリンクを円錐台で表現したモデル  
⊗ は重心位置を示す

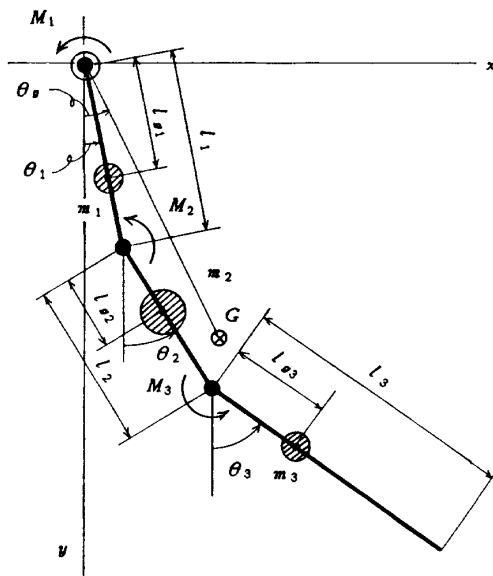


図2. 剛体3リンクモデル

トウェアにより表現することとし、各関節には工業用のアクチュエータが取り付けられており、必要なトルクを発生できるものとする。

鉄棒と手掌との間の摩擦力はないと仮定している。鉄棒上で静止したり、回転を抑えたりするときには必要であるが、これは後から運動方程式に付け加えることができる。

#### 4. 振りを増やすための方法

鉄棒運動の基本的な動作として懸垂振動がある。

「懸垂振動とは懸垂姿勢から振りを開始し、その後、その振幅を維持あるいは増加させること」であるとされている。振りの振幅を増加させる方法として、体操の教本<sup>17)</sup>には「単純な振動」と「投げ上げによる振動」が示されている。

「単純な振動」では前方に振り上げる際には、身体が回転軸に近づき最高点に到達しようとするときには、急速に再び離れようとする。とあるがこれは、ブランコを漕ぐときに立った姿勢で、膝を曲げたり伸ばしたりすることに相当する。この方法は重心の上下動による仕事が、重心の移動量が同じでも、最下点と最高点では作用する力の大きさが異なることによりその差が力学的エネルギーとして蓄えられることによる<sup>18)</sup>。

第2の方法として、人間の身体を振子とみた時の固有振動数と等しい振動数で肩と腰を曲げることにより励振する方法がある。「投げ上げによる振動」はこの方法に近いと考えられる。

### 5. 鉄棒運動のための制御

#### 5.1 基本的な制御方針

人間が実際にどのような制御を行なっているのかは、リンク数や人間の筋肉の数を考えるとあまりに複雑であるので、現象面からのアプローチを行い、上記の3リンクモデルが鉄棒運動を行なうことができるような制御を考えることにする。したがって、人間がこのような制御を行なっているのかどうかは別の問題である。このようなアプローチは歩行ロボットの研究でも同様であり、極言をすれば、うまく動けばよいということになるが、うまく動けば運動の制御の本質的な部分は含まれていると考えてよいであろう。

鉄棒運動に限らず、重力のある地球の上での運動を考えるとき、重心(質量中心)に注目することはごく自然な発想であろう。そして、これまで歩行ロボットの研究でも身体全体の重心の動きを制御することにより滑らかな運動を実現しようとする試みも行なわれてきた。しかし、重心はリンク系の各部が相対的に内力によって変化するときにも敏感に動くことになり、運動の指標としてはあまり適当でない場合もある。

ところで、一般的な言葉に反動を利用するという表現があるが、これを力学的に表わし、人工的に利用することは非常に難しい。一つには慣性の法則を利用することであり、もう一つには運動エネルギーをなるべく減らさないで運動の方向を拘束力により変化させることであろう。これらは、運動量保存則と運動量変化の法則に従うものであり、運動量が人間の運動感覚にとって重要な意味を持つ状態であることが分かる。古荘ら<sup>19),20)</sup>は2足、4足歩行ロボットの動歩行の制御に当たって角運動量に注目した。一方、鉄棒運動はその大部分が鉄棒を中心とした回転運動であることから、鉄棒回りの角運動量を運動の指標とすることができるであろう。

## 5.2 関節角の制御系

人間の鉄棒運動を見てみると、必ずしも正確な目標軌道に沿って運動しているわけではなく、目標軌道に近づくための関節トルクをタイミングよく発生することにより運動が実現されている。すなわち、身体の姿勢を検出しつつ、ある姿勢になったら次の姿勢に移るためのトルクを各関節に発生させるという方法が主であると考えられる。このような、制御を行なうためには大きなフィードバック係数で関節の剛性を高め、正確な目標軌道に追従することを目的とする産業用ロボットに用いられている制御方法では動作が滑らかにはならず、不自然な動きになる。そこで、ここでは各時刻に正確に目標軌道に沿わせることをしないで、比較的小さなフィードバック係数により偏差を生じさせ、それによって各関節に姿勢に応じたトルクを発生させる方法を採用することにした。これは、フィードバック制御ではあるがフィードフォワード的な効果も持つことになる。また、重力の影響は関節角度制御の対称性を失わせるため、各関節には重力補償を行なう。

## 5.3 懸垂振動のための制御アルゴリズム

懸垂振動を継続し、振りを増加させるためのアルゴリズムとして2つの方法を示したが、以下に具体的な方法を示す。

### (1) 重心の上下動による励振

振り下りているときには重心を鉄棒に接近させ、

振り上がっているときには鉄棒から遠ざけることによるが、それを判別するための方法として次の3つが考えられる。

a) 鉄棒から下ろした鉛直線からの質量中心の角度と角速度の条件

b) 全角運動量とその微分値の積の正負

c) 全角運動量の大きさの微分値の正負

いずれの方法でも懸垂振動は可能であるが a) の方法よりも b), c) の方が滑らかで確実な判別が可能である。

### (2) 固有振動数による励振

関節角を微小振動の固有振動数で正弦波状に変化させることにより励振する方法では、固有振動数が振幅に依存して変化するため、振幅が大となったとき励振の位相がずれて振幅が減衰してしまい、90度位までしか励振できない。90度以上の励振を得るためには振幅に応じて励振周期を変化させる必要がある。したがって、振幅角を検出しながら励振周期を変化させればよいが、いま、図3に示すように、時刻  $t_i$  における関節角目標値を  $\theta_d(t_i)$  とすれば、

$$\theta_d(t_i) = A \sin(\omega t_i + \phi)$$

で励振していたものが、 $\omega$  を  $\omega'$  に変えると、

$$\theta_{d'}(t_i) = A \sin(\omega' t_i + \phi)$$

となり、 $\theta_d \neq \theta_{d'}$  となるため目標値が突変する。そこで、時刻  $t_i$  において、

$$\phi' = \omega t_i + \phi - \omega' t_i$$

として

$$\theta_{d'}(t_i) = A \sin(\omega' t_i + \phi')$$

と初期位相を関数値が一致するように与えることにより、 $\theta_d(t_i) = \theta_{d'}(t_i)$  とすることができる。

## 5.4 蹴上がりのための制御アルゴリズム

蹴上がりには反り型蹴上がりと振り上げ型蹴上がりがある。反り型蹴上がりは振り戻りの際に腰を反らし気味に伸ばしその反動によって蹴上がりをするものであり、これを行なうにはまず、懸垂振動によって重心の振幅角の最大値がある域値を越えたとき、反り動作のフラッグを立て、最下点を通過したら反り姿勢を取り、最上点に達したら脚を鉄棒に引き付ける蹴上がり動作を始める。各関節の目標角度(姿勢)は重心位置の鉛直線から

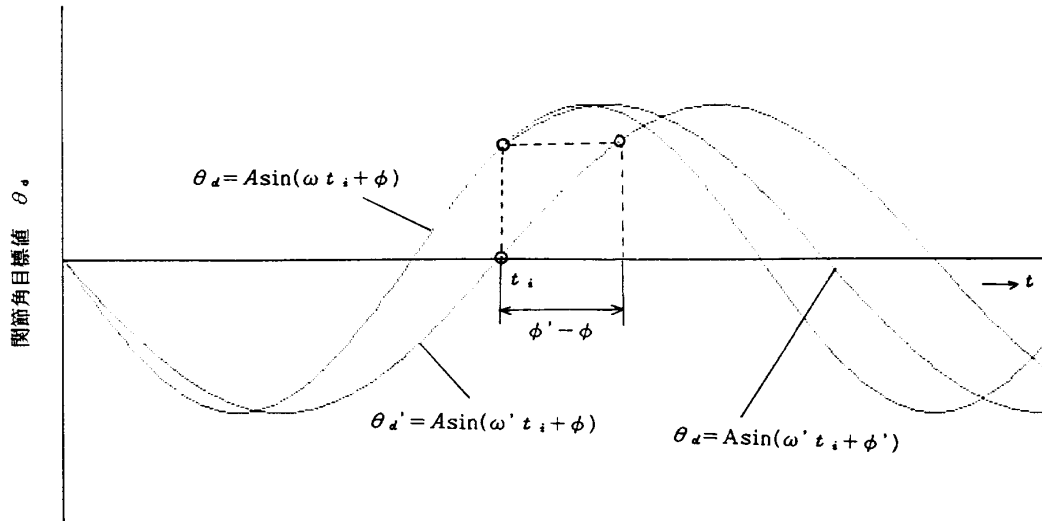


図3. 励振周波数の変更時に目標値の突変を避ける方法

の角度の連続関数として与えている。振り上げ型蹴上がりも同様である。

#### 6. 計算機シミュレーション

計算機シミュレーションを効率よく行なうためには、扱い易い言語が不可欠である。また、グラフィックの命令が充実していること、演算が高速で行えること、数値計算ライブラリが豊富なことも条件である。さらに、筆者の経験から言うと、

できる限りヒューマンインタフェイスがよいプログラムを作成しておくことが大事である。これを怠れば能率が極端に悪くなる。たとえば、計算結果の保存のしやすさ、演算中に自由に様々な条件を変えたり、方程式を切り換えたりできること、アニメーション表示はビデオプレーヤ並に早送りやスロー再生、ストップモーション逆転などがキー操作一つで可能であること、記録したデータを再度アニメーション表示できることなどが求めら

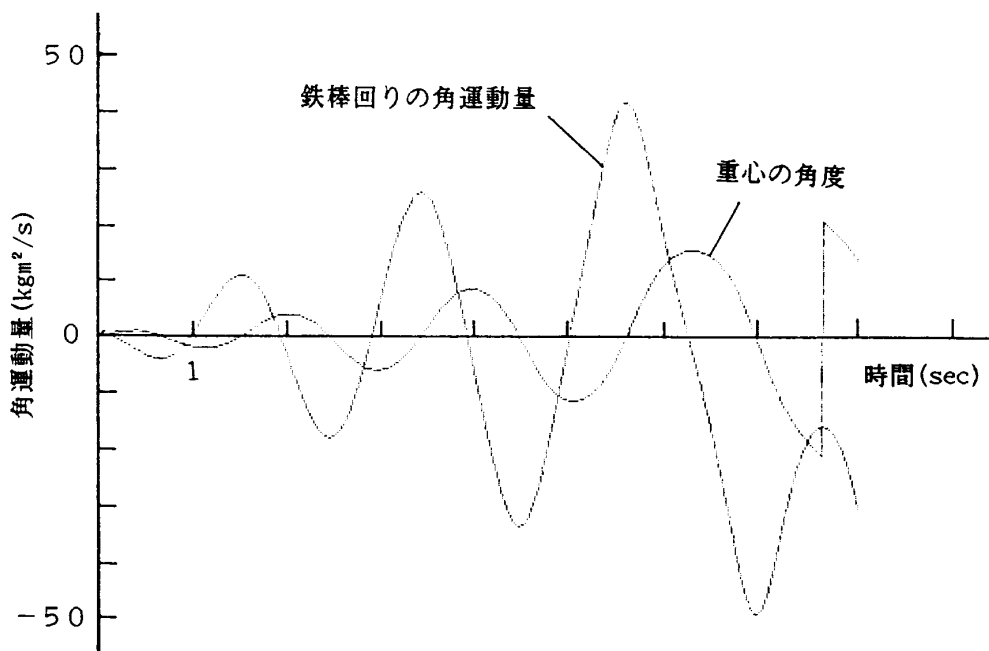


図4. 励振のためのアルゴリズムその1  
(重心の角度と角速度の条件による励振, 重心の角度と角運動量を示す)

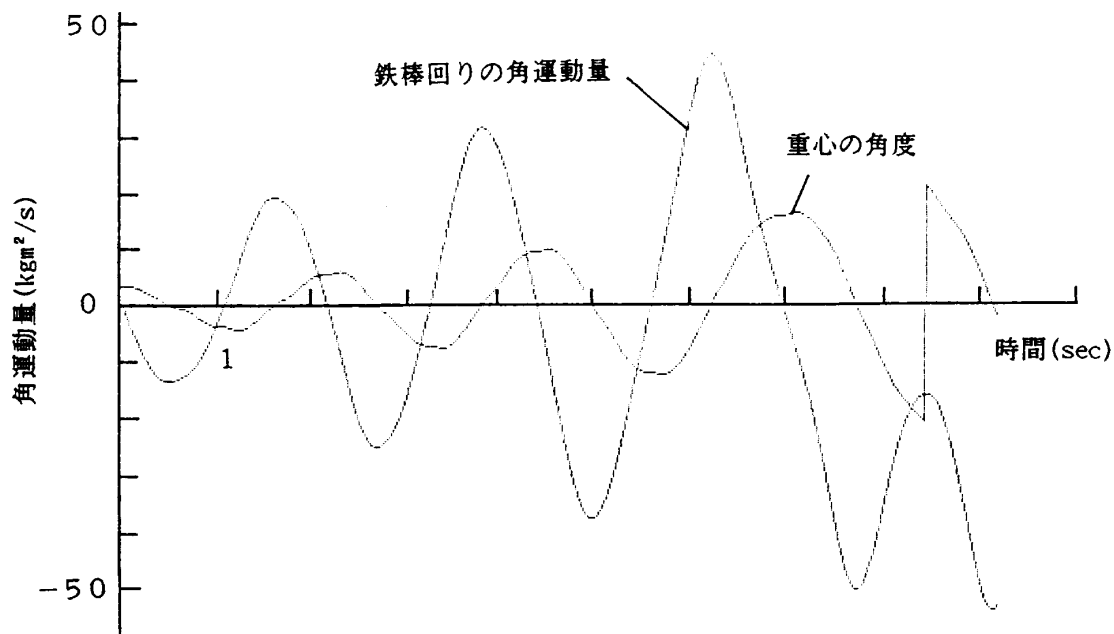


図5. 励振のためのアルゴリズムその2  
(正弦波状の関節角変化による励振,  
重心の角度と角運動量を示す)

れる。すなわち、ワープロ並の機能とコンピュータゲーム並の操作性があれば言うことはない。運動のシミュレーションでは人間が目動きを見ることが必須である。

懸垂振動のシミュレーション結果を図4、図5に示す。図4は重心の上下動による励振であり、図5は固有振動数の正弦波状の動きによる励振である。いずれも大車輪まで励振しているが固有振動数による励振の方が重心の動きが滑らかである。

## 7. 鉄棒運動ロボット

図6に示すような鉄棒運動ロボットを製作し、実験を行ない、懸垂振動、振り出し、蹴上がり、

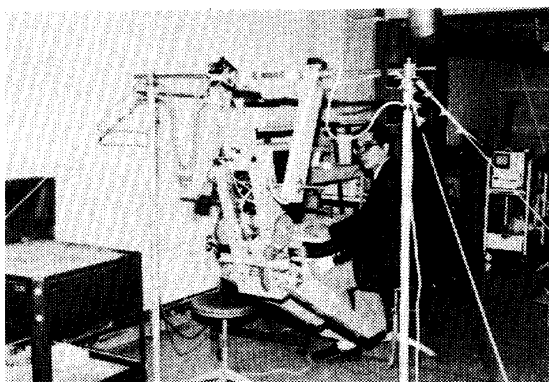


図6. 鉄棒運動ロボット

大車輪を行なわせた。ロボットの身長は1.1 m、体重は15.53 Kgである。各リンクの長さの比は人間とほぼ同じにしてあるが質量配分は胴体がやや重く、脚が軽いため、重心位置が人間よりも上にある。そのため、蹴上がりの最終段階で重心を鉄棒にあまり接近させることができないため、人間より厳しい条件になっている。

大車輪の実験結果の一例を図7に示し、蹴上がりの実験結果を図8に示す。

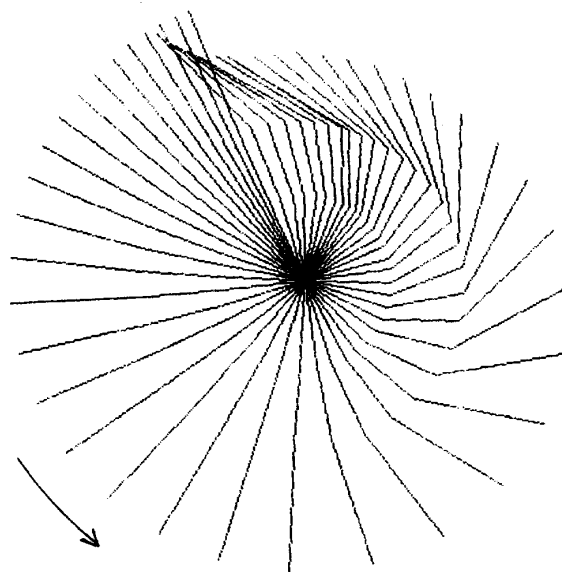


図7. 大車輪の実験結果

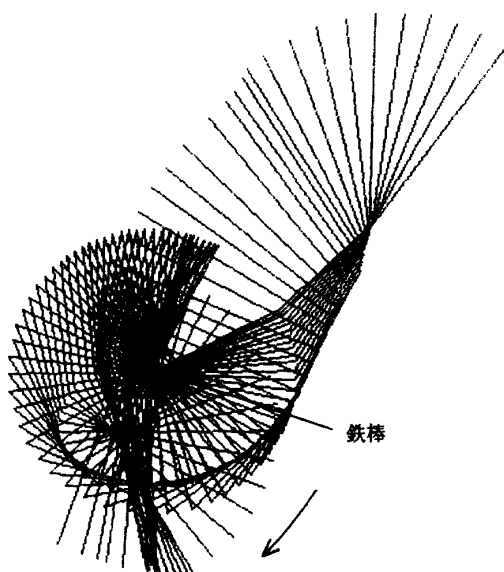


図 8. 蹴上がりの実験結果

## 8. おわりに

器械体操の一種目である鉄棒運動をするロボットを製作することを目的とし、シミュレーションの方法、制御アルゴリズムなどについて述べてきたが、ここには最適性の概念は具体的には盛り込まれていない。最適と言うとどのような評価を選択するのが重要でまた困難な問題でもある。たとえば、上腕のみの運動ではトルク変動が最小となる軌道が最適であるとか、消費エネルギーが最小となる軌道が最適であるなどの評価が可能であるが、多リンク系で表わされる全身を使った運動では、冗長性や多種多様な拘束条件のため、ある評価についての数値的な最適性は単なる一例になる恐れがあり、普遍的な法則や原理には必ずしも結び付かないという問題がある。

鉄棒運動のシミュレーションをし、ロボットを製作し、実験をしてみると、器械体操は人間の筋肉と骨格構造を巧みに利用するように長年に渡って作り上げられたものであると感じる。また、それらの運動をロボットに行なわせようとする、運動の全体的な状態を表わす運動量や角運動量のような指標に加えて、新しい指標を見いだす必要性を感じる。現在、筆者は鉄棒運動の着地<sup>21)</sup>、水泳の飛び込み<sup>22)</sup>、トランポリンにおける姿勢制御などについて研究を進めているが、これらの問題

では先の状態を如何にして予測するかが大きな課題になっている。将来、いわゆる知性はなくとも、知能的に周囲の状況に応じて未来を予測しながら、自由に柔軟な運動をこなすロボットができればと思っている。

## 文 献

- 1) 松岡清利：反復跳躍運動の機械モデル，バイオメカニズム 5，東京大学出版会，251-258 (1980)
- 2) 山藤和男，三矢喜之：跳躍移動ロボットの開発と運動制御，機論，57 (537)，C (1991)
- 3) 福田敏男他：ブラキーション型移動ロボットの研究（第2報，励振シミュレーション及び実験結果），機論，57 (537)，C (1991)
- 4) 福田敏男他：3次元フライングロボットの基礎研究（第1報，フライングロボットのモデル化と姿勢補償地上実験），機論，57 (533)，C (1991)
- 5) 山藤和男他：励振作用を利用した空中移動ロボットの研究（第2報，トルク制御による綾渡り動作の実験），機論，57 (535)，C (1991)
- 6) 松浦勉他：鉄棒ロボット，第30回自動制御連合講演会予稿集，407-409 (1989)
- 7) 鈴木，宮本，木村：蹴上がりのメカニズム，日本機械学会機械力学講演論文集，vol. B (1990)
- 8) 小島宏行他：非駆動関節を有する2関節形鉄棒ロボットに関する研究（逆動力学に基づくフィードフォワード制御を適用した運動制御），日本機械学会論文集，57 (539)，C (1991)
- 9) 高島 俊：鉄棒運動の動力学的シミュレーション，第6回日本ロボット学会学術講演会予稿集，34-42 (1988)
- 10) 高島 俊：鉄棒運動ロボットのための基礎研究，日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'89講演概要集，56-57 (1989)
- 11) 高島 俊：鉄棒運動のシミュレーション（4リンクモデルによる着地），第7回日本ロボット学会学術講演会予稿集，109-110 (1989)
- 12) 高島 俊：鉄棒運動ロボットの制御，第8回日本ロボット学会学術講演会予稿集，619-620 (1990)
- 13) Takashima, S. : Dynamic Modeling of a Gymnast on a High Bar (Computer Simulation and Constructing a Gymnast Robot), Proc. of IROS'90, 955-962 (1990)
- 14) Raibert, M. H. : Hopping in Legged Systems-Modeling and Simulation for the Two-Dimensional One-Legged Case, IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics, SMC 14 (3), 451-463 (1984)



- 15) Mc Geer, T. : Powered Flight, Child's Play, Silly Wheels and Walking Machines, IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, 1592-1597 (1989)
- 16) Van Gheluwe, B. and Atha, J. : Current Research in Sports Biomechanics, KARGAR (1987)
- 17) U. K. ガベルドフスキー : 小野耕三 (訳) : 鉄棒, 8-11 (1978)
- 18) Sanmartin, J. R. : O Botafumeiro : Parametric pumping in the Middle Ages, Am. J. Phys. 52 (10), 937-945 (1984)
- 19) 古荘純次 : 角運動量を考慮した2足歩行ロボットの動的制御, 計自論, 22 (4), 451-458 (1986)
- 20) 佐野明人, 古荘純次 : 疑似角運動量による4足歩行システムの低次モデルの評価及び歩行制御方式の提案, 計自論, 26 (1), 117-119 (1990)
- 21) 高島 俊, 遠藤隆久 : 運動時の人間の空中姿勢の制御および着地のシミュレーション, 日本機械学

会ロボティクス・メカトロニクス講演会 '91 講演論文集 (Vol. A), 437-440 (1991)

- 22) 高島 俊他 : 慣性モーメント操作による落下時の剛体リンク系の姿勢制御, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 '91 講演論文集 (Vol. A), 441-444 (1991)



**高島 俊 (たかしま さとる)** 昭和47年大阪大学大学院工学研究科修士課程修了, 昭和61年工学博士, 昭和47年大阪大学工学部機械工学科助手, 昭和51年~平成元年熊本大学教育学部に勤務, 現在, 法政大学工学部機械工学科教授。運動ロボット, 自律移動ロボットのセンサ開発と軌道制御の研究に従事, 日本機械学会, 計測自動制御学会, 日本ロボット学会, システム制御情報学会の会員。