

3 次元身体運動動的解析支援システム

広島大学 伊藤宏司
(共同研究者) 広島県立身体障害者
リハビリテーション・センター 黒瀬靖郎

On the Three Dimensional Dynamical Analysis Supporting System for Human Movements

by

Koji Ito

*Hiroshima University, College of
Engineering*

Yasuro Kurose

*Hiroshima Prefectural Rehabilitation
Center for the Disabled Persons*

ABSTRACT

Over past ten years, much exciting research has been developed in order to obtain the biomechanical informations of human movements. Much of them is required to model the human body as a linkage system of rigid bodies connected by pin or ball and socket joints. Then, the first step is to determine the equations of motion for the linkage system. The same may be required in the design and control of manipulators and artificial arms or legs. The purpose of this paper is to develop a computer-aided dynamical analysis system for human movements, which is composed of the motion data processing subsystem, the human body model subsystem, and the joint torque and force estimation subsystem. The system is able to analyze and simulate different human movements by pre-assigning the parameters.

要 旨

バイオメカニクスの各分野において、身体運動の力学的・運動学的解析に関心が寄せられている。とくに、競技スポーツの高度化・高速化に伴い、刻々の時間的変化をとらえる動的解析がますます重要になってきている。これらの解析では、身体を剛体リンク系で置き換え、その運動方程式を導出することが前提条件となる。

本稿の目的は、3次元多リンク機構の運動方程式自動生成システムを中心に、運動データの処理、身体骨格モデル、関節トルク・力推定の各サブシステムから構成される身体運動動的解析システムを開発することにある。

本システムは、たとえ力学的知識が不十分であっても、対話形成でパラメータを選択することにより、身体運動の解析・シミュレーションが可能である。また、グラフィックを利用して身体運動をさまざまな角度からとらえ、同時に、作用している関節トルク・力も示すことができる。

1. ま え が き

姿勢・歩行解析、スポーツ運動中の動力学解析、作業中の負荷解析など、バイオメカニクスの各分野において、身体運動の動的解析が必要になる^{1~3)}。動的解析では、まず、人体を多自由度剛体リンク系で近似して、運動方程式を導出する。

次に、人体各部の質量、長さ、慣性モーメントおよび運動時の変位データなどを力学モデルに代入して、各関節に作用する力・モーメントなどを推定する。一方、義手・義足、マニピュレータの設計・制御に対する関心も高い。ここでは、複雑な義肢やマニピュレータの機構・動きを解析するために、シミュレーションが盛んに使われる⁴⁾。

そして、質量や長さの配分、あるいは機構を変えながら、各関節に作用する力・モーメントと義肢・マニピュレータの運動との関係が解析され

る。いずれの場合も、人体を記述する力学モデルの運動方程式を導出することが、前提条件になる。ところが、多リンク機構の運動方程式は、リンク数が多くなると非常に複雑な非線形微分方程式になる。また、リンク構造を若干変化させただけでも、最初から式を立て直し再計算しなければならない。

このような観点から、筆者らは、3次元多リンク機構の運動方程式自動生成システムを中心に、身体運動の解析、義肢・マニピュレータの機構解析に適用可能な支援システムを開発している。本稿ではその概要を報告する。

2. 身体運動と多リンクモデル

身体各部位を剛体リンク系で置き換える場合、いくつかの点を考慮しておかなければならない。

まず、リンク機構モデルでは、図1に示すように、それぞれのリンクがジョイント（関節）で結ばれる。腕とか脚に相当する部分では、図1(a)のような一連鎖構造で表現できるが、胴と頭・腕の結合や両脚と骨盤の結合は図1(b)のような分枝構造になる。後に述べるように、計算機による運動方程式導出アルゴリズムの多くは一連鎖構造に限定されている。各関節はどの方向にも自由に回転できる球ジョイント（例、股関節）または、ある軸まわりのみ回転できるピン・ジョイント（例、肘関節）のいずれかから成る。

腕の運動や姿勢制御動作をリンク機構でモデル化する場合には、一つの端点が固定され、他の端点が自由であるような開いたリンク構造になる（図1(c)）。

一方、歩行運動の両脚支持期にみられるように支持点が二カ所になる場合は、両脚と床反力によって閉じたリンク構造になる（図1(d)）。また、体操、ジャンプ競技など空中動作では、支持点が存在しないので、両端自由のリンク機構になる

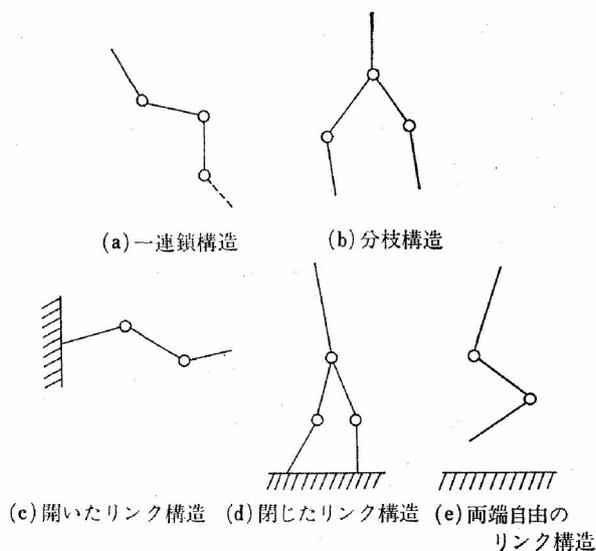


図1 リンク機構モデル

(図1(e)).

このように、運動のタイプによってリンク機構の自由度が違ってくるので、それに応じた運動方程式を生成することが必要である。代表的な運動の特徴を以下に示す。

- 1) **立位姿勢**…足部が床に固定されている運動。運動中、床反力の作用点が移動する。
- 2) **歩行運動**…片脚支持期から両脚支持期に力学的構造が変化する。とくに、両脚支持期は力学的に不整定問題になり、床反力を測定することが不可欠。
- 3) **腕の運動**…リンク機構の一方の端が固定され、他端が開放されている。
- 4) **空中動作**…身体の支持点がない。

3. 剛体リンク系の運動方程式

身体を剛体リンク系で近似したとき得られる運動方程式は、一般に

$$M(\theta) \cdot \ddot{\theta} + h(\theta, \dot{\theta}) + g(\theta) = f \quad \dots\dots(1)$$

で表される。ここで、 θ , $\dot{\theta}$, $\ddot{\theta}$ はそれぞれ、関節角度、角速度、角加速度を、 f は外力を表すベクトルである。たとえば、(1)式が上肢の3次元運動を表しているとする、上肢の自由度は7であるから、 $\theta = (\theta_1, \dots, \theta_7)$ となる。また、 $M(\theta)$

は慣性行列、 $h(\theta, \dot{\theta})$ は遠心力・コリオリ力を表す項、 $g(\theta)$ は重力項で、それぞれ関節角度、あるいは角速度の関数である。したがって、その値は身体の姿勢とともに変化する。もちろん、歩行のように、運動中にリンク構造が変われば、(1)式を再計算しなければならない。

ところで、動的解析では、関節に作用する力・トルクとリンクの初期状態を与えたとき、各リンクの関節角度、角速度、角加速度を求める動力学問題と、逆に各リンクの角度、角速度、角加速度を与えたとき、関節に作用している力・トルクを求める逆動力学問題とがある。前者の動力学問題は運動方程式の積分問題であり、後者の逆動力学問題は、代数方程式の求解問題になる。身体運動の解析ではあらかじめ運動軌道が与えられる後者の問題を扱うことが多い。

さて、まえがきでも述べたように、多リンク機構について(1)式を手計算することは不可能に近い。計算機による運動方程式導出アルゴリズムは、この10年来、ロボットの設計や制御の分野で盛んに研究され、さまざまな手法が提案されている。使用する解析法の違いにより、大きく次の2つに分けられる。

1) ラグランジェ法

リンク系全体の運動エネルギーとポテンシャルエネルギーを求め、ラグランジェ方程式に代入することによって運動方程式が導かれる。リンク相互の内力を考える必要がないので直観的に理解しやすいけれども、物理的意味を与え難く、冗長な計算が多いのが難点である。

Kahn⁵⁾, Hollerbach⁶⁾, Huston⁷⁾, Kane⁸⁾らのアルゴリズムが代表的なものである。ただし、いずれも、一連鎖の開いた構造にのみ適用可能である。

2) ニュートン・オイラー法

この方法で運動方程式を求めるには、ベクトル

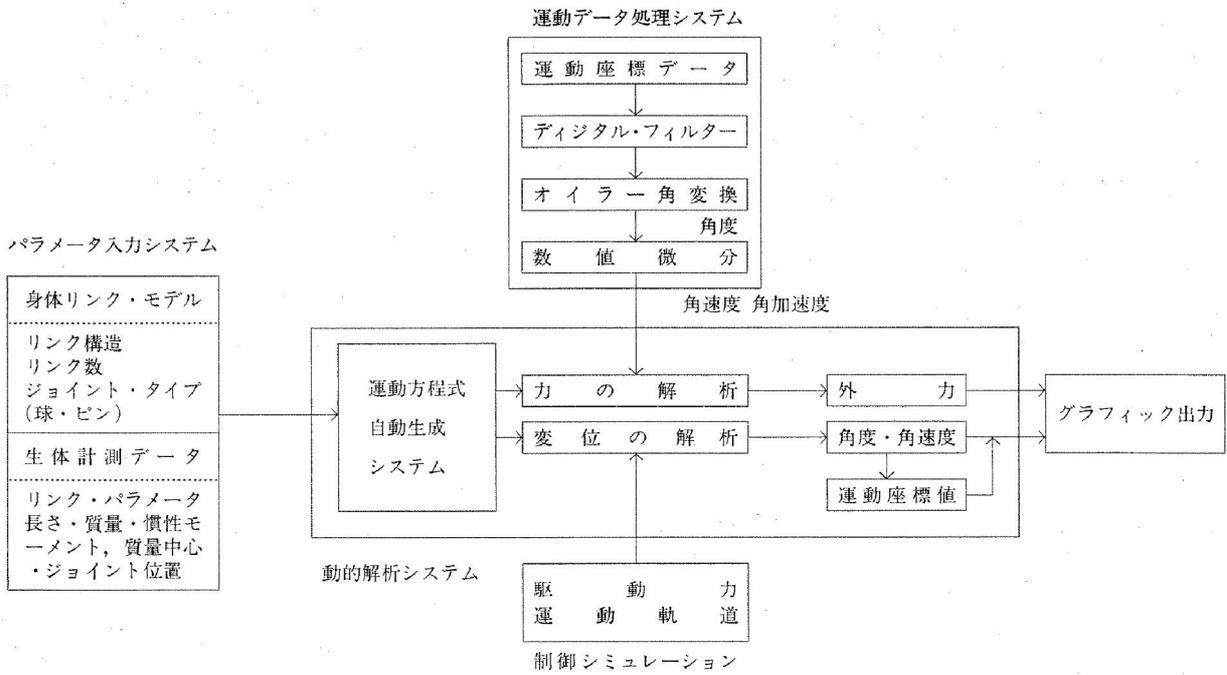


図2 システム・フローチャート

量を扱い、リンク相互の拘束力（内力）や相対運動を考える必要があるが、冗長な計算は比較的少ない。本稿の手法もニュートン・オイラー法によっている⁹⁾。

Luh¹⁰⁾らのアルゴリズムが代表的で最も効率がよいとされている。ただし、開いた一連鎖の構造にのみ適用可能である。閉じた一連鎖構造に対しては、最近増田¹¹⁾らがアップル法によるアルゴリズムを提案している。

4. システム構成

本システムでは、運動座標データを入力して、外力を求める「力の解析」（逆力学問題）と逆に外力を入力して、運動軌道を求める「変位の解析」（力学問題）の両者を実行することができる。システム・フローチャートを図2に示す。

システムは、入力部、データ処理部、運動方程式生成部、解析部、出力部の各サブ・システムから構成される。

4.1 入力部

身体運動の力学モデルを構成する際に必要な

以下のパラメータを与える。

[1] リンク数…力学モデルを構成しているリンク数を与える。設定可能な最大リンク数は使用する計算機のメモリーに依存する。

[2] ジョイント（関節）数…関節数はあらかじめ設定されている身体モデルから自動的に計算される。

[3] 構造行列…リンク機構の構造及び各リンクの結合状態を図3の行列にしたがって与える。

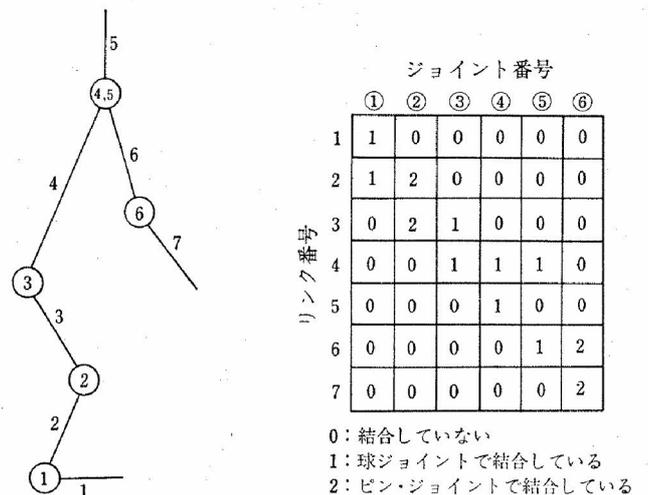


図3 構造行列

図中、縦の数字はリンク番号、横の数字はジョイント番号を表す。また、行列中の数字は以下の意味を持つ。

- <0>: 結合していない。
- <1>: 球ジョイントで結合している。
- <2>: ピン・ジョイントで結合している。

[4] リンクの質量、慣性モーメント、質量中心位置、質量中心からみた関節までの位置ベクトル…各リンクのパラメータは体重および身長で規格化した比率の形で表されており、それらの標準値はあらかじめ用意されている。なお、質量比、質量中心位置は文献(12)、慣性モーメントは文献(1)に基づいて計算している。

4.2 データ処理部

力の解析で利用するため、各種計測データの雑音成分除去、微分などの前処理を行う。

[1] 関節座標値…変位データをオイラー角に変換後、デジタル低域通過フィルターで雑音成分を除去する。ついで、微分フィルターにより角速度、角加速度を求める。

[2] 床反力(垂直, 前後, 左右成分)…必要があればデジタル・フィルターで雑音成分を除去しておく。

[3] 作用点軌跡…床反力から計算しておく。

4.3 運動方程式生成部

運動方程式自動生成システムの簡単なフロー・チャートを図4に示す。まず、それぞれのリンクが結合していないと見なして、各リンクごとに運動方程式を立て、それらをリンクの数(N)だけ並べる。この時、各リンクは並進3、回転3の6つの自由度をもつ。したがって、その運動を記述するためには、6個の変数が必要になる。

次に、関節のタイプ(球またはピン・ジョイント)に基づいて束縛方程式を導出し、冗長な変数を削減して、独立変数のみを残す。球ジョイントであれば、並進の3変数が消去され角度変数のみ

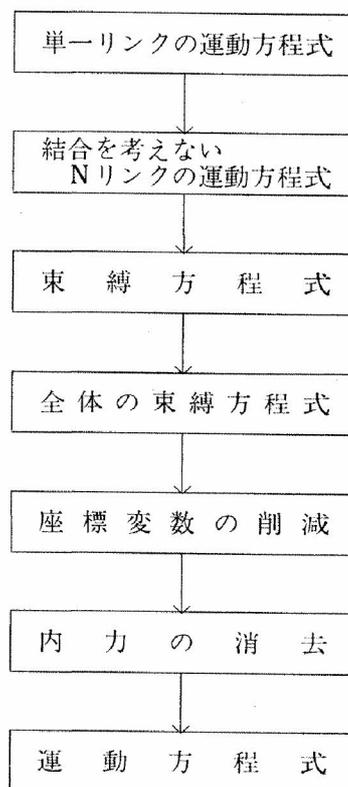


図4 運動方程式生成アルゴリズム

が残される。

一方、膝関節のようなピン・ジョイントでは、さらに2つの角度変数が消去される。たとえば、股関節につながる大腿部の運動は3つの角度変数で記述され、下腿部の運動は1つの角度変数のみで記述される。この後、内力を消去して、(1)式の運動方程式を得る。詳細なアルゴリズムは文献(9)を参照されたい。

4.4 解析部

[1] 力の解析…データ処理部から得られる角度、角速度、角加速度データを運動方程式に代入して、関節に作用する駆動トルク・力を推定する。なお、運動のタイプによっては、床反力データも与えることが必要になる。

[2] 運動の解析…駆動トルクを与えて、運動方程式を数値積分し、角度、角速度、角加速度を推定する。駆動トルクは、制御理論から求めるか、あるいは力の解析で推定した関節トルクの一部を変更するなどして与える。

4.5 出力部

メニュー方式により、グラフィック・ディスプレイ上に、関節トルク、関節角度、角速度、角加速度、関節座標値、体重心軌跡、スティック・ピクチャーおよびこれらの組合せを自由に表示することができる。

5. 適用例

本システムの適用例を以下に示す。モデルのリンク数や身体定数は、CRT画面上で容易に変更できるので、いろいろな運動を解析するのに便利である。

5.1 制御シミュレーション

ロボット・アームの肘を 45° に屈曲させた状態から、水平な位置を維持しながら前方にまっすぐ伸ばす動作をシミュレーションした例を示す。駆動力は状態フィードバックを使って、

$$f = G_p(\theta_r - \theta) + G_v(\dot{\theta}_r - \dot{\theta})$$

で与えた。ここで、 θ_r 、 $\dot{\theta}_r$ は目標位置、速度で、 G_p 、 G_v は位置ゲイン、速度ゲインである。マニピュレータの質量、長さなどは人体モデルと等しくとった。到達時間を6秒とし、刻み幅0.01でルンゲ・クッタ・ギル法を使って、800回積分した

結果を図5に示す。上から、第2リンク（前腕）

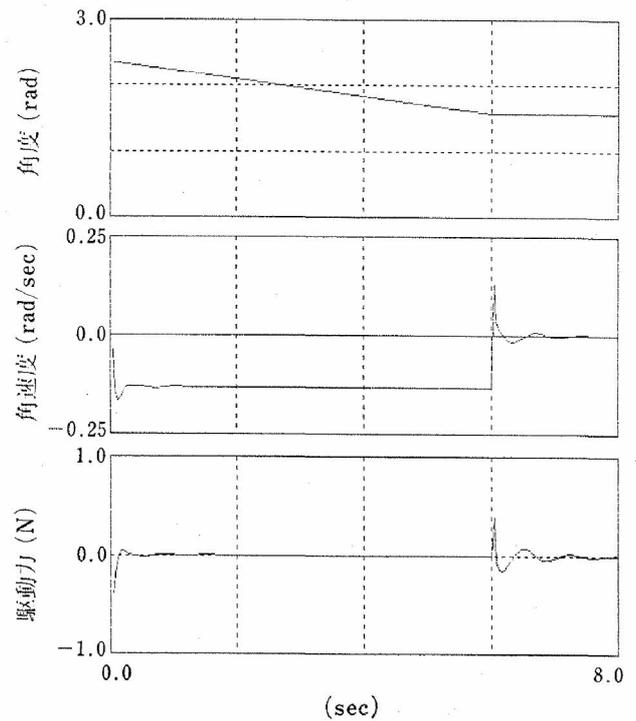
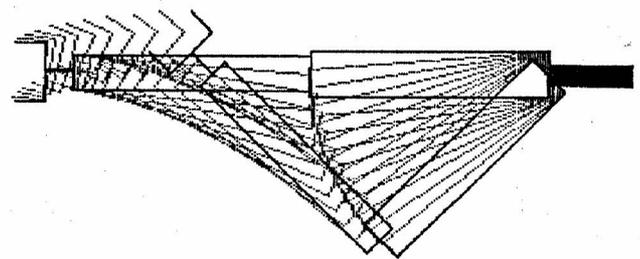


図5 ロボット・アームの制御シミュレーション

構造行列

* JOINT *

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|----------------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|
| 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| * L I N K * | 2 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 3 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 4 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 5 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 10 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

リンク構造の変更を行いますか？ (Y/N)=

図6 構造行列入力画面

の角度，角速度，駆動トルクの時間変化を示す。

5.2 パソコン用2次元解析システム

3次元解析は，計算時間・メモリの関係で現時点では大型計算機に頼らざるを得ない。また，計測装置も大がかりなものになってしまう。そこで，2次元運動に限定したパソコン用運動解析システムを作成した。その使用例を以下に示す。

[1] 歩行運動…人体を足部，下腿，大腿，骨盤，上体の5リンクで近似した。その設定は，CRT画面上で構造行列を使って簡単に行える(図6参照)。質量・リンク長なども図7のようにCRT画面上で設定する。標準値があらかじめ与えてあるので修正部分のみ入力すればよい。歩行データのうち，関節座標値はセル・スポットカメラで測定した。

図8に，単脚支持期のスティック・ピクチャーと関節モーメントの出力例を示す。なお，力の解析の計算では床反力および作用点軌跡も使用している。離床時の足首関節の大きなモーメント(蹴

り)と股関節・膝関節モーメントの同期が特徴である。

[2] 持ち上げ動作…人体を足部，下腿，大腿骨盤・胴，頭部，上肢，前肢，手の8リンクモデルで近似した。いろいろな重さの負荷を持ち上げる動作を側面から16mmシネ・カメラで撮影(64コマ/秒)し，各関節の動きを測定した。膝を伸ばして持ち上げる Stoop (かがむ) と膝を曲げて持ち上げる Squat (しゃがむ) について，スティック・ピクチャー及び股関節と膝関節のパワーを図9に示す(負荷10kg)。

Squatでは股関節と膝関節にパワーが分散されているのに対して，Stoopでは股関節のパワーが極端に大きくなっており，腰部への負荷の集中がみられる。

6. あとがき

本システムは，身体運動，義手・義足，ロボット・マニピュレータなど，剛体リンクで近似され

| 部 位 | 質 量 比 | | | |
|-----|-------|-------|-------|-------|
| 頭 部 | 0.078 | / | 0.418 | 0.557 |
| 胴 | 0.340 | 0.479 | | |
| 骨盤部 | 0.139 | | / | 0.658 |
| 上 腕 | 0.053 | 0.083 | | |
| 前 腕 | 0.030 | | 0.048 | |
| 手 | 0.018 | | / | |
| 大 腿 | 0.200 | 0.307 | | 0.145 |
| 下 腿 | 0.107 | | 0.345 | |
| 足 | 0.038 | | / | |

左の表を参考にして，各リンクの質量比を入力して下さい。

| LINK | 質量比 |
|------|-------|
| 1 | 0.038 |
| 2 | 0.107 |
| 3 | 0.2 |
| 4 | 0.139 |
| 5 | 0.519 |

図7 質量比入力画面

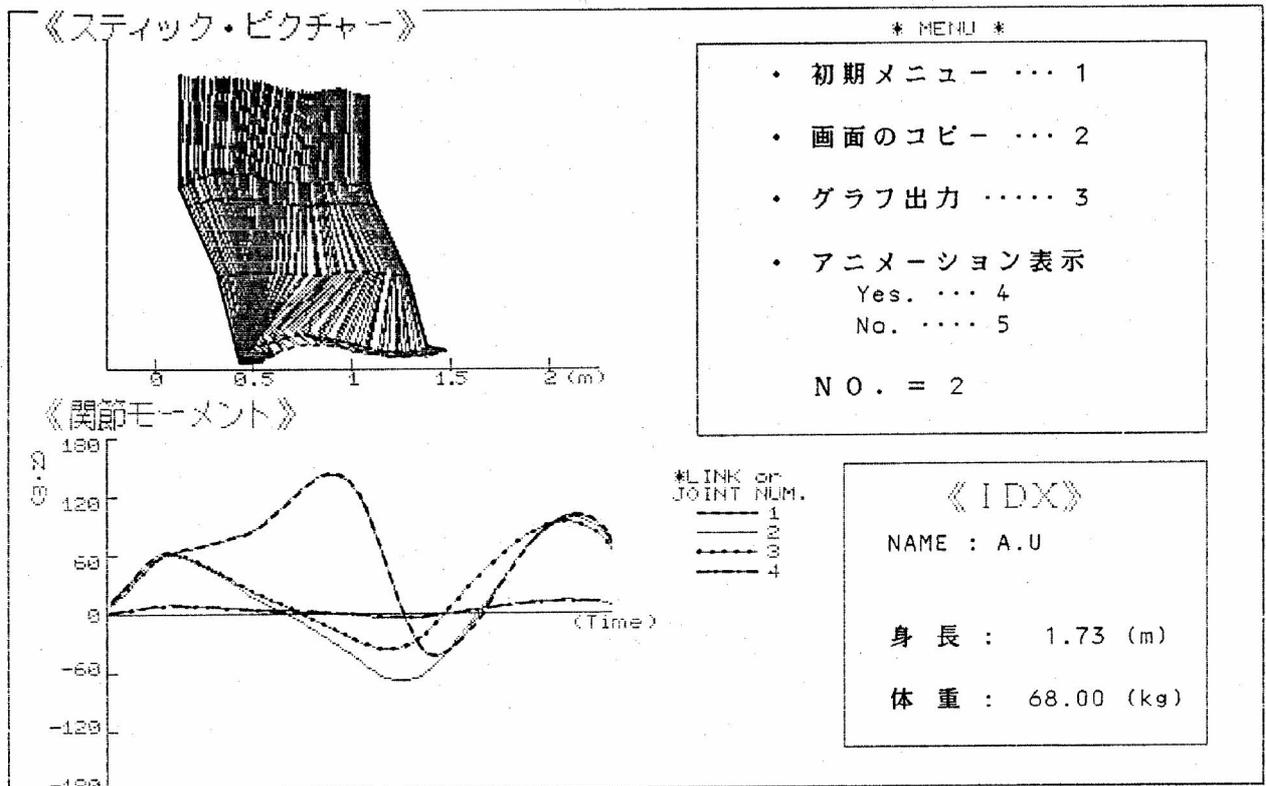


図8 単脚支持期のスティック・ピクチャーと関節モーメント

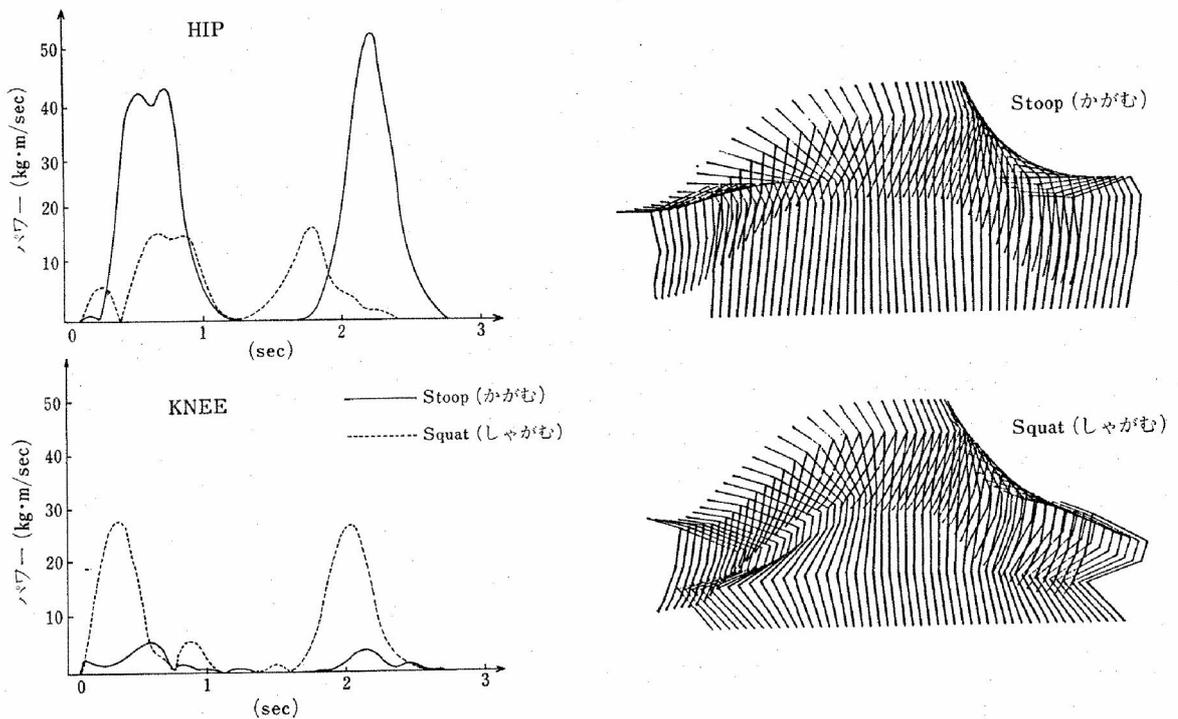


図9 Squat (しゃがむ)とStoop (かがむ)における股関節及び膝関節パワー (両脚)

る力学系の運動解析に適用可能である。なお、3次元運動の解析では、出力の効果的な表示方法が重要になるので、さらに豊富なグラフィック表示を開発する必要がある。今後は、閉じたリンク構造への拡張、パソコンによる3次元解析を試みる予定である。

最後に、本システムの開発にあたっては、名古屋大学大型計算機センターのグラフィックを利用させていただいた。ここに、深く感謝いたします。

文 献

- 1) D.A. Winter; Biomechanics of Human Movement, John Wiley & Sons (1979)
- 2) J.G. Hay; The Biomechanics of Sports Techniques, Prentice-Hall (1973)
- 3) E.R. Tichaur; The Biomechanical Basis of Ergonomics, John Wiley & Sons (1978)
- 4) R.P. Paul; Robot Manipulators, The MIT Press (1981)
- 5) M.E. Kahn; The Near-Minimum-Time Control of Open-Loop Articulated Kinematic Chains, Stanford Artificial Intelligence Project Memo. AIM-106 (1969)
- 6) J.M. Hollerbach; A Recursive Lagrangian Formulation of Manipulator Dynamics and a Comparative Study of Dynamics Formulation Complexity, IEEE Trans. SMC-10—11, pp. 730—736 (1980)
- 7) R.L. Huston & F.A. Kally; The Development of Equation of Motion of Single-Arm Robots, IEEE Trans. SMC-12—3, pp.259—266 (1982)
- 8) T. R. Kane & D.A. Levinson; The Use of Kane's Dynamical Equations in Robots, The International Journal of Robotics Research, 2—3, pp.3—21 (1983)
- 9) 伊藤宏司他; 計算機による多リンク機構動的解析システム, バイオメカニズム 5, 東京大学出版会, pp.231—241 (1980)
- 10) J.Y.S. Luh et al.; On-Line Computational Scheme for Mechanical Manipulators, Trans. of the ASME, *J. of Dynamic Systems, Measurement and Control*, **102**, pp.69—76 (1980)
- 11) 増田隆広他; アッペル法による閉ループ力学系の運動解析, 日本ロボット学会誌4—1, pp.9—15 (1986)
- 12) 松井秀治; 各種姿勢の重心位置に関する研究, 体育学研究, 2—2, pp.65—76 (1956)