

# バイオメカニズム 10

——生体機能の解析と統合——

## 論文別刷

1990年9月

編集 バイオメカニズム学会

製作 財団法人 東京大学出版会

(10)

## 三次元運動解析システムと束縛動作への応用

(広島大学) 伊藤宏司, 横山尚之, 辻 敏夫

### 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<sup>1-4)</sup>. 動的解析では, まず, 人体を剛体リンク系で近似して, 力学モデルを導出する. 次に, 人体各部位の質量, 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・制御においては, 複雑な機構や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<sup>5)</sup>. 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. しかも, 解析の対象はいつも同じ力学的構造をしているわけではない. 例えば, 歩行運動で, 両足を端点と考えた場合, 単脚支持期では, 1つの端点が自由な開リンク構造になり, 両脚支持期では, 両端点とも固定された閉リンク構造になる. またマニピュレータの運動も同様で, クランク回しのように手先に拘束条件が付加されたときは閉リンク構造になり, 手を対象物に向かって伸ばすような動作では開リンク構造になる. 各々の力学的構造の違いによって, それに応じた運動方程式を生成しなくてはならない.

筆者らは先に, 開リンク構造を対象とした解析システムを開発した<sup>6)</sup>. 本稿では, 閉リンク構造にも適用

可能なアルゴリズムを用いた運動方程式生成システムを中心に, 運動データの信号処理, 身体骨格モデル, 関節力・トルク推定, 制御シミュレーションの各サブシステムから構成される支援システムについて述べる. さらに, 外部から束縛を受けるクランク回転作業ヘンシステムを応用し, その解析例を示す.

### 2. 身体運動と多リンクモデル

身体の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・腕の結合は図1(b)のような分枝構造になる. 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.

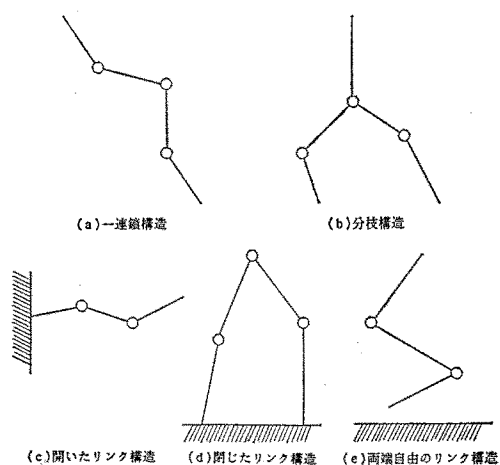


図1 リンク機構モデル

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, ある軸まわりに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。

腕を伸ばす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, 1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やドアの開閉にみられるように支持点が2ヵ所になる場合は, 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, 両端自由のリンク構造になる(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：片脚支持期と両脚支持期で力学的構造が変化する。特に, 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：位置決め動作では, 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開リンク構造になる。しかし, ドアの開閉やクランク回転では, 手先に束縛を受けるので閉リンク構造になる。

4) 空中動作：身体的支持点がない。

### 3. 運動方程式生成アルゴリズム

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。

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<sup>6~11)</sup>。次に, 本稿で採用したアッペル法について概要を述べる。詳細は文献10)を参照されたい。

#### 3.1 アッペル法<sup>10)</sup>

アッペル法で解析の対象とするリンクモデルは枝分かれのないリンク構造で, 開リンク構造, 閉リンク構造をともに扱うことができる。また各リンク間はいずれも1自由度をもつジョイント(関節)で結合され,

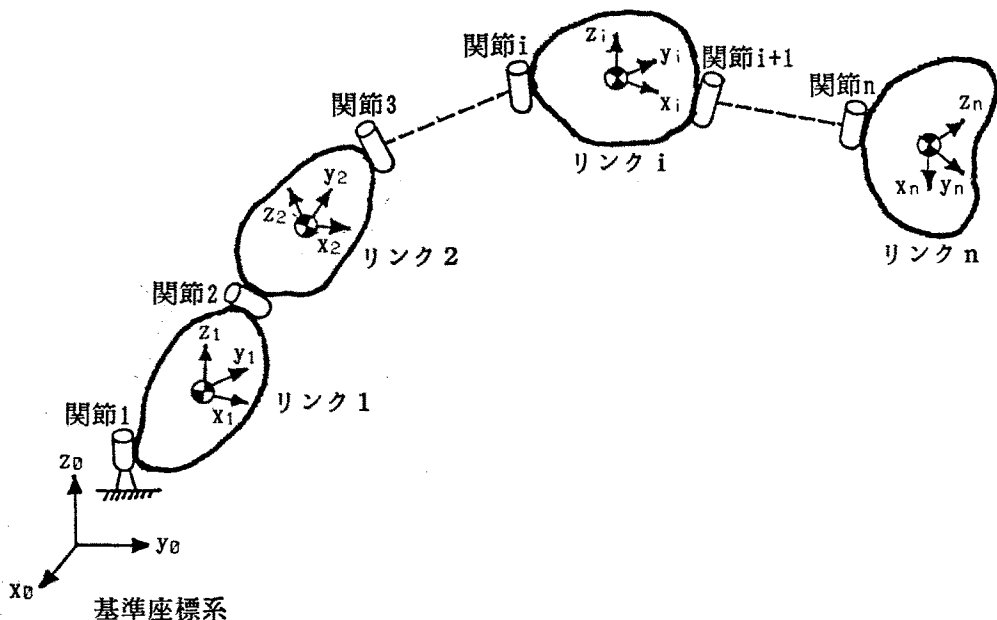


図2 リンクモデルと座標系

基準（固定）座標系とは別に、各リンクの重心位置に座標系をとる（図2参照）。

3.1.1 開リンク構造の運動方程式

まずリンク  $i-1$  の重心座標系からリンク  $i$  の重心座標系への変換を表す変換行列  $A_{i-1,i}$  と重心座標系から基準座標系への変換を表す変換行列  $A_i$  を作成する。次に各リンクごとに重心座標系における加速度エネルギーを計算し、その和を求める。最後に、重心座標系の変数を関節角度、角速度、角加速度に変換して次のような運動方程式が導かれる。

$$M(q)\ddot{q} + h(q, \dot{q}) + g(q) = \tau \quad (1)$$

で表される。ここで、 $q, \dot{q}, \ddot{q}$  はそれぞれ、関節角度、角速度、角加速度を、 $\tau$  は関節駆動力を表すベクトルである。例えば、式(1)が上肢の三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、 $q = (\theta_1, \dots, \theta_7)$  となる。また、 $M$  は慣性行列、 $h$  は遠心力・コリオリ力を表す項、 $g$  は重力項で、それぞれ関節角度、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。

3.1.2 閉リンク構造の運動方程式

閉リンク構造の運動方程式に拘束力と拘束条件を組み込み閉リンク構造の運動方程式を作成する。

基準座標系において、それぞれ並進3方向と回転3方向に独立な  $m$  個の拘束条件を次式で与える。

$$f(q) = k(t) \quad (2)$$

ここで、 $f, k$  は  $m$  ベクトルである。拘束付き運動方程式はラグランジュ乗数  $\lambda$  を用いて以下のように表される。

$$M\ddot{q} = \tau - h - g + E\lambda \quad (3)$$

ここで、 $\lambda$  は  $m$  ベクトル、 $E^T = \partial f / \partial q$  は、作業座標系と関節座標の関係を表すヤコビ行列の拘束される方向の座標成分（行単位）を行列の成分とする小行列となる。

式(2)を時間に関して2回微分すると、

$$E^T \ddot{q} + [(d/dt)E^T] \dot{q} = \dot{k}(t) \quad (4)$$

となる。式(3)、(4)より次式を得る。

$$\begin{bmatrix} M & -E \\ -E^T & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{q} \\ \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau - h - g \\ (d/dt)E^T \dot{q} - \dot{k}(t) \end{bmatrix} \quad (5)$$

慣性行列  $M$  が正定値行列であるので、式(5)の逆行列が存在し、関節加速度と拘束力が求められる。

$$\begin{bmatrix} \ddot{q} \\ \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M & -E \\ -E^T & 0 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \tau - h - g \\ (d/dt)E^T \dot{q} - \dot{k}(t) \end{bmatrix} \quad (6)$$

以上のように、開リンク構造における運動方程式に加えて、ヤコビ行列  $E$  およびその時間微分と関節速度の積  $[(d/dt)E] \dot{q}$  を求めれば、閉リンク構造における解析が可能となる。

4. システム構成

システム・フローチャートを図3に示す。システム

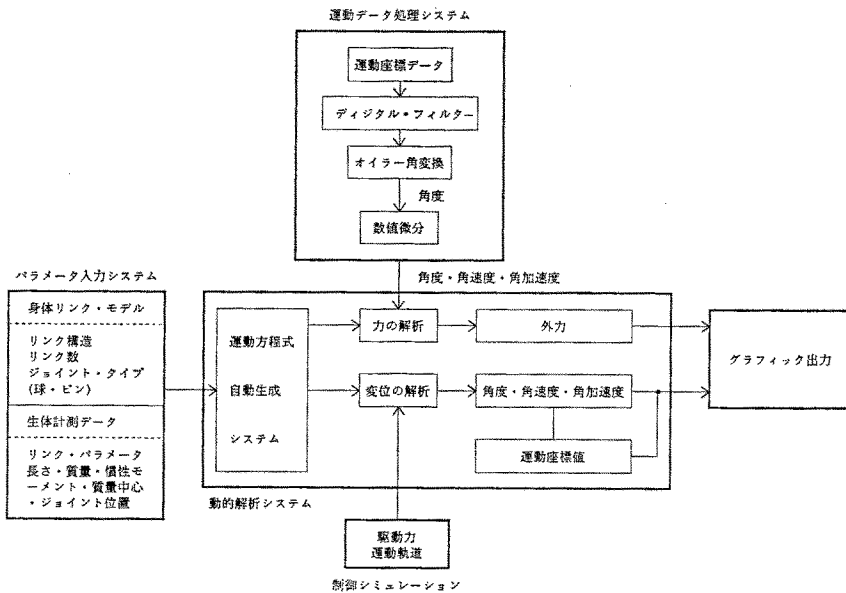


図3 システム・フローチャート

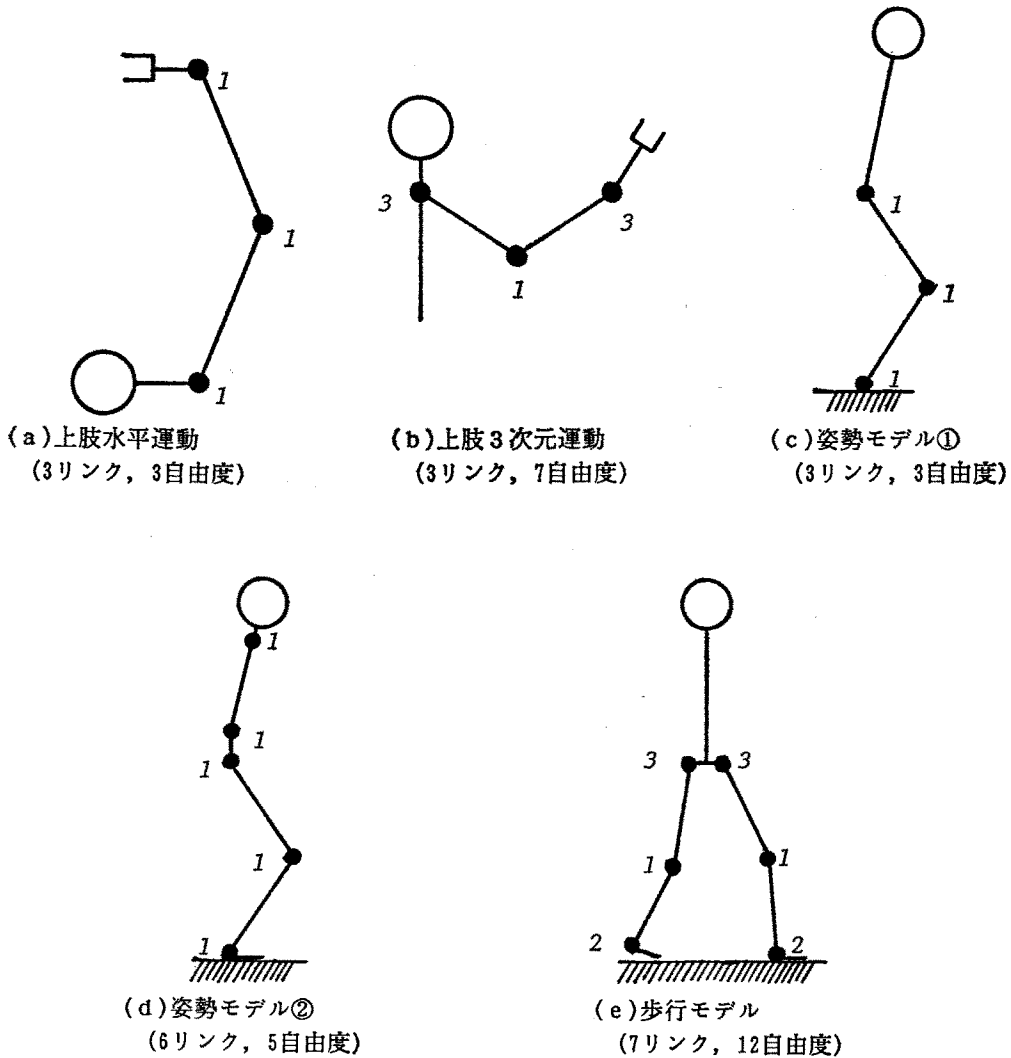


図4 身体リンクモデル

は、パラメータ入力、運動データ処理、運動方程式生成、制御シミュレーション、グラフィック出力の各サブ・システムから構成されている。

#### 4.1 パラメータ入力

身体運動の力学モデルを構築する際に必要な以下のパラメータを与える。

##### 4.1.1 関節タイプ

本システムでは、各ジョイントを1自由度の回転または並進ジョイントに限定して運動方程式を生成する。したがって、股関節や肩関節のような3自由度の回転ジョイントは、

$$(\text{回転1})+(\text{リンク1:長さ0})$$

$$+(\text{回転2})+(\text{リンク2:長さ0})$$

$$+(\text{回転3})$$

のように内部で置き換える。

##### 4.1.2 リンク・パラメータ

各リンクの重心位置に重心座標系を設定し、リンクの姿勢は基準(固定)座標系からのオイラー角変換で与える。次に、重心座標系で表したジョイント方向の単位ベクトル、ジョイントからジョイントまでの位置ベクトル(リンク長に相当)、ジョイントから重心までの位置ベクトル、および各リンクの質量・慣性モーメントを与える。

##### 4.1.3 リンク構造

身体運動を解析する場合は、リンク構造、関節タイ

部位	質 量 比			
頭部	0.078	/	0.418	0.557
胴	0.340			
骨盤部	0.139	0.479	0.658	
上腕	0.053	0.083		0.101
前腕	0.030			
手	0.018	0.048	0.145	
大腿	0.200	0.307		
下腿	0.107			
足	0.038	0.345	/	

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 5 質量比入力画面

ブ、パラメータをそのつど入力しなくてもよいように、図4のような標準モデルが用意されている。各部位の質量・長さなどのパラメータは体重および身長で規格化した比率で表されており、それらの標準値はあらかじめ用意されている。また、修正が必要な場合は、図5のように画面上で行うことができる。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。

一方、ロボット・アーム、義手など図4以外のリンク系をモデル化する場合には、関節タイプを順次画面上で入力する。設定可能な最大リンク数・ジョイント数は使用する計算機のメモリにより決まる。例えば、パソコン(主メモリ:640KB)クラスで、12リンク程度の解析が可能である。

#### 4.2 運動データ処理

逆力学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: デジタル低域通過フィルターで変位データの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) 拘束力・拘束方向のデータ処理。

#### 4.3 運動方程式生成

リンク系の姿勢を与えれば、先の実アルゴリズムにしたがって運動方程式の係数が求められる。

- 1) 逆力学解析: 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。また、必要に応じて拘束力(例: 床反力データ)を与える。
- 2) 動力学解析: 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。駆動トルクは次の制御シミュレーションで与えるか、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。

#### 4.4 制御シミュレーション

動力学の解析を行う場合、各ジョイントの駆動トルク・力が必要となる。しかし、その駆動トルク・力のデータが存在しない場合は、理論から駆動トルク・力を導出するか、仮定の駆動トルク・力を設定する必要がある。

制御シミュレーション部では、各ジョイントごとに

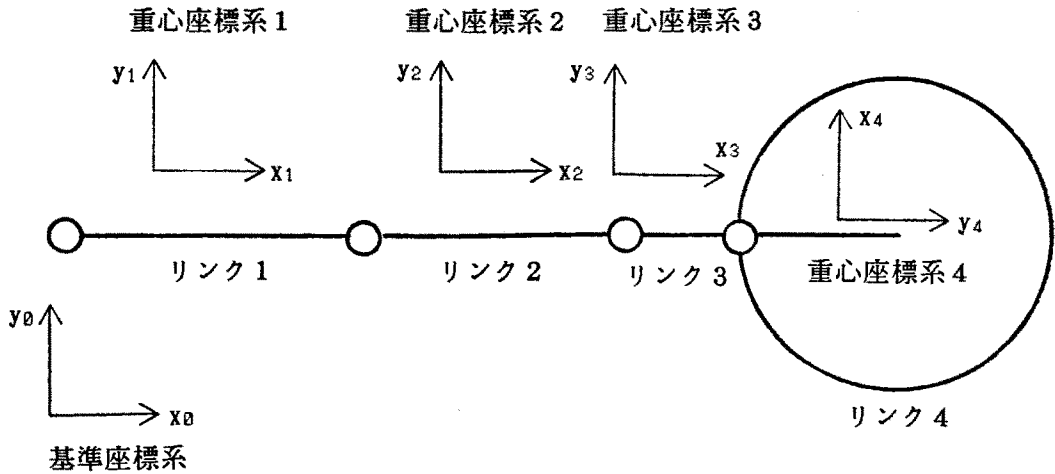


図 6 クランク回転の座標系

表 1. リンク・パラメータ

	link 1	link 2	link 3	link 4	
座標系 (euler 表示) (rad)	x	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
	y	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
	z	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
ジョイント変位方向の単位ベクトル	x	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
	y	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
	z	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000
リンク長 (ベクトル) (m)	x	0.280000	0.250000	0.110000	0.150000
	y	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
	z	0.000000	0.000000	0.000000	-0.050000
重心位置 (ベクトル) (m)	x	0.128800	0.102500	0.055000	0.150000
	y	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
	z	0.000000	0.000000	0.000000	-0.025000
慣性モーメント (kg・m <sup>2</sup> )	x	0.000000	0.000000	0.000000	0.500000
	y	0.029312	0.011017	0.001230	0.500000
	z	0.029312	0.011017	0.001230	0.5632874
質量 (kg)	3.392000	1.920000	1.152000	5.3391876	

上腕 (リンク 1), 前腕 (リンク 2), 手 (リンク 3), クランク (リンク 4)

ローカルな角度・角速度フィードバックを施し、駆動トルクを導出する次式の制御方式が組み込まれている。

$$\tau_i = K_i(\theta_{di} - \theta_i) + B_i(\dot{\theta}_{di} - \dot{\theta}_i) \quad (7)$$

ここで、

$\tau_i$ : 関節  $i$  の駆動トルク

$\theta_{di}, \dot{\theta}_{di}$ : 関節  $i$  の目標角度・角速度

$\theta_i, \dot{\theta}_i$ : 関節  $i$  の角度・角速度

$K_i$ : 位置ゲイン

$B_i$ : 速度ゲイン

である。これ以外にも、必要に応じてさまざまな制御方式を設定することが可能である。

#### 4.5 グラフィック出力

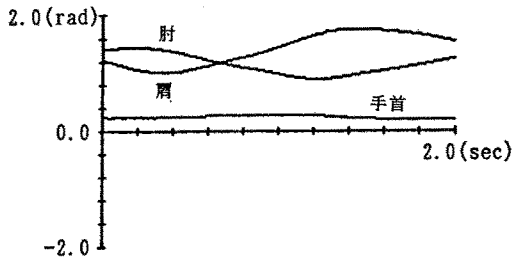
メニュー選択方式により、グラフィック・ディスプレイ上に、駆動トルク・力、変位、速度、加速度、拘束力などをスティック・ピクチャとともに表示する。

### 5. クランク回転作業への適用

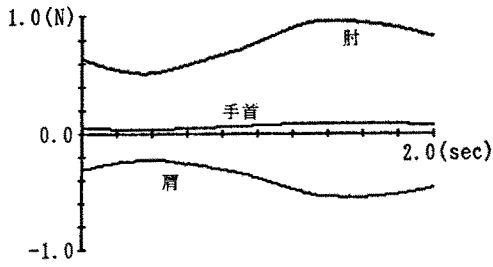
#### 5.1 逆力学解析

水平面内のクランク回転作業を取り上げる。被験者はクランクの中心に身体を中心を合わせて立ち、手で握ったハンドルに力を加えることによりクランクを回転させる。クランクの回転軸に取り付けたパルス・エンコーダにより回転角  $\phi$  を、ハンドルに取り付けたひずみゲージにより動座標系での手先の力ベクトル  $f$  を、手首関節に取り付けたゴニオメータにより手首関節角度  $\theta_3$  を測定し、サンプリング間隔 10 ms で計算機内に取り込んだ。

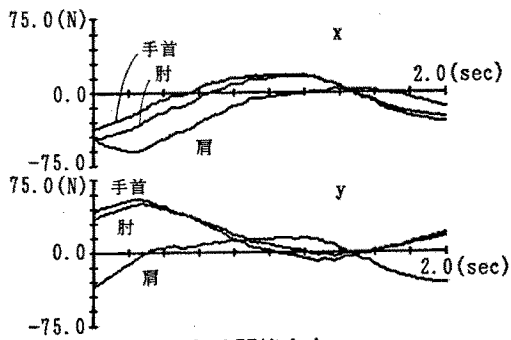
上腕 (リンク 1), 前腕 (リンク 2), 手 (リンク 3), クランク (リンク 4) の 4 リンクで力学モデルを構成した。各リンクのパラメータは表 1 に、座標系は図 6 のように設定した。回転半径 7.5 cm のときの逆動力



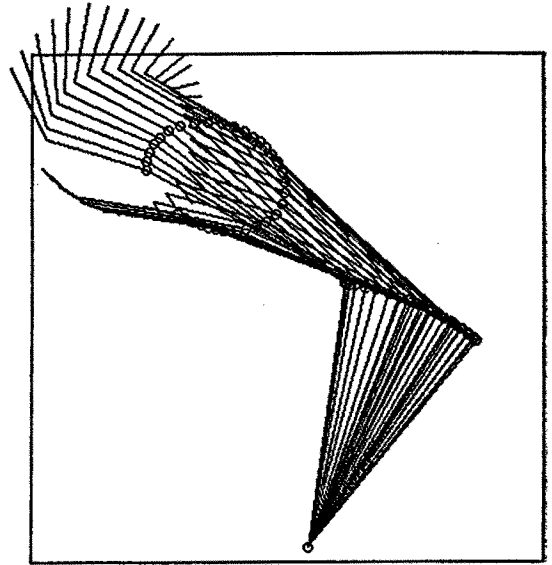
(a) 関節角度



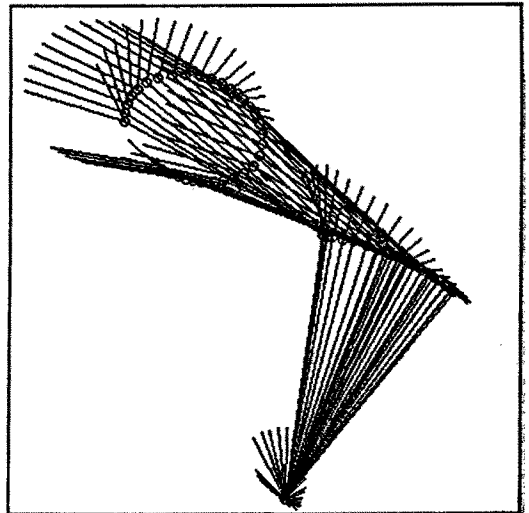
(b) 関節トルク



(c) 関節内力



(d) スティック・ピクチャ及び手先力ベクトル



(e) 内力ベクトル

図 7 逆動力学解析



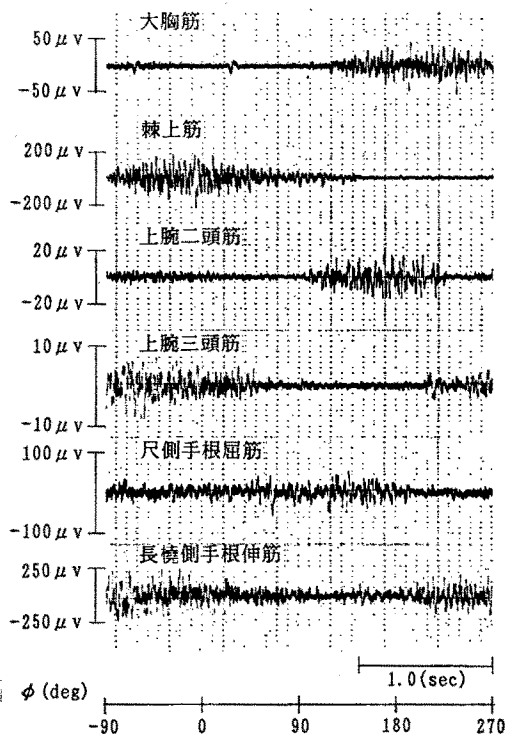


図8 クランク回転中の表面筋電図

学解析の結果を図7に示す。上から、(a)関節角度、(b)関節トルク、(c)関節内力、(d)スティック・ピクチャおよび手先力ベクトル、(e)内力ベクトルである。

関節角度変化に着目すると、肩・肘関節がクランクの回転とともに滑らかに伸展から屈曲へと変化しているのに対して、手首関節の角度はほとんど変化しておらず、伸展位から約 $20^\circ$ 屈曲させた状態を保持していることがわかる(図7(a)参照)。すなわち、被験者はクランク回転中、手首関節をほとんど動かさない。このことは、同時に測定した図8の表面筋電図から確認できる。上から、肩関節の屈筋(大胸筋)・伸筋(棘上筋)、肘関節の屈筋(上腕二頭筋)・伸筋(上腕三頭筋)、手首関節の屈筋(尺側手根屈筋)・伸筋(長橈側手根伸筋)の活動状態である。肩関節、肘関節では伸筋と屈筋が交互に活動しているのに対して、手首関節では、回転中、屈筋と伸筋が同時に活動し続けている。この同時活動は、手首関節回りのスティフネス(剛性)を大きくすることを意味している<sup>13)</sup>。すなわち、被験者は手首関節のスティフネスを大きくすることによって、積極的に関節をロックしている。このため、クラ

nkの回転トルクは肩および肘関節で生成され、手首関節は回転トルクにはほとんど寄与していない(図7(b)参照)。ただし、内力は図7(c)、(e)に示されるように手首関節が最も大きい。これは肩・肘関節のトルクを手先に伝達するうえから当然である。

ところで、クランクを効率よく回転させるには、クランク回転の接線方向のみに力を加えるべきであろう。しかし、実験では、図7(d)のように、手先の力ベクトルが必ずしもクランク接線方向を向かず、むしろ常に力ベクトルが外向きになっている。この外向き力は簡単な力学解析より、外乱に対する回転運動のロバスト性に寄与することが示される<sup>14)</sup>。

## 5.2 インピーダンス制御

次に、このようなヒトの回転作業を手先にインピーダンス制御系を構成して模擬した<sup>15)</sup>。クランクの回転中心に極座標系を設定し、

フィードバック則

$$F_c = K_d(\phi_d - \phi) + B_d(\dot{\phi}_d - \dot{\phi}) \quad (8)$$

を施す。ただし、

$\phi = [\phi, r]^T$ ,  $\phi$ : 回転角度

$r$ : 回転半径

$\phi_d = [\phi_d, r_d]^T$ : 手先の目標軌道

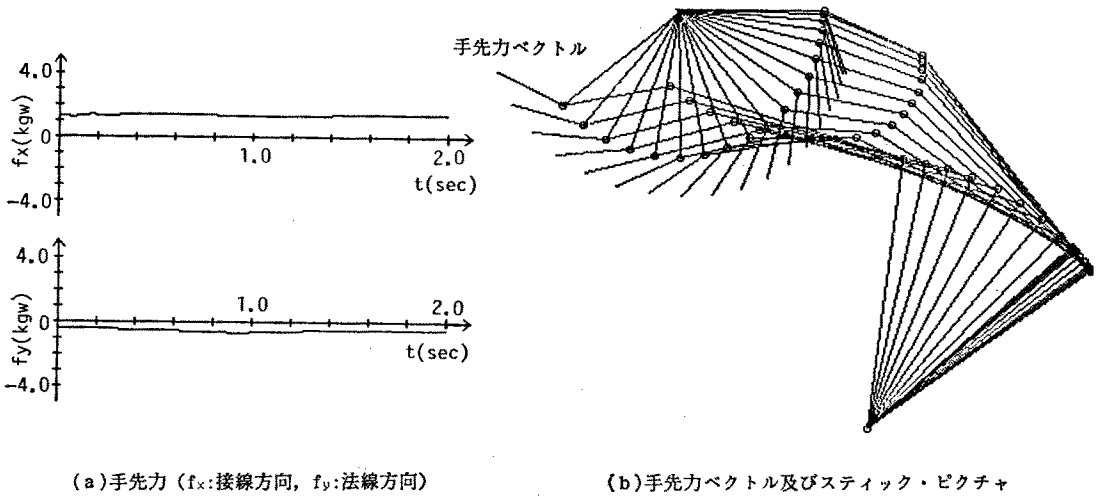
$K_d, B_d$ : フィードバック・ゲインで、極座標で表した手先の望ましいスティフネス、粘性に相当する。

式(8)を接線方向( $x$ )と法線方向( $y$ )に書き下すと、

$$F_c = \begin{bmatrix} b_x & 0 \\ 0 & b_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\phi}_d - \dot{\phi} \\ \dot{r}_d - \dot{r} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_x & 0 \\ 0 & k_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_d - \phi \\ r_d - r \end{bmatrix} \quad (9)$$

となる。ただし、手先のゲインは両方向で相互干渉がないとして対角行列とした。

接線方向に大きな位置ゲイン(スティフネス)を与え、法線方向に適切なゲイン(スティフネスおよび粘性)を与え、同時に目標回転半径 $r_d$ を実際のクランクの半径 $r$ より大きく設定する。また、手首関節のロックを模擬するために、手首関節に高ゲインの局所フィードバックを与えた。その結果を図9に示す。実験と同様に、外向き力が得られている。また、目標半径を実際の半径より小さく設定すれば、力ベクトルは内向きになり、われわれの直観と一致する。設定する法線方向スティフネス・粘性と仮想目標回転半径の大小により、力ベクトルの方向が決まる。



(a)手先力 ( $f_x$ :接線方向,  $f_y$ :法線方向)

(b)手先力ベクトル及びスティック・ピクチャ

図9 手先インピーダンス制御シミュレーション

## 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る力学系の運動解析に適用可能である。特に、上肢による対象物のマニピュレーション、歩行中の両脚支持期の解析などに有効である。なお、三次元運動の解析では、コンピュータ・グラフィックスを有効に活用した表示方法および精度のよい運動計測法を開発することが今後の課題であろう。最後に、本研究の一部は文部省科学研究費(63870060)の研究助成によるもので、ここに改めて謝意を表します。

### 参考文献

- 1) Winter, D. A.: *Biomechanics of Human Movement*, John Wiley & Sons (1979).
- 2) 山崎信寿: 2足歩行の総合解析モデルとシミュレーション, *バイオメカニズム*, 3, (1975), 261-269.
- 3) Hay, J. G.: *The Biomechanics of Sports Techniques*, Prentice-Hall (1973).
- 4) Tichaur, E. R.: *The Biomechanical Basis of Ergonomics*, John Wiley & Sons (1978).
- 5) Paul, R. P.: *Robot Manipulators*, The MIT

- Press (1981).
- 6) 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, (1980), 231-241.
- 7) Luh, J. Y. S., et al.: On-line Computational Scheme for Mechanical Manipulators, *Trans. of the ASME J. of Dynamic Systems, Measurement and Control*, 102, (1980), 69-76.
- 8) Kasahara, H. and Narita, S.: Parallel Processing of Robot-Arm Control Computation on a Multi-microprocessor System, *IEEE J. of Robotics and Automation*, RA-1-2, (1985), 104-113.
- 9) 川崎晴久: ロボットアームの動力学計算法, 計測と制御, 25-1, (1986), 23-29.
- 10) 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, (1986), 9-15.
- 11) Luh, J. Y. S. and Zheng, Y. F.: Computation of Input Generalized Forces for Robots with Closed Kinematic Chain Mechanisms, *IEEE J. of Robotics and Automation*, RA-1-2, (1985), 95-103.
- 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, (1956), 65-76.
- 13) 伊藤宏司・辻敏夫: 筋骨格系の双線形特性と義肢制御への応用, *電気学会論文誌*, C-105-10, (1985), 201-208.
- 14) 永岡・杉野・辻・伊藤: 回転作業における生体運動系のインピーダンス調節, 第28回計測自動制御学会学術講演会予稿集, (1989).
- 15) Hogan, N.: Impedance Control; An Approach to Manipulation; Part I, II, III, *Trans. of the ASME J. of Dynamic Systems, Measurement and Control*, 107-1, (1985), 1-22.

## THREE-DIMENSIONAL HUMAN MOTION ANALYSIS SYSTEM AND APPLICATION TO A CONSTRAINED TASK

Koji ITO, Naoyuki YOKOYAMA and Toshio TSUJI

*Faculty of Engineering, Hiroshima University*

Dynamic and kinematic analyses of human movements are among the most important problems in the field of biomechanics. Many of them require modeling the human body as a system of rigid links connected by several joints. Thus, the first step is to calculate the equations of motion for a spatial multi-linkage system with open and/or closed kinematic chains. However, they are very complex nonlinear equations and must be re-computed depending on the different linkage systems. Above difficulties have led to the development of computer aided dynamic analysis system for human motions.

The purpose of this paper is to present a computer-aided motion analysis system with interactive graphic interfaces; the system consists of five subsystems as follows:

- 1) A recursive model to generate the equations of motion for open or closed chain mechanism.
- 2) Data pre-processing to filter the noise com-

ponents and digital differentiate the motion data.

- 3) Human skeletal link models which are provided for naive users.
- 4) Control simulation to generate the joint torques which give different motions.
- 5) Graphic interaction for various graphs and stick pictures.

The system is applicable to the analysis of a constrained or unconstrained three-dimensional kinematic chain mechanism, such as human motion analysis and the design and control of an artificial arm or leg.

As an example, a crank rotation task constrained by an external object was analyzed using the system. It was found that human subject kept wrist joints stiff during rotation to reduce the joint redundancy and also put the hand force in the outer and tangential directions in order to increase the robustness of hand manipulation against the external disturbance.