

PDF issue: 2025-07-03

# 人体の運動動作解析と作業機能評価に関する研究

## 川野,常夫

```
(Degree)
博士 (学術)
(Date of Degree)
1982-03-31
(Date of Publication)
2008-06-04
(Resource Type)
doctoral thesis
(Report Number)
甲0369
(URL)
https://hdl.handle.net/20.500.14094/D1000369
```

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



# 人体の運動動作解析と 作業機能評価に関する研究

昭和 57年 3 月

川野常夫

# 目 次

第	1	草		緒		論	•••••	• • • • •	•••••	• • • • • • •	•••••	•••••	•••••	•••••	•••••	•••••		1
第	2	章		二次元	;運動፤	動作の	解析		· · · · · ·		••••	••••		•••••	•••••	••••		6
	2.	1	緒	į	言·	• • • • • • • •		• • • • •	• • • • •				•••••	•••••	••••			6
	2.	2	矢	状面内	二次是	元人体	数学	モラ	ジル		•••••	•••••						7
		2.	2. 1	人体	の数	学モデ	`ル			••••	••••				•••••			7
		2.	2. 2	運動	方程:	式	•••••	••••		••••	•••••	••••						9
	2.	3	実	験方法	およ	び実験	デー	タロ	)処理	2方法	•••					••••	1	5
		2.	3. 1	実員	<b>负方</b> 图	去									•••••		1	5
		2.	3. 2	運動	動作	の計測	およ	びぅ	データ	処理							1	8
		2.	3. 3	速度	と加え	速度の	算出	• •						• • • • • •		· • • • • • •	2	1
		2.	3. 4	重心	心位置。	の算出		••••					•••••	•••••		•••••	2	4
	2.	4	起	2立.着	席動	作実験	の結	果と	と考察	₹			•••••	•••••		•••••	2	5
		2.	4. 1	被駁	者の	属性					•••••			•••••			2	5
		2.	4. 2	動作	ミパタ	ーン		••••					•••••			•••••	2	6
		2.	4. 3	身体	<b>各部</b>	に作用	する	力‡	さよて	ドトル	2			•••••		•••••	3	3
		2.	4. 4	前割	面内	の動き	を考	慮し	<b>った</b> 褌	証	•••			•••••		•••••	3	7
	2.	5	荷	<b>万役作業</b>	美動作:	実験の	結果	とま	考察	•••••	••••		••••	••••		•••••	4	1
		2.	5. 1	動作	Fパタ	- ン		••••	· · · · · ·				••••			•••••	4	1
		2.	5. 2	身体	<b> </b> 各部	に作用	する	力‡	さよて	ドトル	ク		••••	••••		•••••	4	4
	2.	. 6	紀	Ė	言	••••			· · · · · ·	• • • • • •				••••		••••	4	6
角	¥ 3	章		三次元	<b>企運動</b>	動作劑	解析の	方法	去論	••••	••••			•••••	•••••	•••••	4	8
	3	. 1	粡	i i	言	••••	• • • • • •	••••	•••••		· · · · •	· · · · · ·	• • • • • •	•••••	•••••	•••••	4	8
	3	. 2	Ξ	三次元ノ	人体数	学モラ	ゴル	••••	•••••	• • • • • • • • • • • • • • • • • • • •	• • • • • •	• • • • • •	• • • • • •	•••••	•••••	•••••	4	8
		3	. 2. 1	l <del>E</del> 7	デルト	<b>巫檀</b> 系	₹の定	姜	••••	•••••							4	8

3. 2. 2	運動方程式	5 1
3.3 シネ	カメラと鏡を用いた三次元動作解析法	5 4
3. 3. 1	運動動作の三次元計測	54
3. 3. 2	コンピュータ・グラフィックスによる三次元像の再生	5 6
3. 3. 3	重心位置の算出	5 6
3. 3. 4	運動方程式の解法	5 7
3.4 ホロ	ワグラフィック・ステレオグラムによる三次元動作解析法…	5 9
3. 4. 1	ホログラフィック・ステレオグラムの原理	5 9
3. 4. 2	三次元動作解析	62
3.5 結	音	6 2
第4章 三	E次元運動動作の解析	6 <b>4</b>
4.1 緒	音	6 <b>4</b>
4.2 荷径	と作業動作実験	6 4
4. 2. 1	実験装置および実験方法	64
4. 2. 2	実験データの処理	6 6
4. 2. 3	被験者の属性	6 8
4. 2. 4	動作パターン	6 9
4. 2. 5	身体各部に作用する力およびトルク	7 9
4.3 垂直	匪跳び動作実験 ⋯⋯⋯⋯⋯⋯⋯⋯⋯⋯⋯⋯⋯⋯	8 3
4. 3. 1	実験装置および実験方法	8 3
4. 3. 2	実験データの処理	8 3
4. 3. 3	動作パターン	8 3
4. 3. 4	身体各部に作用する力およびトルク	94
4.4 ホロ	コグラフィック・ステレオグラムを作製するための	
荷径	设作業動作実験	9 5
4. 4. 1	実験装置および実験方法	9 5
4. 4. 2	実験結果と考察	96

		4.	4.	3	三次	元位置	情報抽出における測定誤差	9 9
	4.	5	÷	結		言		1 0 1
第	5 :	章		U	ねり	を伴う	身体運動動作の解析	103
	5.	1	÷	緒		言		103
	5.	2		ひな	りを	考慮し	た三次元数学モデル	103
		5.	2.	1	モデ	ルの定	義	103
		5.	2.	2	運動	方程式		106
	5.	3		解札	折 方	法		109
		5.	3.	1	運動	方程式	の解法	109
		5.	3.	2	ひね	り成分	の抽出方法	109
		5.	3.	3	ΙT	Vカメ	ラによる座標情報の抽出	1 1 0
	5.	4	,	胴の	ひね	りを伴	う荷役作業動作の実験	114
		5.	4.	1	実験	装置お	よび実験方法	114
		5.	4.	2	実験	データ	の処理	1 1 5
		5.	4.	3	動作	パター	<i>γ</i>	1 1 6
		5.	4.	4	身体	各部に	作用する力およびトルク	1 2 0
	5.	5		前胞	宛のひ	ねり動	作の実験	121
		5.	5.	1	実験	装置ね	よび実験方法	1 2 1
		5.	5.	2	画像	処理		1 2 2
		5.	5.	3	動作	パター	ンとトルクの解析結果	126
	5.	6		結		言		1 2 8
							•	
第	6	章		Š	ンミュ	レーシ	ョンによる作業機能評価	1 3 0
	6.	1		緒		言		1 3 0
	6.	2		シ:	ミュレ	/ーショ	ンの方法	1 3 0
		6.	2.	1	身体	各点の	)座標の創成	1 3 0
		6.	2.	2	関数	近似に	こよる身体関節角の創成	1 3 3

6. 3	シミ	ュレーションの結果および作業機能の評価	1 3 5
6. 4	結	言	1 4 4
第7章	絽	<b>論</b>	1 4 5
45 <del>4</del> 7 44	<del></del> h		
参考文	、献		1 4 7
付	録		
付録	1	加速度 ao; の導出 ···································	1 5 9
付録	2	椅子反力測定用荷重計のキャリブレーション	160
付録	3	実験装置の仕様	1 6 1
付録	4	ローパスフィルタの設計における遮断周波数の	
		決定方法とフィルタの係数	1 6 2
付録	5	運動動作解析のフローチャート	164
付録	6	起立・着席動作パターン	165
付録	7	起立・着席動作に伴う重心移動軌跡	166
付録	8	起立・着席動作における身体各部のトルク	1 6 7
付録	9	三次元荷役作業動作パターン	169
付録	1 0	荷役作業動作に伴う重心移動軌跡	170
付録	1 1	荷役作業動作における身体各部のトルク	171
付録	1 2	垂直跳び動作パターン	172
付録	1 3	垂直跳び動作におけるひざと腰角度の相関図	173
付録	14	垂直跳び動作における身体各部のトルク	174
付録	1 5	グラフィック・タブレットによる身体各点の座標入力用	
		プログラム	175
付録	1 6	コンピュータ・グラフィックスを用いた三次元	
		運動動作パターン表示プログラム	181
付録	1 7	身体各部の重心速度および加速度の三成分算出	
		プログラム	183
付録	1 8	オイラー角算出プログラム	189
付録	1 9	身体各部に作用する力およびトルクの算出プログラム	193
謝	辞		199

記号

A 2点間を補間するスプライン曲線の端点

 $a_1, a_2$  カメラと物体点の間の距離

au ディジタル・フィルタの係数

 $a_{G_i}$  剛体要素 i の重心  $G_i$  の加速度

 $ao_i$  剛体要素 i の端点  $O_i$  の加速度

B 被験者両足左右の幅

B 2点間を補間するスプライン曲線の端点

**b**<sub>v</sub> ディジタル・フィルタの係数

cλ cosλ 岡体川柱

di 円柱剛体 i の端面の直径

E 物体点の座標推定値の差の二乗

E<sub>1</sub> ホログラム再生像における固定点の測定誤差

E<sub>2</sub> ホログラム再生像における動点の視差による変位誤差

 $f_0$  時刻 t=0 における関節角の値

 $f_1$  時刻 t = T における関節角の値

f(t) 時刻 t の関節角を与える関数

Fhand 手がテーブルに作用する力

Fhip 腰部に作用する椅子の反力

 $F_{i-1,i}$  剛体要素 i-1 から剛体要素 i に作用する力

F<sub>L</sub> 股関節において左大腿要素から上肢に作用する力

F<sub>mL</sub> 左足に作用する床反力

F<sub>mR</sub> 右足に作用する床反力

F<sub>R</sub> 股関節において右大腿要素から上肢に作用する力

Ftu 股関節において腰要素から下肢に作用する力

f,f1,f2 カメラの位置ベクトル

G<sub>i</sub> 剛体要素 i の重心

- g 重力の加速度
- H カメラの高さ
- **h** フットプレートの高さ
- hmax 最大跳躍量
- h(t) 時刻 t における跳躍高さ
- I 画像の濃淡レベル数
- $I_{G}$ . 矢状面内における剛体重心まわりの慣性モーメント
- $I_{xx}$  運動座標系x軸まわりの慣性モーメント
- $I_{yy}$  運動座標系 y 軸まわりの慣性モーメント
- $I_{zz}$  運動座標系 z 軸まわりの慣性モーメント
- i 静止座標系 X 軸の基本ベクトル
- J 薄板の長さ
- i 静止座標系Y軸の基本ベクトル
- K 薄板の剛性定数
- k\* 画像の二値化のための最適閾値
- k 静止座標系 Z 軸の基本ベクトル
- L ディジタル・フィルタの次数
- $\ell_i$   $\ell_i$  剛体要素 i の部分長さ
- $\ell_i'',\ell_i'''$  胴上部または腰部要素の重心から肩関節または股関節までの長さ
- $\ell_{i-1,i}$  矢状面内における要素端点i-1とiの距離
- M ディジタル・フィルタの次数
- $M_x$  運動座標系におけるx軸まわりの外部モーメント
- $M_{\nu}$  運動座標系における y 軸まわりの外部モーメント
- $M_z$  運動座標系における z 軸まわりの外部モーメント
- $M_i$  静止座標系における剛体要素iの外部モーメント
- N 一画面の全画素数
- $n_j$  濃淡レベルjの画素の数
- $O_i$  剛体要素iの端点

#### O-XYZ 静止座標系

o-xyz 運動座標系

 $b \qquad \frac{1}{2} \leq b \leq 1 \text{ Kand } \beta \neq -\beta$ 

 $p_i$  濃淡レベルjの確立分布

P 任意の単位ベクトル

P<sub>i</sub> スプライン補間するためのサンプル点の位置ベクトル

P(u) u に関する三次のスプライン関数

 $P_i(u)$  第 j 区間を補間する三次のスプライン関数

 $P_i(u)$  uに関する $P_i(u)$ の一階微分

 $P_i(u)$  uに関する $P_i(u)$ の二階微分

r' 剛体要素を矢状面へ投影した長さ

r" 剛体要素を前額面へ投影した長さ

 $r_i$  剛体要素iの長さ

 $R_i$  三次関数 P(u) における第 i 次の係数

 $(R_{\lambda,P})$  ベクトルPを軸とし反時計回りに $\lambda$ の回転を与える変換行列

 $\hat{\mathbf{r}}_{i}$  剛体要素 i の方向ベクトル

 $\hat{\mathbf{r}}_{i}$ " $\hat{\mathbf{r}}_{i}$ " 胴上部または腰部要素 i の重心から肩関節または股関節へ向かう方向ベクトル

S 薄板の弧長

s シミュレーションで用いる操作変数( $0 \le s \le 1$ )

sλ sinλ

T 角度変化の持続時間

 $T_{X_{-}}T_{Y_{-}}T_{Z_{-}}$ 静止座標系X, Y, Z軸まわりのトルク

 $T_{i-1,i}$  剛体要素 i-1 から剛体要素 i に作用するトルク

T<sub>L</sub> 股関節において左大腿要素から上肢に作用するトルク

T<sub>mL</sub> 左足に作用する床からの反トルク

TmR 右足に作用する床からの反トルク

T<sub>R</sub> 股関節において右大腿要素から上肢に作用するトルク

 $T_{tu}$  股関節において腰要素から下肢に作用するトルク

 $\mathbf{t}_A, \mathbf{t}_B$  点 $\mathbf{A}$ , $\mathbf{B}$ を通る接線の方向ベクトル

 $\mathbf{t}_{j}$  点 $\mathbf{P}_{j}$ を通る接線の方向ベクトル

U 薄板の歪エネルギー

u  $0 \le u \le 1$  なる無次元パラメータ

u,u1,u2 カメラから物体点に向かう方向単位ベクトル

V 運動動作の平均速度

 $v \lambda \qquad 1 - \cos \lambda$ 

 $v_{G_0}$  垂直跳びにおける離床時の身体重心速度

v.V1.V2 物体点の三次元座標

 $W_i$  剛体要素 i の重量

 $X(n \triangle T)$  ディジタル・フィルタリングにおける時系列入力データ

 $(X_{G_i}, Y_{G_i}, Z_{G_i})$  身体の重心の座標

 $\ddot{X}$ , $\ddot{Y}$ , $\ddot{Z}$  剛体重心の加速度成分

 $(x_{G_i}, y_{G_i}, z_{G_i})$  剛体要素の重心の座標

x,y,z 運動座標系の各基本ベクトル

 $Y(n \triangle T)$  ディジタル・フィルタリングにおける時系列出力データ

 $Y_R$  右ひざY座標の真値

 $Y_R$ ' 右ひざY座標測定値

 $\alpha_i$  矢状面内における剛体要素 i の回転角加速度

 $\hat{\alpha}_i$  剛体要素の一端点まわりの回転によって生じる他端点の加速度

 $\triangle T$  ディジタル・フィルタリングにおけるサンプリング時間間隔

△Y 中心投影によって生じるY座標測定値の誤差

ε 物体点の座標推定値の差

 $\theta$  運動座標系を決定するためのオイラー角

 $\theta$  ,  $\theta$  オイラー角  $\theta$  の時間に関する一階, 二階微分

 $[\theta]$  角  $\theta$  の回転を与える変換行列

- θ 軸測投影法における視点の上下変位角
- $\theta_i$  二次元人体モデルにおける剛体要素iとX軸のなす角度
- $\theta_R$  カメラの位置から被験者を見るときの俯角
- θ<sub>r</sub> 前腕断面における回転角
- $\theta_t$  ひねり角度
- λ ベクトルPを軸とする反時計回りの回転角
- μτ 一画面全体の平均濃淡レベル
- μ(k) 濃淡レベル k 以下の画素の平均濃淡レベル
- 〔π〕 オイラー角の角速度から要素の回転角速度を与える変換行列
- 〔π1〕 オイラー角の角速度から要素の回転角加速度を与える変換行列
- ρ 曲率半径
- $\sigma^2(k)$  濃淡レベルkで分割する2群の群間分散
- $\sigma^2(k^*)$  群間分散の最大値
- ∅ 運動座標系を決定するためのオイラー角
- ∅, ∅ オイラー角 ∅の時間に関する一階, 二階微分
- 〔0〕 角0の回転を与える変換行列
- ♥ 運動座標系を決定するためのオイラー角
- 〔♥〕 角♥の回転を与える変換行列
- $\phi_i$  前額面内における剛体要素iが水平方向となす角度
- $\omega_x$ , $\omega_y$ , $\omega_z$  剛体要素の回転角速度
- $\omega_x$ ,  $\omega_y$ ,  $\omega_z$  剛体要素の回転角加速度
- ω; 矢状面内における剛体要素;の回転角速度
- ω(k) 濃淡レベル k 以下の画素の確立分布

### 第1章 緒 論

近年,生産加工の分野において自動化および省力化の進展はめざましく,NC工作機械や産業用ロボットなどの高度省力化機械並びに無人化機械工場などの開発が促進されている。ここに至って、人間は、機械の作動時期と種別を選択し適切な意思決定を行うだけの存在となり、作業形態は従来に比べて大きな変貌を遂げてきている。他方、わが国における中高年者層の急激な増大は、産業構造全体に根本的な影響を与えるものとして認識され、具体的な対策が各方面で要求されている。厚生省人口問題研究所の推計によれば、現在8%の老齢人口比率(65歳以上の人口比率)は2000年には約14%,2025年には約18%に増加するものとみられている。さらに産業者別就業者構成において第1次から第2、第2から第3への人口流入の主役が若年労働者であることに鑑みれば、第2次産業人口に占める中高年者の割合は一段と増加するものと予想される。

こうした背景をみるとき、生産の場における人間と機械の対応関係は明らかに変化するものであり、このことが社会活動の点からも大きな問題を惹起しつつあることが認識される。このような現状において作業者の年齢特性を加味した上で、作業能率が高く、しかも作業者が安全に無理なく労働に従事できるようなマン・マシンシステムのあり方について検討することは極めて重要である。こうした問題について、これまで人間のもつ生理的および心理的な機能やその限界について研究が行われ、椅子やテーブルの設計、各種計測機の設計および配列などに応用されてきている。1),2) しかしながら、最も重要な人間の動作の因子に関する点、すなわちマン・マシンシステムの中で人間が外部からの種々の刺激に対してどのように反応するか、あるいは反応の仕方にどのような原理および法則があるかといった問題に関してはまだ明らかにはされていない。マン・マシンシステムの中で、外的刺激に対する人間の行動、とりわけ加齢や疲労が身体におよぼす影響などを明らかにすることは、人間の特性を重視した作業設計に大いに役立つものと期待される。ここで最適なマン・マシンシステム

とは、人体に限界以上の負荷を与えるものであってはならず、また、自動化によって極めて単調な動作を強いるものであってもならない。いいかえれば、労働や作業を通じて、その人の全機能が適切に行使され自らの回復能力を生かしなからいつまでも若々しく、快適な状態と環境を作り出すようなシステムでなければならない。3) このような問題に効果的に対処するには、外的刺激が人体に与える負荷あるいは反応を定量化し、客観的に評価することが肝要である。

本研究はこうした観点に立脚し、最適なマン・マシンシステムを検討する上で重要な人間の運動動作を運動学並びに動力学の立場から解析評価することを目的としている。

さて、運動学はそれをどのように解釈するかによって以下に示すように5つに分類される。 $^{4}$ 

#### (1) 構造的·機能的運動学

これは人間の身体を形態学的・機能学的観点から分析することを試みようと するもので、機能解剖学の要素の強いものである。従来の運動学といわれるも のはこの傾向が強い。

#### (2) 機械的運動学

物理学、工学をもとにした、人体における機械構造あるいは力学の一般法則 について研究するバイオメカニクスがこれにあたる。またサイバネティクスや 人間工学的な方法も含まれる。

#### (3) 生理学的運動学

神経、筋をはじめ、呼吸、循環、代謝など、人間の運動に関する生理学的、 生化学的な面からの研究がこれに含まれる。

#### (4) 発達運動学

成長,生理学的発達,老化あるいは栄養などの関係をみるもので,とくに運動学習については,その小児期の発達段階を知ることが,正常と異常の差をみ きわめる上で重要である。

#### (5) 象徵的運動学

運動とその意味あるいは目的との関係を学ぶもので、美的感覚、文化、人格

あるいは動機といった象徴的な面での研究がこれに含まれる。

本研究における運動学は上述の(1)および(2)におけるものをさしている。(2)の場合の力学において人体を動かす主な力は、身体自身による内的な力と、他から身体に加えられる外的な力および重力である。内的な力は、神経から伝達された刺激によって起こる筋の収縮で得られる力が主たるものである。力は骨格、関節など運動器官の機械構造に伝達され、その身体諸部分の質量である抵抗に打ち勝つだけの力が生産された時、運動が起こる。運動の型式、方向、強さを決定するのは、筋、骨格、関節の構造、位置および作用による。ここには一般的な物理学の法則が成り立ち、力学の原理が応用される。ここで、力がつり合って平衡状態にあるものを扱う場合は静力学、力が平衡ではない運動について論ずる場合は動力学として扱われる。

運動学および動力学的観点に立脚した人体運動動作の研究は,近年になってバイオメカニクス,人間工学および機械工学などの分野で盛んに行われるようになってきたが,その歴史はまだ浅い。ここでこれらの研究が目的としているのは,作業動作の改善 $^{5)\sim10}$ ),義手・義足の開発 $^{11),12}$ ,リハビリテーションの効率向上 $^{13),14}$ ,スポーツの技能向上 $^{15)\sim18}$ ,およびロボットの開発22)などである。解析方法は以下に示すような分類に従い,多種多様の方法が用いられる。すなわち

- (1) 人体の運動記録方法による分類
- (2) 解析対象による分類(静的,動的による分類を含む)
- (3) モデル化による分類
- (4) 評価方法(定性的,定量的)による分類

である。(1)の運動を記録し身体各部の位置情報を入力する方法としては主として次の二種類の方法がある。

- a) 運動を画像情報として記録した後,身体各部の座標位置を読み取る光学 式計測方法
- b) 身体に直接測定器具を取り付けて情報を取り込む機械式計測方法
- a)としてはシネカメラを用いて運動を撮影し,モーションアナライザを用い

てフィルム上の座標位置をペンで指示することによって入力するもの  $^{23)}$  , ITV カメラによって運動を撮影し,画像処理を行って座標位置を抽出するもの  $^{24)}$  などがある。 b) としてはゴニオメータ(角度変位計 ) やポテンショメータ等を用いて身体各部の角変位を電気量に変換して測定するもの  $^{25)} \sim ^{27)}$  などがある。

(2)の解析対象としては,歩行時における下半身を対象としたもの $^{28)$   $\sim$   $^{34)}$ ,手や腕の諸機能を対象としたもの $^{26)$   $,^{27)}$   $,^{35)}$   $\sim$   $^{43)}$ ,あるいは作業やスポーツにおける全身の運動を対象としたもの $^{6)}$   $\sim$   $^{8)}$   $,^{15)}$   $\sim$   $^{17)}$   $,^{44}$   $\sim$   $^{46)}$  などがある。

(3)のモデル化に関しては、解析対象に応じて身体の部分モデルおよび全身モデルがあり、さらに運動の自由度に応じて二次元モデル $^{47)\sim52)}$ および三次元モデルがある。 $^{53)\sim58)}$ 

(4)の評価方法としては人体の動作パターンを解析評価したもの $^{6)$ ~ $^{8)}$ , $^{36)}$ ~ $^{38)}$ , $^{36)}$ ~ $^{38)}$ , $^{36)}$ ~ $^{38)}$ , $^{36)}$ ~ $^{38)}$ , $^{36)}$  $^{38)}$ , $^{37)}$  などがある。

本研究は一般的な人体の動作を解析しうる解析システムの確立をめざすもので,以下の各章で種々の解析方法とその方法の検討結果について述べる。その主な内容は以下のとおりである。

第2章では、人体の運動動作を記述しうる二次元数学モデルを構築し、その運動方程式を導出する。次いで実際の起立・着席動作および荷役作業動作を16ミリシネカメラを用いて記録した後、その情報をミニコンピュータ内に取り込み、コンピュータグラフィックスを利用して運動に伴う人間の動作パターンを解析評価するとともに、身体各部の速度、加速度並びに各部に作用する力およびトルクを計算し、動作パターンとの相関、加齢による影響などについて定量的な検討を行う。

第3章では、自由度の多い運動動作の解析を目的として、人体の三次元数学 モデルを構築し、運動方程式を導出する。次いで三次元動作の解析方法として、 コンピュータグラフィックスを用いた場合およびホログラフィックステレオグ ラムを用いた場合についての方法論を展開する。 第4章では、第3章で展開した方法論に基づいて実際の荷役作業動作および 垂直跳び動作の解析を行う際の実験方法を述べ、実験結果を基に加齢や疲労が 人体におよぼす影響について検討する。また、ホログラフィックステレオグラ ムによる三次元再生像から運動情報を抽出する際の誤差についても検討する。

第5章では、通常の三次元的な動作にさらに身体各部のひねりを考慮した運動動作解析の方法論を展開し実験・解析した結果について述べる。実験は被験者の左右側方にある二台のテーブルの間で荷物を移動させる動作について行い、特に胴のひねりに注目して解析を行っている。また別の実験では、前腕の回旋運動を取り上げ、その微妙なひねりについて解析を行っている。ここでは特に、座標計測用にITVカメラとミニコンピュータから成る画像処理システムを開発し、座標抽出の自動化を試みる。

第6章では荷役作業動作のシミュレーションを行い,種々の動作パターンに対して腰および肩に作用するトルクを求め,作業動作の評価を試みる。

## 第 2 章 二次元運動動作の解析

#### 2.1 緒 言

本章においては運動動作を運動学および動力学的に解析評価することを目的として, まず人体の運動動作を記述しうる数学モデルを構築し, その運動方程式を導出する。次いで実際の起立・着席動作および荷役作業動作を16ミリシネカメラを用いて記録した後, その情報をミニコンピュータ内に取り込み, コンピュータ・グラフィックスを利用して, 運動に伴う人間の動作パターンを解析評価するとともに, 身体各部の速度, 加速度ならびに各部に作用する力およびトルクを計算し, 動作パターンとの相関, 人体に及ぼす加齢の影響などについて定量的な検討を行う。

#### 2.2 矢状面内二次元人体数学モデル

#### 2.2.1 人体の数学モデル

一般に人体の運動動作解析においては、上肢動作、下肢による屈伸運動および移動動作、眼球運動 <sup>83)</sup>、頭部運動など随意的な運動を対象としているものが多い。<sup>9)</sup> これらの運動は骨格をおおう筋肉群が互いに拮抗し、あるいは協調して収縮、伸長を繰返すことにより実現されるものである。しかしながら、各筋肉がどのように協調して動作が行われるのか、あるいは各筋肉にどれだけの負荷がかかるのかといった問題については、まだ明らかにされていない点が多い。約200の骨格と約800の筋で構成される人体の運動動作の自由度は極めて多大である。また人体の運動動作を解析する場合、身体各部に作用する力やトルクは極めて重要な要因であるにも拘らず、現状ではこれらを直接正確に測定することはほとんど不可能である。したがって、力やトルクを推定するためには、身体各部を適当なモデルで置きかえ、それらの力学的関係を記述する運動方程式を構築し、運動情報をもとにそれを数学的に解く必要がある。

人体モデルは解析対象によって以下のように大別される。すなわち、

- (1) 静力学モデルと動力学モデル
- (2) 骨格モデルと筋骨格モデル
- (3) 二次元モデルと三次元モデル
- (4) 局部モデルと全身モデル

である。ここで(1)は慣性力を考慮するか否かによって分類したものであり,(2)は筋の実体を考慮せず発生する筋力を関節におよぼす作用力およびトルクとして評価するものを骨格モデル $^{59}$ ) $^{-63}$ )とし,筋の作用や特性を考慮したものを筋骨格モデル $^{64}$  $^{-71}$ )として分類したものである。(3)は対象とする運動がある特定の平面内の運動に代替できるものであるか,他の面内の運動を同時に含んでいるものであるかによって分類したものである。(4)は掌,手指,足など局部的な動作を対象とするか,全身の運動を対象とするかによって分類したものである。本章で扱うモデルはこの分類に従えば動力学的な骨格モデルであり,か

つ二次元全身モデルである。

従来提案されている二次元モデルの代表的なものは部分モデルとしてSmidtによる膝関節モデル,岡田  $^{39)}$  による手書き作業における手のモデルなどがある。さらに歩行における下半身のモデルとして,Winter  $^{50)}$  は歩行時における足の中足指節関節の機能に注目し解析を行っている。また,Chao  $^{29)}$  は最適化の手法により下肢の運動の予測を行い,Pedotti  $^{30)}$  は 5 節の要素から成るモデルを用いて歩行中に下半身に作用するトルクを求め,測定された EMG の値との相互関係について述べている。

一方,身体全体のモデルとして,例えば  $Dainis^{15}$  は鉄棒運動時のトルク解析に 3 節の要素からなるモデルを用いている。同様に鉄棒運動における動作完了時間に関する最短時間問題を解くために, $Ghosh^{16}$  は腕・胴・脚をそれぞれ剛体としたリンクモデルを適用している。また  $Boysen^{17}$  は水泳の跳び込み時における空中での動作解析に 5 節リンクモデルを用い, $Kelley^{23}$  は着席姿勢から起立するまでの動作の解析に 5 節モデルを適用し,求めたトルクと EMG 信号の対応関係について検討を行っている。他に北岡 6  $^{(0)}$   $^{(0)}$  は荷役作業における身体移動を矢状面内二次元モデルに基づいて解析を行い,剛体要素間の相互角の関係について検討している。以上のモデルは身体全体の動作を扱

うモデルであるが,これらはいずれも 分割要素数が少なく,自由度の少ない 極めて単純化されたものが多い。

本章ではまず人体を図 2.1 に示すような 1 5 の要素に分割し、各要素を等価な円柱で近似して、それらが互いに隣接する要素に球継手で連結されているモデルを提案する。すなわち、図 2.1 に示すようにまず人体の下肢を左右の足部、下腿部、および大腿部に、上肢

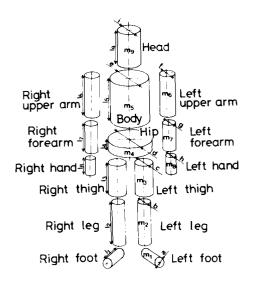


図 2.1 人体のモデリング

を左右の手,前腕および上腕に分割する。さらに胴体を腰部と胴部に分割し, 首より上は1つの要素とする。

#### 2. 2. 2 運動方程式

運動動作中に身体各部に作用する力およびトルクを測定する方法としては、一般に筋肉の E M G 信号を検出し、作用する力やトルクを推定することが行われている。<sup>33)</sup> また最近では直接関節部に圧力センサを挿入して関節部に作用する力を推定することも試みられている。しかし、これらの手法についての評価はまだ確立しておらず、また実際の動作に適用するにあたって実用上は多くの困難を伴う。

本研究では身体各要素の力学的関係を記述する運動方程式を解くことによって各関節に作用する力およびトルクを推定することを試みる。一般に運動方程式を解いて解析を行う場合,力を既知として変位,速度あるいは加速度を求める問題<sup>29)</sup>が扱われるが,ここではこれとは逆に変位を既知として数値微分により加速度を求め,未知数としての力およびトルクを算出する逆問題を扱う。

さて,人体の運動を記述する場合,一般に図 2.2 に示すような体に関する 3 つの面を用いる。4 すなわち,

- (1) 矢状面:身体を前から後に,左右に2分する垂直面
- (2) 前額面:一側から反 対側の方向に体を前と 後に2分する垂直面
- (3) 水平面:体を上の部分と下の部分に2分する水平面

である。

ここではまず解析を行う

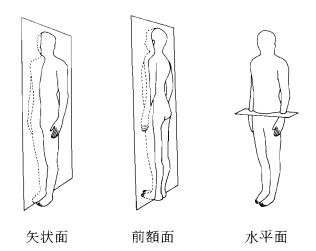


図2.2 三次元法における体の面

起立・着席動作を左右対称とし,矢状面内における二次元数学モデルを構築する。すなわち図2.1において仮定した身体各部要素を図2.3に示す①から9の剛体要素で置きかえ,それらがリンクで結合されているいわゆる剛体リンクモデルを設定し,任意の剛体要素iについて以下のように記号を定義する。まず剛体要素iの長さを $r_i$ ,重心 $G_i$ によって分割される要素の部分長さを $\ell_i$  および $\ell_i$ 'とする。これより,

 $r_i = \ell_i + \ell_i$  (2.1) 剛体要素i の重量を $W_i$  , 重心まわりの慣性モーメントを $I_{Gi}$  , 剛体要素i から剛体要素i+1 に作用する力およびトルクをそれぞれ $F_{i,i+1}$  、 また剛体要素i がそれなり小さい番号の剛体要素と要に対する $O_i$  とし、静止度をれぞれるi 、 および  $G_i$  の加速度をれぞれるi 、 るi 、 さらに静止を想象の回転角変位、角速度、角加速度をそれぞれの方向を示す単位ベクトルを要素i の方向を示す単位ベクトルを要素i の方向を示す単位ベクトルを表i 、 とする。

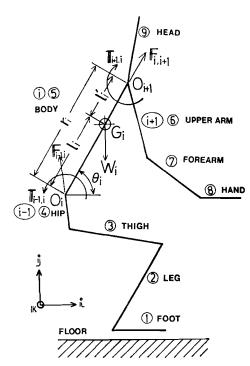


図2.3 矢状面内二次元人体モデル

これらより,動作中におけるニュートンの運動方程式は以下のように定式化 される。

$$\mathsf{F}_{i-1,i} - \mathsf{F}_{i,i+1} - W_i \cdot \mathsf{j} = W_i / g \cdot \mathsf{a}_{Gi} \tag{2.2}$$

$$\mathsf{T}_{i-1,i} - \ell_i \cdot \hat{\mathsf{r}}_i \times \mathsf{F}_{i-1,i} - \mathsf{T}_{i,i+1} - \ell_i' \cdot \hat{\mathsf{r}}_i \times \mathsf{F}_{i,i+1} = I_{Gi} \cdot \alpha_i \cdot \mathsf{k} \ (2.3)$$

$$\mathbf{a}_{Gi} = \mathbf{a}_{Oi} + (-\omega_i^2 \cdot \ell_i \cdot \hat{\mathbf{r}}_i + \alpha_i \cdot \ell_i \cdot \mathbf{k} \times \hat{\mathbf{r}}_i)$$
 (2.4)

$$\mathbf{a}_{0i} = \sum_{j=1}^{i-1} \left( -\omega_j^2 \cdot \mathbf{r}_j \cdot \hat{\mathbf{r}}_j + \alpha_j \cdot \mathbf{r}_j \cdot \mathbf{k} \times \hat{\mathbf{r}}_j \right)$$
 (2.5)

ここで、q は重力の加速度である。式(2.2)~(2.5)を解くことにより,各関 節に作用する力FおよびトルクTを求めることができる。式(2.4).(2.5) の導出を付録1に示す。

以上の運動方程式を剛体リンクモデル全体について記述することによって、 身体各部に作用する力およびトルクを求めることができる。ここで、図2.3に 示す9個の剛体要素全部について運動方程式の導出を行う。ただし,ここでは 以下に示す仮定を設ける。

- (j) 床からの反力 F。」はつま先に作用する。足と床面の接触に関しては, 当然足全体、あるいはつま先とかかとの二点で床に接触するモデルを考え るべきであるが、足から床に力が作用する点、あるいは二点で作用する力 の配分を理論的に求めることは不可能で, いわゆる不静定問題となって解 くことができない。そこで、ここでは便宜上つま先のみが床に接しており かかとは床に接していないものとする。
- (jj) 剛体要素 9 (頭)と剛体要素 6 (上腕)との間には相互干渉がない。従って剛体 要素 9 は剛体要素 5 (胴)のみに力およびトルクを伝達する。 また剛体要素 6

以上の仮定より図2.4に示す力および トルクについて以下の関係が得られる。 剛体要素8に関しては,

$$F_{7,8} - W_{8} j = \frac{W_{8}}{g} a_{G8}$$

 $T_{7.8} - \ell_8 \hat{r}_8 \times F_{7.8} = I_{G8} \alpha_8 k (2.6)$ 剛体要素7に関しては,

$$F_{6,7} - F_{7,8} - W_{7} j = \frac{W_{7}}{g} a_{G7}$$

$$T_{6,7} - \ell_{7} \hat{r}_{7} \times F_{6,7} - T_{7,8} - \ell_{7}' \hat{r}_{7} \times F_{7,8}$$

$$= I_{G7} \alpha_{7} k \qquad (2.7)$$

剛体要素6,9に関しては,

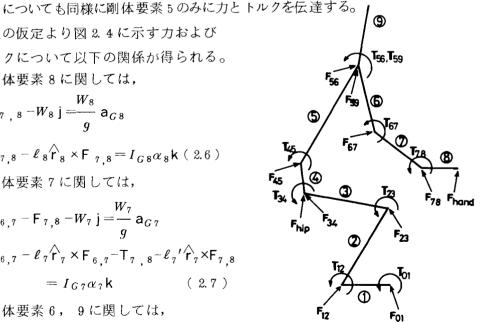


図 2.4 各関節に作用する力およびトルク

$$F_{5,6} - F_{6,7} - W_{6} j = \frac{W_{6}}{g} a_{G6}$$

$$T_{5,6} - \ell_{6} \hat{r}_{6} \times F_{5,6} - T_{6,7} - \ell_{6}' \hat{r}_{6} \times F_{6,7} = I_{G6} \alpha_{6} k \cdots (2.8)$$

$$F_{5,9} - W_{9} j = \frac{W_{9}}{g} a_{G9}$$

となる。また剛体要素 5 には力 $\mathbf{F}_{5,9}$  ,  $\mathbf{F}_{5,6}$  トルク $\mathbf{T}_{5,9}$  ,  $\mathbf{T}_{5,6}$  が作用するから以下のようになる。

剛体要素 4,3,2,1 に関しては

となる。なお式(2.8) $\sim$ (2.11)における右辺の加速度は式(2.5)より,以下のように順次求めることができる。すなわち,

剛体要素1に関しては

剛体要素2~8に関しては

$$\mathbf{a}_{0i} = \sum_{j=1}^{i-1} (-\omega_j^2 \ell_j \hat{\mathbf{r}}_j + \alpha_j \ell_j \mathbf{k} \times \hat{\mathbf{r}}_j) \quad (i=2,3,\dots,8) \quad (2.13)$$

剛体要素 9 に関しては

$$\mathbf{a}_{09} = \sum_{j=1}^{5} \left( -\omega_{j^2} \ell_{j} \hat{\mathbf{r}}_{j} + \alpha_{j} \ell_{j} \mathbf{k} \times \hat{\mathbf{r}}_{j} \right) \quad \cdots \qquad (2.14)$$

となる。

以上の式 (2.6)  $\sim$  (2.11) における力の未知数は  $F_{0,1}$   $\sim$   $F_{7,8}$   $F_{5,9}$  の 9 種類であるが,ここでは運動を矢状面内の二次元に限定しているため, i , j 2 方

向の成分が必要となり力に関する未知数の数は総計 18 個になる。またトルクに関する未知数は  $T_{0,1} \sim T_{7,8}$  ,  $T_{5,9}$  の 9 種類であるが,この場合,k 方向まわりの成分のみを考慮すればよく,従ってトルクに関する未知数の数は総計 9 個となる。以上より上記の方程式は合計 27 個の未知数をもつことになる。一方,方程式は 27 個あるから,これらは一意に解けることになる。これは 9 の剛体要素から構成される系が開ループを形成していることによるものである。

起立・着席動作において目前のテーブルに手をつく場合,手をつくことによりテーブルと床との間で閉ループが生じ,不静定の問題となる。したがってここでは以下の仮定を設ける。すなわち,(j)人体と椅子およびテーブルとの接触点はナイフェッジ状であり,そこではトルクが作用しないものとする。(jj)床反力およびテーブルからの反力はそれぞれ足のつま先,および指先に作用するものとする。この場合運動方程式を一意に解くためには,床反力ならびに椅子およびテーブルからの反力を知る必要があり,実験においては動作の撮影と同時にこれらの反力を測定している。

この場合、剛体要素 4 と 8 に関する運動方程式は以下のようになる。すなわち,

剛体要素8に関しては

$$F_{7,8} - F_{hand} - W_{8} j = \frac{W_{8}}{g} a_{G8}$$

$$T_{7,8} - \ell_{8} \hat{r}_{8} \times F_{7,8} - \ell_{8}' \hat{r}_{8} \times F_{hand} = I_{G8} \alpha_{8} k \qquad (2.15)$$

剛体要素 4 に関しては

$$(F_{3,4} + F_{hip}) - F_{4,5} - W_4 j = \frac{W_4}{g} a_{G4}$$

 $\mathsf{T}_{3,4} - \ell_4 \hat{\mathsf{r}}_4 \times (\mathsf{F}_{3,4} + \mathsf{F}_{hip}) - \mathsf{T}_{4,5} - \ell_4' \hat{\mathsf{r}}_4 \times \mathsf{F}_{4,5} = I_{G4}\alpha_4 \mathsf{k}$  (2.16) となる。但し, $\mathsf{F}_{hand}$  は手がテーブルに及ぼす力, $\mathsf{F}_{hip}$  は椅子反力である。

他の剛体要素については開ループの場合と同様である。以上の方程式に関して式の数と未知数の数を比較すれば、未知数の数が 4 個多くなる。ここで、測定可能な値、 $F_{hand}$ ,  $F_{hip}$ ,  $F_{0,1}$  の i 及び j 方向成分からなる 6 個の測定値

のうち 4 個を代入することによって解を求めることができる。残りの 2 個の 測定値に関しては、計算より求めた値 と比較することにより、このようにし て求めた値がどの程度実測値に一致す るかの検証に用いることができる。

荷役作業動作の場合は起立・着席動作における開ループの場合と同様に解を求めることができるが、図2.5 に示すように荷物を一個の剛体に置き換え

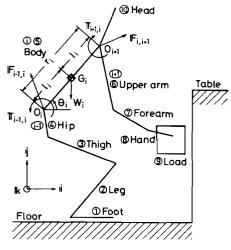


図2.5 矢状面内二次元人体モデル

るため、要素数が10となる。起立・着席動作の運動方程式と異なる剛体要素に関する式は以下の通りである。

剛体要素 9 に関しては

$$F_{8,9} - W_{9} j = \frac{W_{9}}{g} a_{G9}$$

$$T_{8,9} - \ell_{9} \hat{r}_{9} \times F_{8,9} = I_{G9} \alpha_{9} k \qquad \cdots \qquad (2.17)$$

剛体要素8に関しては

$$F_{7,8} - F_{8,9} - W_8 j = \frac{W_8}{g} a_{G8}$$
 $T_{7,8} - \ell_8 \hat{r}_8 \times F_{7,8} - T_{8,9} - \ell_8' \hat{r}_8 \times F_{8,9} = I_{G8} \alpha_8 k$  ……… (2.18)
剛体要素 1 0 に関しては

$$F_{5,10} - W_{10} j = \frac{W_{10}}{g} a_{G10} \dots (2.19)$$

$$T_{5,10} - \ell_{10} \hat{r}_{10} \times F_{5,10} = I_{G10} \alpha_{10} k$$

剛体要素5に関しては,

となる。

#### 2.3 実験方法および実験データの処理方法

#### 2.3.1 実験方法

運動動作を記録し計測を行う方法として,Townsend  $^{25)}$  は関節にゴニオメータ(角度変位計)を装着し,関節の三次元的な動きを測定している。また,Kinzel  $^{37)}$  は骨に穴をあけ支持軸を通してゴニオメータを固定する方法を取っているが,このような機械式計測法は被験者に違和感を与え,関節の自由度に制約を加える点に問題がある。これに対して非接触測定法としてシネカメラやITVカメラの利用があり,これらは動作を何ら拘束しないという利点がある。増田  $^{34)}$  は中高年者の歩行解析において,身体各部の計測点に豆ランプを装着し16ミリシネカメラで動作を記録している。またWinter  $^{24)}$  は歩行解析にTVカメラとコンピュータから成る画像処理システムを用いて,計測点の座標入力の自動化を図っている。これは写真撮影に比べて解像度が劣ること,および画像情報を格納するバッファ領域並びに撮影速度などに制約があることなど問題が多い。

本章では被験者に違和感を与えずしかも精度の高い測定を行うため、16ミ72) リカメラを用いて被験者の側面から運動動作を直接フィルムに撮影する方法を採用している。フィルムはカラーのポジフイルムを使用し、こま送り速度は毎秒40こまとした。被験者とカメラの間の距離は5.8m、カメラの高さは、1.01mである。運動動作の撮影と同時に、3台の荷重計を用いて床、椅子およびテーブルからの反力を測定し、データレコーダに収録するとともに電磁オシログラフに記録した。床およびテーブルからの反力については4点支持ピエゾ型フットプレートを用いて水平並びに垂直力を測定している。また椅子からの反力については椅子に取り付けた両端支持のアルミニウム板(300×400×5mm)の上下面に歪ゲージ各2枚をはりつけた荷重計によって垂直力のみを測定している(付録2にキャリブレーションの結果を示す)。なお、荷役作業動定している(付録2にキャリブレーションの結果を示す)。なお、荷役作業動

作実験においては、椅子は 使用していない。図2.6に 実験装置の概要を示す。実 験に使用した主な測定装置 とその仕様は以下のとおり である。

16ミリシネカメラ ローカム製(フイルム長100ft, 最大撮影こま数500こま /秒)

フットプレート キスラ

-製(3分力)

データレコーダ ティアック製(7チャンネル, FM変調方式)

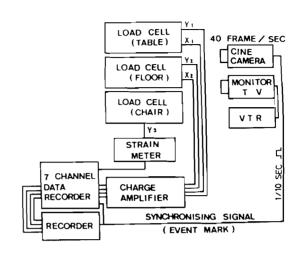


図2.6 実験装置の概要

その他の実験装置と詳細な仕様を付録 3 に示す。外力の測定値と 1 6 ミリフイルム上に撮影した画像情報の同期を取るため、カメラ・コントローラからの 1/10秒間隔のパルス信号(タイムマーク)と手動によって適宜創成したイベントマーク信号をデータレコーダに記録するときにフイルム端に光信号として焼きつけた。記録したデータは実験終了後再生し、13チャンネル・ペンレコーダを用いて記録紙に出力した。

起立・着席動作の実験は22歳から80歳までの19名の成年男子被験者に対して行った。運動動作は椅子に着席した状態から起立し、あらためて着席するという動作の繰返しで、目前のテーブルに手をつく場合と手をつかない場合についてそれぞれ連続して10回以上行った。実験においては各被験者の動作の特徴を見ることも重要であるため、各被験者に適した自由な速さとテンポで動作を行うこととした。図27に起立・着席動作実験の写真を示す。

荷役作業動作の実験は22歳の男子被験者1名に対して行った。荷役作業としては、両足をそろえて立ち、床と目前のテーブル(高さ0.71m)との間で

3.5 kgの荷物を上げ下ろしする動作を取り上げた。

実験に先立ち、被験者の健康診断と身体測定を行った。まず、被験者に対しアンケート調査および医師による血圧測定や問診などを行い、不慮の事故が発生しないよう心がけた。カルテには被験者の姓名、生年月日、年齢、性別、職歴、スポーツの経歴、健康状態、医師の所見などの項目を設けた。次いで、人体モデルを構築する上で必要となる身体各要素の



図2.7 起立.着席動作実験

長さ、直径、重量などを推定するための身体測定を行い、同時にシルエット写真の撮影を行った。各被験者の服装は半ズボンとランニングシャツで統一し、 身体各部を区分する点が容易に識別しうるようにモデルと対応して必要な関節

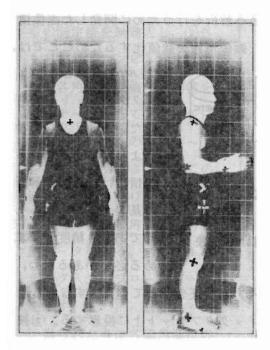
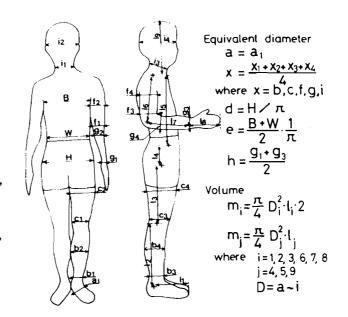


図2.8 被験者のシルエット写真

にビニールテープをはりつけターゲットマークとした。図2.8にシルエット写真の例を示す。ターゲートマークは外から触れることのできる足の外踝,ひざの腓骨頭,大腿骨の大転子,骨盤の腸骨棱,肩の肩峰,肘の橈骨小頭,および手首の茎状突起に取り付けた。これらの点はいずれも人体の側方から見えるところにあり2.2節で構築した矢状面内二次元人体モデルの分節点に対応している。

身体各部に対応する等価な円柱要素の直径および長さは,写真撮影と 身体各部寸法の直接測定結果をもと に定め、一部排水法による 検証も行った。図 2.9 は身 体各部の測定箇所と等価な 円柱の直径、重量を算出す る式を示している。図中の 等価直径 a ~ i は図 2.1 に 示す部分に対応する。なお、 ここでは身体各部の比重は いずれも1g/cm³ として、 身体各要素の質量を求めて いる。



2.3.2 運動動作の計測お よびデータ処理

図 2.9 身体各部の測定箇所

16ミリフィルムに記録された運動動作の画像情報から、1こまごとに身体 各部の角変位をミニコンピュータに取り込み解析を行うために開発した画像情 報処理システムの概要を図210に示す。画像情報を数値化するためここでは、

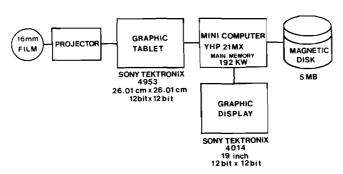


図 2.10 ミニ・コンピュータを用いた画像 処理システムの概要

フィルム投影機とグラフィックタブレットを使用した。 16ミリフィルムより得られるこれらの情報は,以後の解析の基礎データとなるものであり,精度よくかめる必要があるため,

ここでは以下の手順により画像データの入力と検証を行っている。すなわち、 ①動作1サイクルの最初の画像をグラフィックタブレット上に投影する。②被 験者に取り付けたターゲットマークを手がかりに9(荷役作業動作の場合は10)の要素の端点,すなわち10点(同11点)の座標を足の方から順にグラフペ

ンを押して入力する。③入力 した点の座標から人体の骨格 線図を再現し, グラフィック ディスプレイ上に表示する。 ④表示された図を見て目視判 断により入力に誤りがあれば ②へもどる。⑤コンピュータ により各剛体要素間の角度を 計算する。⑥上の②から⑤を あらかじめ設定した回数だけ 繰り返し、そこで得られた測 定値間の差が許容値を越える 場合は、コンピュータはそれ らの測定値を無効とし、②へ もどす。⑦コンピュータによ って各角度測定値の平均値を 求めデータとしてファイルに 収納する。以上の手順②~⑦ を,動作1サイクルすべての 画像について繰り返すことに より身体各部の角変位の時系 列データを得る。図2.11に データ入力のフローチャート を示す。

得られた身体各部角変位の 時系列データには,投影画像

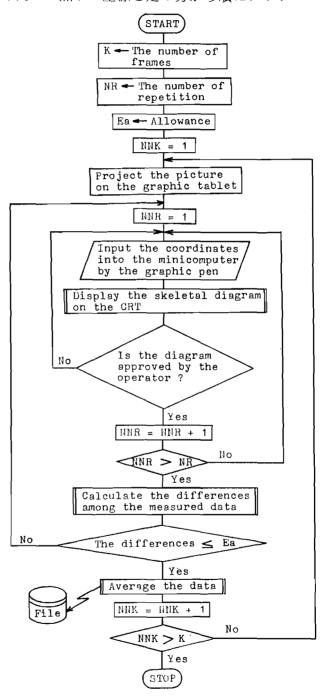


図 2.11 身体各点の座標入力

の特徴点の認識ならびに座標位置のディジタル化に伴う実験誤差が含まれる。この誤差は当然計算によって求められる力やトルクの推定精度に直接影響を及ぼすことが考えられる。このことに関しては特に  $Dainis^{15}$  は、計算によって求めるトルクの値が入力角変位に含まれる誤差に非常に敏感であることを示している。このため得られた時系列データの誤差を最小にするための工夫、あるいはデータの平滑化手法が種々提案されている。例えば、 $Pezzach^{73}$  は得られた時系列データにディジタルフィルタリング処理を施し、また $Keiley^{23}$ は 5点ずつの時系列データに対して最小二乗近似することによりデータの平滑化を行っている。

本研究では,まず得られた角変位の時系列データに対して周波数分析を行い,有意な信号の周波数帯域とノイズ成分の周波数帯域を区分し,その結果から高周波のノイズ成分を排除するような遮断特性を有するディジタルローパスフィルタリング処理を施すことによりデータの平滑化を行う。ディジタルフィルタリング  $^{74}$  は,入力の時系列 X ( $n \triangle T$ ) に対して出力の時系列 Y ( $n \triangle T$ ) を以下に示すディジタル計算式によって与えるものである。すなわち

$$Y(n \triangle T) = \sum_{\mu=0}^{M} a_{\mu} X((n-\mu) \triangle T) - \sum_{\nu=1}^{L} b_{\nu} Y((n-\nu) \triangle T) \quad (2.21)$$

である。ここで, $\triangle T$ はデータ点のサンプリングの時間間隔であり,Mはフィルタの次数である。また $a_\mu$ , $b_\nu$ はフィルタの係数であり,この $a_\mu$ , $b_\nu$ の値によってフィルタはローパス,ハイパスおよびバンドパス等の特性を有する。式(2.21)で表わされるフィルタは右辺に出力の $Y((n-\nu)\Delta T)$ の頃を含むことから再帰型フィルタと呼ばれる。ここでは $b_\mu=0$ ,すなわち,

$$Y(n \triangle T) = \sum_{\mu=0}^{M} a_{\mu} X((n-\mu) \triangle T) \qquad \cdots \qquad (2.22)$$

で表わされる非再帰型フィルタを用いた。ここではフィルタの次数はM=3 2 とし,フィルタの係数  $a_{\mu}$  は要求するフィルタ の周波数特性を逆フーリエ変換したものに Dolph - Chebyshev 関数の逆フーリエ変換値をウィンドウとして乗じて求めている。 $^{75}$  本章における起立.着席動作および荷役作業動作の場合,

サンプリング間隔 $\triangle T=1/40$ 秒に対し、遮断周波数が  $5.2\,\mathrm{Hz}$  となるように係数  $a_\mu$  を定めた。使用したフィルタの係数  $a_\mu$  の値を付録 4 に示す。

#### 2.3.3 速度と加速度の算出

身体各部の力学的関係を記述した運動方程式を解くためには,各剛体要素間の角度,角速度,および角加速度が必要である。この内,角度の時系列データを得る方法については前節までに述べた。ここでは角度の時系列データを数値微分することによって角速度および角加速度を求める方法について述べる。一般に動作の画像情報から速度および加速度を求める場合,各時刻における計測誤差は差分計算によって増幅され,原データの微小な誤差が膨大な誤差となる傾向がある。特に加速度の誤差は作用力やトルクの推定値に直接影響を及ぼすことになるため,角度の微分値は時間に対して連続でしかもなめらかな形で得られなければならない。このため,例えば角度の時系列を有限フーリエ級数で展開し,これに含まれる高調波成分をランチョスの $\alpha$ 因子を掛けることによって平滑化する方法が提案されている。 $\alpha$ 0 他に $\alpha$ 0 他に $\alpha$ 0 他に $\alpha$ 0 他に $\alpha$ 0 を引している。また, $\alpha$ 1 は角度でサンプリングを行ったデータにも適用している。

本研究では以下に示すようなパラメトリックスプライン<sup>76),77)</sup> による補間を行って、角度データの微分値を求めている。ここでスプラインとは薄板のことであり、それがあらかじめ決められた点を通るように曲げられる時、薄板は内部歪エネルギーが最小になるように曲がろうとする。この場合の薄板の歪エネルギーは以下の式で表わされる。

$$U = K \int_{0}^{J} \frac{1}{\rho^{2}} dS = K \int \frac{(d^{2}y/dx^{2})^{2}}{\{1 + (dy/dx)^{2}\}^{5/2}} dx \quad \cdots \qquad (2.23)$$

ここでK, J はそれぞれ薄板の剛性定数および長さ,  $\rho$  は曲率半径,S は弧長である。いま  $dy/dx \ll 1$  ならば,以下に示すようなU の近似式が得られる。すなわち,

$$U \cong K \int \left(\frac{d^2 y}{d x^2}\right)^2 dx \qquad (2.24)$$

である。したがって問題は与えられたn個の点列の各区間を補間する(n-1) 個の関数 y=f(x)を決定することに帰着される。式(2.24)で表わされるUを最小にするような y=f(x)は三次関数であり、この曲線は各点において位置、傾きおよび曲率が連続であるという条件を満足しなければならない。 $^{76}$ ) 以下においてスプライン関数の導出を行う。

まず図 2.12 に示すような 2 点間におけるスプライン関数は,端点 A , B における接線  $t_{A}$  ,  $t_{B}$  に接する三次関数として,以下のように表わすことが できる。

ここでuは $0 \le u \le 1$ の無次元パラメータである。関数P(u)は以下の境界条件を満たす。

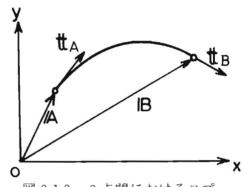


図 2.12 2 点間におけるスプ ライン曲線

これらを式(2.25)に代入すれば、係数 $R_0 \sim R_3$  は以下のように与えられる。

以上よりPWは以下のようになる。すなわち,

$$P(u) = u^{3} \{ 2 (A-B) + t_{A} + t_{B} \} + u^{2} \{ 3(B-A) - 2 t_{A} - t_{B} \} + u t_{A} + A$$
 ... (2.28)

ここでP(u)はパラメータuに関して、A、B間を補間する関数である。

次に図 2.13 に示すようなn 点間におけるスプライン関数の導出を行う。ここで $P_j$  を n 点の位置ベクトル, $t_j$  を各点の接線ベクトルとすれば第 j 区間の三次関数は,式(2.28)より以下のように与えられる。

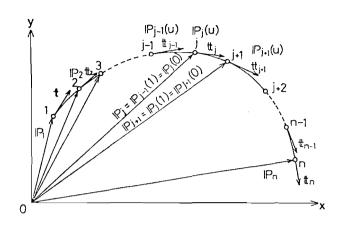


図 2.13 n 点間におけるスプライン曲線

$$P_{j}(u) = u^{3} \{ 2 (P_{j} - P_{j+1}) + t_{j} + t_{j+1} \}$$

$$+ u^{2} \{ 3 (P_{j+1} - P_{j}) - 2 t_{j} - t_{j+1} \}$$

$$+ u t_{j} + P_{j} \qquad (2.29)$$

これより $P_i(u)$ のuに関する一階および二階微分は以下のようになる。

$$\dot{P}_{j}(u) = 3 u^{2} \{ 2 (P_{j} - P_{j+1}) + t_{j} + t_{j+1} \}$$

$$+ 2 u \{ 3 (P_{j+1} - P_{j}) - 2 t_{j} - t_{j+1} \} + t_{j} \cdots \cdots (2.30)$$

$$\dot{P}_{j}(u) = 6 u \{ 2 (P_{j} - P_{j+1}) + t_{j} + t_{j+1} \}$$

$$P_{j}(u) = 6 u \{ 2 (P_{j} - P_{j+1}) + t_{j} + t_{j+1} \}$$

$$+ 2 \{ 3 (P_{j+1} - P_{j}) - 2 t_{j} - t_{j+1} \}$$
...... (2.31)

ここで各区間の曲線が滑らかで、かつ連続であるためには第j区間において次の境界条件が成立しなければならない。すなわち、

$$P_{j}(1) = P_{j+1}(0)$$
,  $\dot{P}_{j}(1) = \dot{P}_{j+1}(0)$ ,  $\ddot{P}_{j+1}(1) = \ddot{P}_{j+1}(0)$  ...... (2.32)

式(2.30)~(2.32)より接続ベクトルtについて次の条件式が得られる。

$$t_{i} + 4 t_{i+1} + t_{i+2} = 3 (P_{i+2} - P_{i})$$
 ...... (2.33)

ただし、両接点 $P_1$ , $P_n$ においては曲率がOであるという仮定を設ければ、

となり、同様にして以下の式が得られる。

$$2 t_1 + t_2 = 3 (P_2 - P_1), t_{n-1} + 2 t_n = 3 (P_n - P_{n-1})$$
 …… (2.35) 式(2.33),(2.35)をマトリクス表示すれば以下のようになる。

$$\begin{bmatrix} 2 & 1 & & & & \\ 1 & 4 & 1 & & O & \\ & 1 & 4 & 1 & & \\ & & & & & \\ O & & & 1 & 4 & 1 \\ & & & & 1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t_1 \\ t_2 \\ t_3 \\ \vdots \\ t_{n-1} \\ t_n \end{bmatrix} = 3 \begin{bmatrix} P_2 - P_1 \\ P_3 - P_1 \\ P_4 - P_2 \\ \vdots \\ P_n - P_{n-2} \\ P_n - P_{n-1} \end{bmatrix} \dots (2.36)$$

ここで $\mathbf{P}_j$  は全て既知であるため、これより  $\mathbf{t}_j$  が求まり式(2.29) のスプライン関数が与えられる。また、式(2.30)、(2.31)も与えられるが、これらは $\mathbf{P}_j$  を時系列データとしたときの速度、加速度にほかならない。

以上において求められたスプライン曲線は、 n 個の点全てを滑らかに通過し、微分値を求めるには都合がよい。しかしながら、もとのデータに細かな変動がある場合であってもスプライン曲線はその変動を忠実に追従するため、もとの変動はそのまま残ることになる。ここでは、本来スプライン曲線は各 2 点間を補間するものであるという性質を利用して、フィルタリング処理によって平滑化された角変位データをある一定の間隔で再サンプルし、各区間の補間を行ってもとの角変位データの数だけ再生するようにした。再サンプリングの間隔および再サンプリングの開始点は、もとの角変位データとスプライン補間によって得た値の最大誤差が、角変位の最大変動幅に対して 5 %以下となるように定めた。

#### 2.3.4 重心位置の算出

運動動作中における人体の重心移動軌跡を求めることは,従来から動作解析の一方法としてよく行われており,例えば  $Kelley^{23}$  は椅子からの起立動作解 78 析において重心の移動軌跡を求めている。重心位置の算出方法としては,松井, 磯前 79 , $Murray^{80}$  および  $Williams^{81}$  による方法があるが,静的な重心位置を与えるものが多く,また重心を算出する式が繁雑なものもあり,これらをそのまま動的な剛体リンクモデルに適用することは困難である。本研究では身体の各剛体要素の重心が円柱の中心にあると仮定し,以下の式に基づいて各

時間ごとの重心位置を算出した。すなわち各剛体要素(起立・着席動作の場合要素数は9である)の中心の座標を( $x_{Gi}$ , $y_{Gi}$ )(i=1, 2, …, 9)とすると求める重心座標( $X_{Gi}$ , $Y_{Gi}$ )は次式で与えられる。

$$X_{Gi} = \sum_{i=1}^{9} W_i x_{Gi} / \sum_{i=1}^{9} W_i$$

$$Y_{Gi} = \sum_{i=1}^{9} W_i y_{Gi} / \sum_{i=1}^{9} W_i$$

$$(2.37)$$

ここで,各剛体要素の中心の座標( $x_{Gi,y_{Gi}}$ )は,動作の画像情報より 求めた各剛体のX軸とのなす角度  $\theta_i$ (図 2.3 および図 2.5 参照 と各剛体の長さ $r_i$ とから以下の式によって求められる。

$$\begin{bmatrix} x_{Gi} \\ y_{Gi} \end{bmatrix} = \sum_{j=1}^{i-1} r_j \begin{bmatrix} \cos \theta_j \\ \sin \theta_j \end{bmatrix} + \frac{1}{2} r_i \begin{bmatrix} \cos \theta_i \\ \sin \theta_i \end{bmatrix} \quad (i = 1, 2, \dots, 8)$$

$$\begin{bmatrix} x_{Gg} \\ y_{Gg} \end{bmatrix} = \sum_{j=1}^{5} r_j \begin{bmatrix} \cos \theta_j \\ \sin \theta_j \end{bmatrix} + \frac{1}{2} r_g \begin{bmatrix} \cos \theta_g \\ \sin \theta_g \end{bmatrix}$$

$$(2.38)$$

#### 

#### 2.4.1 被験者の属性

動作実験に先立ち各被験者について体重、身長、胸囲、腰まわり、足の大き さなどの項目について身体測定を行い、同時にシルエット写真を正面と側面か ら撮影した。これらの結果から、身体各部に対応する等価な円柱要素の直径、

表2.1 身体各剛体要素の円柱形状と重量(被験者番号19,23歳)

Segment	Diameter(m)	Length(m)	<pre>Weight(N(kgf))</pre>	Moment of Inertia *10 <sup>-4</sup> (kgm <sup>2</sup> )
1 2 3 4 5 6 7 8 9	0.099 0.138 0.212 0.288 0.259 0.100 0.080 0.070 0.153	0.20 0.38 0.36 0.13 0.45 0.28 0.25 0.20	15.10 (1.54) 55.66 (5.68) 124.66(12.72) 83.01 (8.47) 231.67(23.64) 21.56 (2.20) 12.35 (1.26) 7.55 (0.77) 45.28 (4.62)	6.20 76.64 176.64 56.98 508.20 16.07 7.21 2.86 31.45

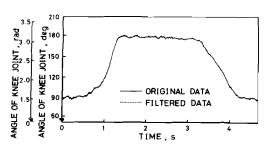
長さ、重量および慣性モーメントを求めた例を表 2.1 に示す。また19名の被験者に対して身体各部を円柱で近似して推定した体重と実測した体重を比較した結果を表 2.2 にまとめて示す。実測値と推定値の平均誤差は 3.25%であり、これより身体各部を円柱形状の剛体要素で近似した本手法はほぼ妥当であると考えられる。なお以後、被験者番号は表 2.2 に示すものと一致させて用いるものとする。

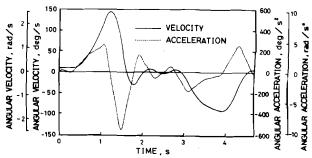
MEASURED WEIGHT, KG ESTIMATED WEIGHT, KG MEASURED WEIGHT, KG ESTIMATED WEIGHT, KG **SUBJECT** AGE SUBJECT AGE 49.0 1 74 63.065.0 11 76 48.0 2 80 59.0 59.6 12 70 58.5 55.6 3 73 60.0 54.0 50.3 59.1 13 26 78 55.0 57.0 54.2 51.8 44 4 14 65.0 54.052.9 69 65.2 22 5 15 62.0 6 73 60.5 61.9 16 47 66.5 7 72 43.0 44.8 17 23 64.5 63.4 67 51.5 23 54.0 52.0 8 49.6 18 60 52.1 19 23 60.0 60.9 9 51.5 10 68 49.5 47.9

表 2.2 体重の実測値と身体各部の円柱近似に基づく体重の推定値

# 2.4.2 動作パターン

着席している状態から起立し、再び着席するまでの1サイクルの動作に対し





(a) 原データとデジタルフィルタリング処理を施したデータ

(b) スプライン関数による補間を利用 して求めた角速度と角加速度データ

図 2.14 起立・着席に伴う関節の角度変化の例(ひざの 関節,手をつかない場合,72歳)

て、グラフィック・タブレットを用いて1/40秒毎に得た身体各部の角変位データの1例として、ひざの角度の時間的変化と、それにディジタルフィルタリング処理を施した結果を図2.14(a)に示す。ひざ角度の変位はもともと比較的精度よく求められているが、フィルタリング処理により原データに含まれる細かな凹凸がならされ、ディジタルフィルタリングによる平滑化が有効であることが認められる。スプライン関数による補間を利用して、この場合の角速度および角加速度を計算した結果を図2.1.4(b)に示す。なお、この場合、スプライン関数を求める際の再サンプリング間隔は1/4秒としている。

平滑化した身体各部角変位データをもとに起立・着席動作を再現し、グラフィック・ディスプレイ上に表示して検討を加えた。図 2.15 は身体各部の角変位の時系列データと剛体要素に関する情報から、二画面ごとに矢状面内の 2 次元骨格線図を構成し、動作パターンの時間的変化が読みとれるように横方向へずらして表示した例である。図 2.15 (a)、(b)はそれぞれ手をつかない場合と目前のテーブルに手をついた場合の起立・着席の動作パターンを示している。図 2.15 (b)においては、上段に起立動作を,また下段に着席動作を示している。 隣接する骨格線図の時間間隔は1/20 0秒で,図中の左から右に向かって時間が

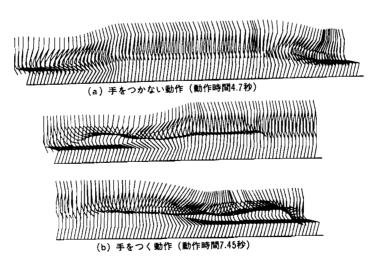
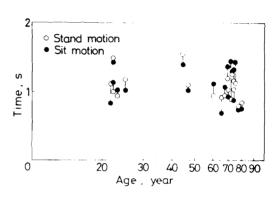


図 2.15 起立・着席動作パターン(年齢 72歳)

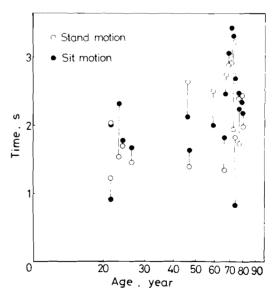
経過している。図より手をつく動作は手をつかない動作に比べて、動作時間が長く、テーブルに手をつくために起立時および着席時により大きな前傾姿勢をとっていることがわかる。このような動作のパターン表示は運動動作の時間的変化を細部にわたって検討する上で有用であるばかりでなく、得られたデータの検証にも用いることができる。

起立・着席動作において各被験者がそれぞれ起立および着席するのに要した

動作時間をフィルムのこま数より求 めた結果を図2.16に示す。ここで 起立時の動作時間は椅子に着席した 状態から起立を開始し, 直立して静 止するまでとし,着席時の場合は着 席動作開始後から椅子に着席して静 止するまでとしている。ただし、図 に示した動作時間はいずれも各被験 者について第5回目の動作サイクル における値を採用している。手をつ かない動作では起立時と着席時にお ける動作時間の差は顕著ではなく, また年齢による相違もほとんど認め られない。一方,手をつく動作では, 手をつかない動作に比べて相対的に 長い動作時間を要し、また起立時、 着席時における差が相対的に大きく なっている。これは目前のテーブル に手をつくための前傾動作に時間を 要しているためであり、また手をつ くタイミングによって動作時間が大 きく変化するためと考えられる。さ



(a) 手をつかない動作



(b) 手をつく動作

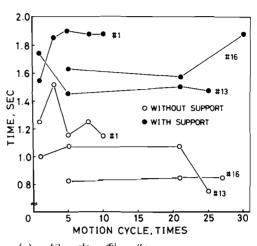
図 2.16 起立・着席動作時間 (動作サイクル 5 回目)

らに手をつく動作の場合,高齢者ほど動作時間が長くなる傾向が認められる。 これは目前のテーブルに手をついて起立・着席する動作が「起立・着席」の一

連の動作と「手をつく」動作の二種の異なる動作から成っており、 高齢者はどこうした異なる動作を 同時に行う協調運動が困難になる ためと考えられる。

図2.17は若年者(被験者番号13,26歳),中年者(被験者番号14,7歳), 中年者(被験者番号16,47歳), 高齢者(被験者番号1,74歳)各1名について動作回数の増加に伴う動作時間の変化を示したものである。ただし,高齢者の動作回数は10回としている。図より動作回数が増加することによる動作時間の顕著な変化は認められないが,高齢者の場合,動作時間に大きなばらつきがあることが認められる。

起立・着席動作中に身体各部の 各関節角が、相互にどのような関係を保ちながら変化するかを検討 した。図2.18は起立・着席動作 におけるひざの角度変化と腰の角



(a) 起 立 動 作

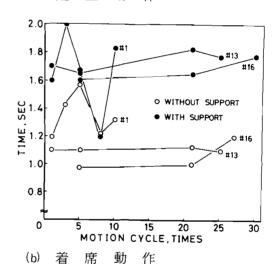


図 2.17 動作サイクルによる動作 時間の変化

度変化を相関図の形でグラフィック・ディスプレイ上に表示した例である。これより、椅子からの起立動作は、基本的には上半身の前傾にはじまり、最大屈曲に達した点から腰の伸展とひざの伸展が同時に進行して起立姿勢に至ることがわかる。着席動作は起立動作に対してほぼ逆の機序をたどっている。

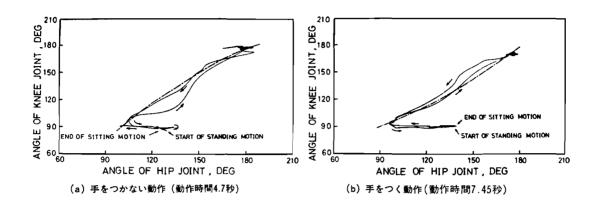
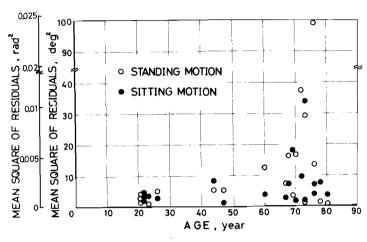


図2.18 起立・着席動作におけるひざと腰の関節角度の相関(年齢72歳)

実験を行った全被験者について腰とひざの角度の相関図を求めた結果,右上がりの曲線部分について滑らかなものと凹凸が顕著であるもの,さらには大局的に見て上に凸のものと下に凸のものがあることが求められた。そこで個々の相関図の右上がりの曲線部分のみを起立動作,着席動作別に抽出し,最もよく近似する二次関数を最小二乗法により求めて相関図の特徴を数値化することを試みた。図 2.1 8 における一点鎖線はこのようにして求めた二次関数を示す。実験から得られた右上がりの部分の凹凸の程度を調べるため,近似した二次関数に対する残差平方の平均値(以下 M S R 値と略記する)を求めた。また全般的な曲率の傾向を知るため近似した二次関数 y=f(x)の各点における曲率半径  $\rho$  を次式より求め,その平均値の逆数を平均曲率として用いた。すなわち,

$$\rho = \frac{(1+y'^2)^{3/2}}{y''} \qquad \dots (2.39)$$

図2.19は各被験者についてあてはめた二次関数に対するMSR値を求めた結果を示す。図より、特に手をつかない動作においては起立・着席いずれの場合も加齢とともにMSR値が増加する傾向が認められる。すなわちこれは高齢者の方が相関図における右上がり曲線部分での滑らかさが少なく、凹凸が顕著であることを意味している。このことは高齢者が若年者に比較して体の柔軟性に劣り、特に腕による支えがない場合、腰とひざといった重要な関節の協調運



(a) 手をつかない動作

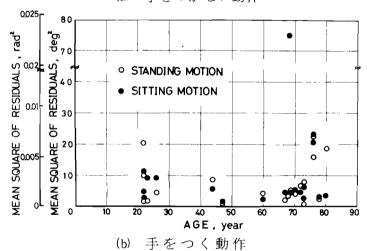


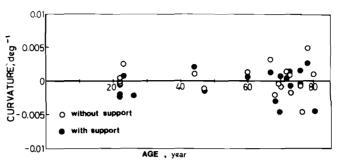
図 2.19 腰およびひざ角度の相関図における動作の 滑らかさと年齢の関係

動が円滑に行われにくくなっている事を示唆しているものと考えられる。

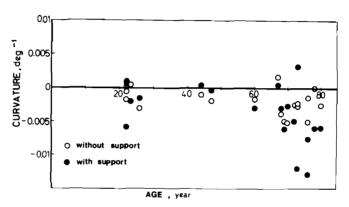
相関図における平均曲率を求めた結果をまとめて図 2.20 に示す。図において正の曲率は曲線が下に凸であることを意味し、負は上に凸であることを示している。起立動作については年齢による顕著な相違は認められず、むしろ個人差が現れていると考えられる。一方、着席動作については、ほとんどの被験者について曲率は負となっており、しかも高齢者ほど曲率は大きい。このことは着席に際してはまず先に腰が閉じて前傾姿勢をとり、次いでひざが閉じるとい

うパターンを取ることを 示している。これはひざ を閉じて体の重心を低く する時に,後ろへ倒れな いようにするために必要 な動作パターンであると 考えられる。

図2.2.2は起立・着席 動作に伴う重心移動の軌 跡を求めた例を示す。全 被験者について重心の移 動軌跡を求めた結果,軌 跡のパターンとして以下 の三種類に大別されるこ とが求められた。すなわ ち,①重心移動が水平移



(a) 起 立 動 作



(b) 着 席 動 作

図 2.20 腰およびひざ角度の相関図にあては めた最小二乗二次関数の平均曲率と 年齢の関係

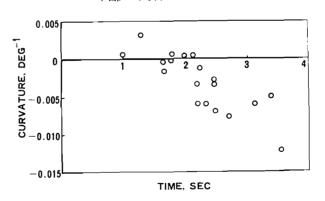


図 2.2 1 着席動作における動作時間と腰, ひざ角度相関図の平均曲率の関係

動と垂直移動に明白に区分し得るもの、②水平移動と垂直移動の区分が明白で

なく,両方向への移動が徐々に変化して行われるもの,③重心が斜めにほば直線的に移動するものである。これらのパ増してある。これらして個とまるものであり,年齢との相関は明らかには認められなかった。



(a) 手をつかない動作 動作時間 2.5秒



(b) 手をつく動作 動作時間 3.5 秒

図 2.22 人体の重心移動(被験者年齢 47歳)

# 2.4.3 身体各部に作用する力およびトルク

身体各関節の角変位,角速度,角加速度を求め,各時間における運動方程式 を解くことにより各関節に作用する力とトルクを計算した。図 2.23 は起立・

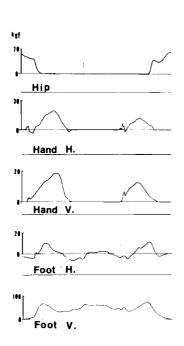


図 2.23 外力測定値(被験 者番号 13,26歳,動作 サイクル5回目)

着席動作実験において測定された外力の例を示す。図において上から椅子の垂直反力,テーブルの水平および垂直反力,ならびに床の水平および垂直反力を示している。これらの外力データの一部は閉ループを形成する動作の場合に,力やトルクを算出する上で必要となる。これらのうち計算に用いない測定値は数学モデルを解くことによって得られた結果の検証に用いた。表2.3 は以後の解析において測定した外力をどのように取扱うかをまとめて示したものである。

図2.24は運動方程式を解くことによって求めた力のうち,足に作用する垂直力と,床反力測定器を用いて測定した床反力 実測値を比較した例を示す。 起立動作

の開始とともに床に垂直 力が作用し,慣性の影響 でいったん極大値に達し た後に反作用で極小値を 取ることがわかる。着席 動作についてもほぼ同様 である。全般に動作に伴 う力の変化については運 動情報をもとに計算した 値と実験値は比較的よく 一致していることが認め られる。動作時間 1.3 秒 から3.3秒の間における 計算値が, 実測値よりも 2 kg 程度大きくなって いるのは,身体各部を円

表 2.3 測定した外力の用途

	Motion without support	Motion with support
For application to equation of motion	*Vertical component of chair reaction force	·Vertical component of chair reaction force ·Vertical and horizontal component of table reaction force
For verification	Vertical and horizontal component of ground reaction force	·Vertical and horizontal component of ground reaction force

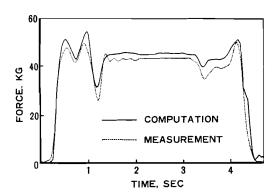
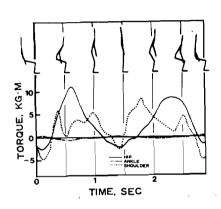


図 2.24 足にかかる垂直床反力(被験者番号7,年齢72歳)

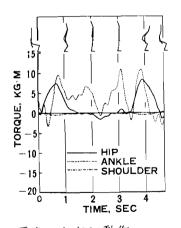
柱近似して求めた被験者の推定体重が,実測値よりも約4%大きくなっているためと考えられる(表2.2被験者番号7番),慣性が床反力に大きく影響を及ぼす過渡状態において,計算した床反力の変化の大きさが実測値よりも小さいところがあるのは,この部分の角変位データが必要以上に平滑化され,見かけ上角加速度が小さく評価されているためと考えられる。

手をつかないで起立・着席した場合と手をついた場合について、腰関節、足首関節および肩関節まわりに作用するトルクを計算した例を図2.25に示す。図(a),(b)は26歳の被験者,(c),(d)は72歳の被験者の結果である。ここでトルクの符号は隣接する剛体要素が関節を中心に広がる方向にトルクが作用する場合を正としている。図には参考のため動作パターンを示している。図より手をついて体を支えることにより、肩関節まわりに大きなトルクが作用することがわかる。腰まわりのトルクは、起立時に上体を起こす場合および着席時に上

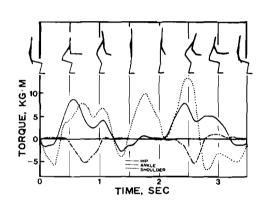
体を前傾させる場合に正の最大値をとるが、この値は手をつくことにより減少している。また肩関節まわりにトルクが作用するのに応じて、腰まわりのトルクが変化することが認められる。足首まわりのトルクは、起立時に上体を起こす場合および着席時に上体を前傾させる場合に最大値をとるが、立ち上がって静止している場合も体を支えるために若干のトルクが作用していることが認められる。



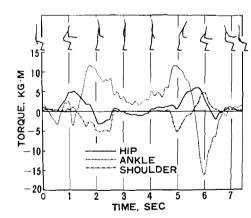
(a) 手をつかない動作(動作時間 2.9秒, 2.6歳)



(c) 手をつかない動作(動作時間47秒,72歳)



(b) 手をつく動作 (動作時間 3.5秒, 2.6歳)



(d) 手をつく動作 (動作時間 7.4 5秒, 7 2歳)

図 2.25 起立・着席動作における腰,足首および肩関節まわりのトルク

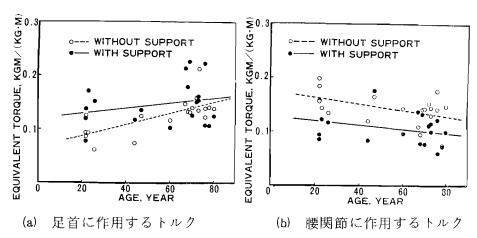


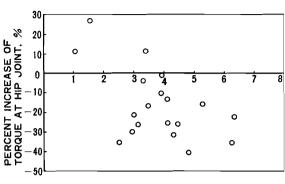
図2.26 動作中に作用するトルクの極大値と年齢の関係

起立・着席時において足首および腰に作用するトルクの極大値と年齢の関係をまとめた結果を図226に示す。身体に作用するトルクの大きさは被験者の体重と身長の影響を強く受けるため、図には起立・着席時におけるトルク極大値の平均値を、各被験者の体重と身長の積で除して基準化した値を示している。

図より手をつかない場合,全般に加齢とともに腰まわりの極大トルクが減少 し,逆に足首まわりの極大トルクが増加する傾向が認められる。このことは腕 による支えがない場合,若年者がいわゆる腰をきかして動作するのに対し,向 老者は腰の運動が弱いためむしろ足首に力が作用する傾向にあるということを 意味している。

手をつく動作においては手をつかない場合に見られた上述の傾向はあまり顕著に認められないが、図226(b)より明らかなように、手をつくことによって腰に作用するトルクは低下していることがわかる。これは、腕が腰の代償作用を行うためであると考えられる。各被験者について、手をつくことによる起立・着席動作における腰まわりのトルク極大値の平均増減率と、手をつく動作における肩関節まわりのトルク極大値の関係を求めた結果を図227にまとめて示す。図よりほとんどの被験者について、手をつくことによって肩関節まわりのトルクが作用し、それに応じて腰まわりのトルクが軽減されていることが認められる。手をつくことによる腰まわりのトルクの全平均減少率は19%であった。なお、手をつく場合、腕を介した垂直方向分力の分担により腰にかかるト

ルクが減少することが考えられる。 そこで、この力の代表値として肩 関節に作用する垂直力と、腰まわ りのトルクの増減率の関係を図 2.27と同様に求めたところ、手 をつくことによる垂直力の顕著な 増加は認められたものの、垂直力 と腰まわりのトルク極大値の平均 増減率の間にはほとんど有意な相 関は認められなかった。



TORQUE AT SHOULDER JOINT, KGM

図2.27 起立・着席動作における手をつくこと の効果(肩関節まわりのトルクと腰関 節まわりのトルクの増減率の関係

また図227において, 肩関節

まわりのトルクが小さい被験者の中には、例外的に無理な前傾姿勢や手をつく タイミングのずれなどによってかえって腰まわりのトルクが増加しているもの も見られる。しかしながら、一般に向老者が起立する場合、無意識のうちに目 前のテーブルや肘かけに手をついて立ち上がるのはこのように腰にかかる負荷 を小さくしようとする代償機能の現われであることは明らかであると言えよう。

#### 2.4.4 前額面内の動きを考慮した補正

これまでの解析においては、起立・着席動作は矢状面内における二次元的な 運動として扱い得ると仮定した。しかしながらテーブルに手をついて起立・着 席を行う場合、腕を左右方向に大きく広げる被験者があり、二次元モデルに基 づいた解析では当然誤差が生ずることが考えられる。そこで本節では起立・着 席動作実験において両腕を左右に大きく屈伸させて動作を行う被験者に対して、 矢状面内の他に前額面内の動きを加味したモデルを考え、その場合の運動方程 式を導出して解くことにより、二次元モデルによる解析結果の補正を行う。

図 2.2 8 は前額面内の動きを含む剛体要素の位置関係を示している。ここで線分 $\overline{1\cdot7}$ は要素の実長r,線分 $\overline{1\cdot6}$ はその要素の矢状面への投影長さr'である。グラフィックタブレットから入力される値はこのr'である。また,角度

 $\angle$ 1・6・5 は矢状面内に投 影された要素が水平方向とな す角度 $\theta$ ;であり、この値を求 めるために $\mathbf{r}'$ の測定値を用 いている。

これまでの解析においては 運動方程式を解く場合,剛体 要素の長さとして実長rを用 い,その長さは時間に関係な く一定であるとしてきた。こ

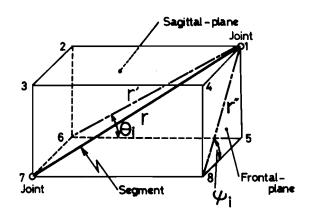


図 2.28 前額面内の動きを含む剛体要素の位置関係

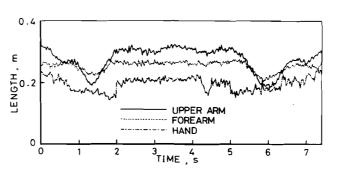
のことは,前額面内の動きを全く含まないという仮定,すなわちr=r'であるという仮定のもとに成立する。しかしながら,図 2.28に示すような前額面成分をもつ場合,矢状面内に投影された長さは実長よりも短くなり(r>r'),r=r'という仮定は成り立たない。 以下に剛体要素長さの矢状面成分に対する補正と前額面成分の抽出について述べる。

# (j) 矢状面成分に対する補正

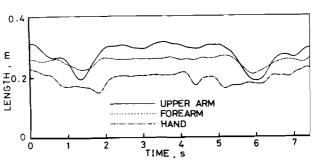
タブレットから運動情報を入力する場合に、矢状面内投影長さr'を入力し、r'から $\theta_i$ を求め、これらの値をファイルに格納する。運動方程式を解くにあたってはrの代わりにr'を用いて、これまで一定長としてきた矢状面内の要素長さを時間の関数として扱うことにより、力・トルクの矢状面成分を得る。

解析は前額面内の動きが顕著に認められる被験者(被験者番号 6, 7 3 歳) の手をつく動作について行った。図 2.2 9 に上腕, 前腕および手の矢状面内投影長さの時間変化を示す。図(a)はグラフィック・タブレットより入力した原データ, (b)はフィルタリング処理を施したデータを示している。これよりテーブルに手をついて動作を行う際に各要素の矢状面内投影長さが大きく減少していることがわかる。上腕の場合, 最大 4 0 %減少しており, この減少に応じて前額面内の動き, すなわちここでは腕の左右への広がりが生じていることがわかる。

図2.30は二次元モデル によって求めた各関節に作 用するトルクと剛体要素の 長さrをr' に置き換える ことにより補正したトルク の矢状面成分を求めた結果 を示す。図より特に前腕, 上腕, および手について, これまでの解析結果におい て認められた相対的に大き な極値が減少していること がわかる。これは前額面内 の動きを含む場合、矢状面 内における剛体要素の長さ は実際の長さよりも短くな るにもかかわらず, これま



(a) 入力原データ



(b) フィルタリング処理データ 図 2.29 上腕,前腕,手の矢状面投影 長さ変化

での計算については実際の長さを用いて運動方程式を解いたため,矢状面内に おけるトルクを過大に評価していたことを示している。

# (ji) 前額面成分の抽出

図 2.28 に示した剛体要素長さr, r' および角  $\theta_i$  を用いて,前額面内に投影される要素が水平方向となす角度  $\psi_i$  および投影長さr'' を以下の式で求めることができる。

$$\psi_{i} = \tan^{-1} \left( r' \sin \theta_{i} / \sqrt{r^{2} - r'^{2}} \right) \qquad \dots \qquad (2.40)$$

$$r'' = \sqrt{r^{2} - r'^{2}} / \cos \psi_{i} \qquad \dots \qquad (2.41)$$

ここで、剛体要素が矢状面内にある場合、角度 $\phi_i$ は $\frac{\pi}{2}$ の値を取り、 剛体要素が前額面内の動きを含むにつれて小さくなる。式(2.40)を用いて、各要素が前額面内において水平方向となす角度 $\phi_i$ の時間変化を求めた結果を図 2.31に示す。図よりテーブルに手をついた場合、角度 $\phi_i$ は小さくなり、 前額面内

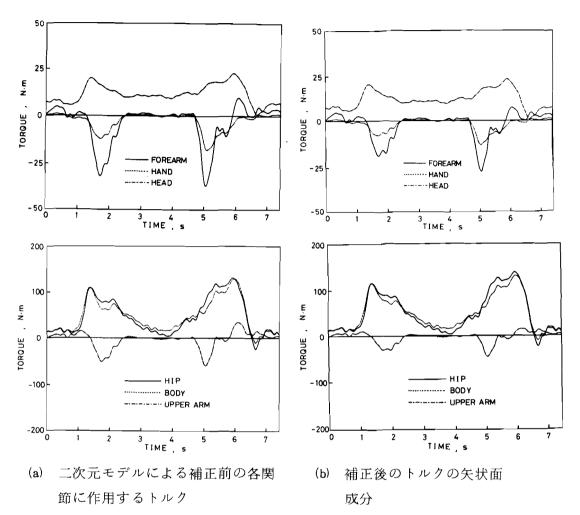


図 2.30 前額面内の動きを考慮したトルクの補正

における成分が増大することがわかる。

図 2.3 2 は各要素の前額 面での位置を求め,矢状面 内の位置情報を合成して各 要素の三次元位置を骨格線 図で表示したものである。 なお表示方法は,軸測投影 法(これについては後の 3.3.2節で詳しく述べる)

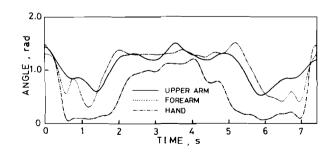


図 2.31 前額面内における上腕, 前腕, および手の角度変化

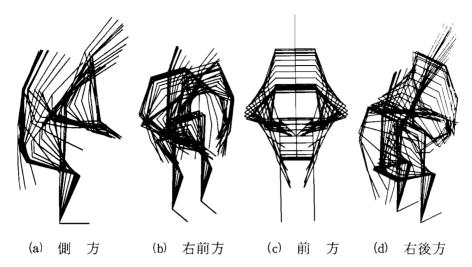


図 2.3 2 前額面内の動きを考慮した起立動作骨格線図

に基づいて行った。ここでは、各要素の前額面内の動きが観察しやすいように、 二次元モデルを拡張し、左右の腕と脚を考慮して 1 5 の要素で表示を行ってい る。これらの図より、上肢の前額面の動きが顕著であることが認められる。

### 2.5 荷役作業動作実験の結果と考察

### 2.5.1 動作パターン

足もとにある荷物を、手にもって立ち上がり目前のテーブルに置くまでの持ち上げ動作に対し、グラフィックタブレットを用いて 1/4 0秒ごとに得た身体要素間の角変位データの一例を図 2.3 3 に示す。被験者は 2.2 歳男子である。図 2.3 3(a)は股関節角度の時間的変化と、それにディジタルフィルタリング処理を施した結果を示している。持ち上げ動作が進行するに従って股関節が徐々に伸長していくことがわかる。スプライン関数による補間を利用して、この場合における角速度および角加速度を計算した結果を図 2.3 3(b)に示す。

平滑化した身体各部の角変位データをもとに荷物の持ち上げ,持ち下ろし動作を再現し,グラフィックディスプレィ上に表示して検討を加えた。図2.34 は身体各部の角変位の時系列データと剛体要素に関する情報に基づいて,一画

面ごとに矢状面内の二次 元骨格線図を構成し、動 作パターンの時間的変化 が読みとれるように横方 向へずらして表示した例 である。隣接する骨格線 図の時間間隔は 1/40 秒 で、図中の左から右に向 かって時間が経過してい る。図より持ち上げ動作 は,荷物を持って立ち上 がる動作と目前のテーブ ルに荷物を置く動作に分 割され, 両動作の所要時 間はほぼ同じであること がわかる。これに対し持 ち下ろし動作は目前のテ - ブルより荷物を取る動 作とすわり込む動作が同 時に進行していることが わかる。また持ち下ろし 動作は持ち上げ動作に比 べて胴体の前傾が若干大 きくなっている。これは 荷物に衝撃を与えないよ うにゆっくり持ち下ろす

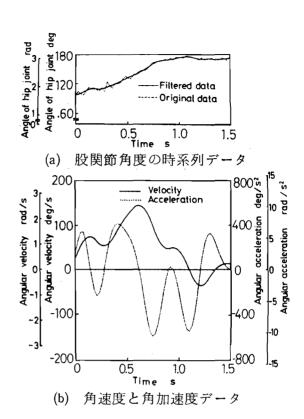
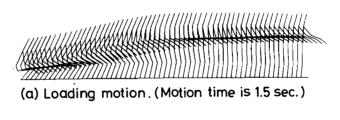
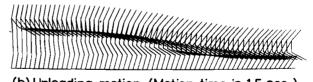


図 2.33 荷役作業動作に伴う角度 変化の例(股関節)





(b) Unloading motion. (Motion time is 1.5 sec.)

図 2.34 荷役作業動作パターン

ために必要な動作であると考えられる。

作業動作中に身体各部の各関節角が、相互にどのような関係を保ちながら変

化するかを検討した。図 2.35 は荷物の持ち上げ,持ち下ろし動作における腰の角度変化とひざの角度変化を相関図の形でグラフィックディスプレイ上に表示した例である。これより荷物の持ち上げ,持ち下ろし動作は腰とひざの伸張が同時に進行して起立姿勢に至り,次いで腰とひざがはぼ同時に屈曲して完了することがわかる。持ち下ろし動作は持ち上げ動作に比較して相関図に顕著な凹凸が認められる。これは荷物を下ろす場合,指定された位置に荷物を置くために腰とひざが微妙に屈伸を繰り返しながら制御を行っていることの現れであると考えられる。

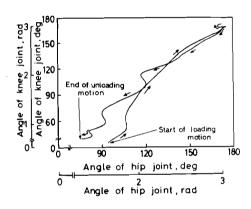


図 2.35 荷役作業動作における ひざと腰の関節角度の相関

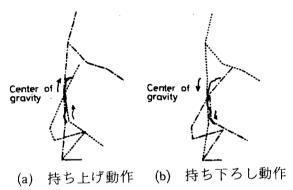


図 2.3 6 荷役作業動作に伴う 重心移動軌跡

図2.36は荷物の持ち上げ、持ち下ろし動作に伴う重心移動の軌跡を求め、グラフィックディスプレイ上に表示したものである。ここでは荷物を含めた身体全体の重心を示している。図より持ち上げ動作における重心移動は、持ち下ろし動作の場合に比べて直線的であり、ほぼ鉛直上方に移動していることがわかる。このことは図2.34における動作パターンにも見られたように、立ち上がる動作と荷物をテーブルに置く動作はほぼ独立して進行するため、重心移動は主として初期の立ち上がり動作で完了し、荷物を置くための動作はほとんど影響していないことを示している。一方、持ち下ろし動作の場合においては重心移動軌跡に凹凸が見られるが、これは先にも述べたとおり持ち下ろし動作中に身体各部が微妙な屈伸を繰り返すためと考えられる。

### 2.5.2 身体各部に作用する力およびトルク

身体各関節の角変位,角速度,および角加速度を求め,各時間における運動 方程式を解くことにより各関節に作用する力とトルクを計算した。図 2.3 7 は このようにして求めた力の中で,足に作用する垂直力と,床反力測定器を用い て測定した床反力を比較したものである。図には参考のため 0.5 秒ごとの動作

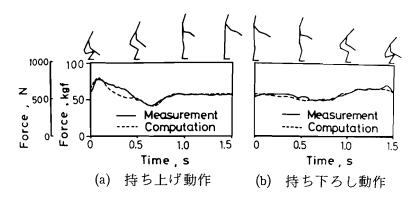


図 2.37 足にかかる垂直床反力

パターンを示している。持ち上げ動作の開始とともに床に大きな垂直力が作用し、慣性の影響で一旦極大値に達した後、反作用で極小値を取ることがわかる。 持ち下ろし動作については、持ち上げ動作に比較して変化する力の大きさは小さいが変化パターンはほぼ同様である。全般的にみて、動作に伴う力の変化は計算値と実測値との間で、比較的よく一致しているものと考えられる。

図2.38は荷物の持ち上げ、持ち下ろし動作について、腰関節、ひざ関節、および肩関節まわりに作用するトルクを計算した結果を示している。ここでトルクの符号は隣接する剛体要素が関節を中心に広がる方向にトルクが作用する場合を正としている。図には参考のため0.5秒ごとの動作パターンを示している。これより持ち上げ動作については、動作開始後にひざと腰に大きなトルクが作用し、その値は荷物がまだ床に近い位置にあるときに最大値をとることがわかる。腰のトルクはその後起立動作の進行に伴って減少し、荷物をテーブルに置くために胴体が前傾する時に再び増加する。持ち下ろし動作についてはほぼその逆の機序をたどっている。

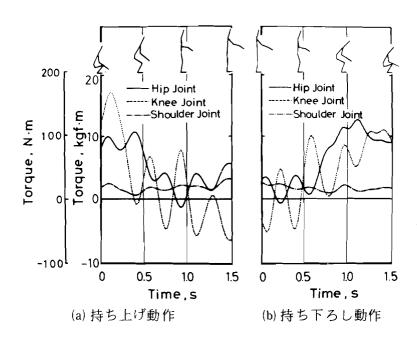


図 2.38 荷役作業動作における腰,ひざ,および肩関節まわりのトルク

図2.39は各関節に作用するトルクの絶対値をそれぞれ持ち上げ動作と持ち

下ろし動作について平均し,比較したものである。図において身体各関節に作用するトルクの内,つま先に作用する値が特に大きいのは,運動方程式の構築において足と床の接触はつま先の一点のみと仮定したためである。持ち上げ動作と持ち下ろし動作について比較すると,つま先と見首のまわりのトルクは持ち上げ動

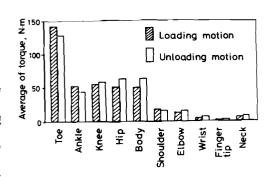


図 2.39 身体各部に作用する平均 トルク

作の方が大きい値を取っている。これは慣性力の影響によるものと考えられる。 一方,ひざ関節,股関節および腰関節まわりのトルクについては持ち下ろし動 作の方が大きい値を取っている。このように持ち下ろし動作において身体の主 要関節のトルクが相対的に大きいのは,先にも述べたように,持ち下ろし動作 においては動作の微妙な制御が要求されるため,相対的に前傾姿勢を取ってい る時間が長く、かつ前傾角が大きくなることによるものと考えられる。

#### 2.6 結 言

人間の運動動作を解析、評価する方法を確立するため、まず人体の数学モデルを構築し、ミニコンピュータとグラフィック・タブレット、グラフィック・ディスプレイ装置からなるデータ処理システムを試作し、動作パターンの解析、評価、ならびに身体各部に作用する力やトルクの計算による定量的な評価を行った。起立・着席動作について若年者から老年者に至る広範な被験者について具体的な検討を行った結果、以下の結論を得た。

- (1) 人体の矢状面内二次元数学モデルを構築し、これが起立・着席動作のような全身の運動動作を解析するには有効であることを確認した。
- (2) グラフィック・タブレットによる運動動作画像のコンピュータへの入力 方法,コンピュータ・グラフィックスを利用した実用的な運動データの処 理と運動パターンの表示法を確立した。
- (3) 椅子からの起立および着席動作に関し以下の点を明らかにした。
  - (a) 起立.着席動作における基本的な動作パターン、機序、各部関節の角度の相関などと加齢の影響を明らかにした。
  - (b) 起立・着席動作において各関節に作用する力とトルクを求め、動作中に目前のテーブルに手をつくことによって腰まわりのトルクが軽減されることを定量的に明らかにした。
- (4) 目前のテーブルに手をついて行う起立・着席動作において、肘を左右に 広げる場合、前額面内の運動を考慮することにより、精度の高い解析が行 えることを明らかにした。

次いで矢状面内の運動に限定した荷物の持ち上げ、持ち下ろし動作を取り上 げて男子被験者について具体的な検討を行った結果,以下の結論を得た。

(5) 荷物の持ち上げ、持ち下ろし動作中に身体各部に作用する力およびトルクを算出し、動作との関連について定量的な検討を行った。

(6) 動作パターンならびに身体各関節に作用する力、トルクの解析を総合して、荷物を持ち下ろす動作は持ち上げる動作に比べて身体各部の微妙な制御と協調を必要とする複雑な運動であることを明らかにした。

# 第 3 章 三次元運動動作解析の方法論

#### 3.1 緒 言

人間の運動動作は一般に三次元空間において行われるものであり,動作を特定の二次元平面に投影し,人体を二次元数学モデルで置き換えて解析を行うことは不可能である場合が多い。例えば手をついて行う起立・着席動作は2.4.4 節で述べたように,一般には,肘の左右への開きを伴う。すなわちこの場合は人体の矢状面内における二次元の動きに前額面内の動きが加わっている。また荷物の持ち上げ持ち下ろし動作では,両脚を広げてかまえるのが普通であり,両肘も左右に広げて作業を行うことが多い。さらに,一般の歩行動作 57),手の作業,38) およびスポーツにおける運動動作 44),45) など日常あるいは労働のあらゆる場において,人間は三次元動作を行っている。

人体の三次元的な運動動作解析,あるいは解析上必要な人体の三次元数学モデルに関しては,これまでいくつかの研究が行われている。しかし,その多くは肘の回転の解析, $^{40}$ )手の機能に関する力学的解析  $^{82}$ )など,身体の局所的な部分を対象としたものが多く,身体全体の運動に関するものはほとんどないと言ってよい。

本章においては、身体全体についての三次元運動動作解析の方法論を確立することを目的としており、まず人体の三次元数学モデルを提案し、それに基づいて運動方程式を構築する。さらにここではこれらの理論的展開を行った後、シネカメラと鏡を用いた三次元動作解析の方法<sup>84)~89)</sup>と、ホログラフィック・ステレオグラムによる三次元動作解析の方法について述べる。

### 3.2 三次元人体数学モデル

### 3.2.1 モデルと座標系の定義

人体の運動を三次元運動としてとらえる場合,得られる情報量は膨大であり, 一方モデルも複雑なものとなるため,従来の研究では身体の部分に関するモデ ルが多く,全身を対象とし,しかも力学的解析まで行った例は少ない。例えば  $Youm^{42}$  や Sommer III  $^{27}$  らは手首の三次元モデルを提案し, $Kinzel^{36}$ , $^{37}$  は関節をはさむ 2 剛体間の運動をモデル化して,肩関節まわりの運動解析に応用している。他に  $An^{82}$  による手の指のモデル, $Chao^{26}$ , $^{40}$  による肘関節のモデル, $Rastegar^{58}$  や  $Hull^{90}$  らによる下肢のモデルなどがある。全身のモデルとしては, $Passerello^{53}$  が身体を 10 の要素からなるモデルで置き換え,宇宙空間における姿勢制御の解析を行っている。また小佐  $^{44}$ , $^{45}$ )は 17 の要素から成るモデルを用いて,機械体操の解析を行っている。これら全身モデルを用いた解析では主に身体各部の関節角と運動との関係を検討しているにすぎない。この他に  $Aleshinsky^{57}$  は 15 の要素から成る人体モデルを提案し,歩行動作の解析において骨格系の関節まわりに作用するトルクを求めている。

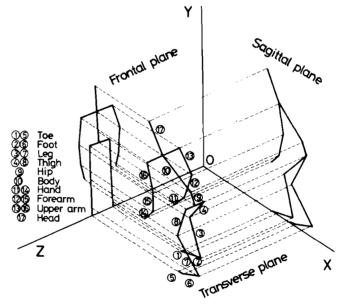


図 3.1 三次元人体モデル

要素は動力学的観点からの貢献はなく、単に要素間の接続関係を示すだけのために導入された要素である。このモデルでは特に足部を中足指節関節で2分割し、足部の運動を詳細に解析できるようにしている。なお図3.1においては参考のため、モデルの矢状面および前額面への投影図もあわせて示している。

身体各部相互の力学的関係を記述するため身体各要素を等価な円柱剛体で近似する。ここで図 3.1 に示すような座標系 O-XYZを静止座標系として定義する。次いで任意の剛体要素 i に対して右手系の運動座標系 o-xyzを定義する。各運動座標系の座標原点は剛体要素の質量中心とし、y軸は剛体要素の長手方向に一致するように定める。さらに z 軸はその要素と隣接する剛体要素が構成する平面に垂直となるように定める。運動座標系の方向を決定するためにオイラー角を導入する。すな

わちオイラー角 $\theta$ ,  $\Psi$ ,  $\theta$ を図8.2に 示すような静止座標系O-XYZに対する運動座標系O-XYZに対する運動座標系o-xyzの回転角として定義する。これより静止座標系を運動座標系に変換するためには,まずX軸まわりに角 $\theta$ だけ回転し,次にx軸まわりに角 $\theta$ だけ回転し,さらにx軸まわりに角 $\theta$ だけ回転すればよい。これより静止座標系における座標(x, y, z)は,次式によって要素に固定した運動座標系における座標(x, y,

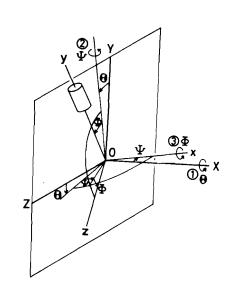


図 3.2 オイラー角の定義

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = (\emptyset)(\Psi)(\Theta) \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}$$

z )に変換することができる。

$$\begin{pmatrix} \mathbf{r} \\ \mathbf{z} \end{pmatrix}$$

ここで[0], [Y],  $[\theta]$ は変換行列であり、以下の形で与えられる。

$$(\emptyset) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & \sin \theta \\ 0 & -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix}$$

$$(\Psi) = \begin{bmatrix} \cos \Psi & 0 & -\sin \Psi \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \Psi & 0 & \cos \Psi \end{bmatrix}$$

$$(\theta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & \sin \theta \\ 0 & -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix}$$

$$(3.2)$$

これらの行列は直交条件が成立するため、逆行列は転置行列となり次式が成立 する。

#### 3.2.2 運動方程式

任意の剛体要素 i に関するニュートンの運動方程式は静止座標系に対して以 下のように定式化される。

り求めることができる。  $M_{x} = I_{xx}\dot{\omega}_{x} + \omega_{y}\omega_{z} \left( I_{zz} - I_{yy} \right)$   $M_{y} = I_{yy}\dot{\omega}_{y} + \omega_{z}\omega_{x} \left( I_{xx} - I_{zz} \right)$   $\vdots \qquad (3.6)$ 

致させているため、外部モーメントの各成分は以下に示すオイラーの方程式よ

 $M_z = I_{zz}\dot{\omega}_z + \omega_x\omega_y (I_{yy} - I_{xx})$ 

ここで、 $M_x$   $M_y$   $M_z$  はそれぞれ運動座標系における x , y および z 軸まわり の外部モーメントの成分を示す。 / は各軸まわりの慣性モーメントであり、円 柱剛体においては以下のように与えられる。

ここで、 $d_{i,r_i,W_i}$ はそれぞれ円柱の直径、長さおよび重量である。 式(3.6)における $\omega$ ,  $\dot{\omega}$ はそれぞれ要素の回転角速度, 回転角加速度であり, オイラー角の微分値で表すと以下のように与えられる。

$$\begin{pmatrix} \omega_{x} \\ \omega_{y} \\ \omega_{z} \end{pmatrix} = ( \emptyset ) ( \Psi ) \begin{pmatrix} \dot{\theta} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} + ( \emptyset ) \begin{pmatrix} \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \dot{\theta} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \\
= ( \pi ) \begin{pmatrix} \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \\ \dot{\theta} \end{pmatrix} \qquad (3.8)$$

ここで,変換行列〔π〕は次式で与えられる。

$$(\pi) = \begin{pmatrix} \cos \Psi & 0 & 1 \\ \sin \Psi \sin \Phi & \cos \Phi & 0 \\ \sin \Psi \cos \Phi & -\sin \Phi & 0 \end{pmatrix} \qquad \dots$$
 (3.9)

これより回転角加速度は以下のように展開できる。

$$\begin{bmatrix} \dot{\omega}_{x} \\ \dot{\omega}_{z} \\ \dot{\omega}_{z} \end{bmatrix} = \frac{d}{dt} \left\{ (\pi) \begin{pmatrix} \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \\ \dot{\varrho} \end{pmatrix} \right\} = (\pi) \begin{pmatrix} \ddot{\theta} \\ \ddot{\psi} \\ \dot{\varrho} \end{pmatrix} + (\pi_{1}) \begin{pmatrix} \dot{\psi} & \dot{\varrho} \\ \dot{\varrho} & \dot{\theta} \\ \dot{\varrho} & \dot{\psi} \end{pmatrix} \cdots (3.10)$$

ここで、変換行列 $[\pi_1]$ は次式で与えられる。

$$(\pi_1) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -\sin\Psi \\ -\sin\theta & \sin\theta\cos\theta & \cos\Psi\sin\theta \\ -\cos\theta & -\sin\Psi\sin\theta & \cos\Psi\cos\theta \end{bmatrix} \qquad \dots$$
 (3.11)

以上より式(3.6)における $\omega$ および $\dot{\omega}$ はオイラー角の微分値で表わされる。従ってオイラー角の微分値が求められれば、外部モーメントMは容易に計算することができる。これより得られるMを式(3.3)に従って静止座標系に変換することにより式(3.5)におけるモーメント $M_i$ が得られる。

運動情報より剛体要素iの加速度,オイラー角,およびその一階,二階微分値を求め,式(3.4),(3.5)を解くことによって,関節に作用する力FおよびトルクTを求めることができる。以下,図3.1における剛体要素番号に従って各部の運動方程式を導く。ただし,ここでは剛体要素1.7(頭),剛体要素1.3(右上腕),剛体要素1.6(左上腕)から伝達される力およびトルクは,

剛体要素 10(胴)に対してのみ伝えられるものと仮定する。

まず上半身における剛体要素11および14に関しては,

剛体要素 12,13 および 15,16 に関しては,

$$F_{i+1,i} - F_{i,i-1} - W_i j = \frac{W_i}{g} a_{G_i} \qquad \dots$$

$$T_{i+1,i} - \ell_i r_i \times F_{i+1,i} - T_{i,i-1} - \ell_i r_i \times F_{i,i-1} = M_i$$
(3.13)

剛体要素17に関しては,

$$F_{10,17} - W_{17} \mathbf{j} = \frac{W_{17}}{g} \mathbf{a}_{G_{17}}$$

$$T_{10,17} - \ell_{17} \, \hat{\mathbf{r}}_{17} \times F_{10,17} = \mathbf{M}_{17}$$
(3.14)

剛体要素10に関しては,

$$F_{9,10} - (F_{10,17} + F_{10,13} + F_{10,16}) - W_{10} j = \frac{W_{10}}{g} a_{G_{10}}$$

$$T_{9,10} - \ell_{10} \hat{r}_{10} \times F_{9,10} - (T_{10,17} + T_{10,13} + T_{10,16}) \qquad \cdots \qquad (3.15)$$

$$-\ell_{10} \hat{r}_{10} \times (F_{10,17} + F_{10,13} + F_{10,16}) = M_{10}$$

剛体要素 9 に関しては,

が成立する。ここで $F_{tu}$ , $T_{tu}$ は上半身と下半身の接合部である股関節を通じて剛体要素 9 (腰)から下半身に作用する力およびトルクであり、式 (3.12)から式(3.16)へ順次解くことによって一意に得られる値である。

次に下半身に関して、床から右足および左足に作用する反力、反トルクをそれぞれ $F_{mR}$ , $T_{mR}$ , $F_{mL}$ , $T_{mL}$ として運動方程式を以下のように導くことができる。すなわち、剛体要素1に関しては、

剛体要素 5 に関しては,

剛体要素 2, 3 および 6, 7 に関しては,

$$F_{i-1,i} - F_{i,i+1} - W_{i} j = \frac{W_{i}}{g} a_{G_{i}}$$

$$T_{i-1,i} - \ell_{i} \hat{r}_{i} \times F_{i-1,i} - T_{i,i+1} - \ell_{i} \hat{r}_{i} \times F_{i,i+1} = M_{i}$$
(3.19)

剛体要素 4 に関しては,

$$F_{3,4} - F_R - W_4 j = \frac{W_4}{g} a_{G_4} \qquad .... \qquad (3.20)$$

$$T_{3,4} - \ell_4 \hat{r}_4 \times F_{3,4} - T_R - \ell_4 \hat{r}_4 \times F_R = M_4$$

剛体要素8に関しては,

となる。ここで $F_{R,T_R}$ は股関節において剛体要素 4 (右大腿)が隣接する他の剛体要素に及ぼす力およびトルクであり, $F_{L,T_L}$ は剛体要素 8 (左大腿) が隣接する他の剛体要素に及ぼす力およびトルクである。これらの値は足部に関する力とトルクを求めた後,連結する剛体要素について順次運動方程式を解くことにより一意に決定される。

### 3.3 シネカメラと鏡を用いた三次元動作解析法

#### 3.3.1 運動動作の三次元計測

運動動作を三次元的に計測し記録する方法として、ゴニオメータによる機械式計測方法がある。 $Chao^{26}$ は肘関節にゴニオメータを用いて、日常動作にお

ける前腕の動きの三次元計測を行っている。この場合 2.3.1 節でも述べたように被験者にとって機械の装着による違和感を伴う他,測定対象が身体の一部分のみに限定される欠点がある。一方,光学式三次元計測はこれまでにもいくつか報告されている。三次元動作を記録する方法としては,一般に二台のカメラを用いることが多く,Aleshinsky  $^{57}$ ),Andriacchi  $^{91}$ )および加藤  $^{92}$   $^{-94}$  らの方法がある。この他,青木  $^{72}$ )は一台のシネカメラを用いて撮影した画像  $^{43}$  情報から,被写体の寸法情報を基に三次元座標情報を求めている。また $^{12}$  と鏡およびプリズムを組合せて,手首の三次元運動を記録している。

本章では、一台のシネカメラと等身大の鏡を用いて、二台のカメラによる二方向撮影と等価な方法で三次元動作の記録を行う方法を採用している。この方法によれば二台のカメラを用いる場合に重要となるカメラ間の同期は不要であり、運動動作を比較的簡単に記録できる点が有利である。シネカメラと鏡を用いる方法においてはまず、人体の矢状面像あるいは前額面像のいずれかを鏡に映し、被験者とその鏡像を同時にカメラで撮影する。この場合、通常鏡に映した像は直接撮影した像より小さく写るため、カメラ、被験者および鏡の位置関係より得られる補正値を鏡の像情報に乗じて補正する必要がある。また、カメラによる像は中心投影によって結像するものであるから、カメラより遠方に位置するものほど見かけ上光軸に近づいて写る。これはカメラの光軸からの俯角や仰角を用いて補正を行うことが可能である。

被験者の矢状面および前額面における画像情報から解析に必要な身体各部の 座標を入力するにあたっては、フィルムの画像を1こまごとにグラフィック・ タブレットに投影し、2.3.2節で述べた方法に基づいて各面における人体の特 徴点の位置座標を計測している。これより得られた各面の座標データに上記の 補正を行い、整合を行うことにより三次元座標の時系列データが得られる。以 後の三次元動作解析においては、この三次元座標を基礎データとして用いてい る。

# 3.3.2 コンピュータ・グラフィックスによる三次元像の再生

人体の運動動作を計測して得られた身体各部の三次元座標情報に基づいて,動作の再現を行うことは動作解析を行う上で,また入力データの検証を行う上で重要な問題である。ここでは三次元運動動作をコンピュータ・グラフィックスによってCRT上に再生表示する方法について述べる。動作の再生にあたっては,三次元運動が容易に認識できるように,視点を任意に変えうるような方法を確立する。そのためにここでは,三次元の動作

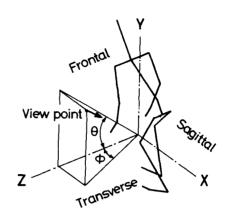


図 3.3 動作パターンの三次元 表示と視点の関係

パターンを二次元のCRT画面上に対応させる軸測投影法  $^{95)}$  を用いる。すなわち図 3.3 に示すような視点からのパターンを得るには三次元座標 (X,Y,Z) を以下の式で変換する。

$$\begin{pmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta & -\sin\theta \\ 0 & \sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos\phi & 0 & -\sin\phi \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\phi & 0 & \cos\phi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} \dots (3.22)$$

これより得られる(X',Y')を CRT上の座標系に対応させることによって,人体の側方から視点を左右方向に $\phi$ ,上下方向に $\theta$ だけ回転した方向に視点を置いた図形が得られる。

### 3.3.3 重心位置の算出

運動動作中における人体の重心移動軌跡を求めることは, 2.3.4 節で述べたように動作解析の一手法としてその持つ意義は大きい。ここでは二次元モデルにおいて導出した人体の重心位置の算出式を拡張し,人体の三次元モデルにおける場合の式を記述する。すなわち各剛体要素の中心の座標を(  $x_{G_i}$  ,  $y_{G_i}$  ,  $z_{G_i}$  )(  $i=1,\ 2,\ \cdots,\ 17$ )とすれば求める重心座標(  $x_{G_i}$  ,  $y_{G_i}$  ,  $z_{G_i}$  )は

次式で与えられる。

$$X_{G_{i}} = \sum_{i=1}^{17} W_{i} x_{G_{i}} / \sum_{i=1}^{17} W_{i}$$

$$Y_{G_{i}} = \sum_{i=1}^{17} W_{i} y_{G_{i}} / \sum_{i=1}^{17} W_{i}$$

$$Z_{G_{i}} = \sum_{i=1}^{17} W_{i} z_{G_{i}} / \sum_{i=1}^{17} W_{i}$$

$$Z_{G_{i}} = \sum_{i=1}^{17} W_{i} z_{G_{i}} / \sum_{i=1}^{17} W_{i}$$
(3.23)

#### 3.3.4 運動方程式の解法

運動方程式を解くためには、基礎データとして身体形状データ、身体各要素の重心位置の加速度、オイラー角の角速度および角加速度が必要である。ここで速度、加速度は 2.3.3 節で述べたように、もとの時系列にあてはめた三次のスプライン関数より求めている。

運動方程式は頭部と上肢の剛体要素から順に解くことができるが,股関節に作用する力とトルクを左右の大腿へ配分する量が決まらないため,下肢に関する運動方程式を純粋に理論的に解くことはできない。このため,まず,二台の荷重計を用いて測定した足部の力とトルクを代入することにより各時間において左右の大腿に作用する力とトルクを求め,その左右の値の比を股関節からそれぞれ左右大腿へ作用する力とトルクの分配比として用いることとした。この比に基づいて改めて下肢の運動方程式を解くことにより足部に作用する力とトルクを理論的に求める。このようにして求めた値には測定値そのものは含まれず,計算値と測定値を比較することによって,求めた解の絶対値を検証することができる。

3.2.1節で定義したオイラー角を実際に求めるにあたっては,まず運動座標系を求めなければならない。図 3.4 は代表的な円柱要素に対して定められる運動座標系の軸を示している。 3.2.1節で述べたようにここでは運動座標軸は,円柱の長手方向をy軸とし,隣接要素との間で形成する平面に垂直な方向をz軸と定めている。さらに運動座標系を右手系と定義していることから,y軸お

よび z 軸の静止座標系に対するそれ ぞれの方向を示す単位ベクトル y = ( $y_1,y_2,y_3$ )および z = ( $z_1$ ,  $z_2,z_3$ )を用いて x ( $x_1,x_2,x_3$ ) は次式に示す外積によって求められ る。すなわち,

 $\mathbf{x} = \mathbf{y} \times \mathbf{z}$  ……… (3.24) ここで、 $|\mathbf{x}| = |\mathbf{y}| = |\mathbf{z}| = 1$  としている。

以上の運動座標系を用いて以下に オイラー角の導出を行う。今,静止

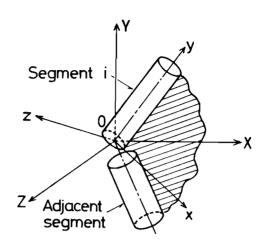


図 3.4 静止座標系と剛体に固定された運動座標系の関係

座標系における任意の単位ベクトルを $\mathbf{P}=(p_1,p_2,p_3)$  とすれば、 $\mathbf{P}$  を軸 96) として反時計回りに入だけ回転するときの変換行列は次式のように与えられる。

$$(\mathsf{R}_{\lambda}, \mathsf{P}) = \left( \begin{array}{ccccc} p_{1}^{2} v \lambda + c \lambda & p_{1} p_{2} v \lambda - p_{3} s \lambda & p_{1} p_{3} v \lambda + p_{2} s \lambda \\ p_{1} p_{2} v \lambda + p_{3} s \lambda & p_{2}^{2} v \lambda + c \lambda & p_{2} p_{3} v \lambda - p_{1} s \lambda \\ p_{1} p_{3} v \lambda - p_{2} s \lambda & p_{2} p_{3} v \lambda + p_{1} s \lambda & p_{3}^{2} v \lambda + c \lambda \end{array} \right) (3.25)$$

である。オイラー角の定義より、y軸をx軸まわりに-0回転すれば、y軸は Y2平面に重なる。従って次式によって与えられるy'のX成分はOである。 すなわち、

$$\emptyset = \tan^{-1} \frac{y_1}{x_2 y_3 - x_3 y_2} \qquad \dots$$
 (3.28)

が得られる。同様に、x 軸を y'軸まわりに $-\Psi$ 回転すれば、x 軸は X 軸 と 一致する。従って

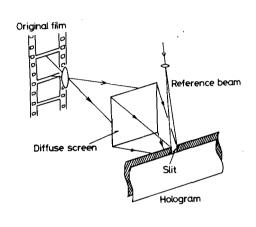
### 3.4 ホログラフィック・ステレオグラムによる三次元動作解析法

### 3.4.1 ホログラフィック・ステレオグラムの原理

従来の三次元動作解析においては運動動作の再生,動作パターンの表示に映写機やCRTなどを用いており,このため得られた像はあくまでも二次元像であって,実物がもつ三次元情報の多くを逸したものであった。ここでは人体の運動動作を動的に連続して,しかも三次元的に再生を行うために用いたホログラフィック・ステレオグラムの原理を述べる 97),98)。

従来の写真は被写体の像をレンズを通してフィルム上に結像させ光の明暗を記録するもので、平面的な二次元像を再現するものであるが、ホログラムは三次元像すなわち立体的な像を空間に再現することができる。一般にホログラムは、2 つに分けたレーザー光の一方を物体に照射し、それからの反射光と他方(参照光)との干渉縞を記録した一枚のフィルムである  $99) \sim 101$ )。これに対し、本章で扱うホログラフィック・ステレオグラムは、被写体を直接ホログラムに記録するのではなく、以下の方法によって作製される。すなわち、(1)一台のシネカメラを用いて、視点を連続に変化させ複数の写真を撮影する。(2)得られた原画フィルムの像を、図 3.5 に示すように 3.5 mm 幅のホログラムに変換し、3.5 こま毎に露光位置がずれた縦方向のすじ状ホログラムの集合体を作製する。(3)帯

状のホログラムを円筒状にして、図3.6に示すような円筒型ホログラフィック・ ステレオグラムが作製される。



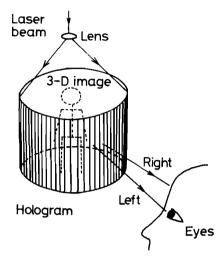


図 3.5 ホログラフィック・ステレオ グラムの作製原理

図 3.6 円筒型ホログラフィック・ステレオグラム

このようにして得た円筒状のホログラフィック・ステレオグラムの内側からレーザー光を照射することによって、個々のすじ状ホログラムは二次元像を再生するが、それぞれ異なった方向からの像を再生するため、両眼で見れば水平視差が生じて像は立体像として認識される。原画撮影時に被写体が動けば各すじのホログラムは少しずつ違った動きを記録するため、再生時に円筒を回転させることによって運動を再現して見ることが可能となる。

二方向からのフィルム情報があれば,三次元情報すなわち物体点の三次元座標は理論的に以下のようにして求めることが可能である<sup>91)</sup>。すなわち,今,図3.7に示すような2台のカメラを想定し,それぞれのカメラのフィルム情報より物体点の三次元座標を抽出する。図には二台のカ

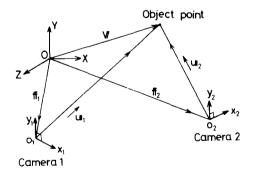


図3.7 二台のカメラと物体点の 位置関係

メラと物体点および静止座標系の原点の位置関係を示している。カメラ 1 および 2 の位置ベクトルをそれぞれ  $\mathbf{f}_{1}$ ,  $\mathbf{f}_{2}$ , カメラ 1, 2 から物体点に 向かう単位ベクトルをそれぞれ  $\mathbf{u}_{1}$ ,  $\mathbf{u}_{2}$  とすれば、物体点の位置ベクトル  $\mathbf{v}_{1}$ ,  $\mathbf{v}_{2}$  は以下の式で与えられる。

$$v_1 = f_1 + a_1 u_1$$
 (3.33)

ここで、 $a_1$ , $a_2$  はそれぞれのカメラと物体点の間の距離である。 $f_1$ , $f_2$  は実 測可能であり、 $u_1$ , $u_2$  は物体点とその像の位置関係より求めることができることから、距離  $a_1$ , $a_2$  が定まれば  $v_1$ , $v_2$  が求められる。ここで  $v_1$  と  $v_2$  は本来一致するものであるが、 $v_1$ , $v_2$  の終点間距離を最小にすることによって 未 知数  $a_1$ , $a_2$  を決定する。すなわち、

 $\varepsilon = \mathbf{v}_1 - \mathbf{v}_2 = \mathbf{f}_1 - \mathbf{f}_2 + a_1 \mathbf{u}_1 - a_2 \mathbf{u}_2$  ……………………… (3.35) とおき,次式で与えられるE が最小となるようにする。すなわち,

$$E = \varepsilon \cdot \varepsilon = a_1^2 + 2 a_1 u_1 (f_1 - f_2) - 2 a_1 a_2 u_1 u_2 + 2 a_2 u_2 \cdot (f_2 - f_1) + (f_2 - f_1) \cdot (f_2 - f_1) + a_2^2 \dots (3.36)$$

ここでEは以下の場合に最小となる。 すなわち

$$\frac{\partial E}{\partial a_{1}} = a_{1} - u_{1} \cdot (f_{2} - f_{1}) - a_{2} u_{1} u_{2} = 0$$

$$\frac{\partial E}{\partial a_{2}} = a_{2} + u_{2} (f_{2} - f_{1}) - a_{1} u_{1} u_{2} = 0$$

$$(3.37)$$

式 (3.27) で与えられる連立方程式を解くことによって, $a_{1,a_2}$  は以下のように求められる。

$$a_{1} = \frac{u_{1} \cdot (f_{2} - f_{1}) - \{u_{2} \cdot (f_{2} - f_{1})\}(u_{1} \cdot u_{2})}{1 - (u_{1} \cdot u_{2})^{2}}$$

$$a_{2} = \frac{\{u_{1} \cdot (f_{2} - f_{1})\}(u_{1} \cdot u_{2}) - u_{2} \cdot (f_{2} - f_{1})}{1 - (u_{1} \cdot u_{2})^{2}}$$
...... (3.38)

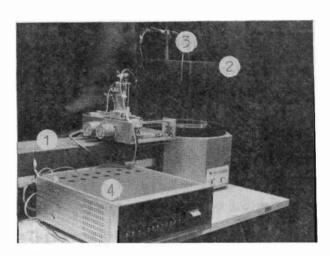
これより、物体点の三次元座標は最終的に以下の式で与えられる。

$$v = (v_1 + v_2) / 2$$
 ..... (3.39)

# 3.4.2 三次元動作解析

ホログラフィック・ステレオグラムによる動作解析は、動的な立体像を直接両眼で見ることによって行う。図 3.8 は円筒型ホログラフィック・ステレオグラムの再生装置と三次元座標測定装置を示している。図中の①は He-Ne レーザー装置であり、出力は 50 mW である。すじ状ホログラムが集合した 一枚のホログラムを直径 40 cm の透明な円筒②に巻きつけ、内側からレーザー光を照射することによって三次元再生像が円筒内に浮かび上がる。再生された像から

三次元位置情報を抽出する ため,三次元座標測定装置 (4)を用いる。再生像の任意 の点を指示するための棒(3) の先端には赤いレーザー光 に対して補色である緑の豆 球が付けられ,点を指示し やすくしている。また指示 棒は3つのステップモータ - によって, X, Y, Z 三 方向に自由に移動し得るよ うになっており、装置④は ステップモーターに送った パルス数を計数して, X, Y, Z方向の座標値をプリ ンタにより出力するように なっている。



- He − Ne レーザー
- ② 透明円筒
- ③ 標点指示棒
- ④ 三次元座標出力装置

図 3.8 ホログラム再生装置および三次 元座標測定装置

# 3.5 結 言

本章では自由度の大きい運動動作を解析するため、人体に関する三次元数学

モデルを構築し、その運動方程式を導出した。さらに三次元動作解析を行うに あたって、シネカメラと鏡を用いる場合およびホログラフィック・ステレオグ ラムを用いる場合を取り上げ、それぞれの場合の解析に用いる理論および方法 論を展開した。その結果、以下の結論を得た。

- (1) 人体の三次元数学モデルを構築し、これによって三次元運動動作の詳細な解析を行う方法を明らかにした。
- (2) 人体の運動動作から身体各部の三次元情報を抽出する方法並びに身体各部に作用する力およびトルクを推定する方法を確立した。
- (3) 三次元コンピュータ・グラフィックスを利用して人体の動作パターンを 表示する方法を確立した。
- (4) ホログラフィック・ステレオグラムの原理およびそれに基づく三次元動 作解析の方法を明らかにした。

# 第 4 章 三次元運動動作の解析

#### 4.1 緒 言

前章においては三次元運動動作解析を行う上で必要な人体の数学モデルと運動方程式の構築を行い、三次元運動動作解析の方法論を展開した。ここでは実際の三次元運動動作について実験を行い、前章で述べた方法に基づいて解析を行う。運動動作としては、まず荷物の持ち上げ持ち下ろし動作 <sup>84) ~89)</sup>並びに垂直眺び動作を取り上げ、実験より得られた身体各部の三次元情報をもとにコンピュータ・グラフィックスを利用して動作パターンの解析を行う。さらに動作に伴う身体各部の速度、加速度を求め、運動方程式を解くことによって各部に作用する力およびトルクを計算し、疲労や加齢が人体に及ぼす影響並びに動作特性などについて検討を行う。次いで荷物の持ち上げ持ち下ろし動作に対して、ホログラフィック・ステレオグラムを作製するための原画撮影実験を行う。これより得られるホログラムを用いて動的な立体像の再生を行い、それに基づいて動作の解析を行う。ここではさらに再生された像から三次元位置情報を抽出する上での測定誤差についても検討を行う。

#### 4.2 荷役作業動作実験

#### 4.2.1 実験装置および実験方法

解析を行う運動動作として,ここでは両足を前後左右に開いた状態で,床と目前のテーブル(高さ  $0.75\,\mathrm{m}$ )間で荷物を上げ下ろしする動作を取り上げた。荷物の重さは  $5.5\,\mathrm{kg}$  である。動作回数は  $70\,\mathrm{em}$  回で, $1\,\mathrm{em}$  回の持ち上げ持ち下ろし動作に要する時間は一定とし,以下のように動作時間を指定した。実験中被験者には一定時間間隔でブザーを鳴らして動作時間を指示した。ここで指定した時間は腰をかがめてすわり込んでいる姿勢から始まって,目前の床の上にある荷物に手を届かせるまでの時間が  $1\,\mathrm{em}$  がの手を離して直立姿勢に至るまでの時間が  $1\,\mathrm{em}$  を

荷物を下ろす時は、その逆の順序を同一の時間で行うようにした。

作業動作の記録には16ミリ高速度シネカメラを用いた。図4.1に被験者と 実験装置の概要を示す。ここでは,

3.3.1節で述べたように身体各部の 三次元情報を得るため、被験者の側 方から動作を撮影すると同時に、被 験者の目前に配置した等身大の鏡 (1.18m×1.78m) によって被験 者の正面像を直接フィルムに記録し た。被験者とカメラの間の距離は、 7.72mで、カメラの高さは0.97 m である。鏡は前額面内における被験 者の正面像が撮影できるように配置

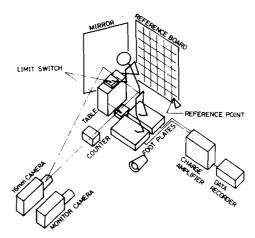
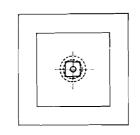


図 4.1 実験装置の概要

している。またカメラと対向する被験者の後方に100mm×100mmの格子を表示した参照板を置き、フィルムに記録した。円錘形の参照点は座標の原点として用いている。図4.1におけるカウンタはマイクロコンピュータの制御によって、被験者に動作のテンポを指示するブザー音を発すると共に、被験者が行



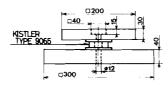


図4.2 テーブル反力測定用 荷重計

った動作回数を表示する。また,運動動作の モニタ用として T V カメラも同時に使用して いる。作業動作の撮影と同時に,二次元動作 解析で使用した 2 台の荷重計を用いて両足の それぞれに作用する床反力および反トルクの X, Y, Z三成分を測定し,データレコーダ ーに収録している。計測装置の仕様は付録3 に示す。さらに被験者がテーブルに荷物を置 いたときにテーブルから両手に作用する反力 を測定するため,図42に示すような荷重計 を製作して用いている。荷物を所定の位置に

身体各部に対応する等価な 円柱要素の直径および長さは, 基本的に二次元解析の場合と 同様にして定め,一部排水法 による検証も行った。図43 は身体各部の測定箇所と等価 な円柱の直径,重量を算出す る式を示している。ここで, 身体各部の比重はいずれも1 g/cm³と仮定している。

# 4.2.2 実験データの処理

16ミリフィルムに記録された作業動作の画像から必要な運動情報を抽出する方法と

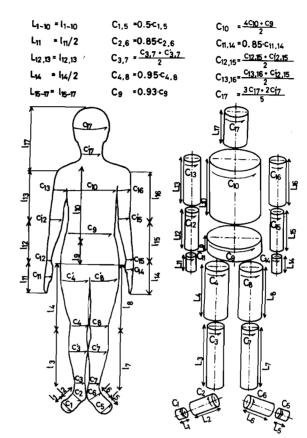


図 4.3 身体各部の測定箇所と身体各要素 の形状

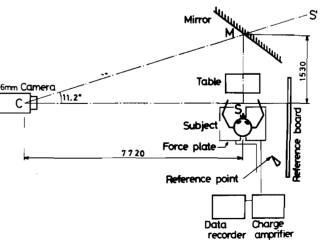


図4.4 実験配置図

しては、グラフィック・タブレットを利用し、まず人体の前額面と矢状面のそれぞれから身体各部の二次元座標をミニコンピュータに入力した。次いで前額面と矢状面のデータの整合を行うことにより三次元座標の時系列データを求めた。この場合、画像上の二次元情報からもとの三次元座標情報を得るために以下の二種類の補正を行った。

まず前額面と矢状面の像は図4.4に示すようにカメラと被写体との間の距離 が異なるため、それらの座標データは違った尺度をもっている。従ってまず前 額面の座標データに関して以下の補正係数をかけることによる修正を行う。す なわち

$$CS'/CS = (CM+MS)/CS \qquad \dots \qquad (4.1)$$

ただし上式中の記号は図 4.4 に示すとおりである。

次に、本実験では矢状面の 画像は人体の左側方から撮っ たものであり、中心投影では カメラから離れた位置にある 物体ほど見かけ上光軸に近づ くという点を考え合せれば、 身体右側の座標データはカメ ラからの距離が異なるための 誤差が含まれることになる。

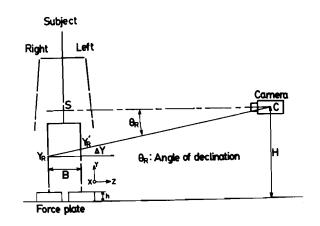


図 4.5 俯角と測定誤差の関係

図4.5は右ひざのY座標値を

例にとって、上述の誤差とひざに対する俯角の関係を示したものである。図中の $Y_R$  は右ひざの真のY座標値であるが、フィルムからは $Y_R$  を読み取ることになる。ここでは誤差 $\Delta Y$ を以下の式で求めることによって補正を行う。 すなわち、

$$\Delta Y = B \tan \theta_R$$

$$= B \left( H - h - Y_R' \right) / \left( C S - \frac{1}{2} B \right) \qquad \cdots \qquad (4.2)$$

以上によって得られた三次元座標の時系列データに対してディジタルローパスフィルタリングによる平滑化処理を施した。使用したフィルタは、2章における二次元解析の場合と同様であり、フィルタの係数はサンプリング間隔 $\Delta T = 1/45.8$ 秒に対し、遮断周波数が2.28 Hzとなるように定めた。遮断周波数の選定方法およびフィルタの係数を付録4に示す。床およびテーブルからの反力の測定値は16ミリフィルムに同期させたイベントマークを参照して、1/45.8 秒間隔で読みとり、コンピュータに入力した。この場合も運動方程式を解くに先立ち時系列データにディジタルフィルタリング処理を施して平滑化している。

# 4.2.3 被験者の属性

実験は21歳から56歳までの男子被験者7名に対して行った。動作実験に 先立ち各被験者について体重,身長,胸囲,腰まわり,足の大きさなどの項目 について身体測定を行い,同時にシルエット写真を正面と側面から撮影した。 身体各部に対応する等価な円柱要素の直径,長さ,重量および慣性モーメント

表 4.1 身体各剛体要素の円柱形状と重量(被験者番号 2, 23歳)

Segment Diameter		Length	Weight (N(kgf))		Inertia Tensor (kgm²)	
	(m)	(m)	Estimation	Measurement	Jxx,Jz2	Јуу <u>*10<sup>-4</sup></u>
1	0.0414	0.083	0.98 ( 0.10)	1.08 ( 0.11)	0.07	0.02
2	0.0703	0.180	6.86 ( 0.70)	7.35 ( 0.75)	2.15	0.43
3	0.0923	0.390	25.89 ( 2.64)	24.91 ( 2.54)	35.58	2.81
4	0.1512	0.340	56.29 ( 5.74)	60.80 ( 6.20)	64.79	16.40
5	0.0398	0.085	1.08 ( 0.11)	1.18 ( 0.12)	0.08	0.02
6	0.0703	0.180	6.86 ( 0.70)	7.16 ( 0.73)	2.15	0.43
7	0.0928	0.390	25.60 ( 2.61)	25.01 ( 2.55)	35.19	2.81
8	0.1467	0.350	61.59 ( 6.28)	70.61 ( 7.20)	74.04	16.89
9	0.2220	0.130	49.33 ( 5.03)	49.03 ( 5.00)	23.04	30.99
10	0.2718	0.410	233.40 (23.80)	241.24 (24.60)	452.33	219.78
11	0.0709	0.100	3.92 ( 0.40)	3.92 ( 0.40)	0.47	0.25
12	0.0672	0.225	7.16 ( 0.73)	7.16 ( 0.73)	3.35	0.41
13	0.0891	0.285	16.48 ( 1.68)	16.38 ( 1.67)	12.45	1.67
14	0.0717	0,100	3.82 ( 0.39)	3.92 ( 0.40)	0.46	0.25
15	0.0645	0.235	8.14 ( 0.83)	7.45 ( 0.76)	4.12	0.43
16	0.0867	0.290	16.48 ( 1.68)	16.48 ( 1.68)	12.82	1.58
17	0.1575	0.265	50.60 ( 5.16)	52.96 ( 5.40)	38.98	16.00

を求めた結果の例を表 4.1 に示す。ここで重量は、円柱の体積より推定した値と排水法により測定した値を示している。次いで 7名の被験者に対して身体各部を円柱で近似して推定した体重と実測した体重を表 4.2 にまとめて示す。これより実測値と推定値の平均誤差は 1.76%であり、身体各部を円柱形状の剛体要素で近似した本手法はほぼ妥当であると考えられる。なお以後、被験者番号は表 4.2 に示すものと一致させて用いる。

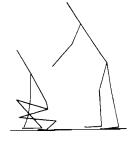
表 4.2 体重の実測値と身体各部の円柱近似に基づく体重の推定値

Subject	Age	Height	Weight (N(kgf))		Error
#	(Years)	(m)	Measurement	Estimation	(%)
1	21	1.718	544.3 (55.50)	536.1 (54.67)	-1.51
2	23	1.706	585.0 (59.65)	574.9 (58.62)	-1.72
3	41	1.773	791.4 (80.70)	795.1 (81.08)	+0.47
4	42	1.686	593.3 (60.50)	622.9 (63.52)	+4.99
5	52	1.721	730.6 (74.50)	753.6 (76.85)	+3.14
6	53	1.604	568.8 (58.00)	569.0 (58.02)	+0.04
7	56	1.588	575.7 (58.70)	572.9 (58.42)	-0.49
Average					1.76

## 4.2.4 動作パターン

運動動作の画像情報から身体各部の三次元座標情報を抽出するに先立ち、 4.2.2 節に示す補正を行った。

実験からまず式(4.1)で与えられる補正係数として1.21が得られた。次いで矢状面内における右足の誤差の補正を行った。図4.6はこの場合の補正の効果を示すもので,図(a)は矢状面内で測定されたもとの座標データに基づいて,ある瞬間における動作パターンを骨格線図の形で



(a) 補正前



(b) 補正後

図 4.6 矢状面内における右足の誤差の 補正

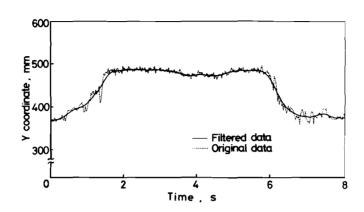


図 4.7 原データとディジタルフィルタリング処理を施したデータ (右ひざ、Y座標値、42歳)

再現した結果を示している。 この場合右足の方が見かけ上光軸側, すなわち上方に浮き上がった形でとらえられていることがわかる。 これに対し式(4.2)より与えられる補正値に基づいて得た骨格線図が図(b)であり, 補正を施すことにより正しい平行投影による像が得られることが認められる。

以上の2種類の補正を行った後,矢状面内の像の水平方向成分をX座標,垂直方向成分をY座標,さらに前額面内の像の水平方向成分をZ座標として採用することにより,静止座標系における三次元座標の時系列データを得た。図4.7はこうして得られた座標データのうち,右ひざのY座標値を例にとってその時間的変化を示したものである。図中の破線はグラフィック・タブレットにより入力した原データを示しており,一方実線は,原データにデイジタル・フィルタリング処理を施した結果を示している。これより手を介した入力による細かなばらつきが認められるが,フィルタリング処理により原データに含まれる細かな凹凸がならされ,データの平滑化が行われていることが認められる。

図 4.8 はスプライン関数による補間を利用して、剛体重心の加速度を求めた結果を示す。ここでは例として右大腿の重心の加速度を取り上げている。この場合、スプライン関数を求める上での再サンプリング間隔は 0.22 秒としている。図より右大腿の重心は X 、 Y 、 Z 三方向にほぼ同じ大きさの加速度成分をもつことが認められる。

剛体要素の方向を表わす すイラー例として がおれて がおれて がおれて がいて がいて がいて がいて がいて がいて がいない がい がいない が

実験で取り上げた男子被 験者 7名の荷役動作につい て三次元運動動作解析を行 い,得られた結果から動作 特性を抽出して作業特性並 びに疲労や加齢の影響につ いて検討を行った。解析は 各被験者に対する 7 0 回の 動作のうち表 4.3 に示す回 数の動作を取上げて行った。

動作パターンの解析としては,まず得られた身体各部の三次元座標値を基に骨

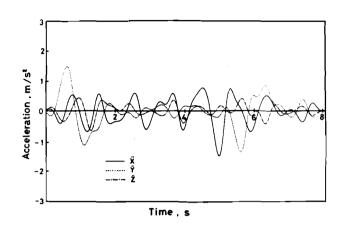
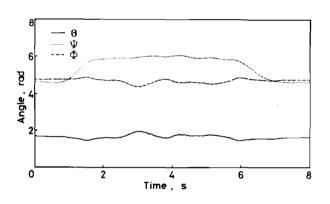
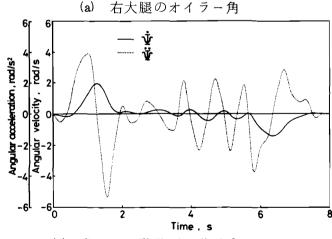


図4.8 剛体重心の加速度の例 (右大腿, 23歳)





(b) 角¥の一階及び二階微分

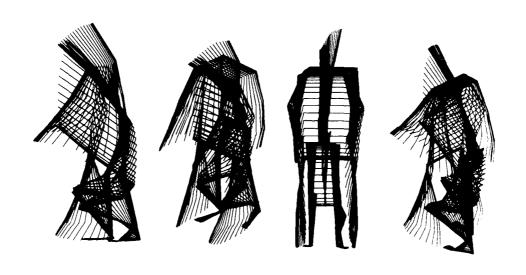
図 4.9 荷役作業動作に伴うオイラー角変化の 例(41歳)

格線図の形で荷役作業動作を再現し、グ 表4.3 解析を行った動作回数 ラフィック・ディスプレイ上に表示して 検討を加えた。図4.10は軸測投影法に より違った視点から荷役作業動作を再生 表示した例である。ここでは、足元の荷 物を持ち上げ、目前のテーブルに荷物を 置くまでのパターンを同じ位置に重ね描 きして示している。図には、3.2.2節で

Subject No.	Age	Cycle of motion
1	21	40_
2	23	1,20,40,70
3	41	40
4	42	40
5	52	40
6	53	40
7	56	1,20,40,60

述べた角度を用いて視点の方向を示している。CRT上ではこのようなパター ンの再生を動的に行いアニメーション動画として得るようになっている。これ より入力した三次元座標データの目視による検証を行うことができるばかりで なく、動作パターンの詳細な解析を行うことができる。

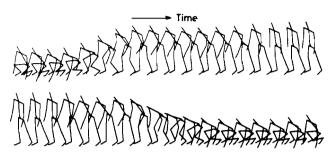
また, 図 4.1 1 は動作パターンの時間的変化を示すため, 0.2 2 秒間隔の骨 格線図をCRT上に再生表示した例である。同図(a),(b)はそれぞれ視点を被験 者の斜め前方および斜め後方に設定した場合の動作パターンを示している。



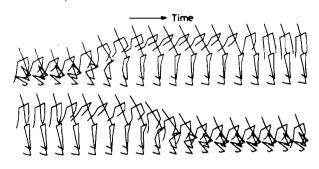
(a)  $\phi = 0^{\circ}$ ,  $\theta = 0^{\circ}$  (b)  $\phi = -45^{\circ}$ ,  $\theta = 30^{\circ}$  (c)  $\phi = -90^{\circ}$ ,  $\theta = 0^{\circ}$  (d)  $\phi = 45^{\circ}$ ,  $\theta = 30^{\circ}$ 

図 4.10 荷役作業動作パターン(動作サイクル 40回目, 41歳)

いずれの図においても骨格 線図の左から右へ時間が経 過している。ここで特に頭 頂の軌跡に注目すると,荷 物の持ち上げ動作に比較し て持ち下ろし動作の方がゆ るやかな曲線を描いており, 動作時間を指定したにもか かわらず持ち上げ動作に比 べて動作が緩慢になってい ることが認められる。また 持ち上げ動作と持ち下ろし 動作とで頭部の傾斜度が異 なっており,動作の違いに 応じて頭は微妙に相違した



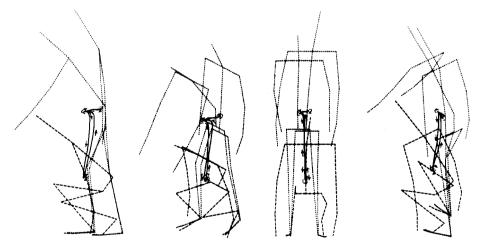
 $\phi = -45^{\circ}$ ,  $\theta = 30^{\circ}$ 



(b)  $\phi = 4.5^{\circ}$  ,  $\theta = 3.0^{\circ}$ 

図 4.11 荷役動作パターンの時間変化 (動作サイクル1回目,23歳)

動きをすることが認められる。このように作業動作の三次元ディスプレイを用



(a)  $\phi = 0^{\circ}$ ,  $\theta = 0^{\circ}$ 

(b)  $\phi = -45^{\circ}$ ,  $\theta = 30^{\circ}$  (c)  $\phi = -90^{\circ}$ ,  $\theta = 0^{\circ}$  (d)  $\phi = 45^{\circ}$ ,  $\theta = 30^{\circ}$ 

図 4.12 重心移動軌跡(年齢 4 1 歳)

いて解析し、検討を行うことは作業者の行動を重要視した作業設計に大いに役立つものと考えられる。

図4.1 2 は各時間ごとに作業動作中の人体の重心位置を算出し、その時系列データを重心移動軌跡として三次元的に表示した例である。図4.1 2 (a)(b)(c)(d) はそれぞれ視点を左側方、斜め前方、正面、および斜め後方に設定した場合のパターンを示している。図中の破線は持ち上げ動作開始直前の姿勢を示している。また点線は持ち上げ動作を完了した時点と、次の持ち下ろし動作に移行する直前の姿勢を示している。これらより重心位置は身体の左右方向にはほとんど移動しておらず、矢状面内では持ち上げ持ち下ろし動作のいずれの場合も重心軌跡はほぼ直線的であることが認められる。このことはここで取り上げた荷役動作が重心の安定したものであり、作業として安全なものであることを示唆している。このように重心移動軌跡は作業動作中の安定性を検討する場合に重要な要因となる。

荷役動作の回数が増すにつれて重心移動軌跡がどのように変化するかを調べた。図4.13は23歳の被験者について異なった動作回数における重心移動軌

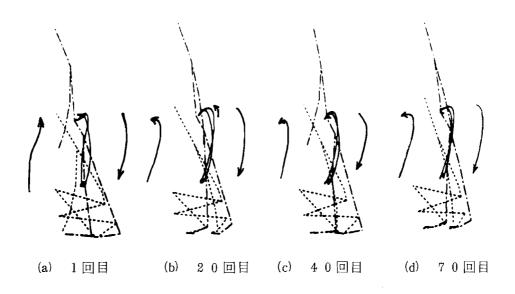


図 4.13 重心移動軌跡の動作回数による変化 (年齢 2.3歳)

跡を求めた結果を示す。ただし、ここでは矢状面内における重心移動軌跡のみ を示している。図中の点線および一点鎖線はそれぞれ持ち上げおよび持ち下ろ し動作開始直前の姿勢を示している。これよりいずれの場合も、目前のテーブ ルに荷物を置くとき,あるいはテーブルから荷物を取るときに重心が身体の前 方へ大きく移動しており、身体の重心位置は荷物の位置に直接関係しているこ とがわかる。図中の重心軌跡を比較すると、第1回目の動作では荷物の持ち上 げ動作において荷物を身体の前方に保持しながら起立していることが認められ る。これは荷物を持った腕を前に突き出した状態で持ち上げ動作を行っている ことを意味しており、荷物の持ち上げに対して腕力の寄与が大きい。これに対 して第20回目の動作では、持ち上げ時の重心位置が第1回目の動作の場合に 比べて後方,すなわち体幹近くへ移動していることがわかる。これは,回を重 ねるに従って腕の疲労が生じ、荷物を体幹に近づけることによって腕にかかる 負荷を小さくしようとする現われであると考えられる。第20回目以降の動作 では重心移動軌跡に顕著な差異は認められないが、いずれも持ち上げ時と持ち 下ろし時における身体の重心はほぼ同様の軌跡を描き、安定した無理のない動 作で作業を行うようになっていることがわかる。

作業動作の特性として,動作に 要する時間および荷物の移動速度 を求めて検討を加えた。図4.14 は被験者2番(23歳)と7番 (56歳)について実際に持ち上 げ動作と持ち下ろし動作に要した 時間を動作回数別にまとめたもの である。実験においては荷物の持 ち上げ持ち下ろし動作時間が各2 秒となるようにブザーを鳴らして 被験者に知らせたにもかかわらず, 動作時間が回数とともに変化して

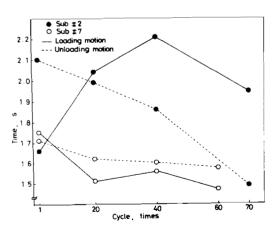


図 4.14 荷物の持ち上げ持ち 下ろしに要する時間 と動作回数の関係

いることが認められる。特に 持ち下ろし動作では両被験者 とも回数が増えるに従って短 い時間で作業を終える傾向が ある。これは回数が増すにつ れて次の動作を開始するまで の休憩時間を長くとろうとす る意識の現われであると考え られる。図4.1.5 は動作中に おける荷物と頭頂の絶対速度

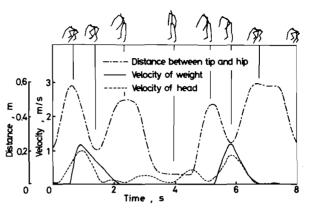
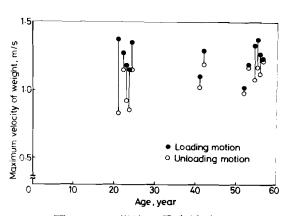


図 4.15 荷物と頭頂の絶対速度および指先と腰の 間の距離の時間変化の例(被験者年齢 53歳)

および指先と腰の間の距離が動作時間とともにどのように変化するかを示した 例である。図中の一点鎖線は動作中における手の指先と腰の間の距離を示して いる。荷物を持っているときは、指先の位置は荷物の位置と考えてもさしつか えない。初め床にある荷物に手を届かせるために手は腰から離れ、荷物を取っ た時点から手は再び腰の方へ近づき、立ち上がる動作の途中で荷物と腰の距離 は最小値をとることがわかる。持ち下ろし動作の場合はその逆の機序をたどる が、距離の最小値は持ち上げ動作に比べて大きく、荷物はそれほど腰へ引きつ けられていないことがわかる。図の実線は荷物の絶対速度を示しており、これ より荷物の持ち上げ初期において荷物を手もとに引きつけることによって急速 な加速を受けることがわかる。また持ち上げ時において荷物は、腰に最も接近 する以前に最大速度を持ち、持ち下ろし時においては、腰に最も接近した時点 で最大速度を持つことが認められる。これは荷役動作の曲型的なパターンであ ると考えられる。さらに図中の破線は頭頂の絶対速度を示しており、持ち上げ 持ち下ろしのいずれの場合も荷物が最大速度を持つ時点で頭頂の速度が最大に なっていることが認められる。これは 5.5 kg の荷物の場合,手と頭の連係動作が 必要であることを示唆しているものと考えられる。

持ち上げ時と持ち下ろし時における荷物の移動速度の最大値をまとめると図 4.16のようになる。これより年齢による相違は認められないが、いずれの被

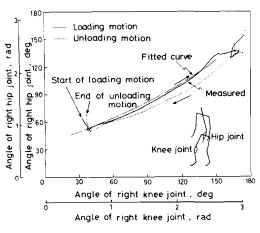
験者も荷物を持ち上げるときは 速く,持ち下ろすときはゆっく りと動作を行っていることがわ かる。これは荷物を床の定位置 に置くために微妙な制御を行い つつ動作することの現われであ ると考えられる。



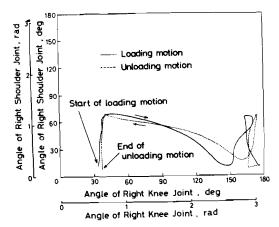
作業動作中に身体各部の各関

図 4.16 荷物の最大速度

節角が、相互にどのような関係を保ちながら変化しているかについて検討を行った。図4.17は身体各部の関節の角度変化を相関図の形でグラフィック・ディスプレイ上に表示した例である。ここで図4.17(a)は右ひざ関節と右股関節の角度の相関を示しており、また図(b)は右ひざ関節と右肩関節の角度の相関を示している。図(a)より荷物の持ち上げ動作は基本的に足元の荷物を取るための前屈運動に始まり、最大前屈点より右ひざと腰の伸展が同時に進行し、テーブルに荷物を置いた後、直立姿勢に至ることがわかる。持ち下ろし動作はほぼ逆の機序をたどっている。図(b)からは特に腕の動きを読み取ることができる。すなわち、まず足元の荷物を取るために肩関節が開き、次に右ひざの伸展と共に



(a) 右ひざと右股関節角度の相関図



(b) 右ひざと右肩の関節角度の相関図

図 4.17 関節角の相関図

腕が体幹に引き寄せられ、最後にテーブルに荷物を置くときに腕が体幹に対して大きく開閉することが認められる。

さらにひざと腰の協調運動を検討するため、ここでは図 4.1 7(a)に示す関節 角の相関図において、荷物の持ち上げ、持ち下ろしに対応する部分の曲線につ いて最もよく近似する二次関数を最小二乗法により求めて相関図の特徴を数量

化することを試みた。図(a)には、ひざと腰角度の相関図に対して求めた二次曲線も示している。数量化の方法は2.4.2節で述べたとおりであり、こで述び低二次曲線のMSR値と平均曲率を求めた。図4.18は全被験者については近と平均曲率を求めた結果である。こ

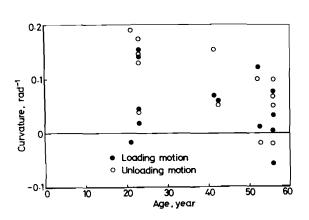


図418 ひざと腰角度の相関図にあてはめた2次関数の平均曲率

れよりほとんどの被験者の曲率が正,すなわち図 4.1 7(a)に示した曲線が下に 凸であることを意味している。これは持ち上げ動作では,まず先にひざが開い て腰が起き,持ち下ろし動作では先に腰が閉じて,次いでひざが閉じるという

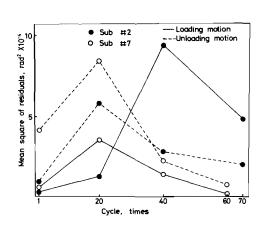


図 4.19 ひざと腰角度の相関図における動作の滑らかさと動作回数の関係

パターンを取ることを示している。 このパターンは荷役動作の曲型的な パターンであると考えられる。

図4.19は被験者2番(23歳) と7番(56歳)についてひざと腰 角度の相関図におけるMSR値を求 めた結果である。いずれも動作回数 を経るに従ってMSR値は初め増加 し一旦ピーク値を取って再び減少し ている。このことはひざと腰の協調 運動が一度は滑らかに行われにくくなるが、その後再び滑らかになることを示している。これは動作に伴い疲労によって動作の滑らかさが失われることと体が作業に慣れることによって円滑な動作が行われることの相乗効果によるものと考えられる。

## 4.2.5 身体各部に作用する力およびトルク

身体各部について測定した寸法、重量、および各部の変位、加速度、オイラー角の微分値などに基づいて運動方程式を解き、各関節に作用する力とトルクを計算した。図420は計算によって求めた足に作用する垂直力と荷重計を用いて測定した床反力を比較したものである。図には参考のため代表的な時点における動作パターンを示している。図より全般的に、動作に伴う力の変化は計算値と実測値との間で比較的よく一致していることが認められ、計算によって求められる力やトルクは信頼し得るものであると判断することができる。 図420(a)より、左足に対してやや前方に踏み出している右足に作用する垂直力は4つの極値をもつことが認められる。これらはそれぞれ被験者が、(1)床から荷物を上げようとする時、(2)テーブルに荷物を置く時、(3)テーブルから荷物を取る時、(4)床に荷物を置く時に相当し、これらの時点において相対的に大きな力が右足の垂直方向に作用することがわかる。一方、左足に作用する垂直力は被験者が床から荷物を上げようとする時、および荷物を持ち下ろしてしゃがみ込んだ時に比較的大きな値を取っている。

図4.2 1 は持ち上げ動作中のある特定の瞬間(動作開始後約1.5秒,図4.20 参照)に身体各部に作用する力の大きさと方向をベクトルの形で三次元的に表示した例である。図よりこの場合、身体各部に作用する力は一般に垂直方向成分が大半を占め、他の力成分は極めて小さいことが認められる。このような図を求めることによって身体各部に作用する力の全体像を検討することができる。

図 4.2 2 は身体各部に作用するトルクの三成分が動作に伴って時間的にどのように変化するかを示した例である。図 4.2 2 (a)は腰まわりのトルクを示している。図より明らかに矢状面に垂直な Z 軸まわりの成分  $T_Z$  が最も大きいこと

が認められる。ここでトル ク $T_z$  の符号は上体を 起こ す方向にトルクが作用する 場合を正としている。トル クTz の変化は図4.20に 示した右足の垂直力の変化 に類似している。図4.22 (b), (c)はそれぞれ右ひざ関 節まわりおよび左ひざ関節 まわりのトルクを示してい る。図よりいずれもZ軸ま わりのトルク成分が最も大 きいが,この他前額面に垂 直なX軸まわりのトルク成 分 $T_X$  も比較的大きいこと が認められる。トルク $T_{Z}$ , およびトルク $T_X$  の符号は, それぞれひざ関節を閉じよ うとする方向、および両足 の左右の開きを閉じようと する方向に作用する場合を 正としている。全般的に右 ひざ関節に作用するトルク の大きさは, 左ひざ関節に 比べて大きいことが認めら れる。これは、ここで取り 上げた荷役動作が右足の動 きを主とした動作であるこ

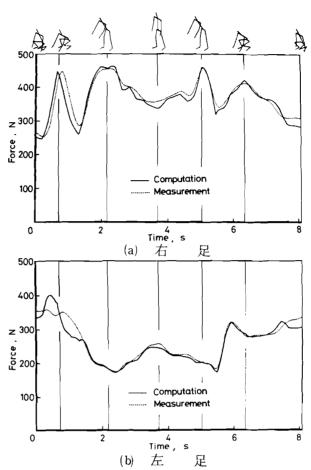


図 4.20 足に作用する垂直床反力 (動作サイクル1回目,23歳)

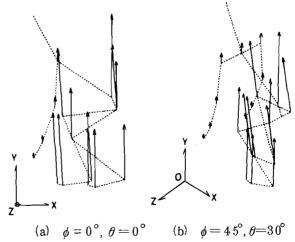
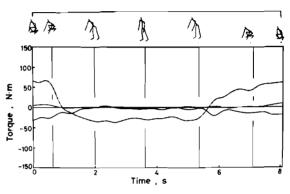


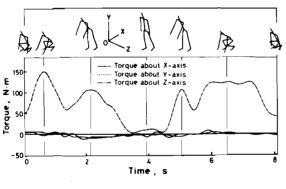
図4.21 持ち上げ動作における身体各部の作用ベクトル

とを示唆している。これより右足の疲労度は左足に比べて大きいであろうと予想される。図 4.2.2 (d)は右肘関節まわりのトルクを示している。ここで  $T_X$  の符号は左右の開きを閉じようとする方向に作用する場合を正とし, $T_Z$  の符号は肘関節を閉じようとする方向に作用する場合を負としている。これより実際に

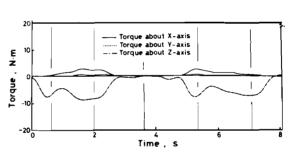
荷物をかかえている時点で Z 軸まわり および X 軸まわりのトルクが作用して いることがわかる。特に X 軸まわりのトルクは肘の左右への開きによって生 じるものであり、ここでも三次元的な動作が無視できないことがわかる。 図 4.22(e)は右肩関節まわりのトルクを



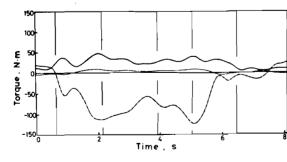
(c) 左ひざ関節まわりのトルク



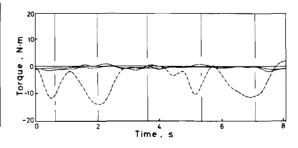
(a) 腰関節まわりのトルク



(d) 右肘関節まわりのトルク



(b) 右ひざ関節まわりのトルク



(e) 右肩関節まわりのトルク

図 4.22 身体各部に作用するトルク(被験者年齢 23歳)

示している。 $T_Z$  の符号は,肩を中心に腕を前方へ突き出す方向に作用する場合を負としている。この場合,矢状面内のトルクのみ作用していることが認められる。

図4.23は被験者2番(23歳)と7番(56歳)について求めた腰まわり

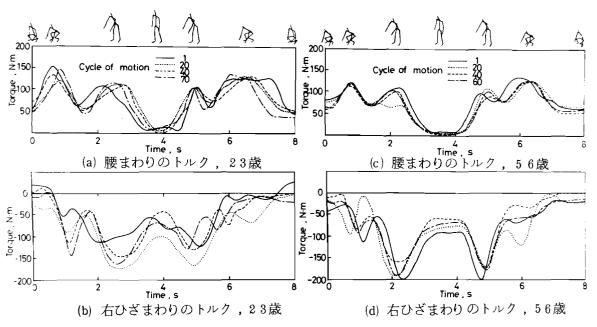


図 4.23 腰および右ひざまわりの矢状面内トルク

と右ひざまわりに作用するトルクが動作回数と共にどのように変化するかをまとめたものである。ここでは矢状面内のみのトルクを示している。動作回数を重ねることと、トルクの値の増減との間には一定の関係は認められないが、腰まわりのトルクのパターン変化は右ひざまわりのトルクの変動に比較して小さく、足に比べて腰は極めて安定した動作を繰返していることが認められる。特に右ひざまわりのトルクの変化が、回を重ねるごとに大きく変動するのは、前にも述べたように、ここでの荷役動作が右足中心の動作であるため疲労が蓄積して、動作回数ごとに安定した同一の動作が行えないためであると考えられる。図423(c)、(d)に示した被験者は年齢が56歳であるにもかかわらず、図(a)、(b)の若年者の場合よりもむしろ安定した動作を繰返している。これは、該当する被験者が保健体育科の現役の教官であり、長年運動によって鍛えられた体の

持ち主であることに帰因するものと考えられる。このことより若い頃から体を鍛えることが重要であることが改めて認識される。以上,作業動作中に身体各部に作用するトルクを求め検討を行うことは,人間の作業特性を知るだけでなく,人間の作業を代替または補助する機械を設計する上でも役立つものと考える。

## 4.3 垂直跳び動作実験

#### 4.3.1 実験装置および実験方法

垂直跳び動作としてここでは、両足を肩の幅に広げて立ち、腰、ひざおよび 腕などの反動を利用して鉛直上方に跳躍する動作を取り上げた。ただしこの場 合、胴体はひねらないものとし、離床前の予備的な反動動作は各被験者の自由 とした。動作回数は30回で、毎回全力を投入し行うよう被験者に指示した。 また4秒毎にブザーを鳴らして跳躍開始時刻を指定した。

垂直跳び動作の記録は、三次元の荷役動作の場合と同様の方法で行った。外力の測定も同様に2台の荷重計を用いて行い、両足のそれぞれに作用する床反力および反トルクを記録した。また身体各部の測定も同様に行い、身体各部に等価な円柱要素の寸法、重量を推定した。

# 4.3.2 実験データの処理

16ミリフィルムの画像から必要な運動情報を抽出する方法,並びに座標データの補正と平滑化処理など実験データの処理は,三次元の荷役動作の場合と同様の方法で行った。

#### 4.3.3 動作パターン

実験は荷役作業動作実験を行った7名の被験者のうち21歳から56歳までの6名に対して行った。表4.4に本節で用いる被験者番号と年齢の対応関係を示す。動作解析はいずれの被験者の場合も第28回目の動作を取り上げて行った。

画像情報より得られた身体各部の三次 元座標値を基に骨格線図の形で垂直跳び 動作を再現し、グラフィック・ディスプレイ上に表示して検討を加えた。図4.24 は動作パターンの時間的変化を骨格線図としてCRT上に再生表示した例である。 同図(a)、(b)はそれぞれ1番(21歳)および5番(53歳)の被験者の動作パターンを示している。いずれも図の左から

表 4.4 被験者番号と年齢の対応表 (垂直跳び実験)

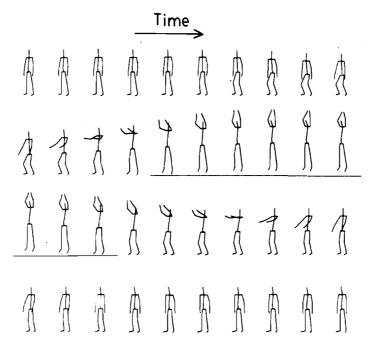
Subject No.	Age
1	21
2	23
3	42
4	52
5	53
6	56

右の方へ時間が経過しているが,各パターンの時間間隔は(a)の場合 0.0 7秒,(b)の場合 0.0 4秒である。図(a)より垂直跳び動作では,ひざと腰の屈曲および腕の後方への振り上げ(反動動作)に始まり,これらの動作量が最大に達した時点から,ひざと腰の伸展および腕の前方への振り上げによって跳躍が行われていることがわかる。着地の際のひざと腰の屈曲および腕の後方への振り上げは,離床前の動作に比べて小さい。図(b)より 5 3 歳の被験者は 2 1 歳の被験者のように大きな反動動作を行っていないことがわかる。このことが両者の跳躍量の差(21歳の被験者 3 9.71 cm,53歳の被験者 2 7.14 cm)に直接影響しているものと考えられる。

図4.25は垂直跳び動作に伴う重心移動軌跡を三次元的に表した例である。 同図(a),(b)はそれぞれ2番(23歳)および6番(56歳)の被験者に関する 結果を示している。視点はいずれの場合も左側方と斜め前方に設定している。 これより,身体の重心は動作に伴って一旦下方へ移動し,その後若干前方に位 置しながら上方へ移動していることがわかる。23歳の被験者の場合,跳躍前 後の重心移動軌跡はほぼ同様の経路をたどっており,離床前および着床後のい ずれも十分しゃがみ込んでいることを示している。これに対し56歳の被験者 の場合,離床前のしゃがみ込みは少なく,着地後はほとんどしゃがみ込んでい ないことが認められる。

身体の重心の速度および加速度を求め、重心位置が時間とともにどのように

(a) 年齢21歳;跳躍量39.71 cm



(b) 年齢 5 3歳;跳躍量 27.14 cm図 4.24 垂直跳び動作パターン

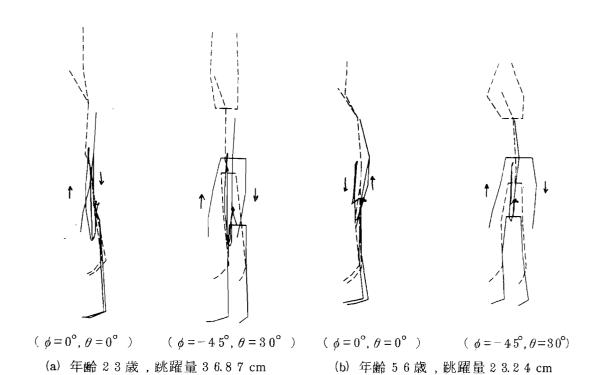


図 4.25 垂直跳び動作に伴う身体の重心移動軌跡

変化するかを検討した。図4.26は2番(23歳)の被験者について,重心位置のY座標(鉛直方向成分)とその速度および加速度を求めた結果である。図

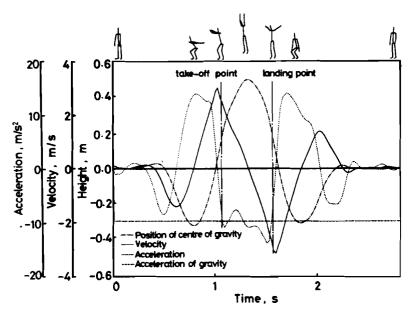


図 4.26 身体重心位置の時間変化の例(年齢 23歳)

中の一点鎖線,実線および点線はそれぞれ重心の位置,速度および加速度を示している。また時間軸に平行に引かれた破線は重力の加速度の大きさを示しており,写真から判定した離床および着床時間を図中に縦の一点鎖線で示している。この図からも離床前におけるしゃがみ込みによって,重心位置が一旦下方へ移動していることは明らかである。次いで重心位置は元の高さに戻るが,その時点ではまだ離床していない。すなわち,離床するまでには腕の振り上げ並びに踵の上昇などを伴い,重心位置が原点より若干上方へ移動してから跳躍が行われている。ここで跳躍量を離床直前の重心位置から,最高点に達した時点の重心位置までの距離と定義し,全被験者について跳躍量の値を求め以後の検討に用いた。

重心の速度については、いずれの被験者も速度が最大値を取った直後(平均 0.017 秒後)に離床していることが求められた。これは離床に必要な加速度すなわち-g を得るために必要な過程であると考えられる。身体が宙にある時、身体各部がどのように動こうとも、空気抵抗を無視すれば身体の重心は-g 一定の加速度で放物運動を行う。図より、離床時の加速度は-g に近い値を取っていることが認められる。計算で求めた加速度に若干の変動が認められるのは、加速度を求める時点で原データに含まれる誤差が増幅されたためと考えられる。被験者が空間にある時の加速度の平均値を全被験者について求めた結果を表4.5 に示す。ただし表においては加速度を正の値として表記している。これらの値

は理論値( $g=9.80665\,\mathrm{m/s}^2$ )に対して若干大きいものの,理論値に比較的よく一致しており,本研究で採用した重心位置の算出方法および加速度の算出方法がこのような跳躍を伴う動的な系においても妥当であることを示している。

跳躍量は理論的に以下のようにして導くことができる。すなわち,跳び出す時の上方向の重心速度を $v_{G_0}$ とすれば時刻 t における高さ h(t)は

表 4.5 数値微分によって 求めた重力の加速度

Subject No.	Calculation m/s <sup>2</sup>	
1	10.164	
2	9.776	
3	10.493	
4	11.042	
5	10.100	
6	9.559	
mean	10.888	

$$h(t) = v_{G_0} t - \frac{1}{2} g t^2 \qquad \dots \qquad (4.3)$$

と表わすことができる。 h(t) の最高点を与える t は dh(t)/dt = 0 より

$$t = \frac{v_{G_0}}{q} \qquad \cdots \qquad (4.4)$$

となる。これより h(t)の最大値は以下の式で与えられる。

$$h_{max} = \frac{v_{G_0}^2}{g} - \frac{1}{2} g \left( \frac{v_{G_0}}{g} \right)^2$$

$$= \frac{v_{G_0}^2}{2 g} \qquad (4.5)$$

すなわち跳躍量は初速度のみによって決定される。図 4.2 6 における重心速度の変化より、跳び出す時点における速度を求め式(4.5)に基づいて跳躍量を算出した。表 4.6 は重心位置の差を測定して得た跳躍量と式(4.5)より計算して得た跳躍量を全被験者について比較したものである。これより測定値と計算値は比較的よく一致していることが認められる。この結果からも重心位置の算出方法および速度の算出方法の妥当性が認められる。図 4.2 7 は表 4.6 における跳躍量の測定値と年齢の関係を示したものである。これより跳躍量は高年齢者ほど減少していることが認められる。

表 4.6 重心位置の差より得られた 跳躍量と初速度より計算さ れた跳躍量

Subject	Age	Measured	Calculated
No.		cm	cm
1	21	39.71	37.42
2	23	36.87	38.55
3	42	35.00	34.33
4	52	29.81	34.94
5	53	27.14	23.07
6	56	23.24	21.74
Mean e	rror	2.56cm(8.48%)	

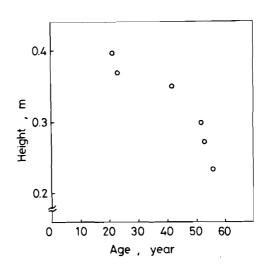
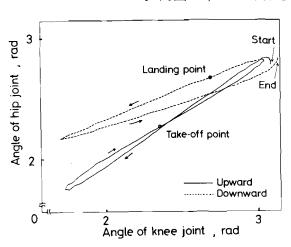


図 4.27 年齢と跳躍量の関係

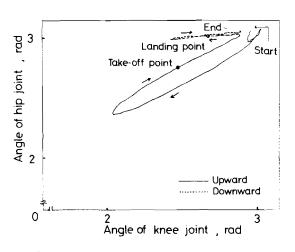
これは跳躍動作を28回繰返した結果、疲労が蓄積し加齢の影響が顕著に現われた結果であると考えられる。

垂直跳び動作中に身体各部の各関節角が、相互にどのような関係を保ちながら変化しているかについて検討を行った。図4.2.8 はひざ角度と腰角度の変化を相関図の形でグラフィック・ディスプレイ上に表示した例である。ただしここでは矢状面内における角度のみを取り上げている。同図(a).(b)はそれぞれ被

験者年齢23歳および56 歳の場合の結果を示してい る。図においては、動作開 始時点から最高到達時点ま での相関を実線で, またそ の後動作終了時点までを破 線で示している。同図(a)よ り垂直跳び動作は, ひざと 腰の屈曲に始まり,最大屈 曲点よりひざと腰の伸展が ほぼ同時に進行して跳躍に 至っていることがわかる。 またひざと腰が伸展する途 中で,離床し,身体が宙に 浮いてからもひざと腰の伸 展は継続していることがわ かる。身体が最高点に達し てから着地する動作は,上 述の跳び上り動作に対し, ほぼ逆の機序をたどってい る。図 4.2 8(b)に示す 5 6 歳の被験者の場合,垂直跳



(a) 被験者年齢23歳



(b) 被験者年齢 5 6 歳

図 4.28 ひざ角度と腰角度の相関

びに見られるひざと腰の基本的な関係は、同図(a)における場合と同様であるが、細部の点において以下のような差異が認められる。すなわち(1)眺躍前後の最大屈曲時におけるひざおよび腰の曲げ角度には大きな差があり、図(a)の若年者の場合に比べて図(b)の高齢者の場合、最大屈曲時におけるひざおよび腰の曲げ角度は小さくなっている。(2)高齢者の場合、眺躍前において最大屈曲点に達した直後、腰が先に開き始める。(3)高齢者の場合、着地後の腰の角

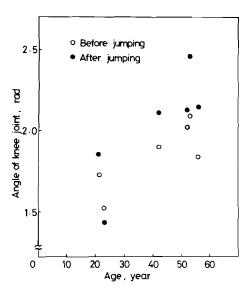
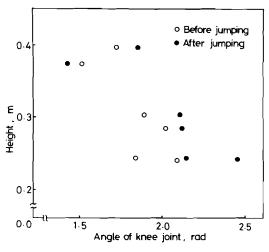
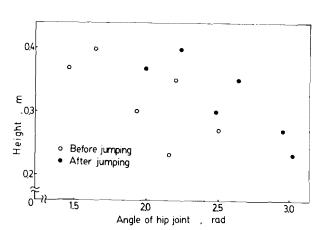


図 4.29 最大屈曲時におけるひざ 角度と年齢の関係

度がほとんど変化していない。すなわちひざは若干屈曲させているが、腰は伸び切った状態で着地している。このような特徴は被験者4番(52歳)と5番(53歳)の場合も共通して認められた。図4.29は最大屈曲時におけるひざ





(a) 最大屈曲時におけるひざ角度と 跳躍量の関係 (b) 最大屈曲時における腰角度と跳躍 量の関係

図 4.30 しゃがみ込み動作と跳躍量との関係

<sup>\*</sup> 付録13参照

角度と年齢の関係をまとめたものである。これより高齢者ほどひざ角度が大きく,ひざの曲げが浅くなっていることが認められる。以上の結果は高齢者が深い屈曲姿勢から上方へ踏み込むために必要な脚力を持たないこと,さらに着地における衝撃を柔げるための足腰の柔軟性に欠けることの現われであると考えられる。図430は下肢の屈曲度と跳躍量の関係をまとめたものである。同図(a)は跳躍前後の最大屈曲時におけるひざ角度と跳躍量との関係を,同図(b)は同じく最大屈曲時における腰角度と跳躍量の関係を示している。これより跳躍の前後いずれにおいても,ひざ角度および腰角度が小さいほど跳躍量が大きくなる傾向が認められる。すなわち,このことはひざおよび腰の曲げが大きいほど高く跳べることを意味している。これはひざおよび腰の屈曲を大きくし,反動をつけることによって跳び出し時点の初速を大きくすることが可能であるということを示唆しているものと考えられる。

身体重心の初速度が跳躍量を決定することは既に述べたが、身体各部の速度、 角速度を求め跳躍量との関係について検討を行った。図4.31は1番(21歳)

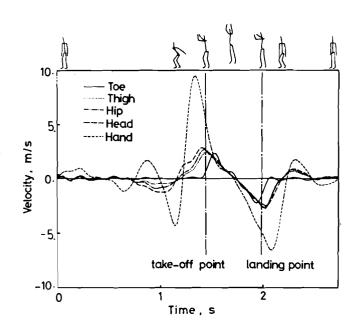


図 4.31 身体各部の速度の垂直成分 (被験者年齢 21歳)

部分は同時に最大値を取るのではなく、手、頭、腰、大腿という順に最大値を取っていることがわかる。こういった傾向は全被験者について認められたが、各部が最大値を取る時間のずれと跳躍量の間には特別な傾向は認められなかった。すなわち、各部の速度が同時に最大値を取る場合と時間的にずれて最大値

を取る場合において跳躍量に顕 著な差異は認められなかった。

跳躍に対する手の振り上げの 効果を調べるため,図431に おける手の速度の最大値と跳躍 量との関係を求めた。図432 は右手重心速度の垂直成分の最 大値と跳躍量の関係をまとめた ものである。これより手の上方 向への速度が大きいほど跳躍量

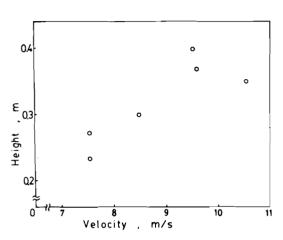


図 4.32 右手重心速度と跳躍量の関係

も大きく、手の振り上げが跳躍量に大きく寄与していることが裏付けられる。 離床直前におけるひざと腰の伸長角速度の最大値と跳躍量の関係をまとめて 図 4.3 3 に示す。同図(a)は右ひざの伸長角速度,(b)は腰の伸長角速度に対する

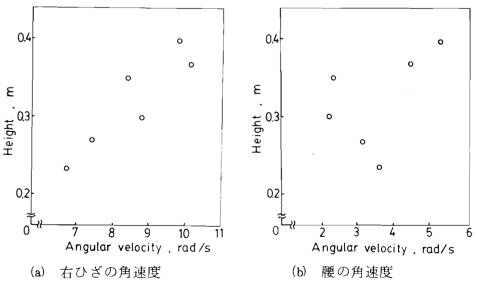


図 4.33 最大角速度と跳躍量の関係

結果である。これより,腰の伸長角速度と跳躍量の間には特別な関係は認められないが,ひざの伸長角速度が大きいほど跳躍量が大きくなる傾向が認められる。すなわち,ひざのような下肢関節の急速な伸長が跳躍量に大きく寄与することが推察できる。また高齢者は下肢関節に大きな角速度を産み出す能力に劣り,このことが跳躍量を小さくしている原因であると考えられる。

#### 4.3.4 身体各部に作用する力およびトルク

計算によって求めた足に作用する垂直力と、荷重計を用いて測定した床反力を比較した例を図434に示す。同図(a)は右足に対する結果であり、(b)は左足に対する結果である。離床前と着地後において力が極大となる付近で計算値と実測値の間に若干の差が認められるが、これは、スプライン関数を求めるときのサンプリング間隔が適切でなかったためと考えられる。すなわち跳躍運動は瞬間的に大きな力が作用するにもかかわらず、全体に対して一定のサンプリング間隔で補間を行っておりデータを必要以上に平滑化した点にも問題があると思われる。しかしながら、動作に伴う力の変化は全般的に計算値と実測値とは比較的よく一致しており、垂直跳びに見られる力の変化を詳しく検討することが可能であると考えられる。

図434より跳躍前においては両足に均等な静荷重が作用しているが、しゃがみ込む時の慣性で力は一旦減少し、踏み込む際に再び増加していることがわかる。着地後はほぼその逆になっている。踏み込む時に足にかかる力は静止の2、3倍にも達しており、着地の際にはそれ以上の力がかかっていることが認められる。

図4.35は両足にかかる垂直床反力の最大値の平均と年齢の関係をまとめた ものである。図中の白丸および黒丸はそれぞれ離床前および着地後の最大床反 力を示している。ただし,床反力は被験者の体重に直接影響を受けることが考 えられるため,ここでは床反力の最大値を各被験者の体重で除して基準化した 値を示している。いずれの被験者も着地後の最大床反力の方が離床前における値 より大きくなっているが,これは着地の際の衝撃によるものと考えられる。図 には跳躍前後の反力の和も示しているが,この値はわずかながら年齢と共に大きくなる傾向が認められる。

図 4.3 6 は身体各部に作用 するトルクが動作に伴って時 間的にどのように変化するか を示した例である。図は矢状 面内のトルクのみを示してい る。図中の実線は中足指節関 節まわりのトルク, 点線は足 首まわりのトルク, 一点鎖線 はひざ関節まわりのトルクで あり,いずれも右足について のトルクのみを示している。 また破線は腰まわりのトルク, 間隔の長い破線は右肩関節ま わりのトルクを示している。 トルクの符号は中足指節関節 まわりのトルクの場合、踵が 上がる方向を正としている。 また足首およびひざの場合, それらの角度が広がる方向 を正、さらに腰の場合は閉 じる方向を正としている。 肩関節の場合は,腕を体の 前方へ振り上げる方向を正 としている。これより身体

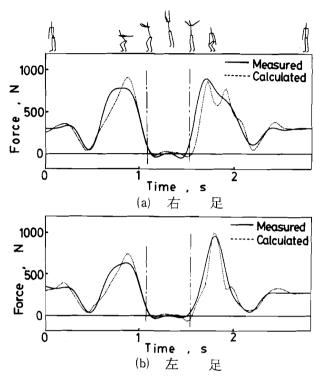


図434 足にかかる垂直床反力 (被験者年齢23歳)

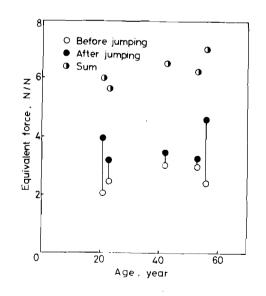


図4.35 最大床反力と年齢の関係

各部に作用するトルクはいずれも離床直前に極大値を取っていることが認

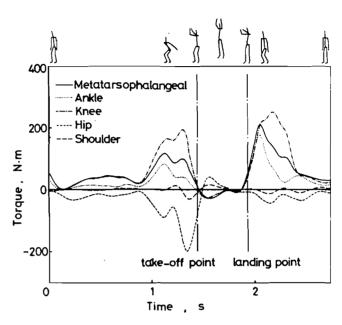


図 4.36 身体各部に作用するトルク(被 験者年齢 2 1歳)

# 4.4 ホログラフィック・ステレオグラムを作製するための荷役作業動作実験

### 4.4.1 実験装置および実験方法

円筒型ホログラフィック・ステレオグラムを作製するために原画の撮影実験を行った。円筒型ホログラフィック・ステレオグラムの原画を撮影するにはカメラの視点を水平方向に $360^\circ$ 変化させる必要がある。そのための簡便法としてカメラを固定し被写体を回転テーブル上で回転させる方法  $^{101}$ ) がある。しかしながらこの方法によれば,回転によって慣性力が作用し,テーブル上にいる破験者の運動に支障をきたす可能性がある上,回転テーブル上で行う運動動作は非常に限定されたものとならざるを得ない。また回転している人体各部からの外力データや $\mathbf{E}$  M  $\mathbf{G}$  信号などを測定することは困難を伴う。ここでは図 $\mathbf{4.37}$  に示すような装置を試作し,動作中の被験者のまわりを $\mathbf{360}$  度回転しながら

16ミリ高速度シネカメラによる撮影を行う技術を開発した。カメラの高さは 1.1 m, 回転半径は2.5 m とした。ACモーターを用いてカメラを一回転10秒の速度で回転させ, 回転角0.6度毎に1こまの割合で被験者のレンズはf5.9 mmの広角レンズである。回転ア

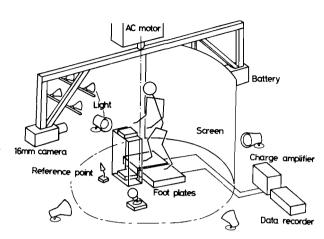


図 4.37 実験装置の概要

-ムにはカメラ、電源装置および照明用ライトを取りつけ、さらにカメラに 対向して黒のスクリーンをつり下げることにより被験者の背景を消している。 回転部分の総重量は約80kgである。

実験は22歳から74歳までの11名の男子被験者に対して行い,動作は床と目前のテーブルの間で5.5kgの荷物を上げ下ろしする荷役作業動作を取り上げた。床反力測定器,データレコーダなどの主要実験装置は4.2節で述べた荷役作業動作の場合と同じである。

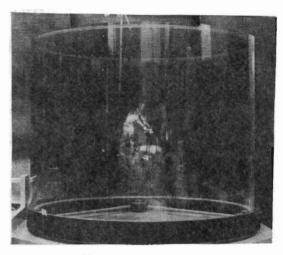
#### 4.4.2 実験結果と考察

ホログラフィック・ステレオグラムビュアーを用い,16ミリ原画フィルムから合成されたホログラムの円筒内に再生された三次元画像の例を図438に示す。ホログラムの作製には特殊な装置を必要とするためでここでは原画からホログラムを作製することは富士写真光機㈱に依託した。図438(a)はホログラム円筒と再生像をともに示している。同図(b),(c),(d)はそれぞれ右前方,左前方および左後方に視点を置いたときの像を示している。円筒を回転させることにより荷役動作を三次元画像として動的に再現することができる。これにより遠近感および重量感のある人体運動動作の再生が可能となり,

荷役動作に見られる腰の屈伸運動やひざおよび肘の開きなどの動作パターンを 詳細に解析することができる。この結果より、ホログラフィック・ステレオグ ラムを用いて動的な運動動作を三次元的に再生するには、本章で試作した原画 撮影装置が有効であることがわかる。

ホログラフィック・ステレオグラムは水平視差のみを利用して三次元像を与えるものであり、原理的には視点の異った2枚の写真を同時に見ていることに相当する。三次元的な点の座標を認識するためには、これら2枚の写真の視差

が大きいほど好ましい。しかしながら被写体が動く場合は2枚の写真の視差が大きいほど被写体の動作変化が大きくなり、違った像が二重像として見えることになる。以上の2点を考慮すれば、観測時における最適な視差が存在することになる。ホログラム面に近づけば視差は大きくなり、遠ざかれば視差は小さくなるため、最適な視差が求まれば最適な



(a) 円筒型ホログラムと再生像



(b) 右前方



(c) 左前方



(d) 左後方

図 4.38 円筒内に再生された荷役作業動作の三次元画像

観測位置も同時に決定される。そこでまず、ホログラム作製用の16ミリフィルムを用いて、ある視差をもった2枚の写真から3.4.1節で述べた方法に基づき物体点の三次元座標を算出した。ここで物体点としては図4.3.7で示した被験者の足元にある参照点を選んでいる。次いで計算によって求められた座標値

と実際の座標値の距離を誤差として求めた。図439に示す曲線 E1 は視差を変化させて求めた繰返し誤差の平均値を示している。これより視差が大きくなるにつれて誤差が小さくなることが認められる。一方,被写体が動くことに認める。の2枚の写真に生じる誤差は荷役動作の場合,身体部分のうちで最も速く動く手におい

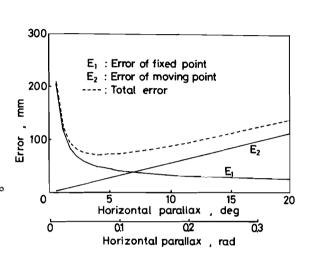


図 4.39 水平視差と誤差の関係

て最大となる。ここでは実験を行った動作について手の先の平均速度を求めた結果  $180\,\mathrm{mm/s}$  が得られた。カメラが  $10\,\mathrm{d}$  で一周することから,手の先の変位は視差  $1\,\mathrm{g}$  度あたり  $5\,\mathrm{mm}$  となる。こうして動く点に対して視差を変えて求めた変位誤差は図  $4.3.9\,\mathrm{cm}$  に示す右上がりの直線  $E_2$  で与えられる。 図中の破線は誤差  $E_1$  と  $E_2$  を合計した値を示しており, この総合誤差を最小にするような視差で見ることが最適であることになる。これより最小の誤差を与える視差は  $4\,\mathrm{g}$  であることが求められた。この値は今,両眼の間隔を  $6.5\,\mathrm{cm}$  とすれば,円筒の中心から  $9.3.1\,\mathrm{cm}$  すなわちホログラム面から  $7.3.1\,\mathrm{cm}$  離れて見ることに相当する。

図 4.39 における直線  $E_2$  の傾きは被写体の動く速度によって変化する。ここで傾きを変化させて同様の図を求めたところ,例えば,総合誤差の最小値がカメラと被験者の距離の 1.5%になる時の傾きは  $3.5\,\mathrm{mm/deg}$  であった。このような誤差  $E_2$  を表わす直線の傾きが与えられれば,カメラを被験者のまわり

に回転させるときの最適な回転速度を算出することができる。今,例に,直線の傾きが3.5 mm/degの場合を取れば,カメラが一周するに要する時間は以下の式で与えられる。

$$\frac{3.5 \times 3.6.0}{1.00.0 V}$$
 秒/サイクル ......(4.6)

ここでVは被験者の平均速度でありその単位はm/sである。 カメラが一周する間に1256こま撮影する場合,こま送り速度は次式で与えられる。

$$1256 \times \frac{1000V}{3.5 \times 360}$$
 こま/秒 ......(4.7)

ここで 1256 こまという値はホログラム再生用円筒の円周とすじ状ホログラ ムの幅によって決定されるものである。本実験で用いたホログラムの円周は 1256 mm, ホログラムの幅は 0.5 mm となっており, ホログラムの円筒一周 に 2512 本 のすじ状ホログラムが対応する。ここでシネフィルムの1こまを 2本のすじ状ホログラムに割り当てる場合,一周に 1256 こまが必要と なる。なお以上は、視差が 5.7度の場合であり、ホログラム面から45cm離れ て見る場合に相当する。これは本実験における最適観測距離よりも小さいが、 いずれの場合も被写体の動きが二重像になって観測されることはない。しかし ながら、これらの距離は身体各部のうちで最も速く動く手を基準にして与えら れたものであり、その他のゆっくりした動作を観測するには、上述した距離ほ どには離れて観測しなくてもよい。静止している物体あるいはゆっくりと動い ている物体を観測する場合、ホログラムに近い位置で観測を行う方が両眼の水 平視差が大きくなり、三次元情報を認識しやすくなる。こういった点から判断 すれば 45cm離れた観測位置と 73.1cm離れた観測位置とでは, 前者の方が像 をより三次元的に認識しやすい位置であることが予想される。実際, 73.1 c m 離れた観測位置では,手の動きによる二重像は見えないが,像の遠近感はほと んど認められなかった。

#### 4.4.3 三次元位置情報抽出における測定誤差

三次元座標測定装置を用いてホログラム像からその位置情報を抽出する場合 における誤差を評価するため、被験者の足元にある参照点(図4.37参照)の座

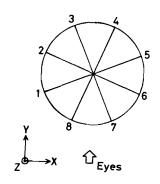
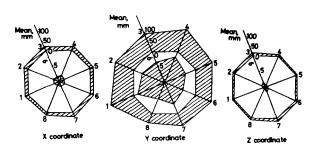
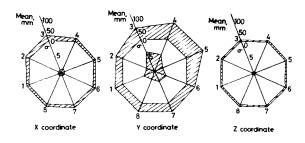


図 4.40 測定点の方向

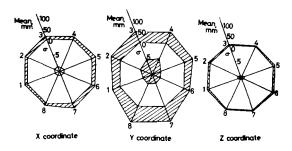
標を8方向の視点から測定した。 図 4.40 は 8 方向の視点から参照 点を見たときの眼と参照点の位置 関係を示している。ここでは8点 の座標を5人の測定者が5回ずつ 繰返して測定を行った。図4.41 は測定値を実スケールに変換し、 真の座標値に対する誤差の平均と 標準偏差を方向別に求めて示した ものである。図において八角形の 頂点から外方向に誤差の平均を示 し、中心からの距離で誤差の標準 偏差を表わしている。(a)はホログ ラム面から 45 cm離れた位置に測 定者の眼を固定して測定を行った 場合,(b)はホログラム面からの位 置を 45 cmのままとして変えない で眼の位置を左右に動かすことを 許した場合の結果である。(a)に対 して全般的に(b)の方が誤差が小さ



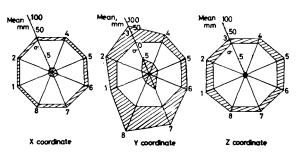
(a) ホログラム面より 4 5 cm 測定位置固定



(b) ホログラム面より 45 cm,測定位置左右動可



(c) ホログラム面より 22 cm ,測定位置左右動可



(d) ホログラム面より5 cm,測定位置左右動可

図 4.41 三方向における測定誤差

い。これは左右に眼の位置を動かすことによって水平視差が増加し、三次元位置が認識しやすくなることによるものと考えられる。(c)および(d)はホログラム面からそれぞれ22cm、5cmの位置において、目を左右に動かすことを許した場合の結果である。これより(d)における誤差が大きいが、これは眼とホログラム面の距離が小さく眼の動きに対して像の時間的なずれが大きくなり、かえって測定におけるばらつきが増加するためであると考えられる。全般的にY方向すなわち奥行き方向の誤差が大きく、ホログラム像から三次元的な位置情報を抽出する上で、今後、何らかの対策が必要である。

#### 4.5 結 言

本章では実際の三次元運動動作について実験を行い、3章で展開した解析方法に基づいて具体的な解析および検討を行った。運動動作としては実際に即した荷物の持ち上げ持ち下ろし動作並びに垂直跳び動作を取り上げ、コンピュータ・グラフィックスを利用した動作パターンの解析、並びに身体各部に作用する力およびトルクに関する動力学的な解析を行った。次いで荷物の持ち上げ持ち下ろし動作に対して、ホログラフィック・ステレオグラムを作製するための原画撮影装置を試作し、これより得られたホログラムによる三次元再生像について検討を行った。本章で得られた結論は以下のとおりである。

- (1) 三次元コンピュータ・グラフィックスを利用して、荷役作業動作並びに 垂直跳び動作における動作パターンの特性、各関節角の相関、および人体 の重心移動軌跡などを明らかにした。
- (2) 荷役作業動作並びに垂直跳び動作中に身体各部に作用する力およびトルクを求め、動作との関係を定量的に明らかにした。
- (3) 荷役作業動作では動作時間,ひざと腰の協調運動および重心移動軌跡において疲労による影響が現われることが明らかとなった。また身体各部に作用するトルクのパターン変化から,下肢に及ぼす疲労の影響が明らかとなった。

- (4) 垂直跳びにおける跳躍量は、離床前におけるひざおよび腰の屈曲運動並びに腕の振り上げ動作などに密接に関係していることが明らかとなった。 さらに高齢者ほどひざおよび腰の屈曲が小さく、跳躍量も小さくなることなどが示された。
- (5) 動的な三次元画像を再生するにはホログラフィック・ステレオグラムを 用いる方法が有効であり、本章で試作した原画像撮影装置は十分実用的で あることが明らかとなった。

# 第 5 章 ひねりを伴う身体運動動作の解析

### 5.1 緒 言

身体の一部あるいは全身にひねりを伴った運動は少なくない。例えばドアの ノブを回したり、受話器を取って耳にあてたりするときの前腕の動作、荷物を 右から左へ移動させるときの胴および腰の動作などはひねりを伴う動作である。 他に歩行動作もまた胴体に若干のひねりを伴う。さらに機械体操、水泳、トラ ンポリンなどスポーツにおける運動動作では、ひねりは重要な構成要素となる。 しかしながら人体のひねり動作は複雑であり、これまでひねり動作を扱った研 究はほとんどないと言ってよい。

本章では通常の三次元的な動作にさらに身体各部のひねりを加味した運動動作を解析する方法を確立し、具体的な運動動作についての実験を行って、詳細な検討を行う。運動動作としてはまず被験者の左右側方にある二台のテーブルの間で荷物を移動させる動作を取り上げ、コンピュータグラフィックスを利用して、ひねりの動作パターンの解析を行う。また数学モデルに基づく運動方程式を解くことによって、ひねりによるトルクを推定し動作との関連を検討する。荷物を左右に運搬する動作は、直立した状態で行う場合と正座した状態で行う場合に分け、それぞれの場合について比較検討も行っている。ここでの解析は特に胴のひねりに注目している。

またこのほか、前腕の回旋運動を取り上げ、前腕部の微妙なひねりについて解析を行う。ここでは特に、座標計測用にITVカメラとミニコンピュータから成る画像処理システムを開発し、座標情報抽出の自動化を試みている。

# 5.2 ひねりを考慮した三次元数学モデル

#### 5.2.1 モデルの定義

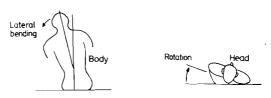
人体の三次元運動を記述するには、2章で述べたように体の3つの面すなわち、矢状面、前額面、および水平面を用いると便利である。ここではさらに運

動の軸として、以下の3軸を定義する。すなわち、

(1) 矢状-水平軸(X軸):前額面に対して垂直で前後方向の軸

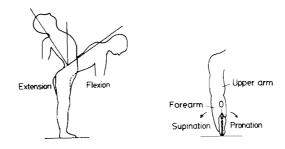
(2) 垂直軸(Y軸) :垂直方向の軸

(3) 前額-水平軸(Z軸):矢状面に対して垂直で左右方向の軸の各軸である。人間の動作は3つの各面内における並進運動と3つの各軸まわりの回転で表現することができる。例えば歩行時の胴体は矢状面と水平面内における並進運動であり、礼をするときの胴体は前額-水平軸まわりの回転であ



(a) 側屈動作

(b) 回旋動作



(c) 前後屈動作

図 5.1

(d) 前腕の回旋動作 身体の回転動作の例

るいは天井を向くような回転は、それぞれ回内、回外と呼ばれる。

本研究では身体各部の回転運動のうち図 5.1(b),(d)に示すような回旋(捻転) および回内,回外などを総称して「ひねり」と呼ぶことにする。ここで円柱の 剛体について「ひねり」を以下の2とおりに定義する。

- (j) 一端面は回転せず他端面が中心軸まわりに回転するような回転。
- (ji) 中心軸まわりの自転

ここで(jj)の場合の回転は、単一の剛体ではひねりではないが、複数の剛体の中

にあって自転する場合、広義の「ひねり」として含めることとする。

従来の研究では(i)の定義におけるひねり動作の解析を行ったものは少なく,(ii)の定義における回転の解析がほとんどである。例えば  ${\rm Chao}^{26)}$ , ${}^{40}$ )は前腕の  ${\rm X}$  線写真から回内,回外並びに外転,内転などの角度を計測し,前腕の動座標系を決定するオイラー角を求めている。また  ${\rm Rastegar}^{58}$ )はひざ関節の内反,外反における回転運動を解析しており, ${\rm Hull}^{90}$ )は下肢をバネとダンパーに置き換え,スキーにおける下肢のひねりを解析している。小佐  ${}^{44)}$ , ${}^{45}$ )は懸垂運動の解析にボールベアリングを用い,人体が空中に浮遊した状態で人体と外界との回転力を遮断することによって,角運動量の保存則を検証している。

身体部位の中で(i)の定義におけるひねり動作を用い得る部分は胴と前腕が考えられる。なおここで胴とは骨盤の腸骨稜を通る水平面から上,首より下の部分をさすものとする。ここでは胴のひねりを解析するにあたって,胴部を以下のような数学モデルで置き換える。すなわち,胴の肋骨部は一体となって回転するため肋骨部下で胴を2分割し,胴の上半分と下半分をそれぞれ円柱形状であると仮定する。2分割部の継手は車軸関節と等価なものとし,上下2つの円柱が独立に回転することでひねりを再現するものとする。さらに前腕の場合も

同様にして以下のようにモデル化を行う。すなわち,前腕は図 5.2に示すように橈骨(Radius)と尺骨(Ulna)から成り 102)右前腕の回外位および回内位はそれぞれ図(a),(b)のようになる。ここで回旋運動の軸は橈骨頭(Caput radii)と尺骨の茎状突起(Processu styloideus)とを結ぶ線で橈骨がこれを中心として回転し,その運動範囲は橈骨下端で約180°で

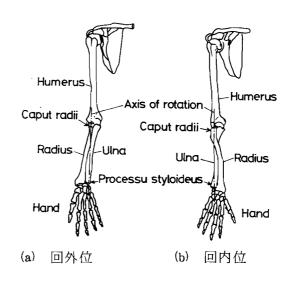


図 5.2 上肢骨(右側)の回旋

ある。この場合、肘関節から手首関節まで均等にひねられるのではなく、実際に前腕各部の回転角度の測定を行ったところ、5名の被験者のいずれも手首側より約40%のところで最もよくひねられていることが求められた。(このことに関しては5.5.3節で詳しく述べる。)以上より、前腕についても、最もよくひねられる部分で2分割し、各部の形状を円柱として車軸関節と等価な継手で結合されているものとする。

次に、(ji)の定義におけるひねり動作を行い得る部分としてここでは頭部、手、上腕、腰、大腿および下腿を取り上げる。これらはそれぞれ等価なひとつの円柱で置き換えることによりモデルを構成する。以上のことからここでは図 5.3

に示すような 2 0 の要素から成る剛体リンクモデルを提案する。すなわち図 5.3 において要素番号 1 および 5 の要素は右および左のつま先に対応し、他の要素はそれぞれ要素番号 2,6 が足,3,7 が下腿,4,8 が大腿,9 が腰,10 が胴下部,11 が胴上部に対応している。さらに12,16は手,13,17は前腕前部,14,18は前腕後部,15,19は上腕,20 は頭に対応している。ここで胴および前腕について定義した関節以外はすべて球継手とする。

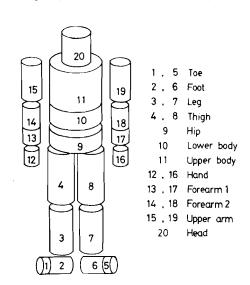


図 5.3 胴および前腕のひねりを 考慮した人体モデル

## 5. 2. 2 運動方程式

前節で定義した人体モデルにおいて任意の剛体要素に関するニュートンの運動方程式は基本的に 3. 2. 2 節の式(3.4)および(3.5)と同様である。以下 3. 2. 2 節で定義した記号を用い,図 5. 3 における剛体要素番号に従って各部の運動方程式を導く。まず剛体要素 1. 2 および 1. 6 に関しては,

$$F_{i+1,i} - W_i j = \frac{W_i}{g} a_{G_i}$$

$$T_{i+1,i} - \ell_i \hat{\Gamma}_i \times F_{i+1,i} = M_i$$

$$(5.1)$$

剛体要素 13, 14, 15, 17, 18 および 19 に関しては,

剛体要素20に関しては

次いで剛体要素11に関して3.2.2 節の場合と同様に以下のような仮 定を設ける。すなわち, 剛体要素 20(頭),剛体要素15(右上 腕),剛体要素19(左上腕)か ら伝達される力およびトルクは, 剛体要素 1 1 (胴上部)に対して のみ伝えられるものとする。ここ で 3.2.2 節では胴部を 1 本のリン クと仮定し,頭および上腕から伝 達される力およびトルクはすべて 首の部分に集中して伝えられるも のとしていた。しかしながらこう いった仮定のもとでは肩関節に作 用する偶力は考慮されず, 胴のひ ねりを伴う動作では垂直軸まわり のトルクが正しく求まらないこと

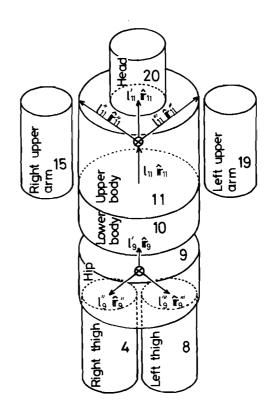


図 5. 4 胴および腰部における重心と 作用点の位置ベクトル

になる。ここでは、上腕から作用する力やトルクを首の部分に集中させるのではなく、左右の肩関節を通して胴に伝えるモデルを考える。図 5.4 に胴部および腰部における偶力の腕をベクトルの形で表示し、剛体の重心と各作用点の位置関係を示す。図 5.4 に示す記号に従えば胴上部(要素番号 1 1 )の運動方程式は以下のとおりとなる。

$$F_{10,11} - (F_{11,20} + F_{11,15} + F_{11,19}) - W_{11} j = \frac{W_{11}}{g} a_{G_{11}} \dots (5.4)$$

$$T_{10,11} - \ell_{11} \hat{r}_{11} \times F_{10,11} - (T_{11,20} + T_{11,15} + T_{11,19}) \dots (5.4)$$

$$-\ell'_{11} \hat{r}_{11} \times F_{11,20} - \ell''_{11} \hat{r}''_{11} \times F_{11,15} - \ell'''_{11} \hat{r}''_{11} \times F_{11,19} = M_{11}$$

ここで、重心は円柱の中心にあるものと仮定する。これより式(5.4)における $\ell$ に関しては以下の式が成立する。すなわち、

である。

剛体要素 10(胴下部)に関する運動方程式は

剛体要素 9 (腰)に関する運動方程式は胴上部の場合と同様に図 5.4 における記号を用いて以下のとおりとなる。

$$F_{4,9} + F_{8,9} - F_{9,10} - W_{9} j = \frac{W_{9}}{g} a_{G_{9}}$$

$$T_{4,9} + T_{8,9} - \ell_{9}^{"'} \hat{r}_{9}^{"} \times F_{4,9} - \ell_{9}^{"'} \hat{r}_{9}^{"'} \times F_{8,9} \qquad \cdots \qquad (5.7)$$

$$- T_{9,10} - \ell_{9}^{"} \hat{r}_{9}^{*} \times F_{9,10} = M_{9}$$

ここで式(5.5)と同様に次式が成立する。

$$\ell_9'' = \ell_9'''$$
 .... (5.8)

また $\ell_0$  は胴の長さの1/2 の長さである。

剛体要素 4 および 8 に関する運動方程式は

$$\begin{aligned} \mathbf{F}_{i-1,i} - \mathbf{F}_{i,\theta} - \mathbf{W}_{i} \mathbf{j} &= \frac{\mathbf{W}_{i}}{g} \mathbf{a}_{G_{i}} \\ \mathbf{T}_{i-1,i} - \ell_{i} \mathbf{\hat{r}}_{i} \times \mathbf{F}_{i-1,i} - \mathbf{T}_{i,\theta} - \ell_{i} \mathbf{\hat{r}}_{i} \times \mathbf{F}_{i,\theta} &= \mathbf{M}_{i} \end{aligned} \qquad ...... (5.9)$$

剛体要素 2, 3 および 6, 7 に関しては式(5.6)と同様である。

剛体要素1に関しては

剛体要素 5 に関しては

$$F_{mL} - F_{5,6} - W_{5} j = \frac{W_{5}}{g} a_{G_{5}}$$

$$T_{mL} - \ell_{5} \stackrel{\wedge}{r_{5}} \times F_{mL} - T_{5,6} - \ell_{5} \stackrel{\wedge}{r_{5}} \times F_{5,6} = M_{5}$$
(5.11)

となる。ここで $F_{mR}$ ,  $T_{mR}$ ,  $F_{mL}$ ,  $T_{mL}$  は床から右足および左足に作用する反力,反トルクを表わしている。

# 5.3 解析方法

### 5.3.1 運動万程式の解法

身体各部に関する運動方程式を解くために必要な身体形状,各要素の重心の加速度およびオイラー角の一階,二階微分値を求めるにあたっては3章および4章で述べた方法と同様の方法を用いている。また両足と床との間で形成される閉ループによる不静定問題は3.3.4節で述べた方法に基づいて解いている。

## 5.3.2 ひねり成分の抽出方法

5.2.1節で述べた人体モデルの中で,ひねりを伴う部位の円柱モデルを $\boxtimes 5.5$ に示す。 $\square$  の中の $\square 01$  の $\square 02$  は上下端面の中心を示している。ここでは点 $\square 02$  を含む端面は $\square$  は回転せず,点 $\square 04$  を含む端面が回転し, それらの中間部は連続的にひねられる場合を考える。この連続的なひねりを $\square 04$  5.5に示すような 2 つの円柱の回転で置き換えることによってモデル化を行う。すなわち,下部の円柱は回転

せず、上部の円柱は一体として上端面の 回転角だけ回転すると仮定したモデルに よってひねりを代替させるものとする。 ここで、図 5.5 に示す角度  $\theta_t$  をひねり 角度と定義する。ひねり角度  $\theta_t$  は以下 の式で与えられる。

$$\theta_t = \cos^{-1} \frac{\overrightarrow{O_1 A} \cdot \overrightarrow{O_2 D}}{|\overrightarrow{O_1 A}| \cdot |\overrightarrow{O_2 D}|} \qquad (5.12)$$

従って図 5.5 に示す 4 点  $O_1$  ,  $O_2$  , A および D が与えられれば式(5.12)によってひねり角度を算出することができる。また円柱剛体が並進運動と回転運動を同時に行っている場合でも,ひねり角度のみ抽出することが可能である。さらにベ

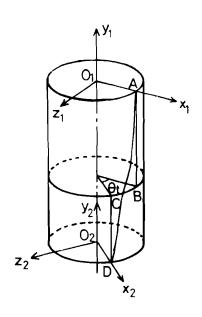


図 5.5 ひねりを伴う身体 部位のモデリング

クトル $O_1A$ および $O_2D$ の方向をそれぞれ運動座標系の $x_1$ 軸, $x_2$ 軸に等しく選ぶことによって,ひねり角度がオイラー角として求まり,運動方程式を解くことによってひねりによる軸まわりのトルクを推定することができる。

# 5.3.3 ITV カメラによる座標情報の抽出

従来,人体の運動動作を連続撮影するにはシネカメラを用いるのが主流であり、ITVカメラを用いた例は少ない。これは、ITV カメラは一般に一画面の分解能が256×256 またはその2倍程度であり、しかも1秒間のこま数は30程度であるにもかかわらず、多数の連続する画面情報をオンラインで計算機に取り組み、身体各部の位置情報を精度よく抽出することはハードウェア、ソフトウェアともに極めて困難であるためと考えられる。これに対しシネカメラはこま数を任意(例えば2章、4章で用いたローカム製シネカメラの場合こま数は最大500こま/秒までである)に設定できる上、画像情報密度もテレビより高く、感光材料を選べば、赤外や紫外の肉眼では見えないものも撮影可能

であることなどが広く用いられている理由である。

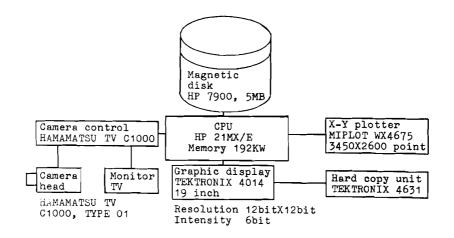


図 5.6 ITV カメラを用いた画像処理システム

の離散データをファイルに格納する。(4)必要に応じてグラフィック・ディスプレイ(濃淡6ビット)に再生,あるいはハードコピーやブロッターに出力する。一画面の入力に要する時間は濃淡8ビット,分解能256×256の場合約12秒である。

抽出すべき位置の身体各部には、2章および4章で行った実験と同様、十字のマークを貼り付けてあり、画像処理によってこのマークの中心点の座標を求める。入力された離散画像情報から身体各部の位置情報を抽出するために開発した種々のソフトウェアは以下のとおりである。

## (a) 画像の2値化のための自動閾値選定

一般に原画像の撮影において照明条件が画面全体に一様であるとは限らないため、画面を  $16\times16$ のブロックに細分し、各ブロックごとに 1つの関値を選定する。ブロックの大きさは抽出すべき十字マークが高々 1つ入る大きさに定めておく。関値の選定は以下の二段階に分けて行う。まず第一段階においては  $3\times3$  の小領域における輝度の分散をブロック内すべてについて求め、最大の分散を与える小領域の平均値を関値とする。104 107 これは、輝度変化の激しい部分を探索し、その部分を境界として 2 値化するものである。すべてのブロックについて関値が定まると、隣接するブロックにおいて関値が極端に異なることを避けるため、各関値の周囲 8 つの関値を用いて重み付き平均することにより平滑化を行う。

第二段階においては、第一段階で求めた閾値を用い画像を2値化した時点で、十字マークが抽出できているかどうかを自動的に判別する。すなわち、各画素の値を2値化によって0または1の値に変換し、画素の中で1の値を持つ領域の面積がブロック内に占める割合によって以下の3とおりに区分する。すなわち、

- (1) 50%以下のとき、十字マークあるいはこれと同等の大きさのものが 抽出できたとみなす。従って閾値は変更しない。
- (2) 80%以上のとき、そのブロック内には十字マークが存在しないとみなす。従ってこのブロックについては以後の処理を行わない。

(3) 上の(1), (2)のいずれでもないとき,閾値の変更を行う。ここではまだ十字マークと背景とが混在していることを想定して,2群の最もよい分離を与える判別基準に基づいて閾値を決定する。 $^{108)}$  この閾値は以下のようにして求める。すなわち,画像の濃淡がIレベルで表現されているものとし,レベルjの画素数を $n_j$ ,全画素数 $N=n_1+n_2+\dots+n_I$ とする。このとき,

$$p_j = n_j / N \qquad \dots \qquad (5.13)$$

は濃度の確立分布を表わす。これより画像の平均レベルは

$$\mu_T = \sum_{j=1}^{I} j \cdot \mathbf{p}_j \qquad \cdots$$

となる。従って判別分析で用いられる規準に従えば最適閾値  $k^*$  は以下の群間分散  $\sigma^2(k)$  を最大にする値として与えられる。すなわち、

$$\sigma^{2}(k^{*}) = \max_{1 \leq k \leq I} \sigma^{2}(k) \qquad \dots \qquad (5.15)$$

ここで

$$\sigma^{2}(k) = \frac{\{ \mu_{T}\omega(k) - \mu(k) \}^{2}}{\omega(k) \{ 1 - \omega(k) \}} \quad \dots \qquad (5.16)$$

$$\omega(k) = \omega(k-1) + p_k \qquad \dots \qquad (5.17)$$

$$\mu(k) = \mu(k-1) + k p_k$$
 .... (5.18)

である。

以上によって、得られた閾値を用いて、原画像の画素の値を0あるいは1に変更し、2値画像を構成する。

### (b) 2値画像の細線化

2 値化によって残された1の値をもつ領域の細線化を行う。ここでは端点を削除していく方法を用いる。<sup>109)</sup> すなわち,1の値をもつ点について周囲8点を調べ,8点とも1の値をもつ場合,今注目している点は端点とはならないからそのまま残し,それ以外の場合はその点を削除する。この方法によれば,一回の処理によってある図形の外周が削られるため,これを繰返すことにより最後には一本の骨格線が得られる。

## (c) 十字マークの中心点抽出

細線化された図形の各点について図 5.7 に示すような連結性を調べる。 ここで 3 次以上の連結性をもつ点が見つかればその点を中心点とする。

### (d) 微分操作

輝度の変化する部分を強調する方法として微分操作があり、これには種種の空間フィルターを用いることができる。ここでは、図 5.8 に示すようなフィルターを用いて横方向成分のみの抽出を行う。



0次(弧立点)1次(端点)2次(屈曲点)

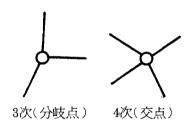


図 5.7 骨格線の連結性



図 5.8 横方向成分の抽出用フィルター

# 5.4 胴のひねりを伴う荷役作業動作の実験

## 5.4.1 実験装置および実験方法

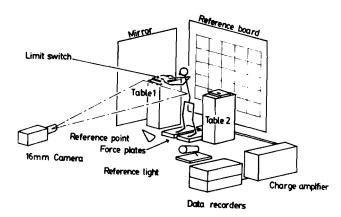
解析を行う運動動作として、ここでは身体の左右側方にある2台のテーブルの間で、胴のひねりを利用して荷物を移動させる動作を取り上げた。胴のひねりは下肢の動作によって大きく影響を受けるため、両足を肩の幅に広げて直立した姿勢で行う場合と正座した姿勢で行う場合の2とおりについて実験を行った。動作時間は規定せず、直立姿勢と正座姿勢のそれぞれについて荷物の移動を右から左へ、左から右へ3往復繰返した。荷物の重さは5.5kgである。

図 5.9 に被験者と実験装置の概要を示す。同図(a),(b)はそれぞれ直立姿勢お

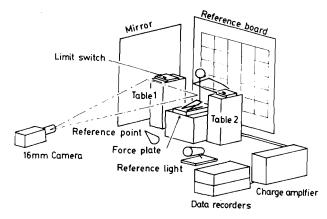
よび正座姿勢における荷役作業動作の実験を示している。荷台の高さは直立姿勢の場合、床から 1.5 m,正座姿勢の場合、正座している面から 0.9 mである。作業動作の撮影、および外力の測定は、4.2.1 節で述べた三次元の荷役動作の場合と同様の方法で行った。ただし、正座姿勢における荷役動作では荷重計は一台のみ使用した。身体各部を識別するためのターゲットマークは、前章までの実験において貼り付けた関節部の他に、5.3.2 節で述べたひねり成分を測定するために必要な皮膚の表面の点にも貼り付けた。すなわち、腸骨稜と同じ高さにある腹部中央の皮膚表面と左右肩関節の中点に相当する皮膚表面および大腿の上下端点の皮膚表面である。身体各部の測定は三次元の荷役動作の場合と同様にして行い、身体各部に等価な円柱要素の寸法、重量を推定した。

## 5.4.2 実験データの処理

16ミリフィルムの矢状面 および前額面の各画像から必 要な運動情報を抽出する方法 は三次元の荷役動作の場合と 同様の方法で行った。本実験 のように腕を回転させるよう な動作では,カメラの中心投 影に帰因する誤差、すなわち カメラより遠方に位置するも のほど見かけ上光軸に近づい て写ることによる座標の誤差 が顕著に現われるため、ここ では以下の方法に基づいて三 次元座標を求めている。すな わち,被験者の矢状面像と前 額面像は2方向からの撮影像に



(a) 直立姿勢における荷役作業動作



(b) 正座姿勢における荷役作業動作 図 5.9 実験装置の概要

等価であるから、3.4.1節で述べた 三次元座標の算出方法をそのまま適 用することができる。図5.1.0 は胴 のひねりを伴った荷役作業動作の撮 影実験におけるカメラと被験者の位 置関係を示している。実際の実験で 使用したカメラは図のO<sub>1</sub> の位置に あるが、ここでは、鏡の像をとらえ る方向に仮想的にもう1台のカメラ を配置している。身体各点の三次元 座標vはカメラの位置ベクトルfと

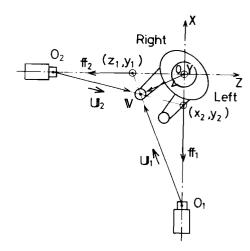


図 5.10 2 台のカメラと被験者の 位置関係

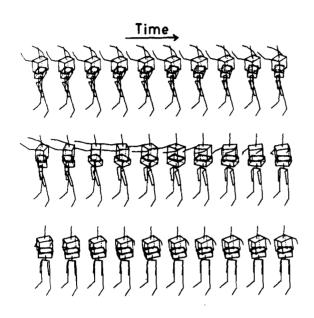
カメラから各点までの方向ベクトルuにより決定される。

得られた三次元座標データの平滑化並びに速度,加速度の算出は,三次元の 荷役動作の場合と同様の方法で行った。

#### 5.4.3 動作パターン

実験は25歳の男子被験者に対して行った。図5.11は本実験で取り上げた荷役作業動作をCRT上に再生表示した例である。同図(a)は直立姿勢のまま,また,(b)は正座姿勢のまま右から左へ荷物を移動させる動作を示しており,いずれも視点位置は被験者の左前方である。各骨格線図の時間間隔は0.25秒であり,左から右の方へ時間が経過している。胴体および大腿のひねりの様子がよく識別できるようにここでは,胴上部と胴下部をそれぞれ直方体で表示し,大腿は骨格線と共に皮膚表面の線も表示している。直方体の頂点は8点あるが,任意の方向から眺めた場合,隠れて見えない点は一般に一点であり,しかもその点は最も遠方に位置することから,この点を探索しその点に接続される線を破線表示して隠線を消去している。正座姿勢による場合は,下半身を1つの直方体に置き換えて表示している。図(a)より胴並びに大腿がよくひねられていることが認められる。図(b)における正座姿勢の場合は直立姿勢の場合に比べ,胴

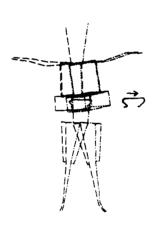
のひねりが大きいことがわかる。



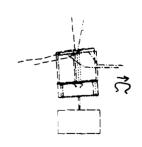
(a) 直立姿勢による場合 (動作時間 3.75秒)

(b) 正座姿勢による場合(動作時間 3.5 秒)図 5.1 1 荷役作業動作パターン

図 5.12 は各時間ごとに作業動作中の人体の重心位置を求めてその軌跡を表示した例である。図(a),(b)はそれぞれ直立姿勢による場合および正座姿勢による場合の正面からの軌跡を示している。これより直立姿勢の場合に比べて大きく移動しており動作としては不安定であることがわかる。



(a) 直立姿勢の場合



(b) 正座姿勢の場合図 5.12 重心移動軌跡

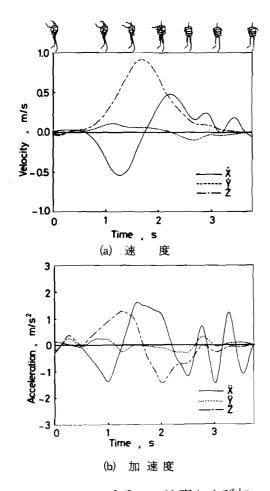
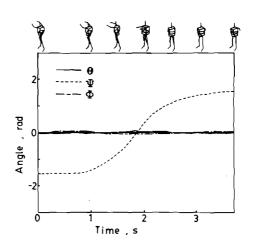
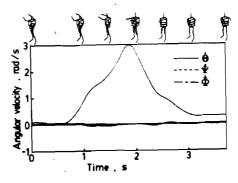


図 5.13 左手重心の速度および加速度(直立姿勢)

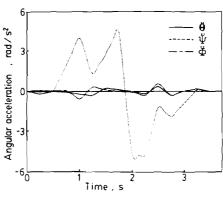
図 5.13に身体各部の重心速度および加速度を求めた結果の例を示す。同図(a),(b)はそれぞれ左手重心の速度および加速度の時間変化を示している。図(a)より Z 軸方向すなわち身体の左方向の速度は徐々に増加し、荷物が正面付近にあるとき最大値を取っていることが認められる。また



(a) オイラー角の三成分



(b) オイラー角の一階微分



(c) オイラー角の二階成分

図 5.14 胴上部のオイラー角の時間 変化(直立姿勢)

X軸方向すなわち身体の後方向の速度は、初め負の方向に増加し、荷物が正面

付近にあるとき0となり、次いで逆の方向の速度が増加している。Y軸方向すなわち上方向の速度成分はほとんど認められないが、初め若干上方向へ持ち上げていることがわかる。

図 5.14 は身体各部の運動座標系を決定するオイラー角を求めた例を示す。 同図(a), (b), (c)はそれぞれ胴上部のオイラー角の三成分とその一階および二階 微分した値を示している。これより角度  $\theta$  および  $\theta$  の変化はほとんどないことがわかる。従って角度  $\Psi$  の変化は胴上部の垂直軸まわりの回転角を代表していると考えられる。これより胴は約  $180^\circ$  回転していることがわかる。胴上部の垂直軸まわりの回転角速度と考えられる角度  $\Psi$  の角速度は,図(b)より荷物が正面にある時最大値を取っている。図(c)の角加速度は力やトルクに直接影響するものであり,回転による慣性力は垂直軸まわりの成分がはとんどであることがわかる。

正座姿勢の場合については同様の図を求めたところ,胴上部の垂直軸まわりの回転角は,直立姿勢と正座姿勢の場合において顕著な差は認められなかった。これは作業の内容すなわち,身体の右側から左側へ荷物を移動するという点については直立姿勢の場合も正座姿勢の場合も同様であり,いずれの場合も約180°の回転が行われるためである。しかしながら図5.11の動作パターンでは明らかに違いが認められた。胴下部の運動座標系が静止座標系となるように各

時刻ごとに各部の座標を変換し,再び 胴上部のオイラー角を求めた結果を図 5.15に示す。実線は直立姿勢の場合, 破線は正座姿勢の場合の角度 V の変化 を示している。先にも述べたように角 度 V は垂直軸まわりの回転角とみなす ことができ,この場合角度 V は胴下部 に対する胴上部の間のひねり角度 に相当する。これより正座姿勢の場合,

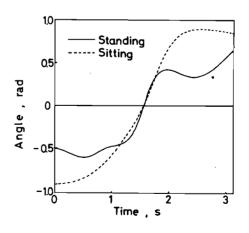


図 5.15 胴のひねり角度

直立姿勢に比べてひねり角度は約2倍にもなっていることがわかる。これは直立姿勢の場合,下半身のひねりを伴い,その分だけ腰をひねらなくてすむためであり,正座した場合のように身体の一部を拘束することによって局部的に大きなひねりが要求されることがわかる。

# 5.4.4 身体各部に作用する力およびトルク

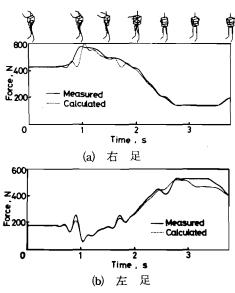
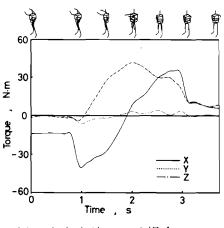
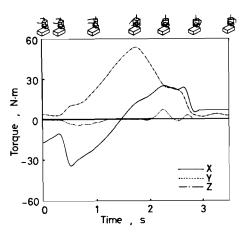


図 5.16 足にかかる垂直床反力

計算によって求めた足に作用する 垂直力と荷重計を用いて測定した床 反力を比較した結果の例を図 5.16 に示す。前章までの結果と同様,計 算値と実測値における力の変化はよ く一致している。同図(a), (b)を比較 すると当初主として右足に荷重がか かっていたものが,動作が進むにつ



(a) 直立姿勢による場合



すると当初主として石足に何重がか (b) 正座姿勢による場合 かっていたものが,動作が進むにつ 図 5.17 胴上部に作用するトルク れて左足に主に荷重が移行していく様子がよくわかる。

図 5.17 は胴上部に作用するトルクの三成分が動作に伴って時間的にどのように変化するかを示した例である。同図(a)は直立姿勢による場合,(b)は正座姿

## X軸まりりの回転

勢による場合の結果である。いずれも図の実線は胴体の側屈運動によって生じるトルクであり、右屈の方向を正としている。一点鎖線は前屈後屈運動によって生じるトルクで、後屈の方向を正としている。また点線は回旋運動によって生じるトルクであり、右旋の方向を正としている。この回旋運動によるトルクがひねりによって生じるトルクに相当する。図より、ひねりによって生じるトルクは他の成分に比べ極めて小さく、これは、荷物を移動させる動作が比較的ゆっくりしていたためと考えられる。また、直立姿勢の場合と正座姿勢の場合についてひねりによって生じるトルクには有意な差が認められない。これは、回転角のところで述べたように、回旋運動という点からは作業の内容はほとんど相違がないためと考えられる。

ここで、直立姿勢の場合と正座姿勢の場合のひねりに注目して解析するため、回転角に関して行ったのと同様に胴下部の運動座標系を静止座標系とするような変換をすべての部分について行い、改めてトルクの推定を行った。図 5.18 はこのようにして求めた胴上部のトルク成分のうち垂直軸まわりのトルクを示したものである。直立姿勢と正座姿勢の場合についてひねり角度には顕著な差が認められたものの、トルクに関しては顕著な差は認められない。これは角変位の違いがそのまま角加速度の違いに

は結びつかないことを意味しており,

結局トルクに関しては、直立して動作 を行っても、正座して行っても大差が ないと判断される

# 5.5 前腕のひねり動作の実験

## 5.5.1 実験装置および実験方法

解析を行う動作としてここでは前腕 のひねり動作を取り上げた。被験者と 実験装置の概要を図 5.19 に示す。

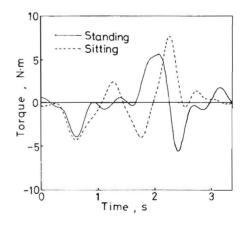


図 5.18 胴のひねりによる トルク

被験者は左手に,直径22 mm,長さ720mm, 重量 730gのアルミ棒を持ち, 腕を左右に回旋する。この とき被験者の頭,胴,足な ど左腕以外の部分は1つの剛 体とみなすため椅子にベル トで固定した。ターゲット マークは肩関節,肘関節の 機骨小頭および手首に貼り

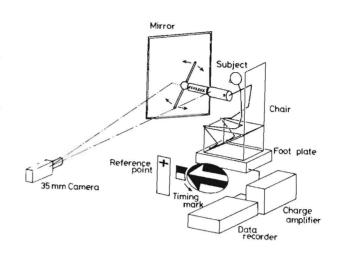


図 5.19 実験装置の概要

付けた。また前腕のひねりを詳細に解析するため肘関節と手首を8分割する点 に十字マークを付けた。

ひねり動作の撮影には35mm高速シネカメラ(アーノルド・リヒター製,最大撮影こま数150こま/秒,フィルム長400ft.)を用い, 前腕の側方から44こま/秒で撮影を行った。またこれまでの実験と同様等身大の鏡に映った被験者の正面像も同時に撮影した。動作の撮影と同時に外力の測定を行い,外力の測定値と35mmフィルム上に撮影した画像情報の同期を取るため,図に示すような矢印を描いた円板の指標を回転させ一回転ごとにタイミング信号を発生させデータレコーダに記録した。

### 5. 5. 2 画像処理

前腕のひねり動作を記録した35mmフィルムから、標点の座標を抽出するために、ここではITVカメラを用いてフィルム像を改めて撮影し、その画像情報をディジタル化してミニコンピュータに取込み、画像処理を行って標点座標の情報を抽出した。画像は照明による反射や影によって、その形状や大きさが変化するため、計算機によるパターン認識を行って座標情報を抽出する作業を完全に自動化することは困難であるため、人間とコンピュータの対話形式によって標点の抽出を行った。前腕のひねり成分を抽出するためのフローチャート

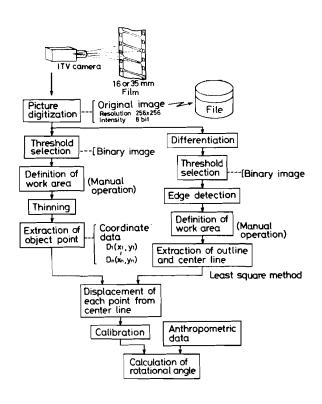


図 5.20 前腕のひねり成分抽出のための フローチャート

を図 5.20 に示す。ここでの目的は前腕各部の標点の座標を計測し、各部のひねり角度を求めることにある。したがってこのための計算機処理は主として座標の抽出と腕の中心線の抽出から成っている。まず座標の抽出手順は以下のとおりである。すなわち、(1)35mmフィルムの画像を直接ITVカメラで撮影する。(2)画像を離散値化しコンピュータに入力する。ここで使用している入力装置では濃淡レベルは8ビット、一画面の分解能は256×256である。(3)画像の2値化を行うため、閾値を自動的に選定する。(4)ディスプレイ上に表示された2値画像に対して処理を行う十字マークをクロスへア・カーソルによって指定する。指定した点の周囲12×12画素領域を対象領域とする。(5)十字マークの細線化を行う。(6)十字マークの中心点を抽出する。

次に腕の中心線の抽出手順は以下のとおりである。すなわち,(1)離散原画像

に対して微分操作を行い、横方向の線成分を強調する。(2) 閾値を自動的に選定する。(3) 閾値によって 2 値化し、横方向の輪郭を抽出する。(4) 処理すべき前腕の部分をクロスへア・カーソルによって指定する。(5) 前腕の輪郭部の点を自動的にサンプリングし、それらの点を最もよく近似する直線を最小二乗法により求める。これより腕の輪郭線が上下 2 本得られる。次いでこの 2 本の中央を通る直線を求め、これを腕の中心線とする。

以上によって、標点の座標と中心線が求まると、中心線から各点までの距離を計算し、実際の尺度に変換した後、あらかじめわかっている前腕の形状を参照して各部の回転角度を求める。ここで、前腕の形状を楕円錐台とし、前腕は楕円錐台の中心軸まわりに回転するものと仮定している。前腕の断面とカメラ

の位置関係を図 5.2.1に示す。図中の点 O は回転中心である。図 5.2.0 について述べた計算 P ルゴリズムにより 標点 P と中心線の距離 O R が求まる。距離 O P は P と P 被験者の前腕を 測定して求めておく。これより,回転角  $\theta_r$  は以下の式で与えられる。  $\theta_r = \tan^{-1}(OR \sqrt{OP^2 - OR^2})$ 

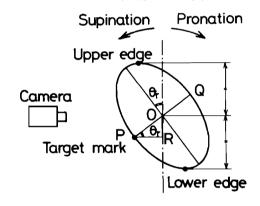


図 5.21 前腕の断面図にお ける回転角

ここでは中心線からの標点の変位

..... (5.19)

ORは下方向を正としており、回外角度が正、回内角度が負となるようにしている。こうして前腕に付けた8つの標点それぞれについて回転角を求める。

実際のひねり動作の解析に先立って、本節で確立したITVカメラによる画像処理方法に基づいた座標計測と、前節までにおいて用いたグラフィック・タブレットによる座標計測の結果について比較検討し誤差の解析を行った。計測を行う箇所として肘関節と手首に付けた標点を選び、上記の2つの方法に基づいてそれぞれ60点ずつ座標の計測を行った。このとき、フィルム画像の拡大倍率は固定しているが、画像の方向、位置などは測定ごとに任意に変えている。

次いで測定値を基に肘関節と手首の距 離を算出し、精度の評価を行った。測 定値より求めた距離を実際の尺度に変 換するには、 肘と手首の60組の点の うち20組の点を無作為に抽出し、そ れらの距離の平均値が実際の距離であ る 2 1.0 cmとなるように補正係数を定 めた。 図 5.22 に残り 40 組の点から 算出した距離に補正係数をかけ、実際 の尺度に変換した値の分布を示す。同 図(a)は I T V カメラを用いた画像処理 に基づいて計測した距離の分布, (b)は グラフィック・タブレットによって計 測した距離の分布を示している。これ よりITVカメラによる場合の方が求 められた値のばらつきが小さく, 測定 値の再現性に関して優れていることが 認められる。なお図5.22における距 離の分布が正規分布に従うものと仮定 して、分散に関する F検定を行ったと ころ, 1%水準において両者の分散に 有意な差が認められた。

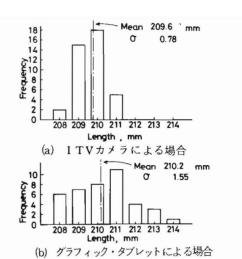


図 5.22 肘,手首間距離の計測 値の分布

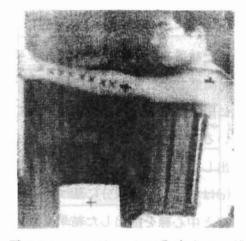
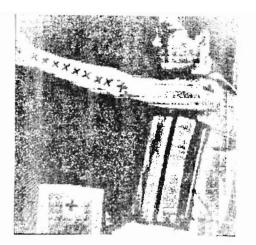
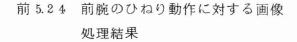


図 5.23 コンピュータに入力された離 散原画像(分解能256×256)

図 5.23 は前腕のひねり動作を収録した 35 mmフィルムの画像を 1TV カメラによってコンピュータに入力し、6 ビットの濃淡で C R T 上に表示した原画像である。ただし、実際にコンピュータ入力した画像の濃淡レベルは 8 ビットで分解能は  $256 \times 256$  である。図 5.23 に示す画像に基づいて画像処理を行った結果を図 5.24 に示す。同図(a)は自動的に決定した閾値によって原画像を2値化した結果を示している。これより、肩関節、肘関節および前腕に付けら



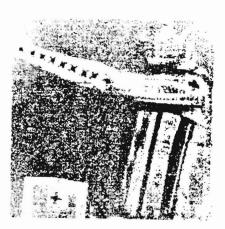
(a) 2 值化画像



れた結果を示している。これより、肩関節 肘関節および前腕に付けられた標点、さら に原点となる参照点が十字の形で浮き出て いることがわかる。図 5.2 4 (b)は標点を抽 出した結果を×印で示している。また同図 (c)は横方向の線成分に基づいて前腕の輪郭 線と中心線を抽出した結果を直線で示して

いる。標点や輪郭線はいずれも比較的精度よく抽出されており,ここで確立した画像処理方法が有効であることが認められる。

5. 5. 3 動作パターンとトルクの解析結果実験を行った左前腕の



(b) 標点の抽出結果



(c) 前腕の輪郭線と中心線 の抽出

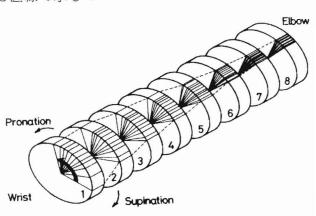


図 5.25 前腕のひねり動作パターン

回旋運動のうち,回外位  $7.7^\circ$  から回内位  $6.2^\circ$  までの  $1.3.9^\circ$  におよぶひねり動作を取り上げて解析を行った。これは  $3.5\,\mathrm{mm}$ フィルムでは  $2.2\,\mathrm{c}$  まに相当するもので,それらの各こまについて画像処理を行い,各時刻における前腕各部の回転角度を求めた。図  $5.2.5\,\mathrm{t}$  は各時刻における前腕各部の回転角が読み取れるようにひねり動作のパターンを模式的に表示した結果である。図中の番号は手首側から順に  $1\,\mathrm{mag}$  からまで付けられた標点の番号を示している。番号  $1\,\mathrm{t}$  は手首の標点で,番号  $8\,\mathrm{t}$  は  $1\,\mathrm{t}$  は  $1\,\mathrm{t}$  が  $1\,\mathrm{t}$  のところに付けられた標点である。これより,手首側に近づくほど回転角が大きくなっていることが認められる。ここで,各部分の角変位が時間とともにどのように変化するかを検討するため,

各部分の回転角速度を算出した。 動作中における各部の平均角速 度を求めた結果を表 5.1に示す。 度を求めた結果を表 5.1に示す。 表には各部の平均角速度の差も のではないる。これより,財側を が最も大きくがわかる。まは財側を でいることがわかる。は財別を のの差を見れば角速度はおらで増加している を も大きく変化していることが認

表 5.1 前腕各部の平均回転角速度

No. of part	Average of angular velocity (rad/s)	Difference (rad/s)
1 (wrist)	4.9549	0.6052
2	4.3497	0 (024
3	3.6676	0.6821
4	3.0759	0.5917
5	2.2232	0.8527
6	1.6582	0.5650
7	1.2886	0.3696
<u> </u>	1.2000	0.2260
(elbow)	1.0626	

められる。このことは番号 4 と 5 の間の部分が最もよくひねられていることを示している。この部分は前腕の全長に対して手首側より約 4 0 %のところに相当する。従って力学的解析を行うにあたってはこの部分で前腕を二分割し、前腕を二つの等価な円柱に置き換えている。

前腕のひねり動作において、回旋によるトルクがどの程度作用するかを検討するため、5.2.2節で導いた運動方程式のうち左腕に関する運動方程式を解いて、力およびトルクの推定を行った。手に持ったアルミ棒の回転角加速度は、

回転面をとらえた鏡の像から計測した回転角変位より求めている。左腕に関して求めたトルクのうち,ひねりによって生じるトルクの成分を図 5.2 6 に示す。図の実線は前腕を二分した部分のうち手首側,点線は同じく肘側のトルクを示している。また一点鎖線は上腕のトルクを示している。トルクの符号は回内方

向にはたらく場合を正としている。

図には参考のため、主要な箇所に前腕のひねり動作パターンを示している。図より動作の開始とともにアルミ棒を回転させるため回内方向にトルクが作用し、回転が始まると慣性力によって逆の回外方向のトルクが生じることがわかる。またこのトルクは回外回内角が0度の付近で最大値を取っていることが認められる。腕の回旋運動では、手の部分に慣性

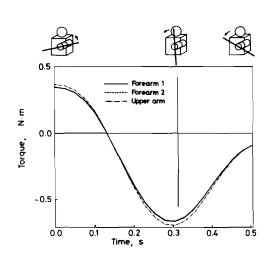


図5.26 前腕のひねりによりトルク

によって生じたトルクが前腕の手首側に伝わり、さらにその値に前腕部の回旋によるトルクが加算されて次の部分に伝わる。従って手から前腕、前腕から上腕へと伝達されるトルクは徐々に増加する。図 5.2 6 に見られる 3 つの値のそれぞれの差がその増分、すなわち、各部の回旋によって生じるトルクを示している。これより、前腕や上腕が回旋して生じるトルクは極めて小さく、各部に作用するトルクの大部分は手に持ったアルミ棒の回転によって生じたトルクが伝達されたものであることがわかる。

## 5.6 結 言

本章では通常の三次元的な運動動作に加えてさらに身体各部のひねりを考慮 した運動動作を解析する方法を確立し、実際のひねり動作について詳細な解析 を行った。運動動作としては身体の左右側方にある二台のテーブルの間で荷物 を移動させる動作を取り上げ、直立姿勢で行う場合と正座姿勢で行う場合について実験を行った。これより特に胴のひねりに注目して、ひねり動作のパターンやひねりによって生じるトルクなどを求め作業との関連を明らかにした。次いで運動動作として前腕の回旋運動を取り上げ、前腕の微妙なひねり動作を詳細に検討した。ここでは、座標計測用にITVカメラとミニコンピュータから成る画像処理システムを開発し、解析に必要な座標の抽出を行った。

本章で得られた結論は以下のとおりである。

- (1) ひねりを伴う身体部分について新たな三次元数学モデルを構築し、従来 の並進および回転運動に加えてひねり動作についても詳細な解析が行える ことを明らかにした。
- (2) 三次元コンピュータ・グラフィックスを利用して胴および大腿のひねり 動作のパターン表示方法を確立し、動作パターンの特性、人体の重心移動 軌跡などを明らかにした。
- (3) 動作に伴う胴のひねり角度およびひねりによって生じるトルクを求め、 直立時と正座時における荷役作業動作について比較検討を行った結果、正 座姿勢における胴のひねり角度は、直立姿勢の場合に比べて2倍程度大き いが、トルクについては顕著な差はないことなどが示された。
- (4) ITVカメラを利用して座標位置情報を抽出する方法は、従来のグラフィック・タブレットを用いた座標抽出方法に比べ、測定値の再現性に関して優れており、前腕のひねり動作のような細部の解析には極めて有効であることが明らかとなった。
- (5) 前腕のひねり動作についてパターンの解析およびトルクの推定を行った 結果,前腕には特によくひねられる箇所が存在すること,ひねりによって 生じるトルクは極めて小さいことなどが求められた。

# 第 6 章 シミュレーションによる作業機能評価

#### 6.1 緒 言

前章までにおいて二次元および三次元の運動動作解析を行い,具体的な動作に対して運動学および動力学的な観点から人体の運動に見られる基本的な動作パターン,身体各関節角の相互関係,動作に伴う身体の重心移動軌跡および身体各部に作用する力,トルクの時間変化などを明らかにしてきた。しかしながら人体にとってどのような動作が最適であるかといった問題,あるいは具体的な動作に対して良し悪しの評価を行う問題に関してはこれまでの研究ではまだ明らかにされていない。

ここでは 3 , 4章で得られた動作の分析データに基づいて運動のモデルを求め、動作のシミュレーションを行って種々の動作を評価する方法論の検討を行う。具体的には解析を行う動作として, 5.5 kg の荷物の持ち上げ動作を取り上げ,コンピュータを用いて荷役作業動作を模擬的に創成する。ここでは作業機能を評価する際の評価規準としては腰関節まわりおよび肩関節まわりのトルクの大きさを選んでいる。

### 6.2 シミュレーションの方法

#### 6.2.1 身体各点の座標の創成

人体の運動動作のシミュレーションとしては、これまで、Mann<sup>110)</sup> が各部の可能な動きを組合せて走幅跳びのシミュレーションを行った研究がある。また Dapena <sup>46)</sup> は棒高跳びにおける離床時の各部の運動を物理法則 に基づいて構成している。この他土屋 <sup>111)</sup> はモータで駆動する歩容シミュレータを試作し、種々の歩容を模作している。

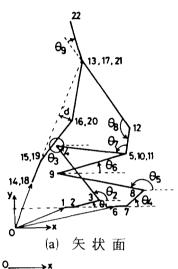
本研究では、実験データに基づいて荷役作業動作を構成し、腰関節まわりのトルクを評価規準として種々の動作を比較検討する。シミュレーションに用いる人体モデルは3.2節で構築した17の要素から成る三次元剛体リンクモデル

である。荷物の持ち上げ動作のシミュレーションは、コンピュータを用いて各時刻における各剛体端点の座標を創成することによって行う。剛体端点の座標のうち矢状面内における成分は、基本的には剛体の長さと水平方向とのなす角

端点 1 , 2 および 6 , 7 は固定して動かないものとし、 4 章で述べた実験で得られた足先の座標と同じ値とする。

端点3,4 および5(右股関節)については,

 $x_i = \ell_{i-1,i} \cdot \cos \theta_{i-2} + x_{i-1}$   $y_i = \ell_{i-1,i} \cdot \sin \theta_{i-2} + y_{i-1}$   $\cdots$  (6.1) となる。ここで  $\ell_{i-1,i}$  は矢状面内における端点 i-1 と i の距離で,この長さは時間に対して一定であるとする。



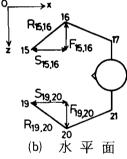


図 6.1 シミュレーションモデル とパラメータ の関係

端点 8, 9, および 10 (左股関節)については

$$x_{i} = \ell_{i-1, i} \cdot \cos \theta_{i-4} + x_{i-1} y_{i} = \ell_{i-1, i} \cdot \sin \theta_{i-4} + y_{i-1}$$
 ..... (6.2)

となる。ここで端点 5 と 1 0 の矢状面内における座標は必ずしも一致するとは限らない。ここではこれら 2 点の座標を等しくするため 2 点の平均値を求めそれぞれの値と置き換える。また股関節の中心点 1 1 は矢状面内において端点 5

および10と同一の点とする。

端点12については,

となる。ここで、 $\theta$  は腰要素が水平方向となす角であり、次式で与えられる。

$$\theta_7' = \tan^{-1} \frac{y_4 - y_5}{x_4 - x_5} - \theta_7$$
 ..... (6.4)

端点13,17,21については,

となる。ここで $\theta$ もは胴要素が水平方向となす角であり、次式で与えられる。

$$\theta'_8 = \pi - \theta_8 + \theta'_7 \qquad \cdots \qquad (6.6)$$

端点22については,

$$\begin{cases}
 x_{22} = \ell_{21,22} \cdot \cos(\theta_8' - \theta_9) + x_{21} \\
 y_{22} = \ell_{21,22} \cdot \sin(\theta_8' - \theta_9) + y_{21}
 \end{cases}
 = (6.7)$$

端点14および18の座標は4章で述べた実験から得られた荷物の軌跡をも とにして、その移動軌跡を後述する関数で近似して与える。

端点 15 および 19 については、手の方向が肩関節の方を向くように定める。 すなわち、

となる。

端点16 および20 については、手首と肩を結ぶ線分の中点から距離 d だけ体幹に近づいた点として与える。すなわち、

$$x_{i} = \sqrt{d^{2} / \left\{ 1 + \left( \frac{x_{13} - x_{15}}{y_{13} - y_{15}} \right)^{2} \right\} + \frac{x_{13} + x_{15}}{2}}$$
 (6.9)

$$y_{i} = -\frac{x_{13} - x_{15}}{y_{13} - y_{15}} \left( x_{i} - \frac{x_{13} + x_{15}}{2} \right) + \frac{y_{13} + y_{15}}{2}$$

となる。ここでdは後述する関数で近似するものとする。

前額面内における座標については,基本的に 4章で述べた実験データと同一の値を取るものとする。ただし,荷物の位置によって矢状面内における腕の長さが短くなる場合,前額面内の肘の開きを考慮して腕の実長が変化しないようにする。図 6.1 (b)は人体の水平面内における肘の開きと各端点の位置関係を示す。ここで図中のR, S, およびFはそれぞれ前腕の実長,矢状面内の長さ,および前額面内の長さを示している。これよりRとSは既知であることより端点 1 6 および 1 9 0, 2 座標は以下の式で与えられる。

$$z_{16} = z_{15} - \sqrt{R_{15,16}^2 - S_{15,16}^2}$$

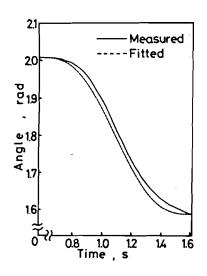
$$z_{20} = z_{19} + \sqrt{R_{19,20}^2 - S_{19,20}^2}$$

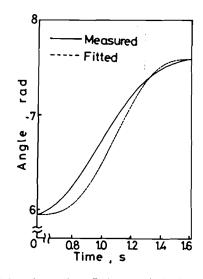
$$(6.10)$$

### 6.2.2 関数近似による身体関節角の創成

本章における荷役動作のシミュレーションは4章で述べた荷役作業動作の実験結果のうち、被験者2番(年齢23歳)の第1回目の動作に基づいて行った。実験結果を詳細に検討した結果、動作中における身体各部の矢状面内関節角の時間的な変化は、基本的に以下の関数<sup>53)</sup>によって近似できることが求められた。すなわち、

である。ここで,Tは角度変化の持続時間, $f_0$  および  $f_1$  はそれぞれ t=0 および t=Tにおける関節角の値である。実験において 2 番の被験者は動作開始後 0.57 秒から 1.6 2 秒まで持ち上げ動作を行っており,ここではこの間の関節角度の時間的変化を式 (6.11) を用いて関数近似を行う。図 6.1 に示す角度について実験データにあてはめた関数 f(t) の例を図 6.2 に示す。同図(a),(b) はそれぞれ角  $\theta_2$  ,  $\theta_3$  の角度変化を示している。いずれも実線は実験の測定値を,破線は近似した関数 f(t) の値を示している。これより,関数 f(t) はよい近似を与えることが認められる。





- (a) 右足首関節の角度変化(右下 腿の水平方向とのなす角 θ<sub>2</sub>)
- (b) 右ひざの関節の角度変化(右大腿の水平方向とのなす角 θ<sub>3</sub>)

図 6.2 身体関節角にあてはめた関数の例

身体の関節角を関数近似すれば,各時刻における関節角の相互関係を任意に変えることが可能である。例えば,すべての関節角について式(6.11)におけるTの値を1/2にすれば,荷物の持ち上げ動作は2倍の速さで行われることになる。また下肢の関節角に関するTを1/2倍し,上肢の位置を決定する角(図6.1(a)における $\theta_7$  および $\theta_8$ ) および荷物の位置を初め一定にしておくことによって,腰を先に上げ,後で荷物を上げるといった動作を創成することができる。

本章では上肢と下肢の運動を上述のように分離することによって種々の荷役動作パターンを創成する。ここでは基本的に腰を先に立ち上げ,後で荷物を持ち上げる動作をパターンA,逆に腰はそのままで先に手によって荷物を上げる動作をパターンBとする。今,pをt  $\leq p$   $\leq 1$  としてパターンAを創成するには式(6.11)のTをすべてp 倍し,時刻t に対して角度 $\theta_i$  を以下のように与えればよい。すなわち上半身に関する角 $\theta_{7}$ . $\theta_{8}$  については,

下半身に関する角 $\theta_1 \sim \theta_6$ について

$$0 \le t \le pT$$
のとき  $\theta_i = f(t)$   $pT < t \le T$ のとき  $\theta_i = f_1$   $ext{ }$   $ext{$ 

逆にパターンBを創成するには同様にTをすべてp倍し,上半身に関する角 $\theta_{7}$ , $\theta_{8}$ を式(6.13)によって定め,下半身に関する角 $\theta_{1}\sim\theta_{6}$ は式(6.12)によって定めればよい。ここでpの値が $\pm$ に近いほどそれぞれ純粋にパターンAあるいはパターンBに近づき,pが1に近いほど実験で行った被験者の動作に近いものとなる。今,操作変数をs( $0 \le s \le 1$ )として,sが0に近づくはどパターンAに近づき,sが1に近づくほどパターンBに近づくようにするにはpを以下のように与えればよい。

$$s \le 0.5 \text{ Obs} \quad p = s + 0.5$$
  
 $s > 0.5 \text{ Obs} \quad p = 1.5 - s$  \tag{6.14}

ここでs=0.5のとき、被験者の実際の動作に近い動作が再現できる。

なお、前節で取り上げた荷物の y 座標および d の時間変化も同様に式(6.11) の関数によって与えることとした。ただし、荷物の x 座標は以下のようにして与えている。すなわち本被験者の場合、一旦荷物を腰の方へ引き寄せ、再び前方へ出していることから、荷物の x 座標は一旦大きくなり、再び小さくなる。従って、対象としている区間を二次関数で近似する。パターン A および B に近づくほど腰への引き寄せが減少するものと仮定して、p が t に近づくほど極大値を減少させている。

#### 6.3 シミュレーションの結果および作業機能の評価

荷役動作における種々のパターンを計算機シミュレーションによって求め検討を行った。図 6.3 は動作パターンを変化させる操作変数 s を 5 種類に変化させて行ったシミュレーションの結果を骨格線図の形でグラフィック・ディスプレイ上に表示した例である。同図(a), (b)はそれぞれ左前方および左側方に視点

を置いたパターンを示しており、いずれもs=0 のときの結果である。これは 前節で述べたパターンAを示している。すなわち先に腰を上げ、後で荷物を持ち上げるという動作パターンである。ここで床にある荷物に手を届かせるまで と、立ち上がってから目前のテーブルに荷物を置く動作は実験データを用いている。すなわち、シミュレーションは荷物を持ち上げる最中のみについて行っている。各骨格線図の時間間隔は0.044 砂である。図(a)、(b)よりこの場合の動作では先に腰を上げ後で荷物を持ち上げている様子がよくわかる。

図 6.3 (c), (d)は同様に s=0.25 のときの結果を示している。これより腰の動きが s=0 の場合ほどは分離されていないことがわかる。同様に(e), (f)は s=0.5 の場合, (g), (h)は s=0.75 の場合, (i), (j)は s=1.0 の場合を示している。これらの図から,s が 1 に近づくにつれ,先に荷物を上げ後で腰を上げる傾向が強くなることが認められる。このようにs の値を任意に変化させることによって,コンピュータと対話形式で種々の動作パターンを創成することができ,本章で取り上げたシミュレーションの方法は動作解析を行う上で非常に有効である。

図 6.4 はシミュレーションによって創成した荷役動作について身体の重心軌跡を求めた結果を示す。同図(a)は s=0 の場合の結果を示している。これより腰が先に上がり,胴体が前方に傾くことによって重心がいったん身体の前方へ大きく移動していることがわかる。同図(b)は s=0.25 の場合の結果を示している。ここでは図(a)の場合の傾向がやや小さくなっている。同図(c),(d),(e)はそれぞれ s=0.5, 0.75 および 1 の場合の結果を示している。これらより,s が大きくなるにつれて重心は後方へ大きく移動していくことが認められる。これは,腰を上げずに先に荷物を肩の高さまで上げ,しかも胴体を起こすことによって後方に重心が移動する結果であると考えられる。以上のいずれの場合も,重心の位置は支持基底面の上方にあり,s のどの値に対する動作も倒れることなく行えることを示している。

荷物の持ち上げ動作における種々のパターンに対して、動作中の腰関節まわりおよび肩関節まわりのトルクを求め、各動作の評価を行った。評価規準とし

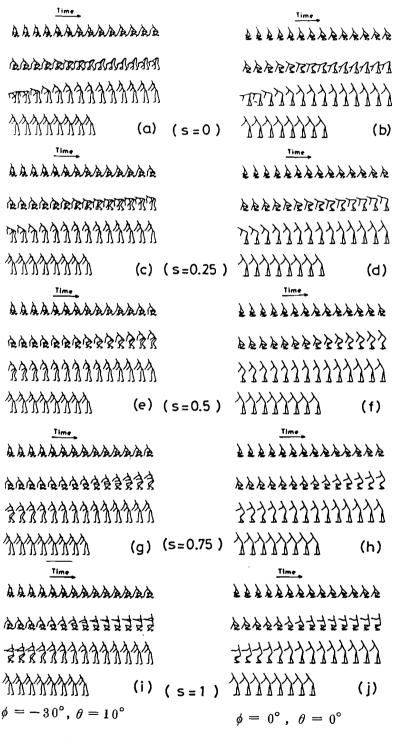


図 6.3 荷役作業動作のシミュレーション

て腰まわりのトルクを選んだのは、腰椎が体幹の荷重のかかる部分であり、椎間円板ヘルニアや脊椎分離症などの脊柱に関する疾患も腰部にかかる負荷が原因となっているためである。また、肩関節まわりのトルクは、荷役作業動作における腕の運動を反映するものとして重要な要因となる。

トルクの算出には3.2.2節で導いた身体各部の運動方程式のうち、上半身に 関する運動方程式を用い,純粋に数学的に解くことによって身体各関節まわり のトルクを求めた。荷物を床から上げる瞬間は動作ごとに異なるため、求めた 動作パターンから手が床から離れる瞬間を読み取った。図 6.5 は種々の荷役動 作に対して求めた身体各部に作用するトルクの例を示す。同図(a), (b)はそれぞ ns = 0 の場合すなわち、腰を先に上げる動作の場合の結果である。図中の実 線,破線 および一点 鎖線 はそれぞれ前 額面 内,水平 面 内 および矢状面内で作用する ト ルクを示している。図には参考のため主要な箇所における動作パターンをあわ せ示している。図(a)より腰関節まわりのトルクは矢状面内の成分が大部分を占 めていることがわかる。ここでトルクの符号は胴体を起こす方向に作用する場 合を正としている。これより、初め床にある荷物に手を届かせる時の前傾姿勢 によって正のトルクが作用し、腰の位置を上げるに従ってトルクは増加し、荷 物を持ち上げる時点で最大となっていることがわかる。図(b)より肩関節まわり のトルクについては矢状面内の成分の他、肘を開くことによって生じる前額面 内の成分も認められる。ここで矢状面内のトルクは腕を前方へ突き出す方向に 作用する場合を正,前額面内のトルクは腕を体幹の方へ閉じる方向に作用する 場合を正としている。図よりこれらの成分は荷物を持ち上げる瞬間に最大値を 取っていることがわかる。

図 6.5 (c), (d)は同様に腰関節まわりおよび右肩関節まわりのトルクを示しており、s=0.25 の場合の結果である。動作に伴うトルクの変化は同図(a), (b) の場合と同様であるが、腰関節まわりのトルクの最大値は図(a)の場合に比べて大きく減少していることが認められる。同図(e), (f)は同様にs=0.5 の場合, (g), (h)はs=0.75, (i), (j)はs=1 の場合の結果を示している。以上より、腰を先に上げる動作から腕を先に上げる動作へ動作パターンが移行するに従っ

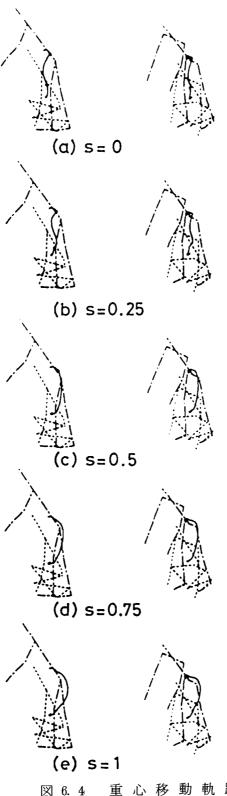
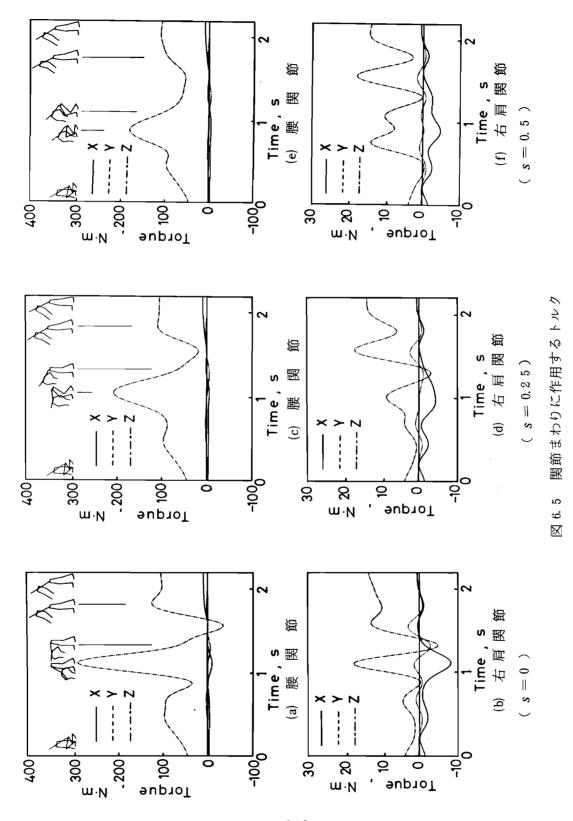
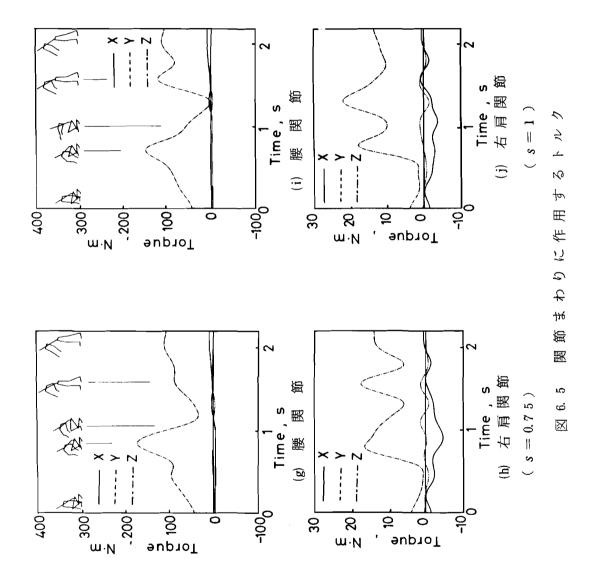


図 6.4 重 心 移 動 軌 跡 -139-



-140-



て、腰に作用するトルクの最大値は減少していることが認められる。また肩関節まわりのトルクについては、腰を先に上げる動作では局所的に大きなトルクが作用しているのに対して、腕を先に上げる動作では比較的大きなトルクが作業時間全般にわたって作用していることがわかる。

動作パターンによるトルクの違いを検討するために図 6.5 の腰関節まわりのトルクのうち矢状面内の成分のみを抽出し、5 とおりの動作について重ね描き

した結果を図 6.6 に示す。図中の実 線は腕を先に上げる動作の場合,二 点鎖線は腰を先に上げる動作の場合のトルクを示しており,その他はその中間的な動作の場合におりを充しておりないる。これより腕を先にいる動作パターンから腰を先に上げる動作パターンへ移行するに大さいであることが認められるないである上げる動作に上げる動作は大に上げる動作は大に上げる動作は大に上げる動作は大に上がる動作は大に上げる動作は大に上げる動作は大によって、腰を取ることによって、腰にかる負担が増加するためであると

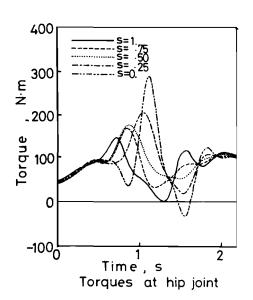


図 6.6 種々の荷役動作における腰関節まわりの矢状面内トルク

考えられる。また図よりそれぞれの動作においてトルクが最大値に到達する時刻は、腰を先に上げる動作パターンへ移行するに従って、遅れることが認められる。この時間のずれは、荷物を持ち上げはじめる時間のずれに対応している。以上より、腰にかかる負担を小さくするには先に腕によって荷物を持ち上げ、後で立ち上がるといった動作を行えばよいことが指針として得られる。逆に腰を先に上げ、後で荷物を持ち上げる動作は腰にかかる負担が大きく、腰にとって好ましくない動作であると判断される。

種々の荷役動作において腰関節および肩関節まわりのトルクがどのような関係で変化するかを検討するため、持ち上げ動作中に作用する各トルクの平均を

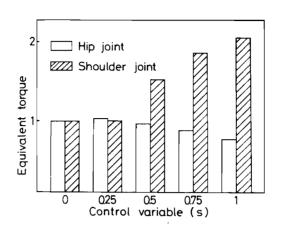


図 6.7 種々の荷役動作において腰関節および 肩関節まわりに作用する平均トルク (s=0の場合を1として基準化している)

求めた。図 6.7は腰関節および肩関節まわりについて求めた 平均 トルクを各動作別に まとめたものである。ここでは s=0 の場合,すなわち腰を先に上げる動作の場合の 平均トルクを1として基準化して示している。これより腰を先に上げる動作パ ターンから腕を先に上げる動作パターンへ移行するに従って、腰に作用するト ルクは徐々に減少する傾向があり、一方肩に作用するトルクは逆に増加する傾 向がある。すなわち、腕を先にあげる動作においては腰への負担は小さくなる が、肩にかかる負担が増大する。しかも肩関節まわりの平均トルクはs=0の 場合,すなわち腰を先に上げる場合に比べて2倍以上にも達している。従って 肩への負担を考慮した場合、腕を先に上げる動作が必ずしもよいとは断言でき ない。シミュレーションを行う際の基礎とした被験者の場合は、図 6.70s= 0.5の場合とほぼ一致しており、腰、肩ともに平均的な値を取っている。これ は、人間が動作を行う場合、体にかかる負担を一箇所に集中させるのではなく、 各部に適した負担を配分し調和のとれた動作を行っていることの現われである と考えられる。こういった人間の特性は、生まれた時から学習によって自然に 身につけられるものと考えられるが、今後同様の解析を進めることにより、種 種の作業について各作業者に最適な動作のあり方を検討する上で有用な指針を 得ることができると期待されるであろう。

#### 6.4 結 言

本章では3,4章で得られた分析データに基づいて荷役作業動作のシミュレーションを行い,種々の荷役動作パターンに対して腰関節および肩関節まわりのトルクを求めた。次いでこれらのトルク値を評価規準として種々の荷役動作を評価し検討を行った結果,以下の結論が得られた。

- (1) 身体各関節角を関数表示し、パラメータを変更することによって種々の動作パターンを創成する方法を確立し、コンピュータグラフィックスを用いた対話形式によるシミュレーションの方法が、荷役作業を評価する上で有効であることを明らかにした。
- (2) 作業に伴う身体の重心移動軌跡を求め、シミュレーションによって創成した動作が実際に行い得るものであることを検証した。
- (3) 動作中に作用する腰関節および肩関節まわりのトルクを求め、荷物の持ち上げ動作における動作パターンの良し悪しの評価並びに最適な動作に関する検討を行った。

#### 第7章 結論

人間の二次元および三次元的な運動動作を運動学並びに動力学の立場から解析、評価する方法を確立するため、まず人体の数学モデルを構築し、基本的にミニコンピュータとグラフィック・タブレット、およびグラフィック・ディスプレイ装置からなるデータ処理システムを試作し、動作パターンの解析、評価、並びに身体各部に作用する力やトルクの計算による定量的な評価を行った。実際に種々の動作について若年者から老年者に至る広範な年齢層の被験者について具体的な検討を行った。各章において得られた主な結論は以下のとおりである。

第2章では人体の矢状面内二次元数学モデルを構築し、起立・着席動作および荷物の持ち上げ、持ち下ろし動作における全身の運動動作を解析し検討を行った。その結果、起立・着席動作における基本的な動作パターン、各部関節角の相関および各関節に作用するトルクなどと加齢の影響との関係が明らかとなった。また起立・着席動作中に目前のテーブルに手をつくことによって腰まわりのトルクが軽減されることを定量的に明らかにした。さらに荷物の持ち上げ、持ち下ろし動作では動作パターンならびに身体各関節に作用する力、トルクの解析を総合して、荷物を持ち下ろす動作は持ち上げる動作に比べて身体各部の微妙な制御と協調を必要とする複雑な運動であることを明らかにした。

第3章では自由度の大きい人体の運動動作を解析するため、人体に関する三次元数学モデルを構築し、三次元コンピュータ・グラフィックスを利用した動作パターンの表示法を確立するとともに、三次元運動において身体各部に作用する力およびトルクの推定方法を明らかにした。さらにシネカメラと鏡を用いた運動動作の三次元計測法並びに、ホログラフィック・ステレオグラムを用いた三次元運動動作解析の方法論を明らかにした。

第4章では実際の三次元運動動作について実験を行い、3章で展開した解析 方法に基づいて具体的な解析および検討を行った。その結果、荷役作業動作で は動作時間、ひざと腰の協調運動および重心移動軌跡において疲労による影響 が現われることが明らかとなった。また垂直跳びにおける跳躍量は雕床前におけるひざおよび腰の屈曲運動並びに腕の振り上げ動作などに密接に関係していること、高齢者ほど跳躍量が小さくなることなどが明らかとなった。さらに三次元運動動作解析において動的な三次元画像を再生するにはホログラフィック・ステレオグラムを用いる方法が有効であり、本章で試作した原画撮影装置は十分実用的であることを明らかにした。

第5章では通常の三次元的な動作に加えて身体各部のひねりを考慮した運動動作解析の方法を確立し、胴のひねりを伴う荷役動作と前腕のひねり動作について詳細な解析を行った。前腕のひねり動作を解析するにあたっては、ITVカメラとミニコンピュータから成る画像処理システムを開発し、解析に必要な座標の抽出を行った。胴のひねりを伴う荷役作業動作を直立姿勢における場合と正座姿勢における場合について行い、両者の比較検討を行った結果、正座姿勢における胴のひねり角度は、直立姿勢の場合に比べて2倍程度大きいが、トルクの大きさには大差がないことが明らかとなった。ITVカメラを利用した座標抽出方法は、前腕のひねり動作のような細部の解析には有効であることが明らかとなった。また前腕のひねり動作についてパターンの解析およびトルクの推定を行った結果、前腕には特によくひねられる箇所が存在すること、ひねりによって生じるトルクは極めて小さいことなどが明らかとなった。

第6章では3,4章で得られた分析データに基づいて荷役作業動作のシミュレーションを行い,種々の荷役作業動作パターンに対して腰関節および肩関節まわりのトルクを求めた。その結果,本章で確立したコンピュータ・グラフィックスに基づくシミュレーションの方法が,荷役作業を評価する上で有効であることを明らかにした。さらに動作中に作用する腰関節および肩関節まわりのトルクを評価規準とし,荷物の持ち上げ動作に対する良し悪しの評価を行い,最適な動作を明らかにした。

#### 参考文献

- (1) 大島:人間工学、ME選書10(1970)、コロナ社、
- (2) 林. 他 4 名: 人間工学(1981). 日本規格協会.
- (3) 岩田:中高年者層の生産における作業性と安全性に関する医工学的研究, トヨタ財団第8回助成研究報告会資料(1980). P.75.
- (4) 中村,斉藤:基礎運動学(1976), 医歯薬出版.
- (5) A. Garg and G. D. Herrin: Stoop or Squat: A Biomechanical and Metabolic Evaluation, AIIE Trans., 11-4 (1979), p. 293.
- (6) 北岡:荷役作業における正面姿勢モデルの数学的解析に関する研究,日本経営工学会誌、26-2(1975), P.147.
- (7) 北岡, 熊坂:荷役作業における身体移動の数学姿勢モデルに関する研究, 日本経営工学会誌、25-4(1975)、P.293.
- (8) 北岡:荷役作業の分類と姿勢コード化に関する研究, 日本経営工学会誌, 28-3(1977), P. 296.
- (9) 白木:作業における運動動作解析と視運動機能評価の基礎研究,神戸大学 大学院工学研究科修士論文(1979).
- (10) 三原: コンピュータを応用した荷役作業動作解析の研究, 神戸大学大学院工学研究科修士論文(1981).
- (11) D. S. Childress: Powered Limb Prostheses,: Their Clinical Significance, IEEE Trans. on Biomedical Engineering, Vol. BME-20, No. 3 (1973), p. 200.
- (12) R. Seliktar: Self Energized Power System for above Knee Prostheses, J. of Biomechanics, 4-6 (1971), P. 431.
- (13) 土屋: リハビリテーション工学と機能評価, 人間工学, 17-2(1981), P.51.

- (14) 首藤,他:身体障害者とスポーツ,リハビリテーションの立場より一, 人間工学、17-6(1981)、P.251.
- (15) A. Dainis: Analysis and Synthesis of Body Moments Utilizing the Simple N-Link System, Biomechanics IV (1975), P. 513, Univ. Park Press, Baltimore.
- (16) T. K. Ghosh and W. H. Boykin, Jr.: Analytic Determination of an Optimal Human Motion, J. of Optimization Theory and Applications, 19-2 (1976), p. 327.
- (17) J. P. Boysen, P. R. Francis and R. A. Thomas: Interactive Computer Graphics in the Study of Human Body Planner Motion under Free Fall Conditions, J. of Biomecanics, 10-11/12 (1977), p. 783.
- (18) J. F. Bedi, and J. M. Coom: Take off in the Long Jump Angular Momentum Considerations, J. of Biomecanics, 10-8 (1977), p. 54
- (19) M. Vukobratović, 加藤, 山下(訳) : 歩行ロボットと人工の足(1975), 日刊工業新聞社.
- (20) M. Vukobratović, 加藤, 山下(訳): ロボットの手(1979), 日刊工業新聞社。
- (21) 神谷, 岡部, 横山:関節型ロボットアームの高速化のための運動制御 —-間欠運動の高速化に関する研究 — 、精密機械、47-6(1981), P. 706.
- (22) B. K. P. Horn: Kinematics, Statics, and Dynamics of Two-Dimensional Manipulators, MIT Artificial Intelligence Laboratory, working paper 99, June, (1975)
- (23) D. L. Kelley, A. Dainis, and G. K. Wood: Mecanics and Muscular Dynamics of Rising from a Seated Position, Biomechanics V,

- 1-B (1976), p. 127, Univ. Park Press, Baltimore.
- (24) D. A. Winter, et al.: Kinematic of Normal Locomotion A Statistical Study Based on TV Data, J. of Biomechanics, 7-6 (1974), p. 479.
- (25) M. A. Townsend, M. Izak, and R. W. Jackson: Total Motion Knee Giometry, J. of Biomechanics, 10-3 (1977), p. 183.
- (26) E. Y. Chao, K. N. An, L. J. Askew, and B. F. Morrey:

  Electrogoniometer for the Measurement of Human Elbow

  Joint Rotation, Trans. ASME, J. of Biomechanical Engg.,

  102 (1980), p. 301.
- (27) H. J. Sommer III and N. R. Miller: A Technic for Kinematic Modeling of Anatomical Joints, Trans. ASME, J. of Biomechanical Engg., 102 (1980), p. 311.
- (28) 土屋, 松尾:歩行解析システムと歩行解析, 人間工学, 7-3(1971), P.137.
- (29) E. Y. Chao and K. Rim: Application of Optimization Principles in Determining the Applied Moments in Human Leg

  Joints during Gait, J. of Biomechanics, 6-5 (1973), p. 497.
- (30) A. Pedotti: A Study of Motor Coordination and Neuro-muscular Activities in Human Locomotion, Biological Cybernetics, 26 (1977), p. 53.
- (31) D. A. Winter and D. G. E. Robertson: Joint Torque and Energy Patterns in Normal Gait, Biol. Cybernetics 29 (1978), P. 137.
- (32) A. Cappozzo, F. Figura, T. Leo, and M. Marchetti:

- Movements and mechanical energy changes of the upper part of the human body during walking, Biomechanics VI-A (1978), p. 272.
- (33) D. H. Hardt: Determining Muscul Forces in the Leg During
  Normal Human Walking An Application and Evaluation of
  Optimization Methods, Trans. of ASME, J. of Biomechanical
  Engg., 100 (1978), p. 22.
- (34) 増田, 江橋:中高年齢者の歩行姿勢について, 体力研究, 21(1971)P. 28.
- (35) R. Tomović, 加藤(訳): 人間の手足の制御(1968), P.142, 学献社.
- (36) G. L. Kinzel, A. S. Hall, Jr., and B. M. Hillberry: Measurement of the Total Motion Between Two Body Segments-I,

  Analytical Development, J. of Biomechanics, 5-1 (1972), p.93.
- (37) G. L. Kinzel, B. M. Hillberry, and A. S. Hall: Measurement of the Total Motion Between Two Body Segments-II, Description of Application, J. of Biomechanics, 5-2 (1972), p. 283.
- (38) 舟久保, 他 5 名: ヒトの腕の動作解析, バイオメカニズム 3 動作の原点の探究(1975), P. 97, 東大出版会。
- (39) 岡田:指の運動と手作業の分析,バイオメカニズム 3─動作の原点の探究 (1975), P.134, 東大出版会.
- (40) E. Y. Chao and B. F. Morrey: Three-Dimensional Rotation of the Elbow, J. of Biomechanics, 11-1 (1978), P. 57.
- (41) E. Y. Chao and K. N. An: Graphical Interpretation of the Solution to the Redundant Problem in Biomechanics, Trans.

  ASME, J. of Biomechanical Engg., 100 (1978), p. 159.

- (42) Y. Youm and Y. S. Yoon: Analytical Development in Investigation of Wrist Kinematics, J. of Biomechanics, 12-8 (1979), p. 613.
- (43) A. G. Erdman, et al.: Kinematic and Kinetic Analysis of the Human Wrist by Stereoscopic Instrumentation, Trans.

  ASME, J. of Biomechanical Engg., 101 (1979), p. 124.
- (44) 小佐,上村,林:慣性ひねりと非慣性ひねりとを重ねて行うときの角運動量の保存性について,東京教育大学スポーツ研究所報,11(1973), P.63.
- (45) 小佐, 上村, 林:空中における人体の回転について, バイオメカニズム 3(1975)、P.63、東大出版会.
- (46) J. Dapena: Simulation of Modified Human Airborne Movements, J. of Biomechanics, 14-1 (1981), p. 81.
- (47) 古庄, 横家, 藤木: 衝突時の乗員挙動の解析(第一報)――乗員の動きの シミュレーションとラップベルトの取付け角の影響について, 自動車技 術、23-10(1969), P.1046.
- (48) G. L. Smidt: Biomechanical Analysis of Knee Flexion and Extension, J. of Biomechanics, 6-1 (1973), p. 79.
- (49) D. A. Hobson, and L. E. Tarfason: Optimization of Four-Bar Knee Mechanisms A Computerized Approach, J. of Biomechanics, 7-4 (1974), pp. 371.
- (50) D. A. Winter and W. M. Kuryliak: Dynamic Stabilization in Human Gait: The Biomechanical Relationships between the Triceps Surae and the Metatarsophalangeal Joint, Biomechanics VI-A (1978), p. 280, University Park Press, Baltimore.

- (51) 高浜, 藤田, 佐藤, 矢野:正常歩行における歩行動作の解析方法, 精密機械、47-6(1981)、P.733.
- (52) 高浜,藤田,永田,高橋:正常歩行時の下肢関節における力とモーメントの実験的解析、精密機械、47-8(1981)、P.949.
- (53) C. E. Passerello and R. L. Huston: Human Attitude Control,
  J. of Biomechanics, 4-1 (1971), p. 95.
- (54) R. L. Huston and C. E. Passerello: On the Dynamics of a Human Body Model, J. of Biomechanics, 4-4 (1971), p. 369.
- (55) R. L. Piziali and J. C. Rastegar: Measurement of the Nonlinear, Coupled Stiffness Characteristics of the Human Knee, J. of Biomechanics, 10-1 (1977), p. 45.
- (56) J. L. Lewis and W. D. Lew: A Method for Locating an Optimal "Fixed" Axis of Rotation for the Human Knee Joint, Trans.

  ASME, J. of Biomechanical Engg., 100 (1978), p. 187.
- (57) S. Y. Aleshinsky and V. M. Zatsiorsky: Human Locomotion in Space Analyzed Biomechanically through a Multi-Link Chain Model, J. of Biomechanics, 11-3 (1978), p. 101.
- (58) J. Rastegar, R. L. Piziali, D. A. Nagel, and D. J. Schurman: Effect of Fixed Axis of Rotation on the Varus-Valgus and Torsional Load-Displacement Characteristics of the In-Vitro Human Knee, Trans. ASME, J. of Biomechanical Engg., 101 (1979), p. 134.
- (59) K. Iwata, T. Moriwaki, and T. Kawano: Computer Graphics

  Applied to Human Motion Analysis and Body Force Evaluation,

  Proc. of EUROGRAPHICS 80 (1980), p. 167.

- (60) 岩田, 森脇, 川野: コンピュータを利用した起立・着席動作の解析と身体各部の作用力に関する研究, 日本機械学会論文集 47-419号 C編(1981), P.978.
- (61) 岩田, 森脇, 川野: コンピュータを応用した起立・着席動作の解析と加齢の影響に関する研究, 人間工学, 17-5(1981), P. 239.
- (62) 岩田,森脇,川野:荷役作業における作業者の運動動作解析と評価の研究(第一報)二次元人体モデルによる解析,精密機械,48-2 (1982), P.184.
- (63) 岩田,森脇,川野:荷役作業における作業者の運動動作解析と評価の研究(第一報)二次元人体モデルによる解析と評価,昭和55年度精機学会秋季大会学術講演会講演論文集(1980), P.507.
- (64) 藤井,赤沢:筋収縮の力学とそのモデル,日本機械学会誌,76-656 (1973),P.1044.
- (65) 赤沢,藤井:骨格筋の働きとそのモデル,バイオテク,4-5(1973), P.428.
- (66) H. Hatze: A Complete Set of Control Equations for the
  Human Musclo-Skeletal System, J. of Biomechanics, 10-11/12
  (1977), p. 799.
- (67) A. Seireg, and R. J. Arvikar: A Mathematical Model for Evaluation of Forces in lower Extremetries of the Musclo-Skeletal System, J. of Biomechanics, 6-3 (1973), p. 313.
- (68) S. A. Glantz: A Three-element Description for Muscle with Viscoelastic Passive Elements, J. of Biomechanics, 10-1 (1977), p. 5.

- (69) K. M. Jackson, J. Joseph, and S. J. Wyard: Sequential Muscular Contraction, J. of Biomechanics, 10-1 (1977), p. 97.
- (70) R. D. Crowninshield: Use of Optimization Techniques to Predict Muscle Forces, Trans. ASME, J. of Biomechanical Engg., 100 (1978), p. 88.
- (71) H. V. Mammeren and J. Drukker: Attachment and Composition of Skeletal Muscles in Relation to Their Function, J. of Biomechanics, 12-10 (1979), p. 859.
- (72) 青木,三田,矢部:一方向撮影画像による三次元測定法の開発,人間工学, 15-2(1979)、P.73.
- (73) J. C. Pezzach, R. W. Norman, and D. A. winter: An Assessment of Derivative Determining Techniques used for Motion Analysis, J. of Biomechanics, 10-5/6 (1977), p. 377.
- (74) 森脇, 岩田:インパルス応答法による工作機械の動剛性の測定(第二報), 精密機械, 45-7(1979), P.848.
- (75) H. D. Helms: Nonrecursive Digital Filters Design

  Methods for Achieving Specifications on Frequency Response,

  Trans. IEEE, Au-16, 3 (1968), p. 336.
- (76) S. Wold: Spline functions in data analysis, Technometrics 16-1 (1974), p. 1.
- (77) R. S. Pressman and J. E. Williams: Numerical Control and Computer-Aided Manufacturing (1977), John-Willey & Sons.
- (78) 三浦,池上,松井:部分および合成重心係数を用いての座標測定方式による合成重心の算出,体育の科学,24-8(1974),P.517.

- (79) 磯前:生体の重心に関する研究—Ⅰ. 簡単な2元同時測定法について, 慶応医学、33(1956). P.87.
- (80) M. P. Murray, A. Seireg, and R. C. Scholz: Center of Gravity, Center of Pressure, and Supportive Forces during Human Activities, J. of Applied Physiology, 23-6 (1967), p. 831.
- (81) M. Williams, H. Lissuer, 青池他 3名(訳):バイオメカニクス, 生体力学とその応用(1975)、医歯薬出版。
- (82) K. N. An, E. Y. Chao, W. P. Cooney, III, and R. L. Linscheid: Normative Model of Human Hand for Biomechanical Analysis, J. of Biomechanics, 12, 11/12 (1979), p. 775.
- (83) K. Iwata, et al.: Evaluation of Eye Movement in Target
  Tracking, Memoirs of the Faculty of Engineering, Kobe
  University, No. 26 (1980), p. 31.
- (84) K. Iwata, et al.: Modeling and Dynamic Analysis of Three-Dimensional Human Body Motion via Computer Graphics, Memoirs of the Faculty of Engineering, Kobe University, No. 27 (1981), p. 15.
- (85) K. Iwata, et al.: Computer Assisted Three-Dimensional Motion Analysis and Dynamic Body Force Evaluation in Simple Loading Operations, Proc. of 8th Int. Congress of Biomechanics (1981).
- (86) 岩田, 森脇, 川野, 三原:荷役作業における作業者の運動動作解析と評価の研究(第二報)コンピュータグラフィックスによる三次元動作解析, 精密機械, 投稿中.

- (87) K. Iwata, T. Moriwaki, T. Kawano, and T. Mihara: Three-Dimensional Analysis of Human Body Motion in Loading Submitted for publication in Operation, Bull. JSPE.
- (88) 岩田,森脇,川野,三原:荷役作業における作業者の運動動作解析と評価の研究(第二報)コンピュータグラフィックスによる三次元動作解析,昭和56年度精機学会春季大会学術講演会講演論文集(1981), P. 260
- (89) 岩田, 森脇, 川野: 荷役作業における作業者の運動動作解析と評価の研究 (第三報)動作特性の抽出とその検討, 昭和56年度精機学会秋季大会講 演会講演論文集(1981). P.16.
- (90) M. L. Hull and J. E. Ramming: A Biomechanical Model for Actively Controlled Snow Ski Bindings, Trans. ASME, J. of Biomechanical Engg., 102 (1980), p. 326.
- (91) T. P. Andriacci, S. J. Hampton, A. B. Schultz, and J. O. Galante: Three-Dimensional Coordinate Data Processing in Human Motion Analysis, Trans. ASME, J. of Biomechanical Engg., 101 (1979), p. 279.
- (92) 加藤:立体写真法による人間歩行の解析,愛知工業大学研究報告10号 (1975), P.18.
- (93) 加藤,村田:立体写真法による人間歩行の解析Ⅱ,愛知工業大学研究報告 1 1号(1976), P.1.
- (94) 加藤,村田:立体写真法による人間歩行の解析,第5回バイオメカニズム 論文集(1975) シンポジウム
- (95) 山口(訳):コンピュータグラフィックス(1979), P.66, 日刊工業新聞社.

- (96) C. H. Suh and C. W. Radcliffe: Kinematics and Mechanisms

  Design (1978), John Wiltey & Sons.
- (97) K. Iwata, et al.: 3-D Dynamic Motion Analysis by

  Cylindrical Holographic Stereogram, Memoirs of the

  (1982), p. 63

  Faculty of Engineering, Kobe University, No. 28
- (98) 岩田,森脇,川野,岩本:荷役作業における作業者の運動動作解析と評価の研究(第四報)ホログラフィック・ステレオグラムによる三次元動作解析、昭和57年度精機学会春季大会学術講演会講演論文集(1982).
- (99) 大越:ホログラフィ(1980)、電子通信学会.
- (100) E. Wolf: Progress in Optics XVI (1978), North-Holland.
- (101) K. Okada, T. Honda, and J. Tsujiuchi: Distortions of Reconstructed Images from Cylindrical Holographic Stereogram, Proc. of SPIE, Three-Dimensional Imaging, 120 (1977), p. 150.
- (102) 小川、他8名:解剖学(1969)、金原出版、
- (103) 谷内田,木谷,長田,辻:ミニコンを用いた対話形動画像処理システム, 電子通信学会論文誌, Vol. J61-D, 10(1978), P. 775.
- (104) S. Fujii, Y. Kaneda, M. Matsuo, and T. Kawano: A Study on Computerized Differential Diagnosis of Diffuse Liver Diseases by Pattern Characterization of Hepatic Scintigram, Proc. of ICCS (1978), p. 290.
- (105) 藤井,金田,松尾,川野:肝シンチグラムを用いたび漫性肝疾患の自動 読影の試み,生体計測と情報処理論文集,昭和53年度日本ME学会関 西支部研究会(1978)、P.25.

- (106) 藤井,他4名:び漫性肝疾患自動診断のための肝シンチグラムの特徴抽出, 第18回日本ME学会大会論文集その2(1979),P.648.
- (107) 川野: 肝シンチグラムの自動計測とび漫性肝疾患の自動診断に関する研究, 神戸大学大学院工学研究科修士論文(1979).
- (108) 大津: 判別および最小2乗規準に基づく自動しきい値選定法,電子通信学会論文誌, Vol. J63-D, 4(1980), P. 349.
- (109) 塩野, 真田, 手塚: 辺縁への可変感度をもつ 2 値画像のスケルトン, 生体 計測と情報処理論文集, 昭和 5 3 年度日本 M E 学会関西支部研究会(1978), P 2 2.
- (110) R. V. Mann and H. C. Sorensen: Investigating Complex

  Movements by Computer Simulation Application to the

  Flip Long Jump, Research Quarterly, 50-1 (1979), p. 36.
- (111) 土屋:歩行の計測とシミュレーション,バイオテク, 3-7(1972), P.554.

#### 付録 1 加速度 $a_{O_i}$ の導出

剛体要素の一方の節点 $O_i$ を固定し剛体要素が $O_i$  まわりに回転運動する事を 考える。この回転運動によって生じる他の一方の節点 $O_{i+1}$ の加速度を $\stackrel{oldsymbol{lpha}}{lpha_i}$ と すると剛体要素の節点のもつ加速度  $\mathbf{a}_{O_{i+1}}$  は点  $O_{i}$  自体がもつ加速度  $\mathbf{a}_{O_{i}}$  と  $\hat{\alpha}_i$  との和で与えられる。すなわち、

$$\mathsf{a}_{o_{i+1}} = \mathsf{a}_{o_i} + \widehat{\alpha}_i \qquad \qquad (1)$$

が成立し, これより次式を得る。

$$\mathbf{a}_{0i} = \sum_{i=1}^{i-1} \widehat{\alpha}_{i} \quad (i \ge 2) \qquad \dots$$

ここで、 $\mathbf{a}_{01} = \mathbf{0}$  , すなわち足のつま先は動かないと仮定しているため i は 2 以上の整数となる。次に $\hat{\alpha_i}$  の導出を行う。点 $O_i$  を原点にとり、時刻 t にお ける点 $O_{i+1}$  の座標を(x, y, z)とすると、ここではx-y平面内の円運 動を考えているため、付録図1に示す関係から

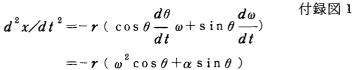
 $x = r \cos \theta$ ,  $y = r \sin \theta$ , z = 0となる。式(3)を時間で一階,二階微分し 角速度ω, 角加速度αを用いて以下のよ うに展開出来る。

 $dx/dt = -r \sin \theta \cdot \frac{d\theta}{dt} = -r \omega \sin \theta$ 

$$\frac{dt}{dy/dt} = r \cos \theta \frac{d\theta}{dt} = r \omega \cos \theta$$

$$d^2x/dt^2 = -r(\cos\theta \frac{d\theta}{dt}\omega + \sin\theta \frac{d\omega}{dt})$$

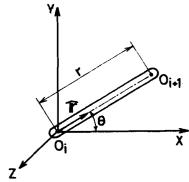
$$=-r(\omega^2\cos\theta+\alpha\sin\theta)$$



$$d^{2}y/dt^{2} = r(-\sin\theta\frac{d\theta}{dt}\omega + \cos\theta\frac{d\omega}{dt}) = r(-\omega^{2}\sin\theta + \alpha\cos\theta)$$

$$d^2z/dt^2=0$$

これより,次式を得る。



$$\widehat{\alpha}_{i} = \begin{pmatrix} d^{2}x/dt^{2} \\ d^{2}y/dt^{2} \\ d^{2}z/dt^{2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -r\omega^{2}\cos\theta - r\alpha\sin\theta \\ -r\omega^{2}\sin\theta + r\alpha\cos\theta \\ 0 \end{pmatrix} = -r\omega^{2} \begin{pmatrix} \cos\theta \\ \sin\theta \\ 0 \end{pmatrix} + r\alpha \begin{pmatrix} -\sin\theta \\ \cos\theta \\ 0 \end{pmatrix}$$
.....(6)

ここで剛体要素の方向を表わす単位ベクトルは,

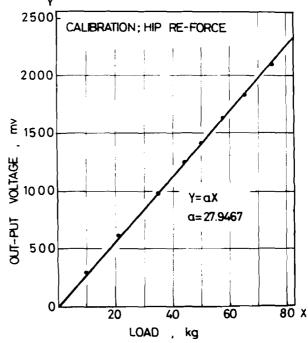
$$\hat{\mathbf{r}} = \left[ \cos\theta, \sin\theta, 0 \right]^T \qquad \dots$$
 (7)

となることから,次の結果を得る。

従って式(2), (9)より式(10), 即ち式(2-5)を得る。

式 (2-4) で表わされる  $\mathbf{a}_{G_i}$  の導出に関しても同様に展開できるのでここでは省略する。

付録2 椅子反力測定用荷 重計のキャリブレ ーション



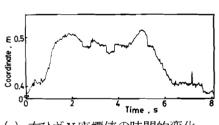
付録図2 荷重計のキャリブレーション

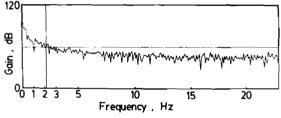
#### 付録3 実験装置の仕様

X3 大教衣匠の1178	
16mmCINE-CAMERA	LOCAM Model 164-5AC 16-500 flames/sec(variable) 95x260x190 mm(3/8inch-bolt) 100/28V.AC,50/60 Hz VOLEX H16Reflex 12-64 flames/sec(variable) Clock-work KYOEI ELECTRONIC CO. CAMERA-CONTROLLER KODAK Ektachrome/7240TUNGSTEN(ASA400)
	KODAK Ektachrome/7250TUNGSTEN(ASA125)
35mmCINE-CAMERA	ARNOLD & RICHTER ARRITECHNO 35 R-150 type 20-150 flames/sec(variable) LENS CARL ZEISS f2.1 50mm
35mmFILM	FUJI SUPER PANCHROMATIC NEGATIVE FILM / FG ASA80 400feet
VIDEO-CAMERA VTR COLOR-MONITOR	VICTOR GC-3350 VICTOR CR-4400 SONY CVM-1350
ITV-CAMERA	HAMAMATSU TV CO.,LTD. CAMERA-HEAD C-1000 Type01 CAMERA-CONTROL C-1000 MONITOR-TV
FOOT-PLATE	KIAG-SWISS Type 9823 x2 Ranges/Fx,Fz:+5kN, Fy:0-10kN
CHARGE AMPLIFIER SUMMING AMPLIFIER ANALOG DEVIDER CENTER CONTROL UNIT	KISTLER Type 5007Y15 x8 KIAG-SWISS Type 5001 x8 KIAG-SWISS Type 5217 x4 KIAG-SWISS Type 5215Y12 x2 KISTLER Type 5675 KIAG-SWISS Type 5671
GALVO AMPLIFIER UV-OSCILOGRAPH	KIAG-SWISS Type 5211A x4 SANEI INSTRUMENT CO.,LTD. FR-301 SANEI INSTRUMENT CO.,LTD. FR-102
OSCILOSCOPE	SANEI INSTRUMENT CO.,LTD. Type 2G51
DATA RECORDER	TEAC R-250A 7ch/open,15/7-30inch/sec,DC-10kHz TEAC R-81 7ch/cassette,15/16-15/2inch/sec, DC-5kHz TEAC R-80 4ch/cassette,15/16-15/2inch/sec, DC-2.5kHz
ELECTRON CEPHALOGRAPH	SANEI INSTRUMENT CO., LTD. Type 1A64
GAS LASER	NEC Model GLS 5800 He-Ne, 50mW
GAS LASER POWER SUPPLY HS VIWER	NEC Model GLG 5800 FUJINON Type AC28A
	Diameter 40cm, Height 30cm

# 付録 4 ローパスフィルタの設計における遮断周波数の決定方法とフィルタの係数

角変位および座標値の時系列データを平滑化するにあたっては、それらに含まれる誤差成分の周波数領域を削除するような遮断特性を有するディジタル・ローパスフィルタリング処理を施している。誤差成分の周波数領域を抽出する方法は以下のとおりである。ここでは4章で行った荷役作業動作の実験より得られた座標値の時系列データを例として用いる。付録図3に動作に伴う座標値の原時系列データとその周波数成分を求めた例を示す。同図(a)はグラフィック・タブレットによって入力した右ひざのY座標値の時間変化を示している。同図(b)は同図(a)の時系列データを高速フーリェ変換して得られた振幅スペクトルを示している。付録図4は動作中の全フィルムから無作為に抽出した1コマの画像に対して右ひざの標点を繰り返し入力した結果とその周波数成分を求めた例を示す。同図(a)、(b)はそれぞれ入力した原データおよび振幅スペクトルを示している。この場合、タブレットによる入力時に誤差を含まなければ座標値は一

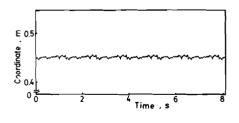


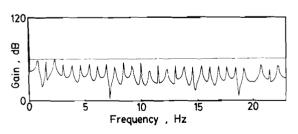


(a) 右ひざ Y 座標値の時間的変化

(b) 振幅スペクトル

付録図3 入力座標値の時間変化とその周波数成分





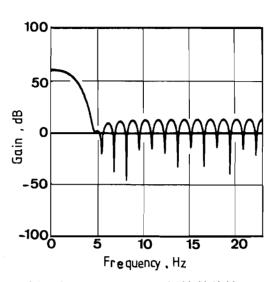
(a) 右ひざY座標値の入力回数変化

(b) 振幅スペクトル

付録図 4 同一点の繰り返し入力による座標とその 周波数成分

定値をとり、その周波数成分は 0 Hz のみとなる。 しかしながら付録図 4(b)よ

り高周波成分を含んでいることが わかる。従ってこの高周波成分は すべて誤差成分であり,付録図3 (b)においてこれと同じゲインを持 つ周波数成分は入力誤差の成分を あると考えられる。これより誤差 成分を除去する遮断周波数は2.1 Hzであることが求められる。 以 上の処理を身体各部のすべての 標値に対して2.28Hzを設定すれば 身体のどの部分に対しても 報を逸することなく平滑化を行え



付録図 5 フィルタの周波数特性 (遮断周波数 2.28 H z )

ることが導かれた。このフィルターの周波数特性を付録図 5 に示す。 論文中に用いたフィルタの係数を付録表 1 に示す。

付録表1 フィルタの係数

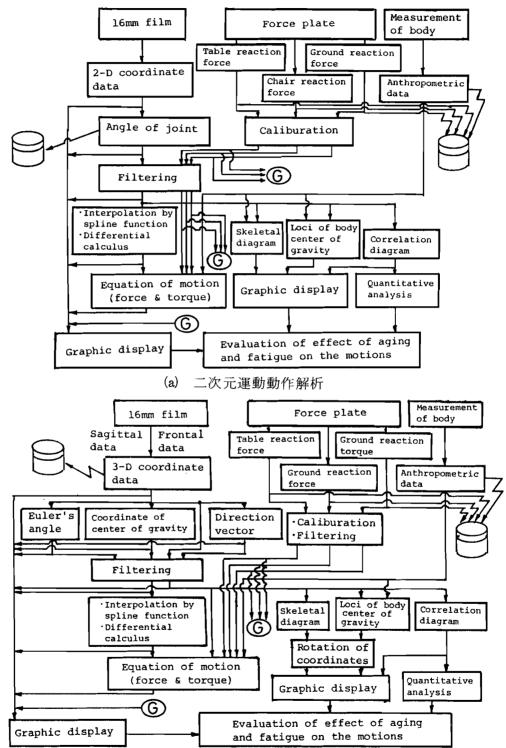
Filter-coefficients (cut-off/5.2Hz)

Д
0,32 1,31 2,30 3,29 4,28 5,27 6,26 7,25 8,24 9,23 10,22 11,21 12,20 13,19 14,18 15,17

Filter-coefficients (cut-off/2.28Hz)

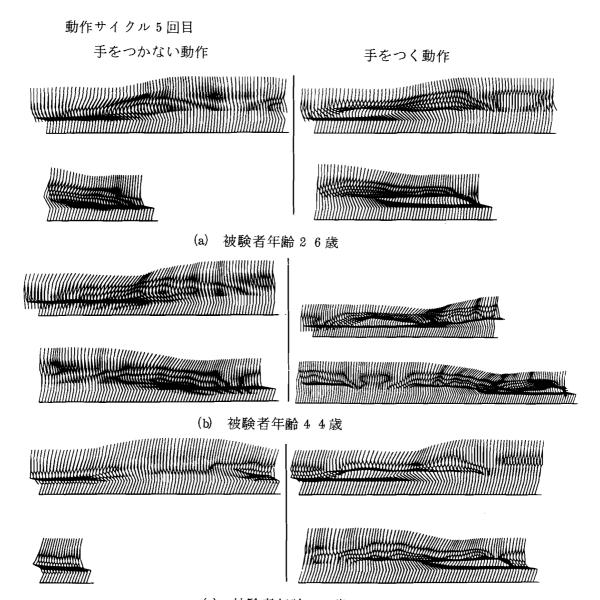
Д	برa
0,32 1,31 2,30 3,29 4,28 5,27 6,26 7,25 8,24 9,23 10,22 11,21 12,20 13,19 14,18 15,17	-0.0034884 -0.0030938 -0.0043068 -0.0051729 -0.0051806 -0.0037403 -0.0002748 0.0056676 0.0142990 0.0254980 0.0387611 0.0532134 0.0676859 0.0808513 0.0913998 0.0982245 0.1005859

付録5 運動動作解析のフローチャート



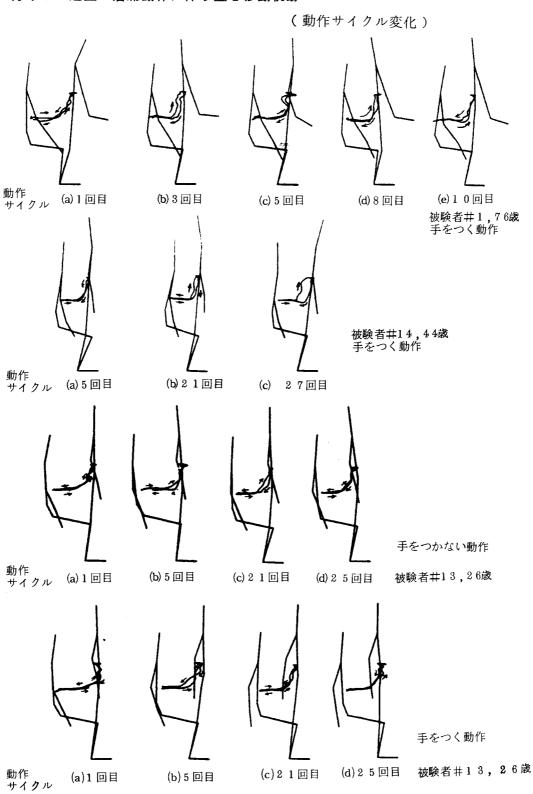
(b) 三次元運動動作解析

### 付録6 起立・着席動作パターン



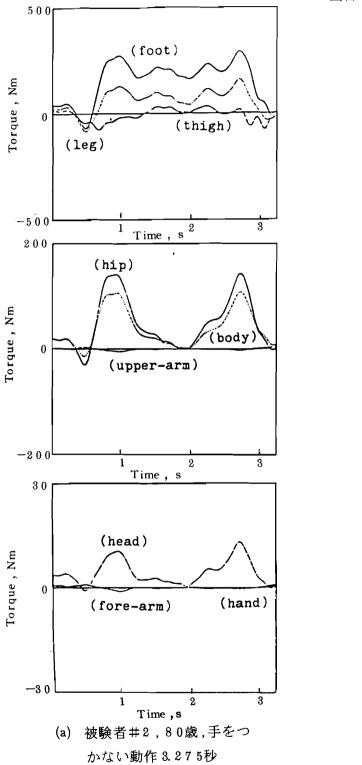
(c) 被験者年齢 6 7歳

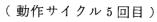
#### 付録7 起立・着席動作に伴う重心移動軌跡

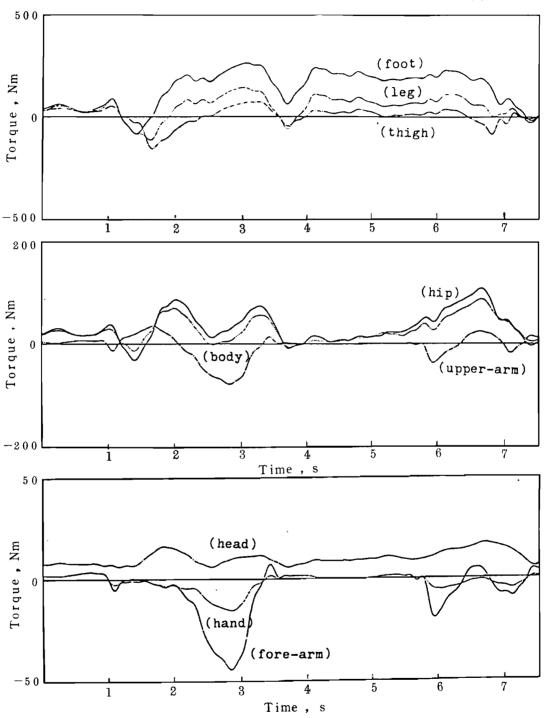


付録8 起立・着席動作における身体各部のトルク

(動作サイクル5回目)

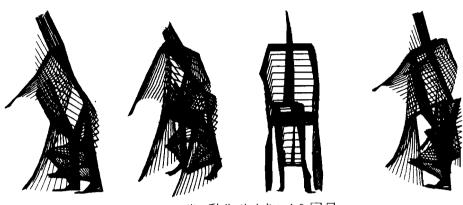




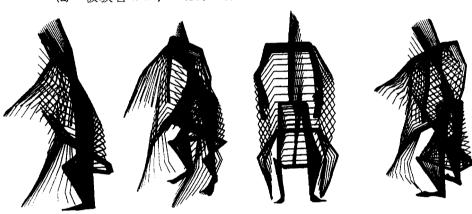


(b) 被験者#2,80歳,手をつく動作,7.45秒

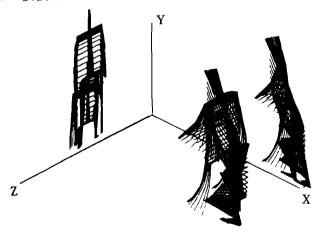
## 付録9 三次元荷役作業動作パターン



(a) 被験者#2,23歳,動作サイクル40回目

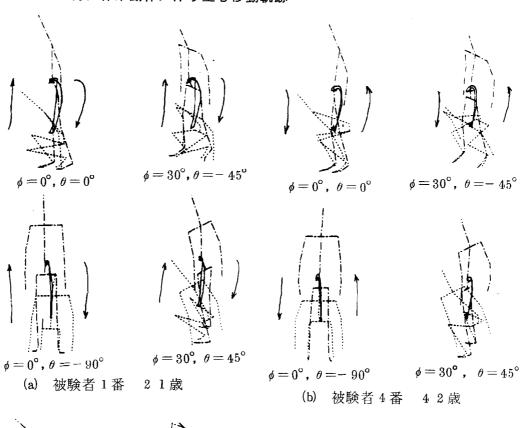


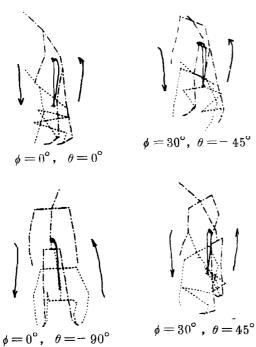
(b) 被験者#6,53歳,動作サイクル40回目



(c) 動作パターンの3面図表示,被験者・動作サイクルに ついては(a)と同一

# 付録10 荷役作業動作に伴う重心移動軌跡

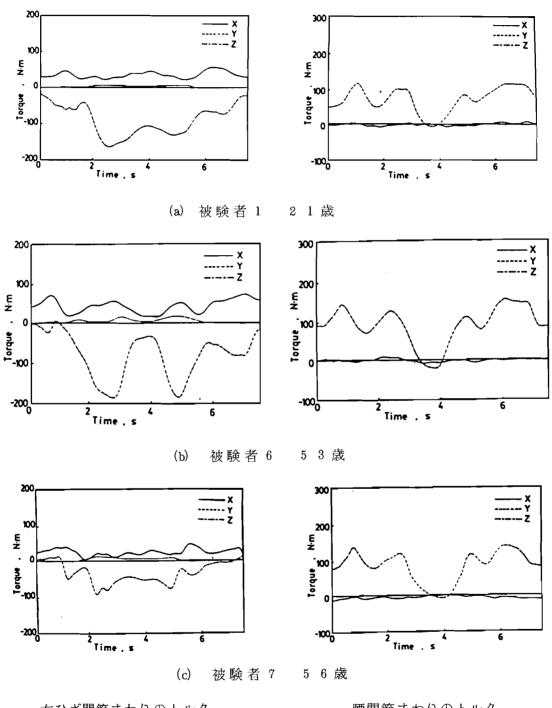




(c) 被験者5番

52歳

付録11 荷役作業動作における身体各部のトルク



右ひざ関節まわりのトルク

腰関節まわりのトルク

### 付録12 垂直跳び動作パターン

(時間間隔 0.0 7秒)

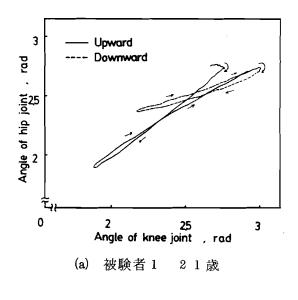
(a) 被験者 2 2 3 歳

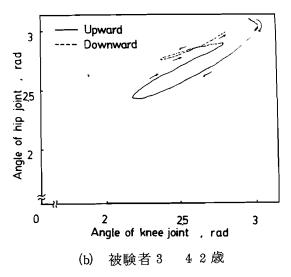
(b) 被験者3 42歳

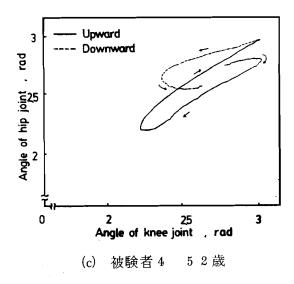
(c) 被験者 4 5 2 歳

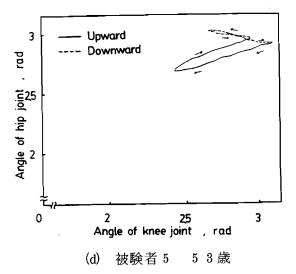
(d) 被験者 6 5 6 歳

## 付録13 垂直跳び動作におけるひざと腰角度の相関図

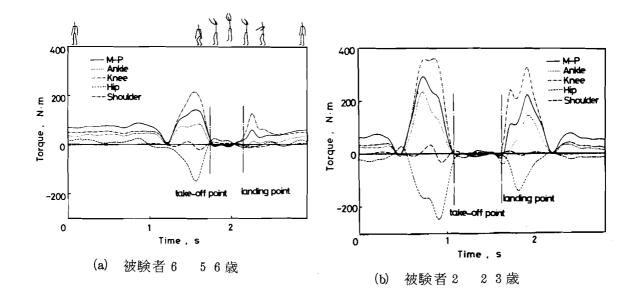


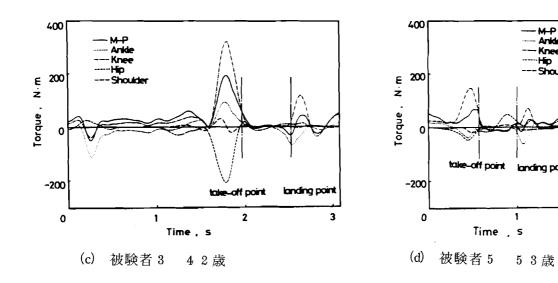






付録14 垂直跳び動作における身体各部のトルク





# 付録15 グラフィック・タブレットによる身体各点の 座標入力プログラム(三次元モデルの場合)

```
0001 FTN4.L
                     FTN4.L

$EMA(DATA,0)

PROGRAM XPANS

C -----FOR INPUT OF COORDINATE OF HUMAN HODEL 20'

C ------REGUIRED SUB

C SRLPT.SRPLT, SRERS. SRTAB

DIMENSION IDCB(144), IDCC(144), NAME(3), IXY(44),

* ML(3), ILL(21), IPIC(44), RA(22), JXY(44)

CDHHON/DATA/IL(12,21), IC(12,44)
8082
 0003
 8805
 9000
0008
0010
0011
0012
0013
                                                     CHECK=10.
NS1=18
NS2=NS1-3
NS3=22
                                       97 WRITE(6,99)
99 FORMAT(*** INPUT PROGRAM OF COORDINATE ****
*//" IS THIS MODEL ON SAGITAL PLANE ? INPUT 0"
*/"
FRONTAL PLANE ? 1")
 0014
 0015
0016
0017
  0018
                                                        READ(6.98) IPL
                                  READ(6.78) IPL

98 FORMAT(II)

IF(IPL NE. D.AND.IPL.NE.1) GD TO 97

WRITE(6,100)

100 FORMAT(/"COORDINATE FILE NAME ? (A6)")

READ(6,200) (NAME(I),I=1,3)

200 FORMAT(3A2)

WRITE(6,101)

101 FORMAT(/"LENGTH FILE NAME ? (A6)")

READ(6,200) (NL(I),I=1,3)
0019
0020
0021
0022
0023
0024
0025
0026
0027
0028
0029
0030
0032
0033
0034
0035
0036
                          READ(6,200) (NL(I),I=1,3)

C

WRITE(6,700)

700 FORMAT(/*INPUT ALLOWANCE Z (F4.1)*)

READ(6,701) CHECK

701 FORMAT(F4.1)

WRITE(6.102)

102 FORMAT(/*INPUT NEXT FRAME NUMBER (I3)*)

READ(6,201) M

201 FORMAT(/*INPUT NEXT FRAME NUMBER (I3)*)

READ(6,201) M

RITE(6.666)

666 FORMAT(/*ORIGIN (IXM,IYM) FOR EXAMPLE(2500,1000)*)

READ(6,*) IXM,IYM

WRITE(6.667)

667 FORMAT(/*ANIME RATE ? (F.) FOR EXAMPLE(0.3)*)

READ(6.668) RATE

668 FORMAT(/*INPUT NAME,2,-1,3)

IF(IERR.GE.0) GO TO 3000

WRITE(6,4000) (NAME(I),I=1,3),IERR

3000 WRITE(6,7000) (NAME(I),I=1,3),IERR

7000 FORMAT(*FILE (*,3A2,*) OF TYPE*,12,* WAS OPENED*)

CALL OPEN(IDCC,IERR,NL,2,-1,3)

IF(IERR.GE.0) GO TO 3001

WRITE(6,4000) (NL(I),I=1,3),IERR

4000 FORMAT(*FILE (*,3A2,*) OPEN ERROR, CODE=*,15)

GO TO 801

3001 WRITE(6,7000) (NL(I),I=1,3),IERR
0038
0037
0049
0041
0042
0043
0044
0045
0046
9047
0048
0047
0058
0053
0054
0055
0055
0057
                              GD TO 301
301 WRITE(6,7000) (NL(I),I=1,3),IERR
WRITE(6,432)
432 FORMAT(///*TO PUSH ANY KEY IS TO START*)
READ(6,433) KAWA
4058
9059
9050
9061
                                    433 FORMAT (A2)
                                    999 NN=0
                                  999 NN=0
516 CALL KPERS
CALL CHOUT(31)
IF(NN.GT.12) NN=0
WRITE(6,103) H
103 FORMAT(40X,"*** FRAME NUMBER",I5/)
WRITE(6.104)
21 IF(IPL.E0.1) GO TO 2
CALL CHOUT(31)
104 FORMAT(58X,"PUSH PEN OF THE TABLET")
DO 340 I=1.100
CALL CHOUT(7)
840 CONTINUE
CALL CHOUT(31)
 2900
 8964
 0065
0066
0067
0068
0069
0070
                                    CALL CHOUT(31)
CALL TAB(0,1,1X0,1Y0)
DO 555 K=1;30
S55 CONTINUE
0074
0075
0076
0077
                                                       CALL CHOUT (7)
```

```
0079
                                                   IF(IX0.GT.3900.AND.IYB.GT.3900) GO TO 801
                                IF (IXU.5T.3900.AND.)
DO 1 I=1.NS2
CALL TABEO,1,IX,IY)
DO 556 X=1.30
556 CONTINUE
CALL CHOUT(7)
IXY(I)=IX
IXY(I+22)=IY
 0080
0081
0082
0083
 0085
  0086
                                         IF(IX.GT.3900.AND.IY.GT.3900) GD TO 21
1 CONTINUE
IXY(NS1)=IXY(NS1-3)
                              I CUNTINUE
IXY (NS1)=IXY (NS1-3)
IXY (NS1+22)=IXY (NS1+19)
IXY (NS1+3)=IXY (NS1-6)
IXY (NS1-3)=IXY (NS1-6)
IXY (NS1-2)=IXY (NS1-6)
IXY (NS1-1)=IXY (NS1+16)
IXY (NS1+19)=IXY (NS1+16)
IXY (NS1+20)=IXY (NS1+17)
IXY (NS1+21)=IXY (NS1+17)
IXY (NS1+21)=IXY (NS1+13)
NS-NS1
GO TO 13
2 DO 444 [=1,100
CALL CHOUT(7)
444 CONTINUE
CALL CHOUT(31)
CALL TAB(0.1,1X0,IY0)
DO 557 K=1,30
557 CONTINUE
CALL CHOUT(7)
 0089
 0090
 8091
0092
0093
0074
0075
0076
0077
 0078
0079
 0101
0102
0103
0104
0105
                               557 CONTINUE

CALL CHOUT(7)

IF (IXO.GT.3700.AND.IYO.GT.3700) GD TD 801

DO 11 I=1.NS3

CALL TAB(0.1.IX,IY)

DO 558 K=1.30

558 CONTINUE

CALL CHOUT(7)

IXY(1)=IX

IXY(1+22)=IY

IF(IX.GT.3700.AND.IY.GT.3700) GD TD 2

11 CONTINUE

NS=NS3

DO 188 I=1.NS

IXY(I)=-1*(IXY(I)-IX0)
0106
0107
0108
 0109
0110
0111
0112
0113
0114
0115
0116
0117
 0118
0119
0120
0121
                                                   IXY(I)=-1*(IXY(I)-IXO)
IXY(I+22)=IXY(I+22)-IYO+IYM
IF(IXY(I+22).LE.0) GO TO 802
                             IXY(I+22)=IXY(I+22)-IY0+IYM
IF(IXY(I+22).LE.0) GD TO 802

108 CONTINUE
GD TO 109

13 DO 3 I=1.NS
IXY(I)=IXY(I)-IX0+IXM
IXY(I+22)=IXY(I+22)-IY0+IYM
IF(IXY(I).LE.0.OR.IXY(I+22).LE.0) GD TO 802

3 CONTINUE
CONTINUE
CALL CHOUT(31)
IF(N.NE.1) GD TO 5
DD 6 I=1.NS
IPIC(I+22)=IPIC(I+22)+1800
6 CONTINUE
GD TO 7

5 IF(N.E0.2) GD TO 7
IF(N.NE.3) GD TO 8
DO 9 I=1.NS
IPIC(I)=IPIC(I+22)+1800
IPIC(I)=IPIC(I+22)+1800
CONTINUE
GD TO 7

5 IF(N.E0.2) GD TO 7
IF(N.NE.3) GD TO 8
DO 9 I=1.NS
IPIC(I)=IPIC(I+22)+1800
IPIC(I)=IPIC(I+22)+1800
CONTINUE
GD TO 7
0122
0123
0124
0125
0126
0127
0128
0129
 0130
0131
0132
0133
0134
0135
0136
0137
0138
 0139
0140
0141
0142
0144
0145
0146
0147
0148
0149
                                    0150
0151
0152
0153
 0154
                                                   CALL KPLPT(0.IXX,IYY)
                                                  DO 14 I=6,14
IXX=IPIC(I)
 0158
                                                   IYY=IPIC(I+22)
```

```
0168
0161
01623
01645
01665
01665
01667
01772
01775
01778
01778
01778
01778
01778
01781
0182
0183
0184
0185
0186
0187
0188
0189
0170
0171
0172
0173
IL(NN.1)=ILL(I)

60 CONTINUE
GO TO 21

23 CALL CPDIS(IPL IXY, ILL)
IF(IPL.E0.1) CO TO 24
DO 25 I=1,18
RA(1)=FLDAT(ILL(I))*CHECK/100,
25 CONTINUE
RA(3)=RA(2)
PA(2)=PA(1)
 8238
                                    RA(2)=RA(1)
```

```
RA(7)=RA(6)
RA(6)=RA(5)
RA(10)=RA(7)
RA(10)=RA(13)
RA(11)=RA(17)
RA(18)=RA(17)
RA(18)=RA(16)
GD TO 26
24 DO 27 I=1,22
RA(1)=RA(18)
RA(2)=RA(1)
RA(2)=RA(1)
RA(2)=RA(1)
RA(2)=RA(1)
RA(2)=RA(1)
RA(2)=RA(1)
RA(2)=RA(17)
RA(12)=RA(17)
RA(12)=RA(17)
RA(12)=RA(17)
RA(12)=RA(17)
RA(12)=RA(17)
RA(12)=RA(17)
RA(12)=RA(17)
RA(13)=RA(17)
RA(18)=RA(17)
RA(18)=RA(17)
RA(18)=RA(17)
RA(18)=RA(17)
RA(18)=RA(17)
RA(18)=RA(17)
RA(18)=RA(17)
RA(18)=RA(17)
RA(18)=RA(17)
   0237
   0240
0241
0242
0243
0244
0245
02447
02249
02253
022533
022553
022553
0225567
022559
022559
022558
                                                                  RA(16)=RA(14)
RA(15)=RA(13)
RA(14)=RA(13)
RA(14)=RA(13)
RA(13)=RA(22)
26 MNN=NN-1
DD 50 JI=1.MNN
DD 28 I=1.MS
X=IC(JI.I)
Y=IC(JI.I)
Y=IC(JI.I)
B=IXY(I+22)
R=(X-A)*(X-A)+(Y-B)*(Y-B)
RA2=RA(I)*RA(I)
IF (R.GT.RA2) GD TD 50
026344
02654
022658
022658
02277
022774
02277
02277
02278
02278
02278
02278
02278
02278
02278
02281
                                                                  RA2=RA(1)*RA(1)

IF (R.GT.RA2) GO TO 50

28 CONTINUE

KA=JI
GO TO 52

50 CONTINUE
GO TO 29

52 DO 30 I=1,NS
IXY(1)=(FLOAT(IXY(1))+FLOAT(IC(KA,I)))/2,+0.5
IXY(1+22)=(FLOAT(IXY(I+22))+FLOAT(IC(KA,I+22)))/2,+1.5
IF (I.ED.NS) GO TO 30
ILL(I)=(FLOAT(IL(KA,I))+FLOAT(ILL(I)))/2,+0.5
30 CONTINUE
IF (IPL.ED.1) GO TO 750
DO 40 I=1,4
IXY(I)=IXY(I)
IXY(I+5)=IXY(I+4)

40 CONTINUE
0282
0283
0284
0285
0286
0287
0288
0287
                                                                      JXY(1+5)=IXY(1+4)
40 CONTINUE
D0 41 1=1.4
JXY(1+22)=IXY(1+22)
JXY(1+27)=IXY(1+28)
41 CONTINUE
JXY(5)=IXY(7)
JXY(5)=IXY(7)
JXY(6)=IXY(9)
JYY(6)=IXY(7)
0290
0291
0292
0293
0294
0295
0296
                                                                                             JXY(10)=IXY(0)

JXY(32)=IXY(31)

JXY(11)=IXY(0)

JXY(33)=IXY(31)

JXY(12)=IXY(10)

JXY(34)=IXY(10)

JXY(33)=IXY(11)

JXY(35)=IXY(33)

JXY(14)=IXY(14)

JXY(36)=IXY(36)

JXY(37)=IXY(35)

JXY(16)=IXY(35)

JXY(16)=IXY(12)

JXY(38)=IXY(35)
0298
0299
0301
0301
 0302
0303
0304
0305
0306
0307
0308
0309
                                                                                               JXY(18)=1XY(12)
JXY(38)=1XY(34)
JXY(17)=1XY(11)
JXY(37)=1XY(33)
JXY(18)=1XY(17)
JXY(40)=1XY(37)
JXY(19)=1XY(18)
JXY(20)=1XY(15)
JXY(20)=1XY(15)
   0310
0311
0312
0313
0314
0315
   0318
                                                                                                  JXY(42)=IXY(37)
```

```
JXY(21)=[XY(11)
                    JXY(43)=IXY(33)
JXY(22)=IXY(18)
0322
0323
0324
0325
0326
0328
03329
03331
03331
033334
033334
03337
CALL CHUCKY)
37 CONTINUE
1F(N.EQ.0) GO TO 516
GO TO 21
801 CALL CLOSE(IDCD)
CALL CLOSE(IDCC)
CALL EXEC(6)
0362
0363
0364
0365
0366
0367
0368
                                             END
                 C
                                           SUBROUTINE CPDIS(IPL,IXY,ILL)
DINCRSION IXY(44).ILL(21)
F(X1,X2,Y1,Y2)=SQRT((X1-X2)*(X1-X2)+(Y1-Y2)*(Y1-Y2))
IF(IPL.ED.1) GD TO 24
DD 25 I=1,13
IF(I.ED.4) GD TO 25
X1=IXY(I)
X2=IXY(I+1)
Y1-IXY(I2)
0370
0371
0372
0373
0374
0375
0376
0377
                              X1=IXY(I)

X2=IXY(I+1)

Y1=IXY(I+23)

Y2=IXY(I+23)

Y1L(I)=F(X1,X2,Y1,Y2)+0.5

25 CONTINUE

X1=IXY(4)

X2=IXY(4)

Y2=IXY(31)

ILL(4)=F(X1,X2,Y1,Y2)+0.5

DO 26 I=14.16

ILL(I)=ILL(I-3)

26 CONTINUE

X1=IXY(11)

X2=IXY(18)

Y1=IXY(33)

Y2=IXY(40)

ILL(17)=F(X1,X2,Y1,Y2)+0.5

RETURN

24 DO 27 I=1,12

IF(I,E0.5) GO TO 27

X1=IXY(I)
0378
0379
0380
0381
0382
0383
0384
0385
0387
0387
0391
0391
   8395
8396
8397
   0.378
```

# 付録16 コンピュータ・グラフィックスを用いた三次元

#### 運動動作パターン表示プログラム

```
### 1001 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ### 1000 ###
        9981 FTN4.L
                                                                                                       FORMAT("MODE-KEY")

READ(6,*) KSO

ITH=ITH**1000

P=3.1415926

ST=FLOAT(IST)*P/180.*(-1.)

CALL OPEN(IDCB.IERR,NAM,0.-1.3)

DO 10 I=KS.KE.INT

CALL READF(IDCB,IERR,ID,66,LEN,I)

DO 10 I=KS.KE.INT
       0026
0027
0028
0029
0030
                                                                                                           DO 10 JX=1,22
JY=JX+22
JZ=JX+44
          0034
          8035
0036
0037
0038
0039
0040
                                                                                                         JZ=1X744
XS=ID(JX)
YS=ID(JY)
ZS=ID(JZ)
CALL ROTE(ST,FA,XS,YS,ZS,XX,YY)
X(1,JX)=XX
                                                                                Y(I,IX)=YY

10 CONTINUE
CALL CLOSE(IDCB)
XMAX=-10000.
          0042
0043
0044
0045
                                                                           0046
0047
       0048
0049
0050
        0051
0052
0053
     0055
0054
0057
0058 C
                                                                      43 CALL KPERS
WRITE(6.107) IST.IFA

107 FORMAT("EYE-POINT/",/," FRONTAL ",I4," DEG.",/,
!" TRANSVERSE",I4." DEG.")
CALL KPDSH(KSO)
D0 11 I=KS.KE.INT
D0 99 JK=1,ITM
99 CONTINUE
IYM=IYMAHEIYYY(I 11)*CP)
        0059
          DAAD
        0061
       8862
0063
0064
0065
          0066
                                                                                                       CONTINUE

IXM=IXO+IFIX(X(I,11)*SC)

IXM=IXO+IFIX(Y(I,11)*SC)

IXS=IXO+IFIX(X(I,13)*SC)

IYS=IYO+IFIX(Y(I,13)*SC)

IXH=IXO+IFIX(X(I,22)*SC)

IXH=IXO+IFIX(Y(I,22)*SC)

DO 50 J=1,5

KEY=1

IX=IXO+IFIX(X(I,J)*SC)

IX=IXO+IFIX(Y(I,J)*SC)

IY=IYO+IFIX(Y(I,J)*SC)

IF(J,ED,1) KEY=0

CALL KPLPT(KEY,IX,IY)
        0067
0068
          0069
          0070
          0071
0072
0073
0074
          0075
0076
0077
```

# 付録17 身体各部の重心速度および加速度の三成分算出

```
プログラム
                               FTN4.L
  0001
                             FINAL
$EHA(DATA_B)
PROCRAM KPSP3
C----CALCULATION OF LINEAR ACCELERATION AGAINST
C THE GROUND
C----REQUIRED SUB "KRSPL"
COMMON /DATA/A1(370.56).A2(370.66)
 0002
  0004
 0005
0006
                                        -----REQUIRED SUB "KRSPL"

COHMON /DATA/A1(370,56),A2(370,56)
DIMENSION IDCA(144).IDCB(272),NAM1(3),NAM2(3),

* IXY(56),AC(56),J1(22),X(50),Y(50),Y(8(390),

* YY1(370),YY2(390),IDCC(272),NAM3(3),Z(50)
DIMENSION IPARA(5)
EQUIVALENCE(LU,IPARA)
CALL RMPAR(IPARA)
WRITE(LU,100)

180 FORMAT("*** CALCULATION OF LINEAR ACCELERATION",

* " AGAINST THE GROUND ***")
TYF=1HY
 0007
  0003
  0009
 0010
0011
0012
0013
                       WRITELD....

100 FORMAT("*** CALCULATION U.

* " AGAINST THE GROUND ****)

IYE=IHY
WRITE(LU.105)

105 FORMAT(/"HAVE YOU CREATED 2 FILES OF LINEAR ",

* "ACCELRATION ? (Y/N)"/" FOR EXAMPLE.",

* " (WA2101)")

READ(LU,106) IY

106 FORMAT(A2)
IF(IY.ED.IYE) GO TO 34
CALL EXEC(6)
34 WRITE(LU,101)

101 FORMAT(/"HOW HANY FRAMES ? (*)")
READ(LU.*) NF
NI=WF/40+1
HM=MODINF.40)
IF(HM.ED.0) NI=NI-1

1001 WRITE(LU.108) NI

108 FORMAT(/" INTERVAL OF RE-SAMPLING ? (*)"

* /"IT HUST BE GREATER EQUAL",13)
READ(LU.*) IR
IF(IR.LT.NI) GO TO 1801
WRITE(LU.109)

109 FORMAT(/" START OF RE-SAMPLING ? (*)")
READ(LU.*) IS
WRITE(LU.102)

102 FORMAT(/" WHAT IS FILE NAME OF COORDINATE(A6
0015
0016
0017
  0018
0017
0021
0021
0023
0024
0025
0027
0027
0027
0031
0032
0033
0034
8035
0036
0037
 0038
0039
0040
                                        WRITE(LU, 102)

102 FORMAT(/* WHAT IS FILE NAME OF COORDINATE(A6)?*/

* ** THE COORDINATE DATA MUST BE SMOOTH ***)

READ(LU, 200) (NAM1(I), I=1,3)

208 FORMAT(3A2)
  0041
 8042
8043
8044
8045
                                      200 FORMAT(32)

WRITE(LU,104)

104 FORMAT(3A2)

WRITE(LU,104)

105 FORMAT(7" WHAT IS THE 1ST FILE NAME OF LENEAR ACCELRATION (A6) ?")

READ(LU,200) (NAM2(I),I=1,3)

WRITE(LU,103)

103 FORMAT(7" WHAT IS THE 2ND FILE NAME OF LINEAR ACCELRATION (A6) ?")

READ(LU,200) (NAM3(I),I=1,3)

CALL OPEN(IDCA,IERR,NAM1,2,-1,3)

IF(IERR.GE,0) GO TO 1

WRITE(LU,300) (NAM1(I),I=1,3),IERR

300 FORMAT(7"FILE(",3A2,") OPEN ERROR",I5)

CALL EXEC(6)

1 CALL OPEN(IDCB,IERR,NAM2,2,-1,3)

IF(IERR.GE,0) GO TO 2

WRITE(LU,300) (NAM2(I),I=1,3),IERR

CALL CLOSE(IDCA)

CALL EXEC(6)

2 CALL OPEN(IDCC,IERR,NAM3,2,-1,3)
 8046
0047
8848
8049
 0050
0051
0052
0053
 0854
0855
0056
0057
 0058
0059
0060
0061
                                         CALL EXEC(6)

2 CALL DPEN(IDCC, IERR, NAM3, 2, -1, 3)

IF (IERR, GE, 0) GO TO 10

WRITE(LU, 300) (NAM3(I), I=1, 3), IERR

CALL CLOSE(IDCA)

CALL CLOSE(IDCB)

CALL EXEC(6)

10 WRITE(LU, 801)

801 FORMAT(/*INPUT ENLARGING SCALE ON GRAPHIC TABLET*//

*" HOW HANY POINTS(P) ON GRAPHIC TABLET ARE EQUIVALENT ",

*"TO WHAT METER (WM) ?"/

*" INPUT P & WM IN ORDER THAT (F15.5)*)

READ(LU, 302)

802 FORMAT(F15.5)
  0062
  0064
0065
0066
    0067
   RAAA
    0069
   9070
9071
6072
9873
                                            802 FORMAT(F15.5)
WRITE(LU.803) P
803 FORMAT(/F15.5, " SURE ? (Y/N)")
READ(LU.106) IY
IF(IY.NE.IYE) GO TO 10
     8874
     9875
   0076
0077
```

```
0079
                                                READ(LU,802) WM
                                                WRITE(LU,803) WH
READ(LU,106) IY
 0086
   0081
                                                IF(IY.NE.IYE) GO TO 10 PWH=WM/P
  0082
0083
                                WHTEGLU, 107)

107 FORMAT(///"WAIT A MINUTE ...")

A40=1./45.7

X00=0.
  0084
  0085
0086
0087
                                        X00=0.
X11=FLOAT(NF-1)*A40
DO 3 I=1,20
JI(I)=1
3 CONTINUE
  8800
  0089
 0091
0091
0092
                                             CONTINUE
JI(5)=6
JI(5)=6
JI(13)=9
JI(17)=-4
JI(21)=-8
JI(22)=-9
DO 4 J=1,3
JJ=J+1
JF(J.ED,3) JJ=1
DO 5 K=1,22
K2=X+(JJ-1)*22
K1=K+(J-1)*22
K3=K1+JI(K)
K4=K7+JI(K)
1073
1074
1095
1096
1096
1098
81 C 8
01 9 I
0102
0104
0105
0106
0107
0108
                                               K3=K1+J1(K)
K4=K2+J1(K)
II=0
DO 6 I=IS,NF,IR
II=II+1
                               II=II+1
N=I
CALL READF(IDCA, IERR, IXY, 66, LEN, N)
IF(IERR.EQ.0) GO TO 7
WRITE(LU, 210) (NAM1(IJ), IJ=1, 3), IERR
210 FORMAT(/*FILE (", JA2, ") READ ERROR", I5)
GO TO 900
7 X1=IXY(X1)
Y1=IXY(X2)
X2=IXY(X3)
Y2=IXY(X4)
X(II)=A40*FLOAT(I-1)
IF(J.EQ.2) GO TO 8
Y(II)=(X1+X2)*PWM/2.
IXII)=(Y1+Y2)*PWM/2.
GO TO 6
 0109
0110
0111
 0112
0113
0114
0115
0116
0117
0113
0119
0120
0121
0122
0123
0124
0125
                                       GO TO 6
8 Y(II)=(Y1+Y2)*PWM/2.
Z(II)=(X1+X2)*PWM/2.
6 CONTINUE
                                    6 CONTINUE
CALL KSPL(II,X,Y,X00,X11,A40,YY0,YY1,YY2)
D0 9 I=1.NF
A1(I,K1)=YY2(I)
9 CONTINUE
CALL KSPL(II,X,Z,X00,X11,A40,YY0,YY1,YY2)
D0 11 I=1.NF
A2(I,K1)=YY2(I)
11 CONTINUE
5 CONTINUE
5 CONTINUE
0126
0127
0128
0129
0130
0131
0132
0133
0134
8135
0136
0137
0138
                               11 CONTINUE
5 CONTINUE
5 CONTINUE
4 CONTINUE
DO 12 I=1,NF
N=I
DO 23 J=1,66
AC(J)=A1(I,J)
23 CONTINUE
CALL WRITE(IDCB,IERR,AC,132,N)
IF(IERR.EB.0) GO TO 12
WRITE(LU,401) (NAM2(II),II=1,3),IERR
401 FORMAT(/*FILE (*,3A2,*) WRITE ERROR*,I5)
GO TO 900
12 CONTINUE
DO 13 I=1,NF
0141
01442
01443
011445
01155
01155
01155
01155
01155
0115
0115
0115
0115
                                   12 CONTINUE
DO 13 I=1,NF
N=I
DO 14 J=1,86
AC(J)=A2(1,J)
14 CONTINUE
CALL WRITF(IDCC,IERR,AC,132,N)
IF(IERR.EQ.0) GO TO 13
WRITE(LU,401) (NAM3(II),II=1,3),IERR
CO TO 900
13 CONTINUE
                                13 CONTINUE
WRITE(LU.500)
500 FORMAT(///" CALCULATION COMPLETE !")
```

```
9001 FTN4
  0002
                                                  SUBROUTINE KSPL(N,X,Y,X0,X1,DX,YY0,YY1,YY2)
                     CCC
  0003
                              DIMENSION X(50) ,Y(50) ,PX(50) ,PY(50) ,TX(50) ,TY(50) 1A(40,80) ,AX(50) ,AY(50) ,PX(50) ,PY(50) ,TX(50) ,TY(50) 1A(40,80) ,AX(50) ,AY(50) ,BX(50) ,BY(50) ,YY1(370),YY2(370) CYAKU GYORETSU M1=N+1 N2=N+N N3=N+1 DO 101 I=1,N DO 101 J=1,N A(I,J)=0.0 101 CDNTINUE A(1,1)=2.0 A(1,2)=1.0 A(N,N3)=1.0 A(N,N3)=1.0 A(N,N3)=1.0 A(N,N3)=1.0 A(N,N3)=1.0 CONTINUE N(2,K)=4.0 A(K2,K)=4.0 A(K2,K)=1.0 102 CDNTINUE DO 103 J=N,N2 IF (J-I-N)11,12,11 11 A(I,J)=0.0 GO TO 103 12 A(I,J)=1.0 103 CONTINUE DO 104 L=1,N I=L J=L J=L J=L J=L J=L J=L J=L J=1 S L=ABS(A(I,J)) K=I
                                                   SPLINE NI YORU HOKAN NO PROGRAM
 0004
0006
 0008
0009
                        С
  0010
0011
0012
0013
0014
0015
0016
0017
0018
0019
0020
0021
0022
0023
0024
0025
0026
0027
I=L

J=L

13 G1=ABS(A(I,J))

K=I

14 I=I+1

IF(I=N)15,15.16

15 IF(G1-ABS(A(I,J)))13,14,14

16 IF(G1)200,200,17

17 DO 105 J=L,N2

G2=A(L,J)

A(K,J)=G2

105 CONTINUE

G3=A(L,L)

D0 186 J=L,N2

A(L,J)=A(L,J)/G3

106 CONTINUE

D0 111 I=1, N

IF(I-L)18,111,18

18 G4=A(I,L)

D0 112 J=L,N2

A(I,J)=A(I,J)-G4*A(L,J)

112 CONTINUE

111 CONTINUE

111 CONTINUE

112 CONTINUE
0948

9949

0059

0051

0052

0053

0055

0055

0055

0058

0059

0064

0064

0065

0064

0065
                              1066
1067
1068
0069
0070
 0071
0072
0073
0074
0075
0076
0077
                                  TY(I)=0.0
108 CONTINUE
DO 109 I=1,N
DO 109 J=N1,N2
  0078
```

```
K=J-N

TX(I)=TX(I)+A(I,J)*PX(K)

TY(I)=TY(I)+A(I,J)*PY(K)

109 CONTINUE

DO 110 I=1,N3

I1=I+1

AVII-2 0*(VII)-V(I))T
  0079
    0080
  0031
0082
0083
0084
0085
                                                  I1=I+1

AX(I)=2.0*(X(I)-X(I1))+TX(I)+TX(I1)

AY(I)=2.0*(Y(I)-Y(I1))+TY(I)+TY(I1)

BX(I)=3.0*(X(I)-X(I))-2.0*TX(I)-TX(I1)

BY(I)=3.0*(Y(II)-Y(I))-2.0*TY(I)-TY(I1)

110 CONTINUE

C

C

JJI_HOTEISIET
    8086
8087
    0088
0089
                                                                                       110 CONTINUE

3JI HOTEISIKI
XX=X0
IXX=1
300 IF(X(N)-XX)21,21,22
21 I=N-1
H=1
GO TO 500
22 I=N-1
26 IF(X(I)-XX)23,24,25
H=0
GO TO 500
24 H=0
GO TO 500
25 I=I-1
GO TO 26
500 A1=AX(I)
A2=AY(I)
B1=BX(I)
B2=BY(I)
C1=TX(I)
C2=TY(I)
D1=X(I)-XX
D2=Y(I)
IF(N)27,28.29
U=0
GD TO 600
0089
0091
0092
0093
0094
0095
0097
0098
00199
0101
0102
0103
0104
0105
0108
  0109
0110
0111
0112
0113
                                                                                         D1=X(I)-XX
D2=Y(I)
DF(H)27,28.29

28 U=0
CD TD 600

27 U=1
CD TD 600

27 IF(A1)31,32,31
32 IF(B1)33,34,33

34 U=-D1/C1
GD TD 600

33 H=C1+C1-4,0*B1*D1
IF(H)35,35,36
35 U=-C1/Z.0/H1
GD TD 600

36 U1=(-C1+SQRT(H))/2.0/B1
U2=(-C1-SQRT(H))/2.0/B1
U2=(-C1-SQRT(H))/2.0/B1
U2=(-C1-SQRT(H))/2.0/B1
U2=(-C1-SQRT(H))/2.0/B1
U2=(-C1-SQRT(H))/2.0/B1
U2=(-C1-SQRT(H))/2.0/B1
U2=(-C1-SQRT(H))/2.0/B1
U2=(-C1-SQRT(H))/2.0/B1
U2=(-C1-SQRT(H))/2.0/B1
U2=(-U1-SQRT(H))/2.0/B1
U2=(-U1-SQRT(H))/2.0/B1
U2=(-U1-SQRT(H))/2.0
U2=(-U1-SQRT(H))/2.0
U3=(-U1-SQRT(H))/2.0
U3=(-U1-SQRT(H)/2.0
U3=(-U1-SQRT(H)/2.0
U3=(-U1-SQR
0114
8115
0116
0117
0118
0119
0120
0121
0122
0123
0124
0125
0126
0127
0130
0131
0132
0133
0134
0135
0136
0137
50 10 34

52 E=0.8

GO TO 54

51 E=-(-W)**(1.0/3.0)

54 R=E+E
```

## 付録18 オイラー角算出プログラム

```
0001 FTN4,L,D
0002 $EMA(EXT.0)
0003 PROGRAM KPTE0
0004 CDHMON PI.DP
0005 CDHMON /EXT/IC(200,93),DX(200,66)
0006 DIMENSION IDCR(272),DY(66),ID(69),NAMC(3),NAMT(3),
0007 1 THE(2),PSI(2),PHI(2),DT(2),DS(2),DH(2),IP(5),
0008 2 ISG(18),NAME(3),IYS(21,2)
0009 EQUIVALENCE(LU.IP)
0010 DATA IYS/1,2,3,4,6,7,8,9,11,12,15,16,17,19,20,21,17
                                                               EQUIVALENCE (U.TP)

DATA IYS/1,2,3,4,6,7,8,9,11,12,15,16,17,19,20,21,13,12,25
1,28,30,2,3,4,5,7,8,9,16,12,13,14,15,16,18,19,20,22,23,24,29,31/
DATA ISG/1,1,1,-1,1,1,1,-1,1,1,-1,-1,1,1,1/
CALL RMPAR(IP)
IF(U.LE.0) LU=1
MRITE(LU.99)
FORMAT("STANDING(1) OR SITTING(0) _*)
READ(LU.*) IMOT
NJ=1
         0012
0013
         0015
0016
0017
0018
015
016
017
017
018
017
018
019
1F(IHOT.EB.B) NJ=9
1021
100
1021
100
FORMAT("CODRDINATE DATA FILE _")
0222
READ(LU.101) NAMC
1023
101
FORMAT(3A2)
WRITE(LU.102)
0224
WRITE(LU.101) NAMT
URITE(LU.101) NAMT
WRITE(LU.101) NAMT
URITE(LU.101) NAMT
027
028
103
FORMAT("FULER'S ANGLE FILE _")
READ(LU.101) NAME
031
104
FORMAT("NUMBER OF FRAMES _")
READ(LU.X) KT
033
C DEFINITION OF CONSTANTS
034
035
DP=6.28318530
ER=0.01
THR=0.4
030
C OBTAIN DATA FROM 2 FILES
037
038
C OBTAIN DATA FROM 2 FILES
039
039
CALL OPEN(IDCB.IERR.NAMC.0,-1,3)
1F(IERR.LT.0) CALL ERROR(LU.IERR.NAMC.4HOPEN)
041
DO 1 I=1,KT
042
043
DO 1 JX=1,23
044
DO 1 JX=1,23
045
JY=JX+31
046
JY=JX+32
IC(I,JX)=ID(JX)
047
047
1C(I,JX)=ID(JX+23)
                                         99
                                                                    JZ-JX+32
IC(I,JX)=ID(JX)
IC(I,JY)=ID(JX+23)
IC(I,JZ)=ID(JX+46)
CALL CLOSE(IDCB)
         0049
                                       1
                                                                   CALL OPEN(IDCB, IERR, NANT, 0, -1,3)
IF(IERR.LT.0) CALL ERROR(LU, IERR, NANT, 4HOPEN)
DO 2 I=1,XT
CALL READF(IDCB, IERR, ID, 36, LEN, I)
IF(IERR.LT.0) CALL ERROR(LU, IERR, NANT, 4HREAD)
DO 3 J=1,2
JX=1+23
         0052
          0054
         0055
0056
0057
0058
                                                                   IX=I+23

IY=I+54

IY=I+65

IC(I,IX)=ID(J)

IC(I,IX)=ID(J+12)

IC(I,IX)=ID(J+24)

IX=I+23

IX=I+23

IY=I+85

IW=I+2

IC(I,IX)=I+4
         0059
        0060
0061
         0062
0063
0064
0065
                                         3
           0066
         0067
0068
                                                                   JW=J+2

IF(J.GT.6) JW=J+4

ID(I.JX)=ID(JW)

ID(I.JX)=ID(JW+12)

ID(I.JZ)=ID(JW+24)

ID(I.JZ)=ID(JW+24)

JX=J+25

JY=J+56

JY=J+87

IT=644 [1-1)*A
          0069
           1070
         0071
0072
0073
0074
                                           318
         0075
0076
          0077
                                                                     JT=6+(J-1)*4
IC(I,JX)=(ID(JT)+ID(JT+2))/2
```

```
IC(I, JY)=(ID(JT+12)+ID(JT+14))/2
IC(I, JZ)=(ID(JT+24)+ID(JT+26))/2
CCNTINUE
  8979
  0080
                    4
   0031
                                  CALL CLOSE(IDCB)
  0082
   0083
                C
                 KL=FLOAT(KT)*FLOAT(19-NJ)*0.1
KI=0
C IDENTIFY DIRECTION OF COORDINATE AXES
  0084
0085
   0086
                                  DO 5 J=NJ,18
ICON=0
  8087
                                0088
  0039
0091
  0091
0092
0093
0094
0098
0098
0098
0101
0102
0103
8126
0127
0128
0129
0130
                                CALL UNITY(Z1,Z2,Z3)
GO TO 11
NZE=10
NZS=5
                   91
                10 NZE=10
NZS=5
IF (J.E0.9) GD TO 12
NZE=21
NZS=17
12 Z1=1C(I,NZE)-IC(I,NZS)
Z2=IC(I,NZE+31)-IC(I,NZS+62)
CALL UNITV(Z1,Z2,Z3)
C x-AXIS
11 X1=Y2*Z3-Y3*Z2
X2=Y3*Z1-Y1*Z3
X3=Y1*Z2-Y2*Z1
CALL UNITV(X1,X2,X3)
IF (Y2.LT.0.7071) GD TO 630
IF (ABS(X2).GE.0.005) Y1=0.
IF (ABS(X2).GE.0.005) Y2=0.
GD TO 510
630 X2=0.
DH=Y1*Y1+Y3*Y3
X1=SQRT(Y3*Y3/DH)
X3=SQRT(Y3*Y3/DH)
IF (Y1.LT.0.) X3=-X3
IF (Y3.GT.D.) X1=-X1
IF (Y1.GE.0.001) GD TO 610
Y1=Y1*10000000.
610 Z1R=Z1
Z2R=Z2
Z3R=Z3
                   1
 0131
0132
0133
0134
0135
0136
0137
0138
0139
0140
0144
0144
0144
0144
0144
0144
  0149
0150
0151
  0153
0153
0154
0155
0156
0157
```

```
D2=-Y2*CTH-Y3*SIN
DH=X2*Y3-X3*Y2
PH=Y1/DH
PH=ATAN(PH)
CPH=COS(PH)
SPH=SIN(PH)
YD2=D1*SPH-D2*CPH
IF (YD2,Ge.0.) GO TO 41
PH=PH+PI
IT (I.E0.1) GO TO 46
CALL SHFT2(TH,D1,I1,J)
CALL SHFT2(PH,D3,I1,J4)
DT(K)=ABS(D1)
DS(K)=ABS(D2)
DH(K)=ABS(D2)
DH(K)=ABS(D2)
DH(K)=ABS(D2)
DH(K)=ABS(D2)
DH(K)=ABS(D2)
DH(K)=ABS(D2)
DH(K)=ABS(D2)
DH(K)=ABS(D2)
D1=AMAXI(DT(1),DS(1),DH(1))
D2=AMAXI(DT(2),DS(2),DH(2))
D3=DT(1)+DS(1)+DH(1)
D4=DT(2)+DS(2)+DH(2)
IF (D1,EE.D2,AND,D3.GE.D4) GO TO 46
D1=DT(1)*DS(1)*DH(1)
D2=DT(2)*DS(2)*DH(2)
IF (D1,ET.D2) IDET=2
GO TO 46
IDET=2
46 DX(1,J)=THE(IDET)
DX(1,J2)=PSI(IDET)
DX(1,DET)
DX(1,DET)
DX(1,DET)
DX(1,DET)
DX(1,DET)
DX(1,DET)
DX(1,DET)
        0194
0195
0196
0197
        0198
0199
0200
0201
0202
        0283
0284
0205
        0206
0207
0208
0209
        0214
0211
0212
0213
        9214
9215
9216
9217
            0218
        0219
0220
0221
0222
0223
0224
0225
        0226
0227
0228
0229
0230
0231
0232
0233
                                                                                                                                   I=I+1
IF(I.LE_KT) GO TO 6
        0234
0235
0236
0237
0238
                                                                                                                                 CONTINUE
                                                                                                                               IIM=1
IF(IMOT.EQ.0) JIM=9
DO 8 J=JIM,18
J0=J
```

```
J2=J+22
                                                     14=J+44
DO 8 I=2,XT
                            0240
0241
                           0261
0262
0263
0264
0265
C
                                                   SUBROUTINE ERROR(LU, IERR, NAME, NACT)
DIMENSION NAME(3), NACT(2)
WRITE(LU,100) NAME, NACT, IERR
FORMAT("FILE(",3A2,") ACCESS FAILED",/,"ACTION:",2A2,
1 " ERR CODE:",14)
                            0291
0292
0293
0293
0295
0296
0297
0298
0299
0301
                                                    EXT, 0)
SUBROUTINE SHFT2(ANG,D,I,J)
CCMHON PI,DP
COMHON /EXT/IC(200,93),DX(200,66)
D=ANG-DX(I,J)
IF(ARS(D).LE.PI) RETURN
IF(D.GI,PI) D=D-DP
IF(D.LT.-PI) D=D+DP
GO TO 1
END
                             0302
0303
9304
0305
                                        C
                                                     SUBROUTINE SHFT3(D)
COMMON PI.DP
IF(ABS(D).LE.PI) RETURN
IF(D.GT.PI) D=D-DP
IF(D.LT.-PI) D=D+DP
GO TO 1
                             0306
0307
                             0308
0309
                                                     END S
                             0318
0311
```

# 付録19 身体各部に作用する力およびトルクの算出プログラム (胴のひねりを伴う三次元動作の場合)

```
$EMA(EXTND,0)
PROGRAM KPTNT
0002
        0004
0005
0006
0007
0008
0010
0012
 0013
0014
0016
0017
0018
0019
0020
0021
0022
0023
0024
0025
0026
                   26
100
0028
0029
        0030
0031
0032
0033
0034
0035
0036
0037
0039
0040
0041
0042
0043
0044
0045
0046
0047
0048
0049
0050
0051
0052
0053
0054
8055
                    DD(I)=DM(I)
DL(I)=DM(I1)
DW(I)=DM(I2)
0056
                   DW(1)=W(1)=W(1):
R=DX(1):
R=C*R
DJ(1,1)=DW(1)*(3.*R+DL(1)*DL(1))/(12.*GRAV)
DJ(1,2)=DW(1)*R/(2.*GRAV)
DJ(1,3)=DJ(1,1)
0057
0058
0059
0440
0061
0063
0063
0064
0065
         Ç
                   NDPT=KT/10
NPT=NDPT
IPAS=10
DO 3 I=1.KT
IF(I.NE.NPT) GO TO 4
WRITE(U.101) IPAS
FORMAT("JOB PERCENTAGE /",I4," Z")
IPAS=IPAS+10
NPT=NPT+NDPT
0066
0067
0068
0069
0070
         181
0071
0072
             NPT=NP1+NPP1
File access
DD 5 J=1,7
DD 6 K=1.3
NAM(K)=NAME(J,K)
CALL DPEN(IDCB,IERR,NAM,0,-1,3)
CALL ERROR(NAM,6HOPEN )
CALL READF(IDCB,IERR,DM,133,LEN,I)
0073
0074
0075
0076
0077
0078
```

```
CALL ERROR (NAM, 6HREADF )
CALL CLOSE (IDCB)
IBF=LEN/2
DO 7 K=1, IBF
DX(K, J)=DM(K)
CONTINUE
0079
00R0
 0081
0082
0083
  0034
                           5
                                      Computation of force & torque/Main procedure. DO 11 X=1.3
0085
0086
 0087
                                                        FS(K)=0.
                                                          TS(K)=0.
 AAAA
                          11
                                                      TS(K)=0.
CALL NEWIN(I,17,17,FS,TS,FH,TH,-1)
R1=(DX(11,1)+DX(14,1))/2.
R2=(DX(34,1)+DX(37,1))/2.
R3=(DX(57,1)+DX(60,1))/2.
NG=DX(26,6)/2.
FD(1)=-MGXR1/GRAV
FD(2)=-NG-NGXR2/GRAV
FD(3)=-MG-R3/GRAV
FD(3)=-MG-R3/GRAV
FD(3)=-MG-R3/GRAV
FD(3)=-MG-R3/GRAV
FD(3)=-MG-R3/GRAV
 8089
 8078
0091
0092
0093
0094
0095
0097
                                                      FD(3)=-WG*R3/GRAV
DO 12 K=1,3
FS(K)=FD(K)
TS(K)=0.
CALL NEWTN(I,11,13,FS,TS,FR,TR,-1)
DO 13 K=1,3
FS(K)=FD(K)
TS(K)=0.
0098
0099
                           12
0100
0101
0102
0103
                             13
                                                        CALL NEWTH(I,14,16,FS,TS,FL,TL,-1)
DD 14 K=1,3
K1=(K-1)*22
 0105
0106
0107
                                                      K1=(K-1)*22

FS(K)=DT(I,K1+17,1)+DT(I,K1+13,1)+DT(I,K1+16,1)

DO 15 K=1.3

I1=(K-1)*22

I1=(BDD(K.3)+1

K2=HOD(K1,3)+1

L1=10+(K1-1)*22

L2=10+(K2-1)*22

L2=10+(K2-1)*22

TS(K)=DT(I,I1+17,2)+DT(I,I1+13,2)+DT(I,I1+16,2)

1 +DX(L1,5)*FH(K2)-DX(L2,5)*FH(K1)

2 +DX(L1+11,5)*FH(K2)-DX(L2+11,5)*FR(K1)

3 +DX(L1+12,5)*FL(K2)-DX(L2+12,5)*FL(K1)

4 -DX(L1,5)*FS(K2)+DX(L2,5)*FS(K1)

CONTINUE
                             14
0108
0109
0110
0111
0112
0113
0114
0115
0116
0117
0118
 0119
                                                      CONTINUE
CALL NEWTH(I,10,10,FS,TS,FE,TE,-1)
CALL NEWTH(I,18,18,FE,TE,FS,TS,-1)
CALL NEWTH(I,19,18,FE,TE,FS,TS,-1)
CALL NEWTH(I,9,9,FS,TS,FH,TH,-1)
IF(IMOT.EB.1) GO TO 8
BO 16 K=1,3
KF=MOD(K.3)*14
FS(K)=DX(KF,6)
TS(K)=DX(K,7)
CALL NEWTH(I,1,4,FS,TS,FR,TR,-1)
DO 17 K=1,3
KF=MOD(K,3)*20
KM=K+3
FS(K)=DX(KF.6)
                                                        CONTINUE
                             15
0128
0121
0122
0123
0124
0125
0126
0127
0128
0129
0131
0131
                             16
                                                    KF=HOD(K, 3)+20
XH=K+3
FS(K)=DX(KF, 6)
TS(K)=DX(KH, 7)
CALL NEWTN(1,5,8,FS,TS,FL,TL,-1)
DO 18 K=1,3
X1=(K-1)*22
DT(I,K1+19,1)=FR(K)
DT(I,K1+20,1)=FR(K)
DT(I,K1+20,2)=TL(K)
DT(I,K1+20,2)=TL(K)
DT(I,K1+20,2)=TL(K)
DT(I,K1+21,2)=TR(K)+FL(K)
DT(I,K1+21,2)=TR(K)+FL(K)
DT(I,K1+21,2)=TR(K)+TL(K)
DO 19 K=1,3
FS(K)=0.
TS(K)=TR(K)+TL(K)
CALL NEWTN(I,9,9,FS,TS,FM,TM,-1)
DO 20 X=1,3
X1=HOD(K,3)+1
K2=HOD(K1,3)+1
L1=(K1-1)*22
L2=(K2-1)*22
I1=K*22
DT(I,11,2)=TM(K)+FR(K)+FL(K)
DT(I,11,2)=TM(K)+FR(K)+FL(K)
DT(I,11,2)=TM(K)+FR(K)+FL(K)
DT(I,11,2)=TM(K)+FR(K)+FL(K)
DT(I,11-13,1)=FH(K)
DT(I,11-13,1)=FH(K)
DT(I,11-13,2)=TH(K)
CONTINUE
8133
0134
0135
                            17
0136
0137
0138
0139
0140
0141
0142
                           18
0143
0144
0145
0146
0147
0148
0149
0150
0151
0152
0153
0154
0155
0155
0158
                         20
```

```
DO 21 K=1,3

X1=(X-1)*22+21
FB=DT(I,X1,1)
FS(K)=FR(K)
IF(K,EQ,2) FS(K)=FH(K)*FR(X)/FB
TS(K)=TR(K)
CALL NEWTN(I,4,1,FS,TS,FE,TE,-1)
DO 22 K=1,3

X1=(K-1)*22+21
FB=DT(I,X1,1)
FS(K)=FL(K)
IF(K,EQ,2) FS(K)=FH(K)*FL(K)/FB
TS(K)=TL(K)
CALL NEWTN(I,8,5,FS,TS,FE,TE,-1)
GO TO 3
FB=0.
DO 23 X=1,8
FR=FB+DW(K)
DO 24 K=1,3
JX=8+(K-1)*22
WG=0.
IF(K,EQ,2) WG=FB
DT(I,JX,1)=FH(K)-WG
FE(K)=DT(I,JX,1)
DO 25 X=1,3
JX=8+(K-1)*22
K1=MD(K,3)+1
K2=MDD(K1,3)+1
DT(I,JK,2)=TH(K)+V1(K1)*FE(K2)-V1(K2)*FE(K1)
1
CONTINUE
CONTINUE
                                                0159
                                                0160
0161
                                                0162
0163
                                                0164 21
0165
0166
                                               0166
8157
0168
0159
0170
0171 22
0173
0174 8
0175
0176 23
                                               0177
0178
0179
0180
0181
6182
0183
0184
0185
```

```
0001
0002
0003
                                                         FTN4 .L
                                                         C DEFINITION OF BLOCK-COMMON
BLOCK DATA
                                                             BLOCK DATA
COMHON/MOX/STA, PSI, PHI, DS(3), DS2(3), DSJ(3)
COMHON/MOX/STA, PSI, PHI, DS(3), DD(18), DL(18), G
COMHON/THR/DJ(18, 3), DW(18), DD(18), DL(18), G
END
CSUBHI
SURROUTINE HOT(T)
C EULERIAM ANGLE / STA, PSI, FAI
C DS: 151 DIFFERENTIAL / STA, PSI, FAI
C DS: 120 DIFFERENTIAL / STA, PSI, FAI
C DS: 120 DIFFERENTIAL / STA, PSI, FAI
C T: OUTPUT TORQUE / SETSHIT-ZAWNO-KEI
APPLIED MOWLY TO /
C HUBDULZEN-O-KEI = KANSEI-STA, TENT
COMHON / MOX/STA, PSI, FAI, DS(3), DS(3), D1(3), D1(3
                                                                                                                  BLUCK DATA
COMMON/MOX/STA,PSI,PHI,DS(3),DS2(3),DSJ(3)
COMMON/ERR/IDCB(272),IERR,LU
COMMON/INR/DJ(18,3),DW(18),DD(18),DL(18),G
 0004
 0006
8008
0007
                                               C
   0018
 0012
0013
 0014
0015
 0016
0019
0020
0021
0022
0023
0024
0025
0026
0027
0028
0129
0031
0032
0033
0034
0035
0036
0037
0038
0039
0042
0043
8044
0045
0046
0048
0049
0050
0051
0052
0053
   0054
0055
0054
0057
0058
0059
0060
0062
0063
0064
0065
0066
0068
0069
0070
   0871
 0072
0073
0074
     9075
   0076
   0078
```

```
0979 C
0080 C
0081 C
0082 C
0083 C
0084 C
0085 C
8086 C
                             P2(1.1)=CP*CP
     8086
0087
0088
    0070
0071
0072
0073
     0094
1095
     0096
    0098
8079
0108
0101
0102
    0104
0105
     0106
     0108
    0110
0111
0112
0113
    8114
0115
     0116
0117
0145 END
0146 C SUB#4
0147 SUBROUTINE TENT(A)
0148 C MATRIX / A
0149 C A=TENCHI(A)
0150 DIMENSION A(3,3),B(
0151 DO 10 I=1,3
0152 DO 10 J=1,3
0153 10 B(J,I)=A(I,J)
0154 DO 20 I=1,3
0155 DO 20 J=1,3
0155 DO 20 J=1,3
                       A=TENCHI(A)
DIMENSION A(3,3),B(3,3)
D0 10 I=1,3
D0 10 J=1,3
10 B(J,I)=A(I,J)
D0 20 J=1,3
D0 20 J=1,3
20 A(I,J)=B(I,J)
RETURN
FND
     0156
0157
0158
                              END
```

```
0159 C SUB$5
0160 SUBROUTINE ERROR(NAME,NACTN)
0161 C ERROR CHECK
0162 COMMON /ERR/IDCB(272),IERR,LU
0163 DIMENSION NAME(3).NACTN(3)
0164 IF (IERR,GE.0) RETURN
0165 CALL CLOSE(IDCB)
0166 WRITE(LU,100) NAME,NACTN,IERR
0167 100 FORMAT(*FILE/*,3A2,1X,3A2,"ERROR,ERROR CDDE IS*,I4)
0168 CALL EXEC(6)
0169 RETURN
0170 END
     9170
9171
9172
9173
9174
 0175
0176
0177
0178
0179
 0130
 0132
0183
 0185
0186
 0187
0188
0189
  0190
 0191
0192 2
0193
 0194
0195
0196
0197
0198
 0199
0200 3
 0201
0202
 0203
0204
0205
 0205
0206
0207
0208
0209
0211
0211
0212
5
0213
0214
6
```

# 謝辞

本研究の遂行にあたり、終始かわらぬ御指導、御配慮を頂きました神戸大学岩田一明教授、森脇俊道助教授、荒井栄司助手に心から感謝の意を表します。本研究の達成にあたり、有益な御教示と懇篤な校閲を賜わりました神戸大学進藤明夫教授、中西英二教授に厚く感謝致します。また研究の過程で多大の御教示を賜わりました神戸大学医学部 溝井泰彦教授、同教育学部 岩田敦教授、同工学部 村田英人助教授に深甚の謝意を表しますとともに、本論文の実験を遂行するにあたり深い御配慮のもとに有益な御教示を賜わりました神戸大学教養部 美崎教正教授、野村治夫助教授、柳田泰義助手に厚く御礼申し上げます。さらに本研究の遂行にあたり、貴重な御助言を賜わりました大阪府立大学 奈倉道隆先生、当時神戸大学医学部大学院生 藤原敏氏に心から感謝の意を表します。

本論文の作成にあたり、多大な御協力を頂いた当時神戸大学大学院生 三原 毅史氏、並びに現在在籍中の岩本尚士氏、田中良明氏、田代清隆氏、白瀬敬一 氏他、生産機械工学科第三講座の皆様に心より感謝致します。