



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章	緒 論	1
第2章	二次元運動動作の解析	6
2.1	緒 言	6
2.2	矢状面内二次元人体数学モデル	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の処理方法	15
2.3.1	実験方法	15
2.3.2	運動動作の計測およびデータ処理	18
2.3.3	速度と加速度の算出	21
2.3.4	重心位置の算出	24
2.4	起立・着席動作実験の結果と考察	25
2.4.1	被験者の属性	25
2.4.2	動作パターン	26
2.4.3	身体各部に作用する力およびトルク	33
2.4.4	前額面内の動きを考慮した補正	37
2.5	荷役作業動作実験の結果と考察	41
2.5.1	動作パターン	41
2.5.2	身体各部に作用する力およびトルク	44
2.6	結 言	46
第3章	三次元運動動作解析の方法論	48
3.1	緒 言	48
3.2	三次元人体数学モデル	48
3.2.1	モデルと座標系の定義	48

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	5 4
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	6 2
3. 5	結 言	6 2
第 4 章	三次元運動動作の解析	6 4
4. 1	結 言	6 4
4. 2	荷役作業動作実験	6 4
4. 2. 1	実験装置および実験方法	6 4
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	9 4
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	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	9 6

4.4.3	三次元位置情報抽出における測定誤差	99
4.5	結 言	101
第5章	ひねりを伴う身体運動動作の解析	103
5.1	緒 言	103
5.2	ひね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	解析方法	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	ITVカメラによる座標情報の抽出	110
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	115
5.4.3	動作パターン	116
5.4.4	身体各部に作用する力およびトルク	120
5.5	前腕のひねり動作の実験	121
5.5.1	実験装置および実験方法	121
5.5.2	画像処理	122
5.5.3	動作パターンとトルクの解析結果	126
5.6	結 言	128
第6章	シミュレーションによる作業機能評価	130
6.1	緒 言	130
6.2	シミュレーションの方法	130
6.2.1	身体各点の座標の創成	130
6.2.2	関数近似による身体関節角の創成	133

6.3	シミュレーションの結果および作業機能の評価	135
6.4	結 言	144
第7章	結 論	145
参考文献		147
付 録		
付録 1	加速度 a_{0i} の導出	159
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	161
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	162
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	167
付録 9	三次元荷役作業動作パターン	169
付録 10	荷役作業動作に伴う重心移動軌跡	170
付録 11	荷役作業動作における身体各部のトルク	171
付録 12	垂直跳び動作パターン	172
付録 13	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 15	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 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	181
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	183
付録 18	オイラー角算出プログラム	189
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	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
a_μ	デジタル・フィルタの係数
a_{G_i}	剛体要素 i の重心 G_i の加速度
a_{O_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_ν	デジタル・フィルタの係数
$c \lambda$	$\cos \lambda$
d_i	剛体円柱 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_1	ホログラム再生像における固定点の測定誤差
E_2	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
F_{hand}	手がテーブルに作用する力
F_{hip}	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_L	股関節において左大腿要素から上肢に作用する力
F_{mL}	左足に作用する床反力
F_{mR}	右足に作用する床反力
F_R	股関節において右大腿要素から上肢に作用する力
F_{tu}	股関節において腰要素から下肢に作用する力
f, f_1, f_2	カメラの位置ベクトル
G_i	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
h_{max}	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_i}	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
j	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	デジタル・フィルタの次数
l_i, l_i'	剛体要素 i の部分長さ
l_i'', l_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
$l_{i-1, i}$	矢状面内における要素端点 $i-1$ と i の距離
M	デジタル・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_y	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

p $\frac{1}{2} \leq p \leq 1$ なるパラメータ

p_j 濃淡レベル j の確立分布

P 任意の単位ベクトル

P_j 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

$P_j(u)$ 第 j 区間を補間する三次のスプライン関数

$\dot{P}_j(u)$ u に関する $P_j(u)$ の一階微分

$\ddot{P}_j(u)$ u に関する $P_j(u)$ の二階微分

r 剛体要素の実長

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 λ の回転を与える変換行列

\hat{r}_i 剛体要素 i の方向ベクトル

$\hat{r}_i'', \hat{r}_i'''$ 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 ($0 \leq s \leq 1$)

$s \lambda$ $\sin \lambda$

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_L 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_{mL} 左足に作用する床からの反トルク

T_{mR} 右足に作用する床からの反トルク

T_R	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
t_A, t_B	点 A, B を通る接線の方向ベクトル
t_j	点 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	$0 \leq u \leq 1$ なる無次元パラメータ
u, u_1, u_2	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
$v \lambda$	$1 - \cos \lambda$
v_{G_0}	垂直跳びにおける離床時の身体重心速度
v, v_1, v_2	物体点の三次元座標
W_i	剛体要素 i の重量
$X(n\Delta T)$	デジタル・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
$Y(n\Delta T)$	デジタル・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
α_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
ΔT	デジタル・フィルタリングにおけるサンプリング時間間隔
ΔY	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
θ	運動座標系を決定するためのオイラー角
$\dot{\theta}, \ddot{\theta}$	オイラー角 θ の時間に関する一階, 二階微分
$[\theta]$	角 θ 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
θ_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
θ_R	カメラの位置から被験者を見るとき俯角
θ_r	前腕断面における回転角
θ_t	ひねり角度
λ	ベクトル \mathbf{P} を軸とする反時計回りの回転角
μ_T	一画面全体の平均濃淡レベル
$\mu(k)$	濃淡レベル k 以下の画素の平均濃淡レベル
$[\pi]$	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
$[\pi_1]$	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
\emptyset	運動座標系を決定するためのオイラー角
$\dot{\emptyset}, \ddot{\emptyset}$	オイラー角 \emptyset の時間に関する一階, 二階微分
$[\emptyset]$	角 \emptyset の回転を与える変換行列
ϕ	軸測投影法における視点の左右変位角
Ψ	運動座標系を決定するためのオイラー角
$\dot{\Psi}, \ddot{\Psi}$	オイラー角 Ψ の時間に関する一階, 二階微分
$[\Psi]$	角 Ψ の回転を与える変換行列
ϕ_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
$\dot{\omega}_x, \dot{\omega}_y, \dot{\omega}_z$	剛体要素の回転角加速度
ω_i	矢状面内における剛体要素 i の回転角速度
$\omega(k)$	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% の高齢人口比率（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、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はならない。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が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見るもので、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) 象徴的運動学

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~~^{に起因する}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、力がつり合っただけの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)~10)}、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)~18)}、およびロボットの開発^{19)~22)}などである。解析方法は以下に示すような分類に従い、多種多様な方法が用いられる。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)やポテンシオメータ等を用いて身体各部の角変位を電氣量に変換して測定するもの^{25)~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)~34)}、手や腕の諸機能を対象としたもの^{26),27),35)~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)~8),15)~17),44)~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)~52)}および三次元モデルがある。^{53)~58)}

(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)}、身体各部の相互角や作用力およびトルクなどを求めて評価したもの^{32),33),57)}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

人間の運動における自由度が極めて大きいことは言うまでもないが、日常生活あるいは労働作業における運動動作の中には、あるひとつの平面内での運動しか行っていないもの、あるいは平面内運動と仮定できるものがある。例えば、椅子に腰かけている状態から起立する動作、足元にある荷物を持ち上げる動作などがそれである。本章ではここで例示した 2 つの動作、すなわち椅子から起立し着席する動作^{59)~61)} および簡単な荷物の持ち上げ、持ち下ろし作業動作^{62),63)} を取り上げ、側面からの詳細な解析、検討を試みた。解析の対象としてまず、起立・着席動作を採用したのはこの動作が他の多くの日常動作、作業動作の基本となっているばかりでなく、よく指摘されるように向老者が起立する場合、無意識のうちに目の前のテーブルや肘もたれに手をつけて体を支えるといった代償機能の特徴についても、詳細な検討を加えるためである。また、荷役動作は作業のうちで最も基本的なものであり、^{6)~8)} 今後複雑な作業の解析を行う上での第一段階となるものである。従ってここでは不自然ではあるが、両足をそろえた状態でひざや肘が開かないような動作を行っている。実験においては若年から老年にいたる幅広い年齢層の被験者に対して解析を行った。

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⁸³⁾、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。⁹⁾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、足など局所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Smidt⁴⁸⁾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, Winter⁵⁰⁾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, Chao²⁹⁾は最適化の手法により下肢の運動の予測を行い, Pedotti³⁰⁾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Dainis¹⁵⁾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, Ghosh¹⁶⁾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Boysen¹⁷⁾は水泳の飛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, Kelley²³⁾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)~8)}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15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

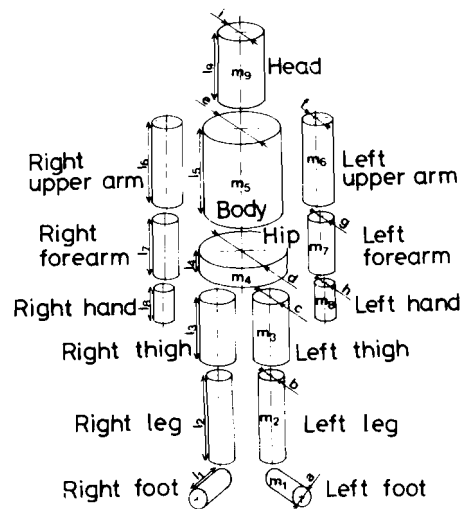


図 2.1 人体のモデリング

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。

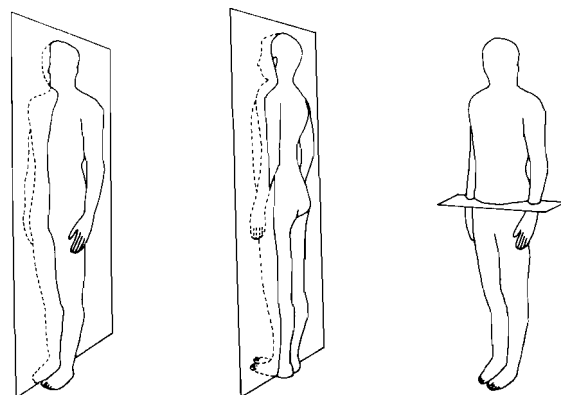
2.2.2 運動方程式

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EMG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。³³⁾ 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²⁹⁾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



矢状面

前額面

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 l_i および l_i' とする。これより、

$$r_i = l_i + l_i' \quad (2.1)$$

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_{G_i} 、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 $F_{i,i+1}$ 、 $T_{i,i+1}$ とする。また剛体要素 i がそれより小さい番号の剛体要素と接続する接点を O_i とし、静止座標系に対する O_i および G_i の加速度をそれぞれ a_{O_i} 、 a_{G_i} 、さらに静止座標系に対する剛体要素 i の O_i まわりの回転角変位、角速度、角加速度をそれぞれ θ_i 、 ω_i 、 α_i 、剛体要素 i の方向を示す単位ベクトルを \hat{r}_i とする。

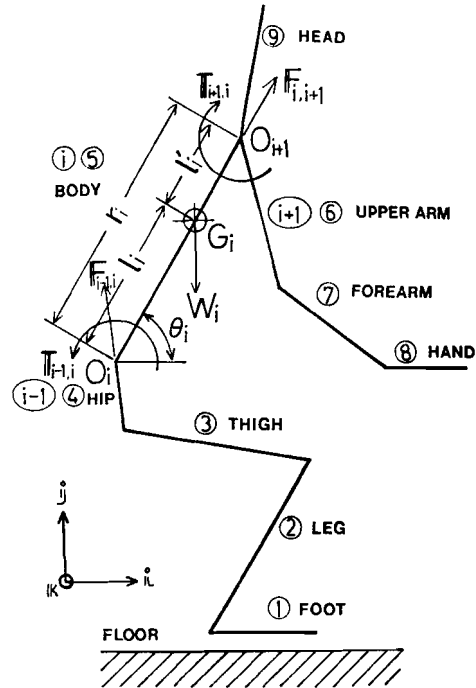


図 2.3 矢状面内二次元人体モデル

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。

$$F_{i-1,i} - F_{i,i+1} - W_i \cdot j = W_i/g \cdot a_{G_i} \quad (2.2)$$

$$T_{i-1,i} - l_i \cdot \hat{r}_i \times F_{i-1,i} - T_{i,i+1} - l_i' \cdot \hat{r}_i \times F_{i,i+1} = I_{G_i} \cdot \alpha_i \cdot k \quad (2.3)$$

$$a_{G_i} = a_{O_i} + (-\omega_i^2 \cdot l_i \cdot \hat{r}_i + \alpha_i \cdot l_i \cdot k \times \hat{r}_i) \quad (2.4)$$

$$a_{O_i} = \sum_{j=1}^{i-1} (-\omega_j^2 \cdot r_j \cdot \hat{r}_j + \alpha_j \cdot r_j \cdot k \times \hat{r}_j) \quad (2.5)$$

ここで、 g 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。

- (i) 床からの反力 $F_{0,1}$ 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。
- (ii) 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についても同様に剛体要素5のみに力とトルクを伝達する。

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、

$$F_{7,8} - W_8 j = \frac{W_8}{g} a_{G8}$$

$$T_{7,8} - \ell_8 \hat{r}_8 \times F_{7,8} = I_{G8} \alpha_8 k \quad (2.6)$$

剛体要素7に関しては、

$$F_{6,7} - F_{7,8} - W_7 j = \frac{W_7}{g} a_{G7}$$

$$T_{6,7} - \ell_7 \hat{r}_7 \times F_{6,7} - T_{7,8} - \ell_7' \hat{r}_7' \times F_{7,8} = I_{G7} \alpha_7 k \quad (2.7)$$

剛体要素6,9に関しては、

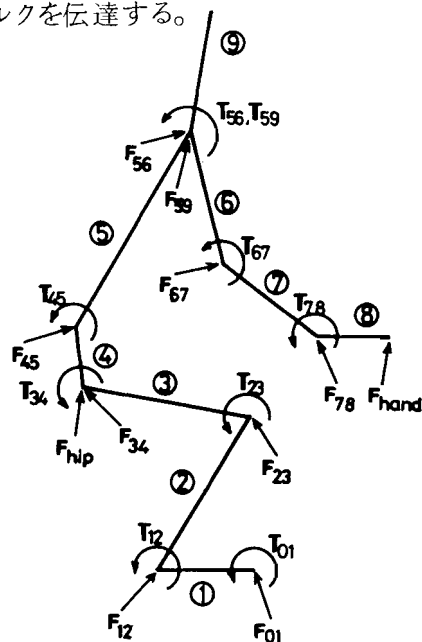


図2.4 各関節に作用する力およびトルク

$$F_{5,6} - F_{6,7} - W_6 j = \frac{W_6}{g} a_{G6}$$

$$T_{5,6} - l_6 \hat{r}_6 \times F_{5,6} - T_{6,7} - l_6' \hat{r}_6 \times F_{6,7} = I_{G6} \alpha_6 k \dots\dots\dots (2.8)$$

$$F_{5,9} - W_9 j = \frac{W_9}{g} a_{G9}$$

$$T_{5,9} - l_9 \hat{r}_9 \times F_{5,9} = I_{G9} \alpha_9 k \dots\dots\dots (2.9)$$

となる。また剛体要素 5 には力 $F_{5,9}$, $F_{5,6}$, トルク $T_{5,9}$, $T_{5,6}$ が作用するから以下のようなになる。

$$F_{4,5} - (F_{5,6} + F_{5,9}) - W_5 j = \frac{W_5}{g} a_{G5}$$

$$T_{4,5} - l_5 \hat{r}_5 \times F_{4,5} - (T_{5,6} + T_{5,9}) - l_5' \hat{r}_5 \times (F_{5,6} + F_{5,9}) = I_{G5} \alpha_5 k \dots\dots\dots (2.10)$$

剛体要素 4, 3, 2, 1 に関しては

$$F_{i-1,i} - F_{i,i+1} - W_i j = \frac{W_i}{g} a_{Gi} \quad (i=4, 3, 2, 1)$$

$$T_{i-1,i} - l_i \hat{r}_i \times F_{i-1,i} - T_{i,i+1} - l_i' \hat{r}_i \times F_{i,i+1} = I_{Gi} \alpha_i k \dots\dots\dots (2.11)$$

となる。なお式(2.8)~(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

$$a_{O1} = 0 \dots\dots\dots (2.12)$$

剛体要素 2~8 に関しては

$$a_{Oi} = \sum_{j=1}^{i-1} (-\omega_j^2 l_j \hat{r}_j + \alpha_j l_j k \times \hat{r}_j) \quad (i=2, 3, \dots, 8) \quad (2.13)$$

剛体要素 9 に関しては

$$a_{O9} = \sum_{j=1}^5 (-\omega_j^2 l_j \hat{r}_j + \alpha_j l_j k \times \hat{r}_j) \dots\dots\dots (2.14)$$

となる。

以上の式(2.6)~(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の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、(i)人体と椅子およびテーブルとの接触点はナイフエッジ状であり、そこではトルクが作用しないものとする。(ii)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ようになる。すなわち、

剛体要素 8 に関しては

$$\begin{aligned} F_{7,8} - F_{hand} - W_8 j &= \frac{W_8}{g} a_{G8} \\ T_{7,8} - \ell_8 \hat{r}_8 \times F_{7,8} - \ell_8' \hat{r}_8 \times F_{hand} &= I_{G8} \alpha_8 k \end{aligned} \quad (2.15)$$

剛体要素 4 に関しては

$$\begin{aligned} (F_{3,4} + F_{hip}) - F_{4,5} - W_4 j &= \frac{W_4}{g} a_{G4} \\ T_{3,4} - \ell_4 \hat{r}_4 \times (F_{3,4} + F_{hip}) - T_{4,5} - \ell_4' \hat{r}_4 \times F_{4,5} &= I_{G4} \alpha_4 k \end{aligned} \quad (2.16)$$

となる。但し、 F_{hand} は手がテーブルに及ぼす力、 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

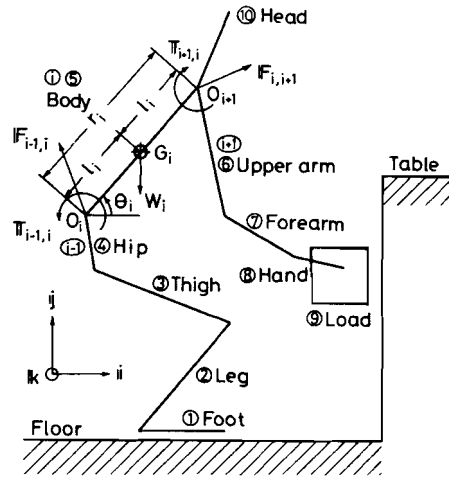


図 2.5 矢状面内二次元人体モデル

に関する式は以下の通りである。

剛体要素 9 に関しては

$$F_{8,9} - W_9 j = \frac{W_9}{g} a_{G9}$$

$$T_{8,9} - l_9 \hat{r}_9 \times F_{8,9} = I_{G9} \alpha_9 k \quad \dots \dots \dots (2.17)$$

剛体要素 8 に関しては

$$F_{7,8} - F_{8,9} - W_8 j = \frac{W_8}{g} a_{G8}$$

$$T_{7,8} - l_8 \hat{r}_8 \times F_{7,8} - T_{8,9} - l_8' \hat{r}_8' \times F_{8,9} = I_{G8} \alpha_8 k \quad \dots \dots \dots (2.18)$$

剛体要素 10 に関しては

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

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

剛体要素 5 に関しては、

$$F_{4,5} - (F_{5,6} + F_{5,10}) - W_5 j = \frac{W_5}{g} a_{G5}$$

$$T_{4,5} - l_5 \hat{r}_5 \times F_{4,5} - (T_{5,6} + T_{5,10}) - l_5' \hat{r}_5' \times (F_{5,6} + F_{5,10}) = I_{G5} \alpha_5 k \quad \dots \dots \dots (2.20)$$

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、Townsend²⁵⁾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、Kinzel³⁷⁾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Winter²⁴⁾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⁷²⁾を採用している。フィルムはカラーのポジフィルムを使用し、コマ送り速度は毎秒40コマとした。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

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（フィルム長 100ft, 最大撮影コマ数 500コマ / 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）

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 16ミリフィ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フィ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、目の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 2.7 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、床と目の前のテーブル（高さ 0.71m）との間で

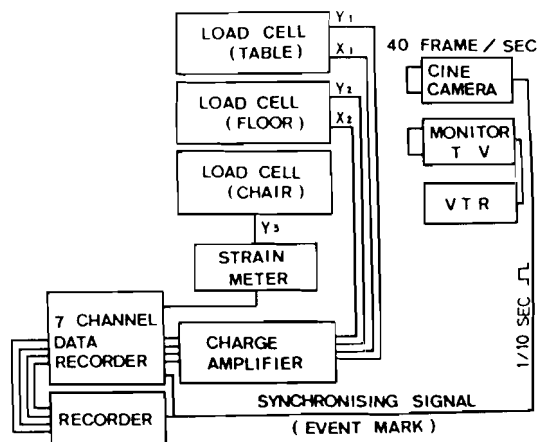


図 2.6 実験装置の概要

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。ターゲッ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、骨盤の腸骨稜、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



図 2.7 起立・着席動作実験

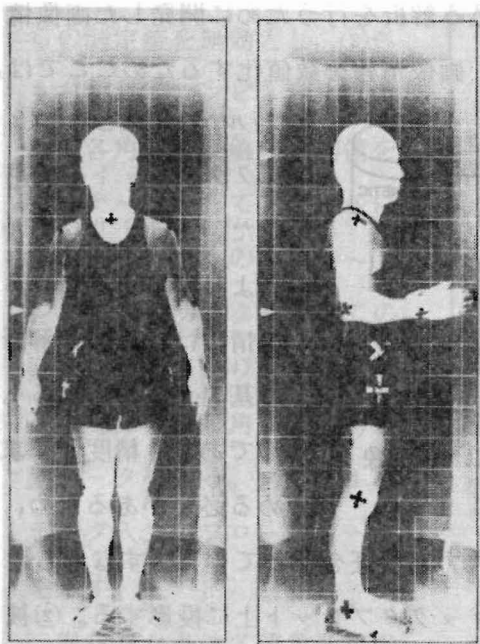
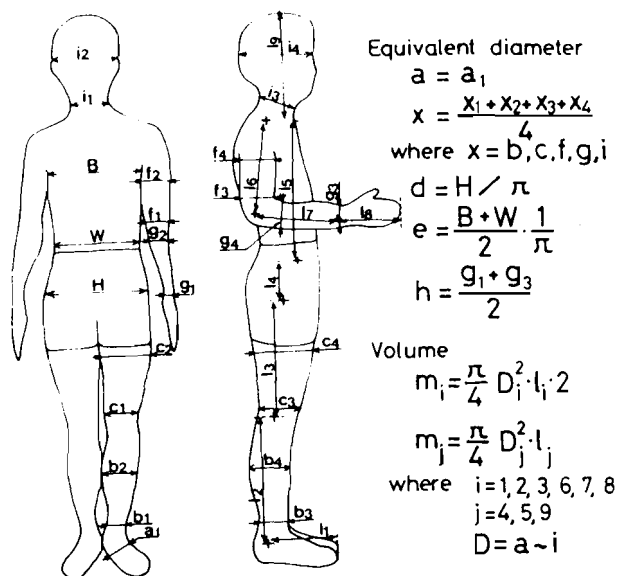


図 2.8 被験者のシルエット写真

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 $a \sim i$ 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 1 g/cm^3 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 2.10 に示す。画像情報を数値化するためここでは、

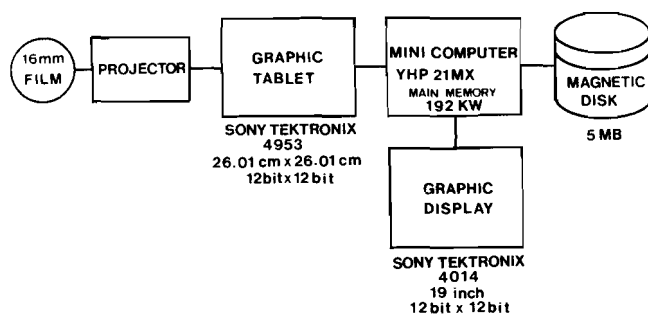


図 2.10 ミニ・コンピュータを用いた画像
 処理システムの概要

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、精度よく求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す，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

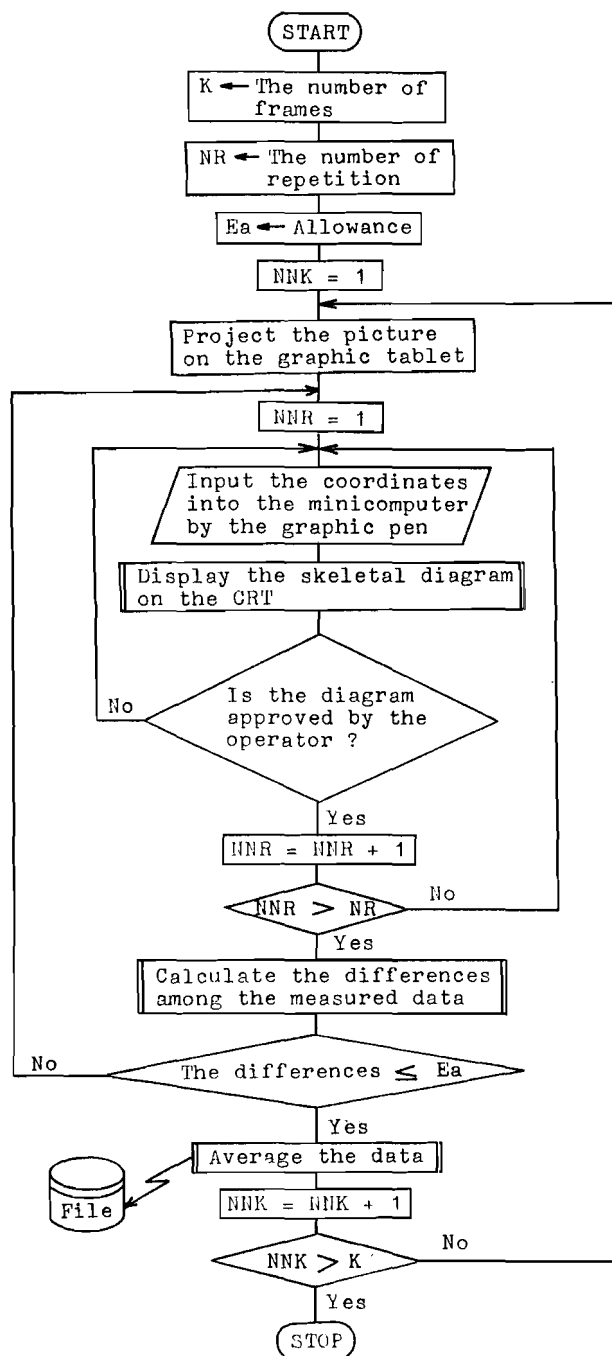


図 2.11 身体各点の座標入力

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 Dainis¹⁵⁾ 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、Pezzach⁷³⁾ は得られた時系列データにデジタルフィルタリング処理を施し、また Kelley²³⁾ 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。デジタルフィルタリング⁷⁴⁾ は、入力の時系列 $X(n\Delta T)$ に対して出力の時系列 $Y(n\Delta T)$ を以下に示すデジタル計算式によって与えるものである。すなわち

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

である。ここで、 ΔT 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_{μ}, b_{ν} はフィルタの係数であり、この a_{μ}, b_{ν} 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 $Y((n-\nu)\Delta T)$ の項を含むことから再帰型フィルタと呼ばれる。ここでは $b_{\nu} = 0$ 、すなわち、

$$Y(n\Delta T) = \sum_{\mu=0}^M a_{\mu} X((n-\mu)\Delta T) \quad \dots\dots\dots (2.22)$$

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 $M=32$ とし、フィルタの係数 a_{μ} 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 $\Delta T = 1/40$ 秒に対し、遮断周波数が 5.2 Hz となるように係数 a_μ を定めた。使用したフィルタの係数 a_μ 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 σ 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。⁹⁾ 他に Pezzach⁷³⁾ はチェビシェフの多項式近似による方法とフィルタリング処理による方法を比較検討している。また、Dainis¹⁵⁾ は角度データを 3 点ずつ二次関数で近似する方法を提案し、不等時間間隔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^{76),77)} 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。

$$U = K \int_0^J \frac{1}{\rho^2} dS = K \int \frac{(d^2 y/dx^2)^2}{\{1 + (dy/dx)^2\}^{5/2}} dx \quad \dots\dots (2.23)$$

ここで K 、 J はそれぞれ薄板の剛性定数および長さ、 ρ 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、

$$U \simeq K \int \left(\frac{d^2 y}{dx^2} \right)^2 dx \quad \dots\dots\dots (2.24)$$

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。

$$P(u) = R_0 + R_1 u + R_2 u^2 + R_3 u^3 \quad \dots\dots\dots (2.25)$$

ここで u は $0 \leq u \leq 1$ 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。

$$\begin{aligned} P(0) &= A, \quad P(1) = B, \\ dP/du|_{u=0} &= t_A, \quad dP/du|_{u=1} = t_B \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (2.26)$$

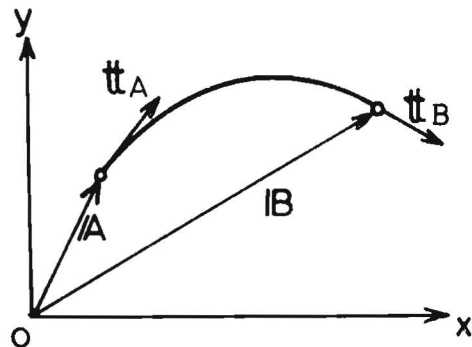


図 2.12 2 点間におけるスプライン曲線

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。

$$\begin{aligned} R_0 &= A, \quad R_1 = t_A, \quad R_2 = 3(B-A) - 2t_A - t_B \quad \dots\dots\dots (2.27) \\ R_3 &= 2(A-B) + t_A + t_B \end{aligned}$$

以上より $P(u)$ は以下のようなになる。すなわち、

$$\begin{aligned} P(u) &= u^3 \{ 2(A-B) + t_A + t_B \} + u^2 \{ 3(B-A) - 2t_A - t_B \} \quad \dots (2.28) \\ &\quad + u t_A + A \end{aligned}$$

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 j 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。

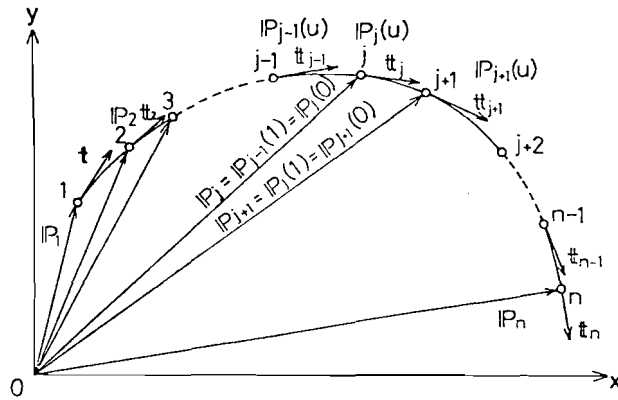


図 2.13 n点間におけるスプライン曲線

$$\begin{aligned}
 P_j(u) = & u^3 \{ 2(P_j - P_{j+1}) + t_j + t_{j+1} \} \\
 & + u^2 \{ 3(P_{j+1} - P_j) - 2t_j - t_{j+1} \} \\
 & + u t_j + P_j \quad \dots\dots\dots (2.29)
 \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned}
 \dot{P}_j(u) = & 3u^2 \{ 2(P_j - P_{j+1}) + t_j + t_{j+1} \} \\
 & + 2u \{ 3(P_{j+1} - P_j) - 2t_j - t_{j+1} \} + t_j \quad \dots\dots\dots (2.30)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \ddot{P}_j(u) = & 6u \{ 2(P_j - P_{j+1}) + t_j + t_{j+1} \} \\
 & + 2 \{ 3(P_{j+1} - P_j) - 2t_j - t_{j+1} \} \quad \dots\dots\dots (2.31)
 \end{aligned}$$

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、

$$P_j(1) = P_{j+1}(0), \dot{P}_j(1) = \dot{P}_{j+1}(0), \ddot{P}_j(1) = \ddot{P}_{j+1}(0) \quad \dots\dots\dots (2.32)$$

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。

$$t_j + 4t_{j+1} + t_{j+2} = 3(P_{j+2} - P_j) \quad \dots\dots\dots (2.33)$$

ただし、両接点 P_1, P_n においては曲率が 0 であるという仮定を設ければ、

$$\ddot{P}_1(0) = 0, \ddot{P}_n(0) = 0 \quad \dots\dots\dots (2.34)$$

となり、同様にして以下の式が得られる。

$$2t_1 + t_2 = 3(P_2 - P_1), t_{n-1} + 2t_n = 3(P_n - P_{n-1}) \quad \dots\dots (2.35)$$

式(2.33), (2.35)をマトリクス表示すれば以下のようなになる。

$$\begin{pmatrix} 2 & 1 & & & & \\ 1 & 4 & 1 & & 0 & \\ & 1 & 4 & 1 & & \\ & & & & & \\ 0 & & & 1 & 4 & 1 \\ & & & 1 & 2 & \end{pmatrix} \begin{pmatrix} t_1 \\ t_2 \\ t_3 \\ \vdots \\ t_{n-1} \\ t_n \end{pmatrix} = 3 \begin{pmatrix} P_2 - P_1 \\ P_3 - P_1 \\ P_4 - P_2 \\ \vdots \\ P_n - P_{n-2} \\ P_n - P_{n-1} \end{pmatrix} \dots\dots (2.36)$$

ここで P_j は全て既知であるため、これより 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 P_j を時系列データとしたときの速度、加速度にはかならない。

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 Kelley²³⁾ は椅子からの起立動作解析⁷⁸⁾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⁾、Murray⁸⁰⁾ および Williams⁸¹⁾ 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} ）（ $i = 1, 2, \dots, 9$ ）とすると求める重心座標（ X_{Gi}, Y_{Gi} ）は次式で与えられる。

$$X_{Gi} = \frac{\sum_{i=1}^9 W_i x_{Gi}}{\sum_{i=1}^9 W_i} \dots\dots\dots (2.37)$$

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

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 θ_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。

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} x_{Gi} \\ y_{Gi} \end{bmatrix} &= \sum_{j=1}^{i-1} r_j \begin{bmatrix} \cos \theta_j \\ \sin \theta_j \end{bmatrix} + \frac{1}{2} r_i \begin{bmatrix} \cos \theta_i \\ \sin \theta_i \end{bmatrix} \quad (i=1, 2, \dots, 8) \\ \begin{bmatrix} x_{G9} \\ y_{G9} \end{bmatrix} &= \sum_{j=1}^5 r_j \begin{bmatrix} \cos \theta_j \\ \sin \theta_j \end{bmatrix} + \frac{1}{2} r_9 \begin{bmatrix} \cos \theta_9 \\ \sin \theta_9 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2.38)$$

2.4 起立・着席動作実験の結果と考察

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)	Weight(N(kgf))	Moment of Inertia $\times 10^{-4}(\text{kgm}^2)$
1	0.099	0.20	15.10 (1.54)	6.20
2	0.138	0.38	55.66 (5.68)	76.64
3	0.212	0.36	124.66(12.72)	176.64
4	0.288	0.13	83.01 (8.47)	56.98
5	0.259	0.45	231.67(23.64)	508.20
6	0.100	0.28	21.56 (2.20)	16.07
7	0.080	0.25	12.35 (1.26)	7.21
8	0.070	0.20	7.55 (0.77)	2.86
9	0.153	0.25	45.28 (4.62)	31.45

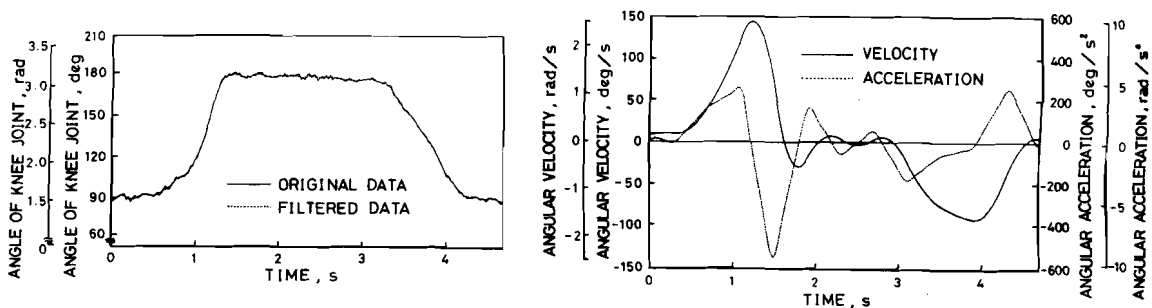
長さ、重量および慣性モーメントを求めた例を表 2.1 に示す。また 19 名の被験者に対して身体各部を円柱で近似して推定した体重と実測した体重を比較した結果を表 2.2 にまとめて示す。実測値と推定値の平均誤差は 3.25% であり、これより身体各部を円柱形状の剛体要素で近似した本手法はほぼ妥当であると考えられる。なお以後、被験者番号は表 2.2 に示すものと一致させて用いるものとする。

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

SUBJECT	AGE	MEASURED WEIGHT, KG	ESTIMATED WEIGHT, KG	SUBJECT	AGE	MEASURED WEIGHT, KG	ESTIMATED WEIGHT, KG
1	74	63.0	65.0	11	76	48.0	49.0
2	80	59.0	59.6	12	70	58.5	55.6
3	73	60.0	59.1	13	26	54.0	50.3
4	78	55.0	51.8	14	44	57.0	54.2
5	69	65.0	65.2	15	22	54.0	52.9
6	73	60.5	61.9	16	47	62.0	66.5
7	72	43.0	44.8	17	23	64.5	63.4
8	67	51.5	49.6	18	23	54.0	52.0
9	60	51.5	52.1	19	23	60.0	60.9
10	68	49.5	47.9				

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变化と，それにデ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2.14(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变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の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

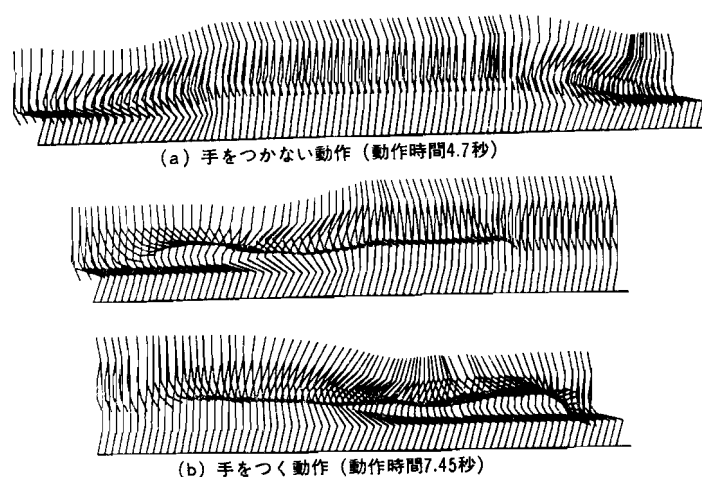
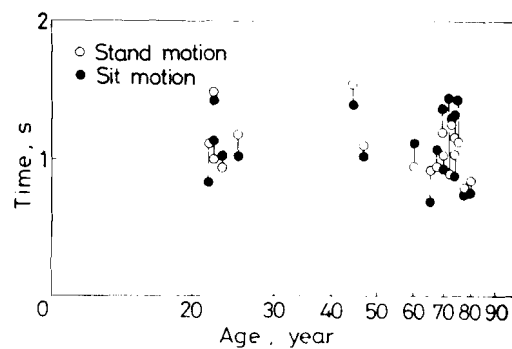


図2.15 起立・着席動作パターン(年齢72歳)

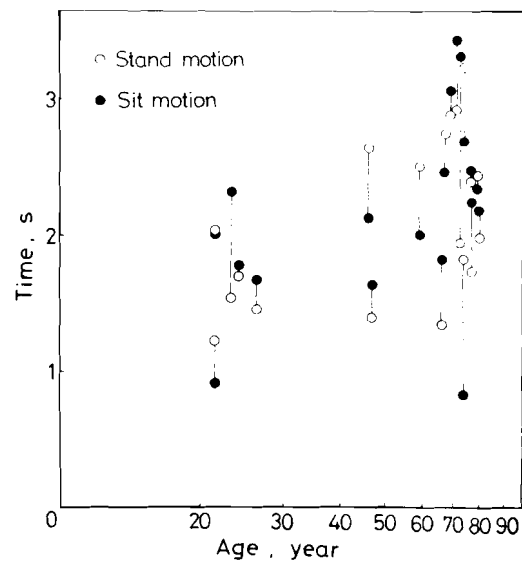
経過している。図より手をつく動作は手をつかない動作に比べて、動作時間が長く、テーブルに手をつくために起立時および着席時により大きな前傾姿勢をとっていることがわかる。このような動作のパターン表示は運動動作の時間的变化を細部にわたって検討する上で有用であるばかりでなく、得られたデータの検証にも用いることができる。

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コマ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

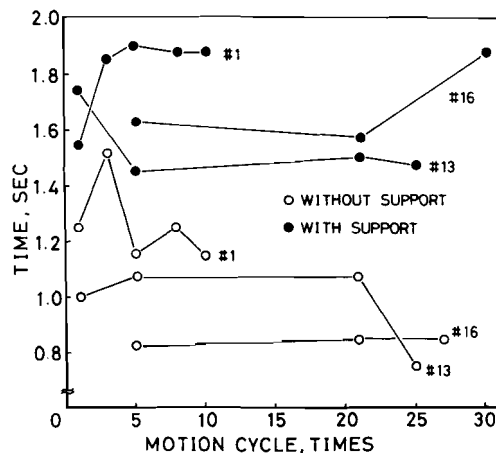
図 2.16 起立・着席動作時間
(動作サイクル 5 回目)

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。これは目今のテーブルに手をつけて起立・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，高齢者ほ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。

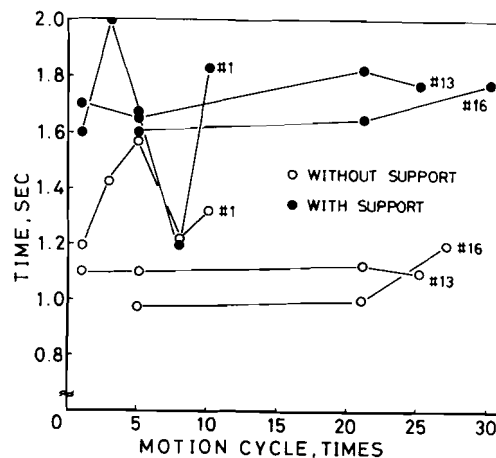
図 2.17 は若年者（被験者番号 13, 26 歳），中年者（被験者番号 16, 47 歳），高齢者（被験者番号 1, 74 歳）各 1 名について動作回数の増加に伴う動作時間の変化を示したものである。ただし，高齢者の動作回数は 10 回としている。図より動作回数が増加することによる動作時間の顕著な変化は認められないが，高齢者の場合，動作時間に大きなばらつきがあることが認められる。

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。



(a) 起立動作



(b) 着席動作

図 2.17 動作サイクルによる動作時間の変化

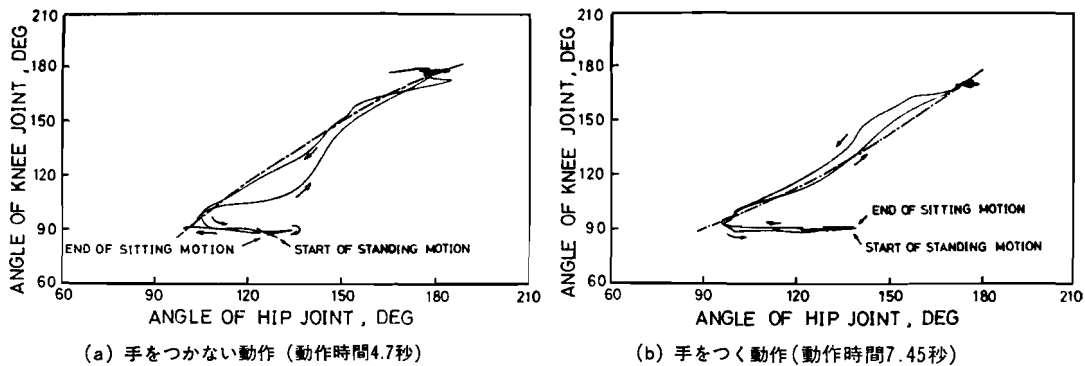
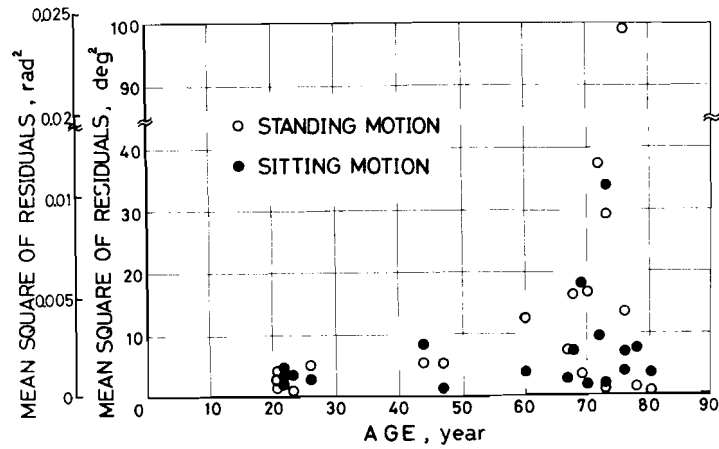


図 2.18 起立・着席動作におけるひざと腰の関節角度の相関 (年齢72歳)

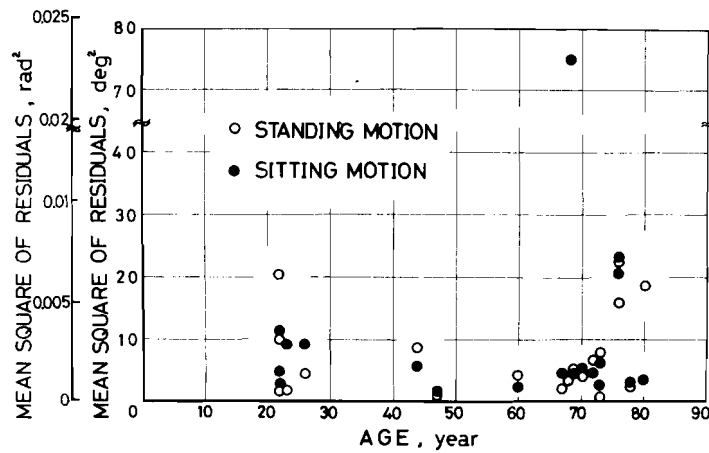
実験を行った全被験者について腰とひざの角度の相関図を求めた結果、右上がりの曲線部分について滑らかなものと凹凸が顕著であるもの、さらには大局的に見て上に凸のものと下に凸のものがあることが求められた。そこで個々の相関図の右上がりの曲線部分のみを起立動作，着席動作別に抽出し，最もよく近似する二次関数を最小二乗法により求めて相関図の特徴を数値化することを試みた。図 2.18 における一点鎖線はこのようにして求めた二次関数を示す。実験から得られた右上がりの部分の凹凸の程度を調べるため，近似した二次関数に対する残差平方の平均値 (以下 M S R 値と略記する) を求めた。また全般的な曲率の傾向を知るため近似した二次関数 $y = f(x)$ の各点における曲率半径 ρ 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，

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

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 M S R 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 M S R 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



(b) 手をつく動作

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

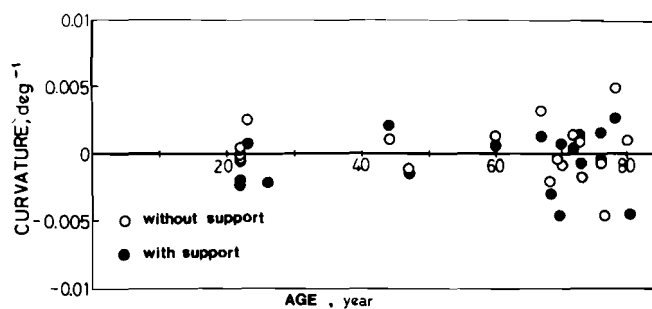
動が円滑に行われにくくなっている事を示唆しているものと考えられる。

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

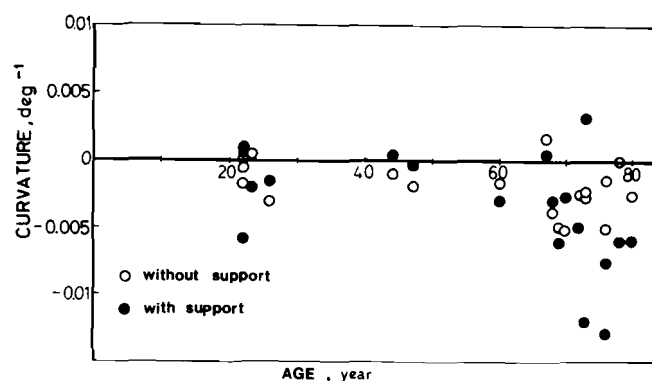
うパターンを取ることを示している。これはひざを閉じて体の重心を低くする時に、後ろへ倒れないようにするために必要な動作パターンであると考えられる。

図 2.2 1 は年齢とは関係なく、着席に要した時間と平均曲率の関係を示したものである。着席時間と平均曲率の間には強い負の相関が認められ、着席時間が長くなるほど平均曲率は負の大きな値を取り、前述した着席動作の傾向が強くなることを示している。

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



(a) 起立動作



(b) 着席動作

図 2.2 0 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

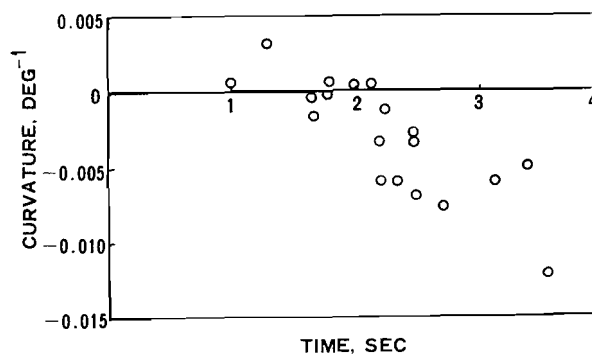
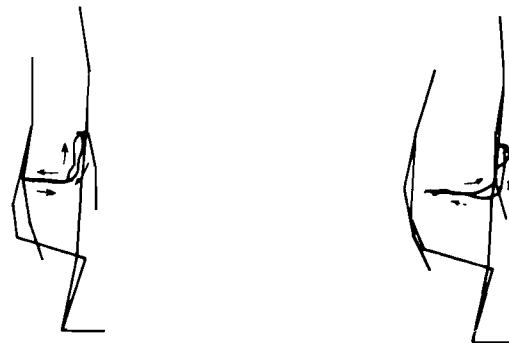


図 2.2 1 着席動作における動作時間と腰、ひざ角度相関図の平均曲率の関係

なく、両方向への移動が徐々に変化して行われるもの、③重心が斜めにはほぼ直線的に移動するものである。これらのパターンの相違は主として個人差によるものであり、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・

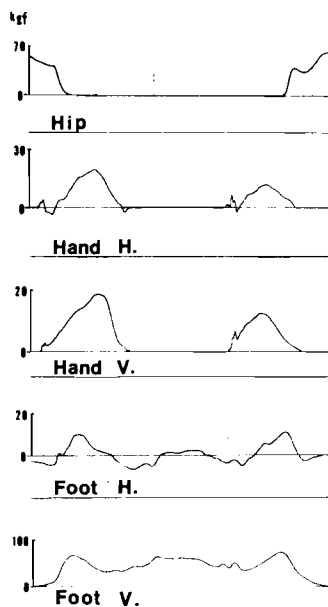


図 2.23 外力測定値 (被験者番号 13, 26歳, 動作サイクル 5回目)

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

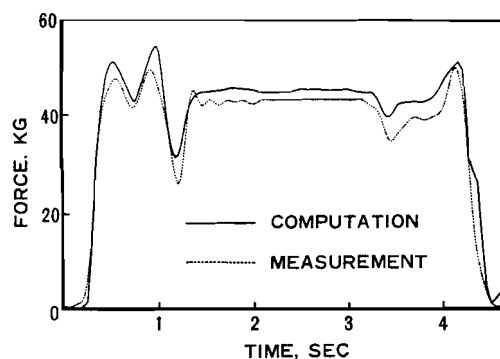
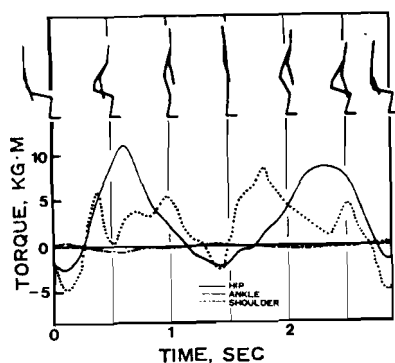


図 2.24 足にかかる垂直床反力(被験者番号 7, 年齢 72 歳)

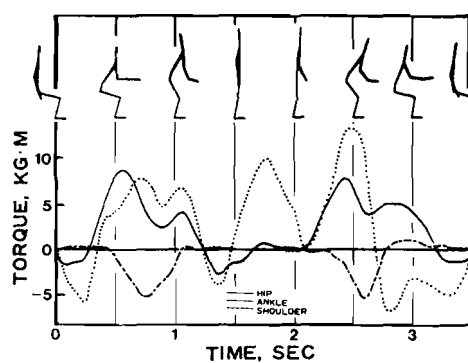
柱近似して求めた被験者の推定体重が、実測値よりも約 4%大きくなっているためと考えられる(表 2.2 被験者番号 7 番), 慣性が床反力に大きく影響を及ぼす過渡状態において、計算した床反力の変化の大きさが実測値よりも小さいところがあるのは、この部分の角変位データが必要以上に平滑化され、見かけ上角加速度が小さく評価されているためと考えられる。

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

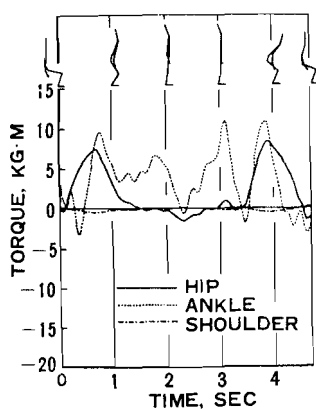
体を前傾させる場合に正の最大値をとるが、この値は手をつくことにより減少している。また肩関節まわりにトルクが作用するのに応じて、腰まわりのトルクが変化することが認められる。足首まわりのトルクは、起立時に上体を起こす場合および着席時に上体を前傾させる場合に最大値をとるが、立ち上がって静止している場合も体を支えるために若干のトルクが作用していることが認められる。



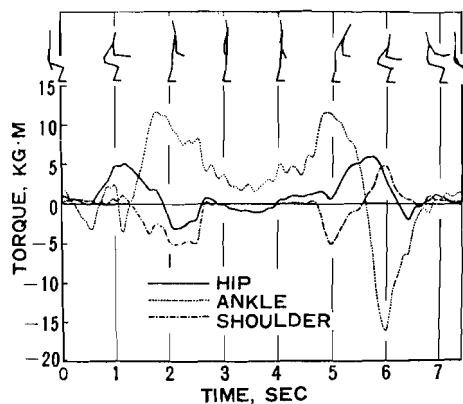
(a) 手をつかない動作
(動作時間 2.9秒, 26歳)



(b) 手をつく動作
(動作時間 3.5秒, 26歳)

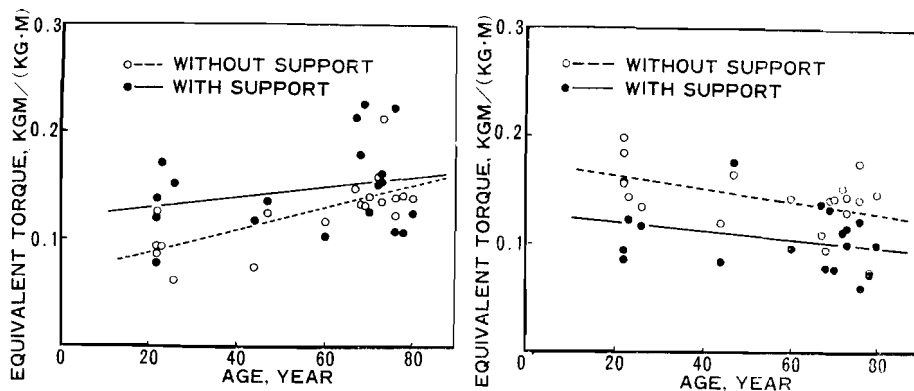


(c) 手をつかない動作
(動作時間 4.7秒, 72歳)



(d) 手をつく動作
(動作時間 7.45秒, 72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



(a) 足首に作用するトルク

(b) 腰関節に作用するトルク

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 2.26 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の意味している。

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 2.26 (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 2.27 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

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 と同様に見つけたところ、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。

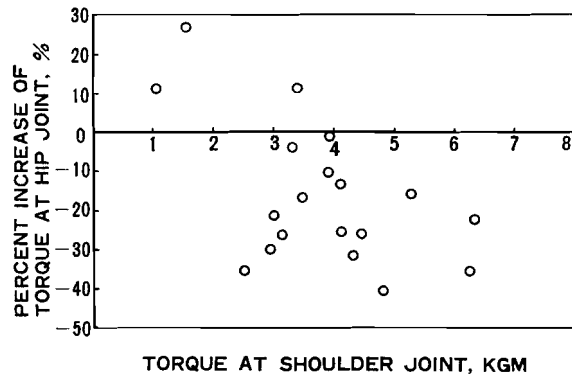


図 2.27 起立・着席動作における手をつくことの効果（肩関節まわりのトルクと腰関節まわりのトルクの増減率の関係）

また図 2.27 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、無意識のうちに目の前のテーブルや肘かけに手をつけ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え得ると仮定した。しかしながらテーブルに手をつけて起立・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 2.28 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 1.7 は要素の実長 r 、線分 1.6 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

∠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 θ_i であり, この値を求めるために 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

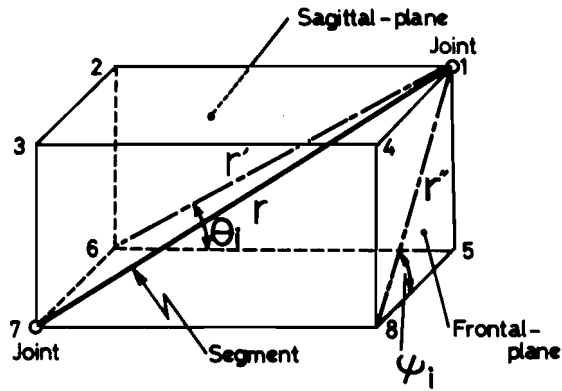


図 2.28 前額面内の動きを含む剛体要素の位置関係

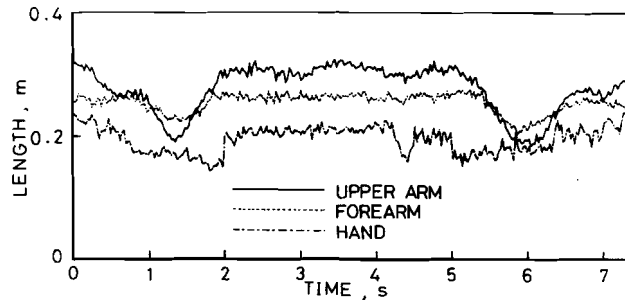
のことは, 前額面内の動きを全く含まないという仮定, すなわち $r = r'$ であるという仮定のもとに成立する。しかしながら, 図 2.28 に示すような前額面成分をもつ場合, 矢状面内に投影された長さは実長よりも短くなり ($r > r'$), $r = r'$ という仮定は成り立たない。以下に剛体要素長さの矢状面成分に対する補正と前額面成分の抽出について述べる。

(i) 矢状面成分に対する補正

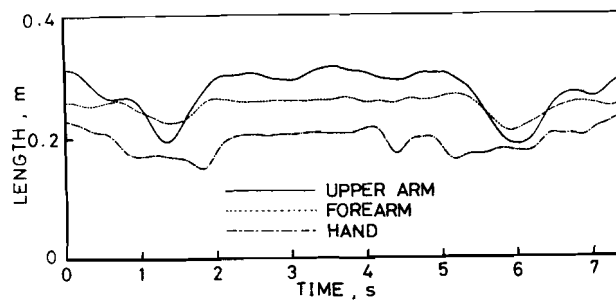
タブレットから運動情報を入力する場合に, 矢状面内投影長さ r' を入力し, r' から θ_i を求め, これらの値をファイルに格納する。運動方程式を解くにあたっては r の代わりに r' を用いて, これまで一定長としてきた矢状面内の要素長さを時間の関数として扱うことにより, 力・トルクの矢状面成分を得る。

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, 73 歳)の手をつく動作について行った。図 2.29 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 40% 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。

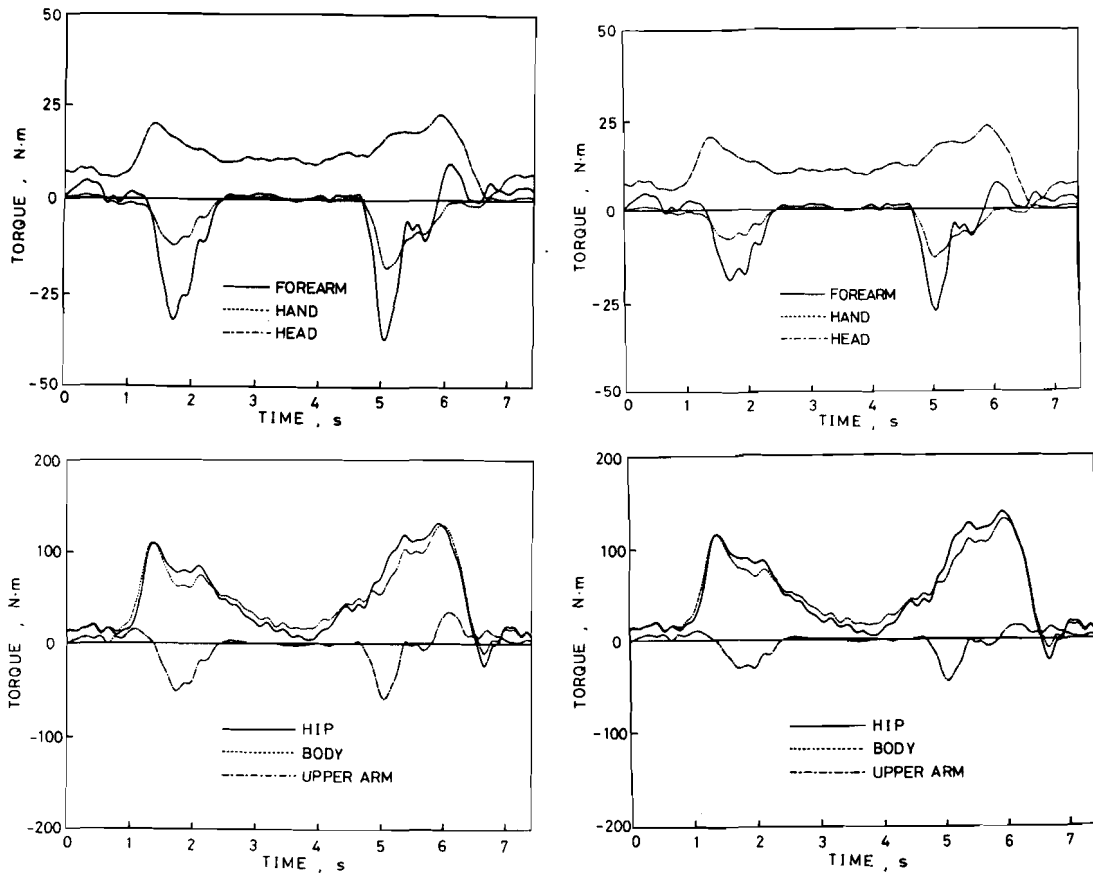
(ii) 前額面成分の抽出

図 2.28 に示した剛体要素長さ r , r' および角 θ_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 ψ_i および投影長さ r'' を以下の式で求めることができる。

$$\psi_i = \tan^{-1} (r' \sin \theta_i / \sqrt{r^2 - r'^2}) \quad \dots\dots\dots (2.40)$$

$$r'' = \sqrt{r^2 - r'^2} / \cos \psi_i \quad \dots\dots\dots (2.41)$$

ここで、剛体要素が矢状面内にある場合、角度 ψ_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 ψ_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 ψ_i は小さくなり、前額面内



(a) 二次元モデルによる補正前の各関節に作用するトルク

(b) 補正後のトルクの矢状面成分

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 2.32 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)

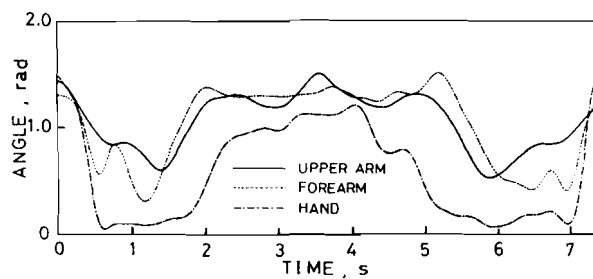
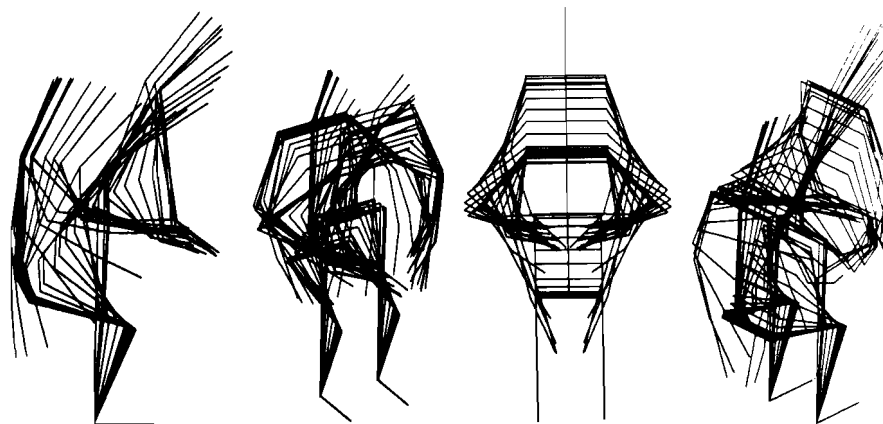


図 2.31 前額面内における上腕, 前腕, および手の角度変化



(a) 側方 (b) 右前方 (c) 前方 (d) 右後方

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15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、手をもって立ち上がり目の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1/40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22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イ上に表示して検討を加えた。図2.3.4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、一面

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のテー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

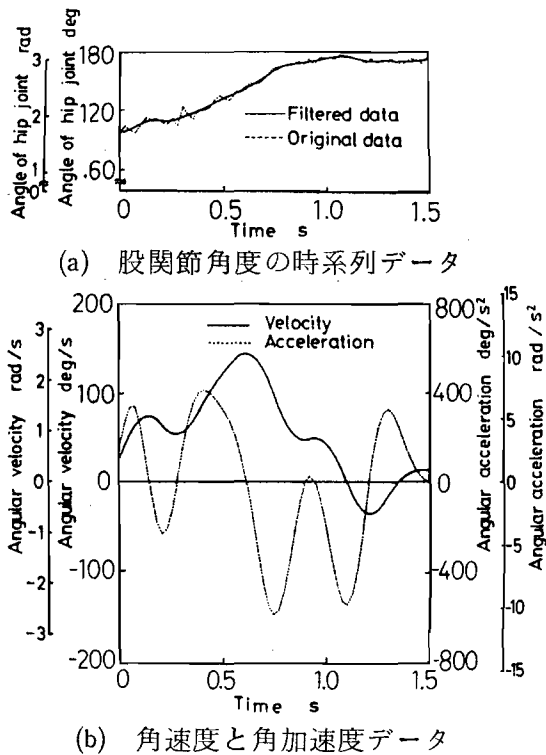


図 2.3.3 荷役作業動作に伴う角度変化の例（股関節）

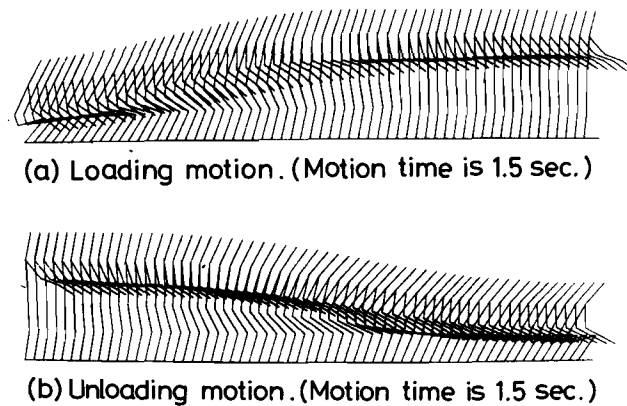


図 2.3.4 荷役作業動作パターン

化するかを検討した。図 2.3 5 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，次いで腰とひざがほ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。

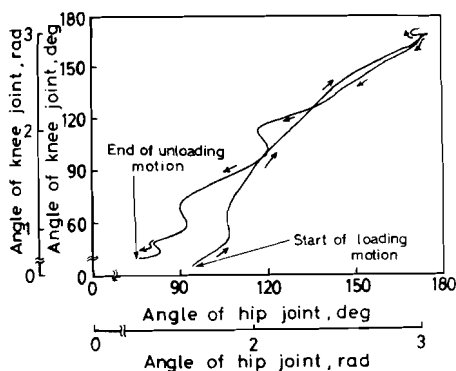


図 2.3 5 荷役作業動作における
ひざと腰の関節角度の相関

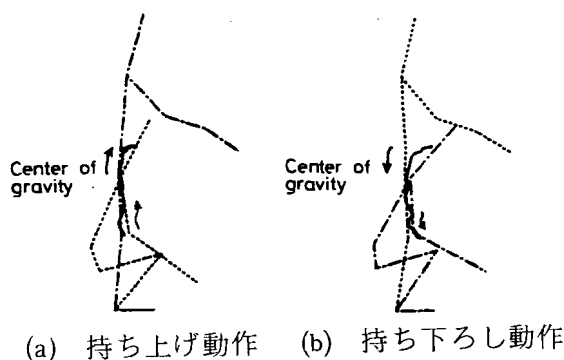


図 2.3 6 荷役作業動作に伴う
重心移動軌跡

図 2.3 6 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 2.3 4 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 2.37 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

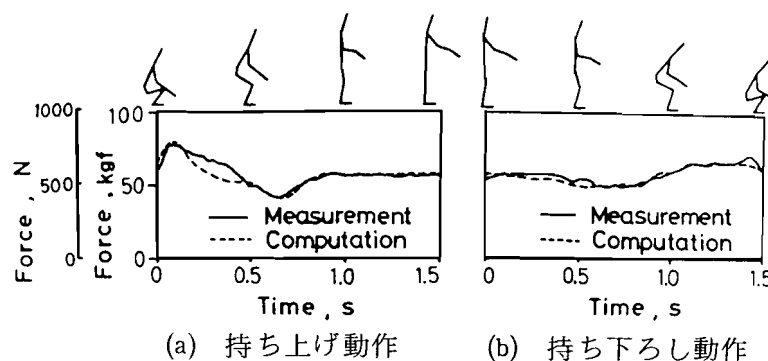


図 2.37 足にかかる垂直床反力

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，比較的良好に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。

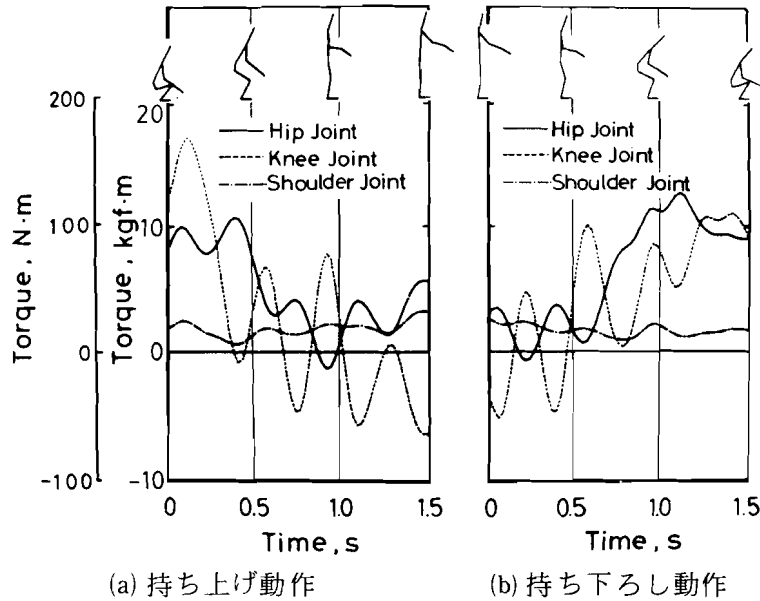


図 2.38 荷役作業動作における腰，ひざ，および肩関節まわりのトルク

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，つま先と足首のまわりのトルクは持ち上げ動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。

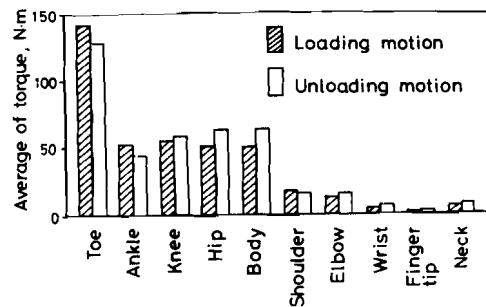


図 2.39 身体各部に作用する平均トルク

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的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

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，動作中に目の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) 目の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^{84)~89)}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 Youm⁴²⁾ や Sommer III²⁷⁾ 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 An⁸²⁾ による手の指のモデル、Chao^{26),40)} による肘関節のモデル、Rastegar⁵⁸⁾ や Hull⁹⁰⁾ 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、Passerello⁵³⁾ 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 Aleshinsky⁵⁷⁾ 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。

本章では、動力学的観点から身体全体の三次元運動動作解析を行うことを目的として、以下の三次元人体モデルを提案する。まず人体を図 3.1 に示すような 17 の要素に分割し、各要素は互いに隣接する要素に球継手で連結されているものと仮定する。図中の肩関節および股関節部における水平の

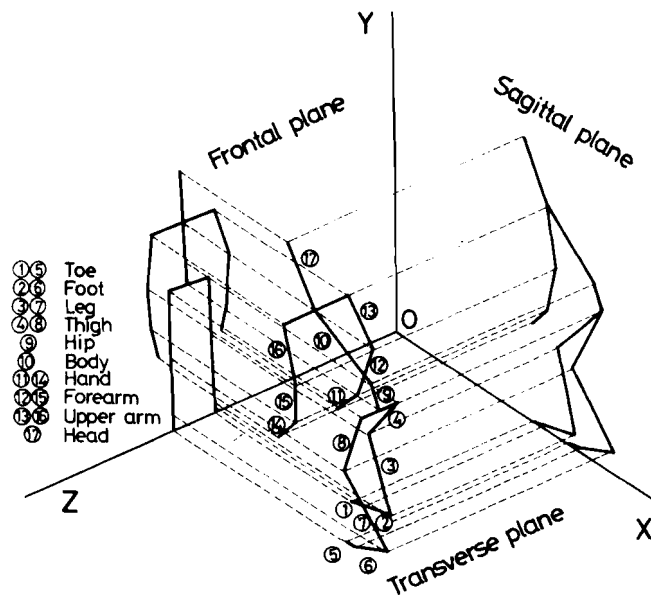


図 3.1 三次元人体モデル

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 θ, ψ, ϑ を図 3.2 に示すような静止座標系 $O-XYZ$ に対する運動座標系 $o-xyz$ 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 θ だけ回転し、次に y 軸まわりに角 ψ だけ回転し、さらに x 軸まわりに角 ϑ 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, z) に変換することができる。

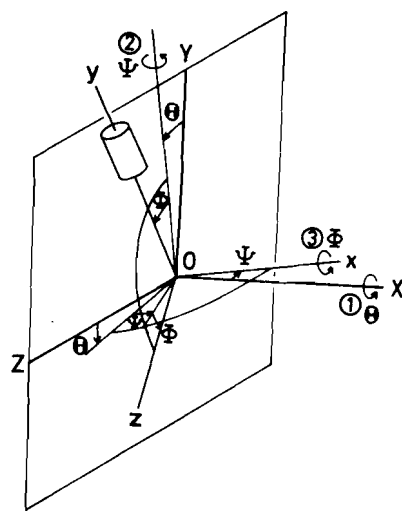


図 3.2 オイラー角の定義

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = [\vartheta][\psi][\theta] \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} \dots\dots\dots (3.1)$$

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

$$\left. \begin{aligned} [\theta] &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta & \sin\theta \\ 0 & -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \\ [\psi] &= \begin{bmatrix} \cos\psi & 0 & -\sin\psi \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\psi & 0 & \cos\psi \end{bmatrix} \\ [\vartheta] &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\vartheta & \sin\vartheta \\ 0 & -\sin\vartheta & \cos\vartheta \end{bmatrix} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3.2)$$

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。

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = [\theta]^T [\psi]^T [\phi]^T \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \dots\dots\dots (3.3)$$

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。

$$F_{i-1,i} - F_{i,i+1} - W_i j = W_i / g \cdot a_{Gi} \dots\dots\dots (3.4)$$

$$T_{i-1,i} - \ell_i \cdot \hat{r}_i \times F_{i-1,i} - T_{i,i+1} - \ell_i \cdot \hat{r}_i \times F_{i,i+1} = M_i \dots\dots (3.5)$$

ここで $F_{i-1,i}, T_{i-1,i}$ はそれぞれ各剛体要素 i の端点において隣接剛体要素 $i-1$ から作用する力およびトルクであり、 W_i, ℓ_i, \hat{r}_i はそれぞれ剛体要素 i の重量、長さの $1/2$ および方向ベクトルである。また g, a_{Gi} はそれぞれ重力の加速度および剛体重心の加速度である。 M_i は剛体要素 i に回転を引き起こす外部モーメントである。ここでは運動座標系を要素の慣性主軸の方向と一致させているため、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り求めることができる。

$$\left. \begin{aligned} M_x &= I_{xx} \dot{\omega}_x + \omega_y \omega_z (I_{zz} - I_{yy}) \\ M_y &= I_{yy} \dot{\omega}_y + \omega_z \omega_x (I_{xx} - I_{zz}) \\ M_z &= I_{zz} \dot{\omega}_z + \omega_x \omega_y (I_{yy} - I_{xx}) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3.6)$$

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。 I 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。

$$\begin{aligned} I_{xx} &= I_{zz} = W_i \{ 3(d_i/2)^2 + r_i^2 \} / 12g \dots\dots\dots (3.7) \\ I_{yy} &= W_i (d_i/2)^2 / 2g \end{aligned}$$

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。

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{pmatrix} &= [\emptyset] [\Psi] \begin{pmatrix} \dot{\theta} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} + [\emptyset] \begin{pmatrix} 0 \\ \dot{\psi} \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \dot{\emptyset} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \\ &= [\pi] \begin{pmatrix} \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \\ \dot{\emptyset} \end{pmatrix} \dots\dots\dots (3.8) \end{aligned}$$

ここで、変換行列 $[\pi]$ は次式で与えられる。

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

これより回転角加速度は以下のように展開できる。

$$\begin{pmatrix} \dot{\omega}_x \\ \dot{\omega}_y \\ \dot{\omega}_z \end{pmatrix} = \frac{d}{dt} \left\{ [\pi] \begin{pmatrix} \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \\ \dot{\emptyset} \end{pmatrix} \right\} = [\pi] \begin{pmatrix} \ddot{\theta} \\ \ddot{\psi} \\ \ddot{\emptyset} \end{pmatrix} + [\pi_1] \begin{pmatrix} \dot{\psi} & \dot{\emptyset} \\ \dot{\emptyset} & \dot{\psi} \end{pmatrix} \dots\dots (3.10)$$

ここで、変換行列 $[\pi_1]$ は次式で与えられる。

$$[\pi_1] = \begin{pmatrix} 0 & 0 & -\sin\Psi \\ -\sin\emptyset & \sin\Psi\cos\emptyset & \cos\Psi\sin\emptyset \\ -\cos\emptyset & -\sin\Psi\sin\emptyset & \cos\Psi\cos\emptyset \end{pmatrix} \dots\dots\dots (3.11)$$

以上より式(3.6)における ω 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17(頭)、剛体要素13(右上腕)、剛体要素16(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,

$$\begin{aligned} F_{i+1,i} - W_i j &= \frac{W_i}{g} a_{G_i} & \dots\dots\dots (3.12) \\ T_{i+1,i} - \ell_i \hat{r}_i \times F_{i+1,i} &= M_i \end{aligned}$$

剛体要素 12, 13 および 15, 16 に関しては,

$$\begin{aligned} F_{i+1,i} - F_{i,i-1} - W_i j &= \frac{W_i}{g} a_{G_i} & \dots\dots (3.13) \\ T_{i+1,i} - \ell_i \hat{r}_i \times F_{i+1,i} - T_{i,i-1} - \ell_i \hat{r}_i \times F_{i,i-1} &= M_i \end{aligned}$$

剛体要素 17 に関しては,

$$\begin{aligned} F_{10,17} - W_{17} j &= \frac{W_{17}}{g} a_{G_{17}} & \dots\dots\dots (3.14) \\ T_{10,17} - \ell_{17} \hat{r}_{17} \times F_{10,17} &= M_{17} \end{aligned}$$

剛体要素 10 に関しては,

$$\begin{aligned} F_{9,10} - (F_{10,17} + F_{10,13} + F_{10,16}) - W_{10} j &= \frac{W_{10}}{g} a_{G_{10}} \\ T_{9,10} - \ell_{10} \hat{r}_{10} \times F_{9,10} - (T_{10,17} + T_{10,13} + T_{10,16}) & \dots\dots (3.15) \\ - \ell_{10} \hat{r}_{10} \times (F_{10,17} + F_{10,13} + F_{10,16}) &= M_{10} \end{aligned}$$

剛体要素 9 に関しては,

$$\begin{aligned} F_{tu} - F_{9,10} - W_9 j &= \frac{W_9}{g} a_{G_9} & \dots\dots\dots (3.16) \\ T_{tu} - \ell_9 \hat{r}_9 \times F_{tu} - T_{9,10} - \ell_9 \hat{r}_9 \times F_{9,10} &= M_9 \end{aligned}$$

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,

$$\begin{aligned}
F_{mR} - F_{1,2} - W_1 j &= \frac{W_1}{g} a_{G_1} & \dots\dots\dots (3.17) \\
T_{mR} - \ell_1 \hat{r}_1 \times F_{mR} - T_{1,2} - \ell_1 \hat{r}_1 \times F_{1,2} &= M_1
\end{aligned}$$

剛体要素 5 に関しては,

$$\begin{aligned}
F_{mL} - F_{5,6} - W_5 j &= \frac{W_5}{g} a_{G_5} & \dots\dots\dots (3.18) \\
T_{mL} - \ell_5 \hat{r}_5 \times F_{mL} - T_{5,6} - \ell_5 \hat{r}_5 \times F_{5,6} &= M_5
\end{aligned}$$

剛体要素 2, 3 および 6, 7 に関しては,

$$\begin{aligned}
F_{i-1,i} - F_{i,i+1} - W_i j &= \frac{W_i}{g} a_{G_i} & (3.19) \\
T_{i-1,i} - \ell_i \hat{r}_i \times F_{i-1,i} - T_{i,i+1} - \ell_i \hat{r}_i \times F_{i,i+1} &= M_i
\end{aligned}$$

剛体要素 4 に関しては,

$$\begin{aligned}
F_{3,4} - F_R - W_4 j &= \frac{W_4}{g} a_{G_4} & \dots\dots\dots (3.20) \\
T_{3,4} - \ell_4 \hat{r}_4 \times F_{3,4} - T_R - \ell_4 \hat{r}_4 \times F_R &= M_4
\end{aligned}$$

剛体要素 8 に関しては,

$$\begin{aligned}
F_{7,8} - F_L - W_8 j &= \frac{W_8}{g} a_{G_8} & \dots\dots\dots (3.21) \\
T_{7,8} - \ell_8 \hat{r}_8 \times F_{7,8} - T_L - \ell_8 \hat{r}_8 \times F_L &= M_8
\end{aligned}$$

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。Chao²⁶⁾ 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、Aleshinsky⁵⁷⁾、Andriacchi⁹¹⁾ 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 Erdman⁴³⁾ は一台のシネカメラ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

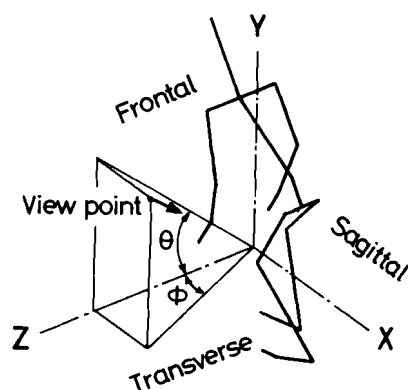


図 3.3 動作パターンの三次元表示と視点の関係

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。

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

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φ, 上下方向にθ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, ..., 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。

$$\left. \begin{aligned} X_{G_i} &= \frac{\sum_{i=1}^{17} W_i x_{G_i}}{\sum_{i=1}^{17} W_i} \\ Y_{G_i} &= \frac{\sum_{i=1}^{17} W_i y_{G_i}}{\sum_{i=1}^{17} W_i} \\ Z_{G_i} &= \frac{\sum_{i=1}^{17} W_i z_{G_i}}{\sum_{i=1}^{17} W_i} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3.23)$$

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、

$$x = y \times z \quad \dots\dots\dots (3.24)$$

ここで、 $|x| = |y| = |z| = 1$ 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

座標系における任意の単位ベクトルを $P = (p_1, p_2, p_3)$ とすれば、 P を軸として反時計回りに λ 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。⁹⁶⁾

$$[R_\lambda, P] = \begin{bmatrix} p_1^2 v\lambda + c\lambda & p_1 p_2 v\lambda - p_3 s\lambda & p_1 p_3 v\lambda + p_2 s\lambda \\ p_1 p_2 v\lambda + p_3 s\lambda & p_2^2 v\lambda + c\lambda & p_2 p_3 v\lambda - p_1 s\lambda \\ p_1 p_3 v\lambda - p_2 s\lambda & p_2 p_3 v\lambda + p_1 s\lambda & p_3^2 v\lambda + c\lambda \end{bmatrix} \quad (3.25)$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{ここで、} \quad v\lambda = 1 - \cos \lambda \\ \quad \quad \quad s\lambda = \sin \lambda \\ \quad \quad \quad c\lambda = \cos \lambda \end{array} \right\} \dots\dots\dots (3.26)$$

である。オイラー角の定義より、 y 軸を x 軸まわりに $-\theta$ 回転すれば、 y 軸は YZ 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 0 である。すなわち、

$$y' = [R_{-\theta}, x] y \quad \dots\dots\dots (3.27)$$

において X 成分を 0 とおくと

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

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

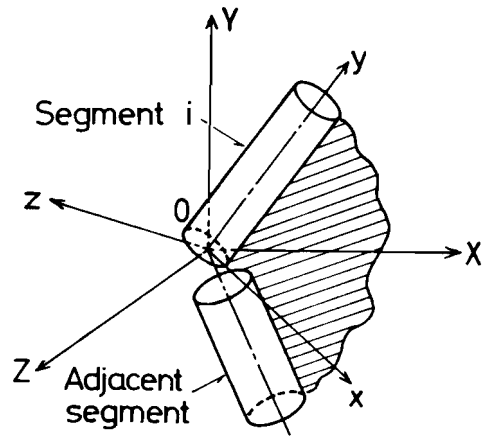


図 3.4 静止座標系と剛体に固定された運動座標系の関係

$$x' = [R_{-\psi}, y'] x \quad \dots\dots\dots (3.29)$$

において Y 成分を 0 とおくと

$$\psi = \cos^{-1} x_1 \quad \dots\dots\dots (3.30)$$

が得られる。さらに、y' 軸を x' 軸まわりに $-\theta$ 回転すれば、y' 軸は Y 軸と一致する。従って

$$y'' = [R_{-\theta}, x'] y' \quad \dots\dots\dots (3.31)$$

において Z 成分を 0 とおくと

$$\theta = \tan^{-1} \left(-\frac{x_2}{x_3} \right) \quad \dots\dots\dots (3.32)$$

が得られる。

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、実物を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)~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 0.5 mm 幅のホログラムに変換し、1 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。

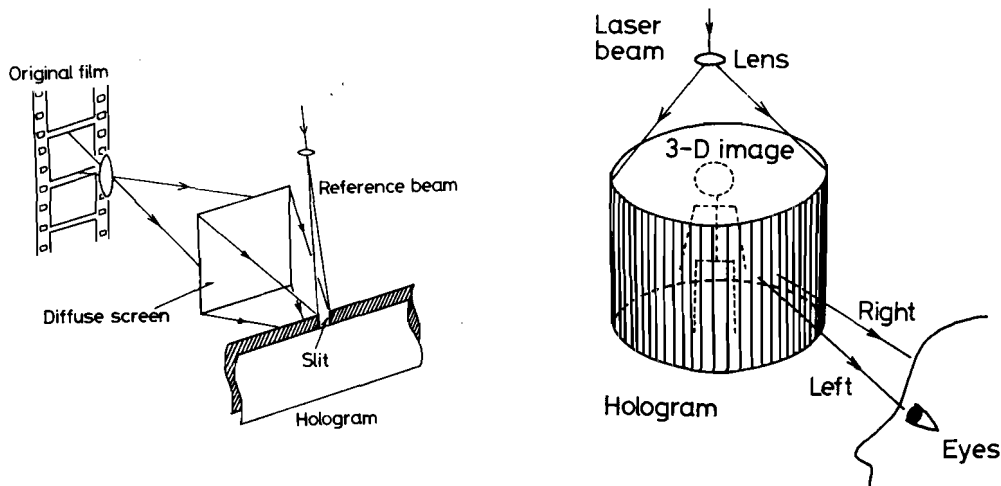


図 3.5 ホログラフィック・ステレオ
グラムの作製原理

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事が可能となる。

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⁹¹⁾。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。図には二台のカメラ

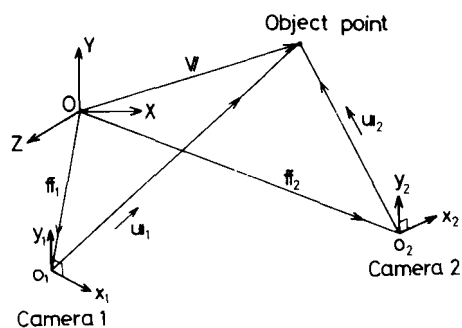


図 3.7 二台のカメラと物体点の
位置関係

カ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 f_1, 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 u_1, u_2 とすれば, 物体点の位置ベクトル v_1, v_2 は以下の式で与えられる。

$$v_1 = f_1 + a_1 u_1 \quad \dots\dots\dots (3.33)$$

$$v_2 = f_2 + a_2 u_2 \quad \dots\dots\dots (3.34)$$

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,

$$e = v_1 - v_2 = f_1 - f_2 + a_1 u_1 - a_2 u_2 \quad \dots\dots\dots (3.35)$$

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,

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

ここで E は以下の場合に最小となる。すなわち

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial E}{\partial a_1} &= a_1 - u_1 \cdot (f_2 - f_1) - a_2 u_1 u_2 = 0 \\ \frac{\partial E}{\partial a_2} &= a_2 + u_2 \cdot (f_2 - f_1) - a_1 u_1 u_2 = 0 \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (3.37)$$

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 は以下のよう求められる。

$$\left. \begin{aligned} a_1 &= \frac{u_1 \cdot (f_2 - f_1) - \{u_2 \cdot (f_2 - f_1)\} (u_1 \cdot u_2)}{1 - (u_1 \cdot u_2)^2} \\ a_2 &= \frac{\{u_1 \cdot (f_2 - f_1)\} (u_1 \cdot u_2) - u_2 \cdot (f_2 - f_1)}{1 - (u_1 \cdot u_2)^2} \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (3.38)$$

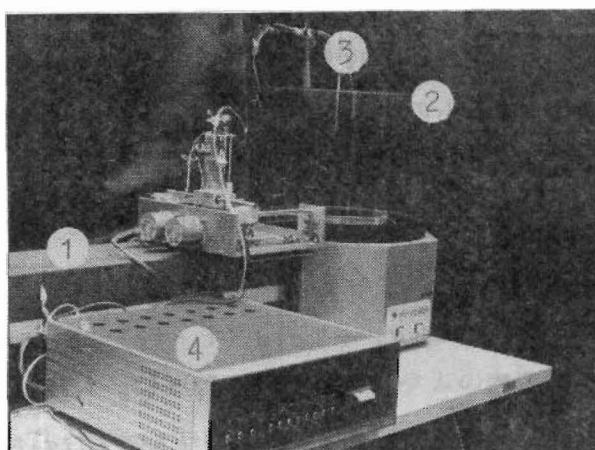
これより, 物体点の三次元座標は最終的に以下の式で与えられる。

$$v = (v_1 + v_2) / 2 \quad \dots\dots\dots (3.39)$$

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50mW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40cm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ーによって、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。



- ① 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^{84)~89)}並びに垂直跳び動作を取り上げ、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、床と目の前のテーブル(高さ 0.75 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 kg である。動作回数は 70 回で、1 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、目の前の床の上にある荷物に手を届かせるまでの時間が 1 秒、荷物を持ち上げてテーブルに置くまでの時間が 2 秒、荷物から手を離して直立姿勢に至るまでの時間が 1 秒である。

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0.97m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

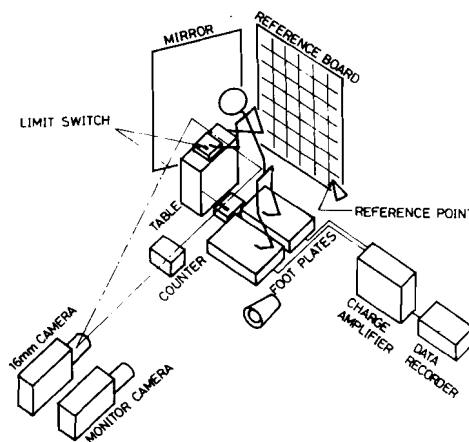


図4.1 実験装置の概要

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。円錐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

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TV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4.2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

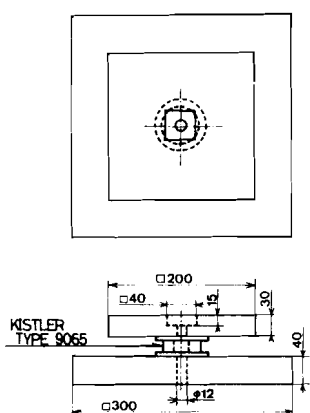


図4.2 テーブル反力測定用荷重計

置いた瞬間あるいは荷物を持ち上げた瞬間の時間を知るため、リミットスイッチを用いてライトを点滅させている。写真撮影にはカラーのポジフィルムを使用し、こま送り速度を毎秒4.5.8こまとしている。なお、外力の測定データと画像情報の同期を取る方法並びに被験者の服装、標点の位置などは基本的に2章における二次元解析の場合と同様である。

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、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4.3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/cm^3 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

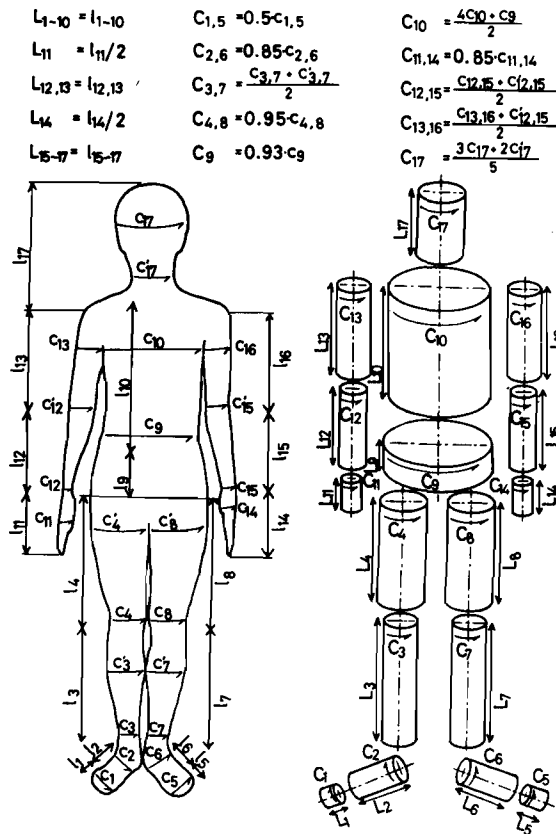


図 4.3 身体各部の測定箇所と身体各要素の形状

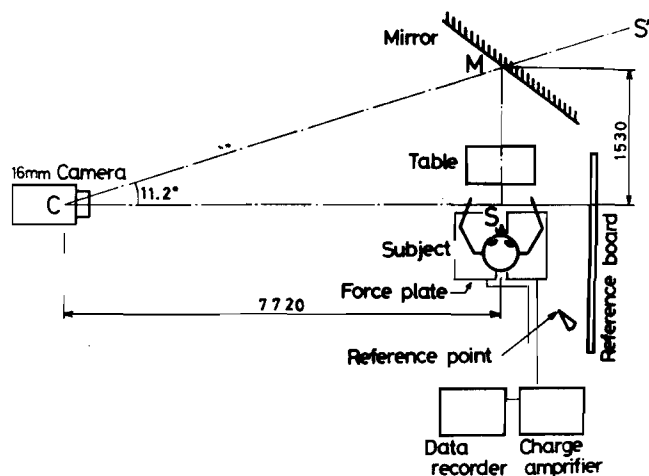


図 4.4 実験配置図

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

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

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。

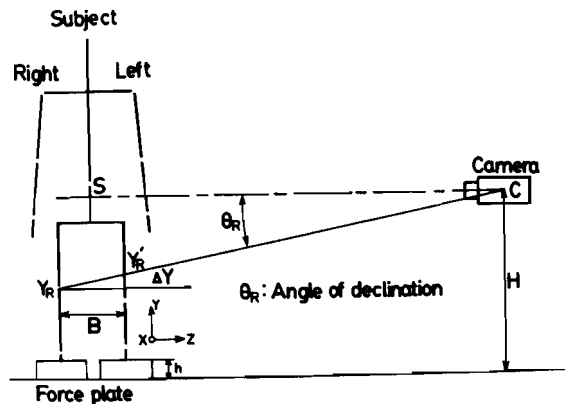


図 4. 5 俯角と測定誤差の関係

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 ΔY を以下の式で求めることによって補正を行う。すなわち、

$$\begin{aligned} \Delta Y &= B \tan \theta_R \\ &= B(H - h - Y'_R) / (CS - \frac{1}{2}B) \quad \dots\dots\dots (4.2) \end{aligned}$$

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 (m)	Length (m)	Weight (N(kgf))		Inertia Tensor (kgm ²)	
			Estimation	Measurement	Jxx, Jzz	Jyy *10 ⁻⁴
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 (Years)	Height (m)	Weight (N(kgf))		Error (%)
			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

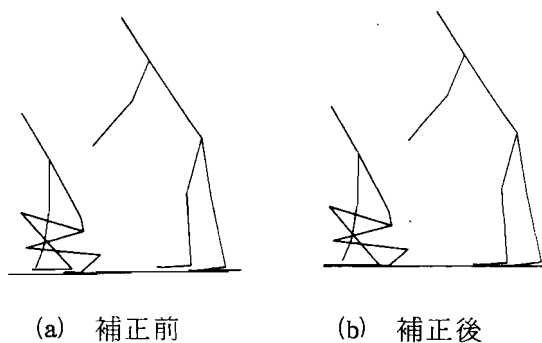


図 4.6 矢状面内における右足の誤差の補正

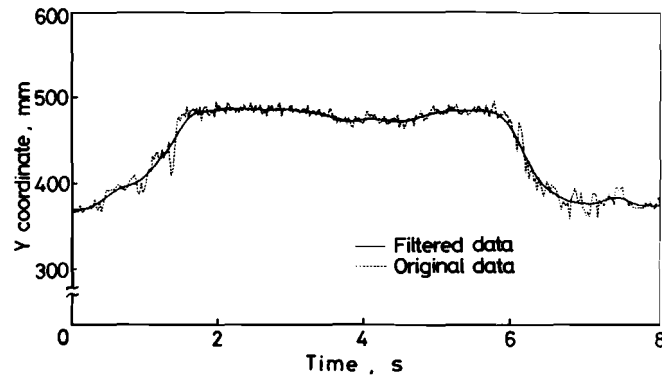


図 4.7 原データとデジタルフィルタリング処理を施したデータ
(右ひざ, Y座標値, 42歳)

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值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オイラー角を求めた結果のうち、1例として右大腿におけるオイラー角の時間的変化を図4.9(a)に示す。各時刻におけるこれらの値を用いて静止座標系と運動座標系間の変換を容易に行うことができる。スプライン関数による補間を利用して、図(a)における角 ψ の一階および二階微分を求めた結果を図(b)に示す。運動方程式を解く場合には、これらの値を用いている。

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70回の動作のうち表4.3に示す回数 of 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

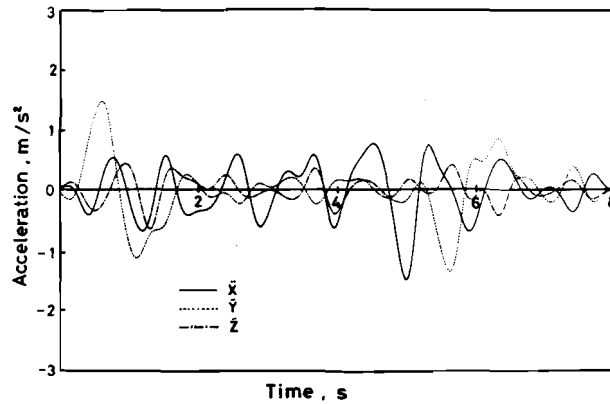
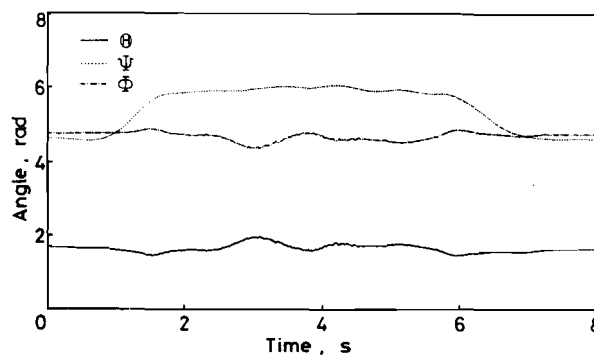
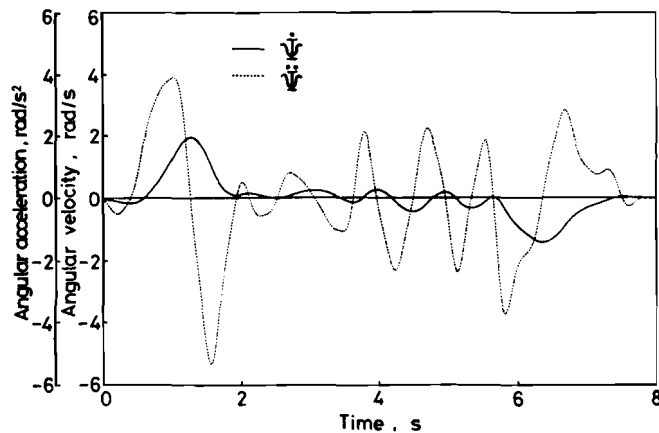


図4.8 剛体重心の加速度の例
(右大腿, 23歳)



(a) 右大腿のオイラー角



(b) 角 ψ 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)

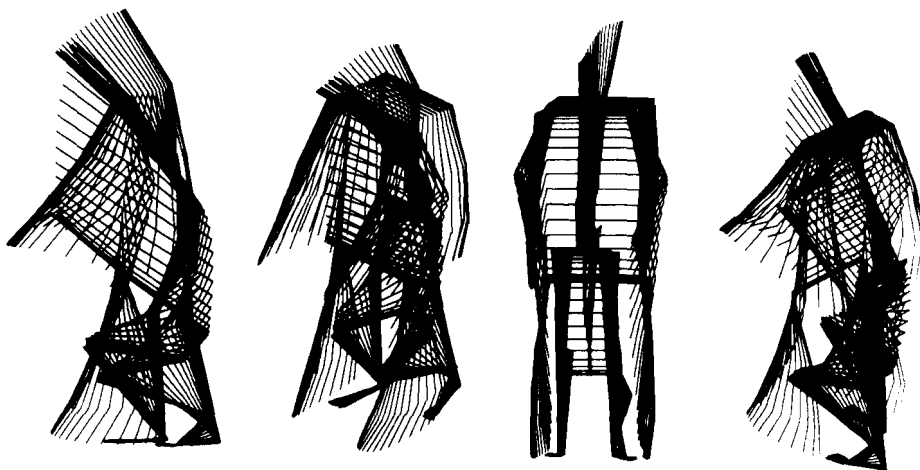
格線図の形で荷役作業動作を再現し、グラフィック・ディスプレイ上に表示して検討を加えた。図 4.10 は軸測投影法により違った視点から荷役作業動作を再生表示した例である。ここでは、足元の荷物を持ち上げ、目の前のテーブルに荷物を置くまでのパターンを同じ位置に重ね描きして示している。図には、3.2.2 節で

表 4.3 解析を行った動作回数

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きている。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だけでなく、動作パターンの詳細な解析を行うことができる。

また、図 4.11 は動作パターンの時間的変化を示すため、0.22 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

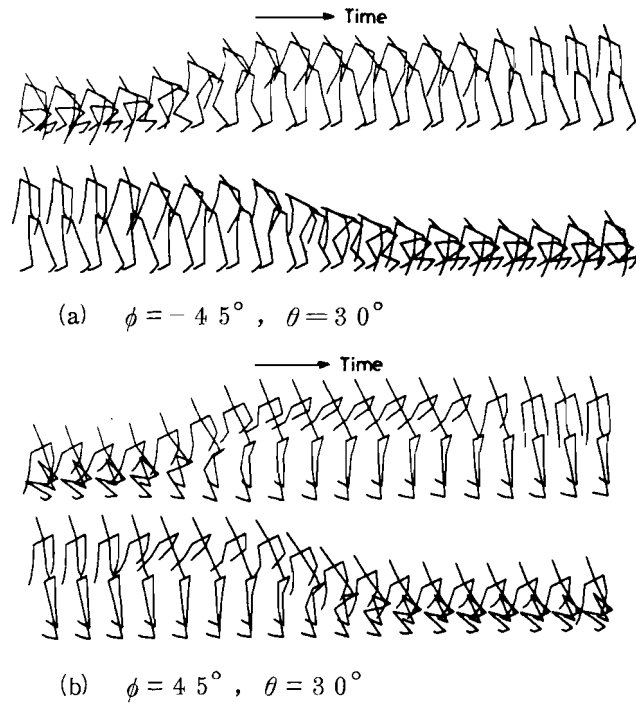


図 4.11 荷役動作パターンの時間変化
(動作サイクル1回目, 23歳)

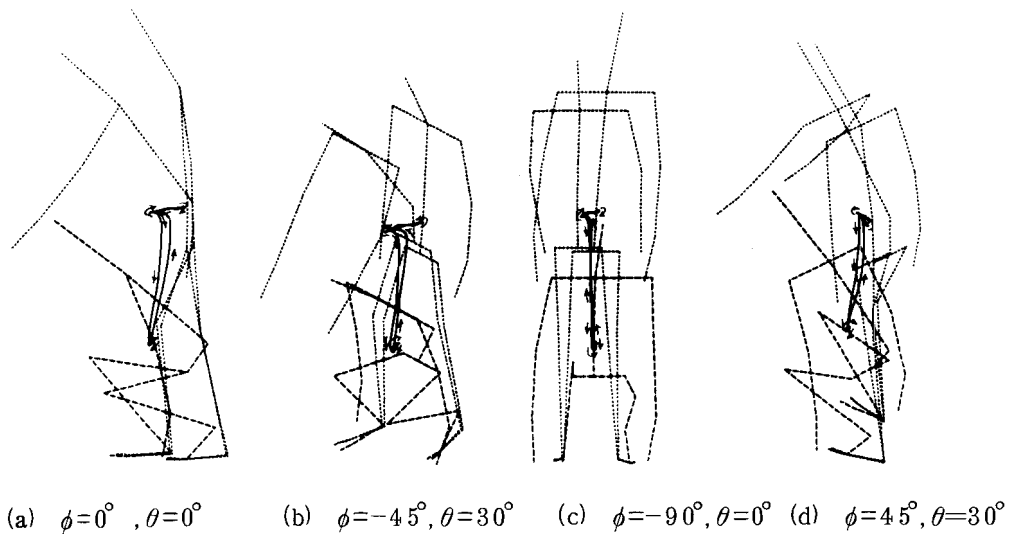


図 4.12 重心移動軌跡 (年齢 41歳)

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 4.1 3 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

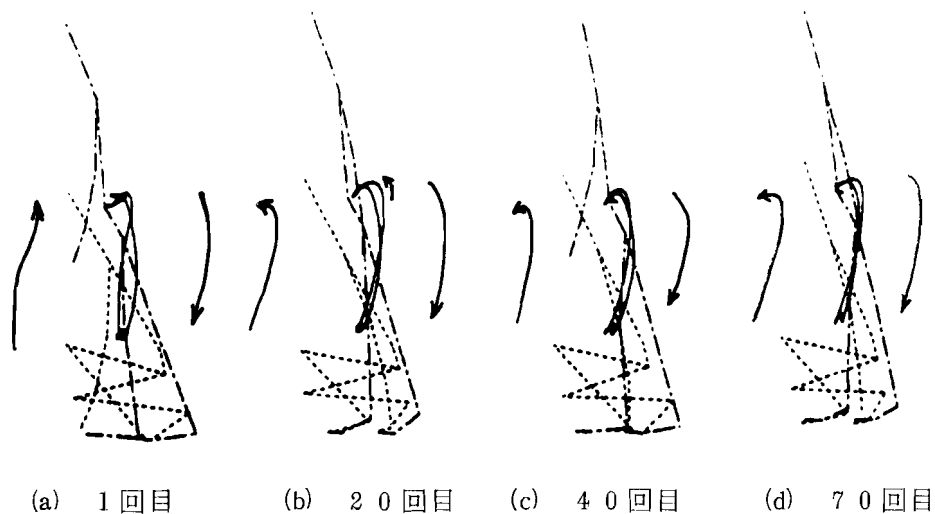


図 4.1 3 重心移動軌跡の動作回数による変化
(年齢 23 歳)

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、目の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向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き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

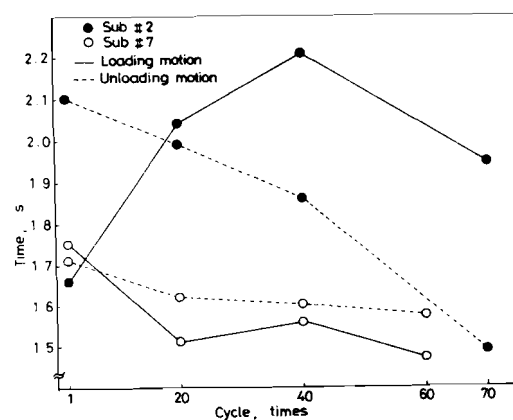


図4.14 荷物の持ち上げ持ち下ろしに要する時間と動作回数の関係

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りとうとする意識の現われであると考えられる。図 4.15 は動作中における荷物と頭頂の絶対速度

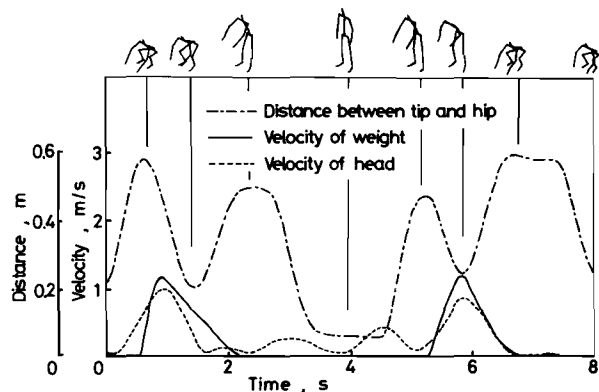


図 4.15 荷物と頭頂の絶対速度および指先と腰の間の距離の時間変化の例(被験者年齢 53 歳)

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、手と頭の関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。

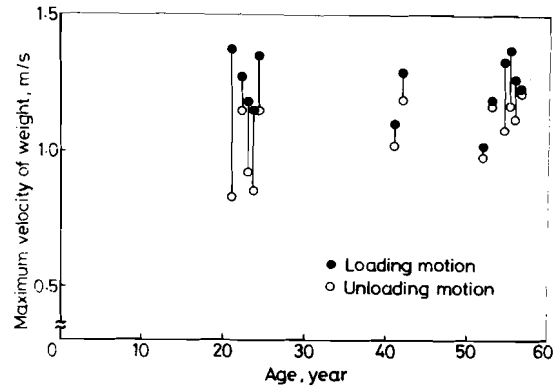


図 4.16 荷物の最大速度

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

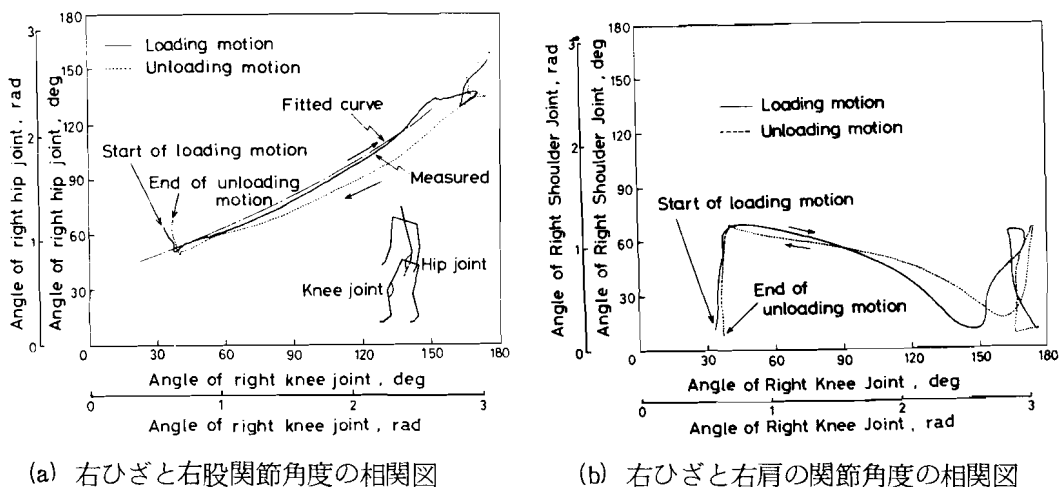


図 4.17 関節角の相関図

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 4.17(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、ここでは近似二次曲線のMSR値と平均曲率を求めた。図

4.18は全被験者についてひざと腰角度の相関図における曲率を求めた結果である。こ

れよりほとんどの被験者の曲率が正、すなわち図 4.17(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

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典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

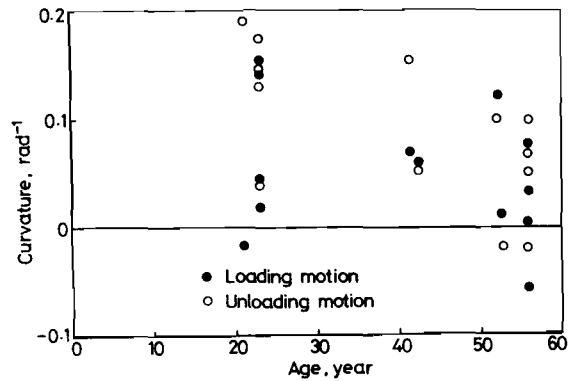


図 4.18 ひざと腰角度の相関図にあてはめた二次関数の平均曲率

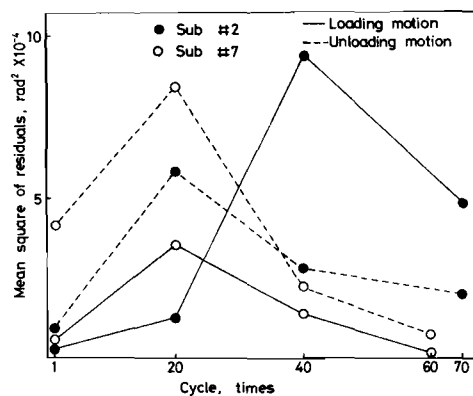


図 4.19 ひざと腰角度の相関図における動作の滑らかさと動作回数の関係

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 4.20 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良好に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 4.20(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 4.21 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 4.22 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 4.22(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 T_z 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。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

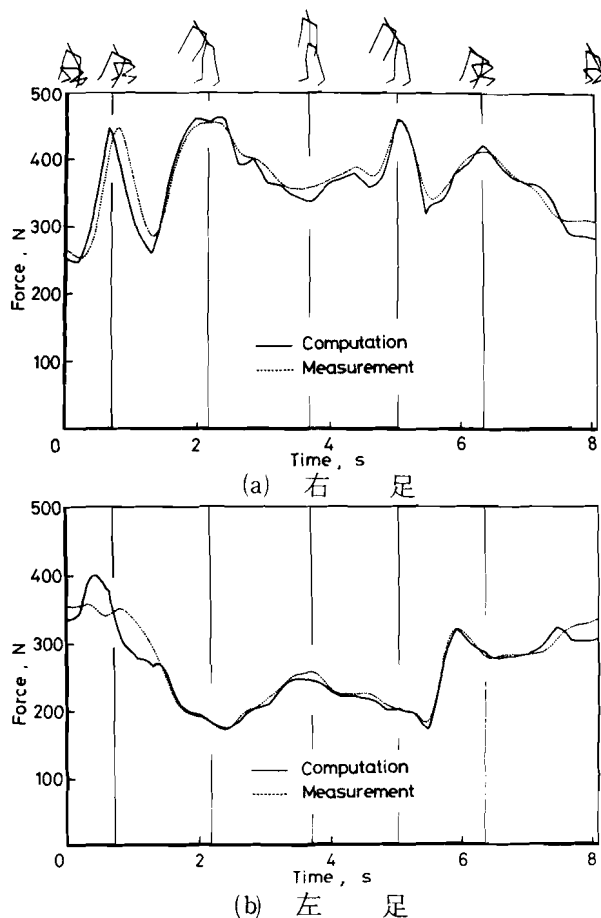


図 4.20 足に作用する垂直床反力
(動作サイクル1回目, 23歳)

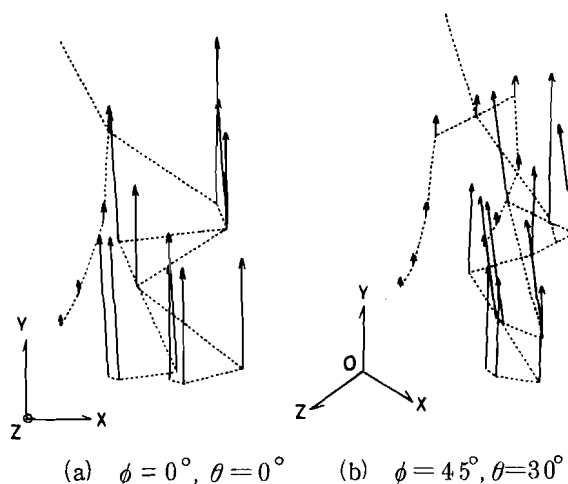
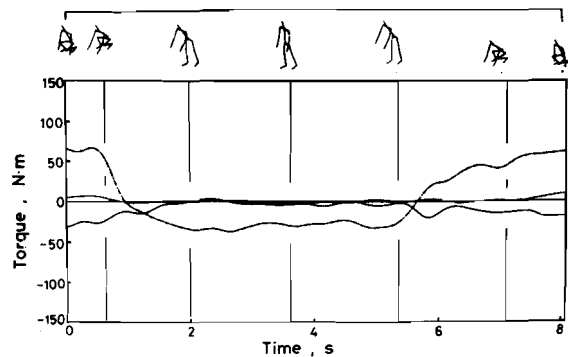
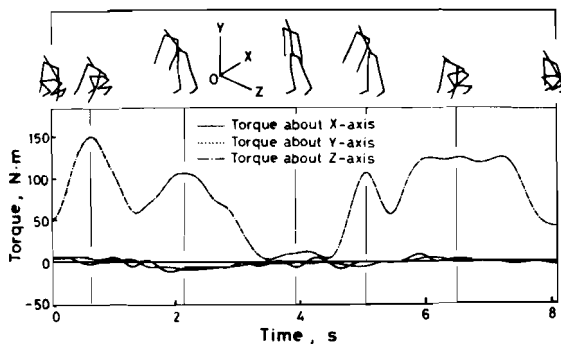


図 4.21 持ち上げ動作における身体各部の作用ベクトル

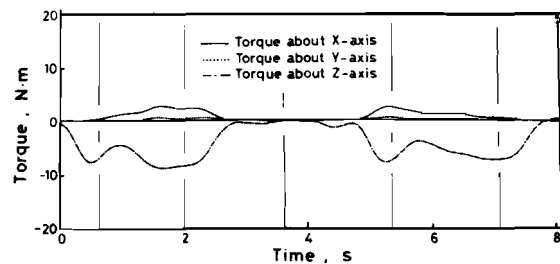
とを示唆している。これより右足の疲労度は左足に比べて大きいであろうと予想される。図 4.2.2 (d) は右肘関節まわりのトルクを示している。ここで T_X の符号は左右の開きを閉じようとする方向に作用する場合を正とし、 T_Z の符号は肘関節を閉じようとする方向に作用する場合を負としている。これより実際に荷物をかかえている時点で Z 軸まわりおよび X 軸まわりのトルクが作用していることがわかる。特に X 軸まわりのトルクは肘の左右への開きによって生じるものであり、ここでも三次元的な動作が無視できないことがわかる。図 4.2.2 (e) は右肩関節まわりのトルクを



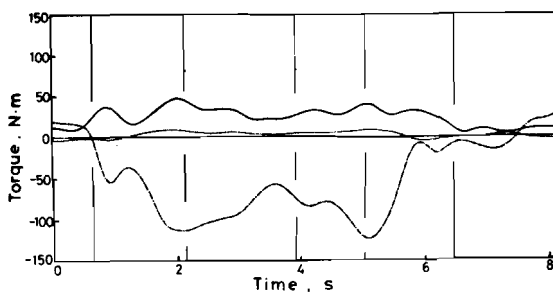
(c) 左ひざ関節まわりのトルク



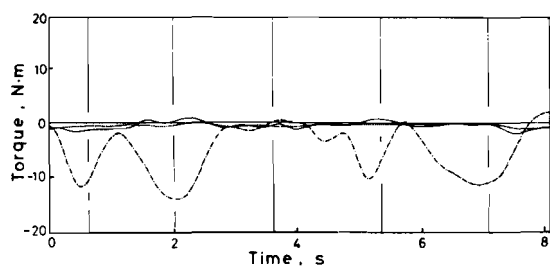
(a) 腰関節まわりのトルク



(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 4.2.2 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 4.2.3 は被験者 2 番 (23 歳) と 7 番 (56 歳) について求めた腰まわり

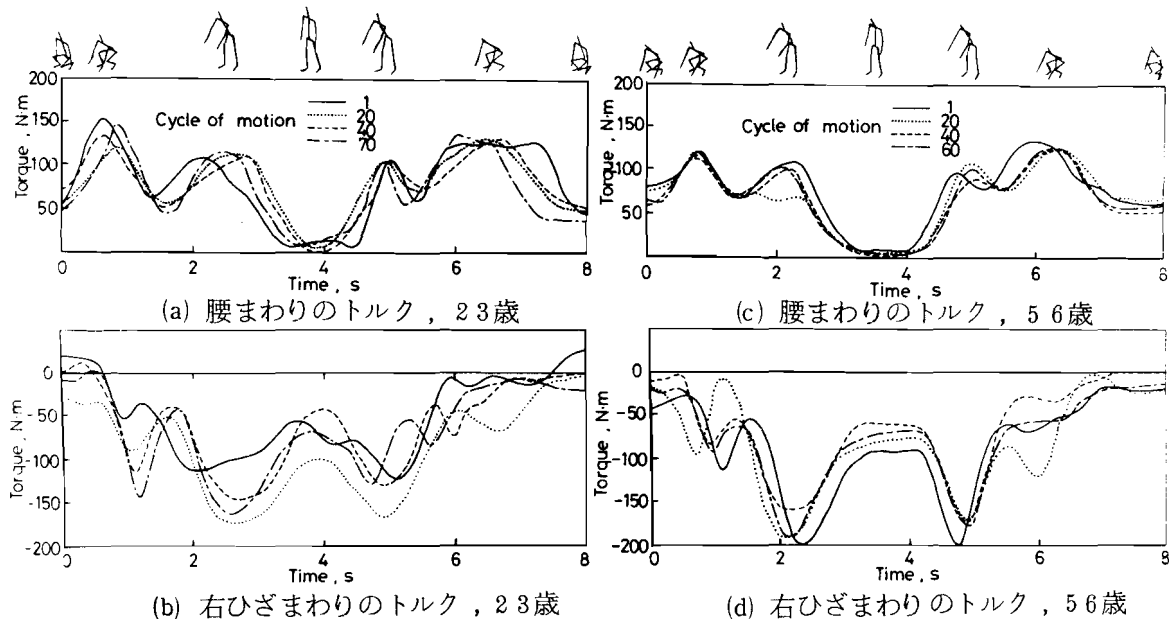


図 4.2.3 腰および右ひざまわりの矢状面内トルク

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り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 4.2.3 (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り返している。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られる。

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。

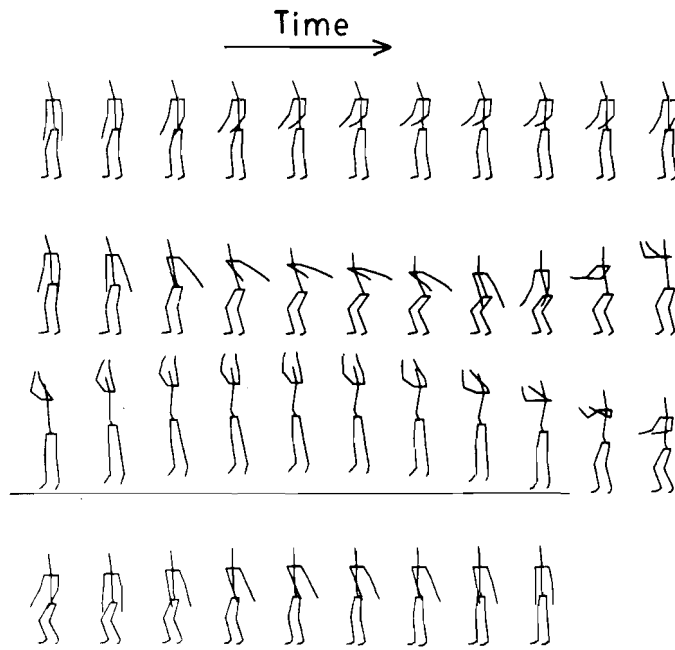
画像情報より得られた身体各部の三次元座標値を基に骨格線図の形で垂直跳び動作を再現し、グラフィック・ディスプレイ上に表示して検討を加えた。図4.24は動作パターンの時間的変化を骨格線図としてCRT上に再生表示した例である。同図(a), (b)はそれぞれ1番(21歳)および5番(53歳)の被験者の動作パターンを示している。いずれも図の左から右の方へ時間が経過しているが、各パターンの時間間隔は(a)の場合0.07秒、(b)の場合0.04秒である。図(a)より垂直跳び動作では、ひざと腰の屈曲および腕の後方への振り上げ(反動動作)に始まり、これらの動作量が最大に達した時点から、ひざと腰の伸展および腕の前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53歳の被験者は21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39.71cm, 53歳の被験者27.14cm)に直接影響しているものと考えられる。

表 4.4 被験者番号と年齢の対応表
(垂直跳び実験)

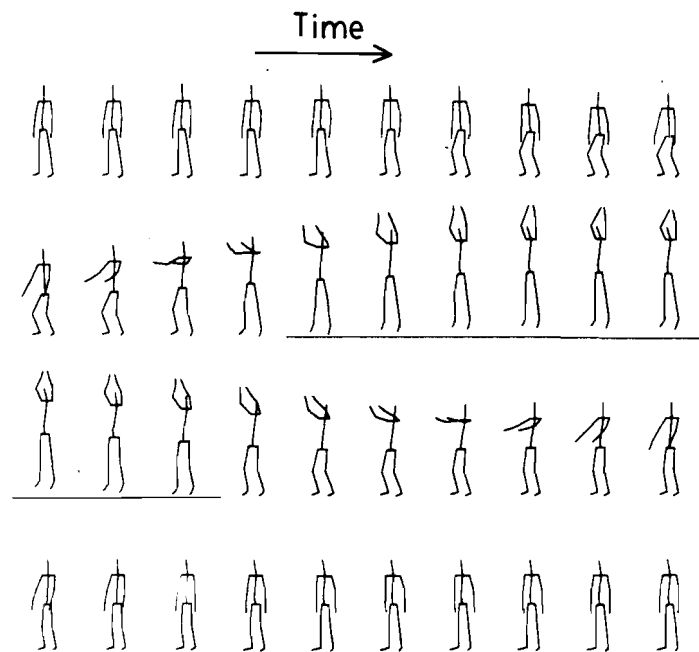
Subject No.	Age
1	21
2	23
3	42
4	52
5	53
6	56

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 53 歳 ; 跳躍量 27.14 cm

図 4.24 垂直跳び動作パターン

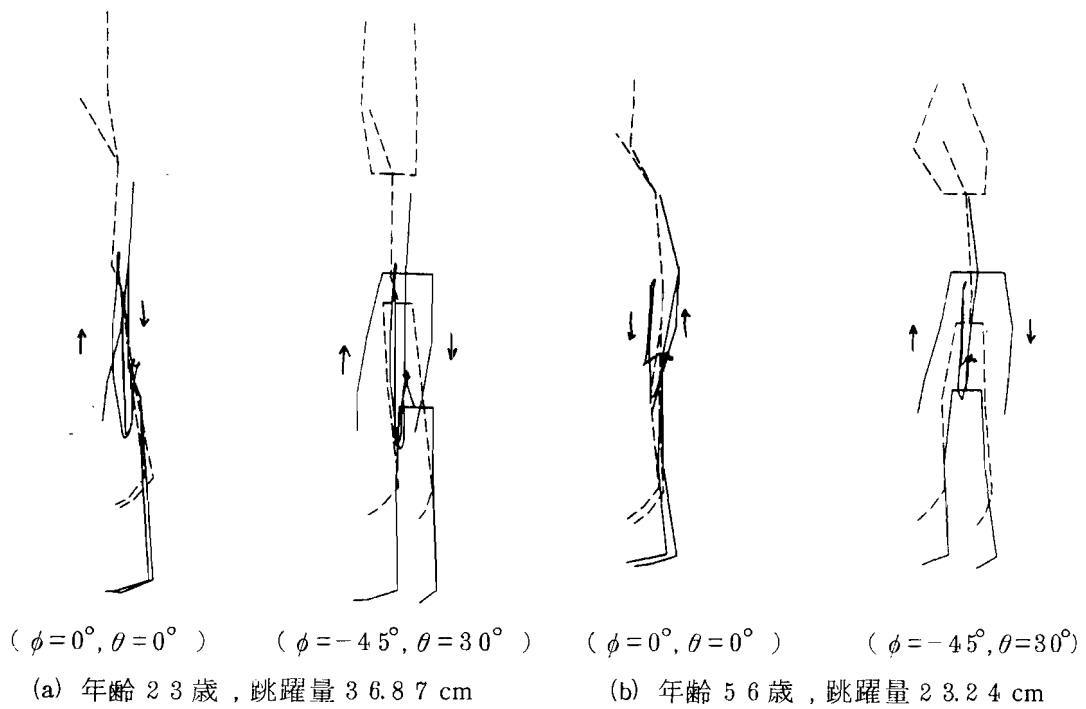


図 4.25 垂直跳び動作に伴う身体の重心移動軌跡

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

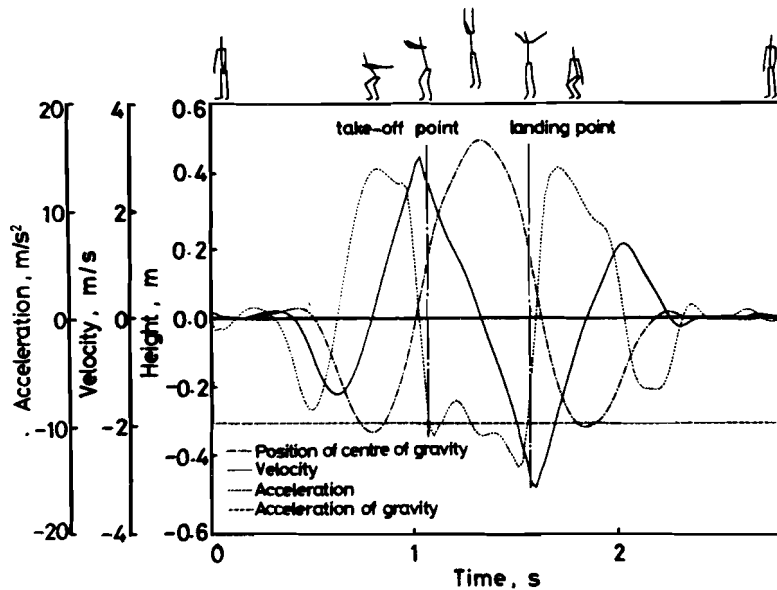


図 4.26 身体重心位置の時間変化の例 (年齢 23 歳)

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，身体各部分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（ $g = 9.80665 \text{ m/s}^2$ ）に対して若干

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^2
1	10.164
2	9.776
3	10.493
4	11.042
5	10.100
6	9.559
mean	10.888

大きいものの，理論値に比較的良好に一致しており，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

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

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

$$t = \frac{v_{G_0}}{g} \quad \dots\dots\dots (4.4)$$

となる。これより $h(t)$ の最大値は以下の式で与えられる。

$$\begin{aligned} h_{max} &= \frac{v_{G_0}^2}{g} - \frac{1}{2} g \left(\frac{v_{G_0}}{g} \right)^2 \\ &= \frac{v_{G_0}^2}{2g} \quad \dots\dots\dots (4.5) \end{aligned}$$

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良好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 No.	Age	Measured cm	Calculated 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 error		2.56cm(8.48%)	

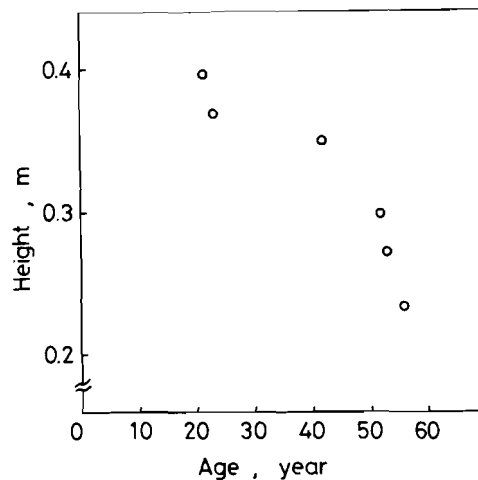
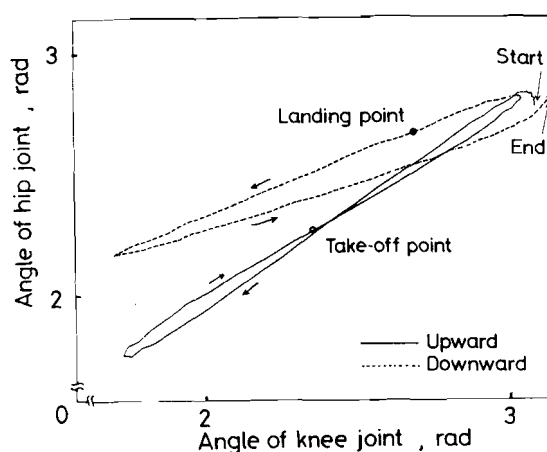


図 4.2.7 年齢と跳躍量の関係

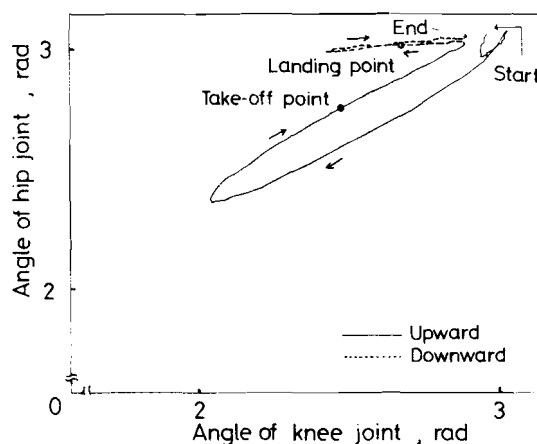
これは跳躍動作を28回繰り返した結果、疲労が蓄積し加齢の影響が顕著に現われた結果であると考えられる。

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4.28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4.28(b)に示す56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56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)跳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、跳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4.2.9は最大屈曲時におけるひざ

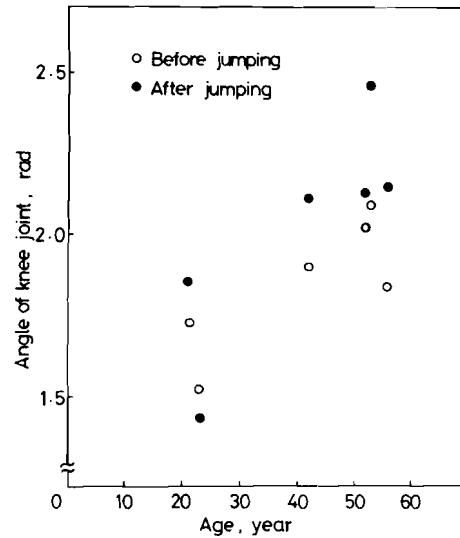
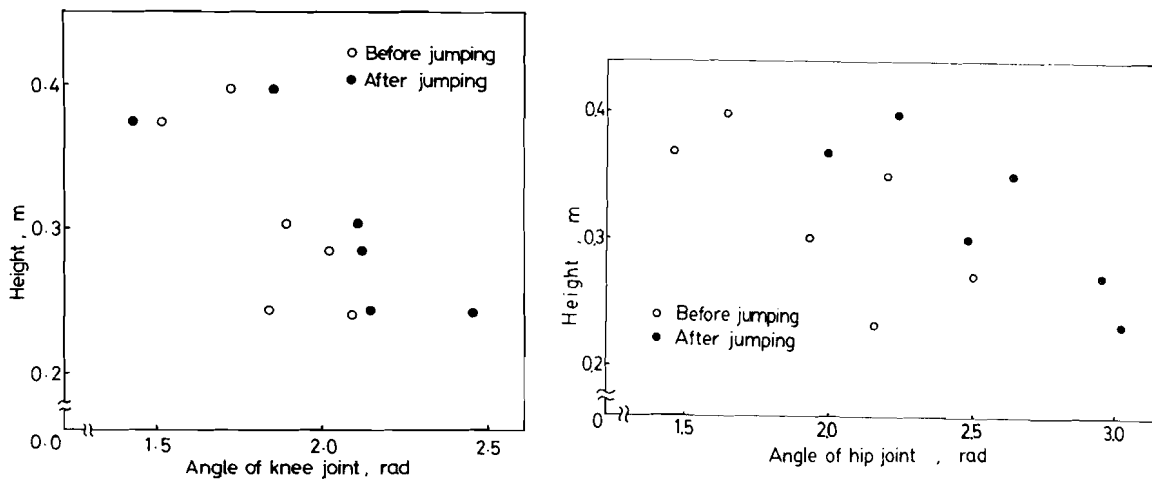


図 4.2.9 最大屈曲時におけるひざ角度と年齢の関係



(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 4.3.0 シャガみ込み動作と跳躍量との関係

* 付録 1.3 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 4.30 は下肢の屈曲度と跳躍量と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と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ぶ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飛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) の被験者について身体各部の重心速度を求めた結果を示す。ここでは速度の垂直成分のみを示している。図中の実線は右足のつま先、点線は右大腿、一点鎖線は腰、破線は右手、さらに間隔の広い破線は頭についてそれぞれの要素の重心速度を示している。これより、つま先を除いて各部の速度は離床直前に最大値を取っており、しかもこれらの

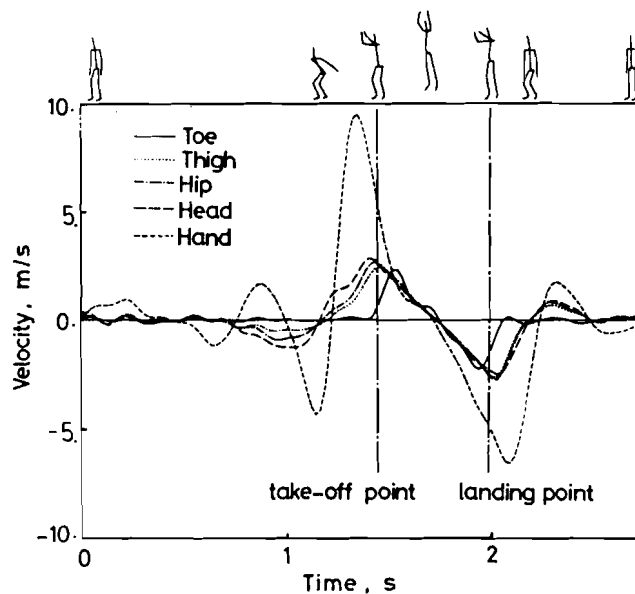


図 4.31 身体各部の速度の垂直成分
(被験者年齢 21 歳)

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 4.3 1 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 4.3 2 は右手重心速度の垂直成分の最大値と跳躍量との関係をまとめたものである。これより手の上方

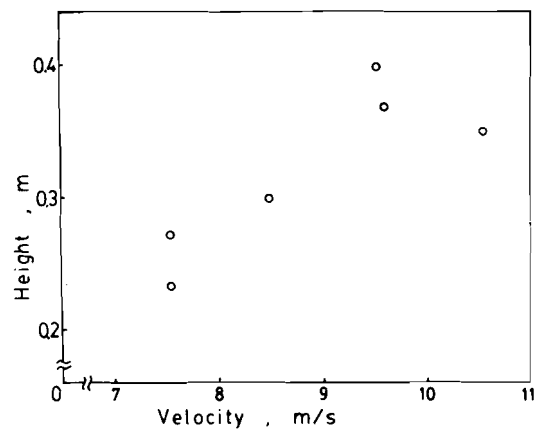
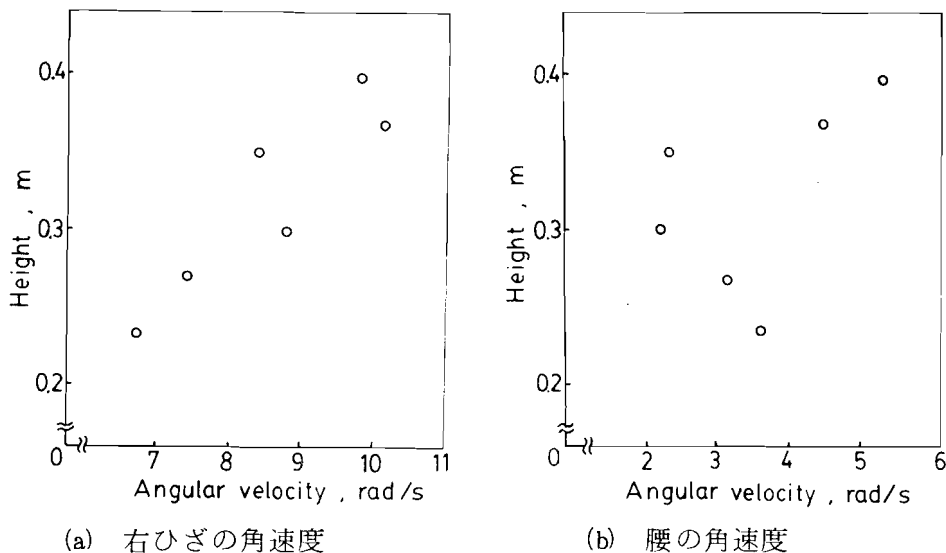


図 4.3 2 右手重心速度と跳躍量の関係

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と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



(a) 右ひざの角速度

(b) 腰の角速度

図 4.3 3 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4.3.4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4.3.4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4.3.5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

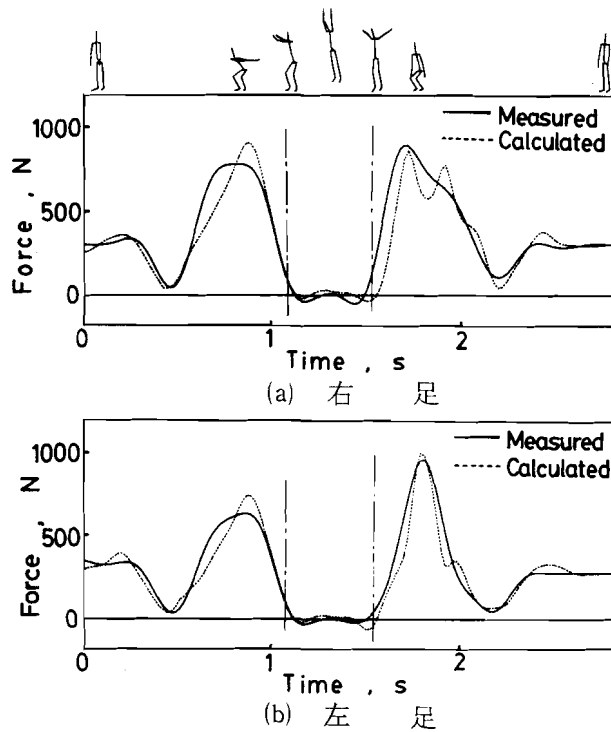


図 4.3.4 足にかかる垂直床反力
(被験者年齢 23 歳)

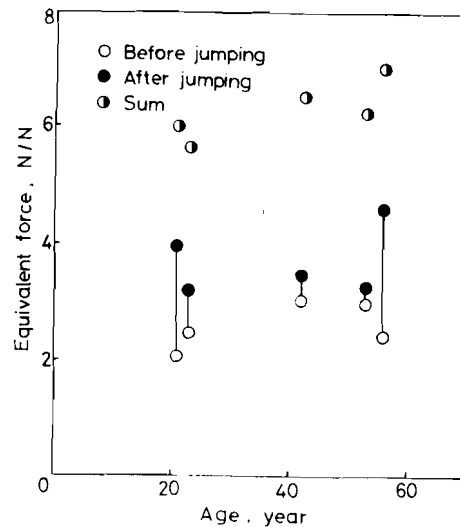


図 4.3.5 最大床反力と年齢の関係

められる。一方下肢に作用するトルクはいずれも離床前に比べて着地後に相対的に大きな値を取っているが、これは先に見たように離床前より着地後により大きな垂直力が足に作用することおよび着地後、床に倒れないように体を支えるために余分なトルクが作用するためであると考えられる。全被験者について身体各部に作用する力とトルクを求め、年齢や跳躍量との関係を求めたところ、それらの間には顕著な傾向は認められなかった。

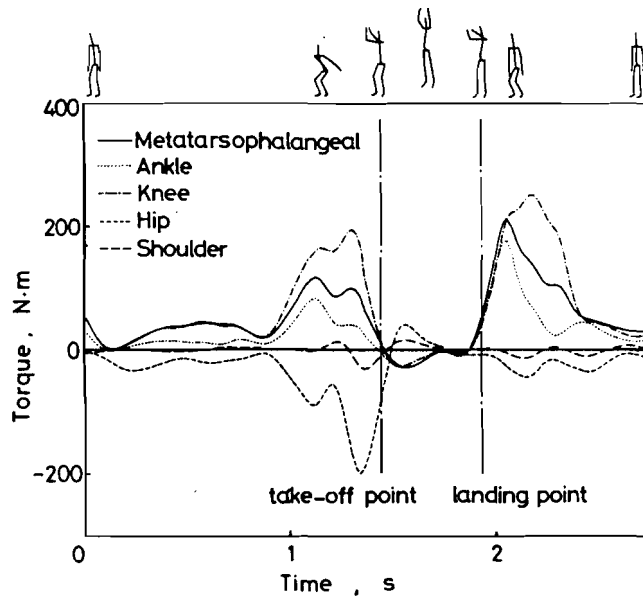


図 4.36 身体各部に作用するトルク（被験者年齢 21 歳）

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° 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、テーブル上にいる被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 E M G 信号などを測定することは困難を伴う。ここでは図 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 360 度回転しながら

16ミリ高速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1.1m、回転半径は2.5m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撮影を行った。カメラのレンズはf5.9mmの広角レンズである。回転ア

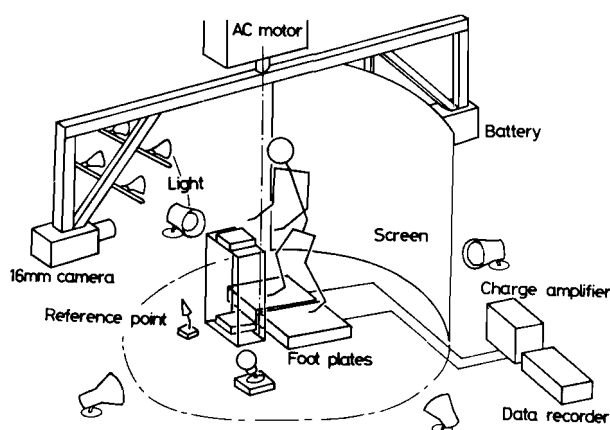


図 4.37 実験装置の概要

ームにはカメラ、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。

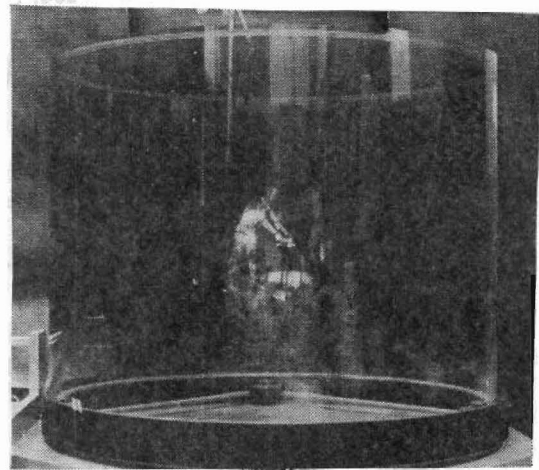
実験は22歳から74歳までの11名の男子被験者に対して行い、動作は床と目の前のテーブルの間で5.5kgの荷物を上げ下ろしする荷役作業動作を取り上げた。床反力測定器、データレコーダなどの主要実験装置は4.2節で述べた荷役作業動作の場合と同じである。

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ーアーを用い、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4.38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頼した。図4.38(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、最適な視差が求めれば最適な



(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4.37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4.39に示す曲線 E_1 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より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て

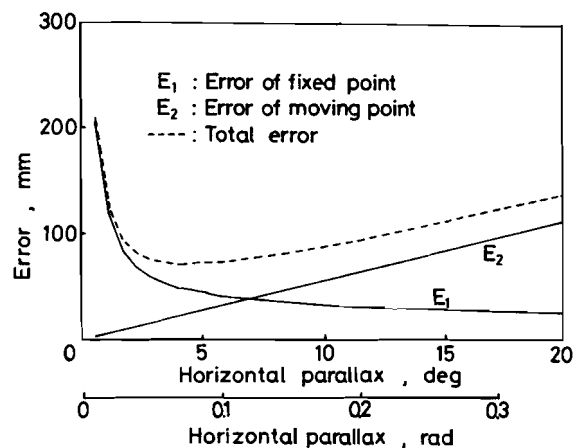


図 4.39 水平視差と誤差の関係

で最大となる。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180mm/sが得られた。カメラが10秒で一周することから、手の先の変位は視差1度あたり5mm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4.39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度であることが求められた。この値は今、両眼の間隔を6.5cmとすれば、円筒の中心から93.1cm、すなわちホログラム面から73.1cm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3.5mm/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、^仮例に、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。

$$\frac{3.5 \times 360}{1000V} \quad \text{秒/サイクル} \quad \dots\dots\dots (4.6)$$

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。

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

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 45 cm 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 45 cm 離れた観測位置と 73.1 cm 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 cm 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 4.3.7 参照)の座

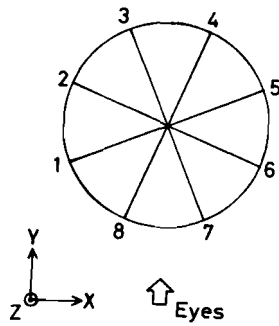
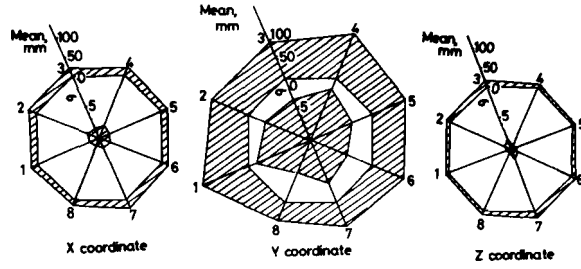
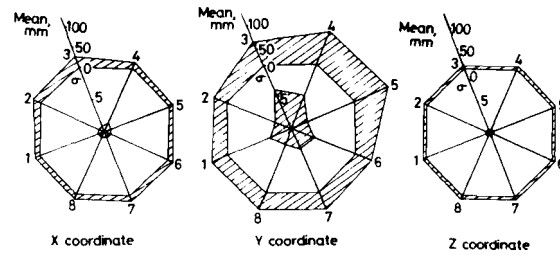


図 4.4.0 測定点の方向

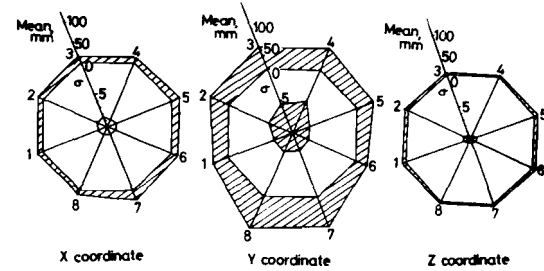
標を 8 方向の視点から測定した。図 4.4.0 は 8 方向の視点から参照点を見たときの眼と参照点の位置関係を示している。ここでは 8 点の座標を 5 人の測定者が 5 回ずつ繰返して測定を行った。図 4.4.1 は測定値を実スケールに変換し、真の座標値に対する誤差の平均と標準偏差を方向別に求めて示したものである。図において八角形の頂点から外方向に誤差の平均を示し、中心からの距離で誤差の標準偏差を表わしている。(a)はホログラム面から 4.5 cm 離れた位置に測定者の眼を固定して測定を行った場合、(b)はホログラム面からの位置を 4.5 cm のままとして変えないで眼の位置を左右に動かすことを許した場合の結果である。(a)に対して一般的に(b)の方が誤差が小さ



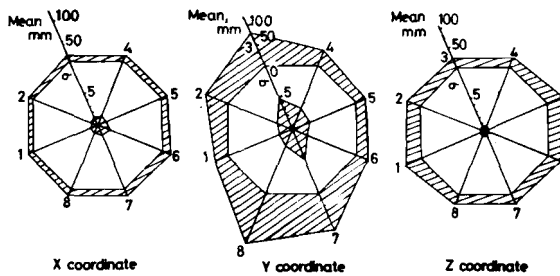
(a) ホログラム面より 4.5 cm, 測定位置固定



(b) ホログラム面より 4.5 cm, 測定位置左右動可



(c) ホログラム面より 2.2 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 4.4.1 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。一般的に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 I T V 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る。身体各部の回転運動は回

転軸によってそれぞれ固有の呼称で表現される。例えば図 5.1 (a)に示すような胴体の矢

状-水平軸まわりの回転は側屈(左屈, 右屈), 同図(b)に示すような垂直軸まわりの回転は回旋(捻転), 同図(c)に示すような前額-水平軸まわりの回転は前屈および後屈と呼ばれる。また, 腕については図 5.1 (d)に示すように

肘を90°に屈曲した状態で手掌が床面を向くような、あ

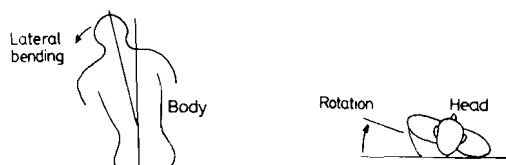
るいは天井を向くような回転は, それぞれ回内, 回外と呼ばれる。

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。

(i) 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。

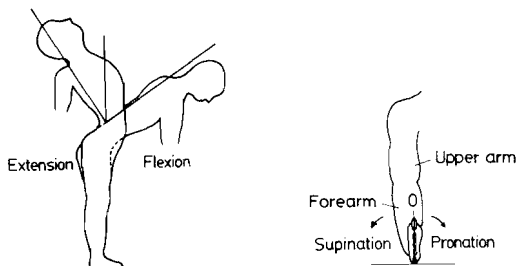
(ii) 中心軸まわりの自転

ここで(ii)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



(a) 側屈動作

(b) 回旋動作



(c) 前後屈動作

(d) 前腕の回旋動作

図 5.1 身体の回転動作の例

にあつて自転する場合，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 Chao^{26),40)} は前腕の 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 Rastegar⁵⁸⁾ 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，Hull⁹⁰⁾ 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

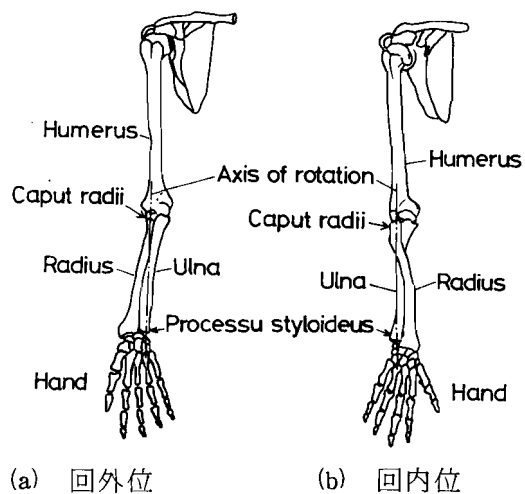


図 5.2 上肢骨(右側)の回旋

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，(ii)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20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。

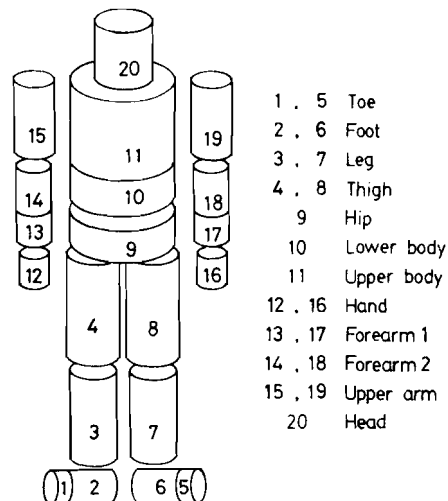


図 5.3 胴および前腕のひねりを考慮した人体モデル

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12および16に関しては，

$$F_{i+1,i} - W_i j = \frac{W_i}{g} a_{G_i} \dots\dots\dots (5.1)$$

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

剛体要素 13, 14, 15, 17, 18 および 19 に関しては,

$$F_{i+1,i} - F_{i,i-1} - W_i j = \frac{W_i}{g} a_{G_i} \dots\dots\dots (5.2)$$

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

剛体要素 20 に関しては

$$F_{11,20} - W_{20} j = \frac{W_{20}}{g} a_{G_{20}} \dots\dots\dots (5.3)$$

$$T_{11,20} - \ell_{20} \hat{r}_{20} \times F_{11,20} = M_{20}$$

が成立する。

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 11 (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

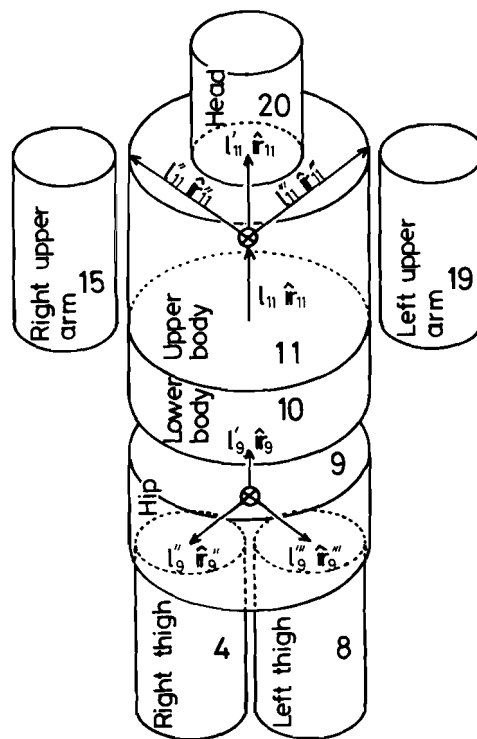


図 5.4 胴および腰部における重心と作用点の位置ベクトル

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。

$$\begin{aligned}
 F_{10,11} - (F_{11,20} + F_{11,15} + F_{11,19}) - W_{11} j &= \frac{W_{11}}{g} a_{G_{11}} \dots\dots\dots (5.4) \\
 T_{10,11} - \ell_{11} \hat{r}_{11} \times F_{10,11} - (T_{11,20} + T_{11,15} + T_{11,19}) \\
 - \ell'_{11} \hat{r}'_{11} \times F_{11,20} - \ell''_{11} \hat{r}''_{11} \times F_{11,15} - \ell'''_{11} \hat{r}'''_{11} \times F_{11,19} &= M_{11}
 \end{aligned}$$

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 ℓ に関しては以下の式が成立する。すなわち、

$$\begin{aligned}
 \ell_{11} &= \ell'_{11} \\
 \ell''_{11} &= \ell'''_{11} \dots\dots\dots (5.5)
 \end{aligned}$$

である。

剛体要素 1 0（胴下部）に関する運動方程式は

$$\begin{aligned}
 F_{i-1,i} - F_{i,i+1} - W_i j &= \frac{W_i}{g} a_{G_i} \dots\dots\dots (5.6) \\
 T_{i-1,i} - \ell_i \hat{r}_i \times F_{i-1,i} - T_{i,i+1} - \ell_i \hat{r}_i \times F_{i,i+1} &= M_i
 \end{aligned}$$

となる。

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。

$$\begin{aligned}
 F_{4,9} + F_{8,9} - F_{9,10} - W_9 j &= \frac{W_9}{g} a_{G_9} \\
 T_{4,9} + T_{8,9} - \ell''_9 \hat{r}''_9 \times F_{4,9} - \ell'''_9 \hat{r}'''_9 \times F_{8,9} \dots\dots\dots (5.7) \\
 - T_{9,10} - \ell'_9 \hat{r}'_9 \times F_{9,10} &= M_9
 \end{aligned}$$

ここで式(5.5)と同様に次式が成立する。

$$\ell''_9 = \ell'''_9 \dots\dots\dots (5.8)$$

また ℓ'_9 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

$$\begin{aligned}
F_{i-1,i} - F_{i,9} - W_i j &= \frac{W_i}{g} a_{G_i} \\
T_{i-1,i} - \ell_i \hat{r}_i \times F_{i-1,i} - T_{i,9} - \ell_i \hat{r}_i \times F_{i,9} &= M_i
\end{aligned}
\tag{5.9}$$

となる。

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

$$\begin{aligned}
F_{mR} - F_{1,2} - W_1 j &= \frac{W_1}{g} a_{G_1} \\
T_{mR} - \ell_1 \hat{r}_1 \times F_{mR} - T_{1,2} - \ell_1 \hat{r}_1 \times F_{1,2} &= M_1
\end{aligned}
\tag{5.10}$$

剛体要素 5 に関しては

$$\begin{aligned}
F_{mL} - F_{5,6} - W_5 j &= \frac{W_5}{g} a_{G_5} \\
T_{mL} - \ell_5 \hat{r}_5 \times F_{mL} - T_{5,6} - \ell_5 \hat{r}_5 \times F_{5,6} &= M_5
\end{aligned}
\tag{5.11}$$

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 運動方程式の解法

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図 5.5 に示す。図中の O_1, O_2 は上下端面の中心を示している。ここでは点 O_2 を含む端面は回転せず, 点 O_1 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図 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 θ_t をひねり角度と定義する。ひねり角度 θ_t は以下の式で与えられる。

$$\theta_t = \cos^{-1} \frac{\vec{O_1A} \cdot \vec{O_2D}}{|\vec{O_1A}| \cdot |\vec{O_2D}|} \quad (5.12)$$

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

クトル $\vec{O_1A}$ および $\vec{O_2D}$ 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。

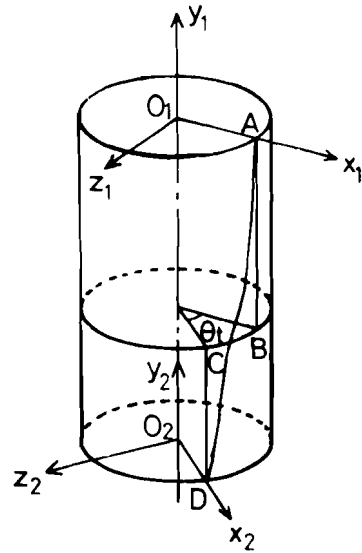


図 5.5 ひねりを伴う身体部位のモデリング

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秒間のコマ数は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コマ数を任意（例えば2章，4章で用いたローカム製シネカメラの場合コマ数は最大500コマ/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。

しかしながら、シネフィルムによる解析は精度が高く、得られる情報量が豊富であるが故にデータの読み取りに要する時間、労力、費用などが多大なものとなる。しかも1こまごとの画像を数量化し、必要なデータを抽出する作業は主に人間の労力に依存しているため、多くの情報を有効に利用することが困難であり、得られたデータには手入力による誤差が含まれる。こういった現状に対して、動画像の記録を計算機で能率よく処理し解析するシステムの開発が望まれている。¹⁰³⁾

ここでは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、運動を記録したシネフィルムより身体各部の位置情報を精度よく抽出する方法を提案する。ITVカメラによって位置情報を抽出するために用いた画像処理システムの構成を図5.6に示す。カメラの濃淡レベルは8ビット、画面の分解能は 128×128 、 256×256 および 1024×1024 の3段階に変えることができる。ここではITVカメラを用いて人体の運動動作を直接撮影するのではなく、一旦シネカメラによって撮影し、得られたフィルムの画像をITVカメラによってミニコンピュータに入力している。画像入力の手順は以下のとおりである。すなわち、(1)シネフィルムの1こまをITVカメラによって撮像する。(2)画面の左端から縦1ラインごとにA-D変換しミニコンピュータに転送する。(3)一画面分

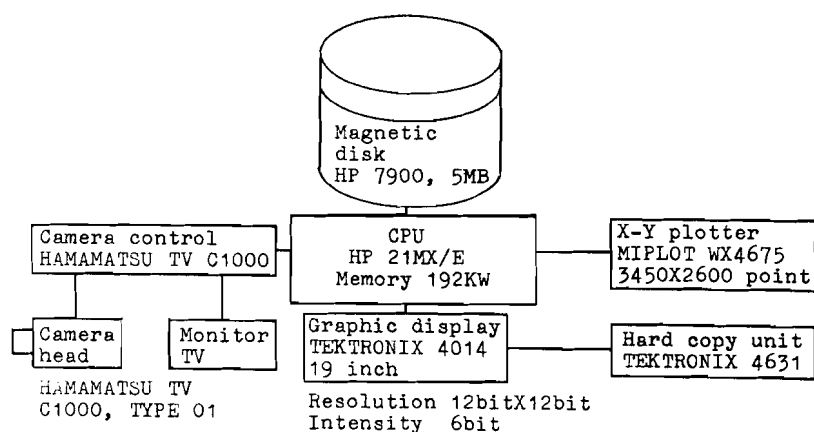


図 5.6 ITVカメラを用いた画像処理システム

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プ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 16×16 のブロックに細分し,各ブロックごとに1つの閾値を選定する。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。閾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 3×3 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閾値とする。^{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閾値が定まると,隣接するブロックにおいて閾値が極端に異なることを避けるため,各閾値の周囲8つの閾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,

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

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

$$\mu_T = \sum_{j=1}^I j \cdot p_j \quad \dots\dots\dots (5.14)$$

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,

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

ここで

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

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

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

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。¹⁰⁹⁾ 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、これには種類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。

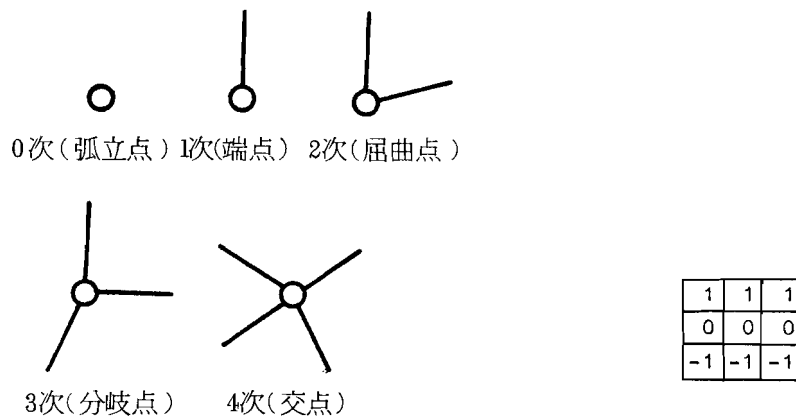


図 5.7 骨格線の連結性

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

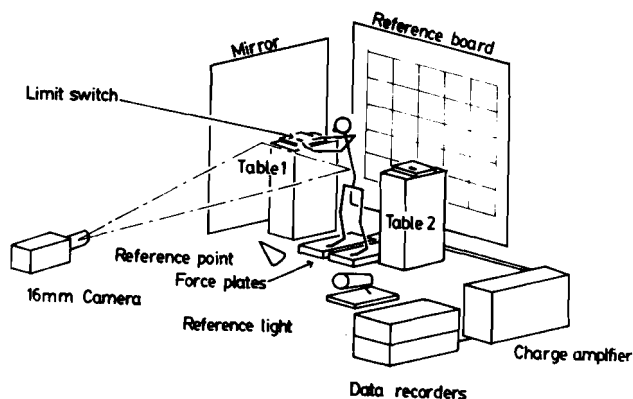
解析を行う運動動作として、ここでは身体の左右側方にある 2 台のテーブルの間で、胴のひねりを利用して荷物を移動させる動作を取り上げた。胴のひねりは下肢の動作によって大きく影響を受けるため、両足を肩の幅に広げて直立した姿勢で行う場合と正座した姿勢で行う場合の 2 とおりについて実験を行った。動作時間は規定せず、直立姿勢と正座姿勢のそれぞれについて荷物の移動を右から左へ、左から右へ 3 往復繰返した。荷物の重さは 5.5 kg である。

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

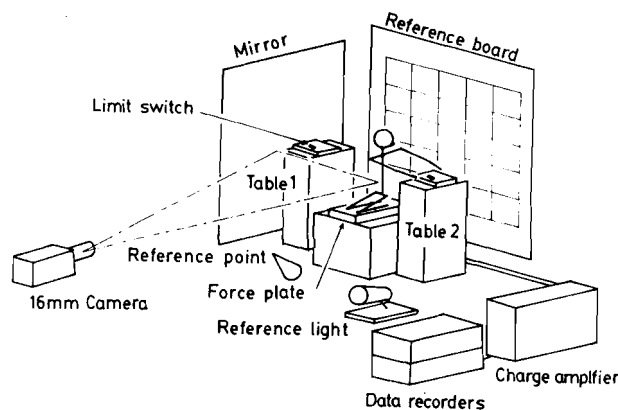
よび正座姿勢における荷役作業動作の実験を示している。荷台の高さは直立姿勢の場合、床から 1.5 m ,正座姿勢の場合、正座している面から 0.9 m である。作業動作の撮影、および外力の測定は、4.2.1 節で述べた三次元の荷役動作の場合と同様の方法で行った。ただし、正座姿勢における荷役動作では荷重計は一台のみ使用した。身体各部を識別するためのターゲットマークは、前章までの実験において貼り付けた関節部の他に、5.3.2 節で述べたひねり成分を測定するために必要な皮膚の表面の点にも貼り付けた。すなわち、腸骨稜と同じ高さにある腹部中央の皮膚表面と左右肩関節の midpoint に相当する皮膚表面お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5.10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_1 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。

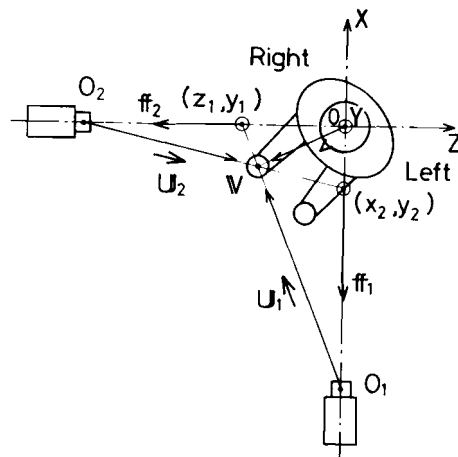


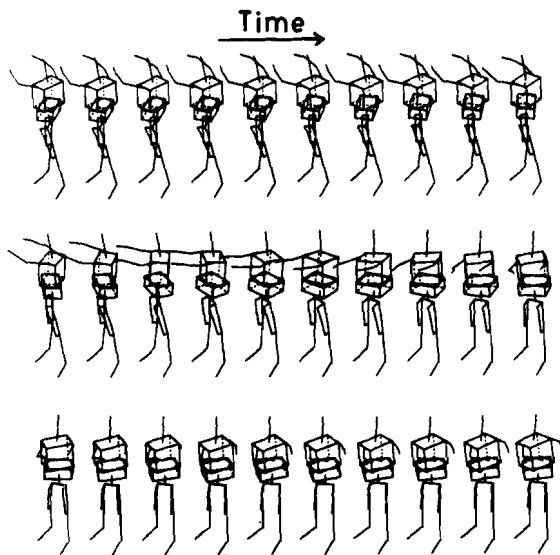
図5.10 2台のカメラと被験者の位置関係

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。

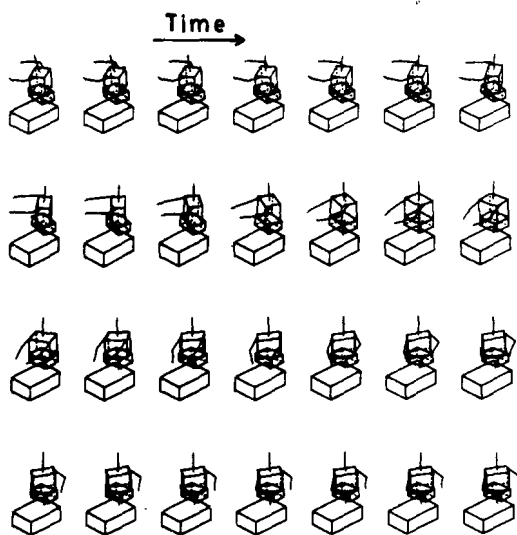
5.4.3 動作パターン

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。



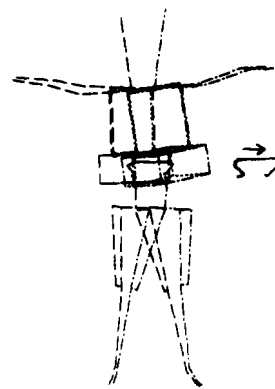
(a) 直立姿勢による場合
(動作時間 3.75 秒)



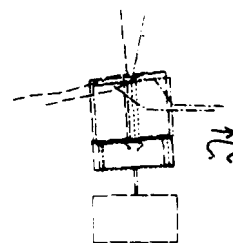
(b) 正座姿勢による場合
(動作時間 3.5 秒)

図 5.1.1 荷役作業動作パターン

図 5.1.2 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の重心は正座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。

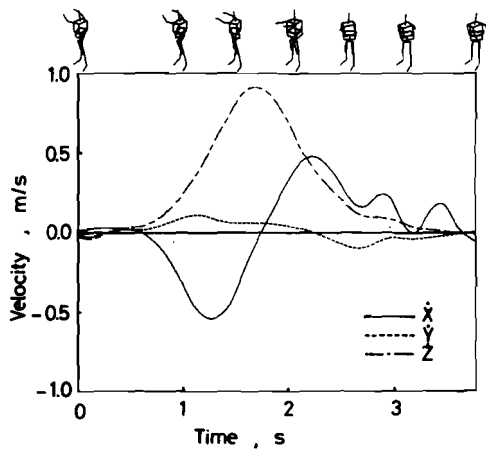


(a) 直立姿勢の場合

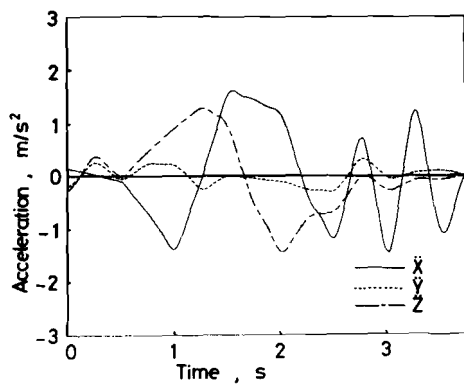


(b) 正座姿勢の場合

図 5.1.2 重心移動軌跡



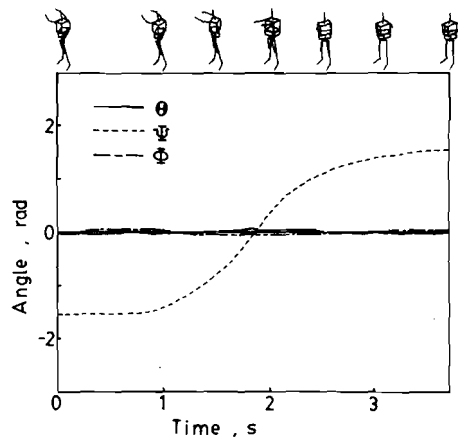
(a) 速度



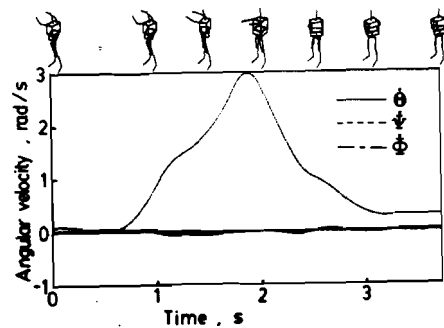
(b) 加速度

図 5.1 3 左手重心の速度および加速度 (直立姿勢)

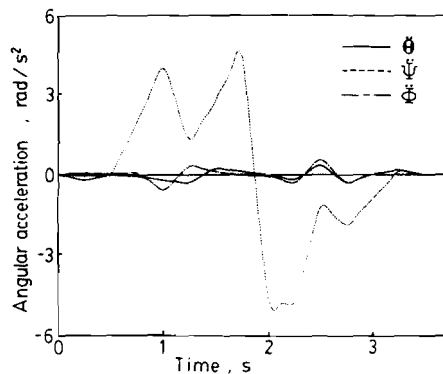
図 5.1 3 に身体各部の重心速度および加速度を求めた結果の例を示す。同図(a), (b)はそれぞれ左手重心の速度および加速度の時間変化を示している。図(a)より Z 軸方向すなわち身体の左方向の速度は徐々に増加し、荷物が正面付近にあるとき最大値を取っていることが認められる。また X 軸方向すなわち身体の後方向の速度は、初め負の方向に増加し、荷物が正面



(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 5.1 4 胴上部のオイラー角の時間変化 (直立姿勢)

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 θ および ϕ の変化はほとんどないことがわかる。従って角度 ψ 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° 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 ψ 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ほ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 ψ の変化を示している。先にも述べたように角度 ψ 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 ψ は胴下部に対する胴上部の相対的回転角，すなわち胴下部と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，

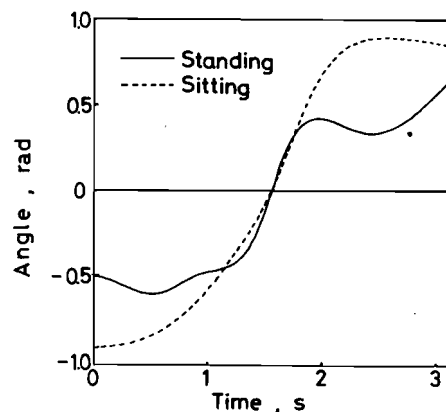
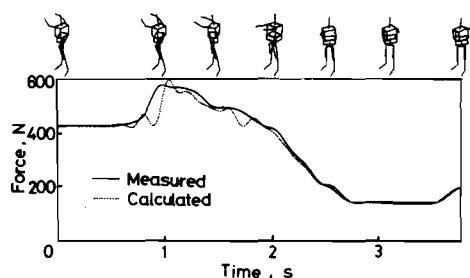


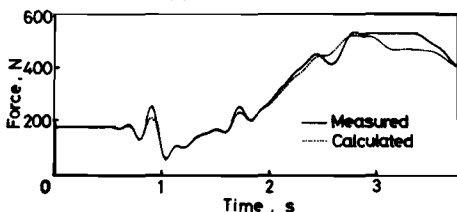
図 5.15 胴のひねり角度

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



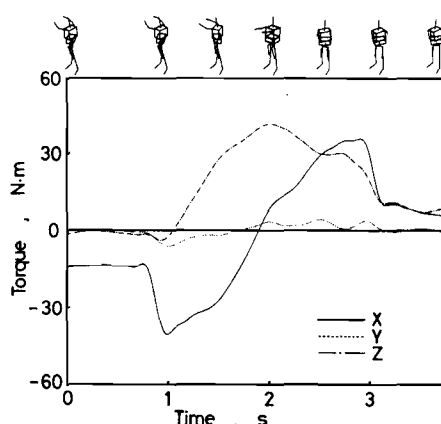
(a) 右足



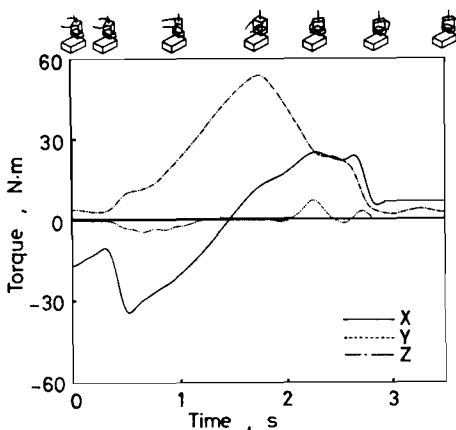
(b) 左足

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、動作が進むにつれて左足に主に荷重が移行していく様子がよくわかる。



(a) 直立姿勢による場合



(b) 正座姿勢による場合

図 5.17 胴上部に作用するトルク

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

勢による場合の結果である。いずれも図の実線は胸体の側屈運動によって生じるトルクであり、^{反時計回り}右屈の方向を正としている。一点鎖線は^{反時計回り}前屈後屈運動によって生じるトルクで、^{反時計回り}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。

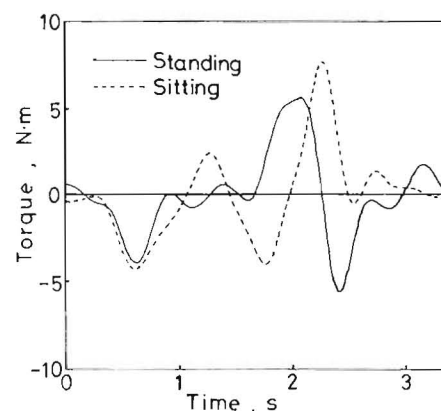


図 5.18 胴のひねりによるトルク

被験者は左手に、直径 22 mm, 長さ 720 mm, 重量 730 g 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、肘関節の橈骨小頭および手首に貼り

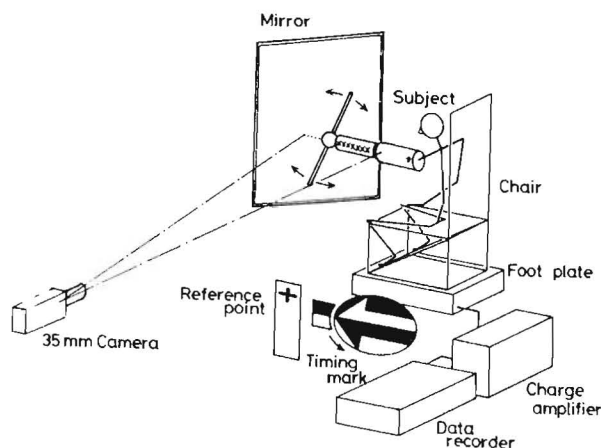


図 5.19 実験装置の概要

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, 最大撮影コマ数 150 コマ/秒, フィルム長 400 ft.) を用い, 前腕の側方から 44 コマ/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 I T V 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

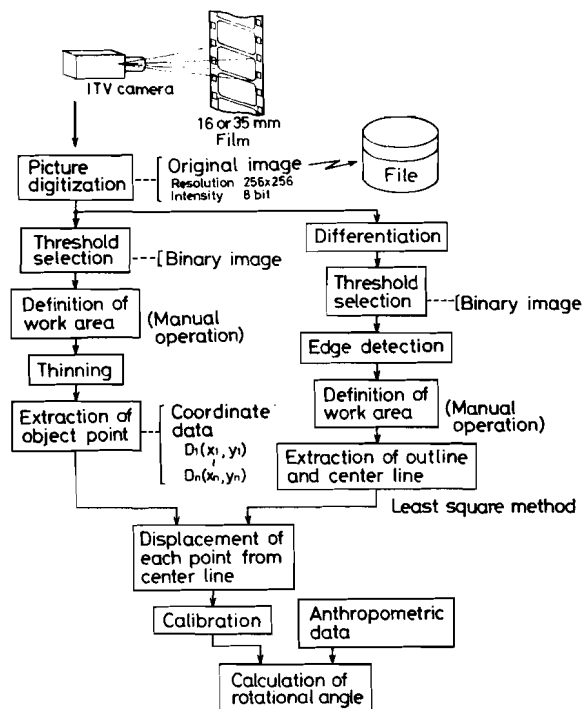


図 5.20 前腕のひねり成分抽出のための
フローチャート

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ヘア・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ヘア・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アルゴリズムにより標点Pと中心線の距離ORが求まる。距離OPは予め被験者の前腕を測定して求めておく。これより，回転角 θ_r は以下の式で与えられる。

$$\theta_r = \tan^{-1}(OR/\sqrt{OP^2 - OR^2})$$

..... (5.19)

ここでは中心線からの標点の変位

ORは下方向を正としており，回外角度が正，回内角度が負となっている。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。

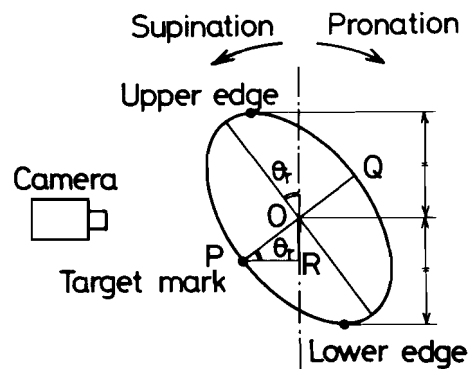


図5.2.1 前腕の断面図における回転角

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21.0 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ITV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5.23は前腕のひねり動作を収録した35mmフィルムの画像をITV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CRT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256×256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

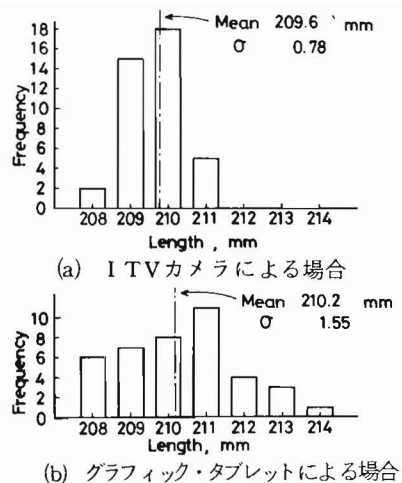


図 5.22 肘，手首間距離の計測値の分布

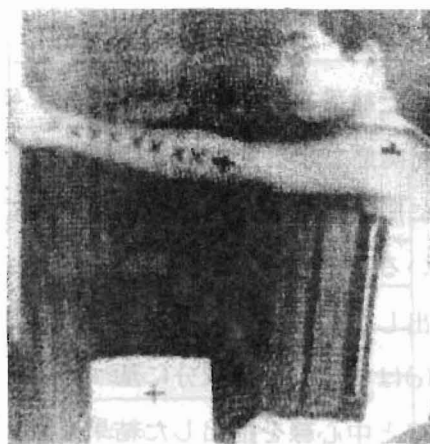
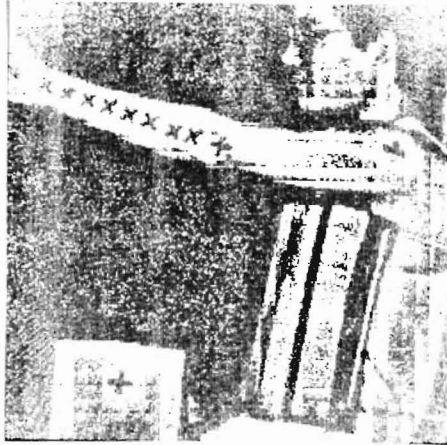
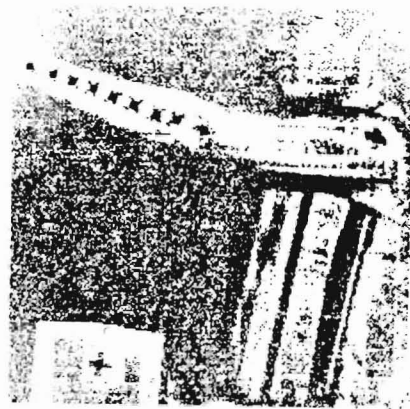


図 5.23 コンピュータに入力された離散原画像(分解能256×256)



(a) 2 値化画像



(b) 標点の抽出結果

前 5.2.4 前腕のひねり動作に対する画像
処理結果

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



(c) 前腕の輪郭線と中心線
の抽出

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

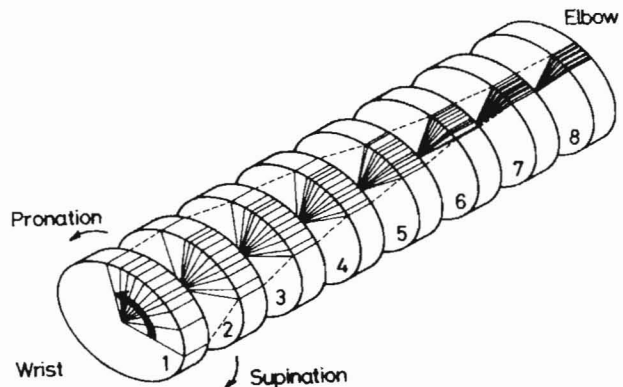


図 5.2.5 前腕のひねり動作パターン

回旋運動のうち，回外位 77° から回内位 62° までの 139° におよぶひねり動作を取り上げて解析を行った。これは 35mm フィルムでは 22 こ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 5.25 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 から 8 まで付けられた標点の番号を示している。番号 1 は手首の標点で，番号 8 は肘より手首側 3 cm 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。表には各部の平均角速度の差も示している。これより，手首の角速度が最も大きく，肘側の番号 8 の部分が最もおそく回転していることがわかる。また，各部の差を見れば角速度は肘側より一定の割合で増加しておらず，特に番号 4 と 5 の部分の間で最も大きく変化していることが認められる。

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 40% 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，

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	0.6821
3	3.6676	0.5917
4	3.0759	0.8527
5	2.2232	0.5650
6	1.6582	0.3696
7	1.2886	0.2260
8 (elbow)	1.0626	

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。

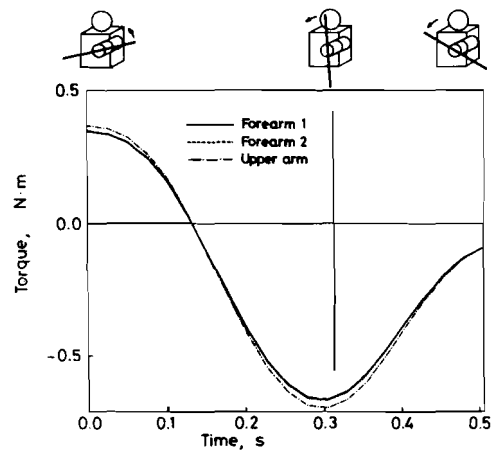


図 5.2.6 前腕のひねりによりトルク

腕の回旋運動では、手の部分に慣性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 I T V 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倍程度大きいことが、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) I T V 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~~^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、Mann¹¹⁰⁾ 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 Dapena⁴⁶⁾ 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。その他土屋¹¹¹⁾ 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や水平方向とのなす角度によって定めることができる。図 6.1 に座標を決定するために用いたパラメータを示す。

すなわち、ここでは図の角 $\theta_1 \sim \theta_9$ を用いて剛体要素端点の座標を定めた。同図(a)は矢状面内におけるモデルと各パラメータの関係を示しており、各要素の端点には 1 から 22 までの通し番号を付している。これより矢状面内における各点の座標 (x_i, y_i) は以下のように与える。

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、

$$\left. \begin{aligned} x_i &= l_{i-1,i} \cdot \cos \theta_{i-2} + x_{i-1} \\ y_i &= l_{i-1,i} \cdot \sin \theta_{i-2} + y_{i-1} \end{aligned} \right\} \dots (6.1)$$

となる。ここで $l_{i-1,i}$ 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。

端点 8, 9, および 10 (左股関節) については

$$\left. \begin{aligned} x_i &= l_{i-1,i} \cdot \cos \theta_{i-4} + x_{i-1} \\ y_i &= l_{i-1,i} \cdot \sin \theta_{i-4} + y_{i-1} \end{aligned} \right\} \dots (6.2)$$

となる。ここで端点 5 と 10 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 11 は矢状面内において端点 5

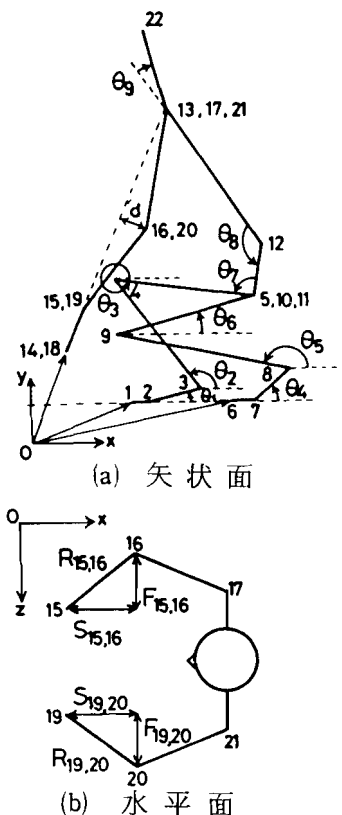


図 6.1 シミュレーションモデルとパラメータの関係

および 10 と同一の点とする。

端点 12 については,

$$\left. \begin{aligned} x_{12} &= l_{11,12} \cdot \cos \theta_7' + x_{11} \\ y_{12} &= l_{11,12} \cdot \sin \theta_7' + y_{11} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (6.3)$$

となる。ここで、 θ_7' は腰要素が水平方向となす角であり、次式で与えられる。

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

端点 13, 17, 21 については,

$$\left. \begin{aligned} x_i &= l_{12,13} \cdot \cos \theta_8' + x_{12} \\ y_i &= l_{12,13} \cdot \sin \theta_8' + y_{12} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (6.5)$$

となる。ここで θ_8' は胴要素が水平方向となす角であり、次式で与えられる。

$$\theta_8' = \pi - \theta_8 + \theta_7' \dots\dots\dots (6.6)$$

端点 22 については,

$$\left. \begin{aligned} x_{22} &= l_{21,22} \cdot \cos (\theta_8' - \theta_9) + x_{21} \\ y_{22} &= l_{21,22} \cdot \sin (\theta_8' - \theta_9) + y_{21} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (6.7)$$

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,

$$\left. \begin{aligned} x_i &= l_{i-1,i} \cdot \frac{x_{13} - x_{14}}{l_{13,14}} + x_{i-1} \\ y_i &= l_{i-1,i} \cdot \frac{y_{13} - y_{14}}{l_{13,14}} + y_{i-1} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (6.8)$$

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 midpoint 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,

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

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

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 16 および 19 の, z 座標は以下の式で与えられる。

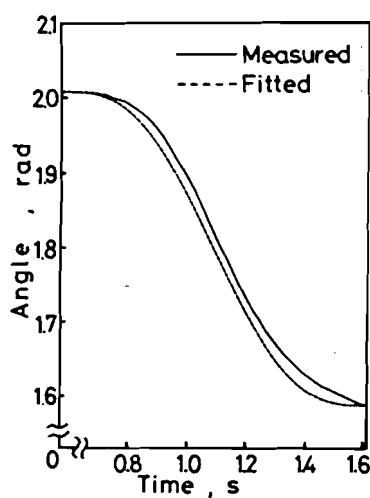
$$\left. \begin{aligned} z_{16} &= z_{15} - \sqrt{R_{15,16}^2 - S_{15,16}^2} \\ z_{20} &= z_{19} + \sqrt{R_{19,20}^2 - S_{19,20}^2} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (6.10)$$

6.2.2 関数近似による身体関節角の創成

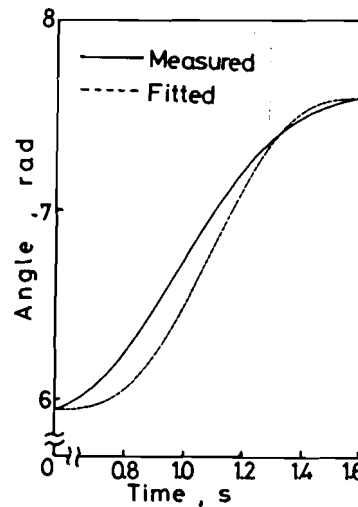
本章における荷役動作のシミュレーションは4章で述べた荷役作業動作の実験結果のうち、被験者2番(年齢23歳)の第1回目の動作に基づいて行った。実験結果を詳細に検討した結果、動作中における身体各部の矢状面内関節角の時間的な変化は、基本的に以下の関数⁵³⁾によって近似できることが求められた。すなわち、

$$f(t) = f_0 + (f_1 - f_0) \left[\frac{t}{T} - \frac{1}{2\pi} \sin\left(\frac{2\pi t}{T}\right) \right] \dots\dots\dots (6.11)$$

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1.62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な変化を式(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 θ_2, θ_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_2)



(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_3)

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 θ_7 および θ_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 $0 \leq p \leq 1$ 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 θ_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 θ_7, θ_8 については、

$$\left. \begin{array}{l} 0 \leq t \leq (1-p)T \text{ のとき } \theta_i = f_0 \\ (1-p)T < t \leq T \text{ のとき } \theta_i = f(t) \end{array} \right\} \dots\dots\dots (6.12)$$

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

$$\left. \begin{array}{l} 0 \leq t \leq pT \text{ のとき } \theta_i = f(t) \\ pT < t \leq T \text{ のとき } \theta_i = f_1 \end{array} \right\} \dots\dots\dots (6.13)$$

となるように定める。

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 θ_7, θ_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 $\frac{1}{2}$ 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 ($0 \leq s \leq 1$) とし、 s が0に近づくほどパターン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。

$$\left. \begin{array}{l} s \leq 0.5 \text{ のとき } p = s + 0.5 \\ s > 0.5 \text{ のとき } p = 1.5 - s \end{array} \right\} \dots\dots\dots (6.14)$$

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 $\frac{1}{2}$ 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の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 秒である。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向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

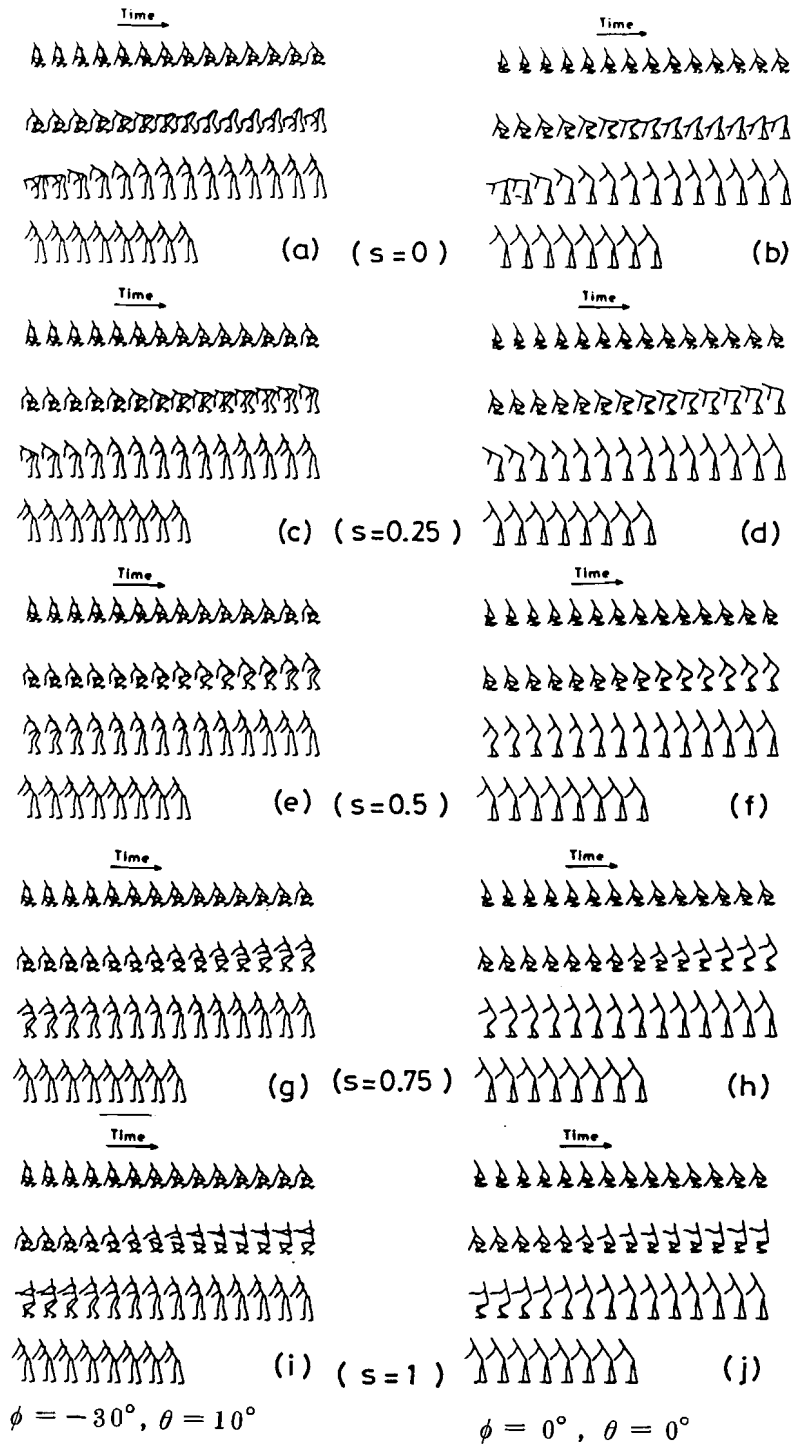
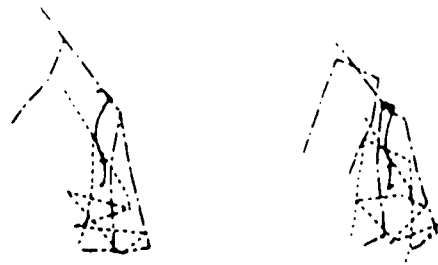


図 6.3 荷役作業動作のシミュレーション

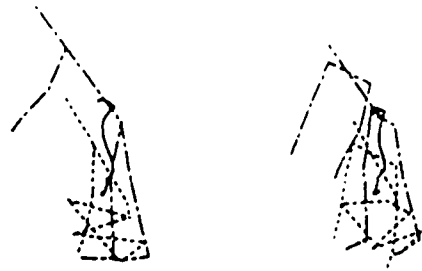
て腰まわりのトルクを選んだのは、腰椎が体幹の荷重のかかる部分であり、椎間円板ヘルニアや脊椎分離症などの脊柱に関する疾患も腰部にかかる負荷が原因となっているためである。また、肩関節まわりのトルクは、荷役作業動作における腕の運動を反映するものとして重要な要因となる。

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、純粹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)はそれぞれ $s = 0$ 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。

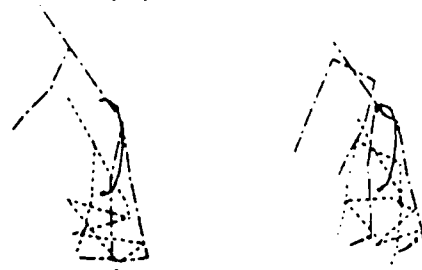
図6.5(c), (d)は同様に腰関節まわりおよび右肩関節まわりのトルクを示しており、 $s = 0.25$ の場合の結果である。動作に伴うトルクの変化は同図(a), (b)の場合と同様であるが、腰関節まわりのトルクの最大値は図(a)の場合に比べて大きく減少していることが認められる。同図(e), (f)は同様に $s = 0.5$ の場合、(g), (h)は $s = 0.75$, (i), (j)は $s = 1$ の場合の結果を示している。以上より、腰を先に上げる動作から腕を先に上げる動作へ動作パターンが移行するに従っ



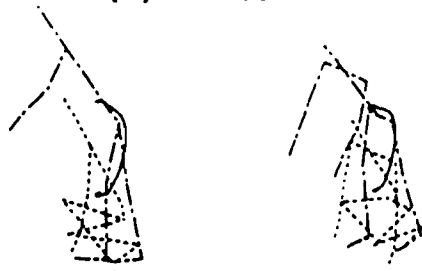
(a) $s = 0$



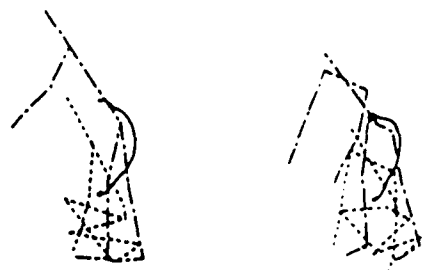
(b) $s = 0.25$



(c) $s = 0.5$



(d) $s = 0.75$



(e) $s = 1$

图 6.4 重心移动轨迹

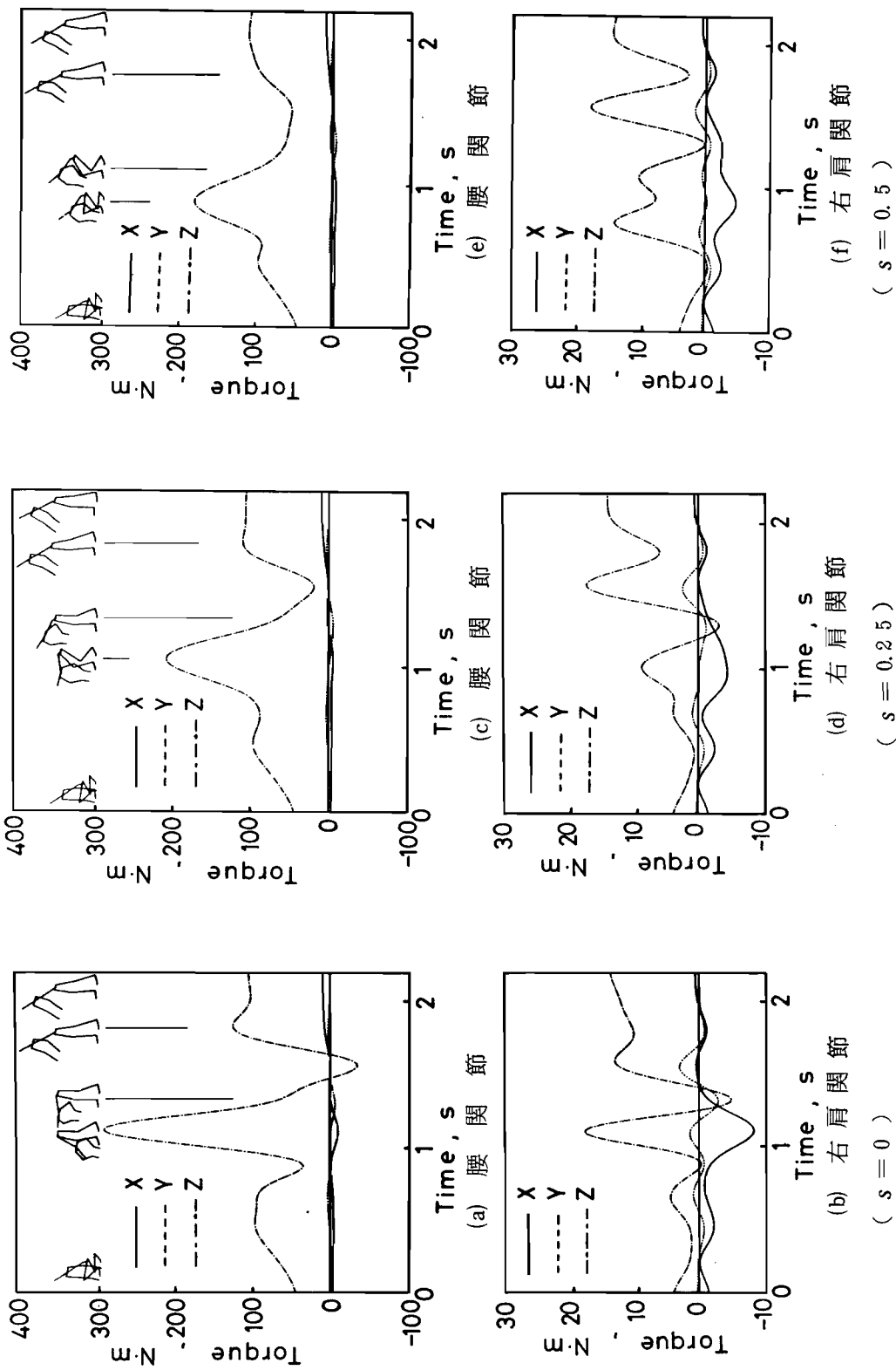
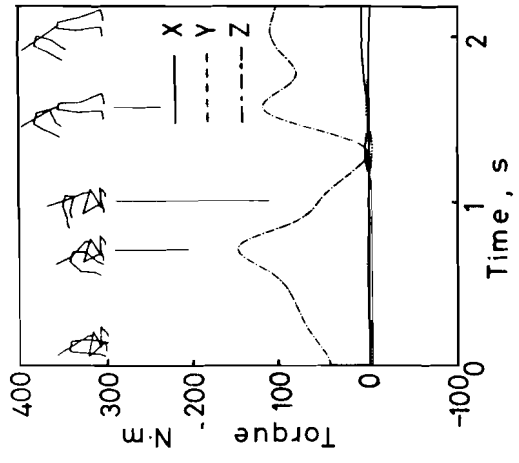
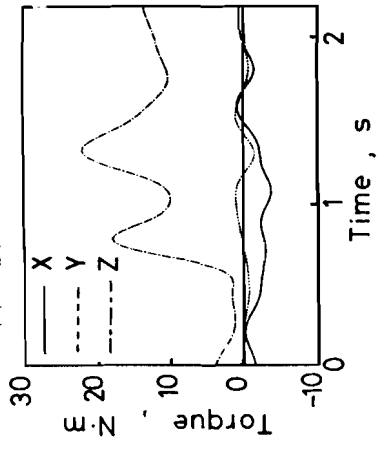


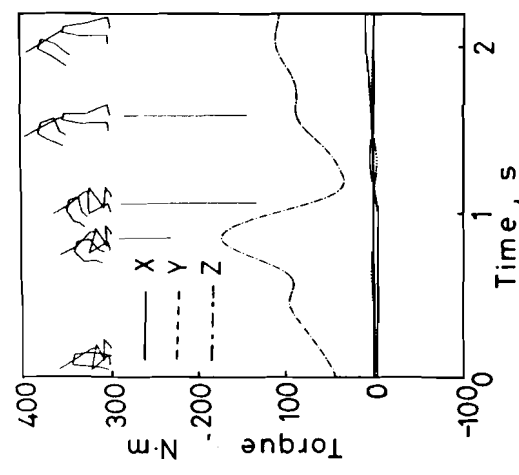
図 6.5 関節まわりに作用するトルク



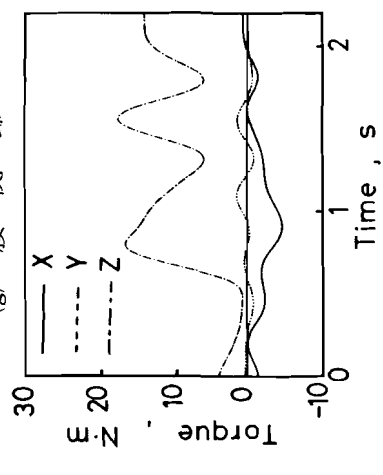
(g) 腰関節



(i) 右肩関節



(h) 右肩関節



(i) 腰関節

(s = 1)

(s = 0.75)

図 6.5 関節まわりに作用するトルク

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けるトルクを示している。これより腕を先に上げ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従って、腰関節まわりのトルクの最大値は徐々に増加することが認められる。これは腰を先に上げる動作は大きな前傾姿勢を取ることによって、腰にかかる負担が増加するためであると考えられる。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

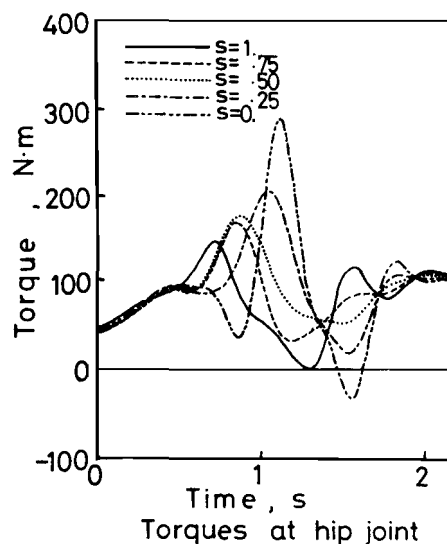


図 6.6 種々の荷役動作における腰関節まわりの矢状面内トルク

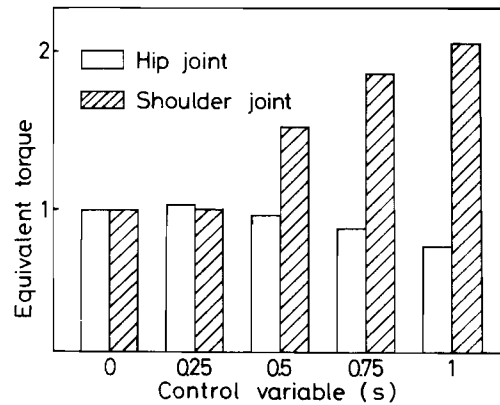


図 6.7 種々の荷役動作において腰関節および肩関節まわりに作用する平均トルク (s=0の場合を1として基準化している)

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 6.7 の $s=0.5$ 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、種類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・着席動作中に目の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、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、I T V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倍程度大きいことが明らかとなった。I T V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 — ,
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 Biomechanics, 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 Biomechanics, 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 : Mechanics 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 ^{en} 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 Musculo-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 Extremities of the Musculo-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. Mammen 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-Wiley & 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. Lissner, 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 Operation, ^{submitted for publication in} 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11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シンポジウム ^{論文集(1975)}
- (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 Wiley & Sons.
- (97) K. Iwata, et al. : 3-D Dynamic Motion Analysis by Cylindrical Holographic Stereogram, Memoirs of the Faculty of Engineering, Kobe University, No. 28. (1982), p. 63
- (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慢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M E学会関西支部研究会(1978), P. 25.

- (106) 藤井, 他 4 名 : び慢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 M E 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慢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 53 年度日本 M E 学会関西支部研究会 (1978),
P. 22 .
- (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_{0_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 $\hat{\alpha}_i$ とすると剛体要素の節点のもつ加速度 $a_{0_{i+1}}$ は点 O_i 自体がもつ加速度 a_{0_i} と $\hat{\alpha}_i$ との和で与えられる。すなわち、

$$a_{0_{i+1}} = a_{0_i} + \hat{\alpha}_i \quad \dots\dots\dots (1)$$

が成立し、これより次式を得る。

$$a_{0_i} = \sum_{j=1}^{i-1} \hat{\alpha}_j, \quad (i \geq 2) \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 $a_{0_1} = 0$ 、すなわち足のは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

$$x = r \cos \theta, y = r \sin \theta, z = 0 \quad \dots\dots\dots (3)$$

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。

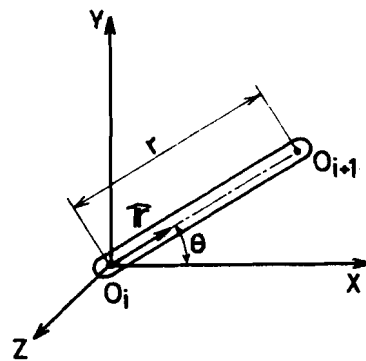
$$\begin{aligned} dx/dt &= -r \sin \theta \frac{d\theta}{dt} = -r \omega \sin \theta \\ dy/dt &= r \cos \theta \frac{d\theta}{dt} = r \omega \cos \theta \\ dz/dt &= 0 \quad \dots\dots\dots (4) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} d^2 x/dt^2 &= -r \left(\cos \theta \frac{d\theta}{dt} \omega + \sin \theta \frac{d\omega}{dt} \right) \\ &= -r (\omega^2 \cos \theta + \alpha \sin \theta) \end{aligned}$$

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

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

これより、次式を得る。



付録図1 剛体と各パラメータ

$$\hat{\alpha}_i = \begin{pmatrix} d^2x/dt^2 \\ d^2y/dt^2 \\ d^2z/dt^2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -r\omega^2 \cos\theta - r\alpha \sin\theta \\ -r\omega^2 \sin\theta + r\alpha \cos\theta \\ 0 \end{pmatrix} = -r\omega^2 \begin{pmatrix} \cos\theta \\ \sin\theta \\ 0 \end{pmatrix} + r\alpha \begin{pmatrix} -\sin\theta \\ \cos\theta \\ 0 \end{pmatrix} \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここで剛体要素の方向を表わす単位ベクトルは、

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

であり、また z 軸方向の単位ベクトル $k = [0, 0, 1]^T$ を用いると、 k と \hat{r} のベクトル積は

$$k \times \hat{r} = [-\sin\theta, \cos\theta, 0]^T \quad \dots\dots\dots (8)$$

となることから、次の結果を得る。

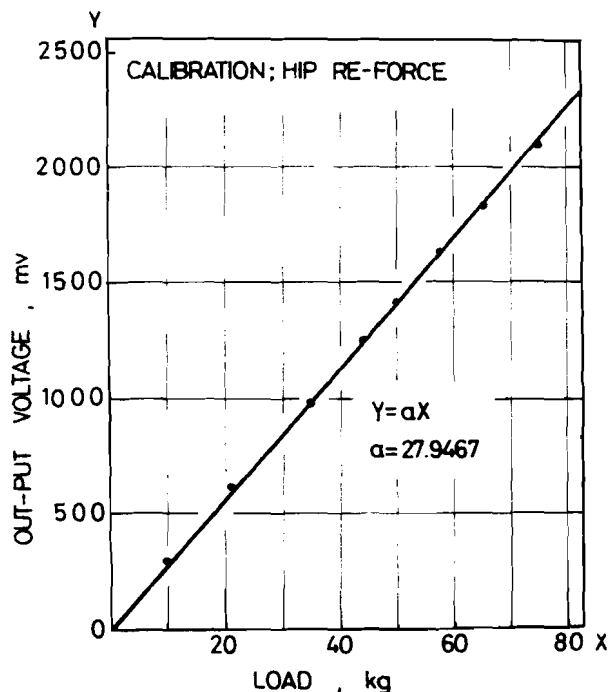
$$\hat{\alpha}_i = -r\omega^2 \hat{r} + r\alpha k \times \hat{r} \quad \dots\dots\dots (9)$$

従って式(2)、(9)より式(10)、即ち式(2-5)を得る。

$$a_{0i} = \sum_{j=1}^{i-1} (-r_j \omega_j^2 \hat{r} + r_j \alpha_j k \times \hat{r}) \quad \dots\dots\dots (10)$$

式(2-4)で表わされる a_{0i} 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



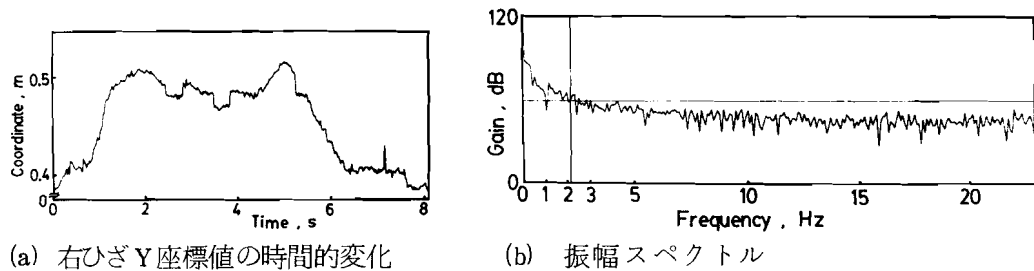
付録図2 荷重計のキャリブレーション

付録3 実験装置の仕様

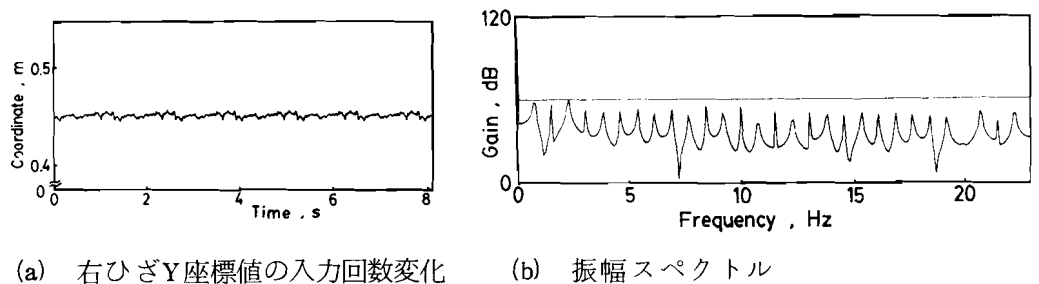
16mmCINE-CAMERA	LOCAM Model 164-5AC 16-500 frames/sec(variable) 95x260x190 mm(3/8inch-bolt) 100/28V.AC,50/60 Hz VOLEX H16Reflex 12-64 frames/sec(variable) Clock-work KYOEI ELECTRONIC CO. CAMERA-CONTROLLER
16mmFILM	KODAK Ektachrome/7240TUNGSTEN(ASA400) KODAK Ektachrome/7250TUNGSTEN(ASA125)
35mmCINE-CAMERA	ARNCLD & RICHTER ARRITECHNO 35 R-150 type 20-150 frames/sec(variable) LENS CARL ZEISS f2.1 50mm
35mmFILM	FUJI SUPER PANCHROMATIC NEGATIVE FILM / FG ASA80 400feet
VIDEO-CAMERA	VICTOR GC-3350
VTR	VICTOR CR-4400
COLOR-MONITOR	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 Ax:+300mm, Az:+200mm Overload/ 120% Sensitivity variation/ 5.0% Linearity/ 1.0% FSOmax Histeresis/ 0.5% FSOmax Threshold/ 50mN Cross talk/ 3.0%max
CHARGE AMPLIFIER	KISTLER Type 5007Y15 x8
SUMMING AMPLIFIER	KIAG-SWISS Type 5001 x8
ANALOG DEVIDER	KIAG-SWISS Type 5217 x4
CENTER CONTROL UNIT	KIAG-SWISS Type 5215Y12 x2 KISTLER Type 5675 KIAG-SWISS Type 5671
GALVO AMPLIFIER	KIAG-SWISS Type 5211A x4
UV-OSCILOGRAPH	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	NEC Model GLG 5800
HS VIWER	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エ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

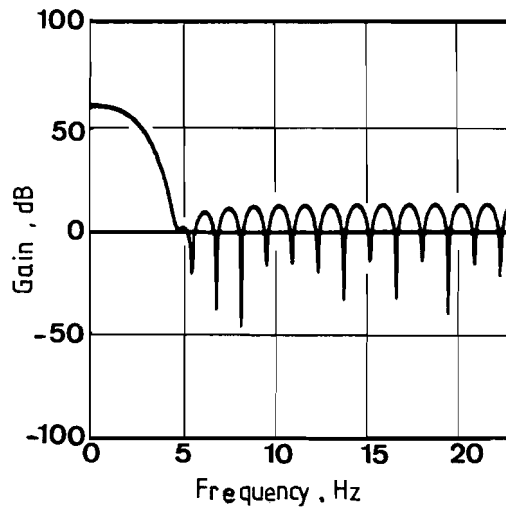


付録図3 入力座標値の時間変化とその周波数成分



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であると考えられる。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座標値に対して行った結果，遮断周波数として 2.28 Hz を設定すれば身体の中のどの部分に対しても運動情報を逸することなく平滑化を行えることが導かれた。このフィルターの周波数特性を付録図 5 に示す。



付録図 5 フィルタの周波数特性
(遮断周波数 2.28 Hz)

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

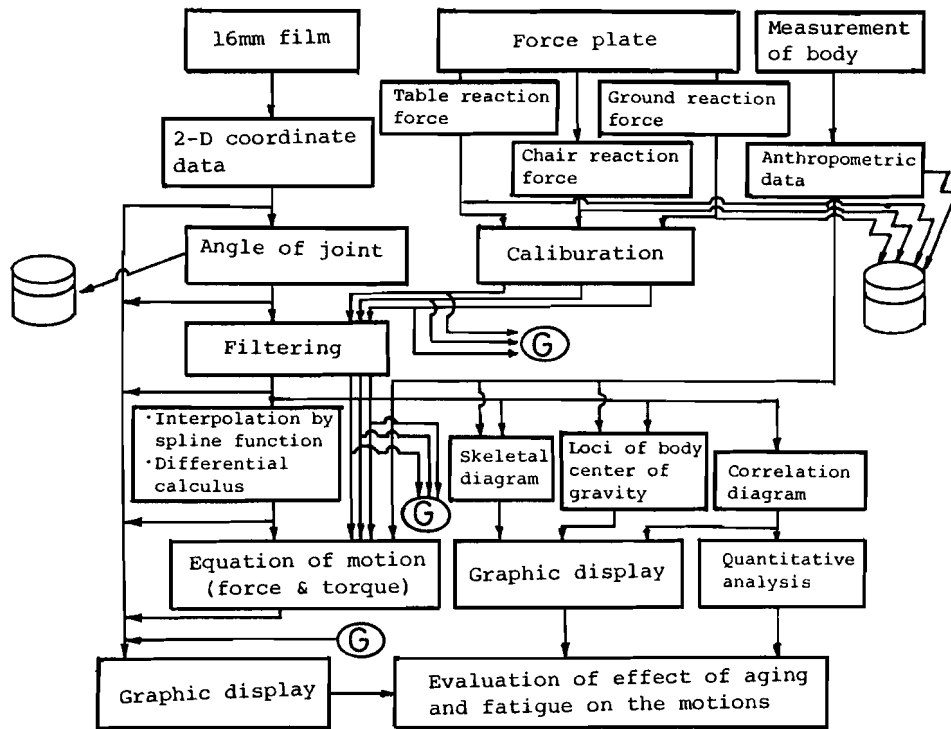
Filter-coefficients
(cut-off/5.2Hz)

μ	a_{μ}
0,32	0.010020
1,31	0.003831
2,30	-0.000790
3,29	-0.007783
4,28	-0.011159
5,27	-0.005229
6,26	0.009263
7,25	0.022539
8,24	0.020921
9,23	-0.001935
10,22	-0.035564
11,21	-0.053915
12,20	-0.029668
13,19	0.046082
14,18	0.152513
15,17	0.246016
16	0.283203

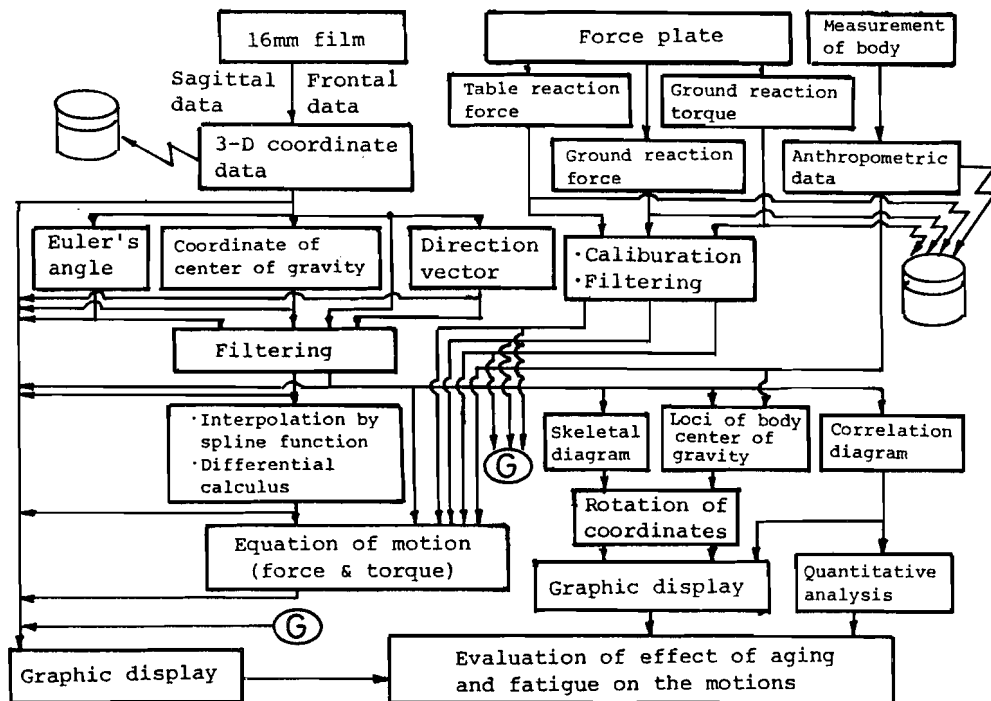
Filter-coefficients
(cut-off/2.28Hz)

μ	a_{μ}
0,32	-0.0034884
1,31	-0.0030938
2,30	-0.0043068
3,29	-0.0051729
4,28	-0.0051806
5,27	-0.0037403
6,26	-0.0002748
7,25	0.0056676
8,24	0.0142990
9,23	0.0254980
10,22	0.0387611
11,21	0.0532134
12,20	0.0676859
13,19	0.0808513
14,18	0.0913998
15,17	0.0982245
16	0.1005859

付録5 運動動作解析のフローチャート



(a) 二次元運動動作解析



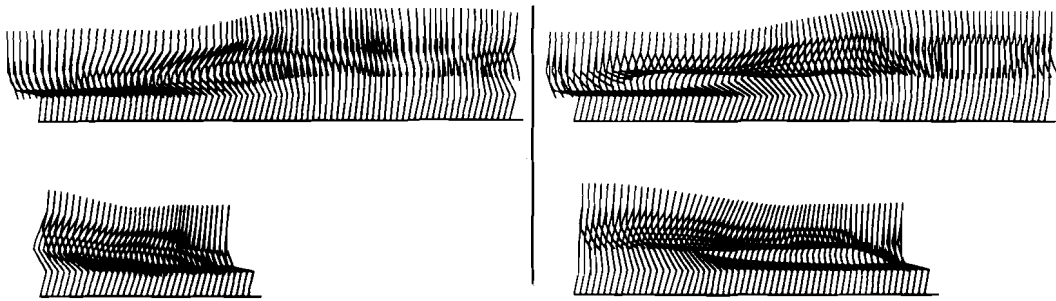
(b) 三次元運動動作解析

付録6 起立・着席動作パターン

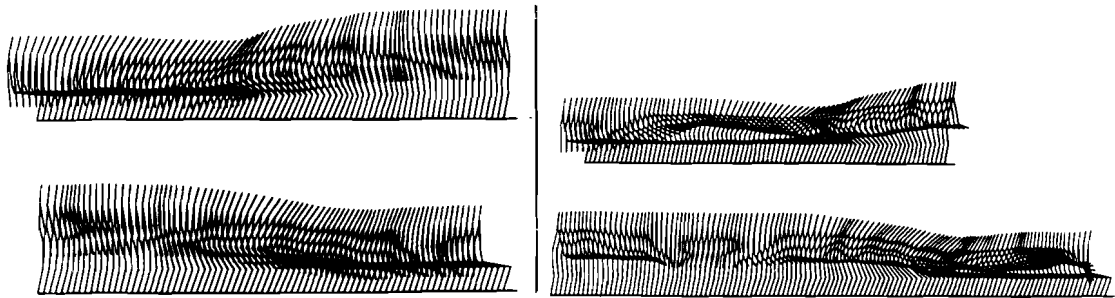
動作サイクル5回目

手をつかない動作

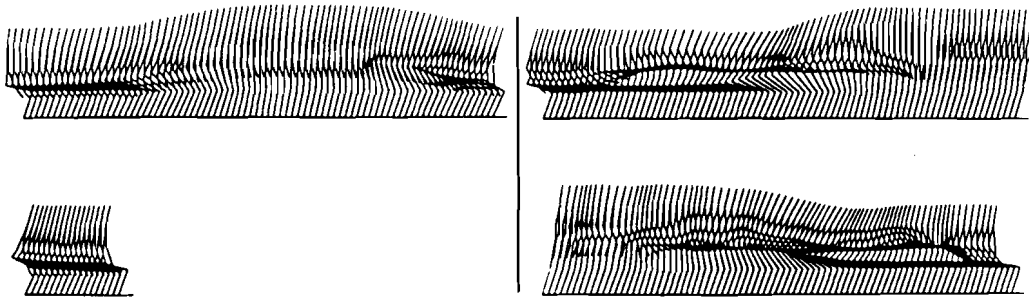
手をつく動作



(a) 被験者年齢 26 歳



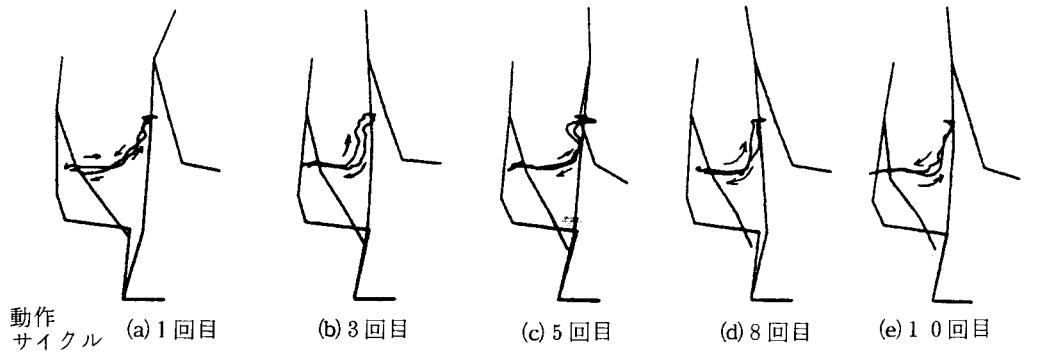
(b) 被験者年齢 44 歳



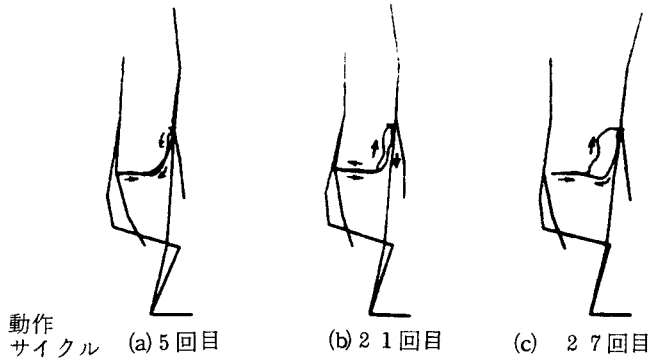
(c) 被験者年齢 67 歳

付録7 起立・着席動作に伴う重心移動軌跡

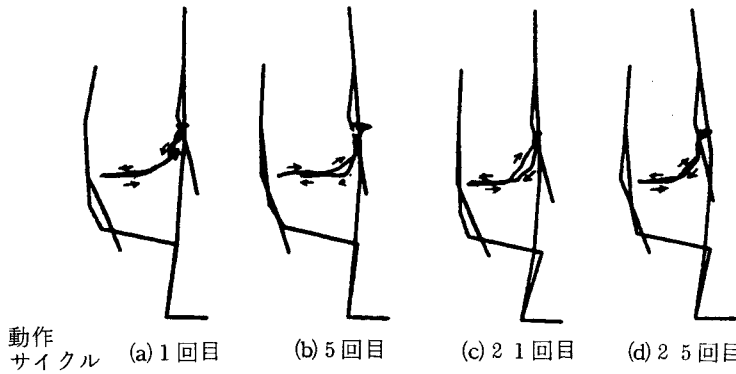
(動作サイクル変化)



被験者#1, 76歳
手をつく動作

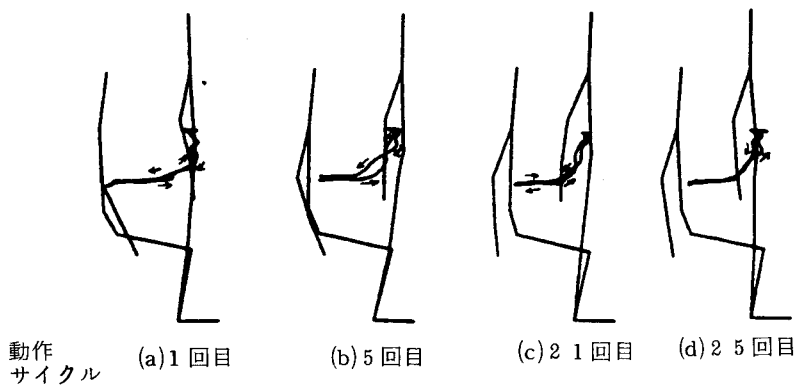


被験者#14, 44歳
手をつく動作



手をつかない動作

被験者#13, 26歳

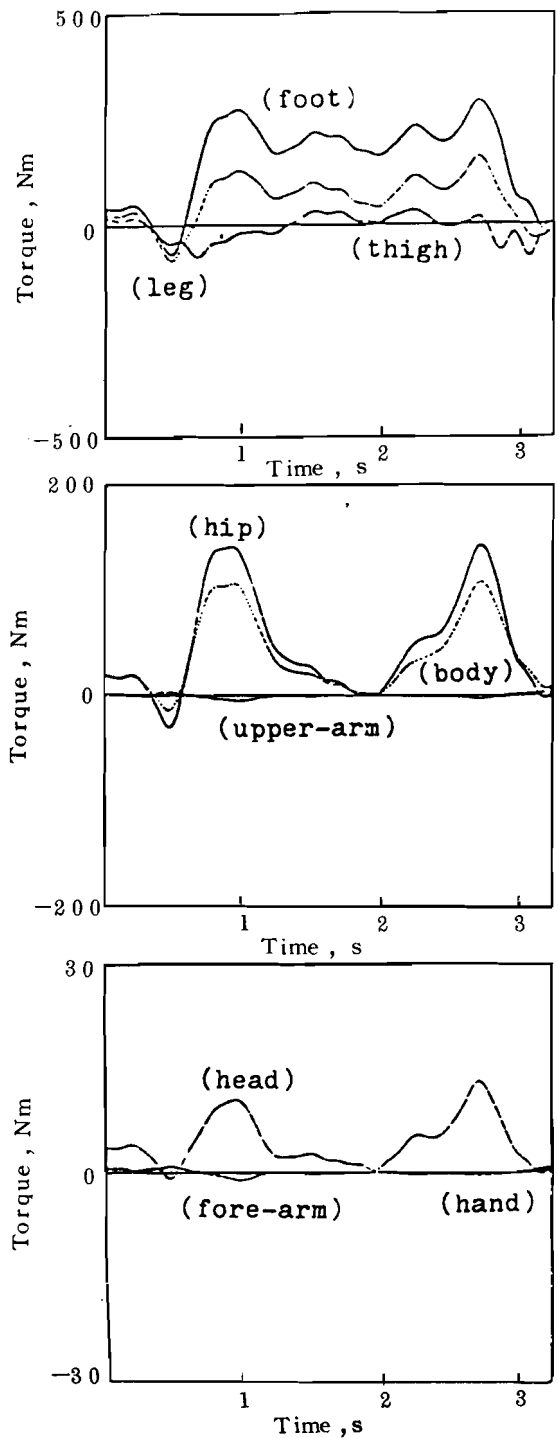


手をつく動作

被験者#13, 26歳

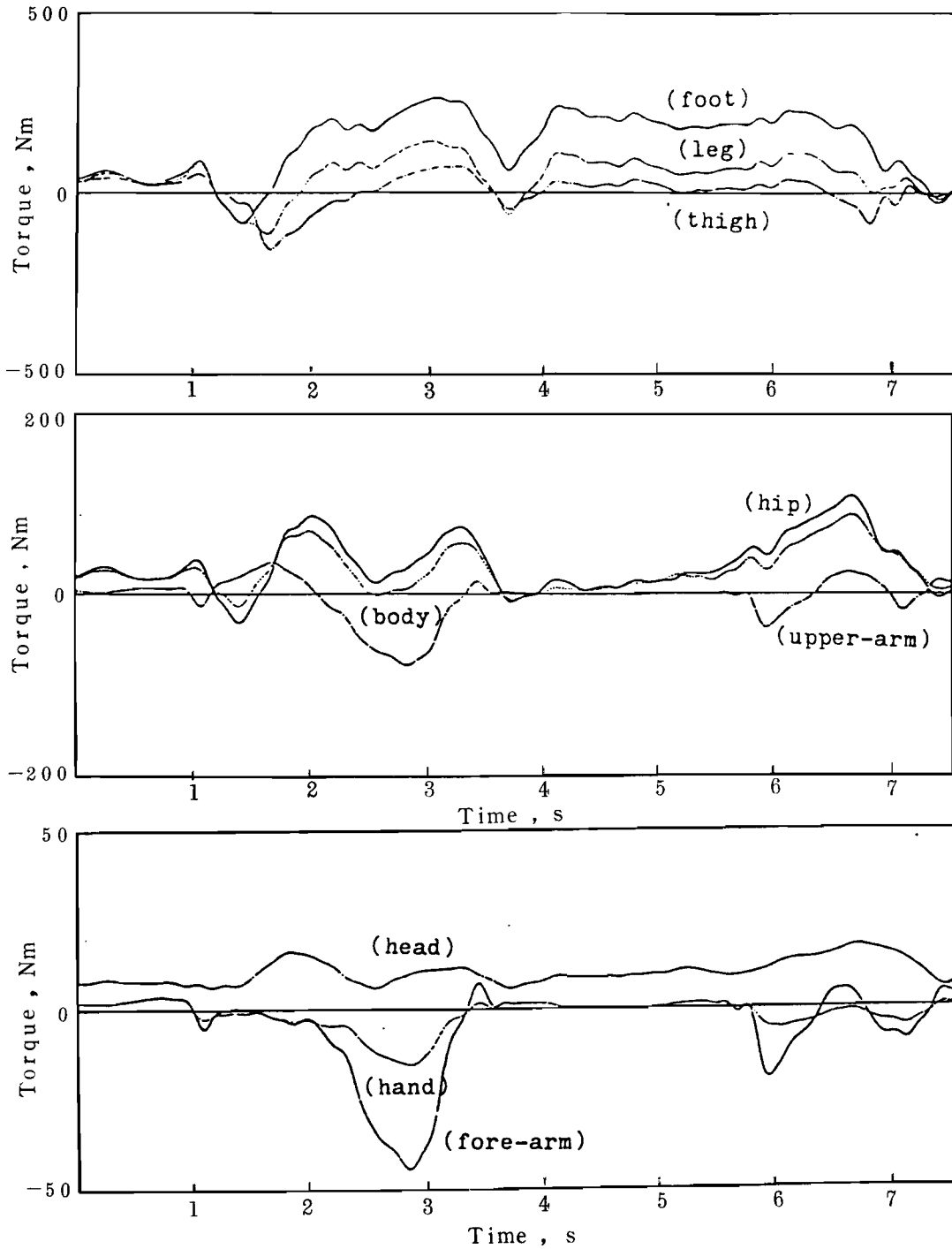
付録8 起立・着席動作における身体各部のトルク

(動作サイクル5回目)



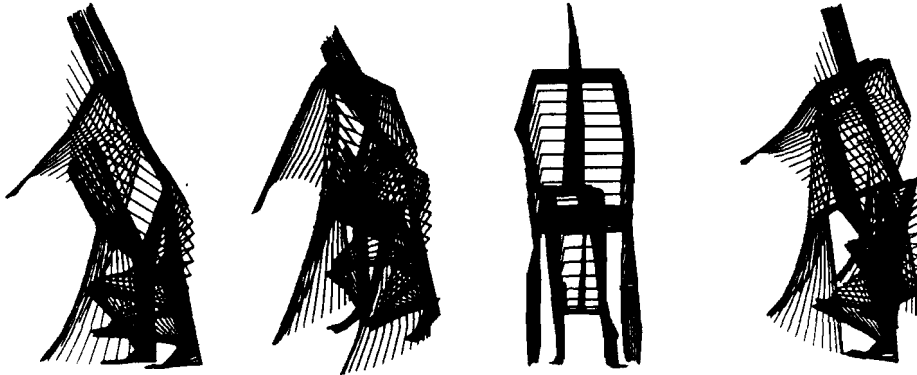
(a) 被験者#2, 80歳, 手をつかない動作 3.275秒

(動作サイクル5回目)

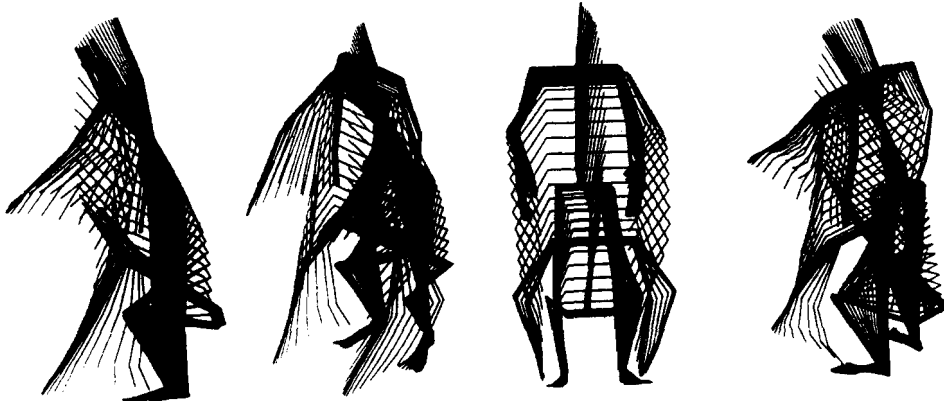


(b) 被験者#2, 80歳, 手をつく動作, 7.45秒

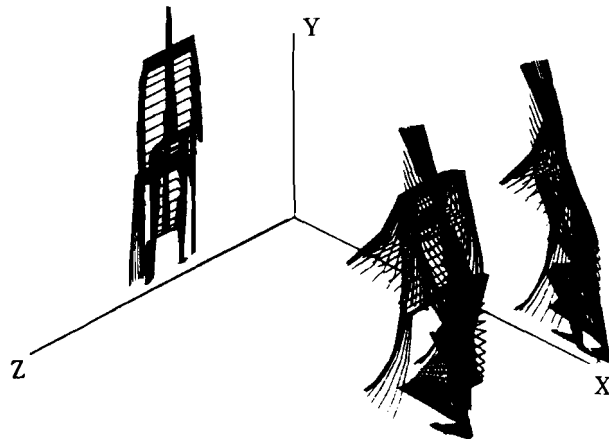
付録9 三次元荷役作業動作パターン



(a) 被験者#2, 23歳, 動作サイクル40回目

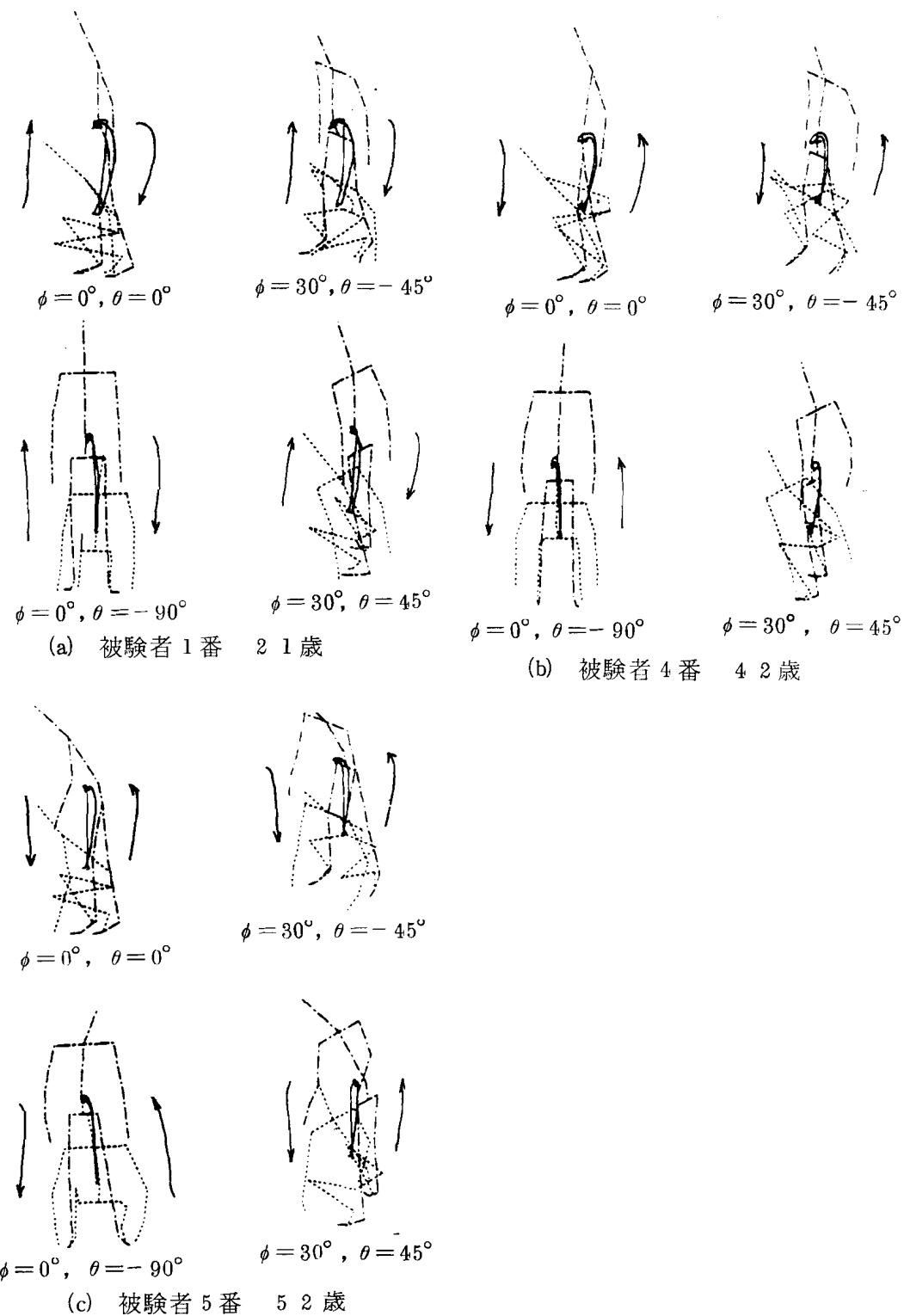


(b) 被験者#6, 53歳, 動作サイクル40回目

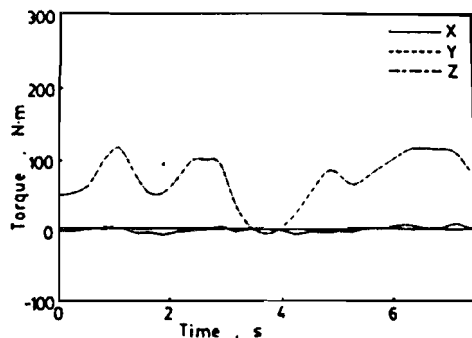
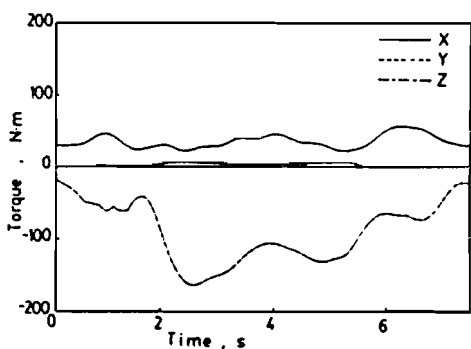


(c) 動作パターンの3面図表示, 被験者・動作サイクルについては(a)と同一

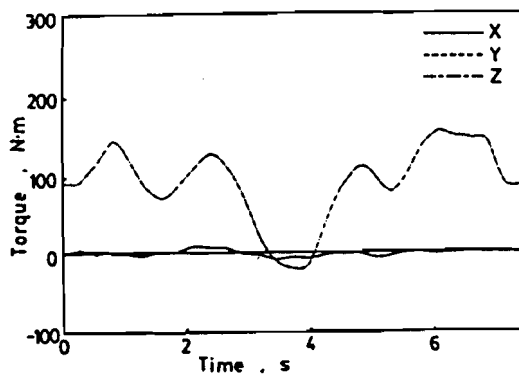
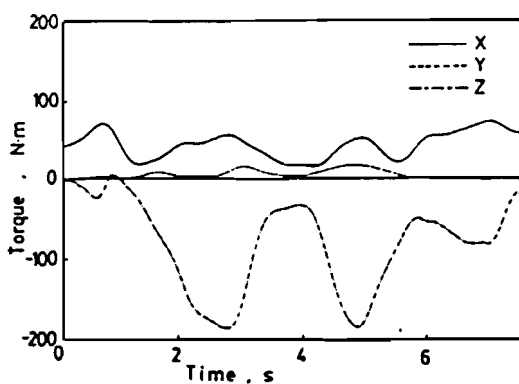
付録 10 荷役作業動作に伴う重心移動軌跡



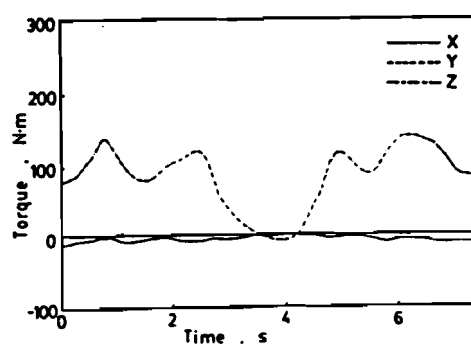
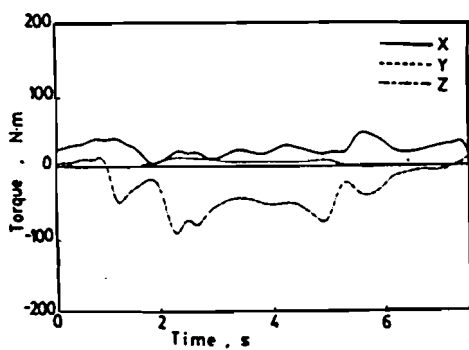
付録 11 荷役作業動作における身体各部のトルク



(a) 被験者 1 21 歳



(b) 被験者 6 53 歳



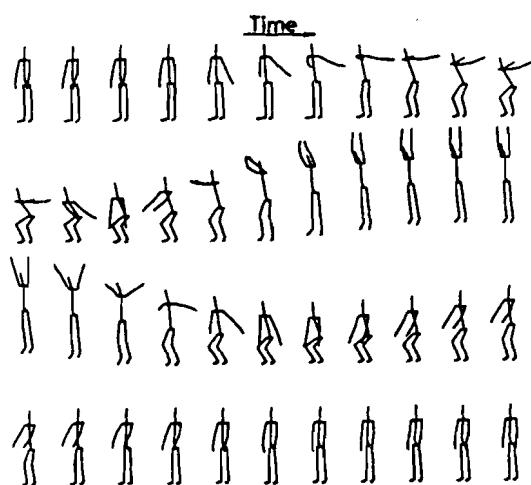
(c) 被験者 7 56 歳

右ひざ関節まわりのトルク

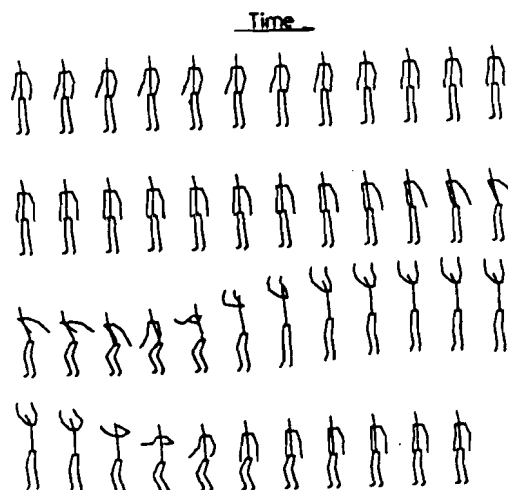
腰関節まわりのトルク

付録 12 垂直跳び動作パターン

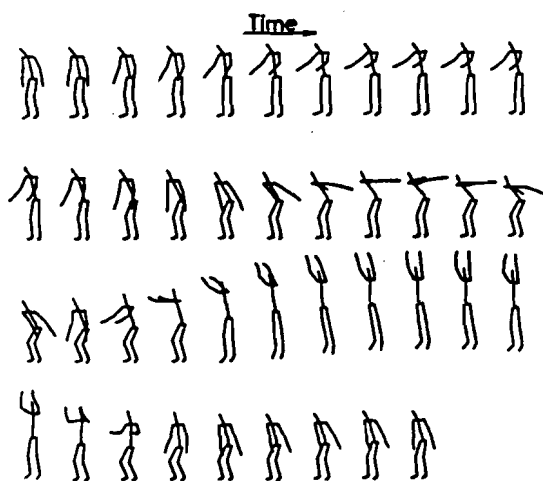
(時間間隔 0.07秒)



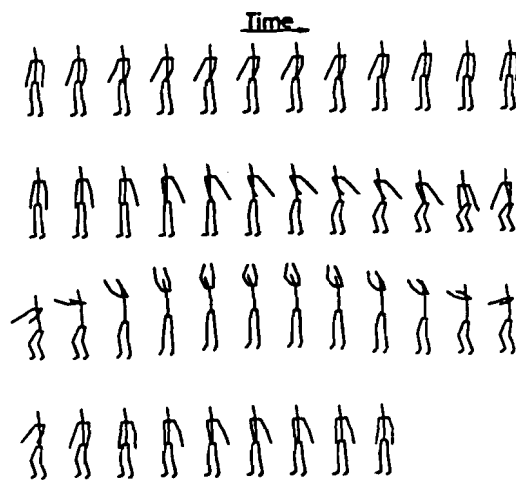
(a) 被験者 2 23 歳



(b) 被験者 3 42 歳

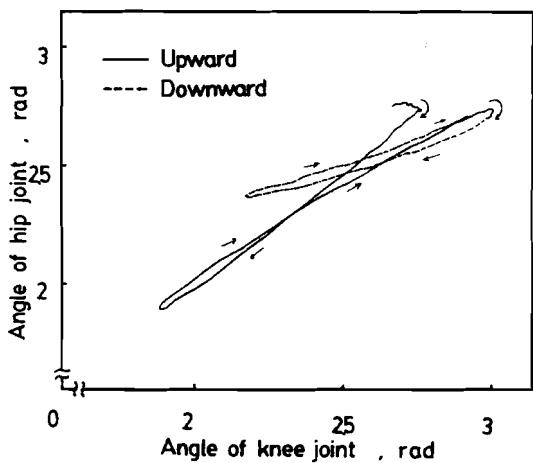


(c) 被験者 4 52 歳

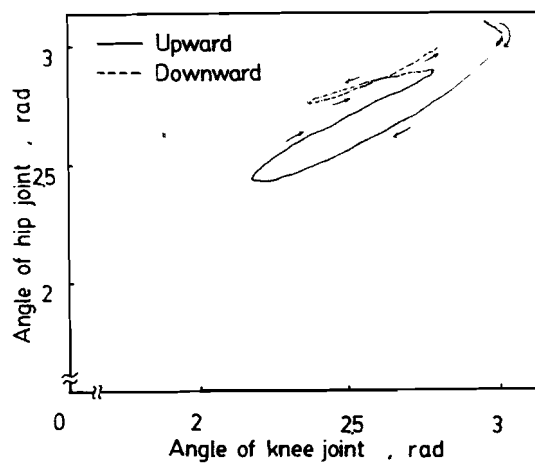


(d) 被験者 6 56 歳

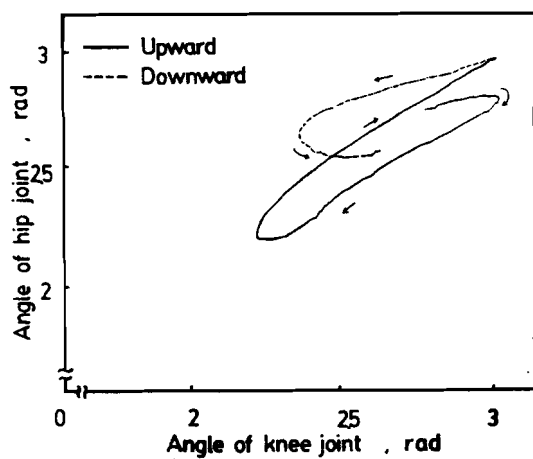
付録 13 垂直跳び動作におけるひざと腰角度の相関図



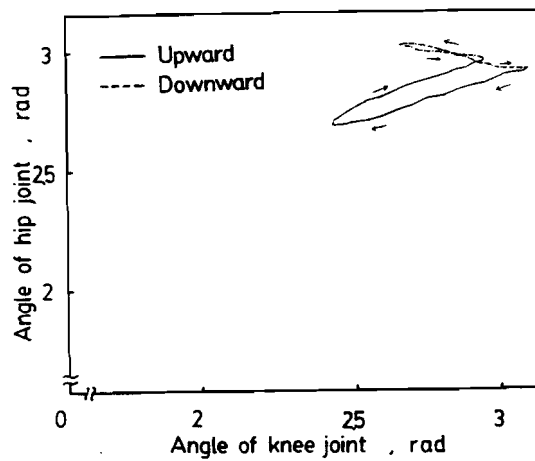
(a) 被験者 1 21 歳



(b) 被験者 3 42 歳

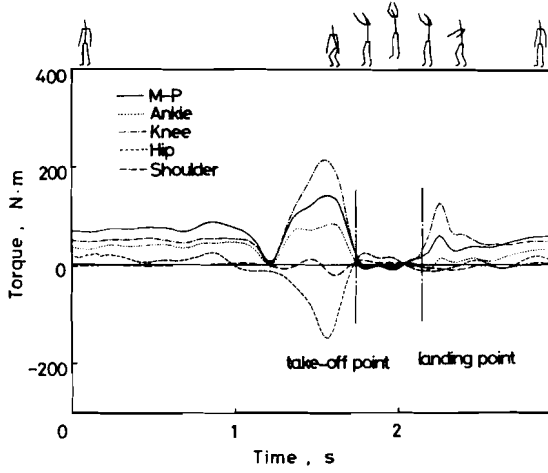


(c) 被験者 4 52 歳

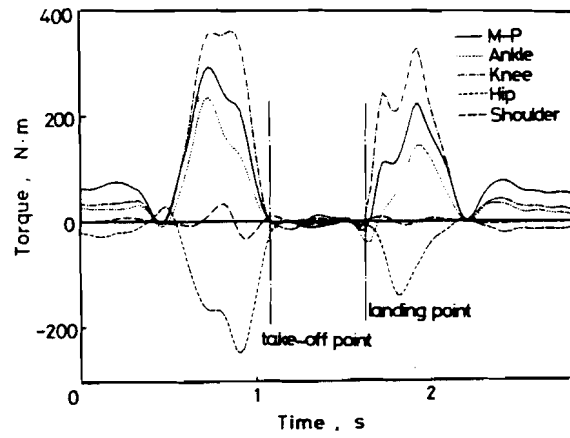


(d) 被験者 5 53 歳

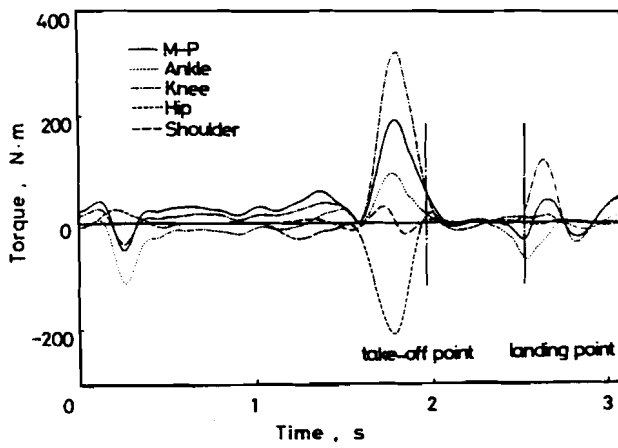
付録 14 垂直跳び動作における身体各部のトルク



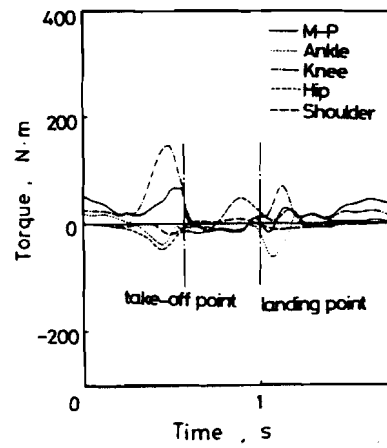
(a) 被験者 6 56 歳



(b) 被験者 2 23 歳



(c) 被験者 3 42 歳



(d) 被験者 5 53 歳

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
0002 %EMA(DATA,0)
0003 PROGRAM KPANS
0004 C -----FOR INPUT OF COORDINATE OF HUMAN MODEL CO'
0005 C -----REQUIRED SUB
0006 C          SRLPT,SRPLT,SRERS,SRTAB
0007          DIMENSION IDCB(144),IDCC(144),NAME(3),IXY(44),
0008          *          NL(3),ILL(21),IPIC(44),RA(22),JXY(44)
0009          COMMON/DATA/IL(12,21),IC(12,44)
0010          CHECK=10.
0011          NS1=18
0012          NS2=NS1-3
0013          NS3=22
0014          97 WRITE(6,99)
0015          99 FORMAT('*** INPUT PROGRAM OF COORDINATE ***'/
0016          */' IS THIS MODEL ON SAGITAL PLANE ? INPUT 0"
0017          */'          FRONTAL PLANE ?          1"')
0018          READ(6,98) IPL
0019          98 FORMAT(I1)
0020          IF(IPL.NE.0.AND.IPL.NE.1) GO TO 97
0021          WRITE(6,100)
0022          100 FORMAT(/"COORDINATE FILE NAME ? (A6)")
0023          READ(6,200) (NAME(I),I=1,3)
0024          200 FORMAT(3A2)
0025          WRITE(6,101)
0026          101 FORMAT(/"LENGTH FILE NAME ? (A6)")
0027          READ(6,200) (NL(I),I=1,3)
0028 C
0029          WRITE(6,700)
0030          700 FORMAT(/"INPUT ALLOWANCE Z (F4.1)")
0031          READ(6,701) CHECK
0032          701 FORMAT(F4.1)
0033          WRITE(6,102)
0034          102 FORMAT(/"INPUT NEXT FRAME NUMBER (I3)")
0035          READ(6,201) N
0036          201 FORMAT(I3)
0037          WRITE(6,666)
0038          666 FORMAT(/"ORIGIN (IXH,IYH) FOR EXAMPLE(2500,1000)")
0039          READ(6,*) IXH,IYH
0040          WRITE(6,667)
0041          667 FORMAT(/"ANIME RATE ? (F.) FOR EXAMPLE(0.3)")
0042          READ(6,668) RATE
0043          668 FORMAT(F10.0)
0044          CALL OPEN(IDCB,IERR,NAME,2,-1,3)
0045          IF(IERR.GE.0) GO TO 3000
0046          WRITE(6,4000) (NAME(I),I=1,3),IERR
0047          GO TO 801
0048          3000 WRITE(6,7000) (NAME(I),I=1,3),IERR
0049          7000 FORMAT("FILE ('.3A2,') OF TYPE",I2," WAS OPENED")
0050          CALL OPEN(IDCC,IERR,NL,2,-1,3)
0051          IF(IERR.GE.0) GO TO 3001
0052          WRITE(6,4000) (NL(I),I=1,3),IERR
0053          4000 FORMAT("FILE ('.3A2,') OPEN ERROR, CODE=",I5)
0054          GO TO 801
0055          3001 WRITE(6,7000) (NL(I),I=1,3),IERR
0056          WRITE(6,432)
0057          432 FORMAT(///"TO PUSH ANY KEY IS TO START")
0058          READ(6,433) KAWA
0059          433 FORMAT(A2)
0060          N=1
0061          999 NN=0
0062          516 CALL KPERS
0063          CALL CHOUT(31)
0064          IF(NN.GT.12) NN=0
0065          WRITE(6,103) M
0066          103 FORMAT(40X,"*** FRAME NUMBER",I5/)
0067          WRITE(6,104)
0068          21 IF(IPL.EQ.1) GO TO 2
0069          CALL CHOUT(31)
0070          104 FORMAT(50X,"PUSH PEN OF THE TABLET")
0071          DO 340 I=1,100
0072          CALL CHOUT(7)
0073          840 CONTINUE
0074          CALL CHOUT(31)
0075          CALL TAB(0,1,IX0,IY0)
0076          DO 555 K=1,30
0077          555 CONTINUE
0078          CALL CHOUT(7)

```

```

0079      IF (IX0.GT.3900.AND.IY0.GT.3900) GO TO 801
0080      DO 1 I=1,NS2
0081      CALL TAB(0,1,IX,IY)
0082      DO 556 K=1,30
0083      556 CONTINUE
0084      CALL CHOUT(7)
0085      IXY(I)=IX
0086      IXY(I+22)=IY
0087      IF (IX.GT.3900.AND.IY.GT.3900) GO TO 21
0088      1 CONTINUE
0089      IXY(NS1)=IXY(NS1-3)
0090      IXY(NS1+22)=IXY(NS1+19)
0091      IXY(NS1-3)=IXY(NS1-6)
0092      IXY(NS1-2)=IXY(NS1-5)
0093      IXY(NS1-1)=IXY(NS1-4)
0094      IXY(NS1+17)=IXY(NS1+16)
0095      IXY(NS1+20)=IXY(NS1+17)
0096      IXY(NS1+21)=IXY(NS1+18)
0097      NS=NS1
0098      GO TO 13
0099      2 DO 444 I=1,;00
0100      CALL CHOUT(7)
0101      444 CONTINUE
0102      CALL CHOUT(31)
0103      CALL TAB(0,1,IX0,IY0)
0104      DO 557 K=1,30
0105      557 CONTINUE
0106      CALL CHOUT(7)
0107      IF (IX0.GT.3900.AND.IY0.GT.3900) GO TO 801
0108      DO 11 I=1,NS3
0109      CALL TAB(0,1,IX,IY)
0110      DO 558 K=1,30
0111      558 CONTINUE
0112      CALL CHOUT(7)
0113      IXY(I)=IX
0114      IXY(I+22)=IY
0115      IF (IX.GT.3900.AND.IY.GT.3900) GO TO 2
0116      11 CONTINUE
0117      NS=NS3
0118      DO 108 I=1,NS
0119      IXY(I)=-1*(IXY(I)-IX0)
0120      IXY(I+22)=IXY(I+22)-IY0+IYM
0121      IF (IXY(I+22).LE.0) GO TO 802
0122      108 CONTINUE
0123      GO TO 109
0124      13 DO 3 I=1,NS
0125      IXY(I)=IXY(I)-IX0+IXM
0126      IXY(I+22)=IXY(I+22)-IY0+IYM
0127      IF (IXY(I).LE.0.OR.IXY(I+22).LE.0) GO TO 802
0128      3 CONTINUE
0129      109 NN=NN+1
0130      N=NN/4
0131      N=NN-N*4
0132      DO 4 I=1,NS
0133      IPIC(I)=FLOAT(IXY(I))*RATE+100.5
0134      IPIC(I+22)=FLOAT(IXY(I+22))*RATE+100.5
0135      4 CONTINUE
0136      CALL CHOUT(31)
0137      IF (N.NE.1) GO TO 5
0138      DO 6 I=1,NS
0139      IPIC(I+22)=IPIC(I+22)+1800
0140      6 CONTINUE
0141      GO TO 7
0142      5 IF (N.EQ.2) GO TO 7
0143      IF (N.NE.3) GO TO 8
0144      DO 9 I=1,NS
0145      IPIC(I)=IPIC(I)+1900
0146      IPIC(I+22)=IPIC(I+22)+1800
0147      9 CONTINUE
0148      GO TO 7
0149      8 DO 10 I=1,NS
0150      IPIC(I)=IPIC(I)+1900
0151      10 CONTINUE
0152      7 IF (IPL.EQ.1) GO TO 12
0153      IXX=IPIC(5)
0154      IYY=IPIC(27)
0155      CALL KPLPT(0,IXX,IYY)
0156      DO 14 I=6,14
0157      IXX=IPIC(I)
0158      IYY=IPIC(I+22)

```

```

0159 CALL KPLPT(1, IXX, IYY)
0160 CONTINUE
0161 14 IXX=IPIC(7)
0162 IYY=IPIC(31)
0163 CALL KPLPT(0, IXX, IYY)
0164 DO 15 I=1, 4
0165 II=5-I
0166 IXX=IPIC(II)
0167 IYY=IPIC(II+22)
0168 CALL KPLPT(1, IXX, IYY)
0169 15 CONTINUE
0170 IXX=IPIC(11)
0171 IYY=IPIC(33)
0172 CALL KPLPT(0, IXX, IYY)
0173 IXX=IPIC(18)
0174 IYY=IPIC(40)
0175 CALL KPLPT(1, IXX, IYY)
0176 GO TO 16
0177 12 IXX=IPIC(1)
0178 IYY=IPIC(23)
0179 CALL KPLPT(0, IXX, IYY)
0180 DO 17 I=2, 5
0181 IXX=IPIC(I)
0182 IYY=IPIC(I+22)
0183 CALL KPLPT(1, IXX, IYY)
0184 17 CONTINUE
0185 IXX=IPIC(11)
0186 IYY=IPIC(33)
0187 CALL KPLPT(1, IXX, IYY)
0188 IXX=IPIC(6)
0189 IYY=IPIC(28)
0190 CALL KPLPT(0, IXX, IYY)
0191 DO 18 I=7, 13
0192 IXX=IPIC(I)
0193 IYY=IPIC(I+22)
0194 CALL KPLPT(1, IXX, IYY)
0195 18 CONTINUE
0196 IXX=IPIC(14)
0197 IYY=IPIC(36)
0198 CALL KPLPT(0, IXX, IYY)
0199 DO 19 I=15, 17
0200 IXX=IPIC(I)
0201 IYY=IPIC(I+22)
0202 CALL KPLPT(1, IXX, IYY)
0203 19 CONTINUE
0204 IXX=IPIC(13)
0205 IYY=IPIC(35)
0206 CALL KPLPT(1, IXX, IYY)
0207 IXX=IPIC(18)
0208 IYY=IPIC(40)
0209 CALL KPLPT(0, IXX, IYY)
0210 DO 20 I=19, 21
0211 IXX=IPIC(I)
0212 IYY=IPIC(I+22)
0213 CALL KPLPT(1, IXX, IYY)
0214 20 CONTINUE
0215 IXX=IPIC(13)
0216 IYY=IPIC(35)
0217 CALL KPLPT(1, IXX, IYY)
0218 IXX=IPIC(22)
0219 IYY=IPIC(44)
0220 CALL KPLPT(1, IXX, IYY)
0221 16 IF(NN.NE.1) GO TO 23
0222 DO 22 I=1, NS
0223 IC(NN, I)=IXY(I)
0224 IC(NN, I+22)=IXY(I+22)
0225 22 CONTINUE
0226 CALL CPDIS(IPL, IXY, ILL)
0227 NSN=NS-1
0228 DO 60 I=1, NSN
0229 IL(NN, I)=ILL(I)
0230 60 CONTINUE
0231 GO TO 21
0232 23 CALL CPDIS(IPL, IXY, ILL)
0233 IF(IPL.EQ.1) GO TO 24
0234 DO 25 I=1, 18
0235 RA(I)=FLOAT(ILL(I))*CHECK/100.
0236 25 CONTINUE
0237 RA(3)=RA(2)
0238 RA(2)=RA(1)

```

```

0239 RA(7)=RA(6)
0240 RA(6)=RA(5)
0241 RA(10)=RA(9)
0242 RA(14)=RA(13)
0243 RA(11)=RA(17)
0244 RA(18)=RA(17)
0245 RA(17)=RA(16)
0246 GO TO 26
0247 24 DO 27 I=1,22
0248 RA(I)=FLOAT(ILL(I))*CHECK/100.
0249 27 CONTINUE
0250 RA(3)=RA(2)
0251 RA(2)=RA(1)
0252 RA(8)=RA(7)
0253 RA(7)=RA(6)
0254 RA(12)=RA(11)
0255 RA(22)=RA(21)
0256 RA(21)=RA(20)
0257 RA(20)=RA(18)
0258 RA(19)=RA(17)
0259 RA(18)=RA(17)
0260 RA(17)=RA(16)
0261 RA(16)=RA(14)
0262 RA(15)=RA(13)
0263 RA(14)=RA(13)
0264 RA(13)=RA(22)
0265 26 NNN=NN-1
0266 DO 50 JI=1,NNN
0267 DO 28 I=1,NS
0268 X=IC(JI,I)
0269 Y=IC(JI,I+22)
0270 A=IXY(I)
0271 B=IXY(I+22)
0272 R=(X-A)*(X-A)+(Y-B)*(Y-B)
0273 RA2=RA(I)*RA(I)
0274 IF(R.GT.RA2) GO TO 50
0275 28 CONTINUE
0276 KA=JI
0277 GO TO 52
0278 50 CONTINUE
0279 GO TO 29
0280 52 DO 30 I=1,NS
0281 IXY(I)=(FLOAT(IXY(I))+FLOAT(IC(KA,I)))/2.+0.5
0282 IXY(I+22)=(FLOAT(IXY(I+22))+FLOAT(IC(KA,I+22)))/2.+0.5
0283 IF(I.EQ.NS) GO TO 30
0284 ILL(I)=(FLOAT(ILL(KA,I))+FLOAT(ILL(I)))/2.+0.5
0285 30 CONTINUE
0286 IF(IPL.EQ.1) GO TO 750
0287 DO 40 I=1,4
0288 JXY(I)=IXY(I)
0289 JXY(I+5)=IXY(I+4)
0290 40 CONTINUE
0291 DO 41 I=1,4
0292 JXY(I+22)=IXY(I+22)
0293 JXY(I+27)=IXY(I+26)
0294 41 CONTINUE
0295 JXY(5)=IXY(9)
0296 JXY(27)=IXY(31)
0297 JXY(10)=IXY(9)
0298 JXY(32)=IXY(31)
0299 JXY(11)=IXY(9)
0300 JXY(33)=IXY(31)
0301 JXY(12)=IXY(10)
0302 JXY(34)=IXY(32)
0303 JXY(13)=IXY(11)
0304 JXY(35)=IXY(33)
0305 JXY(14)=IXY(14)
0306 JXY(36)=IXY(36)
0307 JXY(15)=IXY(13)
0308 JXY(37)=IXY(35)
0309 JXY(16)=IXY(12)
0310 JXY(38)=IXY(34)
0311 JXY(17)=IXY(11)
0312 JXY(39)=IXY(33)
0313 JXY(18)=IXY(17)
0314 JXY(40)=IXY(39)
0315 JXY(19)=IXY(16)
0316 JXY(41)=IXY(38)
0317 JXY(20)=IXY(15)
0318 JXY(42)=IXY(37)

```

```

0319     JXY(21)=IXY(11)
0320     JXY(43)=IXY(33)
0321     JXY(22)=IXY(18)
0322     JXY(44)=IXY(40)
0323     GO TO 751
0324 750 DO 752 J=1,NS
0325     JXY(J)=IXY(J)
0326     JXY(J+22)=IXY(J+22)
0327 752 CONTINUE
0328 751 CALL WRITF(IDC8,IERR,JXY,44,M)
0329     IF(IERR.EQ.0) GO TO 31
0330     CALL CHOUT(31)
0331     WRITE(6,300) NAME
0332     WRITE(6,2001) IERR
0333 300 FORMAT("FILE ('JA2,") WRITE ERROR STOP")
0334     GO TO 801
0335 31 CALL WRITF(IDCC,IERR,ILL,21,M)
0336     IF(IERR.EQ.0) GO TO 32
0337     CALL CHOUT(31)
0338     WRITE(6,300) NL
0339     WRITE(6,2001) IERR
0340 2001 FORMAT("ERROR NO.",I5)
0341     GO TO 801
0342 32 M=M+1
0343     CALL KPLPT(0,100,50)
0344     CALL CHOUT(31)
0345     DO 2000 IJ=1,30
0346 2000 CONTINUE
0347     WRITE(6,301)
0348 301 FORMAT(" *** NEXT FRAME PLEASE ! ----"/
0349     * " IF YOU STOP THEN PUSH THE STOP MARK -- ")
0350     DO 35 J=1,3
0351     CALL BEEP
0352 35 CONTINUE
0353     GO TO 999
0354 29 DO 36 I=1,NS
0355     IC(NN,I)=IXY(I)
0356     IC(NN,I+22)=IXY(I+22)
0357     IF(I.EQ.NS) GO TO 36
0358     IL(NN,I)=ILL(I)
0359 36 CONTINUE
0360 802 DO 37 I=1,1000
0361     CALL CHOUT(7)
0362 37 CONTINUE
0363     IF(N.EQ.0) GO TO 516
0364     GO TO 21
0365 801 CALL CLOSE(IDC8)
0366     CALL CLOSE(IDCC)
0367     CALL EXEC(6)
0368     END
0369 C
0370     SUBROUTINE CPDIS(IPL,IXY,ILL)
0371     DIMENSION IXY(44),ILL(21)
0372     F(X1,X2,Y1,Y2)=SQRT((X1-X2)*(X1-X2)+(Y1-Y2)*(Y1-Y2))
0373     IF(IPL.EQ.1) GO TO 24
0374     DO 25 I=1,13
0375     IF(I.EQ.4) GO TO 25
0376     X1=IXY(I)
0377     X2=IXY(I+1)
0378     Y1=IXY(I+22)
0379     Y2=IXY(I+23)
0380     ILL(I)=F(X1,X2,Y1,Y2)+0.5
0381 25 CONTINUE
0382     X1=IXY(4)
0383     X2=IXY(9)
0384     Y1=IXY(26)
0385     Y2=IXY(31)
0386     ILL(4)=F(X1,X2,Y1,Y2)+0.5
0387     DO 26 I=14,16
0388     ILL(I)=ILL(I-3)
0389 26 CONTINUE
0390     X1=IXY(11)
0391     X2=IXY(18)
0392     Y1=IXY(33)
0393     Y2=IXY(40)
0394     ILL(17)=F(X1,X2,Y1,Y2)+0.5
0395     RETURN
0396 24 DO 27 I=1,12
0397     IF(I.EQ.5) GO TO 27
0398     X1=IXY(I)

```

```

0399      X2=IXY(I+1)
0400      Y1=IXY(I+22)
0401      Y2=IXY(I+23)
0402      ILL(I)=F(X1,X2,Y1,Y2)+0.5
0403 27 CONTINUE
0404      X1=IXY(5)
0405      X2=IXY(11)
0406      Y1=IXY(27)
0407      Y2=IXY(33)
0408      ILL(5)=F(X1,X2,Y1,Y2)+0.5
0409      DO 28 I=14,16
0410      X1=IXY(I)
0411      X2=IXY(I+1)
0412      Y1=IXY(I+22)
0413      Y2=IXY(I+23)
0414      ILL(I-1)=F(X1,X2,Y1,Y2)+0.5
0415      X1=IXY(I+4)
0416      X2=IXY(I+5)
0417      Y1=IXY(I+26)
0418      Y2=IXY(I+27)
0419      ILL(I+3)=F(X1,X2,Y1,Y2)+0.5
0420 28 CONTINUE
0421      X1=IXY(13)
0422      Y1=IXY(35)
0423      X2=IXY(17)
0424      Y2=IXY(39)
0425      ILL(16)=F(X1,X2,Y1,Y2)+0.5
0426      X2=IXY(21)
0427      Y2=IXY(43)
0428      ILL(20)=F(X1,X2,Y1,Y2)+0.5
0429      X2=IXY(22)
0430      Y2=IXY(44)
0431      ILL(21)=F(X1,X2,Y1,Y2)+0.5
0432      RETURN
0433      END
0434      END$

```

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

```

0001 FTN4.L
0002 %ENA (XYZ,0)
0003 PROGRAM KPND5
0004 C 3-DIMENSIONAL ANIMATION
0005 C FOR 17-SEGMENTS
0006 C NORMAL VECTOR & LIGHT THROUGH MODE
0007 C MOBILIZED SUBROUTINE / SRPLT,SRLPT,SRERS,RRDTE,KRDSH
0008 DIMENSION IDCB(144),ID(66),NAM(3)
0009 COMMON /XYZ/X(436,22),Y(436,22)
0010 WRITE(6,101)
0011 101 FORMAT("FILE(3A2)")
0012 READ(6,102) (NAM(I),I=1,3)
0013 102 FORMAT(3A2)
0014 WRITE(6,105)
0015 105 FORMAT("SCALE(F.)")
0016 READ(6,108) SC
0017 108 FORMAT(F10.3)
0018 88 WRITE(6,100)
0019 100 FORMAT("KOMA/START,END,INTERVAL")
0020 READ(6,*) KS,KE,INT
0021 69 WRITE(6,103)
0022 103 FORMAT("EYE-POINT/FRONTAL,TRANSVERSE,TIME-LAG")
0023 READ(6,*) IST,IFA,ITH
0024 WRITE(6,200)
0025 200 FORMAT("MODE-KEY")
0026 READ(6,*) KSO
0027 ITH=ITH*1000
0028 P=3.1415926
0029 ST=FLOAT(IST)*P/180.
0030 FA=FLOAT(IFA)*P/180.*(-1.)
0031 CALL OPEN(IDCB,IERR,NAM,0,-1,3)
0032 DO 10 I=KS,KE,INT
0033 CALL READF(IDCB,IERR,ID,66,LEN,I)
0034 DO 10 JX=1,22
0035 JY=JX+22
0036 JZ=JX+44
0037 XS=ID(JX)
0038 YS=ID(JY)
0039 ZS=ID(JZ)
0040 CALL ROTE(ST,FA,XS,YS,ZS,XX,YY)
0041 X(I,JX)=XX
0042 Y(I,JX)=YY
0043 10 CONTINUE
0044 CALL CLOSE(IDCB)
0045 XMAX=-10000.
0046 YMAX=-10000.
0047 XMIN=10000.
0048 YMIN=10000.
0049 DO 21 I=KS,KE,INT
0050 DO 21 J=1,22
0051 IF(X(I,J).GT.XMAX) XMAX=X(I,J)
0052 IF(Y(I,J).GT.YMAX) YMAX=Y(I,J)
0053 IF(X(I,J).LT.XMIN) XMIN=X(I,J)
0054 IF(Y(I,J).LT.YMIN) YMIN=Y(I,J)
0055 21 CONTINUE
0056 IX0=1800.-XMIN*SC
0057 IY0=500.-YMIN*SC
0058 C
0059 43 CALL KPERS
0060 WRITE(6,107) IST,IFA
0061 107 FORMAT("EYE-POINT"/,"/," FRONTAL " ,IA," DEG."/,"/,"
0062 " " TRANSVERSE" ,IA," DEG.")
0063 CALL KPDSH(KSO)
0064 DO 11 I=KS,KE,INT
0065 DO 99 JK=1,ITH
0066 99 CONTINUE
0067 IXM=IX0+IFIX(X(I,11)*SC)
0068 IYM=IY0+IFIX(Y(I,11)*SC)
0069 IXS=IX0+IFIX(X(I,13)*SC)
0070 IYS=IY0+IFIX(Y(I,13)*SC)
0071 IXH=IX0+IFIX(X(I,22)*SC)
0072 IYH=IY0+IFIX(Y(I,22)*SC)
0073 DO 50 J=1,5
0074 KEY=1
0075 IX=IX0+IFIX(X(I,J)*SC)
0076 IY=IY0+IFIX(Y(I,J)*SC)
0077 IF(J.EQ.1) KEY=0
0078 CALL KPLPT(KEY,IX,IY)

```



```

0079      50 CONTINUE
0080      CALL KPLPT(1,IXM,IYM)
0081      DO 51 J=6,13
0082      KEY=1
0083      IX=IX0+IFIX(X(I,J)*SC)
0084      IY=IY0+IFIX(Y(I,J)*SC)
0085      IF(J.EQ.6) KEY=0
0086      CALL KPLPT(KEY,IX,IY)
0087      51 CONTINUE
0088      DO 52 J=14,17
0089      KEY=1
0090      IX=IX0+IFIX(X(I,J)*SC)
0091      IY=IY0+IFIX(Y(I,J)*SC)
0092      IF(J.EQ.14) KEY=0
0093      CALL KPLPT(KEY,IX,IY)
0094      52 CONTINUE
0095      CALL KPLPT(1,IXS,IYS)
0096      DO 53 J=18,21
0097      KEY=1
0098      IX=IX0+IFIX(X(I,J)*SC)
0099      IY=IY0+IFIX(Y(I,J)*SC)
0100      IF(J.EQ.18) KEY=0
0101      CALL KPLPT(KEY,IX,IY)
0102      53 CONTINUE
0103      CALL KPLPT(1,IXS,IYS)
0104      CALL KPLPT(1,IXH,IYH)
0105      CALL KPLPT(0,IXH,IYH)
0106      11 CONTINUE
0107      CALL KPLPT(0,50,50)
0108      KSO=0
0109      CALL KPDSH(KSO)
0110      CALL CHOUT(31)
0111      WRITE(6,106)
0112      106 FORMAT('EYE-POINT/0,KOMA/1,MORE/2,MODE-KEY')
0113      READ(6,*) IEP,KSO
0114      IF(IEP.EQ.0) GO TO 69
0115      IF(IEP.EQ.1) GO TO 88
0116      IF(IEP.EQ.2) GO TO 43
0117      CALL EXEC(6)
0118      END
0119      C
0120      SUBROUTINE ROTE(ST,FA,XS,YS,ZS,XX,YY)
0121      SS=SIN(ST)
0122      CS=COS(ST)
0123      SF=SIN(FA)
0124      CF=COS(FA)
0125      XX=CF*XS-SF*ZS
0126      YY=-SS*SF*XS+CS*YS-SS*CF*ZS
0127      RETURN
0128      END
0129      END*

```

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

```

0001 FTN4.L
0002 $ENA(DATA,0)
0003 PROGRAM KPSP3
0004 C-----CALCULATION OF LINEAR ACCELERATION AGAINST
0005 C THE GROUND
0006 C-----REQUIRED SUB "KRSPL"
0007 COMMON /DATA/A1(370,66),A2(370,66)
0008 DIMENSION IDCA(144),IDCB(272),NAM1(3),NAM2(3),
0009 * IXY(66),AC(66),JI(22),X(50),Y(50),YY(390),
0010 * YY1(370),YY2(370),IDCC(272),NAM3(3),Z(50)
0011 DIMENSION IPARA(5)
0012 EQUIVALENCE(LU,IPARA)
0013 CALL RMPAR(IPARA)
0014 WRITE(LU,100)
0015 100 FORMAT('*** CALCULATION OF LINEAR ACCELERATION',
0016 * " AGAINST THE GROUND ***")
0017 IYE=IHY
0018 WRITE(LU,105)
0019 105 FORMAT(/"HAVE YOU CREATED 2 FILES OF LINEAR ",
0020 * "ACCELERATION ? (Y/N)"/" FOR EXAMPLE.",
0021 * "(CR,WA1101:-1:3:2:450:132)"/
0022 * "(WA2101)")
0023 READ(LU,106) IY
0024 106 FORMAT(A2)
0025 IF(IY.EQ.IYE) GO TO 34
0026 CALL EXEC(6)
0027 34 WRITE(LU,101)
0028 101 FORMAT(/"HOW MANY FRAMES ? (*)")
0029 READ(LU,*) NF
0030 NI=NF/40+1
0031 MM=MOD(NF,40)
0032 IF(MM.EQ.0) NI=NI-1
0033 1001 WRITE(LU,108) NI
0034 108 FORMAT(/" INTERVAL OF RE-SAMPLING ? (*)")
0035 * /"IT MUST BE GREATER EQUAL",13)
0036 READ(LU,*) IR
0037 IF(IR.LT.NI) GO TO 1001
0038 WRITE(LU,109)
0039 109 FORMAT(/" START OF RE-SAMPLING ? (*)")
0040 READ(LU,*) IS
0041 WRITE(LU,102)
0042 102 FORMAT(/" WHAT IS FILE NAME OF COORDINATE(A6)?"/
0043 * " ** THE COORDINATE DATA MUST BE SMOOTH **")
0044 READ(LU,200) (NAM1(I),I=1,3)
0045 200 FORMAT(3A2)
0046 WRITE(LU,104)
0047 104 FORMAT(/" WHAT IS THE 1ST FILE NAME OF LINEAR ACCELERATION (A6) ?")
0048 READ(LU,200) (NAM2(I),I=1,3)
0049 WRITE(LU,103)
0050 103 FORMAT(/" WHAT IS THE 2ND FILE NAME OF LINEAR ACCELERATION (A6) ?")
0051 READ(LU,200) (NAM3(I),I=1,3)
0052 CALL OPEN(IDCA,IERR,NAM1,2,-1,3)
0053 IF(IERR.GE.0) GO TO 1
0054 WRITE(LU,300) (NAM1(I),I=1,3),IERR
0055 300 FORMAT(/"FILE(",3A2,") OPEN ERROR",I5)
0056 CALL EXEC(6)
0057 1 CALL OPEN(IDCB,IERR,NAM2,2,-1,3)
0058 IF(IERR.GE.0) GO TO 2
0059 WRITE(LU,300) (NAM2(I),I=1,3),IERR
0060 CALL CLOSE(IDCA)
0061 CALL EXEC(6)
0062 2 CALL OPEN(IDCC,IERR,NAM3,2,-1,3)
0063 IF(IERR.GE.0) GO TO 10
0064 WRITE(LU,300) (NAM3(I),I=1,3),IERR
0065 CALL CLOSE(IDCA)
0066 CALL CLOSE(IDCB)
0067 CALL EXEC(6)
0068 10 WRITE(LU,801)
0069 801 FORMAT(/"INPUT ENLARGING SCALE ON GRAPHIC TABLET"/
0070 * " HOW MANY POINTS(P) ON GRAPHIC TABLET ARE EQUIVALENT ",
0071 * "TO WHAT METER (WM) ?"/
0072 * " INPUT P & WM IN ORDER THAT (F15.5)")
0073 READ(LU,802) P
0074 802 FORMAT(F15.5)
0075 WRITE(LU,803) P
0076 803 FORMAT(/F15.5, " SURE ? (Y/N)")
0077 READ(LU,106) IY
0078 IF(IY.NE.IYE) GO TO 10

```

```

0079 READ(LU,802) WM
0080 WRITE(LU,803) WM
0081 READ(LU,106) IY
0082 IF(IY.NE.IYE) GO TO 10
0083 PWM=WM/P
0084 WRITE(LU,107)
0085 107 FORMAT(// "WAIT A MINUTE ... ")
0086 A40=1./45.7
0087 X00=0.
0088 X11=FLOAT(NF-1)*A40
0089 DO 3 I=1,20
0090 JI(I)=1
0091 3 CONTINUE
0092 JI(5)=6
0093 JI(13)=9
0094 JI(17)=-4
0095 JI(21)=-8
0096 JI(22)=-9
0097 DO 4 J=1,3
0098 JJ=J+1
0099 IF(J.EQ.3) JJ=1
0100 DO 5 K=1,22
0101 K2=K+(JJ-1)*22
0102 K1=K+(J-1)*22
0103 K3=K1+JI(K)
0104 K4=K2+JI(K)
0105 II=0
0106 DO 6 I=IS,NF,IR
0107 II=II+1
0108 N=I
0109 CALL READF(IDCA,IERR,IXY,66,LEN,N)
0110 IF(IERR.EQ.0) GO TO 7
0111 WRITE(LU,210) (NAM1(IJ),IJ=1,3),IERR
0112 210 FORMAT(/"FILE (" ,JA2,") READ ERROR",I5)
0113 GO TO 900
0114 7 X1=IXY(K1)
0115 Y1=IXY(K2)
0116 X2=IXY(K3)
0117 Y2=IXY(K4)
0118 X(II)=A40*FLOAT(I-1)
0119 IF(J.EQ.2) GO TO 8
0120 Y(II)=(X1+X2)*PWM/2.
0121 Z(II)=(Y1+Y2)*PWM/2.
0122 GO TO 6
0123 8 Y(II)=(Y1+Y2)*PWM/2.
0124 Z(II)=(X1+X2)*PWM/2.
0125 6 CONTINUE
0126 CALL KSPL(II,X,Y,X00,X11,A40,YY0,YY1,YY2)
0127 DO 9 I=1,NF
0128 A1(I,K1)=YY2(I)
0129 9 CONTINUE
0130 CALL KSPL(II,X,Z,X00,X11,A40,YY0,YY1,YY2)
0131 DO 11 I=1,NF
0132 A2(I,K1)=YY2(I)
0133 11 CONTINUE
0134 5 CONTINUE
0135 4 CONTINUE
0136 DO 12 I=1,NF
0137 N=I
0138 DO 23 J=1,66
0139 AC(J)=A1(I,J)
0140 23 CONTINUE
0141 CALL WRITF(IDCB,IERR,AC,132,N)
0142 IF(IERR.EQ.0) GO TO 12
0143 WRITE(LU,401) (NAM2(II),II=1,3),IERR
0144 401 FORMAT(/"FILE (" ,JA2,") WRITE ERROR",I5)
0145 GO TO 900
0146 12 CONTINUE
0147 DO 13 I=1,NF
0148 N=I
0149 DO 14 J=1,66
0150 AC(J)=A2(I,J)
0151 14 CONTINUE
0152 CALL WRITF(IDCC,IERR,AC,132,N)
0153 IF(IERR.EQ.0) GO TO 13
0154 WRITE(LU,401) (NAM3(II),II=1,3),IERR
0155 GO TO 900
0156 13 CONTINUE
0157 WRITE(LU,500)
0158 500 FORMAT(// " CALCULATION COMPLETE ! ")

```

```

0159      26 WRITE(LU,505)
0160      505 FORMAT(// " DO YOU CHECK ANY DATA ? (Y/N)")
0161      READ(LU,106) IY
0162      IF(IY.EQ.IYE) GO TO 24
0163      GO TO 900
0164      24 WRITE(LU,501)
0165      501 FORMAT(// "INPUT FRAME # (*)")
0166      READ(LU,*) NFR
0167      CALL READF(IDCBIERR,AC,132,LEN,NFR)
0168      IF(IERR.EQ.0) GO TO 25
0169      WRITE(LU,403) (NAM2(II),II=1,3),IERR
0170      403 FORMAT(// "FILE (" ,3A2,") READ ERROR",I5)
0171      GO TO 900
0172      25 WRITE(7,502) NFR
0173      502 FORMAT(///1H0, "*** LINEAR ACCELERATION (I) AT FRAME # ",I3)
0174      WRITE(7,503) (I,AC(I),I=1,66)
0175      503 FORMAT(1H0,11(I4,F7.2))
0176      CALL READF(IDCCIERR,AC,132,LEN,NFR)
0177      IF(IERR.EQ.0) GO TO 27
0178      WRITE(LU,403) (NAM3(II),II=1,3),IERR
0179      GO TO 900
0180      27 WRITE(7,504) NFR
0181      504 FORMAT(///1H0, "*** LINEAR ACCELERATION (J) AT FRAME # ",I3)
0182      WRITE(7,503) (I,AC(I),I=1,66)
0183      GO TO 26
0184      900 CALL CLOSE(IDCBI)
0185      CALL CLOSE(IDCBI)
0186      CALL CLOSE(IDCCI)
0187      CALL EXEC(6)
0188      END
0189      END$

```

```

0001 FTNA
0002 SUBROUTINE KSPL(N,X,Y,X0,X1,DX,YY0,YY1,YY2)
0003 C
0004 C SPLINE NI YORU HOKAN NO PROGRAM
0005 C
0006 DIMENSION X(50),Y(50),PX(50),PY(50),TX(50),TY(50),
0007 1A(40,80),AX(50),AY(50),BX(50),BY(50),YY1(370),YY2(370)
0008 2,YY0(370)
0009 C GYAKU GYORETSU
0010 N1=N+1
0011 N2=N+N
0012 N3=N-1
0013 DO 101 I=1,N
0014 DO 101 J=1,N
0015 A(I,J)=0.0
0016 101 CONTINUE
0017 A(1,1)=2.0
0018 A(1,2)=1.0
0019 A(N,N3)=1.0
0020 A(N,N)=2.0
0021 DO 102 K=3,N
0022 K1=K-2
0023 K2=K-1
0024 A(K2,K1)=1.0
0025 A(K2,K2)=4.0
0026 A(K2,K)=1.0
0027 102 CONTINUE
0028 DO 103 I=1,N
0029 DO 103 J=N1,N2
0030 IF(J-I-N)11,12,11
0031 11 A(I,J)=0.0
0032 GO TO 103
0033 12 A(I,J)=1.0
0034 103 CONTINUE
0035 DO 104 L=1,N
0036 I=L
0037 J=L
0038 13 G1=ABS(A(I,J))
0039 X=I
0040 14 I=I+1
0041 IF(I-N)15,15,16
0042 15 IF(G1-ABS(A(I,J)))13,14,14
0043 16 IF(G1)200,200,17
0044 DO 105 J=L,N2
0045 G2=A(L,J)
0046 A(L,J)=A(K,J)
0047 A(K,J)=G2
0048 105 CONTINUE
0049 G3=A(L,L)
0050 DO 106 J=L,N2
0051 A(L,J)=A(L,J)/G3
0052 106 CONTINUE
0053 DO 111 I=1,N
0054 IF(I-L)18,111,18
0055 18 G4=A(I,L)
0056 DO 112 J=L,N2
0057 A(I,J)=A(I,J)-G4*A(L,J)
0058 112 CONTINUE
0059 111 CONTINUE
0060 104 CONTINUE
0061 C
0062 C KEISU
0063 200 PX(1)=3.0*(X(2)-X(1))
0064 PY(1)=3.0*(Y(2)-Y(1))
0065 PX(N)=3.0*(X(N)-X(N3))
0066 PY(N)=3.0*(Y(N)-Y(N3))
0067 DO 107 I=2,N3
0068 I1=I+1
0069 I3=I-1
0070 PX(I)=3.0*(X(I1)-X(I3))
0071 PY(I)=3.0*(Y(I1)-Y(I3))
0072 107 CONTINUE
0073 DO 108 I=1,N
0074 TX(I)=0.0
0075 TY(I)=0.0
0076 108 CONTINUE
0077 DO 109 I=1,N
0078 DO 109 J=N1,N2

```

```

0079      K=J-N
0080      TX(I)=TX(I)+A(I,J)*PX(K)
0081      TY(I)=TY(I)+A(I,J)*PY(K)
0082 109 CONTINUE
0083      DO 110 I=1,N3
0084      I1=I+1
0085      AX(I)=2.0*(X(I)-X(I1))+TX(I)+TX(I1)
0086      AY(I)=2.0*(Y(I)-Y(I1))+TY(I)+TY(I1)
0087      BX(I)=3.0*(X(I1)-X(I))-2.0*TX(I)-TX(I1)
0088      BY(I)=3.0*(Y(I1)-Y(I))-2.0*TY(I)-TY(I1)
0089 110 CONTINUE
0090 C
0091 C      3JI HOTEISIKI
0092      XX=X0
0093      IXX=1
0094 300 IF(X(N)-XX)21,21,22
0095      21 I=N-1
0096      M=1
0097      GO TO 500
0098      22 I=N-1
0099      26 IF(X(I)-XX)23,24,25
0100      23 M=-1
0101      GO TO 500
0102      24 M=0
0103      GO TO 500
0104      25 I=I-1
0105      GO TO 26
0106 500 A1=AX(I)
0107      A2=AY(I)
0108      B1=BX(I)
0109      B2=BY(I)
0110      C1=TX(I)
0111      C2=TY(I)
0112      D1=X(I)-XX
0113      D2=Y(I)
0114      IF(M)27,28,29
0115      28 U=0
0116      GO TO 600
0117      29 U=1
0118      GO TO 600
0119      27 IF(A1)31,32,31
0120      32 IF(B1)33,34,33
0121      34 U=-D1/C1
0122      GO TO 600
0123      33 H=C1*C1-4.0*B1*D1
0124      IF(H)35,35,36
0125      35 U=-C1/2.0/H1
0126      GO TO 600
0127      36 U1=(-C1+SQRT(H))/2.0/B1
0128      U2=(-C1-SQRT(H))/2.0/B1
0129      GO TO 700
0130      31 P=-B1*B1/9.0/A1/A1+C1/3.0/A1
0131      Q=2.0*B1*B1*B1/27.0/A1/A1/A1-B1*C1/3.0/A1/A1+D1/A1
0132      H=Q*Q+4.0*P*P*P
0133      IF(H)37,38,39
0134      39 W=(-Q+SQRT(H))/2.0
0135      V=(-Q-SQRT(H))/2.0
0136      IF(W)41,42,43
0137      43 E=W**(1.0/3.0)
0138      GO TO 47
0139      42 E=0.0
0140      GO TO 47
0141      41 E=(-W)**(1.0/3.0)
0142      47 IF(V)44,45,46
0143      46 F=V**(1.0/3.0)
0144      GO TO 48
0145      45 F=0.0
0146      GO TO 48
0147      44 F=(-V)**(1.0/3.0)
0148      48 R=E+F
0149      U=R-B1/3.0/A1
0150      GO TO 600
0151      38 W=-Q/2.0
0152      IF(W)51,52,53
0153      53 E=W**(1.0/3.0)
0154      GO TO 54
0155      52 E=0.0
0156      GO TO 54
0157      51 E=(-W)**(1.0/3.0)
0158      54 R=E+E

```

```

0159      S=-(E+F)/2.0
0160      U1=R-B1/3.0/A1
0161      U2=S-B1/3.0/A1
0162 700 IF(U1)55,56,56
0163      56 IF(U1-1.0)57,57,55
0164      57 U=U1
0165      GO TO 600
0166      55 U=U2
0167      GO TO 600
0168      37 ZR=3.14159265
0169      IF(D)58,59,58
0170      59 Z=ZR/2.0
0171      GO TO 62
0172      58 Z=ATAN(SQRT(-H)/(-Q))
0173      IF(Z)61,62,62
0174      61 Z=ZR+Z
0175      62 IF(P)63,64,64
0176      63 R=2.0*SQRT(-P)*COS(Z/3.0)
0177      S=-2.0*SQRT(-P)*COS((ZR-Z)/3.0)
0178      T=-2.0*SQRT(-P)*COS((ZR+Z)/3.0)
0179      GO TO 65
0180      64 R=0.0
0181      S=0.0
0182      T=0.0
0183      65 U1=R-B1/3.0/A1
0184      U2=S-B1/3.0/A1
0185      U3=T-B1/3.0/A1
0186      IF(U1)66,67,67
0187      67 IF(U1-1.0)68,68,66
0188      68 U=U1
0189      GO TO 600
0190      66 IF(U2)71,72,72
0191      72 IF(U2-1.0)73,73,71
0192      73 U=U2
0193      GO TO 600
0194      71 U=U3
0195 600 Y0=A2*U*U+B2*U*U+C2*U+D2
0196      YY=3.0*A1*U*U+2.0*B1*U+C1
0197      Y1=(3.0*A2*U*U+2.0*B2*U+C2)/YY
0198      Y2=(6.0*(B1*A2-A1*B2)*U*U+6.0*(C1*A2-A1*C2)*U+2.0*(C1*B2-B1*C2))
0199      1/YY/YY/YY
0200      YY2(IXX)=Y2
0201      YY1(IXX)=Y1
0202      YY0(IXX)=Y0
0203      XX=XX+DX
0204      IXX=IXX+1
0205      IF(X1-XX+DX/2.0)400,300,300
0206 400 RETURN
0207      END
0208      END*

```

付録 18 オイラー角算出プログラム

```

0001 FTNA,L,D
0002 $EMA(EXT,0)
0003 PROGRAM KPTED
0004 COMMON PI,DP
0005 COMMON /EXT/IC(200,93),DX(200,66)
0006 DIMENSION IDCB(272),DY(66),ID(69),NAMC(3),NAMT(3),
0007 1 THE(2),PSI(2),PHI(2),DT(2),DSI(2),DN(2),IP(5),
0008 2 ISG(18),NAME(3),IYS(21,2)
0009 EQUIVALENCE(LU,IP)
0010 DATA IYS/1,2,3,4,6,7,8,9,11,12,15,16,17,19,20,21,13,12,25
0011 1,28,30,2,3,4,5,7,8,9,10,12,13,14,15,16,18,19,20,22,23,24,29,31/
0012 DATA ISG/1,1,1,-1,1,1,1,-1,1,1,-1,1,1,-1,1,1,-1,1,1/
0013 CALL RMPAR(IP)
0014 IF(LU.LE.0) LU=1
0015 WRITE(LU,99)
0016 99 FORMAT("STANDING(1) OR SITTING(0) _")
0017 READ(LU,*) IMOT
0018 NJ=1
0019 IF(IMOT.EQ.0) NJ=9
0020 WRITE(LU,100)
0021 100 FORMAT("COORDINATE DATA FILE _")
0022 READ(LU,101) NAMC
0023 101 FORMAT(3A2)
0024 WRITE(LU,102)
0025 102 FORMAT("TORSION DATA FILE _")
0026 READ(LU,101) NAMT
0027 WRITE(LU,103)
0028 103 FORMAT("EULER'S ANGLE FILE _")
0029 READ(LU,101) NAME
0030 WRITE(LU,104)
0031 104 FORMAT("NUMBER OF FRAMES _")
0032 READ(LU,*) XT
0033 C DEFINITION OF CONSTANTS
0034 PI=3.14159265
0035 DP=6.28318530
0036 ER=0.01
0037 THR=0.4
0038 C OBTAIN DATA FROM 2 FILES
0039 CALL OPEN(IDC, IERR, NAMC, 0, -1, 3)
0040 IF(IERR.LT.0) CALL ERROR(LU, IERR, NAMC, 4HOPEN)
0041 DO 1 I=1,KT
0042 CALL READF(IDC, IERR, ID, 69, LEN, I)
0043 IF(IERR.LT.0) CALL ERROR(LU, IERR, NAMC, 4HREAD)
0044 DO 1 JX=1,23
0045 JY=JX+31
0046 JZ=JX+52
0047 IC(I, JX)=ID(JX)
0048 IC(I, JY)=ID(JX+23)
0049 1 IC(I, JZ)=ID(JX+46)
0050 CALL CLOSE(IDC)
0051 C
0052 CALL OPEN(IDC, IERR, NAMT, 0, -1, 3)
0053 IF(IERR.LT.0) CALL ERROR(LU, IERR, NAMT, 4HOPEN)
0054 DO 2 I=1,KT
0055 CALL READF(IDC, IERR, ID, 36, LEN, I)
0056 IF(IERR.LT.0) CALL ERROR(LU, IERR, NAMT, 4HREAD)
0057 DO 3 J=1,2
0058 JX=J+23
0059 JY=J+54
0060 JZ=J+85
0061 IC(I, JX)=ID(J)
0062 IC(I, JY)=ID(J+1?)
0063 3 IC(I, JZ)=ID(J+24)
0064 DO 310 J=5,8
0065 JX=J+23
0066 JY=J+54
0067 JZ=J+85
0068 JW=J+2
0069 IF(J.GT.6) JW=J+4
0070 IC(I, JX)=ID(JW)
0071 IC(I, JY)=ID(JW+12)
0072 310 IC(I, JZ)=ID(JW+24)
0073 DO 4 J=1,2
0074 JX=J+25
0075 JY=J+56
0076 JZ=J+87
0077 JT=6+(J-1)*4
0078 IC(I, JX)=(ID(JT)+ID(JT+2))/2

```



```

0079      IC(I,JY)=(ID(JT+12)+ID(JT+14))/2
0080      4  IC(I,JZ)=(ID(JT+24)+ID(JT+26))/2
0081      2  CONTINUE
0082      CALL CLOSE(IDC8)
0083      C
0084      KL=FLOAT(KT)*FLOAT(19-NJ)*0.1
0085      KI=0
0086      C IDENTIFY DIRECTION OF COORDINATE AXES
0087      DO 5 J=NJ,18
0088      ICON=0
0089      J1=J+1
0090      IF(J.EQ.4.OR.J.EQ.8.OR.J.EQ.13.OR.J.EQ.16) J1=J-1
0091      IF(J.EQ.3) J1=20
0092      IF(J.EQ.7) J1=21
0093      NYS=IYS(J,1)
0094      NYE=IYS(J,2)
0095      NZS=IYS(J1,1)
0096      NZE=IYS(J1,2)
0097      IF(J.EQ.4) NZS=26
0098      IF(J.EQ.8) NZS=27
0099      SG=ISG(J)
0100      J2=J+22
0101      J4=J+44
0102      I=1
0103      6  I1=I-1
0104      C y-AXIS
0105      Y1=IC(I,NYE)-IC(I,NYS)
0106      Y2=IC(I,NYE+31)-IC(I,NYS+31)
0107      Y3=IC(I,NYE+62)-IC(I,NYS+62)
0108      CALL UNITV(Y1,Y2,Y3)
0109      C z-AXIS
0110      IF(J.EQ.9.OR.J.EQ.10.OR.J.EQ.17) GO TO 10
0111      A1=IC(I,NZE)-IC(I,NZS)
0112      A2=IC(I,NZE+31)-IC(I,NZS+31)
0113      A3=IC(I,NZE+62)-IC(I,NZS+62)
0114      CALL UNITV(A1,A2,A3)
0115      Z1=SG*(Y2*A3-Y3*A2)
0116      Z2=SG*(Y3*A1-Y1*A3)
0117      Z3=SG*(Y1*A2-Y2*A1)
0118      IF(I.EQ.1) GO TO 91
0119      IF(Z1*Z1+Z2*Z2+Z3*Z3.GT.0.015) GO TO 91
0120      Z1=Z1R
0121      Z2=Z2R
0122      Z3=Z3R
0123      X1=X1R
0124      X2=X2R
0125      X3=X3R
0126      GO TO 17
0127      91 CALL UNITV(Z1,Z2,Z3)
0128      GO TO 11
0129      10 NZE=10
0130      NZS=5
0131      IF(J.EQ.9) GO TO 12
0132      NZE=21
0133      NZS=17
0134      12 Z1=IC(I,NZE)-IC(I,NZS)
0135      Z2=IC(I,NZE+31)-IC(I,NZS+31)
0136      Z3=IC(I,NZE+62)-IC(I,NZS+62)
0137      CALL UNITV(Z1,Z2,Z3)
0138      C x-AXIS
0139      11 X1=Y2*Z3-Y3*Z2
0140      X2=Y3*Z1-Y1*Z3
0141      X3=Y1*Z2-Y2*Z1
0142      CALL UNITV(X1,X2,X3)
0143      IF(Y2.LT.0.7071) GO TO 630
0144      IF(ABS(Y1).GE.0.005) Y1=0.
0145      IF(ABS(X2).GE.0.005) X2=0.
0146      GO TO 610
0147      630 X2=0.
0148      DM=Y1*Y1+Y3*Y3
0149      X1=SQRT(Y3*Y3/DM)
0150      X3=SQRT(Y1*Y1/DM)
0151      IF(Y1.LT.0.) X3=-X3
0152      IF(Y3.GT.0.) X1=-X1
0153      IF(Y1.GE.0.001) GO TO 610
0154      Y1=Y1*100000000.
0155      Y2=0.1
0156      610 Z1R=Z1
0157      Z2R=Z2
0158      Z3R=Z3

```

```

0159      X1R=X1
0160      X2R=X2
0161      X3R=X3
0162 C. CALCULATION OF EULERIAN ANGLE
0163 17  DH=ABS(X2)+ABS(X3)
0164      IF(I.EQ.1) GO TO 13
0165      IF(DM.GT.ER)GO TO 13
0166      DX(I,J)=DX(I1,J)
0167      DX(I,J2)=DX(I1,J2)
0168      DX(I,J4)=DX(I1,J4)
0169      GO TO 14
0170 13  IDET=1
0171      DO 7 K=1,2
0172 C #1/THETA
0173      TH=-X2/X3
0174      TH=ATAN(TH)+FLOAT(K-1)*PI
0175      CTH=COS(TH)
0176      STH=SIN(TH)
0177 C #2/PSI
0178      PS=ACOS(X1)
0179      IF(Y2.LT.0.7071) GO TO 620
0180      IF(Z1.LT.0.) PS=-PS
0181      CPS=COS(PS)
0182      SPS=SIN(PS)
0183      GO TO 21
0184 620  CPS=COS(PS)
0185      SPS=SIN(PS)
0186 22  XD1=X1*CPS+X2*SPS*STH-X3*SPS*CTH
0187      IF(XD1.GE.0.) GO TO 21
0188      PS=-PS
0189      SPS=-SPS
0190      GO TO 22
0191 C #3/PHI
0192 21  D1=Y1*SPS-Y2*CPS*STH+Y3*CPS*CTH
0193      D2=-Y2*CTH-Y3*STH
0194      DH=X2*Y3-X3*Y2
0195      PH=Y1/DH
0196      PH=ATAN(PH)
0197      CPH=COS(PH)
0198      SPH=SIN(PH)
0199      YD2=D1*SPH-D2*CPH
0200      IF(YD2.GE.0.) GO TO 41
0201      PH=PH+PI
0202 41  THE(K)=TH
0203      PSI(K)=PS
0204      PHI(K)=PH
0205      IF(I.EQ.1) GO TO 46
0206      CALL SHFT2(TH,D1,I1,J)
0207      CALL SHFT2(PS,D2,I1,J2)
0208      CALL SHFT2(PH,D3,I1,J4)
0209      DT(K)=ABS(D1)
0210      DS(K)=ABS(D2)
0211      DH(K)=ABS(D3)
0212 7  CONTINUE
0213      D1=AMAX1(DT(1),DS(1),DH(1))
0214      D2=AMAX1(DT(2),DS(2),DH(2))
0215      D3=DT(1)+DS(1)+DH(1)
0216      D4=DT(2)+DS(2)+DH(2)
0217      IF(D1.GE.D2.AND.D3.GE.D4) GO TO 16
0218      IF(D1.LE.D2.AND.D3.LE.D4) GO TO 46
0219      D1=DT(1)*DS(1)*DH(1)
0220      D2=DT(2)*DS(2)*DH(2)
0221      IF(D1.GT.D2) IDET=2
0222      GO TO 46
0223 16  IDET=2
0224 46  DX(I,J)=THE(IDET)
0225      DX(I,J2)=PSI(IDET)
0226      DX(I,J4)=PHI(IDET)
0227 14  KI=KI+1
0228      KK=KI/KL
0229      KJ=KK*KL
0230      IF(KJ.EQ.KI) WRITE(LU,200) KK
0231 200  FORMAT("JOB PERCENTAGE",I3,"%")
0232      I=I+1
0233      IF(I.LE.KT) GO TO 4
0234 5  CONTINUE
0235      JIM=1
0236      IF(IMOT.EQ.0) JIM=9
0237      DO 9 J=JIM,18
0238      JO=J

```

```

0239      J2=J+22
0240      J4=J+44
0241      DO 8 I=2,KT
0242      I0=I
0243      CALL SHFT1(I0,J0)
0244      CALL SHFT1(I0,J2)
0245      CALL SHFT1(I0,J4)
0246      8 CONTINUE
0247 C WRITE FILE
0248      CALL OPEN(IDC, IERR, NAME, 2, -1, J)
0249      IF(IERR.LT.0) CALL ERROR(LU, IERR, NAME, 4#OPEN)
0250      DO 9 I=1,KT
0251      DO 15 J=1,66
0252      DY(J)=DX(I,J)
0253      IF(IMOD,ED.1) GO TO 15
0254      IF(MOD(J,22).NE.9) GO TO 15
0255      DY(J)=0.
0256      15 CONTINUE
0257      CALL WRITF(IDC, IERR, DY, 132, I)
0258      IF(IERR.LT.0) CALL ERROR(LU, IERR, NAME, 4#WRIT)
0259      9 CONTINUE
0260      CALL CLOSE(IDC)
0261      END
0262 C
0263      SUBROUTINE ERROR(LU, IERR, NAME, NACT)
0264      DIMENSION NAME(3), NACT(2)
0265      WRITE(LU, 100) NAME, NACT, IERR
0266      100 FORMAT("FILE(", 3A2, ") ACCESS FAILED", /, "ACTION:", 2A2,
0267      1 " ERR CODE:", I4)
0268      RETURN
0269      END
0270 C
0271      SUBROUTINE UNITV(V1, V2, V3)
0272      DM=V1*V1+V2*V2+V3*V3
0273      DM=1./SQRT(DM)
0274      V1=V1*DM
0275      V2=V2*DM
0276      V3=V3*DM
0277      RETURN
0278      END
0279 C
0280      $EHA(EXT, 0)
0281      SUBROUTINE SHFT1(I, J)
0282      COMMON PI, DP
0283      COMMON /EXT/IC(200, 93), DX(200, 66)
0284      C IF(I, LE, 1) RETURN
0285      I1=I-1
0286      1 DM=DX(I, J)-DX(I1, J)
0287      IF(ABS(DM).LE.PI) RETURN
0288      IF(DM.GT.PI) DX(I, J)=DX(I, J)-DP
0289      IF(DM.LT.-PI) DX(I, J)=DX(I, J)+DP
0290      GO TO 1
0291      END
0292 C
0293      $EHA(EXT, 0)
0294      SUBROUTINE SHFT2(ANG, D, I, J)
0295      COMMON PI, DP
0296      COMMON /EXT/IC(200, 93), DX(200, 66)
0297      D=ANG-DX(I, J)
0298      1 IF(ABS(D).LE.PI) RETURN
0299      IF(D.GT.PI) D=D-DP
0300      IF(D.LT.-PI) D=D+DP
0301      GO TO 1
0302      END
0303 C
0304      SUBROUTINE SHFT3(D)
0305      COMMON PI, DP
0306      1 IF(ABS(D).LE.PI) RETURN
0307      IF(D.GT.PI) D=D-DP
0308      IF(D.LT.-PI) D=D+DP
0309      GO TO 1
0310      END
0311      END$

```

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)

```

0001 FTN4
0002 $EMA(EXTND,0)
0003 PROGRAM KPTNT
0004 C Computation of Force & Torque acting on joints of human body.
0005 C Analyzed motion is torsional loading one.
0006 C Model consists of 18 segments.
0007 C File ID# follow as
0008 C 1/Acceleration(Abs.),2/Euler's angle
0009 C 3/1st dif. of "2",4/2nd dif. of "2"
0010 C 5/Length vector,6/Input force,7/Inout torque
0011 C 8/Output force,9/Output torque
0012 COMMON/EXTND/DI(200,66,2),DX(69,7)
0013 COMMON/HOX/STA,PSI,FAI,DS(3),DS2(3),DSJ(3)
0014 COMMON/ERR/IDCB(272),IERR,LU
0015 COMMON/INR/DJ(18,3),DW(18),DD(18),DL(18),GRAV
0016 DIMENSION IP(5),NAME(9,3),NAM(3),DM(69),FS(3),TS(3)
0017 1 ,FE(3),TE(3),FH(3),TH(3),FR(3),TR(3),FD(3)
0018 2 ,FW(3),TW(3),FL(3),TL(3),V1(3),V2(3)
0019 DATA NAME/2HTA,2HTE,2HTE,2HTE,2HTU,2HTD,2HTM,2HTE,2HTT,
0020 1 2HC1,2H01,2H11,2H21,2HC1,2HS1,2HT1,2HC1,2H01,2*2H /
0021 DATA V1/0.,100.,0./,V2/160.,100.,0./
0022 C Parameter acquisition
0023 CALL RMPAR(IP)
0024 LU=IP(1)
0025 IF(LU.LE.0) LU=1
0026 C
0027 26 WRITE(LU,100)
0028 100 FORMAT("Motion/Standing posture(0)"/,
0029 1 " /Sitting posture(1)")
0030 READ(LU,*) IMOT
0031 IF(IMOT.NE.0.AND.IMOT.NE.1) GO TO 26
0032 DO 1 I=1,9
0033 1 NAME(I,3)=48*256+49+IMOT
0034 C Above number 48 & 49 is ASCII code of 0 & 1 respectively.
0035 IF(IP(2).NE.1) GO TO 27
0036 DO 28 I=1,9
0037 IF(I.EQ.8.OR.I.EQ.7) GO TO 28
0038 NAME(I,2)=NAME(I,2)/256*256+67
0039 NAME(I,3)=2HOM
0040 28 CONTINUE
0041 27 KT=150-10*IMOT
0042 D WRITE(LU,1000) ((NAME(I,J),J=1,3),I=1,9),KT
0043 D1000 FORMAT(9(3A2,1X),I4)
0044 C Body shape data
0045 CALL OPEN(IDCB,IERR,6HHTHO,0,-1,3)
0046 CALL ERROR(6HHTHO,6HOPEN)
0047 CALL READF(IDCB,IERR,DM,108,LEN,1)
0048 CALL ERROR(6HHTHO,6HREADF)
0049 CALL CLOSE(IDCB)
0050 GRAV=9.80665
0051 DO 2 I=1,18
0052 I1=I+18
0053 I2=I+36
0054 DD(I)=DM(I)
0055 DL(I)=DM(I1)
0056 DW(I)=DM(I2)
0057 R=DD(I)/2.
0058 R=R*R
0059 DJ(I,1)=DW(I)*(3.*R+DL(I)*DL(I))/(12.*GRAV)
0060 DJ(I,2)=DW(I)*R/(2.*GRAV)
0061 2 DJ(I,3)=DJ(I,1)
0062 C
0063 NDPT=KT/10
0064 NPT=NDPT
0065 IPAS=10
0066 DO 3 I=1,KT
0067 IF(I.NE.NPT) GO TO 4
0068 WRITE(LU,101) IPAS
0069 101 FORMAT("JOB PERCENTAGE /",I4," Z")
0070 IPAS=IPAS+10
0071 NPT=NPT+NDPT
0072 C File access
0073 4 DO 5 J=1,7
0074 DO 6 K=1,3
0075 6 NAM(K)=NAME(J,K)
0076 CALL OPEN(IDCB,IERR,NAM,0,-1,3)
0077 CALL ERROR(NAM,6HOPEN)
0078 CALL READF(IDCB,IERR,DM,133,LEN,I)

```

```

0079      CALL ERROR(NAM,6HREADF )
0080      CALL CLOSE(IDC8)
0081      IBF=LEN/2
0082      DO 7 K=1,IBF
0083 7     DX(K,J)=DM(K)
0084 5     CONTINUE
0085 C     Computation of force & torque/Main procedure.
0086      DO 11 K=1,3
0087      FS(K)=0.
0088 11     TS(K)=0.
0089      CALL NEWTN(I,17,17,FS,TS,FR,TR,-1)
0090      R1=(DX(11,1)+DX(14,1))/2.
0091      R2=(DX(34,1)+DX(37,1))/2.
0092      R3=(DX(57,1)+DX(60,1))/2.
0093      WG=DX(26,6)/2.
0094      FD(1)=-WG*R1/GRAV
0095      FD(2)=-WG-WG*R2/GRAV
0096      FD(3)=-WG*R3/GRAV
0097      DO 12 K=1,3
0098      FS(K)=FD(K)
0099 12     TS(K)=0.
0100      CALL NEWTN(I,11,13,FS,TS,FR,TR,-1)
0101      DO 13 K=1,3
0102      FS(K)=FD(K)
0103 13     TS(K)=0.
0104      CALL NEWTN(I,14,16,FS,TS,FL,TL,-1)
0105      DO 14 K=1,3
0106      K1=(K-1)*22
0107 14     FS(K)=DT(I,K1+17,1)+DT(I,K1+13,1)+DT(I,K1+16,1)
0108      DO 15 K=1,3
0109      I1=(K-1)*22
0110      K1=MOD(K,3)+1
0111      K2=MOD(K1,3)+1
0112      L1=10+(K1-1)*22
0113      L2=10+(K2-1)*22
0114      TS(K)=DT(I,I1+17,2)+DT(I,I1+13,2)+DT(I,I1+16,2)
0115      1     +DX(L1,5)*FH(K2)-DX(L2,5)*FH(K1)
0116      2     +DX(L1+11,5)*FR(K2)-DX(L2+11,5)*FR(K1)
0117      3     +DX(L1+12,5)*FL(K2)-DX(L2+12,5)*FL(K1)
0118      4     -DX(L1,5)*FS(K2)+DX(L2,5)*FS(K1)
0119 15     CONTINUE
0120      CALL NEWTN(I,10,10,FS,TS,FE,TE,-1)
0121      CALL NEWTN(I,18,18,FE,TE,FS,TS,-1)
0122      CALL NEWTN(I,9,9,FS,TS,FR,TR,-1)
0123      IF(IMOT.EQ.1) GO TO 8
0124      DO 16 K=1,3
0125      KF=MOD(K,3)+14
0126      FS(K)=DX(KF,6)
0127 16     TS(K)=DX(KF,7)
0128      CALL NEWTN(I,1,4,FS,TS,FR,TR,-1)
0129      DO 17 K=1,3
0130      KF=MOD(K,3)+20
0131      KM=K+3
0132      FS(K)=DX(KF,6)
0133 17     TS(K)=DX(KM,7)
0134      CALL NEWTN(I,5,8,FS,TS,FL,TL,-1)
0135      DO 18 K=1,3
0136      K1=(K-1)*22
0137      DT(I,K1+19,1)=FR(K)
0138      DT(I,K1+19,2)=TR(K)
0139      DT(I,K1+20,1)=FL(K)
0140      DT(I,K1+20,2)=TL(K)
0141      DT(I,K1+21,1)=FR(K)+FL(K)
0142 18     DT(I,K1+21,2)=TR(K)+TL(K)
0143      DO 19 K=1,3
0144      FS(K)=0.
0145 19     TS(K)=TR(K)+TL(K)
0146      CALL NEWTN(I,9,9,FS,TS,FW,TW,-1)
0147      DO 20 K=1,3
0148      K1=MOD(K,3)+1
0149      K2=MOD(K1,3)+1
0150      L1=(K1-1)*22
0151      L2=(K2-1)*22
0152      I1=K*22
0153      DT(I,I1,1)=FW(K)+FR(K)+FL(K)
0154      DT(I,I1,2)=TW(K)+DX(L2+19,5)*FR(K1)-DX(L1+19,5)*FR(K2)
0155      1     +DX(L2+20,5)*FL(K1)-DX(L1+20,5)*FL(K2)
0156      DT(I,I1-13,1)=FH(K)
0157      DT(I,I1-13,2)=TH(K)
0158 20     CONTINUE

```

```

0159      DO 21 K=1,3
0160      K1=(K-1)*22+21
0161      FB=DT(I,K1,1)
0162      FS(K)=FR(K)
0163      IF(K.EQ.2) FS(K)=FH(K)*FR(K)/FB
0164      TS(K)=TR(K)
0165      CALL NEWTN(I,4,1,FS,TS,FE,TE,-1)
0166      DO 22 K=1,3
0167      K1=(K-1)*22+21
0168      FB=DT(I,K1,1)
0169      FS(K)=FL(K)
0170      IF(K.EQ.2) FS(K)=FH(K)*FL(K)/FB
0171      TS(K)=TL(K)
0172      CALL NEWTN(I,8,5,FS,TS,FE,TE,-1)
0173      GO TO 3
0174      8      FB=0.
0175      DO 23 K=1,8
0176      FR=FB+DW(K)
0177      DO 24 K=1,3
0178      JK=8+(K-1)*22
0179      WG=0.
0180      IF(K.EQ.2) WG=FB
0181      DT(I,JK,1)=FH(K)-WG
0182      FE(K)=DT(I,JK,1)
0183      DO 25 K=1,3
0184      JK=8+(K-1)*22
0185      K1=MOD(K,3)+1
0186      K2=MOD(K1,3)+1
0187      DT(I,JK,2)=TH(K)+V1(K1)*FE(K2)-V1(K2)*FE(K1)
0188      1      +V2(K1)*FH(K2)-V2(K2)*FH(K1)
0189      25      CONTINUE
0190      3      CONTINUE
0191      C File access
0192      DO 31 J=1,2
0193      SC=1.
0194      IF(J.EQ.2) SC=1./1000.
0195      DO 32 K=1,3
0196      L=J+7
0197      32      NAM(K)=NAME(L,K)
0198      CALL OPEN(IDCBIERR,NAM,2,-1,3)
0199      CALL ERROR(NAM,6HOPEN )
0200      DO 33 I=1,K1
0201      DO 34 K=1,66
0202      34      DM(K)=DT(I,K,J)*SC
0203      CALL WRITF(IDCBIERR,DM,132,I)
0204      CALL ERROR(NAM,6HWRITF )
0205      33      CONTINUE
0206      CALL CLOSE(IDCBI)
0207      31      CONTINUE
0208      END
0209      END$

```

```

0001 FTM4.L
0002 C DEFINITION OF BLOCK-COMMON
0003     BLOCK DATA
0004     COMMON/MOX/STA,PSI,PHI,DS(3),DS2(3),DSJ(3)
0005     COMMON/ERR/IDCB(272),IERR,LU
0006     COMMON/INR/DJ(18,3),DW(18),DD(18),DL(18),G
0007     END
0008 C SUB#1
0009     SUBROUTINE MOT(T)
0010 C EULERIAN ANGLE / STA,PSI,FAI
0011 C DS : 1ST DIFFERENTIAL / STA,PSI,FAI
0012 C DS2 : 2ND DIFFERENTIAL / STA,PSI,FAI
0013 C DJ : INERTIA TENSOR / JXX,JYY,JZZ
0014 C T : OUTPUT TORQUE / SEIGHI-ZAHYO-KEI
0015 C APPLIED ONLY TO /
0016 C     UNDOU-ZAHYO-KEI = KANSEI-SYU-JIKU
0017 C MOBILIZED-SUBROUTINE/MATRX, MATRP, TENT
0018     COMMON /MOX/STA,PSI,FAI,DS(3),DS2(3),DJ(3)
0019     DIMENSION RJ(3,3),RJ2(3,3),P(3,3),P1(3,3),P2(3,3),
0020     !P3(3,3),P4(3,3),ST(3,3),PS(3,3),FI(3,3),O(3,3),O1(3,3),O2(3,3),
0021     !O3(3,3),O4(3,3),D(3,3),E(3,3),F(3,3),P5(3,3),TH(3,3),
0022     !T1(3,3),T2(3,3),T3(3,3),T(3,3),OX(3,3),TH1(3,3),TH2(3,3),TH3(3,3)
0023     DO 10 I=1,3
0024     DO 10 J=1,3
0025     RJ(I,J)=0.
0026     RJ2(I,J)=0.
0027     P(I,J)=0.
0028     P1(I,J)=0.
0029     P2(I,J)=0.
0030     P3(I,J)=0.
0031     P4(I,J)=0.
0032     ST(I,J)=0.
0033     FI(I,J)=0.
0034 10 PS(I,J)=0.
0035     DO 20 I=1,3
0036     T1(I)=DS2(I)
0037     T2(I)=DS(I)*DS(I)
0038 20 RJ(I,I)=DJ(I)
0039     T3(1)=DS(2)*DS(3)
0040     T3(2)=DS(3)*DS(1)
0041     T3(3)=DS(1)*DS(2)
0042     RJ2(1,1)=DJ(3)-DJ(2)
0043     RJ2(2,2)=DJ(1)-DJ(3)
0044     RJ2(3,3)=DJ(2)-DJ(1)
0045     SS=SIN(STA)
0046     CS=COS(STA)
0047     SP=SIN(PSI)
0048     CP=COS(PSI)
0049     SF=SIN(FAI)
0050     CF=COS(FAI)
0051     ST(1,1)=1.
0052     ST(2,2)=CS
0053     ST(2,3)=SS
0054     ST(3,2)=-SS
0055     ST(3,3)=CS
0056     PS(2,2)=1.
0057     PS(1,1)=CP
0058     PS(1,3)=-SP
0059     PS(3,1)=CP
0060     PS(3,3)=CP
0061     FI(1,1)=1.
0062     FI(2,2)=CF
0063     FI(2,3)=SF
0064     FI(3,2)=-SF
0065     FI(3,3)=CF
0066     P(1,1)=CP
0067     P(1,3)=1.
0068     P(2,1)=SP*SF
0069     P(2,2)=CF
0070     P(3,1)=SP*CF
0071     P(3,2)=-SF
0072     P1(1,3)=-SP
0073     P1(2,1)=-SF
0074     P1(2,2)=SP*CF
0075     P1(2,3)=CP*SF
0076     P1(3,1)=-CF
0077     P1(3,2)=-SP*SF
0078     P1(3,3)=CP*CF

```

```

0079 C P2(1,1)=CP*CP
0080 C P2(1,3)=1.
0081 C P2(2,1)=SP*SP*SF*SF
0082 C P2(2,2)=CF*CF
0083 C P2(3,1)=SP*SP*CF*CF
0084 C P2(3,2)=SF*SF
0085 C P3(1,2)=2.*CP
0086 C P3(2,3)=2.*SP*SF*CF
0087 C P3(3,3)=-P3(2,3)
0088 C P4(1,1)=SP*SP*SF*CF
0089 C P4(1,2)=-SF*CF
0090 C P4(2,1)=SP*CP*CF
0091 C P4(3,1)=SP*CP*SF
0092 C P5(1,3)=SP*(CF*CF-SF*SF)
0093 C P5(2,1)=-SF
0094 C P5(2,2)=SP*CF
0095 C P5(2,3)=-CP*SF
0096 C P5(3,1)=CF
0097 C P5(3,2)=SP*SF
0098 C P5(3,3)=CF*CP
0099 C CALL TENT(ST)
0100 C CALL TENT(PS)
0101 C CALL TENT(FI)
0102 C CALL MATRX(3,3,3,ST,PS,OX)
0103 C CALL MATRX(3,3,3,OX,FI,O)
0104 C CALL MATRX(3,3,3,RJ,P,O1)
0105 C CALL MATRX(3,3,3,RJ2,P4,O2)
0106 C CALL MATRX(3,3,3,RJ,P1,O3)
0107 C CALL MATRX(3,3,3,RJ2,P5,O4)
0108 C CALL MATRX(3,3,3,O3,O4,OX)
0109 C CALL MATRX(3,3,3,O,O1,D)
0110 C CALL MATRX(3,3,3,O,O2,E)
0111 C CALL MATRX(3,3,3,O,OX,F)
0112 C CALL MATRX(3,3,1,D,T1,TH1)
0113 C CALL MATRX(3,3,1,E,T2,TH2)
0114 C CALL MATRX(3,3,1,F,T3,TH3)
0115 C CALL MATRP(3,1,TH1,TH2,TH)
0116 C CALL MATRP(3,1,TH,TH3,T)
0117 C RETURN
0118 C END
0119 C SUB#2
0120 C SUBROUTINE MATRX(L,M,N,A,B,C)
0121 C MATRIX / A,B,C
0122 C A(L,M),B(M,N),C(L,N)
0123 C C=A+B
0124 C DIMENSION A(3,3),B(3,3),C(3,3),X(3,3)
0125 C DO 10 I=1,L
0126 C DO 10 J=1,M
0127 C X(I,J)=0.
0128 C DO 10 K=1,N
0129 C 10 X(I,J)=X(I,J)+A(I,K)*B(K,J)
0130 C DO 20 I=1,L
0131 C DO 20 J=1,M
0132 C 20 C(I,J)=X(I,J)
0133 C RETURN
0134 C END
0135 C SUB#3
0136 C SUBROUTINE MATRP(L,M,A,B,C)
0137 C MATRIX / A,B,C
0138 C A(L,M),B(L,M),C(L,M)
0139 C C=A+B
0140 C DIMENSION A(3,3),B(3,3),C(3,3)
0141 C DO 10 I=1,L
0142 C DO 10 J=1,M
0143 C 10 C(I,J)=A(I,J)+B(I,J)
0144 C RETURN
0145 C END
0146 C SUB#4
0147 C SUBROUTINE TENT(A)
0148 C MATRIX / A
0149 C A=TENCHI(A)
0150 C DIMENSION A(3,3),B(3,3)
0151 C DO 10 I=1,3
0152 C DO 10 J=1,3
0153 C 10 B(J,I)=A(I,J)
0154 C DO 20 I=1,3
0155 C DO 20 J=1,3
0156 C 20 A(I,J)=B(I,J)
0157 C RETURN
0158 C 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(IDCBI)
0166 WRITE(LU,100) NAME,NACTN,IERR
0167 100 FORMAT('FILE/',JA2,1X,JA2,'ERROR,ERROR CODE IS',I4)
0168 CALL EXEC(6)
0169 RETURN
0170 END
0171 C SUB#6
0172 $EMA(EXTND,0)
0173 SUBROUTINE NEWTN(I,JS,JE,FS,TS,FE,TE,IDR)
0174 C CALCULATE FORCE & TORQUE
0175 C JS/START-OF-SEGMENT#,JE/END-OF-SEGMENT#
0176 C FS,TS/INITIAL CONDITION OF FORCE,TORQUE
0177 C FE,TE/RETURN TO MAIN-PROGRAM
0178 C MOBILIZED-SUBROUTINE/HOT,MATRP,MATRX,TENT
0179 COMMON/EXTND/DT(200,66,2),DX(67,7)
0180 COMMON/HOX/STA,PSI,FAI,DS(3),DS2(3),DSJ(3)
0181 COMMON/INR/DJ(18,3),DW(18),DD(18),DL(18),G
0182 DIMENSION FS(3),TS(3),FE(3),TE(3),TQ(3)
0183 JB=1
0184 IF(JS.GT.JE) JB=-1
0185 DO 1 J=JS,JE,JB
0186 DO 2 K=1,3
0187 JK=J+(K-1)*22
0188 JL=J+(K-1)*23
0189 WC=0.
0190 IF(K.EQ.2) WC=DW(J)
0191 DT(I,JK,1)=FS(K)+FLOAT(IDR)*(WC+DW(J))*DX(JL,1)/G
0192 2 FE(K)=DT(I,JK,1)
0193 STA=DX(J,2)
0194 PSI=DX(J+22,2)
0195 FAI=DX(J+44,2)
0196 DO 3 K=1,3
0197 JK=J+(K-1)*22
0198 DS(K)=DX(JK,3)
0199 DS2(K)=DX(JK,4)
0200 3 DST(K)=DT(I,K)
0201 CALL HOT(TD)
0202 DO 4 K=1,3
0203 JK=J+(K-1)*22
0204 K1=MOD(K,3)+1
0205 K2=MOD(K1,3)+1
0206 L1=J+(K1-1)*22
0207 L2=J+(K2-1)*22
0208 DT(I,JK,2)=TS(K)+FLOAT(IDR)*(TD(K)-DX(L1,5)*(FS(K2)+FE(K2))
0209 1 +DX(L2,5)*(FS(K1)+FE(K1)))
0210 4 TS(K)=DT(I,JK,2)
0211 DO 5 K=1,3
0212 5 FS(K)=FE(K)
0213 1 CONTINUE
0214 DO 6 K=1,3
0215 6 TE(K)=TS(K)
0216 RETURN
0217 END
0218 END$

```

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心より感謝致します。