

画像処理を利用した
T字型廊下における歩行特性の研究

防災安全工学講座 田中 春彦

目次

第1章	序	.....	1
第2章	実験内容	.....	2
	§ 2-1	実験装置	
	§ 2-2	実験手順・被験者	
	§ 2-3	位置基準点の測定	
第3章	座標変換	.....	6
	§ 3-1	変換式	
	§ 3-2	変換のための定数決定法	
	§ 3-3	誤差・精度の検討	
第4章	個人軌跡	.....	15
第5章	スムージング	.....	16
	§ 5-1	スムージングの必要性	
	§ 5-2	フィルターによるスムージング	
	§ 5-3	デジタルフィルターの特性	
		.....	19
第6章	歩行位置		
	§ 6-1	頭部軌跡	
	§ 6-2	身体重心軌跡	
第7章	速度		
	§ 7-1	速度定義式	..... 27
	§ 7-2	速度変化	
	§ 7-3	曲がり角における速度低下	
第8章	再現性	.....	30
	§ 8-1	歩行位置	
	§ 8-2	速度	
	§ 8-3	再現性の考察	
第9章	終章	.....	36

本研究では、最近進歩の著しい画像処理技術を利用して、人間行動の中では比較的単純な動作である「歩行」を測定し分析をおこなった。画像処理を使うことによって、省力化と精度の向上を目的としている。今回の実験では仮設した廊下を歩行する被験者を斜め上方からビデオに録画して、それを画像処理によって人体頭部の位置測定をおこなった。利用した画像処理機は、歩行者の頭部が他に比べ暗いことを利用し頭部と他の部分を区別するように2値化して、黒に変換された頭部の画面上の重心座標を得てマイコンに出力するもので、マイコン側でそれを受け取り座標値を実際のミリ単位の座標に変換して分析をおこなった。

人間の歩行を8ミリフィルムやビデオに録画して、その特性を調査することは従来からおこなわれてきた。しかし、これら過去の研究においての位置データは30cm角の舗装コンクリートブロック等を利用して足の接地位置を目測で読みとっており、その精度・誤差にはあまりふれられていない。また、データを得られるのは、足が地面につく瞬間と離れる瞬間だけで、時間軸上では、人間が一步踏みだすのにかかる約0.5秒ごとの離散的にしか有効なデータは得られない。それと比較して、本研究の方法では1/30秒ごとのデータを得ており、歩行速度の分析においては大きな利点となっている。本研究で用いた機器では、画面の分解能が低く速度の算出においては単純に差分をとることができず、データにフィルターをかけているが(第5章)、画面の分解能が上がればこの問題は解決されることである。

省力化の点では、延べ306回の歩行の位置(約52000点)を得る作業を2人で約半日で処理することができた。データ量が膨大となる群衆等の計測には更に効果があるものと思われる。

第2章 実験内容

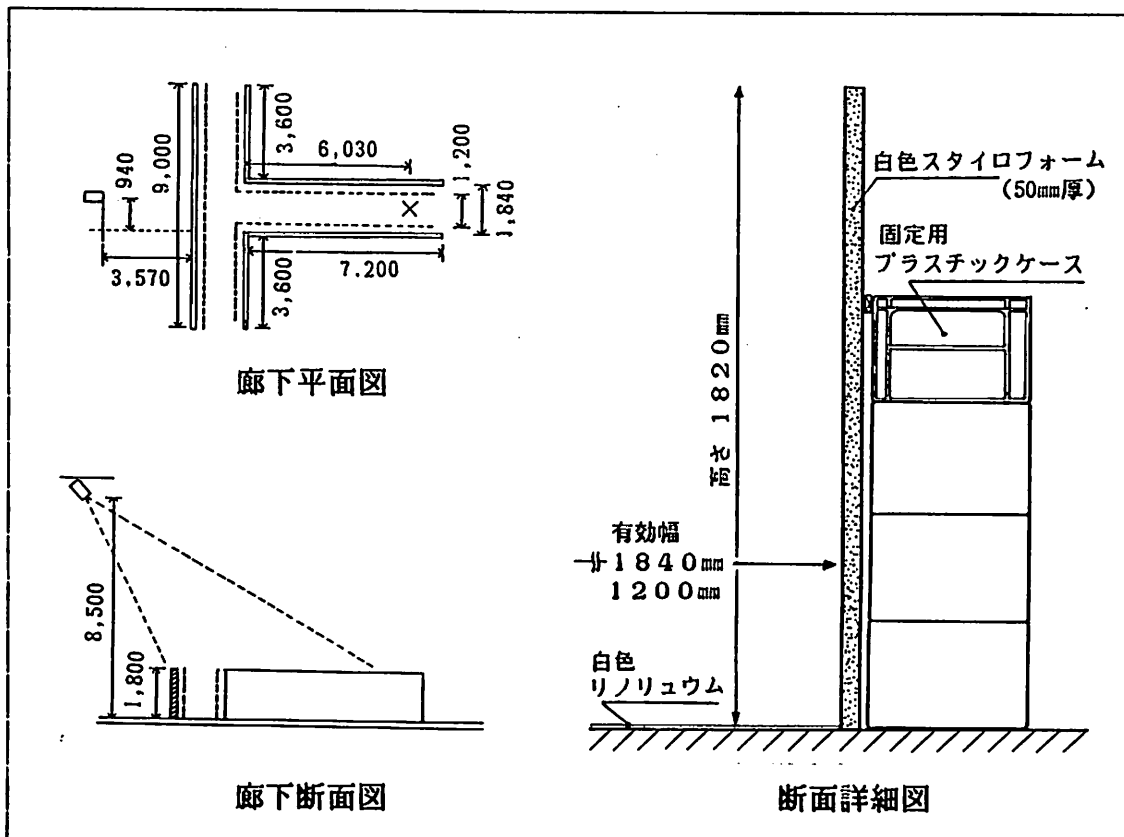
体育館にT字型廊下を仮設し、バスケットゴールの板に取りつけたビデオカメラ（高さ8.5m）を使い被験者の歩行の様子を録画した。廊下の有効幅は2種類（1.20mと1.84m）に変えて実験をおこなった。また、同一条件下での同一人物の歩行の再現性を調べるための実験も付加的におこなった。

§2-1 実験装置

(1) 仮設廊下

名古屋大学附属中学・高校の体育館に図2-1のようなT字型廊下を仮設し、ビデオカメラをバスケットゴールの板に取りつけ高さ8.5mに釣り上げた状態に固定した。廊下は長さ7.20mと9.00mの直線状廊下を組み合わせることで有効幅を2種類（1.20mと1.84m）に変えて実験をおこなった。床には白色リノリウムカーペットを敷き、両側に50mm厚の白色スタイロフォームを立ち上げ高さ1.82mの壁とした。

廊下の壁面の状態（なめらか・きれい、ゴツゴツしている・汚い・触ると壊れそう）により、被験者の壁面からの距離のとり方が変わることが考えられるが、写真2-1に見られるように一般的な建築物の廊下に近い壁を再現できたと思う。



【図2-1 廊下寸法】



【写真2-1 仮設廊下の様子】



【写真2-2 2値化画面例】

(2) 測定機

画像処理機 : (株) 朋栄 IV-540

画面を縦192ドット・横256ドットの画素に分割して、その1つ1つの輝度を前面パネルのつまみで設定したしきい値で白・黒の2つに分ける2値化をおこない、白または黒の画素の4ドット以上の画像が連続した塊の重心座標と面積を求める画像処理演算が可能である。

演算の対象はライトペンで最大6個まで指定することができ、演算に必要な時間は窓が1個の場合はリアルタイム(1/30秒)、窓が6個の場合は10/30秒である。

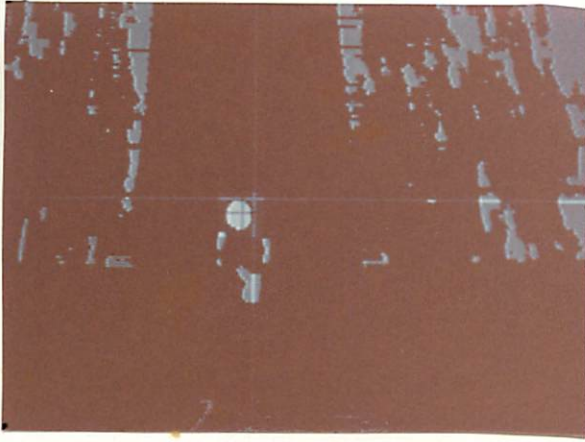
ビデオデッキ : (株) 松下電気
一般的なVHSのビデオデッキを使用した。

ビデオカメラ : (株) SONY AVC-D5
撮像素子 インターライン転送方式CCD
有効画素数 510×492 (水平/垂直)
毎秒像数 30枚

レンズ : (株) SONY オートアイリスレンズ VCL-08Y
焦点距離 8mm
絞り F1.4~F360
自動絞り調節範囲 30~100,000 lux

ビデオバッファ : (株) 朋栄 FA-300

ビデオから出力される信号はモーターの回転偏差のために1/30で1枚の画面を構成する正確なNTSC信号とはズレが生じている。その偏差を含んだ信号を正確なタイミングに整形し、IV-540に入力する機器である。



【写真2-1 仮設廊下の様子】



【写真2-2 2値化画面例】

(2) 測定機

画像処理機 : (株) 朋栄 IV-540

画面を縦192ドット・横256ドットの画素に分割して、その1つ1つの輝度を前面パネルのつまみで設定したしきい値で白・黒の2つに分ける2値化をおこない、白または黒の画素の4ドット以上の画像が連続した塊の重心座標と面積を求める画像処理演算が可能である。

演算の対象はライトペンで最大6個まで指定することができ、演算に必要な時間は窓が1個の場合はリアルタイム(1/30秒)、窓が6個の場合は10/30秒である。

ビデオデッキ : (株) 松下電気
一般的なVHSのビデオデッキを使用した。

ビデオカメラ : (株) SONY AVC-D5
撮像素子 インターライン転送方式CCD
有効画素数 510×492 (水平/垂直)
毎秒像数 30枚

レンズ : (株) SONY オートアイリスレンズ VCL-08Y
焦点距離 8mm
絞り F1.4~F360
自動絞り調節範囲 30~100,000 lux

ビデオバッファ

: (株) 朋栄 FA-300

ビデオから出力される信号はモーターの回転偏差のために1/30で1枚の画面を構成する正確なNTSC信号とはズレが生じている。その偏差を含んだ信号を正確なタイミングに整形し、IV-540に入力する機器である。

§ 2-2 被験者・実験手順

被験者は名古屋大学在籍のサッカー部とバドミントン部の18~23才の男子学生で、年齢・性別・身長・利き腕を実験前にアンケート調査した。

また、再現性の検証のために上記の本実験に同時に、同一条件下の同一人物10回の歩行実験も付加的におこなったが、この被験者は実験スタッフであり本実験とは条件が異なる。

実験日	廊下幅	本実験		再現性の検証のための実験	
		被験者数	回数 (サンプル数)	被験者数	回数 (サンプル数)
1988.8.24	1.84m	38名	左右1回ずつ (76)	1名	左のみ10回 (10)
1988.8.26	1.20m	40名	左右2回ずつ (160)	3名	左右10回 (60)
合計		47名	(236)	4名	(70)
		両方とも実験したのは31名		両方とも実験したのは0名	

図2-1に示す出発点(廊下中央、交差中心部から6.95m)で必ず立ち止まり、前の被験者のトレースをしないように、前の被験者の姿が完全に見えなくなるまでここで待機してから、壁面の終る所まで歩行するように指示した。事前に本実験と同じ手順で予備歩行として左右1回ずつ歩いて、実験方法と実験用廊下に慣れてもらった。また、実験を意識しないよう普通に歩くように依頼した。

1人の被験者における右曲り・左曲りの順序は1回ずつの場合は全員右・左の順、2回ずつの場合は右・左・右・左の順とした。これは、予備歩行をおこなったことにより順序の影響は無視できると判断したためである

被験者は、この実験用廊下において実験条件として対向者が絶対に来ないことを確信して歩いていたと思われる。その点で実際の廊下とは異なるわけだが、一般に曲がり角において対向者がいるかどうかはその姿が見えるより先に、足音・話声・影などで知覚しているのであるから、実際の廊下における歩行を再現できたと考えている。

幅1840mmの実験の翌日に、廊下の中心線が変わらないように両側の壁を320mmずつ狭めて幅1200mmとした。

No. _____

実験日 8月 日 午前 午後

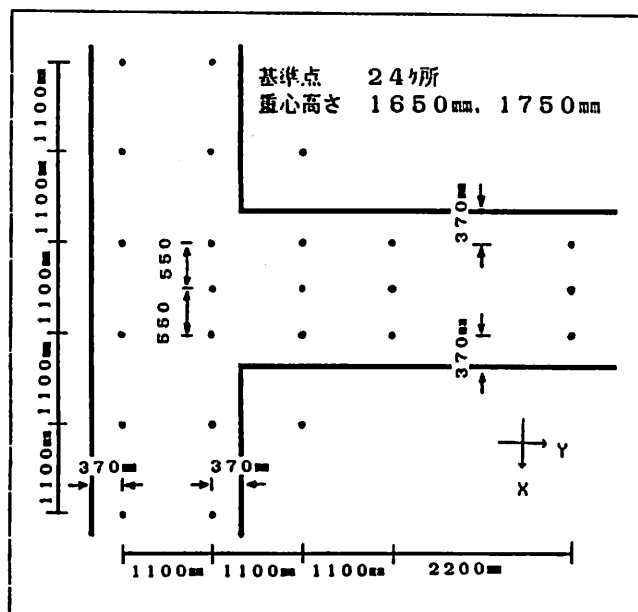
氏名		性別	
生年月日	昭和 年 月 日	身長	cm
所属クラブ		利き腕	右・左

枠内のみ記入してください。

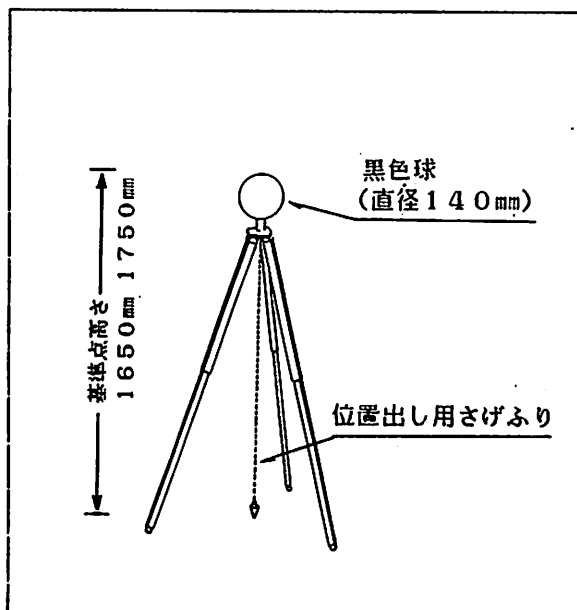
【図2-4 アンケート調査用紙】

§ 2-3 位置基準点の測定

各幅（各実験日）の実験終了後に基準点の測定をおこなった。図2-3に示すような三脚の上に直径140mmの黒球を取り付けた器具を、廊下内を中心として配置した24ヶ所の基準点に設置してその様子を歩行実験と同じビデオカメラで録画した。基準点の高さは1650mm、1750mmの2種類として計48個の基準点データを各幅（各実験日）ごとに得た。



【図2-3 基準点位置】



【図2-4 測定用器具】

第3章 座標変換

現在、画像処理の利用はCTスキャナー（断層撮影）等の通常は見えないものを見せる、あるいは画像上のノイズ等を取り除いたりソフトな画像にするといった「良い絵を見せる」という方面で主として発達しているが、ここでは数値測定に用いている。

ビデオカメラで撮映し2次元座標となった座標から人体頭部が移動する3次元座標を再現することは不可能であるが、ここでは頭部の運動の上下動を無視して体育館床面に平行な水平平面に拘束されているものとして変換をおこなった。水平平面の高さが必要となるが、この値は人体頭部を完全な球形と仮定して身長と頭高から求めている。

画像処理機が出力する値は、ドット単位の画面上の各種の値（長さ・面積・重心等）であり、その値に単純に定数を乗じて実際の測定値（ミリ単位）とすることは精度の点からできない。

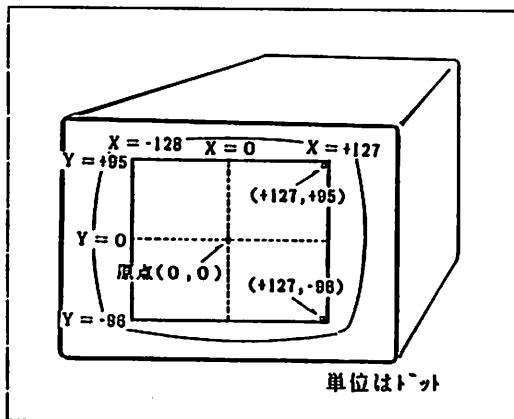
ここでは、画面上の座標を実際の位置や長さに変換する際に

- (1) スケール変換
- (2) 投射角（斜め上方から撮影したことの補正）
- (3) 画面素の縦・横の比
- (4) レンズ収差

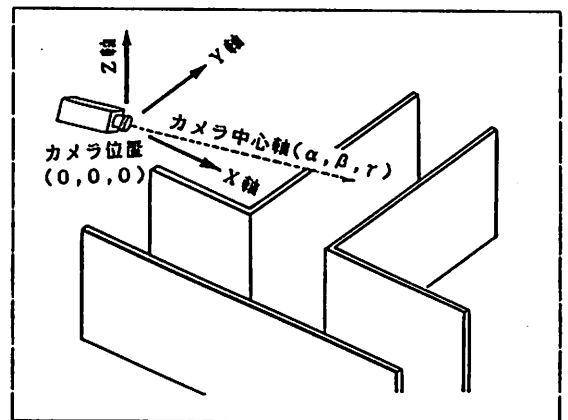
の4点を考慮した。

§3-1 変換式

IV-540から出力された、画面上の座標 (X_1, Y_1) と身長 K から実際の体育館上の座標 (X_5, Y_5) を求めている。



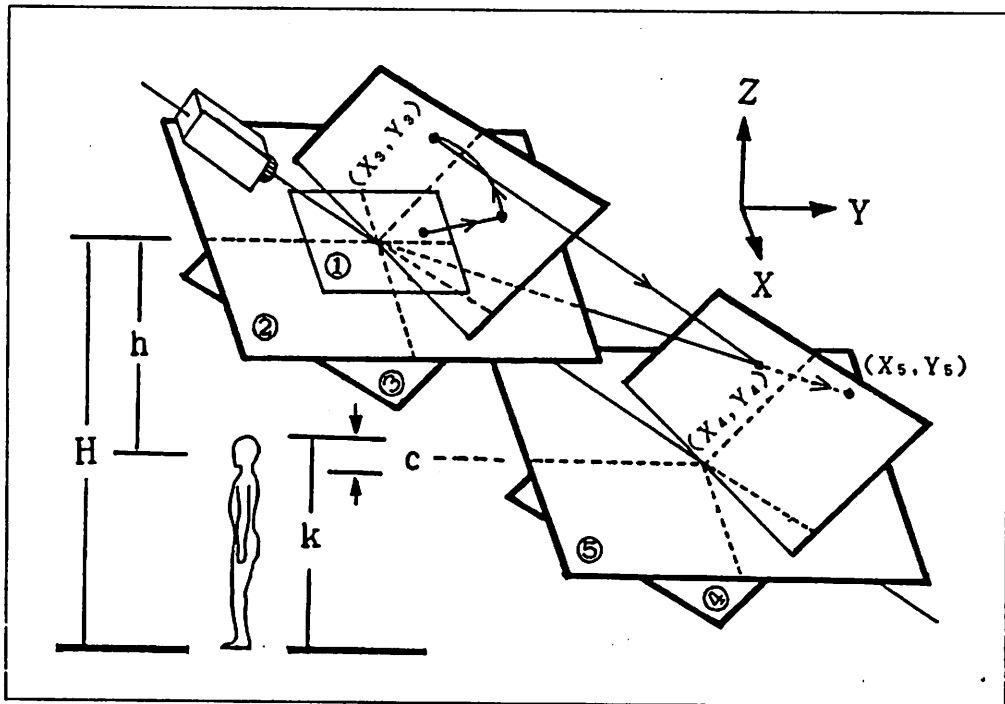
【図3-1 画面上座標 (X_1, Y_1) 】



【図3-2 体育館上座標 (X_5, Y_5) 】

変換にあたって、図3-3のように平面①～⑤の4段階に分けた。座標 (X_i, Y_i) の添字 i は、変換の各段階の平面①～⑤に対応する。

- ①： 画像処理機から出力された画面上座標。原点（カメラの位置）および、X・Y・Z軸を平面⑤と一致させている。
- ②： 収差補正とスケール変換後の座標
- ③： 平面④に平行で原点を通る平面
- ④： カメラ中心軸と被験者の頭部重心高さの水平面との交点を通り、カメラ中心軸に垂直な平面。以下、投影面と呼ぶ。
- ⑤： 被験者の頭部重心高さの水平平面



【図3-3 変換の流れ図】

①→② 収差補正とスケール変換（トットをmmに）

$$X_2 = (1 - E \times (\sqrt{X_1^2 + Y_1^2})^3) \times \frac{h}{\gamma} \times F_x \times X_1$$

$$Y_2 = (1 - E \times (\sqrt{X_1^2 + Y_1^2})^3) \times \frac{h}{\gamma} \times F_y \times Y_1$$

E : レンズの歪曲収差の補正係数

F_x : 画面上X方向のスケール変換係数

F_y : 画面上Y方向のスケール変換係数

K : 被験者身長(1600~1840mm)

c : 頭高(=250mm, 一定とした)

H : カメラ(原点)から床までの高さ(=-8500mm)

h : 被験者の頭部重心の高さ $h = H + K - \frac{c}{2}$

γ : 基準高さ($H + 1650\text{mm} = -6850\text{mm}$)

β : レンズの中心軸が平面 $Z = \gamma$ と交わる時のX座標

α : レンズの中心軸が平面 $Z = \gamma$ と交わる時のY座標

(α , β , γ) はカメラ中心軸の方向を表すベクトル。

・ F_x, F_y の値は画面上の1ドットが図3-3の中の投影面④の上で何mmに相当するかを表している。ビデオカメラの感光素子の1個の粒の縦横比は正確には1:1になっておらず、縦と横の F_x と F_y との2個必要である。また、この値はカメラ（感光素子）が異なれば変化する値である。

・ $\frac{h}{\gamma}$ は被験者の身長の違いによるカメラから投影面までの距離の違いの補正項である。

・ K (被験者の身長) は静的身長(通常の測定身長)の自己申告値としている。歩行時の動的身長(頭部上端の高さ)は静的身長より20~50mm程度低くなるが、その差を無視してここでは静的身長を使っている。(参考文献 **)

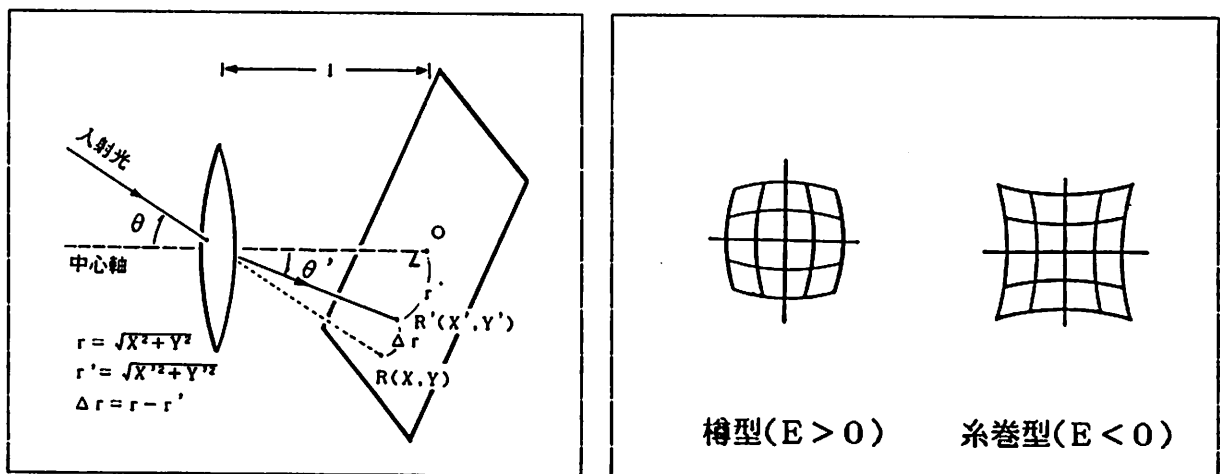
・ c (頭高) の標準偏差は10~30mmと小さいので個人差は無視して平均のみを使用している。(参考文献 4) 今回の被験者は男子運動部の学生で髪が短いため頭部を完全な球形と仮定し、 $c=250\text{mm}$ 一定としている。

・ 収差補正項 $(1 - E \times (\sqrt{X_1^2 + Y_1^2})^3)$

中心軸近傍のガウス領域から発してレンズを通った光は 入射角 $\theta \approx 0$ であるから

$$\sin \theta = \theta$$

と近似できて理想レンズとして扱える。しかし、ガウス領域以外では正方形のマス目をこれらのレンズを通して見た時、樽型あるいは糸巻型の歪んだ像となる。(図3-4)



【図3-4 歪曲収差】

ザイデルの5収差の理論はテーラー展開の第2項までとり

$$\sin \theta = \theta - \frac{1}{3} \theta^3$$

と近似した場合であり、その時の歪曲収差 Δr は

$$\Delta r = e \cdot \theta^3 \quad (e \text{ は収差の比例定数})$$

で求められる。(図3-4)

$$\theta \approx \theta', \quad \therefore \theta \approx \frac{f'}{l}$$

と近似して

③→④ 平行移動

回転の計算はX, Y, Z軸まわりの回転とした方が簡単になるので回転・収差補正・スケール変換(①→②→③)を先におこない、その後に平行移動した。カメラの中心軸が被験者の頭部重心高さの水平面⑤と交わる点を通り中心軸に垂直な投影面に移動する変換である。

$$\begin{pmatrix} X_4 \\ Y_4 \\ Z_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_3 \\ Y_3 \\ Z_3 \end{pmatrix} + \frac{h}{r} \cdot \begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \\ \gamma \end{pmatrix}$$

④→⑤ 被験者の頭部重心高さの水平面への投射

原点と投影面④上の点(X₄, Y₄)を通る直線が被験者の頭部重心高さの水平面⑤と交わる点の座標(X₅, Y₅)を求めている。

$$X_5 = \frac{h}{Z_4} \times X_4 \quad Y_5 = \frac{h}{Z_4} \times Y_4$$

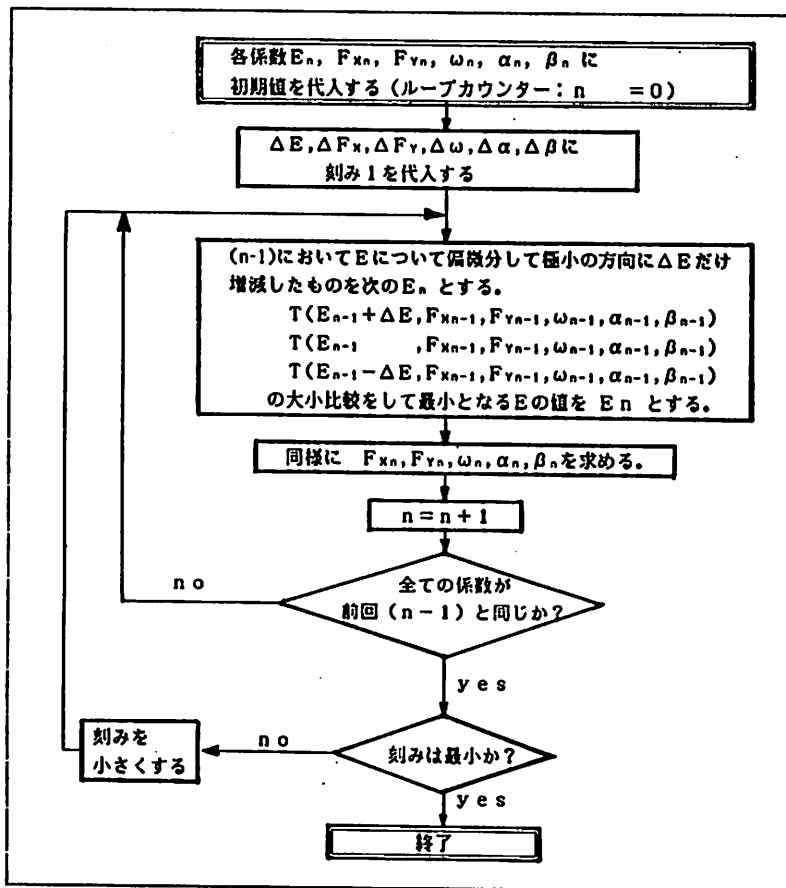
§ 3-2 変換のための定数決定法

(1) 定数決定法

ビデオに録画した基準点の映像を画像処理機を通し1/30秒ごとの20個のデータを平均して0.05ドットまでの値をとり、基準点データ $(X_{1(j)}, Y_{1(j)})$ としている。(jは基準点番号) 基準点データに§3-1の変換($c=140\text{mm}$)をほどこした値を $(X_{5(j)}, Y_{5(j)})$ 、基準点の設置位置を $(SX_{(j)}, SY_{(j)})$ した時、次式で表される差の2乗の総和Tが最小となるように各定数 $E, F_x, F_y, \omega, \alpha, \beta$ を決めた。

$$T(E, F_x, F_y, \omega, \alpha, \beta) = \sum_{j=1}^{48} \{ (SX_{(j)} - X_{5(j)})^2 + (SY_{(j)} - Y_{5(j)})^2 \}$$

収束計算のアルゴリズムは図3-5に示すものである。



【図3-5 収束計算アルゴリズム】

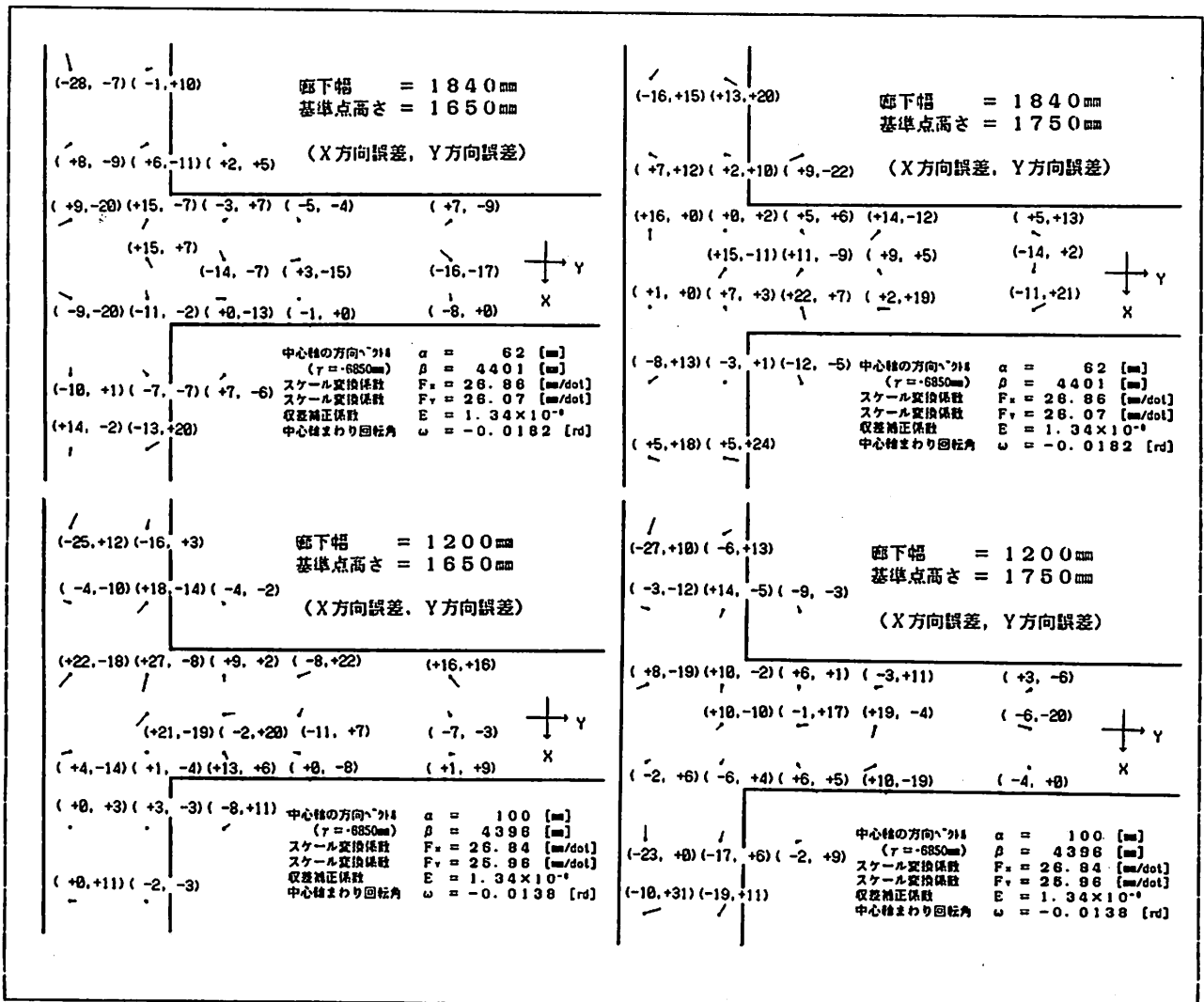
刻みの最小値は変換後の誤差の総和の収束状況を見ながら、表3-1の値とした。初期値は表中の1, 2のいずれの同じ値に収束することを確認している。

収束時の誤差の2乗の総和Tは 幅1840mmの時 T = 9816
幅1200mmの時 T = 11831

である。

【表3-1 収束計算の初期値と刻み値】

	F_x	F_y	E	ω	α	β
初期値 1	20	20	0	0	4000	0
初期値 2	30	30	1.0×10^{-7}	0.1	1000	5000
刻み値 1	0.5	0.5	1.0×10^{-8}	0.01	100	100
刻み値 2	0.1	0.1	1.0×10^{-9}	0.001	10	10
刻み値 3	0.01	0.01	1.0×10^{-10}	0.0001	1	1
幅1840mm	26.86	26.04	1.34×10^{-8}	-0.0138	62	4401
幅1200mm	26.84	25.96	1.34×10^{-8}	-0.0182	100	4396



【図3-6 基準点の誤差】

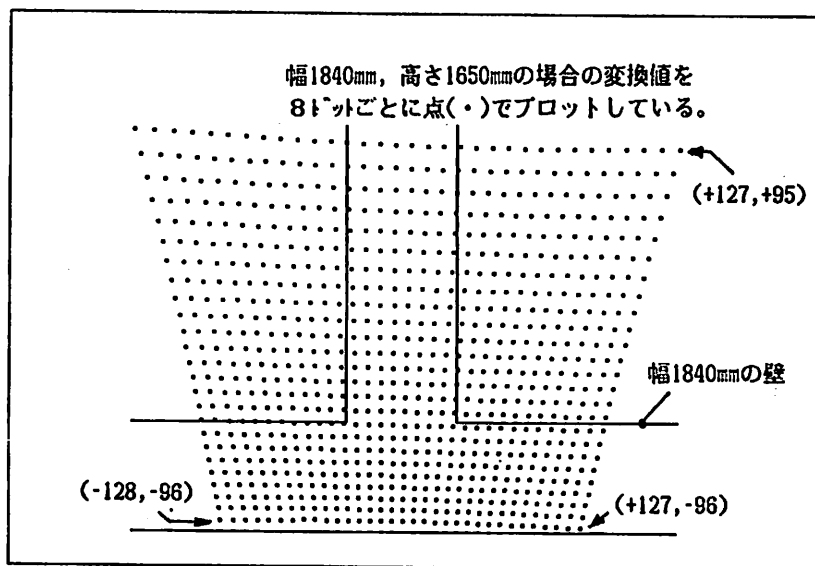
§ 3-3 精度・誤差の検討

(1) 変換定数の検討

2回の実験の変換定数を比較するとほとんど一致している。

・ F_x の差は小さいのに比較して ($0.02[\text{mm/ドット}]$)、 F_y はかなり異っている。これは、画面上で基準点が画面下側の交差部分に多く配置されていることによる。(図2-3) 更に、画面上部ではカメラからの距離が大きくまた撮影角度が浅いため分解能が低いことも大きく影響している。(図3-7)

・ ω , α , β の差は、実験中にカメラを動かしていないが2回の実験の間に1日空けたことにより僅かながらズレたものと思われる。そのズレは ω は $0.0044[\text{rd}]$ (0.25°)、中心軸(α, β, γ)は $0.0046[\text{rd}]$ (0.26°)である。



【図3-7 画面分解能】

(2) 基準点の誤差に寄与する事項

基準点の誤差 (図3-6) の原因としては次のものが考えられる。

(a) 測定機に関する事項

- ・ 光の方向による2値化レベルの変動。
- ・ ビデオデッキの回転ヘッドを回転偏差。
- ・ カメラ感光素子の感度のバラツキを無視。
- ・ カメラ感光素子の配列のバラツキを無視。

これらの誤差は相対的に小さく全体の精度にはあまり影響しないが、

- ・ 画面素子の分解能の低さは約22mmから45mmにもなり、誤差をその1/2以下にする事は不可能である。

(b)実験装置に関する事項

- ・位置測定器具の設置誤差
- ・壁の設置位置の誤差
- ・カメラと体育館の位置関係の測定誤差

これらの誤差は約10mm程度である。

(c)座標変換に関する事項

- ・入射角 θ の近似
- ・ザイデル5収差に含まれる近似
- ・カメラ中心軸を画面上の座標 $(X_1, Y_1) = (0, 0)$ としている。

画像上座標を決める際にはカメラとは無関係に水平同期位置から原点を設定しているので一般的に中心軸は $(0, 0)$ と一致しない。しかし、 $(0, 0)$ からの距離は小さく、変換定数が2個増えるのを避けるため無視している。

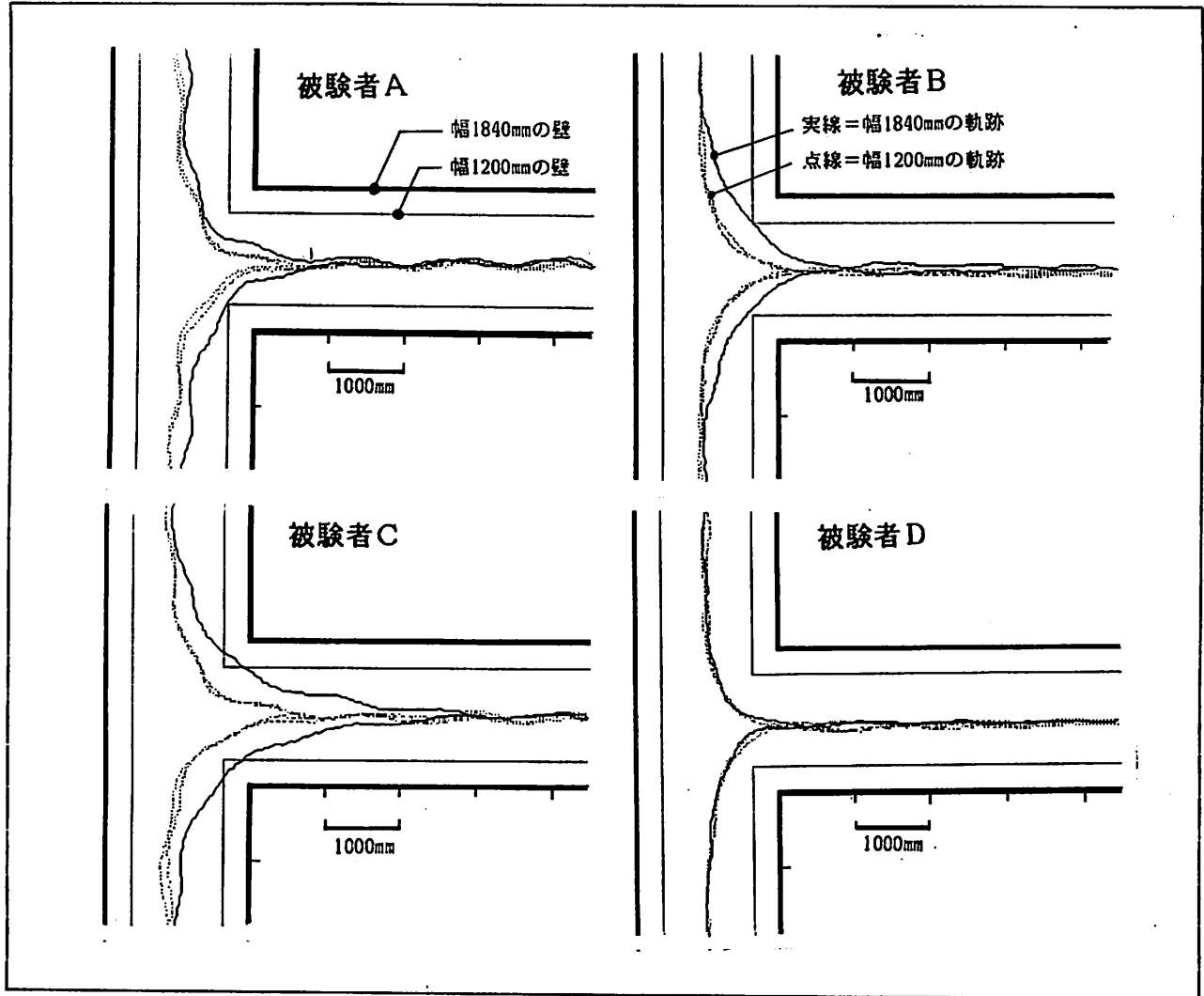
(3)人体寸法の近似に関する事項

- ・歩行中の動的身長を使うべきであるが、測定がむずかしいため静的身長としている。
- ・頭部の上下動(約20~50mm程度)を無視している。(参考文献4)
- ・頭高の個人差(約10~30mm程度)を無視している。(参考文献4)

実験データの誤差は図3-6の値にこれらの3個を加えた値となる。

第4章 個人軌跡

前章の座標変換を使って、各被験者についての全軌跡（幅の違い、左右曲）を重ね合わせた図が得られる。その代表例4個を図4-1に示す。



【図4-1 個人軌跡の代表例】

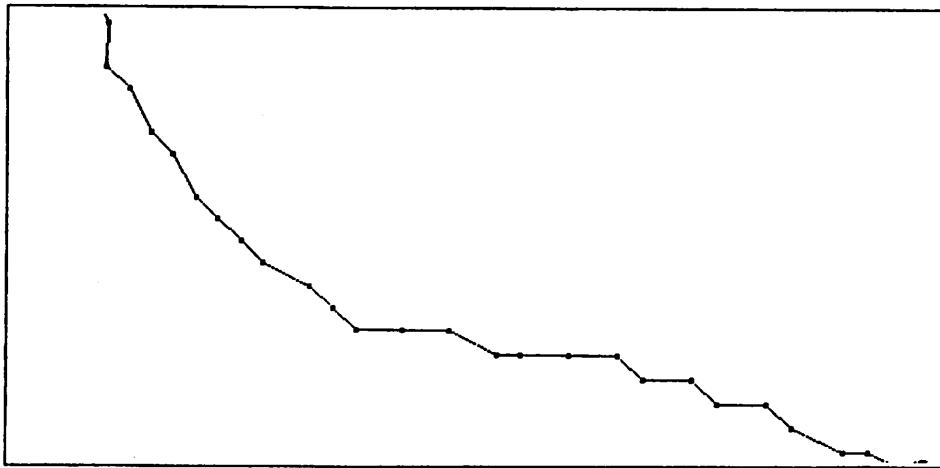
全被験者47名分の個人軌跡から読み取れるのは次のようなことである。

- ・軌跡が左右に振れているのは足の運びによるもので個人差が大きい。
- ・左右の曲がり方の違いは（A）のように角において外側の足をつくか、内側の足をつくかによって軌跡が大きく異なる。歩幅がほぼ一定であるから出発点でどちらの足から歩き始めるかによって決まるということである。幅1200mmでは幅1840mmに比べて壁の移動のため出発点から角までの距離は320mm長くなっているが、この値は成人男子の歩幅の平均値750mmの約1/2である。
- ・曲がり始める位置は(c)、(d)のようにバラツキが非常に大きい。

第5章 スムージング

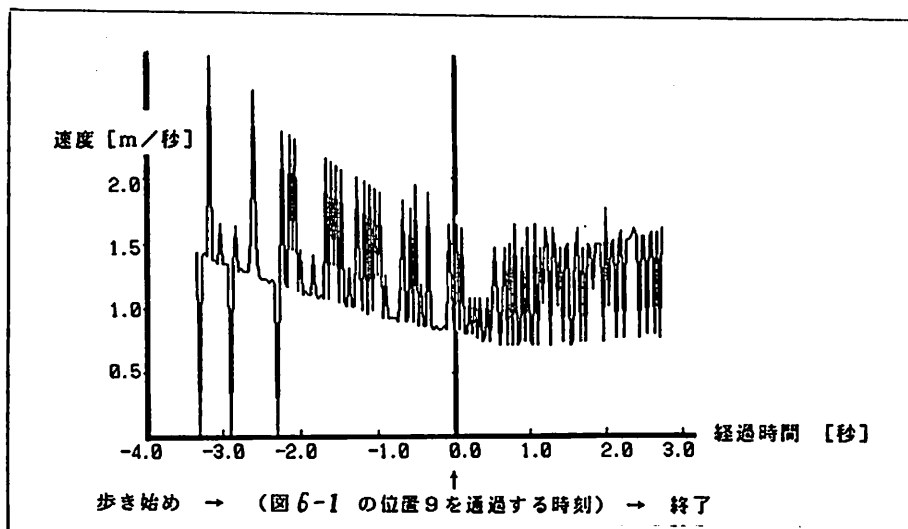
§5-1 スムージングの必要性

軌跡を拡大した図5-1からわかるように、画像処理の際にアナログ/デジタル変換をおこなっているため、変位はその分解能（フルスケールの1/256）ごとの離散値となっていて実際にはありえない細かく振動した軌跡となっている。前章の変換では求める重心位置が1ドットの中央にあるものとしているので、この振幅は1ドット（22mm～40mm）の1/2の範囲であるから、歩行位置の分析にはあまり影響はない。しかし、速度を求める場合にこの値をそのまま差分計算すると図5-2のような振動したグラフしか得られない。



【図5-1 個人軌跡の拡大図】

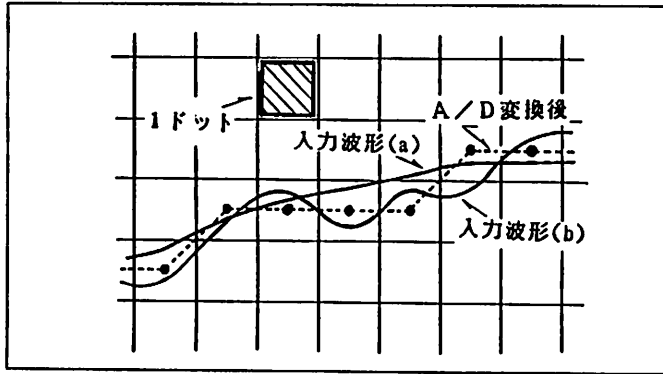
画面上で最も分解能が高い1ドット=22mmのところでは速度を求める場合においても、1/30秒間に0, 1, 2ドット(0mm, 22mm, 44mm)移動した場合の速度は 0, 0.66[m/sec], 1.32[m/sec]と成人男子の歩行速度 1.0~1.5[m/sec]と比較して刻みが大きすぎるためである。時刻0秒までの間に速度がゆるやかに低下しているように見えるのは、1ドットの大きさが徐々に大きくなるためで曲がり角での速度の低下を表しているのではない。



【図5-2 変換データの差分による速度計算】

§5-2 フィルターによるスムージング

アナログ/デジタル変換によって失われた1ドット未満の値はどのようなことをしても、数学的に正確に復元することはできない。例えば、図5-3の入力波形(a),(b)をアナログ/デジ



【図5-3 アナログ/デジタル変換の拡大図】

タル変換した値がともに黒点のとなった場合、変換後の黒点データからは元の波形が(a)であるか(b)であるかは決められない。これは振幅の小さい周波数成分(1ドット以下)に対してであり、人体頭部のような大きな振幅の周波数成分はほぼ復元できるが、それに1ドットの振幅のアナログ/デジタル変換による雑音が付加されたものと考えられる。その雑音の基本周波数はサンプリング周波数の1/2の15Hzで他にその奇数倍(3,5,7...)の高調波成分を含んでいるが、いずれも人間の足の運びの周波数の1Hzと比較してかなり高い周波数である。また、足の運び以外の動作の周波数も15Hzに比較して充分低いと思われるので、低い周波数成分のみを通過させるフィルターをかけて、サンプリングによる振動を取り除いている。

以後の考察では次の2種類のフィルターを用意しフィルターをかけていないデータとの3種類のデータを使っている。

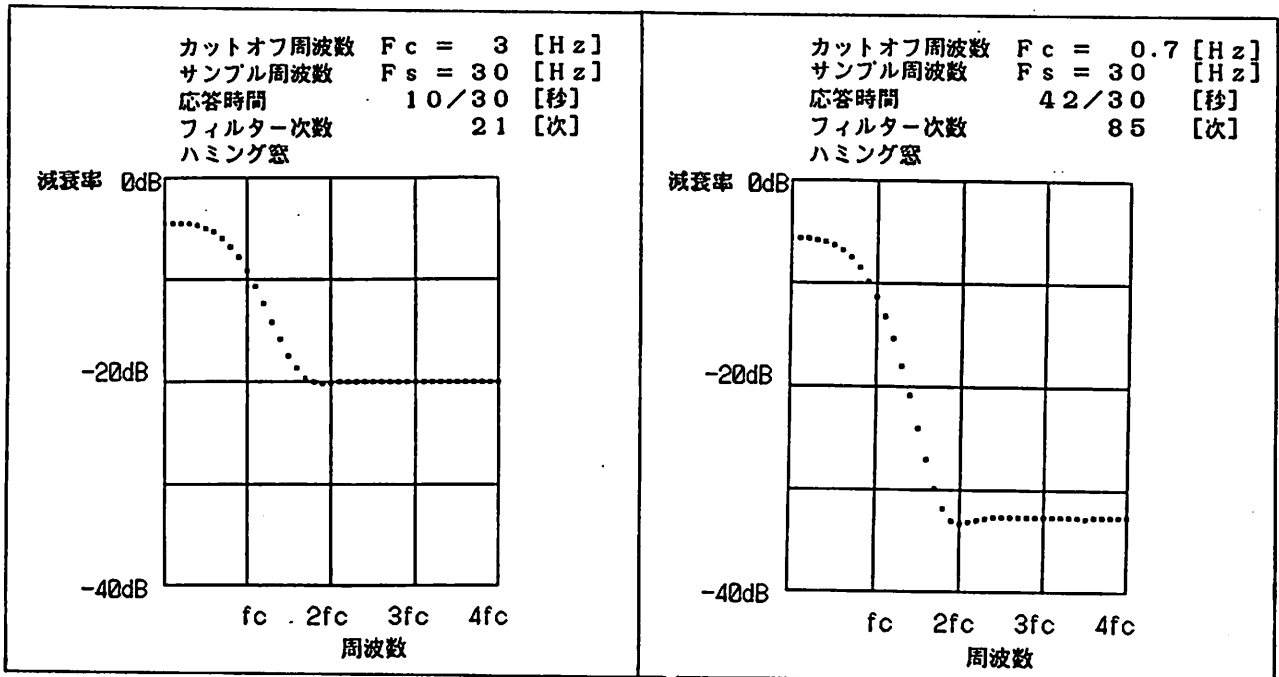
- ・フィルター(H)： 頭部の左右の揺れを残してサンプリングによる振動のみを取り除くフィルター
- ・フィルター(L)： 足の運びによる頭部の揺れをも取り除くフィルターで、その出力値は身体重心の位置を表している。

これらのフィルターの特性(カットオフ周波数等)を決める際に、本来はより精度の高い測定をおこなう等して、歩行の周波数スペクトルをみてから不要な周波数をカットするように決めべきである。しかしながら、フィルター(H)の方は取り除くべき雑音と残したい波形の周波数が数倍以上異なるため要求される特性に余裕があるためサンプリング周波数の1/10としている。フィルター(L)の方は曲がりそのものの約0.4~0.5Hzの周波数成分と取り除くべき1Hz付近の周波数が近いため、減衰特性の急峻なものが要求されるが、データ点数が少ないためあまりフィルター次数を多くして応答時間を長くはできない。カットオフ周波数の0.7Hzと窓関数は減衰特性と応答時間を見比べながら12種類のフィルターの中から選びだした。

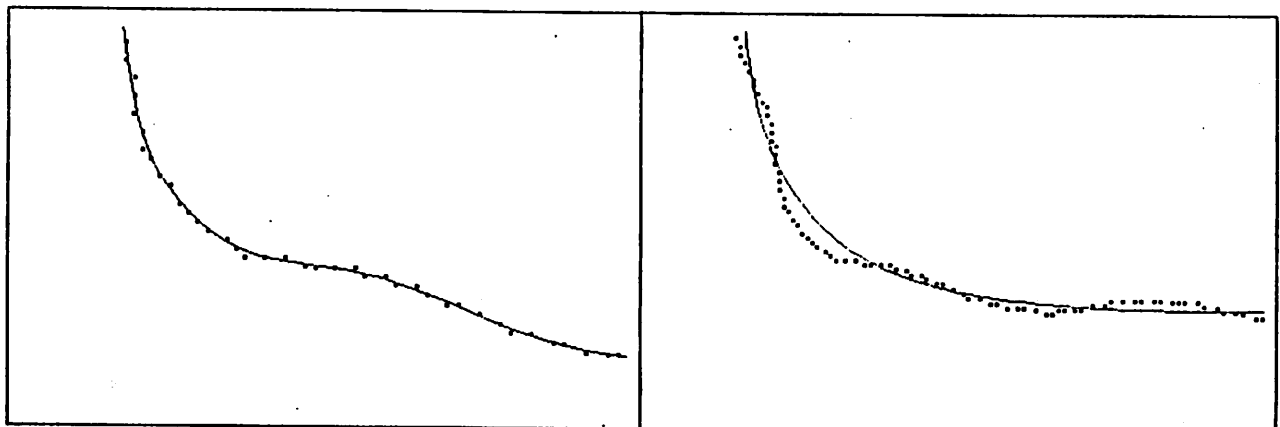
§ 5-3 デジタルフィルターの特性

変位が X , Y の 2 個であるから、フィルターを通した時に位相のズレが問題となるが、ここでは直線位相性を実現できる FIR 型 (Finite Impulse Response) のフィルターとして位相差を 0 にしている。

使用したフィルターの減衰特性とフィルター後の軌跡を図 5-3, 5-4 に示す。



【図 5-3 フィルターの減衰特性】



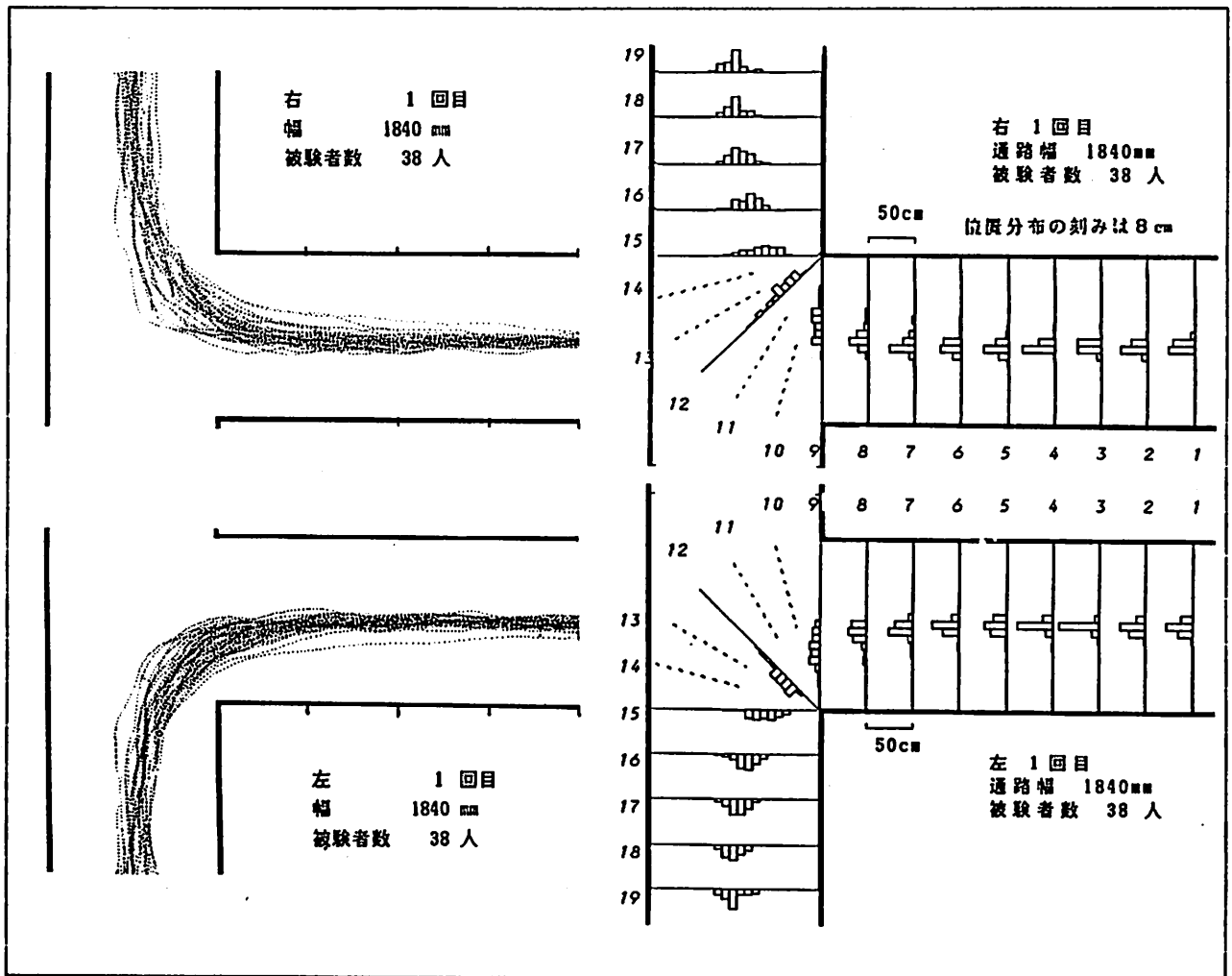
【図 5-4 フィルター後の軌跡】

第6章 歩行位置

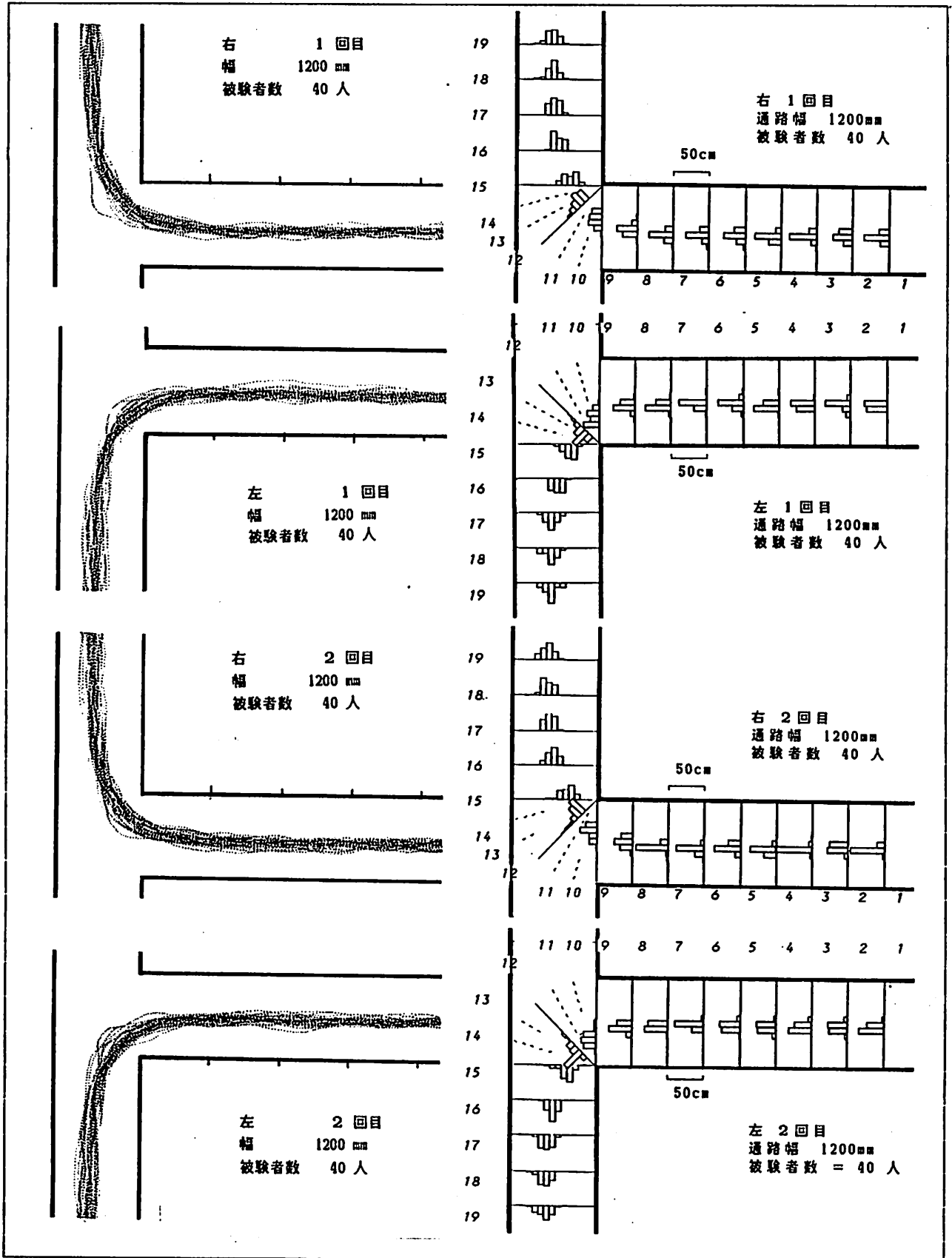
§6-1 頭部軌跡

(1) 軌跡とその分布

頭部軌跡としてフィルター(H)を通したデータの軌跡と、廊下内に仮想的に設定した線を通過するときの壁からの歩行位置の分布を図6-1, 6-2のように求めた。表6-1は歩行位置の平均・標準偏差をまとめたものである。



【図6-1 幅1840mmの全員の軌跡と歩行位置分布】



【図6-2 幅1200mmの全員の軌跡と歩行位置分布】

【表6-1 全員の軌跡の分布】

： σ は標準偏差。縦軸は図6-2に示す廊下位置番号。
 数値は、廊下の中央を原点とした歩行位置のズレを表し
 単位はmm、曲がる方向を-符号、反対側を+符号で表示。

		廊下幅 1.84m		廊下幅 1.20m									
		左曲		右曲		左 1回目		右 1回目		左 2回目		右 2回目	
		平均	σ	平均	σ	平均	σ	平均	σ	平均	σ	平均	σ
廊 下 位 置 番 号	1:	-9	51	34	42	-44	39	74	49	-40	42	75	41
	2:	-14	51	51	49	-38	56	74	46	-48	47	64	36
	3:	-8	46	45	55	-33	47	81	46	-37	42	81	40
	4:	-6	55	48	56	-41	48	91	49	-47	54	92	39
	5:	-19	60	60	72	-22	58	85	52	-40	50	79	38
	6:	-22	65	51	81	-27	46	85	55	-24	42	95	42
	7:	-50	77	30	94	-45	46	74	54	-41	45	73	40
	8:	-126	97	-27	109	-67	53	20	60	-69	46	11	58
	9:	-277	154	-203	165	-234	88	-128	85	-229	74	-139	79
	10:	-346	154	-278	172	-269	84	-178	88	-266	72	-194	83
	11:	-392	148	-317	183	-284	85	-208	89	-282	76	-228	85
	12:	-410	146	-337	188	-283	87	-222	88	-281	83	-243	88
	13:	-404	145	-346	173	-269	86	-221	85	-267	86	-241	92
	14:	-374	143	-334	159	-240	82	-204	82	-236	87	-223	87
	15:	-315	144	-287	152	-187	76	-161	80	-185	85	-178	86
	16:	-135	107	-127	109	-5	58	19	63	9	66	18	65
	17:	-50	94	-46	104	71	78	73	67	85	75	73	62
	18:	-12	89	-7	100	92	85	102	73	109	80	107	71
	19:	-3	108	13	98	91	82	107	79	109	85	115	75

(2) 曲がり角出入口の歩行位置の相関

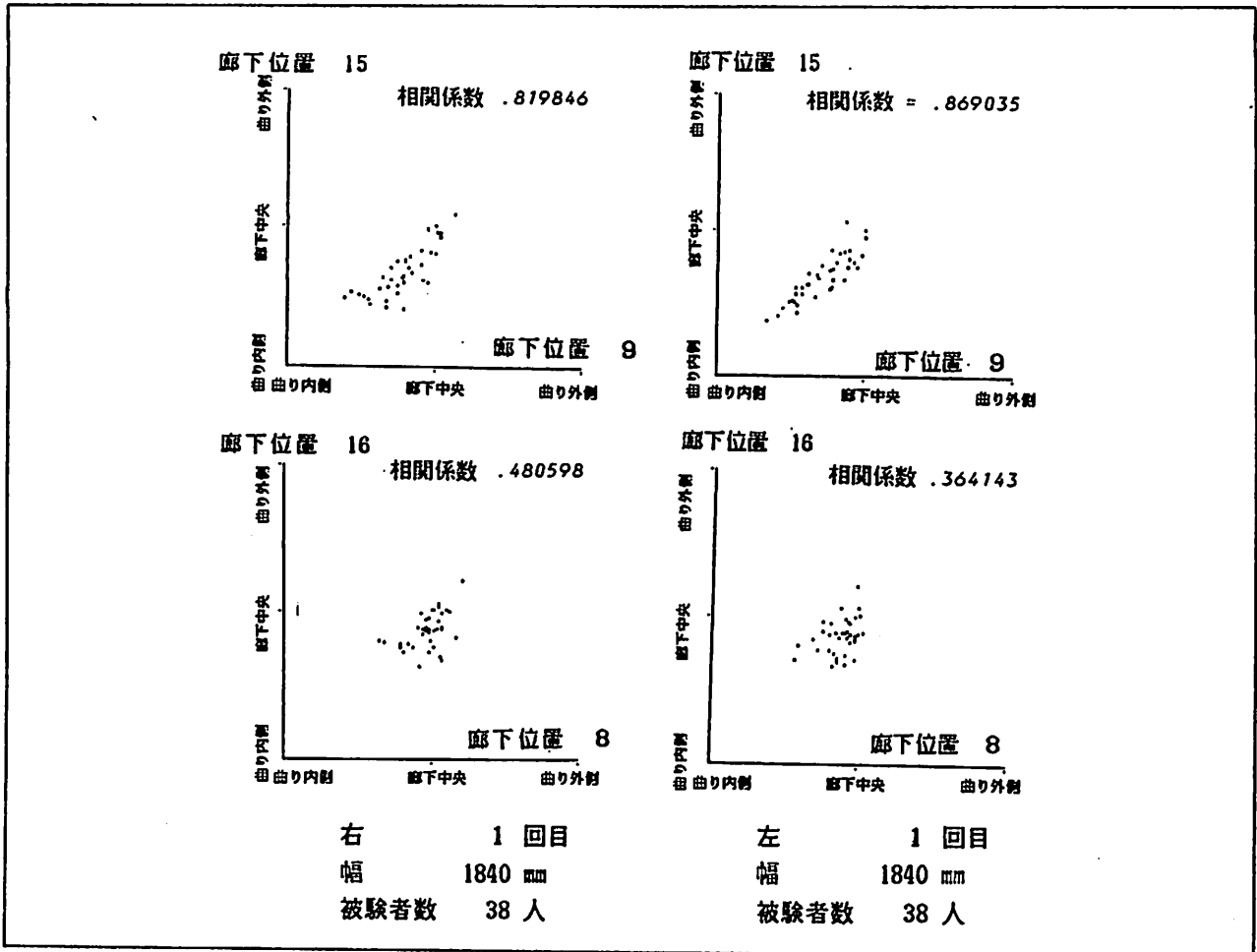
以下の図6-3, 6-4は曲がり角入口の歩行位置と出口の歩行位置との相関を表したものである。曲がり角入口とは図6-1, 6-2に示す廊下位置番号No.9における位置、出口は同じくNo.15における位置とした。また、その前後のNo.8とNo.16の相関もその下に表した。

(3) 考察

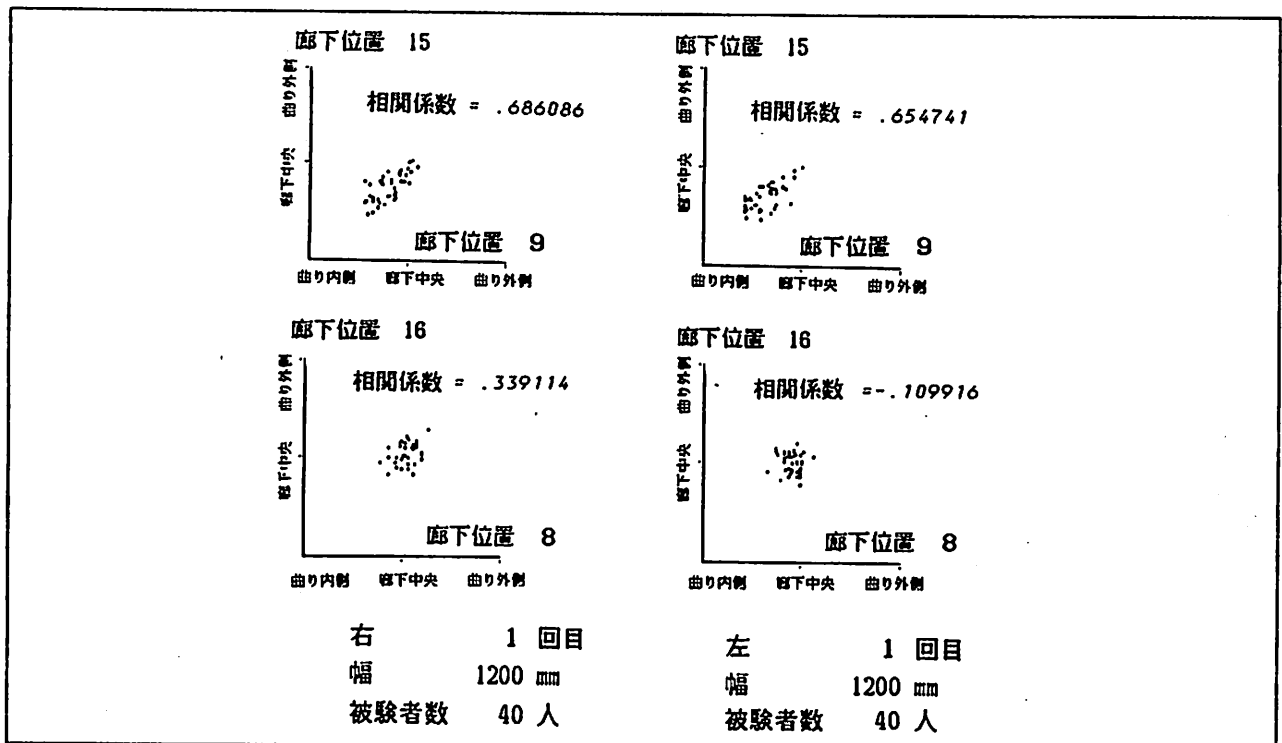
以上の図表から次のようなことが読み取れる。

- ・曲がりまでの直線部分の歩行位置の平均値はいずれも中央より左側に寄っている。しかし、頭部の左右の揺れ（平均値約600mm）を含んでいるので、直線部では左寄りに歩行しているとは判断できない。（参考文献4）
- ・図6-1, 6-2において軌跡からは左右の曲がり方の違いはあまり見られない。
- ・曲がり部分での標準偏差は明らかに幅の狭い1200mmの方が小さくなっている。
- ・曲がり角入口で内側を通った人は出口でも内側を通り、外側を通った人は出口でも外側を通る傾向がみられるが、データ数が少ないため相関係数が統計的に有意であるとはいえない。

また、ここでは省略しているが、曲がり角以外の部分での相関係数は0.1以下と非常に小さい。これは頭部の左右の揺れの影響が大きいためである。



【図6-3 曲がり角出入口の歩行位置の相関図 幅1840mm】

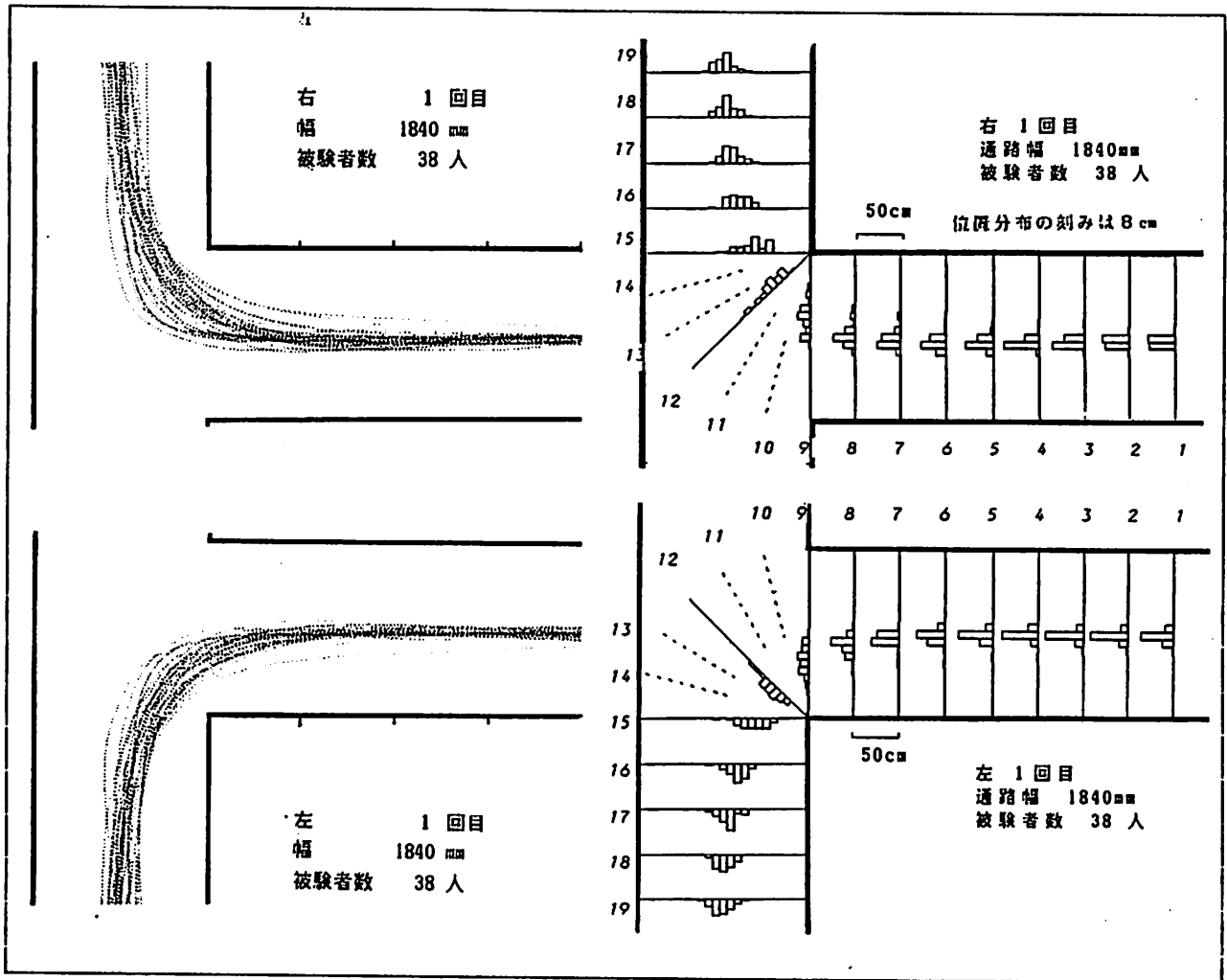


【図6-4 曲がり角出入口の歩行位置の相関図 幅1200mm】

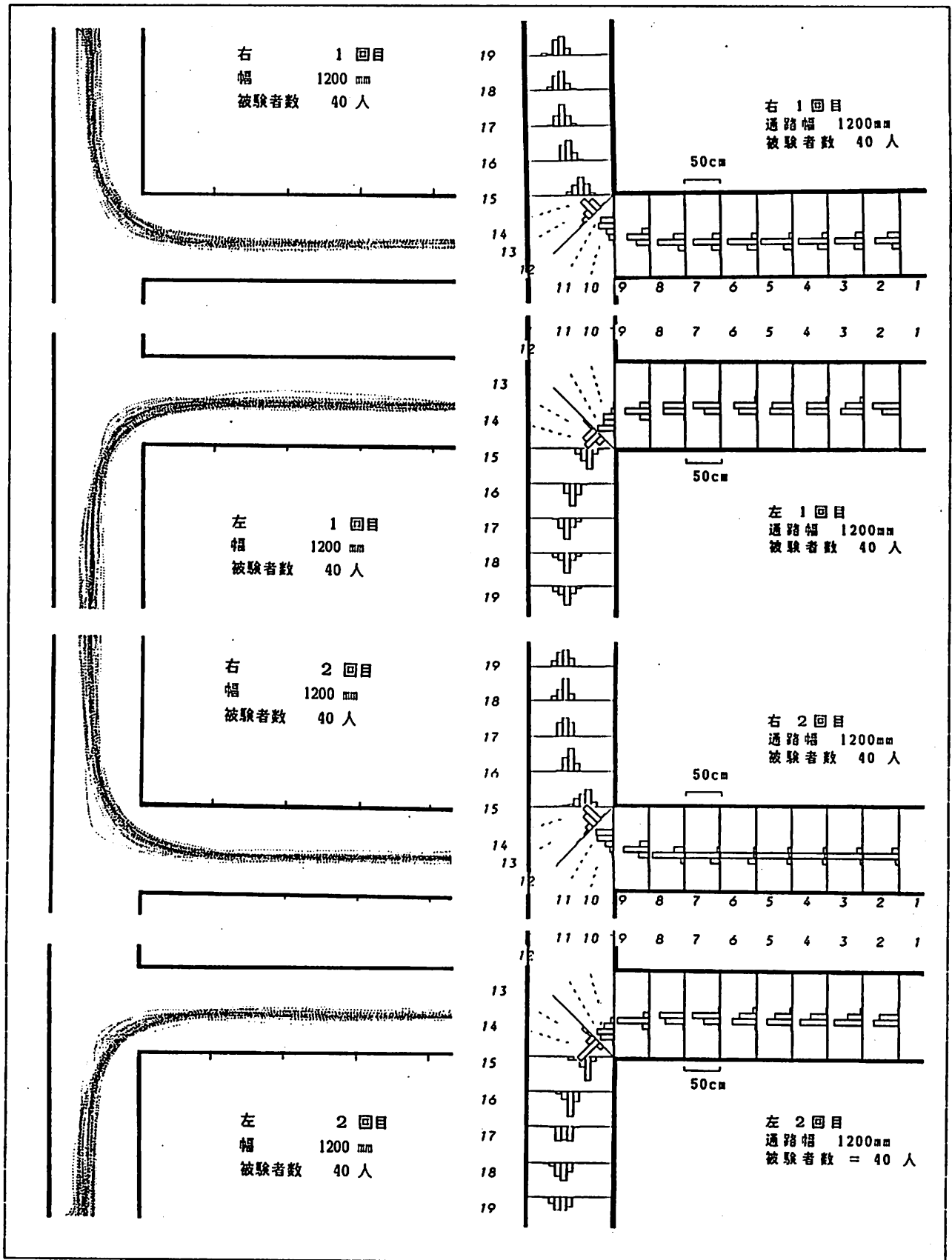
§ 6-2 身体重心軌跡

(1) 軌跡とその分布

図6-5, 6-6 と表6-2はフィルター(L)を通したデータを身体重心位置として軌跡と歩行位置の分布を § 6-1 と同様にまとめたものである。



【図6-5 幅1840mmの身体重心軌跡と歩行位置分布】



【図6-6 幅1200mmの身体重心軌跡と歩行位置分布】

【表6-2 全員の軌跡の分布】

： σ は標準偏差。縦軸は図6-5に示す廊下位置番号。
 数値は、廊下の中央を原点とした歩行位置のズレを表し
 単位はmm、曲がる方向を-符号、反対側を+符号で表示。

		廊下幅 1.84m				廊下幅 1.20m							
		左曲		右曲		左1回目		右1回目		左2回目		右2回目	
		平均	σ	平均	σ	平均	σ	平均	σ	平均	σ	平均	σ
廊 下 位 置 番 号	1:	-14	43	39	40	-40	37	71	39	-41	36	68	32
	2:	-11	44	45	43	-38	44	76	38	-43	39	72	30
	3:	-9	45	47	48	-36	44	83	40	-42	41	80	31
	4:	-9	50	52	55	-34	46	88	43	-42	46	86	32
	5:	-14	55	55	66	-27	47	89	45	-36	45	88	33
	6:	-25	61	53	78	-27	43	86	48	-28	40	89	34
	7:	-53	73	31	90	-37	40	72	50	-35	36	72	37
	8:	-125	99	-36	110	-80	50	19	55	-79	41	12	51
	9:	-297	151	-211	163	-239	83	-144	81	-240	71	-162	82
	10:	-362	151	-284	173	-275	81	-195	82	-276	71	-214	82
	11:	-400	149	-328	180	-292	80	-223	82	-293	73	-242	83
	12:	-416	147	-351	179	-295	80	-235	80	-294	77	-253	85
	13:	-411	144	-357	169	-283	78	-231	78	-281	80	-247	87
	14:	-384	142	-340	158	-256	75	-209	76	-252	80	-225	85
	15:	-326	141	-291	151	-206	72	-165	76	-200	79	-180	82
	16:	-142	104	-131	110	-6	53	10	60	6	60	7	59
	17:	-54	92	-49	99	68	71	75	63	83	70	78	59
	18:	-14	91	-8	97	88	79	99	67	106	77	104	65
	19:	13	101	26	100	96	77	110	73	115	76	115	69

(2) 曲がり角出入口の歩行位置の相関

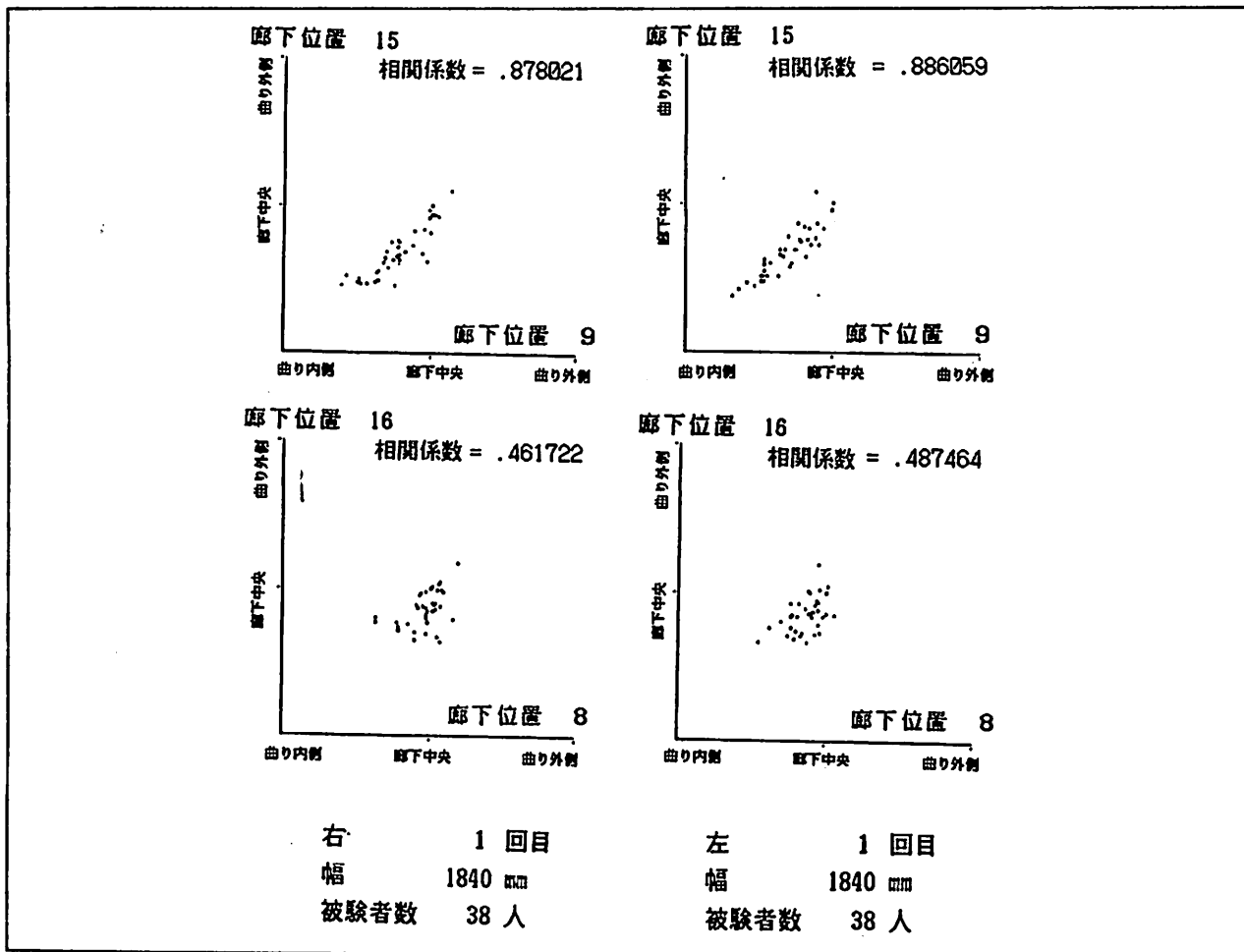
以下の図6-7, 6-8は §6-1と同様に曲がり角入口の歩行位置と出口の歩行位置との相関を表したものである。

(3) 考察

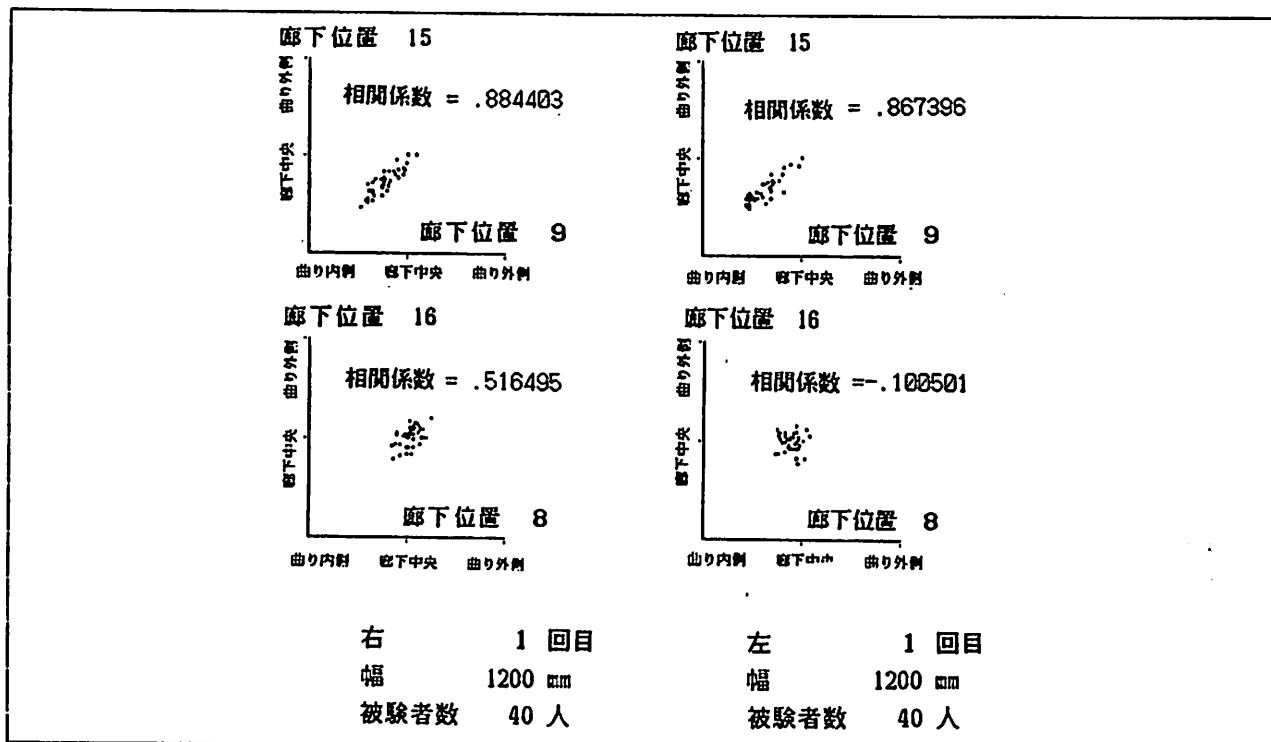
以上の図表から次のようなことが読み取れる。

- ・曲がりまでの直線部分の歩行位置の平均値はいずれも中央より左側に寄っている。これは頭部の左右の揺れ（平均値約600mm）を含んでいないものであるから、その大きさと測定精度（第3章）を比較すると、直線部で左寄りに歩行しているといえる。
- ・図6-5, 6-6において軌跡からは左右の曲がり方の違いはあまり見られない。
- ・曲がり部分での標準偏差は §6-1と同様に幅1200mmの方が小さくなっている。
- ・曲がり角入口で内側を通った人は出口でも内側を通り、外側を通った人は出口でも外側を通る §6-1と同じ傾向がみられ、相関係数がやや高くなっているが、データ数が少ないため相関係数が統計的に有意であるとはいえないのも同様である。

また、ここでは省略しているが、曲がり角以外の部分での相関係数は0.9以上と非常におおきくなっている。これは頭部の左右の揺れの影響を取り除いたためであるが、No.15~No.16の部分の相関係数は他と比べて低い。



【図6-7 曲がり角出入口の歩行位置の相関図 幅1840mm】



【図6-8 曲がり角出入口の歩行位置の相関図 幅1200mm】

第7章 速度

§7-1 速度定義式

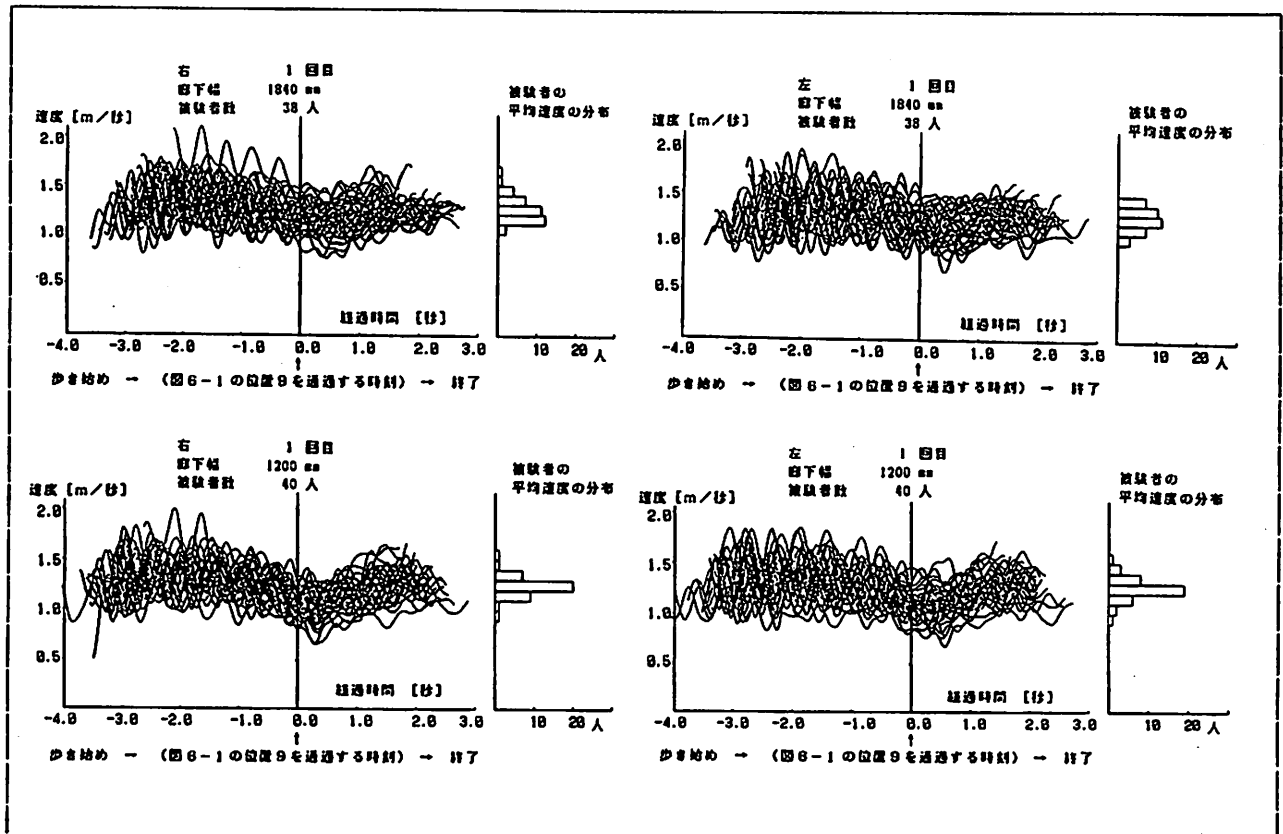
時刻 i ($i = n \cdot \Delta t$) における速度 $V(i)$ を次式で定義している。

$$V(i) = \frac{\sqrt{(X_{5(i)} - X_{5(i-1)})^2 + (Y_{5(i)} - Y_{5(i-1)})^2}}{\Delta t}$$

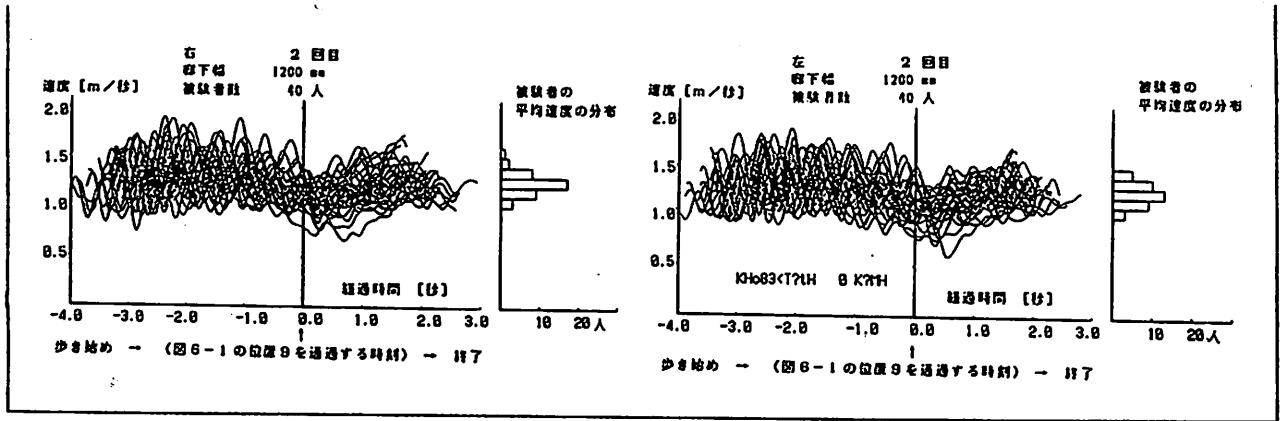
- Δt は 1/30 秒
- $X_{5(i)}$, $Y_{5(i)}$ はフィルター(H)またはフィルター(L)のどちらかを通したデータ。

§7-2 速度変化のグラフ

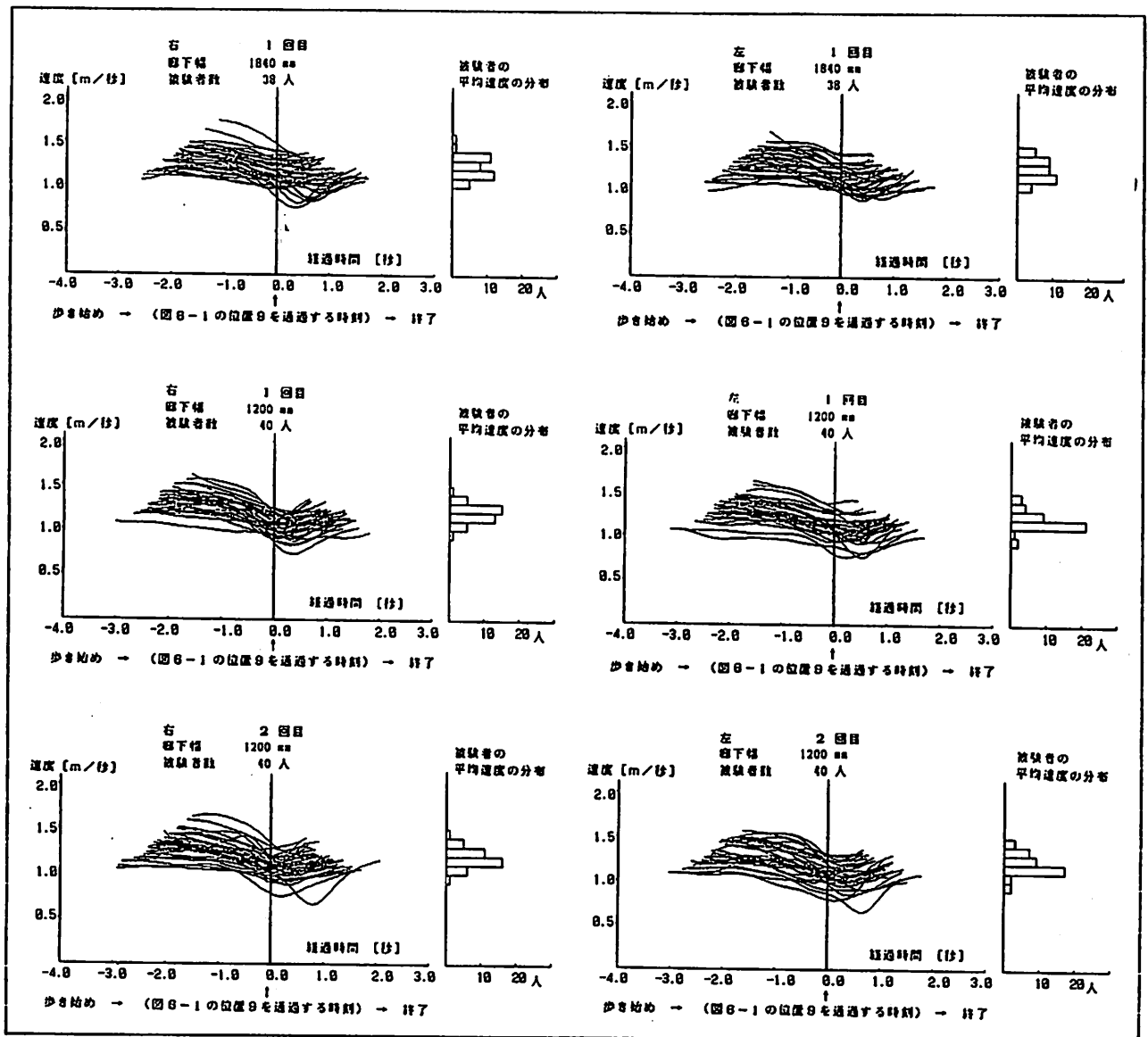
横軸を時刻とした頭部の速度変化の様子を図7-1に、身体の色度変化を図7-2に示す。横軸の基準時刻は曲がり角入口(図6-1の廊下位置No.9)を通過する時刻=0[秒]とした。図7-2においてデータの存在する時間が短いのはフィルター(L)の応答時間によって生じる無効データを削除しているためである。



【図7-1 頭部速度の変化 (次ページへ続く)】



【図7-1 頭部速度の変化 (前ページの続き)】



【図7-2 身体速度の変化】

§ 7-3 曲がり角における速度低下

一般に、曲がり角において歩行速度が低下する。その様子は図7-1, 7-2から読み取れるが、数値としての速度低下を次式で求めて、表7-1としている。

$$\text{(速度低下)} = \text{(直線部分の最初の10/30[秒]間の平均速度)} - \text{(曲り角部分の最低速度)}$$

・データはフィルター(L)をかけたもの。

速度低下の数値は、廊下の曲がりにくさ・通りにくさを数値化したものと言える。

【表7-1 曲がり角における身体速度の低下】

	廊下幅 1840mm		廊下幅 1200mm			
	右1回	左1回	右1回	左1回	右2回	左2回
直線部速度の平均 [m/秒]	1.350	1.351	1.342	1.350	1.334	1.353
最低速度の平均 [m/秒]	1.097	1.123	1.031	1.043	1.044	1.061
速度低下の平均 [m/秒]	0.253	0.228	0.311	0.307	0.290	0.292
速度低下の標準偏差	0.110	0.090	0.081	0.087	0.093	0.098

第8章 再現性

同一人物の10回の歩行のデータを第6章、第7章と同じ形式の図で表し比較をおこなった。

§8-1 歩行位置

第6章と同様に頭部軌跡を図8-1に、身体重心軌跡を図8-2に、その分布の平均・標準偏差を表8-1、表8-2にまとめた。

§8-2 速度

第7章と同様に速度変化を図8-3、図8-4とした。

§8-3 再現性の考察

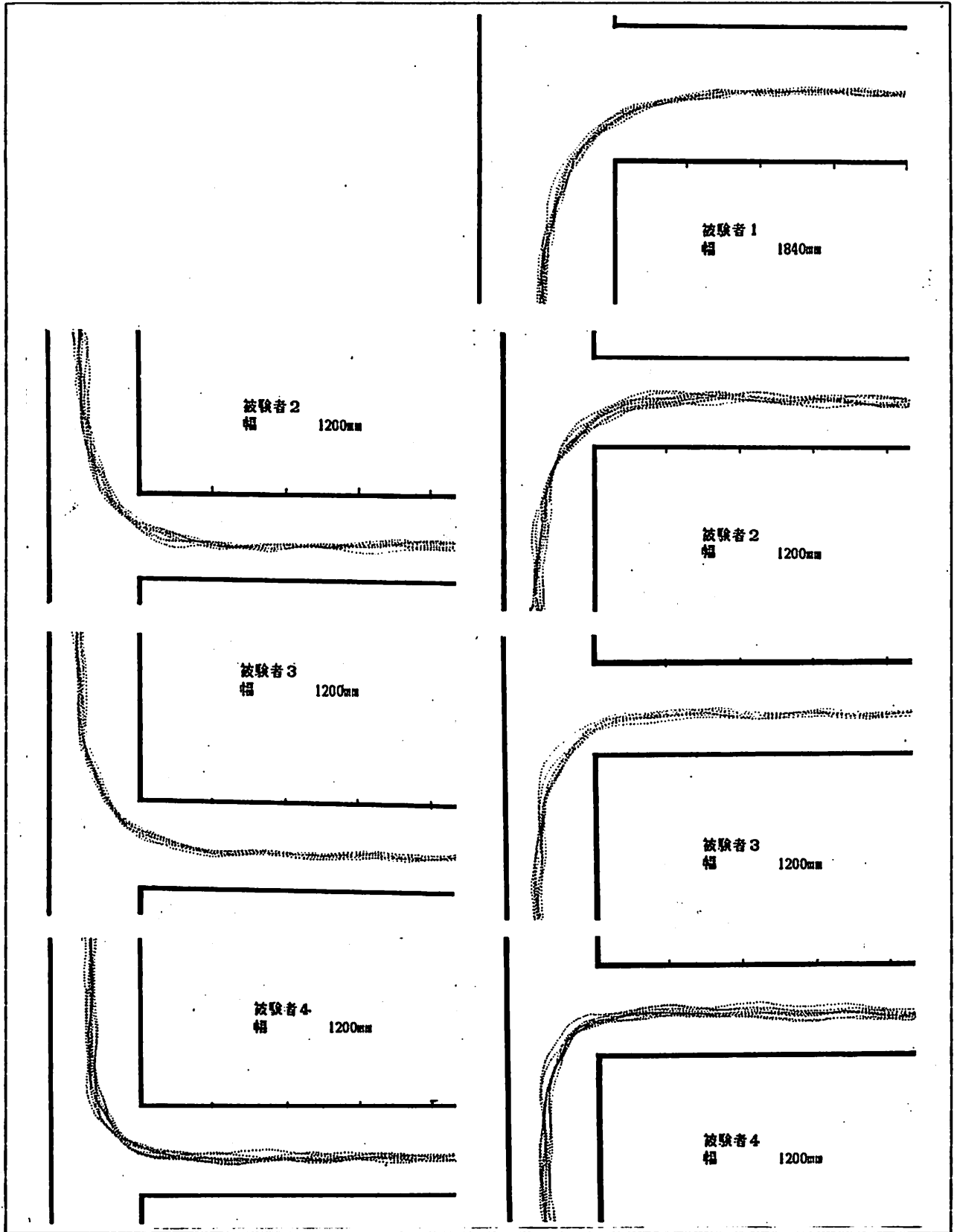
同一人物で幅1840mm、1200mmの両方のデータが揃っているものがないので、その比較ができない。また、データ数が10個と少ないので単純に平均・標準偏差で比較できない。が次のようなことが読み取れる。

- ・表6-1、6-2に比較して、曲がり部分の標準偏差は直線部分との差があまりない。これは直線部分よりも曲がり部分で個体の特徴が現れて、直線部分では個体の特徴が殆どないものであることを意味している。

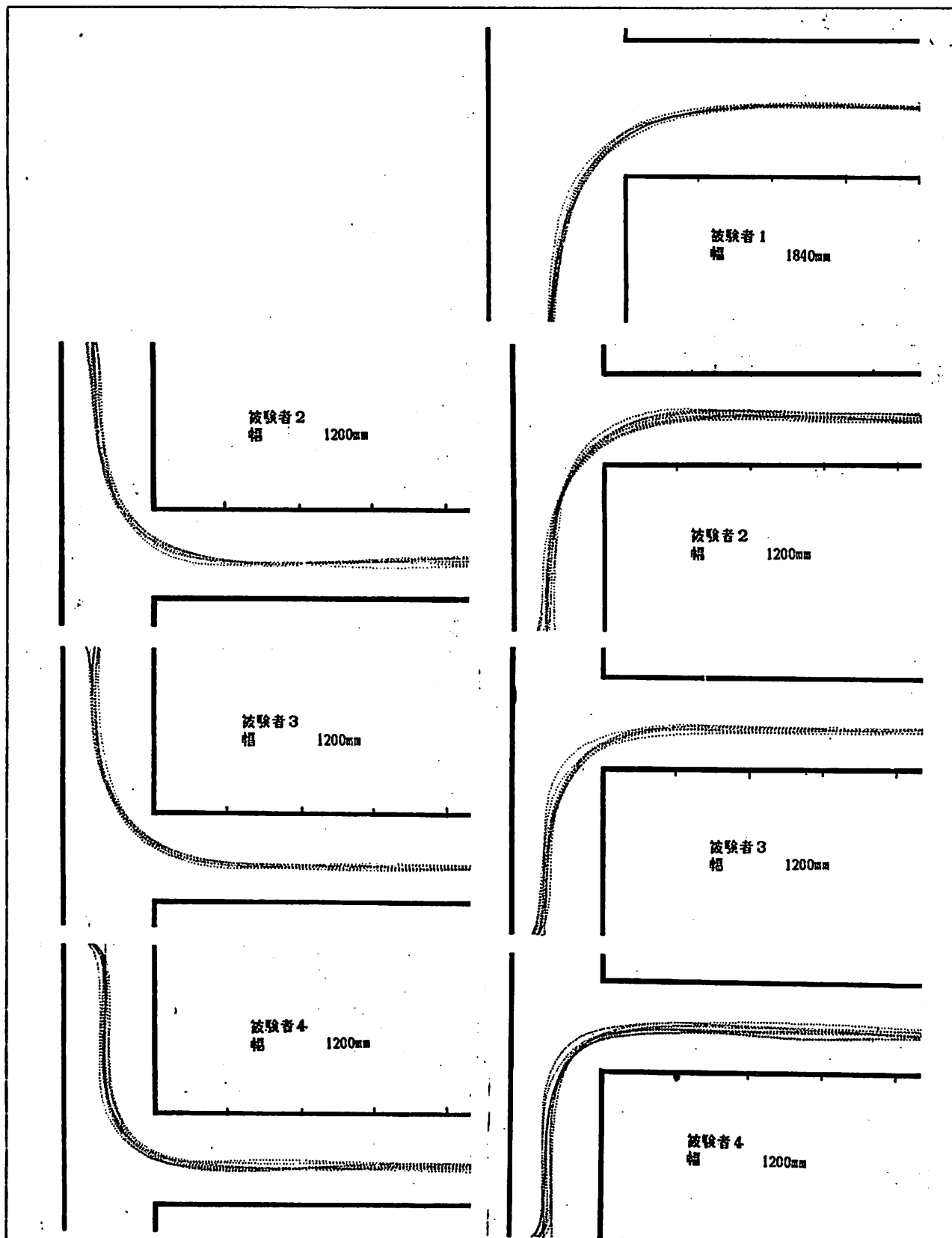
- ・曲がり部分の標準偏差は、表6-1、6-2に比較して小さく個体間のバラツキは個人のバラツキに比べて無視できない。また、個体のバラツキも個体間のバラツキに比較して無視できない。

また、速度に関しても「被験者3・右曲」のように10回の歩行が非常によく一致しているものもあるが、一方では「被験者2・左曲」のようにランダムと思えるものもあり、規則性が有るか無いかはデータ数が少なすぎて判断できない。

なお、図8-3における「被験者4・右曲、左曲」の曲がり部分以後での頭部の速度の変化が小さくなっているが、これは被験者4が長髪で横から撮影した場合にもはや球形とは見なしえないことによる。



【図 8 - 1 10回の歩行の頭部軌跡】



【図8-2 10回の歩行の身体重心軌跡】

【表8-1 10回歩行の頭部軌跡の分布】

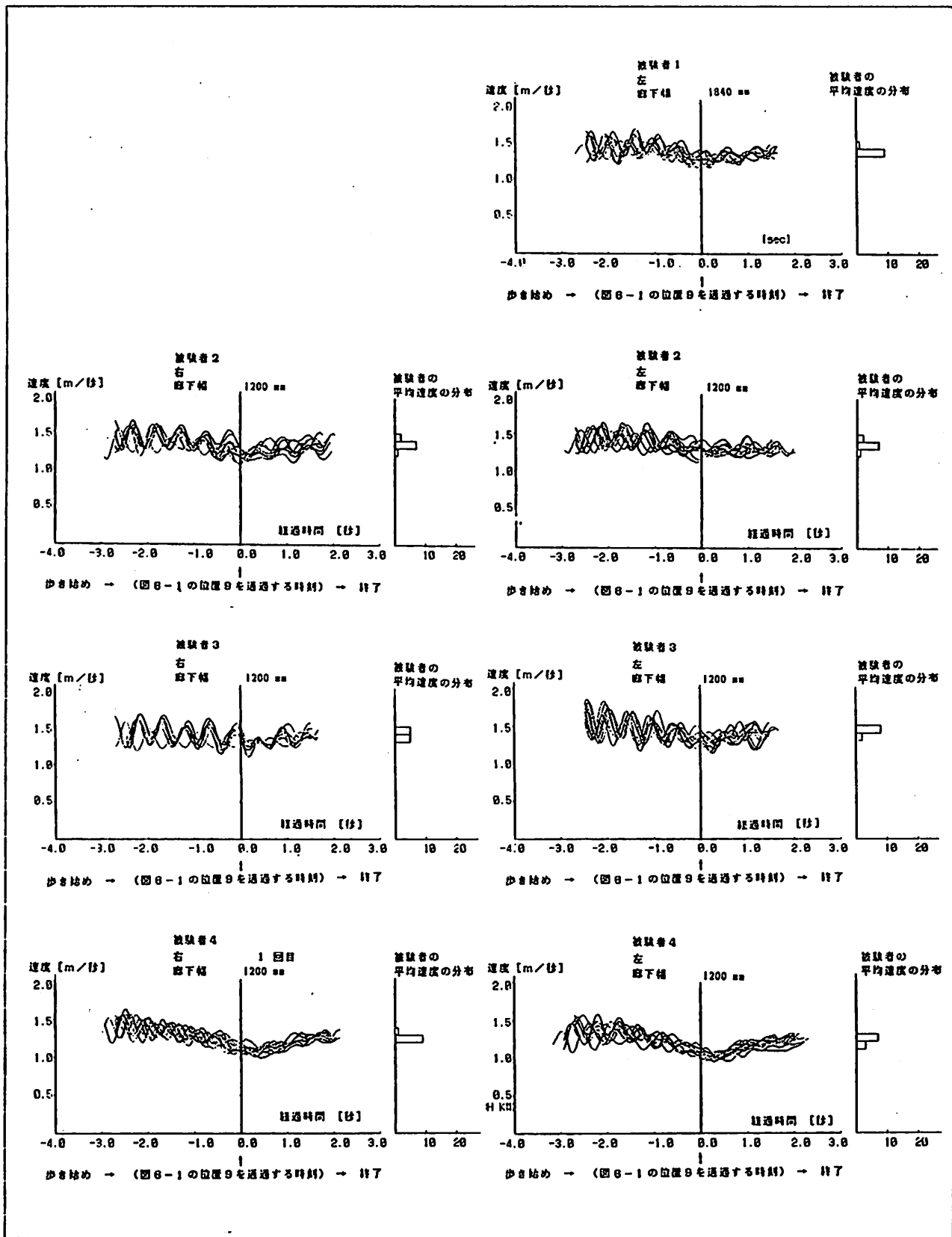
: σ は標準偏差。縦軸は図6-1に示す廊下位置番号。
 数値は、廊下の中央を原点とした歩行位置のズレを表し
 単位はmm、曲がる方向を-符号、反対側を+符号で表示。

	廊下位置番号	被験者1 廊下幅 1.84m		被験者2 廊下幅 1.20m		被験者3 廊下幅 1.20m		被験者4 廊下幅 1.20m						
		左曲		右曲		左曲		右曲						
		平均	σ	平均	σ	平均	σ	平均	σ					
1:	12	23	9	53	73	48	-82	23	116	25	-68	44	99	31
2:	23	31	41	44	75	38	-82	24	100	29	-23	54	84	37
3:	46	19	48	40	104	36	-49	24	86	28	-46	63	86	27
4:	44	23	43	45	108	21	-87	24	118	26	-31	60	104	39
5:	33	22	83	37	121	29	-78	33	91	19	-12	59	92	34
6:	15	32	76	51	133	16	-43	32	85	21	-27	49	109	44
7:	-51	22	39	65	95	26	-81	37	92	24	3	52	107	43
8:	-163	20	-28	59	16	60	-119	41	-11	29	-41	45	63	35
9:	-387	51	-283	63	-191	48	-281	47	-182	45	-137	47	-24	48
10:	-457	39	-331	58	-247	41	-323	44	-223	34	-159	48	-71	36
11:	-493	31	-353	55	-282	36	-342	44	-246	27	-165	48	-110	24
12:	-505	30	-360	53	-295	33	-345	47	-257	21	-160	46	-133	29
13:	-497	32	-352	51	-287	31	-333	51	-255	18	-153	41	-133	42
14:	-461	38	-326	51	-256	33	-302	60	-234	19	-133	48	-106	55
15:	-386	51	-274	53	-198	47	-244	78	-186	25	-87	61	-57	61
16:	-167	53	-12	21	11	40	58	46	47	37	93	50	55	37
17:	-39	35	83	59	101	37	127	25	174	31	111	44	62	48
18:	44	34	148	43	150	46	167	48	180	32	129	48	68	38
19:	71	31	158	46	174	57	200	32	218	39	122	50	59	34

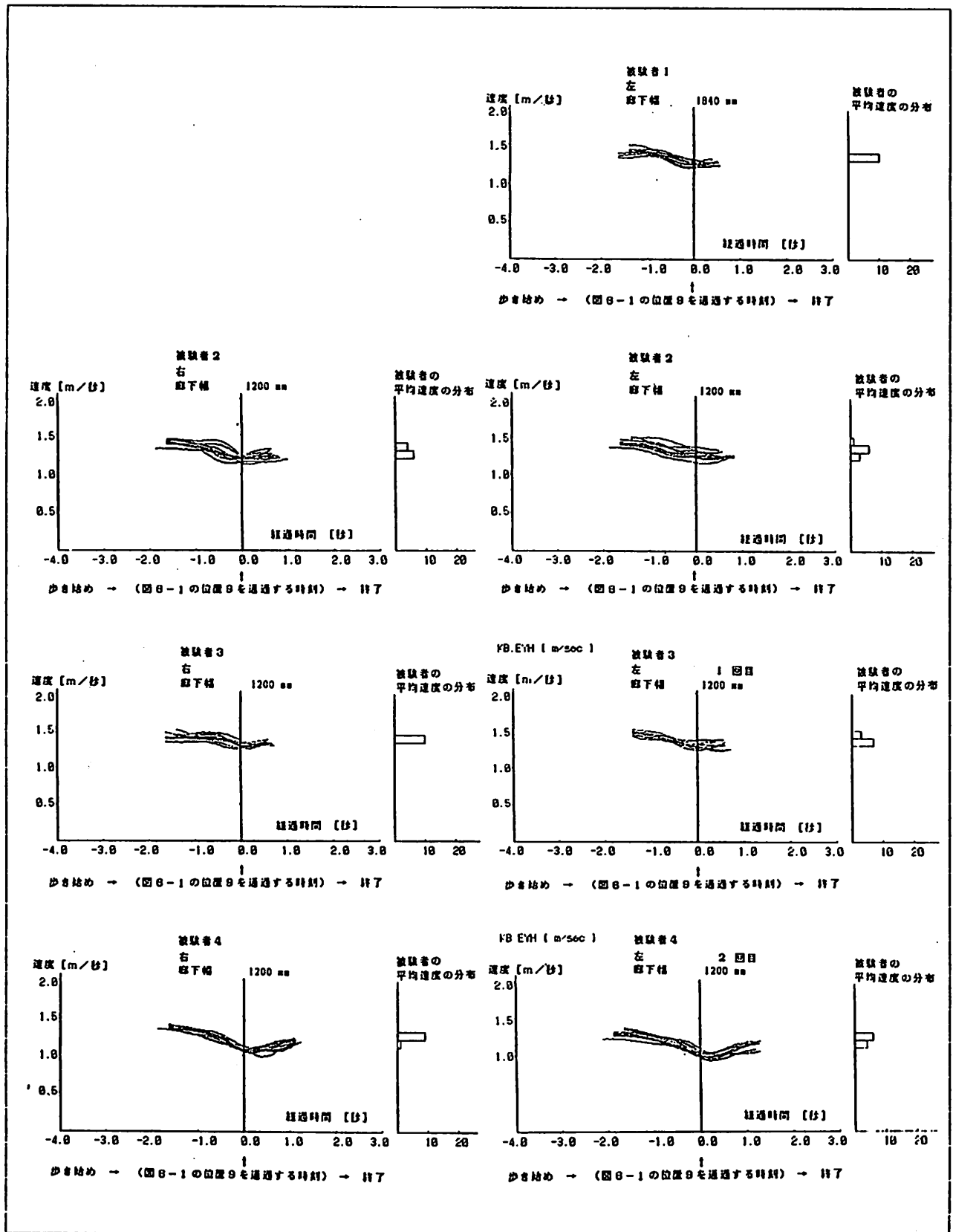
【表8-2 10回歩行の身体重心軌跡の分布】

: σ は標準偏差。縦軸は図6-1に示す廊下位置番号。
 数値は、廊下の中央を原点とした歩行位置のズレを表し
 単位はmm、曲がる方向を-符号、反対側を+符号で表示。

	廊下位置番号	被験者1 廊下幅 1.84m		被験者2 廊下幅 1.20m		被験者3 廊下幅 1.20m		被験者4 廊下幅 1.20m						
		左曲		右曲		左曲		右曲						
		平均	σ	平均	σ	平均	σ	平均	σ					
1:	10	14	21	43	73	39	-74	22	101	24	-54	42	89	30
2:	29	18	33	40	83	35	-72	21	99	28	-41	52	88	29
3:	43	18	43	37	99	28	-70	22	97	27	-37	60	90	28
4:	45	18	57	36	113	17	-73	26	102	24	-29	62	95	31
5:	35	16	75	38	124	14	-68	30	98	20	-20	57	101	36
6:	10	19	75	46	127	14	-58	32	95	20	-13	51	108	41
7:	-49	19	45	57	97	21	-69	34	75	23	-7	48	104	39
8:	-163	24	-49	59	9	40	-127	36	-8	30	-39	42	71	33
9:	-395	37	-293	56	-212	46	-308	48	-211	37	-148	43	-49	36
10:	-464	34	-336	47	-265	38	-340	47	-259	32	-180	44	-100	33
11:	-501	32	-358	41	-293	33	-354	47	-283	29	-193	45	-130	32
12:	-513	32	-364	38	-302	31	-354	49	-289	26	-191	46	-142	34
13:	-503	34	-356	37	-295	30	-340	54	-279	26	-174	48	-137	38
14:	-469	38	-332	36	-270	32	-308	61	-250	27	-141	50	-114	43
15:	-403	45	-284	35	-220	35	-249	70	-194	29	-84	55	-68	47
16:	-168	43	-23	19	2	31	31	47	48	27	76	48	49	39
17:	-39	35	90	40	102	33	133	32	158	30	118	43	69	39
18:	37	28	141	43	149	38	167	34	195	32	120	46	60	37
19:	83	26	162	45	177	43	194	36	209	37	124	51	67	34



【図8-3 10回歩行の頭部速度】



【図8-4 10回歩行の身体重心速度】

第9章 終章

本稿では画像処理を利用した測定方法のファースト・トライアルとして変換方法・測定精度・フィルターといったデータを得るための手法に重点を置いたため、本来の目的である歩行特性の分析にはあまり時間を割くことができず、予定していた「速度と軌跡」や「軌跡と足の接地位置」といった項目についての分析まで到達しなかったことは残念である。特に、本論では歩行特性の中で頭部の運動を中心に考えてきたが、歩行軌跡は第4章にみられるように足のつく位置が大きく関係する筈であるから、頭部の揺れと足の接地位置の関係は是非とも明確にしておかなければならない事である。

しかしながら、歩行速度をかなり精度良く求めることができ、廊下の曲がりにくさを速度の低下として数値で表すことができたことには大きな意義があると言える。

なお、本論を作成するにあたり、辻本 誠氏、志田弘二氏には多大な御指導をいただきましたことを、この場を借りて厚く御礼申し上げます。また、実験に協力して頂いた名古屋大学工学部防災安全工学講座の方々に心から感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 久保田 広 「応用光学」 岩波全書
- 2) 矢野健太郎・石原繁 「線形代数」 裳華房
- 3) 小原二郎・内田哉・宇野英隆 編 「建築室内人間工学」 鹿島出版会
- 4) 日本建築学会編 「建築設計資料集成3 単位空間 I」
- 5) 三上直樹 トランジスタ技術 1988 1月号 CQ出版社
- 6) 谷萩 隆嗣 「デジタル信号処理の理論2」
- 7) 日本工業規格 B-7094 写真用レンズの焦点距離の測定方法, 同解説