

回避行動開始点の判定と前方回避距離

歩行者の回避行動に関する研究(Ⅱ)

METHODS FOR JUDGING THE BEGINNING POINT OF AVOIDING BEHAVIOR,
AND AVOIDANCE DISTANCE BETWEEN A PEDESTRIAN
AND A STANDING OBSTACLE

A study on pedestrian behavior of avoiding obstacles (Ⅱ)

建部謙治*, 辻本 誠**, 志田弘二***

Kenji TATEBE, Makoto TSUJIMOTO and Kouji SHIDA

The characteristics of pedestrian behavior avoiding obstacles is discussed in this paper. The results are summarized as follows:

- (1) The most appropriate method to define automatically the beginning point of avoiding behavior was found to select the point where the curvature is biggest.
(2) According to this method, some distances between a point of a pedestrian starting to avoid and a point of a standing obstacle: S_x were measured. The S_x of each obstacle is different, and its value is 6.74m for a person backwards, 6.82m for one sideways, 8.84m for one facing to and 7.34m for an object.

Keyword : pedestrian, avoidance behavior, image processing technique,
beginning point of avoiding behavior, avoidance distance
歩行者、回避行動、画像処理、回避行動開始点、回避距離

1. はじめに

歩行空間の設計においては、歩行者の行動と歩行者を取りまく周辺環境の相互関係を把握することが不可欠である。しかし個々の歩行者が環境から受ける影響を詳細に観測し分析した研究は、群集歩行を対象としたものに比べると極めて少ないのが現状である。歩行行動のなかでも直進に次いで基本的な回避行動ですら、その特性が明かであるとは言い難い。特に、本研究で行うような、進路を変更する地点(回避行動開始点と定義する)を特定したり、回避行動開始点と障害物の距離(前方回避距離)を実測する研究は筆者らの研究¹⁾を除くと行われていない。

行動を実測した既往の研究には、吉岡⁴⁾や中⁵⁾の研究がある。これらはいずれも比較的低密度な歩行者集団における個々の歩行者の回避行動を現象的に捉え、他の歩行者からの影響を見いだそうとしている。しかし、以下のような問題点がある。第一に、歩行動作の計測は計測者が主観的に判断(目視)している。吉岡の研究では歩行者が障害物から受ける影響の判断についても主観的である。第二に、対象とする歩行者は周辺の複数の歩行者による影響を受けていると考えられ、単独歩行者同士の回避行動を捉えているとは言い難い。第三に、歩行者が受けた影響が障害物によるものであるかの判断が行われていないことである。

建部らが報告した前報¹⁾でも前方回避距離の計測方法は計測者の目視に依存しており、また膨大な作業時間を必要とした(前述した第一の問題点)。そこで筆者らは画像処理技術を歩行行動などの解析に応用することを試み、歩行動作を客観的・自動的に計測できる解析手法を構築した⁶⁾。

1.1 既往研究の問題点

単独歩行者の回避行動を扱えるような歩行モデルには、平井²⁾や岡崎³⁾等の研究がある。しかしモデルで扱われるパラメーターは実測に基づいた値が少ない。また回避

* 愛知工業大学工学部建築学科 助教授・博士(工学)

** 名古屋大学工学部地圏環境工学専攻 教授・工博

*** 日本大学理工学部建築学科 助手・工博

Assoc. Prof., Dept. of Architecture, Faculty of Engineering, Aichi Institute of Technology, Dr. Eng.

Prof., Dept. of Geotechnical and Environmental Engineering, Univ. of Nagoya, Dr. Eng.

Research Assoc. Dept. of Architecture, College of Science and Technology, Univ. of Nihon, Dr. Eng.

1.2 本研究の目的

本研究では、直進する歩行者が障害物のために進路を変更する地点を前報と同様に回避行動の代表的な指標と考え、文献6の成果も応用して、障害物による歩行行動への影響を歩行軌跡データの統計的分析から明らかにすることを目的とした。

1.3 研究の方法

以下に説明する街路上に障害物を設置し、障害物を回避する行動をビデオ映像に記録するフィールドでの実験を行った。ビデオ映像の画像処理から得られた歩行軌跡データを用いて、分析は具体的には以下の二点を中心に行った。

① 回避行動開始点の判定方法の検討

まず回避行動が行われたと判断される歩行軌跡を選定し（前述した第三の問題点の解決）、その歩行特性を明らかにする。次にこれを踏まえて回避行動開始点の判定のための数理的な基準を4種類選定し、相互比較を行うことによって回避行動をよく説明する判定基準を決定する（前述した第一の問題点の解決）。

② 静止した障害物に対する前方回避距離の実測

①で決定した判定基準を用いて回避行動開始点を判定する。前方回避距離を個々の歩行者について求め、障害物ごとに比較・考察する。

1.4 実験方法の概要

(1) フィールドでの実験および分析の概要

フィールドでの実験は朝夕のラッシュ時を除く時間帯に、オフィス街の街路（歩道）に障害物を設置し、この障害物を回避する歩行者の行動を観察した注1)。こうした実験は障害物を変え1990年から1992年までに計3回（3シリーズ）実施した。歩行者の回避行動の様子は、障害物を含め手前およそ14mの範囲をVTRカメラで撮影した（写真1）注2)。図1は実験場所を示す注3)。

(2) 障害物の種類

本研究では、静止した障害物を対象とし、歩行者に対する向き異なる3種類の<ヒト>（体格の似た成人男子（着衣状態での身長1.7m、最大体幅0.53m、胸部厚（体厚）0.35m程度）と、<ヒト>との比較のため、人間程度の寸法（高さ1.7m、幅0.5m、奥行き0.25m）の<モノ>（材料は塩ビパイプの骨組にグレイの布を絡ませたもの）を用いた。

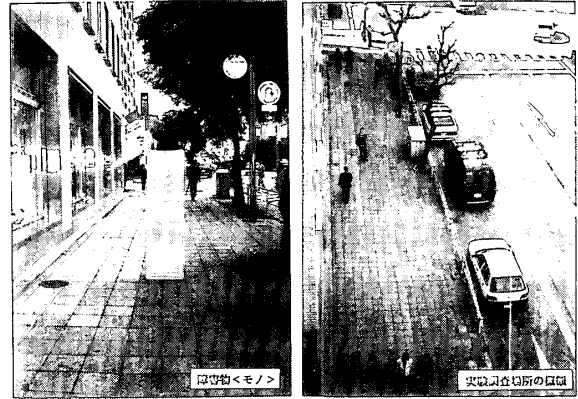


写真1 街路歩行実験（実験シリーズ1）

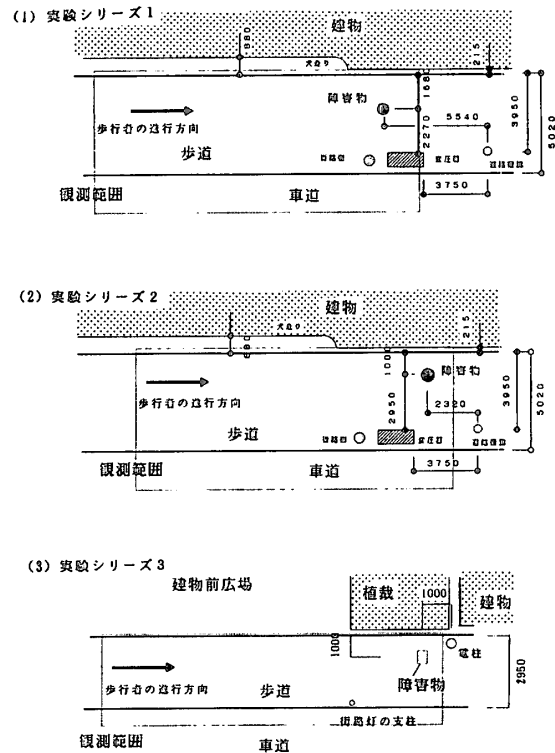


図1 実験場所

表1 実験と標本数

障害物の種類	実験シリーズ		
	1	2	3
モノ	60	71	51
ヒト前向	66	72	-
ヒト後向	70	-	51
ヒト横向	64	-	-

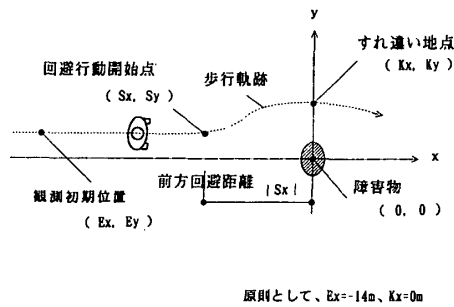


図2 回避行動開始点と障害物

(3)被験者の概要

分析の対象とする歩行者は、前述した第2の問題点を考慮して、街路を一定方向に進行する単独歩行者で、歩行者の行動が障害物以外から影響を受けず、回避行動が完了した男性歩行者に限定した注4)。表1は実験シリーズごとの障害物の組み合わせと標本数を示す。

1.5 解析方法

(1) 歩行軌跡データの処理方法

ビデオ映像の歩行者頭部の軌跡データは、既往研究⁶⁾と同様に、画像処理ならびに歩行解析に不必要な高振動数成分を取り除く処理を行った注5)。

解析は、図2に示すように、 x 、 y 座標系の原点を障害物の設置位置とし、歩行者の進行方向（街路に平行）速度を正として扱えるように、街路に平行な軸を x 軸とし、歩行者の進行方向側を正とする。 y 軸は進行方向の左手方向を正とする。時刻については歩行者が観測初期位置 $E_x = -14m$ （観測範囲の限界）に達した時点 $t=0$ とする。ただし、街路に障害物を設置した場合、回避方向には障害物の右側へ回避する場合（以下、右側回避）と、この逆に左側へ回避する場合（左側回避）の2種類が存在し、これを混在した状態で加速度の最大値等を分析すると回避方向による特性が誤って判断されることがある。このため以下の分析では回避方向の違いによる影響を分析する部分以外では、右側回避のデータは x 軸に対称に折り返した形で、左側回避のデータに併せて分析（併せた場合、 E_y' のように右肩に「'」の記号で表記）している。

(2) 歩行軌跡と速度・加速度の定義

各々の歩行者の頭部の高さ（ z 軸方向座標）を平均的な値（1.68m）で固定し、通路に平行な平面上の座標 Q （ $x(t_i)$ 、 $y(t_i)$ ）で歩行者頭部の座標を表した。この座標の時刻歴として示したものを歩行軌跡と呼ぶことに

する。時刻 t_i （ $= i \cdot \Delta t$ 、 $i=0, 1, 2, \dots, Nr-1$ ）における歩行の速さ $|V(t_i)|$ 、速度成分 $V_x(t_i)$ 、 $V_y(t_i)$ と加速度の大きさ $|A(t_i)|$ 、加速度成分 $A_x(t_i)$ 、 $A_y(t_i)$ については(1.1)から(1.6)式に定義する。 Δt は時刻歴データの時間間隔で1/30秒、 Nr は時刻歴データの数である。

$$V_x(t_i) = (X(t_{i+1}) - X(t_{i-1})) / 2\Delta t \quad (1.1)$$

$$V_y(t_i) = (Y(t_{i+1}) - Y(t_{i-1})) / 2\Delta t \quad (1.2)$$

$$|V(t_i)| = \sqrt{V_x(t_i)^2 + V_y(t_i)^2} \quad (1.3)$$

$$A_x(t_i) = (X(t_{i+1}) - 2X(t_i) + X(t_{i-1})) / (\Delta t)^2 \quad (1.4)$$

$$A_y(t_i) = (Y(t_{i+1}) - 2Y(t_i) + Y(t_{i-1})) / (\Delta t)^2 \quad (1.5)$$

$$|A(t_i)| = \sqrt{A_x(t_i)^2 + A_y(t_i)^2} \quad (1.6)$$

ただし、

$V_x(t_i)$: x 方向の速度(m/sec)

$V_y(t_i)$: y 方向の速度(m/sec)

$|V(t_i)|$: 歩行の速さ(m/sec)

$A_x(t_i)$: x 方向の加速度(m/sec²)

$A_y(t_i)$: y 方向の加速度(m/sec²)

$|A(t_i)|$: 加速度の大きさ(m/sec²)

$i = 0, 1, 2, \dots, Nr-1$

2. 回避行動開始点の判定方法

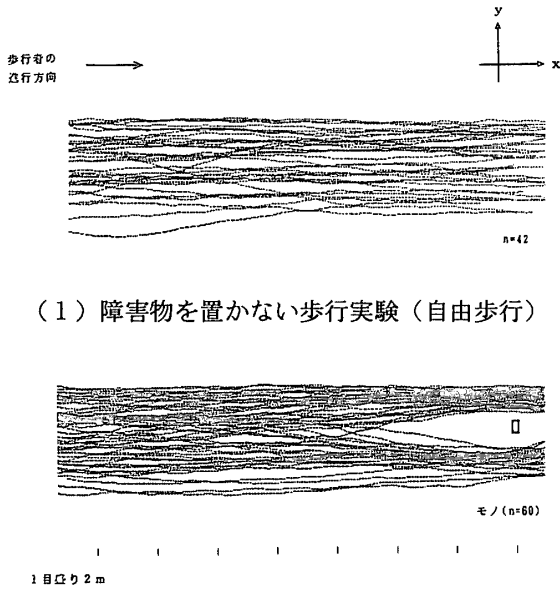
2.1 解析方法

障害物を置かない歩行実験の歩行（以下、自由歩行と呼ぶ）軌跡と障害物を置いた歩行実験（障害物は物体<モノ>（実験シリーズ1））の軌跡の比較から、後者のうち回避行動が行われたと判断される歩行（以下、回避歩行と記す）軌跡を選定する。そして、それらの速度、加速度の特性を解析し、回避歩行の特性を明らかにする。次にこれを踏まえて回避行動開始点の判定のための4つの基準を選定する。さらに各々の判定基準による回避行動開始点の相互比較を行い、回避行動をよく説明する判断基準を1つ選択している。

2.2 回避歩行の特性

(1) 回避歩行の選定

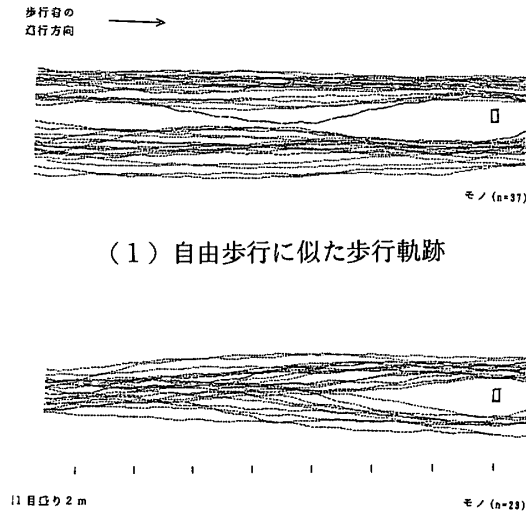
図3は、自由歩行実験ならびに障害物を置いた歩行実験の歩行軌跡の標本集合を示している。前者の歩行軌跡に比較して後者は観測初期位置が x 軸に近いほど軌跡に大きな変化がみられるが、 x 軸から離れるにしたがって自由歩行に似た傾向がある。そこで、前述した第3の問題点を考慮して、自由歩行に似た歩行を標本集合から削除する作業を行った。図4は E_y （観測初期位置の y 座標



(1) 障害物を置かない歩行実験 (自由歩行)

(2) 障害物を置いた歩行実験

図3 歩行軌跡の標本集合 (実験シリーズ1)

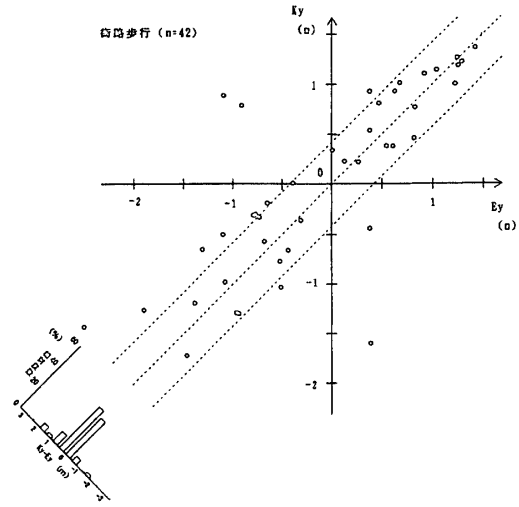


(1) 自由歩行に似た歩行軌跡

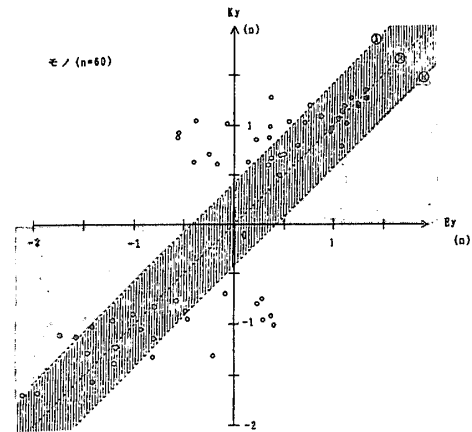
(2) 回避歩行軌跡

図5 選定後の歩行軌跡の標本集合 (障害物を置いた歩行実験)

値)を横軸に、 Ky (すれ違い時の y 座標値)を縦軸にとって標本ごとにプロットしたものであり、図4(1)が自由歩行のもの、(2)が障害物を置いた場合のものである。(1)の自由歩行の場合には、 $Ey=Ky$ (歩行軌跡が左右にブ



(1) 障害物を置かない歩行実験 (自由歩行)



(2) 障害物を置いた歩行実験

図4 Ey と Ky の関係

れずにまっすぐ歩く)の直線の回りに分布がバラついて いるのに対し、障害物が置かれると図4(2)に示されるよ うに障害物の近傍 ($-0.5 < Ky < 0.5$) には、物理的に当然 であるがプロットされる標本がなくなり、 $Ey=Ky$ の直線か らかなり離れた部分にプロットされる標本が増える。す なわち(2)の分布は回避が不要だった標本集合と回避した 標本集合が重なって表現されているわけで、ここから回 避したと判断される標本集合を選定する必要が生じる。 ここでは選定の方法として、(2)での各標本の直線 $Ey=Ky$ からの距離の分布 (回避方向を考慮したもの) では、(1)

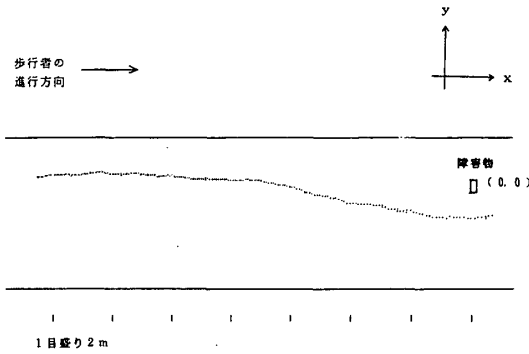


図6 典型的な回避歩行軌跡の標本

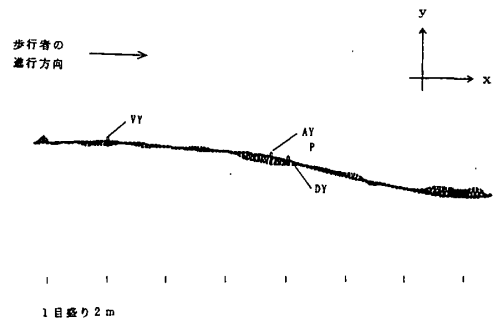


図8 判定方法別回避行動開始点の判定位置
(移動平均後、図6と同一の標本)

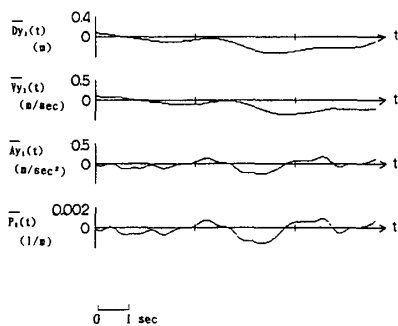


図7 $\overline{Dy_1(t)}$, $\overline{Vy_1(t)}$, $\overline{Ay_1(t)}$, $\overline{P_1(t)}$ の時刻歴
(移動平均後、図6と同一の標本)

での同様の分布の標準偏差 $\pm 1\sigma$ のところ(図4(2)の直線①、③)で分布形にくぼみが生じていることから、①と③の直線に囲まれた網掛けゾーン内にプロットされた標本については自由歩行に似た歩行をしているものと判断した。また、左下(第3象限)の直線①より左側(もう一方の網掛けのゾーン内)の2例については障害物に接近している標本として除外した。これ以外のゾーンにプロットされた標本については回避行動があったとして「回避歩行」(標本数60例中23例)と判断した。図5は、障害物を置いた場合の歩行軌跡を自由歩行に似た歩行軌跡と回避歩行の軌跡に区分けした標本集合を示す。

(2) 回避歩行の特徴

図6は回避歩行の典型的な歩行軌跡の標本を示したものである。y座標が歩行をすすめるにともなって大きく変化していることが読みとれる。すなわち、障害物を避けるためにy座標が大きく変化する部分と、軌跡を通路に平行にするため、y座標の変化が抑えられる部分で2度の曲がりが生じている。本論では前者を「曲がりⅠ」、

後者を「曲がりⅡ」と呼ぶ。「曲がりⅡ」については軌跡データの処理によって容易に識別できる(加速度が自由歩行時に比べ明らかに大きい)が、本論文の分析対象である「曲がりⅠ」は単純な加速度分析では識別できない。そこで、本報ではいくつかのデータ処理のうち、分析結果が比較的安定している1.2Hzローパスフィルター処理後歩行者固有の周期^{注6})で移動平均したデータを用いて以下の分析を行った。

2.3 回避行動開始点の判定方法

曲がりⅠに関する判定方法として以下の判定基準について検討を行う。

- ① 横ゆれ一周期分先の点とのy方向の変位量 $Dy(t_i)$ が最大となる点「DY」
ただし、 $Dy(t_i) = Y(t_{i+M}) - Y(t_i)$ 、Mは歩行者固有の周期に最も近い時間間隔に対応する整数。
- ② y方向の速度 $Vy(t_i)$ が負もしくは0から正になる点のうち障害物に最も近い点「VY」
- ③ y方向の加速度 $Ay(t_i)$ が最大値となる点「AY」
- ④ 曲率 d^2y/dx^2 の絶対値が最大値となる点「P」

ただし、 $P(t_i) = d^2y/dx^2$

$$d^2y/dx^2 = \frac{\{(Y(t_{i+2}) - Y(t_i)) / (X(t_{i+2}) - X(t_i)) - (Y(t_i) - Y(t_{i-2})) / (X(t_i) - X(t_{i-2}))\}}{\{X(t_{i+1}) - X(t_{i-1})\}}$$

2.4 判定方法ごとの|Sx|の相対度数分布

図7は移動平均後の軌跡データを用いて、 $\overline{Dy_1(t)}$, $\overline{Vy_1(t)}$, $\overline{Ay_1(t)}$, $\overline{P_1(t)}$ を示したものである。 $\overline{Ay_1(t)}$ と $\overline{P_1(t)}$ はよく似た傾向を示す。図8は移動平均後の歩行軌跡(図6と同一の標本)と各点の加速度ベクトルおよび各判定基準による判定位置を示したものである。判定点は障害

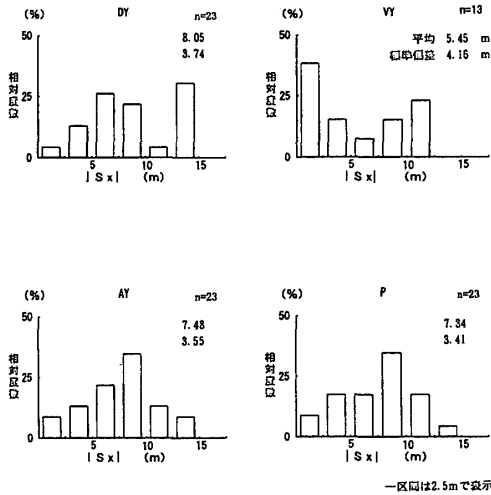


図9 判定方法別|Sx|の相対度数分布
(移動平均後の標本集合、ただしVYのみn=13)

物に近づくにしたがってまずVYが判定され、次いでAYとPが、障害物に一番近い位置でDYが判定されている。AYとPの判定位置が一致しているのはx方向の時間変化が小さいためである。図9はこうした移動平均後の各判定基準による標本集合(n=23)の前方回避距離|Sx|の相対度数分布を示したものである。AY、Pによる判定方法で求められた|Sx|については正規分布の形状を示す。しかし、DYとVYによる判定方法で求められた|Sx|は二つのピークがみられる。また、VYによる判定が可能なのはVy(t)が常に正である10例を除いた13例である^{注7)}。

以上のことから、回避行動開始点の判定方法としてはまずVYとDYは二つのピークがみられることから適当ではない。また、AYとPによる判定方法はほぼ同じ判定結果を得るが、移動平均後のAYは加速度というよりは軌跡の曲率の大きさに相当するものと考えられる。今回、Pの最大値をとる点を回避行動開始点と定義し、前方回避距離を求めることとした。ここで、“曲がる”という動きから考えると、Pの最大値は曲がりの始まった点を指すわけではないが、仮に真の前方回避距離が測定できるとした場合にもこれに強く相関する値であると考えた。

3. 静止した障害物に対する前方回避距離

3.1 実験方法

2. で検討した判定方法を用いて前方回避距離を求め、障害物の性質による歩行行動への影響の程度を定量的に把握する。実験は、<モノ>と静止した<ヒト>を障害物とした(いずれも実験シリーズ1)。<ヒト>は、その向きを前向き、後向き、横向きの3種類とした。以後、

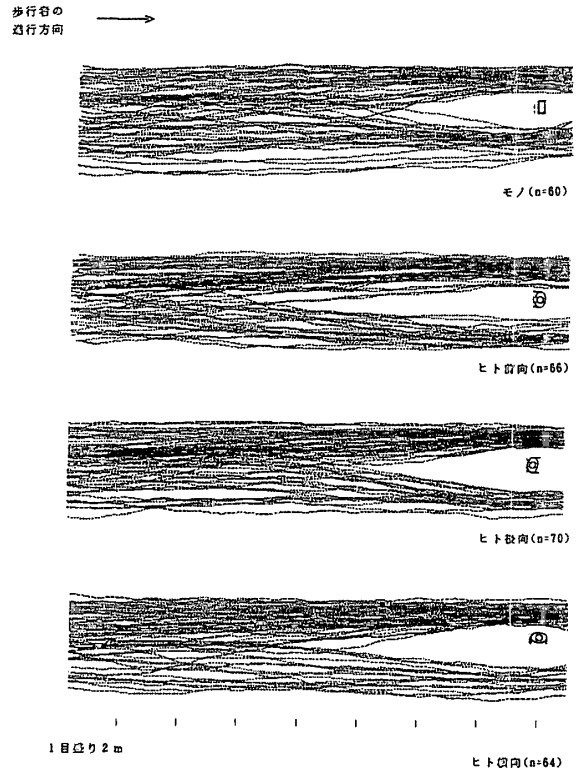


図10 障害物別歩行軌跡の標本集合
(実験シリーズ1)

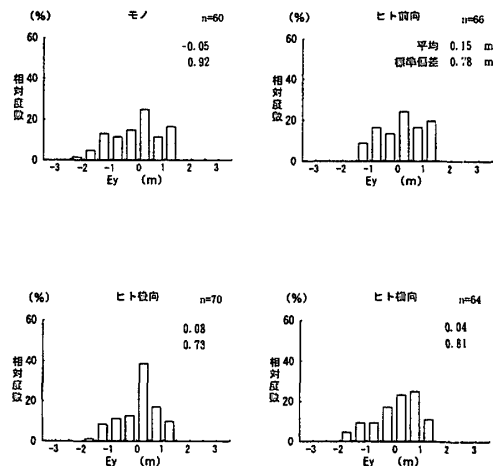


図11 障害物別Eyの相対度数分布(実験シリーズ1)

障害物をそれぞれ、<モノ>、<ヒト前向>、<ヒト後向>、<ヒト横向>と記す。

なお、3.5では同じ障害物を扱った実験シリーズ2、シリーズ3について触れ、前方回避距離の再現性について検討している。

3.2 実験結果

(1) 歩行軌跡

図10は障害物ごとの歩行軌跡の標本集合を示している。歩行者は観測域の初期位置(Ey)に応じて回避する傾向があり、右側回避と左側回避の歩行軌跡の標本集合はx軸に対してほぼ対称である。また、ゆるやかな方向変換によって回避行動がなされるために、障害物の周辺には、いずれの障害物においても歩行者が歩行していないゾーンがある。その大きさは障害物によって異なり、前方のゾーンは<ヒト前向>、<ヒト横向>、<ヒト後向>の順で大きく、<モノ>は<ヒト後向>と変わらないことが読みとれる。

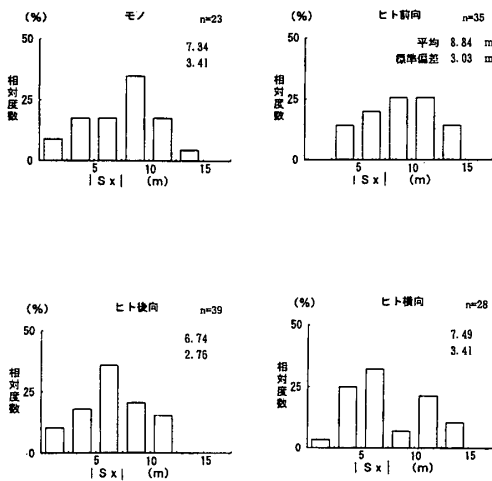


図12 障害物別 |Sx| の相対度数分布
(実験シリーズ1、回避歩行の標本集合)

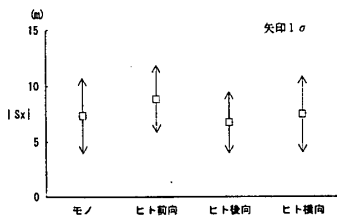


図13 障害物別 |Sx| の平均値と分散
(実験シリーズ1、回避歩行の標本集合)

(2) 観測初期位置の y 座標 Ey

図11は、右側回避のデータを x 軸に対称に折り返す前の状態での、標本集合のEyの相対度数分布を障害物別に示したものである。いずれも正規分布かそれに近い分布形状を示し、障害物に対して左側寄りに歩行する傾向がある(図10参照)。各障害物の標本集合のEyの平均値は、<モノ>、<ヒト前向>、<ヒト後向>、<ヒト横向>でそれぞれ、-0.05m(n=60)、0.15m(n=66)、0.08m(n=70)、0.04m(n=64)で、1σが0.8m前後とほとんど差はみられない。

3.3 分析結果

(1) 回避行動前の障害物による影響の検討

障害物の設置によってあるいは障害物の種類によって回避行動前に歩行者の行動が影響を受けているかどうかを、自由歩行および各障害物の標本集合の観測初期位置のy座標(Ey)を障害物間でt検定した。いずれの障害物間にも有意差がみられないことから、観測初期位置において歩行者は障害物の種類に影響を受けていないと判断した。

(2) 回避歩行の軌跡データの選定

2.2の(1)と同様の方法で回避歩行の標本を選定した。この結果、回避歩行と判断された歩行は<モノ>が60例中23、<ヒト前向>が66例中35、<ヒト後向>が70例中39、<ヒト横向>が64例中28(ただし、右側回避8例、左側回避20例)で、平均48%が回避歩行で、残りの52%が自由歩行に似た歩行をしているか、障害物に接近したものと判断された。以下の分析は特に断らない限り回避歩行について行う。

(3) 前方回避距離 |Sx|

図12は回避歩行における標本集合の |Sx| の相対度数分布を障害物別に見たものである。分布はいずれも正規分布かそれに近い形状を示す。<ヒト横向>については2つのピークがみられる。図13は |Sx| の平均値とその分散を示したものである。障害物別の |Sx| の平均値は、<モノ>、<ヒト前向>、<ヒト後向>、<ヒト横向>がそれぞれ、7.34m(1σは3.41m、n=23)、8.84m(3.03m、n=35)、6.74m(2.76m、n=39)、7.49m(3.41m、n=28)であった。標準偏差σはいずれも3.0m前後である。また、<モノ>、<ヒト前向>、<ヒト後向>、<ヒト横向>における右側回避と左側回避の |Sx| の平均値はそれぞれ、8.85m(n=9)と6.37m(n=14)、9.24m(n=14)と8.57m(n=21)、6.92m(n=13)と6.65m(n=26)、9.17m

(n=8)と6.82m(n=20)であった。〈モノ〉と〈ヒト横向〉を除くと|Sx|については回避方向による差はみられない。〈モノ〉と〈ヒト横向〉については右側回避の標本数が10以下と少ないため差があるとは判断できない。

なお、〈ヒト横向〉の|Sx|については〈ヒト横向後方回避〉と〈ヒト横向前方回避〉に区分して扱うことにする。

(4) 回避方向による影響の検討

障害物を中心に回避方向が左か右かでEy'、Ky'に差があるかどうかを検定した。

Ey'については、〈ヒト横向〉を除くと有意差がないことを検定した。〈ヒト横向〉については標本数が10以下と小さいため回避方向別のEy'の値に有意差があるとは必ずしも断定できない。

Ky'については、〈モノ〉を除くと回避方向による有意差がみられる。〈ヒト横向〉はヒトの身体の向き(前向きと後向き)の影響を受けて左右の回避行動は異なる障害物を対象としていると考えることができるが、〈ヒト前向〉と〈ヒト後向〉については、Kyの絶対値そのものが小さいということで、測定精度を考えると左右の差ということの後述の扱いのように差がないものと見なしても支障が生じないと判断する。

(5) 歩行軌跡のx軸に対する対称性

3.2の(1)では、右側回避と左側回避の歩行軌跡がx軸に対してほぼ対称形であることを述べた。また、前項(4)ではEy'、Ky'について回避方向別の平均値の差を検討した結果、左右の平均値に差がないことが分かった。

この結果、〈ヒト横向〉を除いて歩行軌跡はx軸に対して左右対称であるとみなしてよいと判断される。

3.4 障害物による|Sx|の値の検討

これまでの分析から、観測初期位置がどの障害物でも同様な分布性状を示し、歩行者はランダムに障害物に接近し歩行していること、さらに右側回避と左側回避ではx軸を中心として左右対称と判断されたことにより、以後の|Sx|の値の検討では平均値のみで行うこととする。

|Sx|の平均値は、〈モノ〉、〈ヒト前向〉、〈ヒト後向〉、〈ヒト横向後方回避〉でそれぞれ、7.34m、8.84m、6.74m、6.82m(注8)となる。|Sx|の平均値は〈モノ〉を基準にすると、これより大きいものが〈ヒト前向〉であり、小さいものは〈ヒト横向後方回避〉と〈ヒト後向〉となる。特に、〈ヒト前向〉と〈ヒト後向〉、〈ヒト横向後方回避〉とは平均で2mあまりの差がある。障

表2 回避方向別|Sx|の平均値の差の検定 (実験シリーズ1、回避歩行の標本集合)

	モノ n=23	ヒト前向 n=35	ヒト後向 n=39	ヒト横向 n=20	
モノ	-	C	C	C	A:危険率1%で有意差あり B:危険率5%で有意差あり C:有意差なし ヒト横向は後方回避
ヒト前向	-	-	A	B	
ヒト後向	-	-	-	C	
ヒト横向	-	-	-	-	

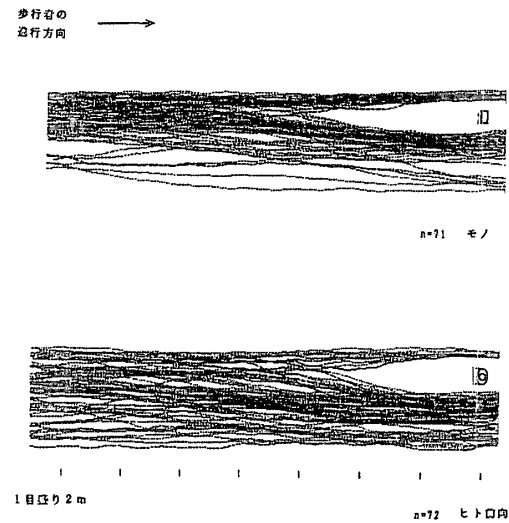


図14 実験シリーズ3の障害物別歩行軌跡の標本集合

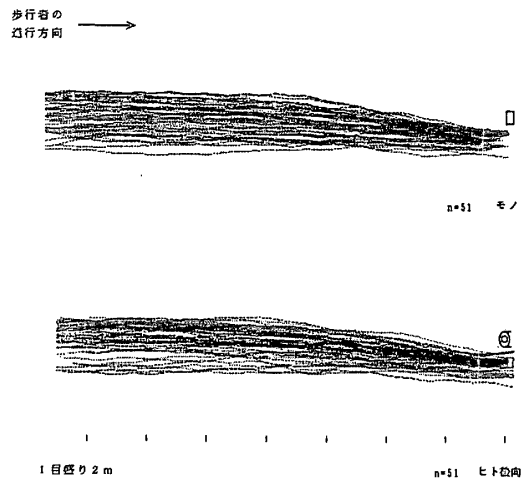


図15 実験シリーズ3の障害物別歩行軌跡の標本集合

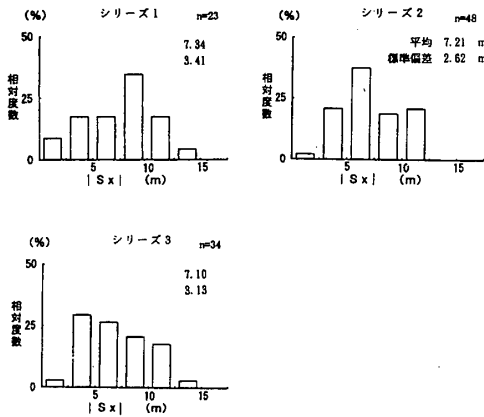


図16 シリーズ別<モノ>の|Sx|の相対度数分布

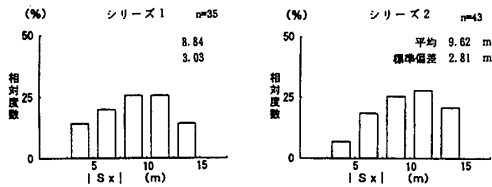


図17 シリーズ別<ヒト前向>の|Sx|の相対度数分布

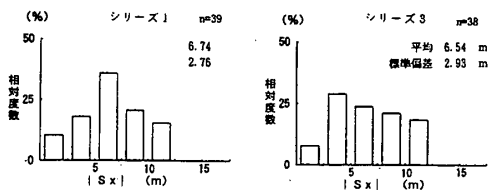


図18 シリーズ別<ヒト後向>の|Sx|の相対度数分布

害物別の|Sx|の平均値の差の検定では、表2に示すように<ヒト前向>と<ヒト後向>、<ヒト前向>と<ヒト横向後方回避>とは有意差がみられる。

この結果、障害物の種類によって|Sx|の値は異なるものと判断される。すなわち、歩行者は人の身体の向きを判断材料として回避する距離を決めていると考えられる。

3.5 |Sx|の再現性

実験環境条件を変えた場合、同じ障害物であれば|Sx|に再現性があるかどうかを検討した。方法は、障害物を変えずに、実験の時期や場所を変えて|Sx|を比較するものである。障害物は<モノ>、<ヒト前向>、<ヒト後向>の3種類を対象とした。<モノ>については実験シリーズ1とシリーズ2とシリーズ3を、<ヒト前向>についてはシリーズ1とシリーズ2を、<ヒト後向>についてはシリーズ1とシリーズ3を比較している(表1参照)。ここでシリーズ2とシリーズ3が基準とするシリーズ1と異なる点は主に障害物を通路のどの部分に置くかである。シリーズ1が通路の中心からおよそ0.3m左側寄りであるのに対し、シリーズ2では回避行動の出現をより鮮明にするため観測初期位置の分布頻度が比較的高い位置(シリーズ1よりさらに0.68m左寄り:図1(2)の図中上方)に配置している。またシリーズ3では有効幅員が大きくないため障害物を図中上方に寄せた。このため歩行者の回避行動は右側回避のみに限定される。以下に、歩行軌跡と|Sx|の概要を示す。

(1) 歩行軌跡と回避歩行の選定

実験シリーズ2の障害物別歩行軌跡の標本集合を図14に、シリーズ3の障害物別歩行軌跡の標本集合を図15に示す。回避歩行の選定をこれまでと同様の方法で行った結果、回避歩行と判断された歩行軌跡は、実験シリーズ2の<モノ>が71例中48、<ヒト前向>が72例中43で平均64%、実験シリーズ3の<モノ>が51例中34、<ヒト後向>が51例中38で平均66%であった。以下、3.3と同様に検討して障害物ごとの|Sx|の平均値を比較することにした。

(2) |Sx|の値の検討

図16は、<モノ>の|Sx|の相対度数分布をシリーズ別に示したものである。|Sx|の平均値は、「シリーズ1」では7.34m($Sy' = 0.41m$, $n=23$)、「シリーズ2」では7.21m($Sy' = 0.46m$, $n=48$)、「シリーズ3」では7.10m($Sy' = 0.09m$, $n=34$)となる。|Sx|は最大0.20mの差しかなく、3者の有意差を検定したところ、いずれも有意差はみられない。

図17は、<ヒト前向>の|Sx|の相対度数分布をシリーズ別に示したものである。|Sx|の平均値は、「シリーズ1」で8.84m($Sy' = 0.55m$, $n=35$)、「シリーズ2」では9.62m($Sy' = 0.47m$, $n=43$)で0.78mの差しかない。両者の有意差を検定したところ、やはり有意差はみられない。

図18は、<ヒト後向後方回避>の|Sx|の相対度数

分布をシリーズ別に示したものである。「シリーズ1」での $|Sx|$ の平均値は6.74m ($Sy' = 0.45m$, $n=39$)、「シリーズ3」で6.54m ($Sy' = -0.01m$, $n=38$)で、やはり0.20mの差しかない。両者の有意差を検定したところ、やはり有意差はみられない。

この結果、同じ障害物であれば歩行環境や実験時期が多少変化しても前方回避距離は変わらないことが分かった。

3.6 前報1)との $|Sx|$ の比較

前報1)で目視により求めた $|Sx|$ の平均値は、 $\langle \text{モノ} \rangle > 5.2\text{m}$ 、 $\langle \text{ヒト前向} \rangle > 8.6\text{m}$ 、 $\langle \text{ヒト後向} \rangle > 4.4\text{m}$ 、 $\langle \text{ヒト横向後方回避} \rangle > 4.3\text{m}$ であり、 $|Sx|$ の大きさの順は今回と同じであった。 $\langle \text{ヒト前向} \rangle$ は今回求めた値と変わらないが、他の障害物については2.1mから2.5m程度大きい値となった。障害物の通路の有効幅員の違いを考慮すると、障害物によって歩行者が前方回避距離を変えしめられている。

4. 結論

本研究は、実際の街路での歩行行動の統計的な解析から、単独歩行者が障害物を回避する行動の特徴を明らかにした。主な成果は以下の通りである。

- ① 回避行動を開始する地点を、画像処理技術を利用することで数理的に判定する方法を示した。この結果、人間の主観に頼っていた判定を自動的・客観的に処理することができた。具体的には、回避行動の開始地点を判定する基準は、カットオフ振動数1.2Hzのローパスフィルター処理後さらに移動平均した軌跡データについて曲率を用いた判定方法が有効であることを示した。
- ② 静止した障害物に対する回避行動を解析し、以下のような回避行動の特性を明らかにした。
 - ・回避行動を開始する時点における歩行者と障害物との距離（前方回避距離）は、ヒトの場合、身体の向きが影響しており、前向き、横向き後方回避、後ろ向きの順に大きくなる。
 - ・人間と同程度の高さ、幅を持つ物体の前方回避距離の平均値は7.34mで、人の前向きと後ろ向きとの中間値をとる。
 - ・障害物が同じであれば通路幅員などの歩行環境や実験時期が多少違って前方回避距離は変わらない。

今回、障害物が横向きの静止した人間でその前方を回避する歩行については充分検討できなかった。これについては計測機器の問題と共に、標本を多数収集する難しさが背景としてある。今後の課題としては、被験者を婦

人や老人などにも広げ、性別・年齢などの影響についても明らかにする必要がある。

次報では、移動する障害物に対する回避行動の分析、ならびに前報¹⁾で提案した回避歩行モデルの再検討について述べる。

注

- 1) 戸川(文7)によれば、自然歩行と実験歩行とは全く別のものであるということから、本研究ではフィールド実験によって歩行者の回避行動を捉えることを基本としている。
- 2) これ以上観測範囲を広げると、画像処理装置の性能の影響を受けて加速度などの定量的解析に用いる精度のよい座標値の計測が困難となる。
- 3) 障害物を設置する際、街路の中央に置かず、若干どちらかの側に偏って設置したのは、歩行者の進路の延長線上に障害物がある割合を増やすためである。小西(文8)によれば、通路の幅員によって異なるが、幅員が4m程度であれば壁面から0.6~1.0mを歩く歩行者が最も多く、歩行者は通路の中央を歩かず左側を歩く傾向があることを観察調査や実験から明らかにしている。
- 4) 複数で歩行しているもの、別の対向者のいるものなどを除いた。小荷物を持っている場合、小荷物を持たない者と体幅がほとんど変わらない者については回避行動も変わらないものと判断して被験者に含めた。
- 5) モニター画像を2値化処理し、歩行者頭部を自動追尾して2次元の座標を得た。文献6でも述べているように、モニター上の座標から座標変換して得られた通路座標は、計測システムの画面分解能の影響を受けて加速度などの定量的な分析には向かないため、低域通過型のフィルターを用いて不必要な高振動成分を除いている。
- 6) 歩行調査で得られたデータを座標変換処理したものを原歩行軌跡データ ($Q(x(t), y(t))$) と呼ぶ。この $y(t)$ をスペクトル解析すると、1秒前後とそれ以上のところで卓越周期を持つ。前者は、2足歩行特有の動作にともなう左右のゆれであり、後者は、回避歩行などの動きにともなうものである。ここで言う歩行者固有の周期とは、前者のことである。
- 7) 移動平均前の軌跡データによる $|Sx|$ の相対度数分布は、いずれの判定基準でも正規分布の形状にはならないものが多い。この理由としては移動平均前の軌跡データではわずかな動きに判定結果が左右されるためと考えられる。こうしたことから移動平均後の軌跡データを用いた方法は、移動平均前の軌跡データより安定した判定結果を得ることができると判断された。
- 8) $\langle \text{ヒト横向前方回避} \rangle$ については標本数が少ないためここでは扱わない。

参考文献

- 1) 建部誠治、中島 一：静止した障害物に対する単独歩行者の回避行動、歩行者の回避行動に関する研究(1)、日本建築学会計画系論文報告集、No.418、pp.51-57、1990.12
- 2) 平井一正、西田素之：歩行者の行動モデルとシミュレーション、人間工学、Vol.13、No.5、pp.185-188、1977
- 3) 岡崎基幸：建築空間における歩行のためのシミュレーションモデルの研究、その1、磁気モデルの応用による歩行モデル、日本建築学会論文報告集、No.283、pp.111-117、1979.9
- 4) 吉岡松太郎、中村和男ほか：歩行者の相互干渉特性の分析、製品科学研究所研究報告、No.96、pp.39-47、1983
- 5) 小塚滋久、中祐一郎ほか：交錯する歩行者の衝突回避行動に関する観測と解析、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.563-564、1988.10
- 6) 辻本 誠、志田弘二、建部誠治：歩行解析への画像処理技術の応用に関する研究、日本建築学会計画系論文報告集、No.436、pp.41-47、1992.6
- 7) 戸川喜久二：群衆の行動、大山正・乾正雄(編)建築のための心理学、彰国社、pp.171-181、1969
- 8) 小西啓史：歩行時における行動特性に関する研究、歩行行動の非対称性についての検討、Japanese Journal of Applied Psychology、No.8、pp.25-33、1983

(1994年4月10日原稿受理、1994年9月20日採用決定)