歩行解析への画像処理技術の応用に関する研究

APPLICATION OF DIGITAL IMAGE PROCESSING TECHNIQUES TO ANALYSIS OF PEDESTRIAN BEHAVIOR

辻本 誠*, 志田弘二**, 建部謙治***
Makoto TSUJIMOTO, Kouji SHIDA and Kenji TATEBE

The method which analyze the pedestrian movement quantitatively by using the digital image processing techniques is discussed in this paper.

The results are summarized as follows :

1) The method was developed to measure the position of pedestrians 30 times in every second automatically.

The main system of this method, using the fact that the hair is normally darker than the other parts, is to trace the position of hair automatically in the binary image which are made from the videotape recorded the movement of pedestrians.

2) Two experiments on walking in straight path and in L-shaped corner were performed.

By using the new method the data of both experiments were processed into the position, the velocity and accelerated velocity of pedestrian.

It was found to be effective to get the variation of the accelerated velocity of pedestrian for analyzing the movement.

Keywords : *image processing technique, pedestrian behavior, accelerated velocity*

画像処理技術, 歩行行動, 加速度

1. はじめに

人間の歩行を写真やビデオなどの画像として記録することは容易であるが、その画像から歩行の解析に必要な数値データを一定の精度で自動的に収集することは容易ではない。例えば、歩行者頭部の位置の時間変化などは、16 mm フィルムを1コマずつ計測者が目視で判定することが従来一般的であり、このような方法は作業量が膨大であった。また判定が計測者に依存するため、再現性と精度に不安があった^{注1)}。

そこで、本報は、撮影したビデオ画像を「画像処理」することで、上述のような歩行者の頭部の軌跡を自動的にまた一定の精度で計測する方法を構築し、二種類の歩行実験・調査を対象に歩行の軌跡・速度、さらに加速度を解析する。

2. 画像処理の方法

本報で用いた画像処理装置^{注2)}は、モニター上の画像

を縦192ドット×横256ドットの画素に分割し、任意に指定できる輝度の閾値で各ドット(画素)を白と黒に2値化した画像として出力する(写真-1)。さらに、任意の位置に設定したウインド内に存在する黒(もしくは白)のドット群の重心を計算し、常にその重心にウインドの中心を重ねることで目標物を自動追尾しながらその位置を計測できる。位置計測の最小時間間隔はウインド1個の場合は1/30秒である。この性質を利用して上方から歩行を撮影した画像を処理すると、頭髪部は身体他の部分や通路に比べて輝度が低いことが多く、追尾している範囲に頭髪部より輝度の低い部分がなければ頭髪部の動きを容易に計測できる。なお、画像処理装置から出力される座標(縦と横方向)の最小単位は、装置の画像分解能(縦192×横256で単位はドット)の制約を受けている。装置のシステム構成を図-1に示す。

作業の省力化を具体的に示すと、後述するT字廊下の歩行実験の場合では、延べ約5万回に及ぶ膨大な頭髪

* 名古屋大学工学部建築学科 助教授・工博

** 日本大学理工学部建築学科 助手・工博

*** 愛知工業大学工学部建築学科 講師・工修

Assoc. Prof., Dept. of Architecture, Faculty of Engineering, Univ. of Nagoya, Dr. Eng.

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

Lecturer, Dept. of Architecture, Faculty of Engineering, Aichi Institute of Technology, M. Eng.

部重心の計測とパソコンへのデータ転送の作業が2人1組で一日程度で完了した^{註3)}。さらに、追尾を開始する位置(ウインドを最初に置く位置)による計測値のばらつきは^{註4)}は、街路直線歩行調査(4章)で実距離にして25mm以内であり満足できる再現性と判断される。

3. 座標変換の方法

モニター画面上の座標を歩行者が位置する実際の通路上の座標へ変換する方法を以下に説明する。座標変換そのものは図学の基本理論に沿っており、本報の目的とは直接関係ないが、既往の研究¹⁾⁻³⁾ではほとんど説明されていないこと、かつレンズの球面収差などの補正が必要のためここで記述する。

本報では、座標変換のため以下の4点を考慮した。

- (1) スケール変換：モニター上の座標(単位ドット)を通路上の実寸(単位mm)に変換
- (2) カメラ投影角：レンズの中心軸と通路面のなす角が垂直でないことの補正
- (3) レンズの球面収差の補正
- (4) レンズ感光素子の縦横比が1:1でないことの補正

図-2に示すモニター上(画面①)の座標(X_1, Y_1, Z_1) (ただし、 $Z_1=0$)から通路(画面⑤)座標(X_s, Y_s, Z_s) (ただし、 Z_s は歩行者頭部の高さ)を得るため以下の画面②~④を仮定し、図学ならびに光学の基礎理論を用いて変換した^{註5)}。

画面②：画面①にレンズ収差の補正とスケール変換(ドットをmmに変換)を行った画面

画面③：レンズ中心軸に垂直でレンズ位置が原点となる画面

画面④：レンズ中心軸と画面⑤(歩行者頭部の高さでの

写真-1(A)(B)(C) 画像処理(2値化)と重心計算・追尾

水平面)の交点まで画面③を平行移動した画面座標変換では、6つの係数($E, F_x, F_y, \omega, \alpha, \beta$)が未知であり、これらを求めるためには画面①及び⑤上で最低6点の座標が既知である必要がある。そこで、通路上に基準点として合計24カ所(直径140mmの黒球を

図-1 画像処理の概略フロー(録画からデータ転送まで)

図-2 座標変換の画面設定(模式図)

図-3(A) 街路直線歩行調査の平面・断面図

写真-2(A) 街路直線歩行調査（街路とカメラ設置の状況）

写真-2(B) T字廊下歩行実験（廊下とカメラ設置の状況）

通路面から一定の高さに設置)を実測して設置し録画した。そして、これらの基準点の実測値と変換値(画面⑤上)の誤差の2乗総和が最小になるように係数を定めた。

4. 歩行実験・調査の解析

2章～3章に述べた画像処理の手法を利用して、街路での直線的な歩行の調査(以下、街路直線歩行調査とする、図-3(A)、写真-2(A))、ならびに体育館の一部にT字型の廊下を設営して実施した歩行実験(以下、T字廊下歩行実験とする、図-3(B)、写真-2(B))に関して、歩行特性の基礎的な分析を行った^{注6), 注7)}。これらの実験は別報で報告する回避行動^{3), 13), 14)}の分析につながるものである。

図-3(B) T字廊下歩行実験の平面・断面図

図-4 平滑化していない歩行軌跡（街路直線歩行の例）

図-5 街路直線歩行における左右(Y)方向のフーリエスペクトル

4.1 歩行軌跡データの平滑化

図-4は3章の処理をした街路直線歩行調査での軌跡の計測例である。計測システムの画面分解能の影響を受けて図のように軌跡は細かい振動を含んだデータとなる。このままでも軌跡の定性的な分析には支障がないが、歩行の「曲がり」など動きの変化の判断材料となる加速度などの定量的な分析には不適切である。そこで不要な高周波数成分を除くために低域通過型のフィルター(ローパスフィルター)を用いてデータを平滑化することとした。

図-5は図-4の歩行軌跡における進行方向と垂直な座標値の周波数分析の例である^{注8)}。分布に若干の個人差はあるが1.0 Hz前後にピークがある。これは歩行に

特有な横ゆれと判断されるのでこれを残し、1.0 Hz 以上の周波数をカットすることとした。そこでいくつかのデジタルフィルターを検討した結果、以降の分析に妥当な結果の得られたカットオフ周波数 1.2 Hz の FIR 型 (Finite Impulse Response, 非巡回型) のローパスフィルターを用いて平滑化した。なお、このフィルターの種類については目的に応じて選択すべきものと考えられる^{註9)}。

4.2 平滑後の軌跡と速度・加速度

平滑後のデータを用い、街路直線歩行と T 字廊下歩行の歩行軌跡、歩行速度、加速度^{註10)}について分析する。図—6 と図—7 に典型的な測定例を示した。また、図—8 と図—9 は各位置での加速度をベクトル表示したものである。

ある。

直線的に歩行する場合 (街路直線歩行調査)、図—6 の進行方向に垂直な方向の加速度 (A_y) と図—8 の加速度ベクトルの変化から分かるように、歩行者は 1.0 Hz 前後で規則的に左右に横ゆれし、加速・減速を繰り返しながら進行する。これは両脚の着床、蹴り出しの繰り返し¹²⁾に対応するものである。測定例 (37 名) の範囲では、進路からの頭部のズレ (測定開始点を原点とし垂直な方向の位置座標) は 7 cm から 83 cm の範囲、また最大加速度 ($A_{y, \max}$) は $0.69 \sim 2.24 \text{ m/sec}^2$ の範囲である (図—10)。ただし、この測定のような場合、歩行者は必ずしも直線的に進行するわけではなく、わずかな蛇行を見せるものが多い。

図—6 街路直線歩行の速度・加速度の変化 (カットオフ周波数 1.2 Hz, 図—4 と同一の歩行者)

図—7 T 字廊下歩行の速度・加速度の変化 (カットオフ周波数 1.2 Hz)

図—8 街路直線歩行の歩行軌跡と各点での加速度 (カットオフ周波数 1.2 Hz, 図—4 と同一の歩行者)

図—9 T字廊下歩行の歩行軌跡と各点での加速度
(カットオフ周波数 1.2 Hz, 図—7 と同一の歩行者)

図—10 街路直線歩行における左右 (Y) 方向の最大加速度 (個人) の度数分布
測定人数 37 名

図—11 T字廊下歩行の速度・加速度の変化
(カットオフ周波数 0.7 Hz, 図—7 と同一の歩行者)

図—12 T字廊下歩行の歩行軌跡と加速度
(カットオフ周波数 0.7 Hz, 図—7 と同一の歩行者)

一方、T字廊下の幅員が曲がり方に及ぼす影響を検討しようとするれば、横ゆれなどを除いた歩行の全体的な動きをとらえた方が有効であり、4.1で述べたように、分析の目的に応じてカットオフ周波数の選択を行えば良い。例えば横ゆれを除くような平滑化 (カットオフ周波数 0.7 Hz) を行くと図—11 と図—12 に示すようになる。

この場合の分析結果については文献 10)、文献 11) にまとめている。

T字廊下歩行の測定例 (幅 1.84 m, 右回り 38 名) の場合、図—9 に示す例のように、図—8 同様に直線部で進行方向の左右に規則的に現れる加速度が曲線部では曲がるための加速度が大きいため曲がり方向だけになる

傾向がある（全歩行者中約 60 %）。またその絶対値は街路直線歩行調査に比べて約 1.3 倍となる。

5. おわりに

画像処理技術を応用して、歩行における頭部の軌跡を自動的に一定の精度で計測する方法を構築した。また、これに基づいて二種類の歩行実験・調査を対象にして歩行の軌跡・速度・加速度について解析した。

従来、ビデオ画像などの視覚情報を定量的に処理する際に人間の主観に頼っていた部分を客観的・自動的に処理する方法の確立は、その応用する分野も広く新たな解析手法の一つになり得ると考える。

最後に、フーリエ変換については名古屋大学河野 守講師と愛知工業大学加藤厚生教授に貴重な御助言を賜った。また、この研究を遂行するにあたり田中春彦氏（名古屋大学卒論生、現在戸田建設）、村上秀隆氏（同愛知県庁）、ならびに愛知工業大学の卒論生の多大なる御協力を得た。記して謝意を表します。

注

- 1) 16 mm フィルムやビデオ画像を用いた既往の歩行研究として、文献 1)～文献 3) などがあるが、いずれも計測は目視に頼っている。
- 2) ・画像処理装置：(株) 朋栄 IV540
・録画と再生の機器
ビデオデッキ：一般的な VHS のビデオデッキ
ビデオカメラ：撮像素子インターライン転送方式 CCD カメラ、有効画素数水平 510×垂直 492、毎秒像数 30 枚、レンズ：焦点距離 8 mm、絞り F1.4～F360、自動絞り調節範囲 30～100,000lux
- 3) 目視計測の場合では手動でのコマ送り操作ならびに画面上的目標物へのライトペン指示などの操作の繰り返しに伴うため、筆者らの過去の経験に基づくと少なくとも十倍以上の作業量を要する。
- 4) いわゆる計測機器に内在する誤差であり、注 7) でいう測定誤差とは異なるものである。
- 5) 画面①→画面②：収差補正とスケール変換

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

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

$$Z_2 = Z_1 = 0$$

E ：レンズの球面収差の補正係数

$(1 + E \cdot (\sqrt{X_1^2 + Y_1^2})^3)$ は、レンズ収差を補正するため X_1 , Y_1 に掛ける倍率である。レンズ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、

$$\sin \theta = \theta$$

と近似できる。しかし、ガウス領域以外ではザイデルの五収差の理論を用いてテーラー展開の第 2 項までとり、

$$\sin \theta = \theta - (1/3)\theta^3$$

と近似できる範囲では、収差 Δr は、

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

で求められる。レンズから像平面までの距離を L 、レンズ中心軸と像平面との交点 O と (X_1, Y_1) との距離を γ' 、 $r = \Delta r + r'$ 、屈折角を θ' とすると、

$$\theta \approx \theta' \text{ によって } \theta \approx (r'/L)$$

と近似して、

$$\Delta r = E \cdot (\sqrt{X_1^2 + Y_1^2})^3$$

$$E \text{ は比例定数} = e/L^3$$

よって、

$$r/r' = \Delta r/r' + 1 = 1 + E \cdot (\sqrt{X_1^2 + Y_1^2})^3$$

が得られる^{文 4)}。

F_x , F_y ：モニター上の X 方向と Y 方向のスケール変換係数

h ：歩行者頭部の Z 軸座標 $= H + (K - (c/2))$

K ：歩行者身長（自己申告値あるいは推定）

c ：頭高（既存文献（文 5、文 6）から一定と判断し、平均値 250 mm を用いた。）

H ：通路面の Z 軸座標

γ ：基準点（3 章参照）の Z 軸座標

h/γ ：基準点を基にして求めた各係数を歩行者身長に合わせて補正する係数

なお、 Z 軸座標 h , H , γ はレンズ位置を原点として与える（いずれも符号はマイナス）

画面②→画面③

画面①（モニター上）の座標と通路上の座標を結び付けるため、レンズの位置を原点とする Z , X , Y 軸まわりの回転を行う^{文 7)}。行列式は下記となる。

$$\begin{pmatrix} X_3 \\ Y_3 \\ Z_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \phi \cos \omega & -\cos \phi \sin \omega \\ +\sin \phi \sin \omega \sin \omega & -\sin \phi \sin \omega \cos \omega \\ \cos \phi \sin \omega & \cos \phi \cos \omega \\ \sin \phi \cos \omega & -\sin \phi \sin \omega \\ -\cos \phi \sin \phi \sin \omega & +\cos \phi \sin \phi \cos \omega \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_2 \\ Y_2 \\ Z_2 \end{pmatrix}$$

$$\phi : X \text{ 軸まわりの回転角} = \sin^{-1}(\beta / (\sqrt{\alpha^2 + \beta^2 + \gamma^2}))$$

$$\psi : Y \text{ 軸まわりの回転角} = \sin^{-1}(\alpha / (\sqrt{\alpha^2 + \beta^2 + \gamma^2}))$$

$$\omega : \text{レンズ中心軸まわりの回転角}$$

X 軸、 Y 軸まわりの回転角はレンズの中心軸の方向ベクトル (α, β, γ) のみで決まるが、 Z 軸まわりの回転角はレンズの中心軸まわりの回転も含むので方向ベクトルだけではなくレンズの設置方向によっても変化する。

画面③→画面④

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

(α, β, γ) ：レンズ中心軸と基準点高さでの水平面との交点の X , Y , Z 座標

画面④→画面⑤

$$X_5 = (h/Z_4) \times X_4$$

$$Y_5 = (h/Z_4) \times Y_4$$

$$Z_5 = Z_4$$

6) 実験・調査の方法の概略

(1) 街路直線歩行調査では、ビジネス街の歩道（有効幅員約 2.9 m）で撮影に気付いていない一般の人たちが歩行する様子を頭上 19.3 m からビデオカメラで撮影した。被験者は単独で直線歩行を行ったと判断した成人男子 37 名である。基準点は 24 点（高さ 1.68 m）を設定した。

注表 変換係数の収束計算結果

実験・調査	係数	スケール変換の係数		球面収差補正の比例定数	以Z'中心軸回りの回転角 ω (°/7°)	以Z'中心軸と基準点高さ γ での水平面との交点 (x座標) (y座標) α (mm) β	
		F_x	F_y	E			
T字廊下	幅1.84 m	26.86	26.04	1.34×10^{-8}	-0.0182	62	4401
	幅1.20 m	26.84	25.96	1.34×10^{-8}	-0.0138	100	4396
街路直線歩行		37.50	38.30	1.0×10^{-10}	-0.0250	-21850	1760

(2) T字廊下歩行実験では、仮設した廊下を単独歩行する被験者がし字に曲がる様子を頭上8.5mからビデオカメラで撮影した。廊下内法幅を1.20mと1.84mの2種類とし、両側に高さ1.82mで壁を設け天井は設置していない。被験者は男子大学生で、年齢・身長・利き腕を実験前にアンケート調査した。被験者数は1.84m幅が38名、1.20m幅が40名である。基準点は48点(24カ所各々に対し高さ1.65mと1.75mの二種類)を設定した。

7) 座標変換の係数決定と誤差の検討

二種類の歩行実験・調査の係数を3章の座標変換の方法を用いて決定した結果が注表である。

基準点ごとの誤差の平均(誤差の2乗総和を基準点数で除した値の平方根)ならびに誤差の最大は、街路直線歩行調査の場合は、平均57mm(最大104mm)、またT字廊下歩行実験の場合は、廊下幅1.84mでは平均14mm(最大28mm)、廊下幅1.20mでは平均16mm(最大31mm)である。

8) 高速フーリエ変換(FFT)で周波数分析をした^{文8)}。各サンプルのデータ総数は300点から400点(計測時間がおよそ10秒)であるため、計算で使用するデータ数は256(=2⁸)点とした。また、進行方向とこれに垂直な方向の成分に分け、時刻*i*におけるデータを差分により求めた。さらに幾何平均を計算しこれとの差を個々のデータとして解析を行った。

分解能は30/256(=0.117)Hz以上15Hz以下である。なお、計算は名古屋大学大型計算機センターのFFTRを使用した。

9) 文献9)のpp.55~90などを参照

本報では、カットオフ周波数は1.2Hz、窓関数はハミング窓、応答時間は25/30(秒)とした。また、変位がX方向とY方向の2個であるので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型のフィルターを用いて位相差を0にしている。

10) 時刻*i* ($i=n \cdot \Delta t$)における速度*V*(*i*)と加速度*A*(*i*)は差分によって計算した。 Δt は1/30秒、 $X_{S(i)}$ 、 $Y_{S(i)}$ はフィルターを通した座標を用いている。

$$V_x(i) = (X_{S(i+1)} - X_{S(i-1)}) / 2 \Delta t : X \text{ 方向}$$

$$V_y(i) = (Y_{S(i+1)} - Y_{S(i-1)}) / 2 \Delta t : Y \text{ 方向}$$

$$V(i) = \sqrt{V_x(i)^2 + V_y(i)^2}$$

$$A_x(i) = (X_{S(i+1)} - 2X_{S(i)} + X_{S(i-1)}) / (\Delta t)^2 : X \text{ 方向}$$

$$A_y(i) = (Y_{S(i+1)} - 2Y_{S(i)} + Y_{S(i-1)}) / (\Delta t)^2 : Y \text{ 方向}$$

$$A(i) = \sqrt{A_x(i)^2 + A_y(i)^2}$$

参考文献

- 中祐一郎：交差流動の構造-鉄道駅における旅客の交錯流動に関する研究(1)，日本建築学会論文報告集，第258号，pp.93~102，1977年8月
- 加藤邦夫ほか：群集対向流動の解析，日本建築学会論文報告集，第289号，pp.119~129，1980年3月
- 建部謙治，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(Ⅰ)，日本建築学会計画系論文報告集，第418号，pp.51~57，1990年12月
- 久保田広：応用光学，岩波全書
- 小原二郎ほか：建築室内人間工学，鹿島出版会
- 日本建築学会編：建築設計資料集成3・単位空間Ⅰ，丸善
- 矢野健太郎ほか：線形代数，裳華房
- 建部謙治，辻本 誠，志田弘二：歩行のスペクトル解析，日本インテリア学会研究発表梗概集No.3，1991年11月
- 三谷政昭：デジタルフィルターデザイン，昭晃堂
- 志田弘二，辻本 誠，田中春彦ほか：画像処理を利用した建築空間内の人間行動の研究—T字型廊下での歩行実験，日本建築学会東海支部研究報告，1989年2月
- 志田弘二，辻本 誠ほか：画像処理を利用した建築空間内の歩行解析とシミュレーション，日本建築学会大会学術講演梗概集E，1989年10月
- 阿久津邦男著：歩行の科学，不昧堂出版，1975年5月
- 建部謙治，辻本 誠，志田弘二，中島 一：画像処理を利用した回避行動開始点の判定方法，日本建築学会東海支部研究報告，1991年2月
- 建部謙治，辻本 誠，志田弘二，中島 一：画像処理を利用した歩行者の回避行動に関する研究—回避行動開始点の判定方法—，日本建築学会大会学術講演梗概集E，pp.691~692，1991年9月

(1991年12月25日原稿受理，1992年4月8日採用決定)