空間—時間系モデルを用いた群衆歩行軌跡の可視化

THE VISUALIZATION OF PEDESTRIAN FLOW
WITH SPACETIME DIAGRAM MODEL

佐野友紀*, 渡辺仁史**

Tomonori SANO and Hitoshi WATANABE

The purpose of this study is to visualize the pedestrian flow with spacetime diagram model. In this model, the location of pedestrian is shown on x-y plane and time is shown on Z-axis. The pedestrian behavior, which is hard to express with 2-dimensional model can be easily expressed with this model. In the computer, we construct a virtual 3D space and see the model rotating freely and interactively. We can understand the construction of pedestrian flow. We applied the model to a practical case and proved its propriety.

Keywords : Visualization, Pedestrian Flow, Diagram model, Space, Time factor

可視化, 群衆流動, ダイアグラムモデル, 空間, 時間

1.はじめに

1.1 研究の背景

近年、様々な分野において目に見えない現象、あるいは見えにくい現象をわかりやすく示すこと（可視化）が注目されている。例えば、化学の分野においては、分子の立体的な構造をコンピュータ上で三次元的に表現することにより、その理解に対して多大な効果を得た。^{1) 2)} また、建築の分野では、室内の温度分布を色で表現したものや、高層建築に吹く風の流れを表現したもの、暖房時の室内の気流を煙によって視覚化したもの³⁾ などがあげられる。これらは、定量的な解析あるいは、平面的な表現のみではとらえにくい現象に対して、感覚的にその理解を助けるものである。可視化に関しては、実験的可視化法（実験あるいは、装置を用いて可視化するもの）、コンピュータ利用可視化法（コンピュータを用いて可視化を行うもの）が、最近多く利用されている。コ

ンピュータ利用可視化法は、1.画像データ可視化法（画像解析を用いて解析した結果をわかりやすく表示する処理）、2.計算データ可視化法（数値計算した結果をわかりやすくする表示）、3.計測データ可視化法（計測した結果をわかりやすくする表示）に分類される。⁴⁾

建築人間工学の分野でも、人間の動きを様々な方法を用いて表現してきた。

1.の研究としては、画像解析により自動的に歩行軌跡の抽出を行ったもの⁵⁾ や、画像解析を用いて歩行者の回避行動について述べたもの⁶⁾ などが挙げられる。2.の研究としては、流れの中の人の塊を流動グループとして表したものの⁷⁾、すれ違いにおける個人の動きを歩行軌跡として矢印で表したものの⁸⁾、歩行者と停止者の分布をメッシュ上に表現したものの⁹⁾ などがあげられる。3.の研究としては、都市における歩行者数の減衰傾向を三次元モデルで表したものの¹⁰⁾ などが挙げられる。本研究では、空間に

* 早稲田大学大学院理工学研究科 博士課程・工修

** 早稲田大学理工学部建築学科 教授・工博

Graduate Student, Graduate School of Science and Engineering, Waseda Univ., M. Eng.
Prof., Department of Architecture, School of Science & Engineering, Waseda Univ., Dr. Eng.

おける歩行軌跡を計測しそれを可視化していることから、3.の分類に区分される。^(註2)

また、従来のほとんどの人間行動研究では、群衆を歩行経路、歩行軌跡で表現し、水平面上に投影された人間の位置(x,y)という、自由度2すなわち平面的な表現が用いられてきた。これに対し、自由度を3とした三次元的な考え方をを用いて時間変化を同時に取り扱い、群衆の平面移動行動を表現することによって、感覚的に群衆流動を理解することが求められているが、数値を用いて解析的に行動を分析した研究がわずかに存在するだけで、行動を視覚的にとらえた例はほとんどない。

1.2 研究の目的

本研究の目的は、従来Staticあるいは二次元的にとらえられてきた群衆の平面移動行動に関して、時間変化に伴う人間の歩行軌跡を表現するモデルを用いることにより、時間の流れに伴うDynamicな群衆の空間移動を視覚的に表現することの有効性を明らかにすることである。

2. 空間-時間系歩行軌跡モデル (STDモデル)

2.1 モデルの内容

本研究では、空間における群衆の平面移動特性を表現するため、空間-時間系歩行軌跡モデル（以下STDモデル）を提案し、可視化を行った。

(1) 空間、時間の表現

本モデルは、空間における時間変化に伴う群衆内の各人の平面的な歩行軌跡を表現するために、二次元移動平面をXY平面、時間をZ軸方向にとり、人間の歩行軌跡を表現したモデルである。（図1,2）

図1：空間-時間系歩行軌跡モデルの概念

図2：空間-時間系歩行軌跡モデルと実空間との対応

・空間平面 (XY平面)

群衆を真上から観察した際の頭の位置^(註3)を地面に投影した二次元座標を(X,Y)とする。この座標は従来の歩行軌跡を二次元平面上に表現する際の歩行軌跡である。

・時間軸 (Z軸)

Z軸に時間の単位(秒)を取り、人間の位置をプロットした。基準時間(t=0)は、解析開始時間に設定した。

このように表示される人間の位置座標を、 $P_n(x,y,t)$ とする。単位系は、 $[X, Y, T]: [m, m, Sec]$ を用いた。

2.2 モデルの表示方法

本研究では、 (x,y,t) の三次元の空間座標を表現するため、コンピュータ内に仮想の3次元空間を再現し、マウスを用いて任意の方向に自由に回転しながらカラー表示した歩行軌跡を見ることができる。^(註4)この仮想空間内に、本モデルを適応することにより、モデルを自由に回転させ、あらゆる角度から歩行軌跡を観察することで、立体的な前後関係や上下関係をインタラクティブに把握することが可能である。また、いくつかの表示方法を用いることによって、個人にあった、方法を用いることができる。ここでは三次元空間を表示する方法として3つの方法を採用した。^(註5)

1. 陰影表示…隠線処理と奥の線ほど彩度を落とす陰影処理により擬似的に立体的に見せる表示。
2. 二色表示…赤、青、2色の3D眼鏡を用いることにより、右目と左目の視差により立体感を表現する。
3. ステレオグラム表示…左右に2つの映像を描画し、立体視法を用いて2つの画像を重ね合わせて見ることにより、立体感を把握する。

図3：STDモデルの表現方法

表1：STDモデルの表現方法の比較

表示方法	見やすさ	立体感	備考
陰影	良い	やや悪い	-
二色	良い	良い	赤青眼鏡が必要
ステレオグラム	やや悪い	良い	訓練が必要

2.3 従来の歩行を表現する指標との関係

本モデルは、従来の二次元の歩行軌跡表示を時間軸方向に拡張したものである。そこで、従来、人間行動研究に用いられてきた指標とSTDモデルの関係について述べる。

(1) 移動、停止

空間を左から右に移動する歩行者の歩行軌跡は右上がりの直線として表される。また、停止している場合には、時間軸に平行な直線となる。このとき、XY平面は、従来の二次元歩行軌跡を示している。(図4)

(2) 歩行速度

ΔT 時間当たりの移動距離を ΔD とし、ベクトルとXY平面とのなす角を θ とすると、 $V = \Delta D / \Delta T = \tan^{-1} \theta$ と表される。モデルの定義より、XY平面との傾きの逆数が歩行速度となるため、傾きが小さいほど、すなわち水平面との勾配が緩やかなほど、歩行速度は大きい。

・ V_x (XT平面への投影 ($f: P \rightarrow XT$))

XT平面への投影は、 ΔX (移動距離のX成分) を表しておりX軸となす角を ω とすると $V_x = \Delta X / \Delta T = \tan^{-1} \omega$ となり、PのXT平面への投影 P_x の傾きの逆数が速さ (V_x) を表す。

・ V_y (YT平面への投影 ($f: P \rightarrow YT$))

YT平面への投影は、 ΔY を表しておりXT平面への投影と同様、PのYT平面への投影 P_y の傾きの逆数が速さ (V_y) を表す。 $V_y = \Delta Y / \Delta T = \tan^{-1} \phi$ (図5)

図4：移動・停止の表現

図5：歩行速度の定義

図6：群衆密度の定義

図7：断面交通量の定義

(3) 群衆密度

XY平面に平行な平面 ($T=t$) で空間を切った際の歩行軌跡と平面との交点を求める。その場合の交点数をその時間での空間内の全人数 (N) その値を空間の面積

(A) 値を群衆密度 (ρ) とする。 $\rho = N/A$ (図6)

(4) 断面交通量

T軸に平行かつXY平面上の断面を通る平面 (例えば、 $X=x$ ($t1 \leq T \leq t2$)) で空間を切った平面と歩行軌跡との交点数が時間 ($t1 \sim t2$) の断面交通量とする。(図7)

(5) 時間 $T=t$ の位置

本モデルでは、時刻 t における歩行者の位置は、平面 $T=t$ と歩行軌跡の交点の座標となる。

(6) 空間内のベクトルの加減

空間内のベクトルは、加法性を保証されている。そのため、同一歩行者の任意の2点を結んでベクトルを取り、それぞれの平面に投影した場合、その結果は、2点間の値となる。また、速度、加速度については、2点間の平均値となる。

3. 群衆内の各人の歩行軌跡の抽出手順

本研究では、モデル検証のためのデータとして、空間における群衆の各人の軌跡データを抽出するため、歩行軌跡抽出システムを構築し、データの抽出を行った。

ここでは、一定時間に空間を通過するの群衆内の各人の歩行軌跡を抽出した。その手順を以下に示す。(図8)

1. 映像データ

2. 座標変換

3. 軌跡図

図8：歩行軌跡抽出システムの流れ

3.1 群衆映像の撮影

群衆の流動を撮影にあたっては、群衆内の各人の頭頂が映るように、群衆を可能な限り高いアングルからビデオ撮影した。^{註6)} このとき、後の座標変換の作業に用いるため、基準となる高さ1.65mの棒を4箇所映しこんだ。

3.2 歩行軌跡のコンピュータへの取り込み

撮影した映像データを30秒間、0.5秒間隔で取り込み、その画面上に映し出された全ての人間について、座標を抽出した。本研究では、座標抽出のために独自のシステムを作成し用いた。^{註7)} このシステムでは、マウスを用いて各時間ごとに各人間の頭頂にカーソルを合わせ、クリックすることにより半自動的に頭の座標をデータとして取り込む。

3.3 データの座標変換

3.2のシステムによって抽出した人間の位置データはコンピュータ画面上に投影された座標データである。そこで、このデータを人の地面に投影した位置データに変換するため座標変換を行い、X-Y平面上に投影した群衆の歩行軌跡データを得た。^{註8)}

3.4 歩行軌跡の表示

このデータを空間-時間系歩行軌跡モデルを用いて表示するために、コンピュータ内で仮想的な三次元表示を行い、マウスを用いてインタラクティブに操作しながら、モデルの構造を把握する。なお、基準として画面上に表示される矩形は、XY平面（5m*5m）、そこから垂直に立ち上がる直線は、時間軸を表す。

4. 歩行軌跡の二次元表示とSTDモデル表示の比較

従来の平面上の歩行軌跡表示（以下、二次元表示とする。）とSTDモデルを用いた表示（以下STDモデル表示とする。）の違いを実際の空間から抽出した群衆の歩行軌跡データにあてはめ、比較を行った。^{註9)}

4.1 群衆流動における比較

(1) 一方向流

一方向流の場合、二次元表示、STDモデル表示もそれほど差異は見られない。STDモデル表示では、移動方向に対して、出発点から、終着点に向かって片側があがるベクトルとなる。

(2) 対向流

対向流では、二次元表示の場合どちらの方向に進んでいるかわかりにくい。STDモデル表示では、一方向流を点対象に重ね合わせたような形となり、出発点から終着点に向かって、二組の片上がりのベクトルが明白に読みとれる。

(3) 交錯流

二次元表示の場合、動線の交差によって、ほとんど時間的な前後関係をとらえることは困難である。STDモデル表示では、時間は、高さの低いところから高いところへ流れるため、時間変化に伴う移動はとらえやすい。全体としては、分散したベクトルとなる。（図9）

4.2 STDモデルを用いた歩行傾向表示

群衆の違いによるSTDモデルの差異を明確にするため、各歩行軌跡ベクトルの出発点をそれぞれ原点に移動し、表現したものが、図9の右になる。これにより、空間内

図9：群衆流動へのモデルの適応における比較

での、歩行の方向と速度の傾向を表現することが可能になる。

(1) 一方向流

移動方向に対して、原点から、終着点に向かって片側があがるベクトルとなる。

(2) 対向流

一方向流を点対象に重ね合わせたような形となり、原点から終着点に向かって、二つの片上がりのベクトルとなる。

(3) 交錯流

交通量が多い方向は、歩行軌跡が集中するが、全体としては、分散したベクトルとなる。

このように、STDモデルを用いることによって流動の差異を視覚的に表現できることが明らかになった。

4.3 個人の歩行軌跡による比較

(1) 動線が交差する流動

二次元表示では、時間を視覚的に表現することができないので、歩行軌跡が図の上で重なっている状態であっても、実際に人と人が同時刻に交差しているとは限らない。STDモデルを用いると、流動内における人間同士の歩行軌跡の時間的ずれ及び交差を視覚的に把握することが可能になる。

(2) 追従行動

群衆内において、追従行動が起こる場合、連続、あるいは断続的に同じ経路を人間が通過する。二次元表示では、歩行軌跡が重なり、時間的な前後関係が把握できないが、STDモデルでは、歩行における時間的な前後関係及び、時間間隔を視覚的に表現することが可能になる。

(3) 追い抜き行動

群衆内において、人間の歩行速度が異なる場合に追い抜き行動が見られる。二次元表示では歩行速度を表現できないが、STDモデルを用いることにより、歩行速度は、高さ方向の傾きの逆数で表現されるので、傾きの大小により、追い抜きが可視化できる。

(4) 移動、停止

二次元表示では、停止者は点、移動歩行者はベクトル

表2：STDモデルと歩行傾向表示

	STDモデル表示		歩行傾向表示	
	モデル	特徴	モデル	特徴
一方向流		片上がり		一方向に集中
対向流		両上がり		二方向に集中
交錯流		乱雑		多方向に分散

図10：個人の歩行行動へのモデルの適応における比較

で表現されるが、停止していた歩行者が途中から移動した場合などの表現は不可能である。しかし、STDモデルでは、停止者は、時間軸に平行な直線、移動歩行者は、斜めの線になるため、このような行動も読みとれる。

(5) 群衆の伸縮

群衆の行動の中で、集団の拡散、即ち、先頭と末尾との速度差によって当初の集団の長さが伸長し、密度を低下させながら速度を上昇させたり、また、歩行者の前後関係が広い状態であったものが、停止したときには間隔がせめめられ、その結果、集団全体の長さが縮小する。

10) このような時間変化に伴う群衆の動きは、二次元表示では表現しにくかったが、STDモデルを用いることによって視覚的に表現し、把握することができる。(図10)

5.まとめ

本研究では、空間-時間系歩行軌跡モデルを提案し、それを用いて群衆の動きのモデルをコンピュータ上で三次元空間を擬似的に表現し、インタラクティブな操作によってモデルを見ることを通して、平面的な表示ではとらえにくかった、群衆行動の時間的要素を含んだ構造を視覚的に理解することが可能になった。

従来、時間を伴う歩行者の流れについては、動画映像を繰り返し見ることによって、理解することが一般的であったが、本モデルを用いることによって、静止画を用いて、時間のファクタを視覚的に表示することが可能になった。

STDモデルの本当の効果は紙面ではなく、コンピュータで表示された、群衆の三次元空間をインタラクティブに操作しながら解析することにより発揮される。しかし、一定のアングルを設定する紙面上でも同様な観察結果をある程度表示することができることも確かめられた。註10)

注

- 1) 例えば、マッキントッシュコンピュータ上で作動するアプリケーションソフトChem-3Dなど。
- 2) 従来、群衆流動の研究は、その行動特性という視点から分類、位置づけが行われてきたが、本研究では、行動の表現の部分だけに着目し、既往の研究の再整理を行っており、新たに群衆行動研究の分類をしたものではない。
- 3) 頭部の動きで人の動きを代表したのは、地面からほぼ一定の高さにあり、群衆密度が高くなったときなど、足元よりも画面上で位置の判定が容易という理由からである。
- 4) 本研究では、コンピュータ内に仮想の三次元空間を再現する方法として、MacintoshのPDSであるRouterというソフトウェアを用いた。このソフトウェアは、三次元空間の座標と色を指定するテキストファ

イルをやりとりすることにより、三次元空間を再現するものである。

5) 本報では見やすさを考慮し、1) 陰影表示を用いたが、紙面で表現する都合上、コンピュータを用いたインタラクティブな画面表示に比べて理解度はある程度犠牲にされる。

6) 調査地点として、1.一方向流：新宿駅西口 2.対向流：新宿駅西口駅前3.交錯流：新宿駅西口改札を用いた。

7) 座標変換に用いるために基準四角形を地面上に設定し、そのうえに人間の身長に相当する高さ(1.65 mと設定した)の棒を立て撮影する。コンピュータ内において、棒の先端をマウスを用いてクリックすることにより、その座標を基準四角形として入力し、また、ダイアログボックスから基準四角形の実際の大きさを入力する。

8) 斜め方向から撮影した映像は、実平面Rから、フィルム面Fへの座標変換と考えられる。二平面間の斜像を行列Aにより行えば、

$\lambda \vec{\eta} = A \vec{\zeta}$ (λ : スカラー, $\vec{\eta}$: ベクトル (F), $\vec{\zeta}$: ベクトル (R))
として実平面R上に変換できる。

9) STDモデルシステムの操作性・モデルの理解については、システム開発者以外に、何人かの利用者に対してヒヤリングした結果、「立体構成・前後関係」に関しては、明らかにカラーで表示したディスプレイのインタラクティブな操作によるほうが、有効であるが、「全体的な状態の把握」に関しては、紙面上のグレイ表示でもある程度の理解ができることが明らかになった。

参考文献

- 1) 岡畑恵雄他：化学系のためのMacintosh, 講談社, 1991.7
- 2) 可視化情報学会：「流れのファンタジー」, 講談社, 1986.6
- 3) 可視化情報学入門編集委員会：「可視化情報学入門-見えないものを視る-」, 電機大出版局, 1994.5
- 4) 竹内啓五, 掛川秀史, 長田耕治：「画像を利用した群衆行動評価に関する研究」, 日本建築学会第15回情報システム利用技術シンポジウム, pp.143~148, 1992.12
- 5) 建部誠治ほか2名：「歩行解析への画像処理技術の応用に関する研究」, 日本建築学会論文報告集 No.436, pp.41~47, 1992.6
- 6) 中祐一郎：「交差流動の構造 - 鉄道駅における交錯流動に関する研究 (1) -」, 日本建築学会論文報告集 No.258, pp.93~102, 1977.8
- 7) 上原孝雄, 中村和男, 吉岡松太郎ほか1名「群衆対向流動の性状」, 日本建築学会論文報告集 No.289, pp.119~129, 1977.3
- 8) 渡辺仁史, 中村良三, 池原義郎ほか3名：「人間-空間系の研究 その6.空間における人間の分布パターン解析」, 日本建築学会論文報告集 No.221, pp.25~30, 1974.7
- 9) 藤井明, 原広司ほか2名：「都市の活動領域に関する研究 その1 歩行者数調査に基づく三次元モデルの提案」, 日本建築学会大会講演梗概集F, pp.515~516, 1994.9
- 10) 吉田克之：「EBモデル(伸縮ブロックモデル)による群衆流の解析、その1 避難行動予測における図解法の問題点とEBモデルの提案」, 日本建築学会論文報告集 No.409, pp.35~43, 1990.3
- 11) 山崎俊裕, 長倉康彦他：「オープンスペースの「動的密度感」に関する実験的研究」, 日本建築学会論文報告集 No.386, pp.71~80, 1988.4
- 12) John J.Fruin：「歩行者の空間 (PEDESTRIAN Planning and design)」, 鹿島出版会, 1974.12

(1995年7月10日原稿受理, 1995年9月26日採用決定)