

人の歩行軌跡データを用いた歩行者群モデルのパラメータ同定と 交差流制御への応用

山本江 (東京工業大学) 岡田昌史 (東京工業大学)

1. はじめに

人口の密集する大都市では、多数の歩行者により人の流れが形成される。このような人の流れには混雑が頻繁に生じ、不快感や事故の危険性の要因となっている。混雑を緩和し人の流れをスムーズにするには、歩行者の群挙動を定量的にモデル化し制御することが必要である。従来、都市空間設計への応用を目指して人の流れをモデル化する研究が多く行われており、それらはミクロモデル [1] とマクロモデル [2] に大別できる。ミクロモデルは各歩行者を粒子としてモデル化するもので、年齢・性別などの個人間のミクロな差異を反映することができ、現実に近い詳細なシミュレーションに適している。Helbing ら [1] は Social Force Model を提案し、目的地への引きつけ力、および衝突回避等の他人との相互作用力からなる運動方程式により歩行者の運動をモデル化した。また、Social Force Model と同様のモデルに予測による衝突回避行動を取り入れたもの [3][4] や、目的地の選択など高次の意思決定機能を含むモデル [5][6] が提案されてきた。しかし、ミクロモデルでは混雑度を定量的に表すことは難しい。一方、マクロモデル [2] は群全体を流体等の連続体でモデルするもので、混雑度を密度として表すことができる。著者ら [8] は、複数の人の流れが交差する「交差流」と呼ばれる現象に注目し、その連続体モデルを提案した。特に、二つの流れが垂直に交差する場合、交差領域において歩行者が縞状の群を形成して通過する現象が知られている [9]。提案モデルでは速度ベクトル場と連続の式を用いて密度を計算し、交差流に見られる動的な混雑度変化を定量化した。また、交差流の平均流速を増加させるような制御法を提案した。提案する制御法では流れの中に配置した誘導員に適切な移動則を与え、一般の歩行者がこの誘導員との衝突を回避する効果を利用して流れ全体を変化させる。そのため、提案手法は歩行者一人一人に直接指示をすることなく群全体を暗示的に制御する方法であり、不特定多数の歩行者に適用可能である。文献 [8] では、連続体モデルに基づいた解析から制御アルゴリズムを導出し、そのアルゴリズムがミクロモデルである粒子モデルにおいても有効であることをシミュレーションにより示した。しかし、粒子モデルにおけるシミュレーションは仮想的な環境を想定しており、現実的な人の歩行速度などがパラメータには反映されておらず、現実世界とシミュレーションとの間に乖離があった。

本稿では、実環境を反映したシミュレーションを目指し、人の歩行軌跡から粒子モデルのパラメータの同定を行う。また、ある歩行者が人の流れを横切る状況を例として、計測データとシミュレーション結果を比較することで粒子モデルの妥当性を検証する。最後に、

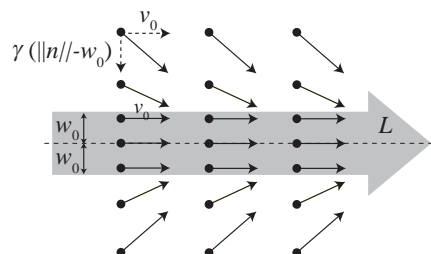


図1 速度ベクトル場による人の流れのマクロな挙動のモデル化

得られたパラメータを使って交差流の制御シミュレーションを行い、有効性を検証する。

2. 人の流れの粒子モデル

2.1 速度ベクトル場による人の流れのマクロモデル化

2次元平面内における歩行者の移動を考える。多数の歩行者によって形成される人の流れのマクロな挙動を次式のような速度ベクトル場でモデル化する。

$$v = f(x) \quad (1)$$

ただし、 $x = [x \ y]^T$ 、 $v = [u \ v]^T$ はそれぞれ平面内における位置と速度である。例えば、図1のような直線状の人の流れを考える。流れの方向を与える単位ベクトルを d 、流れの幅を w_0 とする。幅より内側の領域では方向ベクトル d に平行な速度を持ち、外側では幅の内側へ引き込まれるような速度を与えるベクトル場を考える。このとき、 $f(x)$ は以下のように設計できる。

$$f(x) = \begin{cases} v_0 d & (\|n\| \leq w_0) \\ v_0 d + \gamma(\|n\| - w_0) \frac{n}{\|n\|} & (\|n\| > w_0) \end{cases} \quad (2)$$

ここで、 v_0 は幅 w の内側における速度であり、一般的な人の歩行速度に相当する。以降、 v_0 を速度ベクトル場の基準速度と呼ぶ。また、 n は位置 x から中央線に垂直に下ろしたベクトル、 γ は幅の内側へ引き込まれる強さを表すパラメータである。

2.2 他人との衝突を避ける効果のモデル化

次に、速度ベクトル場 $f(x)$ に沿って移動する各歩行者を粒子でモデル化する。粒子 i の位置を x_i とし、また、速度 v_i を以下のように与える。

$$v_i = f(x_i) - \sum_{i \neq j} s(\|r_{ij}\|) \frac{r_{ij}}{\|r_{ij}\|} \quad (3)$$

$$r_{ij} = x_j - x_i \quad (4)$$

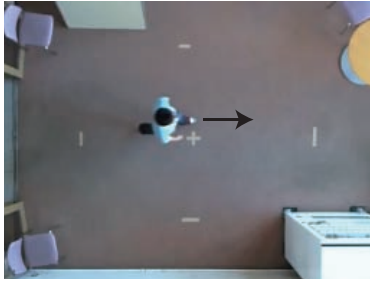


図2 カメラによる人の歩行軌跡の計測

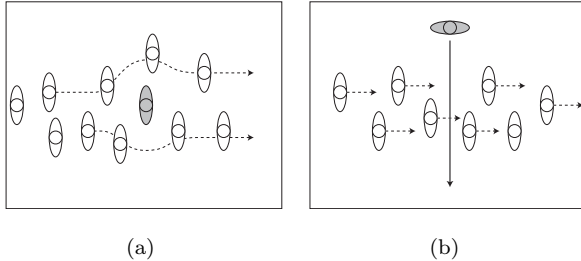


図3 歩行軌跡の計測条件

ただし, r_{ij} は粒子 i から他の粒子 j への相対位置ベクトルである. これは Social Force Model [1] と同様のモデルであり, 式 (3) 右辺第一項の速度ベクトル場が各歩行者が目的地に引きつけられる効果を表す. 式 (3) 右辺第二項は粒子 i とその周辺の粒子との間に生じる反発の効果を表す. これは歩行者が他人との衝突を避ける効果をモデル化したもので, 人が感じるパーソナル・スペース [10] に相当する. ここで, $s(r)$ は次式で定義されるシグモイド関数である.

$$s(r) = \frac{c}{1 + \exp\{(a(r-b))\}} \quad (5)$$

ただし, a, b, c は正の定数である. 式 (5) 中の b がパーソナル・スペースの半径に相当し, a はその領域の境界を滑らかにするパラメータである. また, c は反発の影響の大きさを決定する. これは設定した空間と粒子一個当たりのパーソナル・スペースの大きさとの間のスケール・ファクタである. 本稿では, これらのパラメータ a, b, c を実際の歩行者の歩行軌跡から同定する.

3. 歩行軌跡データからのパラメータ同定

3.1 歩行軌跡の計測

粒子モデルの妥当性を示すために, 実際の歩行者の軌跡を測定し, 得られた結果から粒子モデルのパラメータを決定する. まず, 歩行軌跡を得るために以下のような測定を行った. 図2に示すような約 $4.5\text{m} \times 6\text{m}$ の領域内において, 頭上約 6.5m の高さにカメラを設置し, 人が歩行する様子を撮影した. 撮影後, 各歩行者の頭部をトラッキングすることで歩行軌跡の時系列データを得る. 撮影後の画像処理によるトラッキングを容易にするために FLIR 社製の赤外線カメラ Tau 640 を使用した. 今回, 以下の3種類の歩行軌跡の計測を行った.

計測1. 図2のように, 領域内を単独で歩行する様子

計測2. 図3(a)のように, 中央に静止している人をよけながら複数の人が歩行する様子

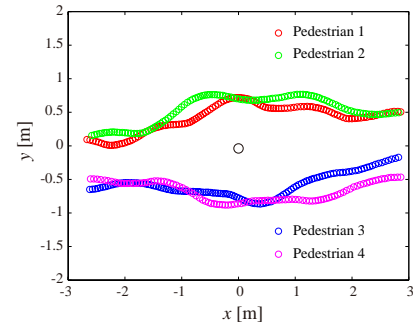


図4 計測2から得られた人の歩行軌跡

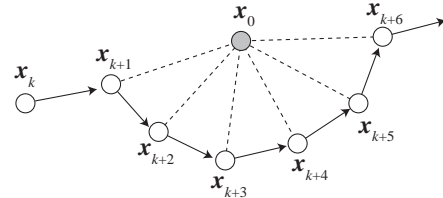


図5 歩行軌跡データからのモデルパラメータの同定

計測3. 図3(b)のように, 複数の歩行者からなる流れを他の歩行者が垂直に横切る様子

3.2 粒子モデルのパラメータ同定

まず, 計測1の歩行軌跡から速度を算出し, 式(2)で表される速度ベクトル場のパラメータを $v_0 = 1.64\text{m/s}$, $w_0 = 0.5\text{m}$, $\gamma = 1.2$ と定めた.

次に, 歩行者同士が衝突を避ける効果をモデル化した式(5)におけるパラメータ a, b, c を計測2の歩行軌跡から以下のように算出する. 図4に実際の歩行軌跡をプロットした様子を示す. 例えば, 図4中の歩行者1についてパラメータを同定することを考える. 図5のように, 中央で静止している人物の位置を x_0 , その人物を避けて移動する歩行軌跡の時系列データを x_k ($k = 1, \dots, m$) とする. 歩行軌跡データから時刻 k における速度 v_k を次式のように算出する.

$$v_k = \frac{x_{k+1} - x_k}{\Delta t} \quad (6)$$

ただし, Δt はサンプリングタイムである. 一方, 粒子モデルでは v_k が次式のように与えられる.

$$v_k = f(x_k) - s(\|r_k\|) \frac{r_k}{\|r_k\|} \quad (7)$$

$$r_k = x_0 - x_k \quad (8)$$

ここで,

$$y_k = f(x_k) - v_k \quad (9)$$

$$g_k(a) = s(\|r_k\|) \frac{r_k}{\|r_k\|} \quad (10)$$

$$a = \begin{bmatrix} a & b & c \end{bmatrix}^T \quad (11)$$

とおけば, 式(7)は次式のように書き換えられる.

$$y_k = g_k(a) \quad (12)$$

$k = 1, \dots, m$ までのデータを用いると、以下のようにまとめられる。

$$y = g(a) \quad (13)$$

$$y = \begin{bmatrix} y_1^T & \dots & y_m^T \end{bmatrix}^T \quad (14)$$

$$g(a) = \begin{bmatrix} g_1(a)^T & \dots & g_m(a)^T \end{bmatrix}^T \in \mathbf{R}^{2m} \quad (15)$$

したがって、式 (13) を満たす a を求めればよい。本稿では、Newton=Raphson 法を用いて a を以下のように求める。

STEP 1. 適当な a の初期値 a_0 を設定。

STEP 2. 現在値 $y_i = g(a_i)$ を計算する

STEP 3. 目標値との誤差 $\Delta y_i = y - y_i$ を計算し、 $\|\Delta y_i\|$ がある閾値 ε 以下であれば終了。

STEP 4. 以下のように a_i を a_{i+1} に更新する。

$$a_{i+1} = a_i + J^\dagger \Delta y_i \quad (16)$$

ただし、 $J \in \mathbf{R}^{2m \times 3}$ は $g(a)$ の a に関するヤコビ行列である。また、 J^\dagger は J の一般化逆行列である。

STEP 5. $i + 1 \rightarrow i$ として STEP. 2 に戻る

なお、式 (16) において J^\dagger として J の擬逆行列を用いることが考えられるが、 J が特異点に近い場合に数値計算が不安定になる。これを防ぐために、本稿では Singularity Robust Inverse [11] を使用する。

以上によりパラメータ a を求めることができると考えられる。しかし、図 4 から分かるように、 x_0 に近い場所には歩行軌跡のデータが存在しない。これは、相対距離 $\|r_k\|$ がある程度小さい場所では、 y に関するサンプルデータが与えられないを意味する。このため、上記の方法では b が負の値になるなど a として不適切な値が求まることがあった。そこで、本稿では図 4 の結果から b の値を 0.8 と定め、残りのパラメータ $\hat{a} = [a \ c]^T$ を求めることとした。これには、式 (16) 中の J を次式の \hat{J} で置き換えればよい。

$$\hat{J} = \frac{\partial y}{\partial \hat{a}} \quad (17)$$

以上のようにして最終的に $a = 10$, $b = 0.8$, $c = 2.5$ とパラメータを決定した。

3.3 粒子モデルの妥当性検証

上記のパラメータを使用して計測 3 と同様な状況を粒子モデルによりシミュレーションした。その結果を実際のデータと比較することで粒子モデルの妥当性を検証する。本稿では、特に歩行者の平均速度を比較することで、粒子モデルによって歩行者の群全体が持つ性質をモデル化できているかどうかを検証する。

図 6 に平均速度の時間変化の様子を示す。図中、点線が計測データから算出した平均速度、実線がシミュレーション結果を示す。灰色で示した約 7.2~9s の間に

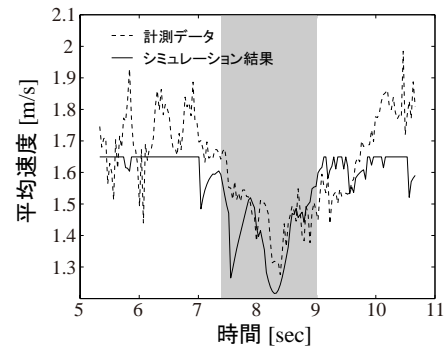


図 6 歩行者の平均速度の時間変化

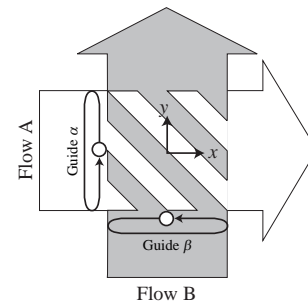


図 7 交差流における縞状の群形成と誘導員による制御

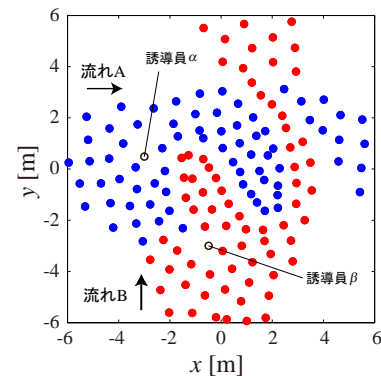


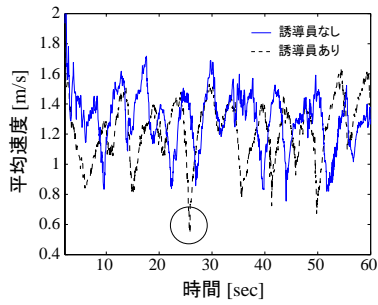
図 8 交差流の制御シミュレーション

他の歩行者が流れを横切る。他の歩行者が横切ることで、計測データにおいて平均速度が一旦低下し回復する様子が分かる。また、シミュレーション結果も同様の変化を示している。これにより、粒子モデルによって実際の歩行者の群が持つマクロな挙動を再現できており、これは粒子モデルが妥当であることを示している。

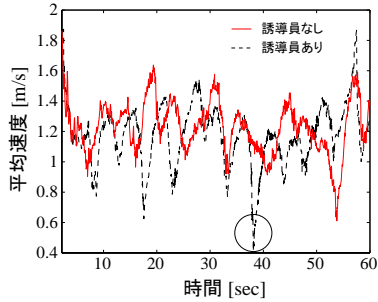
4. 交差流制御への応用

前節で同定した粒子モデルのパラメータを用いて、歩行者の交差流の制御へ応用する。交差流は複数の人の流れが交差する現象である。特に、図 7 のように二つの流れ A, B が垂直に交差する場合、交差領域において縞状の群が形成されることが知られている [9]。また、図 7 のように交差流の中に誘導員 α, β を配置し、この縞状の群の持つ時間・空間周波数に基づいて誘導員に周期運動を行わせることで両方の流れの平均速度を同時に向上させることができる [8]。

図 8 に交差流の制御シミュレーションの様子を示す。青丸が $+x$ 方向に進む流れ A の粒子を、赤丸が $+y$ 方



(a) 流れ A



(b) 流れ B

図 9 交差流制御シミュレーションにおける平均速度の時間変化

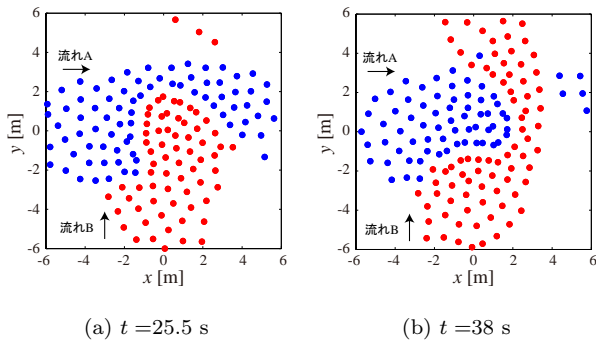


図 10 速度低下時の各粒子の挙動

表 1 交差流制御適用前後の平均速度の比較 (単位: m/s)

	Flow A	Flow B
without guides	1.14	1.13
with guides	1.21	1.19

向に進む流れ B の粒子を表す．各流れに対し，白丸で示した誘導員 α, β が周期的に往復する．図 4.(a), (b) に各粒子の平均速度の時間変化を示す．図中，破線が誘導員なしの場合を，実線が誘導員による制御を適用した場合を表す．誘導員なしの場合，図中丸印で示した瞬間に見られるように，ランダムに粒子を入力しているため各流れの平均速度が極端に低下する瞬間がある．図 9(a) 中の丸印で示した $t = 25.5$ s，図 9(b) 中の $t = 38$ s における交差流のシミュレーションの様子を図 10(a), (b) に示す．図 10(a) では流れ A が B にせき止められている様子が，図 10(b) では流れ B が A にせき止められている様子が確認できる．誘導員による制御を行うことで，図 8 のように誘導員が各流れを交互に優先させ，流れをスムーズにしている様子が確認できる．また，図 4.(a), (b) の時間平均をとった値を表 1

に示す．誘導員により両方の流れにおいて平均速度が向上していることが確認できる．

5. おわりに

本稿では，実際に人が歩行する様子を計測し，得られた歩行軌跡から粒子モデルのパラメータを同定した．また，ある歩行者が人の流れを横切る状況を想定し，歩行者の平均速度について計測結果とシミュレーションによる計算結果を比較することで，粒子モデルの妥当性を定量的に示した．本稿で用いた粒子モデルは年齢や性別等の個人差，衝突回避における予測等を含まない単純なものであるが，上記の結果から粒子モデルによって人の流れの持つマクロな性質が再現できることが分かる．最後に，同定したパラメータを使って交差流の制御シミュレーションを行い，提案した制御法の有効性を示した．

謝辞

本研究は科学技術振興機構 CREST「パラサイトヒューマンネットによる五感情報通信と環境センシング・行動誘導」の支援を受けた．また，歩行軌跡の計測に協力していただいた茂木祐一氏に感謝する．

参考文献

- [1] D. Helbing and P. Molnár. Social force model for pedestrian dynamics. *Physical Review E*, Vol. 51, No. 5, pp. 4282–4286, 1995.
- [2] R. L. Hughes. A Continuum Theory for the Flow of Pedestrians. *Transportation Research Part B*, Vol. 36, pp. 507–535, 2002.
- [3] I. Karamouzas, et al. A Predictive Collision Avoidance Model for Pedestrian Simulation. In *Motion in Games*, Vol. 5884, pp. 41–52, 2009.
- [4] J. Berg, et al. Reciprocal Velocity Obstacle for Real-time Multi-Agent Navigation. In *Proc. of the 2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA2008)*, 2008.
- [5] S. J. Guy, et al. PLEdgestrians: A Least-Effort Approach to Crowd Simulation. In *Proc. of Eurographics/ ACM SIGGRAPH Symposium on Computer Animation*, 2002.
- [6] J. Pettre, et al. A Navigation Graph for Real-time Crowd Animation on Multilayered and Uneven Terrain. In *Proc. of the First International Workshop on Crowd Simulation (V-CROWD'05)*, pp. 81–89, 2005.
- [7] L. F. Henderson. The Statistics of Crowd Fluids. *Nature*, Vol. 229, pp. 381–383, 1971.
- [8] K. Yamamoto and M. Okada. Continuum Model of Crossing Pedestrian Flows and Swarm Control Based on Temporal/Spatial Frequency. In *Proc. of the 2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA2011)*, pp. 3352–3357, 2011.
- [9] 安藤, 大戸, 青木. 人の流れを予測する -旅客流動シミュレーションシステム-. *Railway Research Review*, Vol. 45, No. 8, pp. 8–13, 1988.
- [10] 渋谷. パーソナル・スペースの形態に関する一考察. *山梨医大紀要*, Vol. 2, pp. 41–49, 1985.
- [11] Y. Nakamura and H. Hanafusa. Inverse Kinematics Solutions With Singularity Robustness for Robot Manipulator Control. *ASME Transaction, Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, Vol. 108, pp. 163–171, 1986.