

群の交差流の連続体モデルと 時間・空間周波数に基づく歩行者制御

山本江 岡田昌史 (東工大)

Continuum Model of Crossing Swarm Flows and Pedestrian Control Based on Temporal/Spatial Frequency

*Ko YAMAMOTO and Masafumi OKADA (Tokyo Tech)

Abstract— In the densely-populated urban areas, pedestrian flows often cross each other and congestion occurs. In order to reduce the congestion or the risk of an accident, it is required to control swarm behavior of pedestrian. The authors have proposed the continuum model of the crossing flows. Based on this model, this paper proposes an implicit control method of the crossing flows with guide people. From simulations, it is revealed that periodic motion of guide people affects the temporal/spatial frequency and average velocity of the flows. Based on this relationship, we proposed modulating method of the motion frequency of guide people. The validity of proposed method is verified by simulations.

Key Words: Control of Swarm, Crossing pedestrian flows, Temporal/spatial frequency

1. はじめに

人口の密集する大都市においては人の流れの混雑が頻繁に生じる。特に、Fig. 1(a)のようなスクランブル交差点や駅のコンコース、イベント会場等においては複数の人の流れが複雑に交差することもあり、不快感や事故の危険性の要因となっている。混雑を緩和しリスクを軽減するには、歩行者の群挙動の制御が求められる。群集誘導に関する研究としては、各個人に指示を与える方法が提案されている [1][2]。しかし、誘導のために各個人が指示を受けるデバイスを持つことが必要である。特に、大都市における人の流れを対象とすると個体数が膨大になるため、各個人への個別の指示ではなく群のマクロな挙動を暗示的に操作することが求められる。

一方、Okadaら [3] は、群を連続体としてモデル化し、密度として計算した混雑度から混雑を緩和するためのパーティションの配置を最適化により求めた。連続体モデルにより極めて多くの個体を考慮でき、また、個人への指示を必要しない群の暗示的制御と言える。しかし、文献 [3] では単一の流れのみを考慮し、また密度分布が定常状態に収束する状況を対象としていた。実際の環境では、複数の流れが存在し混雑度が時々刻々と変化することが想定される。特に、二つの人の流れが交差する現象は交差流動と呼ばれ、交差箇所では Fig. 1(b) のように各流れが縞模様状の群を自己組織的に形成して進んで行くことが知られている [4][5]。駅や交差点における人の群挙動を制御するには、このような混雑度の動的変化をモデル化する必要がある。筆者ら [6] は、交差流の連続体モデルを提案した。また、誘導員の運動により一方の流れの平均流速を向上させる制御法を提案したが、2つの流れの平均流速を共に上げることは難しい。

本研究では、交差流において両方の流れの平均流速を向上させるような制御法を提案する。交差流で発

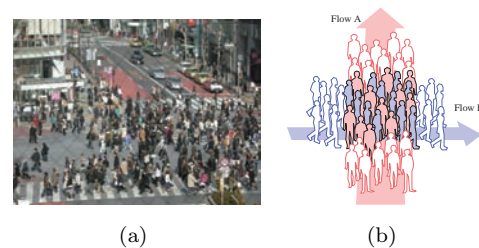


Fig.1 Congestion in urban areas and the crossing pedestrian flows

生する縞模様状の密度分布は空間的・時間的な周期現象である。本稿ではこの周期現象に着目し、誘導員に周期運動を与えた場合の交差流の時間・空間周波数の影響とそのときの平均流速との関係をシミュレーションにより調べる。また、その時間・空間周波数と平均流速との関係から、平均流速を向上させるような誘導員の運動周波数の調整法を提案する。最後に、シミュレーションにより提案手法の有効性を示す。

2. 交差流の連続体モデル

2.1 速度ベクトル場による群集挙動のモデル化

歩行者のマクロな挙動を速度ベクトル場でモデル化する。ある位置 $x = [x \ y]^T \in \mathbf{R}^2$ における速度をベクトル場 $v = f(x)$ で与える。本稿では Fig. 2 のような直線に沿う人の流れを対象とし、 $f(x)$ を以下のように与える。

$$f(x) = \begin{cases} v_0 d & (\|n\| \leq w) \\ v_0 d + k(\|n\| - w) \frac{n}{\|n\|} & (\|n\| > w) \end{cases} \quad (1)$$

ここで、 d は流れの中央線の方向ベクトル、 n は位置 x から中央線に垂直に下ろしたベクトルである。また、 w は速度ベクトル場の幅を、 v_0 は速度ベクトル場の基

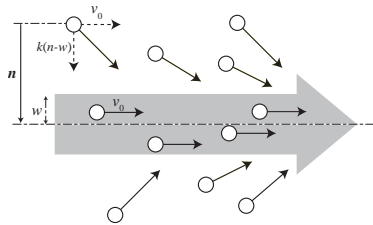


Fig.2 Design method of the velocity field

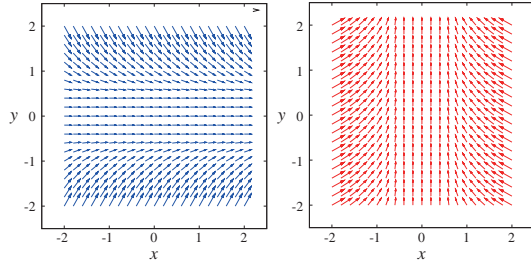


Fig.3 Examples of the vector field

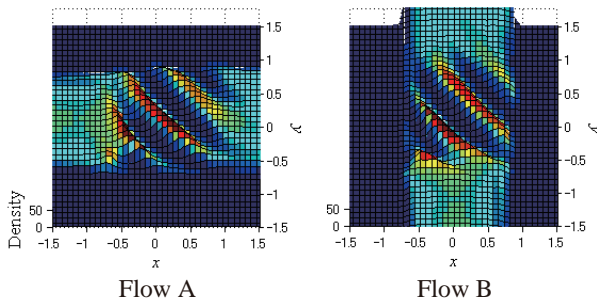


Fig.4 Simulation result of the crossing flow based on the continuum model

準速度を表す．例として， $v_0 = 1.0$ ， $w = 0.5$ ，方向ベクトルを $d_A = [1 \ 0]^T$ ， $d_B = [0 \ 1]^T$ として与えた2つの速度ベクトル場 f_A ， f_B を Fig. 2 に示す．

2.2 連続体による交差流のモデル化

速度ベクトル場 f_A ， f_B に従う2つの流れA，Bを考える．各流れの混雑度を連続体の密度 ρ_A ， ρ_B で表し，それぞれの速度を $v_A = [v_B \ w_B]^T$ ， $v_B = [v_B \ w_B]^T$ とする．このとき，各流れ $i = A, B$ の密度の時間変化は次式にある圧縮性流体の質量保存の式（連続の式）に従うとする．

$$\frac{\partial \rho_i}{\partial t} = -\rho_i \left(\frac{\partial v_i}{\partial x} + \frac{\partial w_i}{\partial y} \right) - \left(\frac{\partial \rho_i}{\partial x} v_i + \frac{\partial \rho_i}{\partial y} w_i \right) \quad (2)$$

また，各流れの速度を以下のように与える．

$$v_A = f_A(x) - \alpha \nabla \rho_A - \beta \nabla \rho_B \quad (3)$$

$$v_B = f_B(x) - \alpha \nabla \rho_B - \beta \nabla \rho_A \quad (4)$$

ここで， $\nabla \rho$ は空間の密度勾配を表わし， $\nabla \rho = \left[\frac{\partial \rho}{\partial x} \ \frac{\partial \rho}{\partial y} \right]^T$ である．右辺第二，三項は各流れの密度に対する流体の拡散項であり， α および β はその係数である．これは人同士が衝突を避けようとする効果に相当する．

2.3 シミュレーション

以上のような連続体モデルを用いて交差流における密度変化をシミュレーションした．連続の式 (2) の計

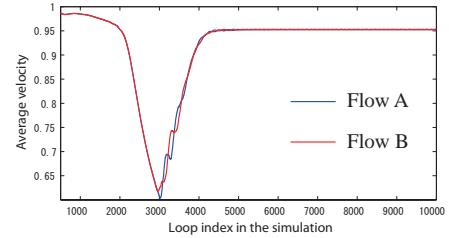


Fig.5 Time variation of average velocity of the crossing flow

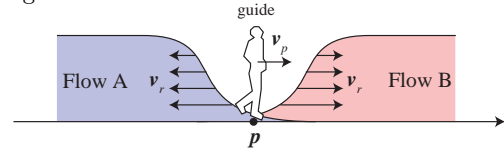


Fig.6 Control of the crossing flow with guide people

算には有限体積法を用いる．また，密度の入力は設定した範囲において ρ_0 となるように境界条件として与えた． xy 平面内における定常状態における密度分布の様子を Fig. 4 に示す．各流れの入力密度は $\rho_0 = 14$ とした．図中，青色の部分が密度0を示し，赤色に近づくほど密度が高くなる．2つの流れが交差後，しばらく時間が経過した後に縞模様状の密度変化が現れることが確認できる．これは，文献 [4][5] で述べられている現象と一致する．

各流れの流速を評価するために，平均速度を（総流量）/（総密度）として次式のように計算する．

$$\bar{v}_i = \frac{\int \rho v_i dx}{\int \rho dx} \quad (i = A, B) \quad (5)$$

\bar{v}_i のうち，各流れの方向ベクトル d_i に射影した成分を $\bar{v}_i = \bar{v}_i^T d_i$ とし，その時間変化を Fig. 5 に示す．図中，2000～4000ステップで平均流速が急激に低下するのは，各密度の衝突によるものである．3000ステップ以降で，縞模様状の密度変化が形成され，速度が回復する様子が確認できる．

3. 交差流の時間・空間周波数調整制御

3.1 誘導員による交差流の制御

本稿では誘導員により交差流を暗示的に制御する方法を考える．誘導員の位置を p とする．このとき，各流れは Fig. 6 ように反発の影響を受けるものとする．ある位置 x における反発速度 v_r は次式で与える．

$$v_r = -s(\|r_p\|) \frac{r_p}{\|r_p\|} \quad (6)$$

ただし， $r_p \equiv p - x$ は誘導員からの相対位置である．また， $s(r)$ は次式で定義されるシグモイド関数である．

$$s(r) = \frac{c}{1 + \exp\{(a(r-b))\}} \quad (7)$$

このとき各流れの速度は，eq.(3) に eq.(6) の影響を足し合わせたものとして次式のように表される．

$$v_A = f_A(x) - \alpha \nabla \rho_A - \beta \nabla \rho_B + \sum_j v_r \quad (8)$$

$$v_B = f_B(x) - \alpha \nabla \rho_B - \beta \nabla \rho_A + \sum_j v_r \quad (9)$$

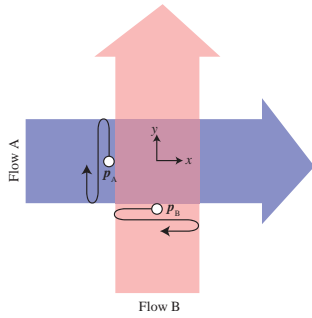


Fig.7 Periodic motion of guides

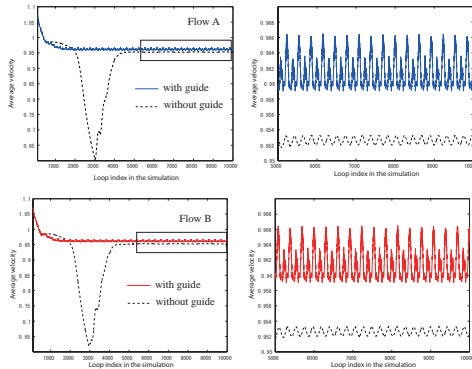


Fig.8 Time variation of average velocity when guide people move periodically.

このとき、誘導員の移動則を適切に与え、各流れの平均速度が向上することを旨とする。

3.2 誘導員の周期運動の影響

前節で見たように、交差流で発生する縞模様の密度分布変化は時間的・空間的な周期現象である。また、交差領域における流速には交差流の持つ時間周波数と空間周波数が影響すると考えられる。ここで、空間周波数の逆数は縞模様の波長に相当する。そこで、本節では誘導員の運動によって交差流の時間・空間周波数を操作し、平均流速を向上させることを考える。具体的には、Fig. 7のように交差領域の入口に誘導員 p_A 、 p_B を配置し、次式のような周期運動を与える。

$$p_A = \begin{bmatrix} -0.75 \\ 0 \end{bmatrix} + 0.7 \sin(2\pi\omega t) \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$p_B = \begin{bmatrix} 0 \\ -0.75 \end{bmatrix} + 0.7 \sin(2\pi\omega t + \pi) \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

ここで、2つの周期運動は逆位相をとるように設定した。

まず、例として $\rho_0 = 14$ 、 $\omega = 0.065$ としてシミュレーションを行った。このときの平均流速の時間変化を Fig. 8 に示す。右列は 5000~10000 ステップを拡大したものである。密度の衝突による平均流速の急激な低下が抑えられ、また定常状態においても流れ A、B とともに平均流速が増加していることが分かる。

次に、入力密度 $\rho_0 = 11, 12, 13, 14, 15$ の場合において、誘導員の周波数 ω を 0.05 から 0.095 の範囲で 0.001 ずつ増やしてシミュレーションを行った。十分に時間が経過後、定常状態における流れ A の平均速度の計算

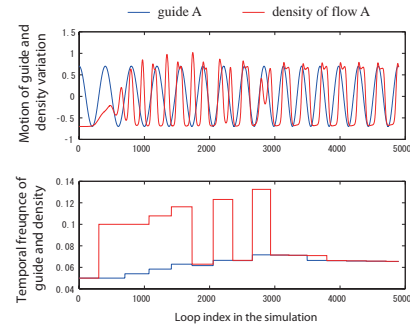


Fig.11 Synchronization between motion of guide and density of flow

結果を Fig. 9 上段に示す。図中、赤色の鎖線が誘導員なしのときの平均速度を、青線が誘導員ありの平均速度を表わす。これにより、周波数を適切に選ぶことにより平均速度が増加することが分かる。なお、流れ B の平均速度についても A と同様の現象が見られた。

具体的にそれぞれの周波数の場合において交差流の様子がどのように変化するかを調べる。時間周波数については、原点での密度の時系列データを FFT で解析することにより算出できる。各入力密度において、時間・空間周波数を計算した結果を Fig. 9 中段・下段に示す。中段には密度変化の時間周波数と誘導員の運動周波数との差を縦軸にプロットした。図中、赤線は平均流速が最大となる誘導員の運動周波数を表わす。これら結果から、次の 2 点が言える。1) 誘導員の周波数が増加するにつれて、密度の時間周波数は誘導員の周波数に近づき、ある値を境に同期する。また、そのとき平均流速が最大となる。2) 誘導員と密度の時間変化が同期する周波数を境に、密度の空間周波数は増加していく。

3.3 時間・空間周波数に基づく制御則

以上の考察から、誘導員の周波数を変化させることで密度変化の時間・空間周波数を調整し、平均流速を増加させることができると考えられる。そこで、本稿では誘導員の周波数の調整則を以下のように与える。

誘導員が周波数 ω_i で運動しているとしよう。このときの一周分、すなわち、ある時刻 t_0 から $t_0 + T_i$ までの密度変化を考えよう。ただし、 $T_i \equiv 1/\omega_i$ である。まず、原点における密度の時系列データから時間周波数 $\omega_{\rho i}$ を求める。また、時刻 $t_0 + T_i$ での密度分布から空間周波数 ν_i を計算する。 $\omega_{\rho i}$ 、 ν_i から次の一周分分の誘導員周波数 ω_{i+1} を次式で与える。

$$\omega_{i+1} = \begin{cases} \omega_i + k_\omega(\omega_{\rho i} - \omega_i) & (\text{if } \omega_{\rho i} - \omega_i \geq \Delta\omega_0) \\ \omega_i + k_\nu(d\nu - \nu_i) & (\text{if } \omega_{\rho i} - \omega_i < \Delta\omega_0) \end{cases} \quad (12)$$

ここで、 k_ω 、 k_ν は時間・空間周波数に関するゲイン、 $d\nu$ は空間周波数の目標値、 $\Delta\omega_0$ は時間周波数の誤差に関する閾値である。

以上の調整則を用いて、入力密度 $\rho_0 = 14$ においてシミュレーションを行った。ただし、 $k_\omega = xx$ 、 $k_\nu = xx$ 、 $d\nu = xx$ 、 $\Delta\omega_0 = xx$ とした。密度分布の様子を Fig. 10 に示す。図中、白色の四角形が誘導員の位置を示す。時

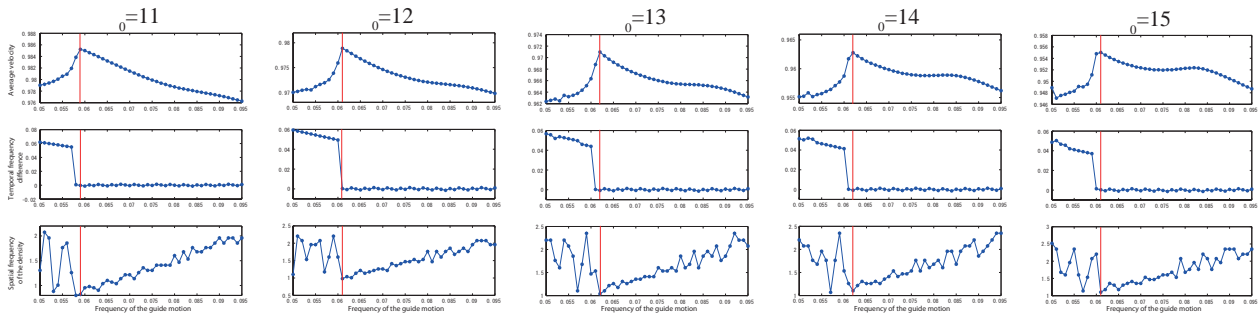


Fig.9 Relationship between frequency of guides and average velocity of the flow A

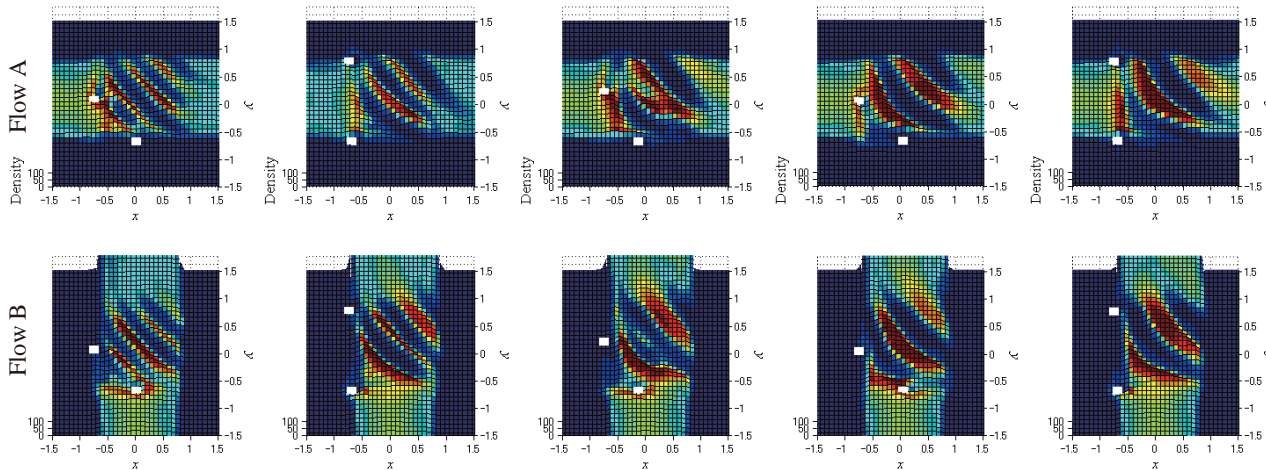


Fig.10 Simulation result of the crossing flow with proposed control method

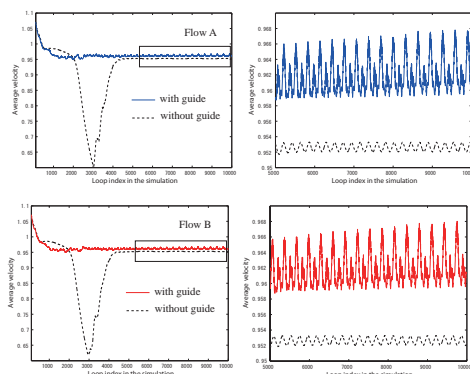


Fig.12 Time variation of average velocity with proposed control method

間が経過するにつれて、縞模様の幅が広がることが確認できる。誘導員の周期運動の様子を Fig. 11 上段に示す。図中、比較のために密度の時間変化をスケールした値を重ねてプロットした。このときの誘導員の運動周波数と密度変化の時間周波数の変化を Fig. 11 下段に示す。時間が経過するにつれて、誘導員の運動と密度変化が同期する様子が確認できる。最後に、平均流速の時間変化の様子を Fig. 12 に示す。十分時間経過後、空間周波数の調整によって平均流速が徐々に増加していることが確認できる。

4. おわりに

交差流の時間的・空間的な周期現象に着目した制御法を提案した。誘導員の運動周波数と密度変化の時間

周波数を一致させると同時に、密度の空間周波数を小さくするように誘導員の運動周波数を調整することで、両方の平均流速を同時に向上させることが可能である。提案手法を用いることで、事前に行ったシミュレーション結果よりも平均流速が向上することを確認し、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。

参考文献

- [1] 車谷. コピキタスエージェントのためのアーキテクチャ CONSORTS - 群ユーザ支援に向けて -. 電子通信学会技術研究報告, 第 102 巻, pp. 13-17, 2003.
- [2] 中島ら. マルチエージェントシミュレーションを用いた避難誘導実験の拡張. 情報処理学会論文誌, Vol. 28, No. 6, pp. 1-8, 2005.
- [3] M. Okada and Y. Homma. Amenity Design for Congestion Reduction based on Continuum Model of Swarm. In *Proc. of the 13th International Conference on Mechatronics Technology*, 2009.
- [4] 中. 交差流動の構造 - 鉄道駅における旅客の交差流動に関する研究 (1) -. 日本建築学会論文集報告集, Vol. 258, pp. 93-102, 1977.
- [5] S. P. Hoogendoorn. Pedestrian flow modeling by adaptive control. In *Proc. of Transportation Research Board Annual Meeting*, 2004.
- [6] 山本, 本間, 岡田. 人の交差流の連続体モデルとその制御. 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会講演論文集, 2A1-G11, 2010.