

交差流の時間・空間周波数を利用した歩行者制御

山本江： 東京工業大学，〒152-8550，東京都目黒区大岡山 2-12-1，
yamamoto@micro.mep.titech.ac.jp

岡田昌史： 東京工業大学，〒152-8550，東京都目黒区大岡山 2-12-1，
okada@mep.titech.ac.jp

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

Ko YAMAMOTO: Tokyo Tech

Masafumi OKADA: Tokyo Tech

Abstract— In the densely-populated urban areas, pedestrian flows often cross each other and congestion occurs. It may lead us to discomfort feeling and pedestrian accidents. In order to reduce the congestion or the risk of accidents, it is required to control swarm flows of pedestrian. This paper proposes an implicit control method of the crossing swarm flows. Swarm flow is modeled by the continuum model and its congestion degree is calculated as the fluid density. From a simulation of the crossing swarm flows with the continuum model, it is verified that diagonal stripe pattern of the congestion degree emerges. Moreover, an implicit control method to increase the average flow velocity by moving guides is proposed. Focusing on periodic phenomenon of the crossing flows, we investigate relationship between its temporal and spatial frequency and a cyclic motion of guides. From the relationship, a control method based on the temporal and spatial frequency is proposed. The validity is verified with simulations in both continuum and particle model.

Key Words: Crossing pedestrian flows, Modeling of pedestrians, Control of swarm

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し，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，歩行者の流れの制御が求められる。これまでに，歩行者へのナビゲーション，避難誘導のために各歩行者へ個別に指示を与える方法が提案されてきた [1][2]。しかし，誘導のためは一人ひとりが指示を受けるデバイスを持つことが必要である。大都市において多数の歩行者を対象とする場合，各歩行者への個別の指示ではなく，「群の暗示的制御」が求められる。ここで，「群の暗示的制御」は，限定された少数の入力によって群のマクロな挙動を間接的に操作することを指す。例えば，少数のエージェントにより大多数の群を目的地まで誘導する「牧羊犬システム」[3]が挙げられる。また，Okadaら [4]は展示場の人の混雑を緩和するためにパーティションの配置によって人の流れを制御することを提案した。文献 [4]では，群衆の流れを連続体でモデル化し，混雑度を密度で定量化している。ここでは，単一の流れに注目し，また混雑度は定常状態に収束するような状況を扱っている。一方，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。特に，二つの人の流れが交差する現象は交差流と呼ばれ，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 [5][6][7]。例えば Fig. 1(b)のように二つの流れが垂直に交差する場合は，流れに対し45度傾いた縞状の群を形成して歩行者が進んでいく。駅や交差点における歩行者の流れを制御するには，このような

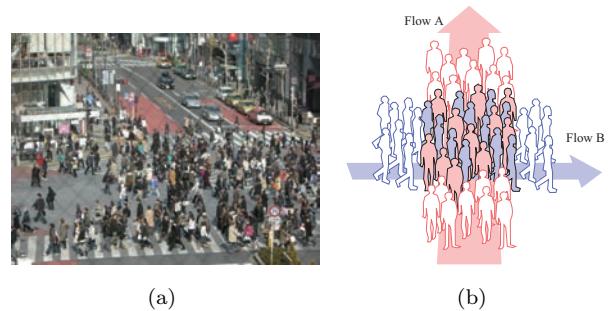


Fig.1 (a) Congestion in urban areas and (b) the crossing pedestrian flows. When two pedestrian flows cross vertically, diagonal stripe pattern emerges.

人の流れの動的変化をモデル化する必要がある。

本稿では交差流を対象として，連続体モデルを用いた歩行者の流れのモデル化と制御方法を提案する。文献 [4]と同様に人の流れを連続体でモデル化し，圧縮性流体の質量保存則に基づいて混雑度を密度として計算する。また，交差流において誘導員を動かすことで流れの平均流速を増加させるように制御する方法を提案する。本稿では特に，交差流の定常状態における周期現象に着目し，交差流の時間・空間周波数に基づく制御法を提案する。また，実際の歩行者への応用を目指し，粒子モデルにおいて仮想的に密度を計算することで提案手法を粒子モデルに適用し，シミュレーションにより有効性を示す。

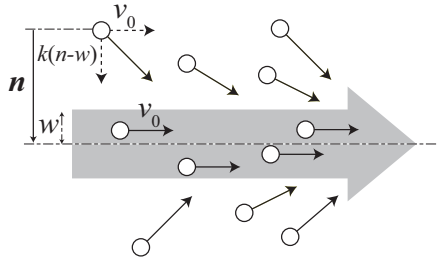


Fig.2 Velocity field setting

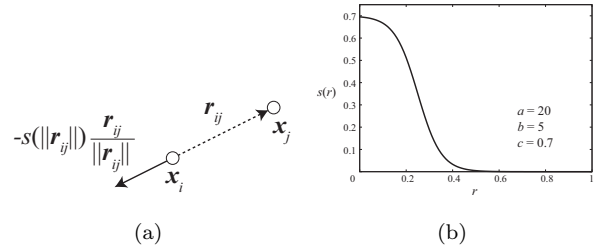
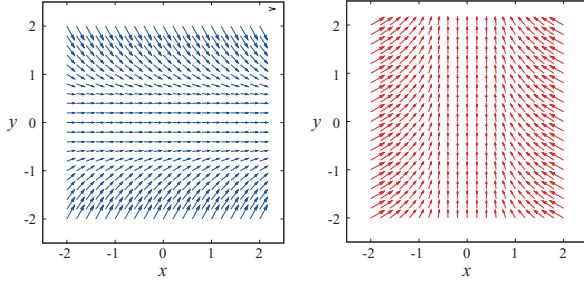


Fig.4 Repulsive velocity between two particles



(a) f_A (b) f_B

Fig.3 Examples of the vector field

2. 速度ベクトル場による人の流れのマクロモデル化

まず、歩行者によって形成される人の流れ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 における速度を以下のようなベクトル場 $f(x)$ で与える．

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

$$x = \begin{bmatrix} x & y \end{bmatrix}^T \in \mathbf{R}^2 \quad (2)$$

本稿では Fig. 2 のような，ある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．

$$f(x) = \begin{cases} v_0 d & (\|n\| \leq w) \\ v_0 d + k(\|n\| - w) \frac{n}{\|n\|} & (\|n\| > w) \end{cases} \quad (3)$$

ここで， d は流れの方向ベクトル， 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 $d_A = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix}^T$ ， $d_B = \begin{bmatrix} 0 & 1 \end{bmatrix}^T$ として与えた 2 つの速度ベクトル場 f_A ， f_B を Fig. 3 に示す．基準速度は $v_0 = 1.0\text{m/s}$ とした．なお，直線上の人の流れ以外にも，文献 [4] の方法によりベクトル場を設計することで，より複雑な流れの形状にも対応可能である．

次に，これらのベクトル場に各歩行者をモデル化した粒子を入力し，交差流の現象を確認する．以降，このような人の流れのモデルを本稿では粒子モデルと呼ぶ．ベクトル場 f_A に従う粒子 i の位置 x_i における速度 v_i を以下のように与える．

$$v_i = f_A(x_i) - \sum_{i \neq j} s(\|r_{ij}\|) \frac{r_{ij}}{\|r_{ij}\|} \quad (4)$$

$$r_{ij} = x_j - x_i \quad (5)$$

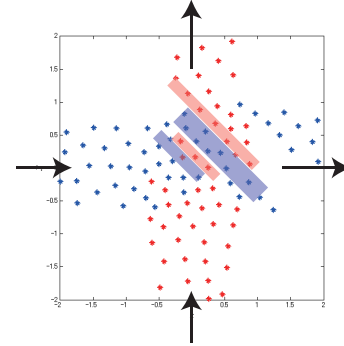


Fig.5 Simulation of the crossing flows with the particle model

右辺第二項は粒子 i が周辺の粒子との衝突を避けるような反発の効果を表す． r_{ij} は，Fig. 4(a) に示すような粒子 i から j への相対位置ベクトルである．また， $s(r)$ は次式で定義されるシグモイド関数であり，Fig. 4(b) のような形をとる．

$$s(r) = \frac{c}{1 + \exp\{(a(r-b))\}} \quad (6)$$

f_B に従う粒子についても同様に速度を指定し，2 つの直交する群の流れをシミュレーションした．粒子の運動の様子を Fig. 5 に示す．2 つの流れが交差後，粒子が帯状の集団を形成して通過していることが確認できる．この結果は，文献 [5][6] に見られる現象と一致し，速度ベクトル場による群挙動のモデル化が妥当であると言える．

しかし，この粒子モデルを用いたシミュレーションでは粒子が帯を形成するが現象として確認できるものの，その幅や混雑度を定量化できない．そこで，次節で述べる連続体によるモデル化を行う．

3. 群の交差流の連続体モデル

3.1 連続の式に基づく交差流のモデル化

前節と同様に，各流れが速度ベクトル場 f_A ， f_B により指定されているとする．また，流れ A，B における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 $v_A = \begin{bmatrix} v_B & w_B \end{bmatrix}^T$ ， $v_B = \begin{bmatrix} v_B & w_B \end{bmatrix}^T$ とする．このとき，各流れの密度の時間変化は次式のような圧縮性流体の質量保存の式 (連続の式) に従うとする．

$$\frac{\partial \rho_i}{\partial t} = -\rho_i \left(\frac{\partial v_i}{\partial x} + \frac{\partial w_i}{\partial y} \right) - \left(\frac{\partial \rho_i}{\partial x} v_i + \frac{\partial \rho_i}{\partial y} w_i \right) \quad (i = A, B) \quad (7)$$

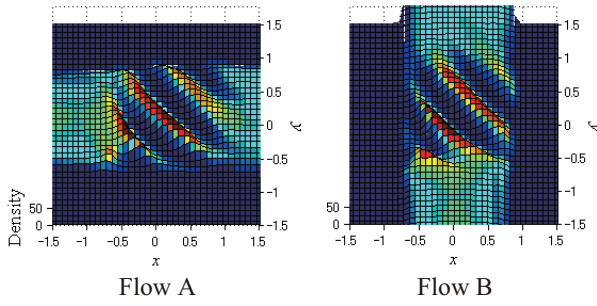


Fig.6 Simulation result of the spatial distribution of density in crossing flows with the continuum model

また、各流れの速度を以下のように与える．

$$\mathbf{v}_i = \mathbf{f}_i(\mathbf{x}) - \alpha \nabla \rho_i - \beta \nabla \rho_j \quad (j \neq i) \quad (8)$$

ここで、 $\nabla \rho_i$ は密度勾配を表わし、

$$\nabla \rho_i = \begin{bmatrix} \frac{\partial \rho_i}{\partial x} & \frac{\partial \rho_i}{\partial y} \end{bmatrix}^T \quad (9)$$

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．これは粒子モデルにおける粒子同士の反発項に相当する．

3.2 連続体モデルに基づく交差流のシミュレーション

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 (7) の計算には有限体積法を用いる．また、密度は設定した範囲においてある値 ρ_0 となるように入力を与える． xy 平面内における密度変化の様子を Fig. 6 に示す．各流れの入力密度の平均値は $\rho_0 = 14$ とした．図中、青色の部分に密度 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、縞模様状の密度変化が現れることが確認できる．

ここで、各流れがどの程度スムーズに流れているかを次式で定義される平均流速を用いて評価する．

$$\bar{v}_i = \left(\frac{\int \rho v_i dx}{\int \rho dx} \right)^T \mathbf{d}_i \quad (i = A, B) \quad (10)$$

右辺の括弧内は「空間内の全密度の総和」に対する「流量の総和」の割合を表し、平均流速 \bar{v}_i は流れの方向ベクトルに平行な成分として計算される．Fig. 7 に平均流速の時間変化を示す．二つの流れの衝突により、100s 以降で平均流速が急激に低下する．その後、150s 付近で交差流に縞状の密度分布が現れ、200s 以降、縞状の密度が定常的に流れることで平均流速が回復する．

4. 時間・空間周波数に基づく交差流の制御

4.1 誘導員による暗示的制御

本稿では誘導員を動かすこと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. 8 ように反発の影響を受ける

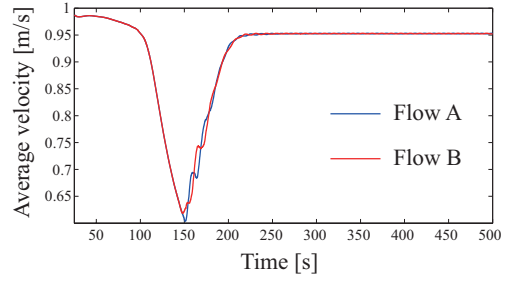


Fig.7 Time variation of average velocity of the crossing flows

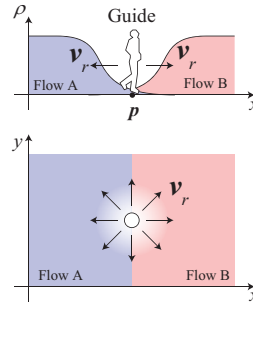


Fig.8 Modeling of a guide and its effect to flows

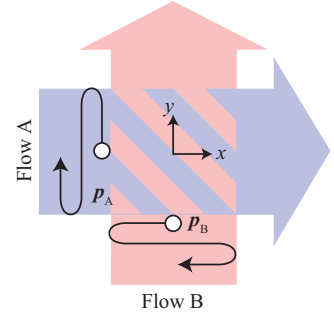


Fig.9 Periodic motion of guides

ものとする．ある位置 x における反発速度 \mathbf{v}_r は次式で与える．

$$\mathbf{v}_r = -s(\|\mathbf{r}_j\|) \frac{\mathbf{r}_j}{\|\mathbf{r}_j\|} \quad (11)$$

ただし、 $\mathbf{r}_p = \mathbf{p} - \mathbf{x}$ は案内人からの相対位置を表す．このとき各流れの速度は、(8) に (11) 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．

$$\mathbf{v}_A = \mathbf{f}_A(\mathbf{x}) - \alpha \nabla \rho_A - \beta \nabla \rho_B + \sum_j \mathbf{v}_r \quad (12)$$

$$\mathbf{v}_B = \mathbf{f}_B(\mathbf{x}) - \alpha \nabla \rho_B - \beta \nabla \rho_A + \sum_j \mathbf{v}_r \quad (13)$$

以上のようにしてモデル化した誘導員を動かすことで平均流速を向上させる制御を行う．

4.2 誘導員の周期運動と交差流の時間・空間周波数解析

Sect. 3. で見たように、交差流では、密度が縞模様状の分布を形成して進んでいく．そこで、誘導員にも周期運動をさせた場合に交差流の平均速度がどのように変化するかを調べた．

まず、2人の誘導員 p_A, p_B の運動を以下のように与えることとする．

$$\mathbf{p}_A = \begin{bmatrix} -0.75 \\ 0 \end{bmatrix} + 0.7 \sin(2\pi\omega_G t) \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$\mathbf{p}_B = \begin{bmatrix} 0 \\ -0.75 \end{bmatrix} + 0.7 \sin(2\pi\omega_G t + \pi) \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (15)$$

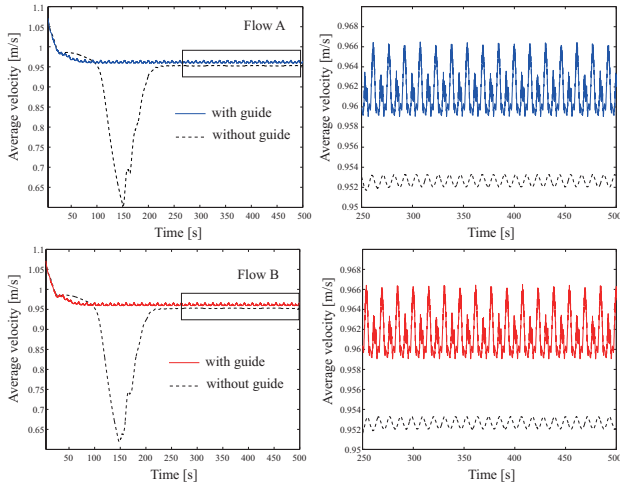


Fig.10 Time variation of average velocity when guide people move periodically.

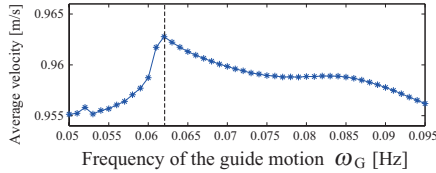


Fig.11 Relationship between the frequency of guide motion ω_G and the average flow velocity, where the input density is $\rho_0 = 14$.

ここで、 ω_G は誘導員の運動の周波数である。また、2つの周期運動は逆位相をとるように設定した。これは、Fig. 9のように誘導員が流れの境界線際で周期運動をすることを意味する。

まず、例として $\rho_0 = 14$ 、 $\omega_G = 0.065\text{Hz}$ 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. 10 に示す。流れの衝突による急激な流速の低下が抑えられていることがわかる。Fig. 10 右列は定常状態 250~500s を拡大したものである。定常状態においても流れ A、B ともに平均流速が増加していることが分かる。

次に、平均流速に対する誘導員の運動周波数の影響を調べるために、入力密度 $\rho_0 = 14$ において周波数 ω_G を 0.050 から 0.095Hz の範囲で 0.001Hz 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 の平均流速の計算結果を Fig. 11 に示す。図中、点線が平均流速が最大となる周波数を示し、このとき誘導員の周波数は $\omega_{G0} = 0.062\text{Hz}$ である。この最適な周波数 ω_{G0} が探索できれば、平均流速が最大となるように交差流を制御することができる。

最適な周波数 ω_{G0} を見つけるために、その前後で交差流の現象がどのような特徴を持つか調べよう。ここでは、特に交差流の時間・空間周波数に注目する。時間周波数は、ある代表点における密度の時系列データを FFT 解析することにより得られる。交差流の密度変化の時間周波数を ω とし、誘導員の周波数との差を $\Delta\omega$

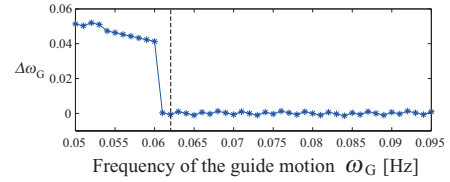


Fig.12 Relationship between the frequency of guides ω_G and temporal frequency difference between the guide and the crossing flows $\Delta\omega$, where the input density is $\rho_0 = 14$.

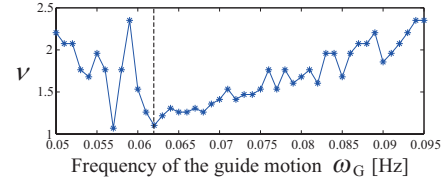


Fig.13 Relationship between the frequency of guides ω_G and spatial frequency of the crossing flows ν , where the input density is $\rho_0 = 14$.

とおく。

$$\Delta\omega = \omega - \omega_G \quad (16)$$

Fig. 12 に ω と $\Delta\omega$ の関係を示す。図中、点線は Fig. 11 において平均流速が最大となる周波数を示す。この結果から、誘導員の周波数と交差流の時間周波数との間を以下のようにまとめることができる。

- ω_G が ω_{G0} よりも低い領域では、 ω_G が増加するにつれて $\Delta\omega_G$ は減少する。
- ω_G が ω_{G0} よりも高い領域では、 ω_G の値にかかわらず $\Delta\omega$ はほぼ 0 の値を保つ。

したがって、低周波領域では $\Delta\omega_G$ が 0 となるように誘導員の周波数を調整することで ω_G を最適な値 ω_{G0} に近づけることができる。これは交差流の時間周波数に基づく制御法である。一方で、高周波領域では $\Delta\omega \simeq 0$ であるため、このような時間周波数に基づく制御法は有効に働かない。

この点を考慮し、次に ω_{G0} の前後の周波数において交差流の空間周波数がどのように変化しているかを調べる。空間周波数は、密度の空間的な分布に見られる縞の幅の逆数に相当する。交差流の空間周波数を ν とおき、誘導員の周波数 ω_G と ν の関係を Fig. 13 に示す。この結果から、誘導員周波数と交差流の空間周波数について以下の関係があるといえる。

- ω_G が ω_{G0} よりも高い領域では、 ω_G の増加と共に ν も増加していく。

以上のシミュレーションは入力密度を $\rho_0 = 14$ として計算した。入力密度を $\rho_0 = 11, 12, 13, 15$ と変えた場合の、交差流の平均流速、時間・空間周波数の関係を Fig. 14 に示す。いずれの場合も Fig. 11, 12, 13 と同様な関係性が確認できる。

4.3 時間・空間周波数に基づく制御則

前節の考察から、以下のような方法で平均流速を最大にするような誘導員の周波数を探索できる。

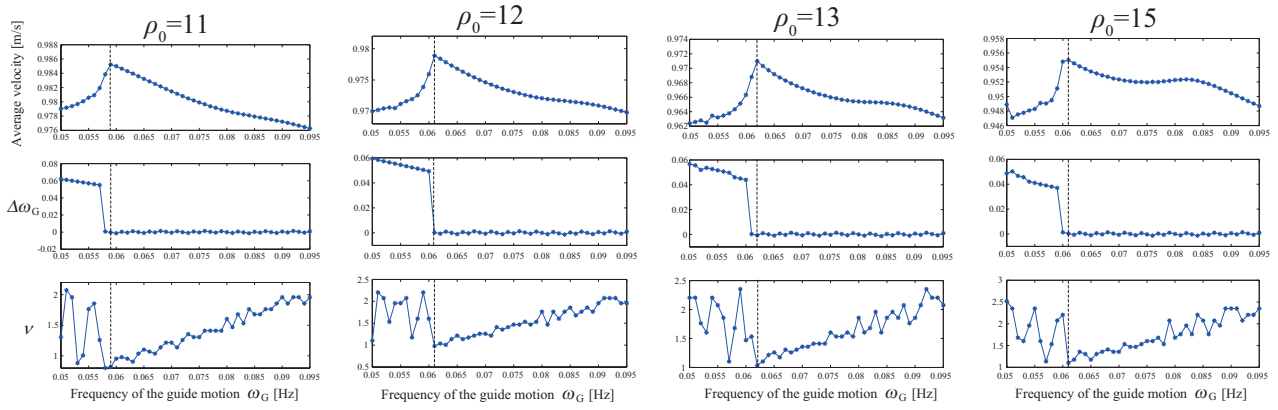


Fig.14 Relationship between frequency of guides and average velocity of the flow A

1. 低周波域では交差流の時間周波数と一致するように誘導員の周波数を増加させる
2. 高周波域では空間周波数を小さくするように誘導員の周波数を減少させる

この2つの制御則は、 $\Delta\omega$ が0かそうでないかによって切り替えることができる。

具体的に、誘導員が周波数 $i\omega_G$ で運動しているとしよう。このときの一周期分、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る。ただし、 $T_i \equiv 1/i\omega_G$ である。まず、原点における密度の時系列データから交差流の時間周波数 $i\omega$ 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 $i\nu$ を計算する。 $i\omega, i\nu$ から次の一周期分の誘導員周波数 $i+1\omega_G$ を次式で与える。

$$i+1\omega_G = \begin{cases} i\omega_G + k_\omega \Delta\omega_G & (\text{if } \Delta\omega_G \geq \Delta\omega_0) \\ i\omega_G + k_\nu (\nu_0 - i\nu) & (\text{if } \Delta\omega_G < \Delta\omega_0) \end{cases} \quad (17)$$

ここで、 k_ω, k_ν は時間・空間周波数に関するゲイン、 d_ν 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。

4.4 提案手法による交差流の制御シミュレーション

以上の制御則を用いて、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、 $k_\omega = 0.08, k_\nu = 0.001, \nu_0 = 1.0$ とした。平均流速の時間変化の様子を Fig. 15 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。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. 17 に示す。時間が経過するにつれて誘導員周波数が調整され、 $\Delta\omega$ が0となっていることが確認できる。密度分布の様子を Fig. 16 に示す。図中、白色の四角形が誘導員の位置を示す。時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。

5. 粒子モデルにおける歩行者制御

前節では、連続体モデルにおいて計算される密度の時間・空間周波数に基づく交差流の制御法を提案した。本節では、実環境における歩行者の制御を目指し、提案する制御法を粒子モデルへ応用する。粒子モデルに

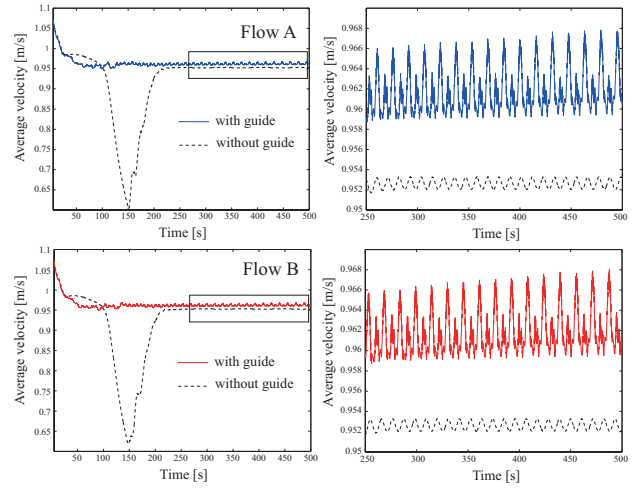


Fig.15 Time variation of average velocity with proposed control method

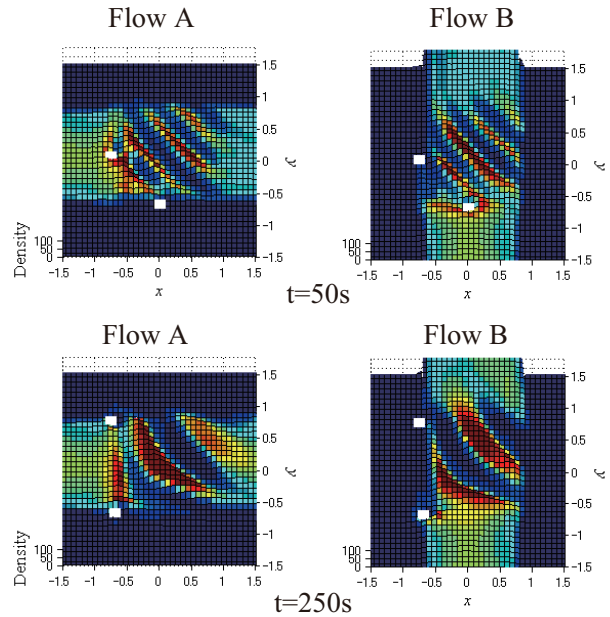


Fig.16 Simulation result of the crossing flows with proposed control method

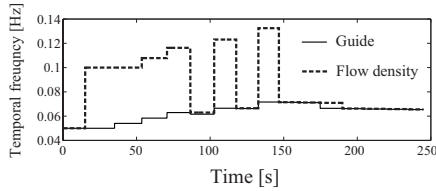


Fig.17 Time variation of the temporal frequencies of the guide and flow density

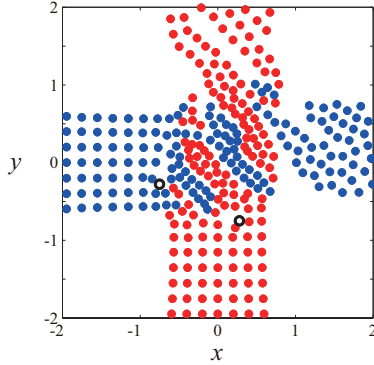


Fig.18 Snapshot of the crossing flows by applying proposed control method to the particle model

において、次式のようにして仮想的に密度を計算する．

$$\rho(\mathbf{x}) = \sum_i m_i W(\mathbf{r}_i, h) \quad (18)$$

$$\mathbf{r}_i = \mathbf{x}_i - \mathbf{x} \quad (19)$$

ここで、 \mathbf{x}_i は粒子 i の位置、 m_i は各粒子に設定された仮想的な質量、 \mathbf{r}_i は粒子までの相対位置である．また、 $W(\mathbf{r}_i, h)$ は次式で表される三次スプライン関数であり、Smoothed Particle Hydrodynamics [8] の密度計算における重み関数としてよく使用される．

$$W(\mathbf{r}, h) = \frac{10}{7\pi h^2} \begin{cases} 1 - \frac{3}{2}\kappa^2 + \frac{3}{4}\kappa^3 & \text{if } 0 \leq \kappa < 1 \\ \frac{1}{4}(2 - \kappa)^3 & \text{if } 1 \leq \kappa < 2 \\ 0 & \text{if } \kappa \geq 2 \end{cases} \quad (20)$$

$$\kappa = \frac{\|\mathbf{r}\|}{h} \quad (21)$$

$m_i = 1.0$ 、 $h = 0.15$ として仮想的に計算した密度を用いて、粒子モデルに提案手法を適用した．Fig. 18 にシミュレーション中の各粒子、誘導員の様子を示す．また、シミュレーション中の平均流速の時間変化を Fig. 19 に示す．図中、点線が誘導員なしの場合を、実線が誘導員ありの場合を示す．提案する制御法により平均流速が向上していることが確認できる．

6. 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時間周波数に基づく制御と、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空間周波数に基づく制御法を併用すること

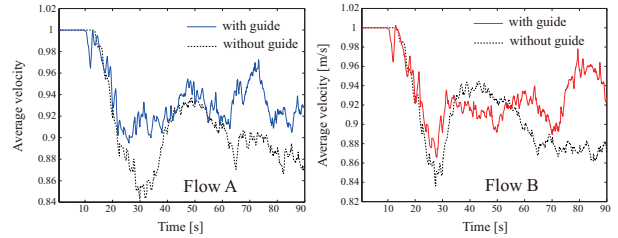


Fig.19 Time variation of average velocity of the crossing flows by applying proposed control method to the particle model

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．また、実環境への応用を目指し、仮想的に計算した密度を用いて提案手法を粒子モデルに適用し、シミュレーションにより有効性を確認した．

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．

References

- [1] K. Kurumatani, "Social Coordination with Architecture for Ubiquitous Agents: CONSORTS," in *Proceedings of International Conference on Intelligent Agents, Web Technologies and Internet Commerce (IAWTIC2003)*, 2003.
- [2] T. Yamashita *et al.*, "Smooth traffic flow with a cooperative car navigation system," in *Proceedings of the fourth international joint conference on Autonomous agents and multiagent systems (AAMAS'05)*, 2005, pp. 478–485.
- [3] J.-M. Lein *et al.*, "Shepherding Behaviors," in *Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA2004)*, 2004, pp. 4159–4164.
- [4] 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.
- [5] Y. Naka, "Mechanism of Cross Passenger Flow -Study on Complicated Passenger Flow in Railway Station (Part 1)- (in Japanese)," *Report Collection of Journal of Architectural Institute of Japan*, vol. 258, pp. 93–102, 1977.
- [6] S. P. Hoogendoorn, "Pedestrian flow modeling by adaptive control," in *Proceedings of Transportation Research Board Annual Meeting*, 2004.
- [7] N. Pelechano *et al.*, "Controlling Individual Agents in High-Density Crowd Simulation," in *Proceedings of Eurographics / ACM SIGGRAPH Symposium on Computer Animation*, 2007.
- [8] L. C. A. Pimenta *et al.*, "Control of swarms based on hydrodynamic models," in *Proceedings of the 2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA2008)*, 2008, pp. 1948–1953.