

# 流入密度の動的変化を考慮した群の交差流の歩行者制御

山本 江<sup>\*1</sup>, 岡田 昌史<sup>\*1</sup>

## Pedestrian Control in Crossing Swarm Flows under Various Densities of Input Flow

Ko YAMAMOTO<sup>\*1</sup> and Masafumi OKADA<sup>\*1</sup>

<sup>\*1</sup> Department of Mechanical Sciences and Engineering, Tokyo Institute of Technology  
Oookayama 2-12-1, Meguro-ku, Tokyo, 152-8550, Japan

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 by moving guides. Swarm flow is modeled by the continuum model and its congestion degree is calculated as the fluid. From temporal and spatial frequency of the crossing flows, we modulate the frequency of cyclic motion of the guides. Moreover, we extend the proposed method to the crossing flows in which the densities of input flows vary from hour to hour. The validity of proposed control method is verified with simulations.

**Key Words** : Pedestrian Flows, Control of Swarm, Temporal/Spatial Frequency

### 1. は じ め に

人口の密集する大都市では人の流れの混雑が頻繁に生じる。Fig. 1(a)のような駅の構内をはじめとして、交差点、イベント会場等においては複数の人の流れが交差し、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人の流れをスムーズにすることが求められ、そのためには、人の流れをモデル化し、制御することが必要である。人の流れのモデル化に関する研究では、二つの人の流れが交差する「交差流」と呼ばれる現象がよく扱われ、交差領域において歩行者が縞模様状の群を形成して進んで行く特徴的な現象が知られている<sup>(1)</sup>。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、流れに対し45度傾いた縞状の群が形成される。従来、このような人の群挙動に特有の交差流の現象をモデル化する研究が行われてきた<sup>(2)</sup>。

一方、人の流れの制御に関しては、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いる<sup>(3)</sup>。しかし、誘導のためには各歩行者が指示を受けるデバイスを持つことが必要であり、大都市において不特定多数の歩行者を対象とする場合には適さない。鳴海ら<sup>(4)</sup>は壁や

床への投影映像によって誘導を行う方法を提案しているが、各歩行者への直接的な誘導にとどまる。群ロボット、マルチエージェントシステムの研究では、大多数の群を目的地まで誘導する牧羊犬システム<sup>(5)</sup>が提案されている。これは各個体への直接指示ではなく、群全体を間接的に操作する方法であり、不特定多数の個体を扱うことができる。以下、本論文では群のマクロな挙動を間接的・暗示的に制御することを「群の暗示的制御」と呼ぶ。安藤ら<sup>(6)</sup>は牧羊犬システムと同様な考えに基づき、少数の誘導員によって群集を適切な避難経路へ誘導する方法を提案した。Okadaら<sup>(7)</sup>は混雑を緩和するための物体配置を最適計算する方法を提案しているが、人の流れにおける混雑を間接的に操作する点でこの方法も群の暗示的制御といえる。しかし、ここでは単一の人の流れを扱っており、混雑度も定常状態になるような場合を対象としている。交差流において歩行者の群を制御するには、交差領域で生じる動的な混雑変化を考慮することが必要である。

著者ら<sup>(8)</sup>は、交差流を連続体でモデルし、その時間・空間周波数に基づいて誘導員を移動させることで流れをスムーズにする制御則を提案した。しかし、ここでは2つの流れの流入密度は等しく、時間によって一定な場合を想定していた。実際の環境では、各流れの密度は時々刻々と変化する。例えば、Fig. 1(a)のような駅構内の人の流れの密度は列車の発着に伴って時間的

<sup>\*1</sup> 東京工業大学大学院理工学研究科 (〒 152-8550 東京都目黒区大岡山 2 - 12 - 1 ) yamamoto@micro.mep.titech.ac.jp

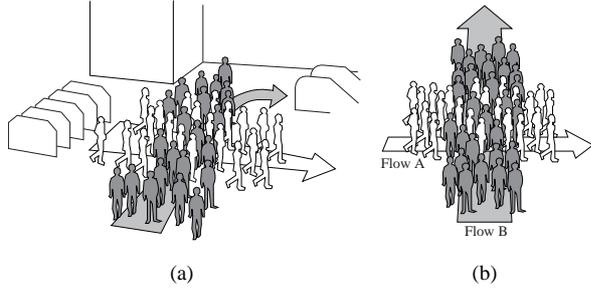


Fig. 1 (a) Congestion in the station and (b) formation of diagonal strips in crossing pedestrian flows

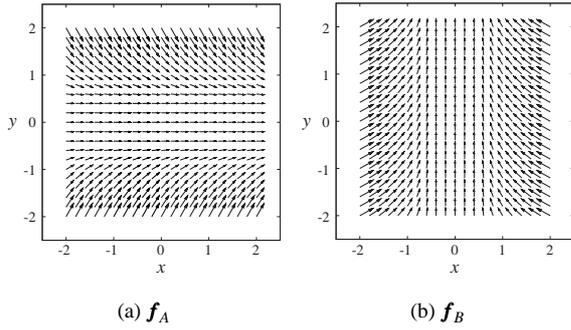


Fig. 2 Examples of the vector field

に変化するため、各流れに対する流入密度の時間変化を考慮する必要がある。

そこで、本稿では流入密度の動的変化を考慮した交差流の制御法を提案する。文献<sup>(8)</sup>と同様に、交差流の時間・空間周波数に基づき誘導員の周期運動の周波数を調整する。同時に、その振幅を各流れの流入密度に応じて変えることにより2つの流入密度が異なる交差流についても平均流速を向上させることができる。また、流入密度が時間によって変化する状況を想定したシミュレーションにより提案手法の有効性を示す。

## 2. 人の交差流の連続体モデル

2.1 交差流の連続体モデル 文献<sup>(6)(7)</sup>と同様に、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  $\mathbf{x} = [x, y]^T$  における速度を以下のようなベクトル場  $\mathbf{f}(\mathbf{x})$  で与える。

$$\mathbf{v} = \mathbf{f}(\mathbf{x}) \quad (1)$$

設計した  $x, y$  軸に沿う速度ベクトル場  $\mathbf{f}_A, \mathbf{f}_B$  を Fig. 2 に示す。これらは、中央部分において速度が  $v_0 = 1.0\text{m/s}$  となるように設計した。

次に、速度ベクトル場  $\mathbf{f}_A, \mathbf{f}_B$  に従う人の流れ A, B が交差する状況を考える。各流れの速度を  $\mathbf{v}_i = [v_i, w_i]^T$  ( $i = A, B$ ) とおく。また、人の流れの混雑度を連続体の密度  $\rho_i$  で表す。各密度の時間変化は次式のような圧

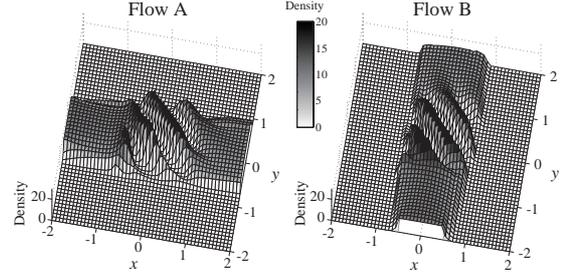


Fig. 3 Simulation result of spatial distribution of density in crossing flows

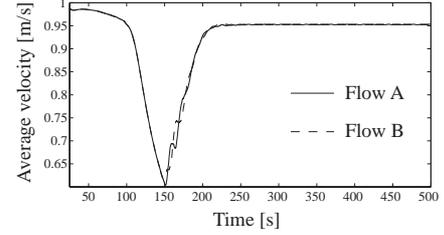


Fig. 4 Time variation of average flow velocities of crossing flows

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。

$$\mathbf{v}_A = \mathbf{f}_A(\mathbf{x}) - \alpha \nabla \rho_A - \beta \nabla \rho_B \quad (3)$$

$$\mathbf{v}_B = \mathbf{f}_B(\mathbf{x}) - \alpha \nabla \rho_B - \beta \nabla \rho_A \quad (4)$$

ここで、 $\nabla \rho_i$  は密度勾配である。右辺第二、三項は流体の拡散項に相当し、 $\alpha, \beta$  はその係数である。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ある。

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)の計算には有限体積法を用いる。流れ A について、 $x = -2, -0.5 \leq y \leq 0.5$  の密度を毎時刻  $\rho_{A0}$  として流れを入力する。流れ B についても同様に、 $y = -2, -0.5 \leq x \leq 0.5$  の密度を  $\rho_{B0}$  とする。以降、この  $\rho_{i0}$  を各流れの流入密度と呼ぶ。流入密度を  $\rho_{A0} = \rho_{B0} = 14$  として、一定時間経過後の  $xy$  平面内における密度分布を Fig. 3 に示す。交差領域内では縞模様状の密度分布が見られ、これは文献<sup>(1)</sup>に見られる現象と一致し、連続体によって交差流に特徴的な現象がモデル化できている。

2.2 交差流の平均流速 各流れがどの程度スムーズに流れているかを評価するために、流れの平均流速を以下のように定義する。まず、位置  $\mathbf{x}$  における流速  $\mathbf{v}(\mathbf{x}, t)$  を速度ベクトル場が与える  $\mathbf{f}(\mathbf{x})$  に射影して得

られるベクトルを  $\hat{v}(x,t)$  とおく．

$$\hat{v} = f^\# v \quad (5)$$

ただし,  $f^\# = (f^T f)^{-1} f^T$  と定義した． $\hat{v}$  のノルム  $\|\hat{v}\|$  は実際の流速のうち元のベクトル場に沿った速度成分を表す． $\|\hat{v}\|$  を用いて, ある時刻  $t$  における流れ全体の平均流速を以下のように定義する．

$$\bar{v}_i(t) = \frac{\int \rho_i \|\hat{v}_i\| dx}{\int \rho_i dx} \quad (i = A, B) \quad (6)$$

ここで, 右辺の分母は密度の空間積分を表し, これは領域内の歩行者の総人数に相当する．また, 分子は流量の空間積分であり, 人数全体の速度和に相当するものである．したがって, (6) は領域内にいる歩行者の人数分の平均速度を計算していることに相当する．Fig. 4 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し, その後, 縞状の密度分布が発生して, 200s 以降においては平均流速が回復する．

### 3. 時間・空間周波数に基づく交差流の制御

**3.1 誘導員による暗示的制御** 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  $x_p$  とする．このとき, 各流れは Fig. 5(a) 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  $v_p$  は次式で与える．

$$v_p(x) = -s(\|r_p\|) \frac{r_p}{\|r_p\|} \quad (7)$$

ただし,  $r_p = x_p - x$  は誘導員からの相対位置を表す．また,  $s(r)$  は次式で表されるシグモイド関数である．

$$s(r) = \frac{c}{1 + \exp a(r-b)} \quad (8)$$

ただし,  $a, b, c$  は定数である．このとき各流れの速度は, (3) に (7) 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．

$$v_A = f_A(x) - \alpha \nabla \rho_A - \beta \nabla \rho_B + \sum_p v_p \quad (9)$$

$$v_B = f_B(x) - \alpha \nabla \rho_B - \beta \nabla \rho_A + \sum_p v_p \quad (10)$$

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．

**3.2 交差流の時間・空間周波数に基づく制御** 則 交差流で発生する縞模様状の密度分布は, 時間的・空間的な周期現象である．ここでは, 交差流の時間・空間周波数に基づいた誘導員の移動則<sup>(8)</sup>について述べる．まず, 2人の誘導員が Fig. 5(b) のように流れの境界線

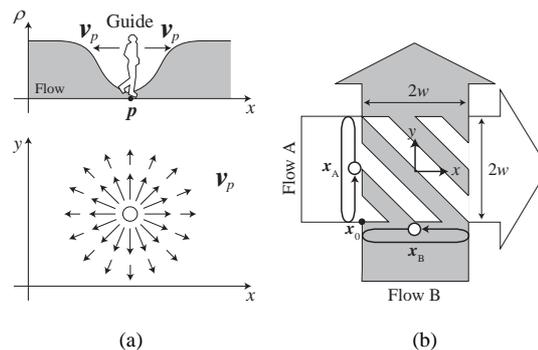


Fig. 5 (a) Modeling of a guide and its effect to flows and (b) cyclic motion of guides

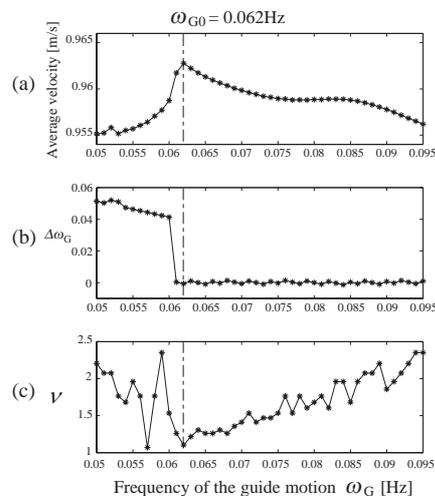


Fig. 6 Frequency analysis result of crossing flows with guide motion ( $\rho_{A0} = \rho_{B0} = 14$ )

際で周期運動するように, 誘導員の位置  $x_A, x_B$  を以下のように与える．

$$x_A = x_0 + a_A \{1 - \cos(2\pi \omega_G t)\} d_B \quad (11)$$

$$x_B = x_0 + a_B \{1 + \cos(2\pi \omega_G t)\} d_A \quad (12)$$

ここで,  $x_0$  は Fig. 5(b) に示すような流れ同士が最初に衝突する位置,  $a_i$  ( $i = A, B$ ),  $\omega_G$  は誘導員の周期運動の振幅および周波数である．2つの周期運動は逆位相をとる． $d_i$  は各流れの方向ベクトルである．また, 各誘導員の振幅は流れの幅  $w$  に一致させる．

誘導員の周期運動が交差流に与える影響を調べるために, 誘導員の周波数  $\omega_G$  に対する交差流の平均流速, 時間・空間周波数の変化の様子を解析した．流入密度  $\rho_{A0} = \rho_{B0} = 14$  での結果を Fig. 6 に示す．まず, Fig. 6(a) に誘導員周波数と平均流速の関係を示す．図中, 一点鎖線で示した周波数  $\omega_{G0} = 0.062\text{Hz}$  において平均流速が最大となる．次に, Fig. 6(b) は交差流の時間周波数との関係を示し, 縦軸には交差流の時間周波数  $\omega$

と誘導員周波数  $\omega_G$  との差  $\Delta\omega$  をプロットした．

$$\Delta\omega = \omega - \omega_G \quad (13)$$

時間周波数  $\omega$  はある代表点における密度の時系列データをフーリエ解析することにより得られる．また，Fig. 6(c) は交差流の空間周波数  $\nu$  との関係を示す．

Fig. 6 の結果から，交差流の時間・空間周波数が  $\omega_{G0}$  を境に以下のように変化することがわかる．

- $\omega_G < \omega_{G0}$  では， $\omega_G$  が増加するにつれて  $\Delta\omega_G$  は減少する．一方， $\omega_G$  と空間周波数  $\nu$  との間には明確な関係はない．
- $\omega_G > \omega_{G0}$  では， $\omega_G$  の値にかかわらず  $\Delta\omega \simeq 0$  となる．また，空間周波数  $\nu$  は  $\omega_G$  の増加ともななって大きくなる．

流入密度が異なる値の場合にも同様の結果が得られることをシミュレーションで確認した．以上の考察から，次のような方法で最適な誘導員の周波数を探索できる．

- $\omega_G < \omega_{G0}$  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（時間周波数に基づく制御）
- $\omega_G > \omega_{G0}$  では空間周波数を小さくするように誘導員の周波数を調整する（空間周波数に基づく制御）

この2つの制御則は， $\Delta\omega \simeq 0$  かどうかを判定することで切り替えることができる．

具体的に，誘導員が周波数  $i\omega_G$  で運動しているとす．このときの一周期分の密度変化から交差流の時間周波数  $i\omega$  と空間周波数  $i\nu$  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．

$$i+1\omega_G = \begin{cases} i\omega_G + k_\omega \Delta\omega & (\Delta\omega \geq \Delta\omega_0) \\ i\omega_G + k_\nu (\nu_0 - i\nu) & (\Delta\omega < \Delta\omega_0) \end{cases} \quad (14)$$

ここで， $k_\omega$ ， $k_\nu$  は時間・空間周波数に関するゲイン， $\nu_0$  は空間周波数に設定したオフセット値， $\Delta\omega_0$  は時間周波数の誤差に関する閾値である．

**3.3 交差流の制御シミュレーション** 以上の制御則を用いて，流入密度  $\rho_{A0} = \rho_{B0} = 14$  においてシミュレーションを行った．平均流速の時間変化の様子を Fig. 7 に示す．図中，右列は定常状態になった 250～500s を拡大したものである．制御則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．Fig. 8 に密度分布の様子を示す．図中，白色の円柱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．

#### 4. 混雑度の動的変化を考慮した交差流の制御

**4.1 流入密度が異なる交差流** 前節において，2つの流れの流入密度は等しく，時間によっても一定で

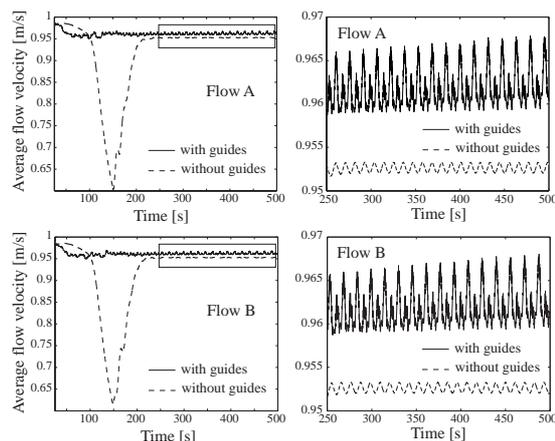


Fig. 7 Time variation of average flow velocities with proposed control method

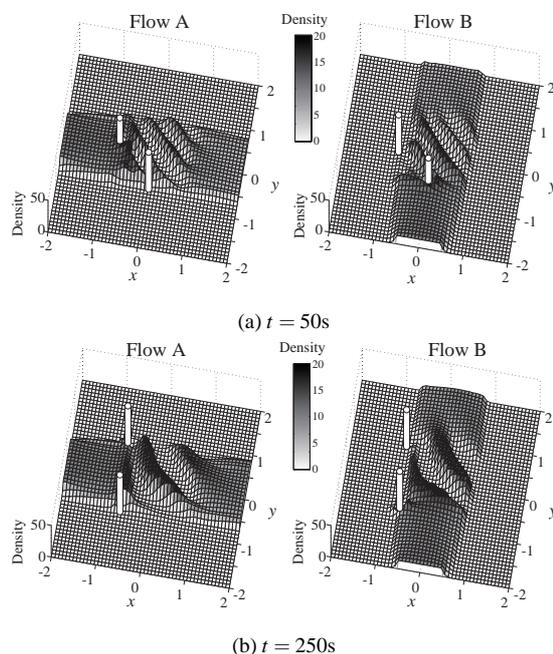


Fig. 8 Simulation result of the crossing flows with proposed control method

あることを想定していた．しかし，実際の環境においてはそれぞれの流入密度は時々刻々と変化する．まず，2つの流れの流入密度が異なる交差流について考える．例として， $\rho_{A0} = 12$ ， $\rho_{B0} = 24$  のときの交差流の密度分布を Fig. 9 に示す．流入密度が大きいほど密度の縞の幅が大きくなることがわかる．

次に，時間・空間周波数に基づく制御が有効かどうかを調べるため，Fig. 6(a)と同様に誘導員の周波数と平均流速の関係を調べた．結果を Fig. 10 に示す．図中，点線が誘導員なしの場合の各流れの平均流速である．誘導員の周波数が 0.05～0.08Hz の範囲では流れ B の平均流速は向上しているが，流れ A は誘導員なし

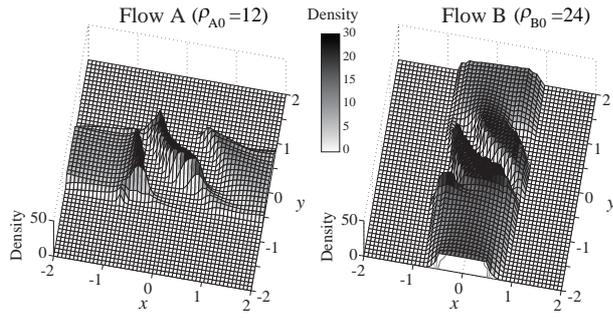


Fig. 9 Density distribution in crossing flows when  $\rho_{A0} = 12$  and  $\rho_{B0} = 24$

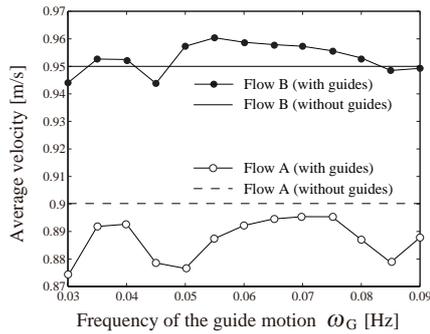


Fig. 10 Relationship between guide frequency and average flow velocities ( $\rho_{A0} = 12$ ,  $\rho_{B0} = 24$ )

の場合よりも流速が低下している．両方の平均流速を増加させるには，流れ B に対し A を優先的に通すように誘導員の運動を変更する必要がある．

4.2 流れの流入密度を考慮した交差流の制御  
Fig. 5(b)において，誘導員 A の運動は流れ A を遮断し流れ B を優先的に通す効果を持つ．反対に，誘導員 B の運動は流れ B を遮断し流れ A を優先的に通す効果を有する．したがって，流れ A を優先的に通したい場合には，誘導員 A の持つ効果を小さくすればよいといえる．本稿では誘導員の周期運動の振幅を調整することで流れに対する効果を調節する．まず，前節と同様に  $\rho_{A0} = 12$ ,  $\rho_{B0} = 24$  の場合に，誘導員 B に対する A の振幅の比率  $a_A/a_B$  を 0.3~1.0 の範囲で変えてシミュレーションを行い，両方の平均流速の変化を調べた．Fig. 11 に誘導員の振幅比と平均流速の関係を示す．図中，実線と点線が誘導員なしの場合，白丸と黒丸が誘導員ありの場合の各流れの平均流速を示す．Fig. 11 より，振幅比が 0.5 のときに両方の平均流速が増加していることが分かる．

そこで，次式のように誘導員の振幅  $a_i$  ( $i = A, B$ ) を変更することで，誘導員が流れに与える影響を調節する．

$$a_i = \frac{\rho_{i0}}{\max(\rho_{A0}, \rho_{B0})} w \quad (15)$$

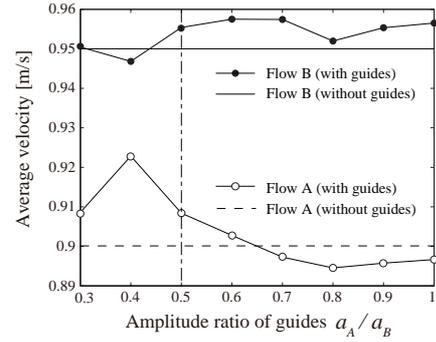


Fig. 11 Relationship between amplitude ratio of guides and average flow velocities ( $\rho_{A0} = 12$ ,  $\rho_{B0} = 24$ )

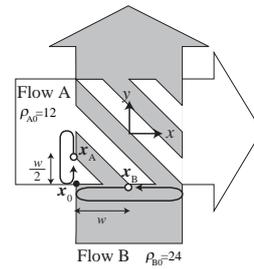


Fig. 12 Cyclic motion of guides when  $\rho_{A0} = 12$  and  $\rho_{B0} = 24$

例えば  $\rho_{A0} = 12$ ,  $\rho_{B0} = 24$  の場合には，Fig. 12 のように誘導員 A の振幅は流れの幅の半分となる．

(15) によって振幅を与えたときの誘導員の周波数と平均流速の関係を Fig. 13(a) に示す． $\omega_{G0} = 0.06\text{Hz}$  で両方の平均流速が最大となる．また，交差流の時間・空間周波数との関係を Fig. 13(b), (c) に示す．流入密度が等しい場合と同様に， $\omega_G > \omega_{G0}$  では  $\Delta\omega \simeq 0$  となり， $\omega_G$  が大きくなるにつれて  $v$  も大きくなることが確認でき，時間・空間周波数に基づく制御が有効であると考えられる．

例として， $\rho_{A0} = 14$ ,  $\rho_{B0} = 7$  としてシミュレーションを行った．平均流速の時間変化の様子を Fig. 14 に示す．定常状態において誘導員なしの場合と比較して平均流速が向上していることが確認できる．

4.3 流入密度が時間変化する交差流の制御 (14), (15) のように誘導員の周期運動を操作することで，交差流の定常状態における平均流速を向上させることができる．本節では実環境への応用を目指して，この制御法を流入密度が時間変化する場合へ適用する．

各流れの流入密度を Fig. 15 のように与え，提案手法を適用しシミュレーションを行った．250~600s における平均流速の時間変化を Fig. 16 に示す．誘導員なしの場合と比べて，いずれの流れについても定期的に平均流速が向上していることが確認できる．

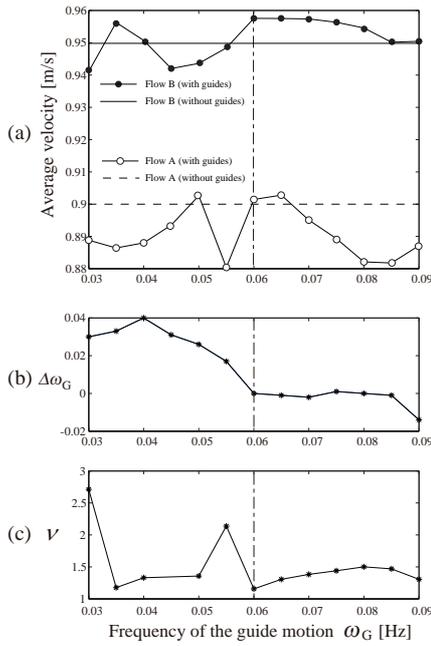


Fig. 13 Frequency analysis result of crossing flows when  $\rho_{A0} = 12$  and  $\rho_{B0} = 24$

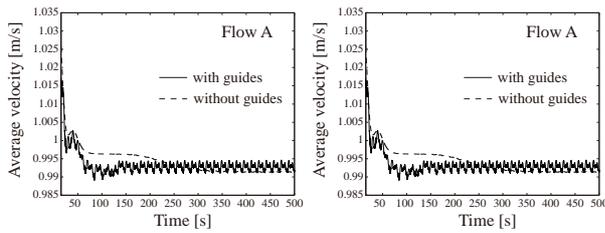


Fig. 14 Time variation of average flow velocities with proposed control method ( $\rho_{A0} = 14$ ,  $\rho_{B0} = 7$ )

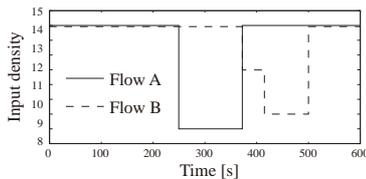


Fig. 15 Time variation of the input density

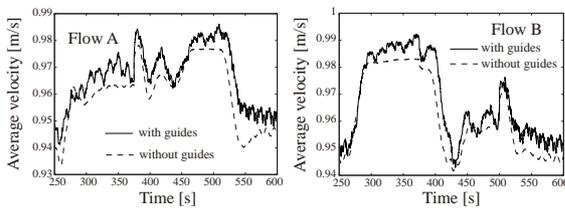


Fig. 16 Average flow velocities with proposed control method with varying input density

## 5. おわりに

2つの流れの流入密度が異なる場合を考慮した交差流の制御法を提案した。交差流の時間・空間周波数に

基づいて誘導員の運動周波数を調整すると同時に、各流れの密度に応じて誘導員の振幅を変化させることで、定常状態における平均流速を向上させることができる。また、実環境への応用を目指し、各流れの混雑度が時間的に変化する場合を想定してシミュレーションを行い、制御則の有効性を確認した。

本稿で提案した制御法は連続体モデルから計算される交差流の時間・空間周波数を用いている。一方、実際の歩行者から得られる位置や人数の情報は離散的であり、提案手法を適用するにはそれらを連続的な密度の値に変換する必要がある。このためには、文献<sup>(9)</sup>と同様に、離散的な位置情報から仮想的な密度を計算することで提案手法を適用できる。

## 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) 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.
- (2) S. Hoogendoorn and P. H. Bovy, “Simulation of Pedestrian Flows by Optimal Control and Differential Games,” *Optimal Control Applications and Methods*, vol. 24, pp. 153–172, 2003.
- (3) K. Kurumatani, “Social Coordination with Architecture for Ubiquitous Agents: CONSORTS,” in *Proc. of International Conference on Intelligent Agents, Web Technologies and Internet Commerce (IAWTIC2003)*, 2003.
- (4) 鳴海, 羽田, 浅間, 辻, “個人の特徴抽出を利用した動的な映像による動線誘導,” 第 11 回ロボティクスシンポジウム講演論文集, 2006, pp. 450–455.
- (5) J. Lein et al., “Shepherding Behaviors,” in *Proc. of the 2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA2004)*, 2004, pp. 4159–4164.
- (6) 安藤, 岡田, “避難誘導のための人員配置最適化と群ロボットへの応用,” 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'10 講演 論文集, 2A1-G07, 2010.
- (7) 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.
- (8) 山本, 岡田, “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,” 第 28 回日本ロボット学会学術講演会, 3C3-5, 2010.
- (9) 山本, 岡田, “交差流の時間・空間周波数を利用した歩行者制御,” 第 16 回日本 IFToMM 会議シンポジウム, 2010, pp. 45–50.