

人の交差流の連続体モデルとその制御

Modeling and Control of Crossing Swarm Behavior Based on Continuum Model

山本江 本間良幸 岡田昌史 (東工大)

Ko YAMAMOTO, Yoshiyuki HOMMA and Masafumi OKADA (Tokyo Tech)

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. This paper proposes an implicit control method of the crossing swarm behavior. Swarm behavior is modeled by the continuum model and its congestion degree is calculated as the fluid density. From a simulation of the crossing flow of swarms with the continuum model, it is verified that diagonal stripe pattern of the congestion degree emerges. Based on this model, we propose a control method to give priority to one of the swarms. Implicit control is realized by moving guide people in the swarm.

Key Words: Swarm, Pedestrian behavior, Crossing flow

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、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。ロボティクスにおける群の制御に関しては、複数ロボットによる物体の協調搬送を対象とした運動制御の研究が行われてきた [1][2]。これらは各ロボットに個別に指示を与える方法である。大都市における人の流れを対象とするとサンプル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間接的に操作することが求められる。Kurabayashi ら [3] は、群ロボットの編隊形成力の強さを各ロボットに設定した非線形振動子間の位相差により調節する方法を提案した。これは各ロボットへの個別の指令値を持たない間接的な群の制御法と言える。しかし、各非線形振動子にロボット間の相互作用項の計算が含まれるため、膨大な数に適用することは難しい。

一方、Okada ら [4] 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計算する方法を提案した。群を連続体としてモデル化することで極めて多くの個体が存在する場合を考慮出来る。しかし、文献 [4] では単一の流れのみを考慮し、また密度分布が一定状態に収束する場合を対象としていた。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 のように各流れが帯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]。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考慮する必要がある。

そこで、本稿では交差流動を対象として、連続体モデルを用いた群集行動のモデル化と人の流れの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ことにより混雑度の動的な変化の扱いを可能にする。また、交差流において一方の流れを優先的に流すことを考え、案内人の運動によって人の流れを間接的に制御する方法を提案する。

2. 速度ベクトル場による群挙動のモデル化

まず、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 $x = [x \ y]^T \in \mathbb{R}^2$ における速度を以下のようなベクトル場 $f(x)$ で与える。

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

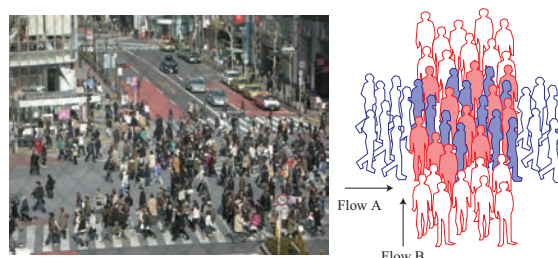


Fig.1 Crossing swarm flows and self-organization of the diagonal stripe pattern

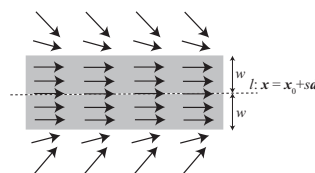


Fig.2 Design method of the velocity field

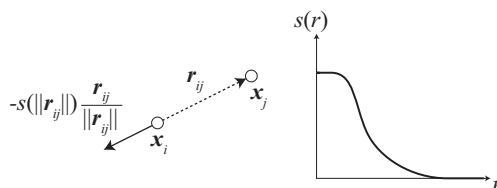


Fig.3 Repulsive velocity between two pedestrians

本稿では Fig. 2 左のような、ある直線 $x = x_0 + sd$ に沿う人の流れを対象とし、 $f(x)$ を以下のように与える。

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

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準速度を表す。ここでは x, y 方向の 2 つの直交する流れを想定し、方向ベクトル d を $[1 \ 0]^T$, $[0 \ 1]^T$, また、 $v_0 = 1.0$, $w = 0.5$ として速度ベクトル場 f_A, f_B を設計する。

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、このような群集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

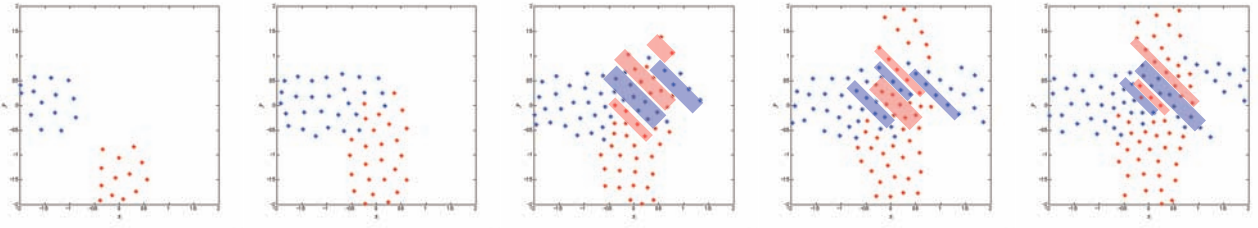


Fig.4 Simulation of the crossing swarm behavior with the particle model

う粒子 i の位置 \mathbf{x}_i における速度 \mathbf{v}_i を以下のように与える .

$$\mathbf{v}_i = \mathbf{f}_A(\mathbf{x}_i) - \sum_{i \neq j} s(\|\mathbf{r}_{ij}\|) \frac{\mathbf{r}_{ij}}{\|\mathbf{r}_{ij}\|} \quad (3)$$

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 . $\mathbf{r}_{ij} \equiv \mathbf{x}_j - \mathbf{x}_i$ は, Fig. 3 左に示すような粒子 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. 3 右のような形をとる .

$$s(r) = \frac{c}{1 + \exp\{(a(r-b))\}} \quad (4)$$

\mathbf{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. 4 に示す . \mathbf{f}_A に従う粒子は $x = -2.0, -0.5 \leq y \leq 0.5$ の範囲に, \mathbf{f}_B に従う粒子については $-0.5 \leq x \leq 0.5, y = -2.0$ の範囲に, それぞれ 2 ステップ毎にランダムに入力した . 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する .

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. 連続体による群の交差流のモデル化

3.1 連続体による交差流のモデル化

前節と同様に, 各流れが速度ベクトル場 $\mathbf{f}_A, \mathbf{f}_B$ 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 $\mathbf{v}_A \equiv [u_B \ v_B]^T, \mathbf{v}_B \equiv [u_B \ v_B]^T$ 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 .

$$\frac{\partial \rho_A}{\partial t} = -\rho_A \left(\frac{\partial u_A}{\partial x} + \frac{\partial v_A}{\partial y} \right) - \left(\frac{\partial \rho_A}{\partial x} u_A + \frac{\partial \rho_A}{\partial y} v_A \right) \quad (5)$$

$$\frac{\partial \rho_B}{\partial t} = -\rho_B \left(\frac{\partial u_B}{\partial x} + \frac{\partial v_B}{\partial y} \right) - \left(\frac{\partial \rho_B}{\partial x} u_B + \frac{\partial \rho_B}{\partial y} v_B \right) \quad (6)$$

ここで, 本稿では以下の 2 点を仮定する .

1. 2つの流れ同士は混ざらない .
2. 単位時間当たりの入力密度の平均値は一定とする .

このとき, 各流れの速度を以下のように与える .

$$\mathbf{v}_A = \mathbf{f}_A(\mathbf{x}) - \alpha \begin{bmatrix} \frac{\partial \rho_A}{\partial x} + \frac{\partial \rho_B}{\partial y} \\ \frac{\partial \rho_A}{\partial y} + \frac{\partial \rho_B}{\partial x} \end{bmatrix} - \gamma \begin{bmatrix} \frac{\partial \rho_B}{\partial y} \\ \frac{\partial \rho_B}{\partial x} \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\mathbf{v}_B = \mathbf{f}_B(\mathbf{x}) - \alpha \begin{bmatrix} \frac{\partial \rho_A}{\partial x} + \frac{\partial \rho_B}{\partial y} \\ \frac{\partial \rho_A}{\partial y} + \frac{\partial \rho_B}{\partial x} \end{bmatrix} - \gamma \begin{bmatrix} \frac{\partial \rho_A}{\partial y} \\ \frac{\partial \rho_A}{\partial x} \end{bmatrix} \quad (8)$$

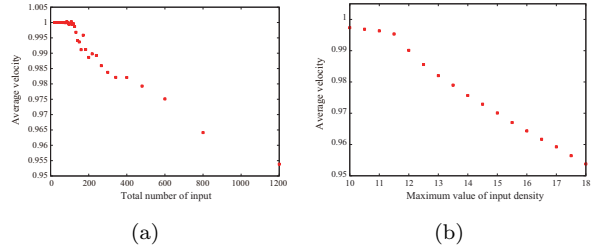


Fig.6 Variation of the average velocity when the number of input is increased.

ここで, 右辺第二項は両方の密度を同時に考慮した場合の流体の拡散項であり, α 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 . また, 第三項は 2つの流れが互いに分離させる項であり, γ はその係数である .

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 . 式 (5), (6) の計算には有限体積法を用いる . また, 密度入力の設定した範囲において平均値が ρ_{in} となるように入力を与える . シミュレーションの様子を Fig. 5 に示す . 入力密度の平均値はいずれも $\rho_{in} = 15$ とした . 2つの流れが交差後, しばらく時間が経過した後に帯状の密度変化が現れることが確認できる . 全体の流れの幅が約 1.7 であるのに対し, 幅約 0.3 の帯形状が各流れにつき 4 本生じた . また, 帯形状における密度の最大値は約 30.2 であった .

3.2 連続体モデルの妥当性の検証

連続体モデルの妥当性を検証するために, 粒子モデル, 連続体モデルにおいて, 入力数 (密度) を増やしていったときの流れの平均速度の変化を比較した .

まず, 粒子モデルにおいてシミュレーション中に入力する粒子の総数を変化させたときの流れ A に従う全粒子の平均速度の変化の様子を Fig. 6(a) に示す . 平均速度には, 各時刻において速度の x 成分に関する平均値を算出した後, それらの時間平均をとった . 入力総数が 0 から 100 と少ない場合, 粒子同士の衝突は少なく, 速度ベクトル場で与えられる基準速度 $v_0 = 1$ で粒子は運動する . 以降, 入力総数が増加するにつれて粒子同士の衝突頻度が高くなり, 平均速度が減少する傾向が見られた .

次に, 連続体モデルにおいて入力密度の平均値を変化させたときの流れ A の平均速度の変化の様子を Fig. 6(b) に示す . 密度の最大値が 11.5 を境に, 平均速度の減少幅が上がり粒子モデルの場合と同様の変化を示していることが分かる .

以上のように, 粒子モデル, 連続体モデルにおいて同様の速度変化が見られ, 連続体モデルが妥当であると言える .

4. 人の交差流の制御

4.1 連続体モデルに基づいた交差流の優先制御

交差流において一方の流れを優先させるような制御を提案する . 特に, 本稿では流れに従う案内人を混入させ, それら进行操作することで間接的に流れを変化させる方法を考える .

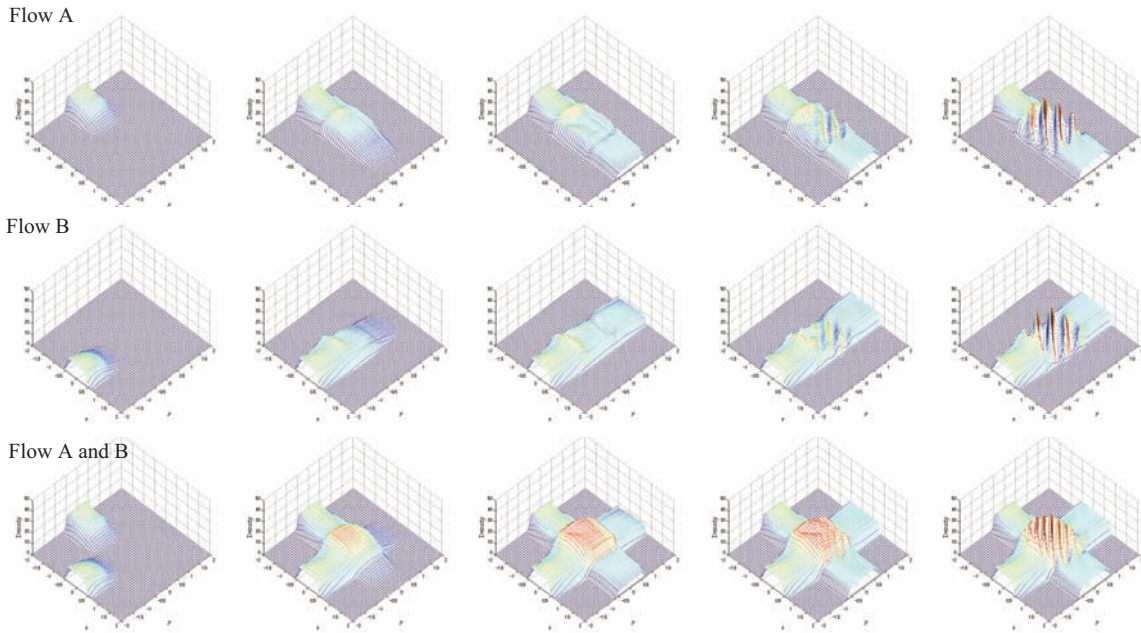


Fig.5 Simulation result of the crossing swarm behavior with the continuum model

案内人の位置を x_p とする．このとき位置 x において，各流れは Fig. 7 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．

$$v_r = -s(\|r_p\|) \frac{r_p}{\|r_p\|} \quad (9)$$

ただし， $r_p \equiv x_p - x$ は案内人からの相対位置である．このとき各流れの速度は，式 (7) に式 (9) 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．

$$v_A = f_A(x) - \alpha \left[\frac{\partial \rho_A}{\partial x} \right] - \beta \left[\frac{\partial \rho_B}{\partial x} \right] + \sum_p v_r \quad (10)$$

$$v_B = f_B(x) - \alpha \left[\frac{\partial \rho_B}{\partial x} \right] - \beta \left[\frac{\partial \rho_A}{\partial x} \right] + \sum_p v_r \quad (11)$$

ここで， $\beta = \alpha + \gamma$ と置き直した．例えば，流れ A を優先して通すことを考えよう．案内人 p の速度 v_p を以下のように与える．

$$v_p = f_A(x_p) - k_1 \left[\frac{\partial \rho_A}{\partial x} \right] + k_2 \left[\frac{\partial \rho_B}{\partial x} \right] \quad (12)$$

案内人の運動はサンプリングタイムを Δt として $x_p(t + \Delta t) = x_p(t) + v_p \Delta t$ のように与えられる．式 (12) は以下のような移動則から構成される．

- 1) 案内人はベクトル場 f_A に沿って移動する (第一項)
- 2) 流れ A から反発の影響を受ける (第二項)
- 3) 流れ B を積極的に押しつける (第三項)

k_1, k_2 はそれぞれ 2), 3) の効果に関するゲインである．1), 2) の効果は案内人が群 A の一員として移動していることを示す．一方，3) の効果は案内人が群 B を積極的に押しつけて流れに逆らって進むことを表す．これにより，案内人が先陣を切って流れの中を進み，群 A は案内人の後に従って優先的に移動することが期待できる．

以上の方法に基づきシミュレーションを行った．各流れの密度変化，および案内人の移動の様子を Fig. 8 に示す．図

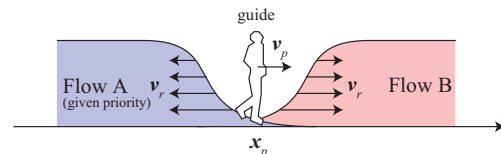


Fig.7 Control to give the priority to one of the fluids by mixing a guide

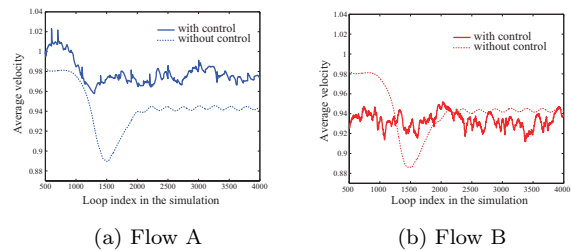


Fig.9 Variation of the average velocity with control of the crossing swarm behavior based on the continuum model

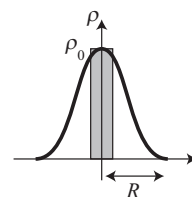


Fig.10 Virtual density at a particle

中，青色の円柱は案内人の位置を表す．案内人が流れ B を遮り，その後方に流れ A が追従する様子が確認できる．また，各流れの平均速度の時間変化を Fig. 9 に示す．まず，Fig. 9(a) は流れ A の平均速度を示す．図中，点線が案内人なしの場合，実線が案内人ありの場合である．案内人なしの場合，1000 ループ付近で流れ同士が衝突し，速度が低下する．その後，帯形状を形成することで速度が一定程度回復し，定常状態に収束することが分かる．一方，案内人を混入させた場合，速度の低下が抑えられ流れ A を優先的に流すことが出来ている．このとき，Fig. 9(b) から，流れ B の速度についてはある程度犠牲になっている様子が分かる．

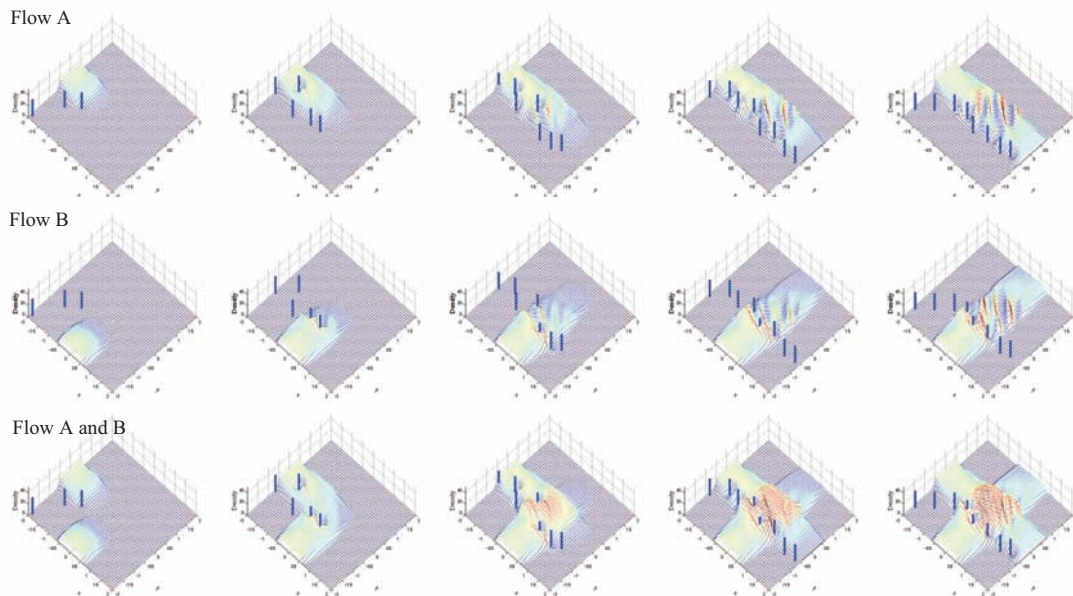


Fig.8 Simulation of the crossing swarm behavior with control based on the continuum model

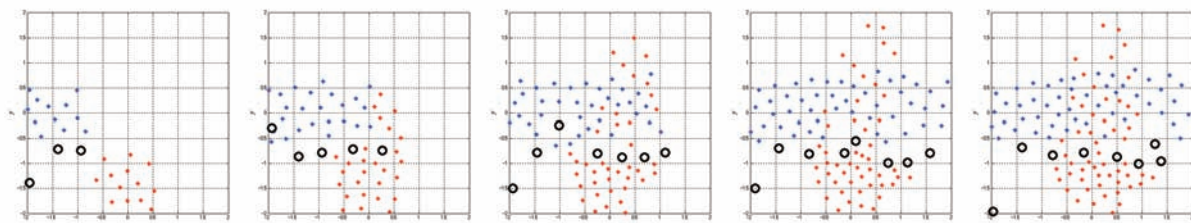
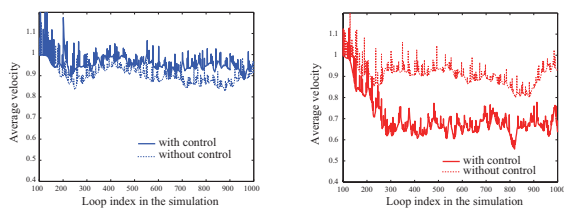


Fig.12 Simulation of the crossing swarm behavior with control based on virtual density at particles



(a) Flow A

(b) Flow B

Fig.11 Variation of the average velocity with control of the crossing swarm behavior based on the particle model and virtual density

4.2 粒子モデルに設定した仮想密度に基づく制御

上記のような流れの優先制御は連続体の密度勾配に基づく方法である。実際の個体への応用を考え、Fig. 10 のように各粒子に仮想的な密度を設定し、提案手法を適用する。ここでは粒子の位置に最大密度 ρ_0 を設定し、仮想密度の範囲を半径 R で指定する。また、最大密度 ρ_0 と密度 0 の間は 5 次多項式で補間した。

案内人を混入させ、擬似密度から計算される密度勾配を用いて案内人を移動させた様子を Fig. 12 に示す。図中、黒丸が案内人を表す。連続体モデルに基づく場合と同様に流れ A が優先的に通過するように案内人が移動していることが確認できる。Fig. 11 に各流れの平均速度の時間変化を示す。流れ A の速度の時間平均値は 0.9 から 0.93 に増加する一方、流れ B の速度の時間平均値は 0.9 から 0.7 まで大幅に低下した。これは、粒子モデルが離散モデルであり、粒子 B が案内人の間をすり抜けることにより粒子 A の速度が低下する影響、粒子 B が案内人により遮られて自身の速度が低下する影響が極端に現れるためだと考える。

5. おわりに

人の交差流のモデル化と制御の方法を提案した。群を連続体によりモデル化することで、時々刻々と変化する混雑度を密度により定量的に評価することができる。さらに、案内人の移動により人の流れを間接的に制御する方法を提案し、シミュレーションにより有効性を確認した。本稿では、特に直線上の人の流れに注目したが、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。

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ワーク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。

文献

- [1] 小菅一弘, 大住智宏, 千葉晋彦. 単一物体を操る複数移動ロボットの分散協調制御. 日本ロボット学会誌, Vol. 16, No. 1, pp. 87-95, 1998.
- [2] J. Fink et al. Multi-Robot Manipulation via Caging in Environments with Obstacles. In *Proc. of the 2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 1471-1476, 2008.
- [3] D. Kurabayashi et al. Obstacle Avoidance of a Mobile Robot Group using a Nonlinear Oscillator Network. In *Proc. of the 2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 186-191, 2006.
- [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] 中祐一郎. 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.
- [6] S. P. Hoogendoorn. Pedestrian flow modeling by adaptive control. In *Proc. of Transportation Research Board Annual Meeting*, 2004.