

# 交差流の粒子モデル化と時間・空間周波数に基づく歩行者群制御

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

山本江 岡田昌史 (東工大)

Ko YAMAMOTO 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 pedestrian flows by moving guides. Each pedestrian is modeled with a particle, and virtual density and temporal/spatial frequency are computed from position of particles. From analysis of relationship between guide motion and temporal/spatial frequency, we verify the validity of control method, which is originally introduced from analysis result with the continuum model.

*Key Words:* Pedestrian flows, Swarm control, 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。図1(a)のような駅のコンコースをはじめとして、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、歩行者の群挙動を制御し人の流れをスムーズすることが求められる。このような歩行者群の制御を行うには、まず人の流れを定量的にモデル化する必要がある。人の流れのモデル化に関しては、従来、建築・都市工学分野において多く研究がなされており、歩行者一人一人を粒子でモデル化するミクロモデル [1][2] と、群全体を流体等の連続体でモデル化するマクロモデル [3][4] に大別できる。これまでに著者ら [5] は二つの流れが交差する「交差流」と呼ばれる現象に着目し、その連続体モデルを提案した。交差流では図1(b)のように縞状の人の流れが形成されることが知られている [6]。提案した連続体モデルはこのような動的な混雑度変化を定量化でき、また人の流れのマクロな挙動を速度ベクトル場とすることで様々な流れの経路に対応できる。

一方、人の流れの制御に関しては、指示デバイスによる歩行者のナビゲーション [7]、映像による動線指示 [8] 等が提案されている。これらは歩行者一人一人へ直接指示を与えるものであり、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。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 [9][10] が提案されている。これは群全体を間接的に操作する方法であり、多数の歩行者から成る群を扱うことができる。以下、本稿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。著者ら [11] は、交差流の連続体モデルにおいて誘導員によって縞状の群を暗示的に制御し、流れの平均速度を向上させる方法を提案した。この方法は、連続値である密度の情報から計算される交差流の時間・空間周波数に基づく制御法である。一方、実際の各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。

本稿では、歩行者の位置情報から仮想的な密度分布を計算し、それによって交差流の時間・空間周波数を求めることで交差流を制御する方法を提案する。まず、実際の人の流れを想定し、歩行者一人一人を粒子でモデル化することで交差流中の歩行者の挙動を再現する。各粒子の位置情報から仮想密度を計算し、文献 [11] と同様な解析を行うことで交差流の時間・空間周波数に基づく制御が有効であることを示す。また、

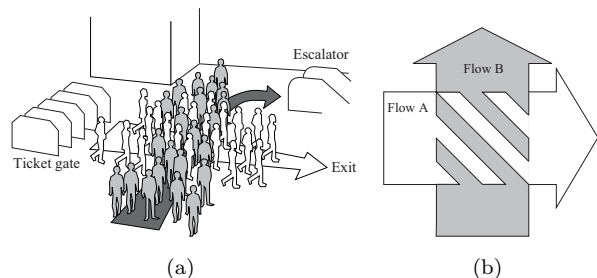


Fig.1 (a) Congestion in the station and (b) diagonal stripe pattern formation in the crossing pedestrian flows.

粒子モデルに制御法を適用することで平均流速が向上することをシミュレーションにより示す。

### 2. 交差流の連続体モデル [5]

#### 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ような速度ベクトル場でモデル化する。

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

ただし、 $\mathbf{x} = [x \ y]^T$ 、 $\mathbf{v} = [u \ v]^T$  はそれぞれ平面内における位置と速度である。例えば、図2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  $\mathbf{d}$ 、流れの幅を  $w$  とする。幅より内側の領域では方向ベクトル  $\mathbf{d}$  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、 $\mathbf{f}(\mathbf{x})$  は以下のように設計できる。

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

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、 $\mathbf{n}$  は位置  $\mathbf{x}$  から中央線に垂直に下ろしたベクトル、 $k$  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。

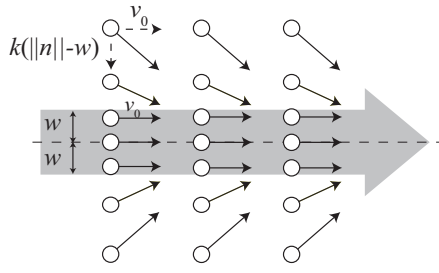


Fig.2 Velocity field setting for a line-shaped pedestrian flow

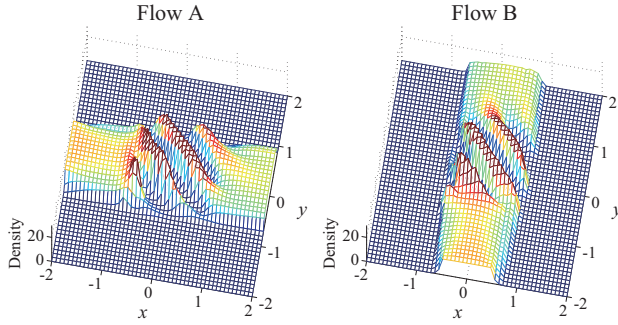


Fig.3 Simulation result of the crossing pedestrian flows with continuum model

## 2.2 交差流の連続体モデル

2つの流れA, Bが交差する状態を考える。位置 $x$ , 時刻 $t$ における流れ $i = A, B$ の混雑度を流体の密度 $\rho_i(x, t)$ として表し, そ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)に従うものとしてモデル化する。

$$\frac{\partial \rho_i}{\partial t} = -\rho_i \left( \frac{\partial u_i}{\partial x} + \frac{\partial v_i}{\partial y} \right) - \left( \frac{\partial \rho_i}{\partial x} u_i + \frac{\partial \rho_i}{\partial y} v_i \right) \quad (3)$$

また, 各流れの速度 $v_i(x, t)$ を以下のように与える。

$$v_A = f_A(x) - \alpha \nabla \rho_A - \beta \nabla \rho_B \quad (4)$$

$$v_B = f_B(x) - \alpha \nabla \rho_B - \beta \nabla \rho_A \quad (5)$$

ただし,  $f_i(x)$ は各流れを表す速度ベクトル場である。また, 右辺第二, 三項は流体の密度勾配 $\nabla \rho_i$ に対する拡散項であり,  $\alpha, \beta$ 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の密度分布をシミュレーションした。図3に一定時間経過後の $xy$ 平面内における密度分布を示す。交差領域内では縞模様状の密度分布が見られ, これは実際に見られる現象[6]と一致し, 連続体によって交差流に特徴的な現象が定量的にモデル化できている。

## 3. 交差流の時間・空間周波数に基づく制御 [11]

流れの中に誘導員を配置し, 交差流を暗的に制御する。まず, 誘導員を図4のように流れに対し反発の速度場の影響を与えるものとしてモデル化する。位置 $x$ における誘導員 $j$ の反発速度場 $v_{rj}$ は次式で与える。

$$v_{rj}(x) = -s(\|r_j\|) \frac{r_j}{\|r_j\|} \quad (6)$$

ただし,  $r_j = x_j - x$ は誘導員からの相対位置を表す。また,  $s(r)$ は次式で定義されるシグモイド関数である。

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

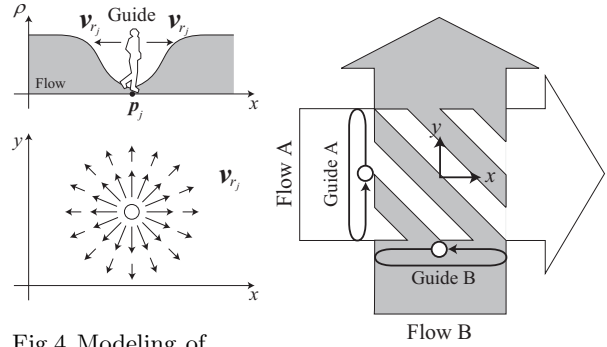


Fig.4 Modeling of a guide

Fig.5 Periodic motion of guides

$a, b, c$ は定数である。このとき各流れの速度は, 式(4)に式(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。

$$v_A = f_A(x) - \alpha \nabla \rho_A - \beta \nabla \rho_B + \sum_j v_{rj} \quad (8)$$

$$v_B = f_B(x) - \alpha \nabla \rho_B - \beta \nabla \rho_A + \sum_j v_{rj} \quad (9)$$

以上のようにしてモデル化した誘導員を図5のように周期的に移動させることで, 交差流の現象を操作することができる。誘導員の周波数を $\omega_G$ として, 平均流速が最大となる $\omega_G$ の値を与える制御則を導くため,  $\omega_G$ の値を様々に変えたときの交差流の変化の様子を解析する。交差流の平均流速, 時間・空間周波数と誘導員周波数 $\omega_G$ との関係を解析した結果を図6に示す。

まず, 図6(a)に誘導員周波数 $\omega_G$ と平均流速 $\bar{v}$ の関係を示す。図中, 一点鎖線で示した周波数 $\omega_{G0}$ において平均流速が最大となる。次に, 図6(b)は誘導員の周波数 $\omega_G$ と交差流の時間周波数 $\omega$ との関係を示す。 $\omega$ は交差領域内の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。縦軸は交差流の時間周波数 $\omega$ と誘導員周波数 $\omega_G$ との差 $\Delta\omega$ を表す。

$$\Delta\omega = \omega - \omega_G \quad (10)$$

図6(c)は交差流の空間周波数 $\nu$ との関係を示す。 $\nu$ は交差流の縞の幅の逆数に相当する。

以上の結果から, 交差流の時間・空間周波数は $\omega_{G0}$ 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 $\Delta\omega$ は減少する。一方,  $\omega_G$ と空間周波数 $\nu$ の間には明確な関係は見いだせない。
- $\omega_G > \omega_{G0}$ 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 $\omega_G$ の増加とともに大きくなる。

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。本稿では, このような解析を交差流の時間・空間周波数解析と呼ぶ。以上から, 平均流速を最大にする誘導員の周波数 $\omega_{G0}$ を次のような方法で探索できる。

時間周波数に基づく制御  $\Delta\omega > 0$ 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

$$\omega_G \leftarrow \omega_G + k_\omega \Delta\omega \quad (11)$$

空間周波数に基づく制御  $\Delta\omega \simeq 0$ 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

$$\omega_G \leftarrow \omega_G + k_\nu (\nu_0 - \nu) \quad (12)$$

ただし,  $k_\omega, k_\nu$ 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である。

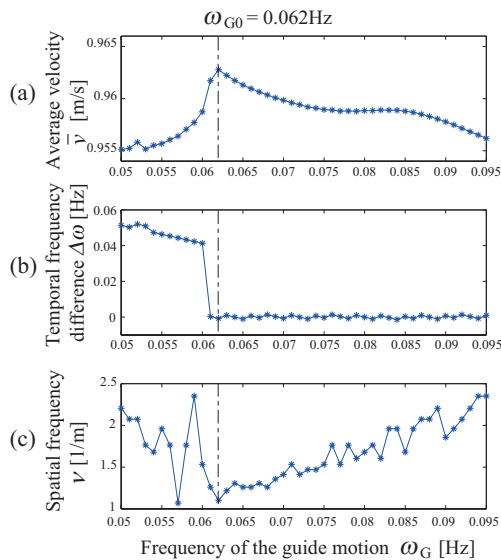


Fig.6 Frequency analysis result of crossing flows with continuum model

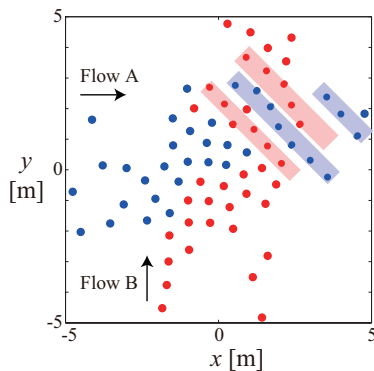


Fig.7 Simulation result of the crossing pedestrian flows with particle model

#### 4. 粒子モデルにおける交差流制御

##### 4.1 交差流の粒子モデル

前節で示した制御法は、連続値である密度の情報を用いている。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。ここでは、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する制御法を適用する方法を示す。

まず、各流れに従う歩行者を粒子としてモデル化する。流れ A に従って移動する粒子  $i$  の速度  $v_i$  を以下のように与える。

$$v_i = f_A(x_i) - \sum_{i \neq j} s(\|r_{ij}\|) \frac{r_{ij}}{\|r_{ij}\|} \quad (13)$$

$$r_{ij} = x_j - x_i \quad (14)$$

ただし、 $x_i$  は粒子  $i$  の位置を表し、 $r_{ij}$  は粒子  $i$  から他の粒子  $j$  への相対位置ベクトルである。式 (13) 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し、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。 $s(r)$  は式 (7) で定義されるシグモイド関数である。

流れ B に従う粒子についても同様に速度を指定し、A、B の流れに従って移動する粒子群が交差する様子をシミュレーションした。各流れの速度ベクトル場の基準速度  $v_0$  は、成

人男性の平均歩行速度である 1.34m/s に設定した [12]。粒子の運動の様子を図 7 に示す。図中、青が粒子 A、赤が粒子 B を示す。流れの交差領域において、粒子が縞状の集団を形成して通過していることが確認できる。

##### 4.2 粒子モデルにおける仮想的な密度計算

具体的に、粒子モデルにおける各粒子の位置情報から仮想的な密度を求める。位置  $x$  における仮想的な密度  $\hat{\rho}(x)$  を次式のように計算する。

$$\hat{\rho}(x) = \sum_i m_i W(\|r_i\|, h) \quad (15)$$

$$r_i = x - x_i \quad (16)$$

ここで、 $x_i$  は粒子  $i$  の位置、 $r_i$  は粒子からの相対位置である。 $m_i$  は各粒子に割り当てられた仮想的な人数の値であり、以降、粒子 1 個当たり歩行者 1 人に相当するとして  $m_i = 1$  とする。また、 $W(x, h)$  は次式で表される三次スプライン関数である。

$$W(x, h) = \begin{cases} \frac{10}{7\pi h^2} \left\{ 1 - \frac{3}{2} \left(\frac{x}{h}\right)^2 + \frac{3}{4} \left(\frac{x}{h}\right)^3 \right\} & (0 \leq x < h) \\ \frac{5}{14\pi h^2} \left\{ 2 - \left(\frac{x}{h}\right)^3 \right\} & (h \leq x < 2h) \\ 0 & (x \geq 2h) \end{cases} \quad (17)$$

$h$  は各粒子に設定された密度の空間的な広がりを表すパラメータである。このとき、 $\int W(x, h) dx = 1$  を満たすため以下が成り立つ。

$$\int \hat{\rho}(x) dx = \sum_i m_i \int W(\|r_i\|, h) dx = \sum_i m_i \quad (18)$$

すなわち、 $\hat{\rho}$  の空間積分が粒子の総数に一致し、元の人数に関する情報を再現できることが分かる。

##### 4.3 粒子モデルにおける交差流の時間・空間周波数解析

仮想的な密度から求まる交差流の時間・空間周波数を用いた制御が有効かどうかを検証するために、連続体モデルと同様の交差流の時間・空間周波数解析を行う。

###### • 平均流速

図 8(a) に誘導員周波数  $\omega_G$  と平均流速  $\bar{v}$  の関係を示す。縦軸には、各時刻における全粒子の平均速度を計算し、その時間平均値をプロットした。図中、一点鎖線が平均速度が最大となる誘導員の周波数  $\omega_{G0}$  を示す。

###### • 時間周波数

図 8(b) に誘導員周波数  $\omega_G$  と交差流の時間周波数  $\omega$  の関係を示す。縦軸には  $\omega$  と  $\omega_G$  の差  $\Delta\omega = \omega - \omega_G$  をプロットした。式 (15) で  $h = 0.4$  として仮想密度を計算した。図中、一点鎖線が最適な誘導員の周波数  $\omega_{G0}$  を示し、 $\omega_G > \omega_{G0}$  の範囲では  $\Delta\omega \simeq 0$  であることが確認できる。これは連続体モデルでの解析結果と一致し、式 (11) による時間周波数に基づく制御が有効であることを示している。

###### • 空間周波数

図 8(c) に誘導員周波数  $\omega_G$  と交差流の空間周波数  $\nu$  との関係を示す。連続体モデルでは密度分布から空間周波数を求めたが、粒子モデルにおいて式 (15) のように仮想的な密度分布を計算したとしても、空間周波数の詳細な変化を見ることは難しい。これは、連続体モデルにおいて空間周波数は縞の幅の逆数に相当し、縞の幅は粒子モデルにおいてその中に含まれる人数に相当するが、その変化が離散的になるためであると考えられる。そこで、既に計算されている平均速度  $\bar{v}$  と時間周波数  $\omega$  から空間周波数  $\nu$  を次式のように擬似的に求める。

$$\nu = \frac{\bar{v}}{\omega} \quad (19)$$



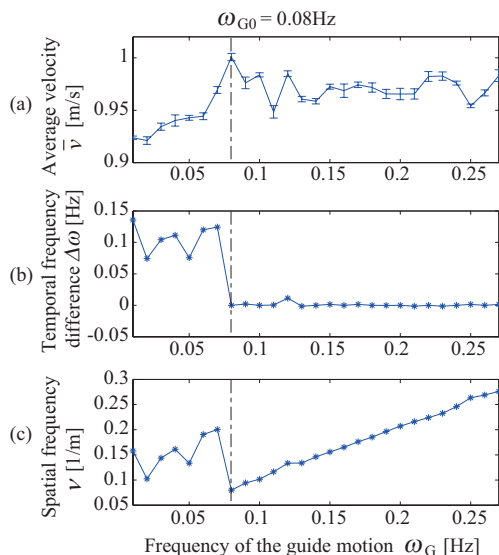


Fig.8 Frequency analysis of the crossing pedestrian flows with particle model

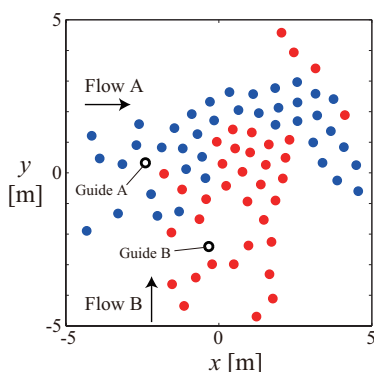


Fig.9 Snapshot of the crossing flows by applying proposed control method to the particle model

Table 1 Temporal average velocity of the particles

Flow	without guides	with guides
A	0.959	0.987
B	0.951	0.978

図 8(c) から、一点鎖線で示した  $\omega_{G0}$  を境に誘導員の周波数が増加するしたがって交差流の空間周波数増加していることが分かる。この現象も連続体モデルでの解析結果と一致し、式 (12) による空間周波数に基づく制御の有効性を示している。

以上から、離散的な位置情報を持つ粒子モデルにおいても連続体モデルから導いた制御則が有効であることがわかる。

#### 4.4 交差流の制御シミュレーション

粒子モデルに提案手法を適用し、シミュレーションを行った。図 9 にシミュレーション中の各粒子、誘導員の様子を示す。図中、青が粒子 A、赤が粒子 B を表し、白丸が各誘導員の位置を表す。各流れの平均速度の時間変化を図 10 に、それらの時間平均を計算した結果を表 1 に示す。制御により、流れ A、B とともに平均速度が向上していることがわかる。

#### 5. おわりに

本稿では、歩行者の位置情報から仮想的な密度分布を計算し、それによって交差流の時間・空間周波数を求めることで交差流を制御する方法を提案した。実際の歩行者を想定した

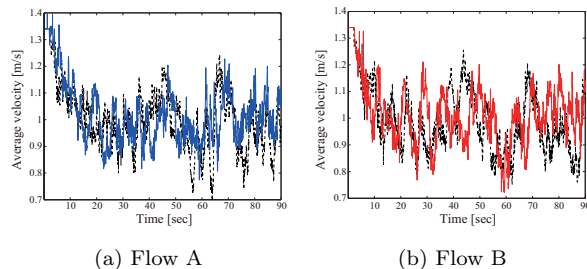


Fig.10 Time variation of average velocity of the crossing flows when applying proposed control method to the particle model

交差流の粒子モデルにおいて時間・空間周波数解析を行うことにより、連続体モデルから導いた制御アルゴリズムが粒子モデルにおいても有効であることを示している。シミュレーションでは、制御を適用することで 2 つの流れの平均速度がともに向上することを示した。これは連続体モデルの妥当性を裏付ける結果ともいえる。

#### 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。

#### 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] S. J. Guy, et al. PLEdestrians: A Least-Effort Approach to Crowd Simulation. In *Proceedings of Eurographics/ ACM SIGGRAPH Symposium on Computer Animation*, 2002.
- [3] L. F. Henderson. The Statistics of Crowd Fluids. *Nature*, Vol. 229, pp. 381–383, 1971.
- [4] Roger L. Hughes. A Continuum Theory for the Flow of Pedestrians. *Transportation Research Part B*, Vol. 36, pp. 507–535, 2002.
- [5] 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, 3C3-5, 2010.
- [6] 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.
- [7] K. Kurumatani. Social Coordination with Architecture for Ubiquitous Agents: CONSORTS. In *Proceedings of International Conference on Intelligent Agents, Web Technologies and Internet Commerce (IAWTC2003)*, 2003.
- [8] Takuji Narumi, et al. Pedestrian Route Guidance System Using Moving Information Based on Personal Feature Extraction. In *Proceedings of IEEE International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems*, pp. 94–99, 2008.
- [9] R. Vaughan, et al. Robot Control of Animal Flocks. In *Proceedings of the 1998 IEEE ISIC/CIRA/ISAS Joint Conference*, pp. 277–282, 1998.
- [10] Jyh-Ming Lien, et al. Shepherding Behaviors. In *Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA2004)*, pp. 4159–4164, 2004.
- [11] 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.
- [12] 松本, 清田, 伊藤. 街路空間特性と歩行速度の関係. 日本建築学会計画系論文集, Vol. 74, No. 640, pp. 1371–1377, 2009.