学術・技術論文

交差流の時間・空間周波数に基づく歩行者群制御

山 本 江* 岡 田 昌 史*

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

Ko Yamamoto* and Masafumi Okada*

In the densely-populated urban cities, pedestrian flows often cross each other and congestion occurs. Due to the congestion, we feel discomfort and accidents may occur. In order to reduce the congestion or the risk of accidents, it is required to control swarm behavior of pedestrian flows so that the flows become smooth. This paper proposes the control method of the crossing pedestrian flows. First, we propose the continuum model of the crossing flows. In the actual pedestrian flows, it is known that people formulate the diagonal stripe pattern in the crossing area. The continuum model enables us to quantify such dynamical change of the congestion degree. Then, we propose an implicit control method of the crossing flows. Utilizing the dynamical characteristics of the flows, swarm behavior is controlled by moving a few guides without explicit guidance. From analysis on the crossing flows, we derive a control algorithm to improve the average flow velocity. The proposed control method is also applied to the particle model, assuming the actual pedestrian flows. The validity is verified with simulations in both the continuum and particle models.

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 [1] [2]．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° 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な現象をモデル化する研究が行われてきた [3]～[5]．

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 [6]．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．一方，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 [7] [8] 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のに適している．安藤ら [9] 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 [10] は物体配置によって流れを間接的に操作し混雑を緩和する手法を提案した．しかし，これらの研究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．

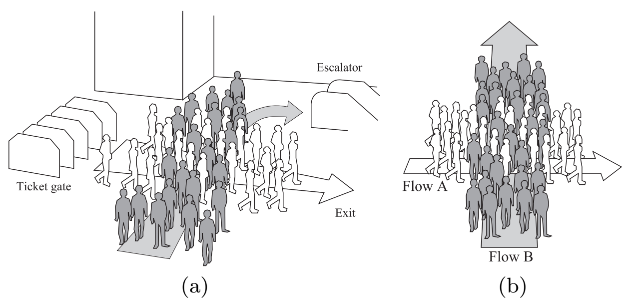


Fig. 1 (a) Congestion in the station and (b) the crossing pedestrian flows. When two pedestrian flows cross vertically, diagonal stripe pattern emerges

原稿受付 2010 年 12 月 20 日
*東京工業大学
*Tokyo Tech.
■ 本論文は提案性で評価されました．

本論文では，交差流における歩行者群の制御法を提案する．まず，交差流における混雑度の動的変化を扱うために交差流の連続体モデルを提案する．連続体モデルでは，群のマクロな挙動を速度ベクトル場で与え，混雑度を連続体の密度として計算することにより定量的な評価を可能にする．また，交差流の中に誘導員を配置し，一般の歩行者がこの誘導員を避けて通る効果を間接的に利用して流れ全体を制御する方法を提案する．誘導員は明示的な指示を行わないため，本論文ではこの方法を「群の暗示的制御」と呼ぶ．提案手法では，定常状態で発生する交差流の周期現象に着目し，誘導員にも周期移動を行わせ，その際に交差流との間に生じる相互作用を利用することで流れを変化させる．特に交差流の持つ時間・空間周波数に着目した解析により，平均流速を向上させる制御アルゴリズムを導出する．さらに，流入密度が変化するような一般的な場合にも同様の制御アルゴリズムにより平均流速が向上することを示す．提案手法は連続値である密度の情報を用いるが，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，それらを連続的な密度の値に変換する必要がある．そこで，より実際に近いモデルとして交差流の粒子モデルを想定し，その位置情報から仮想的な密度分布を計算して提案手法を適用することで，粒子モデルにおいても平均流速が向上することを示す．

2. 群集挙動のモデル化

2.1 速度ベクトル場による人の流れのマクロモデル化

本論文では二次元平面内における歩行者の移動を対象とする．文献 [9] [10] と同様に，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速度ベクトル場でモデル化する．すなわち，位置 $\boldsymbol{x} = [\ x\ y\ ]^T$ における速度 $\boldsymbol{v} = [\ v\ w\ ]^T$ は次式のようなベクトル場 $\boldsymbol{f}(\boldsymbol{x})$ で与えられる．

$$\boldsymbol{v} = \boldsymbol{f}(\boldsymbol{x}) \tag{1}$$

例えば，**Fig. 2** のような直線 L に沿う人の流れを考える．流れの方向を与える単位ベクトルを $\boldsymbol{d}$，流れの幅を w_0 とする．幅より内側の領域では方向ベクトル $\boldsymbol{d}$ 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，$\boldsymbol{f}(\boldsymbol{x})$ は以下のように設計できる．

$$\boldsymbol{f}(\boldsymbol{x}) = \begin{cases} v_0\boldsymbol{d} & (\|\boldsymbol{n}\| \le w_0) \\ v_0\boldsymbol{d} + k(\|\boldsymbol{n}\| - w_0)\frac{\boldsymbol{n}}{\|\boldsymbol{n}\|} & (\|\boldsymbol{n}\| > w_0) \end{cases} \tag{2}$$

ここで，v_0 は幅 w_0 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，$\boldsymbol{n}$ は位置 $\boldsymbol{x}$ から中央線 L 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．

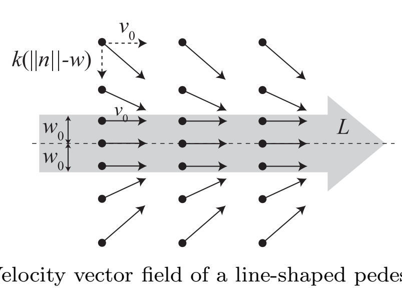


Fig. 2 Velocity vector field of a line-shaped pedestrian flow

2.2 粒子モデルによる交差流現象の確認

次に，速度ベクトル場によって歩行者の群挙動を再現できることを確認する．直交する二つの流れ A，B を考え，各流れを指定する速度ベクトル場を $\boldsymbol{f}_A$，$\boldsymbol{f}_B$ とする．各流れに従う歩行者を粒子としてモデル化し，交差流の現象を確認する．流れ A に従って移動する粒子 i の速度 $\boldsymbol{v}_i$ を以下のように与える．

$$\boldsymbol{v}_i = \boldsymbol{f}_A(\boldsymbol{x}_i) - \sum_{i \ne j} s(\|\boldsymbol{r}_{ij}\|)\frac{\boldsymbol{r}_{ij}}{\|\boldsymbol{r}_{ij}\|} \tag{3}$$

$$\boldsymbol{r}_{ij} = \boldsymbol{x}_j - \boldsymbol{x}_i \tag{4}$$

ただし，$\boldsymbol{x}_i$ は粒子 i の位置を表し，$\boldsymbol{r}_{ij}$ は粒子 i から他の粒子 j への相対位置ベクトルである．これは Social Force Model [11] と同様のモデルであり，式（3）右辺第一項は各歩行者が目的地に引きつけられる効果を表す．式（3）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．ここで，$s(r)$ は次式で定義されるシグモイド関数である．

$$s(r) = \frac{c}{1 + \exp\{(a(r - b)\}} \tag{5}$$

ただし，a，b，c は定数である．これは人が感じるパーソナル・スペース [12] をモデル化したものである．式（5）中の b がパーソナル・スペースの半径に相当し，a はその領域の境界を滑らかにするパラメータである．また，c は反発の影響の大きさを決定する．これは設定した空間と粒子一個当たりのパーソナル・スペースの大きさとの間のスケール・ファクタである．

なお，Social Force Model では運動方程式から各歩行者の加速度を決定する．人が通常の歩行をしているような時間的・空間的スケールでの運動を考えると，人は一般的な歩行速度に瞬時に到達することができるため，加速度レベルでのモデル化は必要ないと考える．

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．粒子の運動の様子を **Fig. 3** に示す．図中，白丸が流れ A の粒子，黒丸が B の粒子を表す．流れが交差する領域では，粒子が縞状の群を形成して通過していることが確認できる．一方，実際の交差流においても歩行者が縞状の群を形成すること

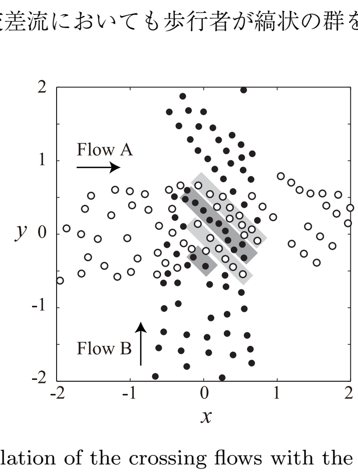


Fig. 3 Simulation of the crossing flows with the particle model

が知られている [1] [2]．シミュレーション結果はこの現象と一致し，速度ベクトル場によるモデル化が妥当であるといえる．以降，このような歩行者群のモデルを本論文では粒子モデルと呼ぶ．

しかし，これは離散的なモデルであり，交差領域内における混雑度を定量化することは難しい．また，粒子モデルでは各歩行者の年齢・性別等の差異をパラメータに反映することで歩行者のミクロな挙動をモデル化することも可能であるが，群全体の挙動を制御する場合には流れのマクロな挙動を評価することが重要である．そこで，次章で述べる連続体によるモデル化を行う．

3. 交差流の連続体モデル

3.1 連続体による混雑度のモデル化

2章と同様に速度ベクトル場 $\boldsymbol{f}_A$，$\boldsymbol{f}_B$ に従う人の流れ A，B が交差する状況を考えよう．人の流れを連続体でモデル化し，混雑度を連続体の密度 $\rho_i(\boldsymbol{x}, t)$ $(i = \mathrm{A, B})$ として表す．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）で与えられるものとする．

$$\frac{\partial \rho_i}{\partial t} = -\rho_i \left(\frac{\partial v_i}{\partial x} + \frac{\partial w_i}{\partial y} \right) - \left(\frac{\partial \rho_i}{\partial x} v_i + \frac{\partial \rho_i}{\partial y} w_i \right) \quad (i = A, B) \qquad (6)$$

ここで，$\boldsymbol{v}_i = [\ v_i\ w_i\ ]^T$ は各流れの速度であり，次式のように決定する．

$$\boldsymbol{v}_A = \boldsymbol{f}_A(\boldsymbol{x}) - k_1 \nabla \rho_A - k_2 \nabla \rho_B \qquad (7)$$

$$\boldsymbol{v}_B = \boldsymbol{f}_B(\boldsymbol{x}) - k_1 \nabla \rho_B - k_2 \nabla \rho_A \qquad (8)$$

ただし，$\nabla \rho_i$ は密度勾配を表し，次式のように定義される．

$$\nabla \rho_i = \left[\begin{array}{cc} \dfrac{\partial \rho_i}{\partial x} & \dfrac{\partial \rho_i}{\partial y} \end{array} \right]^T \qquad (9)$$

式（7），（8）の右辺第二，三項は密度の拡散項を表し，k_1，k_2 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り，粒子モデルでは式（3）右辺第二項に相当する．式（6）〜（8）は，粒子モデルと同様に速度レベルでモデル化したものである．

3.2 連続体モデルによる交差流のシミュレーション

以上の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．$|x| \leq 2$，$|y| \leq 2$ の領域を 50×50 の微小領域に分割し，有限体積法により連続の式（6）を計算する．流れ A について，$x = -2$，$|y| \leq 0.5$ の密度を毎時刻 ρ_{A0} として流れを入力する．流れ B についても同様に，$y = -2$，$|x| \leq 0.5$ の密度を ρ_{B0} とする．以降，この ρ_{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. 4** に示す．図中，白色の部分が密度 0 を示し，黒色に近づくほど密度が高くなる．交差領域内において Fig. 4 に示すような縞模様状の密度分布が形成され，またそれが伝播する様子がシミュレーションにより確認できた．この結果も実際に見られる縞状の群形成現象 [1] [2] と一致し，定性的な考察として，モデルが妥当であると言える．また，粒子モデルとは異なり，交差領域における混雑度の時間的・空間的な変化を定量的に表すことができる．

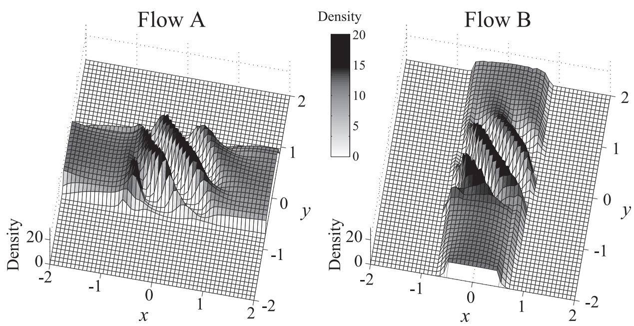


Fig. 4 Density distribution in crossing flows simulated with the continuum model

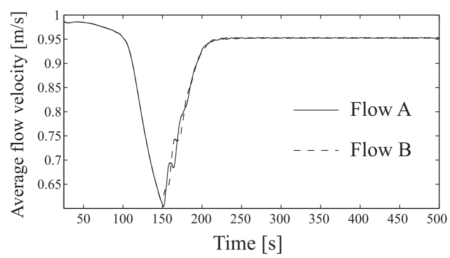


Fig. 5 Time variation of the average flow velocity of the crossing flows

ここで，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 $\boldsymbol{x}$ における流速 $\boldsymbol{v}(\boldsymbol{x}, t)$ を速度ベクトル場が与える $\boldsymbol{f}(\boldsymbol{x})$ に射影して得られるベクトルを $\hat{\boldsymbol{v}}(\boldsymbol{x}, t)$ とおく．

$$\hat{\boldsymbol{v}} = \boldsymbol{f}\boldsymbol{f}^{\#}\boldsymbol{v} \qquad (10)$$

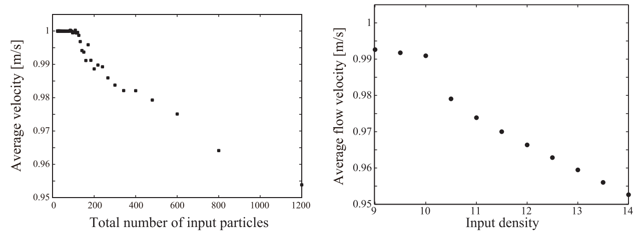
ただし，$\boldsymbol{f}^{\#} = (\boldsymbol{f}^T\boldsymbol{f})^{-1}\boldsymbol{f}^T$ と定義した．$\hat{\boldsymbol{v}}$ のノルム $\|\hat{\boldsymbol{v}}\|$ は実際の流速のうち元のベクトル場に沿った速度成分を表す．$\|\hat{\boldsymbol{v}}\|$ を用いて，ある時刻 t における流れ全体の平均流速を以下のように定義する．

$$\bar{v}_i(t) = \frac{\int \rho_i \|\hat{\boldsymbol{v}}_i\|\ d\boldsymbol{x}}{\int \rho_i\ d\boldsymbol{x}} \quad (i = \mathrm{A, B}) \qquad (11)$$

右辺の分母は空間内の全密度の総和を，分子は流量の総和の割合を表す．**Fig. 5** にシミュレーション中の平均流速の時間変化を示す．二つの流れの衝突により，100 [s] 以降で平均流速が急激に低下する．その後，Fig. 4 に見られるような縞状の密度分布が発生して，200 [s] 以降においては平均流速が回復する．

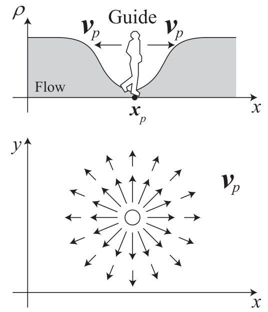
3.3 混雑度と平均流速の関係

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混雑度が増加に伴う平均流速の変化を比較した．まず，粒子モデルでは入力される粒子の総数が入力密度と相関を持つため，粒子数を変化させたときの全粒子の平均速度の変化を調べた．平均速度は，連続体の場合と同様に，各粒子の速度を速度ベクトル場 $\boldsymbol{f}$ に射影したベクトルのノルムの平均値を計算し，それらの時間平均をとることで算出する．粒子数



(a) Particle model (b) Continuum model

Fig. 6 Relationship between the congestion degree and average flow velocity



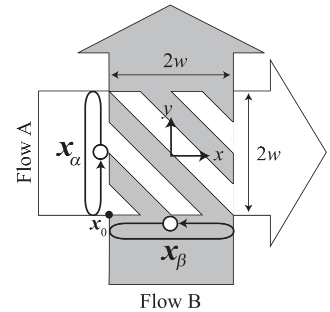


Fig. 7 Modeling of a guide and its effect to flows **Fig. 8** Cyclic motion of guides

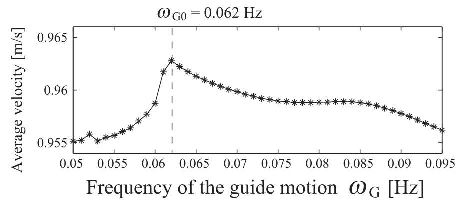


Fig. 9 Relationship between the guide frequency ω_G and the average flow velocity, when $\rho_0 = 14$

と平均速度の関係を **Fig. 6** (a) に示す．図中，粒子数が 0 から 100 と少ない場合，粒子同士の衝突はほとんどなく，速度ベクトル場の基準速度 $v_0 = 1.0$ で粒子は移動していることが分かる．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，ある値を境に交差領域内で混雑が発生し始め，平均速度の低下率が大きくなる傾向が見られる．

次に，連続体モデルにおいて流入密度を変化させたときの平均流速の変化の様子を Fig. 6 (b) に示す．流入密度の値が 10 より小さい場合には，交差領域内に縞状の密度分布は現れず，平均速度の低下率も小さい．一方，流入密度が 10 を境に交差領域内に縞状の密度分布が生じ，粒子モデルと同様に低下率が大きくなる傾向が見られた．Fig. 6 (a)，(b) を比較すると，粒子数が 0〜200 と小さい場合は連続体モデルとの間に乖離が見られるが，粒子数が増加するほど平均速度変化が連続体モデルに近くなることが確認できる．したがって，粒子数が十分に大きい場合には，粒子・連続体モデル双方に同様の混雑度–平均速度の関係があり，これは連続体モデルの妥当性を示す結果であるといえる．

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

本論文では駅構内等における交差流を対象として，流れの中に誘導員を配置し，それらに適当な移動則を与えることで流れを操作することを考える．一般の歩行者はこの誘導員を避けて通る．この効果が流れ全体に伝播することを利用して，流れ全体の挙動を制御する．誘導員は明示的な指示を行わないため，この方法を「群の暗示的制御」と呼ぶ．ここで，「誘導員」は人間だけでなく移動ロボット等の利用も想定している．

Fig. 7 のように人の流れの中に誘導員を配置した状況を考える．誘導員 p の位置を $\boldsymbol{x}_p$ とする．このとき，Fig. 7 のように流れは誘導員から反発の速度の影響を受けるものとする．ある位置 $\boldsymbol{x}$ における反発速度 $\boldsymbol{v}_p$ は次式で与える．

$$\boldsymbol{v}_p(\boldsymbol{x}) = -s(\|\boldsymbol{r}_p\|)\frac{\boldsymbol{r}_p}{\|\boldsymbol{r}_p\|} \quad (12)$$

ただし，$\boldsymbol{r}_p = \boldsymbol{x}_p - \boldsymbol{x}$ は誘導員からの相対位置を表す．また，$s(r)$ は式（5）で表される．このとき各流れの速度は，式（7），（8）に式（12）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．

$$\boldsymbol{v}_A = \boldsymbol{f}_A(\boldsymbol{x}) - k_1\nabla\rho_A - k_2\nabla\rho_B + \sum_p \boldsymbol{v}_p \quad (13)$$

$$\boldsymbol{v}_B = \boldsymbol{f}_B(\boldsymbol{x}) - k_1\nabla\rho_B - k_2\nabla\rho_A + \sum_p \boldsymbol{v}_p \quad (14)$$

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 交差流と誘導員の相互作用

交差流で生じる縞状の密度分布は時間的・空間的な周期を持つ．この周期的な現象は，連続の式（6）と流速の式（7），（8）から得られる偏微分方程式の解として得られる非線形な振動である．そこで，本論文では誘導員によって外部から周期的な入力を与えることで，交差流の現象を操作することを考える．

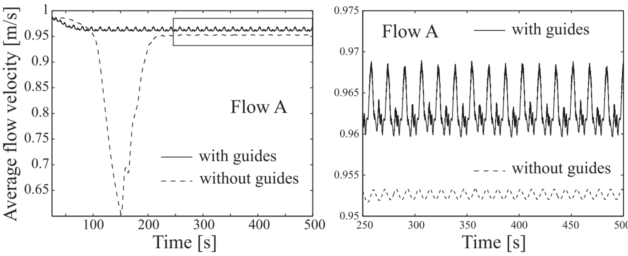
簡単のため，$\rho_{A0} = \rho_{B0} = \rho_0$ として，二つの流れの流入密度が等しい場合を考える．このとき，二人の誘導員 α，β の位置 $\boldsymbol{x}_\alpha$，$\boldsymbol{x}_\beta$ を以下のように与え，**Fig. 8** のように流れの境界線際で周期移動を行わせる．

$$\boldsymbol{x}_\alpha = \boldsymbol{x}_0 + w\{1 - \cos(2\pi\omega_G t)\}\boldsymbol{d}_B \quad (15)$$

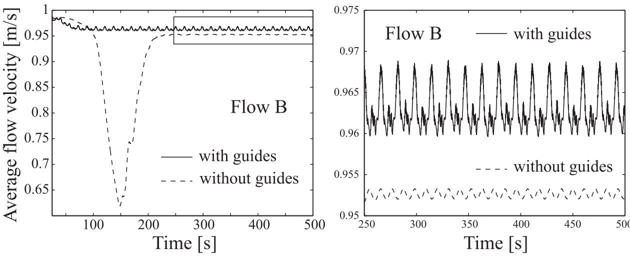
$$\boldsymbol{x}_\beta = \boldsymbol{x}_0 + w\{1 + \cos(2\pi\omega_G t)\}\boldsymbol{d}_A \quad (16)$$

ここで，$\boldsymbol{x}_0$ は Fig. 8 に示すような流れ同士が最初に衝突する位置，w は流れの幅，ω_G は誘導員の周期移動の周波数である．二つの周期運動は逆位相をとるように設定する．$\boldsymbol{d}_i$ $(i = A, B)$ は各流れの方向ベクトルである．このとき，式（15），（16）右辺第二項のように誘導員 α は流れ B に平行に，誘導員 β は流れ A に平行に移動する．

誘導員の周波数が平均流速に及ぼす影響を調べるために，流入密度 $\rho_0 = 14$ において周波数 ω_G を 0.050 から 0.095 [Hz] の範囲で 0.001 [Hz] 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. 9** に示す．誘導員の移動周波数が図中の点線で示される値 $\omega_{G0} = 0.062$ [Hz] のとき，平均流速がピーク値を持つ．このときの平均流速の時間変化を **Fig. 10** 左列に示す．流



(a) Flow A



(b) Flow B

Fig. 10　Time variation of the average flow velocities when $\rho_0 = 14$ and $\omega_G = 0.062$ [Hz]

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分かる．Fig. 10 中に四角形で囲んだ $t = 250$〜500 [s] の定常状態の部分を拡大したものを Fig. 10 右列に示す．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．ここで，ω_{G0} の値は流量などの条件によって変動し，一般的には未知である．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．

4.3　交差流の時間・空間周波数解析

ω_{G0} の値を探索するために，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る．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．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

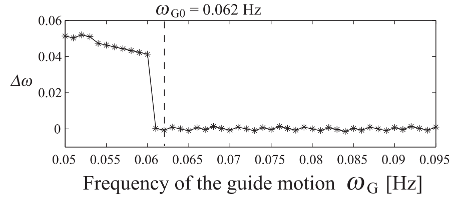
$$\Delta\omega = \omega - \omega_G \tag{17}$$

とする．**Fig. 11** (a) に ω_G と $\Delta\omega$ の関係を示す．図中，点線は平均流速が最大となる誘導員周波数 $\omega_{G0} = 0.062$ [Hz] 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関係を以下のようにまとめることができる．

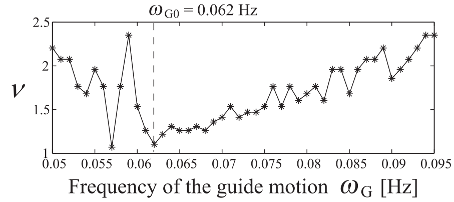
- $\omega_G < \omega_{G0}$ では，ω_G が増加するにつれて $\Delta\omega_G$ は減少する．
- $\omega_G > \omega_{G0}$ では, ω_G の値にかかわらず $\Delta\omega \simeq 0$ となる．

したがって，低周波領域では $\Delta\omega$ 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．

次に ω_{G0} の前後の周波数において交差流の特徴がどのように変化するかを調べる．ここでは特に交差流の空間周波数に注目する．空間周波数は波長の逆数であり，交差流においては縞状の密度分布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. 11 (b) 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の関係は以



(a) Difference between temporal frequency of the guide and crossing flows



(b) Spatial frequency of the crossing flows

Fig. 11　Relationship between the guide frequency ω_G and the temporal/spatial frequency of the crossing flows, when $\rho_0 = 14$

下のようにまとめられる．

- $\omega_G < \omega_{G0}$ では，ω_G と ν の間に明確な関係性は見いだせない．
- $\omega_G \geq \omega_{G0}$ では，ω_G が増加するに従って ν も増加する．

以上のシミュレーションは流入密度を $\rho_0 = 14$ として計算した．流入密度を $\rho_0 = 11, 12, 13, 15$ 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. 12** に示す．図中，点線が各流入密度における ω_{G0} の値を示す．このように，ω_{G0} は流入密度と明確な相関を持たないが，いずれの場合も Fig. 9, 11 と同様な関係性が確認できる．なお，定性的な考察にとどまるが，Fig. 9，11 (a) の解析結果から，誘導員周波数と交差流の時間周波数の同期によって共振に相当する効果が生じ，平均流速が増加すると考えている．

4.4　時間・空間周波数に基づく制御則

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と考えられる．

時間周波数に基づく制御　低周波域（$\omega_G < \omega_{G0}$）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

空間周波数に基づく制御　高周波域（$\omega_G > \omega_{G0}$）では空間周波数を小さくするように誘導員の周波数を減少させる

この二つの制御則は，$\Delta\omega \simeq 0$ を判定すること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，ある時刻 t_0 から $t_0 + 1/{}^i\omega_G$ まで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．

$${}^{i+1}\omega_G = \begin{cases} {}^i\omega_G + k_\omega \Delta\omega & (\text{if} \quad \Delta\omega \geq \Delta\omega_0) \\ {}^i\omega_G + k_\nu(\nu_0 -{}^i\nu) & (\text{if} \quad \Delta\omega < \Delta\omega_0) \end{cases} \tag{18}$$

ここで，k_ω，k_ν は時間・空間周波数に関するゲイン，ν_0 は空間周波数に設定したオフセット値，$\Delta\omega_0$ は $\Delta\omega$ に関する閾値

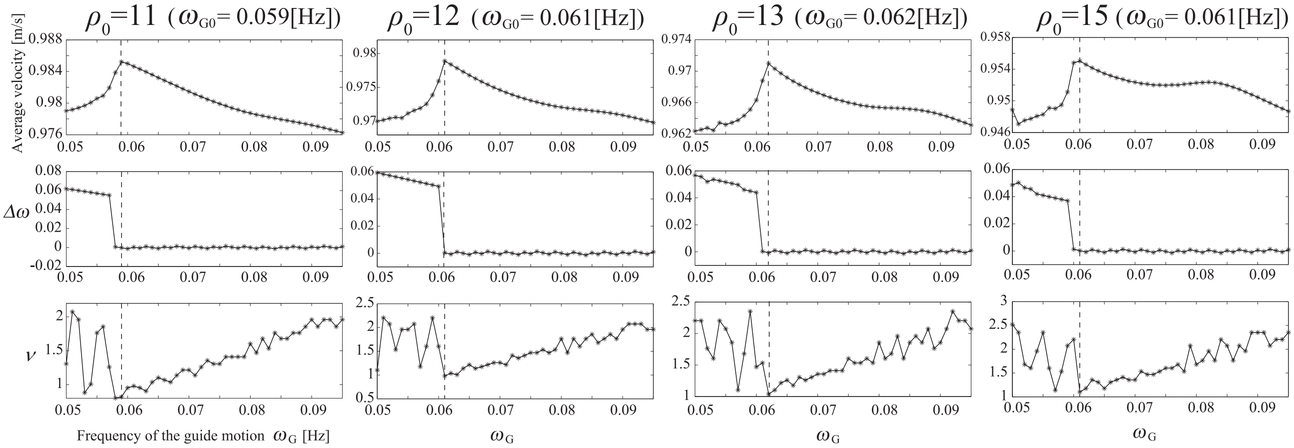
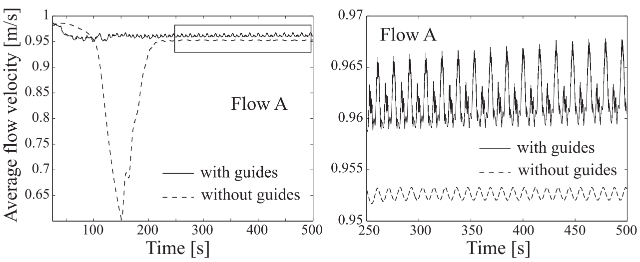
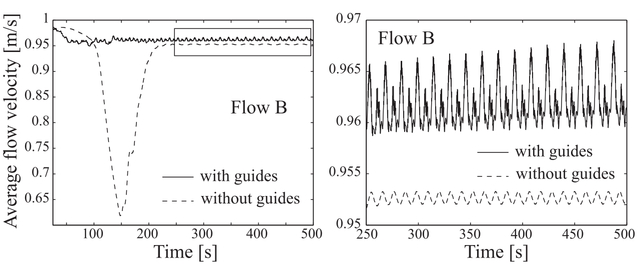


Fig. 12 Results of the temporal and spatial frequency analysis



(a) Flow A



(b) Flow B

Fig. 13 Time variation of the average flow velocities with proposed control method

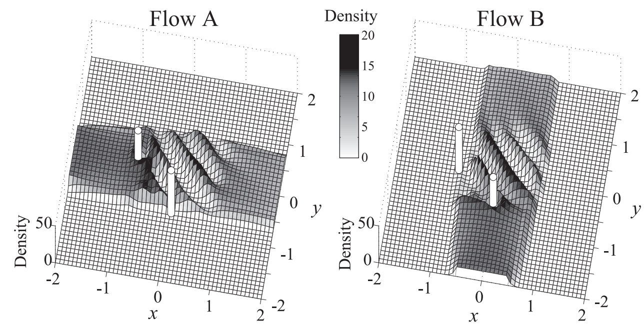
である．

以上の制御則を用いて，流入密度 $\rho_0 = 14$ 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. 13** に示す．図中，右列は定常状態になった 250〜500 [s] 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. 14** に $t = 50$，250 [s] における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，縞模様の幅が広くなる様子が確認できる．

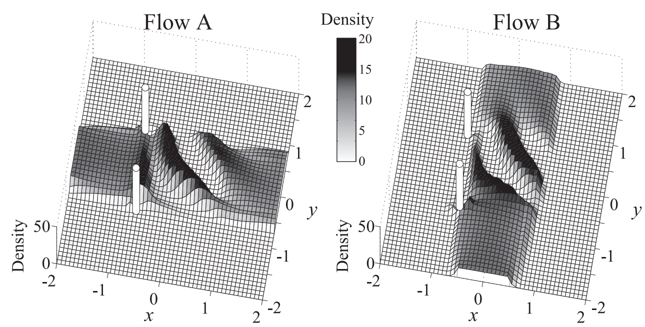
4.5 異なる流入密度を持つ交差流の時間・空間周波数解析

前章までは，二つの流れの流入密度は等しく，時間によっても一定であることを想定していた．しかし，実際の環境では各流入密度は必ずしも等しくない．そこで，本節では 4.3 節で示した時間・空間周波数解析を流入密度が異なる交差流についても行い，提案する制御法が有効かどうか検証する．

流れ A，B の流入密度をそれぞれ $\rho_{A0} = 15$，$\rho_{B0} = 7.5$ と



(a) $t = 50$ [s]



(b) $t = 250$ [s]

Fig. 14 Simulation results of the crossing flows with proposed control method

したときの誘導員周波数と交差流の平均流速，時間・空間周波数の関係を **Fig. 15** に示す．図中，点線が提案手法を適用して探索される誘導員周波数 ω_{G0} を表す．このとき，A，B の平均流速はともにピーク値に近くなり，提案手法により両方の流れを同時に考慮して流速を向上させることが期待できる．

4.6 流入密度の時間変化を考慮した交差流の制御

時間・空間周波数に基づく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. 16** 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．250〜600 [s] における平均流速の時間変化を **Fig. 17** 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常的に平均流速が向上していることが確認できる．

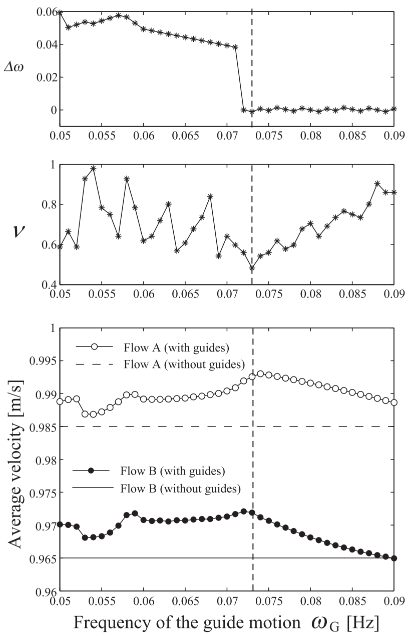


Fig. 15 Relationship between the frequency of guides and the average velocity ($\rho_{A0} = 15$, $\rho_{B0} = 7.5$)

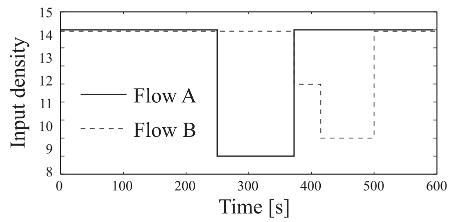


Fig. 16 Time variation of the input density

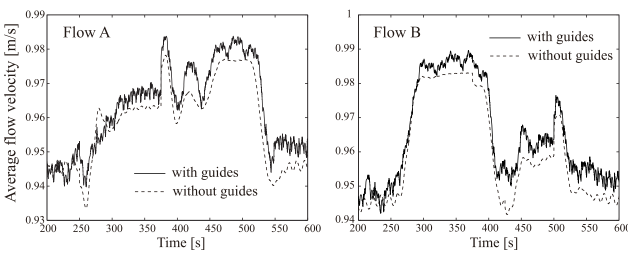


Fig. 17 Average flow velocity with proposed control method when the density varies from hour to hour

5. 粒子モデルにおける歩行者制御

前章において提案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．本章では，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．

位置 $\boldsymbol{x}$ における仮想的な密度 $\hat{\rho}(\boldsymbol{x})$ を次式のように計算する．

$$\hat{\rho}(\boldsymbol{x}) = \sum_i W(\|\boldsymbol{r}_i\|, h) \tag{19}$$

$$\boldsymbol{r}_i = \boldsymbol{x} - \boldsymbol{x}_i \tag{20}$$

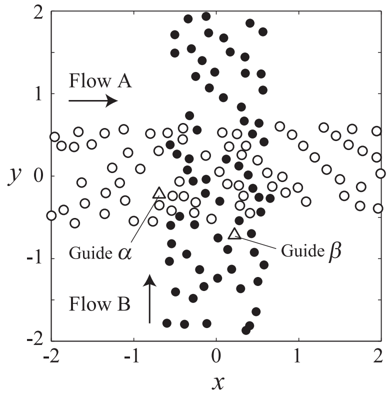


Fig. 18 Snapshot of the crossing flows by applying proposed control method to the particle model

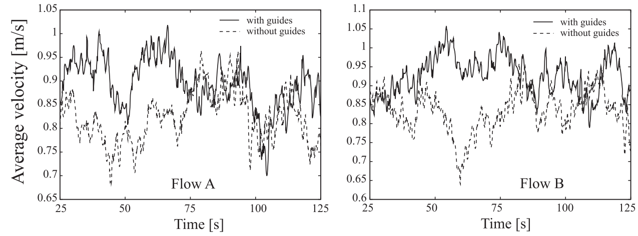


Fig. 19 Time variation of average velocity of the crossing flows by applying proposed control method to the particle model

ここで，$\boldsymbol{x}_i$ は粒子 i の位置，$\boldsymbol{r}_i$ は粒子からの相対位置である．また，$W(x,h)$ は次式で表される三次スプライン関数であり，粒子 1 個あたりが持つ擬似的な密度分布を表す．

$$W(x,h) = \begin{cases} \dfrac{10}{7\pi h^2}\left\{1 - \dfrac{3}{2}\left(\dfrac{x}{h}\right)^2 + \dfrac{3}{4}\left(\dfrac{x}{h}\right)^3\right\} & (0 \leq x < h) \\ \dfrac{5}{14\pi h^2}\left\{2 - \left(\dfrac{x}{h}\right)^3\right\} & (h \leq x < 2h) \\ 0 & (x \geq 2h) \end{cases} \tag{21}$$

ここで，h は密度の空間的な広がりを表すパラメータである．

$h = 0.15$ として仮想的に計算した密度を用いて，粒子モデルに提案する制御法を適用した．**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．図中，白丸が粒子 A，黒丸が粒子 B を表し，三角形が各誘導員の位置を表す．また，シミュレーション中の平均速度の時間変化を **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．各流れの平均速度の時間平均を計算した結果を **Table 1** に示す．流れ A，B ともに誘導員による制御により平均速度が増加していることが分かる．この平均速度の増加が実際の人の移動にどの程度影響するかを考察する．流れの平均速度を $\bar{v}$，密度（単位面積当たりの人数）を $\bar{\rho}$，流れの幅を w とすれば，T[s] 間に通過する総人数 N は次式で与えられる．

$$N = \bar{\rho}\bar{v}wT \tag{22}$$

シミュレーションでは $\bar{\rho} \simeq 17$，$w = 1.0$ であり，$T = 60$ [s] 間

Table 1 Temporal average velocity of the particles

	Flow A	Flow B
without guides	0.82	0.83
with guides	0.88	0.91

の流れBの通過人数を計算すると，制御なしの場合 $N = 846.6$ 人，制御ありの場合 928.2 人となり，1 分間当たり約 80 人多く人を流すことができる．

6. おわりに

本研究の成果は以下のようにまとめられる．

(1) 歩行者群の交差流の連続体モデルを提案した．群のマクロな挙動を速度ベクトル場で与えることで交差流の現象を再現でき，それに従う歩行者の流れの混雑度を連続体の密度として計算することで，交差流における動的な混雑度変化を定量的に評価できる．

(2) 誘導員によって交差流の平均流速を増加させる暗示的制御法を提案した．交差流が非線形な周期現象を持つことに注目し，誘導員の周期運動との相互作用により交差流のもつ特性を変化させる．特に，本論文では誘導員の運動周波数と交差流の持つ時間・空間周波数との関係を解析し，時間・空間周波数に基づいて誘導員の周波数を調整することで交差流の平均流速を増加させる制御法を示した．

各流れの流入密度が異なる一般的な場合へも制御法が適用可能かを検証し，シミュレーションによって有効性を示した．また，実際の歩行者を想定した場合に得られる各歩行者の離散的な位置・人数の情報から，仮想的な密度を計算することで提案手法を適用する方法を示した．具体的に粒子モデルに提案手法を適用し，平均流速を増加させることができることを確認した．なお，本論文では直線上の人の流れを対象としていたが，文献[10]と同様に速度ベクトル場を設計することで，より複雑な流れの経路にも対応可能である．

本論文では，人の流れのモデルは各歩行者を均質なものとしてモデル化し，そこから現れるマクロな性質に注目した流れの制御を行う制御則を提案した．実際には，年齢・性別などの個人差や家族・友人等の社会的関係により移動形態にミクロな差が存在する．提案手法を実環境に適用する場合，大多数の歩行者が行き来する場所を対象として長時間制御を適用することにより，その効果が表れると考える．

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．また，連続体モデルにおける密度計算について本間良幸氏から貴重な意見をいただいた．

参考文献

[1] 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.

[2] 加藤邦夫，上原孝雄，中村和男，吉岡松太郎：“群集対向流動の解析”，日本建築学会論文集報告集，vol.289, pp.119–129, 1980.

[3] S.P. Hoogendoorn and P.H.L. Bovy: “Simulation of Pedestiran Flows by Optimal Control and Differential Games,” Optimal Control Applications and Methods, vol.24, no.3, pp.153–172, 2003.

[4] 浅野美帆，桑原雅夫：“先読み行動を考慮した歩行者交通流シミュレーション”，生産研究，vol.59, no.3, pp.184–187, 2007.

[5] N. Pelechano, et al.: “Controlling Individual Agents in High-Density Crowd Simulation,” Proceedings of Eurographics / ACM SIGGRAPH Symposium on Computer Animation, 2007.

[6] K. Kurumatani: “Social Coordination with Architecture for Ubiquitous Agents: CONSORTS,” Proceedings of International Conference on Intelligent Agents, Web Technologies and Internet Commerce (IAWTIC2003), 2003.

[7] R. Vaughan, N. Sumpter, J. Henderson, A. Frost and S. Cameron: “Robot Control of Animal Flocks,” Proceedings of the 1998 IEEE ISIC/CIRA/ISAS Joint Conference, pp.277–282, 1998.

[8] J. Lien, et al.: “Shepherding Behaviors,” Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA2004), pp.4159–4164, 2004.

[9] 安藤輝尚，岡田昌史：“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.

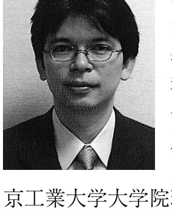
[10] M. Okada and Y. Homma: “Amenity Design for Congestion Reduction based on Continuum Model of Swarm,” Proceedings of the 13th International Conference on Mechatronics Technology (ICMT2009).

[11] D. Helbing and P. Molnár: “Social force model for pedestrian dynamics,” Physical Review E, vol.51, no.5, pp.4282–4286, 1995.

[12] 渋谷昌三：“パーソナル・スペースの形態に関する一考察”，山梨医大紀要，vol.2, pp.41–49, 1985.

山本 江（Ko Yamamoto）

2004 年東京大学工学部機械情報工学科卒業．2009 年同大学大学院情報理工学系研究科知能機械情報学専攻博士課程修了．現在東京工業大学大学院理工学研究科機械物理工学専攻産学官連携研究員．博士（情報理工学）．ヒューマノイドロボットの制御と機構開発，人の流れのモデル化・制御の研究に従事．IEEE の会員．（日本ロボット学会正会員）



岡田昌史（Masafumi Okada）

1992 年 3 月京都大学工学部精密工学科卒業．1996 年 9 月同大学大学院応用システム科学専攻博士課程修了，博士（工学）．1996 年 10 月日本学術振興会特別研究員（PD）．1997 年 2 月東京大学大学院工学系研究科リサーチ・アソシエイト．2000 年 4 月同大学大学院工学系研究科講師．2004 年 4 月東京工業大学大学院理工学研究科助教授．2007 年 4 月准教授となり現在に至る．ロボットの機構設計，力学系を用いた情報処理の研究に従事．日本機械学会，IEEE の会員．（日本ロボット学会正会員）