パーソナルスペースを考慮した群集挙動モデリング —ハイブリッドシステム表現に基づくアプローチ*

猪鹿倉貴史[†]・清水 剛[†]・石橋 良太[†]・児島 晃[†]

A Modeling of Pedestrian Flow Including the Effect of Personal Space —An Approach Based on MLD System Description*

Takashi IGAKURA[†], Tsuyoshi SHIMIZU[†], Ryota ISHIBASHI[†] and Akira KOJIMA[†]

The understanding of the pedestrian behavior in the crowd is indispensable for the assessment of urban layout and various approaches are reported for evaluating the safety of the social infrastructures. In this paper, a simulation model of pedestrian flow is introduced based on the Mixed Logical Dynamical (MLD) system approach. The effect of personal space is newly investigated from the viewpoint of the path-planning and an alternative pedestrian flow model is proposed based on the MLD system description. The feature of the proposed model is illustrated with typical simulations and the relation between the congestion and the effect of personal spaces is evaluated in the evacuation and bi-directional flows.

1. はじめに

人間の行動特徴を把握し群集挙動を予測することは、都市計画や建築設計の安全性や快適性などの評価に際して有効であると考えられている [1–5]。とくに混雑時や特殊なレイアウトにおける群集挙動の予測は、実測の難しさもあり、その予測シミュレーションは有用な一手法となり得る [5]。

群集挙動モデルは、巨視的モデルと微視的モデルに大別できる。巨視的モデルは群集全体の特徴を反映させたモデルであり、代表例としてセルオートマトンモデル、ネットワークモデル、および流体モデルなどがあげられる。巨視的モデルに基づく群集モデルは、密度や流動係数といった数値データの大局的な視点から群集挙動を把握するのに適している。ただし、群集を構成する歩行者一人一人の挙動を把握できない [6,7]。一方、微視的モデルはそれぞれの歩行者の挙動を細かに表現したモデルであり、代表例としてポテンシャルモデルやマルチエージェントモデルなどがあげられる。微視的モデルに基づく

群集モデルは、数値データと視覚的なデータで歩行者一人から群集まで挙動を把握することができる [7–12]。

これまで本研究では微視的な視点から、ハイブリッドシステムの記述法のひとつである Mixed Logical Dynamical System (MLD システム) 表現を用いた群集挙動のモデリングを行ってきた。既報では、歩行者の動特性を考慮した経路計画や複雑な行動のモードを的確に表現できることを示し [13–16]、応用例として避難時の部屋からの退出行動を再現した [15,16]。しかしながら、群集を構成する各歩行者の心理学的特性については十分に考慮されておらず、平常時の挙動が再現されていなかった。よく知られているように、人間の行動はその心理学的特性を反映して大きく変化する。したがって、予測シミュレーションに際しても状況などの外的要因に応じた心理状態と、これに起因した行動特性をモデルへ含める必要がある。

群集の心理状態は、平常時と避難時では大きく異なり、その差異は動的な特性に顕著に現れる [10]。とくに避難時では、混雑が発生すると人間同士の衝突、押し合い、またこれらによる摩擦などが発生する [10]。一方、平常時ではパーソナルスペースの効果が支配的になる。本報告では、平常時の挙動を再現するために、MLD システム表現に基づいた群集挙動モデルにパーソナルスペースの論理を導入する。

パーソナルスペースとは人間の周囲に存在する心理的

* 原稿受付 2013 年 2 月 4 日

[†] 首都大学東京大学院 システムデザイン研究科 Graduate School of System Design, Tokyo Metropolitan University; 6-6, Asahigaoka, Hino city, Tokyo 191-0065, JAPAN

Key Words: pedestrian flow, personal space, hybrid system, mixed logical dynamical system, model predictive control.

な空間領域であり、人間はこの空間内に他人や障害物が侵入しないように行動する [17–19]。パーソナルスペースは、群集の相互の位置関係、密度、歩行空間のレイアウトなど外的要因、および性別などの個体の特徴により大きさや形状が変化することが指摘されている [17–19]。これまで、高橋・西出らは、静止した人間が不快と感じる空間領域を明らかにした [17]。また、歩行者と障害物に対する回避開始時の間隔についても明らかにされてきた [20,21]。

群集モデルの研究においては、パーソナルスペースの大きさを一定にしたものが多い [22,23]。このため、歩行空間のレイアウトによっては実際の歩行現象を再現できない可能性がある。よってパーソナルスペースは属性や状況に応じて可変にするのが望ましい。しかしながら、群集の中にはさまざまな属性をもった歩行者が混在し、歩行空間のレイアウトも多様であることから、一人一人厳密にモデル化するのはモデルの複雑化を招く。そこで、本研究では群集密度に着目した。群集密度は群集モデルの評価の際にも用いられる重要な要素であり、パーソナルスペースの大きさに強く影響する。また、文献 [18,24] では、密度が高くなると人間はパーソナルスペースを小さくすることを指摘している。

本研究では、1) 人間はパーソナルスペースに他人が入らないように行動すること、2) 密度が高くなると人間はパーソナルスペースを小さくすること、に着目し、既報 [15] の群集挙動モデルにパーソナルスペースの効果を取り入れる。そして、ボトルネック通過や通路などさまざまな状況下でのシミュレーションを行い、モデルの妥当性を検証する。

以下では、はじめに MLD システム表現を用いた群集挙動のモデリングについてまとめ、基本的なアルゴリズムを整理する (2 節)。つぎにハイブリッドシステムモデルにパーソナルスペースの論理を導入する (3 節)。提案した群集モデルに基づき、1) 対面歩行とボトルネック通過、2) ボトルネック通過における障害物配置、3) 2 方向の合流、のシミュレーションを行い、流動係数・密度・退出時間の関係から、パーソナルスペースの効果を検討する (4 節)。

2. 群集挙動のモデリング

本節では、既報 [15] で述べられている群集挙動モデルの基本事項を整理する。群集挙動のモデリングのため、はじめに歩行者の基本モデルと経路計画に関する基本的なアルゴリズムについて説明する。歩行者は質点系として表し、歩行者の自律的な行動は各離散時間によるモデル予測制御により求められた制御入力から表現する。

2.1 歩行者の基本モデル

歩行空間を Fig. 1 のように定め、歩行者が障害物を回避しながら目標点まで歩行するアルゴリズムを示す。

歩行行動に関する特性を質点 m [kg] の運動とみなし、加速、減速の緩慢さを抵抗係数 μ [Ns/m] で表現する。 x 方向、 y 方向の変位を x [m]、 y [m]、歩行速度を v_x [m/s]、 v_y [m/s]、それぞれの方向に働く力を f_x [N]、 f_y [N] とすると、対応する運動方程式は、

$$m\ddot{x} + \mu\dot{x} = f_x \quad (1)$$

$$m\ddot{y} + \mu\dot{y} = f_y \quad (2)$$

となり、状態方程式はつぎのように求められる。

$$\dot{s} = A_c s + B_c u \quad (3)$$

$$s = [x, y, v_x, v_y]^T, \quad u = [f_x, f_y]^T$$

$$A_c = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -\frac{\mu}{m} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{\mu}{m} \end{bmatrix}, \quad B_c = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ \frac{1}{m} & 0 \\ 0 & \frac{1}{m} \end{bmatrix} \quad (4)$$

ここで、上式をサンプル時間 h [s] で離散化するとつぎの状態方程式が得られる。

$$s(t+1) = A_d s(t) + B_d u(t), \quad t=0,1,2,\dots \quad (5)$$

$$s(t) = [x(t), y(t), v_x(t), v_y(t)]^T$$

$$u(t) = [f_x(t), f_y(t)]^T$$

$$A_d = e^{A_c h}, \quad B_d = \int_0^h e^{A_c \tau} d\tau B_c \quad (6)$$

ここでは文献 [13,14] などの検討に基づき、 $m=60$ [kg]、 $\mu=20$ [Ns/m] とした。また、歩行者の速度の上限を $v_{\max}$ [m/s] と表す。このとき、速度の制約

$$0 \leq \sqrt{v_x^2 + v_y^2} \leq v_{\max} \quad (7)$$

は線形不等式により 16 角形に近似し、次式のように表す。

$$(v_x, v_y) \in D(v_{\max}) \quad (8)$$

時刻 t における状態 s 、入力 u を

$$s(t|t) = [x(t|t), y(t|t), v_x(t|t), v_y(t|t)]^T \quad (9)$$

$$u(t|t) = [f_x(t|t), f_y(t|t)]^T \quad (10)$$

と表し、入力列を

$$U := \{u(t|t), u(t+1|t), \dots, u(t+N-1|t)\} \quad (11)$$

とすると、状態の予測値

$$s(t+k|t) = [x(t+k|t), y(t+k|t), v_x(t+k|t), v_y(t+k|t)]^T \quad k=1,2,\dots,N \quad (12)$$

は、(5) 式から求められる。そして、Fig. 1 の障害物に対して、左下と右上の座標をそれぞれ $(x_{\min}, y_{\min})$ 、

$(x_{\max}, y_{\max})$ と与えると、回避しながら歩行する条件は、各時刻でつぎのように表される。

$$\begin{cases} x(t+k|t) \leq x_{\min} + M\delta_1(t+k|t) \\ -x(t+k|t) \leq -x_{\max} + M\delta_2(t+k|t) \\ y(t+k|t) \leq y_{\min} + M\delta_3(t+k|t) \\ -y(t+k|t) \leq -y_{\max} + M\delta_4(t+k|t) \\ \sum_{l=1}^4 \delta_l(t+k|t) \leq 3 \end{cases} \quad (13)$$

ここで、 $\delta_1(t+k|t), \delta_2(t+k|t), \delta_3(t+k|t), \delta_4(t+k|t)$ は状態 (5) に対応して導入した 0-1 変数であり、 M は障害物の横幅 ($x_{\max} - x_{\min}$)、縦幅 ($y_{\max} - y_{\min}$) に比べて十分大きな正数である。

つぎに目標点を $s_f = [x_f, y_f, 0, 0]^T$ と与え、(5) 式に対する評価関数を、

$$J = \sum_{k=0}^{N-1} \{ (s(t+k|t) - s_f)^T Q (s(t+k|t) - s_f) + u(t+k|t)^T R u(t+k|t) \} \quad (14)$$

$$Q \geq 0, R > 0$$

と定めると、歩行者が経路を決定する問題は、以下の混合整数 2 次計画問題にまとめられる。

$$\begin{aligned} \min_U J, U := \{u(t|t), u(t+1|t), \dots, u(t+N-1|t)\} \\ \text{subj.to} \begin{cases} \text{状態方程式 (5)} \\ \text{位置・速度の制約 (8), } k=0, \dots, N-1 \\ \text{衝突回避条件 (13)} \end{cases} \end{aligned} \quad (15)$$

すなわち、最適化問題 (15) を receding horizon で解くことにより、目的地に到達する各歩行者の歩行行動が表現できる。

また、歩行者自身の大きさ (占有領域) を考慮するために、周囲の障害物との位置関係に関する制約を Fig. 2 のように定めることにする。注目している歩行者の大きさが D [m] 四方であるとき、他の歩行者、障害物の占有領域は Fig. 2 のように変更して表すことにする。このような変更により、歩行者の経路計画問題は、歩行者を質点とみなした基本問題 (14), (15) に帰着される。

2.2 群集内の相互作用

2.1 節の考察により、障害物を回避する基本的な歩行行動が MLD システムのモデル予測制御により表現できることを述べた。本節では、さらに建築分野で明らかにされた群集内での歩行行動の特徴 [11,12] を反映させ、群集挙動のモデリングに必要な条件について整理する。

本研究では、文献 [2] に基づき、歩行行動の特徴としてつぎのような (1) 歩行速度調節モード、(2) 停止・回避行動のモード、(3) 追従行動のモード、を導入する。

(1) 歩行速度調節モード

歩行者は歩行空間の部分的な情報から周囲の歩行

Fig. 1 Basic problem

Fig. 2 Equivalent occupied region

者を認識し、歩行速度とモードを選択すると考えられる [2,11,12]. ここでは歩行者 i の認識領域を Fig. 3 のように表す。そして、認識領域 (Fig. 3) の歩行者の数に応じて、(7) 式の $v_{\max}$ の値を、

$$v_{\max} = 0.5 \cdot v_{\max}^0 + 0.5 \cdot \frac{1}{N} v_{\max}^0 \quad (16)$$

と変化させることにする。ここでの $v_{\max}^0$ は他の歩行者が存在しないときの上限値とする。

(2) 停止・回避行動のモード

歩行者は認識領域内にいる最も影響をおよぼす他の歩行者との関係により、いくつかのモードを選択すると考えられている [12]. ここでは最も影響をおよぼす他の歩行者を選び、その歩行者との位置と速度の関係により、停止・回避のモードを Fig. 4 に基づいて定める。既報 [15] では、Fig. 4 中の距離を定めたパラメータ R, L を、それぞれ $R = k_R \cdot |v_i - v_j|$, $L = k_L \cdot |v_i - v_j|$ と与え、つぎのモードを導入している。

- (i) 停止行動: Fig. 4 のように歩行者 i が円内に入ったとき歩行者は停止する。そして本モードでは、モデル予測制御の計算を 1 ステップぶん行わない。
- (ii) 回避行動: Fig. 4 のように歩行者 i が円外かつ長方形内の領域に存在するとき、回避行動をとるとする。そして Fig. 3 の領域 (斜線部) を一時的に禁止領域として定め、この制約条件を (15) 式に加えモデル予測制御問題を解くことにより歩行者 i が回避する動きを表現する。
- (3) 追従行動のモード

Fig. 3 Recognition region of pedestrian

Fig. 4 Stopping and avoidance mode

先行する歩行者がほぼ同じ方向に歩いているとき、後ろを歩く歩行者は追従し、他の歩行者との衝突を回避する傾向がある [12]. そこで、歩行者が停止・回避領域外に存在するとき、先に設定した最も影響を与える歩行者 j が目標点への進行を遮っており、速度ベクトルが近い場合、歩行者 j を目標点に変更したモデル予測制御問題を解き、追従行動を表現する。

群集挙動のシミュレーションにおいて、各歩行者の経路計画は、視界、建築物・他の歩行者の状況により、さまざまな影響を受ける。上述のモードのうち (2), (3) は、これらの歩行行動の特徴を、基本モデル (2 節) に反映させるために設けたものであり、混雑の状況によって制約条件、目標座標を修正しながら経路計算が行われる。

実際の経路計算では、歩行者間の制約条件の競合を避けるため、離散時間化した群集の挙動を以下の手順により計算している [15].

- 1) 最適化問題 (15) を解く歩行者の順番をあらかじめ決めておく。
- 2) ある歩行者の経路計画を最適化問題 (15) により求めたら、1 サンプル時間ぶんその歩行者の状態 (位置, 速度) を更新する。
- 3) 2) の歩行者の状態を更新したあと、つぎに計算の順番が来た歩行者に対して同様の経路計算を行い、歩行者の状態 (位置, 速度) を 1 サンプル時間ぶん更新する。
- 4) すべての歩行者の状態が 1 サンプル時間ぶん更新されたら、シミュレーションの時刻を 1 サンプル時間ぶん進める。

Fig. 5 Transition of the obstacle avoidance constraints modified from [25]

2.3 その他の条件

計算時間を短縮するために、文献 [25] で示された根らの遷移制約を導入する。ここで γ_{1k}, γ_{2k} は 0-1 変数である。

$$\begin{cases} \delta_1(t+k|t) + \delta_1(t+k+1|t) \leq M\gamma_{1k} + M\gamma_{2k} \\ \delta_2(t+k|t) + \delta_2(t+k+1|t) \leq -M\gamma_{1k} + M\gamma_{2k} + M \\ \delta_3(t+k|t) + \delta_3(t+k+1|t) \leq M\gamma_{1k} - M\gamma_{2k} - M \\ \delta_4(t+k|t) + \delta_4(t+k+1|t) \leq -M\gamma_{1k} - M\gamma_{2k} - 2M \end{cases} \quad (17)$$

(17) 式に設けた制約条件は、障害物周辺の動きを Fig. 5 (b) のように制限したものである。これは離散時間のシミュレーションにおいて、Fig. 5 (a) に含まれる不自然に障害物を飛び越す現象を除外するものである。この制約条件を取り入れ、サンプル時間を $h = 0.25$ [s], 予測ホライズンを $N = 3$ に設定した場合のシミュレーション結果は、文献 [15] のシミュレーション結果に対応しており、計算時間も 10 分の 1 以下に削減できている。よって、この条件でシミュレーションを行うものとする。

3. パーソナルスペース

2 節で述べたモデルに関し、新たにパーソナルスペースの効果を反映させる。1 節で述べたとおり、パーソナルスペースは歩行者の属性や状況に応じて大きさや形状が変化することが知られている [17–19]. 本節では、1) 人間はパーソナルスペースに他人が入らないように行動すること、2) 密度が高くなると人間はパーソナルスペースを小さくすること、の二つの特徴を群集挙動モデルに反映させる。

文献 [17–19, 24] では、人間はパーソナルスペースに他人が入らないように行動することを指摘している。本モデルではパーソナルスペースを Fig. 6 のような、歩行者から距離 $\epsilon_{\max}(n)$ [m] の正方形の領域とする。パーソナルスペースは一般に非対称であるが、簡略化のため正方形とした。以下に表すように、(13) 式の障害物回避制約を (18) 式に、(14) 式の評価関数を (20) 式に変更し制約条件を加えた。

Fig. 6 Personal space

$$\begin{cases} x(t+k|t) \leq (x_{\min} - \epsilon(t+k|t)) + M\delta_1(t+k|t) \\ -x(t+k|t) \leq -(x_{\max} + \epsilon(t+k|t)) + M\delta_2(t+k|t) \\ y(t+k|t) \leq (y_{\min} - \epsilon(t+k|t)) + M\delta_3(t+k|t) \\ -y(t+k|t) \leq -(y_{\max} + \epsilon(t+k|t)) + M\delta_4(t+k|t) \\ \sum_{l=1}^4 \delta_l(t+k|t) \leq 3 \end{cases} \quad (18)$$

$$0 \leq \epsilon(t+k|t) \leq \epsilon_{\max}(n) \quad (19)$$

$$J = \sum_{k=0}^{N-1} \{ (s(t+k|t) - s_f)^T Q (s(t+k|t) - s_f) + u(t+k|t)^T R u(t+k|t) - c \epsilon(t+k|t) \}, \quad (20)$$

$$Q \geq 0, R > 0, c > 0$$

$$c = r \|s_{t|t} - s_f\|^2, r > 0 \quad (21)$$

ここで、(20) 式は目標点へ近づく、もしくは他の歩行者と距離を離すことで値が小さくなる評価関数である。(20) 式の第 3 項は 1 次式とし、これにより凸 2 次計画問題に帰着できる。また評価関数の変化率は歩行者と目標点との距離によって変化する。目標点への移動とパーソナルスペースの維持に関して適当な均衡を保つために、評価関数の重み c を (21) 式のように定めた。これらにより、歩行者が他の歩行者をなるべくパーソナルスペース内に入れないように歩行する現象を表現できる。

文献 [18,24] では、密度が高くなると人間はパーソナルスペースを小さくすることを指摘している。この現象を本モデルで再現するために、以下の制約を取り入れた (Fig. 7)。

$$\epsilon_{\max}(n) = \begin{cases} \epsilon_{\max 0}, & n \leq 5 \\ 0.1\epsilon_{\max 0}(15-n), & 5 < n \leq 15 \\ 0, & 15 < n \end{cases} \quad (22)$$

パーソナルスペースの形状は、文献 [17,18,24] において基本的な特徴が報告され、とくに文献 [24] において

Fig. 7 The maximum value of personal space

は、群集の特徴に応じて歩行者間の間隔が、1.0 [m] から 2.0 [m] の範囲で変化することが示されている。本論文では、Fig. 6 のようにパーソナルスペースを正方形の領域で簡略化したため、歩行者間の距離は、 x, y 軸方向で $D + \epsilon(n)$ [m]、対角方向で $\sqrt{2} \cdot (D + \epsilon(n))$ まで変化する (Table 1)。以下のシミュレーションでは $\epsilon_{\max 0} = 0.5$ と定めて、パーソナルスペースと群集挙動の関係を考察する。この値は、歩行者間の距離を x, y 軸方向で 0.9 [m]、対角方向で 1.3 [m] と想定したことに対応し、比較的パーソナルスペースが小さい通勤群集の挙動に相当する。

4. シミュレーションと評価

本節では、3 節で示した群集モデルに基づいてシミュレーションを行い、平常時の歩行を再現しているか検証する。まず 4.2 節ではパーソナルスペースに大きな影響を与える係数である r を定めるため、通路とボトルネック通過の二つのシミュレーションを行う。つぎに、4.2 節により決定した r を用いて、4.3 節でボトルネックにおける障害物の効果 [5,6] を検証し、4.4 節では合流シミュレーションを行いパーソナルスペースの論理の特徴を確認する。

4.1 シミュレーション条件

各パラメータは Table 1 に示す。2.3 節の検討に基づき、サンプル時間は $h = 0.25$ [s]、予測ホライズンは $N = 3$ と定めた。質量 m の値にはさまざまな分散が考えられるが、今回は代表例として一定とした。また μ の値は、文献 [14] で歩行者の軌跡とシミュレーション結果の対比から調べられており、本研究でも同じ値を採用した。

一方、歩行者間で回避、追従の行動を表現するアルゴリズムは 2.2 節で記述したとおり、認識領域によって制約、目標点の変更が定められている。このことより本手法では近い距離の回避動作はモデル予測制御により考慮し、遠い距離での経路計画は回避、追従のモードによって考慮している。

4.2 対面歩行とボトルネック通過

本節では、少人数と大人数の場合でパーソナルスペースが、評価関数の重み r によりどのように機能するかを

Table 1 Parameters of simulation model

パラメータ	値	説明
h [s]	0.25	サンプル時間
N	3	予測ホライズン
m [kg]	60	歩行者の質量
μ [Ns/m]	20	歩行者の速度の緩慢さを表す抵抗係数
Q	diag (1,1,0,0)	位置, 速度に対する重み
R	$10^{-5} * I_2$	入力に対する重み
D [m]	0.4	歩行者の大きさ (Fig. 2)
l [m]	2.0	認識領域の半径 (Fig. 3)
θ [rad]	$\pi/3$	認識領域を定めるための進行方向との偏角 (Fig. 3)
k_L	0.7	停止・回避領域における長方形の1辺 L の算出に用いる比例定数 (Fig. 4)
k_R	0.2	停止・回避領域における円の半径 R の算出に用いる比例定数 (Fig. 4)
r	0.1	パーソナルスペースに対する重み
$\epsilon_{\max 0}$	0.5	パーソナルスペースの最大幅

検証するために、対面歩行と狭部通過のシミュレーションを行う。

Fig. 9, 10 は、Fig. 8(a) に示す狭い通路で歩行者同士がすれ違った場合であり、互いが通路幅と対向者を考慮したうえで可能な限りパーソナルスペースを維持しようとする挙動が確認できる。ここで、 $r=0.2$ の場合、両者はすれ違わずに対面したまま紙面上方へ動く。これは、重み r の値が Q , R の値に比べて大きくなり、目標点へ向かうことよりもパーソナルスペースを維持することが優先されたためである。

Fig. 11 は、Fig. 8(b) に示すレイアウトの部屋から群集が退出する挙動結果であり、人数は 99 名とした。また、本シミュレーションにおいては、各歩行者の目標点を出口中央から、右側 20 [m] の地点に定め (Fig. 8)、出口

Fig. 8 Floor layout

Fig. 9 Simulation result: $r = 0.1$ Fig. 10 Simulation result: $r = 0.2$

Fig. 11 Simulation results

から 3 [m] 以上右側に離れた時点で経路計算を打ち切っている。 $r=0.1$ の場合は、 $r=0.2$ の場合に比べ出口付近の密度が高く、アーチが形成されているのが確認できる。また $r=0.1$ の場合は最大密度が 4.0 [person/m²] ほどであり、これは実際に同様の条件下で観測される値とおおむね一致する [26,27]。

以上より、重み r を 0.1 に設定した場合、提案した群集挙動モデルにより、対面歩行、およびボトルネック通過シミュレーションで妥当な結果を示すことが確認でき

た. よって $r=0.1$ を用いて以降のシミュレーションを行う.

4.3 障害物配置の効果

ボトルネック通過のシミュレーションを行い, 障害物配置の効果 [5,6] を確認する. 一般に避難時においては, 歩行者はパーソナルスペースを確保せずにボトルネック部分に集中し, 平常時においては, パーソナルスペースを維持し, 競合状態を回避しながら歩行する傾向がある. 本節では, 避難時, 平常時の歩行行動をパーソナルスペースの論理の有無に対比させて, その効果を調べる. Fig. 12 はレイアウトであり, シミュレーション条件と結果は Table 2 のようにまとめられる. ここで, Case 1, 2 がパーソナルスペースの論理を導入していない場合 (緊急時), Case 3 がパーソナルスペースを導入した場合 (平常時) に対応する. また, Case 2, 3 に対応するシミュレーションレイアウトは Fig. 14, 15 のように示される¹.

Table 2 より, Case 1, 2 では, 障害物を配置した場合に, 退出時間が短縮されたことが確認できる. 停止回数と退出時間の関係を見ると, 停止の割合が増えるにつれ, 退出時間に差が出ている. Fig. 14 を見ると群集の形状に違いができており, その結果衝突回数に差が現れ,

Fig. 12 Floor layout

Fig. 13 Initial placement: layout (a)

¹Fig. 8 と同様に, 各歩行者の目標点は, 出口中央から右側 20 [m] の地点に定めた.

Table 2 Simulation conditions and results

	パーソナル スペース	障害物	退出時間 [s]	停止の割合
Case 1 $k_R=0.2$	なし	あり	57.25	0.0725
		なし	58.50	0.0774
Case 2 $k_R=1.0$	なし	あり	84.25	0.1507
		なし	88.25	0.1915
Case 3 $k_R=0.2$	あり	あり	64.00	0.0500
		なし	63.50	0.0493

退出時間に影響したと考えられる. Case 3 では退出時間が短縮されていない. これは停止行動の割合が少なく, パーソナルスペースの論理が機能しているためと考えられる.

以上の結果から, 1) 衝突による停止回数が増えるにつれて, 障害物配置の効果が顕著に表れていき, 2) パーソナルスペースにより, 障害物配置の効果が表れなくなっていることがわかる. この結果は, 文献 [5,6] の衝突しやすい状況では効果が表れ, 平常時では表れないという結果と対応する. よってパーソナルスペースの論理を取り入れることでボトルネック通過における平常時の特徴を再現できているといえる.

4.4 合流シミュレーション

本節では, 混雑に応じてパーソナルスペースがどのように変化するか確認するため, 合流シミュレーションを行う.

レイアウトを Fig. 16 のように定める. ここで Case (a) は図中の下から上へ移動する歩行者の流れに右から左へ移動する歩行者が合流する場合であり (順方向合流), 一方 Case (b) は左右から中央に移動する歩行者が方向を変えながら合流する場合である (逆方向合流) [28]. 順方向合流, 逆方向合流のシミュレーション結果は Fig. 17, 流動係数は Table 3 のようにまとめられる².

Fig. 17 では歩行者が適度に距離を保ちながら移動する様子が確認され, 混雑状況に応じてパーソナルスペースを変化させ歩行する現象が確認できた. Case (a) で, 右から左に向かう歩行者は, 下から上に向かう歩行者に比べ, すみやかに合流地点を通過している. 一方 Case (b) ではどちらの群集も曲がり角付近で混雑している. そのため, Case (a) に比べ流動係数が下がっている.

本結果は, 文献 [28] で観察された現象と対応しており, また文献 [15] で報告された群集モデルでは, 再現が確認できなかった現象である. これらの条件の対比から, 群集の合流現状においてもパーソナルスペースに関する論理が適切な挙動を表現する重要な要素になると考えら

²Fig. 17 (a), (b) において, 各歩行者の目標点は, (a) 通路出口中央左側 2 [m], (b) 通路出口中央下側 1.5 [m] の地点に定め, 歩行者が通路から出た時点で経路計算を打ち切っている.

Fig. 14 Simulation results: Case 2

れる。

5. おわりに

本論文では、既報 [15] に示された群集挙動モデルに、パーソナルスペースの論理を取り入れることにより、適切な群集挙動を生成するシミュレーションモデルが構築できることを示した。そして、歩行者が他の歩行者や障害物と一定のスペースを維持しようとする論理を導入することにより、1) 障害物が配置された場合、群集固有の挙動が生成され、その効果がパーソナルスペースの論理と密接に関係すること、2) 周囲の混雑状況に応じてパーソナルスペースの大きさを変化させる挙動が再現さ

Fig. 15 Simulation results: Case 3

Fig. 16 Floor layout

Table 3 Simulation conditions and results

合流の種類	平均流動係数 [person/m/s]
Case (a) 順方向合流	0.57
Case (b) 逆方向合流	0.35

れること、を確認した。これにより、平常時の特徴を取り入れた群集モデルが構築され、本モデルが避難時や平常時のさまざまな状況下で有効に機能することが示された。今後、さらに群集流の交差などの相互作用を検証し、提案モデルの有用性を評価するとともに、歩行者（エージェント）の近距離の相互作用と群集全体の動特性の関係について、検討を進める予定である。

謝 辞

本研究は、科学研究費補助金（挑戦的萌芽研究 22656096）により行われた。記して謝意を表する。

Fig. 17 Simulation results

参考文献

- [1] 堀内, 田中, 室崎: 大地震火災時の群集避難計画に関する研究 (その 1); 日本建築学会近畿支部研究報告集, 計画系, Vol.13, pp.1-4 (1973)
- [2] 小林, 堀内: オフィスビルにおける火災時の人間行動の分析 (その 1); 日本建築学会論文報告集, Vol.280, pp.137-142 (1979)
- [3] 小林, 堀内: オフィスビルにおける火災時の人間行動の分析 (その 2); 日本建築学会論文報告集, Vol.284, pp.119-125 (1979)
- [4] 戸沼, 根岸: 歩行空間における人間行動 (その 1); 日本建築学会学術講演梗概集計画系, Vol.58, pp. 2127-2128 (1983)
- [5] D. Helbing, L. Buzna, A. Johansson and T. Werner: Self-organized pedestrian crowd dynamics: experiments, simulations, and design solutions; *Transportation Science*, Vol.39, pp.1-24 (2005)
- [6] A. Kirchner, K. Nishinari and A. Schadschneider: Friction effects and clogging in a cellular automaton model for pedestrian dynamics; *Phys. Rev. E* 67, 056122 (2003)
- [7] 岡田: 群集安全工学, 鹿島出版協会 (2011)
- [8] D. Helbing and P. Molnar: Social force model for pedestrian dynamics; *Physical Rev. E* 51 pp.4282-4286 (1995)
- [9] D. Helbing, I. Farkas and T. Vicsek: Simulating dynamical features of escape panic; *Nature* (London), Vol.407, pp.487-490 (2000)
- [10] D. Helbing, I. J. Farkas, P. Molnar and T. Vicsek: *Simulation of Pedestrian Crowds in Normal and Evacuation Situations*, Springer, pp.21-58 (2002)
- [11] 岡崎: 建築空間における歩行のためのシミュレーションモデルの研究 (その 1); 日本建築学会論文報告集, Vol.283, pp.111-119 (1979)
- [12] 岡崎: 建築空間における歩行のためのシミュレーションモデルの研究 (その 2); 日本建築学会論文報告集, Vol.284, pp.101-110 (1979)
- [13] G. Tanaka and A. Kojima: A modeling of crowd behavior based on model predictive control; *Proc. of SICE-ICCAS International Joint Conference 2006*, CD-ROM, pp.5120-5124 (2006)
- [14] A. Kojima and G. Tanaka: A modeling of pedestrian dynamics in crowd based on MLD system approach; *Proc. of 17th International Symposium on Mathematical Theory of Network and Systems (MTNS2006)*, pp.634-637 (2006)
- [15] 幸加木, 児島: MLD システム表現に基づく群集挙動のモデリング; システム制御情報学会論文誌, Vol.23, No.7 pp.139-146 (2010)
- [16] A. Kojima, T. Koukaki and Y. Mitamura: A modeling of pedestrian flow based on a hybrid system approach; *IEEE International Conference on Control Applications 2010*, pp.2362-2367 (2009)
- [17] 高橋, 高橋, 初見, 西出, 川嶋: 空間における人間集合の研究 -Personal Space の概念の空間への適用-; 日本建築学会関東支部研究報告集, Vol.52, pp.165-168 (1981)
- [18] 渋谷: 人と人との快適距離 -パーソナルスペースとは何か-, pp.23-24, 日本放送出版協会 (1990)
- [19] 林田, 山本, 石突, 渡辺: 駅のネック箇所における群集歩行の圧縮解放に関する研究; 日本建築学会関東支部研究報告集, Vol.79, pp.77-80 (2009)
- [20] 建部, 辻本, 志田: 回避行動開始点の判定と前方回避距離 -歩行者の回避行動に関する研究- (II); 日本建築学会計画系論文集, Vol.465, pp.95-104 (1994)
- [21] 高久, 柳瀬: 建築空間における通路幅に関する実験的研究 -すれ違い及び回避行動と印象評価の関係-; 日本建築学会北陸支部研究報告集, Vol.51, pp.535-538 (2008)
- [22] 劉, 大枝, 角: パーソナルスペースを用いた障害物を回避する歩行者の群集流動; 土木学会論文集 D, Vol.64, No.4, pp.513-524 (2008)
- [23] 阿久津, 田口: 駅構内における群集歩行シミュレーションモデルの研究, 中央大学大学院理工学研究科情報工学専攻修士論文 (2006)
- [24] 加藤, 上原, 中村, 吉岡: 群集対向流動の解析; 日本建築学会論文報告集, Vol.289, pp.119-129 (1980)
- [25] 根, 福島, 松野: 予測時刻間の障害物回避を考慮したモデル予測制御に基づく軌道計画法; 計測自動制御学会論文集, Vol.45, No.8, pp.406-408 (2009)
- [26] 毛利, 塚口: 歩行路における歩行者挙動に関する研究; 土木学会論文報告集, Vol.268, pp.99-108 (1977)
- [27] 内田: 電車站の乗降場及び階段幅員; 鉄道技術研究所中

間報告, pp.7-91 (1956)

- [28] 角方, 竹市, 木村, 吉田, 佐野, 大宮, 渡辺: 全館避難を想定した階段室における群集合流の実験; 日本建築学会関東支部研究報告集, Vol.75, pp.261-264 (2005)

著者略歴

い が くら たか し
猪 鹿 倉 貴 史

1988年3月31日生。2011年首都大学東京システムデザイン学部システムデザイン学科ヒューマンメカトロニクスシステムコース卒業, 2013年首都大学東京システムデザイン研究科ヒューマンメカトロニクスシステム学域博士前期課程修了。現在, 株式会社 enish に勤務。在学中はハイブリッドシステム表現を用いた群集挙動のモデリングの研究に従事。

し みず つよし
清 水 剛

1986年4月6日生。2010年首都大学東京システムデザイン学部システムデザイン学科ヒューマンメカトロニクスコース卒業, 2012年首都大学東京システムデザイン研究科ヒューマンメカトロニクスシステム学域博士前期過程修了。現在, トヨタ自動車株式会社に勤務。在学中はハイブリッドシステム表現を用いた群集挙動のモデリングの研究に従事。

い し ば し りょう た
石 橋 良 太

2003年立命館大学理工学部ロボティクス学科卒業, 同年同大学大学院フロンティア理工学専攻一貫制博士課程に入学。2008年名古屋工業大学研究員, 2010年首都大学東京助教, 現在に至る。ロボティクス・ハプティクス, システム制御に関連した研究に従事。博士(工学)。人間・生物の知覚制御機構, 運動神経生理学やスポーツ科学に興味をもつ。

こ じま あきら
児 島 晃 (正会員)

1991年早稲田大学大学院理工学研究科博士後期課程修了。同年, 東京都立科学技術大学講師, 1997年同助教授, 2004年首都大学東京教授となり。現在に至る。2000-2001年スイス連邦工科大学 (ETH) 自動制御研究所客員研究員。モデル予測制御とその応用, ロバスト制御, むだ時間系をはじめとする分布系の制御などの研究に従事。工学博士。IEEE, 計測自動制御学会, 日本鉄鋼協会, 電気学会などの会員。