MLD システム表現に基づく群集挙動のモデリング*

幸加木 徹[†]・児島 晃[‡]

A Modeling of Pedestrian Flow Based on MLD System Approach*

Toru KOUKAKI[†] and Akira KOJIMA[‡]

A simulation model of pedestrian flow is introduced based on Mixed Logical Dynamical (MLD) system approach. Typical phenomena in the evacuation flow are generated with the proposed model and, further, it is verified that improved outflows can be reached by obstacles placed asymmetrically in front of the exits. The feature of the congestion in the evacuation is also discussed in terms of the flow coefficient.

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を評価することに役立ち、災害時、避難行動を円滑に誘導するための手段として有効であると考えられている [1–5]。とくにパニック時の行動を実証することは危険を伴うと考えられるので、歩行者の挙動を再現できる精巧なシミュレーションモデルが求められている [5]。

現在まで、さまざまなアプローチにより群集挙動のシミュレーションが行われている。文献 [5–8] で提案されたモデルは、すべての歩行者の間や障害物、壁などとの作用に仮想的なポテンシャルを設け群集挙動を記述したものであり、さまざまな斥力を定めシミュレーションが行われている。このモデルは、ロボティクス分野における人工ポテンシャル法 [9,10] と共通した接近法であり、複雑なフィールドにおいてはさまざまな斥力を適切に定め、停留点を解消したうえで群集挙動を表現する必要がある。とくに文献 [7] では通路での歩行者の流量の変化が調べられ、障害物を出口正面から非対称に配置すると

退出時間が短縮されることが示されている。そしてこれらの結果から、将来、駅やスタジアムなどの公共施設において、群集の流れがよくなるような設計の改善案についてまとめられている [5]。また、文献 [11,12] で提案されたモデルは、歩行者、障害物をセルオートマトンで扱い、群集挙動を状態遷移により表したものであり、広域でのシミュレーションを容易に扱うことができる。そして文献 [11] では障害物の配置による効果 [7] を提案モデルで再現し、モデルの妥当性を評価している。しかしながら、1) 出口付近に歩行者が集中する現象を表現するためには、あらかじめ状態遷移を適切に定め調整する必要があること、2) 出口の幅などシミュレーションの設定がセルの大きさにより制限されることが報告され、さらに考察が進められている [12]。

一方、システム制御分野ではハイブリッドシステム表現とその制御法への応用に関する研究が進められ、対象のモード遷移を含めた記述能力の高い表現が開発されてきた [13,14]。そして、これらの手法は制御対象のダイナミクスとモードを同時に扱うことを可能にするため、人間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可能性がある。

本研究では、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) 表現を用いて群集挙動のモデリングを行う [13]。そして、建築分野で明らかにされてきた現象が MLD システム表現に基づいて再現できることを示す。群集挙動を表現するためには、歩行者一人一人の基本的な経路計画をモデル化し、障害物に対応する経路計画の変更などの

* 原稿受付 2009 年 10 月 9 日

[†] 本田技研工業 (株) Honda Motor Co., Ltd.; Minami-aoyama 2-1-1, Minato-ku, Tokyo 107-8556, JAPAN[‡] 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; Asahigaoka 6-6, Hino-city, Tokyo 191-0065, JAPAN**Key Words:** model predictive control, mixed logical dynamical system, pedestrian flow.

論理を整理する必要がある。さらに、群集内では歩行者の複雑な運動を他の歩行者との相互作用によって表現することが必要である。そこで本考察では、1) 目標点に至る歩行行動、2) 障害物の回避、3) 他の歩行者との相互作用、を MLD システム表現より表し、歩行行動を歩行者のモデルに印加する外力により表現することを考える。そして、各歩行者に印加される外力をモデル予測制御により求めて、群集の自律的な動きを表現する。

本手法を、文献[5-8]と対比させた場合、1) 障害物や壁などの配置、他の歩行者との相互作用が容易に定義できること、2) 経路計画にモデル予測制御を用いるため、複雑な経路計画に基づく挙動が表現できること、が特徴にあげられる。また、文献[11,12]と比較した場合、各歩行者の座標、壁や出口の大きさを連続量で扱うことが可能であり、さまざまな設定における挙動が同一のモデルにより調べられると考えられる。

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)。つぎに提案した群集モデルに基づき、部屋からの避難行動のシミュレーションを行い、流動係数[18]との関係から、退出時の障害物配置による効果を検討する(3節)。

2. 群集挙動のモデリング

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を整理する。歩行者は質点系の運動により表し、また歩行者の自律的な行動は、離散時間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ことにする。

2.1 歩行者の基本モデル

人間の歩行行動に関する特性を質点 $m[\text{kg}]$ の運動とし、加速、減速の緩慢さを抵抗係数 $\mu[\text{Ns/m}]$ で表現する。 x 方向、 y 方向の変位を $x[\text{m}]$, $y[\text{m}]$ 、歩行速度を $v_x[\text{m/s}]$, $v_y[\text{m/s}]$ 、それぞれの方向に働く力を $f_x[\text{N}]$, $f_y[\text{N}]$ 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。

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

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

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

そして、サンプル時間 $h[\text{s}]$ で離散化すると、つぎの状態方程式が得られる。

Fig. 1 Basic problem

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

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

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

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

ここでは文献[20,21]などの検討に基づき、 $m = 60[\text{kg}]$, $\mu = 20[\text{Ns/m}]$ とした¹。また、歩行者の速度の上限を $v_{\max}[\text{m/s}]$ とし、歩行行動を考える。速度制約は

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

を線形不等式により 16 角形近似したものをを用い、次のように表すことにする。

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

つぎに、Fig. 1 の例を用いて、歩行者が障害物を回避しながら目標点まで歩行する基本的なアルゴリズムを説明する。時刻 t における状態 s 、入力 u を

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

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

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

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

$$k = 1, 2, \dots, N$$

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、

¹文献[20,21]において、実際に対向させた歩行者の軌跡とシミュレーション結果を対比させ μ の値が調べられている。また質量 m の値には様々な分散が考えられるが、50-70[kg]の間で変化させても、ほとんど経路計画に影響がないため、本モデルでは一定値とする。

各時刻でつぎのように表される.

$$x(t+k|t) \leq x_{\min} + M\delta_1(t+k|t) \quad (13a)$$

$$-x(t+k|t) \leq -x_{\max} + M\delta_2(t+k|t) \quad (13b)$$

$$y(t+k|t) \leq y_{\min} + M\delta_3(t+k|t) \quad (13c)$$

$$-y(t+k|t) \leq -y_{\max} + M\delta_4(t+k|t) \quad (13d)$$

$$\sum_{l=1}^4 \delta_l(t+k|t) \leq 3 \quad (13e)$$

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. また (13e) 式により, 離散変数には, 少なくともひとつが 0 になる制約が設けられている. したがって, たとえば $\delta_1(t+k|t) = 0$ の場合, (13a) 式が $x(t+k|t) \leq x_{\min}$ となり, Fig. 1 における障害物の左側が歩行可能領域となる. 同様に, $\delta_2, \delta_3, \delta_4$ が 0 の場合を合わせて考えると, 障害物の周囲が歩行可能領域として表される.

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

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

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

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.

$$\min_U J, U := \{u(t|t), u(t+1|t), \dots, u(t+N-1|t)\} \quad (15)$$

$$\text{subj.to} \begin{cases} \text{状態方程式 (5)} \\ \text{位置・速度の制約 (8), } k=0, \dots, N-1 \\ \text{衝突回避条件 (13)} \end{cases}$$

すなわち, 最適化問題 (15) を receding horizon で解くことにより, 空間内の障害物や他の歩行者を回避し, 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, 周囲の障害物の制約を 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. これらの手法は文献 [20, 21] や自動車の衝突回避問題 [15] で扱われてきた.

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される

Fig. 2 Equivalent occupied region

Fig. 3 Recognition region of pedestrian

ことが確認された. 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 [16, 17] 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. 各歩行者の経路計画は群集内で最も影響を受ける他の歩行者の位置関係により定まり, また速度の最大値は群集内の歩行者の密度により定まることが知られている [2]. そこで文献 [2] に基づき, つぎのような (1) 歩行速度の評価, (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) 歩行速度の評価

歩行者は歩行空間の部分的な情報から周囲の歩行者を認識し, 歩行速度とモードを選択すると考えられる [2, 16, 17]. 本論文では歩行者 i の認識距離を $l = 3.0[m]$, 認識角を $\theta = \pi/3[\text{rad}]$ とし, 進行方向に合わせて認識領域を 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

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

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及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 [17]. ここでは他の歩行者から受ける影響をつぎのように定め, 最も影響を及ぼす他の歩行者を選ぶことにする.

$$E(d_{ij}, \theta_{ij}) = \frac{\cos \theta_{ij}}{d_{ij}} \quad (17)$$

Fig. 4 Evaluation of a dominant pedestrian

ここで, d_{ij} は注目している他の歩行者との距離, θ_{ij} は進行方向との偏角である. よって (17) 式を用いると, 進行方向に近い歩行者, また近くにいる歩行者が優先されて選ばれる.

つぎに Fig. 5 のような領域を定め, 停止・回避のモードを導入する. ここで, 歩行者 i は注目している歩行者であり, 歩行者 j は最も影響を与える歩行者である. そして, 歩行者 i, j の相対速度により半径 $R = k_R \cdot |v_j - v_i|$ の円 (停止領域) と一辺が $L = k_L \cdot |v_j - v_i|$ の長方形 (回避領域) が描かれている. ここでの k_L, k_R は相対速度に対する比例係数であり, $k_L = 0.7, k_R = 0.2$ と定めた. そして, 注目している歩行者 i が存在している位置によって, つぎのようなモードを定める.

- (i) **停止行動**: Fig. 6 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 ステップ分行わない.
- (ii) **回避行動**: Fig. 7 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. 7 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 (11) 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

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 [17]. そこで, 歩行者が停止・回避領域外に存在するとき, (2) で定めた最も影響を与える歩行者 j との関係を以下のように判定する (Fig. 8).

- 目標点との方向と, 歩行者 j の方向の差が $\pi/9[\text{rad}] = 20[\text{deg}]$ 以内である.
- v_i, v_j のなす角が $\pi/9[\text{rad}] = 20[\text{deg}]$ 以内である.
- v_i, v_j の速度差が v_i の 50% 以内である.

上記の条件をすべて満たしている場合, 歩行者 i にとっての目標点を歩行者 j に変更し, モデル予測制御問題を解き追従行動を表現することにする.

(注意) Fig. 7 の回避行動のモードに基づいて, 歩行可能領域はつぎの手順から求められる.

- 1) 歩行者 i と他の歩行者 j の位置を, それぞれ $p_i = (x_i, y_i), p_j = (x_j, y_j)$ と表し, 直角三角形の条件から p_i を通る直線と p_j を中心とする半径 R の円

Fig. 5 Stopping and avoidance region

Fig. 6 Stopping mode

Fig. 7 Avoidance mode

Fig. 8 Following mode

の接点を求める (接点は二つ求められる).

- 2) 回避領域の長方形を Fig. 7 のように中心線で二分したとき, 歩行者 i と同じ領域に属する接点を採用する (位置ベクトルを p_c とする, Fig. 7).
- 3) 歩行可能領域の座標を $p = (x, y)$ とすると, ベクトル $p - p_i$ と $p_c - p_j$ のなす角は $90[\text{deg}]$ 以内であり, 制約条件は内積から

$$(p_c - p_j)^T (p - p_i) \geq 0$$

と求められる.

Table 1 Parameters of flow coefficient

パラメータ	説明
N_{eff} [人/s・m]	有効流動係数
p [人/m ²]	歩行者の密度
A_{area} [m ²]	当該居室などの床面積
t_{queue} [s]	出口の通過に要する時間
B_{room} [m]	有効出口幅

以上の相互作用を新たに (15) 式の制約に加え, 群集内における各歩行者の行動を表すことにする.

$$\min_U J, U := \{u(t|t), u(t+1|t), \dots, u(t+N-1|t)\} \quad (18)$$

$$\text{subj.to} \begin{cases} \text{状態方程式 (5)} \\ \text{位置・速度の制約 (8), } k=0, \dots, N-1 \\ \text{衝突回避条件 (13)} \\ \text{群集内での相互作用} \end{cases}$$

そして群集のシミュレーションにおいては, モデル予測制御問題を解く歩行者の順番を決めておき, その順番に従って, 各歩行者の状態を 1 サンプル時間ごとに更新していく.

3. シミュレーションと考察

2 節で定めたモデルに基づき, 群集が部屋から退出するシミュレーションを行い, 流動係数の視点から出口付近の障害物の効果について考察する. 流動係数とは単位時間 (1[s]) あたりに単位幅 (1[m]) の出口を通過する人数であり, つぎのように定められる (Table 1 参照)[18].

$$N_{\text{eff}} = \frac{p \cdot A_{\text{area}}}{t_{\text{queue}} \cdot B_{\text{room}}} \quad (19)$$

また, 各パラメータは Tables 2, 3 のように定め, ここでは最大歩行速度 $v_{\text{max}} = 1.2[\text{m/s}]$, サンプル時間 $h = 0.1[\text{s}]$, 予測ホライズン $N = 5$ とした. これは混雑時, 歩行者が $0.4 \sim 0.6[\text{m}]$ の間隔で障害物を回避し, 経路を変更することに対応させたものである. 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.

(a),(b),(c) の設定において, 群集挙動のシミュレーションを行い, 退出に要する時間と流動係数の関係を調べる.

- (a) 障害物を配置しない場合 (Fig. 9(a))
- (b) 障害物を出口正面から 3[m], 上方に 2.5[m] ずらして非対称に配置した場合 (Fig. 9(b))
- (c) 障害物を出口正面から 3[m] に対称に配置した場合 (Fig. 9(c))

Case(a): an obstacle is not placed

Case(b): an obstacle is placed asymmetrically in front of the exit

Case(c): an obstacle is placed in front of the exit

Fig. 9 Floor layout

ここでは, 評価関数 (15) 式における目標点 s_f は出口の位置, 重みは $Q = 10^{-6}$, $R = 1$ と定めた¹. Fig. 9(b) の障害物を非対称に配置したとき, 退出時間が短縮される現象は, 文献 [5,7] で報告され, この現象の再現がモデルの有用性を検証する一つの評価基準と位置付けられている. また, 歩行者の最大速度は, 文献 [19] を参考に Table 3 のように定めた.

シミュレーション結果は Figs. 10–15 のように求められ, それぞれの群集と退出時間の関係は Table 4 のようにまとめられる. いずれの場合も障害物を配置したほうが退出時間を若干短縮できることが確認できる. しかしながら Case 5, 6 のように速度が遅い歩行者が多い場合, 短縮される時間がわずかである. これは速い歩行者

¹評価関数の重み行列 Q, R は文献 [21] で検討され, 歩行者の対向・追い越しの現象が再現されることが確認されている. また, これらの準備的な検証において, フィールドデータとほぼ同じスケールの軌跡が再現されたことから, 本シミュレーションに導入した.

Table 2 Parameters of simulation model

パラメータ	値	説明
m [kg]	60	歩行者の質量
μ [Ns/m]	20	歩行者の速度変化の緩慢さを表す抵抗係数
h [s]	0.1	サンプル時間
N	5	予測ホライズン
D [m]	0.4	歩行者の大きさ (Fig. 2)
l [m]	3.0	認識領域の半径 (Fig. 3)
θ [rad]	$\pi/3$	進行方向との偏角 (Fig. 3)
d_{ij} [m]		他の歩行者との距離 (Fig. 4)
θ_{ij} [rad]		他の歩行者と進行方向の偏角 (Fig. 4)
k_L	0.7	停止・回避領域を定める比例定数 (Fig. 5)
k_R	0.2	停止・回避領域を定める比例定数 (Fig. 5)

Table 3 Dynamics of pedestrian flow

Case	説明
1	最大歩行速度を $v_{\max}=0.8$ [m/s] と定めた歩行者 150 人
2	$v_{\max}=1.2$ [m/s] とした歩行者 150 人
3	$v_{\max}=1.2$ [m/s] とした歩行者 120 人 および 0.8 [m/s] とした歩行者 30 人
4	$v_{\max}=1.2$ [m/s] とした歩行者 90 人 および 0.8 [m/s] とした歩行者 60 人
5	$v_{\max}=1.2$ [m/s] とした歩行者 60 人 および 0.8 [m/s] とした歩行者 90 人
6	$v_{\max}=1.2$ [m/s] とした歩行者 30 人 および 0.8 [m/s] とした歩行者 120 人

Table 4 Evaluated evacuation times

Case	Floor layout	Evacuation time [s]
1	(a)	79.0
	(b)	78.2
2	(a)	55.4
	(b)	54.6
3	(a)	58.9
	(b)	58.0
4	(a)	64.3
	(b)	63.7
5	(a)	67.8
	(b)	67.5
6	(a)	71.6
	(b)	71.3

が追い抜いていく行動が多発し、退出時間を短縮させる効果が十分に現れなかったためと考えられる。また、典型的な混雑の様子は、Figs. 10–13 のようにまとめられる。ここで Figs. 10, 11 は Case 3(a),(b) に対応するシミュレーション結果であり、Figs. 12, 13 は、歩行者を中心に直径 1[m] の円を書き込んだものである。

Fig. 10 Simulation result: Case 3(a)

Fig. 11 Simulation result: Case 3(b)

シミュレーション結果から以下のことが確認できる。

- (1) 障害物がない場合では、大きなアーチ状の混雑が形成され、結果的に退出に要する時間が長くなる。
- (2) 障害物を非対称に配置した場合は、歩行者の経路が二分されるため、アーチ状の混雑の発生が遅れ、比較的高い流動性が維持できる可能性がある。

また Case 3(a),(b) における流動係数の時間変化は Figs. 14, 15 のようにまとめられ、以下のことが確認できる。

- (3) 障害物を非対称に配置した場合 (Fig. 15) は、障害物がない場合 (Fig. 14) に比べて流動係数の立ち上がりが緩やかである。このことより歩行者が出口に殺到しにくく、出口でのアーチ状の混雑が形成

Fig. 12 Congestion around the exit: Case 3(a)

Fig. 13 Congestion around the exit: Case 3(b)

される時間を若干遅らせることができる。

- (4) 障害物がない場合 (Fig. 14), アーチが形成されては部分的に解消される現象が繰り返されるため, 流動係数が脈動する傾向がある。

さらに障害物を対称に配置した場合 (Case 3(c)), 流動係数の時間変化は Fig. 16 のようになり, 以下のことが確認される。

- (5) 障害物を対称に配置した場合 (Fig. 16), 流動係数が脈動する様子はやや抑えられるが, 退出時間は短縮されない。これは, 出口までの到達時間に差がつかず, 混雑が分散されないためと考えられる。また, 立ち上がりの様子は非対称に配置したとき (Fig. 15) と同様であるが, 定常時には脈動が生じる。

Figs. 14–16 における退出開始時から終了時までの流動係数の平均値は, それぞれ 1.68, 1.73, 1.69[人/(s・m)] であった。同一のレイアウトにおいて, 文献 [18] では流動係数が 1.5[人/(s・m)] と示されており, ほぼ対応する流動係数が再現されている。

4. おわりに

本論文では, MLD システム表現に基づいた群集挙動のモデルを提案した。そして, 1) 歩行者を質点の力学

Fig. 14 Flow coefficient: Case 3(a)

Fig. 15 Flow coefficient: Case 3(b)

Fig. 16 Flow coefficient: Case 3(c)

モデルと考え, 停止・回避・追従のモードを導入すること [16,17], 2) 歩行者の自律的な歩行行動をモデル予測制御制御により表現すること, により退出行動のシミュレーションを行い, これらの前提から, 1) アーチ状の混雑が形成され, 妥当な流動係数が再現されること [18], 2) 群集モデルの評価基準とされる障害物を配置したシミュレーションにおいて, 退出時間が短縮される現象が再現されること [5,7] を確認した。

今後, フィールドデータに基づいて力学モデルの細部の検証を進め, また複数の領域を結合させた一般的なシミュレーションを通じて手法の有用性を検討する予定である。

参考文献

- [1] 堀内, 室崎, 田中: 大震災時の群集避難計画に関する研究 その1; 日本建築学会大会学術講演梗概集, Vol. 48,

- pp. 1241-1242 (1973)
- [2] 小林, 堀内: オフィスビルの火災時の人間の行動分析 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: オフィスビルの火災時の人間の行動分析 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; 日本建築学会大会学術講演梗概集, 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] D. Helbing and P. Molnar: Social force model for pedestrian dynamics; *Phys. Rev. E* 51, pp. 4282-4286 (1995)
- [7] D. Helbing, I. Farkas and T. Vicsek: Simulating dynamical features of escape panic; *Nature* (London), Vol. 407, pp. 487-490 (2000)
- [8] D. Helbing, I. J. Farkas, P. Molnar and T. Vicsek: *Simulation of Pedestrian Crowds in Normal and Evacuation Situations*, Springer, pp. 21-58 (2002)
- [9] O. Khatib: Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots; *International Journal of Robotics Research*, Vol. 5, No. 1 (1986)
- [10] 浅田, 國吉: ロボットインテリジェンス, 岩波書店 (2006)
- [11] 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)
- [12] 柳沢, 西成: クラスタ近似による出口を通過する人の流量の式の導入; 日本応用数理学会論文誌, Vol. 17, pp. 277-290 (2007)
- [13] A. Bemporad and M. Morari: Control of systems integrating logic, dynamics, and constraints; *Automatica*, Vol. 35, pp. 407-427 (1999)
- [14] A. Bemporad, D. Mignone and M. Morari: Moving horizon estimation for hybrid systems and fault detection; *Proc. of the American Control Conference*, Vol. 4, pp. 2471-2475 (1999)
- [15] M. Mukai, J. Murata, T. Kawabe, H. Nishira, Y. Takagi and Y. Deguchi: Optimal path generation for automotive collision avoidance using mixed integer programming; *SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration*, Vol. 1, No. 3, pp. 222-226 (2008)
- [16] 岡崎, 松下: 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; 日本建築学会計画系論文報告集, Vol. 283, pp. 111-117 (1979)
- [17] 岡崎, 松下: 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; 日本建築学会計画系論文報告集, Vol. 284, pp. 101-108 (1979)
- [18] 国土交通省住宅局建築指導課, 国土交通省建築研究所, 日本建築主事会議, 財団法人日本建築センター: 2001年度版避難安全検証法の解説及び計算例とその解説, 井上書院 (2001)
- [19] 梶原, 山田: 歩行速度の決定要因に関する分析的研究; 日本建築学会学術講演梗概集, pp. 951-952 (2007)
- [20] 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)
- [21] 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)

著者略歴

こう 加 木 とある
幸 徹 (学生会員)

1984年9月11日生。2008年東京都立科学技術大学工学部電子システム工学科卒業, 2010年首都大学東京大学院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, 本田技研工業(株)に勤務。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。

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。