Vol.2010-MPS-81 No.6
Vol.2010-BIO-23 No.6
2010/12/16

一次元歩行者モデルを用いた高速避難シミュレータの開発

副田 俊介[†1]　山下 倫央[†1]　大西 正輝[†1]
依田 育士[†1]　野田 五十樹[†1]

一次元歩行者モデルを提案し，高速避難シミュレータ NetMAS に実装する．一次元歩行者モデルは空間の表現を簡略化することによって高速に計算できる．本モデルを実装した避難シミュレータ NetMAS を作成し，避難訓練を観測した結果と比較評価することでモデルの有効性を検証した．また，多数のシミュレーションを行うことで NetMAS の有効性を確認した．

One-dimensional Pedestrian Model for Fast Evacuation Simulator

Shunsuke Soeda ,[†1] Tomohisa Yamashita ,[†1]
Masaki Onishi ,[†1] Ikushi Yoda [†1] and Itsuki Noda[†1]

We propose the one-dimentional pedestrian model, which simplifies the representation of space for fast calculation. The model was implemented into NetMAS, an evacuation simulator. The validity of the model was confirmed by comaring simulation results with data observed from an evacuation drill. The effectiveness of the model was confirmed by running many simulations.

1. まえがき

近年，建築技術の向上に伴って，オフィスビルや商業施設の大型化，高層化が進み，多くの人々が同時にこのような施設を利用するという状況が生じている．大規模な施設で火災や地震のような自然災害やテロのような人為的災害が発生した場合には，避難者が意図せず特定経路へ集中したり，遠回りしたりしてしまい，大規模な被害が生じてしまう危険性が高い．特に，不特定多数の利用者がいる商業施設では，利用者が施設の構造に不慣れであることが想定され，危険な状況から人々を迅速に遠ざける的確な避難誘導が必要とされている．

また，大型商業施設や高層ビルでは避難対象者は数千人となることも少なくないため，避難者への避難経路の指示や避難開始の指示の内容やタイミングが避難を完了するまでの時間に大きく影響する．しかし，多くの要素が複雑に関連する大規模な避難行動を扱うことは容易ではない．そのため，近年，各避難者の動きを再現する歩行者シミュレーションが避難経路の流量の確認や避難誘導計画の安全検証に用いられるようになってきている．歩行者シミュレーションでは，各歩行者の周辺の歩行者や障害物を回避しつつ，目的地方向に進む移動過程を計算し，歩行者群全体の動きを再現している．歩行者シミュレーションで避難行動を再現することで，避難に使われる通路幅が混雑発生に与える影響や避難経路への分散状況が避難時間に与える影響等を定量的に扱うことができる．

従来の歩行者シミュレータで用いられている歩行者の行動モデルは，その機能に基づいて Strategic level，Tactical level，Operational level の三つのレベルに分類できる[1),2)]．Strategic level で目的地を決定し，Tactical level で目的地までの経路や経由地を決定する．Operational level で他の歩行者や障害物との衝突を回避し，目的地に向かうための移動先を決定する．

本論文では歩行者の移動状況の再現精度を落とすことなく Operational level の衝突回避の計算を簡約化し，避難過程を高速に計算するための，一次元歩行者モデルを提案する．さらに，一次元歩行者モデルを利用した避難シミュレータ NetMAS を開発する．そして，NetMAS を用いて大規模な複合商業施設における避難を扱い，避難効率に影響を与える要因を検証する．

2. 関連研究

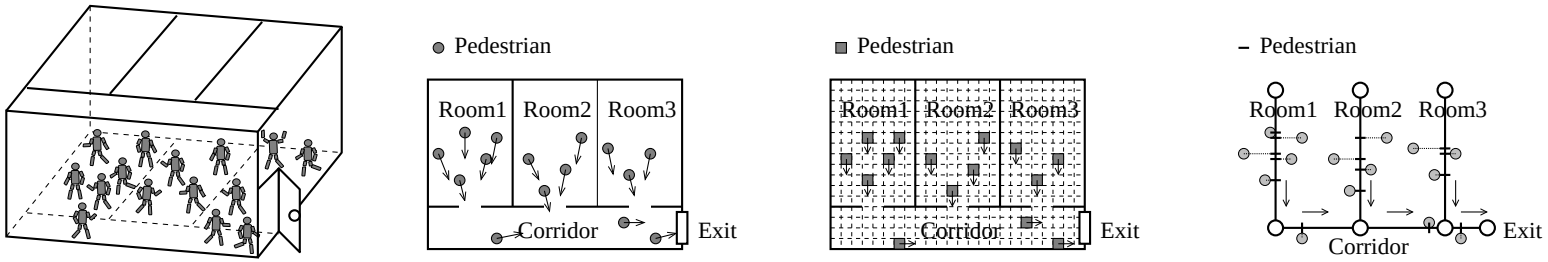
近年，数多くの歩行者シミュレーション[3)]が開発されているが，それらの多くは歩行者が移動する空間の表現方法として，連続空間上を歩行者が移動する二次元連続空間モデル[4)–6)]や空間をグリッド状に分割したセル上を歩行者が移動するセルオートマトンモデル[7)–9)]を採用している．

図 1 に，二次元連続空間モデル，セルオートマトンモデル，本論文で提案する一次元歩行

†1 産業技術総合研究所
National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)

© 2010 Information Processing Society of Japan

Vol.2010-MPS-81 No.6
Vol.2010-BIO-23 No.6
2010/12/16



(a) 実環境　(b) 二次元連続空間モデル　(c) セルオートマトンモデル　(d) 一次元歩行者モデル

図 1 空間モデル
Fig. 1 Space model.

者モデルで同一の対象（図 1 (a)）をモデル化している例を示す．図 1 (b) に示す連続空間モデル上での移動モデルでは，歩行者が二次元平面上で他の歩行者や障害物を回避したり，パーソナルスペースを確保したり，目的地方向へ移動するという条件を満たす移動方向，移動距離や移動速度を算出している．連続空間モデルにおける歩行者の移動モデルとして，連続空間上で他の歩行者や障害物がもたらす作用を集積して速度を決定するポテンシャルモデル[4]，近くの歩行者や障害物から反発力を受けて加速度を決定する Social Force モデル[5]，等が挙げられる．これらの移動モデルでは，0.1 秒程度を 1 シミュレーションステップとして歩行者の移動を精緻に計算するため，多くの避難者が密度の高い状況にいる場合には移動に関する計算量が増加し，高い再現精度が期待できるものの計算に時間がかかる．

図 1 (c) に示すセルオートマトンモデルでは，歩行者が移動可能の判定対象となるセルの数が歩行者のいるセル周辺のノイマン近傍の 4 個またはムーア近傍の 8 個と限られている．歩行者の移動モデルでは，目的地方向の空いたセルへ確率的に移動したり，過去の通過した歩行者の移動傾向を模倣するといった比較的単純なアルゴリズムが採用されているため[7)–9)]，移動の計算に負荷がかからない場合が多い．実際の計算機上で計算する場合には，歩行者が移動可能な全領域を 50cm 四方程度のセルに分割し，歩行者の有無，周囲のセルとの隣接状況，歩行者の通過履歴等を計算機のメモリ上に確保する．避難の対象とする領域の拡大に従ってセル数が二乗に比例して増加するため，高層ビル群や大規模な商業施設といった広範囲に渡る避難を扱う場合には必要なメモリの確保が困難になる場合がある．

連続空間モデルやセルオートマトンモデルでは扉の幅や通路上の障害物に応じた流率を算出できるため，レイアウトの形状が混雑発生に与える影響の評価には適しているが，多数の条件下での大規模な施設全体の避難誘導計画の検証には適していない．本論文で提案する図 1 (d) に示される一次元歩行者モデルは他の空間モデルとは異なり，歩行者の移動可能範囲が長さと幅を持ったリンクとして表現され，部屋や廊下はリンクとして扱われる．移動モデルとして，直前の歩行者との距離から移動速度を決定する速度関数を採用する．一次元歩行者モデルは二次元平面上における近傍の歩行者の判定や移動方向を決定する計算過程を省略できるため，避難誘導計画の検証に適している．

3. 歩行者モデル

本論文では歩行者が移動する空間を一次元的に表現した一次元歩行者モデルを提案する．本章では空間モデルについて説明した後，歩行速度の計算方法について説明する．

3.1 空間モデル

ある空間内での避難行動を考えた場合，歩行者はその空間の出口へと向かって流れていく．部屋からは扉へ向かい，通路からはより出口に近い方向へと向かっていく．そこで，本論文では部屋や通路などの歩行者のいる空間を歩行者の流れに平行な一次元の位置で表現できると仮定する．

このように考えると，通路や部屋のつながりはネットワーク構造と捉えることが可能で，図 1 (a) は (d) のように部屋や廊下をリンク，扉や出口をノードとして扱うことができる．ここでは，リンクを $L_1, L_2, \cdots, L_m, \cdots, L_M$ で表現する．

文献 10) では通路や部屋を整然と移動する歩行者は，ある程度以上の密度になった場合には列を形成することが指摘されている．そこで，この各列を自動車のレーンに見立てて仮想

© 2010 Information Processing Society of Japan

Vol.2010-MPS-81 No.6
Vol.2010-BIO-23 No.6
2010/12/16

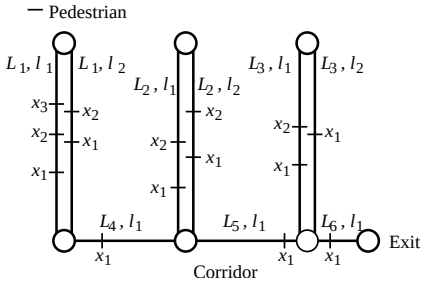


図 2 一次元歩行者モデル
Fig. 2 One-dimensional pedestrian model.

レーンと呼ぶことにする．仮想レーン数は部屋の幅に比例し，各リンクはそれぞれ 1 本以上の仮想レーンを持つものとする．図 1 (d) のそれぞれの部屋に 2 本の仮想レーンがあり，廊下に 1 本の仮想レーンがあった場合の様子を **図 2** に示す．仮想レーンは $l_1, l_2, \cdots, l_n, \cdots, l_N$ で表現する．

なお，時刻 t においてリンク L_m の仮想レーン l_n にいる，先頭から i 番目の歩行者の位置は $x_i^{(L_m,l_n)}(t)$ で表わすことにする．原点はノードに取り，進行方向を正とする．なお，リンク L_m と仮想レーン l_n に関しては適宜省略して $x_i(t)$ で記述する．次節では歩行速度のモデルについて説明する．

3.2 歩行速度のモデル

Helbing らは文献 5) で一般的な歩行者にかかる仮想的な力として，(1) 歩行者推進力，(2) 社会的作用，(3) 壁や障害物の影響力，(4) 集団凝縮力，(5) その他の力の五つの要素を挙げている．

(1) 歩行者推進力は，混雑等によって減速した歩行者が，周囲からの影響を受けない場合の歩行速度（自由歩行速度）に戻ろうとする力を表現している．時刻 t における i 番目の歩行者への歩行者推進力 $f_i^{dr}(t)$ は歩行者の質量を m_i，自由歩行速度を v_i^0，速度を $\dot{x}_i(t)$，自由歩行速度に戻る時間を表わすパラメータ τ_i を利用して次のように表現できる．

$$f_i^{dr}(t) = m_i \frac{v_i^0 - \dot{x}_i(t)}{\tau_i} \tag{1}$$

次に，(2) 社会的作用は i 番目の歩行者が周囲の歩行者との間にパーソナルスペースを取ろうとする力を表現している．i 番目の歩行者が j 番目の歩行者から受ける社会的作用 $f_{i,j}^{soc}(t)$ は，二人の歩行者の中心間の距離 $d_{i,j}(t)$，歩行者の半径の和 $r_{i,j}$，パラメータ A, B を用いて次のように表現できる．

$$f_{i,j}^{soc}(t) = A \exp \frac{r_{i,j} - d_{i,j}(t)}{B} \tag{2}$$

なお，歩行者 i にかかる社会的作用は次式のように周囲の全ての人から受ける力の和で表現される．

$$f_i^{soc}(t) = \sum_j f_{i,j}^{soc}(t) \tag{3}$$

一方，一次元歩行者モデルでは進行方向に平行な力のみを考えるため（3）壁や障害物の影響力は無視できると仮定する．また，単純な避難行動を考えているため，家族などのグループで固まる傾向を示す（4）集団凝縮力や，購買行動などで見られるショッピングウィンドウに引き寄せられる現象等を表現している（5）その他の力も無視できると考える．

さらに，社会的作用に関しては仮想レーン内の直前にいる歩行者だけの影響を受けると仮定すると，式 (3) の i 番目の歩行者の受ける社会的作用は次式で表現できる．

$$f_i^{soc}(t) = A \exp \frac{r_{i,i-1} - (x_{i-1}(t) - x_i(t))}{B} \tag{4}$$

以上より，一次元歩行者モデルにおける歩行者の運動方程式は次式で表現できる．

$$m_i \ddot{x}_i(t) = m_i \frac{v_i^0 - \dot{x}_i(t)}{\tau_i} + A \exp \frac{r_{i,i-1} - (x_{i-1}(t) - x_i(t))}{B} \tag{5}$$

ただし，全ての歩行者の質量や半径，自由歩行速度，パラメータ τ_i は同じであるとして $v^0, r/2, m, \tau$ に統一し，$a_1 = 1/\tau, a_2 = A/m, a_3 = B$ と置くことで，次式の歩行者の加速度が得られる．

$$\ddot{x}_i(t) = a_1(v^0 - \dot{x}_i(t)) - a_2 \exp \frac{r - (x_{i-1}(t) - x_i(t))}{a_3} \tag{6}$$

3.3 パラメータ推定

式 (6) を用いることで混雑環境化での人流をシミュレーションすることが可能であるが，自由歩行速度 v^0 と歩行者の半径 r ，パラメータ a_1, a_2, a_3 が未知である．

これらのパラメータを算出するために本論文では二次元連続空間モデルを採用しているベクトル総研の歩行者シミュレータ D-MACS[11] を用いる．D-MACS は群集流動再現による都市環境評価や津波や災害の避難シミュレーション，ショッピングモールにおける回遊性評価などに利用されているシミュレータである．ここでは T 字路において D-MACS で合流を再現し，1 次元の空間モデルに射影した後，歩行者 i の速度 $\dot{x}_i$，前の歩行者との距離

© 2010 Information Processing Society of Japan

Vol.2010-MPS-81 No.6
Vol.2010-BIO-23 No.6
2010/12/16

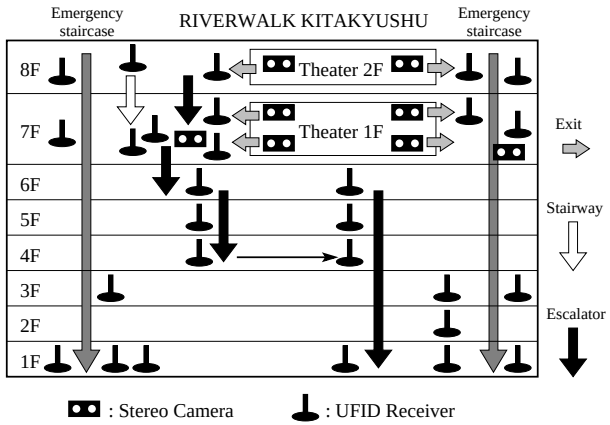


図 3 中劇場からの避難経路
Fig. 3 Evacuation routes from the mid-theater.

$x_{i-1} - x_i$ のデータ列から，歩行者の速度を最適化するように山登り法で未知パラメータを探索する．

シミュレーションステップを 0.5 [sec] でパラメータを求めたところ，$v^0 = 1.023, r = 0.522, a_1 = 0.962, a_2 = 0.869, a_3 = 0.214$ が得られた．

4. 実験・評価

本論文で提案した一次元歩行者モデルを実装し，高速避難シミュレータ NetMAS を開発した．さらに，実際の避難訓練を観測した結果を利用してシミュレーションの評価を行った．本章では避難訓練の概要について説明した後，高速避難シミュレータで避難訓練を再現することで一次元歩行者モデルを評価する．

4.1 避難訓練の概要

2009 年 2 月 11 日にリバーウォーク北九州にある北九州芸術劇場の中劇場において実動避難訓練を行った．中劇場の客席数は 700 で，1 階には前後左右の 4 箇所に扉があり，2 階には左右の 2 箇所に扉がある．中劇場から出た後は通常の入退場に利用されるエスカレータの他に 2 系統の非常階段が設置されている．エスカレータは上りと下りの 2 系統がある．非常階段はそれぞれ二重らせん構造となっているため，内部にさらに 2 系統の非常階段がある．中劇場の 1 階はリバーウォーク北九州の 7 階部分に相当する．



(a) 扉 1 （1 階）付近での動線　(b) エスカレータ付近での動線　(c) 非常階段での動線

図 4 避難訓練における動線抽出
Fig. 4 Extraction of trajectory in evacuation drill.

中劇場にいる避難者には爆破予告があったため速やかにリバーウォーク北九州の 1 階広場に避難するように指示した．中劇場からの避難経路を **図 3** に示す．参加者の内，570 人が実際に避難した．

避難行動は 8 台のステレオカメラと 39 台の RFID レシーバによって記録した[12]．ステレオカメラは中劇場にある 6 箇所全ての出入り口と，エスカレータ前，非常階段に設置し，文献[13] の手法を用いて避難動線を記録し，避難者の扉や廊下，階段の通過時間を計測した．動線抽出結果を **図 4** に示す．一方，RFID タグ をおよそ 440 人の参加者に持たせることで避難経路を測定した．アクティブ RFID システムを用いたため，RFID タグを持った参加者が RFID レシーバの付近にいれば，その ID と検知時間が自動的に記録される．RFID タグ を持っていない参加者の経路は 39 台の RFID レシーバの中から経路選択に有効な 28 台を用いて補完することで推定した．

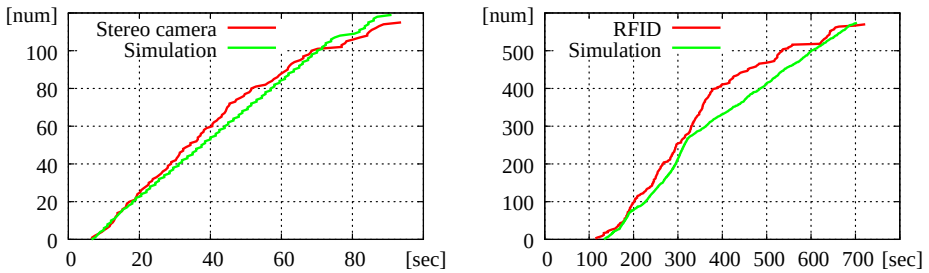
4.2 シミュレーションの実行

本論文で提案した一次元歩行者モデルを用いて避難訓練を再現するためのシミュレーションを行い，提案手法を評価した．避難経路は複数通り存在するが，ステレオカメラから得られた結果を用いて中劇場のどの扉から避難するかの割合と通過時間を求め，それ以降の経路については RFID タグによって得られた結果をサンプリング調査することで全避難者の経路を推定した．そして，実測と同様の割合でエージェントが経路を選択するようにシミュレーションを実行し，避難時間を評価した．また，シミュレーションにおいては 0.5 [sec] を 1 ステップとした．リンクの幅 1 [m] あたりに仮想レーン 1 本を割り当てた．

実測とシミュレーションの避難時間を **図 5** に示す．図 5 (a) は中劇場の 1 階の扉からの避難時間と避難人数の関係を表しており，80 〜 90 秒程度で中劇場から出ていることが分

© 2010 Information Processing Society of Japan

Vol.2010-MPS-81 No.6
Vol.2010-BIO-23 No.6
2010/12/16



(a) 扉 1 （1 階）の通過時間　　(b) 避難完了時間

図 5 実測とシミュレーションの避難時間
Fig. 5 Comparison of evacuation time.

かる．図 5 (b) にはリバーウォーク北九州の 1 階までの避難完了時間を示す．全ての人が避難を完了するのに 700 秒程度かかっていることが分かる．全てグラフにおいて赤線は避難訓練の実測結果を示し，緑線はシミュレーションの結果を示している．なお，(a) の実測はステレオカメラを用い，(b) は RFID を用いて結果を算出した．避難完了時間に関しては途中で誤差が大きくなるが，最大でも 15 % 以下であり，全員の避難完了時間の誤差は 5 % 以下と高い精度で再現できている．

5. 避難シミュレータの応用

NetMAS の最大の特徴は一次元歩行者モデルによって高速なシミュレーションが実現できる点である．そこで，北九州芸術劇場における効率的な避難誘導方法に関する知見を得るために，以下に示される複数の条件を設定し，避難完了時間への影響を検証した．

- 避難人数（6 通り）：188, 294, 414, 534, 594, 654 人
- 扉の開き具合（2 通り）：半開，全開
- 扉の前後の偏り（5 通り）：4:1, 2:1, 1:1, 1:2, 1:4
- 避難経路選択（8 通り）：各非常階段内の 1 系統の階段，各非常階段内の 2 系統の階段，1 系統のエスカレータ，2 系統のエスカレータ，各非常階段内の 1 系統の階段と 1 系統のエスカレータ，各非常階段内の 2 系統の階段と 2 系統のエスカレータ，避難訓練の実測と同じ割合に分散，全経路に均等に分散

扉の開き具合に関しては，扉が半開の場合は中劇場 1 階と 2 階にある 6 つの扉が全開の場合に比べて流量が半分になることを表わしている．扉の前後の偏りに関しては，中劇場 1 階にいる避難者が避難時に通過する前方 2 つの扉と後方 2 つの扉への偏りの程度を表わしている．避難経路に関しては，中劇場の避難経路には，エスカレータと劇場の左右に 2 系統の非常階段があり，いずれかの経路に避難者が集中したり，分散して避難した場合を表わしている．中劇場の 2 系統の各非常階段内にはさらに 2 系統の階段があるため，それらが片方だけ，または両方使われる場合を考える．エスカレータも上下の 2 系統があるため，片方だけ，または両方とも下りの場合を考える．これらの各種条件を組み合わせて, 480 通り（$= 6 \times 2 \times 5 \times 8$）の条件下で試行した．

シミュレーションに使用した計算機の CPU は Intel Core i7 860 （2.8 [GHz] HT 有効），Memory は 4 [GB], OS は Ubuntu Linux 10.04 （64bit 版） である．Java J2SE 1.60 でプログラムを実装した．全 480 通りの計算に 11 分 54 秒かかった．これは現実世界のおよそ 400 倍の速さの計算を実現していることに相当し，十分に高速である．

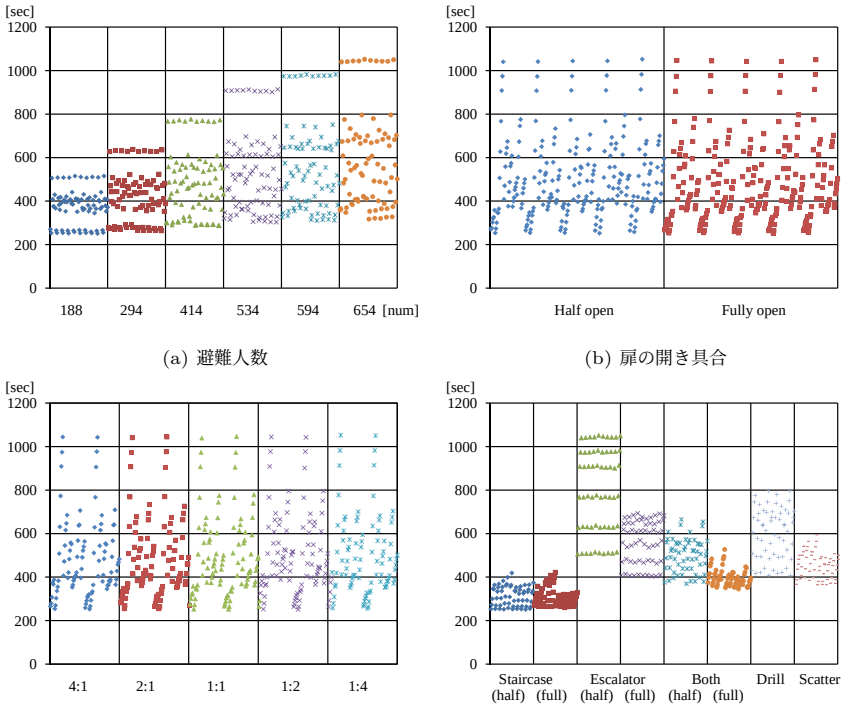
図 6 に条件毎に避難完了時間をプロットしたグラフを示す．横軸が条件，縦軸が避難完了時間を表している．図 6 (a) は条件を避難人数によってソートした結果である．一般には人数が増えるほど避難完了時間が長くなり，分散が大きくなっている様子が分かる．実働避難訓練では 570 人の避難に 723 秒必要であったが，654 人の避難でも適切に避難することで半分以下の時間（300 秒程度）で避難が完了することが分かる．

図 6 (b) は扉の開き具合によってソートした結果であり，(c) は利用する扉の前後の偏りによってソートした結果である．扉が半開であった場合や，使用する扉の前後に大きな偏りがあった場合には中劇場から出るのにかかる時間は増大するものの，その先に混雑が発生しているため，全体的な避難完了までの時間はほとんど変わらないことが，条件の違いごとにそれぞれのパターンが類似していることから明らかである．

図 6 (d) は避難経路選択によってソートした結果である．非常階段やエスカレータを 1 系統だけを使うよりも 2 系統使う方が避難完了時間は短くなり，エスカレータを利用するよりも非常階段を利用する方が避難時間が短くなることが分かる．特に全員の避難完了時間を短くするという意味では非常階段とエスカレータを併用するよりも，全員を非常階段に誘導した方が良いことが分かる．これはエスカレータを使う経路は非常階段を使う経路に比べて長く，例え混雑が緩和されたとしても避難に時間がかかるためである．非常階段に関しては 1 系統だけ使うよりも 2 系統使う方が避難完了時間は少し短くはなるが，大きな差はないために，避難時には近くの非常階段を使うように避難誘導することが避難完了時間を短くする上では重要であると結論付けることができる．

© 2010 Information Processing Society of Japan

Vol.2010-MPS-81 No.6
Vol.2010-BIO-23 No.6
2010/12/16



(a) 避難人数　(b) 扉の開き具合

(c) 利用する扉の前後の偏り　(d) 選択する避難経路

図 6　条件の変化による避難完了時間の変化
Fig. 6　Change of evacuation time.

6. む　す　び

本論文では歩行者が移動する空間を一次元的に表現することで，高速に計算することが可能な一次元歩行者モデルを提案した．従来のモデルが他の歩行者との衝突等の Operational level での挙動の再現を重視している一方，本モデルでは避難誘導計画の検証等の Tactical level での利用を想定している．本モデルを実装した避難シミュレータ NetMAS を作成することで Tactical level での避難現象の再現性と高速性を検証し，避難誘導計画の立案に対して有用であることを示した．

謝辞　本研究成果の一部は NEDO の平成 21 年度産業技術研究助成事業の支援によるものである．また，避難訓練の実証実験に関して協力を得た北九州芸術劇場，リバーウォーク北九州および北九州市消防局の関係者に深く感謝する．

参　考　文　献

1) Hoogendoorn, S. P., Bovy, P. H. L. and Daamen, W.: Microscopic Pedestrian Wayfinding and Dynamics Modelling, *Pedestrian and Evacuation Dynamics*, Springer, Berlin, pp.123–154 (2001).
2) Steiner, A., Philipp, M. and Schmid, A.: Parameter Estimation for a Pedestrian Simulation Model, *Swiss Transport Research Conference*, p.29 (2007).
3) Kuligowski, E. D. and Peacock, R. D.: Review of Building Evacuation Models, Technical report, NIST (2005).
4) 木村　謙，佐野友紀，林田和人，竹市尚広，峯岸良和，吉田克之，渡辺仁史：マルチエージェントモデルによる群集歩行性状の表現，日本建築学会計画系論文集，Vol.74, No.636, pp.371–377 (2009).
5) Helbing, D. and Molnár, P.: Social force model for pedestrian dynamics, *Phys. Rev. E*, Vol.51, No.5, pp.4282–4286 (1995).
6) 劉　建宏，大枝良直，角　知憲：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).
7) Nishinari, N., Kirchner, Namazi, A., A. and Schadschneider, A.: Simulations of evacuation by an Extended Floor Field CA model, *Proceeding of Traffic and Granular Flow '03*, pp.405–410 (2003).
8) 森下　信，中塚直希：セルオートマトンによる緊急避難時の群衆流解析，機械力学・計測制御講演論文集 : D & D，p.308 (2002).
9) 大鑄史男，小野木基裕：セルオートマトン法による避難流動のシミュレーション，日本オペレーションズ・リサーチ学会和文論文誌，Vol.51, pp.94–111 (2008).
10) Helbing, D., Molnár, P., Farkas, I, J. and Bolay, K.: Self-organizing pedestrian movement, *Environment and Planning B: Planning and Design*, Vol.28, No.3, pp. 361–383 (2001).
11) ベクトル総研：D-MACS.　`http://www.vri.co.jp/solution/floatsys/index.html`.
12) 山下倫央，副田俊介，野田五十樹：避難誘導効果の検証に向けた人流計測，情報処理学会研究報告，Vol.2010-ICS-158, No.9, pp.1–8 (2010).
13) 大西正輝，依田育士：ファジィクラスタリングを用いたステレオ映像からの動線抽出，電気学会論文誌 C（電子・情報・システム部門誌），Vol.128, No.9, pp.1438–1446 (2008).

© 2010 Information Processing Society of Japan