

避難経路ネットワークモデルを用いた自動誘導灯配置

尾崎 昭剛^{1,a)} 原尾 政輝

概要: 多数の人が集合する建物からの避難行動は一般に群集流となってしまうため、避難行動の全体像を捉えるには、これらをマクロな視点から表現し解析する手法が必要である。本研究では、この観点から、建築物をネットワークで表し、群集流をネットワークフローとして解析する手法を提案する。また、対象構造を複合長方形領域に限定される代わりに、避難完了時間の効率を改善する避難誘導等の自動配置手法を提案する。そして、この手法を用いて、出入口の増設が必ずしも全体の避難効率の改善には繋がらないことや、誘導灯や出入口の位置によって避難効率がどのような影響を受けるかなどの解析に有用であることを示す。また、MA シミュレーションによって現象の再現を行い、提案する配置手法が妥当であることを示す。

An Automatic Exit signs Placement by An Evacuation Route Network Model

Abstract: In the evacuation simulation, analysis of refuge time and exit-signs placement are important techniques. In this paper, we propose automatic analysis of refuge action and exit signs placement algorithm. At first, we formulate a cost of evacuation, and we propose an analytical technique by network flow. Moreover, we propose exit-signs placement algorithm based on rectangle division and network flow model. We construct multi-agent simulator which simulates selfish behavior of refugee agent. And we show that this placement algorithm is useful to reduce evacuation time by our simulator.

1. はじめに

多数の人間が集まる建物を、災害時に安全に避難できるように設計することは重要であり、非常口や避難誘導灯などの設置が消防法 [1] で義務付けられている。避難誘導の効果を検証するために、これまでにマルチエージェント (以下 MA) モデルを用いたシミュレーションが行われている [2]-[5]。

しかしながら、これまで提案されているモデルは、避難者の行動を忠実に再現する工夫がなされているが、これは建物の特性に影響されてしまうという欠点がある。つまり、構造の特性に依存した避難行動は規定できるが、避難行動のマクロな性質の解析には不向きである。また、これらの研究では避難誘導灯は実験者が手動で配置を行っており、一定の誘導効果を保ちながら一般的な構造に対応できる自動配置手法は知られていない。

そこで、本研究では建築物の構造を複合長方形領域に限定して、適切な避難誘導を実現する誘導灯自動配置手法を提案する。

提案手法では、次の手順で誘導灯の自動配置を行う。

- (1) 死角の無いように誘導灯を配置する
- (2) 配置された誘導灯同士の接続関係をネットワークモデル化する
- (3) ネットワークモデルより避難完了時間が最小となるように誘導方向を決定する

死角の無いように誘導灯を配置する手法は、建築物内を矩形に分割して全領域を網羅する配置手法 [12] を用いる。また、建物内の誘導灯・出口を頂点とし、出口への経路を辺とするネットワークモデルを提案し、それを基に交通流の解析で用いられるネットワークフロー [6] の解析手法を用いて、適切な誘導方向を決定する手法を提案する。

また、本研究では、避難者が全体の効率を考慮せず、最も近い出口へ避難するという利己的な行動をモデル化した MA シミュレータを作成して、提案手法の避難効率の検証を行う。

¹ 崇城大学情報学部
Faculty of Computer and Information Science, SOJO University
^{a)} s_ozaki@cis.sojo-u.ac.jp

第2章では、本研究の前提となす避難モデルの説明を行う。第3章では、避難モデルの交通流ネットワークモデルに基づく解析手法を述べる。第4章では、ネットワークモデルに基づく避難誘導灯配置手法を提案する。第5章では、MA シミュレータを実装して、提案する解析手法の有用性を検証し、第6章で考察、第7章でまとめと今後の課題を述べる。

2. 避難モデル

本研究で対象とする建物は、ショッピングモールなど、内部構造を知らない（避難経路を知らない）不特定多数の人が集まる建物であり、以下の前提を持つとする。

- 構造：2次元平面とし、高低差は考慮しない
- 配置要素：以下の3種類の要素が配置される
 - － 壁：移動、視界を遮る
 - － 出口：避難者が到達すると脱出できる。一度に脱出できる人数（許容量）には制限がある。
 - － 避難誘導灯：避難者に移動方向を指示する

避難者は、自己の移動距離を最短にするよう出口を選択する利己的行動を取り、混雑状況などを観察して、全体の避難効率を最適化するような行動は取らないとする。

避難者は次のように定義する。

- 情報取得：全周囲を視界として情報を得る^{*1}
- 行動
 - － 目標選択：以下の優先順位で目標を選択する
 - (1) 出口が視界内にある場合は、直近の出口を目指す。出口、誘導灯が同時に視界内にある場合には、距離に関係なく出口を優先する。
 - (2) 誘導灯が視界内にある場合は、直近の誘導灯を目指す
 - (3) 視界内に出口、誘導灯が無い場合には、ランダムな方向を選択する
 - － 移動：目標に対して ASPF 歩行者モデル [11] に従い移動する

3. 避難流のネットワークモデルによる解析

3.1 OD ペア表現

道路交通網の効率を解析する問題では、一方向性の最大流問題 [6] として扱い、交通網上のある始点 (Origin) と終点 (Destination) 1 つずつからなる OD ペアを定め、この2点間の流量を最大にすることで旅行時間を最短にするというモデル化が知られている。

しかし、避難シミュレーションで同様の解析を行おうとすると、始点が1箇所に決定できないため、OD ペア表現ができない。また、始点以外にも初期配置された避難者がいるとすると、建物内のある1点からグラフの頂点、辺へ

の対応付けが困難である。特に、適切な対応付けができていないと、避難者が頂点を通らずに、辺の途中から別の辺へ入っていくことが可能となるなど、グラフとしての性質が満たされなくなる恐れもある。

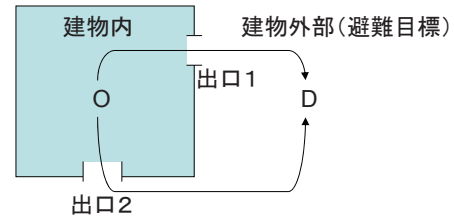


図1 OD ペアによるグラフ化

Fig. 1 OD pair

そこで、本研究では、位置に関係なく建物内全体を始点、建物外部を終点として OD ペア表現を行う（図1）。避難者全体が避難完了する時間を解析するためには、建物内に一様に避難者が存在すると仮定すると、個々の避難者の位置はあまり意味を持たない。そのため、本手法では建物全体を始点として表す。また、出口が複数ある場合でも、避難行動では外部へ到達できれば、経路に関係なく避難成功という同じ結果となるため、全ての出口を1つの終点として表す。しかし、避難効率を解析する際には、どの出口から脱出するかは重要な要素であるため、出口の違いを OD 間の辺として表現する。出口の数だけ辺があることで、出口の選択を表現しつつ避難経路全体を1組の OD ペア表現として扱うことができる。

3.2 経路のコスト

本論文では、ある経路を選択した避難者全員が避難完了する時間（以下「避難完了時間」と呼ぶ）を、その経路のコストとする。経路のコストは次の2つの仮定の下で定式化する。

仮定（1）人口密度が十分に低い状態

交通集中による滞留の影響より出口までの移動時間の方が影響が大きいため、避難完了時間 t は移動距離 d に比例する。そのため、この場合は移動速度を v とすると、 $t = \frac{d}{v}$ となる。ある出口（辺）のコストは、その出口へ避難する最も遠い地点の距離で決定される。

仮定（2）人口密度が高い状態

出口付近には交通集中による滞留が発生する。出口までの移動時間より滞留による待ち時間の方が影響が大きいため、移動時間は無視できるようになる。出口のコストはその出口への経路のボトルネックとなる部分で決定できるが、各通路の流量が出口に対して十分に広い場合には、出口の許容量（単位時間あたりに受け入れ可能な避難者数） e のみを考慮すればよい。

多数の避難者が1つの出口へ集中すると、出口の許容量

^{*1} 今回は簡単化のため、視認距離の制限は行わない

による制限と、人口密度の上昇による速度低下により避難が遅れることになるので、避難完了時間 t は e と避難者数 x の関数 $f(x, e)$ として定義する．以上より、ある 1 つの出口のコスト c は以下の式で表すことができる．

$$c = \max\left(\frac{d}{v}, f(x, e)\right) \quad (1)$$

3.3 避難者行動の表現

避難行動としては、直近の出口を目標として移動距離を最短とするよう行動する．交通流ネットワーク上ではこの目標選択行動を、始点から経路（辺＝出口）を選択することで表す．ある避難者から出口が 1 つだけ視認できる場合には、その出口が自動的に目標となる．そのため、避難者の初期配置がフロア内に均等に行なわれる場合、ある 1 つの出口が選ばれる確率は、その出口を視認できる範囲の面積に比例する．

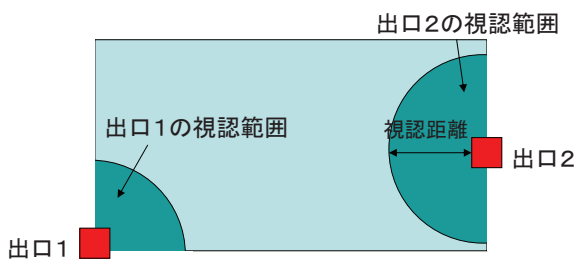


図 2 出口の有効範囲
Fig. 2 Range of exits

例えば、図 2 では、矩形のマップ内の角に出口 1 が、辺上に出口 2 がある．この時、マップ内で出口 1 の視認範囲は視認距離を半径とする円の $\frac{1}{4}$ 、出口 2 の視認範囲は同じ円の $\frac{1}{2}$ となる．に避難者が均等に配置されると、出口 2 の視認範囲に避難者が入る確率は出口 1 の 2 倍となる．

また、避難者の視界に複数の出口が存在する場合には、近い方を目標とするため、出口同士の視認範囲が重複する場合には、出口同士の中間線より内側をその出口の効果領域とする．

3.4 避難効率の定式化と評価

3.4.1 避難完了時間

建物全体の避難効率の尺度として、全出口における避難完了時間を用いる．

マップ内の出口の総数: $m (m \geq 1)$

出口 i のコスト: $c_i (1 \leq i \leq m)$

全避難者数: n

避難者の移動速度: v

出口 i の許容量: $e_i (1 \leq i \leq m)$

出口 i に配分された避難者数: $x_i (1 \leq i \leq m)$

出口 i に配分された最遠避難者の移動距離: $d_i (1 \leq i \leq m)$

とすると、経路 i の避難完了時間 t_i は $\max(\frac{d_i}{v}, f(x_i, e_i))$ となる．従って、全体の避難完了時間 t は、

$$t = \max(\cup_{i=1}^m \max(\frac{d_i}{v}, f(x_i, e_i))) \quad (1 \leq i \leq m) \quad (2)$$

と表すことができる．移動速度と建物内の構造が決定されると、 x_i 以外の値は全て定数となるため、避難完了時間について次が成立する．

- 避難距離で最少値が決定される
- 出口への配分避難者数で最大値が決定される

3.4.2 避難効率評価の例

図 3 は一辺 d の正方形内に同じ大きさの視認範囲を持つ 4 つの出口（許容量 1 避難者/単位時間）を持つ構造を用いる例である．

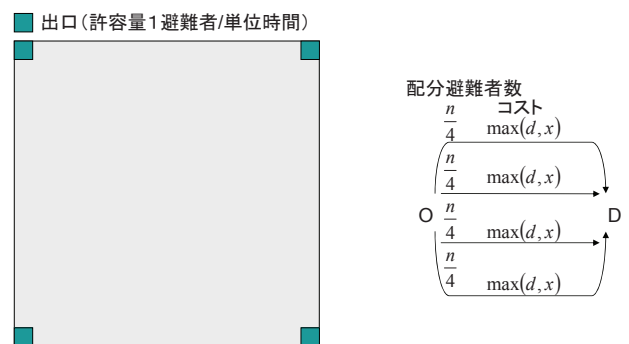


図 3 構造例 1
Fig. 3 A map example 1

この構造では、それぞれの出口に均等に避難者が割り振られるため、マップ内の避難行動のネットワークモデルは図 3 右のようになる．（ここでは簡単化のため、避難者の移動速度 $v = 1$ とする．）全体で n 人の避難者がいる場合、各出口の完了時間は (2) 式より全て等しく $\max(d, \frac{n}{4})$ となり、これが全体の避難完了時間となる^{*2}．

図 4 は構造例 1（図 3）の中央に新たな出口を付け加えたものである．中央へ追加された出口は、実際の建築物では、下階への階段を設置する場合に相当する．

この時、全体の $\frac{1}{2}$ の避難者が中央の出口に割り振られる．元からある四隅の出口には、残り $\frac{1}{2}$ の避難者がそれぞれ均等に配分されるため、それぞれ $\frac{n}{8}$ の避難者が配分される．このネットワークモデルは図 4 右のようになる．

新しく追加された中央の出口の避難完了時間は (1) 式より $\max(\frac{d}{2}, \frac{n}{2})$ 、他の出口は $\max(\frac{d}{2}, \frac{n}{8})$ となる．図 3 から図 4 の変化は、避難距離を短縮するという観点からは最適な配置と考えられる．しかし、避難者が多い場合（ $n > d$ を満たす場合）には、基本モデルの避難完了時間 $\frac{n}{4}$ に比べ $\frac{n}{2}$ と悪化する．

^{*2} 後述する避難シミュレーションでは、移動が上下左右の 4 方向のみで斜め方向の移動が出来ないため、正方形中央部から角への移動距離は d とする

中央の出口に割り当てられる範囲

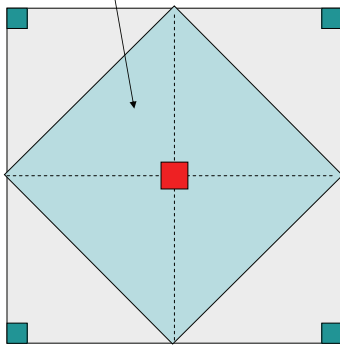


図 4 構造例 2

Fig. 4 A map example 2

この例は、ある避難者数では最適だった配置が、避難者数が変化すると逆に避難効率悪化の原因となってしまうことがあるということを示している。

4. ネットワークモデルに基づく誘導灯自動配置

壁（障害物）が設置されている場合、避難者エージェントから出口が直接視認できない地点が出てくる。このとき、視界内に避難誘導灯があれば避難者の目標となる。しかし、これまでに誘導灯の効果を検証している研究 [2]-[5] においては、誘導灯は手動で設置されていたため、本研究では、次の 2 点の仕様を持つ誘導灯の自動配置手法を提案する。

- (1) 誘導灯効果範囲による全領域の網羅：対象建物内の全ての地点から避難経路が参照できる
- (2) 避難効率の向上：全体の避難完了時間が減少する誘導灯を行う

この仕様の実現のために、まず、全体を網羅できる誘導灯の設置場所を決定、次に各誘導灯の避難方向を決定する、という 2 段階で配置を決定する。

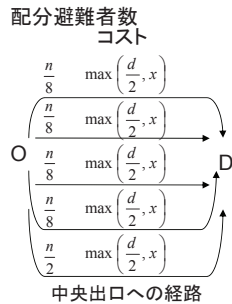
4.1 矩形分割に基づく誘導灯設置場所の取得

全体を網羅できる誘導灯の設置手法として、対象領域を矩形分割して設置座標を決定する手法が知られている [12]。この手法は、対象図形が複合長方形領域、つまり図形内の角度が 90° 、 270° のみに限定されるが、類似問題として知られる美術館問題 [13]-[16] に比べて少ない誘導灯で十分であることが示されている。そのため、本手法ではこの矩形分割の手法により、誘導灯の設置座標を決定する。また、誘導灯の設置座標が決定すると、各誘導灯毎の効果範囲の面積比も得ることができる。

4.2 誘導灯ネットワークによる誘導方向の決定

4.2.1 誘導灯接続ネットワークの生成

誘導灯、出口をノードとして移動経路を辺とする有向



ネットワークを次のように生成する。誘導灯 s_1 と s_2 の効果範囲が隣接している場合、誘導灯 s_1 から s_2 へ、または逆方向へ誘導することができる。これを、2 誘導灯間の双方向に接続があるとみなして、ノード間に辺を追加する。ただし、出口が直接視認できる誘導灯の場合は、避難者は誘導の方向に関係なく出口を目標とするため、この誘導灯からは出口にのみ有向辺があり、他誘導灯への辺は無いものとする。

図 5 左は、正方形の中に 3 つの壁がある構造に対して、矩形分割を行い、誘導灯の座標を決定した例である。この例では誘導灯が 3 つ、出口が 2 つあり、接続関係からネットワークを作成すると、図 5 右のようになる。この例では、誘導灯 s_1 、 s_3 は誘導灯 s_2 の効果範囲と接しており、 $s_2 \rightarrow s_1$ 、 $s_2 \rightarrow s_3$ の辺ができる。しかし、誘導灯 s_1 、 s_3 からは出口 e_1 、 e_2 が見え、誘導灯 s_2 への移動はできないため、 $s_1 \rightarrow s_2$ 、 $s_3 \rightarrow s_2$ の辺は生じない。分配避難者数は、それぞれの誘導灯の効果範囲下にある面積をそのまま当てはめている。誘導灯 s_2 が置かれている矩形は面積が $16 \times 5 = 80$ となるが、接続ネットワークでは 78 となっている。これは、誘導灯 s_2 は設置されている矩形だけでなく、下の小矩形も同時に効果範囲に収めるために、左側に偏って配置されている。そのため、誘導灯 s_2 のある矩形の右側には、誘導灯 s_3 の方が距離が近くなる部分ができ、この範囲は誘導灯 s_3 の効果範囲となるためである。

出口のコストに関しては、出口 e_2 は出口 e_1 の 2 倍の大きさがあるため、割り当て避難者数 x に対してコスト $\frac{x}{2}$ としている。

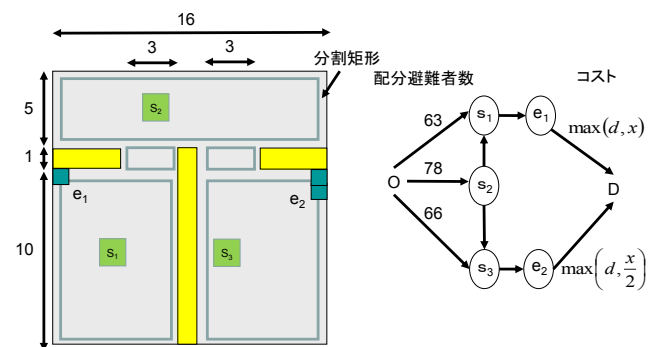


図 5 構造例 3

Fig. 5 map example 3

4.2.2 最適誘導方向の決定

前節までに生成した誘導灯・出口の接続ネットワークより、各誘導灯の誘導方向を決定する。誘導灯の接続先が接続先が 2 つ以上ある場合には、接続を 1 つ選択することで誘導方向が決定する。全ての誘導灯の接続先が選択されると、各出口の分配避難者数によるコストが決定する。

本研究では、避難効率の評価基準として避難完了時間を用いているため、出口のうち最大コストが最も小さくな

る誘導を選択する^{*3}。これは、全出口のコストが同じになるように誘導することになるため、Wardrop の第一原則 [7] として知られる「旅行者に使われている経路のコストは全て等しく、使われていない経路のコスト以下になる」という性質を満たしており、利用者均衡配分 (UE: User Equilibrium assignment) に該当する。

一般的に、交通流を最適化する際には、システム全体の総移動時間を最低とするシステム最適配分 (SO: System Optimum assignment) の実現を目指す。しかし、本問題で目的とする避難完了時間は、最後の避難者が移動完了するまでの時間であるので、必ずしも SO である必要はない。また、本研究での各出口のコストは、そのままその出口の避難完了時間となるため、全体の避難完了時間を最小とするのは、各出口のコストが均等になる UE の場合で十分である。

ただし、Wardrop の原則は「旅行者はすべての経路情報を完全に得ることができる」という前提があるが、本研究の避難者は視界によって取得できる情報が制限されているため、厳密にはあてはめることはできない。

図 5 右の例では、誘導灯 s_2 が s_1 への接続を選択した場合には、出口 e_1 の配分避難者数は $63 + 78 = 141$ でコストも同じになる。出口 e_2 の配分避難者数は 66 で、コストは $\frac{66}{2} = 33$ となる。

誘導灯 s_2 が s_3 への接続を選択した場合には、出口 e_1 の配分避難者数は 63 でコストも同じになる。出口 e_2 の配分避難者数は $78 + 66 = 144$ で、コストは $\frac{144}{2} = 72$ となる。

このとき、全体の避難効率としては、誘導灯 s_2 を s_3 へ誘導した方が、各出口の最大コストが 72 と、 s_1 へ誘導した場合より低くなるため、こちらを選択する。これは、より大きい出口へ誘導人数を増やしたほうが良いという直感的にも明らかであることを、本手法では自動的に実現していることが分かる。

4.2.3 補助誘導灯の設置

本手法で用いる誘導灯の配置位置決定手法 [12] は、分割矩形 2 つを組にして 1 つの誘導灯で網羅する事を基本としている。しかし、一つの誘導灯の指示方向に複数の経路がある場合には、狙った経路へ誘導ができない可能性がある。そこで、ある誘導灯から次の誘導方向が決まっている場合には、その境界となる位置に次の誘導方向を明示するための補助誘導灯を配置する。

図 6 の例では、誘導灯 s_1 は同方向、同距離で誘導灯 s_2 、 s_3 と接続している。誘導灯 s_1 から誘導灯 s_2 に誘導したい場合、誘導灯 s_1 と s_2 の効果範囲の境界部分に誘導灯 s_2 方向へ補助誘導灯を配置する。

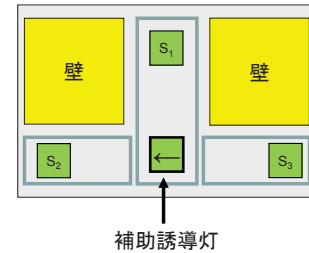


図 6 補助誘導灯

Fig. 6 An additional Sign

5. 実装と実験

本研究では、第 2 章で述べた避難者行動を再現し、避難効率を検証するために MA 避難シミュレータを Visual Basic 2010 を用いて実装した。

本シミュレータでは、2 次元格子上で構成されたマップ上に壁、誘導灯を設置・削除する編集機能を持ち、作成したマップに対して第 4 章で述べた誘導灯の自動配置ならびに誘導方向の自動決定を行うことができる。また、避難者エージェントが第 2 章で定義した行動をとるときの避難流を確認することができる。

本シミュレータでは、建物のマップは以下のように実装した。

- 建物内は、天井方向から俯瞰した二次元平面で表現し、距離はノイマン近傍を使用する
- 建物内は、視界・移動を遮蔽する壁と、何も無く見通し、移動が可能な地点（以後フロアと呼ぶ）からなる
- フロアには出口の他、出口への方向を示す避難誘導灯を配置できる
- 壁、フロアなどの設置は、建物内を格子状に区切ったセルで表現する
- 建物の外壁（外枠）は矩形で構成される
- 出口、避難誘導灯の効果範囲には角度の限定はなく、壁で遮蔽されない限り全方位で有効
- 出口 1 セルからは 1 ステップに 1 エージェントが脱出し、マップから削除される

また、以上のマップ内に配置される避難者を、以下のルールで行動するエージェントとして実装する。

- 目的：出口への到達を目的とする
- 情報：現在位置座標、方向を持つ
- 視界：設定される距離内を視界として情報を取得できる
- 行動：視界内の目標に対して、ASPF ルール [11] に従って行動する

5.1 実験 1. 理論的予測値とシミュレーション結果の比較

避難完了時間の理論的予測値と、実装したシミュレータによる結果の比較を行い、提案する解析手法の有効性を確

^{*3} 1 つの誘導灯の範囲内の避難者エージェントは、その誘導灯の指示に従って同じ方向へ移動するため、一般的な最大流問題のように、1 つのノードから複数のノードへ分割して移動することはできない

認する．使用するマップ構造は，前章で述べた構造例 1 (図 3)，構造例 2 (図 4) を用い，以下の条件で実験を行う．

- マップの大きさ：50 セル × 50 セル
- 視認距離制限なし
- 配置避難者エージェント数：2000
- 試行回数：1000 回

実験では，上述の条件下で，全エージェントが避難を終えるまでのステップ数を避難完了時間として測定する．構造例 1 の結果を 7 に，構造例 2 の結果を 8 に示す．なお，理論解析値については，(2) 式を用いている．また，ASPF 歩行者ルール (5) では，周囲が空いている場合には前方 3 セルまで移動できるため，避難者エージェントの移動速度 $v = 3$ としている．

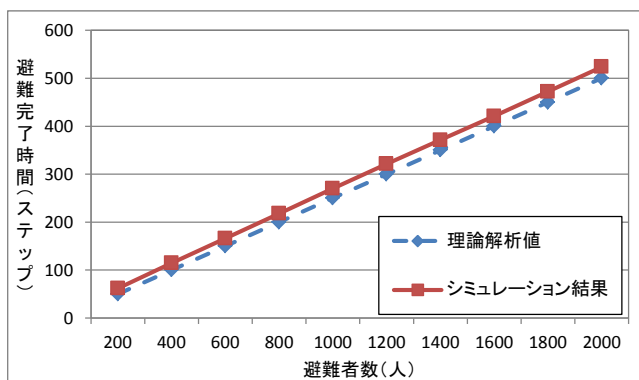


図 7 実験 1 結果 (1-2)

Fig. 7 The result of examination 1(1-2)

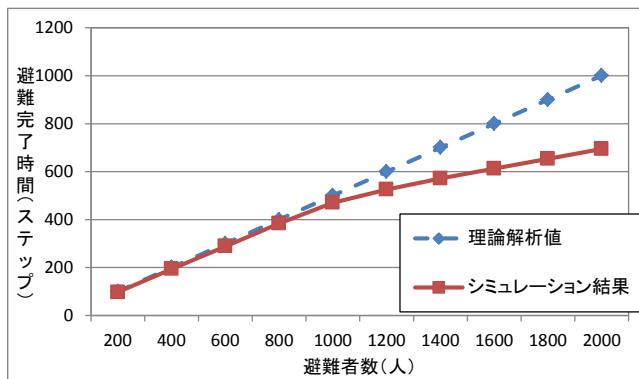


図 8 実験 1 結果 (2-2)

Fig. 8 The result of examination 1(2-2)

5.2 実験 2．避難者数の避難完了時間への影響の検証

本実験では，提案する誘導手法の有用性を検証するために，建築物内部を模した構造での実験を行う．使用する構造は図 9 のようになっていて，誘導灯の配置位置を矩形分割で決定した後，誘導方向を

- 最短距離出口誘導
- ネットワーク解析による避難完了時間最適配分誘導

の 2 通りで自動的に決定する．実装したシステムによる誘導灯の配置結果を図 10 に示す．

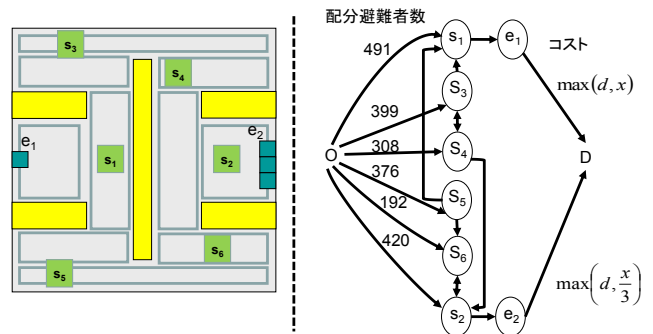


図 9 実験 2 のマップとネットワーク

Fig. 9 The map and the network of examination 2

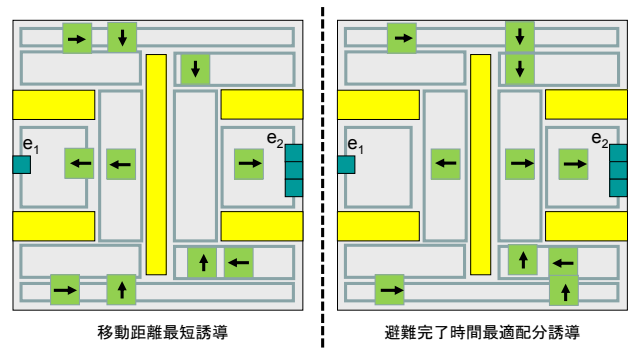


図 10 実験 2 の誘導灯配置

Fig. 10 The exit sign assignment of examination 2

また，この実験では避難者の人数の避難効率への影響を検証するため，避難者数を

- (1) 10～100 人まで 10 人刻みで変化
- (2) 200～2000 人まで 200 人刻みで変化

の 2 通りの結果を得る．図 11，図 12 に結果を示す．

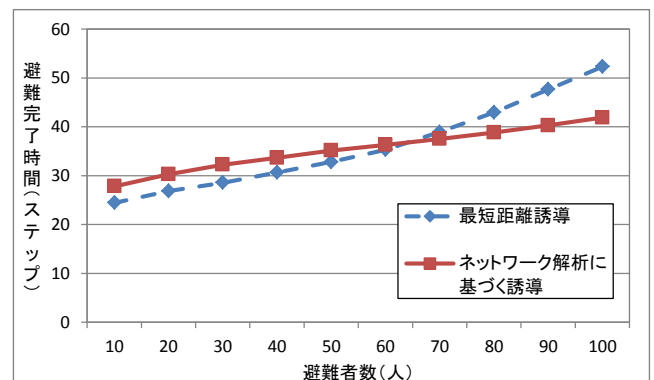


図 11 実験 2 結果 1(1)

Fig. 11 The result of examination 2(1)

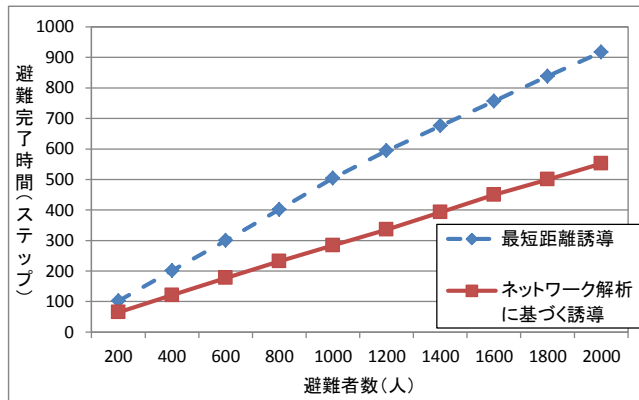


図 12 実験 2 結果 (2)

Fig. 12 The result of examination 2(2)

6. 考察

実験 1 の結果 (図 7, 8) より, 交通流モデル化による解析値と MA シミュレータによる結果に同様の傾向が見られ, 提案する解析手法が群集流のマクロな現象の解析に有用であることがわかる。

また, 建築基準法施行令 [9] においては, 床面積に比例した出口の大きさが規定されている。しかし, 本実験では出口の増設により, かえって避難効率が悪化する場合があることが示される。そのため, 単に全体の床面積ではなく, 各出口の効果範囲のバランスより許容量を求めることが不可欠であると考えられる。

また, 図 8 では, 避難者エージェントの数が増えるにつれ解析値とシミュレータ結果が乖離する傾向がある。これは, ASPF 歩行者ルールが原因である。この歩行者ルールでは, ある出口へ向かおうとするエージェントが他者を避けることで, 目標出口から遠ざかってしまうことがある。この時, エージェントの位置が 2 つの出口の中間線上に近いと, 他者回避により中間線を越えてしまい, 元の目標出口と異なる出口側へ移動することがある。構造例 2 (図 4) では, 中央出口に集中する滞留の外縁部にいるエージェントが, この現象で, より空いている他の出口へ移動することで, 意図せずに避難者の分散が行われて, 避難完了時間が解析値より低下している。

実験 2 の結果 (図 11, 12) より, 出口を直接視認できない構造であっても, 提案手法により避難誘導灯の自動配置, 誘導が可能であることが分かる。また, 避難者が少ない場合 (図 11) には, 移動距離を最短とする誘導の方が効率が良いが, 避難者が多くなると図 12 のように, 出口の大きさに比例した配分を行う方が効率が良くなることから, あらゆる場合に最適な誘導方向は存在せず, 避難誘導の計画時には, 避難者数の見積もりが重要であることがわかる。

以上より, 本研究では, 避難流の特徴をネットワークモデル化と (2) 式に基づく理論的な解析より予測でき, シ

ミュレーション上でも同様の傾向を一致することを示した。これは, 建築物の避難効率を検討する際に, 計算コストのかかるシミュレーションを省略できることを示唆している。また, 今回は簡単化のため, 視認距離の制限は行っていないが, 誘導灯配置問題 [12] においては, 視認距離が有限の場合も考慮されており, 対応は難しくない。

7. まとめと今後の課題

本研究では, これまで理論的な解析が行われていなかった避難流について, 交通流ネットワークを用いたモデル化を行い, マクロな視点からの避難効率解析手法を提案し, 従来は手動で行われていた誘導灯配置の自動化を行った。また, 提案手法に対して MA モデルによる避難シミュレータを作成して避難効率の検証実験を行い, シミュレーション結果を高い精度で予測でき, 提案手法で効率的な誘導が可能となることを確認した。

今回の手法では, 避難経路のコストを出口のみで決定しており, 途中の通路の大きさは考慮していないため, ボトルネックとなる通路のコストへの繁栄が今後の課題として挙げられる。また, 同じ誘導経路であっても避難者の密度で効率が変化することが示されたため, 将来的には誘導経路を動的に変化させる手法も考えられる。

参考文献

- [1] 消防法施行規則: (オンライン) <http://law.e-gov.go.jp/htmldata/S36/S36F04301000006.html>
- [2] 辻優介, 尾崎昭剛, 原尾政輝: MAS 手法を用いた屋内避難誘導灯の最適配置法に関する研究, 第 11 回 MAS コンペティション, (オンライン) <http://mas.kke.co.jp/modules/tinyd3/index.php?id=13>, (2011).
- [3] 渡邊卓也, 大上俊之, 小山茂: マルチエージェントモデルを用いた建物火災の避難行動シミュレーション, 計算数理工学論文集 Vol.7, pp. 7-12(2007).
- [4] 鎌田智之: マルチエージェントモデルによる介護保険施設における火災時の避難誘導に関する研究, 筑波大学大学院博士課程システム情報工学研究科修士論文, (2008).
- [5] 安福健祐, 阿部浩和, 吉田勝行: 避難シミュレーションシステムの経路障害発生時への適用, 日本建築学会計画系論文集, 第 626 号, pp.721-727, (2008)
- [6] Tim Roughgarden: "SELFISH ROUTING", A Dissertation Presented to the Faculty of the Graduate School of Cornell University in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Doctor of Philosophy, (2002).
- [7] J. G. Wardrop, "Some Theoretical Aspects of Road Traffic Reserach," in Proceedings of the Institute of Civil Engineers 2, pp325-378, (1952).
- [8] 兼田敏之: artisoc で始める歩行者エージェントシミュレーション, 構造計画研究所 (2010) .
- [9] 建築基準法施行令第 5 章第 2 節第 125 条: (オンライン) <http://law.e-gov.go.jp/htmldata/S25/S25SE338.html>
- [10] 森田孝夫, 阪田弘一, 高木真人, 山本宗: 祝祭街路における群集密度と歩行特性に関する研究-神戸ルミナリエを中心として-, 日本建築学会技術報告集, 第 20 号, pp.307-312, (2004)
- [11] 伊藤悠太郎, 鈴木智彦: エージェントアプローチによる

群集流動のシミュレーション分析 - 明石歩道橋事故の再現を通じて - , 構造計画研究所 第 4 回 MAS コンペティション論文集 , pp.195-202 , (2004).

- [12] 尾崎昭剛, 原尾政輝: 矩形領域分割による誘導灯自動配置アルゴリズム, 電子情報通信学会論文誌, 投稿中.
- [13] Chva'tal, V.: "A combinatorial theorem in plane geometry", Journal of Combinatorial Theory, Series B 18: pp39-41(1975)
- [14] Fisk, S.: "A Short Proof of Chva'tal's Watchman Theorem.", Journal of Combinatorial Theory, Series B 24, pp374 (1978)
- [15] Bjorling-Sachs, I. and Souvaine, D. L. : "A Tight Bound for Guarding Polygons with Holes.", Report LCSR-TR-165. New Brunswick, NJ Lab. Comput. Sci. Res., Rutgers Univ., 1991.
- [16] Bjorling-Sachs, I. and Souvaine, D. L. : "An Efficient Algorithm for Guard Placement in Polygons with Holes.", Disc. Comput. Geom. 13, 77-109, 1995.