

周回探索による避難誘導

尾崎 昭剛^{1,a)}

概要: 多数の人が集まる施設においては、災害発生時の犠牲者を減らすため、避難誘導が重要である。これまでに、避難誘導灯の配置手法について提案されているが、災害によって使用不能になったり、避難経路の変更が生じた場合等には、誘導者が動いて避難を誘導する、動的誘導が必要になる。そこで、本研究では、誘導者が矩形外周を移動しながら誘導を行うことで、少ない誘導者数で避難完了時間を低減できる手法の提案を行う。また、提案手法を、マルチエージェントシミュレーション上で実装し、避難効率への影響を検証する。

キーワード: 避難誘導, マルチエージェントシミュレーション

Evacuation Guidance by Go around Search

OZAKI SHOGO^{1,a)}

Abstract: In facilities where many people gather, evacuation guidance is important in order to reduce the number of victims in the event of a disaster. So far, it has been proposed for the placement algorithm of exit sign. Dynamic guidance is necessary if disaster becomes unusable due to disaster or evacuation route changes. Therefore, in this research, we propose a method to reduce the evacuation time by guides going around the rectangle. We implement the proposed method by multi agent simulation and verify evacuation efficiency.

Keywords: Evacuation Guidance, Multi Agent Simulation

1. はじめに

不特定多数の人が集まる施設においては、避難者が避難経路を知っているとは限らないため、災害発生時に適切な避難誘導が行われず、多大な犠牲者が出た事例 [1][2] が知られている。そのため、消防法施工規則 [3] では、避難誘導灯の設置が義務付けられているおり、誘導灯の避難効率への検証 [4]-[7] や、死角を作らない避難誘導灯の配置手法の提案 [8] が行われている。

しかし、災害時には誘導灯の破損や、危険地域の変化による避難経路の変更などの状況変化が起こる可能性があるため、動的な誘導手法も必要である。動的な誘導手法の検

討としては、誘導者が避難者に方向を指し示す指差誘導法と出口まで案内を行う吸着誘導法 [9] が提案されている。

指差誘導法は、周囲の避難者に対して避難方向を指し示して誘導を行う方法で、吸着誘導法は、近距離にいる避難者を直接出口まで誘導する方法である。この2つの手法は、実際の人間による避難実験 [9] や、マルチエージェントシミュレーション (以下 MAS) による比較 [10] が行われており、吸着誘導法の方が効率が良くとされている。

しかし、これらの検証では、誘導者は一度誘導を行うとそのまま自身も避難してしまうため、避難者が取り残される恐れがある。また、検証条件も地下街からの避難で、 $75m \times 8m$ の範囲に避難者 42 名であり、人口密度 $0.07 \text{ 人}/m^2$ と低い状況であった。一方、ショッピングモール等のように、狭い範囲に人が集まる環境を想定する場合には、建築基準法施行令 [11] において在館者密度は売場の部分で $0.5 \text{ 人}/m^2$,

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

通路の部分で $0.25 \text{ 人}/m^2$ と定められていることから、既存の検証の条件とは大きな開きがある。

そこで、本研究では、建築物内部の状況を想定し、人口密度の高い状況での避難効率の検証を行う。誘導手法には吸着誘導法を用いるが、既存研究とは異なり、誘導者が積極的に避難者を探索することで、避難者の取り残しを防ぐ。そして、誘導者の探索手法について、設定範囲内を無作為に動き回るランダム探索誘導と、設定矩形の外周を回り続ける周回探索誘導の比較を行う。周回探索誘導においては、誘導者は人間のような複雑で能動的に動作を行うのではなく、一定の経路を機械的に周回するという単純な挙動とし、将来的にはドローン等による置き換えも考慮する。

提案手法を、モデル化して MAS として実装し、避難効率の検証を行う。

本論文の構成は以下の通りである。第 2 章では、避難現象のモデル化を行う。第 3 章では、提案する避難誘導手法を述べる。第 4 章では、MAS の実装と避難効率の検証実験と、考察を述べる。第 5 章は考察、第 6 章はまとめと今後の課題である。

2. 避難現象のモデル化

本研究では、大型商業施設やスタジアムやコンサートホール等、避難経路を知らない不特定多数の人が集まる状況を想定する。動的誘導手法の検討のため、障害物や避難誘導灯は設置せず、シミュレーション空間としては以下の条件を設定する。

- 空間：2次元平面とする
- 空間内に配置される要素
 - 避難者エージェント
 - 誘導者エージェント
 - 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。

避難者エージェントは自己の避難を最優先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。

避難者エージェントの基本的な条件は次のように定義する。

- 情報取得：全周囲の距離 $10m$ 以内を視界として情報を得る。ただし、壁によって視界は遮断される。
- 行動
 - 移動：目標に対して最大 $1.15m/s$ の速度で移動する。移動には ASPF 歩行者モデル [13] を用いる。
- 目標達成：出口から $1.5m$ 以内への到達を避難完了とみなし、目標達成とする

2.1 避難行動

避難者は、出口への到達を目標として避難行動を行う。そのために、次の優先順位で目標を設定し、移動する。

- (1) 視界内の出口
- (2) 視界内の誘導者
- (3) 視界内の被誘導中の避難者

視界内に上記の目標が 1 つも無い場合には、ランダムに移動する。この時、1 ステップ毎に 5% の確率で全周囲からランダムに方向決定を行う。

一般的な建築物では、出口は通路より狭くなっていることが多く、このような場所はボトルネックとなり、移動速度が低下することが知られている [12]。過去のシミュレータ [4] では、この移動速度低下の実験結果を元に、1 つの出口から 1 人が通過するのに 1.3 秒必要という設定を用いており、本モデルでも同様とする。

3. 探索・誘導手法

誘導者エージェントは、他の避難者を探索して出口へ誘導することを目的とする。誘導者エージェントの基本的な条件を以下のように定義する。

- 状態：エージェントは以下の情報を保持する
 - 自分が誘導する出口
 - 探索半径
- 情報取得：全周囲の距離 $10m$ 以内を視界として情報を得る。ただし、壁によって視界は遮断される。
- 行動
 - 移動：目標に対して $0.58m/s$ の速度で直線的に移動できる

取得できる情報は避難者と同じであるが、移動は ASPF モデルに基づく他者回避は行わないものとする。これは、誘導者は避難者の移動目標となりうるため、1 人の誘導者に対して多数の避難者が全周囲から集まる場合がある。この時、ASPF モデルに従うと、周囲を囲まれた誘導者は移動ができず、誘導が停止してしまう。実際の避難現場では、このような場合には、誘導者が避難者をかき分けて進み、避難者側も自分の避難のため、誘導者には道を譲ると想定されるため、誘導者エージェントは他者の回避を行わず、目標への直線移動ができるものとする。ただし、避難者エージェントが確実に追従できるように、速度は避難者の半分とする。

対象となる建築物に目標となる出口が複数ある場合には、出口の大きさに比例した人数を誘導することにより、避難効率が改善できることが指摘されている [14]。そこで、本研究では誘導者の探索・誘導範囲を限定する。以下に挙げる 2 つの手法において、範囲を均等とする場合、出口の大きさに比例した範囲にする場合の両方を実装し、避難効率への影響を検証する。

3.1 ランダム探索

本研究では、提案する外周探索との比較のために、無作為に避難者を探索して誘導するランダム探索を定義する。

この探索誘導においては、誘導者エージェントは以下のように移動する(図1)。

- 自分が誘導中の避難者がいる場合：出口へ誘導する(移動する)
- 自分が誘導中の避難者がない場合：自分の所属出口から探索半径内の領域をランダム移動する

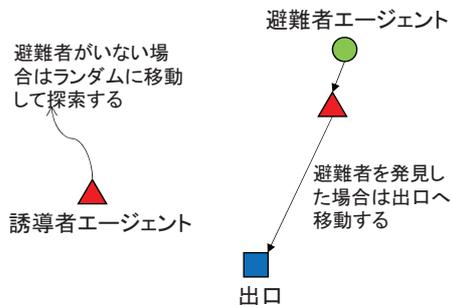


図1 ランダム探索
Fig. 1 Random search

誘導者エージェントのランダム移動も、避難者の場合と同じく、1ステップ毎に5%の確率で方向転換を行う。

出口へ誘導を行い、避難者が直接出口を視認できるようになると、それ以上の誘導は不要となる。また、既に他の誘導者を目標としている避難者も、誘導は必要ない。そのため、周囲に避難者がいたとしても、自分が誘導中でない(避難者が自分を目標としていない)場合は、ランダム移動による探索を行う。

この手法では、最初は誘導者が無作為に散らばっていたとしても、避難者を見つけると必ず出口へ誘導するため、結果的に出口付近に誘導者が集まってしまう。そのため、出口から離れるほど誘導者密度が下がってしまい、最も移動距離の長くなる避難者が誘導を得られず、避難時間が悪化する原因となる。

3.2 周回探索

構造物内部の全域に対して、一定の探索密度を確保するため、本研究では、対象領域を矩形に分割して、誘導者を専属で割り振る方法を提案する。本手法の基本的な考え方は、死角を作らない誘導灯配置の手法[8]が知られているため、誘導灯の代わりに、誘導者で誘導を行うというものである。

また、適切な避難誘導が行われなかった建物火災の事例[1][2]では、ほとんどの死亡者が壁際又は階段で発見されていることから、救助の際にも、フロア中央部分より外周部分の探索を重点的に行うことが効果的であると考えられる。そのため、本手法の誘導者は分割された矩形のその外周を規則的に周回する。この手法を周回探索と呼ぶ。

誘導者の周回経路設定のため、誘導者の移動目標となる

チェックポイントを定義する。誘導者は矩形の各頂点に配置されたチェックポイントを順に辿っていくことで、周回を行う。この時、誘導者は周囲に避難者がいても行動は変更せず、周回を続行する(図2)。避難者は誘導者を見つると追跡して周回し、出口を発見すると出口へ目標が変更されるため、出口へ到達することが可能となる。

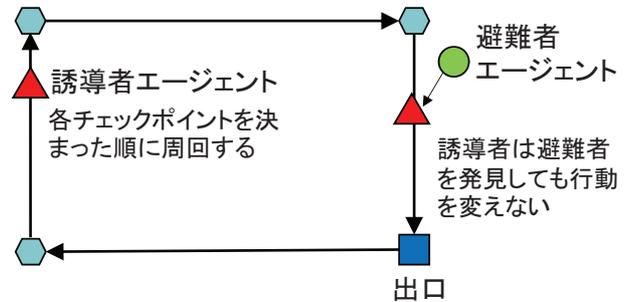


図2 周回探索誘導
Fig. 2 Go around search guiding

本手法では、以下の手順に従ってチェックポイントを配置する。

- (1) 全体を被覆できる矩形分割[15]を行う
- (2) 各矩形内の領域を、どの出口に割り振るのかを決定する[8]
- (3) 1つの矩形内に複数の出口がある場合には、各出口を頂点とする矩形に分割する
- (4) 分割された矩形の各頂点にチェックポイントを配置する

3.2.1 周回の連結

周回探索誘導において、各探索周回内に出口がある場合は、1週すると必ず誘導中の避難者を出口から脱出させられる。しかし、出口のない領域を周回する際には、同じ部分を何周も回ってしまうため、出口のある別の領域へ移動する必要がある。そのため、本手法においては、分割された矩形間が接する部分に引継ぎ部分を設ける(図3)。これは、引継ぎ用のチェックポイントとして定義され、誘導員の移動経路となることは、通常チェックポイントと差異はない。

例えば、図4のような構造があったとする。これに対して矩形分割を行うと、図5の点線部分のように、3つの矩形に分けられる。分割された各矩形領域のうち、下部の左右の矩形は、それぞれ矩形内に出口があるため、出口への割り当ては自動的に決定できる。また、上部の矩形は内部に出口を持たないため、下部左右の出口のどちらかに割り振る必要がある。この場合、面積比と出口の数より、左に割り振る方が避難効率が向上できる。

そして、各矩形内の頂点にチェックポイントを作り、周回路を設定する(図6)。この例では、左下矩形には出口

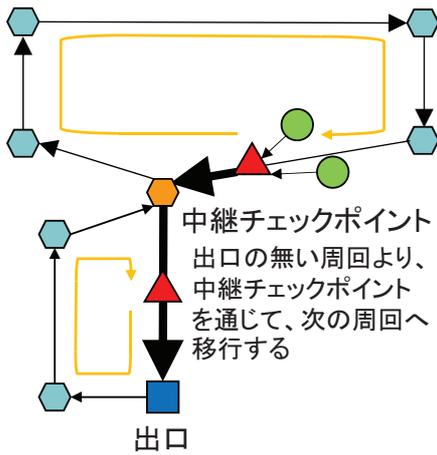


図 3 周回の連結
 Fig. 3 Changeover to a next round

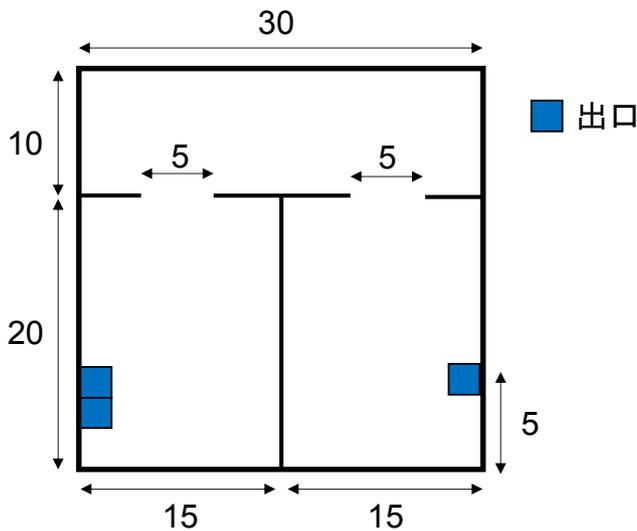


図 4 構造例
 Fig. 4 An example map

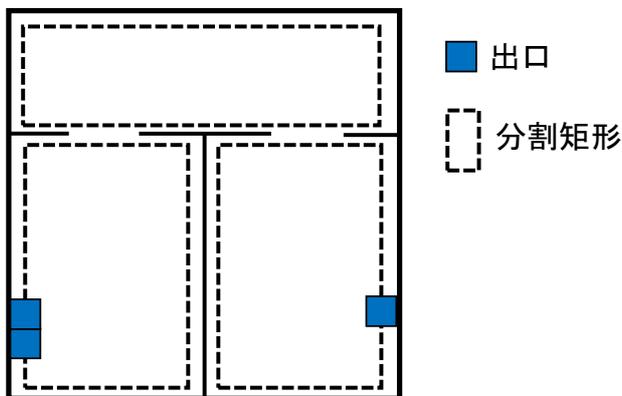


図 5 矩形分割
 Fig. 5 Division by rectangle

が2つあるため、1 矩形内に2つの周回ができています。また、左下矩形上部の周回が矩形ではなく、三角形になって

いる。これは、下部の周回の上辺により、上部のほとんどの領域が視界内に入るため、人間の手で上部周回を簡略化する調整を行ったためである。また、下部のチェックポイントが下側に寄っているが、周回矩形間が避難者エージェントの視界より近いと、避難移動中に他の矩形の誘導者を見つけて、正しく出口の分配ができなくなるためである。

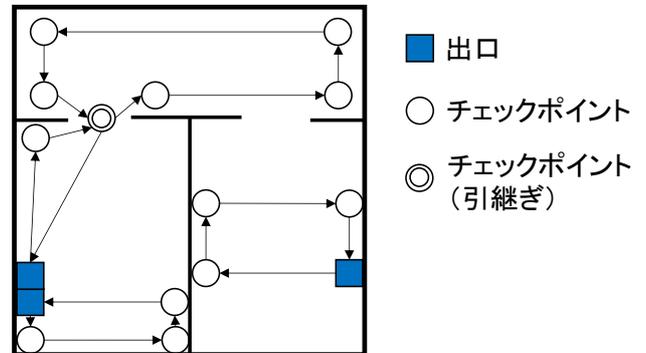


図 6 誘導者の移動経路
 Fig. 6 Route of guide

4. MAS による実装と実験

本研究では、提案する誘導手法を artisoc 2.6[16] を用いて実装した。実装したシステムの画面を図7に示す。

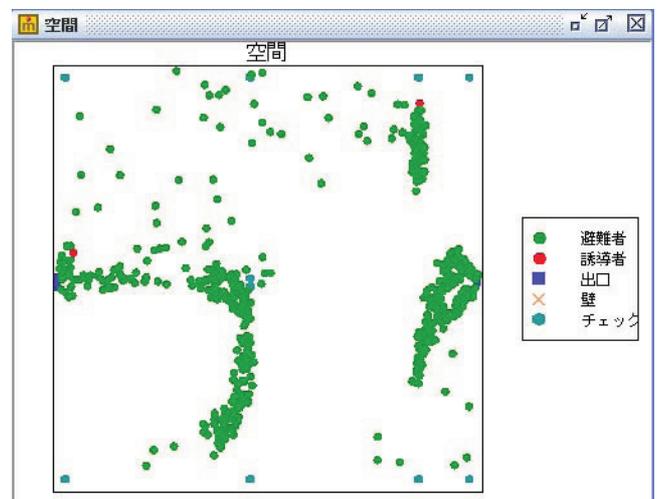


図 7 避難シミュレーションの GUI
 Fig. 7 GUI of evacuation simulation

4.1 実験 1：障害物の無い構造での避難

提案手法により、誘導灯と同様に避難者を適切に出口に割り振ることで、避難効率が改善できるのか、以下の条件で検証する。

- 全避難者の避難が完了するまでのステップ数を避難完了時間とする
- 試行回数 100 回の平均避難完了時間を結果として用

いる

- 使用する構造の広さは $50m \times 50m$
- 避難者数 600 人 (人口密度 $0.24 \text{ 人}/m^2$)
- 誘導者数を 3~18 人の範囲で 3 人刻みで変化させる
各エージェントの初期配置は以下の通りである。
- 避難者エージェント：全体に均等に配置
- 誘導者エージェント：各出口、チェックポイントに均等に配置

実験に用いる構造は、次の図 8、図 9 の 2 種類である。

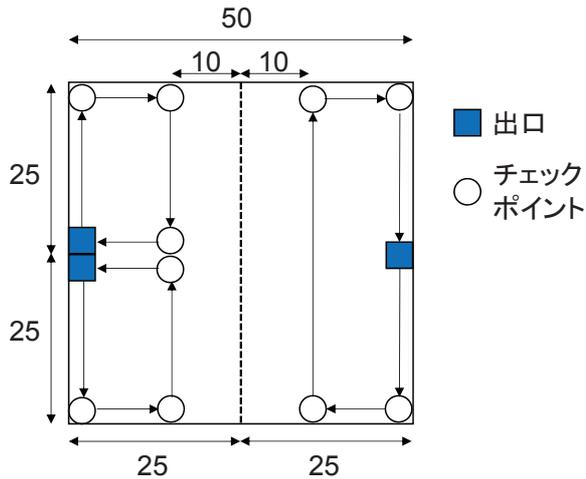


図 8 チェックポイントの配置 (均等)

Fig. 8 Location of Checkpoints(equal)

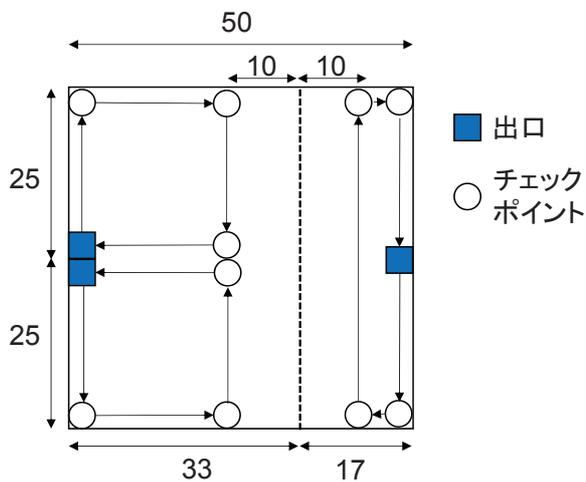


図 9 チェックポイントの配置 (比率変更)

Fig. 9 Location of Checkpoints(rate change)

この 2 つは構造は同じであり、左端に出口が 2 つ、右端に出口が 1 つある。異なる点は、図 8 はチェックポイントが左右均等、図 9 は出口の比率に応じて、左側 2/3、右側 1/3 となるように調整されている。また、ランダム探索の際は、図 8 の構造では全誘導者の探索半径を 15、図 9 の構造では左側出口担当の誘導者は探索半径 15、右側出口担当

の誘導者は探索半径 7 とする。
実験 1 の結果を図 10 に示す。

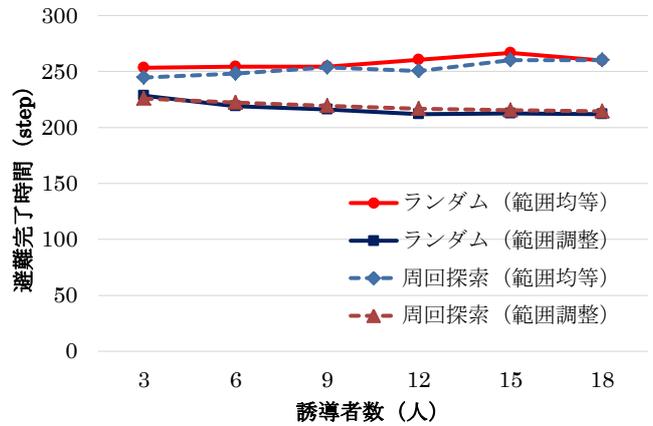


図 10 実験 1 結果

Fig. 10 The experimental result 1

4.2 実験 2：障害物のある構造での避難効率

次に、障害物のある構造での避難効率の検証を行う。使用する構造としては、前章で説明した図 6 を用いる。実験の条件は以下の通りである。

- 全避難者の避難が完了するまでのステップ数を避難完了時間とする
 - 試行回数 100 回の平均避難完了時間を結果として用いる
 - 使用する構造の広さは $30m \times 30m$
 - 避難者数 225 人 (人口密度 $0.25 \text{ 人}/m^2$)
 - 誘導者数を 3~18 人の範囲で 3 人刻みで変化させる
- 実験 2 の結果を図 11 に示す。

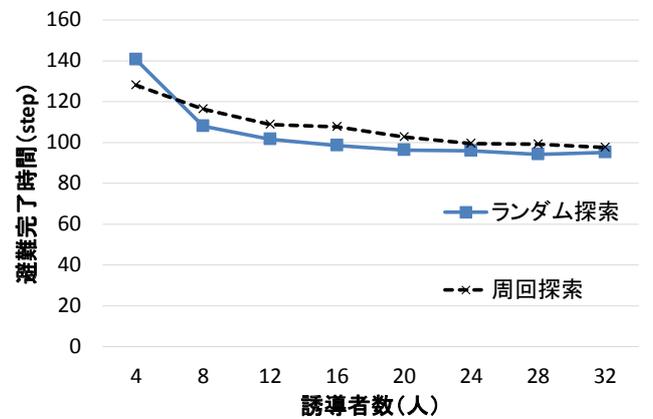


図 11 実験 2 結果

Fig. 11 The experimental result 2

4.3 実験3：誘導者密度が低い場合の避難効率

実験2のように人口密度が高く、狭い構造の場合、避難者が誘導員や被誘導中の避難者を見つけることが容易になると考えられる。そこで、実験3では誘導員の密度を減少させることで、避難者の発見を困難にした場合の検証を行う。そのために、実験2の構造を50m×50mに拡大した図12を用いる。また、誘導者も4~8人と限定する。避難者数が100~300である以外の条件は実験2と同様である。

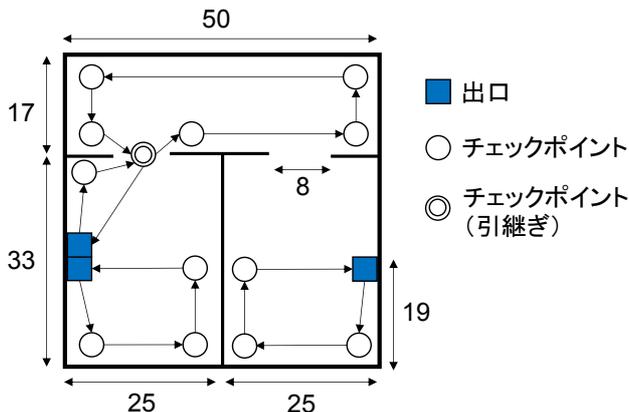


図12 実験3の地図

Fig. 12 The map of exam3

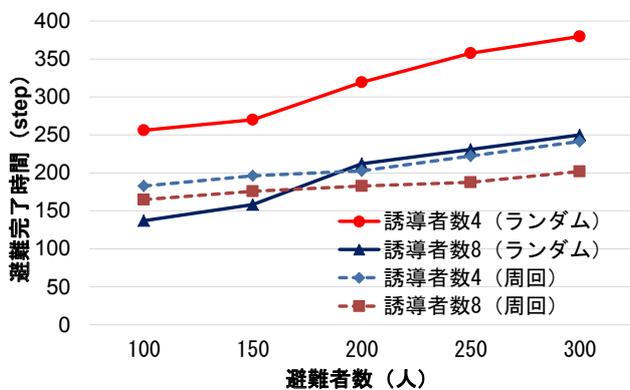


図13 実験3結果

Fig. 13 The experimental result 3

5. 考察

実験1の結果(図10)より、避難者を左右均等に誘導するより、出口の数の比に応じて、左右を2:1に誘導するように調整したほうが、避難効率が良いことが分かる。これにより、本研究で提案する誘導法であっても、誘導灯による誘導と同じ手法で避難者の割り当てを行い、避難効率を改善できることが分かる。

実験2の結果(図11)では、建設省告示第1442号[11]における商業施設の通路の定義に準じた人口密度で実験を行っている。その結果、両手法の避難完了時間に大きな差

は見られなかった。これは、人口密度が高い場合は、出口へ到達した避難者による滞留が生じるため、誘導の効率に多少の差があっても、滞留が解消するまでに誘導できれば避難完了時間に影響が少ないためと考えられる。

傾向としては、ランダム探索は誘導者数16以降は避難完了時間の減少がほぼ無くなるため、今回の構造では、誘導者は16人で十分であるといえる。これは、ランダム探索の場合は誘導者が増えると、探索領域の重複が起きるため、ある程度の数以上は改善がなくなるためと考えられる。一方、周回探索は誘導者数4ではランダム探索より低い時間で避難を完了しており、以後線形に近い形で減少し、誘導者数32でランダム探索ほぼ同程度となる。周回探索では、1つの周回に誘導者1人の場合、避難者が直近の誘導者の発見・追従に失敗すると、1周してきた誘導者が戻ってくるまで、誘導を受けられない。1つの周回の誘導者が増えると、誘導を受けられる確率が増加するため、避難時間が減少する。しかし、ランダム誘導の場合は誘導が始まると、その場から最短経路で出口へ移動できるのに対し、周回探索では誘導者を見つけても、その後は必ず周回経路を通して出口へ移動するため、このような傾向の差が出たものと考えられる。

実験3は、実験2の誘導者が少ない場合の比較をより詳細に行ったものである。その結果(図13)より、誘導者数が限られた状態では、周回探索の方が優れた避難効率を示している。特に周回探索誘導者数ランダム探索の場合、誘導者数が少ない場合は、初期配置位置から出口への経路以外の部分は、低い確率でしか誘導者が訪れない。周回探索の場合は、最低限の誘導者であっても、必ず全部の周回矩形に誘導者が回っているため、死角となる領域を減らすことができているためと考えられる。

以上の実験より、本研究で提案する周回探索手法は、少ない誘導者で高い避難効率を実現できることができると言える。周回探索手法は、ランダム探索のように、周囲の状況に応じて行動を変えるようなことは必要なく、ドローンのような無人の機械でも容易に代替が可能である。災害時の避難誘導の際には、誘導者自身も危険に晒されるため、有効な手法であると思われる。

6. まとめと今後の課題

本論文では、誘導灯を使わず、誘導者が動いて避難者を誘導する手法について、提案を行った。提案手法をMAシミュレータにより、避難効率を検証し、無作為に探し回るより、より少ない人数で効率の良い避難誘導を行えることを示した。

課題としては、本稿ではシミュレーション中の避難経路については、静的な環境であったため、今後は一部の出口が途中で使えなくなり、動的に避難経路の変更する場合の再現を行いたい。避難誘導手法についても、今回は1つの

手法のみを検証に用いていたが、複数の誘導手法の誘導員と避難誘導灯を組み合わせるなど、複合的な避難誘導を検討することで、より高い避難効率の実現が可能であると考えられる。

また、今回は実装したシミュレータの処理速度の問題から、法令上の通路相当の人口密度までしか実験を行えなかったが、今後は店舗の売場や飲食室等、より高い人口密度での検証を行う予定である。

参考文献

- [1] 消防防災博物館：特異火災事例 大洋デパート, 入手先
(<http://www.bousaihaku.com/bousaihaku2/images/exam/pdf/a083.pdf>)
- [2] 消防防災博物館：特異火災事例 千日デパート, 入手先
(<http://www.bousaihaku.com/bousaihaku2/images/exam/pdf/a077.pdf>)
- [3] 総務省：消防法施行規則, 入手先 (<http://law.e-gov.go.jp/htmldata/S36/S36F04301000006.html>)
(2016.5.27).
- [4] 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)
入手先 (<http://mas.kke.co.jp/modules/tinyd3/index.php?id=13>)
, (2011).
- [5] 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).
- [6] 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).
- [7] 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)
- [8] 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 D, Vol.J98-D No.6 pp.916-925 (2015.06.01)
- [9] 杉万 俊夫, 三隅 二不二, 佐古 秀一：緊急避難状況における避難誘導方法に関するアクション・リサーチ (I)-指差誘導法と吸着誘導法 -, 実験社会心理学研究, Vol. 22 (1982-1983) No. 2 P 95-98
- [10] 岡田 裕作, 竹内 則雄：避難時における指差誘導法及び吸着誘導法に対するシミュレーション, 法政大学情報メディア教育研究センター研究報告 20, 55-62 (2007)
- [11] 建設省：平成 12 年建設省告示第 1442 号, 入手先
(<http://www.mlit.go.jp/jutakukentiku/build/s20000523/n072.pdf>),
(2000)
- [12] 佐野友紀, 今西美音子, 布田健, 萩原一郎：群衆実験からみた開口部通過流動に関する考察, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.957-958, (2007).
- [13] 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).
- [14] 尾崎昭剛, 原尾政輝：避難経路ネットワークモデルを用いた自動誘導灯配置, 火の国情報シンポジウム 2015,(2015).
- [15] 畑田秀一, 山下雅史, 平田富夫, 茨木俊秀, 本多波雄：図形の長方形による最小被覆問題, 電子通信学会技術研究報告, Vol.83-303,pp93-106, (1984)
- [16] 構造計画研究所：artisoc 入手先 (<http://mas.kke.co.jp>)
(2009).