

周回探索による避難誘導

尾崎 昭剛

(崇城大学情報学部情報学科)

1 はじめに

大型商業施設のように、内部構造を熟知しない不特定多数の人が集まる施設においては、災害発生時に適切な誘導が行われず、多大な犠牲者が出た事例 [1][2] が知られている。そのため、避難誘導灯の設置が法的に義務付けられている [3]。

誘導灯については、設置による避難効率への検証 [5]-[8] や、死角を無くすことのできる自動配置手法の提案 [9] が行われている。また、適切な避難者の配分を行うため、避難者の数を認知することで、動的に誘導方向を変える動的誘導灯の提案も行われている [10]。

しかし、延焼により一部の誘導灯や避難経路が使用不能ななど、避難環境の変更が起こる場合には、誘導灯による誘導は有効でない場合も考えられる。このような場合には、避難者を探索する誘導者による誘導も必要であり、消防法 [4] においても、施設関係者による救助活動が義務付けられている。

誘導者の誘導手法としては、指差誘導法と吸着誘導法が知られている [11]。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手法であり、吸着誘導法は、避難者を見つけたら一緒に出口まで移動して誘導する手法である。この2つの手法の避難効率の比較は、被験者による実験 [11] 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 [12] が行われており、吸着誘導法の方が効率が良いとされている。

しかし、これらの検証で用いられた吸着誘導法は、誘導者が一度誘導を行うとそのまま自身も避難してしまうため、誘導を受けられない避難者がいた場合、取り残される恐れがある。また、建築基準法施行令 [13] において、百貨店又は店舗の通路における人口密度は $0.25 \text{ 人}/m^2$ と定められているが、地下街からの避難を検証した実験 [11] では、密度 $0.07 \text{ 人}/m^2$ と低い状況であった。

そこで、本研究では、店舗の通路の状況を想定し、人口密度の高い状況での避難効率の検証を行う。誘導者の行動は吸着誘導法を基本とするが、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、誘導者の探索手法は、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。周回探索誘導は、人間のような複雑な動作や判断は行わず、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実現を考慮する。

また、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

本研究の対象とする構造は、建築基準法施行令 [13] で規定されている店舗や通路とし、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。また、今回のモデルでは、提案する動的誘導手法の検討のため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次元平面とし、高低差は考慮しない
- 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
 - 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。

2.1 避難者エージェント

出口への避難者を表現する避難者エージェントを次のように定義する。

- 目的：出口から $1.5m$ 以内への到達を避難完了とみなし、行動目的とする。
- 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．また，建物内部構造の情報は持っていないとする．

- 行動：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 [15] を用いる．

避難者エージェントは自己の出口への到達のためだけに行動し，全体の避難効率を改善するための行動は取らないものとする．そのために以下の優先順位で目標を設定する．

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

このうち，視界内の被誘導中の避難者については，直接誘導者を視認できないような場合でも，誘導されている避難者の集団を見たら追従する，という状況を想定している（図 1）．

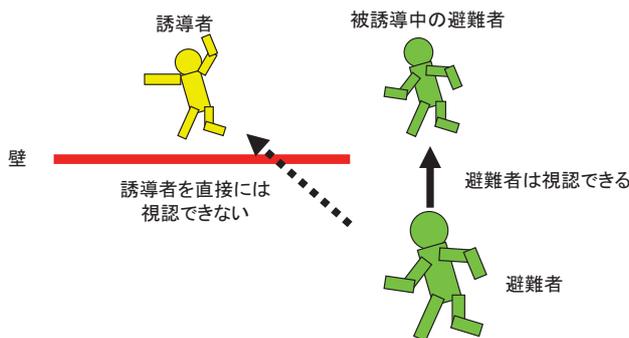


図 1: 被誘導中の避難者への追従

視界内に目標となる対象が 1 つも無い場合には，ランダムに移動する．この時，1 ステップに 5% の確率で全周囲からランダムに方向を変更する．

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いため，ボトルネックとなって移動速度が低下することが知られている [14]．過去のシミュレータ [5] 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．また，ある 1 人の避難者エージェントが出口を通過中は，他のエージェントは出口を利用できないものとする．

3 探索・誘導手法

避難者を出口へ誘導する誘導者を表現する誘導者エージェントを定義する．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し，基本的な条件を以下のように定義する．

- 目的：全避難者エージェントを出口へ到達させることを目的とする．
- 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．また，出口への経路を取得できるものとする．
- 行動：目標に対して最大 $0.58m/s$ の速度で直線的に移動できる

誘導者エージェントの移動は直線的であり，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，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に ASPF モデルに従うと，周囲を囲まれた誘導者が移動不能となり，誘導が停止してしまうことを避けるためである．実際の避難現場でも，誘導者は必要に応じて避難者をかき分けて進み，避難者も自分の避難のためには，誘導者には道を譲ると想定されるため，本モデルの誘導者エージェントは目標への直線移動ができるものとする．また，誘導者の移動速度が避難者と同等だと，避難者が振り切られてしまうため，確実に追従できるように，誘導者の速度は避難者の半分としている．

建築物内部に複数の出口がある場合には，出口の大きさに比例した面積を割り振ることで，避難効率が改善できることが指摘されている [16]．そこで，本研究でも以下に挙げる 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

提案する周回探索との比較のために，ランダムに移動して避難者を探索するランダム探索を定義する．ランダム探索誘導を用いる誘導者エージェントの行動は次のように定義する（図 2）．

- 避難者誘導中：避難者を出口へ誘導する（移動する）
- 避難者を誘導していない場合
 - － 視界内に未誘導の避難者がいない場合：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

- 視界内に未誘導の避難者がいる場合：避難者の誘導を開始する

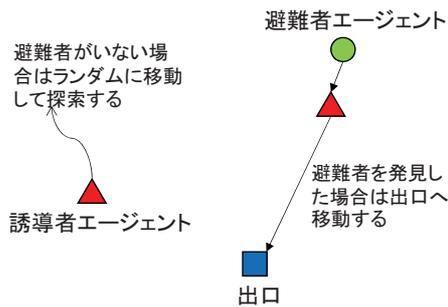


図 2: ランダム探索

視界内に避難者がいても、既に出口を視認しているか、他の誘導者が誘導中であれば、それ以上の誘導は必要ないため対処は行わず、ランダム移動による探索を続ける。

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。

この探索手法では、誘導者の初期位置が無作為に散らばっていたとしても、避難者を見つける度に必ず出口へ誘導するため、出口付近に誘導者が集中してしまう。また、誘導を終えた誘導者は、再度ランダムな方向へ移動して探索を行うが、比較的誘導の優先順位が低い出口に近い避難者ほど、誘導者の探索に入りやすく、逆に本来最も誘導されるべき出口から遠い避難者ほど、誘導を受けにくいという現象が起き、避難時間が悪化する原因となる。

3.2 周回探索

ランダム探索で誘導確率が低くなる、出口から遠い領域に対しても、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 [9] を利用して、誘導灯の代わりに誘導者に周回を行わせるというものである。

この手法では、矩形の外周を周回するため、矩形中央部の誘導は行われませんが、過去の建物火災の事例 [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、有効であると考えられる。本研究では、本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、周回を続ける(図3)。避難者は誘導者を発見す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。この時、誘導者は特別な行動は行わず、そのまま次の周回へ向かうが、避難者の目標優先順位は出口の方が高いため、避難者は出口へ到達することが可能となる。

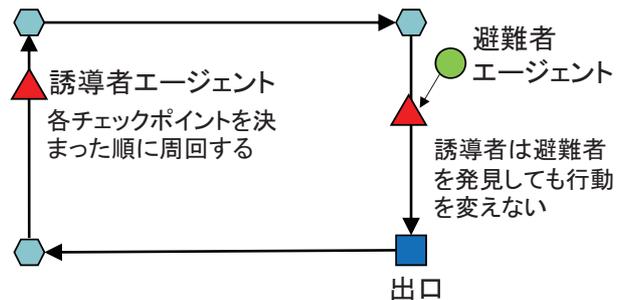


図 3: 周回探索誘導

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 [17] 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 [9]
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

3.3 周回の連結

周回探索では、各探索周回内に出口がある場合は、最大でも1週すると必ず出口に到達する。しかし、周回内に出口が無い場合は、出口のある周回への中継が必要になる。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中継部分を設ける(図4)。これを、中継チェックポイントとして定義する。誘導者は避難者を誘導していない時は、中継チェックポイントでも通常のチェックポイントと同様に、通過するのみである。避難者を誘導中の時は、中継チェックポイントへ到達すると一旦停止し、誘導中の全避難者が次の周回への乗り換えを終えてから、次のチェックポイントへ向かう。

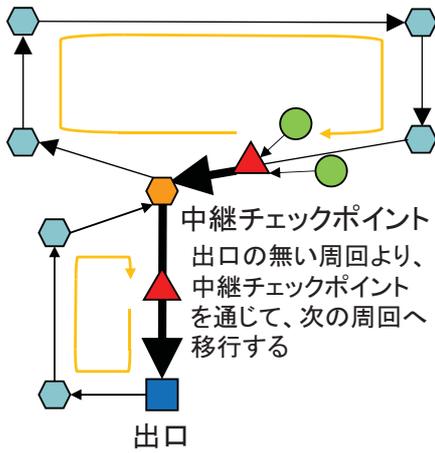


図 4: 周回の連結

3.4 探索周回の設定例

図 5 のような構造があったとする．この構造に対して矩形分割を行うと，図 6 の点線部分のように，3 つの矩形に分けられる¹．分割された各矩形のうち，下部の左右の矩形は矩形内に出口があるため，1 つの周回で出口へ到達できる．一方，上部矩形は内部に出口を持たないため，下部左右の矩形のどちらかへ接続する必要がある．この例では，左側の出口が右側より大きいため，左へ接続する方が避難効率が向上する．

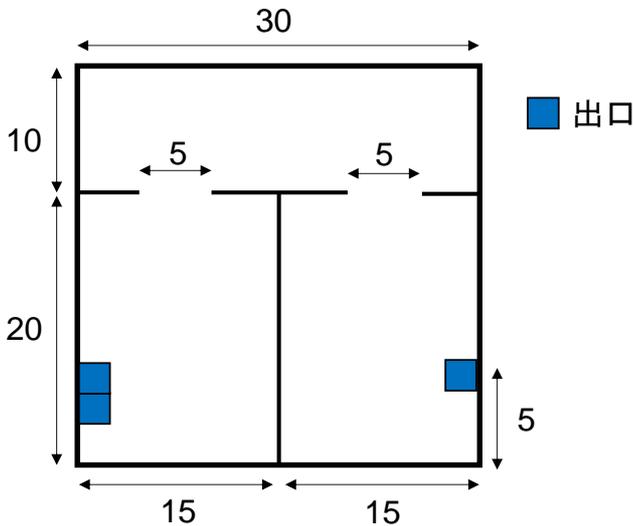


図 5: 構造例

次に，各矩形の頂点にチェックポイントを作り，周回を設定する（図 7）．この例では，左下矩形には出口が 2 つあるため，2 つの周回に分割される．また，左下矩形上部の周回が矩形ではなく，三角形に

¹ここでは，壁の厚みは無視する

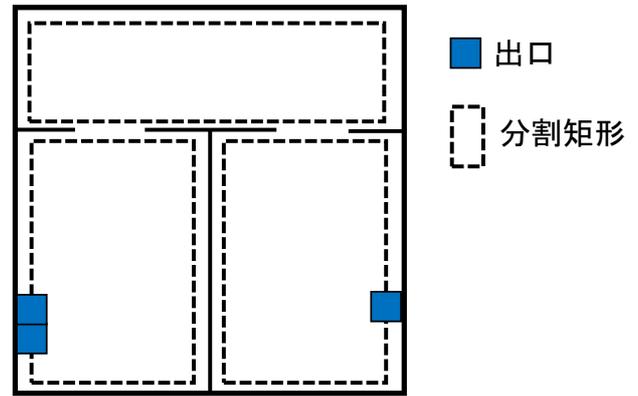


図 6: 矩形分割

なっているが，下部の周回上から，上部のほとんどの領域が視界内に入るため，人間の手で簡略化する調整を行ったためである．

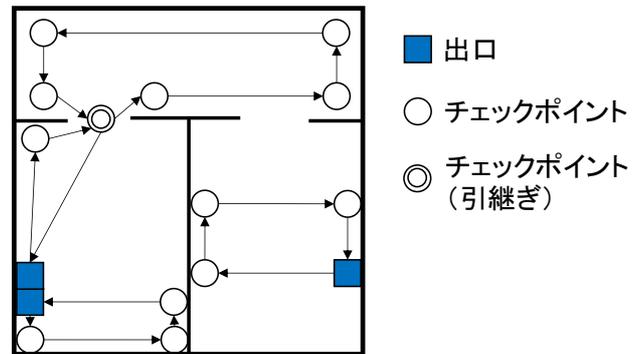


図 7: 誘導者の移動経路

4 MAS による実装と実験

4.1 実装

本研究では，提案する誘導手法を artisoc 2.6[18] を用いて実装した．実装したシステムの画面を図 8 に示す．

本モデルでは，様々な構造を比較検証するため，シミュレーション実行時に，マップ読み込み機能がある．マップデータは，CSV 形式で記述されるもので，

- Exit : 出口の定義
- BeginLoop ~ EndLoop : 周回の定義
- Checkpoint : 周回内のチェックポイントの定義
- Wall : 壁の定義

の要素を記述することができる．しかし，この記述を人間が行うことは負担が大きいため，本研究では，

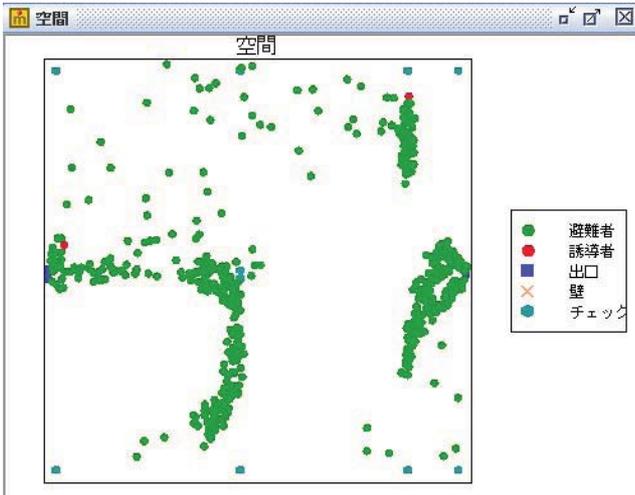


図 8: 避難シミュレーションの GUI

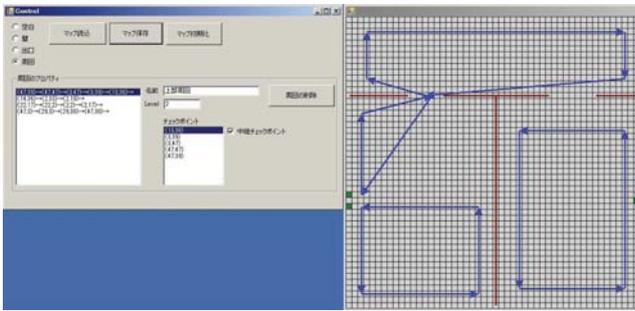


図 9: マップエディタの GUI

VisualBasic 2010 Express によりマップエディタを実装した(図9)。このマップエディタでは、出口、周回、壁の各要素をグラフィカルに配置し、前述の CSV 形式で読込・保存することができる。

また、一度設定した周回に対して、各チェックポイントの中継チェックポイントとするか選択ができる(図10)。本モデルにおいては、各周回に対して、出口にどれだけ近いかの値を Level という値で設定している。直接出口のある周回は Level=1 とし、図 Map02b の上部周回は Level=2 とする。中継チェックポイントに到達して一旦停止した避難者は、現在の周回より小さい Level を周回する誘導者が来ると、誘導者の乗り換えを行うことで、周回の接続を表現している。

4.2 実験 1: 障害物の無い構造での避難効率検証

提案手法により、避難者を適切に分配して誘導することができるか、以下の条件で検証を行う。

- 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



図 10: 周回の設定

- 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 $50m \times 50m$
- 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 11、図 12 の 2 種類である。

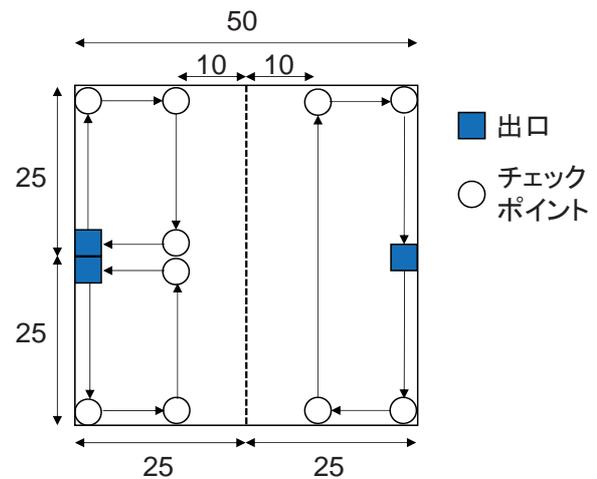


図 11: チェックポイントの配置 (均等)

これらの構造には壁は無く、出口の配置も共通であるが、周回の設定が異なる。

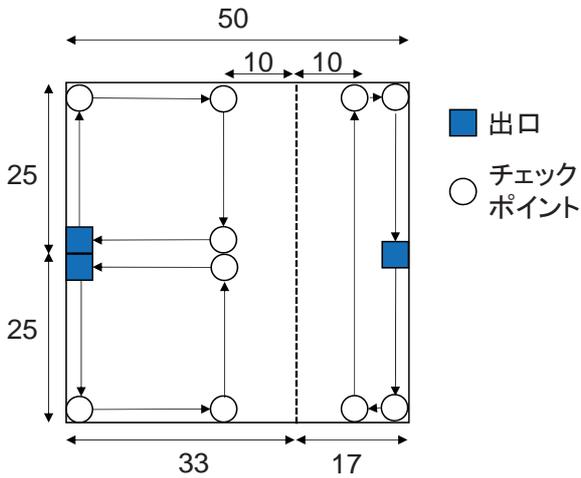


図 12: チェックポイントの配置 (比率変更)

図 11 は周回が左右均等, 図 12 は出口の比率に応じて, 周回が左側 2/3, 右側 1/3 となるように調整されている。また, ランダム探索では, 周回を行わないため, 出口を中心とした探索半径を設定することで, 誘導範囲の調整を行う。図 11 の構造では全誘導者の探索半径を 15, 図 12 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 としている。

実験 1 の結果を図 13 に示す。

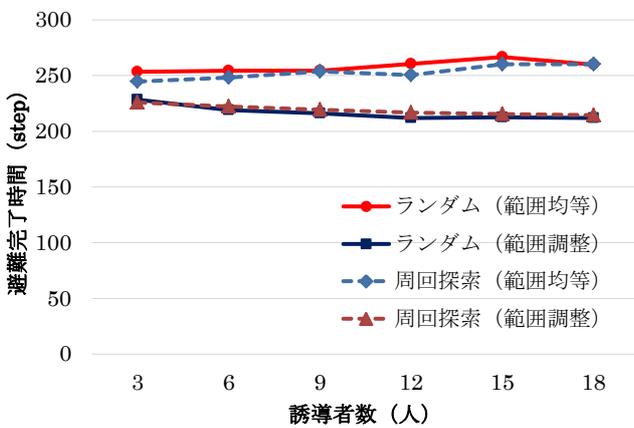


図 13: 実験 1 結果

4.3 実験 2: 障害物のある構造での避難効率検証

次に, 壁のある環境での避難効率の検証を行う。使用する構造としては, 図 7 を用い, 避難完了時間, 試行回数は実験 1 と同様であるが, 次の条件が異なる。

- 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 4~32 人の範囲で 3 人刻みで変化させる

避難者数は建設省告示第 1442 号 [13] における百貨店又は店舗の売場の人口密度となるよう設定している。また, ランダム誘導の際には周回誘導を行わないが, 出口までの経路定義のため, チェックポイントの一部を各矩形の接続部分に移動している (図 14)。

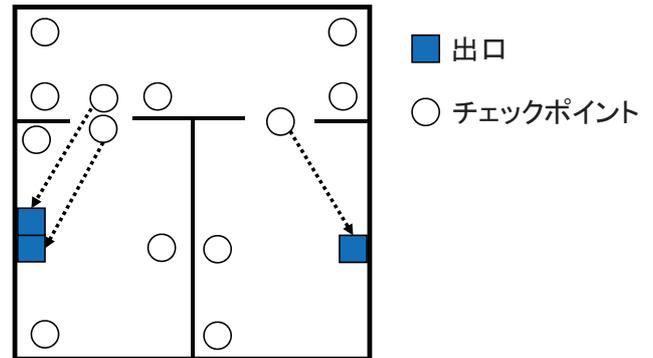


図 14: ランダム探索時のチェックポイント配置

実験 2 の結果を図 15 に示す。

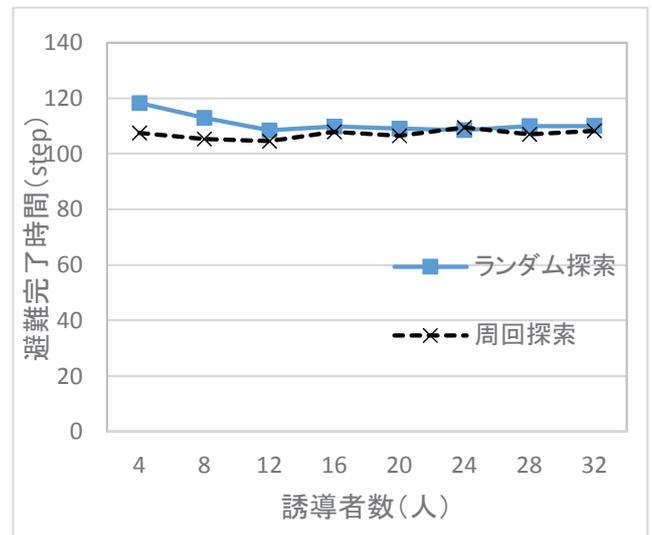


図 15: 実験 2 結果

4.4 実験 3: 誘導者密度が低い場合の避難効率検証

実験 2 のように人口密度が高く, 狭い構造の場合, 避難者が誘導者を見つけることが容易になるため, 両手法の差が出にくいと考えられる。そこで, 実験 3 では構造の大きさを $50m \times 50m$ に拡大し, 誘導者も 4~8 人と限定することで, 誘導者の密度を相対的に減少させ, 避難者の発見を困難にする (図 16)。

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．実験 3 の結果を図 17 に示す．

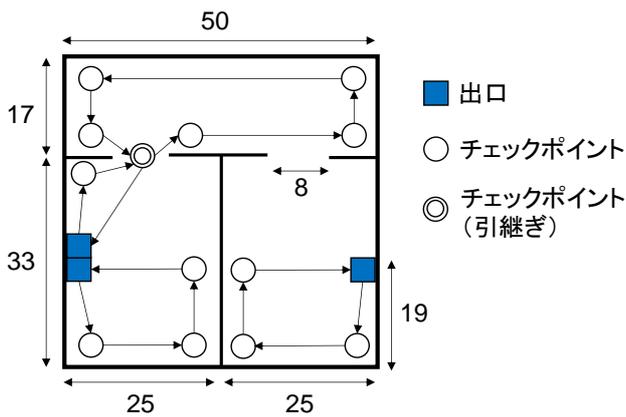


図 16: 実験 3 の構造

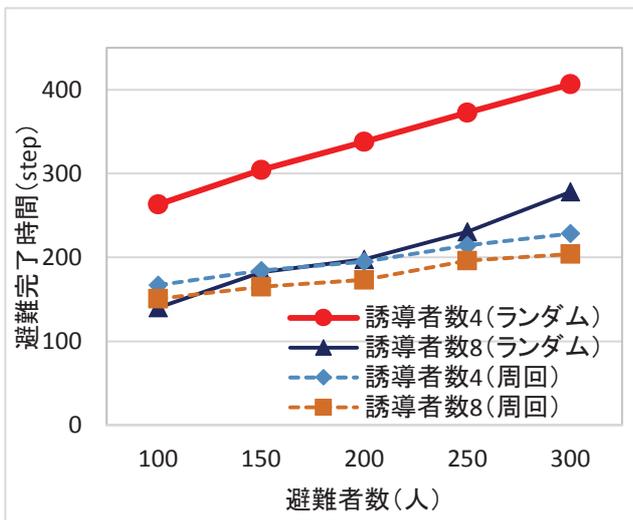


図 17: 実験 3 結果

5 考察

実験 1 の結果 (図 13) より、左右均等に誘導するより、出口の数の比に応じて範囲を調整した方が避難効率が良いことがわかる．これにより、誘導者による誘導であっても、適切に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 15) では、両手法の避難完了時間に大きな差は見られなかった．特に、誘導者が 16 人以降の場合、両手法の避難完了時間がほぼ一致しているが、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、誘導の効率に差があったとしても、滞留が解消するまでに誘導できれば避難完了時間へ影響が出ないためと考えられる．

ランダム探索は誘導者数が少ない時は、やや避難完了時間がかかっているが、誘導者数 12 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 12 人で十分であるといえる．ランダム探索の場合は、誘導者が少ないときには、各エージェントの探索範囲が重なる確率が低いが、誘導者がある一定以上まで増加すると、探索範囲の重複が大きくなって、誘導者数が増えてもあまり効果が無いためと思われる．

一方、周回探索は誘導者数 4 から、ほぼ避難完了時間が変わっていない．これは、滞留解消の速度より、誘導による滞留増加の方が大きいため、誘導者数を増加しても、出口がボトルネックとなって、これ以上避難効率が向上しないためと考えられる．また、この条件下では、ランダム探索における誘導者数 12 人と同程度の避難効率を誘導者 4 人で達成しており、提案手法が有用であることが分かる．

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 17) 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．ランダム探索の場合、出口から距離が遠くなるほど、誘導を受けられる確率が低下すると考えられるが、周回探索の場合は、誘導者、避難者の人数に関係なく、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、有効な誘導ができていると考えられる．これらのことは、図 17 において避難者数の増加に対して、避難完了時間の傾きが周回誘導の方が小さいことから分かる

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、誘導者による避難者を探索・誘導する手法について、提案を行った．また、提案手法を再現する MA シミュレータ、マップエディタの実装を行い、検証実験を行い、提案手法が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．

本シミュレータは探索手法の検証のみを行うため、誘導灯の無い状況下で検証を行っているが、今後は誘導灯と組み合わせた場合の避難効率の検証が必要である。シミュレーション中の避難経路についても、今回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・検証が必要である。

また、避難誘導手法についても、今回は1つの手法のみで検証を行ったが、人間によるランダム探索とドローンによる周回探索の組み合わせ、さらに、動的誘導灯との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。

参考文献

- [1] 消防防災博物館：特異火災事例 大洋デパート,
<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,
<http://www.bousaihaku.com/bousaihaku2/images/exam/pdf/a077.pdf>
- [3] 総務省：消防法施行規則,
<http://law.e-gov.go.jp/htmldata/S36/S36F04301000006.html>, (2016.5.27).
- [4] 総務省：消防法,
http://elaws.e-gov.go.jp/search/elawsSearch/elaws_search/lsg0500/viewContents?lawId=323AC1000000186_20160401, (2015.9.11).
- [5] 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).
- [6] 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).
- [7] 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).
- [8] 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)
- [9] 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)
- [10] 尾崎昭剛：Q 学習を用いた動的誘導灯, 火の国情報シンポジウム 2018,(2018).
- [11] 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
- [12] 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)
- [13] 建設省：平成 12 年建設省告示第 1442 号,
<http://www.mlit.go.jp/jutakukentiku/build/s20000523/n072.pdf>, (2000)
- [14] 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).
- [15] 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).
- [16] 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).
- [17] 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)
- [18] 構造計画研究所：artisoc
<http://mas.kke.co.jp>