

誘導灯ネットワークに基づく動的避難誘導

尾崎昭剛†

概要：建築物内部からの避難のために、避難誘導灯が義務付けられているが、適切な方向への誘導が行われず滞留を生じてしまう。また、壁の崩落等が発生すると、使用不能な避難経路に誘導してしまう、避難が行えなくなる可能性がある。そこで、本研究では誘導灯同士で情報共有を行い、避難者の分布、その時の通路の状況に応じて誘導方向を設定する動的避難誘導を行う手法を提案する。

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

1. はじめに

建築物においては、災害発生時の在館者への避難経路案内のために、避難誘導灯の設置が義務付けられている[1]。これまでも、誘導灯の避難効率への検証[2]-[4]や、誘導灯の自動配置手法の提案[5][6]が行われている。しかし、設置される誘導灯は一般に指示方向が固定されたものであるため、災害によって避難経路の一部が遮断される状況では適切な誘導ができない可能性があり、実際の災害時にも、避難経路が使用不能になったため、避難が行えなかった事例が知られている[7][8]。災害発生時の状況を再現するシミュレータ[9]も提案されているが、個々の避難者がどのように経路選択を行うか、避難者同士の情報伝達などミクロな視点から再現を行っており、全体の避難効率を向上させるための手法は示されていない。また、全体の避難効率を改善するための手法として、誘導灯の見える面積比から誘導方向を決定する手法[6]も提案されているが、建築物内部に均等に避難者が配置されている、という前提があるため、特定の部屋に多数の人が集まっている場合など、避難者の配置が偏っている場合は考慮されていなかった。

そこで、本研究では誘導灯をノードとするネットワークを作成し、各誘導灯の周囲の人数と避難経路の状況から指示方向を変更して、最も避難完了時間を短くできる方向へ誘導を行う動的避難誘導を提案する。また、提案手法をマルチエージェントシミュレーション(MAS)として実装し、提案手法が避難者配置の偏りや経路の障害発生などに対して動的に誘導方向を変更し、誘導方向が固定の場合に比べて、より効率の良い避難誘導が行えることを示す。

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、提案する動的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について述べる。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、商業施設やイベント会場など、避難経路を把握していない不特定多数の人が集まる状況を想定する。また、シミュレーション実装の容易さのため、構造は2次元セル空間で表現するものとし、高低差は再現しない。建築物内部には、以下の要素を配置する。

- ・ 壁：移動、視界を遮る
- ・ 出口：避難者の目標となり、避難者が到達すると脱出できるが、一度に脱出できる人数には制限がある
- ・ 避難誘導灯：避難者へ移動方向を指示する
- ・ 避難者：出口からの避難を目的とする避難者

避難者が出口のある座標に到達すると、避難したとみなして構造から削除される。出口から脱出できる人数の制限については、群衆が開開口部を通過する際には遅延が発生されることが知られている[10]。本研究では、これを表現するために、避難者が出口に到達してもそのステップではなく、次のステップに削除されるものとする。

避難者は、建物からの避難を行う人を表すためのものであり、以下のように情報取得、行動を定義する。

- ・ 情報取得：前方 180° で壁に遮られない範囲の情報を得る。
- ・ 行動
 - ・ 目標選択：以下の優先順位で目標を選択する
 1. 出口：視界内にある最も近い出口を目標とする。出口と誘導灯がどちらも視界内にある場合には、出口を優先する。
 2. 誘導灯：視界内に出口が無い場合には、最も近い誘導灯を目標とする。ただし、誘導灯そのものではなく、誘導灯が指し示す先(指示方向の先)を目標とする
 - ・ 移動：ASPF 歩行者モデル[11]を用いて目標物への移動を行う。視界内(前方 180°)に目標となるものが無い場合には、後を向いて再度目標の探索を行い、

† 崇城大学情報学部

それでも目標物がない場合には、10%の確率でランダムな方向を選択しながら直進する

避難者は自己の出口到達のみを目的として移動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。ただし、誘導灯の指示方向には必ず従うものとする。

避難誘導等については、次章で述べる。

3. 誘導灯ネットワークによる避難誘導

これまでに誘導灯の指示方向の決定手法として、面積比に基づいて、出口毎に到達避難者数が均等となるよう割り当てるものを提案している[6]。しかし、この手法は建物内の避難者の配置が均一である、という前提があるため、特定の部屋などに避難者が集中している場合など、偏りがある場合は想定されていない。また、避難中の誘導方向の変更は行わないため、火災や壁・天井の崩落等によって避難経路の変化があった場合にも対処できない。そこで、本研究では、これらの問題に対処を行う動的誘導手法を提案する。

3.1 避難誘導灯

避難者へ移動方向を指示する誘導灯を定義する。一般に誘導灯は事前に設定された方向を示すものであるが、本研究では、避難者の状況、避難経路の状況から指示方向を変更できる**動的避難誘導**を提案するため、以下の基本要素を持つものとする。

- ・指示方向：現在示している方向
- ・選択可能な方向集合：誘導灯が選択可能な方向の集合
- ・情報取得：周囲 9m 以内の避難者数を取得することができる（複数の誘導灯の探索範囲が重なる領域については、距離の近い誘導灯を優先し、同じ避難者を重複して数えることはしない）
- ・通路最小幅：現在の指示方向で他の要素（出口、誘導灯、壁）に到達するまでの通路の最も狭い部分の幅
- ・ネットワーク化：誘導灯は他の誘導灯とネットワークを形成し、全体の避難者数の状況・通路最小幅を取得できる

選択可能な方向が複数ある誘導灯を**動的誘導灯**と呼ぶ。動的誘導灯が指示可能な 4 方向を集合 $D = \{\uparrow, \rightarrow, \downarrow, \leftarrow\}$ で表すとき、 i 番目の誘導灯の指示方向、選択可能な方向集合は

- ・現在の指示方向 $c_i \in D$
- ・選択可能な方向集合 $E_i \in 2^D$

となる。

建物内に n 個の誘導灯があるとき、全動的誘導方向集合 S は、全誘導灯が選択可能な方向集合の直積集合の要素となるため、

$$S \in \prod_{i=1}^n E_i$$

となる。

例えば、図 1 のような構造があるとする。緑色の矢印は誘導灯で、枠内に複数の方向のある誘導灯は、選択可能な方向を示して、誘導時にはこの中から 1 つの方向を選択して表示する。各誘導灯の指示方向の先にある目標物（誘導灯、出口）をリンクとするネットワークを作成すると、図 2 のようになる。

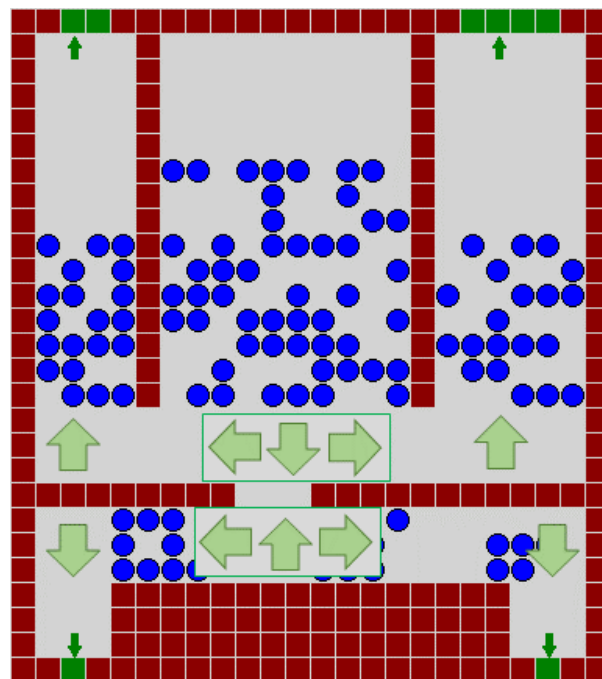


図 1 建物内構造の例

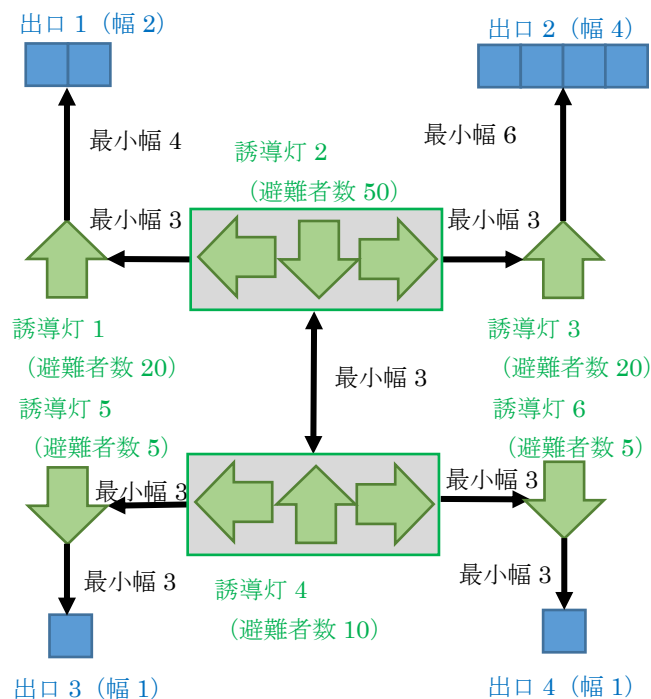


図 2 誘導灯ネットワークの例 (1)

なお、シミュレーション実装の都合上、出口にも誘導灯が1つずつ配置されているが、ここでは省略する。誘導灯ネットワークでは、各誘導灯は前述の通り、自分の周囲の避難者数と、移動の際にボトルネックとなる目標物までの経路の通路最小幅を認識しているものとする。

この例の場合の誘導灯の選択可能方向集合は、誘導灯2は $\{\rightarrow, \downarrow, \leftarrow\}$ 、誘導灯4は $\{\uparrow, \rightarrow, \leftarrow\}$ となるため、全誘導灯が選択可能な方向集合の直積集合は $\{(\rightarrow, \uparrow), (\rightarrow, \rightarrow), (\rightarrow, \leftarrow), (\downarrow, \uparrow), (\downarrow, \rightarrow), (\downarrow, \leftarrow), (\leftarrow, \uparrow), (\leftarrow, \rightarrow), (\leftarrow, \leftarrow)\}$ となり、誘導方向の決定はこの9種類から1つ選択するという意味になる。

3.2 誘導方向の選択

誘導方向を更新する際には、選択可能な全誘導灯の方向の全組み合わせに対して、

- ・全誘導灯が出口まで到達できるか
- ・予想避難完了時間
- ・最長移動距離

の3つを判定する。その結果、出口へ到達できない方向は除外する。例えば、図2の例だと、誘導灯2が $\downarrow$ 、誘導灯4が $\uparrow$ という組み合わせだと、互いにループしてしまうため除外される。出口へ到達できる誘導方向の組み合わせのうち、最も予想避難完了時間の短いものを次の誘導方向として選択する。ただし、予想避難完了時間が同一の場合には、最長移動距離が短い方を優先する。

一つの誘導灯の周辺避難者が避難を完了する時間 t は、誘導者数 x 、出口までの経路の最小幅 b とすると、 $t = \frac{x}{b}$ とする。経路の最小幅については、その誘導灯から、指示方向にある次の誘導灯、さらに次の誘導灯と出口まで辿っていく、その中で通路または出口の最も狭い部分の幅とする。ただし、出口については前章で定義した通り、避難者が到達して、次のステップで削除（避難完了）となるため、2ステップ必要となる。そのため、出口1セルから避難できる人数は0.5人/ステップとなるため、通路の最小幅とは別に、出口の幅 $\times 0.5$ も経路の最小幅として用いる。

この予想避難完了時間には、出口までの移動時間が含まれていない。避難者数が十分に多い場合には、移動時間より避難者の集中から起こる滞留による待ち時間の方が大きいと考えられるため、本手法では移動時間は含めていない。予想避難完了時間は出口ごとに計算し、一つの出口の避難完了時間は、その出口へ誘導される全誘導灯の予想避難完了時間の総和とする。そして、全出口の予想避難完了時間のうち、最も長い時間をその誘導方向での避難完了時間とする。

1つの出口の予想避難完了時間の例を挙げる。図3のネットワーク例の場合、各誘導灯の予想避難完了時間は、

- ・誘導灯1：避難者数30、最小幅2（誘導灯2，4間）より $\frac{30}{2} = 15$
- ・誘導灯2：避難者数30、最小幅3（誘導灯2，4間）より $\frac{30}{3} = 10$
- ・誘導灯3：避難者数60、最小幅3（誘導灯3，4間）より $\frac{60}{3} = 20$
- ・誘導灯4：避難者数15、最小幅3（出口）より $\frac{15}{3} = 5$

となり、この出口の予想避難完了時間は、これらを合計して、65となる。

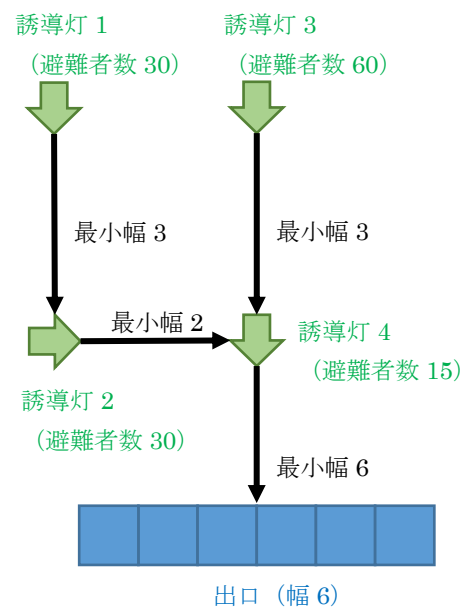


図3 誘導灯ネットワークの例（2）

また、図2のネットワーク例で誘導灯2，4の選択方向が共に $\rightarrow$ の場合、各出口の予想避難完了時間は、

- ・出口1： $\frac{20}{1} = 20$
- ・出口2： $\frac{50}{2} + \frac{20}{2} = 35$
- ・出口3： $\frac{5}{0.5} = 10$
- ・出口4： $\frac{10}{0.5} + \frac{5}{0.5} = 30$

となるため、この誘導方向全体の予想避難完了時間は、この中で最も大きい時間となる35となる。

4. 実装と実験

4.1 実装

提案手法の有効性を検証するため、避難モデル、誘導方向の選択手法をMicrosoft Visual Basic 2010を用いてマルチ

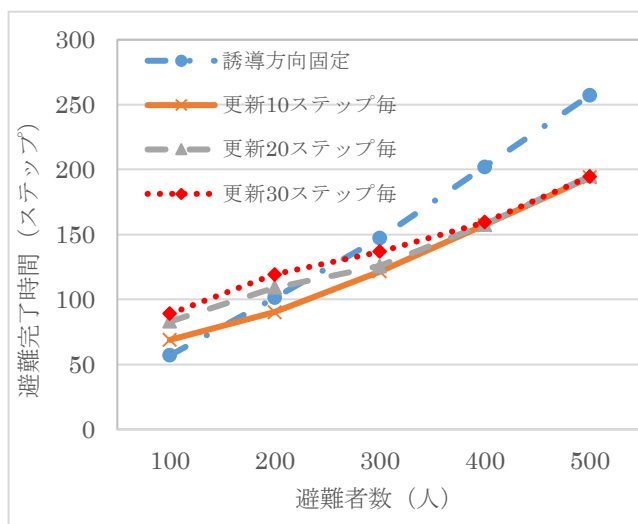


図6 実験1の結果

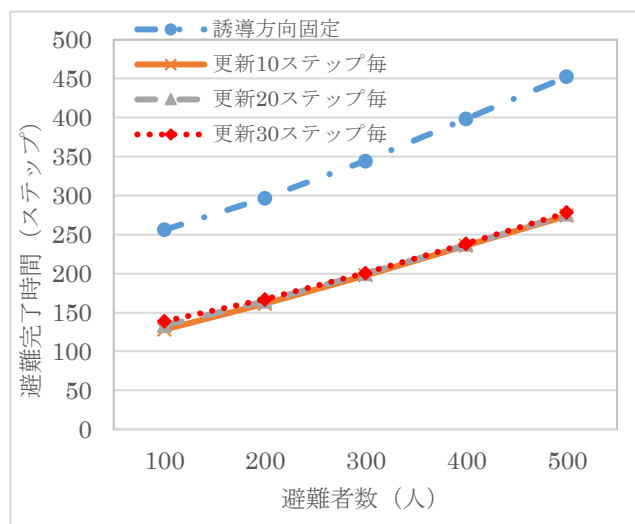


図8 実験2の結果 (50×4)

4.2.2 実験2 (偏った配置)

避難者が偏って存在している場合の避難効率を検証するため、実験1の避難者に加えて、左側の4部屋に追加で避難者を配置してシミュレーション実験を行った。追加する人数は、1部屋に25人ずつ (25×4部屋で100人追加) の場合、1部屋に50人ずつ (50×4部屋で200人追加) の場合の2パターン実施した。

25人×4部屋の場合の実験結果を図7に、50人×4部屋の場合の実験結果を図8に示す。なお、この結果の横軸の人数は、全体に均等に配置する避難者数となっている。例えば、「100人」と表記がある場合には、「全体に均等に100人+左側の4部屋に25人ずつ」の計200人を配置するという意味になる。

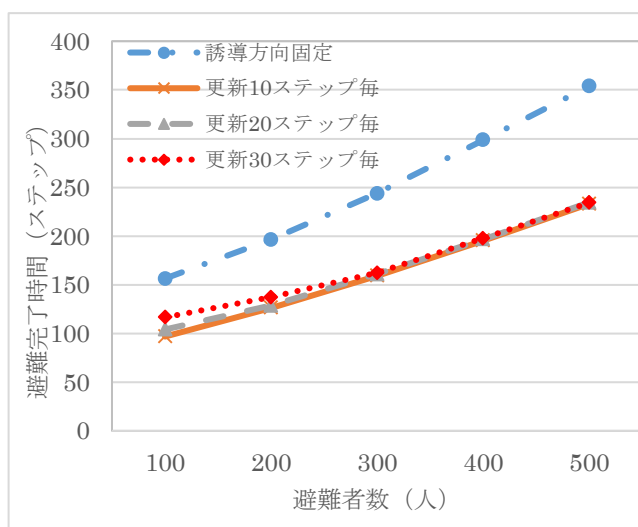


図7 実験2の結果 (25×4)

4.2.3 実験3 (通路幅の減少)

避難行動中に壁や天井の崩落等により、通路幅が狭くなる現象を再現するため、避難者数が初期配置の半数となると、中央通路の幅が狭くなる、という状況を再現したシミュレーションを実施した。この実験の結果を図9に示す。

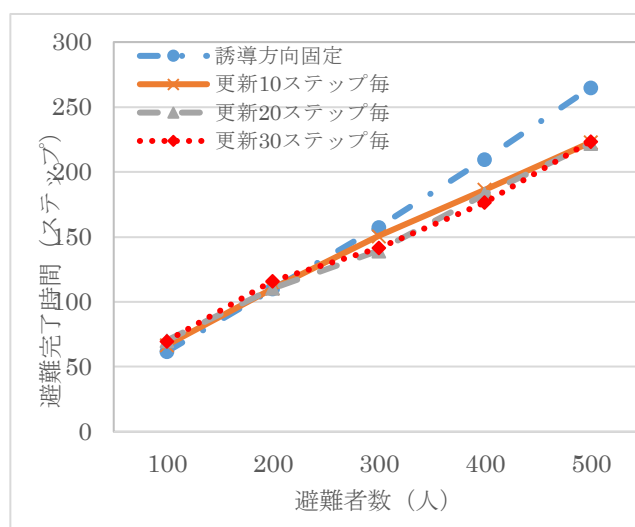


図9 実験3の結果

4.2.3 実験4 (一部出口の使用不能)

実験3と同様に、避難行動中に中央出口への通路が完全に塞がってしまう状況を再現し、適切な避難誘導が行えるかの検証を行った。なお、この実験では、誘導方向が固定の場合には、中央出口へ向かった避難者が目標を見失って避難が完了できないため、動的誘導を行う場合のみ実施している。この実験の結果を図10に示す。

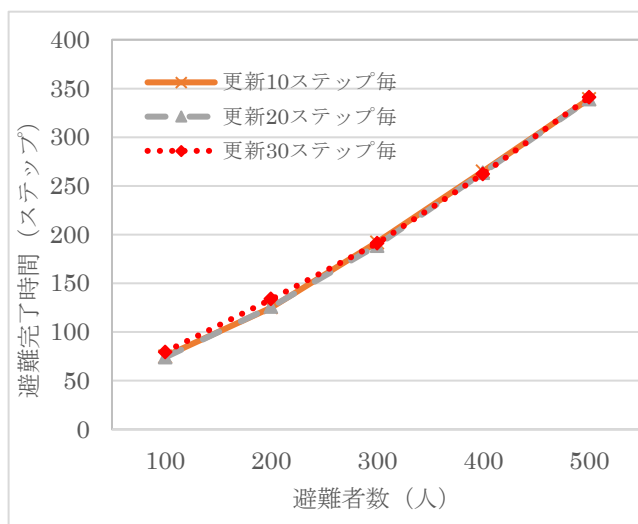


図 10 実験 3 の結果

5. 考察

実験 1, 2, 3 の結果 (図 6, 7, 8, 9) より, 提案手法は誘導方向を固定した場合に比べ, 避難者数が増えるほど避難完了時間が短くなり, 避難効率が良くなっていることが分かる. 誘導方向が固定されている場合には, 全避難者が均等に配置される場合に最適化された誘導であるため, 条件が合致する実験 1 においては, 避難者数が少ない場合には動的誘導より効率が良くなる場合がある. 提案手法では, 経路選択を行う際に移動距離の優先順位が低いため, 避難者が少なく, 滞留が発生していない状況でも, 各出口の大きさに応じて避難者を配分しようとするため, 移動距離が大きくなってしまいうためと考えられる. しかし, 避難者数が増加すると, 移動にかかる時間より滞留発生による待ち時間の影響が大きくなるため, 避難者数が増加するほど提案手法の優位性が見られると考えられる.

また, 実験 2 の結果 (図 7, 8) では, すべての避難者数において提案手法の方が避難効率が良いことがわかる. この実験では配置避難者に偏りがあるため, 誘導方向固定の前提に合致しないため, 適切な誘導が行えていないが, 動的誘導では, その状況に応じて誘導方向を変えて, 適切な対処が行えているためと思われる.

誘導灯の指示方向の更新ステップ数については, 避難者数が少ない場合には, 更新間隔が短い方が効率が良くなっているが, 避難者数が増加すると, 差がなくなる傾向がある. 実験 2 でも同様の傾向が見られ, 避難者数が少ない場合 (図 7) では, 更新間隔が短い場合の方が避難効率がやや良くなっているが, 避難者数が増加した場合 (図 8) では, 更新ステップ数による差が見られなくなる. これは, 避難者数が増加すると, 出口付近に生じる滞留による待ち時間が長くなるため, 更新間隔が長くなっても影響が出なくなるためと考えられる.

実験 4 については, 誘導方向固定の場合が無いため比較

は行えないが, 避難中に一部の出口が使用不能になる場合でも, 別の出口へ適切に誘導を行い, 全避難者が避難を完了できることが確認できた.

これらの結果より, 提案する動的誘導手法が, 避難者の配置や通路の状況変化に対応し, 適切に避難経路の変更を行うことができていると考えられる.

6. まとめと今後の課題

本研究では, 避難者分布と通路の状況に応じて, 全体の避難効率を最適化する動的誘導灯を手法の提案を行った. また, 提案手法をマルチエージェントシミュレータとして実装し, 避難効率の検証を行い, 指示方向が固定の場合と比べ, 避難効率を向上できること示した.

今回モデル化した避難者は, 誘導灯の指示方向に必ず従う, という前提があったが, 実際には大きい出口や, 自分の使い慣れた通路を好むなど, 指示に従わない避難者がいる場合も考えられる. そのため, 今後はそのような避難者が一定数いる場合の避難効率の検証が必要である. また, 今回の実験は誘導灯による誘導方向選択の検証のため, 避難誘導は誘導灯のみに限定しているが, 誘導員による誘導との組み合わせによる避難効率の検証も今後の課題と考えられる.

参考文献

- [1] 総務省: 消防法施行規則,
<https://elaws.e-gov.go.jp/document?lawid=336M50000008006>
(2021/2/10 閲覧)
- [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,
https://mas.kke.co.jp/event/mas_competition11/2-4.zip
(2021/2/14 閲覧), (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] 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)
- [6] 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).
- [7] 消防防災博物館: 特異火災事例 大洋デパート,
<https://www.bousaihaku.com/wp/wp-content/uploads/2017/03/a083.pdf>
(2021/2/14 閲覧)
- [8] 消防防災博物館: 特異火災事例 千日デパート,
<https://www.bousaihaku.com/wp/wp-content/uploads/2017/03/a077.pdf>
(2021/2/14 閲覧)
- [9] 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)
- [10] 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).

- [11] 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）．