

平成30年度 修士論文

避難者分布と避難障害を考慮した  
リアルタイム分散避難誘導システムの開発

Real-time distributed evacuation guidance system  
considering obstacle and evacuee location

指導教員

舟橋 健司 准教授

伊藤 宏隆 助教

名古屋工業大学大学院 工学研究科

博士前期課程 情報工学専攻

平成29年度入学 29414047番

木村 健

# 目次

第1章	はじめに	1
第2章	分散避難のための経路選択手法	4
2.1	建物のモデル化	4
2.2	避難経路の選出	5
2.2.1	経路の探索	5
2.2.2	基礎避難経路の選択	6
2.3	避難者の再分配	6
2.3.1	避難者が集中する階段または出入口	7
2.3.2	階段または出入口同士の通過時間の比較	7
2.3.3	行先を変更する避難者	8
2.3.4	避難者の再分配実施の検討	9
2.4	シミュレーション結果	10
2.5	MASによる評価シミュレーション結果	10
第3章	避難者への避難経路の提示方法	15
3.1	サーバによる避難経路提示のための機能	15
3.1.1	避難経路の画像化	15
3.1.2	画像化した避難経路情報の転送	15
3.2	避難誘導アプリケーション	16
第4章	BLEビーコンによる避難者の動向の監視	18
4.1	避難者の動向の監視	18
4.2	避難障害の推定	20
4.3	避難経路の再選択と提示	21
第5章	システム評価実験	23
5.1	システムの動作確認実験	23
5.1.1	実験目的	23
5.1.2	実験内容	23
5.1.3	実験結果	26
5.1.4	考察	26
5.2	評価シミュレーション実験について	27
5.2.1	実験目的	27
5.2.2	実験内容	27
5.2.3	実験結果	31
5.2.4	考察	31
第6章	むすび	32

謝辞	33
参考文献	34
発表論文リスト	36

## 第1章 はじめに

自然災害とは、暴風や地震などの自然現象によって人間社会が人的被害や物的被害を被ることと定義されている [1]。とくに日本では地理的に様々な自然現象が発生する風土であることが知られている。台風を例に挙げると、日本近海で 1951 年から 2018 年までに発生した台風の年平均は 26.2 個であり、日本に上陸した台風の年平均は 3.0 個である [2]。全世界の台風（ハリケーンおよびサイクロンも含む）の年間発生数（平均約 79 個）と比較すると、そのうち日本近海で発生したものが約 33% を占める。また 1 年に 1 個以上台風が上陸する国は日本を含めて 11 か国のみであり、年間平均上陸数のランキングでは日本は 8 位（気象庁の上陸の定義に基づく）に位置する [3]。他にも、国土が 4 つのプレートにまたがって位置しているために、日本での地震の発生数は特に多い。2018 年には震度 1 以上を観測した地震は 2179 回発生しており、そのうち震度 5 弱以上の地震は 11 回であった [4]。加えて、世界で発生するマグニチュード 6.0 以上の地震のうち、20% は日本（2000 年から 2009 年）で発生 [5] しており、2018 年にも世界で発生したマグニチュード 7.0 または人的被害を伴った地震 24 回のうち 4 回（うち 3 回が日本、1 回が台湾で発生）が日本近海で発生したものである [4]。

毎年多くの自然災害が発生する日本では、このような自然災害による被害をなるべく少なくするための防災対策が必要である。自然災害による被害をなくすためには、原因となる自然現象自体を発生させないようにすることが最良であるが、自然現象を制御することは不可能であるため、防災対策は災害による被害をゼロに近づけること、すなわち減災が基本となる。水谷 [6] は、「防災対策は時間経過の観点から、事前（平常時）の準備対策、直前および発生時の応急対策、ならびに事後の処理対策に分類できる。」と述べている。また、「いつ起こってもよいようにあらかじめ準備しておくのが防災の基本であるから、事前対策が中心となるべきもの」であり、実際に防波堤などの設備の建設や緊急地震速報などの自然災害の発生を迅速に報知するためのシステムの運用、避難訓練や避難所の場所の提示・告知などの発生後の人的被害を軽減するための対策が講じられている。しかし、事前に講じることのできる対策にも限度がある。例えば、避難所の位置やそこへたどり着くまでの道のりは事前に知ることができるが、実際にその避難所へ避難しようとしている避難

者数や、その道のりに殺到する避難者数は災害発生後でなければ知ることができない。とくに避難途中で、多くの避難者が一か所に集中すれば渋滞が発生し、全員が避難するまでの時間が長くなることが想定される。そういった人の流れによる変化を考慮しなければ、適切な避難を行うことはできないだろう。そこで本研究室では、ボトルネックとなりやすい階段または出入口に着目し、これらの箇所において発生しやすい渋滞の予防のため、分散避難を行うための手法を構築した [7]。この手法は災害発生時の各避難者の位置が把握できるという仮定のもとに、建物内に存在する全避難者の位置に応じて、渋滞の発生がなるべく少なくなり、そして全員が素早く建物内から避難するための経路を選出する手法である。この手法ではある階段または出入口を通過する避難者全員がその階段または出入口を通過するまでにかかる時間により、避難者の集中の度合いを測ることができると考え、これが均一化されるように各避難者の避難経路を調整することで渋滞の緩和を試みた。しかし、災害発生後にのみ知りうる情報で避難に影響を与えるのは人の流れだけではない。二次災害によって建物内の環境が変化し、一部の避難経路が使用不可になってしまうことも考えられる。環境の変化、例えば火災により発生した炎や煙、地震の振動による物の散乱などに対応しつつ分散避難するためには、災害発生後の環境を推定し、推定した環境に基づいて避難経路の選出を行う必要がある。

災害発生後の環境を検知し、これを避難誘導に活用する手法として滝本ら [8] は、大規模な避難誘導システムが設置できないような店舗等向けに、自律分散協調的に避難誘導を行うシステムを開発した。このシステムはある閉空間内の出入口や曲がり角、交差路に火災を検知するためのユニットを設置し、ユニット同士で情報を共有することで、危険な場所を通過しない避難誘導を行う。ユニットには火災を検知するための温度、一酸化炭素、煙を感知する3つのセンサと、避難誘導を行うための方向指示用のLEDと音声指示用のスピーカー、そしてマイコン、無線LAN通信機能が備え付けられている。

滝本らの研究では、火災、つまり災害発生後の建物内の環境の変化を検知するために各種センサを用いているが、センサの設置には費用がかかり、また障害の発生からセンサが検知するまでにラグが発生することが考えられる。さらには検知できる障害がセンサで検知できるものに限られるという問題点もある。

そこで本論文では、BLE ビーコンを用いて避難障害を推定し、避難障害を考慮した分散避難のための避難経路の選出手法およびこれを用いた避難誘導を行うためのリアルタイム分散避難誘導システムの構築手法について述べる。様々な避難障害を推定するために人間の危機回避能力に着目した。人間が危険を察知し、これを回避するために進路を変更

したことを位置推定手法により検出することで、センサ類を設置することなく、避難障害を推定し、共有することで避難障害を考慮した分散避難を行う。屋外であればGPSを使用し、位置を推定することが可能だが、本システムが想定しているのは建物内での分散避難であり、屋内でのGPSによる位置推定は精度の問題により難しい。屋内で使用可能な位置推定手法はいくつか存在するが、本システムでは名古屋工業大学に設置されているBLEビーコンを用いて、避難者が所持しているスマートフォンと通信を行い、RSSIによる位置推定を行う。昨今急速に普及しているスマートフォンの多くの機種にはBluetoothが搭載されているため、スマートフォンの利用者にとって使用しやすいのが利点である。加えて、分散避難のために、災害発生時に同じ場所に居る避難者同士でも避難経路が異なる可能性があるため、個人を対象にした情報の提示手段としてもスマートフォンは適している。2017年時点でスマートフォンの保有者は60.9%、とくに大学生の大半が含まれる20～29歳に限定すると94.5%が保有している[9]ため、多くの避難者がスマートフォンを所持していると仮定しても問題ないと考えられる。

本システムの有効性の評価をコンピュータシミュレーションにより行う。初期避難においては分散避難を行うが、避難中に障害を認識した避難者は各自その地点から出口までの距離が最も短い経路を用いて避難する場合と、初期避難において分散避難を行った上で避難障害を検知した場合には、障害を考慮した上で全員が分散避難できるように避難経路を再選択する場合の2通りについてシミュレーションを行い、全避難者が避難するまでにかかった時間を比較する。

以下、第2章では先行研究である分散避難のための避難経路の選出手法について述べる。第3章では避難者への避難経路の提示方法について述べる。第4章では避難中の避難者の動きの監視方法、避難経路の再選択および再選択した避難経路の避難者への提示方法について述べる。第5章では本システムの避難経路の調整の効果について評価するためのシミュレーションの結果およびそれに基づく考察について述べる。そして第6章にて本研究についてまとめる。

## 第2章 分散避難のための経路選択手法

本章では、先行研究である分散避難のための経路選出手法について述べる。災害発生時、一般的に避難者は避難経路が提示されているならばそれに従い、提示されていない場合は自分の居る場所から外に通じる出入口までの距離が最短となるような経路で建物からの脱出を図るものと考えられる。最短距離で避難するということは避難者それぞれにとっては合理的な行動ではあるが、それが必ずしも全体にとっても合理的であるとは限らない。災害発生時の各避難者の位置によっては、一部の階段や出入口などのボトルネックとなりやすい場所に多くの避難者が集中してしまう恐れがある。そのため、災害発生時の各避難者の位置が既知であるという仮定のもとに、一部の階段や出入口に避難者が集中しないよう分散させて避難するための動的な避難経路の選出手法を提案した [7]。なお、各階段または出入口に分散させる適切な人数の指標に用いる流動係数は文献 [10] に基づく。流動係数とは、1 [m] 幅の空間を 1 秒間に通り抜けることのできる人数を表す値である。本論文では、流動係数を 1.5 [人/m・s] とする。

なお、後述する分散避難誘導システムにこの手法を適用するにあたり変更を行った部分があるため、その変更点についても記述する。

### 2.1 建物のモデル化

本手法では、一般的な建物について、人が滞在、または移動する空間は部屋、通路、階段、出入口（扉）の4種類に大別できると考え、これに基づいて建物のモデル化を行った。各モデルはそのモデルが表す空間の範囲を示す領域の情報を持つ。

**部屋** 授業時間中に学生が滞在している空間を部屋と呼称する。災害発生時の避難者の初期位置は、名古屋工業大学が運営している打刻システムから取得することを想定しているため、災害発生時の避難者の位置は建物の部屋のいずれかである。

**通路** 主として人が移動するために使用する空間を通路と呼称する。単純化のため、曲がり角や分岐が存在する通路は長方形で表現できるように分割し、それぞれ別の空

間領域としてモデル化する。分割した通路の一部分である空間領域それぞれを通路区画と呼称する。

**階段** 階を移動するための空間を階段と呼称する。ただし、避難に使用すべきでないエレベータはこれに含めないものとする。流動係数により、1秒間に階段を通過することができる人数は階段の幅に比例するため、各階段の幅を避難者分散の際の適切な人数の割合の指標として用いる。

**出入口（扉）** 手動で開閉する扉や自動ドアを出入口と呼称する。階段と同様に、流動係数に基づき、各出入口の幅を避難者分散の際の適切な人数の割合の指標として用いる。

以上4種類のモデルで構成されるよう、事前に建物の図面よりモデル化する。モデル化した建物を用いて避難経路の選出を行う。

## 2.2 避難経路の選出

災害発生時の避難者の分布を考慮しない避難経路では、一部の階段および出入口に人が集中し、円滑な避難が妨げられる可能性がある。このとき、その集中を緩和することができれば、渋滞による避難の遅れを解消でき、全員が避難するまでの時間を短縮する効果が見込める。そこで経験則的に、多くの状況で全員が短い時間で避難できると予測される、避難者全員を最も近い階段または出入口に避難させた場合の避難経路（以降、基礎避難経路と称す）をもとに、一部の階段または出入口に避難者が集中することが予想される場合は、避難経路の調整を行うことで渋滞による避難時間の長期化を防ぐ。ただし、避難者の基礎避難経路の選出および調整は建物から脱出する出入口より遠い階層から、階ごとに順番に行うものとする。これは、単純化のためおよび建物からの出入口から遠い階層に居る避難者ほど、避難完了までにかかる時間が長く、優先的に距離の短い避難経路を割り当てる必要があると考えるからである。本節では、避難経路の選出方法および選出した避難経路の調整方法について述べる。

### 2.2.1 経路の探索

ある座標から階段または出入口まで移動する経路の探索にはダイクストラ法を用いた。空間的に接続しているモデル同士の領域の接触部の中点をノードとし、同一のモデルの領域上に存在するノード同士にパスを引き、パスの重みをノード間のマンハッタン距離とし

てグラフ化する．ただし部屋が目的地となることはないため，経路探索の開始地点以外の部屋はノード化の対象外とする．このグラフに対してダイクストラ法を用いて経路を探索する．またその経路の距離はパスの重さの合計とする．図2.2は，図2.1をグラフ化したものである．

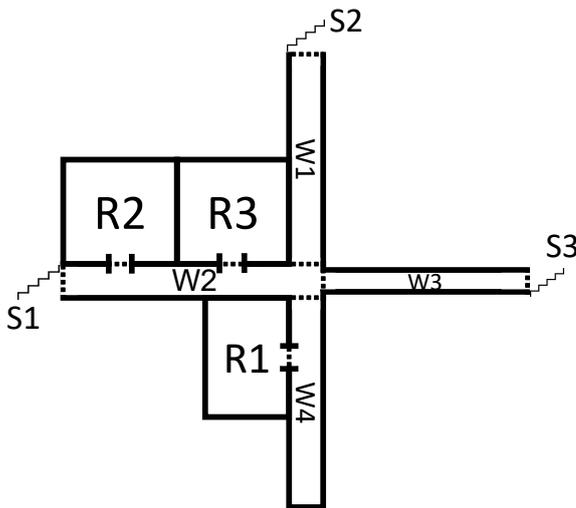


図 2.1: 建物の一例

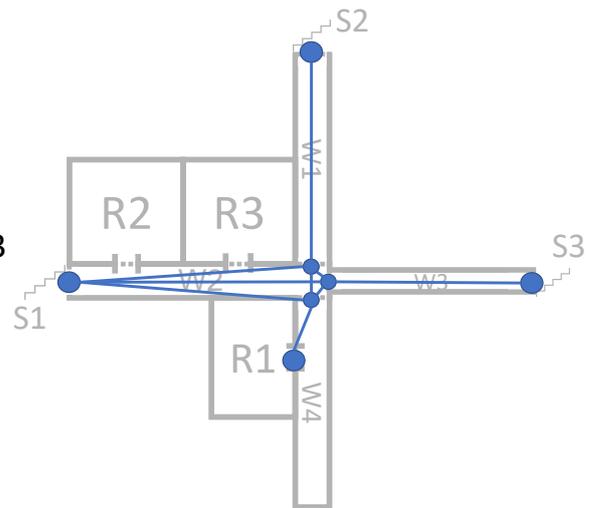


図 2.2: 経路探索のためにグラフ化した一例

### 2.2.2 基礎避難経路の選択

避難者の存在する部屋ごとに基礎避難経路を選択する．前述の経路探索により算出された，その部屋を出発地点とする経路の距離を比較し，最も距離の短い経路をその部屋にいる避難者の基礎避難経路とする．特定の部屋から特定の階段または出入口へ移動する経路が複数存在する場合は，そのなかで最も短い経路のみを使用することとする．

## 2.3 避難者の再分配

全避難者に対して基礎避難経路の選択を終了した状態で，基礎避難経路をそのまま避難経路として使用した場合に，一部の階段または出入口に避難者が集中すると想定される場合は，避難者の向かう階段または出入口の変更の是非を判定する．一部の階段または出入口に避難者が集中することで，それらの階段または出入口周辺で渋滞が発生する可能性が高くなる．よって，より避難者が集中している階段または出入口から避難者が集中していない階段または出入口へ避難者の向かう先を変更し，避難者を分散させることで渋滞が緩和されると考えられる．しかし，避難者の分散避難によって，かえって避難時間が長くなってしまう可能性がある．そのため，避難者が階段または出入口に集中していると判定

されても、一定以上の悪影響が生じると推定される場合は変更を行わない。本論文では、この全避難者の向かう行先変更の是非の判定および変更の実施を、避難者の再分配と呼称する。避難者の再分配は、その階に存在する各階段または出入口の各組合せの集中の度合いの差がすべて一定以下になるまで、またはその階に存在するすべての避難者について行先の変更が行われなくなるまで繰り返す。

### 2.3.1 避難者が集中する階段または出入口

流動係数の考え方にに基づき、避難者が一部の階段または出入口に集中しているかどうかの判定を行う。1秒間に空間のある地点を通過できる人数はその地点の幅に比例する。つまり、 $n$ 人の避難者集団が幅  $w$  [m] のある地点を通過し終えるまでにかかる時間  $t$  [s] は式 2.1 であらわされる。なお、 $\alpha$  は流動係数とする。

$$t = \frac{n}{\alpha w} \quad (2.1)$$

よって、地点 A から脱出しようとする  $n$  人の集団に対して、複数の出口（空間ではなく点と考える） $E_k (k = 1, 2, \dots)$  がある場合に、出口  $E_k$  を通過し終えるまでにかかる時間  $t_k$  がすべての出口について等しくなるように  $n$  人の集団を分割することで、 $n$  人全員が地点 A から脱出し終えるまでの時間が最短になると考えられる。そこで先行研究では、すべての階段または出入口について、その階段または出入口を利用する避難者全員が通過するまでにかかる時間（以降、階段または出入口の通過時間と称す）を比較し、他の階段または出入口と比べて通過時間の長い階段または出入口に避難者が集中していると判定する。

### 2.3.2 階段または出入口同士の通過時間の比較

避難者の集中の判定のため、同一の階に存在する階段または出入口の中から二つを選び出して、それぞれの通過時間を比較する。通過時間を比較し、一定以上の差があれば、差が縮まるように避難者の行先を変更することで渋滞が緩和され、避難時間が短くなる可能性がある。通過時間の比較には式 2.2 を用いる。なお、 $\epsilon_t$  は通過時間の差の閾値、 $X$  および  $Y$  はその階に存在する全階段または出入口のうちの任意の二つとする。

$$\left| \frac{n_X}{\alpha w_X} - \frac{n_Y}{\alpha w_Y} \right| < \epsilon_t \quad (2.2)$$

式2.2により、通過時間の差が大きいと判定された場合は、通過時間の差を縮めるために行先の変更が必要な避難者の人数  $n$  を算出する。文献[7]では、行先を変更する避難者の人数を算出する式として式2.3を用いていた。なお、 $P$ はその階段または出入口を通過する予定の避難者の人数である。しかし、二つの階段または出入口に向かう人数の比とそれぞれの階段または出入口を秒間に通過できる人数の比を等しくするという考えのもとに導出した式2.3であるが、様々な避難者の分布において検証を重ねたところ、期待する計算結果が得られない場合があることがわかった。そこで二つの階段または出入口の通過時間の差を小さくするという考えのもとに導出した式2.4を、本論文において、行先の変更が必要な避難者の人数  $n$  の算出に用いる。ただし、式2.4は行先を  $X$  から  $Y$  へ変更する場合の式である。

$$n = \left| \frac{w_Y P_X - w_X P_Y}{w_X + w_Y} \right| \quad (2.3)$$

$$n_{XY} = \left| \frac{n_X \alpha w_Y - n_Y \alpha w_X}{\alpha^2 w_X w_Y} \right| \times \frac{\alpha w_Y}{2} \quad (2.4)$$

階段または出入口の通過時間（式2.1）ならびにそれらを比較する式2.2はその階段または出入口に避難者が辿りつくまでの時間、つまり避難者の居る地点から階段または出入口までの距離が考慮されていない。そのため、式2.2により、片方の階段または出入口に避難者が集中していると判定されても、行先の変更を行うことで移動距離が長くなり、それに伴って避難時間が長くなる可能性が考えられる。そこで、行先の変更による悪影響がなるべく少なくなるような避難者を選び出し、その避難者について変更による悪影響が好影響を上回るのか下回るのか判定したうえで行先の変更を行うかどうか判断する。

### 2.3.3 行先を変更する避難者

行先を変更する避難者の理想の選出基準は、変更することによる避難時間への悪影響を最小に、かつ好影響を最大にすることであると考えられる。変更することによる避難時間への好影響は、渋滞の緩和による人の流れの改善であると考えられる。よって渋滞の影響を受けやすい、変更元の階段または出入口へ最も遅く辿りつく避難者の行先を変更することにより、好影響を最大化できる。また変更することによる悪影響は、行先を変更した避難者の集団が階段または出入口へ到着する時刻が遅れることによる全体の避難時間の増加であると考えられる。よって、変更先の階段または出入口に最も近い位置に居る避難者の行先を変更することで、悪影響を最小化できる。以上より、変更元から最も遠い位置に

居り、かつ変更先に最も近い位置に居る避難者が、行先を変更する避難者として最適であるといえる。ただし、必ずしも変更元の階段または出入口から遠い位置に居る避難者が、変更先の階段または出入口に近いとは限らない。本手法は、ボトルネックとなりやすい場所で発生する渋滞の緩和を主目的としているため、変更元からより遠い座標に居る避難者を優先的に行先の変更の対象とする。

#### 2.3.4 避難者の再分配実施の検討

2.3.3節では、行先の変更を行った際の効果をより良くするために、変更の対象とする避難者の選定基準について述べた。ただし、変更を行った場合の効果が最大である対象であったとしても、避難時間に良い影響を与えるとは限らない。そこで、選定した避難者がもたらすと推定される悪影響を評価する。文献[7]では、悪影響の評価式として式2.5を用いていたが、この式では行先を変更する人数の増加による評価値への影響が大きい。行先を変更する人数が倍増した場合、悪影響の評価値が半減してしまう、つまり変更する人数が多ければ多いほど良いことになってしまうため不適切であると考え、新しい悪影響の評価式として式2.6を用いる。これは避難者の行先の変更による移動時間の増加量を算出する式であり、これが一定以下であった場合は好影響が悪影響を上回ったとして行先の変更を行う。本手法が想定する初期の避難者の分布では、相当数の避難者が同一の部屋などの空間に居ることが予想される。そういった集団は避難時に列をなして避難することが想定されるため、これらの避難者の行先を変更することによる移動時間の増加量は、先頭の避難者が変更先に到達するまでの時間（式2.6左辺第一項）と先頭がたどり着いてから列最後尾の避難者が変更先にたどり着くまでの時間（式2.6左辺第二項）より推定できる。なお、 $d$ は変更によって増加した移動距離、 $S$ は避難者の移動速度、 $n$ は行先を変更する予定の避難者の人数、 $\alpha$ は流動係数、 $w$ は変更後の階段または出入口へ向かう経路上で最も狭い空間の幅、 $\epsilon_d$ は許容する移動時間の増加量の閾値である。

$$\frac{d}{n} < \epsilon \quad (2.5)$$

$$\frac{d}{S} + \frac{n}{\alpha w} < \epsilon_d \quad (2.6)$$

以上の避難者の再分配の検討をその階の全階段または出入口に対して検討条件を満たさなくなるまで繰り返す。繰り返しが行われなくなった状態の避難経路を、その階での各避難者の避難経路とする。

## 2.4 シミュレーション結果

本手法の有効性を検証するために、提案手法による避難経路と基礎避難経路（提案手法を適用していない避難経路）の避難時間をコンピュータシミュレーションにより評価した。用意した3つのモデルについて、2つの避難経路それぞれを用いた際の全体の避難時間を計測し、比較する。本シミュレーションでは、行先を変更する避難者の人数を計算する式として2.3を、行先の変更による悪影響を評価する式として2.5を採用し、選択した避難経路を用いて評価した。なお、全体の避難時間は建物内に居る最後の避難者が建物の外につながるいずれかの出入口に辿りつくまでにかかった時間である。図2.3から図2.9は評価シミュレーションに用いたモデルの見取り図、表2.1は各モデルについて、シミュレーションの結果をまとめたものである。モデル1では、避難時間が約7%短縮され、モデル2、3では、それぞれ避難時間が約10%、約37%延長された。これにより、本手法によって避難時間を短縮できる場合があることがわかったが、同時に避難時間が延長されてしまう場合もあることがわかった。

表 2.1: 評価シミュレーション結果

	提案手法 [s]	基礎避難経路 [s]
モデル1	136	146
モデル2	145	132
モデル3	81	59

## 2.5 MASによる評価シミュレーション結果

前述のシミュレーションソフトを精査したところ、モデル2、3に対して提案手法を適用し、選出した避難経路を用いた場合に結果が悪く、つまり避難時間が実際よりも長く算出されることがわかった。そこで、シミュレーション手法の一種であるMAS (Multi-Agent Simulation) を用いてシミュレーションを行う「Artisoc」というソフトウェア [13] を用いて、再度シミュレーションによる評価を行った。エージェントとは周囲の状況を認識し、一定のルールのもとで自律的に行動する主体を指す。人や生物をエージェントとしてモデル化し、個々のエージェントの相互作用により発生する様々な現象を観測するためのシミュレーション手法がMASである。前述のシミュレーションと同様の状況を用意するため、本シミュレーションで用いた避難経路は、行先を変更する避難者の人数を計算する式として2.3を、行先の変更による悪影響を評価する式として2.5を採用し、選択した避難

経路である。なお、本シミュレーションでは「Artisoc 4.2」を用いた。

表 2.2 は、3つのモデルについて行った、Artisocによる評価シミュレーション結果をまとめたものである。モデル1については、約15%の避難時間の短縮効果が得られ、モデル2, 3については、避難時間の短縮効果は得られなかった。これにより、本手法によって避難時間の短縮効果が、適用する状況に左右されるが、得られることがわかった。また、前述のシミュレーションでは避難時間が延長された2つのモデルについては、本手法によって避難時間が延長されることはないことがわかった。

表 2.2: MAS による避難経路の評価

	先行研究 [s]	基礎避難経路 [s]
モデル 1	265	223
モデル 2	258	258
モデル 3	165	166

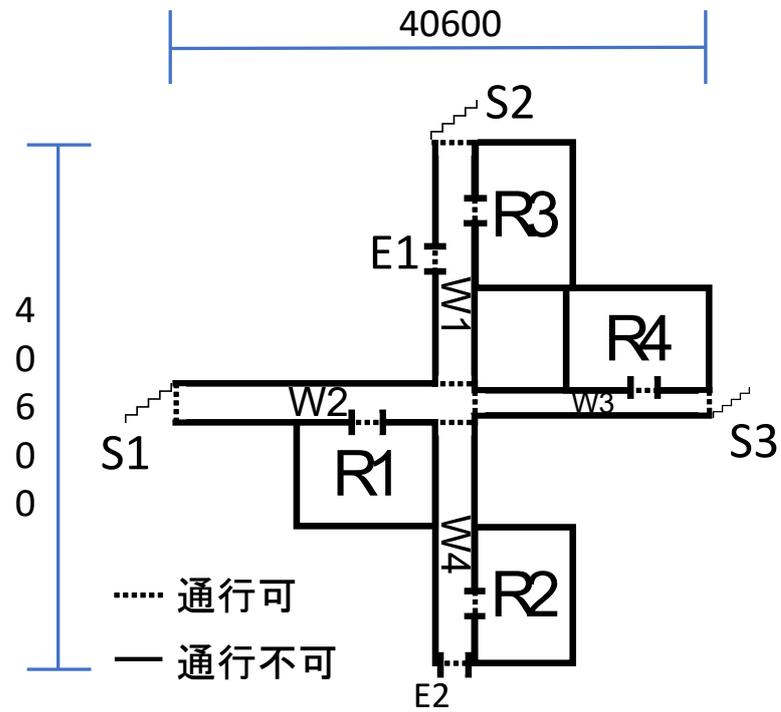


図 2.3: モデル1, 1階の模式図

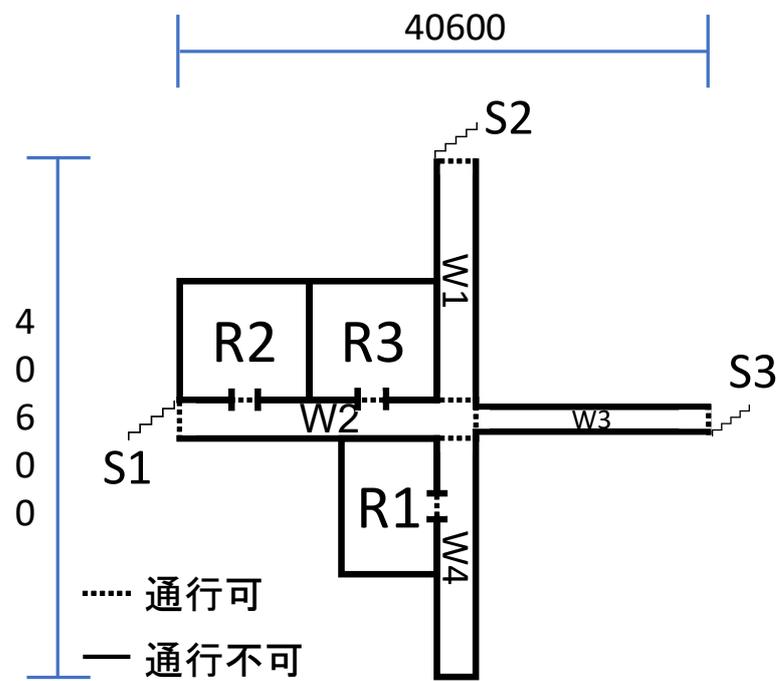


図 2.4: モデル1, 2階の模式図

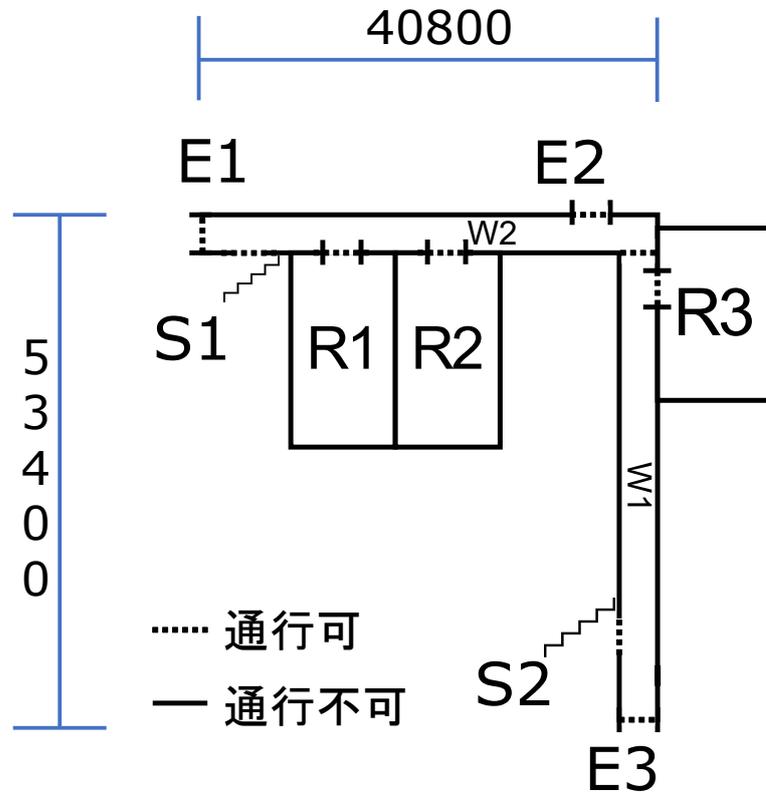


図 2.5: モデル2, 1階の模式図

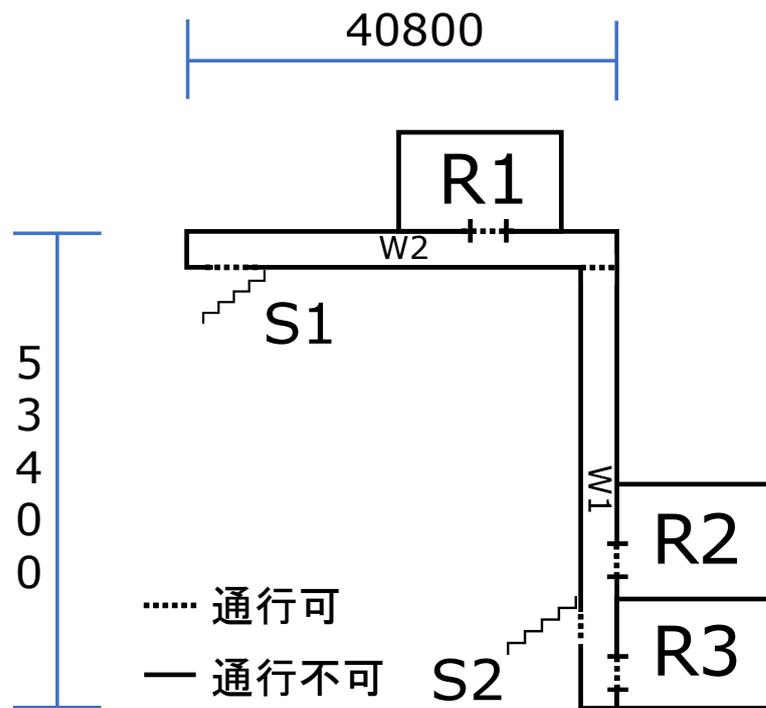


図 2.6: モデル2, 2階の模式図

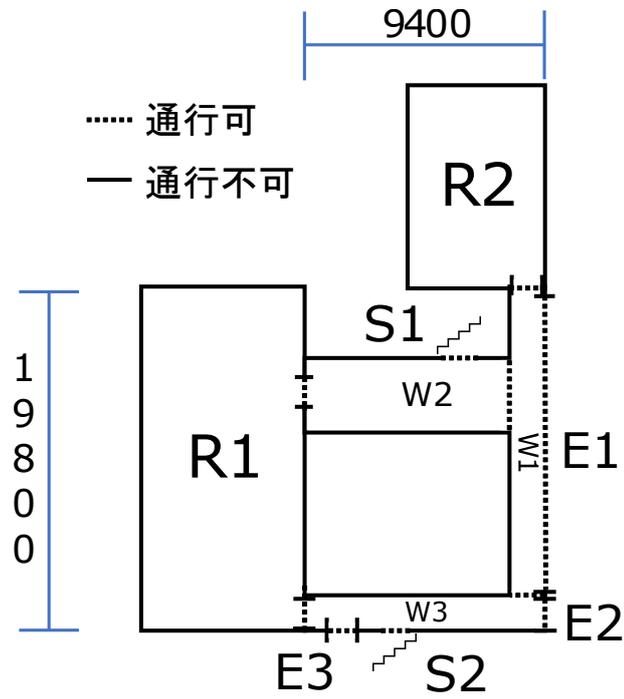


図 2.7: モデル 3, 1 階の模式図

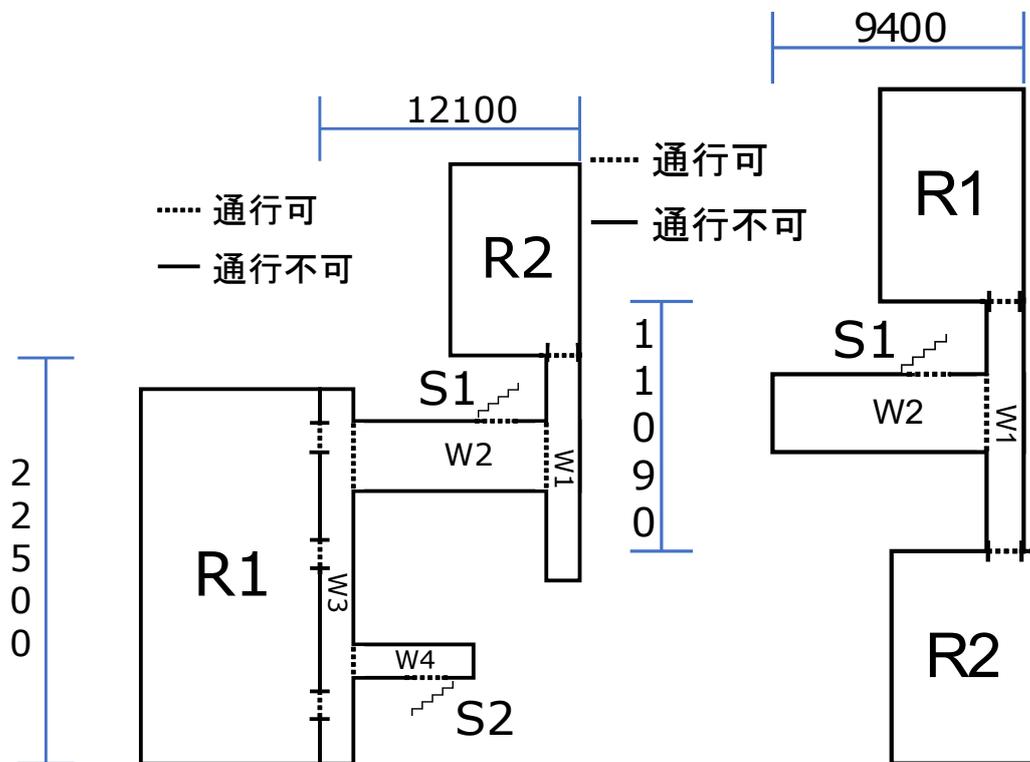


図 2.8: モデル 3, 2 階の模式図

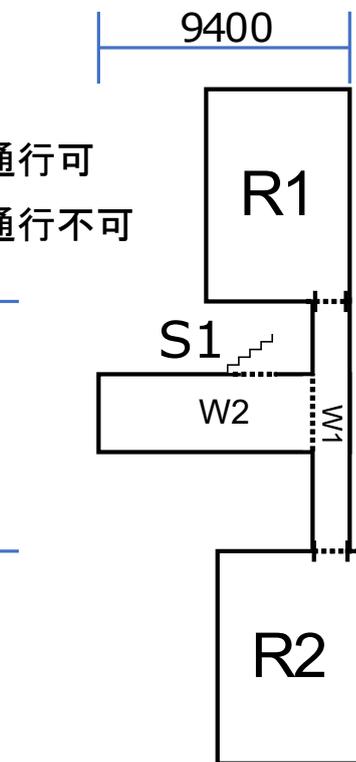


図 2.9: モデル 3, 3 階の模式図

## 第3章 避難者への避難経路の提示方法

本研究で開発するシステムは、避難者の情報を管理し、情報に基づいて分散避難のための避難経路を選出するサーバと、避難者の BLE ビーコンによる位置推定を行い、かつサーバから避難経路を受信し、避難者に提示するクライアントの2つからなる。分散避難のための手法は、避難者によって避難経路が異なる可能性があるため、避難経路を避難者に提示するクライアントは避難者の人数と同じ台数が必要になる。そこで、避難者の所持しているモバイル端末、その中でも昨今普及が著しいスマートフォンをクライアントとする。また、第4章で述べる避難者の動向の監視にスマートフォンに搭載されている Bluetooth を使用し、避難者の位置情報をサーバに送信するため、避難者の動向の監視機能と避難経路を提示する機能を合わせたアプリケーションを作成する。本章では、サーバにおいて行われる避難経路の提示のための機能および作成するアプリケーションの避難経路の提示機能について述べる [11].

### 3.1 サーバによる避難経路提示のための機能

本システムでは、避難経路の提示のためにサーバにおいて避難経路の画像化し、またクライアントへの画像化した避難経路情報を転送する。

#### 3.1.1 避難経路の画像化

2章で述べた手法によって選出した避難経路を各避難者に対して提示する必要がある。そのため避難者自身がどのように動けばよいのかをわかりやすく提示するために、選出した避難経路を画像化する。画像には、建物の各階の見取り図にその階の避難経路を示す矢印が重畳表示される。避難経路は各階ごとに別々の画像として生成する。図 3.1 は画像化した避難経路の一例である。

#### 3.1.2 画像化した避難経路情報の転送

画像化した各階の避難経路を、階同士の間関係を保持したまま避難者に提示するために、画像化した各階を表示する Web ページを同時に生成する。この Web ページには、画

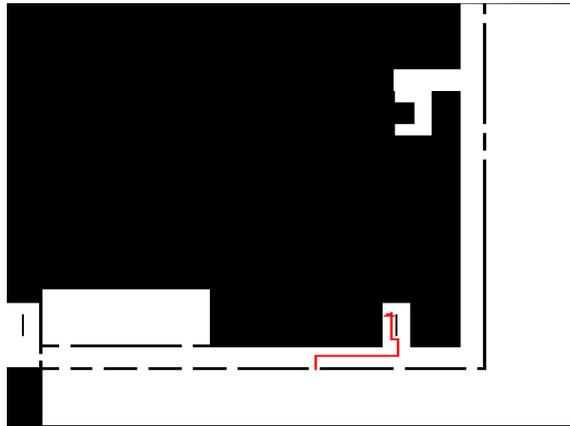


図 3.1: 画像化した避難経路の一例

画像化した避難経路の表示と、その画像が示している建物の階層の表示および現在表示している階に接続する上階および下階の避難経路を表示するための Web ページへ遷移する JavaScript を設定する。これにより、クライアント側で表示したい階層の避難経路を提示できるようにする。

### 3.2 避難誘導アプリケーション

前節にて述べた手法により画像化した避難経路を表示する機能を持つアプリケーションを作成する。本システムは、このアプリケーションが全避難者のスマートフォンにインストールされていることを前提とする。

本アプリケーションは、災害が発生した後、各避難者がシェイクアウト行動をとり、ある程度の安全を確保したのちに使用されることを想定している。各避難者を区別するために、識別子として学生番号を入力する。避難経路は各避難者を示す識別子によって、個別に管理されており、学生番号に応じた避難経路がクライアントに提示される。図 3.2 は、本アプリケーションを起動した際に表示される初期画面である。画面中央の ID 欄に学生番号を入力する。

図 3.2 下部に設置されている「Start Guidance」ボタンを押下することでサーバ側に HTTP/GET リクエストが送信される。リクエストを受信したサーバより、避難者の初期位置に応じた階の避難経路画像を含んだ Web ページを受信し、表示する。図 3.3 は、避難誘導中のアプリケーション画面の一例である。図 3.3 下部に設置した「DOWNSTAIR」、 「UPSTAIR」ボタンを押下することで、一つ下の階または一つ上の階の避難経路を表す Web ページを要求するリクエストをサーバに送信する。

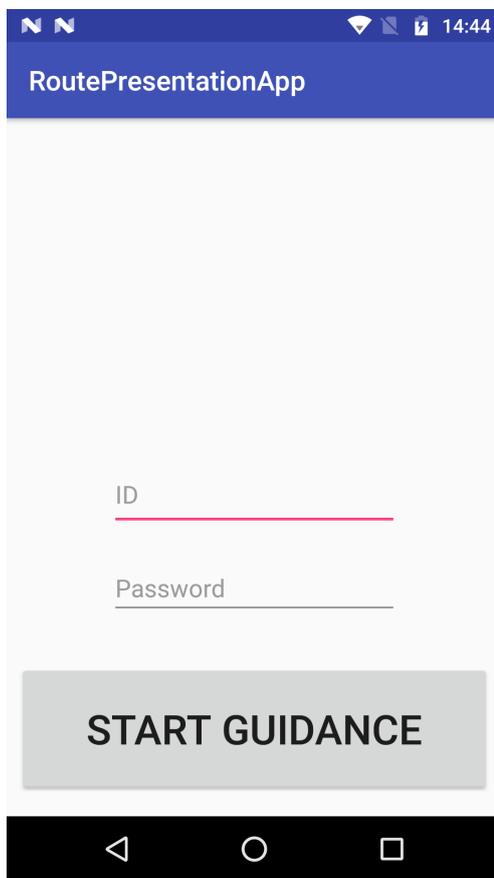


図 3.2: アプリケーション初期画面

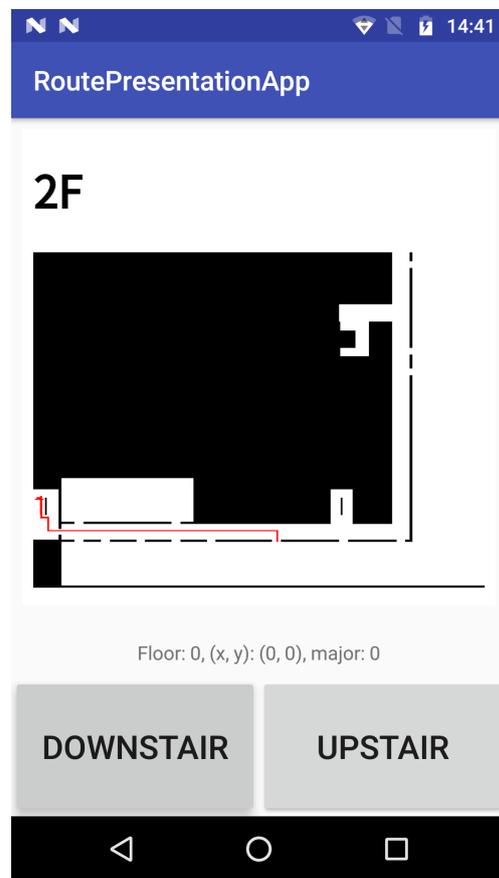


図 3.3: アプリケーション避難誘導中の画面例

## 第4章 BLEビーコンによる避難者の動向の監視

先行研究 [7] では、災害発生時に第2章にて述べた手法により、分散避難のための避難経路を選出する。しかし、これは避難経路として使用されるすべての通路が安全に通過できるという前提のものである。そのため実際には通行に支障がある可能性や、避難経路として不適切な通路が選出されてしまう可能性がある。仮に通行に危険が伴う通路、例えば地震により窓ガラスが散乱している通路や、火災が発生している通路が避難経路として選出されているのであれば、避難経路を変更する必要がある。火災の発生は炎を感知するセンサで、窓ガラスの散乱は感圧センサで検知することができるが、これでは検知できる障害が設置されているセンサに左右されてしまう。そこで本研究では、避難者は進路上の危険を回避するような行動をとると想定し、避難者の動向から避難障害の推定を行うことで、危険を回避しつつ分散避難を行えるようにする。

本章では、避難者の動向の監視方法および避難障害の推定方法について述べる。ただし、避難障害を推定するにあたり、以下の仮定を設ける。

- 避難者は全員、自身に身の危険が生じると予測される場合を除き、こちらの提示した避難経路に沿って避難を行う
- 避難者は全員、自分が居る建物の構造を把握している。

### 4.1 避難者の動向の監視

第3章にて述べた避難誘導アプリケーションに、避難者の動向の監視を行うための機能を搭載する。避難者がアプリを起動し、避難経路提示機能を起動すると同時に避難者の動向の監視を行う機能が有効となる。この機能は検出されたBLEビーコンに基づいて、避難者の建物内の位置を推定し、記録する。この位置の推定を毎秒行うことで、避難者の移動の足跡を監視し、避難経路に沿った移動を行っているかどうか判定する。

室外ではGPS等を用いた位置推定を行うことができるが、室内でも適用できるものは少ない。本研究では、屋内での位置推定手法として電波を受信したBLEビーコンの識別子による位置推定を用いる。名古屋工業大学には敷地内の多くの場所にBLEビーコンが

設置されており，屋内でも部屋の壁や通路の柱に設置されている．これらのビーコンからブロードキャストされている電波をクライアントで検知し，その電波強度から電波を発信したビーコンがどの程度離れているかを推定する．

本システムの BLE ビーコンの検出のため，Radius Networks 社が提供している各種の BLE ビーコンを検出するためのライブラリ，AltBeacon[14]を用いる．このライブラリは，Android 環境でも iOS 環境と同様の記述で BLE ビーコンの検出を行えるようにするためのライブラリである．本研究では，AltBeacon によりビーコンの検出およびビーコンの電波強度による距離推定を行う．AltBeacon が距離推定に用いている式は以下の式である．なお， $Power$  はビーコンから 1 [m] 離れた地点での受信信号強度であり，BLE ビーコンからブロードキャストされる電波情報にこの値が含まれている．

$$ratio = \frac{RSSI}{Power} \quad (4.1)$$

$$distance = \begin{cases} ratio^{10} & (ratio < 1.0) \\ 0.42093 * ratio^{6.9476} + 0.54992 & (ratio \geq 1.0) \end{cases} \quad (4.2)$$

検出された BLE ビーコンの中で，式 4.2 を用いて算出された距離が最も短い BLE ビーコンを，避難者に最も近い BLE ビーコンとし，避難者はその BLE ビーコンの周辺に居るものとする．本研究では，BLE ビーコンの探索は 0.1 [s] 間隔で行う．ただし，各 BLE ビーコンが電波をブロードキャストするタイミングが異なることにより，実際には近くに BLE ビーコンが設置されていても，同じタイミングで検出されなかったり，クライアントが BLE ビーコンの電波を受信できない時間にブロードキャストされることで電波が検出されない場合があるため，5 [s] 前までの検出結果を記録し，検出された回数が最も多いものを優先的に避難者に最も近いビーコンとして扱うこととする．検出された回数が同じ BLE ビーコンがあった場合は，それぞれについて検出された距離の平均値を算出し，値が小さいものを最も近いビーコンとする．

また BLE ビーコンの検知には，検知する BLE ビーコンの 3 つの識別子を必要とするため，アプリケーションに設置されている BLE ビーコンの各種識別子が格納されている．

避難者に最も近いビーコンの推移より，その避難者が避難障害を認識して行動を変化させたかどうかを判定する．

## 4.2 避難障害の推定

避難障害を推定するにあたり、本研究では以下のような動きを避難者が行ったと推定される場合に、避難障害が存在すると判定する。

**避難者が避難経路から逸れる** 提示された避難経路を避難者が無視し、避難経路を逸れるということは提示された避難経路の先になんらかの避難障害が存在し、それを避けるための行動であったと考えられる。そのため避難経路から逸れたと推定される場合は、提示されていた避難経路上で逸れた直後の区画に避難障害が存在すると判定する。

**避難者が避難経路を U ターンする** 提示された避難経路を避難者が無視し、一度通った場所を戻るように避難者が移動したということは、移動予定だった場所になんらかの避難障害が存在し、それを避けたいが戻る以外に進む場所がないことによる行動であったと考えられる。避難者が提示された避難経路に対して、逆方向に移動した、避難経路を逆走したと推定される場合は、U ターンした場所以降に通る予定だった部分に障害が存在すると推定する。

図 4.1 は避難者が避難経路を逸れた場合に想定される状況の一例、図 4.2 は避難者が避難経路を U ターンする場合に想定される状況の一例である。避難者の移動の推移により、避難障害が存在すると判定された場合は、障害が存在する通路を通行不可とする。

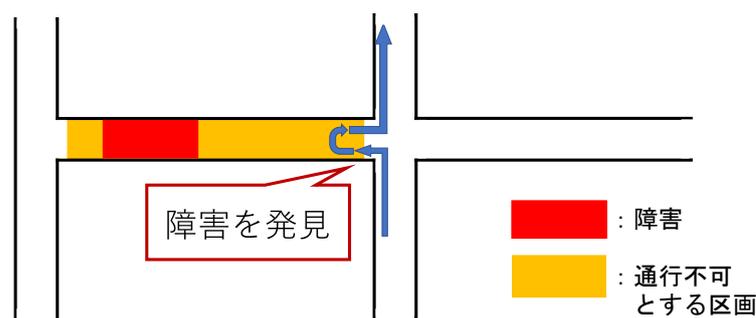


図 4.1: 避難経路逸れが想定される一例

BLE ビーコンによる移動の推移が上記のような状況に面した人間の行動を表している場合、避難障害が存在すると判定し、避難経路の再選択を行う。

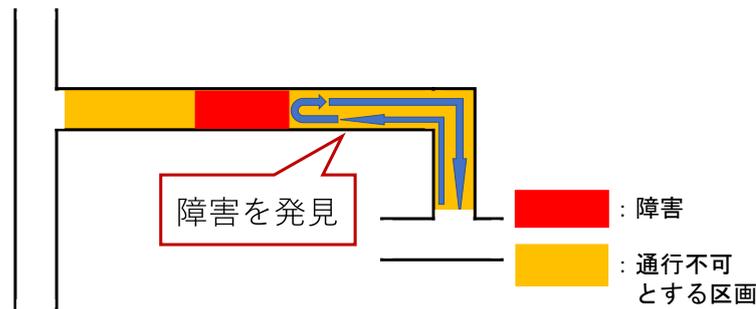


図 4.2: 避難経路の U ターンが想定される一例

### 4.3 避難経路の再選択と提示

クライアントが推定した最も近い BLE ビーコンの情報は、無線通信によってサーバに送信される。サーバは受信した BLE ビーコンの情報と、これまでに受信した最も近いビーコンの推移を比較し、5 回（実時間で 5 [s] に相当）同一の BLE ビーコンが検出されている場合は、避難者が検出された BLE ビーコンの付近に移動したと判定する。移動判定に 5 回の検出を要するのは、クライアントが移動していなくても様々な BLE ビーコンが最も近いビーコンとして検知されることを防ぐためである。

選出された避難経路は、避難開始地点から脱出地点までに付近を通過する BLE ビーコンの順番でも表される。サーバは避難者の移動判定ごとに、移動前の BLE ビーコンと移動後の BLE ビーコンの識別子を比較し、図 4.3 であらわされるような順番通りに移動しているか判定する。以上の、BLE ビーコンの検知、避難者の移動判定、避難経路に沿って移動しているかの判定を繰り返し、避難者の動向を監視する。BLE ビーコンの検知による避難者の移動の推移が、図 4.3 のような順番通り（順番を飛ばすことは許容する）に移動し、最後の BLE ビーコンが検知された場合、その避難者は建物から脱出したと判断する。

避難者の移動判定により、付近に移動したと判定された BLE ビーコンが、提示された避難経路を通過する際に検知しないビーコンであった場合は、避難者が避難経路から逸れたと判断する。また、付近に移動したと判定された BLE ビーコンが、既に通過したビーコンと同一であった場合は、避難者が避難経路を U ターンしたと判断する。

避難者が避難経路を逸れた、または避難経路を U ターンしたと判断された場合は、避難障害の推定が行われる。このとき、避難障害があると判定される領域は、避難経路を逸れるまたは避難経路を U ターンする直前に居たビーコンの次に通過するはずであったビーコンが存在する区画である。この区画を封鎖し、封鎖した区画を通過しない、分散避難の

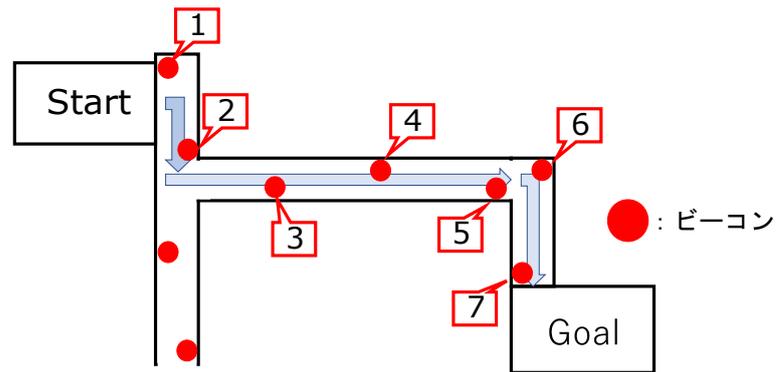


図 4.3: 避難経路上に存在するビーコンの通過順の一例

ための避難経路の再選出を全避難者を対象に再度行う。ただし、各避難者が居る地点を初期地点として避難経路の再選出を行う。新しく選出された避難経路は、3.1.1 節で述べたように画像化され、次のクライアントからの経路提示要求により、避難者に提示される。図 4.4 は、再選択された後の避難経路がクライアントに表示されている様子の一例である。図 4.4 中の建物の見取り図内に表示されている赤い区画は、推定された避難障害を表している。

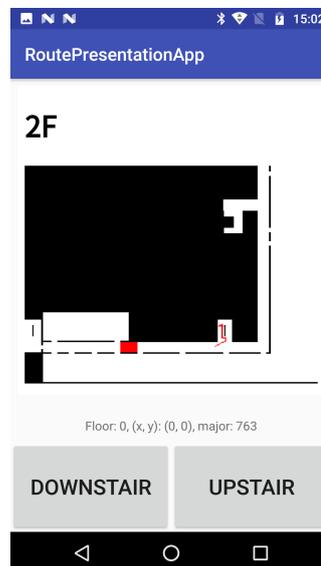


図 4.4: 避難経路再構築後のアプリケーション画面例

## 第5章 システム評価実験

本章では，分散避難誘導システムの動作確認のための実験，および分散避難誘導システムによって選出された避難経路の有効性の検証実験について述べる．

### 5.1 システムの動作確認実験

本節では，分散避難誘導システムの動作を確認するために行った実験について述べる．

#### 5.1.1 実験目的

本実験の目的は，以下の二つである．

1. 実際に移動した通りに位置推定が行えるかどうか確認する．特に避難障害の推定に必要である，経路のUターンおよび経路からの逸れを推定し，避難経路の再選択を行えるかどうか確認する．
2. 実際に避難者が避難経路のUターンまたは避難経路からの逸れてから，再選択された新しい避難経路が避難者に提示されるまでの時間を計測する．

#### 5.1.2 実験内容

実験に使用した機材は以下の通りである．

サーバ

CPU Intel Corei5-6500 3.50GHz

メモリ 8192MB

OS Windows 10 Home

クライアント

端末名 moto g4 plus

OS Android 7.0

メモリ 3072MB

### Bluetooth Bluetooth Version 4.1 LE

クライアント用端末を所持した状態で、避難者の一人であると想定し、分散避難誘導システムによって提案された避難経路に沿って途中まで移動する。その後、ある地点で避難経路のUターンおよび避難経路の逸れに相当する行動を行い、システムがこれを検知し、避難経路の再選択が行われるまで避難行動を継続する。再選択された避難経路が所持しているモバイル端末に提示された時点で実験を終了する。なお、本実験で実際にクライアント用端末を所持して移動する被験者は1名であるが、サーバのデータ上では計400名の避難者が4つの部屋に分かれて存在しているとの想定でサーバの処理を行う。また、これらの避難者はそれぞれ存在する部屋から移動しないものとして処理する。実験を行った名古屋工業大学内における、BLEビーコンの設置場所の例を図5.1, 5.2に示す。



図 5.1: BLE ビーコン設置場所例 1



図 5.2: BLE ビーコン設置場所例 2

### 実験 1 : U ターンの検出

名古屋工業大学内の20号館2階212号室の出入口を開始地点とし、分散避難誘導システムによって建物の外側に設置されている西側階段を用いて避難するという提示がされたという状況を想定する。ただし、この西側階段に繋がる通路に避難障害が存在し、これを視認した避難者は自身の判断で建物内の東側の階段を用いて避難する経路に変更したという想定の実験を行う。提示された避難経路と実際に移動する経路を図5.3に示す。

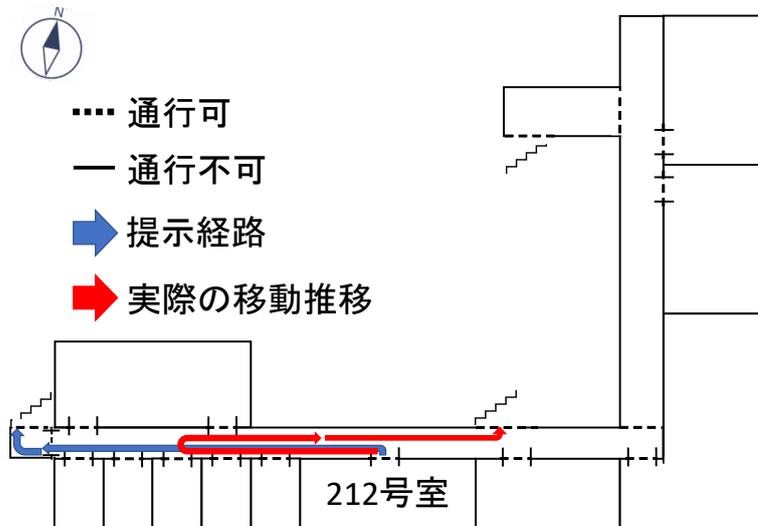


図 5.3: U ターン検出実験の提示経路および移動経路

実験 2：逸れの検出

実験 1 と同様に、20 号館 2 階 212 号室の出入口を開始地点とし、分散避難誘導システムによって建物内の東側の階段を用いて避難するという提示がされたという状況を想定する。しかし、東側階段に繋がる通路に避難障害が存在し、これを視認した避難者は自身の判断で建物内の北側の階段を用いて避難する経路に変更したという想定の実験を行う。提示された避難経路と実際に移動する経路を図 5.4 に示す。

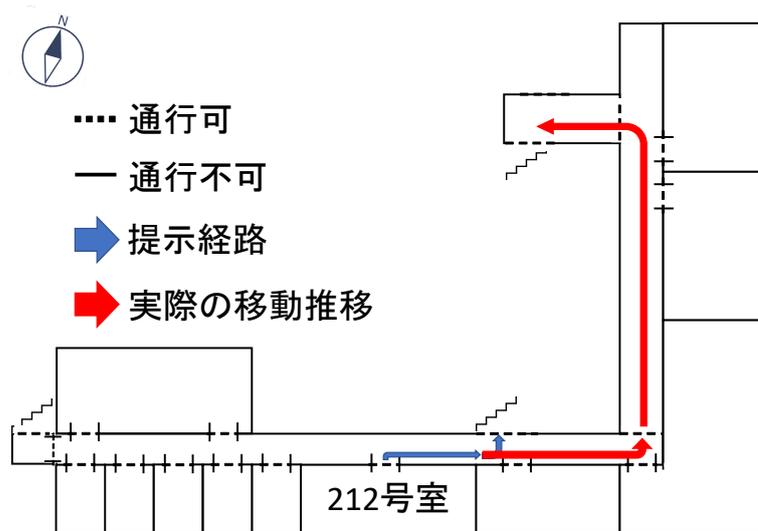


図 5.4: 逸れ検出実験の提示経路および移動経路

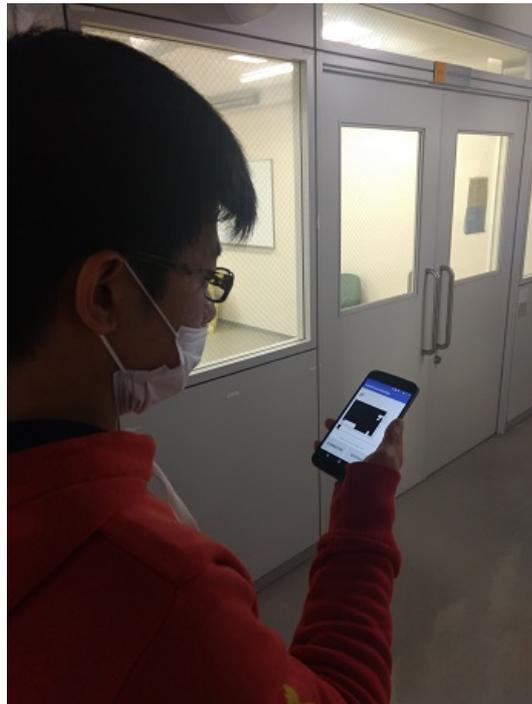


図 5.5: 実験の様子

### 5.1.3 実験結果

図 5.5 に実験の様子を示す。実験 1 では、避難経路を U ターンをしてから約 24 秒後に検知され、さらに約 5 秒後に変更された避難経路が提示された。実験 2 では、避難経路を逸れてから約 15 秒後に検知され、さらに約 5 秒後に変更された避難経路が提示された。

### 5.1.4 考察

最初にどちらかの行動を起こした避難者に対して変更された避難経路が提示されるまでに実験 1 では約 22m、実験 2 では約 20m 程進んでおり、この間の移動方向によっては再選択された避難経路と移動していた方向が異なる可能性があり、混乱が生じる可能性がある。しかし、この行動によって推定された避難障害の存在および避難経路の変更は、避難経路が再提示された時点でまだ部屋から出ることができていない避難者にも周知されるため、後続の避難者は避難障害に惑わされることなく、迅速に避難することが可能だろう。また、U ターンおよび逸れを検知し、再選択された避難経路が提示されるまでにかかった時間のほとんどは避難経路の画像化にかかった時間であった。本実験の環境では、1 枚画像化するために約 0.42 秒かかる。避難経路の画像化は各階各避難経路ごとに行われるため、避難者が様々な部屋にいる場合や高層ビルなどの階数が多い建物では画像化にかかる

時間が増大し、避難者に再選択した避難経路を提示するのにより時間がかかってしまう。実験1, 2では、避難経路の再選択によって、計400名の全避難者に対し、2階分、5種類の避難経路、計10枚の画像化を行ったため、行動を検知し、再選択した避難経路を提示するまでに約5秒必要であった。そのため、より高速な画像化手法、画像化以外の避難経路の提示方法により、この影響を小さくする必要があると考えられる。

## 5.2 評価シミュレーション実験について

本節では、避難経路の再選択が避難時間に与える影響を評価するために行ったコンピュータシミュレーション実験について述べる。

### 5.2.1 実験目的

本手法の有効性を検証するため、避難障害が検知された場合に、避難障害が避難経路上に存在する避難者のみ進路を変更した場合と、避難障害を考慮し、全避難者の避難経路を再選択した場合で、避難者全員が避難するまでにかかる時間をシミュレートし、比較する。

### 5.2.2 実験内容

本シミュレーション実験には、2.5節でも用いたシミュレーションソフト、Artisocを用いた。避難者をエージェントとしてモデル化し、避難開始後の避難経路の変更による影響を計測するため、2通りのシミュレーションを行った。

**障害認識者のみ経路変更** 避難障害を認識した避難者は、その地点から最も近い階段または出口へ行先を変更する。避難経路上に避難障害が存在しない避難者は行先を変更しない。

**障害を考慮した分散避難** 任意の避難者が避難障害を認識した場合は、全避難者の避難経路に対して、障害を考慮し、かつ分散避難を行うための避難経路に変更する。

以下に2通りのシミュレーションに共通する項目の詳細について述べる。なお、本実験では分散避難のための避難経路の選出に使用される、各階段または出入口の通過時間の差の閾値  $\epsilon_t$  を10、許容する行先の変更による悪影響の閾値  $\epsilon_d$  を20とした。

### シミュレーション空間構築

避難者をモデル化したエージェント（以下、避難者エージェントと呼称する）が行動する空間を構築する。空間は名古屋工業大学の20号館をモデルに構築した。空間はマス目状に区切られており、避難者エージェントはこのマス目に沿って避難行動を行う。マス目は1マス50 [cm] × 50 [cm] とし、避難者エージェントはこのマス目を、通路では毎ステップ2マス、階段部では毎ステップ1マス移動する。本実験では、1ステップは1 [s] とするため、避難者エージェントは通路では1 [m/s] 相当、階段部では0.5 [m/s] 相当で移動している。ただし、マス目は上下左右4方向にのみ移動できるものとする。また、同じマスに複数の避難者エージェントは存在できない。図5.6から5.8は、それぞれ20号館の1階から3階までのモデルに構築したシミュレーション用の空間である。図中の白い領域は通路などの通行可能な空間を示す。図中の濃い緑の領域は壁などの通行不可能な空間を示す。図中の薄い緑の領域は階段部を示し、この空間では避難者エージェントの速度が低下する。図中の赤い領域は避難障害を示す。また、避難開始時に各部屋に居る避難者の人数を表5.1に示す。

表 5.1: 各部屋に居る避難者の人数

部屋名	階数	人数 [人]
R1	1	60
R2	2	50
R3	2	10
R4	2	60
R5	2	60
R6	2	50
R7	2	50
R8	3	50

### 避難者エージェントの行動ルール

避難者エージェントはポテンシャル法に基づいて、それぞれの避難経路に沿うように階段または出入口へ移動する。本実験では、マス目ごとにポテンシャル値を設定し、避難者エージェントはポテンシャル値が小さくなる方向へ移動する。各階段または出入口に当たる座標のポテンシャル値を基準とし、シミュレーション空間内の各座標のポテンシャル値を算出する。ただし、侵入不可座標のポテンシャル値は-1と設定し、他の侵入可能な座標と区別する。また、他の避難者が存在する座標は移動先の候補から除外する。階段にたどり着いた避難者エージェントは、対応する一つ下の階の座標へ移動させる。出入口にたどり着いた避難者エージェントは建物から脱出したと判断し、消滅させる。

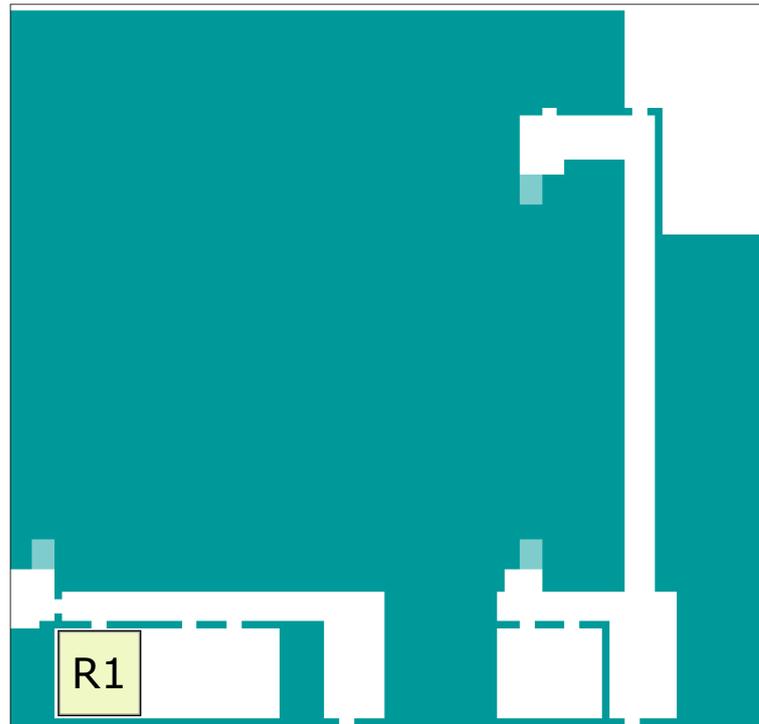


図 5.6: 20 号館モデル 1 階

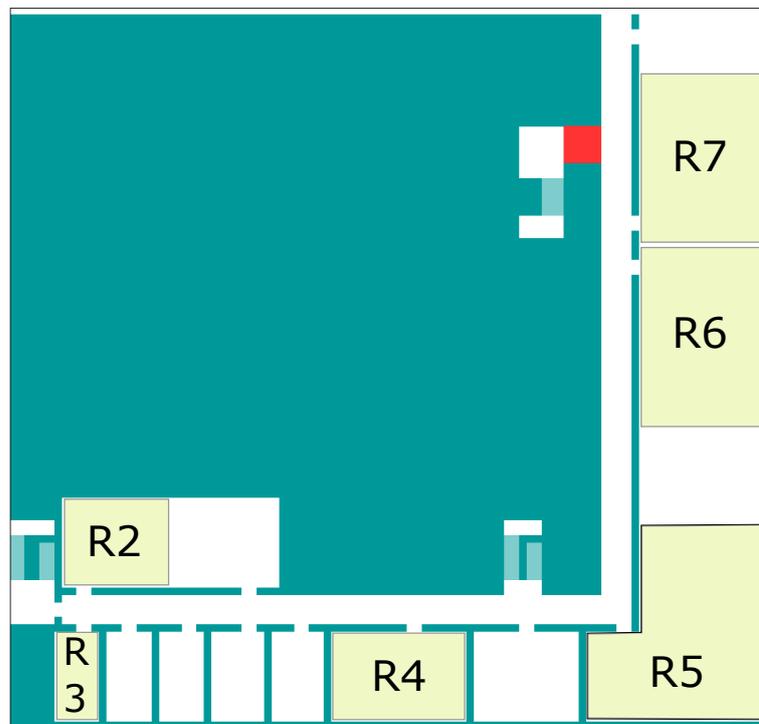


図 5.7: 20 号館モデル 2 階

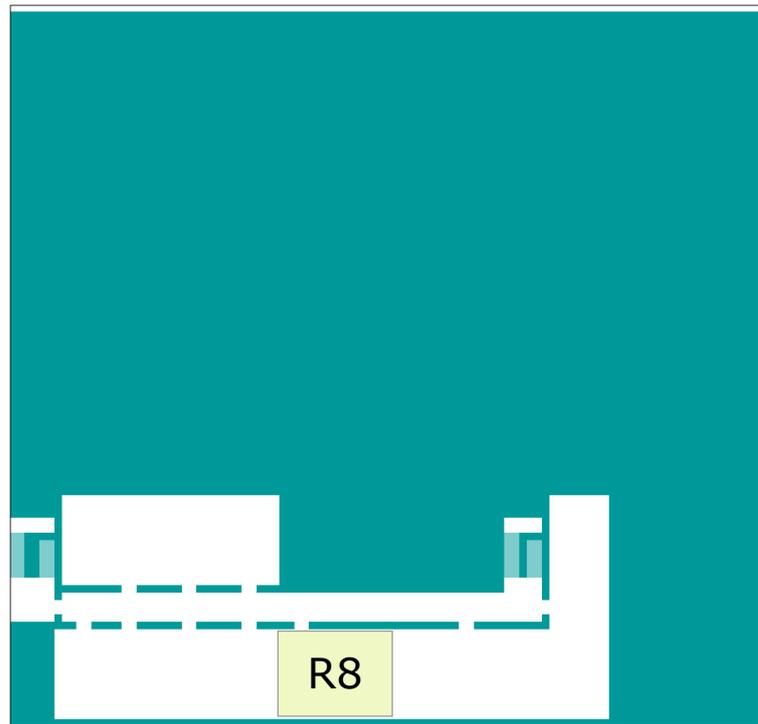


図 5.8: 20 号館モデル 3 階

### 避難障害エージェント

避難者エージェントは基本的にポテンシャル法に基づいて行動を行うが、避難障害をモデル化したエージェント（以下、避難障害エージェントと呼称する）を認識した場合は、次のステップから目標とする階段または出入口を変更する。避難開始後、避難障害エージェントの周囲4マス以内に侵入した避難者エージェントは、避難障害を認識した避難者として行先を変更する。また、本実験では避難障害検出から各避難者に新しい避難経路が提示されるまでの時間を考慮しない。そのため、避難障害の検出によって全避難者の避難経路が変更される場合は、任意の避難者エージェントが任意の避難障害エージェントを認識した次のステップに全避難者の避難経路を変更する。

### シミュレーション1ステップの処理の流れ

本実験におけるシミュレーションの1ステップごとに行われる処理について述べる。

1. 避難者が部屋などの初期位置にいる場合は、避難者の初期位置に相当する座標に避難者エージェントを発生させる。ただし、初期位置に相当する座標が避難者エージェントで埋まっている場合は、発生を一時的に抑制する。
2. シミュレーション空間内に存在するすべての避難者エージェントをそれぞれの避難

経路に沿って移動させる。

建物内のすべての部屋に居る避難者が建物から脱出するまで繰り返し、終了した際の時刻を避難時間とする。

### 5.2.3 実験結果

避難障害を認識した避難者の行先だけを変更した場合は、452 [s]，避難障害を検出後に全避難者の避難経路を再選択した場合は、420 [s] であり、避難障害を考慮し、全避難者の避難経路を再選択することで避難時間が約7%短縮された。

### 5.2.4 考察

避難障害を考慮することで、特に避難障害によって避難経路が使えなくなった避難者が流入する階段の渋滞が緩和された。建物全体の階段または出入口を効率的に使うようになることで、渋滞が緩和され、円滑に避難できたためであると考えられる。

## 第6章 むすび

本論文では、BLE ビーコンを用いて避難障害を推定し、避難障害を考慮した分散避難のための避難経路の選出手法およびこれを用いた避難誘導を行うためのリアルタイム分散避難誘導システムの構築について述べた。動作確認実験により、本システムを使用することで、避難者が避難障害を発見し、回避行動を行ってから 20 秒程度で、その避難障害を考慮した避難経路を再選択することが可能であることがわかった。ただし、再選択した避難経路を避難者に再度提示するための画像化に時間を要しているため、よりかかる時間の短い画像化手法、または提示のための手段が必要である。また、評価シミュレーションの結果より、避難障害が検出された場合に、避難障害を考慮した上で再度分散避難のための避難経路を選出することで、考慮しない場合よりも全体の避難時間を短縮できることがわかった。試行回数が少ないため、様々なモデルを用意し、評価していく必要があるが、本システムの有効性が少なくとも示されたと言える。

今後の課題として、本論文では経験的に一定の値として定めていた階段または出入口の通過時間の閾値  $\epsilon_t$ 、および許容する行先の変更による悪影響の閾値  $\epsilon_d$  の決め方の確立が挙げられる。避難者の再分配は変更による好影響が悪影響を上回る限り行うことで避難時間が短縮できると考えられる。しかし、一定の閾値による判定では悪影響のみを評価するととても影響が大きい、同時に得られる好影響がより大きい場合の変更を実施することができない。そこで、閾値  $\epsilon_d$  を定数ではなく、変更による好影響に応じて変動する値にすることで、より全体の避難時間の短縮を短縮できると考えられる。

## 謝辞

本研究を進めるにあたって、お忙しい中、様々な御助言ならびに多大な御尽力をいただき、ご指導を賜りました名古屋工業大学 舟橋健司 准教授、伊藤宏隆 助教に心から感謝致します。また、名古屋工業大学内に設置されている BLE ビーコンに関する情報を提供していただいた、情報基盤センター長 松尾啓志 教授、情報基盤センター教職員の皆様に心から感謝致します。そして、研究生活において励まし、支えていただいた舟橋研究室諸氏に心から感謝致します。

## 参考文献

- [1] 内閣府 防災情報のページ 被災者生活再建支援法,  
<http://www.bousai.go.jp/taisaku/seikatsusaiken/shiensya.html>
- [2] 国土交通省 気象庁 台風の詳細資料,  
<https://www.data.jma.go.jp/fcd/yoho/typhoon/statistics/index.html>
- [3] 筆保 弘徳, 伊藤 耕介, 山口 宗彦, ”数字で見る台風,” 台風の正体, pp.52-57, (株)朝倉書店, 東京, 2014
- [4] 国土交通省 気象庁 平成30年12月 地震・火山月報(防災編),  
<http://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/gaikyo/monthly/201812/201812index.html>
- [5] 内閣府 防災情報のページ 平成22年版 防災白書 図1-1-1,  
<http://www.bousai.go.jp/kaigirep/hakusho/h22/bousai2010/html/zu/zu001.htm>
- [6] 水谷 武司, ”防災対策,” 自然災害の予測と対策, p253, (株)朝倉書店, 東京, 2012
- [7] Takeru Kimura, Kenji Funahashi, Hirotaka Itoh, ”Distributing evacuee method to appropriate routes according to variation of person number,” Proceedings of IEEE-GCCE 2017, pp.488-491, 2017
- [8] 瀧本 浩一, 三浦 房紀, 松本 隆博, 関原 弦, 組田 良則, 山本 真吾, ”自律分散協調による避難誘導システムの開発,” 社会技術研究論文集, Vol.8, pp.82-90, Apr. 2011
- [9] 総務省 情報通信統計データベース 通信利用動向調査 平成29年調査,  
<http://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/statistics/statistics05a.html>
- [10] 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 -歩行者シミュレーションシス

テム SimTread の構築-, ” 日本建築学会計画系論文集, Vol.74, No.636, pp.371-377, Feb. 2009

- [11] 木村 健, 伊藤 宏隆, 舟橋 健司, ” 分散避難のための避難ルートを避難者に提示するシステムの構築, ” 平成 30 年度電気・電子・情報関係学会東海支部連合大会講演論文集, K3-1, Sep. 2018
- [12] GitHub Repository ”android-beacon-library”,  
<https://github.com/AltBeacon/android-beacon-library/blob/master/lib/src/main/resources/model-distance-calculations.json>
- [13] MAS コミュニティ,  
<http://mas.kke.co.jp/>
- [14] AltBeacon - The Open Proximity Beacon, <https://altbeacon.org/>

## 発表論文リスト

1. Takeru Kimura, Kenji Funahashi, Hirotaka Itoh, “Distributing evacuee method to appropriate routes according to variation of person number,” Proceedings of IEEE-GCCE 2017, pp.488-491, 2017
2. 木村健, 伊藤宏隆, 舟橋健司, ”分散避難のための避難ルートを避難者に提示するシステムの構築,” 平成30年度電気・電子・情報関係学会東海支部連合大会講演論文集, K3-1, 2018