

# IoT センサ情報とシミュレーションに基づく屋内避難経路の自動立案と通知

## Automatic Indoor Evacuation Routes Planning Using Information of Inside Building by IoT Sensor

安藤慧<sup>†</sup>, 飯島正<sup>‡</sup>

Kei Ando<sup>†</sup>, and Tadashi Iijima<sup>‡</sup>

<sup>†</sup>慶應義塾 大学院 理工学研究科 開放環境科学専攻

<sup>‡</sup>慶應義塾大学 理工学部

<sup>†</sup>Graduate School of Science and Technology, Keio Univ.

<sup>‡</sup>Faculty of Science and Technology, Keio Univ.

### 要旨

本論文では、火災発生時の建物内からの避難において、被災者を特定の経路に集中させず分散させることで、避難効率を向上させる誘導経路の探索手法を提案する。

本手法では、発災時の屋内被災者分布が、ある程度把握できていることを前提に、単純化した避難シミュレーションを行い、IoT センサで取得した災害状況に応じて、経路上の混雑状況を推定する。そのもとで、避難者全員が避難に要する平均時間を最小化する経路の探索を最適化問題としてとらえ、遺伝的アルゴリズム (GA) を利用する。

各種 IoT センサが設置された、ホテルや大学の研究室のような間取りを持つ建物において、火災発生から短時間の間に避難経路を求め、各室へ通知する想定の実験を行い、その条件下ではあるが、本手法の有効性を確認した。

## 1. はじめに

火災や地震などは、私たちにとって身近な危険の一つである。そのような災害が発生した場合に備え、様々な対策が講じられている。建物からの適切な避難誘導を行うことも、災害発生時の一つの重要事項である。現代の建築物は、避難を考慮した建築基準を満たしているが、高層ビルや公共施設など大型であったり、内部構造が複雑な建物においては、被災者が特定の避難路に集中してしまうなど、避難が遅れてしまう場合がある。被災者の集中を避け、迅速な避難のために、状況の把握と的確な避難誘導が求められる。

公共の建築物には、避難経路図の設置が義務付けられている。しかし、実際に火災などが起き、いくつかの内の出口が使えなくなってしまった場合や、その時の被災者の位置や人数によって特定の出口に集中してしまう場合などには、必ずしも避難経路図が適切な避難経路とはなりえない。設置されている避難経路図は、その地点から、いくつかの避難出口までの経路を図示する静的情報にすぎないからである。そこで、火災などの災害発生時における建物内の、被災状況と被災者の数と位置を基に決定した避難経路を被災者に伝達することで、避難可能な出口に、建物内にいる被災者を集中させずに、分配することができるのではないかと考える。

本研究は、火災時の屋内避難経路の自動立案を目指すものである。今回は、その中でも条件を絞ったもののみ着手する。建物としては、ホテルや学校のように、主通路となる廊下があり、いくつかの部屋が隣接しているような単純な構造の建物について取り扱う。また、避難に関しても窓から脱出する方法を考えず、出口からの避難のみを考える。

そして、火災時の屋内の情報を基に経路を決定するという前提から、建物内の情報を収集する必要があるのだが、本研究においては情報の収集の可能性を述べるにとどまり、情報を基に経路を立案するという点について取り上げる。

## 2. 既存研究と本研究の位置づけ

本研究は、建築物を対象とした避難シミュレーション・GA を用いた最適解探索に関する研究である。建築物を対象とした避難シミュレーションに関する研究として、海老原、掛川 (1995)[1], 木村ら (2009) 等 [2] によって、避難者個人単位での避難行動を予測するシミュレーション技術に関する研究が行われている。本研究においても、岩佐 (2016)[3] によって、誘導と救助などの避難者行動を考慮した屋内での

シミュレーション研究が行われている。避難シミュレーションは、建物の設計段階で避難安全性を評価し、設計上の問題を明らかにしたり、避難誘導対策を検討するための方法としても活用される。

GAを用いた最適解探索に関する研究として、原ら(2006)[4]はカーナビゲーションの経路探索を多目的最適化問題にとらえ、交通量を考慮した経路探索を開発した。志村ら(2014)[5]はGISによる空間分析とGAによって、道路上の安全性と避難距離を考慮した災害時の避難経路を探索する手法を開発した。

本研究は、火災発生時に建物内の状況からシミュレーションを行い、最適な避難経路を探索する方法を提案するものである。そのため、建築物の設備や避難計画の評価、混雑箇所や避難弱者を考慮した安全な避難方法の事前計画のためのシミュレーションとは目的が異なる。シミュレーションによる事前計画などによって、災害自体も想定して避難経路を求めるのではなく、火災などの災害が発生した場合に、実際の火災状況とその時点での建物内避難者分布をもとに避難経路を探索することを本研究では目的とする。

### 3. 提案

#### 3.1. センサによる被災状況と被災者情報の収集

避難が必要な場合、建物自体の静的情報だけでなく、実際に災害が発生した場合の建物内の動的情報が重要となる。ここでの動的情報とは、火災を想定し、火災の出火元や延焼の状況、煙の充満の程度など、避難する際に影響を与える要因で実際に災害が起こらないと得ることができなく、時間によって刻々と変化する情報を指す。これらの情報を収集するために、建物内にセンサを多数設置する。センサとしては、火災状況を把握するために煙センサと温湿度センサ、人の位置・数を把握するためにカメラや赤外線センサなどを想定する。

建物内の情報をリアルタイムに取得するために、RaspberryPi[11]の利用を想定する。Raspberry Piとは、ラズベリーパイ財団がイギリスで開発した、ARMプロセッサ搭載のシングルボードコンピュータである。Raspberry Pi 3 Model Bは、Wi-FiとBluetoothが搭載されており、USBポートもしくはGPIOにセンサを接続し使用する。最大消費電力は約12.5Wと、一般的なノートPCと比べ省電力である。消費電力が低いため、モバイルバッテリーで駆動可能である。つまり、建物内が停電してしまった場合でも、ある程度の時間はセンサからの情報収集が可能である。よって、Raspberry PiによってセンサをIoT化し、多数設置することで、建物内の動的情報を収集する。ここで、提案する情報収集から避難誘導までの流れのイメージを示す。(図1)

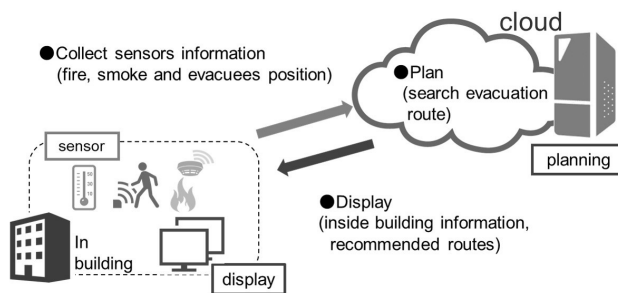


図 1: 建物内情報の収集から避難誘導までの全体像

#### 3.2. 建物情報の取得

避難経路を求めるにあたって、建物の基本構造である間取り図が必要となる。火災や煙などの物理シミュレーションには、天井の高さなどの3次元情報が必要となるが、人の移動する経路としては、階段などは重要な要因となるが、建物の各階の2次元情報、見取り図が必要となる。本研究では、前述したIFCと呼ばれる3DCADデータから、建物の構造情報を取得する。IFCは、3次元情報であり、コストや日程情報など建物に関する情報も含まれており、今回必要とする2次元情報を抽出する必要がある(図2)。

また、建物の情報を取得したら、座標情報だけでなく、部屋同士の接続情報も経路探索・シミュレーションを行うのに必要となる。IFCでは、寸法だけでなくドアや窓などの属性情報とそれらの接続関係も記述されているため、その情報から部屋などをノードとしたネットワークで表現し、トポロジーマップを生成する。図3にトポロジーマップの例を示す。建物の座標情報とトポロジーマップから、本研究では避難経路の策定を行っていく

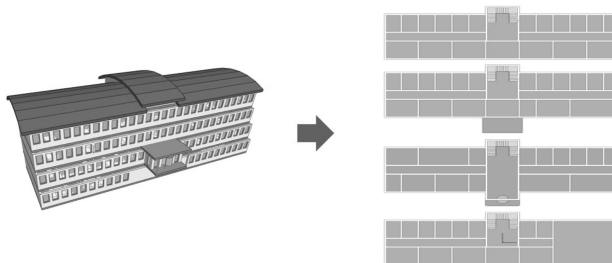


図 2: IFC[7] からの 2次元情報の抽出

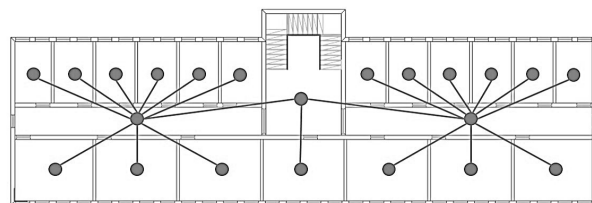


図 3: トポロジーマップの例

### 3.3.GA による避難経路の策定

最適化手法としての、GA の利点としては以下のようなものが挙げられる。

- 1). 最適解は保証されないが、効率的に準最適解を求めることが可能
- 2). 解の表現の自由度が高く、取り扱う問題に依存しないので、汎用性が高い
- 3). 解空間構造が複雑であったり、広すぎる場合でも適用可能

GA には、1) に挙げたように、効率的に準最適解を求めることができるという利点がある。しかしながら、十分な効果を得るには、集団サイズや交叉率、突然変異率などのパラメーターや遺伝的操作の方法などを、適切なものにする必要がある。GA は、2) に挙げたように、汎用性が高い。本研究で目的関数とするのは、後述するがシミュレーションによって求めた被災者全員の平均避難時間であるので、不連続となる。このような場合でも、適応度の値のみで評価する GA は取り扱うことができる。また、GA は確率的な多点探索であるため、3) に挙げたように、解空間が広く全探索が不可能な場合などでも効果的な解の探索ができる。今回求めようとする解は、建物内の各部屋からの出口までの避難経路なので、解の候補は膨大なものとなる。そのため、広い解空間に対応可能な GA が本研究に適していると考えられる。

GA によって求める解は、効率的な避難経路である。経路の評価は、静的情報の建物構造からだけでなく、火災状況と被災者分布の動的情報も考慮して行う。被災者分布から混雑度も考慮して評価するため、解としては単一の部屋からの避難経路だけでなく、建物内のすべての部屋からの避難経路を保持する必要がある。そこで、各部屋からの経路を遺伝子として、部屋の数だけ遺伝子を配列したものを染色体、個体とする。選択方法は、トーナメント方式を採用する。交叉方法は、一様位置交叉を採用し、親となる個体対のどちらを遺伝させるかを遺伝子座ごと、つまり各部屋ごとに決める。突然変異方法は、染色体の配列の中からランダムに選び出し、新しい遺伝子、経路に置き換える。以上のように、遺伝的操作を行い、世代を繰り返す。終了条件としては、時間制限を設けるとする。GA は、解の探索途中だとしても、それまでで求められた解の中で最も良い解を返すことができるので、災害発生から避難誘導を開始するまでに、経路探索することができる。また、初期集団の生成時に、各部屋からの経路をランダムに生成するだけでなく、最短距離を持った個体を生成することで、静的情報から求められる最適避難経路よりも劣った解にはならないようにする。

被災者分布から混雑度を考慮して評価するために、離散型シミュレーションを行う。GA の適応度の評価値として、シミュレーションによって求めた、避難者全員の平均避難時間をとる。シミュレーションは、IFC による施設内情報とセンサから得られた建物内の火災状況・避難者分布をもとに行う。本研究では、事後的な経路策定を目指しているため、厳密なシミュレーションではなく、簡易的なシミュレー

シミュレーションを行う。具体的には、同じ部屋にいる被災者は、まとまって行動すると仮定し、避難行動のバリエーションを今回は考慮しない。また、シミュレートする単位時間を大きくすることで、シミュレートにかかる時間を削減する..

### 3.4. 施設内にいる避難者への通知

策定した避難経路を、図 4.1 に示したように、建物内の各部屋 (ホテルなどのドアの内側に避難経路図が掲示してあることがよくあるが、そのような部分) にディスプレイを設置してあることを仮定し、そのディスプレイに、IFC から抽出した建物内の見取り図とセンサから得られた現在の火災状況・GA によって策定した推奨避難経路を表示する。施設全体の状況を伝達することで、避難者は建物の外までの安全な避難経路を考えられる。さらに、推奨避難経路を表示することによって、特定の経路に集中することの緩和につながると考える。

## 4. 実験・評価

本研究において、構築した避難経路策定方法は、建物内において火災が発生した場合の経路を策定するものである。したがって、評価・検証実験の内容としては、建物内での火災が発生した状態を仮想的に作りだし、その情報をもとに経路を策定し、単なる最短経路で避難した場合と比較することになる。まず、この実験の条件を以下に記す。

- 実験に用いる建物構造は、図 4 を用いる
- 経路策定に用いるトポロジーマップはあらかじめ IFC から生成しておく
- 火災情報は、ガス格子セルオートマトンにより、煙の仮想データを生成し、センサー配置情報 (図 5) と照らし合わせ、センサー情報として与える
- 避難者は、各部屋に一律 3 人いるものとする

火災状況に関しては、多数考えられるが、ここでは一例を取り上げて考える。(図 6)

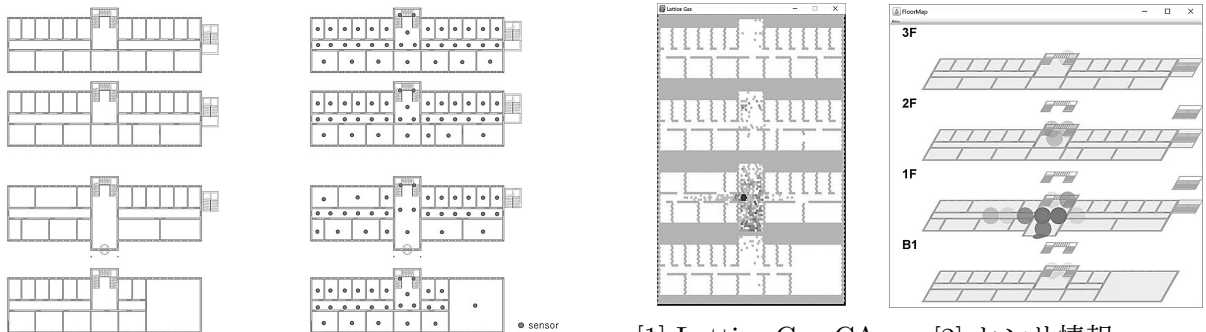


図 4: 建物見取り図

図 5: センサー配置

図 6: 火災状況

また、本実験において使用したパラメータを表 1 に示す。パラメータは、実験を試行した中でもっとも良かったものを採用した。

表 1: 本実験における各パラメータ値

個体数	交叉率	突然変異率	シミュレーションの単位時間
50	0.6	0.6	10s

以上の条件で実験を行い、単純な最短距離経路と比較して避難者の平均避難時間 (ステップ) がどの程度改善するかを求めた。

$$\text{改善度} = \frac{\text{最短距離経路の避難時間} - \text{GA によって求めた経路の避難時間}}{\text{最短距離経路の避難時間}} \quad (1)$$

また、経路を求めるために行ったシミュレーションは、時間短縮のために単位時間を10秒としていたので、求めた経路で、単位時間1秒とした場合の平均避難時間も求めた(表2)。実験は5回行い、平均を求めた。

表 2: 世代数 30, 交叉率 0.6, 変異率 0.6 での実験結果

単位時間		距離最短経路	1	2	3	4	5	平均
10s	平均避難時間 [step]	6.91	4.98	4.94	4.94	4.95	4.95	4.95
	改善度	0	0.280	0.286	0.286	0.284	0.284	0.284
1s	平均避難時間 [step]	103.2	67.7	66.3	66.3	67.4	66.8	66.9
	改善度	0	0.344	0.356	0.357	0.347	0.353	0.352

求められた経路の一例を図7に示す。

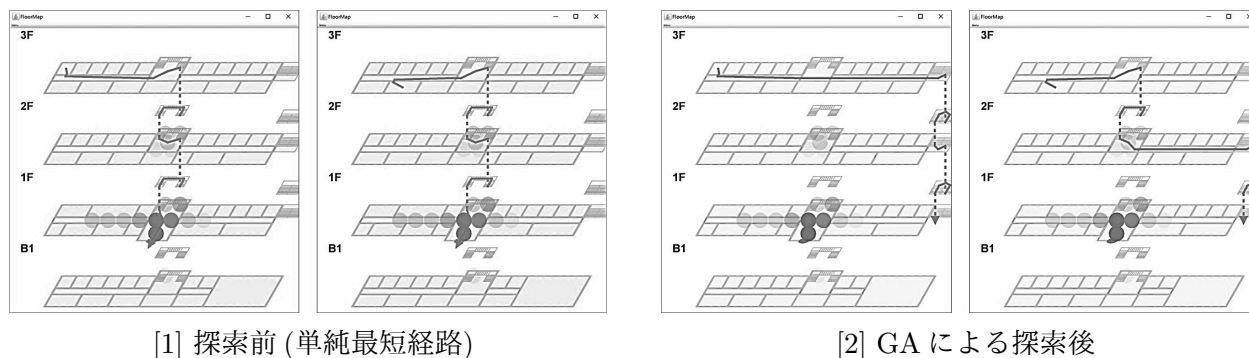


図 7: 経路変化の例

さらに、建物の規模を変えた場合の解の改善度の変化と計算に要する時間を見るために、地下1階から地上3階までの全4階の建物に、さらに階数を増やした建物で、同様の実験を世代数を変えて行い、改善度の平均と計算時間の5回の平均を求めた。表3 横軸に計算時間、縦軸に改善度をとったそれらのグラフを、図8に示す。

表 3: 建物規模による解の探索への影響

世代数	全4階		全5階		全6階		全7階	
	改善度	計算時間 [sec]	改善度	計算時間 [sec]	改善度	計算時間 [sec]	改善度	計算時間 [sec]
20	0.241	20.1	0.102	38.8	0.076	64.0	0.075	93.9
30	0.279	26.3	0.195	52.3	0.115	86.5	0.086	126.2
40	0.282	32.2	0.202	65.5	0.126	101.4	0.104	155.2
50	0.283	37.1	0.202	69.1	0.148	117.5	0.116	173.1
60	-	-	-	-	0.153	138.2	0.117	206.9

まず、求めた経路自体の評価に関しては、表2を見て分かるように、単純な建物外への最短経路と比較した場合に比べて、避難者平均避難時間が約3割減少していることから、単純な最短経路よりも改善された経路の探索ができていことがわかる。図7を見ると、探索前はどちらも出火元とされる部屋を通過して出口に向かう経路なのに対し、探索後には出火元とされる部屋を避けるような経路をとっている。また、一つの階段に集中しないように、建物の中央の階段で一つ下まで降りてから建物の端の階段を使うといった経路の分散ができていことから、人の混雑度が考慮されていることがわかる。次に、建物の規模を拡張した場合に関してだが、図8をみると、階数が増えていくごとに改善度が上限に達するまでの計算時間が増加していることがわかる。改善度の上限自体が減少しているのは、評価値として、平均避難時間を用いているからであり、もともと火災の影響をあまり受けない経路が増えることによるところであると考えられる。しかし、改善度の上限に達するまでの変化率の減少は、建物の規模の

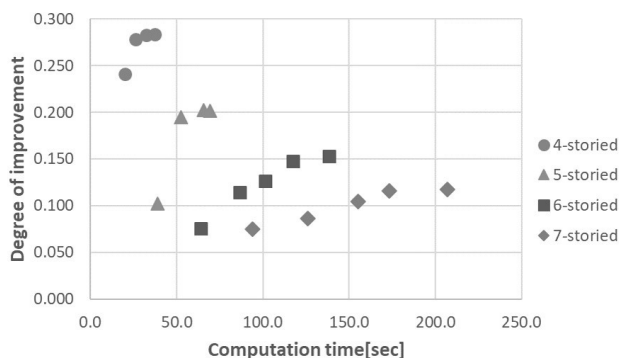


図 8: 計算時間と改善度の関係

増加によるものである。建物の規模が大きくなることによって、個体の持つ経路情報はより複雑になり、その分だけ試行世代数は増えることになるためであろう。さらに、本実験では個体の評価に簡易とはいえシミュレーションを用いているため、規模が大きくなるほどシミュレーション1回あたりにかかる時間が増加するため、規模が大きいくほど計算に要する時間も増加している。

## 5. まとめ

規模が大きい単なる単純な間取りの建物において、火災発生から短時間の間に、火災状況や避難者分布を考慮した避難経路を自動で探索・各室へ通知する想定シミュレーション実験を行い、その条件下ではあるが、本手法の有効性を確認した。しかしながら、建物の規模や複雑度が大きい場合に関しては、十分な解の探索に時間を要してしまうなど、不十分である。

## 参考文献

- [1] 海老原学, 掛川秀史: “オブジェクト指向に基づく避難・介助行動シミュレーションモデル,” 日本建築学会計画系論文集, 467号, pp.1-12, 日本建築学会, 1995.
- [2] 木村謙, 佐野友紀, 林田和人, 竹市尚広, 峰岸良和, 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, 74, 636, pp.371-377, 日本建築学会, 2009.
- [3] 岩佐貴俊: “屋内避難シミュレーションのための避難者行動のモデリングと実装,” 慶應義塾大学大学院理工学研究科修士論文, 2016.
- [4] 原健太, 塚原荘一, 狩野均, 曾田敏弘, 黒河久: “多目的遺伝的アルゴリズムを用いたカーナビゲーションのための予測経路探索,” 情報処理学会研究報告高度交通システム (ITS), 22(2006-ITS-024), pp.31-38, 情報処理学会, 2006.
- [5] 志村雄一郎: “多目的 GA を用いた地震災害下における避難経路探索法に関する研究,” 電気通信大学大学院情報システム学研究科 2013 年度修士論文, 2014.
- [6] 井上祐介: “遺伝的アルゴリズムを用いた複数経路探索法,” 高知工科大学情報システム工学科 2000 年度学士学位論文, 2001.
- [7] University of Auckland : “KIT: AC11-Institute-Var-2-IFC,” <http://openifcmodel.cs.auckland.ac.nz/Model/Details/110>, 閲覧日:2016/09/20.
- [8] 日本建築学会: “建築物の火災安全設計指針,” 丸善, 2002.
- [9] 日本火災学会: “火災と建築,” 共立出版, 2002.
- [10] 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.
- [11] Raspberry Pi Foundation UK registered charity 1129409: “Raspberry Pi - Teach, Learn, and Make with Raspberry Pi,” <https://www.raspberrypi.org/>, 閲覧日:2017/01/11.