

自動巡回ロボットによる避難誘導実現のための マルチエージェントシミュレーション

杉江 竜太¹ 打矢 隆弘¹ 内匠 逸¹

概要 : 近年, 日本は大規模な震災によって多くの被害を受けている. 被害を減らすため適切な防災行動を行うことが重要である. 屋外への避難行動も防災行動の1つである. 特に, 学校などの大型の施設では, 適切な避難行動が行えるよう避難訓練が実施されている. しかし, 地震発生時が夜間で誘導者が不在である場合や, 火災による煙などの2次災害によって人では誘導が困難になる場合が考えられる. これらの問題点の解決策として, 避難経路の状況に応じた動的な誘導を, 人に代わってロボットが行う防災システムを構築する方法が考えられる. 本研究では, ロボットによる防災システムを開発するために, マルチエージェントシミュレーション (Multi-Agent Simulation) を利用して, ロボットによる避難誘導の有効性を示す.

Multi-Agent Simulation for Realization of Evacuation Guidance with Automatic Patrol Robots

Ryuta Sugie¹ Takahiro Uchiya¹ Ichi Takumi¹

1. はじめに

地震後の防災行動の1つに屋内からの避難がある. 普段行われている避難訓練では, 多くの場合避難誘導者が配置され避難を促している. しかし災害時には, 夜間で誘導者が不在であるなど常に万全な状態であるとは言えない. また, 火災が発生した場合, ある経路が通行できなくなる場合や, 煙による2次災害などの理由で人では誘導できなくなる場合が考えられる. これらのことから, 避難経路の状況に応じた動的な誘導を人に代わるものが行うことが望ましい. そこで, 人に代わるものとしてロボットが動的に避難誘導を実施する防災システムを提案する.

しかし, 防災システムにロボットを導入するためには, 誘導方法, 配置場所, ロボットの性能など様々な要因を変化させて実験を何度も行う必要がある. 実機で実験を行うには時間的にも, 費用的にもコストが大きくなってしまいうという問題がある. そこで, 本研究ではマルチエージェントシミュレーションを利用することで, 仮想環境を構築しその中で, ロボットによる避難誘導の有効性を示すことを目的とする.

マルチエージェントシミュレーションを用いた既存研究には, 岡谷ら [1] の避難者と誘導者が関与する動的避難誘導の研究や, 田中ら [2] の情報伝達手段の1つとして小型無人航空機を避難誘導に用いた研究などがある.

2. マルチエージェント

本章では, まずエージェントに関する基本的な知識について説明する. 次に, マルチエージェントシミュレータの *artisoc*[3] について説明する.

2.1 エージェント

エージェントとは, 外部環境, 人, 他のエージェントの相互作用によって自律的に動作するプログラムである. 単体のエージェントは, 単純な機能しか持たないが, 複数のエージェントが分散・協調することで複雑な人工社会を構築することができる. エージェントという概念は現在, 明確な定義が無く, 様々なエージェントの定義が存在する. 共通した概念として以下のようなものが挙げられる.

自律性 他のエージェントや人から直接干渉を受けずとも, 自身で判断し動作する.

社会性 他のエージェントと相互作用を行う. 協調するこ

¹ 名古屋工業大学 大学院 工学研究科 情報工学専攻

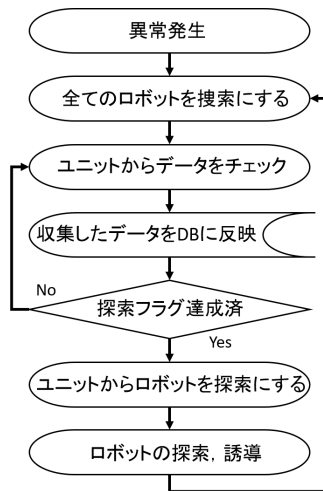


図 3 システムの処理の流れ

増加するにつれて環境情報収集必要時間が短くなると考えられたが、25 体までは結果が短くなったが 30 体の結果が長くなった。これは、ロボットを増やしすぎたために探索効率が上がらなくなり、最大効率に収束したためであると考ええる。

表 1 使用ロボット数別環境情報収集

ロボット数	時間 (s)
1	6053
5	1847
10	1248
15	696
20	626
25	519
30	578

誘導での実験は、システムが実行されてからランダムに 1 つのロボットの役割を誘導にし、そのロボットによって役割が誘導になったロボットの合計 3 台の誘導にかかった時間を計測した。結果から、役割が誘導に変更されたロボット (誘導開始ロボット) の結果は良いが、誘導ロボットの命令を受けて役割が誘導に変更されたロボット (first 命令ロボット) の結果が全ノードをチェックする時間の 1/10 以上となってしまった。また、人の流れを考慮して誘導するロボットごとに出口を分けるアルゴリズムを用いたが、役割が誘導に変更された 3 台目のロボット (second 命令ロボット) では最初に役割を誘導に変更されたロボットに比べ 2 倍以上の誘導時間の差があった。このことから、誘導を行うロボットは複数用いるよりは単体の方が良い結果が出る可能性がある。

3.2 考察

この研究では、音声による誘導は客観的で指示が多方向的に捉えることが可能であり確実性がないため、ロボットが直接出口まで誘導することを想定している。たしかに、音

表 2 ロボット別完了時間

計測ロボット	時間 (s)
誘導開始	71
first 命令	123
second 命令	175

声での誘導は、信頼性が低くなるが非常事態を素早く複数の相手に伝達することが可能である。ゆえに、音声での誘導と直接の誘導を使い分けることで効率的な誘導が行えるものと考ええる。

また、ロボットの数を最大 30 体用いて実験を行っているが、低コストのロボットを使用してもコストがかさんでしまう問題点が挙げられる。そして、同時に 30 体のロボットを使用した場合、どのロボットが信頼できるかわからなくなる場合や、ロボット同士の干渉、ロボット自体が避難の妨げになるといった問題も考えられる。ゆえに、最低限のロボットの台数で避難効率を上げるシステムの構築を目指すべきである。

4. 提案手法

本研究では、無人地上車両 (Unmanned Ground Vehicle : UGV) による屋内での動的避難誘導を想定する。UGV を利用した誘導方法は、大きく分けて 2 つのタイプが存在する。1 つ目は、UGV が音声や矢印を示すなど視覚的な方法で出口の方向を伝える間接的避難誘導である。間接的避難誘導は、出口までの経路を把握している避難者に対して 2 次災害による危険を避けるため経路の変更を促すといった利用法が有効である。2 つ目は、UGV が避難者を先導して出口まで誘導する直接的避難誘導である。直接的避難誘導は、出口を把握していない避難者に対して有効である。

UGV による動的避難誘導が有効であることを検証するため、UGV エージェントを用いた間接的避難誘導、直接的避難誘導それぞれを扱った 2 つのシナリオを提案する。

4.1 シナリオ 1-火災の発見と避難の呼びかけ

地震後の 2 次災害として起こりやすいのが火災の発生である。火災が発生した部屋の周囲の経路でも通行できる場合はあるが、煙などの危険もあるためその経路は避けるべきである。1 つ目のシナリオでは、火災を想定するために火災エージェントと煙エージェントを作成する。巡回中の UGV エージェントが火災エージェントから発生した煙エージェントを検知した場合、周囲の避難者エージェントに音声を用いて呼びかけることで、煙エージェントの発生した経路を避けた出口への間接的避難誘導を行う (図 4)。

4.2 シナリオ 2-来訪者を考慮した避難誘導

UGV による直接的避難誘導は、主に避難が遅れた人に対して有効である。大学を例にすると、在学生や教員など

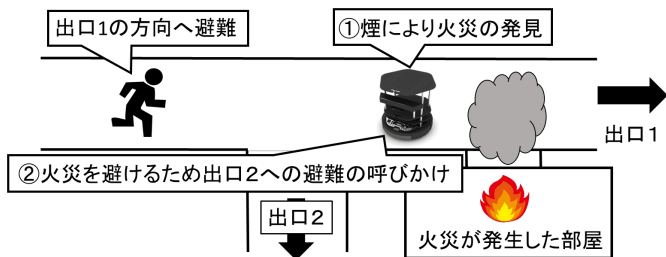


図 4 ロボットによる火災の発見と呼びかけ

は建物に馴染みがあり出口を把握していると考えられるが、来訪者の場合、初めて来た建物の出口を把握しているとは考えにくく避難が遅れる原因となる。この状況を再現するために、在学生エージェントと来訪者エージェントを作成する。在学生エージェントは地震発生後に自ら避難を行うが、来訪者エージェントは出口を把握していないものとし、出口を探索する。避難誘導を行う UGV エージェントが巡回を行い、来訪者エージェントを発見すると避難誘導を開始するというシナリオである (図 5)。

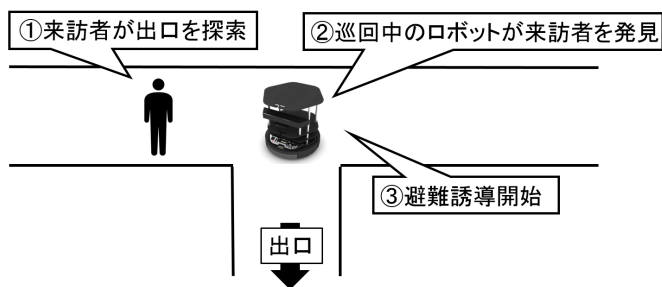


図 5 ロボットによる来訪者を考慮した避難誘導

4.3 避難行動のモデル化

状況設定

本シミュレーションは、名古屋工業大学 2 号館 2 階における避難行動を想定する (図 6)。避難口は丸を付けた 4ヶ所である。各エージェントの行動は表 3 のように定義した。避難者は在学生エージェント 100 人である。避難者の避難行動として、地震発生直後は全員身の安全を確保するものとする [6]。90 秒後に避難開始のアナウンスがあると仮定し、避難者は避難を開始する。避難するタイミングは、90 秒以降で避難者毎にランダムで設定されている。そして、8 分経過、もしくは全員の避難完了によってシミュレーションが終了となる [7]。UGV エージェントは、0~2 台が配置され図 6 中の黄色の線上を巡回する。

マップ設定

シミュレーションでは、図 6 をもとに縦 80 マス×横 120 マスのセル空間のマップ (図 7) を作成し使用した。1 セルの大きさは 0.6m 四方である。これは、[8] より人体を覆うことのできる設計上有用な大きさとして設定した。

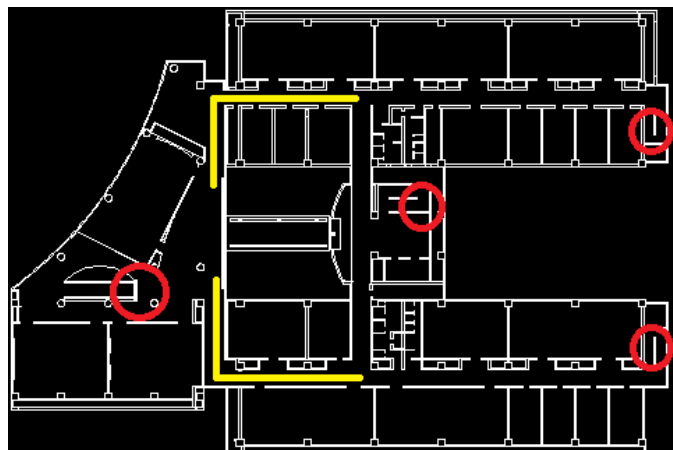


図 6 名古屋工業大学 2 号館 2 階見取り図

表 3 エージェントの行動一覧

Agent	Action
UGV	災害発生後：指定範囲を巡回 煙を感知：周囲の避難者に音声で呼びかけ 来訪者発見時：避難誘導の実施
在学生	最寄りの避難口へ避難
来訪者	近くに避難者がいる場合：追従 いない場合：出口を探索
火災	一定時間後ランダムな部屋から発生
煙	火災エージェントから一定速度で充満

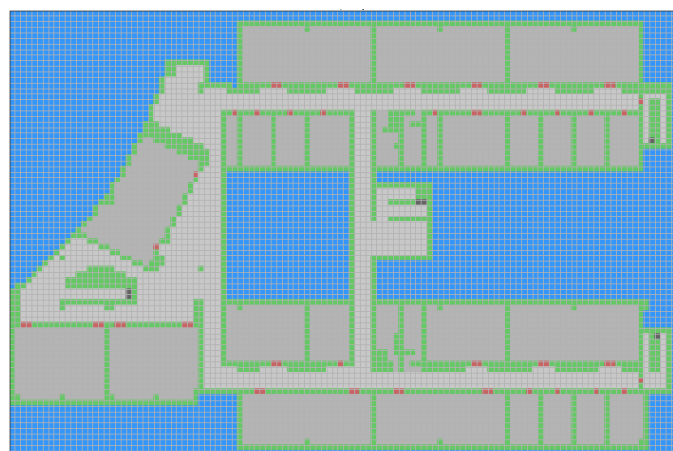


図 7 見取り図のマップ化

1 ステップの経過時間

一般的に人の歩行速度は 4km/h(≈1.1m/s) であるとされている。2 セル分の約 1.2m を 1 秒で歩ける計算となるので、1 ステップの経過時間は 0.5 秒とした。

ポテンシャル

在学生エージェント、来訪者エージェント、UGV エージェントの 3 つは主にポテンシャルを用いて移動を行う。ポテンシャルとは、出口の値を 0 として出口から離れるにつれて増加する値である。(図 8)

シミュレーションでは、エージェントがいるマスの周囲のマスのポテンシャル値を比較し最小のマスの移動を続け

9	10	11	12	13
8				
7		3	2	
6			1	0
5	4	3	2	1

図 8 ポテンシャルの例

ることによって出口にたどり着くことが可能である。

本研究が対象としている 2 号館 2 階のマップのポテンシャル値は図 9 のようになる。青色になるにつれてポテンシャル値が小さくなり、黄色になるにつれてポテンシャル値が大きくなる。

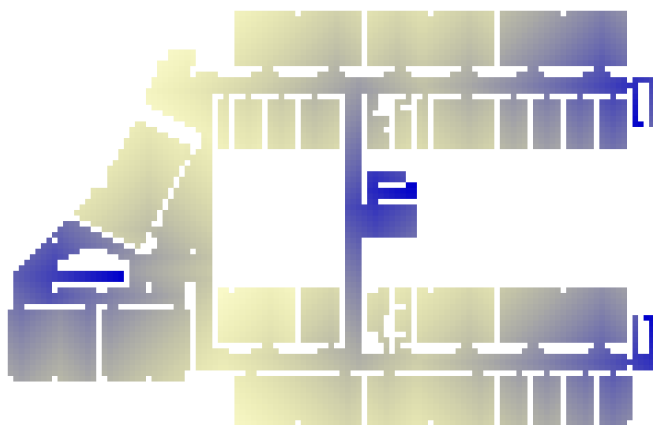


図 9 ポテンシャルマップ

UGV エージェント

UGV エージェントが 2 台で巡回を行っている場合、UGV 同士で通信をし、連携できるものと想定する。連携内容として、片方の UGV エージェントが火災を発見した場合、火災発見場所をもう一方の UGV エージェントと共有し避難誘導を行えるものとする。

火災エージェントと煙エージェント

火災エージェントは、複数の教室の中のある 1 ヶ所から発生する。発生後、煙エージェントを生成する。火災による煙の水平方向の拡散速度は $0.3 \sim 0.8 \text{ m/s}$ とされている。本シミュレーションでは、 0.4 m/s と設定した。煙が充満した状態では、体勢を低く保ち移動する必要があるため歩行速度が低下することが考えられる。ゆえに、在学生エージェントが煙エージェントに触れている場合、歩行速度は通常時の半分の 0.6 m/s とした。また、在学生エージェントが煙エージェントに 30 秒間触れた場合死亡扱いとする。

音声を想定した間接的避難誘導

シナリオ 1 で用いる間接的避難誘導では音声を想定している。シミュレーションではその再現をするために、UGV エージェントの周囲 15 マス (=9m) の範囲内にいる避難者エージェントに避難経路の情報を伝達している。伝達する情報は、UGV エージェントが煙を検知した経路を避けるよう修正したポテンシャルマップの情報を避難者に与えている。

来訪者エージェント

来訪者エージェントは、近くに UGV エージェントがいる場合 UGV エージェントに追従し UGV エージェントが直接的避難誘導を行う。シミュレーションでは、UGV エージェントの周囲 3 マス (=1.8m) において来訪者を識別できるとし、音声で避難者に呼びかける想定をする。その後、UGV エージェントは 5 ステップ間停止し、その間に来訪者エージェントが UGV エージェントに接近し、誘導開始のトリガーとなるアクションが行われると想定する。そして、UGV エージェントは出口を目指し来訪者エージェントはそれに追従するといった流れとなる。

5. 評価実験

シナリオ 1 の実験を 2 種類、シナリオ 2 の実験を 1 種類行った。

5.1 シナリオ 1

5.1.1 実験 1

実験 1 では、誘導方法についての実験を行う。名古屋工業大学 2 号館の中央階段は、火災がどこで発生しても中央に存在するため煙が到達しやすいことが予想される。そこで、中央階段が最も近い出口であっても使用を避けるよう誘導を行った場合と、使用した場合についてそれぞれシミュレーションを行い結果を比較する。

実験方法と結果

避難者の位置、UGV の位置、火災の発生場所、発生時間はそれぞれ固定し再現性を保持する。UGV なし、中央階段を使用したときの UGV が 1 台の場合、2 台の場合、中央階段を誘導に使用しないときの UGV が 1 台の場合、2 台の場合の 5 パターンについてそれぞれ 10 回試行を行いその平均値を表 4 に示す。また、UGV が 2 台の時に中央階段を使用した場合と使用していない場合のシミュレーション実行画面をそれぞれ図 10、図 11 に示す。

考察

まず、中央階段を使用した場合で UGV の台数による比較を行う。

0 台と 1 台の場合を比較すると、ステップ数、避難失敗者数、煙に触れたステップ数の削減が確認できた。一方で、避難者移動距離は増加した。避難者移動距離の増加は、避難経路変更による増加と考えられる。UGV が 1 台の場合、

表 4 シナリオ 1 実験 1 の結果

中央階段	-	使用		不使用	
		1 台	2 台	1 台	2 台
UGV の台数	0 台	1 台	2 台	1 台	2 台
ステップ数	642.5	631.6	573.1	644.9	604.2
誘導された人数	-	4.7	12.9	4.3	14.7
誘導された避難成功者数	-	0.2	7.6	3	11.9
避難失敗者数	9.1	8	6	6	3.1
避難者移動距離	108.6	120.9	118.7	116	118.8
煙に触れたステップ数	678.7	669	405.7	538.4	250.5
火災発生時間	362				
火災発見時間	-	485.8	421.7	486.4	420.8

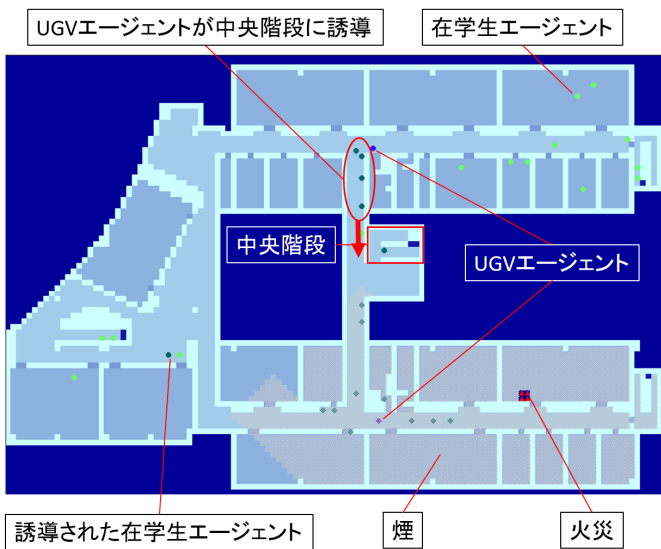


図 10 シナリオ 1-中央階段を使用したシミュレーション実行画面

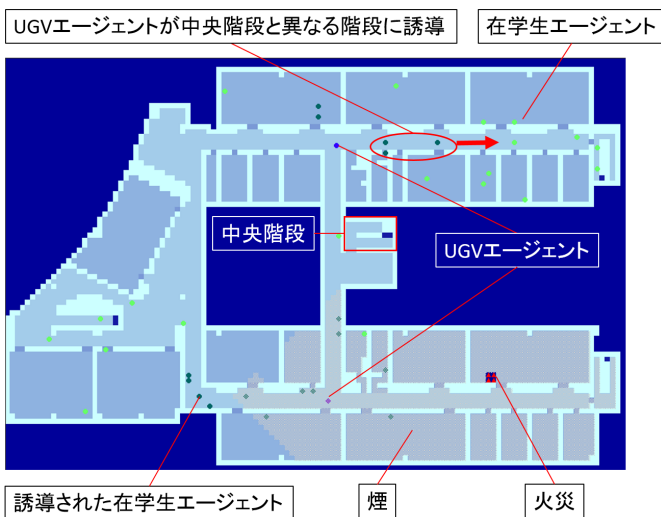


図 11 シナリオ 1-中央階段を使用しないシミュレーション実行画面

誘導された人数は 4.7 人と避難者全体の 5%ほどである。さらに、誘導された避難成功者数が 0.2 人であるため、誘導時には煙が充満してしまっていたと考えられる。

1 台と 2 台の場合を比較すると、ステップ数、避難失敗者数、避難者移動距離、煙に触れたステップ数、火災発見

時間の値は削減が確認できた。また、誘導された人数、誘導された避難成功者の値は増加が確認できた。

1 台と 2 台の場合の大きな差は、火災発見時間が早くなり、誘導された人数が大きく増加したことである。その結果、避難失敗者数や煙に触れたステップ数の減少につながったと考えられる。以上より、UGV を避難誘導に用いることは有効であると言える。また、UGV を 2 台用いる場合に最良の結果となった。

続いて、中央階段を誘導に使用した場合と不使用の場合を比較する。UGV が 1 台の場合、ステップ数が増加し、誘導された人数が減少したものの誘導された避難成功者数が増加し、避難失敗者数、避難者移動距離、煙に触れたステップ数の減少が確認できた。特に、誘導された避難成功者は 0.2 人から 3 人まで増加した。この差は、誘導方向を中央階段ではない階段に向けたためだと考えられる。

UGV が 2 台の場合、こちらもステップ数は増加したが、誘導された人数と誘導された避難成功者数が増加し、避難失敗者数、煙に触れたステップ数の減少が確認できた。中央階段を誘導に使用した場合、誘導された避難成功者数は誘導された人数の 60%だが、中央階段を誘導に使用しなかった場合では 80%と大きく増加している。また、中央階段を使用した場合に比べ使用しなかった場合では、避難失敗者数は半分に、煙に触れたステップ数も 40%削減できている。

これらのことから、中央階段を使用しない誘導方法が有効であると言える。

5.1.2 実験 2

実験 2 では、火災の発見時間による避難失敗者数の変化についての実験を行う。火災の発見が遅れることによって、避難失敗者数がどのように変化するかをシミュレーションし検証する。

実験方法と結果

火災の発生時間をシミュレーション開始から 240 ステップ後とした。避難者の位置、火災の発生場所は毎回ランダムである。UGV は 2 台で実験を行う。誘導方法は実験 1 で行った中央階段を使用しない誘導方法である。100 回のシミュレーション結果の火災発見時間と避難失敗者数を散布図 (図 12) に示す。

考察

火災発見時間は、火災の発生場所により 260 ステップ～400 ステップの間で変化している。最短と最長で 140 ステップの差であり時間に直すと 70 秒の差である。一方、避難失敗者数は 10 人～20 人の間に集中している。全体的にばらつきはあるものの、火災発見時間が早いほど避難失敗者数が減少し、遅いほど増加する傾向がみられる。特に、避難失敗者数が 10 人を下回るときは火災発見時間は早く、25 人を上回るときは遅いということが言える。

以上のことより、火災発見時間を早くすることが避難失

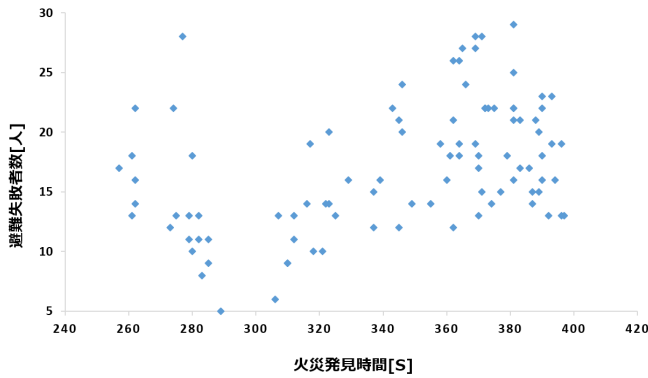


図 12 実験 2 の結果

敗者数を減少させるための重要な要因となっていると言える。

5.2 シナリオ 2

実験方法と結果

在学生と来訪者の位置を固定し、再現性を保持したまま、UGV なし、UGV1 台、UGV2 台の場合の 3 通りのシミュレーションを行う。この試行を 10 回行い平均値を表 5 に示す。また、シミュレーション実行画面を図 13 に示す。

表 5 シナリオ 2 の実験結果

UGV	0	1	2
ステップ数	603	559.5	531.5
避難者移動距離	114.2	118.1	114.4
誘導された人数	-	1.5	0.9

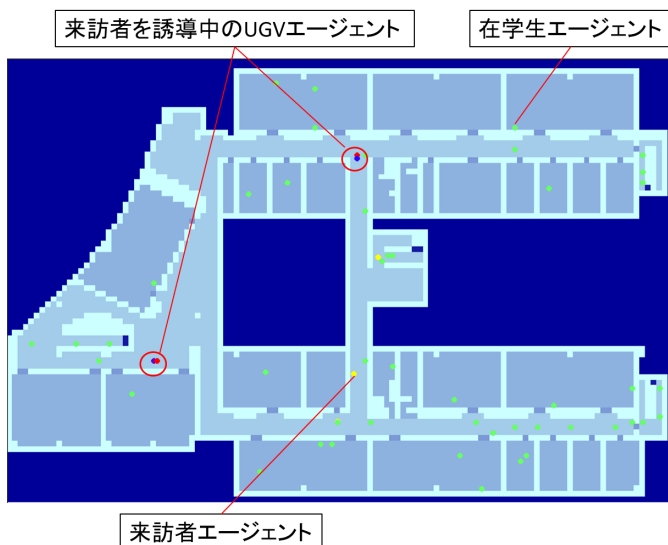


図 13 シナリオ 2 のシミュレーション実行画面

考察

UGV が 0 台と 1 台の場合を比較するとステップ数が約 40 ステップ削減された。また UGV が 1 台と 2 台の場合を比較するとステップ数が約 30 ステップ削減された。以上より、徘徊している来訪者を誘導することで避難時間を短縮することができた。

しかし一方で、UGV が 1 台と 2 台の場合で誘導された人数は 0.6 人減少している。これは、来訪者が 5~10 人しかいないため、UGV が 2 台の時にうまく在学生エージェントを追従できたものと推測する。UGV が 1 台と 2 台の時の差は、避難できていない来訪者が 1 人残った時に早く発見できるかどうかであり、それによってステップ数が削減できたものと考えられる。

UGV の有効性は確認できたが、この実験の問題点として在学生エージェントに対して来訪者エージェントの割合がかなり少ないことが挙げられる。来訪者エージェントが在学生エージェントに追従することが容易であるため、追従することが困難なシチュエーションを再現できるパラメータを考慮する必要がある。

6. おわりに

本研究は、災害時にロボットが自律して動的な避難誘導を行うことで、人の手を介することなく、迅速に避難誘導を行うシステムを構築することを目的としている。そして、システムを構築するにあたって、どのようにロボットを使用すべきかをシミュレーションで検証した。

提案手法では、ロボットが行う避難誘導として間接的避難誘導と直接的避難誘導の 2 つに分類し、それぞれの誘導を再現できるシナリオを提案した。

実験として、シナリオ 1 では UGV の有効性と誘導方法を検証する実験 1 と火災発見時間と避難失敗者数の関連を調査する実験 2 を行った。実験 1 では、UGV の有効性を示すと同時に、誘導方法として中央階段を使用しない誘導方法が有効であることを示した。実験 2 では、火災発見時間の増加に伴って避難失敗者数も増加する傾向を示した。

シナリオ 2 では、来訪者を誘導する UGV が有効であることを示すと同時に課題についても述べた。

今後は、ロボットの動作方法を改良することで誘導効率の向上を図る。また、来訪者に関するパラメータの再検討を行う。

参考文献

- [1] 岡谷賢 他, “動的避難誘導を考慮したエージェントベース避難シミュレーション”, 電子情報通信学会技術研究報告. AI, Vol.112, No.477, pp.7-11, 2013.
- [2] 田中和幸 他, “小型無人航空機を用いた大規模災害時における避難誘導の MAS による有効性検証”, 情報科学技術フォーラム講演論文集, Vol.14, No.4, pp.473-474, 2015.
- [3] 株式会社 構造計画研究所, “artisoc”,

- <http://mas.kke.co.jp/> (2017/05/03 アクセス)
- [4] “Visual Basic 6”, <http://www.vb6.us/> (2017/05/03 アクセス)
- [5] 安藤孝徳, “役割を持つマルチロボットを用いた避難誘導システムの提案”, 法政大学大学院紀要 (情報科学研究科編), Vol.8, pp.87-92, 2013.
- [6] “東京都防災ホームページ-地震発生時の行動マニュアル”, <http://www.bousai.metro.tokyo.jp/bousai/1000026/1000276.html> (2017/05/03 アクセス)
- [7] “国土交通省-第4回地下街安心避難対策検討委員会”, http://www.mlit.go.jp/toshi/toshi_gairo.tk.000052.html (2017/05/03 アクセス)
- [8] 押野麻由子, “マルチエージェントモデルを用いた避難行動のシミュレーション”, 中央大学理工学部情報工学科 田口研究室 卒業研究論文, 2005.