

避難シミュレーションにおける 誘導内容が避難時行動に及ぼす効果の検証

Validation Method for Evacuation Guidance Efficacy in Agent Based Simulation

磯野 綸太郎 *1
Rintato ISONO

伊藤 真司 *2
Shinji ITO

高橋 友一 *3
Tomoichi TAKAHASHI

*1*3 名城大学大学院理工学研究科情報工学専攻
Graduate School of Meijo University, Department of Information Engineering

*2 名城大学理工学部情報工学科
Meijo University, Department of Information Engineering

Disasters may occur anytime and anywhere in the world. Evacuation drills are used to estimate safe egress time and improve prevention plans for emergency situations. However, it is difficult to conduct drills that involve a large number of people in real-world environments. Multi-agent simulations (MAS) have been used to disaster-related fields and applied to scenarios that are difficult to perform drills in the real world. Making use of the simulation results to plan disaster-prevention measure, we need to verify that the simulation results that are reasonable at scenarios that are not confirmed from real data and observations. In this paper, we discuss the examining qualitative differences in MAS-based evacuation simulations.

1. はじめに

火災や地震といった災害が発生したときに、人々が速やかに避難できるような避難計画が求められている。減災を考えた誘導手法にするために、実際の建物で避難訓練を実施し、避難誘導が避難者の行動に与える効果を調査することが望ましい。駅や都市等の人が多く密集する場所で、現実に避難訓練や誘導効果の実験を行うことは難しいため、避難シミュレーションを利用することが検討されている [1]。

避難シミュレーションが減災に有効であることを示すために、従来は実際の訓練と比較し、避難者の避難時行動や避難結果を、防災担当者が主観的に判断する方法が用いられてきた [2]。その一方、実験や実データの無い状況では不確定要素があり、避難シミュレーションにおける避難誘導を検証する方法は、我々の知る限り提案されていない。

本論文では、避難誘導放送・エージェント間通信等の機能を持つ避難シミュレーションを用いて、訓練が困難な条件下で誘導内容と避難者行動が避難結果に与える影響を統計的に検証し、避難シミュレーションの有効性を検討する方法を提案する。2章では避難シミュレーションに要求される機能について、3章では避難シミュレーションの有効性について、4章では提案手法と検証結果について、5章ではまとめを述べる。

2. 避難シミュレーションに要求される機能

日常の訓練があったとしても、状況に応じた避難行動を取ることは難しい。非常時の避難に際して、災害時における人間の行動を想定した避難計画には、避難時の混雑や避難時間の推定等が必要である。有効な避難計画を考案する現実的な方法の一つとして、避難シミュレーションが有効であると考えられてきた。これまで、水害避難、帰宅困難、高層建築物からの避難等、様々な状況を想定した避難シミュレーションが提案された。

避難シミュレーションを構成する要素として、現実起きた災害データと、歩行者の行動を模した歩行モデルが利用されてきた。具体的には、1) 災害データとして地震、火災、津波等を取り入れ、2) 人間の避難行動を、2次元連続空間モデル、セルオートマトンモデル、ネットワークモデルといった歩行者モデルで表現し、3) 現実の空間を模倣した空間モデル内で避難者が避難する。さらに、避難シミュレーションの実験結果を提示するために、グラフ画像や動画が利用されてきた。視覚的に表現されたシミュレーション結果が、現実の避難行動と比較して定性的な性質を持つことを示すために、避難シミュレーションの動作保証や性能比較を行うことが求められている [3]。

NIST は、避難シミュレーションに必要な機能として、30種類の避難シミュレーションを次に示す項目で評価した (表1)[4]。項目は、シミュレーションの有償/無償利用、シミュレーションのモデル化手法、目的、構造、避難者の避難行動、避難者の移動方法、火災の取扱い、CADの使用、シミュレーションの様子を表現する視覚的要素、そしてシミュレーション手法と結果検証がある。検証に際して、1) 避難シミュレーションのソースコード利用形態、2) 消防訓練や人の移動実験/テストに対する検証、3) 過去の避難実験に関する文献に対する検証、4) 他のシミュレーションモデルに対する検証、5) 第三者視点による検証を提示している。

NIST の評価項目には、避難者行動モデルによって発生する渋滞や避難者のパーソナリティが考慮されてきた一方で、避難誘導等の避難時の情報伝達 (Communication) が人に及ぼす影響については扱われていない。邑本は、東日本大震災の調査を元に、人間の認知や行動特性等が避難者が避難する際の避難時行動に影響することを述べている [5]。避難者が避難誘導を受けの際の災害時の情報処理過程のモデルを提示し、受け手の知識量を考え、流す情報の質と量に対する重要性を指摘している。

我々は、避難誘導を考慮した避難シミュレーションを用いて、情報伝達によって災害時の避難行動が変動し、避難結果に与える影響を検証することが必要であると考えられる。

連絡先:

磯野 綸太郎, 143430002@ccalumni.meijo-u.ac.jp

伊藤 真司, 110425034@ccalumni.meijo-u.ac.jp

高橋 友一, ttaka@meijo-u.ac.jp

表 1: 避難シミュレーションに必要な機能

Required functions	Exitsting 30 models	
	Using	number and kinds
Available to public	✓	13 models avail
Modeling Method	✓	30 models use one of 5 method
Purpose	✓	30 models have 1 or more purpose
Grid/Structure	✓	30 models use Coarse or Fine network
Persepctive of M/O	✓	30 models use Global or Individual
Behavior	✓	30 models 18 models use one of 5 rules
Movement	✓	30 models use one or more types
Fire data	✓	14 models use
CAD	✓	12 models use
Visual	✓	9 models use 2-D or 3-D
Valid	✓	20 models checked by one or two point of 5 views
Communication		No models use communication like Evacuation Guidance

3. 避難シミュレーションにおける避難誘導の有効性について

3.1 避難誘導の効果と避難シナリオ

避難シミュレーションの有効性を示すために、避難誘導の内容が避難時間の推移と避難率に与える影響、災害時の受け手の情報処理を考慮した避難放送、避難者心理や避難者同士の衝突を扱った避難シミュレーションを用いた [6]。ここでいう避難率とは、要避難者に対して想定した時間までに避難出来た人数の割合を指す。

3.1.1 避難シミュレーションモデル

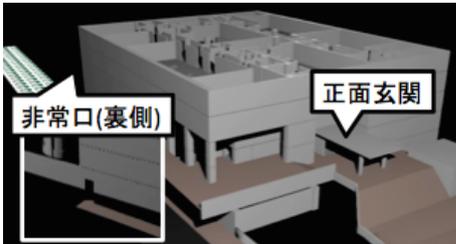


図 1: 避難シミュレーションをした建物

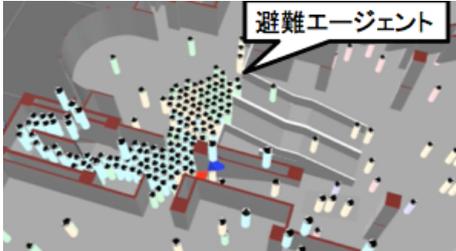


図 2: 2, 3 階の避難する様子

図 1 と図 2 に、対象とした建物と建物内の避難状況を示す。5 階建ての建物にいる 1,000 人 (各階 200 人) の避難者が、避難放送を元に、正面玄関または非常口から避難場所へ向かって避難を開始する。図 3 は避難誘導の情報伝達のモデルで、1) 避難時の誘導内容が決まり、2) 避難者に避難誘導が伝わる割

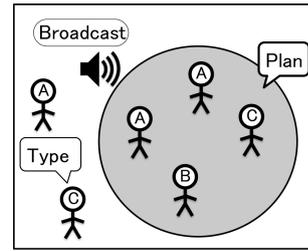


図 3: 災害発生時の情報伝達モデル

合が状況に応じて変化し、3) 避難者各々が避難行動を取る、の 3 段階で構成される。

3.1.2 避難シミュレーションのパラメータ

避難シミュレーションの情報伝達モデル 1)、2)、3) を、パラメータ Plan、Broadcast Rate、Type として設定した。

Plan: 放送される避難誘導の内容を示し、X、Y、Z のいずれかが放送される。避難する意思を持つ避難者は、誘導内容の通りに避難行動を行う。

PlanX 6step 目に 1F・3F・5F の避難者を非常口、2F・4F の避難者を正面玄関に誘導する。

PlanY 6step 目に避難者全員を正面玄関に誘導する。

PlanZ 6step 目に 1F・2F・3F・5F の避難者を非常口に誘導し、20step 目に 4F の避難者を正面玄関に誘導する。

X は避難者によって異なる出口へ向かって避難する様子、Y は避難者全員が同じ出口に避難する様子、Z は、9.11 の災害報告書にある建物の階に応じて避難時間をずらした避難誘導を模した内容である [7]。

Broadcast Rate: 災害発生時の避難放送を、建物内の避難者が聞き取れる割合である。ただし、避難場所と指定された出口までの避難経路の情報が伝わらないことがある。避難放送を聞き取れなかった避難者は、避難しない。

Type: 東日本大震災を例に、避難者が避難放送を聞いた際に取り取る避難行動を定義し、全ての避難者が以下の A) 直後避難、B) 用事後避難、C) 切迫避難のいずれかに属する。

TypeA 避難誘導を聞いた場合すぐに避難する。

TypeB 避難誘導を聞いた場合用事を終えてから避難する。

TypeC 避難誘導を聞いた場合でも避難しない。

3.2 シミュレーション結果

3 通りの Plan、Broadcast Rate を 100%、70%、40%、10% の 4 通り、Type を A、B、C の比率で 5 通り考え、 $3 \times 4 \times 5 = 60$ 通りで実験した (表 2)。ここで、東日本大震災の Type は $A : B : C = 57\% : 31\% : 12\%$ にあたる [8]。空白は行わなかった実験を示している。避難シナリオとして、以下の 4 つを定義をした。

Scenario1 避難者全員が Type A で誘導に従って正面玄関または非常口へ避難する従来の避難シミュレーションを模したもの。

Scenario2 Scenario 1 を元として Type と Broadcast Rate の組み合わせを変えたもの。

Scenario3 Scenario 2 を元として Plan Y を誘導内容としたもの。

Scenario4 Scenario 2 を元として Plan Z を誘導内容としたもの。

各シナリオにつき、3 回実験して得た避難率の平均と偏差を取った。Scenario 1-000、2-001、3-001、4-001(表 2 の*) は、行った実験のうち縦軸に時間あたりの避難率、横軸に避難率の推移をとったグラフにした (図 4)。

シミュレーション結果より、理想と思われる全員が同時に避難する方法よりも、避難誘導を用いる方が迅速に避難できることが観測された。さらに、全ての避難者が一斉に避難するよりも、誘導内容に従って避難者を避難させる方が効率的に避難できることが分かった。Scenario 3-001 と 4-001 について、偏差の大きさから誘導効果のばらつきが少なく、信頼性が高いことがいえる。その一方で、避難開始 25 step 以降では、両者の誘導内容のうち、どちらが優れた方法であるかを判断することが難しい。

表 2: 想定したパラメータの組合せ

Broadcast Rate (%)	Type(%)			Plan		
	A	B	C	X	Y	Z
100	100	0	0	1-000*		
	65	25	10	2-001*	3-001*	4-001*
	60	30	10	2-002	3-002	4-002
	60	25	15	2-003	3-003	4-003
	55	30	15	2-004	3-004	4-004
70	65	20	15	2-005	3-005	4-005
	65	25	10	2-006	3-006	4-006
	60	30	10	2-007	3-007	4-007
	60	25	15	2-008	3-008	4-008
	55	30	15	2-009	3-009	4-009
40	65	20	15	2-010	3-010	4-010
	65	25	10	2-011	3-011	4-011
	60	30	10	2-012	3-012	4-012
	60	25	15	2-013	3-013	4-013
	55	30	15	2-014	3-014	4-014
10	65	20	15	2-015	3-015	4-015
	65	25	10	2-016	3-016	4-016
	60	30	10	2-017	3-017	4-017
	60	25	15	2-018	3-018	4-018
	55	30	15	2-019	3-019	4-019
	65	20	15	2-020	3-020	4-020

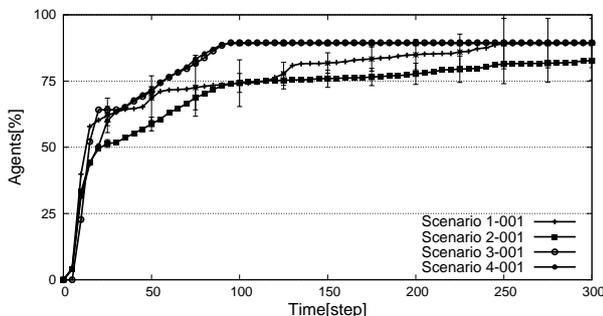


図 4: Scenario 1-000, 2-001, 3-001, 4-001 の避難率推移

4. シミュレーション結果の定性的検証

4.1 提案手法

実環境で、多数の参加者による避難訓練を行うことはできないため、代わりに避難シミュレーションを行う。想定する状況が増えるに従って、避難誘導や避難時行動が避難率の推移に与える影響を目視で評価することは困難になる。多くの状況をシミュレーションした結果を、統一した尺度で視覚的に検査する方法は、シミュレーションにおける避難誘導の有効性を検証する上で十分ではない。避難シミュレーションの有効性を示すために、避難結果を機械的かつ客観的に検証する方法が必要である。

シミュレーション結果は、一次元のデータ列 $y_{1:n} = (y_1, \dots, y_n)$ として表現される。図 4 における、30step、90step のような避難率が変化する点と全体の避難率の関係に注目した。

4.2 検証結果

全体の尺度として、3 章と同様に、単一の変化点が最大 1 つ現れることを仮定し、R 言語を用いて評価した検証した (表 3)。time は変化点を検出した時間、ERC は変化点における避難率、ERF は最終的な避難率を表している。Scenario 1-000、2-001、3-001、4-001(表 3 の*) は、図 4 で選択したシナリオを示している。

4.2.1 考察 1

図 4 にあげた 4 つのシナリオ間の比較から、以下のことが言える。

- (1) 自動検出された変化点で、5~6 割の避難者が避難している。
- (2) 4 つのシナリオとも 30step 付近に変化点があることがわかった。

4.2.2 考察 2

表 3 より、61 通りのシミュレーション結果を検証した結果から次のことが言える。

- (1) 避難放送を聞ける割合が低下すると、変化点も相対的に小さくなる。
- (2) 2-16、3-17、3-20 において、変化点の変化が避難率に影響していない。
- (3) Broadcast Rate と Type 間影響では特に大きな変化がない。

変化点が特に小さい* -016 ~ 020 のうち、最小であった 2-016 に注目したところ、避難率推移の性質が明らかに 3 回変化していることが分かった (図 5)。複数の変化点があることに留意すること、変化点の検出以外に別の方法を考えることについて、課題が残った。

5. まとめ

災害時に、避難者が安全かつ迅速に避難できる効率の良い避難誘導が必要である。都市や駅等の人が多く密集する地域では、実際の場所で避難訓練を行うことはできない。避難訓練の代替品として、避難シミュレーションを行い、避難者の避難時行動が変動する原因が判明すれば避難率を高めることができる。

本論文では、複数の避難シナリオを想定した避難シミュレーション実験を行い、避難結果を統計的に検証する手法を提示し、誘導内容や避難者心理が避難率に与える影響を分析する手

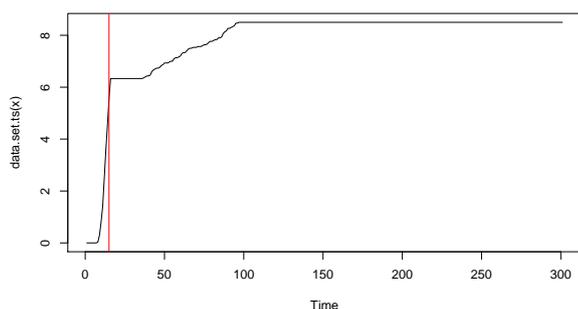


図 5: Scenario 2-016 の避難率推移

法を検討した。今後は、避難率推移結果から、複数の要因を検出する方法について検討する。

参考文献

- [1] N. Wagner, V. Agrawal.: An agent-based simulation system for concert venue crowd evacuation modeling in the presence of a fire disaster, Expert Systems with Applications 41, 2807-2815 (2014).
- [2] A. R. Larusdottir, A. S. Dederichs.: Evacuation Dynamics of Children - Walking Speeds, Flows Through Doors in Daycare Centers, Pedestrian and Evacuation Dynamics, pp. 139-147 (2011)
- [3] 山下倫央, 野田五十樹.: 避難シミュレーションの実社会への応用, 情報処理, 572-578, No.6 (2014).
- [4] E. D. Kuligowsk, R. D. Peacock.: Review of Building Evacuation Models, NIST Technical Notes 1471 (2005).
- [5] 邑本俊亮.: 避難と情報, 電子情報通信学会誌, 894-898, No.10 (2012).
- [6] 岡谷賢, 高橋友一.: 避難誘導避難シミュレーションにおける情報伝達モデル, 電気学会論文誌. C, 電子・情報・システム部門誌, 134(2), 252-257, (2014).
- [7] Jason D. Averill, Dennis S. Mileti, Richard D. Peacock, Erica D. Kuligowski, Norman Groner, Guylene Proulx, Paul A. Reneke, Harold E. Nelson.: Federal Building and Fire Safety Investigation of the World Trade Center Disaster, NIST NCSTAR 1-7, (2005).
- [8] 内閣府.: 東北地方太平洋沖地震を教訓とした地震・津波対策に関する専門調査会 (2011).
- [9] Rebecca Killick, Idris A. Eclely.: change point: An R Package for Changepoint Analysis, Journal of Statistical Software, Volume 58, Issue 3 (2014).

表 3: 避難率推移を検証した結果

Scenario	time	ERC(%)	ERF(%)
1-000*	17	46.1	78.5
2-001*	40	53.0	82.0
3-001*	21	56.2	87.6
4-001*	30	59.2	88.4
2-002	43	50.1	78.4
2-003	48	49.8	72.7
2-004	49	50.4	78.8
2-005	22	48.8	75.1
2-006	47	39.9	60.7
2-007	44	39.1	59.9
2-008	43	40.8	58.3
2-009	43	38.3	55.8
2-010	41	42.3	58.4
2-011	40	25.7	35.7
2-012	49	24.3	34.2
2-013	41	24.2	33.2
2-014	49	23.4	32.7
2-015	37	24.2	32.1
2-016	15	5.6	8.5
2-017	52	6.3	8.8
2-018	44	5.9	8.4
2-019	52	5.7	8.2
2-020	39	5.9	7.7
3-002	40	61.2	88.6
3-003	40	59.0	84.2
3-004	45	57.0	83.8
3-005	21	56.1	84.1
3-006	19	40.3	59.5
3-007	44	42.1	60.6
3-008	19	39.1	58.8
3-009	46	39.5	57.6
3-010	18	36.7	57.9
3-011	18	24.6	35.6
3-012	44	24.4	34.6
3-013	43	24.4	34.0
3-014	47	24.4	35.8
3-015	18	23.6	33.1
3-016	17	6.1	8.7
3-017	49	5.8	8.4
3-018	40	6.0	8.6
3-019	43	6.0	8.4
3-020	17	5.8	8.1
4-002	40	60.7	88.9
4-003	30	56.0	83.5
4-004	42	56.6	83.3
4-005	30	61.0	84.9
4-006	30	44.1	63.4
4-007	42	41.8	60.2
4-008	30	40.7	58.9
4-009	45	42.2	61.1
4-010	29	39.0	58.4
4-011	29	24.8	37.0
4-012	41	23.2	32.7
4-013	41	23.5	33.3
4-014	43	23.7	34.1
4-015	29	22.8	33.8
4-016	38	7.1	9.6
4-017	45	5.8	8.6
4-018	40	6.3	8.6
4-019	38	5.7	8.1
4-020	29	6.0	8.6