

ロボットを用いた効果的な屋内避難誘導 — 被験者実験とエージェントモデルシミュレーション —

Effective Indoor Evacuation Guidance Using a Robot:
Human Subjects Experiments and Agent Model Simulation

小檜山 雅之¹, 金子 みなみ²

Masayuki KOHIYAMA¹ and Minami KANEKO²

¹慶應義塾大学工学部システムデザイン工学科

Department of System Design Engineering, Faculty of Science and Technology, Keio University

²慶應義塾大学大学院理工学研究科開放環境科学専攻 (現, アズビル(株))

Graduate School of Science and Technology, Keio University (Currently, Azbil Corporation)

Evacuation assistance using a robot is studied. Human subjects experiments of indoor evacuation under robot guidance were conducted and the result showed effectiveness of a robot guidance in the evacuation. Based on the experiment result an agent model for evacuation simulation was conducted. The agent model considers probability distributions of the walking speed and the route decision time of evacuees. Using the constructed agent model, evacuation simulation was carried out for a building with complex hallways. It is demonstrated that effective position of a robot for guidance can be sought through the agent simulation.

Keywords: indoor evacuation, evacuation guidance, robot, evacuation simulation, agent model

1. はじめに

建物内で災害が発生した際の避難誘導は重要であり、特に不特定多数の人が利用する建物では円滑に行われる必要がある。岡田ら¹⁾は、特に地震時の家具転倒による室内負傷を低減するため、赤外線カメラで撮影した画像によりリアルタイムで音声誘導するシステムを開発している。山本・佐野²⁾は平常・非常照明下での音声誘導と点滅機能のある誘導灯の避難誘導の効果を実験により検討している。瀧本ら³⁾は天井設置センサーと無線LANを用い、自律分散協調的に光や音による誘導を行う避難誘導システムを提案している。このほか避難誘導に関し、ナビゲーションシステム⁴⁾、携帯端末⁵⁾、経路指示パネル⁶⁾を用いた誘導や、群衆の避難誘導の人員配置最適化⁷⁾など多くの研究が行われている。しかし、現在、避難誘導は、建物管理者、消防士や警察官などが、放送システムや拡声器を用い、専ら音声により行っている。

一方、掃除用ロボットなど、建物にロボットを導入する事例が増えてきている。ロボットを導入し、建物の健全性や災害時の状況を把握したり、建物利用者の行動情報を取得したりし、建築空間を制御する仕組みを構築する研究が三田⁸⁾らの研究グループにより行われている。このような研究によって、災害時の建物情報の取得、適切な避難経路の選択、在館者の円滑な誘導といった一連の作業をロボットに支援させることが提案されている⁹⁾。

そこで、本研究では、災害時の避難誘導をロボットにより効果的に行う方法を明らかにするため、まず被験者による避難実験^{10), 11)}の結果から、ロボットによる避難誘導の有効性を検証する。次に、実験結果に基づき、避難シミュレーションによる誘導方法の検討を行う。避難シミュレーションにはセルオートマトンを用いた研究^{12), 13)}やマルチエージェントモデルを用いた研究^{14), 15)}がある。本研究では、避難者の特性を反映しやすいエージェントモデルを用いシミュレーションを行う。まず実験結果より設定したエージェントモデルを用い、避難実験の再現シミュレーションを行い、さらなるモデルパラメータの同定を行う。そして、構築したエージェントモデルを用い複雑な廊下を有するホテルの避難シミュレーションを行い、ロボットによる効果的な避難誘導方法について検討を行う。

2. 避難実験の概要

文献10)ならびに11)では、ロボットによる避難誘導がある場合の大学校舎における被験者避難実験を報告している(表1)。以下、実験概要について説明する。なお、被験者は建物利用経験のある若年層に偏っており、高齢者や建物をよく知らない来訪者のデータの収集は今後の課題といえる。

表 1 避難実験の概要

実験	建物平面	被験者数
文献10)	直線廊下 (図1)	男性40人, 女性19人 合計59人 (年齢20~25歳)
文献11)	ロの字型廊下 (図4)	男性60人, 女性19人 合計79人 (年齢18~26歳)

ロボットに関しては、文献8)のe-bio (移動速度1.0 m/s) にノートPCを載せた台車を連結し (写真1), LEDによる矢印あるいは×印の表示や音声再生による誘導が可能である。写真1に示すように、矢印あるいは×印の表示面は2方向から見えるよう2面を切妻屋根形に配置しており、1面の大きさは220 mm×175 mmである。また、ロボットに搭載したスピーカーの出力は2 W×2 (0.5 m 地点のピーク音量: 85 dB) である。

(1) 直線廊下を有する大学校舎における実験

本実験は、2011年12月6~9日の4日間、慶應義塾大学矢上キャンパス創想館6階を用いて行った。図1に避難実験で用いた建物の平面図を示す。被験者は男性40人、女性19人の合計59人の学生 (年齢: 20~25歳) である。

この実験では、災害発生によって、避難に用いることになっている2方向の階段 (図1の東階段と西階段) のうち1つが使用できなくなったことを想定している。2つの避難開始室A、B (図1) から避難を行っており、避難開始室から階段までの最短距離を表2に示すとおりである。

実験時には階段番号を表す看板を被験者から見やすい位置 (図1の★付近) に設置し、階段を「1番の階段」、「2番の階段」といった番号で呼称し避難誘導を行った。これは、「東階段」や「西階段」といった呼称を用いた場合、被験者の日常における階段の利用頻度や、実験の慣れにより、避難時間が短くなることも考えられ、それを避けるためである。階段番号は実験ケースごとにランダムに変化させ、被験者は常に階段番号を看板で確認しないとわからない状態とした。



写真1 避難実験で用いたロボット

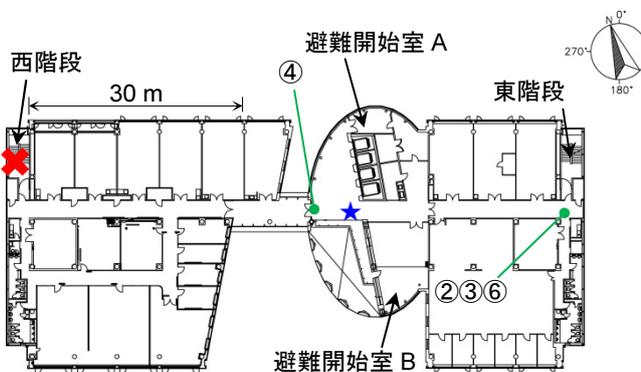


図1 直線廊下の避難実験における建物平面図ならびにロボットの初期位置 (★) と東側階段に避難する場合のロボットの移動目標位置 (●)

被験者には事前のガイダンスで以下を周知した。

- ・災害発生によって2方向の階段のうち1つが使用できなくなったことを想定して避難実験を行う。
- ・避難を開始する部屋は2部屋を設定している。
- ・階段は番号で区別するようになっており、実験ごとにランダムに変化する。
- ・階段番号は看板で確認することができる。
- ・避難は走らず、できるだけ速やかに行う。

実験手順は次のとおりである。避難開始室Aの隣に位置する部屋で待機している被験者を避難開始室へ案内し、合図とともに避難を開始する。そこから、避難誘導を頼りに避難すべき階段まで避難する。避難開始から避難すべき階段到達までの時間を記録し、ここまでする1回の実験ケースとする。実験では、使用する2か所の廊下にてビデオを設置し、被験者の避難の様子を撮影した。実験ケースごとに避難誘導方法や同時に避難する人数を変化させ、実験データの収集を行った。

本実験では、避難誘導方法を表3に示す7通り、同時に避難する人数を表4に示す4通り設定した。また、各組合せの実験ケース数を表5 (計89ケース) に示す。

本実験で使用するロボットは、遠隔操作により移動させることができる。図1に各避難誘導方法におけるロボットの移動目標位置を示す。ロボットは、各実験ケースとも、実験開始前に★印の初期位置で待機している。実験開始の合図とともに各避難誘導方法の目標位置に移動しはじめる。

避難誘導の館内放送は、いずれの誘導方法においても、常に流れている。館内放送の内容は「1番 (または、2番) の方向で火災が発生しました。速やかに避難してください」である。なお、対照実験のため、館内放送のみの実験も行う。同時に避難する人数がⅢ、Ⅳの場合、避難開始室をAとBのいずれにするかは、ランダムに設定した。

本実験では、同じ被験者に何度か実験を行ってもらった。そこで、初めて実験を行う人のみ、初めての人と2回目以降の人、2回目以降の人をみの避難において有意な差があるか検討した。その結果、実験を経験したことによる有意な差は確認されなかった。そこで、以下では経験による差はないものとして検討を行う。

表 2 直線廊下の避難実験における避難開始室から各階段までの最短距離

避難開始室	東階段	西階段
A 室	42.8 m	52.2 m
B 室	39.8 m	53.8 m

表 3 直線廊下の避難実験における避難誘導方法

番号	避難誘導の方法
①	「館内放送」のみ (放送内容は本文を参照)
②	「館内放送」+「ロボットが避難方向に移動しながら火災報知機の音 (以下、警告音) を発生」
③	「館内放送」+「ロボットが避難方向に移動しながら『こちらの階段に避難してください』と音声誘導」
④	「館内放送」+「ロボットが避難方向と反対に移動しながら『反対側の階段に避難してください』と音声誘導」
⑤	「館内放送」+「ロボットがエレベータホールにて避難方向への矢印を点灯」
⑥	「館内放送」+「ロボットが避難方向に移動しながら避難方向への矢印を点灯」+「ロボットが『こちらの階段に避難してください』と音声誘導」
⑦	「館内放送」+「ロボットがエレベータホールにて避難方向への矢印を点灯」+「ロボットが『矢印の方向の階段へ避難してください』と音声誘導」

表4 直線廊下の避難実験における同時に避難する人数

番号	同時に避難する人数
I	避難開始室AとBから各2人ずつの合計4人
II	避難開始室AとBから各1人ずつの合計2人
III	避難開始室AとBのいずれかから2人
IV	避難開始室AとBのいずれかから1人

表5 直線廊下の避難実験における誘導方法と避難人数の各組合せの実験ケース数

	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦
I	4	4	3	4	4	3	3
II	3	3	3	3	3	3	3
III	4	3	3	3	3	3	3
IV	4	3	3	3	3	3	3

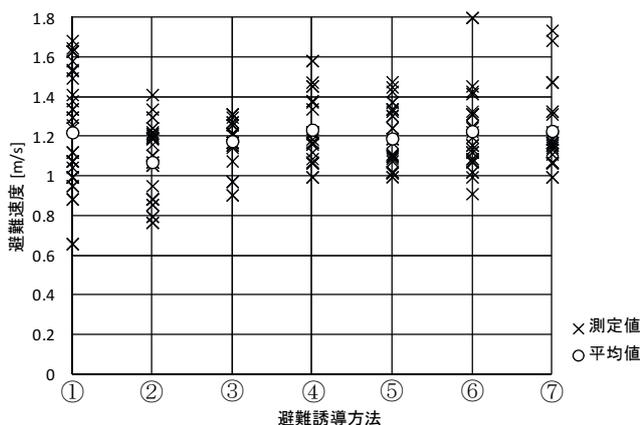


図2 避難誘導方法と避難速度の関係

表6 避難速度の平均値と標準偏差 (単位: m/s)

誘導方法	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦
被験者数	34	31	27	25	31	27	27
平均値	1.22	1.07	1.18	1.23	1.19	1.23	1.23
標準偏差	0.288	0.188	0.117	0.174	0.153	0.215	0.193

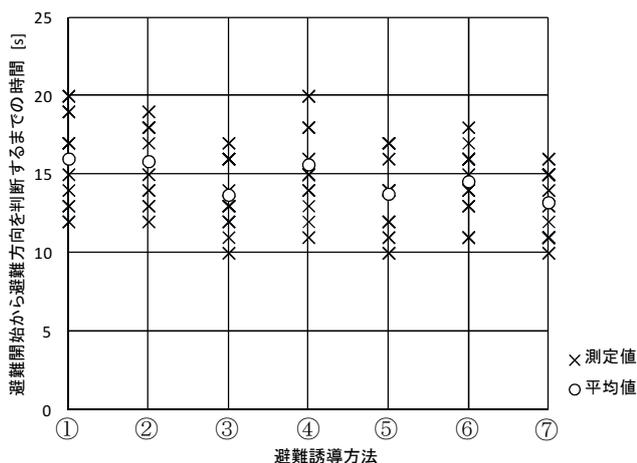


図3 避難誘導方法と判断時間の関係

表7 判断時間の平均値と標準偏差 (単位: s)

誘導方法	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦
被験者数	30	19	23	31	27	27	29
平均値	17	16	14	18	14	15	14
標準偏差	4.0	3.5	2.2	7.7	3.1	2.1	2.5

各避難者の避難最短距離を避難時間で割ったものを避難速度と定義する。実験の結果、得られた避難誘導方法と避難速度の関係を図2に、避難速度の平均値と標準偏差を表6に示す。

また、避難開始の合図から避難者が避難方向を判断しその方向に進みはじめるまでの時間を判断時間と定義し、録画したビデオより計測する。実験の結果、計測できた判断時間を図3に、その平均値と標準偏差を表7に示す。ここで、避難速度と判断時間が計測できたかどうかは被験者によって異なる。そのため、同じ誘導方法でも表6と表7で被験者数は異なっている。

(2) ロの字型廊下を有する大学校舎における実験

実験は、2012年9月3～7日の5日間、慶應義塾大学日吉キャンパス第4校舎独立館4階を用いて行った。図4に避難実験で用いた建物の平面図を示す。被験者は男性60人、女性19人の合計77人の学生（年齢：18～26歳）である。この実験でも、災害発生によって、避難に用いることになっている2方向の階段（図4の外階段と×印そばの内階段）のうち1つが使用できなくなったことを想定している。2つの避難開始室C、D（図4）から避難を行っており、避難開始室から階段までの最短距離は表8に示すとおりである。

本実験では、避難を開始してロボットが見えない状態で音声誘導をする場合とロボットが見える場合とでどのような差があるかを検証するため、実験場所をロの字型廊下を有する大学校舎とした。また、避難誘導方法については、ロボットが避難方向に移動しながら音声誘導を行う方法と、ロボットが避難方向への矢印を点灯し音声誘導を行う方法を中心に計画した。今回の実験では、新たに×印表示を作成し、避難できない階段のそばで反対方向への避難を促す方法も検討した。さらに、実際の災害では避難に使用できない階段を煙などにより判断できる可能性があるため、使用できないと設定した階段の前に炎の看板を設置し、状況を模擬した。

被験者には事前のガイダンスで以下を周知した。

- ・災害発生によって2方向の階段のうち1つが使用できなくなったことを想定して避難実験を行う。
- ・避難を開始する部屋は2部屋を設定している。
- ・炎の看板が設置してある通路は通ることができない。
- ・避難は走らず、できるだけ速やかに行う。

本実験では、避難誘導方法を表9に示す6通り、同時に避難する人数を表10に示す2通り設定した。また、各組合せの実験ケース数を表11（計123ケース）に示す。誘導方法V、VIでは、実験開始の合図とともにロボットを避難方向に移動させた。

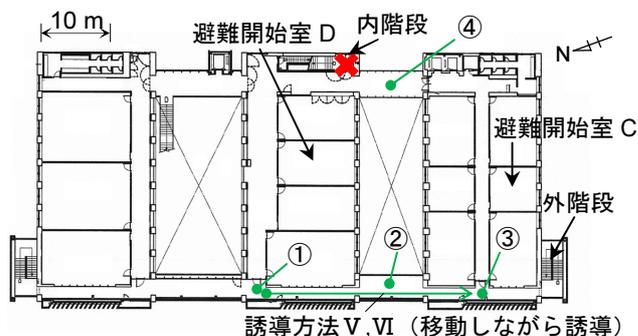


図4 ロの字型廊下の避難実験における建物平面図と外階段に避難する場合のロボットの位置

表 8 口の字型廊下の避難実験における避難開始室から各階段までの最短距離

避難開始室	内階段	外階段
C室	31.1 m	25.9 m
D室	27.6 m	56.9 m

表 9 口の字型廊下の避難実験における避難誘導方法 (ローマ数字: 誘導方法番号)

番号	避難誘導の方法 (アラビア数字: 避難者種別)
I	「ロボットが①の場所にて避難方向への矢印を点灯」 + 「ロボットが『矢印の方向の階段へ避難してください』と音声誘導」 (1: C室から避難開始, 2: D室から避難開始)
II	「ロボットが②の場所にて避難方向への矢印を点灯」 + 「ロボットが『矢印の方向の階段へ避難してください』と音声誘導」 (3: C室から避難開始, 4: D室から避難開始)
III	「ロボットが③の場所にて避難方向への矢印を点灯」 + 「ロボットが『矢印の方向の階段へ避難してください』と音声誘導」 (5: C室から避難開始, 6: D室から避難開始)
IV	「ロボットが④の場所にて避難方向への×印を点灯」 + 「ロボットが『反対側の階段に避難してください』と音声誘導」 (7)
V	「ロボットが避難方向に移動しながら『こちらの階段に避難してください』と音声誘導」 (8: ロボットが見える教室から避難開始, 9: ロボットが見えない教室から避難開始)
VI	「ロボットが矢印を点灯」 + 「ロボットが避難方向に移動しながら『こちらの階段に避難してください』と音声誘導」 (10: ロボットが見える教室から避難開始, 11: ロボットが見えない教室から避難開始)

表 10 口の字型廊下の避難実験における同時に避難する人数

番号	同時に避難する人数
i	避難開始室 C, D から各 2 人ずつの合計 4 人
ii	避難開始室 C, D から各 1 人ずつの合計 2 人

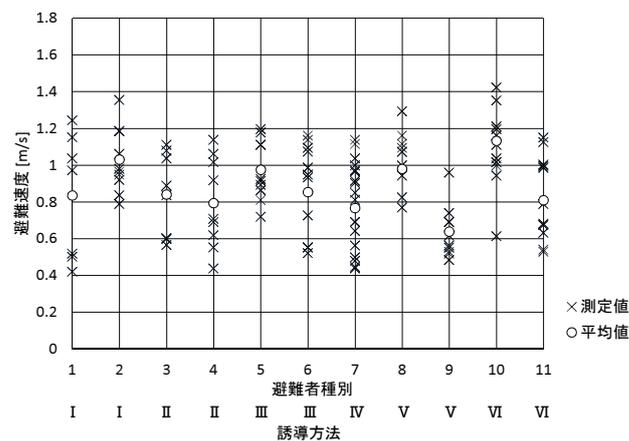
表 11 口の字型廊下の避難実験における誘導方法と避難人数の各組合せの実験ケース数

	I	II	III	IV	V	VI
i	10	9	10	10	13	11
ii	11	12	9	8	10	10

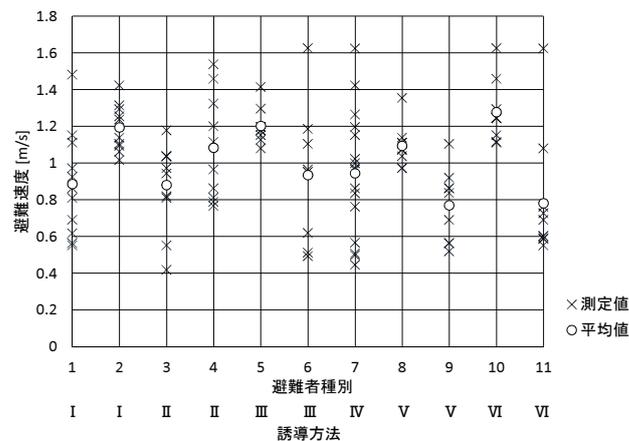
実験の結果得られた避難誘導方法と避難速度の関係を図5に、避難速度の平均値と標準偏差を表12に示す。また、避難誘導方法と判断時間の関係を図6に、判断時間の平均値と標準偏差を表13に示す。

3. ロボットによる避難誘導の有効性の検証

まず直線廊下の実験結果について、館内放送のみの誘導方法①の場合と館内放送に加えてロボットの避難誘導がある場合 (誘導方法②~⑦) でどのような差があるかを比較する。誘導方法②では、ロボットが発する警告音が館内放送の聞き取りの妨げとなり避難時間がかかるケースが複数あった。また、ロボットの音声誘導がない誘導方法⑤では表6の避難速度の平均値が小さく、効果が見られない。そこで音声誘導がある誘導方法③, ④, ⑥, ⑦のデータをまとめ避難速度の平均値と標準偏差を計算し、誘導方法①と比較したものを表14に示す。標準偏差



(a) 各教室から 2 人ずつの合計 4 人で避難した場合



(b) 各教室から 1 人ずつの合計 2 人で避難した場合

図 5 避難誘導方法と避難速度の関係

表 12 避難速度の平均値と標準偏差 (単位: m/s)

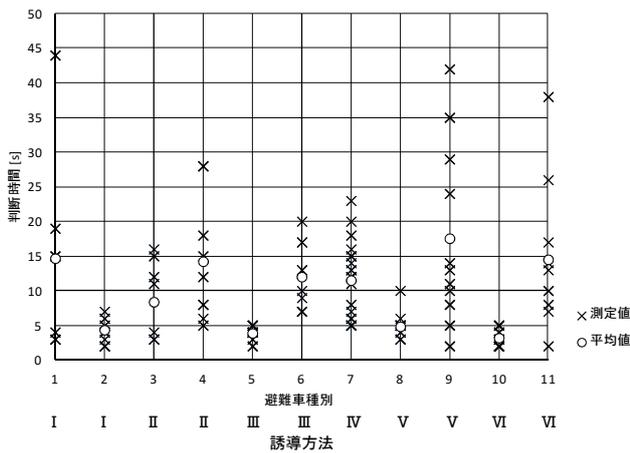
(a) 各教室から 2 人ずつの合計 4 人で避難した場合

誘導方法	I		II		III	
避難者種別	1	2	3	4	5	6
被験者数	16	18	16	18	20	20
平均値	0.831	1.03	0.840	0.793	0.975	0.854
標準偏差	0.340	0.178	0.220	0.240	0.158	0.237
誘導方法	IV		V		VI	
避難者種別	7	8	9	10	11	
被験者数	34	18	18	22	20	
平均値	0.766	0.979	0.638	1.13	0.809	
標準偏差	0.223	0.187	0.140	0.150	0.231	

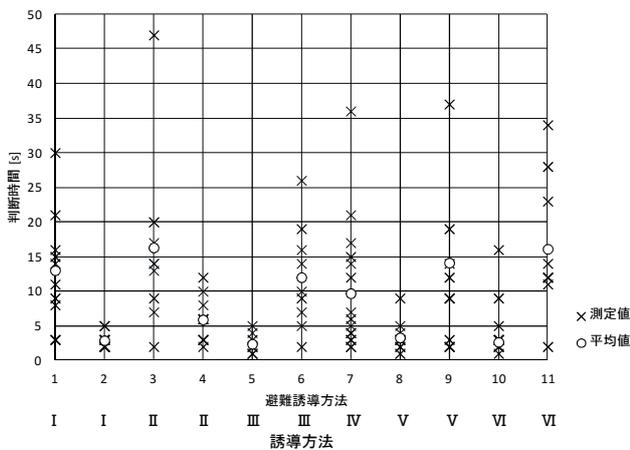
(b) 各教室から 1 人ずつの合計 2 人で避難した場合

誘導方法	I		II		III	
避難者種別	1	2	3	4	5	6
被験者数	11	10	10	10	9	9
平均値	0.885	1.19	0.880	1.08	1.20	0.934
標準偏差	0.286	0.130	0.237	0.287	0.0989	0.361
誘導方法	IV		V		VI	
避難者種別	7	8	9	10	11	
被験者数	16	9	9	9	10	
平均値	0.943	1.09	0.769	1.28	0.781	
標準偏差	0.341	0.114	0.197	0.169	0.334	

は統計的に有意に小さいものの、平均値にはほとんど差がない。同様に、判断時間について比較をしたものを表15に示す。平均値に有意な差があるか、統計的検定により分析を行ったところ、F検定により等分散とみなせた



(a) 各教室から2人ずつの合計4人で避難した場合



(b) 各教室から1人ずつの合計2人で避難した場合

図6 避難誘導方法と判断時間の関係

表13 判断時間の平均値と標準偏差 (単位: s)

(a) 各教室から2人ずつの合計4人で避難した場合

誘導方法	I		II		III	
避難者種別	1	2	3	4	5	6
被験者数	12	18	16	18	16	20
平均値	15	4.3	8.4	14	3.9	12
標準偏差	15	1.7	5.5	8.6	1.0	4.6
誘導方法	IV		V		VI	
避難者種別	7	8	9	10	11	
被験者数	40	22	22	22	20	
平均値	12	4.8	18	3.2	15	
標準偏差	5.3	1.9	13	1.1	10	

(b) 各教室から1人ずつの合計2人で避難した場合

誘導方法	I		II		III	
避難者種別	1	2	3	4	5	6
被験者数	10	10	10	10	8	9
平均値	13	2.9	16	5.9	2.4	12
標準偏差	8.2	1.2	12	3.3	1.5	7.5
誘導方法	IV		V		VI	
避難者種別	7	8	9	10	11	
被験者数	16	10	9	9	10	
平均値	9.7	3.3	14	2.7	16	
標準偏差	9.2	2.4	10	1.1	9.6	

め、t検定を行った。その結果、有意水準 $p < 0.05$ で判断時間の平均に有意な差があることが確認された。したが

表14 館内放送のみの場合とロボットの音声誘導もある場合の避難速度の比較

避難誘導方法		館内放送のみ	館内放送+ロボット
被験者データ	誘導方法番号	①	③, ④, ⑥, ⑦
	被験者数	34人	106人
平均値		1.22 m/s	1.22 m/s
標準偏差		0.288 m/s	0.178 m/s

表15 館内放送のみの場合とロボットの音声誘導もある場合の判断時間の比較

避難誘導方法		館内放送のみ	館内放送+ロボット
被験者データ	誘導方法番号	①	③, ④, ⑥, ⑦
	被験者数	30人	110人
平均値		17 s	15 s
標準偏差		4.0 s	4.9 s

表16 ロボットが見える場合と見えない場合の避難速度の比較

ロボット		見える	見えない
被験者データ	直線廊下の実験における避難誘導方法	③, ⑥	
	ロの字型廊下の実験における被験者種別	8, 10	9, 11
	被験者数	110人	57人
平均値		1.14 m/s	0.744 m/s
標準偏差		0.165 m/s	0.230 m/s

って、ロボットが音声を用い避難誘導すると、判断時間の短縮に寄与するといえる。

次に、2つの実験を通してロボットが避難者から見えている場合と見えていない場合でどのような差があるかを検討する。避難速度の平均値と標準偏差を表16に示す。なお、ロボットが避難者から見えている場合としては、直線廊下を有する大学校舎における実験の避難誘導方法③と⑥、ロの字型廊下を有する大学校舎における実験の被験者種別8と10を用い、ロボットが避難者から見えていない場合としては、ロの字型廊下を有する大学校舎における実験の被験者種別9と11を用いた。平均値に有意な差があるか、統計的検定により分析を行った。F検定により等分散とみなせたため、t検定を行ったところ、避難速度に有意な差が確認された(有意水準 $p < 0.01$)。したがって、ロボットが避難誘導する際には、ロボットが避難者から見えることが重要であるといえる。

4. 避難エージェントモデルの構築

2つの実験結果の統計データに基づき、ロボットが存在する場合の避難シミュレーションに用いることができる、避難者のエージェントモデルの構築を行う。

(1) 歩行速度

実験データより歩行速度 v_w を以下の式で求める。

$$v_w = \frac{T_c - T_j}{x} \quad [1]$$

ここで、 T_c : 避難開始の合図から避難すべき階段に到着するまでの時間(以下、避難時間)、 T_j : 避難開始の合図から避難者が避難方向を判断しその方向に進みはじめるまでの時間(以下、判断時間、録画したビデオより計測)、 x : 避難開始室から各階段までの最短距離である。

2つの実験の歩行速度のデータから、対数平均 0.155, 対数標準偏差 0.295 の対数正規分布がよく合致することがわかった。歩行速度の実験値と確率モデル（確率密度関数）を図7に示す。

(2) 判断時間

判断時間 T_j については、実験データより、ロボットによる誘導方法ごとに表17のようにモデルを定義する。

(3) 決断時間

ロボットなどによる誘導がなく、避難すべき方向がわからない場合に、どちらに向かって進むかを決めて進むまでの時間を決断時間 T_d と定義する。決断時間は実験を撮影したビデオから計測している。

決断時間は実験データから対数平均 1.54, 対数標準偏差 0.569 の対数正規分布によく従うことがわかった。決断時間の実験値と確率モデルを図8に示す。

5. 避難実験の再現解析によるパラメータ同定

4章で構築したエージェントモデルを用い、文献10)のロの字型廊下の避難実験を再現するシミュレーションを行う。シミュレーションにより、進むべき方向がわからない場合に右に進む確率 P_r と、ロボットとゴールが見えた場合にロボットに近づく確率 P_R の2つのモデルパラメータの同定を行う。

(1) 建物平面のノード・リンクモデル

文献10)のロの字型廊下を有する建物における避難実験を再現するため、図4の建物平面図を図9のようなノードとリンクでモデル化する。それぞれのリンクの距離を表18に示す。

避難エージェントの避難開始位置はノード1または2、ゴール位置はノード9または10とする。ロボットの位置については避難誘導方法に応じてノード3, 4, 5, 6, 7または8とする。

(2) 避難シミュレーションの手順

以下の手順で避難シミュレーションを行う。

- ① 初期設定として、ノードとリンクの接続情報、リンクの距離、避難誘導方法、避難階段（ゴール）、エージェント情報（避難開始位置、歩行速度 v_w 、判断時間 T_j 、決断時間 T_d 、進むべき方向がわからない場合に右に進む確率 P_r 、ロボットとゴールが見えた場合にロボットに近づく確率 P_R) を与える。
- ② ノード上において、そのノードにロボットがいる場合、判断時間 T_j 間そのノードにとどまり、そのあとロボットが示す方向に進む。隣接するノードにロボットがいる場合は、ロボットのいるノードへ向かってリンク上を進み、進むべき方向を確定する。しかし、隣接するノードにロボットがいて、また他の隣接するノードが避難階段の場合、ロボットとゴールが見えた場合にロボットに近づく確率 P_R に従って、ロボットに近づくかを決定する。進むべき方向が確定している場合は、その方向のノードへ向かってリンク上を進む。隣接するノードにロボットがおらず進むべき方向も確定していない場合、進むべき方向がわからない場合に右に進む確率 P_r に従って、右または左に進む。
- ③ リンク上にいる場合、リンクの距離を歩行速度で割ったものを整数に丸め、その時間をかけて次のノードへ

表17 判断時間のモデル

誘導方法	判断時間
「ロボットが停止して避難方向への矢印を点灯」+「ロボットが『矢印の方向の階段へ避難してください』と音声誘導」	4 s
「ロボットが停止して避難方向への×印を点灯」+「ロボットが『反対側の階段に避難してください』と音声誘導」	7 s
「ロボットが避難方向に移動しながら『こちらの階段に避難してください』と音声誘導」	5 s
「ロボットが矢印を点灯」+「ロボットが避難方向に移動しながら『こちらの階段に避難してください』と音声誘導」	4 s

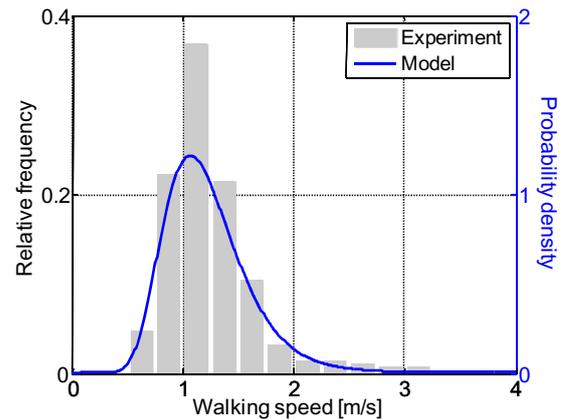


図7 歩行速度の実験値と確率モデル

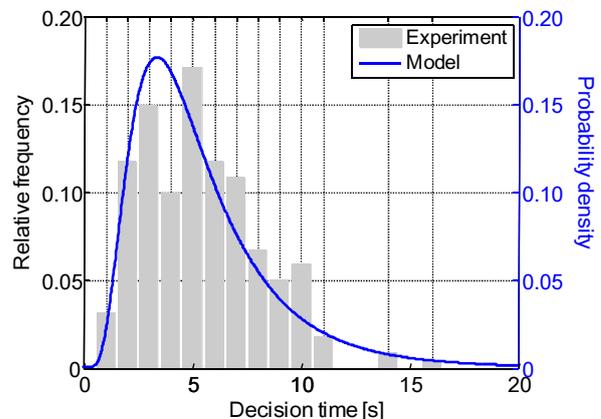


図8 決断時間の実験値と確率モデル

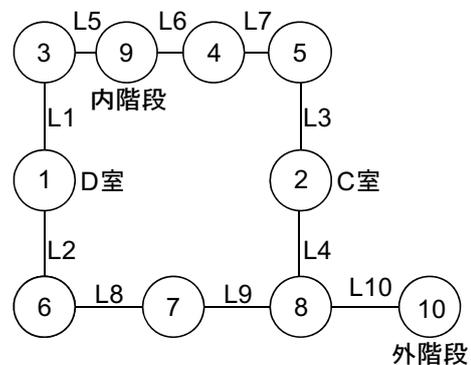


図9 ロの字型廊下の避難実験のノード・リンクモデル

向かう。

表 18 リンクの距離

リンク	L1	L2	L3	L4	L5
距離 [m]	15.6	15.6	12.1	19.0	13.8
リンク	L6	L7	L8	L9	L10
距離 [m]	6.9	13.8	20.7	13.8	8.7

④ ゴールのノードに到着するまで、②、③を繰り返す。
 ゴールのノードに到着したら解析を終了する。
 ここで、 v_w 、 T_j は確率モデルから、 T_d は避難誘導方法に基づくモデルから与える。また、 P_r と P_R は、次に述べる方法で最適値を探索する。

(3) モデルパラメータの同定

まず、パラメータの同定に用いる評価関数について述べる。実験における避難時間を T_{e_exp} 、シミュレーションにおける避難時間を T_{e_sim} とする。まず、二乗誤差 J_l を以下のように定義する。

$$J_l = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \{T_{e_exp}(k) - T_{e_sim}(k)\}^2 \quad [2]$$

ここで、実験とシミュレーションでは、避難者（避難エージェント）の数が異なるため、いずれも 10000 個になるようサンプルを調整し、 J_l の計算を行う。すなわち、 $N = 10000$ とする。また、実験では、避難開始室が 2 通り、避難階段が 2 通り、誘導方法が 6 通り設定されているため、それぞれの場合で二乗誤差 J_l を計算し、それらすべての和を評価関数 J とする。つまり、

$$J = \frac{1}{N_s} \sum_{s=1}^{N_s} J_l \quad [3]$$

とする。ここで、場合の数 $N_s = 24$ である。 J を最小化する最適化手法には Nelder-Mead Simplex 法を用いる。

初期値は進むべき方向がわからない場合に右に進む確率 $P_r = 0.5$ 、ロボットとゴールが見えた場合にロボットに近づく確率 $P_R = 0.5$ とする。上記の手法で最適化した結果、

$$\begin{cases} P_r = 69\% \\ P_R = 7.7\% \end{cases} \quad [4]$$

となった。この値を用い、シミュレーションを 1000 回試行した結果を図 10 に示す。赤色が実験結果、青色がシミュレーション結果である。また、それぞれの避難時間の平均値と標準偏差の関係をそれぞれ表 19 に示す。

シミュレーション結果と実験結果の平均値を比べると、24 ケース中 15 ケースで平均値の誤差が 20%以下となっており比較的良好に対応しているが、全般的に実験値より避難時間をやや過大評価する傾向がある。原因としては、ビデオから避難歩行にかかる時間と判断時間や決断時間を計測しているが、これらの時間に誤差が存在している可能性が考えられる。全体の避難時間の平均値が 40 s 程度であることを踏まえると、20%以上の誤差はかなり大きいといえるが、モデルの改良は今後の課題としたい。

また、避難開始室と避難階段ごとに図を比較すると、D 室から外階段へ避難する場合に誤差が大きくなっていることが確認できる。これは、歩行速度や決断時間を対数正規分布で与えていることで、歩行速度が著しく遅い場合や決断時間が著しく長い場合もあることが影響していると思われる。今後、確率分布を改良することでより避難シミュレーションの再現性を向上させることができると考えられる。さらに、D 室から外階段への避難が最も移動する距離が長いことも、実験とシミュレーション

で誤差を大きくする要因となっているといえる。

6. 複雑な廊下の避難シミュレーション

(1) 建物平面のノード・リンクモデル

4・5章で構築したエージェントモデルを用い、複雑な廊下を有する建物の避難シミュレーションを行う。ここで解析対象とする建物は実際に火災事故が発生したホテル¹⁰⁾の平面図を参考に作成した仮想的な建物である。作成した建物のノードとリンクのモデルを図11に示す。リンクの距離はいずれも15 mとする。

(2) 避難シミュレーションの解析条件

避難シミュレーションの解析条件について述べる。誘導方法は「ロボットが矢印を点灯」+「ロボットが避難方向に移動しながら『こちらの階段に避難してください』と音声誘導」に限定する。判断時間 T_j 、進む方向がわからない場合に右に進む確率 P_r 、ロボットとゴールが見えた場合にロボットに近づく確率 P_R は 4・5章でモデル化した値 ($T_j = 4$ s, $P_r = 69\%$, $P_R = 7.7\%$) を用いてシミュレーションを行う。建物のノード・リンクモデルの対称性を考え、表 20 に示す解析条件で、それぞれ条件ごとに 1000 回のシミュレーションを行う。

シミュレーションの手順は 5 章(2)に準ずるが、十字路口が存在するため、エージェントが進むノードの選択方法を以下のように拡張する。

- ① 進む方向が確定している場合は、その方向のノードへ向かってリンク上を進む。
- ② ノードにロボットがいる場合、ロボットを見つけてから進む方向を判断する時間（判断時間） T_j までそのノードにとどまり、そのあとロボットが示す方向に進む。
- ③ 隣接するノードにロボットがいる場合は、ロボットのいるノードへ向かってリンク上を進む。
- ④ 隣接するノードにロボットがおり、また他の隣接するノードが避難階段の場合、ロボットとゴールが見えた場合にロボットに近づく確率 P_R に従ってロボットに近づくかを決定する。
- ⑤ 進んできたノード以外の隣接するノードが 2 つで、なおかつそのノードにロボットがおらず進む方向も確定していない場合、進む方向がわからない場合に右に進む確率 P_r に従って右または左に進む。
- ⑥ 進んできたノード以外の隣接するノードが 3 つで、なおかつそのノードにロボットがおらず進む方向も確定していない場合、進む方向がわからない場合に直進する確率 P_s に従って直進、直進しない確率 $(1 - P_s)$ に右に進む確率 P_r をかけた確率に従って右に、直進しない確率 $(1 - P_s)$ に左に進む確率 $(1 - P_r)$ をかけた確率に従って左に進む。

(3) 結果と考察

ロボットの位置を各ケースで変化させ、それぞれ 1000 回ずつ行ったシミュレーションの結果を図 12~14 に示す。図 12~14 は直進する確率 P_s をそれぞれ 25%、50%、75%とした場合の避難時間の累積分布を表している。ここで、黒：ロボットなし、青：ロボットをノード 1 に設置、赤：ロボットをノード 2 に設置、緑：ロボットをノード 3 に設置した場合を示している。

これらの結果より、ノード 5 からノード 11 へ避難する、すなわち、避難開始位置と避難階段が近い場合は、避難時間の平均値と標準偏差がロボットをノード 1 に設置し

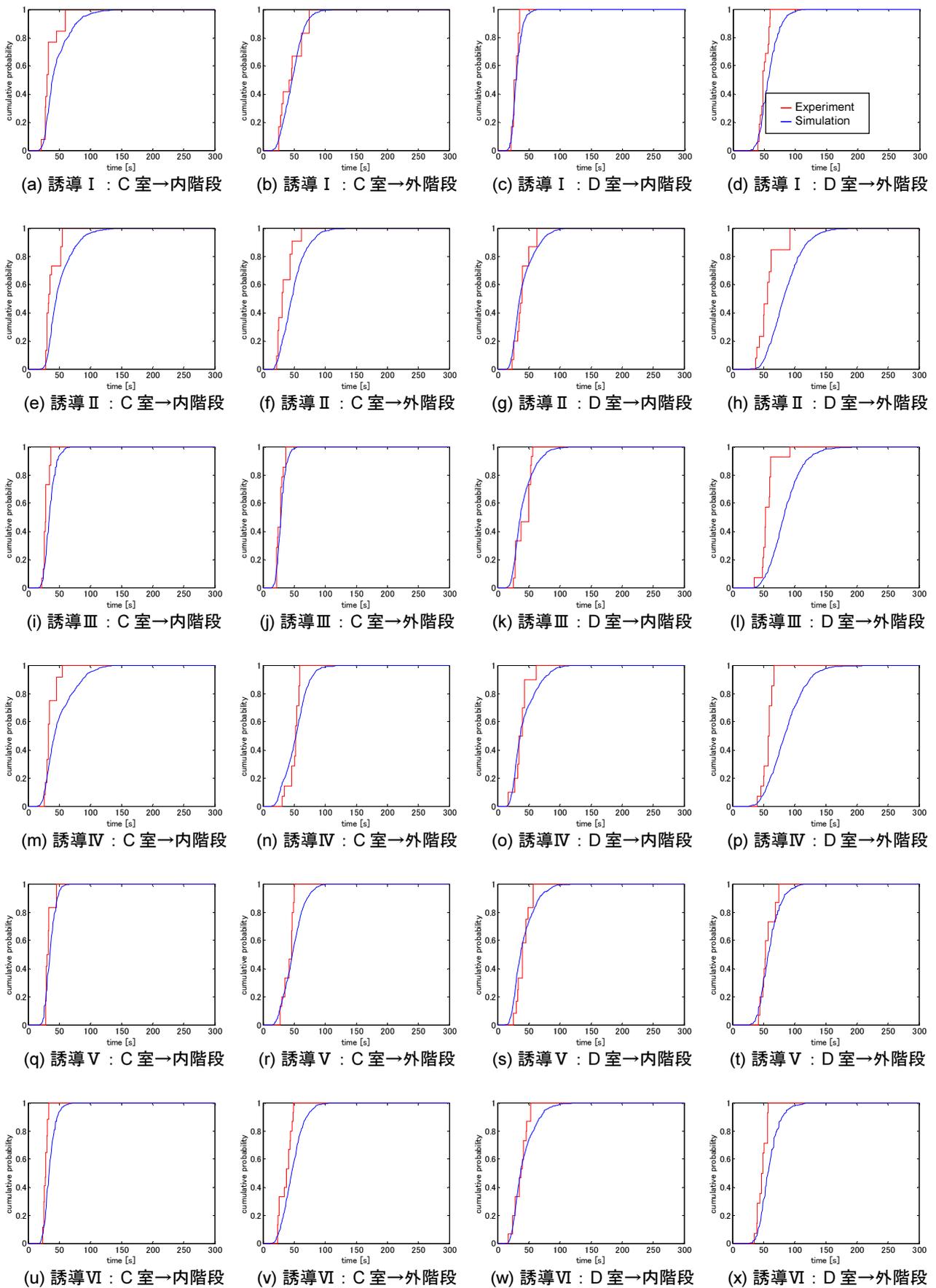


図 10 避難時間の累積分布に関する実験結果とシミュレーション結果の比較

表 19 避難時間の平均値と標準偏差の比較

誘導方法	避難開始室	避難階段	実験			シミュレーション	
			平均値 [s]	標準偏差 [s]	被験者数	平均値 [s]	標準偏差 [s]
I	C室	内	34.7	12.5	13	44.3	21.1
		外	45.6	18.5	12	45.8	16.3
	D室	内	28.5	4.9	12	30.4	8.3
		外	49.9	6.6	16	56.1	15.4
II	C室	内	37.5	10.4	15	49.3	20.4
		外	34.9	12.5	11	47.1	19.8
	D室	内	39.7	12.2	15	40.3	17.8
		外	57.6	17.2	13	81.7	26.6
III	C室	内	28.6	4.3	15	33.7	9.1
		外	27.4	5.0	14	28.9	7.3
	D室	内	42.1	11.6	15	40.1	16.8
		外	56.1	12.5	14	81.4	25.6
IV	C室	内	35.2	8.7	12	47.9	23.7
		外	50.4	8.7	14	50.6	18.5
	D室	内	37.2	11.8	10	41.6	19.4
		外	56.7	7.8	14	82.5	28.4
V	C室	内	32.8	6.0	12	34.3	8.3
		外	41.3	8.3	15	46.3	16.5
	D室	内	41.1	10.1	12	40.5	17.6
		外	55.9	10.7	15	57.5	16.2
VI	C室	内	27.8	3.2	17	33.4	9.1
		外	36.3	9.6	15	45.6	16.4
	D室	内	36.7	10.8	15	40.9	17.9
		外	47.6	7.2	14	56.9	15.8

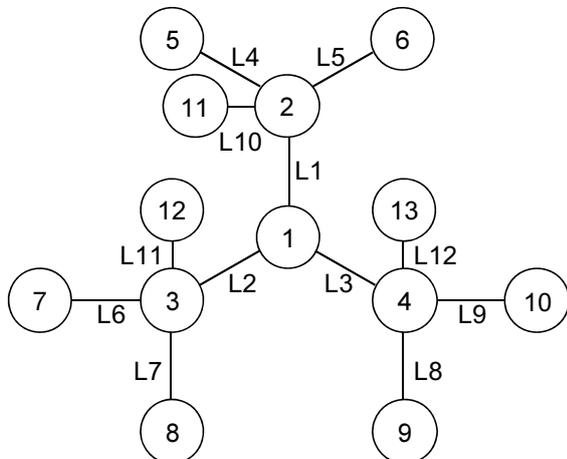


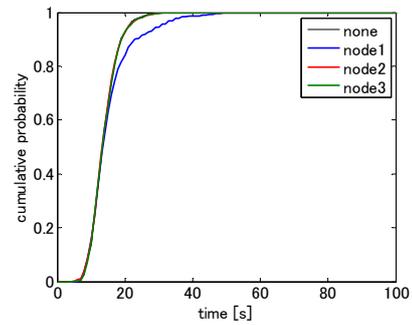
図 11 複雑な廊下を有する建物のノード・リンクモデル

表 20 解析条件

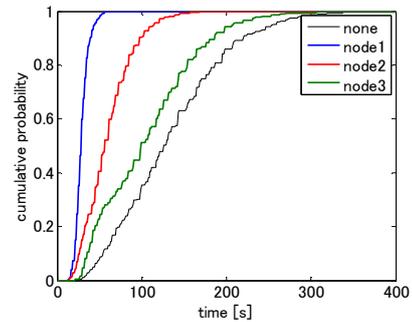
避難開始位置	ノード 5, 7 の 2 通り
避難階段の位置	ノード 11
ロボットの位置	ノード 1, 2, 3 とロボットなしの 4 通り

た場合を除いてほぼ一致している。ロボットをノード 1 に設置した場合は他の誘導方法より平均避難時間が 2 s 程度長くなった。これは、ロボットをノード 1 に設置した場合、ノード 2 から次に進むノードを選ぶ際に 7.7% の確率で避難階段のノード 11 ではなくロボットが位置するノード 1 を選択するためであると考えられる。

また、ノード 7 からノード 11 へ避難する、すなわち、避難開始場所と避難階段が遠い場合は、直進する確率 $P_s =$

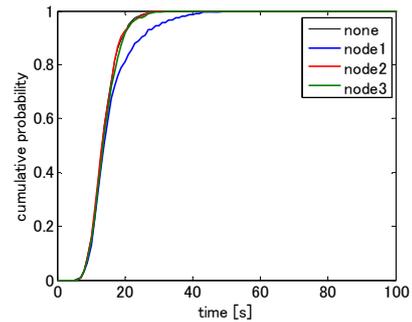


(a) ノード 5 から避難

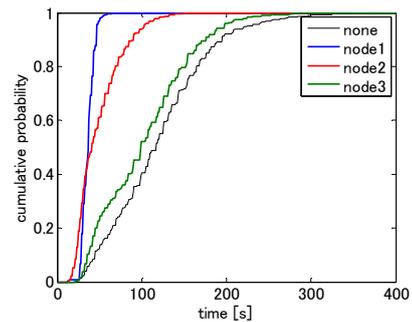


(b) ノード 7 から避難

図 12 避難時間の累積分布 ($P_s = 25\%$)



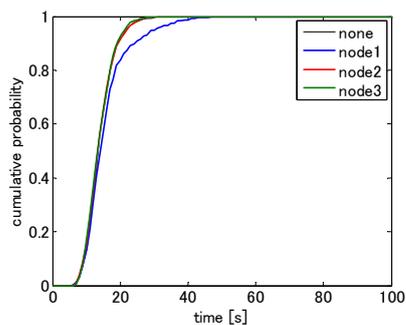
(a) ノード 5 から避難



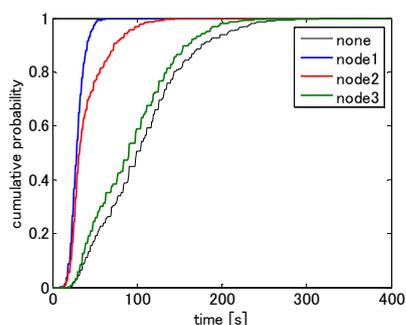
(b) ノード 7 から避難

図 13 避難時間の累積分布 ($P_s = 50\%$)

50% のときに避難時間の最大値が最も短くなる誘導方法はロボットをノード 1 に設置する方法で、平均避難時間が 32.9 s、避難時間が最も長い誘導方法はロボットがない場合で、平均避難時間が 111.7 s となった。ロボットがない場合はリンクの分岐点で間違っただけ進む可能性が高くなる。また、ロボットをノード 2 に設置した場合はノード 3 から次に進むノードを選ぶ際に間違っただけ進む可能性があり、ロボットをノード 3 に設置した場合はノード 1 から次に進むノードを選ぶ際に間違っただけ進む可能性があるため、避難時間がノード 1 に設



(a) ノード5から避難



(b) ノード7から避難

図 14 避難時間の累積分布 ($P_s = 75\%$)

置する場合よりも長くなり、標準偏差も大きくなったといえる。

本研究では、直進する確率 P_s が未知のため、25%、50%、75%と与えてシミュレーションを行ったが、いずれの場合もロボットをノード1に設置し誘導させる方法が避難時間が短くなった。これより、本研究の建物モデルの場合、ロボットをノード1に設置し誘導させる方法が最も効果的であると推察できる。

以上、4・5章で構築したエージェントモデルを用いた避難シミュレーションにより、ロボットの効果的な避難誘導位置が検討できることを示した。

7. まとめ

災害時の避難誘導をロボットにより効果的に行う方法を明らかにするため、ロボットを用いた避難誘導実験を行った。その結果、音声誘導するロボットが見えている場合に有意に避難速度が上がる事が明らかとなった。次に、避難誘導実験の結果を用い、避難シミュレーションのためのエージェントモデルを構築した。また、構築したエージェントモデルを用い、複雑な廊下を有する建物の避難シミュレーションを行い、ロボットを用いて避難誘導を行う際に効果的なロボットの位置について検討を行った。これより、構築したエージェントモデルを用いて、効果的な避難誘導位置が検討できることを確認した。

今後の課題としては、以下が挙げられる。まず、避難実験の被験者について、より幅広い年齢層でデータを収集し、エージェントモデルを構築する必要がある。また、避難者間の情報のやり取りや煙で視界が悪いときの挙動など、エージェントモデルをより現実的なものとする事も挙げられる。そして、ロボットによる避難支援を実用化するため、災害時にロボットが適切な場所に移動し避難誘導を行う一連の動作についても技術開発を進める必要がある。

謝辞

本研究は科研費(22310103)の助成を受けたものである。ロボットe-bioの実験使用などに関して、慶應義塾大学三田彰教授ならびに同大学大学院修士秋葉達也氏の協力を得た。記して謝意を表す。

参考文献

- 岡田成幸, 中嶋唯貴, 小山真紀, 松下孝星: コンピュータビジョンによるリアルタイム音声誘導システムの開発~地震時室内負傷低減のための多重対策の一環として~, 地域安全学会論文集, No. 13, pp. 213-221, 2010.11
- 山本勝也, 佐野友紀: 平常・非常照明下での音声誘導・点滅機能のある誘導灯の誘導効果, 日本建築学会学術講演梗概集, A-2, pp. 223-224, 2011.8
- 瀧本浩一・三浦房紀・松元隆博・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, 2011.4
- 伊藤英明, 中西英之, 小泉智史, 石田亨: 鳥瞰コミュニケーション環境を用いたナビゲーションシステム, 情報処理学会インタラクション2004, pp. 55-56, 2004.3
- 神成淳司, 吉田茂樹: 災害時における携帯端末を用いた効果的な避難誘導に関する考察, 人工知能学会全国大会論文集, Vol. 18, 2G2-04, 2 pp., 2004.6
- 原科直記, 三栗寛之, 向直人, 渡邊豊英: 経路指示パネルによる避難誘導のためのシミュレーション分析, 電子情報通信学会データ工学ワークショップ/日本データベース学会年次大会 DEWS2006 論文集, 4B-i7, 8 pp., 2006.3
- 岡田昌史, 安藤輝尚: 場に基づいた避難誘導のための人員配置最適化, 日本ロボット学会誌, Vol. 29, No. 4, pp. 395-401, 2011.5
- Mita, A.: Use of Small Robots as Sensor Agents for Biofied Building, The 6th International Workshop on Advanced Smart Materials and Smart Structures Technology (ANCRiSST2011), 8 pp., 2011.7
- 竹内翼, 三田彰, 伊勢大樹: 小型ロボットと構造ヘルスマニタリングシステムを用いたアクティブ避難誘導に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集(東海), Vol. B-2, pp. 1195-1196, 2012.9
- 金子みなみ, 小檜山雅之: 被験者実験によるロボットを用いた避難誘導の効果の検討, 日本建築学会関東支部 2011 年度研究報告集, Vol. 1, pp. 653-656, 2012.3
- 金子みなみ, 小檜山雅之: ロの字型廊下の被験者実験によるロボットを用いた避難誘導の効果の検討, 第9回日本地震工学会大会-2012 梗概集, pp. 344-345, 2012.11
- 松田泰治, 大塚久哲, 樗木 武, 内田広明: セルオートマトン法を用いた地下街の避難行動シミュレーションに関する一考察, 地域安全学会論文集, No. 2, pp. 95-100, 2000.11
- 瀧本浩一, 山崎隆弘: 中山間温泉地の避難行動実験とセルオートマトンを用いた避難シミュレーション, 地域安全学会論文集, No. 11, pp. 69-75, 2009.11
- 藤岡正樹, 石橋健一, 梶 秀樹, 塚越 功: マルチエージェント型避難モデルの特性評価, 地域安全学会論文集, No. 4, pp. 57-63, 2002.11
- 鎌田智之, 糸井川栄一: 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, 地域安全学会論文集, No. 10, pp. 183-193, 2008.11
- 消防防災博物館: <http://www.bousaihaku.com/bousaihaku2/imagenes/exam/pdf/b016.pdf>, 2013.01.29 閲覧

(原稿受付 2013.8.30)

(掲載決定 2014.2.24)