

# エージェントシミュレーションを用いた 動的環境における避難管理システム

Evacuation simulation for dynamic evacuation management

岡谷 賢\*<sup>1</sup>      高橋 友一\*<sup>1</sup>  
Masaru Okaya      Tomoichi Takahashi

\*<sup>1</sup>名城大学 理工学研究科  
Meijo University, Department of Information Engineering

It is important for the safety department to guide people in evacuating quickly from facilities in emergencies. It is desired to prepare for all emergencies to save human lives. However, it is difficult to conduct drills involving many people and using real environments under various scenarios without giving notice to people beforehand. Evacuation simulation is one of the methods for verifying the efficiency of prevention plans.

In this paper, we propose an evacuation management system for the safety department engage in emergency preparations and provide trainings to save individuals during emergencies. Results of evacuation simulation at subterranean shopping malls are shown to demonstrate our method reduce the cost of computer resource that are required in simulations.

## 1. はじめに

防災対策は、あらゆる状況を想定して行うことが望ましい。実際の人や建物で多くの状況に対する訓練を実施する事は難しい。建物からの避難状況をシミュレーションすることで、避難にかかる時間を予測する研究が行われている [野田 10]。避難に加え、非常放送や避難誘導といった防災担当側の活動をシミュレーションする事で、建物の災害対応マニュアルを評価することが可能となると考えられる。これまでに、避難状況をシミュレーションする様々な手法が提案された。ルールベースの手法やネットワークモデルなどマクロ的に避難状況を表現する手法に加え、セルオートマトンやソーシャルフォースモデルといったミクロ的なモデリング手法を用いて混雑状況を詳細に再現するものなどが提案された [Helbing 00][Kuligowski 08]。

物理法則などのシミュレーションと異なり、人間活動を含んだシミュレーションはその結果に対する検証も難しい。9.11WTC事件や東日本大震災では、アンケート調査により災害発生後の人の行動がまとめられ、これまでの避難シミュレーションの想定で扱われていない事象が多数指摘された [邑本 12][Averill 05]。そこでは、地震発生直後の人の行動や、避難することを決めた要因が様々であった事など、これまでのシミュレーションで考慮されていない様々な人の行動が指摘された。

著者は、個々の人心理や判断をエージェントモデルを用いて表現し、家族関係を例に人間関係に起因する行動の違いや避難誘導情報を考慮した行動を避難シミュレーションに取り入れる手法を提案してきた [岡谷 11]。多種多様なエージェント、その間のインタラクションやコミュニケーションを扱う手法は、計算資源を必要とし、大勢の人が関わる避難シミュレーションを困難にする問題があった。

本論文では、多くの人が関わる建物からの避難において、局所的な人の流れに着目し、シミュレーション対象領域にいる必要最小限のエージェントのみを計算の対象とする事で、効率よいシミュレーションが可能となる手法を提案し、その効果を示す。関連研究を 2. 章、提案手法を 3. 章、プロトタイプシステ

ムによるシミュレーションを 4. 章、まとめを 5. 章で述べる。

## 2. 関連研究

### 2.1 シミュレーションの対象と特徴

非常時におけるシミュレーションは、帰宅困難者の交通流、建物からの避難、救助活動の訓練などを対象にしたものがある。それぞれにおける対象人数、エリア、人間の行動モデル、動きモデルの違いを表 1 に示す。

表 1: 災害時におけるシミュレーションの目的と機能。

Issues	Intended purpose	
	traffic of returner	emergency escape
<b>a) Scale</b>		
number of agents	>> 10,000	< 10,000
area	town	building
duration time	days	hours
<b>b) Behavior model</b>		
mind status		✓
grouping		✓
guidance		✓
<b>c) Motion model</b>		
one-way congestion	✓	✓
bidirectional congestion		✓

**a) Scale** 帰宅困難者の交通を解析する目的でシミュレーションを用いる場合は、広範囲のエリアが対象となる。大都市のターミナルにおいては、少なくとも数万人の動きを、帰宅完了まで日単位で予測する。建物からの避難状況のシミュレーションでは、単一の建物から数千人が避難し、数十分から数時間程度の避難が対象となる。

**b) Behavior model** 避難時の人の行動は複雑であることが報告されている。東日本大震災での報告では、災害直後に危険を感じて避難する、何らかの用事を済ませてから避難する、危機が迫ってから避難する人と、異なる行動をとる事が報告されている [内閣府 11]。また、平時のアンケート調査において、避難指示に従う人、煙から反対

連絡先: 岡谷 賢, 名城大学 理工学研究科, 〒468-8502 名古屋市中天白区塩釜口 1-501, tel:052-832-1151, fax:052-832-1298, m0930007@ccalumni.meijo-u.ac.jp

の方向へ避難する人、人の少ない方向へ避難する人と多様な事が報告されている(表 2)。周囲の人とのインタラクションや避難誘導等の要因を考慮する必要がある。

c) **Motion model** 避難者が個々の事情や考え方に応じて様々な対応行動をとり、避難者による混雑が生じる。9.11WTC 事件の報告にあるように、避難中に休憩している人を追い抜く状況や、避難者と救助隊が対向してすれ違う状況などが報告されている。避難者の歩行動作は、渋滞やすれ違いなど複雑な混雑を扱う必要がある。

表 2: 非常時に、人が避難する方向 [安倍 86].

Selected directions	All	Man	Woman
Follow instructions from clerks or announcements	46.7	38.7	54.7
Hide from smoke	26.3	30.7	22.0
Go to the nearest staircase or emergency exit	16.7	20.7	12.7
Follow other people's movement	3.0	1.3	4.7
Go in the direction with fewer people	3.0	2.7	3.3
Go to bright windows	2.3	2.7	2.0
Return to the path	1.7	2.7	0.7
Other	0.3	0.7	-

## 2.2 関連研究の研究対象と本論文のねらい

### 2.2.1 街全体の交通流シミュレーション

山下らは帰宅困難者を想定した 30 万人のシミュレーションを行った [山下 12]。地図情報をネットワークモデルで表現した。ネットワークモデルでは、密度等を元にエージェントの速度を均一に計算する。一方で、意図を持ち様々な方向に移動するエージェントによる混雑を計算する事ができない。

### 2.2.2 建物内の人流シミュレーション

Helbing らは、狭い出口から避難する際のアーチ現象や双方向に向かう人による混雑状況を再現する Social Force Model を提案した [Helbing 00]。一方で、セルオートマトンやネットワークモデル等の手法に比べ、Social Force Model は計算コストが高い。

エージェント数が数百人、シミュレーションできる領域の面積も数百メートル四方レベルである。エージェントの役割や、感情を考慮したシミュレーションはあるが、飛行機からの避難や、周囲の建物との連絡路のない独立した建物でのシミュレーションに限られる [Galea 08][Tsai 11]。

### 2.2.3 避難シミュレーション

避難者の多様な心理状態や判断、避難誘導、といった人間活動を考慮した避難シミュレーションを対象とする。避難シミュレーションは、WTC ビルからの避難のように既存の施設からのケースと、駅構内など人の動きが流動的なケースがある。前者は初期に居る人が対象なのに比べ、後者は、人が次から次へと流入し延べ人数が多くなる。電車に乗っていた人が災害発生後に駅に到着し避難誘導に従って避難するといったシナリオは扱われていない。

本論文では、他から人が流入してくる状況や流出する状況を対象に、エージェント流入、流出に応じて、エージェントの発生/消滅させる事で、結果的に避難に関わった延べ人数の多い避難シミュレーションを効率的に処理する手法を提案する。

## 3. 対象シナリオと提案手法

### 3.1 非常時における人の流入・流出

シミュレーションの対象領域に周囲から流入してくる状況や、安全な方に出て行く状況を考慮するためには、何時、どの程度の頻度でシミュレーション対象領域にエージェントが流入、流出するかをシナリオに含める必要がある。また、エージェントが流入する時点でのエージェントの心理状態などもあらかじめ設定しておく必要がある。

### 3.2 システム構成

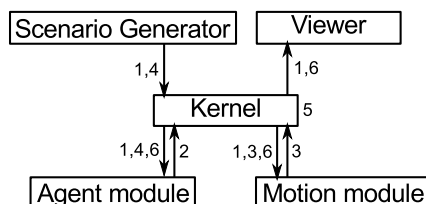


図 1: システム構成

以下に示す 3 つのモジュールと Viewer, それらを制御する Kernel から構成されるシステム構成を図 1 に示す。

**Scenario Generator** は、初期のマップ情報やエージェントの配置に加え、時刻  $t$  で流入するエージェントの初期化を行う。エージェントの初期化には、位置の指定だけでなく、避難路に関する記憶や心理状態、行動タイプを指定する。

**Agent module** エージェントの記憶や心理状態の表現方法や意思決定は、個別のエージェントが持つ Belief-Desire-Intention モデル (BDI モデル) により表現する。個々のエージェントは視界や聞き取った情報 (Belief) をもとに願望 (Desire) を持ち、その結果として個々の意図 (Intention) を持つ。災害の認識、知識として知っている避難路、非常放送や避難誘導などは Belief として表現し、2. 章で述べたエージェントの対応行動の違いを、BDI の違いで表現する。エージェントは特定の場所避難したいという意図や、周囲の人に話しかけるといった意図を持つ。

**Motion module** エージェントの意図に応じて、周囲のエージェントや壁を考慮して歩行を Social Force Model を用いてシミュレーションする。

$$m_i \frac{dv_i}{dt} = m_i \frac{v_i^0(t) e_i^0(t) - v_i(t)}{\tau_i} + \sum_{j(\neq i)} f_{ij} + \sum_W f_{iW} \quad (1)$$

ここで、第一項はエージェントが目的地に向うための力であり意図に伴う動作である。  $m_i$  はエージェント  $i$  の体重を示す。  $e_i^0(t)$ ,  $v_i^0(t)$  はそれぞれ目的地方向、目的地に向かう速さを示す。  $\tau_i$  は人が目的地に向かおうとする力加減を調節するパラメタ。  $f_{ij}$  は他のエージェントとの衝突回避する力、  $f_{iW}$  は壁から離れようとする力を示している。

以下にシミュレーションの手順を示す (図 1 中の数字は以下の手順に対応する)。

A 初期手順

1. Scenario Generator は、初期のマップ生成やエージェントの配置を行い、Kernel が全てのモジュールに送信する

B 繰り返し

2. Agent module はそれぞれのエージェントの意思決定を行い Kernel へ送信する.
3. Motion module は、Kernel から受け取ったエージェントの意思に応じて  $\Delta T$  間の歩行動作をシミュレーションし、シミュレーション結果を Kernel に送る.
4. Scenario Generator はシミュレーション中に
  - i) 流入エージェントに対し、新たなエージェントの初期化を行う
  - ii) 流出に伴い削除する
5. Kernel は、タイムステップ  $\Delta T$  毎にそれぞれのモジュールの計算結果を統合する
6. Kernel は、統合結果の変更点をモジュールに送る. エージェントに関しては、視界や位置関係を元に、それぞれのエージェントに関する情報のみを送信する.

3.3 計算資源モデル

以上の手法を管理するのに必要な計算資源について、メモリー、シミュレーション時間を以下に示す.  $T$  はステップ数、ステップ  $t$  におけるエージェント数を  $n(t)$  とする.

3.3.1 必要メモリー

1 ステップあたりの平均使用メモリー  $S$  を以下に示す.

$$S = \frac{m_1}{T} \sum_{t=0}^T n(t) + m_2 \quad (2)$$

$m_3$  はマップ表現など全ステップにおいて必要な情報,  $m_2$  は 1 エージェントの表現に必要なメモリーとする. シミュレーションに必要なメモリーの平均は  $\frac{m_1}{T} \sum_{t=0}^T \{n(t)\}$  に比例する.

一方、流入流出を考慮しない場合は、全てのステップでエージェント数  $n(t) = N$  となり、 $m_1 N + m_2$  となる.

3.3.2 シミュレーション時間

シミュレーションにかかる時間  $T_{sim}$  を以下に示す.

$$T_{sim} = c_1 + \sum_{t=0}^T \left\{ \sum_i n(t) \{c_4 + \sum_j sa(i)\} + c_3 \right\} \quad (3)$$

$$sa(i) \approx kn(t) \quad (4)$$

$$T_{sim} \approx c_1 + Tc_3 + c_4 \sum_{t=0}^T \{n(t)\} + kc_2 \sum_{t=0}^T \{n(t)^2\} \quad (5)$$

$c_1$  はタイムステップ以外の初期化などにかかる時間,  $c_2$  はエージェントどうしの衝突の計算に要する時間,  $c_3$  はタイムステップ毎に行うシミュレーション結果の送信などに要する時間,  $c_4$  はエージェントと壁, エージェントの目的地方向の計算等にかかる時間を示す.  $c_2$  の計算において、全てのエージェント  $i$  に対し、その周辺にいるエージェントとの衝突判定を行う. ここで、周囲にいるエージェント数は  $n(t)$  に線形比例することとする (4 式). 計算時間は  $\sum_{t=0}^T \{n(t)^2\}$  に比例する.

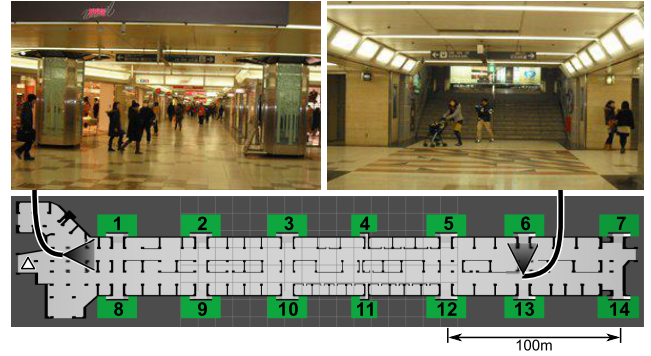


図 2: ユニモールのレイアウト.  $\Delta$  はエージェントが流入地点.

4. シミュレーション

4.1 避難シナリオ

プロトタイプシステムを用いて、人の流入、流出を含む避難シミュレーションを行った. 名古屋駅地下街のユニモールを対象としてシミュレーションを行った (図 2). ユニモールからの地上への出口は 1 から 14 の出口がある. 現場にいる誘導員が 1 から 14 の何れかに避難する様に誘導する.

災害発生直後建物内に 1,000 人の避難者がいる. 災害発生時に、図 2 の  $\Delta$  に示す位置から新たにエージェントが流入する. エージェントが何れかの出口から地上へ移動した時点で削除される. これらの流入流出は 3.2 の 4 においてエージェントの追加、削除に対応する.

今回のシナリオでは、通信効率 100%, エージェントは避難誘導に従う直後避難とした. 流入、流出を考慮しないシナリオと、流出を考慮した上で毎ステップ  $M$  人のエージェントが流入してくる想定で実験を行った ( $M = \{0, 10, 20, 30, 40, 50\}$ ).

4.2 シミュレーション結果の考察

100 ステップ (1000[s]) のシミュレーションにおいて、延べ人数とかかった時間を表 3, 表 4 に示す.

(1) 流入、流出を含まない/含むシナリオの効果 表 3, 表 4

の一重下線で示したシナリオは、最初から 5,000 人がいた場合 (左下) と、最初 1,000 人で毎ステップ 40 人ずつ流入した合計 5,000 人のシナリオ (右上) に対応する. どちらも、延べ人数 5,000 人のシナリオであるのに対し、流入、流出を考慮した方が 25% 程度のメモリー、20% のシミュレーション時間と必要とした計算資源が少ない.

(2) 流入量の異なるシナリオの比較 表 3, 表 4 の二重下線で

示した結果は、初期の人数と流入流出量が異なる延べ人数 6,000 人のシナリオである. 流入数の少ないステップあたりのエージェント数の少ないシナリオ (左下) の方が 30% のメモリー、20% のシミュレーション時間と必要とした計算資源が少ない.

図 3 に平均使用メモリー、平均計算時間を示す. x 軸は全ステップにおけるエージェント数の平均を示し、それぞれの点が 1 シナリオに対応し、初期配置エージェント数が同じシナリオが線で結ばれている. 前章で示した様に、メモリーはエージェント数に比例、平均計算時間はエージェント数の 2 乗に比例している. この傾向は、3.3 章のモデルと一致する.

表 3: 延べ人数と平均人数

initial agents	without outgoing/incoming agents	with outgoing agents					
		incoming agents per step (10[s])					
		0	10	20	30	40	50
1,000	1,000/1,000	1,000/73	1,950/181	2,900/296	3,850/574	4,800/988	5,750/1,366
3,000	3,000/3,000	3,000/305	3,950/414	4,900/529	5,850/814		
5,000	5,000/5,000	5,000/600	5,950/711				

\*total agents / average of agents of each step

表 4: 1 ステップにかかった平均計算時間 [s] と 1 ステップあたりの平均使用メモリー [GB]

initial agents	without outgoing/incoming agents	with outgoing agents					
		incoming agents per step (10[s])					
		0	10	20	30	40	50
1,000	4.82/56.71	0.42/3.46	0.97/6.70	1.61/14.56	3.33/68.81	6.43/245.13	9.65/449.04
3,000	14.70/417.63	1.58/28.96	2.16/32.66	2.82/40.73	4.60/97.46		
5,000	25.06/1075.54	3.05/87.82	3.70/90.51				

\*average memory[GB] usage at each step / average time[s] to simulate 1 step

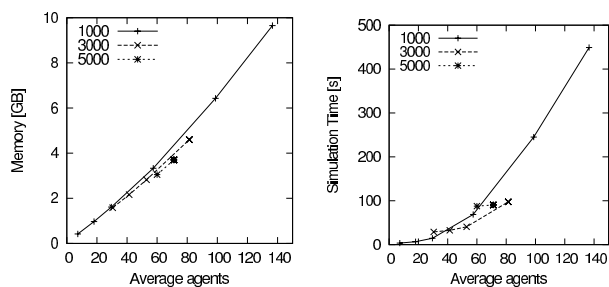


図 3: 平均使用メモリーと平均計算時間

## 5. まとめ

建物からの避難においては、多種多様な人の行動により避難状況は複雑になる。本論文では、地下街のような人の流入・流出のあるエリアで避難誘導を行う事を前提とした避難シミュレーションを考え、対象領域にいるエージェントを計算の対象とする事で、効率よいシミュレーションが可能となる手法を提案した。シミュレーション結果から、提案手法は全てのエージェントを扱う手法に比べて、同数のエージェントが関わる避難シミュレーションにおいて、少ないメモリーで、短時間で実現できる事を示した。

今後は、用事後避難、切迫避難といった行動動作をするエージェントや、混雑状況に応じた避難誘導を取り入れたケースをシミュレーションし、本手法の有効性を検証する。

## 参考文献

[Averill 05] Averill, J. D., Mileti, D. S., Peacock, R. D., Kuligowski, E. D., and Groner, N. E.: Occupant behavior, egress, and emergency communications, NIST NCSTAR 1-7, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg (2005)

[Galea 08] Galea, E. R. et. al.: The UK WTC 9/11 Evacuation Study: An Overview of the Methodologies Employed and Some Preliminary Analysis, in

Klingsch W.W.F., S. A., Rogsch C. and Schreckenberg, M. eds., *Pedestrian and Evacuation Dynamics 2008*, pp. 3–24, Springer (2008)

[Helbing 00] Helbing, I. F. D. and Vicsek, T.: Simulating dynamical features of escape panic, *NATURE*, pp. 407:487–490 (2000)

[Kuligowski 08] Kuligowski, E. D. and Gwynne, S. M.: The Need for Behavioral Theory in Evacuation modeling, *In Pedestrian and Evacuation Dynamics 2008*, pp. 721–732 (2008)

[Tsai 11] Tsai, J., Fridman, N., Brown, M., Ogden, A., Rika, I., Wang, X., Epstein, S., Zilka, A., Taylor, M., Tambe, M., Bowring, E., Marsella, S., Kaminka, G. A., and Sheel, A.: ESCAPES - Evacuation Simulation with Children, Authorities, Parents, Emotions, and Social comparison (2011)

[安倍 86] 安倍 北夫: パニックの人間科学-防災と安全の危機管理, プレーン出版 (1986)

[岡谷 11] 岡谷 賢, 高橋 友一: 人間関係を考慮したエージェントベースの避難シミュレーションフレームワーク, 電子情報通信学会誌, Vol. J94-D, pp. 1855–1865 (2011)

[山下 12] 山下 倫央, 岡田 崇, 野田 五十樹: 大規模群集流動の制御に向けたシミュレーション環境の構築, in *JAWS 2012*, pp. – (2012)

[内閣府 11] 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)

[野田 10] 野田 五十樹, 山下 倫央, 副田 俊介, 下羅 弘樹, 秋山 英久: 災害情報学, 情報処理—新しい〇〇情報学—, pp. 649–655 (2010)

[邑本 12] 邑本 俊亮: 避難と情報, 電子情報通信学会誌, pp. 894–898 (2012)