

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

原科 直記[†] 三栗 寛之^{††} 向 直人^{††} 渡邊 豊英^{††}

[†] 名古屋大学工学部電気電子・情報工学科 〒 464-8603 愛知県名古屋市千種区不老町

^{††} 名古屋大学大学院情報科学研究科社会システム情報学専攻 〒 464-8603 愛知県名古屋市千種区不老町

E-mail: †harashina@watanabe.ss.is.nagoya-u.ac.jp

あらまし 本稿では、災害時の避難行動支援のために経路指示パネルを用いた避難誘導法を検討し、その方法を計算機シミュレーションによる実験及び評価を目的とする。マルチエージェント・パラダイムに従って個々の避難者をモデル化し、避難時の行動アルゴリズムを各エージェントに付与させて、避難行動のためのシミュレーション・プログラムを構成する。このシミュレーション・プログラムを用い格子状の仮想地図ネットワーク上でエージェントの行動を観察する。さらに、観察データに基づいて経路指示パネルを設置し、計算機シミュレーションによって避難者の行動、及び経路指示パネルによる行動への影響を分析した。この結果、i) モンテカルロ法による決定位置に経路指示パネルを設置した場合、ii) 広域の混雑状況に基づき動的に指示を与えた場合において避難行動の効率性及び安全性が高いことが確かめられた。

キーワード マルチエージェント、災害対策、混雑緩和、モンテカルロ法

Simulation Analysis for Evacuation Guidance Method, Based on Routing Panel

Naoki HARASHINA[†], Hiroyuki MIKURI^{††}, Naoto MUKAI^{††}, and Toyohide WATANABE^{††}

[†] School of Engineering, Nagoya University Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya, 464-8603 Japan

^{††} Graduate School of Information Science, Nagoya University Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya, 464-8603 Japan

E-mail: †harashina@watanabe.ss.is.nagoya-u.ac.jp

Abstract This paper proposes a method for evacuation navigation based on routing panel, and analyzes this method with computer simulation. For this simulation, the multi-agent paradigm is adopted as our basic refugee modeling. With this modeling, we observe the evacuation behaviors of agents' actions by routing panels. As a consequence, two characteristic results are derived. One is that setting routing panels on the intersections, detected by Monte Carlo method, navigate refugees rapidly and safely. The another is that evacuation routes based on global information about congestion improve efficiency of navigation.

Key words multi-agent, evacuation planning, congestion reducing, Monte Carlo method

1. ま え が き

近年、世界中で多発する自然災害に伴って、災害対策に対する関心が高まっている。これまでの災害対策は「災害の発生を未然に防ぐための各種行為、施策、取組み」という意味合いの「防災」が主であった。近年では「災害発生時の被害をできる限り減らすこと」という意味合いの「減災」が広く普及しつつある。減災対策は、災害発生からの経過時間に応じて、発災前の災害準備期と発災後の応急対応期および復旧・復興期に分類される。我々は応急対応期、すなわち災害発生直後の被災者の避難行動支援に注目する [1],[2].

これまで、避難行動支援に関して様々な研究が報告されている。杉万ら [3] は地下街で誘導員を用いた避難者の統制実験を行った。誘導員は多数の避難者に出口を知らせる指先誘導法と、少数の避難者に出口を知らせる吸着誘導法の 2 つの誘導法を用いた。結果として、吸着誘導法が優れていた。しかし、誘導員と避難者の比率に応じて 2 つの誘導法の優劣が逆転するとの知見を示した。

一般に災害は不定期かつ突発的に発生するため、実環境下での災害対策の実験は難しい。そこで、災害対策の有効性を確認するために、計算機を用いたシミュレーションに注目する。石田ら [4] は杉万らが提案した避難誘導法の妥当性についてシミュ

レーションで検証した。対象は実環境での避難訓練が困難な場所である地下鉄駅構内とし、空間内に避難者と誘導者を配置し、それぞれに対して行動アルゴリズムを与えた。また、新井ら[5]は避難者の年齢や障害を考慮して移動速度、視野、自律行動および追従行動、行動アルゴリズム等を変化させ、デパートの地下における避難シミュレーションを行った。鏡味ら[6]は被災者に対するアンケートを基に様々な年代の人間の行動を分析し、その結果に基づき年代別に避難行動アルゴリズムを設計し、必要に応じて避難者同士で情報を共有させた。北海道という寒冷地を考慮し、積雪等の気象条件の変化による避難行動の変化について実験・考察した。これらの研究では、避難者の身体的特徴や行動、避難者同士の情報共有に基づき、避難者をエージェントとしてモデル化し、その妥当性をシミュレーションで検証している。災害時の避難者の振舞傾向を解析することは、減災対策を考える上で、非常に重要である。

被災者の避難行動支援において、避難の効率性と安全性は評価要因となる。効率性はできるだけ早い時間で多くの避難者を目的地に避難させること、また安全性を混雑や経路の通行不可をできるだけ避けた避難行動を実現することをそれぞれ意味する。避難の際には、難解な経路選択や経路の混雑によって避難行動に支障をきたすことがある。これらの問題を解決するには、経路の通行状況を考慮した動的な指示、すなわち周囲の経路状況を取得し、それに基づいた指示を避難者に与えることが必要となる。

我々は経路指示パネルを道路上に配置し、避難者が直接自己の行動では得ることのできない周囲の情報を、基地局から発信する。さらに、その情報を基に形で経路指示パネルの指示内容を設定し、避難行動を支援する。これまで、災害対策用自動販売機[7]、ITDP(災害時情報電子掲示板)[8]などが、災害時に情報を避難者に配信するという目的で道路上に設置されている。これらは、携帯電話に代表される個人端末に比べ信頼性の高い無線を使用しており、また一度に多くの避難者に共通の情報を提供できるため、優れた避難行動支援を実現できる。

本稿では、道路上に設置した経路指示パネルの指示内容、また経路指示パネルの設置場所を変化させ、混雑緩和を図ることで、避難者にとっての効率性、安全性を評価及び分析する。対象とする災害を地震とし、発生後間もない時期の応急対応、つまり避難行動を検討する。シミュレーション上で、指示パネルは地図上の交差点に設置し、経路の混雑状況及び通行状況等の情報は全て情報発信する基地局(サーバ)から得ることとした。

本稿の構成は以下の通りである。2章では提案する経路指示パネルによる避難誘導法について述べる。まず、避難行動時の問題点に対する解決策(アプローチ)を説明する。次に、モンテカルロ法に基づいた地図上の指示パネル設置位置の決定法、局所領域と広域領域の異なる2種類の領域内の混雑情報取得手法を提案する。3章で、シミュレーション実験の内容と結果を述べ、得られた結果に対して評価・考察する。最後に、4章で本稿のまとめと今後の課題を述べる。

2. 経路指示パネルによる避難誘導法

2.1 視点とアプローチ

避難行動上の問題、すなわち「避難経路選択」と「混雑発生」を解決するために、本稿では経路指示パネルの設置による避難行動支援法を提案する。経路指示パネルによる動的な情報提供により、避難者の分散や安全性の高い避難といった効果が期待できる。本稿ではモンテカルロ法に基づいて経路指示パネルの設置位置を決定し、被災地状況のセンシングにより指示パネルの表示内容を変更する手法を採用する。

(1) モンテカルロ法による指示パネル設置位置の決定

一般に経路指示パネルを設置する位置は、道路網の各地点を通行する人数に依存する。しかし、災害時の状況を考慮すると、避難者の避難開始位置やどの道路が通行不可能になるかといった不確定要素も含まれる。このため、実際に避難行動実験を行って設置場所を決定することは難しい。

我々は、仮想的な都市モデルを構築し、計算機シミュレーションによって設置位置を決定する。不確定要素、すなわち確率的要素が含まれる場合はモンテカルロ法を用いて近似的な解(パネル設置位置)を求める。モンテカルロ法は乱数を用いたシミュレーション手法であり、試行回数が多いほど近似精度は高くなる。道路標識の設置位置と同様に、シミュレーション終了後にエージェントの延べ通行回数が多い交差点を設置交差点として決定する。能島ら[9]も、被災時の交通機能の評価基準として道路網の最大フローを用い、モンテカルロ法によって重要な道路ネットワークを算出している。

(2) 領域情報(混雑情報)の取得

特定の道路に多数の避難者が集中すると、移動速度の低下や待機の発生によって避難の効率性および安全性が低下する。また、避難者自身が利己的に進行すべき道路を選択すると、安全性の低い道路を選択したり、他の避難者を追従することによる混雑が発生する。

我々は混雑情報を取得することで経路指示パネルで提供する経路情報を動的に変化させることを考える。ここで、混雑情報とはある時刻において、ある情報取得領域を通行したエージェント数と定義する。

ここで2種類の情報取得領域を考える。

(a) 局所領域

経路指示パネルで提供する情報をパネル設置位置付近の混雑情報から決定する。経路指示パネルが設置されているノードと、パネルの指示によりエージェントを誘導する候補ノード間のリンク(経路)の混雑状況を取得する。2つの候補ノードをそれぞれ c_1, c_2 とし、時刻 t におけるリンクの通行エージェント数をそれぞれ n_1, n_2 とする。パネルがエージェントに提供する情報は以下とする。

- $n_1 < n_2$ であれば c_1
- $n_1 > n_2$ であれば c_2
- $n_1 = n_2$ であれば c_1, c_2 それぞれをランダムに選択

図1に例を示す。リンク上の交通量に基づき提示情報を変化させることで、リンクの混雑を防ぐ。

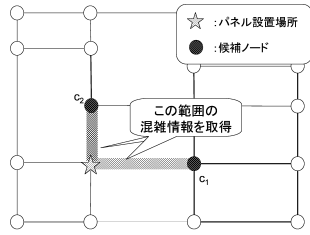


図 1 局所混雑情報の取得

(b) 広域領域

経路指示パネルで提供する情報をエージェントが現時点で確認不可能な領域の混雑情報から決定する。

予め設定した 2 つの候補ノードの通行後に、通行する可能性が高い領域の混雑情報を取得する。各候補ノードと、目的地ノードから領域を決定する。候補ノード c_1, c_2 の座標をそれぞれ (x_1, y_1) , (x_2, y_2) , 目的地ノードの座標を (x_{g1}, y_{g1}) , (x_{g2}, y_{g2}) としたとき、取得領域を幅 $|x_1 - x_{g1}|$, 高さ $|y_1 - y_{g1}|$ および幅 $|x_2 - x_{g2}|$, 高さ $|y_2 - y_{g2}|$ の長方形を取得領域と定義し、この領域中に存在するエージェント数を利用する。各領域中に含まれる経路全体の通行エージェント数を n'_1, n'_2 , 長方形の面積を A_1, A_2 とする。パネルがエージェントに提供する情報は以下とする。

- $n'_1/A_1 < n'_2/A_2$ であれば c_1
- $n'_1/A_1 > n'_2/A_2$ であれば c_2
- $n'_1/A_1 = n'_2/A_2$ であれば c_1, c_2 それぞれをランダムに選択

図 2 に例を示す。領域内のエージェントの密度から、それぞれの目的地に到達するエージェント数を予測し、目的地へ向かうエージェント数の均一化を図ることで、混雑を防ぐ。

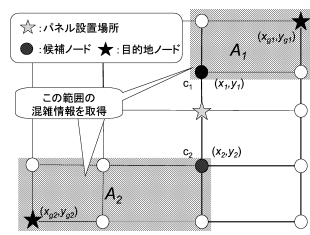


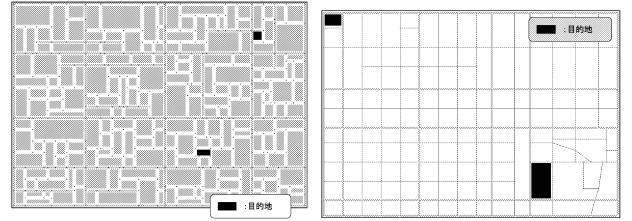
図 2 広域混雑情報の取得

2.2 実験システムの提案

2.2.1 ネットワーク

本シミュレーションでは格子状のネットワークで構成される仮想道路ネットワークと、名古屋市栄周辺(市内中心部)のデータに基づいて作成した道路ネットワークを、それぞれ用いる。実験で用いた仮想道路ネットワークの例を図 3(a) に示す。また、実データに基づいて作成した道路ネットワークを図 3(b) に示す。シミュレーション画面の縮尺は 1 ピクセルあたり 2m であり、その大きさはシミュレーション画面上で 800×600 ピクセルである。

本ネットワークはノードとリンクから構成され、ノードは以



(a) 仮想道路ネットワーク

(b) 実データに基づいた道路ネットワーク

図 3 道路ネットワーク

下の属性を持つ。

- ノードの x 座標及び y 座標
- 接続ノード数
- 接続ノード番号

また、リンクは以下の属性を持つ。

- 2 端点の x 座標及び y 座標
- リンク長
- リンク幅 (経路幅)
- 通行可能状態
- 現時刻での通行エージェント数

地震発生による道路閉塞の主な原因として、家屋の崩壊がある [10]。本シミュレーションでは経路の通行不可における原因として建物の倒壊を想定し、各経路固有の通行不可確率に基づいて経路の通行を不可能とする経路状態変化イベントを定期的に発生させる。状態を変化させる経路はランダムに決定する。なお、通行不可となった経路はそのシミュレーション内において再び通行可能になることはない。本稿ではこのイベントを「経路通行不可イベント」とよぶ。リンク幅とそれに基づく「通行可能エージェント数」「通行不可確率」を表 1 に示す。

表 1 シミュレーションのリンク特性

リンク幅	通行可能エージェント数	通行不可確率 (%)
10	2	2
20	4	1
30	6	0

リンク幅は地図上で南北及び東西に長く伸びている経路を優先的に大きく設定した。簡単化のため、3 種類とした。通行可能なエージェント数は経路を同時に通行することができるエージェント数の上限であり、リンク幅に比例して設定した。通行不可確率は [11] にある、国の評価による道路閉塞確率の概念に基づいてリンク幅に反比例する形式で設定した。なお、シミュレーションの単位時間 (ユニットタイム: UT) を $1UT=4sec$ とした。

2.2.2 エージェント

エージェントはシミュレーション開始時に地図上にランダムに配置され、ノードに到達するたびに避難行動アルゴリズムに

従って移動すべきリンク（経路）を決定する。この手順を繰り返して目的地に到達する。エージェントは、目的地までの（最短）避難経路は知らないが、目的地の位置（x-y 座標）は知っていると考え。また、全てのエージェントは同じ避難行動アルゴリズムに基づいて行動する。また、避難時の群集歩行速度は約 1.0m/sec であることに基づき、エージェントの移動（歩行）速度を 2 ピクセル/UT とした。

道路ネットワーク上に複数の目的地が存在する場合、エージェントは初期位置に近い目的地に向かって避難する。避難行動アルゴリズムは服部らが提案した移動アルゴリズム [12] に基づき、候補経路が複数存在する場合の経路決定法、経路混雑時の対処法を拡張した。避難行動アルゴリズム・フローを図 4 に示す。

エージェントがノードに到達すると、まずそのノードに経路指示パネルが設置されているかどうかを見る。設置されていれば次節で述べる経路指示パネルの指示に従った行動を優先的にとる。ノード上に経路指示パネルが存在しなければ、現在エージェントがいるノードと目的地の座標から候補経路を決定する。候補経路は場合によっては複数存在することがある。図 5 に例を示す。

図中の現在地ノードからは e_1, e_2, e_3 と通行可能な経路が 3 箇所存在する。現在地ノードと目的地ノードの座標関係から、目的地ノードへと近づくようなノードへの移動経路は e_1, e_2 となり、この例では候補経路が 2 本存在する。複数の候補経路が存在する場合、その時刻において通行エージェント数が多い候補経路を優先的に選択する。この基準には、「緊急時には通行人数が多い経路を選択する傾向が強い」という避難者心理が考慮されている。

目的地方向に進むことができない場合は前時刻から進行してきた方向へ進むことができるか、進行方向から左右に転回した方向へ進むことができるか、進行方向の逆方向へ進むことができるか、の優先順位で候補経路を選択していく。「進むことがで

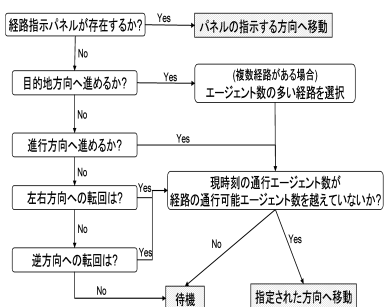


図 4 1 ステップにおける避難行動アルゴリズムフロー

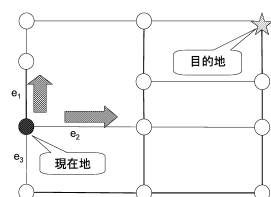


図 5 候補経路が複数存在する場合

きない」とは次の二つの基準で判断する。

- その方向に経路が存在しない
- その方向にある候補経路状態が通行不可になっている

ここまでで、候補経路は一意に決まる。最後に、決定した候補経路における通行エージェント数とその経路の通行可能なエージェント数に達していないかどうかを判断する。超えていればその時刻では移動せず、待機する。そして、通行可能エージェント数を下回った際に移動を再開する。

2.2.3 経路指示パネル

各経路指示パネルは以下の属性を持つ。

- 設置ノード番号
- 候補ノード 1
- 候補ノード 2
- 情報取得方法

設置ノード番号は、指示パネルが設置されているノード番号を示す。候補ノードは、指示パネルが混雑状況から経路を判断した上で指示を出し、エージェントを進ませるノードである。候補ノードはシミュレーション開始前に予め設定するが、設定には設置ノードと候補ノードを結ぶリンクと以下の基準を用いる。

- 目的地方向に近づき、かつ経路幅の大きいリンク
- 経路幅の大きいリンク
- 目的地に近づくようなリンク

設定の際にはこの順で優先的に決定する。つまり、経路指示パネルの指示によって避難者を誘導する経路を上記の設定基準に基づいて予め複数設定しておき、サーバから取得する混雑情報に応じて経路指示パネルは動的に誘導経路を変化させる。

3. 計算機シミュレーション実験

2章で設定した実験システムを用い、経路指示パネル設置位置の決定及び経路指示パネルの設置による避難行動を計算機シミュレーションで実験・評価し、その結果に対して考察する。

3.1 評価基準

シミュレーションにおける避難の効率性、安全性を次のように定義する。

- 効率性

シミュレーション開始から終了までの各時刻における避難完了エージェント数を比較する。避難完了エージェント数に比例して効率性の高い避難が実現される。

- 安全性

1章で安全性を「混雑や経路の通行不可をできるだけ避けた避難行動を実現すること」とした。混雑や経路の通行不可を避けるための手段として「幅の広い経路を通行する [13]」がある。本シミュレーションではこの手段に従って安全性の評価基準とする。シミュレーションの開始時刻を t_s 、終了時刻を t_f 、時刻 t の時点で避難未完了のエージェント数を $n_u(t)$ 、その中で経路幅 30 の経路を通行しているエージェント数を $n_w(t)$ とする。

この条件の下で、安全性を示す値 S を

表 2 実験環境 (共通)

エージェント数	100, 200
制限時間	300UT
経路通行不可イベント発生間隔	40UT
安全性の算出時に基準とする経路幅	30

$$S = \sum_{t=t_s}^{t_f} r_w(t)/r_a(t) \quad (1)$$

とする。この値が大きいくほど、幅の広い経路を通行する、すなわち安全性の高い避難行動が実現できる。

3.2 実験環境および実験方法

経路指示パネル設置位置の決定および経路指示パネルの設置による避難行動をシミュレーションするための実験環境とその方法について述べる。

3.2.1 実験環境

各実験で共通の実験環境を表 2 に示す。

- エージェント数

避難人数の変化を想定し、2 通りのエージェント数を設定した。

- 制限時間

避難行動は迅速さが求められる。また、ある程度の時間で目的地に到達しなければ避難行動の安全性は低下する。したがって、本シミュレーションでは制限時間を設定する。設定基準として、避難開始から約 20 分間を基準とし、本シミュレーションでは制限時間を 300UT とする。経路の通行不可、混雑等の影響がない状況では、エージェントの初期位置が道路ネットワーク上のどの位置であっても制限時間内に目的地まで到達できる。

- 経路通行不可イベント発生間隔

災害発生後、どの経路がいつ通行不可になるかは不定である。したがって、2.1 節で示したように経路通行不可イベントを 40UT (=160sec) 毎に定期的に発生させ、表 1 で設定した各リンク (経路) の持つ通行不可確率に基づいてリンク通行状態を変化させる。

- 安全性の算出時に基準とする経路幅

3.1 節で述べた安全性を示す値 S (式 1) 中の基準幅以上の経路を通行しているエージェント数 ($r_w(t)$) の算出時に基準とする経路幅を 30 と設定した。

なお、本実験における S の最大値は 300 である。

3.2.2 実験方法

5 回の実験を実施する。各実験について、詳しい実験環境、実験手順を以下に示す。

- 実験 1: 指示パネル設置位置の決定

本実験ではモンテカルロ法に基づき複数回シミュレーションして、経路指示パネルの設置位置を決定する。モンテカルロ法で近似的な解を求めるためにシミュレーション回数を 100 回と設定した。

実験手順は以下の通りである。

(1) エージェント数が 100, 200 の各場合でモンテカルロ法に基づいた 100 回のシミュレーションを行う

(2) 各場合でエージェントの延べ通行回数が多いノードを 15 箇所検出する

(3) 各場合で検出したノードから最終的にノードを 10 箇所決定する

実データに基づいた道路ネットワークのノード (交差点) 数は仮想道路ネットワークのノード数の約半分であったので、実データに基づいた道路ネットワークでの実験時は検出ノード数をそれぞれ 7 箇所、5 箇所とした。

- 実験 2: 指示パネル設置の評価

本実験では経路指示パネルの設置の有無による避難行動の効率性・安全性を評価する。

実験環境は表 2 に次を加えたものとする。

- シミュレーション回数: 5 回
- パネル取得情報: 局所情報

シミュレーション回数は 5 回とし、その平均を最終的な結果として算出する。本実験ではパネル設置による避難行動の変化を評価するため、局所領域の情報を取得する。

実験手順は以下の通りである。

(1) 指示パネル未設置・設置の各場合によるシミュレーションをエージェント数が 100, 200 の各場合で行う

- 実験 3: 人間による指示パネル設置の評価

本実験では、人間の判断による経路指示パネル設置位置と実験 1 でモンテカルロ法によって決定した経路指示パネル設置位置における避難行動の効率性・安全性を評価する。実験環境は表 2 に次を加えたものとする。

- シミュレーション回数: 5 回
- パネル取得情報: 局所情報

実験手順は以下の通りである。

(1) 設定者に道路ネットワーク上のノードを 10 箇所選択してもらう

(2) 設定者による選択位置、モンテカルロ法による決定位置の各位置に指示パネルを設置した場合のシミュレーションをエージェント数が 100, 200 の各場合で行う

設定者には目的地に避難する際にエージェントが通行する回数が多いと思われるノードを選択してもらった。

- 実験 4: 指示経路の動的変化の評価

本実験では、実験 1 で決定した設置位置に経路指示パネルを設置し、静的な経路指示、すなわち常に一定の指示を出す場合と、混雑情報から判断した動的な経路指示を出す場合における避難の効率性・安全性を評価する。実験環境は表 2 に次を加えたものとする。

- シミュレーション回数: 5 回
- パネル取得情報: 局所情報, なし

本実験では静的な経路指示の場合と動的な経路指示の場合との避難行動の変化を評価するため、情報取得内容は局所混雑情報とした。

実験手順は以下の通りである。

(1) 指示パネルが一定の経路指示を出す場合、動的な経路指示を出す場合でのシミュレーションをエージェント数が 100, 200 の各場合で行う

● 実験 5:情報取得内容の評価

本実験では、実験 1 で決定した設置位置に経路指示パネルを設置し、取得情報内容を局所混雑情報と広域混雑情報とした場合の避難行動の効率性・安全性を評価する。実験環境は表 2 に次を加えたものとする。

- シミュレーション回数：5 回
- パネル取得情報：局所情報，広域情報

実験手順は以下の通りである。

(1) 指示パネルが局所混雑情報，広域混雑情報の各情報を取得する場合のシミュレーションをエージェント数が 100, 200 の各場合で行う

一連の実験を，複数の道路ネットワーク上に対して実施し，評価する。

3.3 実験結果

3.3.1 実験 1:指示パネル設置位置の決定

図 3(a) に対して各エージェント数で検出されたノードを基に最終的に決定した経路指示パネル設置位置を図 6 に示す。図中の★が最終的な決定位置である。

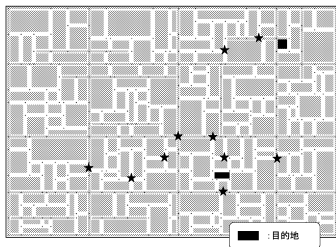


図 6 指示パネル設置位置 (仮想道路ネットワーク)

3.3.2 実験 2:指示パネル設置の評価

各エージェント数での実験結果をグラフで表示した。グラフの横軸は時間軸，縦軸は避難人数および安全性 ($n_w(t) / n_e(t)$ の値) とした。図 7 にエージェント数 100 のグラフを，表 3 に各エージェント数における安全性 (S) の値を示す。

避難の効率性を表すグラフを見ると，避難エージェント数および最終的な避難エージェント数はパネル未設置に比べてパネル設置の方が常に上回っていることが分かる。同様に，避難の安全性を示す S の値も，パネル設置の方が優れた値を示して

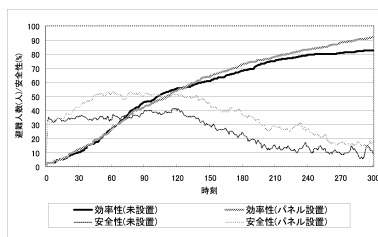


図 7 実験 2 結果 (エージェント数:100)

表 3 エージェント数と S の値 (実験 2)

エージェント数	S (未設置)	S (設置)
100	76.2	111.2
200	57.4	122.2

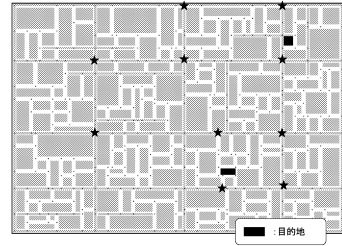


図 8 人間による指示パネル設置位置 (仮想道路ネットワーク)

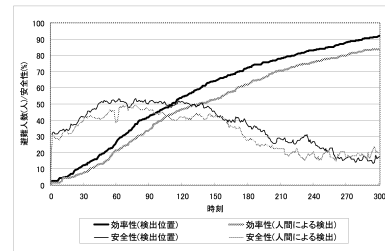


図 9 実験 3 結果 (エージェント数:100)

表 4 エージェント数と S の値 (実験 3)

エージェント数	S (決定位置)	S (人間による選択位置)
100	111.2	97.5
200	122.2	97.2

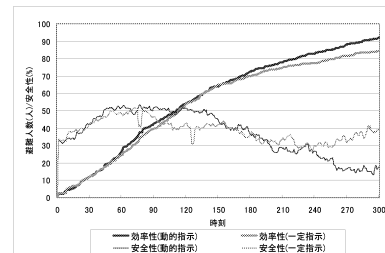


図 10 実験 4 結果 (エージェント数:100)

いる。

3.3.3 実験 3:人間による指示パネル設置の評価

図 3(a) に対する人間の判断による経路指示パネルの設置位置を図 8 に示す。

図 9 にエージェント数 100 のグラフを，表 4 に各エージェント数における安全性 (S) の値を示す。

避難の効率性を表すグラフを見ると，避難エージェント数および最終的な避難エージェント数は，人間による選択位置へのパネル設置に比べてモンテカルロ法による決定位置へのパネル設置の方が常に上回っていることが分かる。同様に，避難の安全性を示す S の値も，モンテカルロ法による決定位置の方が優れた値を示している。

3.3.4 実験 4:指示経路の動的変化の評価

図 10 にエージェント数 100 のグラフを，表 5 に各エージェント数における安全性 (S) の値を示す。

避難の効率性を表すグラフを見ると，避難エージェント数および最終的な避難エージェント数は，一定の指示を出す場合に比べて動的に指示を変化させる方が常に上回っていることが分かる。一方，避難の安全性を示す S の値は，一定の指示を出す

表 5 エージェント数と S の値 (実験 4)

エージェント数	S (動的指示)	S (静的指示)
100	111.2	115.8
200	122.2	102.8

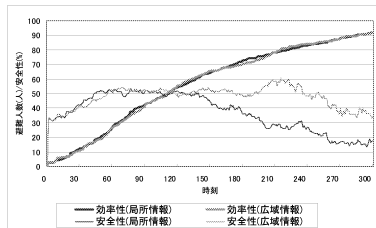


図 11 実験 5 結果 (エージェント数:100)

表 6 エージェント数と S の値 (実験 5)

エージェント数	S (局所情報)	S (広域情報)
100	111.2	143.1
200	122.2	129.1

場合と動的な指示を出す場合で大きな差が見られなかった。

3.3.5 実験 5:情報取得内容の評価

図 11 にエージェント数 100 のグラフを、表 6 に各エージェント数における安全性 (S) の値を示す。

避難の効率性を表すグラフを見ると、各時刻での避難エージェント数については局所情報取得と広域情報取得でほとんど差が見られなかったが、最終的な避難エージェント数は広域情報取得の方が上回っていた。一方、避難の安全性を示す S の値は、広域情報取得の方が優れた値を示した。

3.4 考察

各道路ネットワークについて、評価基準を基にした実験 2~5 の結果を表 7、表 8 に示す。効率性・安全性の欄には評価が高くなった方式を記した。なお、「-」は有意な差が得られなかったことを示す。

3.4.1 経路指示パネル設置位置の有効性

モンテカルロ法による手法の設置位置の傾向として、仮想道路ネットワークと実データに基づいた道路ネットワークの両方で、目的地付近に設置場所が集中していることが分かる。これは避難が進むにつれ、次第にエージェントが目的地に集中する

表 7 実験結果の評価 (仮想道路ネットワーク)

実験	効率性	安全性
実験 2 (パネル設置・未設置)	パネル設置	パネル設置
実験 3 (決定位置・選択位置)	決定位置	決定位置
実験 4 (動的指示・一定指示)	動的指示	-
実験 5 (局所情報取得・広域情報取得)	広域情報取得	広域情報取得

表 8 実験結果の評価 (実データに基づいた道路ネットワーク)

実験	効率性	安全性
実験 2 (パネル設置・未設置)	パネル設置	パネル設置
実験 3 (決定位置・選択位置)	決定位置	決定位置
実験 4 (動的指示・一定指示)	動的指示	動的指示
実験 5 (局所情報取得・広域情報取得)	広域情報取得	-

ためである。したがって、エージェントの通行回数から判断すると、目的地に近いノードが多く選択されることが分かる。

一方、人間の判断による経路指示パネル設置位置の選択結果を見ると、目的地に近いノードよりも、むしろ幅の広い経路が交差しているノードおよび幅の広い経路上にあるノードを選択する傾向がある。この傾向から、人間が判断する重要なノードは前提として「幅の広い、すなわち安全である経路」であることが分かる。

避難の効率性・安全性について、実験 3 より、人間による選択位置よりもモンテカルロ法による手法での設置位置に経路指示パネルを設置した方が効率性・安全性ともに向上していることが分かる。モンテカルロ法による決定位置に経路指示パネルを設置することで、目的地付近の混雑を緩和させることができ、避難の効率化に繋がっていると考えられる。また、モンテカルロ法による手法では、幅の狭い経路に接するノード上に経路指示パネルを設置する場合があった。幅の狭い経路を通過するエージェントを幅の広い経路へと誘導することで、避難の安全化に繋がっていると考えられる。

以上の結果より、人間の判断による設置位置に比べて、モンテカルロ法による設置位置に経路指示パネルを設置することの有効性が示された。

3.4.2 経路指示パネルによる避難行動の効率化・安全化

実験 2 より、経路指示パネルの設置により避難の効率性・安全性が共に向上していることが分かる。理由として、エージェント数の違いによる経路指示パネルに及ぼす効果が考えられる。エージェント数が多い場合、混雑の発生による待機や他のエージェントに追従して行動する可能性が高くなる。したがって、パネルの指示に従う方が効率よく、かつ安全に避難できると考えられる。パネルを通行する回数が増えると、それだけパネルによる効果が高くなり、結果として効率性・安全性の高い避難行動が実現できる。以上より、パネルの及ぼす効果は主にエージェント数に依存すると考えられる。

実験 4 について、仮想道路ネットワークでは動的な経路指示は静的な経路指示に比べ効率性の高い避難が実現できるが、安全性の面では有意な差がないことが分かる。一方、実データに基づいた道路ネットワークでは静的な経路指示よりも動的な経路指示の方が避難の効率性・安全性がともに向上している。

動的な経路指示の場合、混雑していない経路へエージェントを誘導することができるので、混雑の発生を抑え、避難の効率化に貢献している。

ノード設置位置は同一であるため、動的な経路指示でも静的な経路指示と同一の経路を指示する場合がある。したがって、同一ノードに設置するといった物理的な要因によって、安全性の値には大きな差が見られないと推測される。しかし、図 10 では、推測のような結果は得られず、特にシミュレーション終盤で安全性に大きな差が現れている。終盤になると、避難完了エージェント数の増加によって安全性を示す値 S (式 1) の $n_u(t)$ の値が小さくなり、基準幅以上の経路を通行しているエージェント数 $n_w(t)$ の安全性に与える影響が大きくなる。言い換えれば、終盤での安全性の値が大幅に異なっても、影響を与え

るエージェント数は少数である。したがって、シミュレーション終盤における安全性の大きな差は安全性全体の比較の際に考慮しないと判断する。以上より、動的な経路指示をエージェントに与えることで、特に避難の効率性の面で優れた避難誘導が可能であることが分かる。

実験 5 から、広域情報取得の場合は局所情報取得の場合に比べ効率性の高い避難が実現できることが分かる。広域混雑情報を利用した場合は目的地付近の混雑状況まで考慮して経路を指示することができるので、複数の経路から目的地に流入しやすく、目的地付近での混雑による待機が解消されている。また、広域混雑情報を利用した方が距離的に離れている位置からも目的地の混雑緩和を考慮することが可能である。したがって、広域混雑情報を利用した方が効率性の高い避難が実現できる。

実験結果を二つの観点から評価・考察した結果、モンテカルロ法による決定位置に経路指示パネルを設置し、経路指示パネルが表示する広域混雑情報に基づいた動的な経路指示に基づいて避難者が避難行動をとることにより、効率性・安全性の面で優れた避難行動を実現できることが確認できた。

4. むすび

本稿では、災害時の避難支援として経路指示パネルを用いた避難誘導を提案し、避難行動システムを構築して指示パネル設置による避難行動を計算機シミュレーションで分析・評価した。その結果、経路指示パネルを設置することにより、効率性や安全性から見た避難行動を評価できただけでなく、パネルの設置場所及び経路指示に必要な情報の取得範囲の変化によって避難行動を改善できることを明らかにした。具体的には、モンテカルロ法による手法で決定したエージェントの延べ通行回数が多いノードにパネルを設置した方が、人間の判断で設置した場合と比較して、優れた避難行動が実現できた。また、一定の経路のみを指示する静的な経路指示に比べ、動的な経路指示の方が優れた避難行動が実現できた。さらに、提示する経路情報は広域の混雑情報に基づいた方が局所的な混雑情報に基づいた場合と比較して、優れた避難行動が実現できた。

本稿によって明らかになった結果は、実際の避難支援に役立てることができると考えている。災害対策用自動販売機 [7]、ITDP(災害時情報電子掲示板) [8] に代表されるような避難情報を提供する端末を路上に設置する活動も広がりつつあり、また店舗の電光掲示板等を災害時の情報提供に利用する活動も出てきている。本システムを用いてシミュレーションし、パネル設置位置を決定することで、端末を設置する際や、避難時に誘導員を派遣する際に参考となる。また、経路指示パネルを設置しない場合でも特にビジネス街等、さほど土地勘のない人が生活する地区上で避難時にどの交差点、経路がよく通行するのかをシミュレーションで算出する際にも有効である。

今後の課題として、エージェントの行動アルゴリズム及びパネル指示内容の拡張が必要である。行動アルゴリズムについては、今回は歩行速度を一定とし、また年齢別によるアルゴリズムの変化等は考慮しなかった。より厳密に設置位置を決定するためには行動アルゴリズムを拡張し、多様化すべきである。パ

ネル指示内容についても、今回は混雑情報から次に進むべき経路のみの指示内容としたが、混雑情報を基にした目的地までの最短経路を指示内容に付加し、また複数の目的地が存在した場合に動的に目的地を変化させることに対応した指示内容を付加すべきである。これらの課題を解決することで、より厳密なシミュレーションをが可能となり、優れた避難行動支援が実現できる。

謝 辞

本研究の一部は、名古屋大学情報系 COE:「社会情報基盤のための音声・映像の知的統合」の支援による。ここに記して感謝の意を表す。

文 献

- [1] 仲谷 善雄, “大規模災害に対する減災情報システム (前編)”, 情報処理, Vol.45, No.11, pp.1164-1174(2004).
- [2] 仲谷 善雄, “大規模災害に対する減災情報システム (後編)”, 情報処理, Vol.45, No.12, pp.1255-1265(2004).
- [3] 杉万 俊夫, “避難誘導法のアクションリサーチ; 自然災害の行動科学”, 応用心理学講座, Vol.3, pp.110-122(1988).
- [4] 石田 亨, 他 2 名, “デジタルシティにおける危機管理シミュレーション”, システム制御情報学会誌, Vol.46, No.9, pp.524-531(2002).
- [5] 新井 健, 他 2 名, “災害弱者を考慮したマルチエージェント避難シミュレーションモデル”, 第 3 回 KKMAS コンペティション論文集 pp.117-125(2003).
- [6] 鏡味 洋史, “積雪寒冷地における震災対応マルチエージェントシステム”, 大都市大震災軽減化特別プロジェクト 成果報告書 3-1, pp.79-108(2003).
- [7] 千代田区総合ホームページ内「防災情報」
<http://www.city.chiyoda.tokyo.jp/dp/hanbaiki/hanbaiki.htm> .
- [8] 株式会社 ソリッドアライアンス ホームページ内「製品一覧」
<http://www.solidalliance.com/products/ITDP.html> .
- [9] 能島 暢呂, “地震時における道路網の機能評価法の開発とその活用について”, 関西大学学術フロンティアセンター講演会資料 (2000).
- [10] 塚口博司, 他 2 名 “阪神・淡路大震災における道路閉塞状況に関する研究”, 国際交通安全学会誌, Vol.22, No.2, p.26(1996).
- [11] 郷内 吉瑞, 他 4 名, “歴史的市街地における住民参加型防災まちづくりのための災害危険度測定手法の検討”, 日本建築学会東海支部研究報告集第 41 号, pp.769-772(2003).
- [12] 服部 正太, 他 2 名, “遊園地における混雑情報と入場者の行動”, 構造計画研究所ワーキングペーパー No.12(2000).
- [13] 松本市公式ホームページ内「安全な避難」
<http://www.city.matsumoto.nagano.jp/bosai/bosai/bousaikaanzenhinan/index.html> .