

災害時における避難者流量の最適化

向 直人[†] 渡邊 豊英[†]

[†] 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 名古屋市千種区不老町
E-mail: †{naoto,watanabe}@watanabe.ss.is.nagoya-u.ac.jp

あらまし 近年、東海大地震などの大規模な災害が予測される中、情報技術を活用した災害対策、または、シミュレーションによる避難指針の構築が進められている。本稿では、災害時における避難者の利己的な振舞を前提として、避難者を安全な領域まで迅速に誘導するための、避難経路における避難者流量の最適化について検討する。災害などの危機的状況においては、避難者は他者より自身を優先する行動を選択する傾向が強い。さらに、パニック状態に陥ることから避難の指示に正確に従うことは難しい。この利己的な振舞は、渋滞による遅延の原因となり、期待避難時間の増加を招く可能性がある。そこで、避難者個別に避難経路を指示するのではなく、通路を封鎖することによって避難者流量を制御し、期待避難時間を向上させることを試みる。この通路封鎖を決定する問題は、NP 困難な組合せ最適化問題であり、短時間での最適解の導出は困難である。本稿では、強欲的なアルゴリズムを用いて解を導出し、シミュレーションによって、統計的に最適化の効果を評価する。

キーワード 災害救助システム, エージェント・シミュレーション, 利己的経路選択, 流量制御

Optimization for Refugee Flow Volume in Disaster Situation

Naoto MUKAI[†] and Toyohide WATANABE[†]

[†] Department of Systems and Social Informatics, Graduate School of Information Science,
Nagoya University Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya, 464-8603, Japan
E-mail: †{naoto,watanabe}@watanabe.ss.is.nagoya-u.ac.jp

Abstract Recently, rescue planning systems based on information technologies have been developed in anticipation of huge disasters such as Tokai big earthquake. In this paper, we consider an optimization problem of refugee flow volume to navigate refugees into safe places as early as possible on an assumption that refugees are selfish in disaster situations. It is obvious that people give priority themselves over other people in disaster situations. Such selfish behavior of refugees is one of the causes of traffic jams and has a negative effect on the escape time for all people. Therefore, we try to control the amount of refugee flow volume by closing the paths in disaster areas to avoid the negative effects. It is difficult to find the optimum solution of this problem within a short calculation time. Thus, we propose a greedy search algorithm to find a near-optimum solution, and evaluate the statistical effect of the volume control by computer simulation.

Key words Rescue System, Agent Simulation, Selfish Routing, Flow Volume Control

1. はじめに

近年、最先端の情報技術を活用した災害対策の研究が様々な分野から進められている。これらの研究の目的は、「情報の配信・共有」と「救助計画の最適化」に大別できる。例えば、「情報の配信・共有」を目的とした研究として、携帯端末等の無線機器を利用したアドホック・ネットワークによる災害救助情報システム [7] が挙げられる。このシステムでは、通信インフラを必要としないため、災害時においても、効率的な情報の配信・共有が可能となる。この他にも、無線タグ (RF-ID) に災害救援に関

する情報を蓄積し、救助活動時に利用する方法も検討されている [10]。一方、「救助計画の最適化」を目的とした研究として、災害の計算機シミュレーションから避難指針を獲得する試みがなされている [9], [11]。これらの研究では、被災者に見立てたマルチエージェントを仮想都市に配置し、災害をシミュレーションすることで、効果的な救助計画の構築を目指している。また、年齢や障害の異なる被災者に対してアンケートを実施することで、被災者の特徴を考慮した避難行動モデルの構築が進められている [5], [8]。

本稿では、後者の「救助計画の最適化」を目的とし、被災地が

ら効率的に避難するための誘導手法について検討する。本手法の特徴は、災害時における避難者の利己的な群衆心理を考慮することにある。災害などの危機的状況においては、一刻も早く危険な領域から脱出するために、避難者は他者より自身を優先して行動を選択する傾向が強い。さらに、パニック状態に陥ることから、音声ガイダンスや情報掲示板による避難行動の指示に正確に従うことは難しい。この避難者の利己的な振舞は、渋滞による遅延の原因となり、避難者全体にとって悪影響を及ぼす可能性がある。そこで、避難者に対して具体的な指示を与えるのではなく、「避難環境」そのものを「変化」させることで、避難効率を改善することを試みる。ここでの「避難環境」とは、安全な地域に脱出するための避難通路のネットワークを意味する。また、「変化」とは、避難通路の開閉（シャッター等による通行制御）を意味する。避難通路の開閉により、避難者の流量を制御することで、避難者全体の避難時間を改善することが可能である。

この理論は、通信ネットワーク等の分野で議論されている「Selfish Routing」と呼ばれる概念により裏付けられる[2]~[4]。この概念は、あるシステムにおける「資源」を複数の「利用者」が共有しているとき、利用者が利己的に資源を選択すると、システムの最適なパフォーマンスが得られなくなることを表している。また、このような資源共有のシステムにおいて、利用者の選択肢を増やすことによって、却ってパフォーマンスの低下を招く可能性があることも示唆されており、この現象は「Braess's Paradox」と呼ばれる。本稿において、「資源」とは、「避難通路ネットワーク」を意味する。また、「利用者」とは、「避難者」を意味し、避難者の利己的な経路選択によって渋滞による遅延（ボトルネック）が発生することを想定する。

これまでに、我々は[6]において、前述したような利己的な避難者のモデルを構築し、単純な避難通路のネットワーク（通路の組合せは 3×3 、 3×2 、 2×3 の3パターン）を用いて、シミュレーション実験を実施した。この実験結果から、避難通路のネットワーク・トポロジーを変化させることで、避難路における渋滞による遅延（ボトルネック）の影響を回避することができることを確認した。本稿では、閉鎖通路発見の問題を、NP困難な組合せ最適化問題として捉え、強欲的なアルゴリズムを用いて近似解を導出することを試みる。さらに、計算機シミュレーションにより、より複雑なネットワーク・トポロジー環境における、最適化の効果を統計的な側面から評価する。

本稿の構成は以下である。2章では、本手法の基礎理論となる「Selfish Routing」と「Braess's Paradox」について具体例を挙げて説明する。3章では、本稿における、災害環境や避難者のモデルについて形式的に表現する。4章では、強欲的なアルゴリズムによる避難者流量の最適化について述べる。5章では、シミュレーション実験の結果から、本手法の効果や特徴について考察する。最後に、6章で、本研究をまとめ、今後の課題を述べる。

2. 避難者の利己性と遅延

本手法の基礎理論となる「Selfish Routing」と「Braess's

Paradox」に関して具体例を挙げて述べる。これらの理論は、通信ネットワーク等の分野で議論されており、トポロジカルな通信ネットワーク環境におけるパケット送信を想定している。また、この理論により、パケット送信者が利己的に通信経路を選択することにより遅延が発生し、通信ネットワーク全体のパフォーマンスが低下する可能性があることが示される。ここでは、通信ネットワーク環境を「避難通路ネットワーク」、パケット送信者を「避難者」と置き換え述べる。

2.1 Selfish Routing

最初に、「Selfish Routing」について述べる。図1は、避難通路ネットワークを表している。ネットワークには、ノード S と D が存在し、ノード間には2つのリンク（通路）が設置されている。避難者集合 R は、 S から D までの最短時間での移動（避難）を目的とする。また、避難者 i は D に到達するための2通りの通路選択肢から、自由に通路を選択することができる。このとき、各避難者が上方の通路を選択する確率を p 、下方の通路を選択する確率を $1-p$ とする。さらに、避難者 i の避難時間 d_i を、上方の通路を選択したとき p 、下方の通路を選択したとき 1 とする（つまり選択確率と避難時間は比例すると仮定する）。避難時間 d_i が p であるとは、多くの避難者が上方の通路を通行すると、その割合に応じて渋滞が発生し、遅延時間が大きくなることを意味する。一方、避難時間 d_i が 1 であるとは、通路における避難者の人数に関係なく、常に避難時間の期待値が一定であることを意味する。つまり、上方の通路は、目的地までの距離は短い、通路の幅が狭いため多くの避難者が通行すると渋滞が発生する。一方、下方の通路は、目的地までの距離は長い、通路の幅が広く渋滞の発生は考慮しなくてもよい。

このような環境において、期待避難時間 E が最適となる避難者の選択確率 p について考える。期待避難時間 E は、式(1)に示すように、避難者が S から D に到達するまでの移動時間の平均とする。期待避難時間 E が最適となるのは、選択確率 p が0.5のときであり、期待避難時間 E は0.75である。つまり、避難者の半数が上方の通路、残り半数が下方の通路を選択するとき、期待避難時間 E は最適となる。しかし、ここで注目すべきは、上方の通路を選択した避難者と、下方の通路を選択した避難者との避難時間の差である。上方の通路を選択した避難者の期待避難時間は $0.5 \times 0.5 = 0.25$ 、下方の通路を選択した避難者の期待避難時間は $0.5 \times 1.0 = 0.5$ となる。これは、避難者間で避難時間の優劣が発生していることを意味しており、下方の通路を選択した避難者は、他の避難者に取って良い通路を譲ったことになる。つまり、避難者集合 R は、利他的な集団であるとみなすことができる。しかし、災害が発生した危機的状況において、避難者集合 R が利他的であるとは考えにくい。

次に、期待避難時間 E が全避難者にとって平等となる避難者の選択確率 p について考える。期待避難時間 E が平等となるのは、選択確率 p が1.0のときであり、期待避難時間 E は1.0である。これは、この均衡を崩し下方の通路を選択することは自身にとって不利になることを意味している。つまり、避難者集合 R は、利己的な集団であるとみなすことができる。結果的に、期待避難時間 E は、全ての避難者が下方の通路を選択したとき

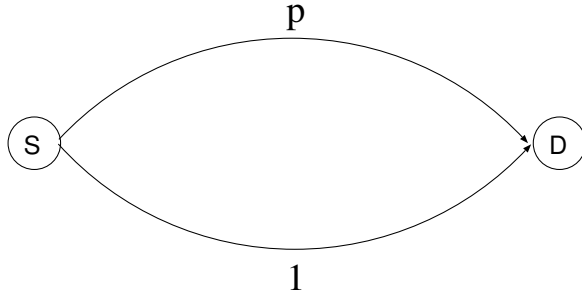


図1 利己的な経路選択
Fig.1 Selfish routing

と等しくなってしまう。本稿で対象とする災害時の避難においては、後者の利己的な避難者集合 R を想定する。

$$E = \sum_{i \in R} \frac{d_i}{|R|} \quad (1)$$

2.2 Braess's Paradox

次に、前述の「Selfish Routing」を基礎理論として、「Braess's Paradox」について述べる。図2、図3は避難通路ネットワークを表し、4つのノード S, A, B, D が存在する。避難者集合 R は、 S から D までの最短時間での移動（避難）を目的とする。また、避難者集合 R は、前述に示したような、利己的な集団であると仮定する。

最初に、図2の避難通路ネットワークにおける、期待避難時間 E について考える。この避難通路ネットワークにおいて、 D に到達するためには、2通りの経路選択肢 ($S \rightarrow A \rightarrow D$, $S \rightarrow B \rightarrow D$) が存在する。避難者 i は、これらの経路から、自由に経路を選択することができる。また、 $S \rightarrow A$ を選択する確率を p , $S \rightarrow B$ を選択する確率を $1-p$ とする。さらに、 $S \rightarrow A$ の避難時間を p , $A \rightarrow D$ の避難時間を 1 , $S \rightarrow B$ の避難時間を 1 , $B \rightarrow D$ の避難時間を $1-p$ とする。このとき、期待避難時間 E が全避難者にとって平等となるのは、選択確率 p が 0.5 のときであり、期待避難時間 E は 1.5 である。つまり、避難者の半数が $S \rightarrow A \rightarrow D$, 残り半数が $S \rightarrow B \rightarrow D$ を選択するとき、期待避難時間 E は平等となる。また、この状態は、この環境における最適状態でもある。

次に、図3の避難通路ネットワークにおける、期待避難時間 E について考える。図3の避難通路ネットワークは、図2の避難通路ネットワークに、経路選択肢 $S \rightarrow A \rightarrow B \rightarrow D$ を新しく追加した形状である。また、 $A \rightarrow D$ を選択する確率を q , $A \rightarrow B$ を選択する確率を $1-q$ とする。また、 $A \rightarrow B$ の遅延時間を 0 とすると、必然的に、 $B \rightarrow D$ の遅延時間は、 $(1-p) + p(1-q)$ となる。このとき、期待避難時間 E が全避難者にとって平等となるのは、選択確率 p が 1.0 , かつ、選択確率 q が 0 のときであり、期待避難時間 E は 2.0 である。つまり、全ての避難者が $S \rightarrow A \rightarrow B \rightarrow D$ を選択するとき、期待避難時間 E は平等となる。図3における期待避難時間 E が、図2における期待避難時間 E よりも大きいことから、この状態が最適状態ではないことは明らかである。

この結果は、避難者集団 R が利己的であると仮定したとき、

避難者に多くの経路選択肢を与えたとしても、必ずしも期待避難時間 E を向上させるとは限らないことを示唆している。豊富な選択肢が却って効率を低下させるという事実が、一見矛盾してみえることから、この現象は逆説的 (Paradox) であると言われる。

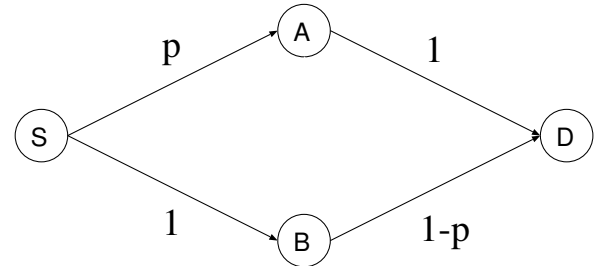


図2 2つの経路選択肢
Fig.2 Two options of routing

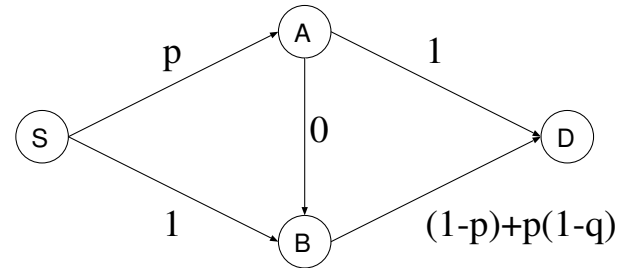


図3 3つの経路選択肢
Fig.3 Three options of routing

2.3 避難者流量の制御

本稿では、前述の「Selfish Routing」と「Braess's Paradox」の概念に基づき、避難者に対して具体的な指示を与えることなく、避難通路ネットワークのトポロジーを変化させることで、期待避難時間を改善する手法を提案する。つまり、避難通路ネットワークから、パラドックスを引き起こしボトルネックとなっている通路（図3における通路 $A \rightarrow B$ ）を発見し、その通路を封鎖（シャッター等による通行制御）することで、避難者流量を制御する。前述のように、災害発生時には、避難者はパニック状態に陥ることから、音声ガイダンスや情報掲示板による避難行動の指示に従うことは困難であると想定できる。このことから、本手法は災害発生時において有効な手段となりえると考えられる。ボトルネックとなる通路は、避難者の位置や人数に依存することから、あらかじめ決めておくことは不可能である。そこで、避難者の位置を常に監視しておき、災害発生直後に、ボトルネックとなる通路を判断する必要がある。本稿では、この閉鎖通路発見を組合せ最適化問題として捉え、強欲的なアルゴリズムを用いて近似解を導出することを試みる。アルゴリズムの詳細は4章で述べる。

3. シミュレーション・モデル

本章では、災害環境や避難者行動の形式的なモデルについて

述べる。我々は、これまでに、Adriana らの群衆モデル[1]に基づき、[6]において格子状平面におけるシミュレーション・モデルを提案した。本稿では、そのモデルを基に、環境をネットワーク構造とみなしたシミュレーション・モデルを提案する。6章では、このモデルを用いたシミュレーション実験の結果を報告する。

3.1 環境

避難者が行動する環境 Env を、式 (2) に示すように、ノード集合 N 、リンク集合 L 、脱出口集合 E で構成される、平面空間上のネットワーク構造として与える。ノード n は平面空間上の閉じられた部屋を表し、リンク l はノード間を結ぶ通路を表す。また、リンク l は、ノード間を直線で結ぶように配置し、ノードに重なるような配置はしない。さらに、リンク l は、シャッターによる通行制御が可能であるとし、その状態 $s(l)$ は、0(開)または1(閉)のどちらかで与える。リンクの状態集合は $s(L)$ で表現し、式 (3) で与える。脱出口 e は、災害発生時における避難者の目的地であり、部屋内に配置する。図4に示すように、ノード、リンク、脱出口のいずれの形状も矩形で表現する。Adriana らのシミュレーション・モデルでは、環境内における火災やガス漏れ等の災害の広がりや考慮し、避難者の行動に制限を付加した。本モデルでは、これらの影響は考慮せず、避難者の利己的通路選択による遅延のみを評価対象とする。

$$\begin{cases} Env = (N, L, E) \\ N = \{n_1, n_2, \dots, n_h\} \\ L = \{l(n, n') | n, n' \in N\} \\ E = \{e_1, e_2, \dots, e_k\} \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} s(L) = \{s(l_1), s(l_2), \dots\} \\ s(l) = 0 \wedge 1 \end{cases} \quad (3)$$

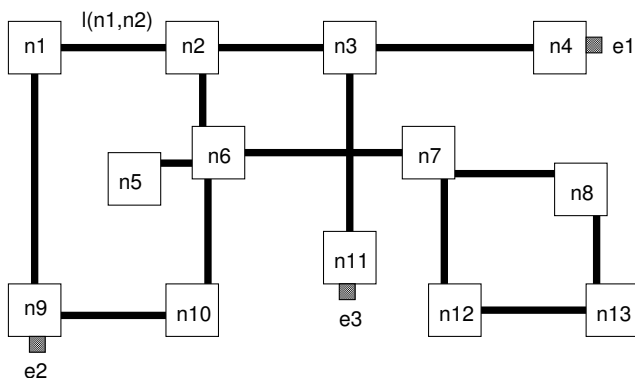


図4 避難通路ネットワーク
Fig. 4 Escape route network

3.2 避難者

避難者を a で表現し、その集合を式 (4) で与える。初期状態として、避難者 a は環境 Env 内のいずれかの位置にランダムに配置される。災害が発生すると、避難者は、現在地から最短距離

にある脱出口 e に向けて避難を開始する。災害発生時に、避難者が、他の避難者の位置や人数を、瞬時に把握することは困難であると考えられるため、渋滞に因る遅延の影響とは無関係に、あくまで最短距離となる脱出口までの経路を選択すると仮定する。また、避難者は、渋滞による遅延がなければ、等加速度直線運動に従って移動すると仮定する。そこで、避難者 a_j のパラメータとして、加速度 α_j 、利己性 w_j を定義する。加速度 α_j は、避難者が本質的に備える運動能力を表し、利己性 w_j は、渋滞によって引き起こされる遅延の大きさの重み係数を表す。ここで、 $a_j(t)$ は時刻 t における避難者 a_j の位置、 $v_j(t)$ は時刻 t における避難者 a_j の速度を表す。

$$\begin{cases} A = \{a_1, a_2, \dots, a_m\} \\ a_j(t+1) = a_j(t) + v_j(t) \\ v_j(t+1) = v_j(t) + \alpha_j \end{cases} \quad (4)$$

次に、渋滞による遅延のモデルを、図5を用いて説明する。図中において、避難者 a_1, a_2 は、それぞれ、加速度 α_1, α_2 で、避難口に向かって進行している。このとき、避難者間の距離 $dist(a_1, a_2)$ が小さく、かつ、避難者の進行方向が等しいほど、遅延が大きくなるように、避難者の進行方向とは逆向きの加速度を付与する。避難者 a_1 は、避難者 a_2 の加速度を同方向に分解したときの加速度の大きさ $\alpha_2 \cos(\theta)$ を引数として、式 (5) で与えられる関数 $f(x)$ によって計算された大きさの逆向きの加速度を受ける。関数 $f(x)$ は、逆向きの加速度の大きさが、避難者 a_2 の利己性 w_2 に比例し、避難者間の距離 $dist(a_1, a_2)$ に反比例することを表している。よって、多くの避難者が、同時に通路を通過しようとする、必然的に避難者間の距離が小さく、かつ、進行方向が等しくなるため、遅延が大きくなる。結果的に、これは通路における渋滞の発生を意味する。

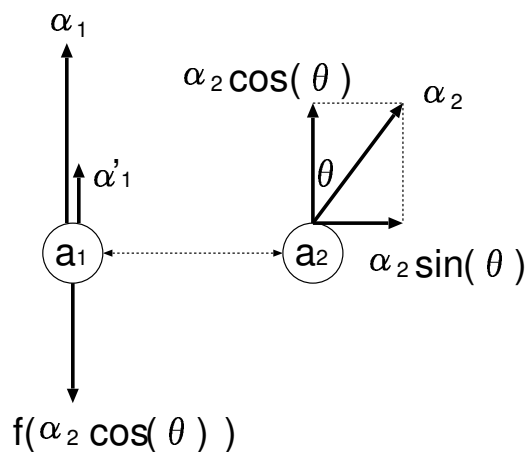


図5 渋滞に因る遅延
Fig. 5 Delay caused by traffic jam

$$f(x) = \frac{w_2 \times x}{dist(a_1, a_2)^2} \quad (5)$$

4. 避難者流量の最適化

本章では、前節で述べた避難環境モデルにおいて、ボトルネックとなっている通路を発見するためのアルゴリズムについて述べる。閉鎖通路発見は、NP 困難な組合せ最適化問題であるため、全組合せを探索し最適解を発見するのは現実的な手段ではない。そこで、強欲的なアルゴリズムを用いて、近似解を短時間で導出することを試みる。

4.1 組合せ最適化問題

閉鎖通路発見は、組合せ最適化問題とみなすことができる。この問題における、目的関数は、期待避難時間 E の最小化である、また、問題空間における状態はリンクの状態集合 $s(L)$ で表され、その状態数は、全組合せから全通路を閉鎖するパターンを除いた $2^{|L|} - 1$ である (計算オーダーは $O(2^{|L|})$)。しかし、通路の封鎖数を増やし過ぎると、期待避難時間 E が増加することは明らかであるため、実際に探索すべき状態数は $2^{|L|} - 1$ よりも少ないと考えられる。また、通路の封鎖により、避難者が脱出口まで辿り着くことが不可能になるパターン (例、避難口を含む部屋への通路全てを封鎖) は、避難者の位置や人数に関係なく既知であるため、このパターンも事前に取り除くことができる。しかし、通路封鎖によって得られる効用は、「避難者流量を分散させることによる遅延時間の減少」と、「迂回経路を通行することによる移動時間の増加」のトレード・オフにより決まる。このため、可能性が残された全ての状態空間を探索しなければ、最適な状態を発見することは困難である。そこで、近似解を発見するための、探索アルゴリズムが必要となる。

4.2 強欲的なアルゴリズム

閉鎖通路を発見するための探索アルゴリズムの疑似コードを図 6 に示す。本アルゴリズムは、強欲的に目的関数である期待避難時間 E を改善するように作用するため、最適解を発見する保証はない。また、本アルゴリズムの計算オーダーは、最小で $O(|L|)$ 、最大で $O(|L|^2)$ である。詳細を以下に示す。まず、リンク集合 L から、ランダムに 1 つのリンク $l(n, n')$ を選択し、リンク集合 L からリンク $l(n, n')$ を削除 (閉鎖) したリンク集合 L' を生成する。このとき、避難者が避難口まで到達することが不可能になるようなリンクは削除しない。次に、リンク集合 L' において、避難者が現在位置から脱出口に到達するまでの、期待避難時間 E を計算する。ここで、避難者の現在位置は、監視カメラの情報から、常に取得可能であると仮定する (環境内にゲートを設置し、避難者の通過人数をカウントすることで、おおまかな現在位置を予測する方法も考えられる)。この処理を、全てのリンクに対して適用し、期待避難時間 E が最小となるリンク集合 L^* を探索する。リンク集合 L より、リンク集合 L^* の期待避難時間 E が小さいなら、リンク集合 L^* を引数として再帰処理を行う。結果的に、本アルゴリズムは、ボトルネックの大きい通路から順に、改善がなくなるまで通路の削除を繰り返すことになる。

5. 実験

本章では、提案モデルを用いたシミュレーション実験の結果

```
search (L, A){ // L: リンク集合, A: 避難者集合
  E* = time (L, A) // 期待避難時間の計算
  L* = L
  WHILE l(n, n') IN L DO
    L' = L - l(n, n') // リンクの削除
    E = time (L', A) // 期待避難時間の計算
    IF E < E* THEN // E*: 期待避難時間の最小値
      E* = E
      L* = L'
    END
  IF L* != L THEN
    search (L*, A) // 再帰処理
  END
END
}
```

図 6 探索アルゴリズムの疑似コード

Fig. 6 Pseudo-code of search algorithm

について報告し、閉鎖通路発見アルゴリズムによるボトルネック回避の効果について考察する。

5.1 環境設定

環境として、図 7 に示すような、平面空間 (幅 800, 高さ 400) 上に、ランダムに構成した避難通路ネットワーク (ノード数 $|N|=30$, リンク数 $|L|=20$, 避難口数 $|E|=3$) を配置した。それぞれのパターンに対して、10 回のシミュレーションを行い、その平均値を評価値とした。また、各シミュレーションにおいて、避難者の初期位置はランダムに変更した。実験の評価項目として、「影響避難者数」、「改善避難時間」を設けた。「影響避難者数」は、最適化によって避難時間が変化した避難者の人数である。「改善避難時間」は、最適化によって変化した避難時間の減少値 (増加値) である。避難者数 $|A|$ を、10 から 190 に、30 刻みで変化させた。実験で使用したパラメータを表 1 にまとめる。

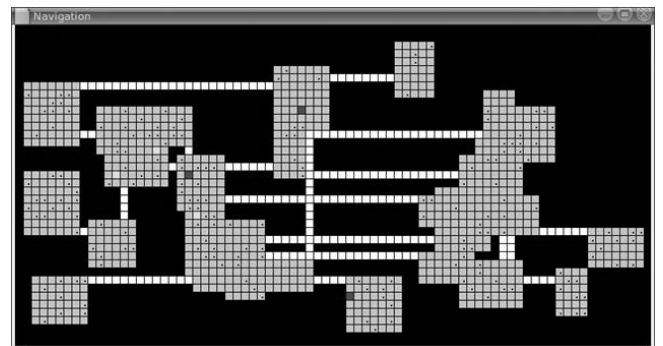


図 7 環境

Fig. 7 Environment

5.2 実験結果

図 8 は、最適化によって避難時間が変化した避難者の人数を示している。実線は、避難時間が減少した避難者数、一方、破線は、避難時間が増加した避難者数である。結果から、避難者数の増加と共に、避難時間が変化する避難者が増加している事がわかる。これは、避難者数が多いほど、通路における遅延が発生しやすく、広範囲で最適化による渋滞の回避の効果が得られた事

表 1 パラメータ設定
Table 1 Parameter setting

幅	800	避難者数 $ A $	10 - 200
高さ	400	利己性 w	0.1
ノード数 $ N $	30	加速度 α	0.5
リンク数 $ L $	20	最高速度	2
避難口数 $ E $	3	最低速度	1

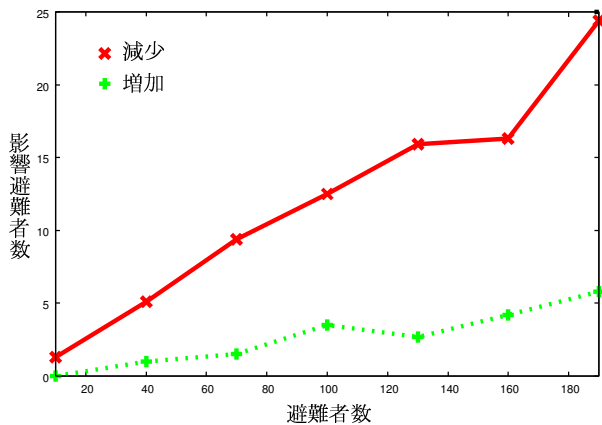


図 8 影響避難者数

Fig. 8 Number of affected evacuees

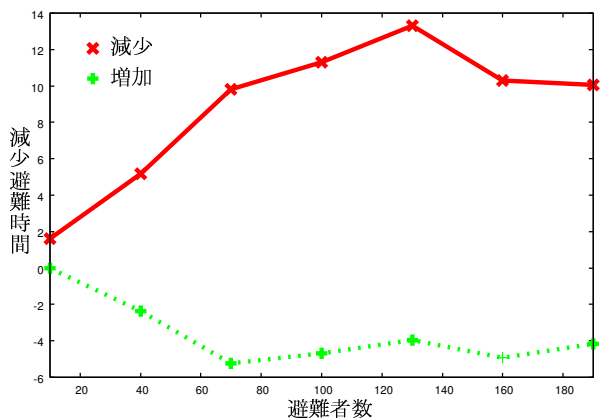


図 9 改善避難時間

Fig. 9 Improved escape time

が理由である。また、本手法による効果は避難者間のトレードオフ関係で成り立っている事がわかる。つまり、通路を封鎖する事によって渋滞を回避することで、避難時間が減少する避難者の割合が増加する一方で、避難路の迂回を余儀なくされ避難時間が増加してしまう避難者も発生してしまう。この影響を小さくするには、災害発生と同時に通路を封鎖するのではなく、避難開始後に避難者全体の状況に応じて、通路を開閉するといった工夫が必要になると考えられる。

図 9 は、最適化によって変化した避難時間の減少値 (増加値) を示している。実線は、避難時間の減少値、一方、破線は、避難時間の増加値である。結果から、避難者が少ないときは避難時間への影響はほとんどないが、避難者数の増加と共に値が増加し、避難者数が約 80 を越えたところで値の増加が停止している事がわかる。これは、本実験では避難者の速度に最小値を設定した事が理由であると考えられる。つまり、避難者数が増加するにつれ、遅延の原因となる渋滞箇所も増加するが、渋滞による遅延量は一定値で増加が止まる。今後、より現実的な避難者モデルを構築することで、この問題を解決したい。

6. まとめ

本稿では、近年研究が盛んな情報技術を活用した災害対策分野に着目し、避難者の利己性を前提とした避難誘導手法を提案した。一般に、災害時には、避難者はパニックに陥るため、避難誘導の指示に正確に従うことは困難であると考えられる。そこで、従来のように個々の避難者に対して指示を与えるのではなく、避難環境を変化させることで、避難者の期待避難時間を改善することを目的とした。まず、利己的な集団を仮定したとき、避難者に多くの選択肢を与えることが却って避難効率を低下させる可能性があることを示した。我々は、この理論を基に、避難通路ネットワークからボトルネックとなっている通路を敢えて閉鎖することによって、避難者の通路における流量を制御し、避難者の期待避難時間を改善することを試みた。閉鎖通路を発見する処理を組合せ最適化問題とみなし、強欲的なアルゴリズムを用いて短時間で近似解を導出する方法を示した。シミュレーション実験により、本手法は、渋滞による遅延を回避し、避難者の期待避難時間を減少させる効果があることを明らかにした。しかし、本手法の効用は、避難通路ネットワークのトポロジーや避難者の位置といった環境パラメータに依存して上限が決まってしまう。また、その効用は避難者間で分散されてしまうことも明らかとなった。

今後の課題として、提案した探索アルゴリズムを改善する必要がある。提案アルゴリズムは、強欲的に近似解を発見するため、その解の最適性は高くない。このため、計算量を低く抑えながら、より高い最適性を保証するアルゴリズムが必要であると考えられる。また、本稿では、災害発生時における避難者の位置は完全に特定可能であることを前提としていた。しかし、実際の場合において、避難者の位置を正確に特定することは難しいと考えられる。そこで、環境にゲートを配置し避難者の通過人数を把握することで、おおまかな避難者の位置を把握することが現実的な方法の 1 つだと考えられる。また、避難者の集合を

抽象化して捉えるため、計算時間を削減できる可能性も期待できる。最終的には、実環境下で本手法を実験・評価し、避難支援システムとして実用化させることが目標である。

謝辞

御指導頂いた愛知工業大学・石井直宏教授に感謝致します。

文 献

- [1] Adriana Braun, Bardo E. J. Bodmann, and Soraia R. Musse. Simulating virtual crowds in emergency situations. In *Proc. of Virtual Reality Software and Technology (VRST)*, pp. 244–252, 2005.
- [2] E. Koutsoupias and C. H. Papadimitriou. Worst-case equilibria. In *Proceedings of the 16th Annual Symposium on Theoretical Aspects of Computer Science*, pp. 387–396, 1999.
- [3] T. Roughgarden. The price of anarchy is independent of the network topology. In *Proceedings of the 34th ACM Symposium on the Theory of Computing*, pp. 428–437, 2002.
- [4] Tim Roughgarden and Eva Tardos. How bad is selfish routing? In *IEEE Symposium on Foundations of Computer Science*, pp. 93–102, 2000.
- [5] 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, 2003.
- [6] 向直人, 渡邊豊英. 避難者の利己性を前提とした避難経路設定, 2006. 合同エージェントワークショップ&シンポジウム 2006 (JAWS2006).
- [7] 篠田孝祐, 野田五十樹, 國藤進. 人の繋がりを利用したアドホックネットワーク環境を用いた災害時情報支援. マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICOMO 2003) シンポジウム論文集, pp. 45–48, 2003.
- [8] 新井健, 増田浩通, 落合哲郎. 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.
- [9] 石田亨, 中西英之, 高田司郎. 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論文誌, Vol. 46, No. 9, pp. 524–531, 2002.
- [10] 滝澤修, 田中秀磨, 山村明弘. 防災用 rfid のセキュリティ要件に関する考察, 2004. 電子情報通信学会・暗号と情報セキュリティシンポジウム (SCIS2004) 2C5-4.
- [11] 田所諭, 北野宏明, 高橋友一, 松野文俊, 竹内郁雄. Robocup-rescue: 情報科学の緊急災害対応問題への挑戦. 情報処理学会論文誌, Vol. 41, No. 4, pp. 412–418, 2000.