

避難者属性を考慮した被災地におけるDTNを用いた 避難経路推薦方式の提案

三角 真[†] 上山 憲昭[†]

[†] 福岡大学工学部 〒814-0180 福岡県福岡市城南区七隈 8-19-1

E-mail: †{mmisumi,kamiyama}@fukuoka-u.ac.jp

あらまし 災害が発生したとき、避難者が避難を安全かつ迅速に行うためには、避難所の情報と避難経路の情報は必要不可欠である。適切な避難経路の提案には、経路の故障状況の収集が必要となり、それらの情報の獲得には情報通信ネットワークが必要となるものの、大規模災害発生時には通信インフラが使用不可能な状況が想定される。この問題に対して、Delay Tolerant Networkにて、避難者が所有する端末間で通信インフラを用いずに経路の故障状況を収集し、それらの情報を用いた避難経路の提案が先行研究として行われている。しかし先行研究では、全避難者に同様の条件で求めた避難経路を提示するため、避難者の特定の経路への集中によって引き起こされる渋滞が問題となっている。そこで、本研究では避難時の渋滞緩和を目的として、避難経路上に発生した故障箇所において、避難者属性毎に通行の可否を設定し、避難者属性毎に避難経路を求め提示する方式を提案する。提案手法をマルチエージェントシミュレーション (MAS) で数値評価し、避難者属性を考慮していない手法との比較で、避難者の平均移動距離については少なくとも 22% 程度の減少、平均避難時間については少なくとも 44% 程度の減少が確認された。

キーワード Delay Tolerant Network (DTN), 災害時避難経路提案

Evacuation Route Recommendation System by DTN in Disaster Area Using Evacuee Attribute

Makoto MISUMI[†] and Noriaki KAMIYAMA[†]

[†] Faculty of Engineering, Fukuoka University

8-19-1 Nanakuma, Jonan-ku, Fukuoka-city, Fukuoka, 814-0180 Japan

E-mail: †{mmisumi,kamiyama}@fukuoka-u.ac.jp

Abstract Information on evacuation shelters and evacuation routes are important for evacuees to evacuate safely and promptly when a disaster occurs. In order to propose an appropriate evacuation route, it is necessary to gather trouble information, and an information communication network is required to acquire such information. However, when a large-scale disaster occurs, it is assumed that the communication infrastructure can not be used. In response to this problem, there are previous studies on proposing evacuation routes by collecting trouble information between evacuees terminals using Delay Tolerant Network without using communication infrastructure. However, in the previous research, congestion caused by concentrating evacuees on a specific route is a problem. These congestions are caused by presenting evacuation routes similar to all evacuees. Therefore, in this research, we propose a method to set the propriety of traffic for each evacuee attribute in the fault location occurred on the evacuation route for the purpose of alleviating congestion at the time of evacuation and seek evacuation route for each evacuee attribute. We evaluated the proposed method numerically with multi agent simulation (MAS) and compared with a method not considering evacuee attribute. As a result, the proposed method achieves at least 22% reduction in evacuated average distance and at least 44% reduction in average evacuation time.

Key words Delay Tolerant Network (DTN), Evacuation Route Recommendation

1. はじめに

災害が発生したとき被災地内の状況把握や被災者からの救助要請、ならびに、行政からの被災者への避難所や被災地情報の伝達などの通信が発生する。さらに、被災者が安全かつ迅速に避難を行うためには、災害発生前に共有可能な避難所の情報だけでなく、被災地域の道路の故障状況の把握が必要不可欠である。道路の故障状況の情報は災害発生後しか取得できないため、災害発生後に情報を被災地内で収集し、そして被災地内の被災者に対して配布する必要がある。しかし、大規模災害発生時には通信基地局や交換局などの通信設備の損壊や、電源消失によって通信インフラが使用不可能な状況が想定され、[1]の報告にもある通り2011年3月の東日本大震災においては、長時間・広範囲で固定通信網とモバイル通信網が使用不可であった。

通信インフラが使用不可能な状況下において被災地内の被災者間での情報通信を実現する手法として、被災地内の端末間でEnd-to-Endの通信経路を確保するAd-Hockネットワークや[2]、セルラーネットワークにおいて基地局を経由せずに携帯端末間で複数の携帯端末を経由して情報を伝達するマルチホップdevice-to-device (D2D) 通信[3]~[6]の適用が検討されている。また、Delay Tolerant Network (DTN) を用いて被災地内の避難者間で道路の故障状況を交換・共有し適切な避難経路を推薦する研究が行われている[7]~[10]。

しかし避難経路推薦に関する先行研究においては、全避難者に同様の条件で求めた最小コストの避難経路の提示を原因とした避難者の特定の経路への集中によって引き起こされる渋滞発生が問題となっており、[7]では避難者の位置情報を正確に把握することで渋滞状況を把握しその情報もコストに組み入れた避難経路提案手法が提案されている。

そこで本稿では避難時の渋滞緩和を目的として、避難経路上に発生した故障箇所を全避難者に対して一律に通行不能として扱うのではなく、避難者に年齢や性別などで属性を分けて、故障箇所の故障度合いに応じて各属性ごとに通行の可否を設定し避難経路を求め提示する方式を提案する。また提案手法の渋滞削減効果を確認するために提案手法をモデル化し、マルチエージェントシミュレーション(MAS)で評価することで、提案手法と避難者属性を考慮していない手法について避難時間と避難距離にて比較を行う。

以下、2節では関連研究についてまとめ、3節では提案手法について説明し、4節でMASのモデル化とその結果得られた数値評価の結果を示し、5節で全体をまとめる。

2. 関連研究

災害時の避難計画に関する先行研究は[11],[12]などがある。Limらは[11]において、ネットワークフローの問題でハリケーン発生時の最適な避難経路計画を定式化し、最適解を得るアルゴリズムを提案している。また、Horiyamaらは[12]で対象地域内の複数の避難所に対する避難区域の分割と割り当て手法について検討を行っており、地震による火災やビルの倒壊などの被災パターンの事前予測が困難であることから、推測可能な全分割パターンを列挙する方式を提案している。

災害発生時に安全で迅速な避難活動を目的として、通

信インフラが使用不可能な被災地において、被災地内の情報を収集し活用する研究がこれまでも行われている[2],[9],[10],[13]。

[2]では比較的通信端末の構成の変化が小さい環境においてAd-HockネットワークをEnd-to-Endで構築し、避難者の渋滞に考慮し避難経路とタイミングを提示するシステムが提案されている。また、Fujiwaraらは[10]にてEnd-to-Endで通信路を構築できないほど通信環境が劣悪な状況下でもDTNを用いたすれ違い通信にて被災地情報を交換し、避難者へ避難経路を提示するシステムを提案している。さらに、Komatsuらは[8]にて避難者の所有するモバイル端末のGPS機能を利用し、避難者が通行不能箇所遭遇したとき避難者が操作することなく避難者端末が自動的に推定する手法を提案している。それに加えて、Kasaiらは[7]において渋滞の緩和を目的として、避難者の位置情報をGPSを用いて詳細に取得することで、特定の経路上に存在する避難者数から渋滞情報を推定し、渋滞した経路を避けた経路推薦について提案しているものの、経路内のある区間であるエッジの避難者順序を正確に取得する必要がある。

また、[14],[15]では災害時に通信インフラを用いず端末間の通信を行うときの、被災地内の避難者や救助者などの行動の情報伝搬への影響が指摘されている。[14]では災害発生後の救助者の救助活動の動きをモデル化、従来のランダムウェイポイントモデルと比較し、端末間の遅延特性やパケットロス率が異なることを示している。さらに、[15]では、この移動モデルを用い複数のDTNルーティング方式間の性能を比較している。

3. 提案手法

本研究では、避難時の渋滞緩和を目的として、性別や年齢などの避難者属性で通行可能な故障箇所における故障度合いが異なると仮定し、避難者属性毎に異なる経路提示するシステムを提案する。

3.1 避難経路の提示と避難者の行動

図1(a)は、避難者端末が故障箇所の情報を有しておらず、かつ、避難者端末が提示した経路上に存在する故障箇所が、その避難者が通過できないほど故障している状態を表している。図1(a)①において、避難者はシステムが提示した経路1に従って避難を開始する。避難者は②で故障箇所に到達し、故障箇所が自身が通過できないほど故障していると判断し③に示すように迂回行動を取り提示経路1とは異なる経路に進む。提案システムは、GPSを用いて避難者の位置情報をモニタリングしており、④の段階で提示経路1とは異なる経路を避難者が取ったことを検知したシステムが故障箇所を含まない新たな経路2を提示すると同時に、提示経路1と避難者が実際に辿った経路の差から避難者の操作なしに故障箇所情報を得て端末に故障箇所を登録する。避難者は⑤で提示経路2に従って避難し故障箇所を避けて目的地に到達する。なお、端末あらかじめ故障箇所情報を有しており、その故障箇所が避難者が通過できないほど故障しているとシステムが判断したときには、図1(c)に示す通り最初から故障箇所を避けた経路が提示される。

避難者端末が故障箇所情報を有しておらず提示経路に含まれる故障箇所がその避難者にとって通行可能であるとき、または、避難者端末が故障箇所情報を有しており提示経路に含まれる故障箇所がその避難者にとって通行可能であるときは、図1(b)

表 1: 避難者タイプ情報例 (通行可能な故障度合いの上限でソート済)

| 避難者タイプ | 人口割合 (0 ~1.0) | 通行可能な 故障度合いの上限 (0 ~1.0) | 人口割合の 累積値 |
|--------|------------------|-------------------------------|--------------|
| A | 0.4 | 0.8 | 1.0 |
| B | 0.3 | 0.5 | 0.6 |
| C | 0.2 | 0.4 | 0.3 |
| D | 0.1 | 0.2 | 0.1 |

の状況となる。避難者はシステムが提示した経路 1 に従って避難を開始する (①)。避難者は ② で故障箇所 に到達するが、通行可能であると判断し提示経路 1 に従ってそのまま通過する (③)。図 1 (b) の状況において、避難者端末が故障箇所情報を有しているとき、故障箇所を通過したタイミングで避難者数をインクリメントする。

3.2 故障箇所の故障度合いと通行可能確率

提案システムにおいて、故障箇所の故障度合いを用いるが、これらの情報も災害発生後に収集する必要がある。しかし、故障箇所の故障度合いの情報収集において、避難行動時に避難者が故障箇所の故障度合いを適切に判断しスマートフォンなどの端末を操作してその故障度合いを入力する方法も考えられるが、それらの操作は煩雑でありかつ避難行動の妨げとなることから十分な故障度合い情報の収集が行えない可能性がある。そこで、提案システムでは避難者による操作を必要としない次の手順で、故障箇所の故障度合いを推定する。

本システムにおいて避難者端末は事前に、表 1 に示す対象地域における各避難者属性の人口比率と、各属性の避難者が通行可能な故障度合いの上限値を保持している。また、避難者が有する端末には事前に避難者自身の避難者タイプが登録されていることを前提としている。

避難者は故障箇所 に到達したとき、避難者自身が通行可能であると判断すれば故障箇所を通過し、避難者自身が通行できないと判断すれば故障箇所を迂回する行動を取る。この情報を避難者それぞれの端末で記録し、複数の避難者端末間で交換し各端末で集計すると、各故障箇所の通行可能確率が得られる。

図 2 は、表 1 の条件において、各避難者タイプの避難者が通行可能な故障度合いの上限値に従って行動したと仮定したときの、通行可能確率と故障度合いの関係を示したグラフである。例えば、故障箇所を通過した避難者数から求めた通行可能確率が 0.6 であるとする、図 2 にて通行可能確率 0.6 の点を水平方向に見ていくと、故障度合いが 0.5 で表 1 から求めた線と交差する。このように、対象地域の避難者タイプの人口割合と各避難者タイプの故障度合いの上限情報をあらかじめ有していれば、避難時に避難者の端末操作を必要とせず収集可能な通行可能確率から、故障箇所の故障度合いを推定可能となる。

3.3 故障箇所情報の交換と更新

端末 n における故障箇所 x の通行可能確率の推定値 P_{xn} は次式となる。

$$P_{xn} = \frac{C_{xn}}{S_{xn}} \quad (1)$$

ここで、 C_{xn} は故障箇所 x を通過した避難者数であり、 S_{xn} は故障箇所 x に対峙した避難者数である。言い換えると、 S_{xn} は

C_{xn} と故障箇所 x に対峙したときに通行を諦めた避難者の和である。端末 n は、通行可能確率の推定値 P_{xn} と通行可能確率の推定値の導出に用いたサンプル数 S_{xn} を端末内に保持し、また、他の端末とこれらの値を交換する。端末は、すでに故障箇所情報の交換済みの端末集合を $N_{\text{exchanged}}$ として管理している。各端末は定期的に、自身の有している故障箇所情報を送信しており、端末 n が他の端末が送信した故障箇所情報を受信したとき、その情報を送信した端末が $N_{\text{exchanged}}$ に含まれていなければ次の手順で自身の、通行可能確率の推定値 P_{xn} と通行可能確率の推定値の導出に用いたサンプル数 S_{xn} を更新する。ここで、端末 n が端末 n_{peer} から受け取る通行可能確率を $P_{xn_{\text{peer}}}$ 、それを求める時のサンプル数を $S_{xn_{\text{peer}}}$ としたとき、これらの情報交換後の端末 n の P_{xn} と S_{xn} は次式で更新される。

$$P_{xn} \leftarrow \frac{P_{xn}S_{xn} + P_{xn_{\text{peer}}}S_{xn_{\text{peer}}}}{S_{xn} + S_{xn_{\text{peer}}}} \quad (2)$$

$$S_{xn} \leftarrow S_{xn} + S_{xn_{\text{peer}}} \quad (3)$$

端末 n は、情報の交換完了後 n_{peer} を情報交換済みの端末として $N_{\text{exchanged}}$ に追加する。これらの処理を、 $N_{\text{exchanged}}$ に登録されていない端末からの故障箇所情報を受信する度に繰り返すことで、故障箇所情報の交換と更新を行う。

3.4 近隣端末の探索

避難者端末 n において近隣端末の探索は次の手順で行う。避難者端末 n は一定間隔 (t_B) で近隣端末探索ビーコンを送信する。近隣端末探索ビーコンを受信した近隣端末は、それに対する応答を返す。応答を受け取った端末 n は近隣端末探索ビーコンの応答待ち時間 ($t_{B_{\text{wait}}}$) 内に応答を受け取った近隣ノードを自身の通信範囲内に存在する端末群 $N_{\text{in-range}}$ に追加する。

3.5 情報交換済み端末リストの更新

$N_{\text{exchanged}}$ は各端末における情報交換済み端末集合であり、3.3 でも説明したが $N_{\text{exchanged}}$ に登録されている端末は情報交換対象ノード n_{peer} として選出されず、同じ端末と複数回情報の交換は行われない。一方で、度情報を交換した端末であっても、情報交換後に通信範囲外に移動し、一定時間後に再び通信範囲内となったとき、その端末は以前とは異なる故障箇所情報を有している可能性があることから、それらの端末を情報交換対象として扱いたい。そこで、それらを実現するために、次の手順で $N_{\text{exchanged}}$ を更新する。

- $N_{\text{exchanged}}$ の各端末毎に、近隣探索ビーコンの応答を受け取った最終時刻を記録する。
- 近隣探索ビーコンの応答を受け取った最終時刻から、通信範囲外に出た端末の生存時間 $t_{D_{\text{ttl}}}$ 以上経過した端末を、定期的に $N_{\text{exchanged}}$ から削除する。

4. MAS を用いた評価実験

大阪市北区に震災が発生した場合を想定し、震災時に大阪市北区にいた人々が携帯端末を使用しながら自宅や避難所に徒歩で避難する行動をマルチエージェントシミュレーション (MAS) で再現する。そして、避難者属性を考慮しある避難者属性において通行可能な故障箇所については通行可能として提示経路を求める提案手法と、避難者属性を考慮せず一律に故障箇所を通

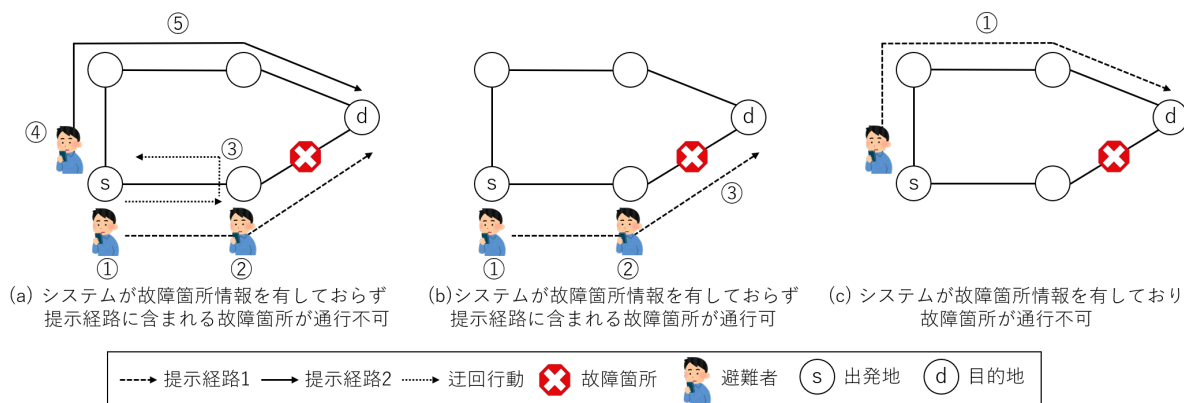


図 1: 提案システムによる避難者への避難経路提示

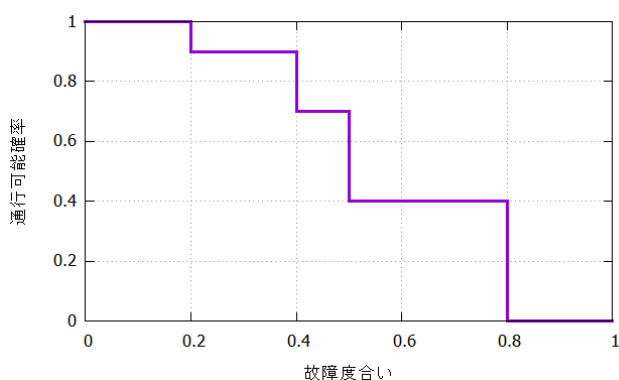


図 2: 通行可能確率と故障度合いの関係

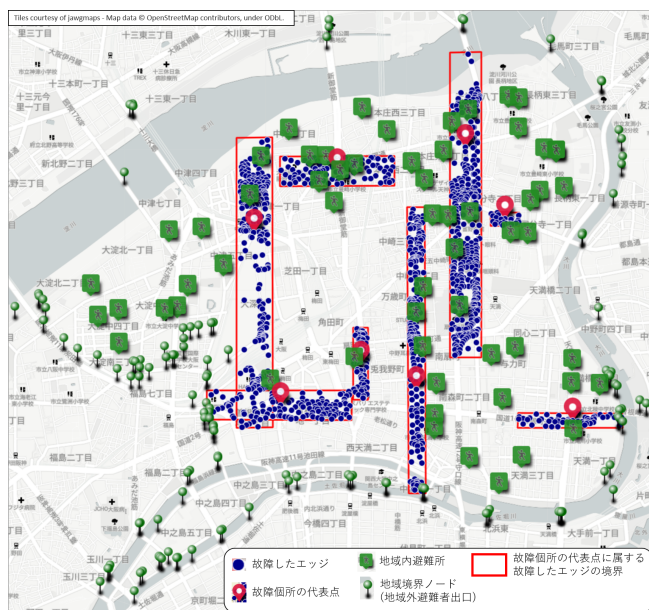


図 3: 故障箇所・地域内避難所・地域境界ノードの位置

行不可能として提示経路を求める手法の結果を示す。

4.1 MAS のモデル

4.1.1 道路と故障箇所設定

道路に関しては、OpenStreetMap [16] で取得可能な道路の位置情報を使用する。OpenStreetMap の大阪市北区エリアには幹線道路 (motorway, trunk 等), 住宅道路 (residential 等), 歩道 (footway 等) や未分類の道路 (unclassified) など、23 種類

の道路 (way) が含まれており、本評価実験では motorway (自動車専用道路) を除く way を使用する。各 way は交差点とカーブ点を有しており、それらの点をノードと定義し、各 way においてノードで分割された各部位をエッジと定義した。なお、短すぎるエッジが生成されないよう、本評価実験においては長さ 10m 以下のエッジについては他のエッジと統合した。

MAS のパラメータとして故障箇所の代表点となる複数のエッジ指定し、それらの各エッジから一定の範囲内に存在するエッジ群をそれぞれ故障箇所とし、それぞれの故障箇所に 0.0~1.0 の故障度合のパラメータを付与する。MAS では、故障エッジはいずれかの故障箇所の代表点に属し、故障箇所の代表点単位で故障箇所が管理される。図 3 の赤いマークが今回設定した故障箇所の代表点を示し、青い丸は故障したエッジを示す。なお、図 3 の赤い矩形は、故障箇所の代表点に属する故障したエッジの境界を示しており、それぞれの故障したエッジは同じ赤い矩形内の故障箇所の代表点に属する。故障箇所は MAS 開始時に発生させ、MAS の終了まで故障箇所の位置や故障度合いは変化しない。

4.1.2 避難所と避難者初期配置

本評価実験では、避難者の人数をノードとエッジで、移動速度をエッジで管理する。各ノードが所属する町丁については、国土地理院が公開している各町丁の代表点座標に対して最も距離に近い町丁に属することとした。避難所については、大阪市の Web サイトで公開されている 60 の避難所の位置座標から最も距離に近い way を構成するノードの座標を避難場所の位置として使用する。図 3 の緑色の四角い吹出しがこれらの避難所を示している。また、大阪市北区と他の地域の境界となる 122 箇所のノードを地域境界ノードとして抽出し地域外避難者出口の候補とする。図 3 に緑色のピンでこれらの地域境界ノードを示す。さらに、大阪府が公開している国勢調査の各町丁単位の昼間人口と夜間人口を被災者と見なし、大阪市北区ではマンションやオフィスなど耐震強度の高い安全の確保された建物が多いため予測されることが、人口の 70% はそのまま待機すると想定し避難行動を取る 30% の被災者をそれぞれの町丁内のノードに一様分布で初期配置をする。昼間人口から夜間人口を引いた人数を大阪市周辺から通勤している人数と見なし、大阪府が公開している大阪市への周辺エリアからの通勤人数の統計情報から通勤者の自宅のある地域を割り当てた。

4.1.3 避難行動

震災発生時点 (MAS 開始時点) で各避難者の目指す目的地は以下の通り設定する。夜間人口の 30% である初期配置された被災者が、初期配置地点から直線距離で最も近く、かつ、故障箇所を考慮したとき必ず到達可能な避難所を目的地として避難を開始する。ただし、避難所の収容キャパシティは考慮せず、最初に選択した避難所に到着した避難者は MAS から除外する。また、各町丁の昼間人口から夜間人口を引いた人口 (大阪市北区外から日中大阪市北区に就業や修学のためにきている人々) についても、30% の初期配置された被災者が大阪市北区外に帰宅するものとし、大阪市の公開している大阪市への周辺エリアからの通勤人数の統計情報から通勤者の自宅のある地域を割り当てた。大阪市北区外への避難者は、初期配置された地点と自宅のある地域の代表点と結ぶ線分と、大阪市北区の境界線とが交差する点から最も近い到達可能な大阪市北区内のノードを出口としてシステムが提案しそれに従い避難を開始する。最初に設定した出口に到達し大阪市北区外に出た避難者については MAS から除外する。

避難所並びに出口に向けて移動する避難者に対して避難者誘導システムが提案する経路は、各エッジの距離を幅で割った値をコストとして、経路するエッジのコストの合計が最小となる経路である。避難路提示システムは、各避難者端末が知っている通行不能な故障箇所を経由しない経路を提案するが、初期配置時には全く故障箇所情報を知らない状態で経路を提案し、避難者端末の故障箇所情報が更新されるとその情報に従った最小コストの経路を提案する。なお、故障箇所情報は、他の避難者端末との故障箇所情報の交換か、避難者自身が故障箇所到達時に更新される。

一般に、道路上に存在する避難者の数が増えるほど移動速度は低下することが推測される。そこで、各 way の種類毎に対して 1m~10m の道路幅を設定し、各エッジ e の長さ l_e と道路幅から求めた面積で e 上に存在する避難者数を除した避難者密度 d_e に対して、エッジ e の避難者速度 v_e を [17] のモデル (式 4) から求める。

$$v_e = \begin{cases} -0.204d_e + 1.48, & d_e < 1.5 \\ \max\{1.32 \log \frac{9.16}{d_e}, v_{\min}\}, & d_e \geq 1.5 \end{cases} \quad (4)$$

ここで v_{\min} は歩行者速度の下限値であり [17] のモデルでは $v_{\min} = 0.1$ である。

4.1.4 通信行動

MAS では避難者をエージェントとして扱う。本評価実験の MAS において通信チャンネル数は無限大とし、避難者端末は通信範囲内に存在する他の全避難者端末と 1 タイムスロット内にお互いの故障箇所情報の交換を完了する。提案手法は各避難者端末が収集した各故障箇所を通過した人数の統計情報から通行可能確率を各避難者端末で求めるが、今回の評価実験では各避難者端末があらかじめ与えた避難者タイプの人口比率から求めた真の通行可能確率を MAS 開始時から保持していると仮定した。

4.2 結果

表 2 は、避難者属性の有無それぞれで 20 回ずつ試行した結果得られた、地域内外避難者別の避難時間と移動距離の平均値である。避難者タイプを考慮した提案手法と比較し考慮してい

表 2: 目的地までの平均避難時間と平均移動距離

| 避難者属性 | 平均避難時間 (timeslot) | | 平均移動距離 (m) | |
|-------------|-------------------|---------|------------|---------|
| | 地域内 | 地域外 | 地域内 | 地域外 |
| 考慮あり (提案手法) | 143.013 | 351.632 | 698.533 | 2620.54 |
| 考慮なし | 312.123 | 638.254 | 1106.58 | 3395.79 |

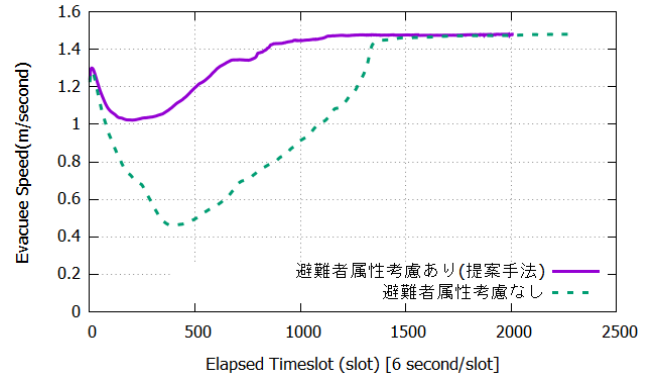


図 4: 平均避難者移動速度の時間的変化

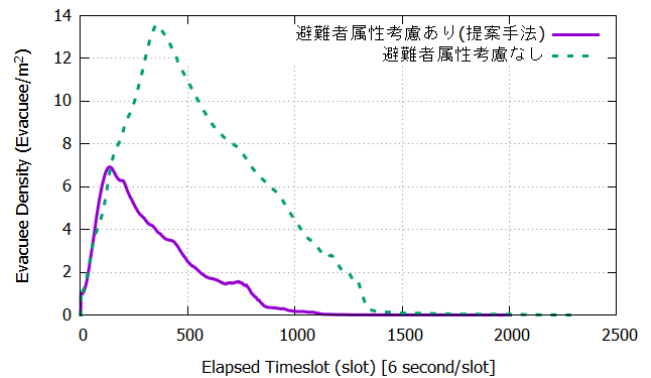
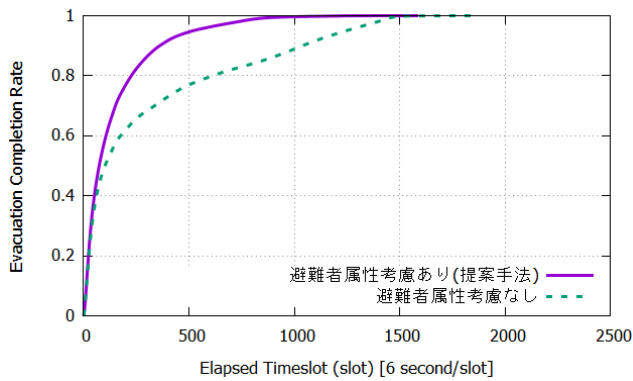


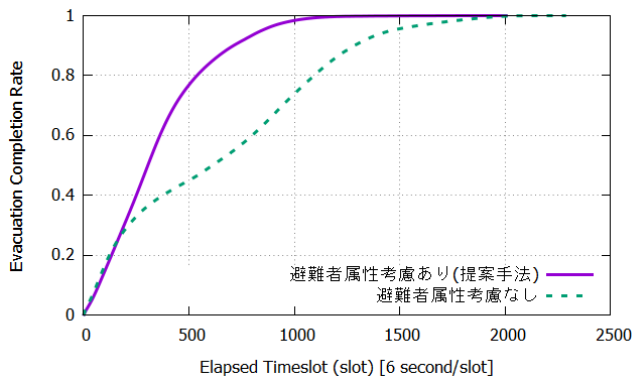
図 5: 平均避難者密度の時間的変化の

ない手法の平均移動距離は 1.5 倍ほど長い移動距離となっている。提案手法は故障箇所であったとしても、通行可能な故障度合いであれば通行可能であると判断し避難経路として使用可能なことから、提案手法においてより短い移動距離が達成できたと考えられる。

平均避難時間については、避難者タイプを考慮した提案手法と比較し考慮していない手法の避難時間は、地域内外どちらの避難者についても 2 倍ほどの時間となっており移動距離の平均値よりも大きな差がみられる。これは、避難者の密度と移動速度が関係している。図 5 は平均避難者密度の時間的変化をプロットしたものであるが、MAS 実行開始から約 300timeslot までは避難者属性考慮の有無にかかわらず避難者密度が $1m^2$ 当たり 7 人程度まで上昇し続け、避難者属性を考慮していない従来手法では避難者密度が単位面積当たり 14 人にまで上昇し長時間高い避難者密度であるのに対して、避難者タイプを考慮した提案手法の最大避難者密度は小さくまたより短時間で渋滞が解消されている。それと関連して、避難者の平均移動速度の時間的変化をプロットした図 4 にみられるように、提案手法については移動速度の低下は発生しているものの、避難者属性考慮を考慮していない手法と比較すると、低下幅も小さくまた短時間



(a) 地域内への避難者



(b) 地域外への避難者

図 6: 平均避難完了率の時間的変化

で回復していることが確認できる。

図 6 は地域内の避難所または、地域外に対する出口への到達避難者数の割合の時間的変化の平均値を示したグラフであるが、地域内と地域外への避難者いずれにおいても避難者属性を考慮した提案手法がより早く多くの避難者が当初目的地とした地点に到達できていることが確認できた。

5. まとめ

本研究では、災害発生時の避難経路提示システムにおいて渋滞の緩和を目的として、各避難者属性毎に通行可能な故障度合の上限値を設定し、それ未満の故障度合であれば通行可能であると判断し避難経路の一部として使用する手法を提案した。MAS によるシミュレーションにて、全故障箇所を一律に通行不可能なセグメントとして扱う手法と提案手法で比較を行った結果、提案手法によって渋滞の軽減され、短縮された移動距離以上に避難時間の短縮されることが確認された。

本稿では、通信チャンネル数を加味した評価や、故障個所の通行可能確率から故障度合の導出に関する評価を行っていないため、今後これらの評価を行う。

謝 辞

本研究は福岡大学研究推進部の研究経費によるものである。(課題番号: 185005)

文 献

[1] Ministry of Internal Affairs and Communications, Japan: “2011 WHITE PAPER Information and Communications

in Japan”, Japanese Government (2011).

- [2] Y. Iizuka, K. Yoshida and K. Iizuka: “An Effective Disaster Evacuation Assist System Utilized by an Ad-Hoc Network”, Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 31–35 (2011).
- [3] A. Al-Hourani, S. Kandeepan and A. Jamalipour: “Stochastic Geometry Study on Device-to-Device Communication as a Disaster Relief Solution”, IEEE Transactions on Vehicular Technology, **65**, 5, pp. 3005–3017 (2016).
- [4] H. Nishiyama, M. Ito and N. Kato: “Relay-by-smartphone: realizing multihop device-to-device communications”, IEEE Communications Magazine, **52**, 4, pp. 56–65 (2014).
- [5] M. Tanha, D. Sajjadi, F. Tong and J. Pan: “Disaster Management and Response for Modern Cellular Networks Using Flow-Based Multi-Hop Device-to-Device Communications”, 2016 IEEE 84th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall), IEEE, pp. 1–7 (2016).
- [6] H. Yuan, W. Guo and S. Wang: “Emergency route selection for D2D cellular communications during an urban terrorist attack”, 2014 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC), IEEE, pp. 237–242 (2014).
- [7] Y. Kasai, M. Sasabe and S. Kasahara: “Congestion-aware route selection in automatic evacuation guiding based on cooperation between evacuees and their mobile nodes”, EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, **2017**, 1, p. 164 (2017).
- [8] N. Komatsu, M. Sasabe, J. Kawahara and S. Kasahara: “Automatic Evacuation Guiding Scheme Using Trajectories of Mobile Nodes”, Springer, Cham, pp. 3–14 (2015).
- [9] N. Komatsu, M. Sasabe, J. Kawahara and S. Kasahara: “Automatic evacuation guiding scheme based on implicit interactions between evacuees and their mobile nodes”, GeoInformatica, **22**, 1, pp. 127–141 (2018).
- [10] A. Fujihara and H. Miwa: “Disaster Evacuation Guidance Using Opportunistic Communication: The Potential for Opportunity-Based Service”, Springer, Cham, pp. 425–446 (2014).
- [11] G. J. Lim, S. Zangeneh, M. Reza Baharnemati and T. Asavapokee: “A capacitated network flow optimization approach for short notice evacuation planning”, European Journal of Operational Research, **223**, 1, pp. 234–245 (2012).
- [12] T. Horiyama, A. Ohta, N. Katoh, A. Takizawa, J. Kawahara, T. Inoue, Y. Takechi and S.-I. Minato: “Enumeration of region partitioning for evacuation planning based on ZDD”, 11th International Symposium on Operations Research and its Applications in Engineering, Technology and Management 2013 (ISORA 2013), Institution of Engineering and Technology, pp. 65–72 (2013).
- [13] C.-H. Lin, P.-Y. Chen and W.-T. Chen: “An Adaptive Guiding Protocol for Crowd Evacuation Based on Wireless Sensor Networks”, 2013 IEEE 77th Vehicular Technology Conference (VTC Spring), IEEE, pp. 1–5 (2013).
- [14] N. Aschenbruck, E. Gerhards-Padilla and P. Martini: “Modeling mobility in disaster area scenarios”, Performance Evaluation, **66**, 12, pp. 773–790 (2009).
- [15] A. Martín-Campillo, J. Crowcroft, E. Yoneki and R. Martí: “Evaluating opportunistic networks in disaster scenarios”, Journal of Network and Computer Applications, **36**, 2, pp. 870–880 (2013).
- [16] OpenStreetMap contributors: “Planet dump retrieved from <https://planet.osm.org>”, <https://www.openstreetmap.org> (2019).
- [17] N. Kamiyama, K. Ishibashi and Y. Hoshiai: “Reachability analysis of multi-hop d2d communications at disaster”, IEICE Transactions on Communications, **E101-B**, 8, pp. 1833–1844 (2018).