

災害時の避難誘導における DTN を活用した

自律分散手法のシミュレーション評価

Simulation Evaluation of Autonomous Decentralized Method Using DTN for Disaster Evacuation Guidance

中壺 柁貴† 柏崎 礼生‡ 井口 信和§

Masaki Nakatsubo Hiroki Kashiwazaki Nobukazu Iguchi

1. はじめに

日本は災害大国であり、集中豪雨や地震などといった災害による被害が後を経たない。特に地震においては、世界で発生するマグニチュード 6 以上の地震の 20%以上が日本国内で発生している[1]。このような自然災害に備え、被害を最小限に抑えるために、適切な避難誘導が重要である。2011 年の東日本大震災において最も被害の大きかった地域の一つである、宮城県の石巻市では、地震発生後から約 20 分で津波の第一波が沿岸に到達した[2]。地震に限らず、このような大規模災害が発生した際には、迅速で効果的な避難誘導が不可欠である。

東日本大震災において、岩手県釜石市鶴住居町では、市が指定する第一次避難場所は「旧 JA 集配センター」「鶴住居神社境内」「本行寺」「常楽寺裏山」といずれも標高 12m 以上の場所にあった。しかし、事前の避難訓練では、標高 4.3m に位置する、鉄筋コンクリート造 2 階建ての「釜石市鶴住居地区防災センター」に避難した。鶴住居長に到達した津波の高さは 11m で、2 階屋上近くまで津波が到達し、防災センターは全壊。その結果、200 名を超える住民が津波の犠牲となった。適切な避難場所への誘導の必要性を訴えかける事故となった。

宮城県南三陸町では地震発生後 23 分で第一波が到達し、その 23 分後には津波水位 20.8m の最大波が到達している。南三陸町危機管理課の職員は、南三陸町防災対策庁舎から防災無線を用いた避難の呼びかけを行なった。防災対策庁舎は海拔 1.7m の地点に建設された高さ 12m、3 階建の建築物であった。危機管理課は 2 階にあり、職員は津波にのまれ殉職した[3]。防災における避難誘導を中央集権的に行うことは、担当者が単一障害点となる可能性があると同時に、一人の担当者に対して過度の責任感を負わせることともなる。避難誘導を自律分散で行わせることは、耐障害性を高めるとともに、担当者を精神的な抑圧から解放する意義があると考えられる。

これまでには、様々な自律分散的な避難誘導手法が考案されてきた。Twitter や Thread に代表される SNS を用いた避難誘導手法もその一つである。SNS を利用した自律分散的な避難誘導手法の特徴として、SNS から得られる情報には比較的広域に関する情報が多く、境域に関する情報を得るためには検索手段を工夫しなければならない。また、SNS から得られる情報の中には真偽を含めて多くの情報が出回っている点が挙げられる。そのため、この手法では避難者に SNS の情報を適切に選別する能力が求められる。避難者が得られる情報の地域を限定し、真偽判断を行うことは、迅速な避難誘導の妨げとなる。

また、災害時におけるプライバシーの問題にも配慮する必要がある。上記の問題を解決するために避難者が有益な情報を詳細かつ頻繁に提供すればするほど、その避難者のプライバシーは侵害されやすくなる。災害時における弱者に対する犯罪、特に女性への性犯罪は 1995 年の阪神淡路大震災から問題提起されており、東日本大震災においても同様の事例が複数あったことが 2020 年に入ってから報道の調査などから明らかになった[4]。現地の情報提供者により、情報の鮮度が高まることが期待できたとしても、その情報からは追跡可能性を失わせることが期待される。

一方、登山における事故軽減のため、近接したスマートフォン同士のすれ違い通信が利用されている。登山アウトドア向けアプリ・Web サービス「YAMAP」は、2019 年に山の安全に貢献する「みまもり機能」が追加された[5]。日本百名山に掲載されるようなメジャーな山のみならず、二百名山、三百名山、あるいはそれらにも記載されないような低山が、筆者らが住む近畿圏には数多く存在する。これらの山中において携帯キャリアによる 5G 通信や 4G 通信はもとより、3G 通信も頼ることのできない場所は数多くある。そのため、山岳事故に遭遇した時、その被害者がどこにいるのかを推定することが困難である。そこでキャリア網やインターネット接続性を確保したときに、この情報をサーバに提供することで、いつどこで誰とすれ違ったかを追跡することが可能となり、すれ違った人が事故に遭った場合でも、その事故現場を限定することが可能になる。この機能の優れた点は、ユーザが意識することなく情報を交換し、交換された情報が誰かの役に立つ可能性があるという点である。

そこで本研究では、近接したスマートフォン同士のすれ違い通信を用いた自律分散的な避難誘導手法を提案する。すれ違い通信を実現するための手法として、遅延耐性ネッ

†近畿大学大学院総合理工学研究科,
Graduate School of Science and Engineering,
Kindai University

‡近畿大学情報学研究所,
Cyber Informatics Institute, Kindai University

§近畿大学情報学部,
Faculty of Informatics, Kindai University

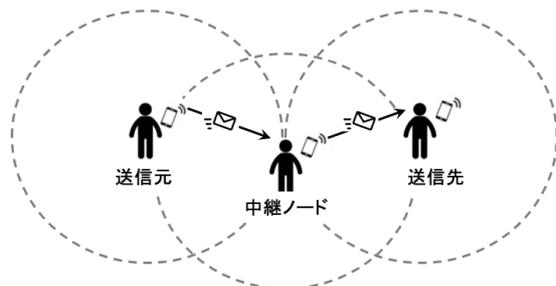


図 1: DTN の概要

トワーク (Delay Tolerant Networking: DTN) を採用し、メッセージ交換によって誘導目的地を伝搬させる。シミュレーション評価を通じて提案手法の有効性を示す。

2. 関連研究

瀧本らは、地下街等の閉鎖空間における火災発生時の避難誘導を目的とし、温度センサーや煙センサーに加えて無線 LAN を天井に設置することによる、自律分散を可能とする避難誘導システムの開発に取り組んでいる[6]。ここで言及されている「自律分散」とは、設置したセンサーが情報を収集し、それらに基づいて光や音による誘導装置を自動的に稼働させることが可能であることを意味する。また、永山らは、避難誘導のために LED 光源を用いたサインユニットを製作し、避難経路の明確化を図る研究に取り組んでいる[7]。このサインユニットは、各地域の避難計画や津波避難のための施設整備指針等に基づいて、避難経路から目的地までの連続して設置される。これらの研究は、避難場所や避難経路にオブジェクトを設置することで効果的な避難誘導手法を提案している。しかし、あらかじめ設置した機器の不良や、地形の変化や建物の倒壊が発生するほどの大規模災害が発生した場合、設置した機器が正常に動作する保証は得られない。

上記の関連研究は、災害発生に備えた取り組みだったが、成田らは津波発生時の緊急避難場所への誘導手法として、バルーン型標識 (アドバルーン) の活用を提案しており、バルーン型標識の有効性を評価し、新たな避難誘導ツールとしての導入方法を検討している[8]。また榎原らは、災害時に避難者救助を支援するための情報提供手法に焦点を当て、スマートフォンや無人航空機 (UAV) などを活用した情報収集手法を提案している[9]。これらの研究では、アドバルーンや無人航空機を飛ばす担当者が飛ばせない状況下にある場合、その担当者が単一障害点になる可能性がある。これらの研究を踏まえると、災害時における避難誘導において、追加の機器を必要としない手法が有効であると考えられる。

災害時に通信インフラが破壊された場合でも、追加の機器を必要とすることなく、個々のデバイス間で通信を確立し、情報共有や避難場所への誘導を行う手法についても研究が進められている。坂上らは、避難行動時の情報共有システムとして Bluetooth のデバイス検索を利用したすれ違い通信を採用し、広域ネットワークを利用しない情報交換を可能にしている[10]。また、本田らは周辺の避難場所の情報と歩行速度を考慮した避難場所情報を共有するために、アドホック通信を使用した避難支援システムを提案してい

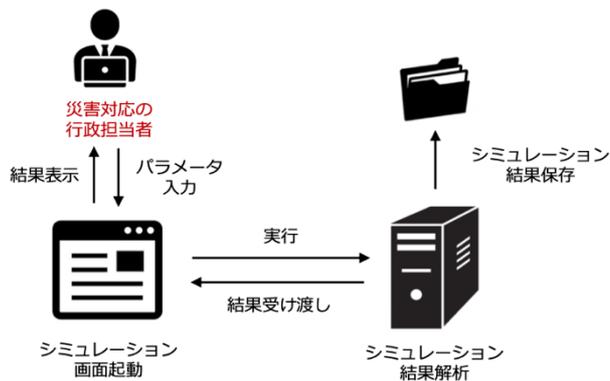


図 2: 提案システムの概要図

る[11]。これらの提案手法では、1 ホップの通信範囲しか持たないため、情報が送信者周辺の避難者にしか届かず、情報拡散の面で十分な性能を得ることができないという課題がある。

Ritwik Mondal らは、災害後の通信を回復し、救助活動を支援するために、LTE-Advanced にデバイス間通信を統合した枠組みを提案した[12]。クラスタリングと各クラスタ内で中心的な役割を果たすクラスターコアの導入により、効率的なデータ収集を実現した。

Md Akbar Hossain らは、スマートフォンを活用した災害後の通信手段「SmartDR」を提案している[13]。5G ネットワークのデバイス間通信技術(D2D)を利用し、被災者や周囲の人々のスマートフォンが災害モードに切り替わり、緊急メッセージを送信することで救助活動を支援するための手法を提案している。

Seyyed Iliia らは、2010 年のエイヤフィヤットラヨークトル火山噴火を例に、アイスランドの自然災害時における通信障害軽減のための DTN の有用性を検証した[14]。DTN を使用することで、固定インフラに依存せず D2D 通信を実現する。道路交通データを基に移動モデルを構築し、The ONE シミュレータで評価を行った。Epidemic Routing によって最大 100% のメッセージ送信可能性を示し、Wi-Fi 伝送が Bluetooth よりも高い配信確率を実現することを確認した。

三角らは、ネットワークインフラが損傷するような大規模災害時の効果的な避難経路提供を目的に、遅延体制ネットワーク(DTN)を利用し、被災者の携帯端末から道路情報を収集するための手法を提案した[15]。全ての避難者に同じ経路を提供することで引き起こされる混雑を軽減するため、この避難者の属性(年齢など)に基づいて異なる経路を提供する。提案手法はマルチエージェントシミュレーションを用いた数値評価により、平均避難距離の 22% の削減と平均避難時間の 44% の削減を実現した。

当研究では、すれ違い通信を実現し、かつ通信距離の制約を克服するために DTN を導入する。DTN は、基地局やアクセスポイントといったインフラが機能しないような劣悪な環境下でも信頼性のある通信を実現するために設計されたアーキテクチャの一つである。図 1 で示すように、DTN は通信を確立するためにホップバイホップでの通信を行い、宛先までデータを転送することが可能である。

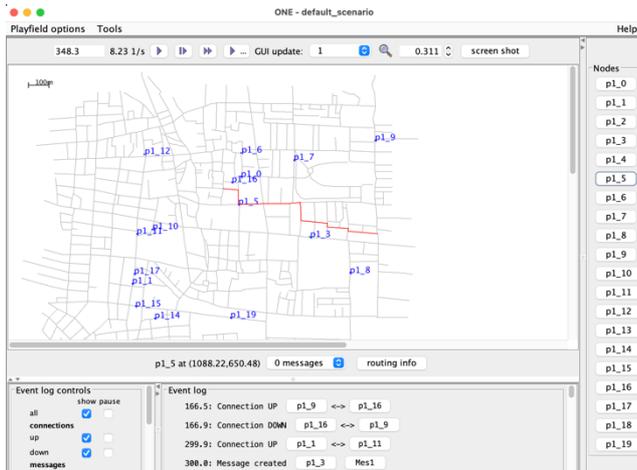


図 3: 提案システムの概要図(シミュレーション結果解析部)

3. 提案手法

本稿で著者らが提案する手法は、スマートフォンや IoT デバイスに備わった Bluetooth を用いて近傍のデバイスとデータのやり取りを行うことで、目的地への誘導を実現する避難誘導アプリケーションおよび避難誘導サービスである。避難誘導にはその地域の特性が重要な要素となる。避難に用いる道路がどのようなトポロジとなっているかはもちろん、第 1 章で述べたように第一次避難場所が高所にある場合、あるいは遠くにある場合に避難弱者となる高齢者をどのように誘導するかが問題となるため、年齢別の人口分布情報が必要となる。避難誘導においてその地域の避難人数も重要な要素であり、特に都市部での大規模避難においては群衆雪崩を起こさない密度を保たなければならない。通常時においては、警察による誘導が行われるが、災害時には警察もまた避難者であり、警察による誘導を期待してはならない。避難者はスマートフォンのアプリケーションを利用することを想定しているが、高齢者のデジタル・デバイドを鑑みると体に身につけることのできる小型の IoT デバイスの利用も想定することが望ましい。このアプリケーションやデバイスは、インストールすれば、電源を入れればすぐに入れられるものではなく、行政の避難担当者が事前に登録した地域 ID を登録して使用できるようにするものとする。

3.1 避難誘導サービス

図 2 に、提案する避難誘導サービスの模式図を示す。以南誘導に必要な情報として、その地域の道路データ、地形情報、第一次避難場所および年代別人口分布情報を想定している。道路データは国土交通省の国土数値情報が提供する道路データから得ることができる。地形情報は同じく国土地理院が提供する基盤地図情報から得ることができ、二次元の道路データと併せることで三次元の情報とすることができる。担当者は避難誘導サービスのシミュレータで前述の情報を提供する。シミュレーション結果解析を行う計算機は利用者からの要望を受け取り、指定された情報をもとに人を模すノードを複数の分布に従って、指定された地域内に配置する。

・シナリオ共通設定

シミュレーション時間	[sec]
シミュレーションステップ	[sec]

・ノードグループ設定

ノード数	—
グループID	—
移動速度	[m/s]
待機時間	[m/s]
バッファ容量	[kbyte]
TTL(Time To Live)	[min]
ルーティングアルゴリズム	—

・インターフェース設定

通信範囲	[m]
通信速度	[kbps]

・メッセージ設定

メッセージ数	—
生成間隔	[sec]
メッセージサイズ	[kbyte]
プレフィックス	—

・レポート出力設定

レポート出力数	—
レポート保存先	—

図 4: The ONE で設定可能なパラメーター一覧

このシミュレーション結果を基に、各々の道路における人の密度や移動時間を計算し、複数ある第一次避難場所に対して、どこに配置された人を誘導すれば良いかを計算し、統計値を求める。この統計値はパラメータセットとシミュレーション結果の組み合わせとして保存され、前述の地域 ID に紐づけられ、避難予定者がインストールするアプリケーションおよびデバイスには、この地域 ID を読み込ませることで、避難パラメータをアプリケーションにダウンロードすることができる。

3.2 シミュレーション結果解析

与えられたパラメータセットから人流のシミュレーションを行うため、SINDTN projects および CATDTN projects によって開発された The ONE を用いる[15]。The ONE とは、DTN を仮想的に検証するためのシミュレータであり、通信プロトコルやアルゴリズムの性能を評価するために開発されたシミュレータである。

The ONE は、様々なパラメータを設定することができる。図 4 に、設定可能なパラメーターの一覧を示す。まず、シナリオ共通設定では、1 回あたりのシミュレーション時間や、1 シミュレーションステップ毎の時間間隔を設定することができる。ノードグループ設定では、グループごとに特性を設定することができる。具体的には、グループのノード数・移動速度・ノードが保有することのできるデータの容量・ルーティングアルゴリズムなどがある。様々な DTN ルーティングアルゴリズムと送信者と受信者の属性を使用して、ノード間のメッセージをルーティングすることができる。また、ノードグループにおける移動速度を設定することで、自動車や自転車、複数のタイプの人間などを表現することができる。インターフェース設定では、ノードの通信範囲や通信速度を設定することができる。これにより、様々な無線通信規格でのシミュレーションを可能とする。

The ONE では、図 3 で示すようなグラフィカルユーザーインターフェースが具備されており、シミュレーション内での移動者の移動を可視化することができる。グラフィカルユーザーインターフェースは大きく 4 つの役割に分かれている。画面中央のプレビューフィールド部では、パラメータで設定したマップファイルと、ノードグループ設定におけるノード数で設定した数分のノードが配置される様子が確認できる。シミュレーションを開始すると、移動者の移動だけでなく、移動者が現在移動しているルートを確認することができる。

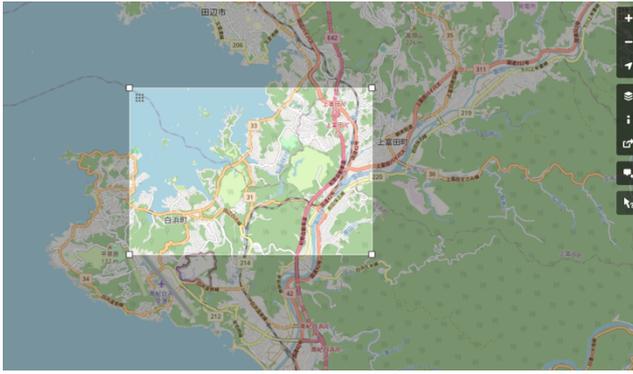


図 5: OpenStreetMap の概要

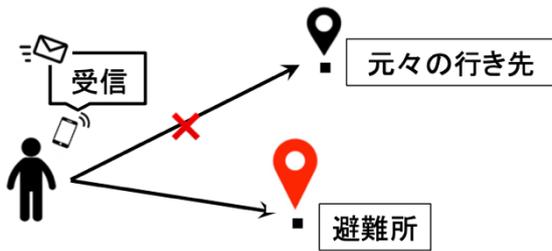


図 6: すれ違い通信機能の模式図

また、画面右側の Nodes 部では、マップ上に配置されているノードの一覧を確認することができる。任意のノード番号をクリックすることで、そのノードが所持しているメッセージとその個数、移動者が使用しているルーティングアルゴリズムなどを確認することが可能である。画面下部の Event log 部では、タイムスタンプ付きのイベントログが表示される。イベントログでは、ノード間の通信接続・切断や、メッセージの生成・複製・破棄などがある。

3.3 The ONE で使用するマップについて

The ONE シミュレータではあらかじめいくつかのマップが用意されているが、特定の地域におけるシミュレーションを行うためには自身でマップを作成する必要がある。

特定の地域のマップデータを取得するために、本研究では OpenStreetMap (OSM) を活用した。OSM とは、無料で編集可能な地理情報データベースを提供するプロジェクトである。OSM は、世界中の何十万ものボランティアによって収集・提供されたデータを基にしているため、地図情報の精度と詳細さは、商業用地図サービスと比較しても遜色ない。図 5 に示すように、OSM は特定の地域をドラッグ形式で範囲を指定することでエクスポートすることが可能である。

The ONE で使用するマップファイルは WKT 形式であるのに対し、OpenStreetMap で得られるマップファイルは OSM 形式である。そのためマップデータの形式を変換する必要がある。そこで本研究ではマップデータの変換に OpenJUMP を活用した。OpenJUMP とは、オープンソースの地理情報システムソフトウェアであり、地理データの表示・編集・解析に特化している。OpenJUMP はシェープファイルや GML ファイルなど、様々な地理データフォーマットをサポートしており、ユーザが簡単に地図を作成、

CPU	メモリ	OS
Apple M1	16GB	macOS Sonoma 14.5

表 1: シミュレーション評価環境

パラメータ	値
シミュレーション時間	1620[s]
ノード数 (避難者数)	300
歩行速度	2.6[m/s]
ルーティングアルゴリズム	Epidemic Routing
マップサイズ	2.0km * 1.5km
使用したマップ	白浜実験場
避難場所の数	6
ノードグループ数	2

表 2: パラメータ設定

編集できるように設計されている。地理データフォーマット機能を活用し、OpenStreetMap で得られた OSM ファイルを The ONE で使用可能な WKT 形式に変換した。

3.4 すれ違い通信機能の実装

本研究の題目である、災害時の避難誘導における DTN を活用した自律分散手法のシミュレーション評価を実施するにあたって、The ONE にいくつかの拡張を加えた。

The ONE におけるシミュレーションでは、ノード間でメッセージのやり取りが実施されているものの、シミュレーションの簡略化や、ネットワークプロトコルの動作や、メッセージの経路選択アルゴリズムを重視しているため、送受信されるメッセージはダミーとして扱われている。そのため、自律分散的な避難誘導をシミュレーションで実現するため、まずメッセージ情報の拡張を行った。

シミュレーションでやり取りされるメッセージはダミーメッセージではあるもの送信元・送信先・ユニーク ID といった情報は含まれている。図 6 で示すように、すれ違いによって受信したメッセージの内容に基づいて、ノードを避難場所に誘導することを目標としているため、メッセージ内容に新たに「避難先情報」を追加した。また、ノードがメッセージを受信した際に、避難場所に移動するような挙動を実現するには、ノードが持つ経路情報を破棄し、ノードが今いる現在地から目的地までの経路を再計算する必要がある。これらの実装を The ONE に追加することで、すれ違い通信機能を実現した。

4. 評価

災害時の避難誘導における自律分散手法の評価を行うためのシミュレーションを実施した。本研究では、南海トラフ巨大地震を想定した、和歌山県白浜町にある近畿大学の水産研究所の一つである白浜実験場周辺のマップを使用した評価実験を実施した。本章では、評価実験の概要について述べる。

4.1 評価環境

シミュレーション評価環境のスペックを表 1 に示す。The ONE は、Apple M1 チップを搭載した 16GB のメインメモリを有する Mac mini で実行した。また、The ONE は Java

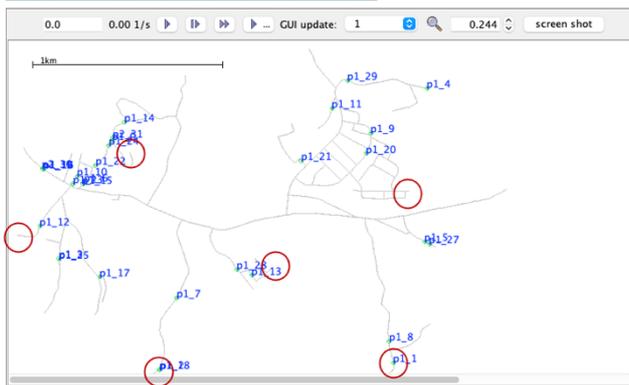


図 7: 追加した 6ヶ所の避難場所

で記述されているため、オープンソースの統合開発環境の一つである Eclipse を使用した。

4.2 パラメータ設定

表 2 に、シミュレーションで設定したパラメータの一覧を示す。本シミュレーションは南海トラフ地震を想定している。和歌山県が平成 25 年に公表した「南海トラフの巨大地震」および「東海・東南海・南海 3 連動地震」の津波浸水想定をもとに作成したハザードマップによると、白浜町に 10m の津波が到達するまでの予測時間は 27 分であった [16]。そのため、シミュレーション時間は 1620s (27 分) を設定した。

本シミュレーションでは、近畿大学が生物学とその関連分野の研究を行うために設立した、和歌山県白浜町に位置する白浜実験場の周辺マップを使用した。

マップに配置するノード数については、和歌山県白浜町の公式ホームページによると、執筆時(2024 年 7 月 8 日)の人口は 19,892 人、白浜町の面積が 201 km² であることから、人口密度は 98.9 人/km² であることがわかる。また、作成したマップの大きさが横が 2.0km、縦が 1.5km であることから、白浜実験場マップに配置するノード数は $98.9(\text{人}/\text{km}^2) * 2.0\text{km} * 1.5\text{km} = 296.7 \approx 300$ とした。

また、白浜実験場のマップには図 7 に示すように、6 カ所の初期避難場所 (白浜中学校、修心寺金閣寺、東白浜地区 14、東白浜地区 21、白浜サニービーチ多目的広場、コガノイベイホテル) を追加した。避難場所の選定について、平成 24 年度に中央防災会議 (内閣府) から公表された南海トラフ巨大地震の被害想定では [17]、白浜町における最大津波高は 16m とされていることから、行政が指定する初期避難場所の中から、標高 16m 以上の避難場所を選別した。

メッセージのルーティングアルゴリズムは、DTN の代表的なアルゴリズムである Epidemic Routing とした。Epidemic Routing とは、メッセージを出会ったノード全てに複製して転送することで、宛先に到達する確率を高めるアルゴリズムである。これは、感染症の拡散モデルに基づいており、メッセージの複製をネットワーク全体に広げることで、最終的に宛先に到達する確率を最大化するアルゴリズムである。その他の代表的なアルゴリズムとして、MaxProp, Prophet, Spray and wait がある。MaxProp とは、ノードが接触するたびに優先順位を計算し、高優先度のメッセージを先に転送するアルゴリズムである。Prophet は、過去の接触



図 8: 評価実験

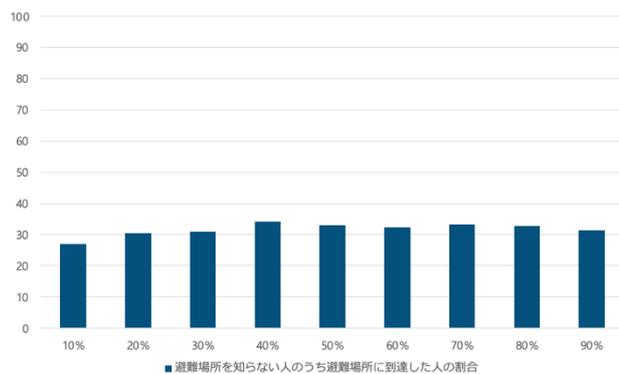


図 9: 評価実験

履歴に基づいてノード間の接触確率を計算し、高確率の経路を優先してメッセージを転送する。Spray and Wait は、メッセージのコピー数を制限することで、メッセージの転送遅延とバッファ使用量におけるトレードオフを調節可能なアルゴリズムである。このアルゴリズムの選定理由として、今回の実験では、3.4 節で示したようにシンプルなメッセージ交換による情報伝搬の効果を評価することを目的としているため、Epidemic Routing をルーティングアルゴリズムとして選定した。

歩行速度は、通常の歩行速度よりも早くなることを想定したため、著者の駆け足の速度である 2.6m/s を設定した。

ノードグループは 2 つ定義した。一つは避難場所を知らないグループ、もう一つはあらかじめ避難場所を知っているグループである。避難場所を知っているグループは、シミュレーションを開始させると、今いる現在位置から最も近い避難場所に向かって移動を開始する。一方、避難場所を知らないグループは、シミュレーション開始後ランダムに目的地を選択し、マップ上を移動するものとしている。このグループに属するノードは、避難場所を知っているグループに属するノードとすれ違い、避難場所情報が格納されているメッセージを受信することで、避難場所への移動を開始する。評価実験では、避難場所を知っている人の割合を 10% から 90% まで、10% 区切りで増加させシミュレーションを実施した (図 8)。これにより、避難場所を知っている人の割合が避難行動に与える影響を評価した。

4.3 実験結果と議論

避難場所を知っている人を 10%(ノード数 30)に設定した時の、シミュレーション時間内に避難場所に到達した人の割合は 39.1%であることがわかった。そのうち、避難場所を知っている人が 8.97%、避難場所を知らない人が 30.2%という内訳になった。この結果から、避難場所を知っている少数の人が避難場所を知らない人にメッセージを拡散し、避難行動を促進したことがわかる。しかし、全体の避難成功率は低いことから、避難場所の認知度が低いと自律分散的な避難誘導は難しいことがわかった。

避難場所を知っている人を 50%(ノード数 150)に設定した時の、シミュレーション時間内に避難場所に到達した人の割合は 60.7%であることがわかった。そのうち、避難場所を知っている人が 44.2%、避難場所を知らない人が 16.5%という内訳になった。

避難場所を知っている人を 90%(ノード数 270)に設定した時の、シミュレーション時間内に避難場所に到達した人の割合は 83.7%であることがわかった。そのうち、避難場所を知っている人が 79.1%、避難場所を知らない人が 3.13%という内訳になった。避難場所を知っている人が 90%いるにもかかわらず、避難成功率が高くない理由として、すれ違いによってメッセージのやり取りは行われているものの、南海トラフ地震のシビアな予想津波到達時間によって、メッセージを持つ避難場所を知らない人々が目的地に到達しなかったのではないかと考える。

今回、避難場所を知っている人の割合を 10%から 90%まで 10%区切りで増加させてシミュレーションを実施したが、いずれのパラメータでも、避難場所を知っているにもかかわらず、設定したシミュレーション時間内に避難場所に到達していない人が存在することがわかった。

また、図 9 に避難場所を知らない人のうち、避難場所を知っている人とすれ違うことでメッセージを受け取り、シミュレーション時間内に避難場所に到達した人の割合を表したグラフを示す。10%から 90%の間で、いずれの割合も 30%前後の値を取ることが確認された。この結果から、避難場所を知っている人が何人であれ、避難場所を知らない人のうち 30%の人々をシミュレーション時間内に避難場所に誘導することができることがわかった。

5. まとめと今後の課題

本稿では、災害時の避難誘導における自律分散手法を提案した。提案手法はDTNを用いたシンプルなメッセージ交換によって実現される。提案手法をシミュレーションを用いて評価した。シミュレータとしては、The ONE を用いた。評価実験では、南海トラフ地震を想定した現実的な制限時間内にどの程度の避難者が避難場所に到達することができるのかを評価した。その結果、避難場所を知っている人が何人であれ、避難場所を知らない人のうち 30%の人々をシミュレーション時間内に避難場所に誘導することができることが分かった。今後は、異なる地域での評価、およびマップの混雑度を考慮した評価の実施を行う予定である。

参考文献

- [1] 令和 2 年版情報通信白書
<https://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/r02/html/nd121140.html>
- [2] 平成 25 年度釜石市 釜石市鶴住居地区防災センターにおける 東 日本大震災津波被災調査 報告書
<https://iwate-archive.pref.iwate.jp/wp/wp-content/uploads/2017/02/20140312-130741.pdf>
- [3] 日本経済新聞 津波避難呼び掛け犠牲 南三陸町の遠藤さん、教材に (2012 年 1 月 27 日)
https://www.nikkei.com/article/DGXNASDG2601C_X20C12A1CC0000/
- [4] 災害時 避難所における性被害 東日本大震災における被災地の声 - 性暴力を考える - NHK みんなでプラス
<https://www.nhk.or.jp/minplus/0011/topic027.html>
- [5] 株式会社ヤママップ YAMAP ― 山で“人とすれ違う” ことか、誰かの命を救う!登山アプリ YAMAP が、電波の届かない場所でもスマートフォンだけで現在地を共有できる新機能をリリース
https://corp.yamap.co.jp/news/IE_bh9_s
- [6] 瀧本浩一,三浦房紀,松元隆博,関原弦,組田良則,山本真吾:自律分散による避難誘導システムの開発, 社会技術研究論文集, p.82-90 (2011)
- [7] 永山 雅大, 原田 一, 永山 広樹: 広域災害における避難誘導サインユニットの製作, 日本デザイン学会研究発表大会 概要集, p.212- (2014)
- [8] 成田 峻之輔, 佐藤 翔輔, 今村 文彦: 津波避難誘導を目的としたバルーン型標識の視認性検証, 第 70 回海岸工学講演会, 2023
- [9] 梶原 茂: 罹災地における DTN 技術を用いた情報収集手法, 第 57 回自動制御連合講演会, p.1052-1055 (2014)
- [10] 坂上 裕都, 高間 康史: すれ違い通信を用いた避難行動時情報共有システム, 知能と情報, p796-805 (2013)
- [11] 本田 佳鈴, 山場 久昭, 油田 健太郎, 岡崎 直宣: 青島地区における避難者の歩行速度を考慮した災害時の避難行動に関するシミュレーション, 研究報告高度交通システムとスマートコミュニティ (ITS), Vol. 2018-ITS-75, No. 19, pp. 1 - 8 (2018)
- [12] Ritwik Mondal, Ananya Biswas, Indrajit Bhattacharya, Priya Ranjan Sinha Mahapatra: A Framework for Post Disaster Management using Device to Device Communication with Controlled Mobility and Opportunistic Routing (2021)
- [13] Md Akbar Hossain, Sayan Kumar Ray, Jaswinder Lata: SmartDR: A device-to-device communication for post-disaster recovery (2020)
- [14] Seyyed Ilia, Jalali Chime: Developing a mobility model and simulating delay-tolerant networks for natural disaster in Iceland (2021)
- [15] Makoto Misumi, Noriaki Kamiyama: Evacuation-Route Recommendation Using DTN with Evacuee Attribute in Disaster (2021)

[15] The ONE

<https://www.netlab.tkk.fi/tutkimus/dtn/theone/>

[16] 白浜町 津波ハザードマップ,

https://www.town.shirahama.wakayama.jp/material/files/grou/68/tunami_map_01_shirahama_03.pdf (2024-07-19)

[17] 内閣府 防災情報のページ,

https://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/nankaitrough_info.html (2024-07-19)