

DTN を用いた災害時通信での消費電力削減を目的とした 情報ボックス配置法

三角 真[†] 西村 俊彦[†] 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

^{††} 立命館大学情報理工学部 〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1

E-mail: [†]mmisumi@fukuoka-u.ac.jp, ^{††}nishimura2020@net.tl.fukuoka-u.ac.jp, ^{†††}kamiaki@fc.ritsumeikan.ac.jp

あらまし 地震などの大規模災害では、迅速かつ安全に避難することが必要であり、そのためには、道路の被災箇所の情報を避難者間で速やかに共有することが重要である。しかし、大規模災害時には、通信インフラの破損や電力供給の停止などにより、通信インフラを利用できない場合がある。そのため、災害時の通信には、通信インフラを使わずに携帯端末が直接通信を行う delay tolerant network (DTN) を用いた様々な手法が提案されている。しかし、DTN を利用する場合、携帯端末は近隣の携帯端末と何度も道路情報を交換する必要があるため、携帯端末の消費電力が増加する。また、災害時の停電により、携帯端末のバッテリーを充電することが困難になると考えられるため、携帯端末の消費電力を削減することが重要となる。そこで本稿では、被災した道路の位置情報を格納する情報ボックスを複数の場所に設置することを提案する。情報ボックスを介して道路情報をやりとりする、つまり情報ボックスで情報をアップロードしたりダウンロードしたりすることで、携帯端末の消費電力の大幅な削減が期待できる。また、避難者の推定通過人数とその配置距離を考慮して、情報ボックスの配置場所を効率的に設計する手法を提案する。そして、multi-agent simulation を用いた数値評価により、提案手法の有効性を示す。

キーワード Delay Tolerant Network, 災害時通信

Information Box Placing Method for Power Consumption Reduction in Disaster Communication Using DTN

Makoto MISUMI[†], Toshihiko NISHIMURA[†], and Noriaki KAMIYAMA^{††}

[†] Faculty of Engineering, Fukuoka University

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

^{††} College of Information Science and Engineering, Ritsumeikan University

1-1-1 Noji-higashi, Kusatsu, Shiga, 525-8577 Japan

E-mail: [†]mmisumi@fukuoka-u.ac.jp, ^{††}nishimura2020@net.tl.fukuoka-u.ac.jp, ^{†††}kamiaki@fc.ritsumeikan.ac.jp

Abstract In a large-scale disaster such as an earthquake, it is necessary to evacuate quickly and safely. For this purpose, it is important to smoothly share information about the affected roads among evacuees. However, in a large-scale disaster, communication infrastructures may become damaged and unusable, or there may be power outages. As an alternative communication method, the concept of Delay Tolerant Network (DTN), in which mobile terminals communicate directly with each other without using the communication infrastructure, has been proposed for use during disasters. However, when using DTN, nearby mobile terminals need to exchange road information many times, which increases power consumption. In addition, when a power failure occurs during a disaster, the battery of the mobile terminal may not be able to be recharged, so it is important to reduce the power consumption. Therefore, this paper proposes the placement of information boxes that store location information of damaged roads in multiple locations. By exchanging such road information through the information boxes, i.e., uploading and downloading information at the information boxes, it is expected to significantly reduce the power consumption of mobile terminals. We also propose a method to determine the placement of the information boxes by considering the estimated number of evacuees passing through and their dispersion. We show the effectiveness of the proposed method by numerical evaluation using a multi-agent simulation.

Key words Delay Tolerant Network, Disaster Communication

1. はじめに

地震などの大規模災害が発生した場合、迅速かつ安全に避難することが非常に重要である。そのためには、道路などの被害情報を迅速に被災者に提供し、その被害情報を考慮した避難計画を立てる必要がある。一方で、被害情報は災害発生後にしか得られないため、災害発生後に被災地で情報を収集し、その情報を被災者に伝える必要がある。しかし、大規模な災害では、通信機器の破損や停電などにより、情報インフラが使用不能になる可能性があり、2011年3月に発生した東日本大震災では、有線および携帯電話の通信ネットワークが広範囲かつ長時間にわたって使用不能となったことが[1]で報告されている。

通信インフラが使用不可能な被災地での通信を可能にするために、避難者の携帯端末で形成される delay tolerant network (DTN) が提案されている。しかし[2]では、近隣の避難者の携帯端末間で情報を共有するため、情報収集のために端末間で複数回の通信が必要となり、通信回数の増加や端末の電力消費が問題となる。また、災害時の停電発生時に携帯端末の電力の枯渇してしまうと、通信手段や情報収集手段が失われる危険性がある。そこで本研究では、被災者の携帯端末の通信回数と電力消費量を削減を目的とし、特に、災害情報を収集して避難者の携帯端末に配信する方法として、道路の交差点に情報ボックスを設置する手法を提案する。本論文では、共有する災害情報を道路の故障情報とし、また、情報ボックスの設置場所の選定には、交差点を通過する避難者の数を表す指標である betweenness centrality (BC) を用いる。

本論文の貢献は以下の通りである。

- 通信の頻度を減らすために、情報ボックスを使うことを提案する。各情報ボックスには、避難者端末から災害情報をアップロードしたり、ダウンロードしたりする機能を有する。情報ボックスに災害情報をアップロードした避難者端末は、一定時間、災害情報の送信を停止することで、避難者端末の通信頻度を低減する。
- 避難者端末の通信回数削減効果を高めるために、情報ボックスの配置を決定するアルゴリズムを提案した。情報ボックスを配置する候補のノードとして交差点を選択し、避難経路の BC 順にノードをソートする。情報ボックスの配置は、物理的な最小配置間隔を保って配置される。
- 大阪市北区を対象とした multi-agent simulation (MAS) において、避難者端末の消費電力の評価指標であるパワーファクタと、避難効果の評価指標である避難完了率の観点から評価を行った。その結果、情報ボックスの最小配置間隔を 500m とした場合、均等配置に比べてパワーファクタを最大で約 60 % の低減を達成した。

以下、2章では災害時の情報通信に関する関連研究を紹介し、3章では我々の提案手法を詳細に説明する。4章ではシミュレーションのモデルを示し、5章ではその結果を示す。最後に、6章で結論と今後の課題を述べる。

2. 関連研究

災害時の避難経路を探索する手法が、[3],[4]によって提案された。[3]では、ネットワークフローの最適化問題を解くことで、ハリケーン発生後の最適な避難経路計画を策定するアルゴリズムを提案している。また、[4]では、火災や地震による建物の倒壊などの災害パターンを事前に予測することは困難であることから、可能な限りの地域分割パターンを列挙し、対象地域内に複数の避難所を分割して配置する手法を提案している。

[5]~[8]では、被災地で通信インフラが使用不能な場合に、安全かつ迅速な避難を目的として、被災地の情報の収集・活用が案されている。[6]では、送信端末と受信端末間のアドホックネットワークを構築し、避難者による混雑を考慮した避難経路や避難のタイミングを提示するシステムを開発している。[7]では、DTN を用いて被災地の情報を交換し、避難者に避難経路を提示することを提案し、[5]では、携帯端末の GPS 機能を用いて、避難者が遭遇する通行不能エリアを自動的に推定することを提案している。[9]では、GPS で得た詳細な位置情報を用いて避難経路の混雑状況を推定し、渋滞を回避する経路推薦手法を提案している。この手法では、GPS で得られた詳細な位置情報を用いて、避難経路の混雑状況を推定する。この情報には、避難経路の特定の区間にいる避難者の数と、その区間にいる避難者の順序が含まれる。

[10]では、unmanned aerial vehicles (UAV) を DTN メッセージフェリーとして利用した場合の、対象エリアにおけるデータカバレッジの度合いを評価している。また、[11]では、通信インフラが失われた地域を巡回するメッセージフェリーとして車両を用いて災害情報を収集するシステムを提案している。

しかしこれらの文献において、災害地域内に DTN のデータ集約・配信ノードを配置した際の避難者端末の消費電力削減効果についての評価はなされていない。

3. 提案手法

提案手法では、避難者が通過する可能性の高い交差点に効率的に情報ボックスを配置するために避難経路の BC に応じて候補地をランク付けし、情報ボックスが過度に密集して配置されることを防ぐために情報ボックス間の最小配置距離を設定する。

3.1 情報ボックス

本研究における情報ボックスは、避難者端末から送信された災害情報を受信して蓄積し、蓄積した情報を通信範囲内の避難者端末に送信する機能を有する装置を想定している。また、情報ボックスには大容量のバッテリーが搭載されており、避難者端末よりも長時間動作することを想定する。

3.2 BC を用いた情報ボックスの順位付け

本稿では、多くの避難者が利益を得られるように、多くの避難者が通過する交差点に情報ボックスを設置することを想定している。このため、各交差点において、避難者がすべてのノードからすべての目的地ノードに避難するための最短経路の数である BC を用いて、情報ボックスの設置場所を分類する。

ノード v における BC は次式の通り定義する。

Algorithm 1 最小配置間隔を考慮した情報ボックス配置

N : Set of all nodes
 N_{box} : Set of nodes placed information box
for $n \leftarrow$ pop the node of maximum BC from N **do**
 if Distance between nodes in N_{box} and n is greater than d_{min}
 then
 Add n to N_{box}
 end if
end for

$$bc(v) = \sum_{s \in V} \sum_{t \in V_t} \frac{\sigma_{s,t}(v)}{\sigma_{s,t}} (s \neq v, t \neq v) \quad (1)$$

ここで、 V はノードの集合、 V_t はシェルターなどの目的地ノードの集合、 s はソースノード、 t は目的地ノード、 $\sigma_{s,t}$ はノード s, t 間の最短パスの数、 $\sigma_{s,t}(v)$ はノード v を経由するノード s, t 間の最短パスの数である。最短経路 $\sigma_{s,t}(v)$ には必ず s が含まれるため、ノード v 自身が送信元ノード s となる最短経路の数は BC の導出には用いない。さらに、宛先ノード t は常に最短経路 $\sigma_{s,t}(v)$ に含まれるため、ノード v 自身が宛先ノード t となる最短経路の数は、BC の導出には使用しない。

3.3 最小配置間隔

本提案手法では、情報ボックスが密集しすぎないように、情報ボックス間の最小配置間隔を設定する。

単に $bc(v)$ で情報ボックスの配置候補場所を順位付けするだけでは、情報ボックスが特定のエリアに密集した配置パターンとなる。そこで、提案手法においては、既に情報ボックスの配置が決定している全てのノードから一定の距離を置いて、新しい情報ボックスを配置する。Algorithm 1 に、最小配置間隔を考慮した配置アルゴリズムを示す。Algorithm 1 において、 d_{min} はボックス間の最小距離を表す。BC の昇順でノード n を選択し、すでにボックスの配置が決定した全ノードまでの距離を求める。それらの距離が d_{min} よりも大きければ、ノード n に新しい情報ボックスを配置する。情報ボックスの数には上限が設定されており、配置された情報ボックスの数が上限に達した時点で、配置アルゴリズムは終了する。

3.4 避難者端末と情報ボックスの通信

提案手法では、避難者端末の通信頻度を下げることが目的として、避難者端末が送信したデータを情報ボックスが受信すると、避難者端末は一定時間データの送信を停止する。情報ボックスと避難者端末はブロードキャストで情報を送信し、通信範囲内の端末がデータを受信する。情報ボックスは、避難者端末からデータを受信すると避難者端末へ ACK を送り返し、情報ボックスがデータを受信したことを避難者端末に通知する。避難者端末は、自分のデータが情報ボックスに受信されたことを知ると、一定期間データの送信を停止する。

4. MAS のモデル

提案手法を multi-agent simulation (MAS) で評価した。こ



図 1: MAS における故障箇所・避難所・境界ノードの位置

のセクションでは、シミュレーションの設定について説明する。

本シミュレーションでは、モバイル端末を持った避難者が、地震発生後に自宅や避難所まで徒歩で移動する様子を再現した。避難者の属性ごとに通過可能な障害点を含む避難者へのルートを提案するために、筆者らが [2] で提案した手法を用いた。

4.1 道路と故障箇所

道路地図情報としては、OpenStreetMap [12] を使用した。大阪市北区の OpenStreetMap には、motorway, residential street, pedestrian など、23 種類の道路が登録されている。今回の評価では、motorway を除くすべての道路タイプを使用した。各道路には交差点やカーブがあり、これらのポイントが MAS のノードとして定義されている。各道路はノードによって分割され、ノードによって分割された部分がエッジとして定義されている。長さが 10m 未満のエッジは、他のエッジと統合されるため MAS には長さが 10m 未満のエッジは存在しない。

図 1 に、シミュレーションの対象領域の、故障領域、避難先（避難所や地域境界ノード）を示している。赤色の円は故障エリアの代表エッジ、青色の円は故障エリアに含まれる故障エッジである。赤色の矩形は故障エリアの境界であり、各故障エッジは赤色の矩形の代表エッジ内に存在する。今回の評価では、8 個の代表エッジを故障点とし、各代表エッジの周囲の矩形領域を故障領域とし、故障領域内のすべてのエッジは故障エッジとした。各故障領域の故障の度合いは 0.0 から 1.0 の間でランダムに設定する。エッジの故障はすべて MAS の開始時に発生し、故障の位置と程度はシミュレーション中には変化しないこととする。

4.2 避難所と避難者の初期配置

MAS の避難者はエッジに配置され、各エッジでの移動速度は、各エッジでの避難者の密度に依存する。各ノードは、国土地理院が公開している各町丁の代表点の座標 [13] を基に、最も近い町丁に割り当てた。避難所については、大阪市の Web ページに掲載されている 60 箇所の避難所の情報 [14]~[16] を利用した。避難所の位置については、各避難所の位置に最も近

表 1: 道路の種類とエッジ幅の関係

OpenStreetMap の道路の種類 [19]	エッジ幅 (m)
steps	1.0
path	1.8
footway	2.0
service	2.3
track	3.0
living_street, pedestrian	4.0
construction, corridor, cycleway, residential, unclassified	5.0
road	7.0
secondary, secondary_link, tertiary, tertiary_link	8.0
motorway, motorway_link, primary, primary_link, rest_area, trunk, trunk_link	10.0

い OpenStreetMap のノードの座標を使用した。図 1 の緑色の四角い吹き出しアイコンが避難所の位置を示しており、また、大阪市北区とそれ以外の地域との境界地点として定義、122 のノードを地域境界ノードとして定義し、被災地外への避難先として使用した。図 1 の緑色のピンが、これらの地域境界ノードを示している。被災者の数は、大阪市が公表している各町の昼間と夜間の人口情報 [17] から算出した。大阪市北区にはマンションやオフィスなど耐震安全性の高い建物が多いため、昼間人口の 90% は避難せずに当初割り当てられた地域にとどまり、被災者の 10% が避難行動をとると想定した。また、大阪市への通勤者数として、各街区の昼間人口から夜間人口を差し引いた値を用いた。

4.3 避難行動

避難者の目的地は MAS の開始時に設定される。各町丁の夜間人口の 10% を、対象地域内の避難所を目的地とする避難者として初期設定し、避難者は初期設定された地点から直線距離で最も近い避難所を目的地とする。なお、避難所の収容力は考慮されず、選択された避難所に到着した避難者は MAS から除外される。

各町丁の昼間人口から夜間人口を差し引いた値を、大阪市北区外から通勤・通学する通勤者の人口として、通勤者のうち 10% が北区外の自宅に戻ると仮定した。これらの通勤者の自宅は、[18] 表 1-2 と表 1-3 に示される大阪市周辺地域からの通勤者数の統計を基に割り当てた。MAS 内の避難者は目的地に向かって移動し、地域境界ノードに到達した避難者は MAS から離脱する。

エッジ e のコスト c_e は、式 (2) で定義する。このコストを用いたダイクストラアルゴリズムにて、最小コストの経路を決定する。ここで、 l_e はエッジ e の長さ、 w_e はエッジ e の幅である。各避難者端末は、これらの道路情報を事前に入手していると仮定する。

$$c_e = \frac{l_e}{w_e} \quad (2)$$

我々は、表 1 に示す通り、OpenStreetMap の各道路タイプ [19]

表 2: シミュレーション設定: 避難者属性毎の避難者割合

避難者属性	人口割合 (0 to 1.0)	通過可能な故障度合いの上限 (0 to 1.0)
A	0.4	0.8
B	0.3	0.5
C	0.2	0.4
D	0.1	0.2

にエッジの幅を割り当てた。本シミュレーションで用いた経路提案手法は、各避難者端末が知っている通過不能な故障箇所を含まない、エッジコストの合計が最小となる経路を避難者に推奨する。シミュレーション開始時には、故障箇所の情報がない状態で最小コストの経路を提案し、避難者端末で故障箇所の情報が更新されると、提案する経路を更新する。

一般に、道路上の避難者の数が増えると、その移動速度は低下する。ここでは、表 1 に示された各道路タイプのエッジの幅と長さで避難者数から算出されるエッジ e の避難者密度 d_e を用いた、[20] で示されている式 (3) により、エッジ e の避難者速度 v_e が算出される。

$$v_e = \begin{cases} -0.204d_e + 1.48, & d_e < 1.5 \\ \max \left\{ 1.32 \log \frac{9.16}{d_e}, v_{min} \right\}, & d_e \geq 1.5, \end{cases} \quad (3)$$

ここで、 v_{min} は歩行者速度の下限値であり、[20] のモデルに基づいて $v_{min} = 0.1$ と設定した。

4.4 タイムスロット

MAS において、時間は一定の長さのタイムスロット T_{ts} に分割する。各タイムスロット毎に、避難者のエッジ間の移動、故障箇所の情報交換のイベントが発生する。

避難者は隣接するエッジ間をタイムスロット間隔で移動するため、各エッジを通過するためには少なくとも 1 つのタイムスロットが必要となる。つまり、避難者の移動速度を考慮したときに、 T_{ts} が 1 つのエッジを通過するのに必要な時間よりも長いと、避難者がそのエッジで不必要に長い時間を過ごすことになり、移動時間の正確なシミュレーションが不可能になる。そこで、タイムスロットの長さ T_{ts} は、最大速度 v_{max} で移動したときに避難者が最短のエッジの長さ l_{min} を通過できないように設定した。つまり、タイムスロットの長さは $T_{ts} = \lfloor l_{min}/v_{max} \rfloor$ として計算した。ここで v_{max} は式 (3) より 1.48 m/s とし、 l_{min} は 4.1 より 10 m であるため、本評価での MAS の T_{ts} 6 秒に設定した。

4.5 避難者属性と人口比率

我々は、本評価の避難経路推薦の方法として、著者らが [2] で提案した避難者の属性を考慮した避難経路推薦法を用いる。MAS における属性毎の避難者割合を表 2 に示す。

4.6 通信

MAS では、無線通信を用いて対象エリアの情報ボックスと避難者端末がブロードキャストでデータを送信し、それらの通信要求は、2 秒に 1 回、20% の確率で発生すると想定した。また、避難者端末からの通信要求が対象エリア外からは発生しな

いものとする。さらに、通信範囲内で通信チャネル数が不足した場合には、Erlang-B 式により呼損が発生させる。なお、本検討では、避難者同士が直接通信を行わず、情報ボックスとのみ通信を行うことを想定した。避難者端末が送信したデータを情報ボックスが受信すると、避難者端末は 600 秒間データの送信を停止する。また、[21] にて、IEEE 802.11b/g の屋外での通信距離が約 150 m であると報告されており、加えて、今回の MAS の対象である都市部では障害物が多いことを想定し、情報ボックスと避難者端末の通信可能距離を 30 m と 100 m に設定した。

4.7 BC の配置

我々は、災害発生前に情報ボックスを配置することを想定した。そのため、本稿のシミュレーションにおける BC の導出は、災害時の道路の故障は考慮せず、すべての道路が通行可能であることを前提に導出している。

4.8 パワーファクタ

我々は、データ送信回数と避難者端末の通信距離を考慮したパワーファクタ PF を評価指標として用いる。 PF は式 (4) で与えられる。

$$PF = T \cdot r^2 \quad (4)$$

ここで、 T はデータ送信回数を表し、 r は通信半径を表す。なお、端末の消費電力 P は PF と比例関係にあり、式 (5) で表される。

$$P = \alpha \cdot PF \quad (5)$$

このとき、 α はエネルギー係数とする。

5. 結 果

各条件で 10 回の MAS を試行し、避難者端末の平均パワーファクタと避難完了率の時間変化の観点から、本手法を評価した。図 2 は、横軸に情報ボックスの数を、縦軸にタイムスロットごとの平均パワーファクタを示したグラフである。最小配置間隔を 300 m または 500 m とした提案手法と、単純に BC の高い順に情報ボックスを配置した手法、および 4, 9, 16, 25, 36 等分割した矩形領域の中心付近のノードに情報ボックスを配置する手法を比較した。また、各情報ボックスの配置方法について、避難者端末と情報ボックスの間の無線通信半径が 30 m の場合と 100 m の場合で評価した。なお、情報ボックスの最小配置間隔を 500 m とした場合、対象領域に配置可能な最大数は 30 個となるため、最小配置間隔 500 m のシミュレーション結果に、情報ボックス数が 35 個の結果は存在しない。

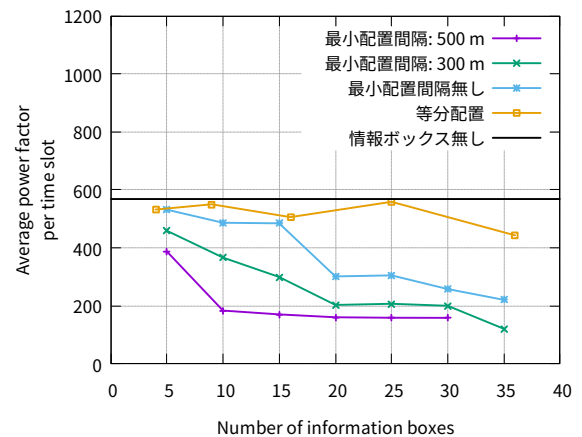
図 2 より、同じ配置方法であれば、避難者端末と情報ボックスの通信半径が大きくなるほど、避難者端末の平均パワーファクタが大きくなるのが分かる。これは、本稿のパワーファクタが避難者端末と情報 box の通信距離の 2 乗に比例することに起因する。その結果、通信距離が 100 m の図 2b の垂直軸の規模は、通信距離が 30 m の図 2a の約 10 倍となっている。

BC が大きな順に最小配置間隔を設定して、情報ボックスを配置する我々の手法では、情報ボックスの最小配置距離が大き

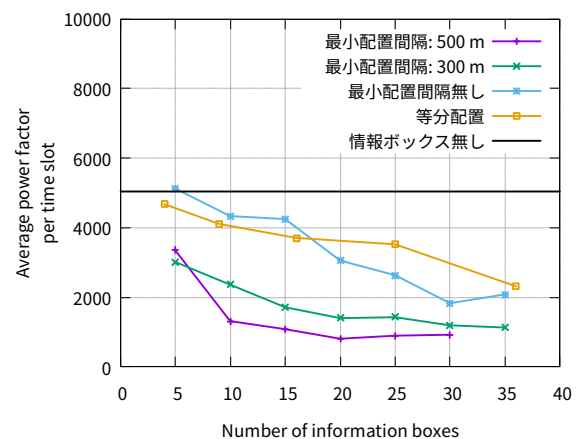
くなるほど平均パワーファクタが低くなる。これは、最小配置距離が大きいかほど情報ボックスの配置が地理的に分散するため、結果的に情報ボックスと通信可能な避難者の総数が増加するためである。

BC の大きな順に情報ボックスを最小配置間隔を設けて配置した場合に、最低平均パワーファクタとなった。次に平均パワーファクタが低かったのは、BC の大きな順に情報ボックスを配置し最小配置間隔を設定しなかった場合であり、最も平均パワーファクタが高かったのは、対象エリアの矩形分割の中心に最も近いノードにボックスを配置した場合であった。これらの結果から、避難者が通過する可能性を示す BC は、情報ボックスの配置を決定する際に重要な考慮事項であることが分かる。

図 3 は、被災地以外に避難した避難者の避難完了率の時間変化を示したグラフである。この結果から、提案手法により避難者端末の通信頻度が低下しても、避難者は避難に必要な被災地の情報を迅速に入手できていることが分かる。また、提案手法を用いた場合には、僅かではあるもののより早く避難を完了していることが明らかになった。



(a) 通信半径: 30 m



(b) 通信半径: 100 m

図 2: 情報ボックス数に対するタイムスロット毎の平均パワーファクタ

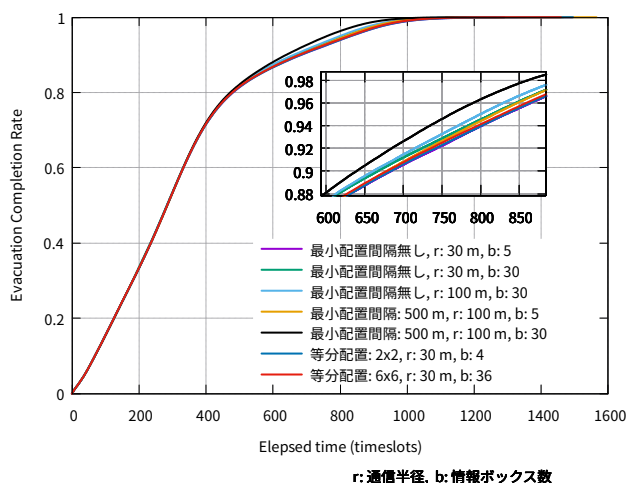


図 3: 対象地域外への避難完了割合の時間変化

6. ま と め

災害時に被災者が災害情報を共有する際に、被災者の携帯端末の消費電力を削減するための情報ボックス配置法を提案した。本手法の評価を、避難者の端末のパワーファクタと避難完了率の観点から行った。その結果、情報ボックスの数が多いほどパワーファクタが低下すること、情報ボックスの配置を決める際には BC が重要であることが明らかにした。また、情報ボックスの配置方法やボックスの数に関わらず、被災地外への避難完了度の時間変化はほぼ一定であることが確認された。今後は、各町丁の人口を考慮して BC を検討し、避難者への情報伝搬度の時間的変化を評価する予定である。また、情報ボックスと避難者端末の間の通信方式についても検討する予定である。

謝 辞

本研究は JSPS 科研費 JP21H03436 の助成を受けたものである。

文 献

- [1] Ministry of Internal Affairs and Communications, Japan: “2011 WHITE PAPER Information and Communications in Japan”, Japanese Government (2011).
- [2] M. Misumi and N. Kamiyama: “Evacuation-Route recommendation using DTN with evacuee attributes in disasters”, IEEE WCNC 2021, Nanjing, China, pp. 1–7 (2021).
- [3] 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).
- [4] 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”, in *Proc. IET ISORA2013*, Institution of Engineering and Technology, pp. 65–72 (2013).
- [5] N. Komatsu, M. Sasabe, J. Kawahara and S. Kasahara: “Automatic evacuation guiding scheme based on implicit interactions between evacuees and their mobile nodes”, *GeoInformatica*, 1, pp. 127–141 (2018).
- [6] Y. Iizuka, K. Yoshida and K. Iizuka: “An Effective Disaster Evacuation Assist System Utilized by an Ad-Hoc Network”, in *HCI International*, Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 31–35.
- [7] A. Fujihara and H. Miwa: “Disaster Evacuation Guidance Using Opportunistic Communication: The Potential for Opportunity-Based Service”, in *Eur. J. Oper. Res.*, Springer, Cham, pp. 425–446.
- [8] C. Lin, P. Chen and W. Chen: “An Adaptive Guiding Protocol for Crowd Evacuation Based on Wireless Sensor Networks”, in *Proc. IEEE VTC-2013-Spring*, IEEE, pp. 1–5 (2013).
- [9] 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*, 1, p. 164 (2017).
- [10] R. Sato, O. Oyakhire and K. Gyoda: “Performance evaluation of disaster information communication system using message ferry”, 2019 34th International Technical Conference on Circuits/Systems, Computers and Communications (ITC-CSCC), pp. 1–4 (2019).
- [11] M. Otomo, K. Hashimoto, N. Uchida and Y. Shibata: “Mobile cloud computing usage for onboard vehicle servers in collecting disaster data information”, 2017 IEEE 8th International Conference on Awareness Science and Technology (iCAST), pp. 475–480 (2017).
- [12] OpenStreetMap contributors: “Planet dump retrieved from <https://planet.osm.org>”, <https://www.openstreetmap.org> (2019).
- [13] Geospatial Information Authority of Japan: “Basic Geographical Information Download Service”, <https://fgd.gsi.go.jp/download/mapGis.php>.
- [14] City of Osaka: “Kita-ku, Osaka City: Designated disaster evacuation site”, <https://www.city.osaka.lg.jp/kita/page/0000299024.html>.
- [15] City of Osaka: “Kita-ku, Osaka City: Temporary evacuation site”, <https://www.city.osaka.lg.jp/kita/page/0000298932.html>.
- [16] City of Osaka: “Kita-ku, Osaka City: Designated safety area”, <https://www.city.osaka.lg.jp/kita/page/0000298928.html>.
- [17] City of Osaka: “2010 Census Daytime population (estimate) by section in Osaka City”, <https://www.city.osaka.lg.jp/toshikeikaku/page/0000248962.html>.
- [18] Planning and Coordination Bureau, City of Osaka: “Outline of the 2010 National Census (Daytime population of Osaka City)”, <https://www.city.osaka.lg.jp/toshikeikaku/cmsfiles/contents/0000176/176459/gaiyou.pdf>.
- [19] OpenStreetMap Wiki: “Key:highway”, <https://wiki.openstreetmap.org/wiki/Key:highway>.
- [20] 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).
- [21] A. B. Fadiah, A. Al-Lawati, S. Al-Maskari, A. Touzene and A. Al-Kindi: “Experimental performance evaluation of wireless 802.11b networks”, 2008 First International Conference on the Applications of Digital Information and Web Technologies (ICADIWT), pp. 151–155 (2008).