

MANET を用いた避難経路支援システムのための災害状況の変化を考慮した 避難経路選択手法の実験的評価

Experimental Evaluation of Evacuation Route Selection Considering Changes of Disaster Situation for MANET-based Building Evacuation System

藤中 宥成[†] 村上 慎之介^{††} 大田 知行^{††} 角田 良明^{††}

Hironori Fujinaka[†] Shinnosuke Murakami^{††} Tomoyuki Ohta^{††} Yoshiaki Kakuda^{††}

[†] 広島市立大学 情報科学部 ^{††} 広島市立大学 大学院情報科学研究科

1 はじめに

緊急時に、建物内にいる人にとって、迅速かつ効率的に避難を行うことは非常に重要である。これまで、建物内にいる人へ避難経路を提供する多くの手法が提案されてきた [1, 2]。Mobile Ad hoc NETwork (MANET) は通信インフラストラクチャに依存しないため停電に強く、サーバの障害や過負荷に左右されないという強みがある。この強みを活かして、MANET を用いた避難システムが提案されている [3]。

この避難システムでは、モバイル端末を使用して建物内のセクション状態や出口ドアの混雑度などの避難情報を交換する。この情報に基づいて、各モバイル端末は適切な避難経路を計算する。これまで、システムを評価するために、様々なシミュレーション実験が行われ、多くのユーザタイプの避難完了時間について議論されてきた。しかし、これまで行ってきたシミュレーション評価では、災害状況の変化が考慮されていない。

本稿では、時間とともに災害状況を変更する機能をシミュレータに実装し、様々なユーザタイプごとの避難完了時間の観点から MANET を用いた避難システムを評価し、考察する。

2 MANET を用いた避難システム

2.1 ビルディングモデル

今回用いるビルディングモデルは部屋に見立てられたセクションで区切られており、その中には建物の出口を含んだものも存在する。建物のフロア図に基づいて、各ユーザの最短避難経路を作成する。ユーザに現在地を知らせるために各セクションには少なくとも一つのビーコンが設置されており、ユーザは現在地を得るために最も強い Received Signal Strength Indicator (RSSI) 信号を発するビーコンを探す。

各ユーザはすべてのセクションの状態と占有率を常に把握する。占有率はセクションにいるユーザ数を表す。セクション状態 (ss_i) は、建物内のセクション i についての情報を表す。セクションは異なった三つの状態に分ける。

$$ss_i \in \{unknown|safe|blocked\}$$

どのユーザもセクションに関する情報を持っていない場合、そのセクション状態を unknown に設定する。

少なくとも一人のユーザがセクション内に存在する場合、そのセクション状態を safe に設定する。もしセクションが、火災のような災害によって通り抜けできない場合、そのセクション状態は blocked となる。セクション状態は建物の全体的な状況を得るためにユーザ間でやり取りされる。

出口セクションは隣接するセクションとドアでつながっている。各ドアの進入率 [人/秒] は単位時間あたりでどれだけのユーザがドアを通過できるかで決定される。ユーザ数が多い場合、すぐにドアを通過できないユーザが発生する可能性がある。

2.2 MANET 通信

メッセージはマルチホップで他のモバイル端末に転送される。特に、local flooding と flooding はユーザ間で情報を共有するために使われる。local flooding は、同じセクション内にいるユーザに情報を転送するフラッディングである。例えば、セクション 3 にいる端末が local flooding によってメッセージを送ったときはセクション 3 にいる端末のみにメッセージが届けられる。flooding は通信範囲内にあるすべての端末へ向けてメッセージを転送するフラッディングである。しかし、端末同士が通信範囲外にいと、互いに通信できないグループに分けられる。ネットワーク上でユーザ情報やセクション情報を効率的に分配するためにユーザは local flooding でデータを送る。また、各セクションには一人のコーディネータが存在する。例えば、セクション内のユーザの内、ID が最も小さいユーザがコーディネータとして選出される可能性がある。コーディネータは自身のセクションに存在するすべてのユーザ情報を収集し、flooding を用いてネットワーク全体に存在するユーザへ情報を送る。

2.3 ユーザモデル

ユーザはユーザ ID、現在ユーザが位置するセクション、通過したセクション、ユーザの状態、Local Situation (LS)、Global Situation (GS) によって構成される。通過したセクションは、ユーザが最初に配置されるセクションから現在のセクションまでの経路のことを示す。ユーザの状態は、ユーザがコーディネータかどうかを示す。LS は、ユーザが現在いるセクション内の状態を示し、local flooding によって収集される。

GS は、建物内全体の状態を示し、flooding によって収集される。ユーザはこの GS を用いて現状で最適な避難経路を計算する。コーディネータは flooding でネットワーク全体に存在するユーザに LS を送る。

2.4 避難経路

はじめに、ユーザは建物のフロア図を用いて様々な避難経路を構築する。このとき、ユーザのいる位置から出口までの避難経路の中から、最も短い経路を最短避難経路とする。しかし、各セクションの混雑状況によっては、必ずしも最短避難経路がユーザにとって最適な避難経路とは限らない。そこで、各ユーザは実際の状況を考慮して最適な避難経路を自身で決定する必要がある。そのため、経路の辺に重みをつけ、それを基に経路を決定する方法を提案する。重みはセクションを通過することがどれほど困難かを表す。各セクションの占有率は最適避難経路を計算するための重みとして用いられる。例えば、セクション中に 5 人いたら、重みは 5 に設定される。また、ユーザは blocked セクションを通過することができないため、経路の中で最も大きい重みを設定する。また、避難時間を遅延させるために、混雑したセクションにつながる辺には大きい重みを設定する。unknown セクションはユーザのタイプに応じて特定のリスクを引き起こす。例えば、注意深いユーザは unknown セクションを避けるため、unknown セクションに大きい重みを設定する。また、リスクを許容するユーザは unknown セクションに小さい重みを設定し、unknown セクションを含んだ避難経路を積極的に選択する。ユーザの持っている情報は動的に変わるため、別セクションに移動したときに避難経路を再計算する。

3 災害状況を変えるためのシミュレータの機能

私たちが行ってきたシミュレーション実験 [3] から、blocked セクションの観点より改善を行った。現状、ユーザの初期配置から避難完了までの間に災害状況が変化しない。そのため、避難途中で災害状況が変化した場合のユーザの動きについて考察ができていない。そこで、本研究では、避難途中で blocked セクションが増加する場合の避難状況の変化について考察した。

以下にシミュレータに追加した仕組みを示す。

• 危険イベントの追加発生：

ユーザが避難を開始して一定時間経過後、既に存在する blocked セクションとは別のセクションで危険イベントが発生する仕組みを追加した。危険イベントが発生したセクションは blocked セクションに設定する。

• 追加した blocked セクションに対するユーザの動作：

二つ目の blocked セクションが追加されたとき、そのセクションにユーザが入るまで blocked セク

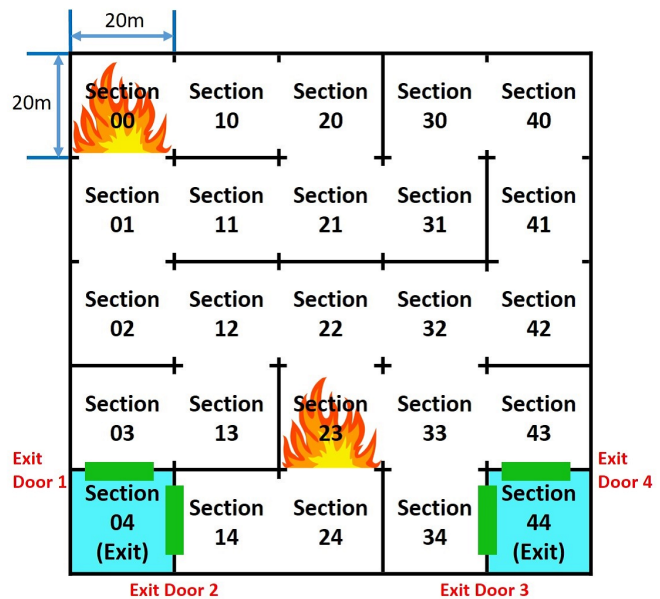


図 1: セクション 00 と 23 が blocked セクション、セクション 04 と 44 が出口セクションの場合のビルディングトポロジ

ションが増加したことはユーザには分からない。そのため、ユーザは blocked セクションに侵入した場合、U ターンを行うと同時に、フィールド全体の他のユーザに二番目の blocked セクションの情報を送る。そして、ユーザはその情報を受け取ると同時に、二番目の blocked セクションを避けるため避難経路の再計算を行う。また、ユーザが存在するセクション内で危険イベントが発生する場合も考えられる。その場合、セクション内に存在するユーザは U ターンを行わずそのセクションを通り過ぎる。

これにより、避難途中でユーザが blocked セクションに遭遇した場合に行う動作が、避難時間や避難効率にどのような影響を及ぼすのか考察することができる。

4 シミュレーション評価

4.1 実験環境

図 1 と表 1 はビルディングトポロジとシミュレーションパラメータを示す。セクション 00 で火災のような災害が起きた場合、ユーザは導出された避難経路を基に出口（ここではセクション 04, 44）に向かって建物から避難を始める。予備実験より、危険イベントが 50 秒で再度発生する場合、より多くのユーザが影響を受けることが確認できた。そのため、本シミュレーションではユーザが避難を開始してから 50 秒経過した時点で危険イベントがもう一度発生するように設定した。また、今回二つ目の危険イベントはセクション 13, 23, および 33 のいずれかで発生する。これらの三つのセクションは、出口セクションの近くにあり、避難する

表 1: シミュレーションパラメーター

ユーザ数	200
移動速度 [m/s]	1-1.4
通信範囲 [m]	20
フィールドサイズ [m^2]	100 × 100
セクションサイズ [m^2]	20 × 20
セクション数	25
blocked セクション数	1 - 2
blocked セクション	fixed(00), 13, 23, 33
出口セクション	04, 44
出口の侵入率 [users/second]	0.2
実行回数	10

表 2: blocked セクションがセクション 00 の場合の実験結果

	shortest	every	risky	central
避難時間 [s]				
平均避難時間	186.8	148.3	141.0	137.7
最悪避難時間	502.1	349.2	361.6	362.7
各出口を通過したユーザ数				
出口ドア 1	98.9	66.1	59.3	54.8
出口ドア 2	27.9	34.1	45.7	48.7
出口ドア 3	55.2	53.2	47.7	46.8
出口ドア 4	18.0	46.6	47.3	49.7
ユーザの負荷				
ループ数	0.0	3.5	9.9	20.9

ユーザの行動に大きな影響を与える。ユーザは危険なセクションに進入した場合、即座に避難経路を再計算し U ターンを行う。それと同時に、フィールド全体に二つ目の blocked セクションの情報を flooding を用いて他のユーザへ転送する。この情報を受け取ったユーザは直ちに避難経路を再計算し、二つ目の blocked セクションを避ける避難経路を選択する。

各ユーザは 5 秒ごとに local flooding を用いて現在地を送信すると仮定する。5 秒経過する度にセクションのコーディネータは flooding を用いて自身のいるセクションの情報を転送する。もし、20 秒間更新が無い情報があれば削除する。ユーザは無作為に各セクション内に分布され、いずれかの出口のに向かって動く。既に述べたように、異なる動作を行うユーザとして、注意深いユーザ (every) とリスクを許容するユーザ (risky) の二種類のユーザを区別する。

4.2 シミュレーション結果

表 2~5 には、blocked セクションの配置と各ユーザタイプによるシミュレーション結果をそれぞれ示す。‘shortest’ は、セクション状態等の情報を考慮せず、最短経路のみを計算する方式である。ただし、ユーザが二つ目の blocked セクションに進入した場合のみ、再計算を行う。‘every’ とは、セクション状態を考慮し、unknown セクションを極力避けるよう避難経路を計算する方式である。‘risky’ とは、セクション状態を考慮す

表 3: 最初の blocked セクションがセクション 00、二つ目の blocked セクションがセクション 13 の場合の実験結果

	shortest	every	risky	central
避難時間 [s]				
平均避難時間	202.5	197.5	194.4	154.9
最悪避難時間	546.3	437.3	420.6	328.0
各出口を通過したユーザ数				
出口ドア 1	28.0	27.0	27.8	27.8
出口ドア 2	91.9	48.4	54.6	54.7
出口ドア 3	60.1	60.6	58.0	58.2
出口ドア 4	20.0	64.0	59.7	59.3
ユーザの負荷				
ループ数	47.9	70.7	79.2	35.5

表 4: 最初の blocked セクションがセクション 00、二つ目の blocked セクションがセクション 23 の場合の実験結果

	shortest	every	risky	central
避難時間 [s]				
平均避難時間	189.5	181.1	181.0	147.1
最悪避難時間	510.9	451.6	442.8	351.3
各出口を通過したユーザ数				
出口ドア 1	100.2	70.8	64.8	65.2
出口ドア 2	25.7	25.6	22.6	27.2
出口ドア 3	55.1	51.7	55.8	53.1
出口ドア 4	19.0	51.9	56.8	54.5
ユーザの負荷				
ループ数	2.6	46.6	54.8	17.4

るが、unknown セクションを積極的に通るように避難経路を計算する方式である。‘central’ とは、各ユーザが集中型サーバへ自身の情報を送る。また、ユーザは集中型サーバから建物内全体の情報を取得し、その情報を用いて避難経路を計算する方式である。そのため、ユーザは常に最新の情報を持っているため、‘central’ は最も理想の方式となる。ループ数とは、同じセクションを二度以上通過したユーザ数を表す。ループ数が増加するほどユーザの移動距離や移動時間が増加し、ユーザの負荷が大きくなる。

表 2 は blocked セクションが増加しない場合のシミュレーション結果を表す。shortest の平均避難時間と最悪避難時間がともに他のユーザよりも遅くなっている。これは各出口にユーザが分散して避難が行われず、出口付近で混雑しているためと考えられる。

表 3 はセクション 13 で危険イベントが発生した場合のシミュレーション結果を表す。どのユーザタイプの結果でも、出口 1 のユーザ数が小さくなっている。これは、発生した危険イベントによって出口 1 に向かう経路が塞がれたためである。every は出口のユーザ数に偏りが生じているが、risky と central ではユーザが分散でき

表 5: 最初の blocked セクションがセクション 00, 二つ目の blocked セクションがセクション 33 の場合の実験結果

	shortest	every	risky	central
避難時間 [s]				
平均避難時間	227.3	249.5	240.7	195.6
最悪避難時間	591.3	592.3	572.6	437.0
各出口を通過したユーザ数				
出口ドア 1	116.7	89.2	82.7	83.8
出口ドア 2	49.4	72.5	77.4	80.8
出口ドア 3	8.3	15.5	16.9	8.7
出口ドア 4	25.6	22.8	23.1	26.7
ユーザの負荷				
ループ数	26.2	77.0	76.4	35.5

ている。every は unknown セクションを極力避けるよう避難経路を計算するため、unknown セクションが増えると避難経路が限定されてしまう。risky は unknown セクションを積極的に通るため、unknown セクションが増えても避難経路が限定されることはない。

表 4 はセクション 23 で危険イベントが発生した場合のシミュレーション結果を表す。どのユーザの結果でも、出口 2 のユーザ数が小さくなっている。これは、発生した危険イベントによって出口 2 に向かう経路が塞がれたためである。shortest の場合、最短距離として多く選ぶ出口が出口 1,3 のため、表 2 の結果とあまり差がでなかった。every は出口 1 にユーザが偏っている事が分かる。これは、セクション 23 が塞がれることによりフィールドの左半分ユーザがセクション 44 へ向かう各経路の中に unknown セクションが含まれてしまうため、セクション 44 へ向かう経路を選択できないからであると考えられる。

表 5 はセクション 33 で危険イベントが発生した場合のシミュレーション結果を表す。どのユーザの結果でも、出口 3,4 のユーザ数が小さくなっている。これは、発生した危険イベントによって出口 3,4 に向かう経路がどちらも塞がれたためである。しかし、shortest 以外のユーザは出口 1,2 でユーザの分散ができています。

結果として、避難途中で blocked セクションが増加し、出口セクションが一部塞がってしまった場合でも、every や risky は残った出口の中で分散して避難できていることが分かった。

5 まとめ

本稿では、シミュレーション実験を通して災害状況の変化を検討するための MANET を用いた避難経路支援システムについて述べた。今後の課題として、ネットワーク性能を評価するシステムを検討していく。

謝辞

本研究の一部は JSPS 科研費 JP17K00130 の助成を受けたものである。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- [1] M. Lujak, H. Billhardt, J. Dunkel, A. Fernández, R. Hermoso, and S. Ossowski, "A distributed architecture for real-time evacuation guidance in large smart buildings," Computer Science and Information Systems vol. 14(1), pp. 257-282, 2017.
- [2] H. Billhardt, J. Dunkel, M. Lujak, A. Fernández, R. Hermoso, and S. Ossowski, "An architecture for situation-aware evacuation guidance in smart buildings," Workshop on Ambient Intelligence for Large Premises (AmiLP) in conjunction with European Conference on Artificial Intelligence (ECAI), 2016.
- [3] T. Ohta, and J. Dunkel, "Simulation of evacuation route guidance in MANET-based building evacuation system," Proc. of the 12th EAI International Conference on Performance Evaluation Methodologies and Tools (VALUETOOLS 2019), pp.195-196, March 2019.