

災害状況と要配慮者を考慮した UAV による避難行動支援の効果の検討

関真子*1・桑名杏奈*2・浅本紀子*3
Email: seki.mako@is.ocha.ac.jp

*1: お茶の水女子大学大学院 人間文化創成科学研究科 理学専攻 情報科学コース

*2: お茶の水女子大学 理学部 情報科学科 准教授

*3: お茶の水女子大学 理学部 情報科学科 教授

◎Key Words マルチ・エージェント・シミュレーション, UAV, 避難支援

1. はじめに

災害時には、全ての人が早急に避難場所へ安全に避難することが重要である。特に二次被害も想定される状況下では、避難中に家屋の倒壊、火災、落下物、地震等¹⁾の危険に見舞われ、避難所に安全に到着することが困難な場合があるという課題がある。こうした二次被害から身を守るため、災害状況や避難場所までの安全な経路をリアルタイムで把握することが必要となる。そのため、災害状況に応じた避難誘導が重要である²⁾と考える。しかし、人手では誘導する人がさらに二次災害に遭う危険がある。

UAV (Unmanned Aerial Vehicle)は空撮による災害時の情報収集や要救助者の探索が可能で、近年シミュレーションや実証実験によるさまざまな研究がされている。

片山や高橋らは、エージェント型 IoT デバイスが協調して災害状況を把握し、その情報を基に避難行動プランを生成し、通知を受けた UAV や UGV が避難誘導を行える自律的な避難行動支援システムの構築を行なっている。^① さらに複数の UAV の協調による避難誘導機能も開発しており、夜間の要救助者検出機能や、標識をつけた UAV の試作、沿岸部地域における津波からの避難を想定し実証実験を行っている。^② しかし、これらの避難誘導は地上のデバイスから得られる情報をもとに UAV が避難者を直接先導する方法を用いており、避難対象者が大勢いる場合には適切ではなく、UAV による災害状況の探索は行われない。また杉安らは、UAV が避難目標地点に滞在し続け、避難者に情報提供する誘導による沿岸部での実証実験を行なっているが、誘導サインの視認性には課題が見られ、対象者は健常者のみである。^③

関口らは山間部での避難を想定し、情報収集と避難誘導の2種類の役割を2つの UAV に持たせて連携させ、避難支援システムを構築し、シミュレータにより実験を行っている。^④

鈴木らは AR マーカを装着した人をドローンが認識し、避難者と協調して誘導する支援システムを提案し、シミュレーションにより人1名ドローン1台での誘導の実現可能性を示している。^⑤ 妹尾らは、単独歩行が可能な要配慮者の避難支援システムを提案し、ドローンの空撮画像から AI を用いて物体を検出する「避難経路の状況把握」と避難中に AR マーカを認識して要配慮者を監視する「避難行動の監視」について実証実験により検討した。^⑥ さらに久保らは自律飛行ドローンの避難者検出による避難誘導実験と AR マーカによる避難監視実験を行い、要配慮者の安全な誘導、支援者不足の解消を目指している。のし

かし、大勢の避難者誘導にはまだ対応しておらず、要配慮者にとって通行可能な避難経路の判断方法については検討段階である。またいつでも UAV が AR マーカを認識できるとは限らないため、災害時には困難である可能性がある。

山崎らは UAV が避難者を探索し災害地域の情報を直接提供し、自律的に避難させる手法を提案した。マルチエージェントシミュレーションにより一定時間内での避難完了者増加に繋がること、および、UAV の飛行経路を検討することは避難完了者数の増加に大きく影響することを示した。^⑧ しかし、経路計算のタイミングとしては避難者が通行止め発生場所に辿りついた時については述べられていない。避難者の歩行速度が一定であり、身体的特徴、健康状態等を考慮していない。

伊吹らは災害時の地上のセンサー機器の損傷を考慮し、複数の UAV と避難者の携帯端末を組み合わせ、避難者探索と障害箇所の探索を同時並行に行い、避難者を発見するたびに誘導を実施する方式を提案した。提案手法は、センサーが損傷していない場合と同程度の時間で全員が避難完了可能であることをシミュレーションにより示した。また被災地域の探索を完了してから順に誘導を実施する場合と比較すると避難完了時間が短くなることを示した。^⑨ しかし、避難者の身体的特徴や移動方法については触れられておらず、通行止め箇所は存在するものの避難所へ到着できない場合を排除しているため、現実的ではない。

本研究では、MAS を用いて、屋外で災害状況が時々刻々と変わる中で避難する状況を想定したモデルを構築する。UAV の災害状況の情報収集、避難者への情報共有が避難行動の効率化、安全性向上に与える効果について評価、検討する。伊吹らの研究^⑨とは異なり、避難完了できない避難者の存在を考慮する。

また、高齢者や障害者、幼児、児童、生徒など要配慮者の安全な避難は特に重要である。急な坂や狭い通路、混雑した場所など要配慮者には歩行が困難である可能性があるため、こうした場所を通らないよう要配慮者に対応した UAV による支援方法を検討することも目指す。

2. MAS

マルチエージェントシミュレーション(以下 MAS)とは多数のエージェントに対して同時進行的にルールを課し、エージェント間や周囲の環境との間の相互作用を考慮して進行させる仮想実験である。局所的な相互作用が連鎖した結果として集団的現象に及ぼす影響を調べることが

でき、予測不能な社会現象の分析に用いられている。⁽¹⁰⁾

3. モデル構築

シミュレータ *artisoc cloud* を用いて避難者エージェント、避難所エージェント、UAV エージェント、障害物エージェントを生成し、python により避難行動のモデルを構築した。シミュレーション実行時の様子を図1に示す。図中のグレーの罫線で区切られたものがセルである。色がついた丸形の *person* が避難者エージェント、三角形の *drone* が UAV エージェント、緑色の×で表された範囲が避難所エージェント、青色の四角形が障害物エージェントを表す。エージェントの詳細については後述する。

3.1. ポテンシャル法による経路計算

本モデルは「ポテンシャル法で移動する⁽¹¹⁾」モデルを参考に作成している。ポテンシャル法とは「ボールが高いところから低いところへ転がっていく性質を利用した探索方法」である。次のような方法で計算する。

まず目的地のセルに最も小さいポテンシャル値を代入し「その周り上下左右に「+1」した値を代入」する。通行可能なセル全てに順番にポテンシャル値を格納したものをポテンシャルマップとする。出発地からポテンシャル値の小さいセルを辿ると最短経路で目的地に到着する。

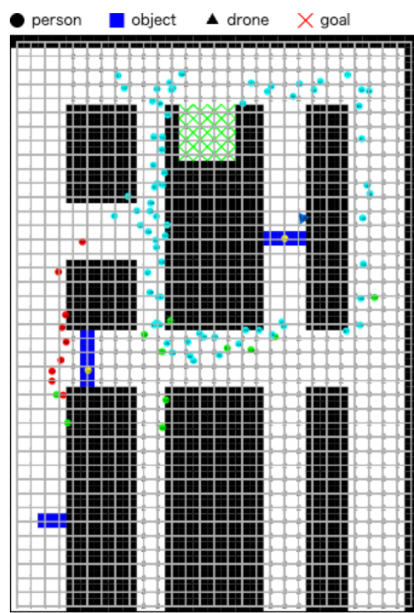


図 1 モデルの空間

3.2. 空間設定

図 1 のように災害エリアを模した壁や建物等と通路からなる街を簡易的に再現した。白い部分は避難者エージェントが歩行可能な通路であり、黒い部分は壁等である。

3.3. 障害物エージェント

災害状況が時間経過とともに落下物、地割れ、家屋倒壊、火災等の二次災害により変化していく様子を再現する。シミュレーション 3 ステップごとに一定の確率で障害物エージェントを 1 つ配置する。障害物も通路をふさぐ形で配置される。1 列における障害物の長さの上限を 4 と

し、一度配置された障害物はシミュレーション実行中に消えることはないものとする。障害物の各列は生成された順番と、構成する障害物の座標集合、通行可否を表す情報を保持する。図 1 では通行止めを発生させている障害物の列が 2 つある。

3.4. 避難者エージェント

避難者は全員が避難所の位置を知っているものとし、通路上を前述のポテンシャル法に従い移動し、避難所へ向かう。ただし、ステップ開始時に現在位置から 0.7 の距離の範囲内に障害物が確認できた場合は移動をやめるものとし、図 1 では黄色の●で表される。

基本的な移動としては周囲 8 方向のうち通路で他の人が存在しないセルの中から一番ポテンシャル値が小さいセルを選び、その方向に向かう。各避難者ごとに以下の情報を避難中保持し続ける。

空間情報

空間のすべてのセルについて壁か通路かを表す値を持ち、障害物を発見するたびに更新する。

ポテンシャルマップ

空間の通路上のすべてのセルについてのポテンシャル値を格納し、ポテンシャルの再計算をするたびに更新する。

(1) 生成

1 ステップごとに 10 人ずつ 14 ステップ目まで通路上にランダムに生成する。1 ステップごとに進む距離を歩行速度とし、1.2~1.4 の範囲でランダムに設定する。

(2) ステップごとの行動

障害物が確認できなかった場合は以下を行う。

UAV からの情報取得

UAV エージェントが保持する空間情報に基づき、自身の空間情報を更新するとともに、ポテンシャル値を再計算しポテンシャルマップを更新する。図 1 では青色の●で表される。

周囲の状況確認

具体的な進路決定の方法について述べる。

上下左右及び斜めの各方向について以下を繰り返す。

障害物の存在の確認

現在位置からその方向に 1 進み、自分を中心とした半径 1 の円の範囲内に障害物が存在するか確認する。

ポテンシャル値の取得

障害物が存在せず、避難者エージェントが存在しない場合、その方向の隣接セルのポテンシャル値を取得し、元の位置に戻る。

通行止め発生箇所の発見

障害物が存在する場合、その障害物が通行止めを発生させている障害物エージェントの列の一部であるか判断する。通路が塞がっていない場合はポテンシャル値を取得せず、元の位置に戻り、次の方向について周囲の状況を確認する。

通路が塞がっていると判断した場合は、ポテンシャル値の再計算を行い、ポテンシャルマップを更新する。図 1 では赤色の●で表される。更新されたポテンシャルマップの値に従うため、もう一度周囲 8 方向について状況確認を行うものとする。

進路決定

以上に基づき進む方向を決める。

(3) 避難完了

避難所エージェントに到着すると避難完了とし、避難完了人数を加算する。空間上から消える。

3.5. UAV エージェント

UAV エージェントは避難所エージェント上に初期配置され、速度を5とし、北を向いた状態で1つ生成する。災害エリア上空を飛行し、通行止め発生箇所を発見すると一定の範囲内に存在する避難者に情報を伝達する。

前提条件

認識可能な範囲、情報の伝達可能な範囲を、UAVを中心とした半径10の円としている。空間情報（空間のすべてのセルについて壁か通路かを表す値）を飛行中保持する。

通行止め発生箇所の発見

UAVの空撮画像の解析による物体検出を想定しているが、モデルの簡略化のため、通行止めを発生させている障害物エージェントの列のうち、一つでも認識範囲内に存在すれば、通行止め発生箇所を発見できたと判断し、シミュレーション実行中記憶し続ける。

ステップごとの行動

方向を変化させる範囲を左右30度とする。

基本的な行動

まず、進む方向をランダムに決める。「1進み、周囲を認識する」を5回繰り返す。すなわち、シミュレーション1ステップ中に5進む。

境界条件

空間はループしないとする。まず現在地が空間の端である場合、端から遠ざかる方向に1進み、ランダムに方向を変化させる。空間の端でない場合は1進む。

障害物の情報収集

移動しながら周囲の空間を認識する。認識範囲内のすべての障害物エージェントの座標を記録し、初めて認識した障害物の位置のセルについて空間情報を更新する。

避難者への情報共有

新たに通行止め発生箇所を発見する度に、更新した空間情報を伝達可能な範囲内を移動している避難者に共有する。伝達手段はスマートフォンによる通信、音声によるアナウンスなどを想定する。

4. シミュレーション方法

表1に示すようなパターンでシミュレーションを実行する。1回あたり150ステップまで実行する。

表1 シミュレーションパターン

パターン名	UAVの有無	通行止めの有無
パターン1	なし	なし
パターン2	なし	あり
パターン3	あり	あり

評価指標

避難完了率 $C_{step}(\%)$ としてそのステップまでの全ての避難者を n 、避難が完了している人の数を m とし、次の式で定義する。

$$C_{step} = \frac{m}{n} \times 100$$

パターン2と3については避難を完了できない避難者が生じるため、避難完了率が80%以上に到達したステップ数とシミュレーション終了時の避難完了率を算出する。パターン1については、全員が避難を完了した時点でシミュレーションを終了し、そのステップ数を求める。

5. 結果

各パターンで10回シミュレーションを行い、求めた評価指標について平均を算出した。表2にその結果を示す。

表2 シミュレーション結果

パターン名	避難を完了したステップ数	避難完了率が80%以上に到達するステップ数	避難完了率(%)
パターン1	68.6	47.6	100
パターン2	-	59.5	93.8
パターン3	-	55.0	96.3

5.1. 通行止め発生の有無の比較

パターン1とパターン2、3を比べると、通行止め発生により避難完了率は減り、避難完了率が80%以上に到達するステップ数は増えている。

5.2. UAVの有無の比較

パターン2と3を比べると、UAVのあるパターン3の方が、わずかではあるが避難完了率が高く、避難完了率が80%以上に到達したステップ数が減っている。

UAVが存在しなければ、避難者は自身が通行止め発生箇所を発見するまで避難所への経路を変更できない。しかし、通行止め発生箇所を発見したUAVによる空間情報の伝達により、伝達された通行止め発生箇所を避難者がまだ発見していなくても、その箇所を迂回するよう避難経路を変更し、避難所へ到着可能になるからだと考えられる。

この結果、UAVの空間内の障害物の探索、避難者への通行止め発生箇所の情報共有により、一定時間内の避難完了率が増加することが分かった。これは山崎らの研究⁸⁾と類似した結果であるが、避難完了が早くなることは異なる結果である。原因については今後分析する。

パターン2について、シミュレーション終了時の避難完了率が76.4%と低い試行があった。終了時点のシミュレーションの様子を図2に示す。

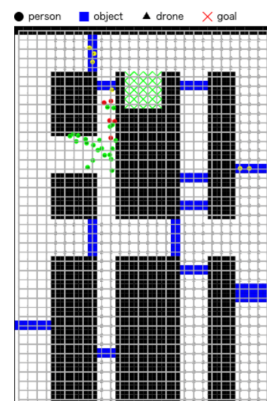


図2 パターン2

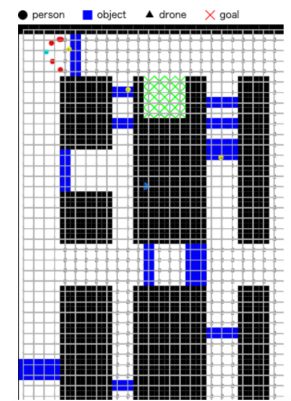


図3 パターン3

空間の左上に多くの避難者が移動できない状態が生じている。図の緑の避難者エージェントは避難所の左側に存在する通行止め発生箇所を知らないため上向きに移動しているが、それを認識している赤い避難者エージェントは迂回しようとして下向きに移動している。モデルでは、人が存在するセルには移動しないよう行動ルールを記述しているため、赤の避難者と緑の避難者がかち合い、移動が滞っていると考えられる。また、この時点の空間状態により、これらの避難者は移動できたとしても避難所に到達することができない。

パターン3において、図3の赤と青の避難者のように UAV からの情報の取得や、通行止め発生箇所を発見しても左上の通行止め発生箇所付近に留まり続ける避難者が生じた。ポテンシャル値を再計算しても、人が密集していないにも関わらず移動可能なセルを選択できていないと考えられる。

障害物の列の生成位置はランダムに決定しており、避難者の移動は通行止め発生箇所の位置に影響されると考えられる。現在、避難所の位置が空間の上部にあり、空間の下部で発生した避難者は避難所に到着することが困難になる可能性がある。また、シミュレーションを観察すると、縦に並ぶ列で通行止め発生箇所が多い場合、避難完了率が高くなるステップ数が早くなる試行があった。向きの違いも影響する可能性がある。

6. まとめと今後の予定

本研究では、MAS を用いて、時間の経過につれ二次災害が生じる中で避難する状況を想定したモデルを構築した。通行止め発生箇所を含む障害物の UAV による情報収集、避難者への情報共有が避難行動の効率化、安全性に与える効果について評価、検討した。結果として、UAV により一定時間内の避難完了率、一定の避難完了率に達するまでの時間に改善が見られたため、避難の効率化に UAV は貢献していると思われる。

今後は他の評価軸として、避難者の通行止め発生箇所到達回数等の比較を検討している。また、モデル構築の課題も見られたため、モデルの改善をしていく。人の動きとして、周囲の人の存在を認識した上で減速して避けるようにすることを検討する。障害物エージェントの列の配置方法の検討、生成する速度の調節や、避難所の位置を空間の中央部に変更することにより、避難行動にどのような影響が見られるか分析する。通行止め発生箇所が増えるにつれ、空間構造が複雑になる。ポテンシャル法が機能していないことも考えられるため、モデルの挙動をより分析していく。

さらに UAV の認識可能な範囲、情報の伝達可能な範囲を変更することで、効果が変化するかどうかについて検証する。本モデルでは、障害物エージェントと重なった場合は、避難者は避難を止めるようにしているが、UAV がその避難者を発見した場合は周囲の避難者に知らせ、救助可能にすることを検討している。UAV は現在ランダムに飛行しているが、飛行経路をあらかじめ定義すること、複数の UAV で連携し、探索範囲の分担、記録した空間情報、要救助者の位置の共有を行うこと等の影響についても検証

していくことを目指したい。

現時点では避難者は全て健常者である。要配慮者の動きとして、健常者よりも遅い速度で歩き、避難所の位置を知らないものとし、周囲の健常者についていくことを検討している。急な坂や階段等、通常時でも身体または健康状態により通行困難に感じる可能性がある場所を空間内に配置し、その箇所に接近している要配慮者には別の通行しやすい道を通るよう優先して誘導する UAV を検討している。さらに空間内の混雑状況を認識し、UAV から取得した情報に基づき、避難者が混雑箇所を避けて避難することも想定する。

今後はこうした要配慮者を含む避難者に対応した支援方法を提案し、複数のパターンでのシミュレーションにより、効果を検証し、避難の安全性向上を目指す。その検証結果に基づき、災害対策の立案、意思決定に活かせることを目指す。また UAV 導入による効果を示すことで避難支援技術の発展に繋げ、活用を促し可能性を広げたい。

参考文献

- (1) 片山健太, 横山真悟, 加藤匠, 高橋秀幸, 横田信英, 杉安和也, 木下哲男: 避難行動支援向けエージェント型 IoT デバイスの検討, 情報処理学会第 79 回全国大会講演論文集, 5ZB-06, pp.4-593-4-593, (2017).
- (2) 高橋秀幸, 片山健太, 横田信英, 杉安和也, 北形元, 木下哲男: UAV を活用した避難誘導支援システムの設計と試作, 第 17 回情報科学技術フォーラム講演論文集 (FIT2018), 0-019, 第 4 分冊, pp. 363-364, (2018).
- (3) 杉安和也, 高橋秀幸, 横田信英, 片山健太: 津波避難時の誘導を目的とした UAV の活用方法の検討, 東日本大震災特別論文集, 7, pp. 7-10, (2018).
- (4) 関口雄太, 加藤利康, 神林靖: 移動エージェントを搭載した UAV による災害避難支援システムのシミュレータ開発, 第 22 回情報科学技術フォーラム講演論文集 (FIT2023), M-006, 第 4 分冊, pp. 197-198, (2023).
- (5) 鈴木学, 浜克己, 中村尚彦: 協調ドローンを用いた避難誘導支援システム, 計測自動制御学会論文集, 56 巻, 1 号, pp. 24-30, (2020).
- (6) 妹尾 大輝, 和田 光真, 野々村 敦子, 吉田 秀典: ドローンと人工知能を組み合わせた要配慮者の避難支援システムの開発, 計算数理工学論文集, 22 巻, pp. 1-10, (2022).
- (7) 久保 栞, 妹尾 大輝, 吉田 秀典: ドローンを用いた要配慮者の避難支援システム構築に関する基礎的研究, AI・データサイエンス論文集, 4 巻, 3 号, pp. 466-473, (2023).
- (8) 山崎仁士, 林晃輔, 田鍋史生, 佐藤理恵, 村越英樹, 林久志: 災害被災状況に応じた UAV による避難誘導の効果検証, 人工知能学会第二種研究会資料, 2025 巻, BI-026 号, pp. 14-, (2025).
- (9) 伊吹 宏三郎, 上山 憲昭: 災害時の複数種 UAV と携帯端末を用いた避難誘導システム, 電子情報通信学会技術研究報告, vol. 122 巻, NS-406 号, pp. 195-200, (2023).
- (10) MAS コミュニティ MAS とは? <https://mas.kke.co.jp/about/>
- (11) MAS コミュニティ モデルの作り方 https://mas.kke.co.jp/howto/recipe05_artisoccloud/