

要救助者の複数ドローンによる協調探索のためのエッジサーバ 集約型自動スケジューリング手法とシミュレーション評価

加藤 亜慧¹ 寺島 美昭¹ 高見 一正¹

概要: 近年災害発生時における要救助者の探索を行う人員の不足を解決する手段として複数のドローンを用いた探索システムが注目されている。既存研究では、災害地を一律に情報収集する手法が提案されているが、要救助者が一様に分布している状況は考えにくく、集中及び存在しない領域が混在する。また、事前情報を用いて探索の優先度設定を行っている手法も提案されているが、災害によって状況が変化している可能性があり、事前情報による優先度設定は現実的ではない。加えて、これらの研究はドローン1台で与えられた領域の効率的な探索のための飛行ルートに着目しており、他のドローンとの協調について考慮されていない。本稿では、探索しながら画像データをエッジサーバに処理させることで即時に要救助者の有無を判定し、要救助者が存在する領域に他の領域を探索中のドローンを招集して集中的に探索するための手法を提案した。さらに、シミュレータを試作して探索完了時間を評価した。

An Edge Server Centralized Automatic Scheduling Method for Cooperative Search of Rescuers by Multiple Drones and Simulation Evaluation

ASATO KATO¹ YOSHIAKI TERASHIMA¹ KAZUMASA TAKAMI¹

1. はじめに

近年災害発生時における要救助者の探索を行う人員の不足が問題となっている。防衛省が発表したデータによると東日本大震災において震災発生後 72 時間以内に人命救助に投入できた隊員数には限界があり、迅速な探索活動及び探索人員増加の必要性が指摘されている[1]。このような問題を解決する手段として複数のドローンを用いた探索システムが注目されている。一方で、既存研究 [2]では情報収集領域に対して一律に情報収集を行う手法が提案されているが、実際には要救助者が一様に分布している状況は考えにくく、要救助者が集中して存在する領域と存在しない領域が混在していると思われる。また、事前情報を用いて探索の優先度設定を行っている手法[3]も提案されているが、災害によって状況が変化している可能性があり、事前情報による優先度設定は現実的ではない。加えて、これらの研究はドローン1台で与えられた領域の効率的な探索のための飛行ルートに着目しており、要救助者の存在有無による他のドローンとの協調については考えられていない。

本研究では、災害時における複数のドローンによる探索においてエッジコンピューティングを用いてリアルタイムに自動で要救助者の有無を判断し、存在した場合にその他の領域で飛行中のドローンを招集して複数ドローンで1領

域を集中的に探索するためのスケジューリング手法を提案する。構成は以下のようになっている。第2章では関連技術を説明し、第3章では提案システムの詳細について述べる。第4章では提案手法の評価のための試作シミュレータについて述べ、第5章で評価方法及び評価実験の結果を示す。第6章で本稿のまとめと今後の課題について記す。

2. 関連技術

農業分野でのドローンを用いたセンシング[4]では分析に数日が必要であり、その分析にはクラウドコンピューティングが利用されている。長所として、スマートフォンのようなパワーの少ないコンピュータでも外部のコンピュータの力を借りて人工知能のような複雑な処理を実現できることが挙げられる。一方、短所として、端末からクラウド上のサーバまでの間の通信経路があるため命令の実行や、質問の回答までに時間がかかることが挙げられる。しかし複雑な処理が必要なサービスであってもそうした遅延が許されない場合もありえる。また、災害時などでインターネットを使えない環境では利用することができない。

これらの問題に対処するため、エッジコンピューティング[5]が注目されている。エッジコンピューティングとは、「端末の近くにサーバを分散配置する」というネットワークコンピューティングの技法のひとつである。「端末」、つ

¹ 創価大学大学院工学研究科情報システム工学専攻
Graduate school of Engineering Soka University

まりスマートフォンなどにネットワーク的に近い場所へサーバを配置する。クラウドよりもっと端末に近い場所でサーバなどのコンピュータを置き処理を行うことでリアルタイムでの処理を可能としている。

3. 提案手法

3.1 概要

本研究では災害時における複数のドローンによる要救助者の探索において1度の飛行に注目し、 $N \times M$ 四方のエリアを定義する。そのエリアをさらに分割し、ドローン1台あたり1領域 $L \times m$ 四方を担当させる。これらのエリアを探索する際に、各ドローンは画像データを取得ごとにエッジサーバに送信し、エッジサーバは受信した画像データを解析して要救助者の有無を診断結果としてドローンに送信する。要救助者を発見した場合、その周辺にも要救助者が複数存在すると考え、自動で当初計画していた探索のスケジュールを変更させる。そして、エッジサーバがその他の領域で飛行中のドローンを M 台招集し、発見箇所のある領域に向かわせて、集中的に探索するスケジューリング方式の研究を行う。図1はシステムの概要、図2は招集するドローンを3台とした場合の探索モデルである。

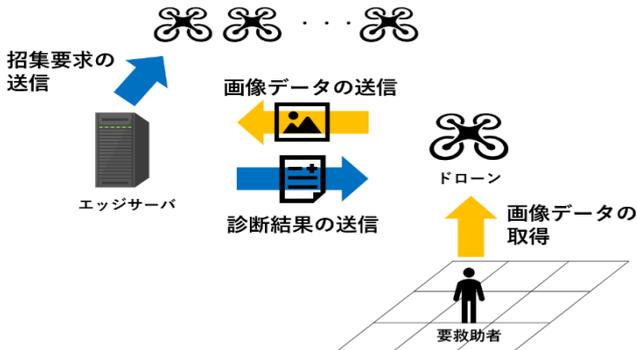


図1 システム概要

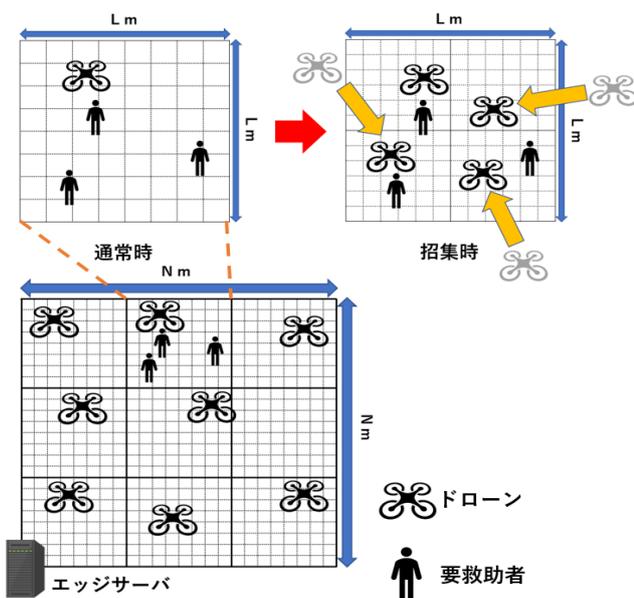


図2 探索モデル

探索により得られる膨大なデータを全て人の手で判断するのは非効率的であるので、取得データから要救助者の有無を判別する画像処理、どのドローンを招集するのかの決定、招集するドローンへの命令までエッジサーバで行うシステムモデルである。一般的にドローンが行える処理能力には限界があるため、画像処理など計算量の多いものを比較的近距离に設置されたエッジサーバへオフロードすることで迅速な計算処理が可能である[6]。

3.2 前提条件

前提として、図2のエッジサーバが配置されている地点までドローンとエッジサーバを運搬可能なものとする。また、エッジサーバが配置されている地点とドローンが出発・帰還する地点は同一地点とする。その他の条件については要素別に以下に示す。

- 通信：ドローンとエッジサーバは互いに常に通信できる状態にあることを想定する。距離による電波の減衰やパケットロス・パケット衝突について考慮しない。
- 環境：探索を行う際、風や障害物などの周囲の環境がドローンの飛行に与える影響について考慮しない。
- 要救助者：現在いる位置から移動せず、一部の領域にのみ分布しているものとする。
- 衝突：ドローン同士は絶対に衝突しないものとする。
- エッジサーバの処理能力：画像データの解析は何枚であっても同時に並行して行えるものとする。

次に本稿での用語の定義を表1に示す。

表1 用語定義

用語	説明
情報収集領域	ドローンによって探索が行われる領域全体を指す
担当領域	1台1台のドローンがそれぞれ探索を担当する領域のこと
該当領域	要救助者を発見した領域
招集領域	招集を行う領域
スタート位置	全てのドローンが探索開始地点に向かう前の待機位置であり、エッジサーバの存在する位置
探索開始地点	担当領域で最初に探索を開始する地点
探索終了地点	担当領域で最後に探索を行う地点

3.3 ドローンとエッジサーバ間のメッセージ形式

ドローンが画像データを取得ごとにエッジサーバに送信し、エッジサーバが受信したデータを解析する。そして、解析結果から要救助者を発見した場合、診断結果を送信し、招集するドローンの選択・決定と招集を行うためのメッセージ形式を決める必要がある。

(1) ドローンを招集するか否かに必要な情報

●**ID**：どのドローンからのメッセージなのかを判別するために識別 ID をメッセージに付加する必要がある。

●**画像データ**：ドローンが探索エリアにおいて区画ごとに等間隔で撮影を行い、そのデータをエッジサーバに届け解析することで要救助者が存在するか否かを判断する。

●**電池残量**：ドローンの墜落原因の 1 つとしてバッテリー切れが挙げられる。災害の際の要救助者の探索において途中で墜落してしまうことはあってはならないことであり、招集する際電池残量の少ないドローンを招集した場合、途中で墜落してしまうリスクが考えられることからドローンの電池残量は常に把握しておく必要がある。

●**状態**：表 2 のように探索を行う際のドローンの状態を定義しており、GATHING 状態のドローンの招集は行わない。

表 2 ドローンの状態

状態名	説明
WAIT	初期状態.スタート位置
GO	スタート位置から探索開始位置に向かっている状態
SENSING	通常の探索を行っている状態
GATHING (gWAIT)	招集要求を受け取り、待機している状態
GATHING(gSTANBY)	招集領域へ向かっている状態.
GATHING(gSENSING)	招集領域で探索を行っている状態
GATHING(gBACK)	招集領域から元居た位置へ帰還中の状態
BACK	スタート位置へ帰還中の状態
END	スタート位置に帰還した状態

(2) ドローンを招集するために必要な情報

●**位置情報**：ドローンは GPS により正確な自身の位置情報を把握することで安定した飛行を実現しており、ドローンが所持している情報として一般的であるため提案手法では招集元のドローンと招集候補のドローンとの相対距離でどのドローンを招集するかを選択・決定している。このことから位置情報が必要である。

以上の (1) (2) から探索を行っている際のドローンからのメッセージ形式を以下に示す。尚、探索を行っていない場合は画像データを付加しない。

SenserData(ID, 画像データ, 位置情報, 電池残量, 状態)

(3) エッジサーバがドローンに要救助者の存在の可否を伝えるために必要な情報

●**診断結果**：画像データの解析結果から要救助者が存在するか否かを診断結果としてドローンに送信し、存在した場合は招集を行うために表 3 の診断結果が必要である。

表 3 診断結果

診断結果	メッセージ
要救助者が存在する	True
要救助者が存在しない	False

以上からドローンから受け取った画像データの診断結果を送信する際のメッセージ形式を以下に示す。また True だった場合は仮招集要求となる。

JudgeData(ID, 診断結果(True/False))

(4) エッジサーバがドローンと交信する際に必要な情報

●**メッセージタイプ**：エッジサーバがドローンと交信するために表 4 のメッセージタイプを付加する必要がある。

表 4 メッセージタイプの種類

メッセージタイプ	説明
MainRequest	招集要求
Shortage	招集できるドローン数が M 未満の場合、通常探索続行を指示

●**招集先の位置情報**：招集先の探索開始地点へ移動するよう招集要求を送信するために探索開始地点の位置情報を付加する必要がある。

以上からエッジサーバが招集要求や招集が行えないことを送信するためのメッセージ形式を以下に示す。尚、shortage の場合、招集先の位置情報に(0, 0)を付加する。

CallingRequest(ID, メッセージタイプ, 招集先の位置情報)

(5) ドローンがエッジサーバと交信する際に必要な情報

●**メッセージタイプ**：ドローンがエッジサーバからの応答や自身の状況を伝えるために表 5 のメッセージタイプを付加する必要がある。

表 5 メッセージタイプの種類

メッセージタイプ	説明
Accept	仮招集要求(True)に対する応答
MainReply	エッジサーバからの MainRequest に対する応答
Start	招集先の探索スタート位置に着いた際のメッセージ
End	招集されたドローンが招集領域での探索が完了した際のメッセージ

以上からドローンがエッジサーバからの応答や自身の状況を伝えるためのメッセージ形式を以下に示す。

Message(ID, メッセージタイプ)

3.4 エッジサーバ集約型自動スケジューリング手法

本手法では画像処理などの重い処理は全てエッジサーバが実行するモデルとなっている。ドローンとエッジサーバの機能分担を以下に示す。

ドローン

- (1) 各自が決められた担当領域で探索を行い、画像データを取得する探索機能
- (2) メッセージの送受信機能
- (3) 招集要求を受信した際の現在位置記憶機能
- (4) 与えられた招集先の位置情報から自らの飛行範囲を導出する機能
- (5) 招集領域での探索後、記憶位置への自動帰還機能

エッジサーバ

- (1) メッセージの送受信機能
- (2) 画像データの解析機能
- (3) 招集実行の可否決定機能
- (4) 招集領域の分割・探索開始地点の決定機能
- (5) 招集するそれぞれのドローンへの探索開始地点割り当て機能

次に通常時の探索の流れを役割ごとに以下に示す。

●ドローンの処理

- STEP.1 スタート地点から自分が割り振られた探索開始地点まで移動し、到着するまで p 秒ごとに画像データを付加されていない `SenserData` を送信
- STEP.2 到着後探索を開始
- STEP.3 1区画の1辺の長さ/速度秒ごとに収集した画像データを `SenserData` に付加し、エッジサーバに送信
- CASE.1 探索終了地点まで到達した場合: STEP.5 へ
- CASE.2 探索終了地点まで未到達の場合: STEP.4 へ
- STEP.4 エッジサーバから受信した `JudgeData` の診断結果による分岐
- CASE.1 「True」の場合:自動スケジューリング手法へ
- CASE.2 「False」の場合:STEP.3 へ
- STEP.5 探索終了後スタート位置へ移動しながら p 秒ごとに画像データを付加していない `SenserData` を送信
- STEP.6 スタート位置へ到着、任務完了

●エッジサーバの処理

- STEP.1 ドローンが探索開始地点に到着するまで画像データが付加されていない `SenserData` を受信
- STEP.2 ドローンが探索開始後は画像データが付加された `SenserData` を受信
- STEP.3 受信した画像データを解析
- CASE.1 要救助者が存在した場合:
- CASE.1-1 招集可能なドローンが M 台以上存在した場合:`JudgeData` に診断結果「True」を格納して送信し、自動スケジューリング手法へ
- CASE.1-2 招集可能なドローンが M 台未満の場合:`CallingRequest` に `Shortage`, 位置情報(0, 0)を格納して送信, STEP.2 へ
- CASE.2 人が存在しなかった場合:`JudgeData` に診断結果「False」を格納して送信, STEP.2 へ

この手法ではドローンが要救助者を発見した場合、そのドローンの担当領域に他にも要救助者が複数存在するという考えが前提となる。ドローンとエッジサーバがメッセージをやり取りし、他の領域で探索中のドローンを M 台招集する。そして、招集元を含め $M+1$ 台で集中的に探索を行うことで、最初にプログラムされた自身の担当領域内のみを探索する手法に比べ、迅速な情報の取得を狙う。以下では、自動スケジューリング手法の流れを $M=3$ の場合を例に役割ごとに手法の構成を説明する。

●招集元ドローンの処理

- STEP.1 エッジサーバから診断結果「True」を受信
- STEP.2 `Message` に `Accept` を格納して送信、現在位置を記憶
- STEP.3 エッジサーバから `MainRequest` と新たな探索開始地点での位置情報が格納された `CallingRequest` を受信
- STEP.4 `Message` に `MainReply` を格納して送信
- STEP.5 新たな探索開始地点へ移動
- STEP.6 到着後高度を一定まで降下させ、`Message` に `Start` を格納して送信、探索を開始
- STEP.7 1区画の1辺の長さ/速度秒ごとに収集した画像データを `SenserData` に格納してエッジサーバに送信
- CASE.1 探索終了地点まで到達した場合: STEP.8 へ
- CASE.2 探索終了地点まで未到達の場合: STEP.7 へ
- STEP.8 `End` を `Message` に格納して送信、記憶位置に移動
- STEP.9 到着後、通常時の探索の STEP.1 へ

●被招集元ドローンの処理

- STEP.1 通常時の探索中にエッジサーバから招集先の探索開始地点の位置情報と `MainRequest` が格納された `CallingRequest` を受信
- STEP.2 `Message` に `MainReply` を格納して送信、現在位置を記憶
- STEP.3 招集先探索開始地点へ移動
- STEP.4 到着後高度を一定まで降下させ、`Message` に `Start` を格納して送信、探索を開始
- STEP.5 1区画の1辺の長さ/速度秒ごとに収集した画像データを `SenserData` に格納してエッジサーバに送信
- CASE.1 探索終了地点まで到達した場合: STEP.6 へ
- CASE.2 探索終了地点まで未到達の場合: STEP.5 へ
- STEP.6 `End` を `Message` に格納して送信、招集前の記憶位置に移動
- STEP.7 到着後、通常時の探索の STEP.1 へ

●エッジサーバの処理

- STEP.1 受信した画像データの解析結果から要救助者が存在すると判断された場合、該当領域のドローンにエッジサーバが診断結果「True」を `JudgeData` に格納して送信
- STEP.2 該当のドローンから `Accept` が格納された `Message` を受信

STEP.3 現在飛行中の全てのドローンの内、招集されていないドローンの位置情報(x1, y1, z1)と招集元のドローンの位置情報(x2, y2, z1)を用いて式(1)から相対距離をそれぞれ算出し、距離の短い順に招集元を含め M+1 台のドローンを選出

$$\text{相対距離の算出式} = \sqrt{(x1-x2)^2 + (y1-y2)^2} \cdots (1)$$

STEP.4 図 3 のように該当エリアを M+1 個の正方形に分割し、それぞれの領域の探索開始地点を M+1 地点算出

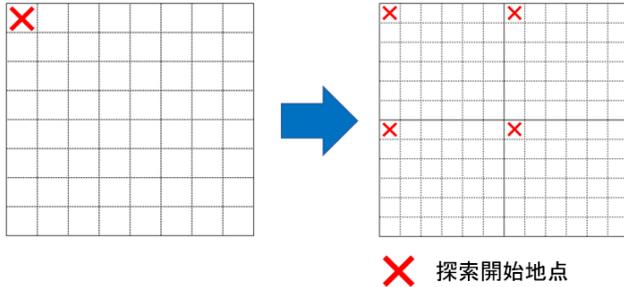


図 3 該当エリアの分割(M=3 の場合)

STEP.5 選出した M+1 台のドローンと M+1 個の探索開始地点の相対距離を STEP.3 と同じように選出し、それぞれの探索開始地点を担当するドローンを相対距離の短い順に決定

STEP.6 CallingRequest に招集するそれぞれのドローンの ID, MainRequest, 招集先の位置情報を格納して送信

STEP.7 それぞれのドローンから MainReply が格納された Message を受信

STEP.8 招集領域での探索を開始するドローンから Start が格納された Message を受信

STEP.9 それぞれのドローンから画像データが格納された SensorData を受信

STEP.11 招集領域での探索を完了したドローンから End が格納された Message を受信

STEP.12 通常時の探索の STEP.1 へ

4. 試作シミュレータ

提案手法の有用性を検証するために、シミュレータを作成した。それぞれのドローンがスタート位置から探索開始地点まで移動し、到着後決められた飛行ルートで移動しながらデータを取得してエッジサーバとやり取りするモデルとなっている。また、ドローンとエッジサーバ間の通信は UDP で行っている。試作シミュレータの開発環境を表 6 に示す。

表 6 試作シミュレータ詳細

項目	内容
OS	Windows10 Pro
使用言語	Java
開発用ソフトウェア	Eclipse
行数	1409 行

5. 評価

5.1 評価条件

提案手法の有用性を評価するために表 7 に示す既存手法と提案手法を表 8 の条件で試作シミュレータに実装し、表 9 の条件で実験を行った。また、本実験では提案手法を M=3, p=2 の場合とした。ドローンに関するパラメータと情報収集領域の大きさに関しては、災害時の要救助者探索のために東海地方の 3 自治体で採用されている DJI 社の Matrice200[7]のパラメータを参考にした。エッジサーバの処理時間は、ドローンとエッジサーバを用いた既存サービス[8]を参考にした。画像サイズと高度に関しては文献[9]において推奨されている値を採用した。通信速度に関しては、近年広く使用されている IEEE802. 11n の実効スループット値を採用し、100 Mbps とした。無線通信であることから、伝送効率を 30%としている。シミュレーションでは、常にドローンの区画ごとの移動時間 \geq 画像の伝送時間 + 画像処理時間となる。

表 7 比較手法

手法名	説明
既存手法	高度 10 m (1 区画 20 m)で探索を行う手法
提案手法	通常時は高度 15 m (1 区画 30 m)で探索を行い、招集時は高度 10 m (1 区画 20 m)で複数台による探索を行う手法

表 8 シミュレーションパラメータ

項目	条件
飛行速度・時間	10 m/s , 27 分
通信距離	4 km
通信速度, 伝送効率	100 Mbps , 30 %
画像サイズ	フル HD(1920×1080px) 約 6.2 MB
エッジサーバの位置	情報収集領域の左斜め下
エッジサーバの処理時間	0.3 秒
ドローン 台数	9 台
情報収集領域	720 m×720 m
1 領域	240 m×240 m
領域数	9 領域
高度(通常時), (招集時)	15 m , 10 m
1 区画(通常時), (招集時)	30 m×30 m , 20 m×20 m
要救助者の検出率	100 %
飛行ルート	

表 9 実験条件

手法	要救助者の分布・配置箇所数	配置方法	試行回数
既存手法	9領域中1領域(10箇所) 2領域(20箇所) 3領域(30箇所)	ランダムに配置	それぞれ10回
提案手法	9領域中1領域(10箇所) 2領域(20箇所) 3領域(30箇所)	ランダムに配置	それぞれ10回

5.2 評価結果

探索に関する時間を表 10 に定義し、既存手法と提案手法の探索完了時間の算出式をそれぞれ式(2)、式(3)に示す。提案手法の場合、招集要求を受けて担当領域を探索途中に招集領域へ向かうため $X * T2 + T4$ 秒と本来 $T3$ 秒探索に要する領域の $1/4$ を探索するため $1/4 * T3$ 秒がかかる。ここで $X \leq 1$ とする。評価では、招集された4台のドローンの内、式(3)の値が最大のものを探索完了時間としている。

$$\text{探索完了時間 (既存)} = T1 + T3 \dots (2)$$

$$\text{探索完了時間 (提案)} = T1 + X * T2 + T4 + 1/4 * T3 \dots (3)$$

表 10 探索に関する時間定義

時間	説明
探索完了時間	ドローンが探索開始地点まで移動し、担当領域を全て探索するためにかかる時間
T1(s)	スタート位置からドローンが探索開始地点まで移動するためにかかる所要時間
T2(s)	高度 15 m での探索においてドローンが担当領域を探索するためにかかる時間
T3(s)	高度 10 m での探索においてドローンが担当領域を全て探索するためにかかる時間
T4(s)	招集要求を受けたドローンが招集先の探索開始地点に到着するためにかかる時間

以上の評価指標での実験結果を図 4 に示す。提案手法は既存手法に比べ、要救助者が9領域中1領域に分布の場合45.3%、2領域に分布の場合34.2%、3領域に分布の場合7.7%探索完了時間を短縮できた。

要救助者が1領域に分布の場合に対して、2領域に分布の場合の探索完了時間の短縮率低下原因として、招集領域付近の領域を担当するドローンが他の招集領域に先行して招集されており、相対距離の大きい未招集ドローンを招集したためだと考えられる。また、ドローンが要救助者を発見する前に招集され、招集領域での探索完了後に担当領域での探索を開始するという事象が起きたためである。要救助者が3領域に分布の場合、大幅に探索完了時間の短縮率が低下した原因としては、前述した事象の他に実験では、ドローンの総数は9台であり、1つの招集領域を4台で探索するため同時に招集を行える領域数は2領域までである。

よって、3領域目の招集が発生した場合招集可能なドローン数が3台以上揃うまで招集が行えず、短縮率が低下した。

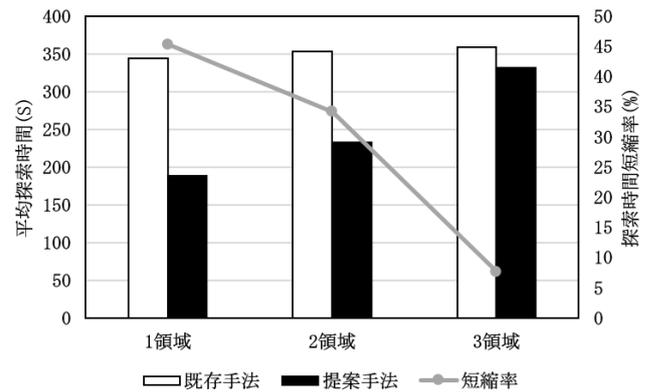


図 4 探索完了時間(平均)

6. まとめ

エッジサーバを用いることで複数ドローンにより1領域を自動で集中的に探索するためのスケジューリング手法を提案し、シミュレーションを実装して評価した。その結果、提案手法が既存手法に比べ、要救助者が9領域中1領域、2領域、3領域に分布の場合の3条件では、探索完了時間を短縮できることを確認した。今後の課題として、現在の手法では、通信に関して距離による電波の減衰やパケットロス・パケット衝突を考慮していないため、それらを考慮した改良・検証が必要である。また、事前に決定した招集数以上の招集可能なドローンが存在しない場合招集を行えないため、動的に招集数を変更し、それに伴って動的に領域分割を行えるよう手法を改良する必要がある。

参考文献

- [1] 東日本大震災への対応に関する教訓事項について- 防衛省(オンライン), 入手先 <<http://www.mod.go.jp/j/approach/defense/saigai/pdf/kyoukun.pdf>> (参照 2019-04-25)
- [2] T. He, A. Swami and K. W. Lee, "Dispatch-and-Search: Dynamic Multi-Ferry Control in Partitioned Mobile Networks, " MobiHoc '11, Article No.17, 2011.
- [3] Q. Liu, X. Pang, Y. Wang, Y. Pan and L. Li, "An Improved Path Management Policy for the Ferry in Opportunistic Networks, " Journal of Networks, Vol. 7, No. 10, 2012.
- [4] ドローンリモートセンシングによる作物・農地診断情報計測とそのスマート農業への応用(オンライン), 入手先<https://www.jstage.jst.go.jp/article/rssj/37/3/37_224/_pdf>(参照 2019-04-25)
- [5] エッジコンピューティングとは - 大和 哲(オンライン), 入手先<<https://k-tai.watch.impress.co.jp/docs/column/keyword/1081438.html>> (参照 2019-04-25)
- [6] エッジコンピューティングを用いた複数 UAV による探索システムのためのスケジューリング方式の評価 - 宮野功晟, 新熊亮一, 大木英司, 佐藤丈博 (京大), MoNA2017-43, pp.13-18.
- [7] Matrice200(オンライン), 入手先<<https://www.dji.com/jp/matrice-200-series>> (参照 2019-04-25)
- [8] CrackVision - 日本システムウェア株式会社(オンライン), 入手先<https://www.nsw.co.jp/corp_file/cop06SolSystem/PS/crackvision.pdf> (参照 2019-04-25)
- [9] ドローンを用いた災害状況動画撮影のポイント - 国土交通省 東北地方整備局, 入手先<<http://www.thr.mlit.go.jp/Bumon/B00097/K00360/drone/assets/doc/point.pdf>>(参照 2019-04-25)