

UAV 協調型センシングにおける探索効率の向上について

伊藤 太清¹ 神崎 映光²

概要：本稿では，大規模災害発災直後において，さまざまな機関および個人の所有するドローンなどの UAV (Unmanned Aerial Vehicle) を積極的に利活用して被災地の探索を行う UAV 協調型センシングにおいて，筆者らの研究グループにおいて提案した手法の拡張を行い，探索効率を向上させる手法を提案する．提案手法では，各探索地点の探索頻度を示す新たな指標を導入し，また UAV が被災地域内を探索する移動経路を定める判断基準に改良を加えることにより，探索対象領域全体を頻繁に，かつ偏りなく探索する．さらに本稿では，シミュレーション実験により提案手法の有用性を確認する．

On Improvement of Efficiency of Exploration in UAV-Collaborative Sensing

TAISEI ITO¹ AKIMITSU KANZAKI²

1. はじめに

近年，ドローンをはじめとした無人航空機 (Unmanned Aerial Vehicle: UAV) の利活用に関する研究が活発に行われている [1]. UAV の用途のひとつとして，大規模災害発災時における被災状況の探索や被災者への情報伝達などへの応用が期待されている [5]. ここで，大規模災害発災時は，建物の倒壊や被災者の移動などによって，被災地域内の状況が刻一刻と変化することが考えられるため，被災状況の情報収集等を効果的に行うためには，被災地域全体に対し，UAV を繰り返し，かつ頻繁に巡回させることが好ましい．

筆者らの研究グループでは，大規模災害発災時において，さまざまな機関や個人の所有する UAV を積極的に活用し，これらの UAV を協調動作させて被災地域の探索を行う UAV 協調型センシングに関する研究を進めている [2]. この手法では，ある探索地点の探索頻度を表す指標として時間経過によって減衰するカバレッジを定義し，各 UAV が，被災地域内の各探索地点のカバレッジからなるカバレッジマップを管理する．各 UAV は，自身の管理するカバレッジマップに基づき，カバレッジの低い，すなわち，UAV に探索されてから経過した時間の長い領域へ優先的

に移動することで被災地域全体を偏りなく探索する．また，他の UAV と無線通信可能となった場合，通信可能となった UAV との間で，互いの持つカバレッジマップに関する情報を共有することで，他の UAV が最近探索した領域を把握し，特定の領域が複数の UAV によって冗長に探索されることを防ぐ．さらに，他の UAV と無線通信を行い，当該 UAV の存在を認識した UAV は，通信を行った UAV が移動経路を決定する動作を再現し，その動作に基づいて自身の持つカバレッジマップを更新していくことで，無線通信後に他 UAV が移動することが予想される領域への冗長な移動を避ける．これらの動作により，特定の領域が複数の UAV によって頻繁に探索されることを防ぎ，被災地域全体を偏りなく頻繁に探索できる．しかし，この手法では，探索頻度の指標として用いているカバレッジの特性上，探索頻度の偏りを十分に抑制できない場合がある．また，各 UAV の移動経路設定に，対象領域全体の巡回を基本とする単純な手順を用いており，探索効率のさらなる向上のためには，改善の余地が残されている．

本稿では，文献 [2] の手法を拡張し，被災地域全体の探索効率をさらに向上させる手法を提案する．提案手法では，先行研究で定義したカバレッジに替わり，各探索地点の探索頻度を評価する新しい指標を導入することで，探索地点毎の探索頻度の偏りを抑える．また，UAV が移動経路を定める判断基準に改良を加えることにより，被災地域全体

¹ 島根大学大学院自然科学研究科理工学専攻

² 島根大学学術研究院理工学系

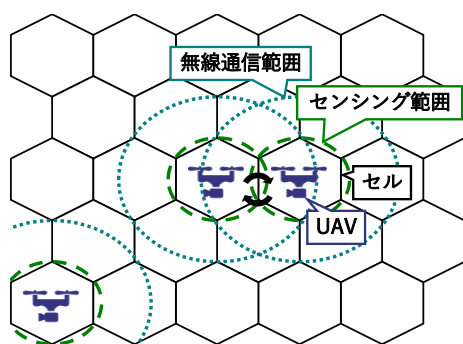


図 1 想定環境

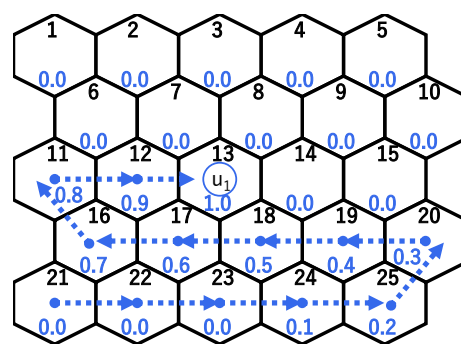


図 2 カバレッジマップ

の探索効率を向上させる．さらに本稿では，提案手法の性能をシミュレーション実験によって評価し，その有効性を検証する．

以下では，2章で本稿の想定環境について述べ，3章で文献 [2] で提案した手法について述べる．4章で提案手法について述べ，5章で提案手法の有効性を検証するためにを行ったシミュレーション実験について述べる．最後に6章で本稿のまとめと今後の研究課題について述べる．

2. 想定環境

図 1 に，本稿の想定環境を示す．探索対象領域は 2 次元平面で表されるものとする．領域内には，さまざまな機関や個人の所有する UAV が複数存在しており，各 UAV は自身を中心とする円形のセンシング範囲を持つものとする．議論の簡単化のため，全ての UAV は同じセンシング範囲を持つものとする．探索対象領域は UAV のセンシング範囲に内接する正六角形のセルによって分割され，各 UAV がセル単位で探索を行うものとする．

前述の通り，本研究ではさまざまな機関や個人の所有する UAV を活用することを想定しているため，UAV が稼働した時点では，その UAV は他の UAV の存在を認識していないものとする．また，各 UAV は，自身を中心とする円形の無線通信範囲を持ち，互いの無線通信範囲内に存在する UAV とのみ通信が可能であるものとする．

各 UAV は，任意の移動方向へ移動可能であるものとする．議論の簡単化のため，隣接するセルへ移動するために要する時間は全 UAV 共通であり，本稿では，この時間を 1 タイムスロットと定義する．

3. 先行研究

本章では，Kanzaki らが文献 [2] において提案した手法について述べる．

この手法では，各 UAV が，自身の持つカバレッジマップに基づき，カバレッジが低いと認識しているセルを優先的に移動先として決定する．また，無線通信可能となった UAV 間でカバレッジマップの共有を行うことによって，他の UAV が最近探索した領域を相互に認識する．さらに，

各 UAV が他の UAV の動作を再現し，これに基づいて自身のカバレッジマップを更新する．

以下では，この手法において定義しているカバレッジ，および各 UAV が保持するカバレッジマップについて述べた後，各 UAV の動作について述べる．

3.1 カバレッジマップ

カバレッジは探索対象領域内の各セルがどの程度探索されているかを表す指標である．この値はセルごとに定義され，あるセルに任意の UAV が存在しており，その UAV によって探索されている時点では，当該セルのカバレッジは最大値である 1.0 となる．UAV によって探索されていない時点においては，タイムスロットごとに，カバレッジの値が 0.0 になるまで，一定の減衰率 δ で低下する．また，カバレッジが 1.0 未満であるセルに再び UAV が移動した場合，当該セルのカバレッジは再び 1.0 となる．これにより，この手法では，カバレッジの高いセルは最近探索されており，カバレッジの低いセルは長い時間探索されていないものと判断する．

各 UAV は，自身が把握している各セルのカバレッジに関する情報をカバレッジマップとして管理する．図 2 に，UAV u_1 が自身の移動経路からカバレッジマップを生成している様子を示す．この図において，各セルの上部に記載している数値は当該セルの識別子，下部に記載している数値は，当該セルのカバレッジの値を表している．

3.2 移動先の決定

各 UAV は，自身の保持するカバレッジマップに基づき，次に移動する隣接セルを決定する．このとき，探索対象領域を偏りなく巡回するために，図 2 の矢印で示すように，セルの列を左右方向に移動し，その後上下方向の列に移動するという動作を基本とする．また，移動方向を決定する際，カバレッジの低いセルが存在する方向を優先的に選択することで，セルごとの探索頻度の偏りを抑制する．

各 UAV は，まず自身の管理するカバレッジマップを参照し，現在地と同じ列にあり，現在地から左方向および右方向にあるセルのカバレッジの平均をそれぞれ求める．こ

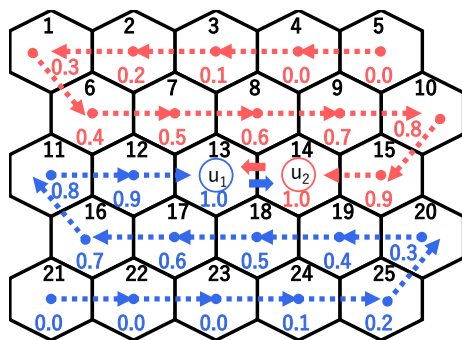


図 3 カバレッジマップの共有

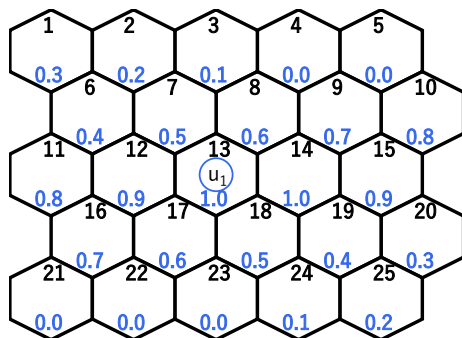


図 4 共有後のカバレッジマップ

のうち平均値が小さい方の値が、予め定められた閾値 α より低い場合、現在の列がまだ十分に探索されていないと判断し、左右のうち平均値が低い隣接セルに移動する。

左右方向におけるセルのカバレッジの平均がいずれも閾値 α より高い場合、UAV は、自身がいる列が十分に探索されていると判断し、上下いずれかの列に移動する。移動先は、自身がいる列よりも上方向にある全てのセルのカバレッジの平均と、下方向にある全てのセルのカバレッジの平均を算出し、より平均値の低い方向を選択する。

3.3 カバレッジマップの共有

複数の UAV が互いに無線通信可能となった場合、UAV 間において互いの持つカバレッジマップを共有する。具体的には、無線通信可能となった UAV 間において、各セルのカバレッジの値を比較し、それらの中で最大の値に、当該セルのカバレッジの値を更新する。例えば図 3 において、図 2 に示すカバレッジマップを持ち、UAV u_2 と無線通信可能となった UAV u_1 は、UAV u_2 との間でカバレッジマップを共有する。ここで、UAV u_2 が、図 3 上部の破線で示す移動経路を通過しており、図中のセル $\{1, \dots, 10, 14, 15\}$ に記載されているカバレッジの値をカバレッジマップとして持つ場合、UAV u_1 は、自身の持つカバレッジマップを図 4 に示す値に更新する。同様に UAV u_2 も、UAV u_1 の持つカバレッジマップに基づき、自身のカバレッジマップを更新することで、UAV u_1 と同様、自身のカバレッジマップを、図 4 に示す値に更新する。

この動作により、各 UAV が、無線通信を行った UAV

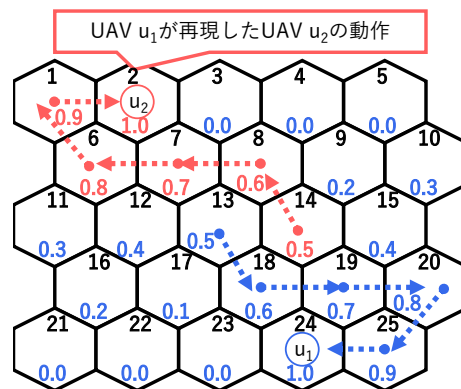


図 5 他の UAV の動作再現

が把握している最近探索されたセルを認識し、自身のカバレッジマップに反映させることができる。これにより、各 UAV は、他の UAV が最近探索していないと判断されるセルへ優先的に移動できる。

3.4 他の UAV の動作再現

無線通信によって他の UAV との情報共有を行った UAV は、3.2 節の動作によって自身の移動先となるセルを決定する度に、自身の持つカバレッジマップに基づいて、過去に情報共有を行った他 UAV に対しても 3.2 節の手順を適用し、各 UAV の移動先となるセルを推測する。また、自身のカバレッジマップにおいて、推測した移動先セルのカバレッジの値を 1.0 に更新する。例えば図 5 では、図 3 における情報共有を行った UAV u_1 および u_2 が探索を継続している。このとき、UAV u_2 は u_1 の無線通信範囲外に移動しているが、 u_1 は、自身の持つカバレッジマップに基づき、 u_2 の動作を再現することで、 u_2 の探索経路を推測する。各 UAV は、この動作を、情報共有を行ってから予め定められた期間 τ タイムスロットが経過するまで行う。これにより、各 UAV は、過去に情報共有を行い、互いに存在を認識している他 UAV が探索するセルを推定し、当該セルを自身の移動先に選択することを防ぐ。

4. 提案手法

本章では、先行研究における問題点と、これを解消するための提案手法の設計について述べた後、提案手法の動作について述べる。

4.1 設計方針

先行研究において定義したカバレッジは、 $[0.0, 1.0]$ の範囲で規定されており、あるセルのカバレッジが 0.0 まで減衰した後、当該セルのカバレッジはどれだけ時間が経過しても 0.0 のままとなる。すなわち、いずれかの UAV に探索されて以降、長期に渡って探索されないセルが複数発生した場合、それらのセルのカバレッジは、最後に探索されてから経過した時間の大小に関わらず、0.0 として扱われてし

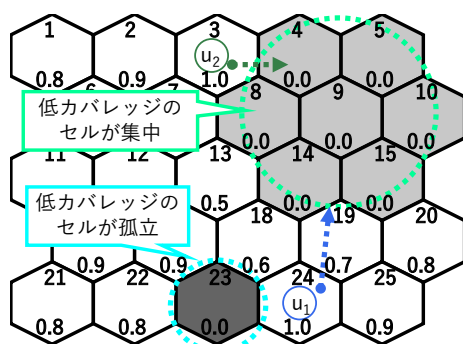


図 6 UAV の集中

まう。そのため、先行研究で定義したカバレッジでは、探索頻度の偏りを十分に表現できない場合があり、結果として探索頻度の偏りを発生させる要因となってしまう。この問題を解消するために、提案手法では、カバレッジに代わる新しい指標として、当該セルがいずれかの UAV に探索されてからの経過時間を示すブランクタイムを導入する。

また、先行研究の手法では、各 UAV 間の移動手段として探索対象領域全体を偏りなく巡回する動作を基本としている。このとき、各 UAV は、探索対象領域全体のカバレッジマップに基づき、平均的にカバレッジが低い領域に向けて優先的に移動する。ここで、3.3 節の動作による情報共有が行われることで、各 UAV が保持するカバレッジマップが同期していき、結果として、多くの UAV が探索対象領域内の特定の領域を移動先を選択し、探索頻度に偏りが生じる可能性がある。例えば、過去に情報共有を行った 2 台の UAV u_1 と u_2 が、図 6 に示す共通のカバレッジマップを保持している場合、両 UAV は、カバレッジの低いセルが多く存在する淡色で着色した領域の方向に移動する。ここで、当該領域の近くには UAV u_2 が存在するため、 u_2 が当該領域内の多くのセルを探索できる。このため、UAV u_1 は、淡色で着色した領域の探索は行わずに、より近くにある濃色で着色したセル 23 を探索することで、領域全体の探索頻度の偏りが抑制できる。このような動作を実現するため、提案手法では、移動先のセルを決定する際、自身の近くにあるセルを優先的に選択するよう制御し、UAV を領域全体に分散させる。

4.2 ブランクタイム

前述の通り、ブランクタイムは、探索対象領域内の各セルが最後に探索されてからの経過時間を表す。カバレッジと同様、この値はセルごとに定義され、初期値は ∞ (無限大) で与えられる。あるセルに任意の UAV が存在しており、その UAV によって探索されている時点では、当該 UAV のブランクタイムは 0 となる。UAV によって探索されていない時点においては、当該セルのブランクタイムはタイムスロットごとに 1 だけ増加する。また、カバレッジが 0 でないセルに再び UAV が移動した場合、当該セルの

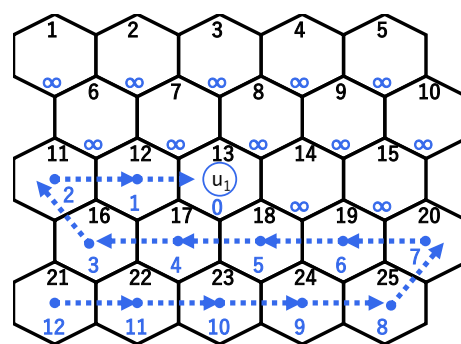


図 7 ブランクタイムマップ

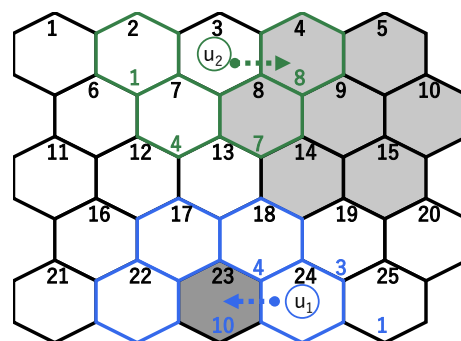


図 8 移動先の決定

ブランクタイムは再び 0 となる。これにより、提案手法では、ブランクタイムの低いセルは最近探索されており、ブランクタイムの高いセルは長い間探索されていないものと判断する。

各 UAV u_i は、自身が把握している各セルのブランクタイムに関する情報をブランクタイムマップとして保持する。図 7 に図 2 のカバレッジをブランクタイムに置き換えたものを示す。この図では、各セルの下部に、当該セルのブランクタイムを記載している。

4.3 移動先の決定

各 UAV は、自身の保持するブランクマップに基づき、次に移動する隣接セルを決定する。このとき、各 UAV は、探索対象領域全体ではなく、自身の周辺のセルにおけるブランクタイムのみを用いる。具体的には、自身の管理するブランクタイムマップにおいて、現在地に隣接するセルのブランクタイムを比較し、この値が最大であるセルを次の移動先とする。例えば図 8 において、UAV u_2 は、それぞれ自身に隣接するセルのブランクタイムを参照し、それぞれセル 23 およびセル 4 を移動先として選択している。

4.4 ブランクタイムマップの共有

複数の UAV が互いに無線通信可能となった場合、UAV 間において互いの持つブランクタイムマップを共有する。具体的には、無線通信可能となった UAV 間において、各セルのブランクタイムの値を比較し、それらの中で最小の値に、当該セルのブランクタイムの値を更新する。例えば図 9

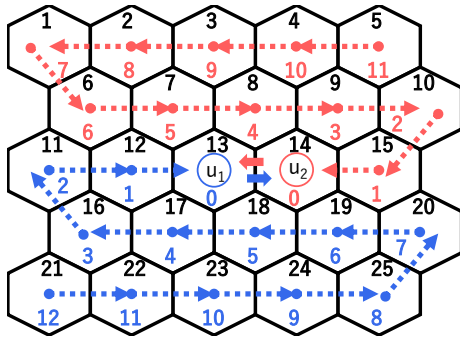


図 9 ブランクタイムマップの共有

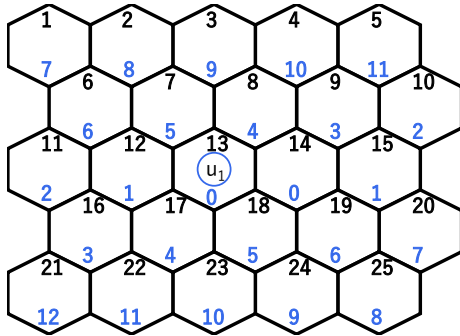


図 10 共有後のブランクタイムマップ

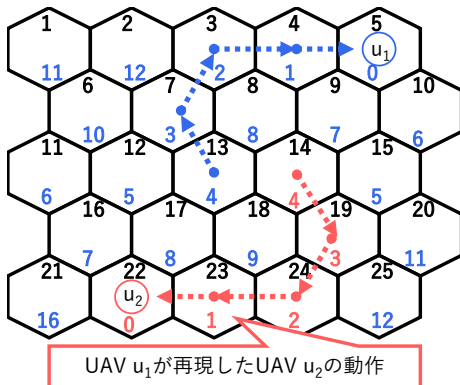


図 11 他の UAV の動作再現

において、図 7 に示すブランクタイムマップを持ち、UAV u_2 と無線通信可能となった UAV u_1 は、 u_2 との間でマップを共有する。ここで、UAV u_2 が、図 9 上部の破線で示す移動経路を通過しており、図中のセル $\{1, \dots, 10, 14, 15\}$ に記載されているブランクタイムをマップとして持つ場合、UAV u_1 は、自身の持つマップを図 10 に示す値に更新する。同様に UAV u_2 も、 u_1 の持つマップに基づき、自身のマップを更新することで、 u_1 と同様、自身のブランクタイムマップを、図 10 に示す値に更新する。

4.5 他の UAV の動作再現

無線通信によって他の UAV との情報共有を行った UAV は、4.3 節の動作によって自身の移動先となるセルを決定する度に、自身の持つブランクタイムマップに基づいて、先行研究と同様、過去に情報共有を行った他 UAV の移動

先となるセルを推測し、これに基づき、自身のブランクタイムマップを更新する動作を、情報共有後 τ タイムスロットだけ行う。例えば図 11 では、図 9 における情報共有を行った UAV u_2 が探索を継続している。このとき、UAV u_2 は u_1 の無線通信範囲外に移動しているが、UAV u_1 は、自身の持つブランクタイムマップに基づき、UAV u_2 の動作を再現することで、UAV u_2 の探索経路を推測する。

4.6 考察

提案手法では、先行研究で探索頻度の指標としていたカバレッジを、UAV に探索されない限り増加し続けるブランクタイムに変更することで、各セルの探索頻度をより正確に表現し、これを各 UAV の移動先選択に利用することで、探索領域全体の探索頻度の偏りを抑制する。また、各 UAV の移動先の選択時に、現在地の周辺のセルにおけるブランクタイムのみを用いることにより、ブランクタイムマップの共有が進んだ場合においても、特定の領域に UAV が集中することを防ぐ。これらの拡張により、提案手法では、先行研究と比較して、より探索効率を向上し、またセル間における探索頻度の偏りを抑制できるものと考えられる。

5. 性能評価

本章では、提案手法の有用性を検証するために行ったシミュレーション実験の結果を示す。実験では、大規模災害発災直後を想定して、3 章で述べた先行研究と提案手法における探索効率を比較した。

5.1 評価環境

実験では、 10×10 個のセルに分割された探索対象領域に、10 台の UAV を配置した。10 台の UAV はシミュレーション毎にランダムに定められたセルを初期位置とし、一斉に探索を開始するものとした。各 UAV の無線通信範囲は自身の現在地のセルと、その隣接セルまでとした。先行研究におけるカバレッジはタイムスロットごとに 0.05 減衰するものとし、情報共有を行った UAV が、他の UAV の動作を再現する期間 τ は 5 タイムスロットとした。

5.2 評価基準

実験では、先行手法と提案手法における探索を 200 タイムスロット行う試行を 10 回実施し、以下の 2 つの指標の平均値を評価した。

平均カバレッジ：探索対象領域中の全てのセルにおける、実際のカバレッジの平均値。この値が高いほど、探索対象領域内の全てのセルが頻繁に探索されていることを表す。

カバレッジの分散：探索対象領域中の全てのセルにおける、実際のカバレッジの分散値。この値が低いほど、探索対象領域内の全てのセルが偏りなく探索されてい

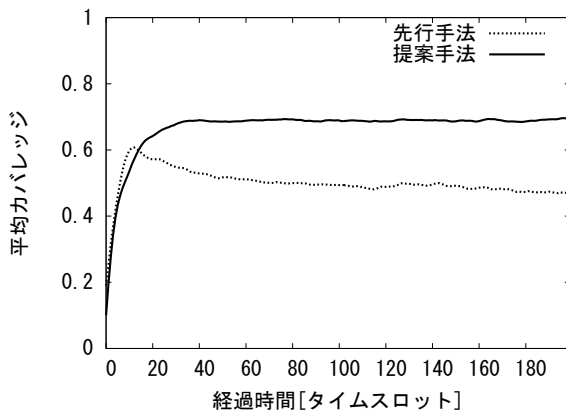


図 12 平均カバレッジ

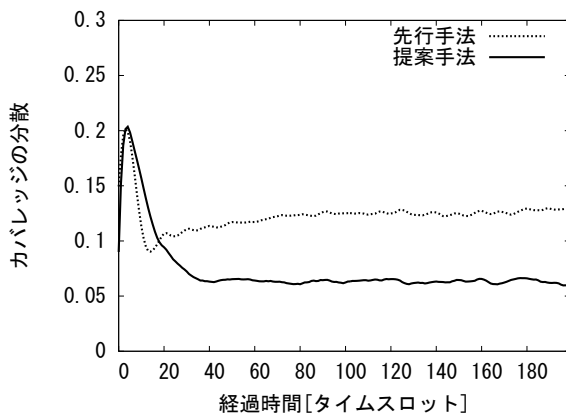


図 13 カバレッジの分散

ることを表す。

5.3 評価結果

図 12 に平均カバレッジを評価した結果を示す。グラフの横軸はシミュレーション実験開始からの経過時間を表し、縦軸は各時刻における平均カバレッジを表す。結果より、提案手法における平均カバレッジが、単純手法と比較して高くなっており、提案手法によって探索対象領域内の全てのセルがより頻繁に探索されていることがわかる。

図 13 にカバレッジの分散を評価した結果を示す。グラフの横軸はシミュレーション実験開始からの経過時間を表し、縦軸は各時刻におけるカバレッジの分散を表す。結果より、提案手法におけるカバレッジの分散が、単純手法と比較して低くなっており、提案手法によって探索対象領域内の全てのセルがより偏りなく探索されていることがわかる。

6. まとめ

本稿では、大規模災害発災直後に被災地域の探索を行う UAV 協調型センシングにおいて、筆者らの研究グループで提案した手法 [2] の改良を行い、被災地域の探索効率をより向上させる手法を提案した。提案手法では、カバレッジ

に替わる探索頻度の指標としてブランチタイムを導入することにより探索地点毎の探索頻度の偏りを抑え、移動先の決定手順を改良することで UAV の集中を防ぐ。シミュレーション実験によって、提案手法によって、先行研究と比較して高い探索効率を実現できることを確認した。

先行研究および提案手法では、各 UAV が探索対象領域全体を探索することを目的としている。一方、大規模災害発災直後は、探索によって得られた画像等のセンサデータを、被災地域内に位置する拠点に収集し、救助活動等に活用することが考えられる。今後は、UAV による探索対象領域全体の探索効率を維持しつつ、取得したデータを拠点に効率よく収集する手法について検討を行う予定である。

謝辞

本研究の一部は、日本学術振興会科学研究費補助金・若手研究 (B) (17K12673) および東北大学電気通信研究所における共同プロジェクト研究によるものである。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- [1] İ. Bekmezci, O.K. Sahingoz, and Ş. Temel, "Flying ad-hoc networks (FANETs): A survey," *Ad Hoc Networks*, vol.11, pp.1254–1270 (2013).
- [2] A. Kanzaki and H. Akagi, "A UAV-collaborative sensing method for efficient monitoring of disaster sites," *Proc. Int. Conf. on Advanced Information Networking and Applications (AINA 2019)* pp.775–786 (2019).
- [3] J. Modares, F. Ghanei, N. Mastronarde, and K. Dantu, "UB-ANC planner: Energy efficient coverage path planning with multiple drones," *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA 2017)*, pp.6182–6189 (2017).
- [4] 大野木優, 尾崎凌介, テープウィロー・ジャナボンニワット, 大田義勝, 高橋淳二, 戸部義人, "複数 UAV 協調センシングにおける階層的カバー率の提案" 情報処理学会マルチメディア通信と分散処理ワークショップ (DPSWS 2015) 論文集, vol.2015, no.5, pp.40–46 (2015).
- [5] J. Sánchez-García, D.G. Reina, and S.L. Toral, "A distributed PSO-based exploration algorithm for a UAV network assisting a disaster scenario," *Future Generation Computer Systems*, vol.90, pp.129–148 (2019).
- [6] 清水健之郎, 佐藤文明, "UAV-MANET のための安定ルート選択方式の提案" 情報処理学会論文誌, vol.57, no.2, pp.449–458 (2016).