

UAV 協調型センシングにおける 巡回担当領域の分割を用いた移動制御について

神崎 映光¹ 坂本 大河²

概要：本稿では、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特定の対象領域を探索する UAV 協調型センシングにおいて、各 UAV の残余電力を考慮しながら、対象領域全体を効率よく探索する手法を提案する。提案手法では、筆者らの研究グループにおいて提案した手法に基づく各 UAV の移動制御を行いながら、各 UAV が、自身の残余電力に応じて動作を変更し、充電を行いながら対象領域を繰り返し探索する。また、UAV および UAV を稼働させた拠点間において無線通信による情報共有を行い、拠点の位置に基づいて各 UAV が探索を担当する領域の分割を行うことで、各 UAV の探索効率を向上させる。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。

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], [7]。特に、UAV の飛行可能な特性を活かした応用として、地震や台風など、通信インフラの崩壊を伴う大規模災害が発生した直後の初動対応が考えられる [6]。例えば、島根県において大規模な地震が発生した直後に、県庁等が所有する UAV を用いて、温度、画像および動画などの情報を上空から取得することで、救助活動に必要な情報を迅速に収集できる。また、UAV に Wi-Fi などの近距離無線通信機能も搭載することで、被災地域内で被災者が所持するスマートフォンなどのモバイル端末との間で無線通信を行い、最寄りの避難所や安全な避難経路に関する情報を被災者に伝達できるものと考えられる。ここで、大規模災害発生直後は、建物の倒壊や被災者の移動などによって、被災地域内の各地点における状況が刻一刻と変化することが考えられる。そのため、被災状況に関する情報収集や、被災地域への情報伝達を効率的に行うためには、対象領域全体に対し、UAV を繰り返し、かつ頻繁に巡回させることが好ましい。

一方、近年の急速な UAV の普及に伴い、上述したような行政施設だけでなく、大学等の研究教育機関、あるいは個人までもが UAV を気軽に所有するようになった。これらの UAV を積極的に利活用し、被災地の探索を行うこと

ができれば、より効率的な情報収集および拡散が可能となるものと考えられる。

このような背景のもと、筆者らの研究グループでは、大規模災害発生時において、さまざまな機関や個人の所有する UAV を積極的に利活用し、これらの UAV を協調動作させて被災地域をはじめとした対象領域の探索を行う「UAV 協調型センシング」に関する研究を進めている [3], [4]。これらの手法では、UAV 同士が無線通信によって相互に情報を共有できる環境を想定し、探索中に無線通信可能となった UAV 間で、各々が探索を行った地点等に関する情報を共有する。各 UAV は、共有した情報に基づき、自身および他 UAV が最近探索した地点を冗長に探索しないよう、自身の移動経路を制御する。これにより、対象領域全体を繰り返し、かつ頻繁に探索できる。

ここで、ドローン等の UAV は電池によって駆動し、UAV の移動やセンシング、無線通信などに利用可能な電力が限られていることが一般的である。電力を使い果たすと UAV は稼働停止してしまうため、UAV が繰り返し探索を続けるためには、電池の充電を行う必要がある。しかし、先行研究では、UAV の電力容量を考慮しておらず、電力に限りがある環境にそのまま適用すると、UAV が早期に電池切れを起こし、探索が継続できなくなってしまう。

そこで本稿では、UAV 協調型センシングにおいて、UAV の残余電力を考慮しながら、対象領域の効率的な探索を実現するための UAV の動作制御手法を提案する。提案手法では、筆者らが文献 [4] で提案した手法に基づく移動制御を行いながら、各 UAV が自身の残余電力を考慮し、電力

¹ 島根大学学術研究院理工学系

² 島根大学総合理工学部

が無くなる前に探索を開始した拠点に帰還し、電池の充電を行いながら繰返し探索を行う。また、各 UAV の拠点の位置に関する情報を UAV 間の無線通信により共有することで、各 UAV が探索を担当する領域の分割を行う。このとき、各 UAV の拠点から近い領域を、当該 UAV の担当領域とすることで、充電を行いながらの効率的な探索を図る。さらに、各 UAV の拠点にも無線通信機能を追加し、無線通信による UAV との情報共有を可能にすることで、通信機会の増加による探索効率の向上を図る。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検証する。

以下では、2 章で本稿において想定する環境について述べる。3 章で、筆者らが文献 [4] で提案した手法について述べ、4 章で提案手法について述べる。5 章で、提案手法の有用性を示すために行ったシミュレーション実験の結果について述べ、最後に 6 章で本稿のまとめと今後の課題について述べる。

2. 想定環境

図 1 に、本稿における想定環境を示す。本稿では、先行研究 [4] と同様、対象領域内を複数の UAV が巡回する環境を想定する。

2.1 UAV および拠点

対象領域内には N 台の UAV u_i ($i = 1, \dots, N$) が存在するものとする。これらの UAV は、大規模災害発災後、さまざまな組織および個人が各々の意思で稼働させることが想定される。そのため、各 UAV は、自身が探索を開始した時点では他の UAV が稼働しているか否かを認識していないものとする。各 UAV には物理現象を観測するセンサが搭載されており、自身を中心とする半径 r_s の円内における物理現象を観測可能であるものとする。議論の簡単化のため、UAV に搭載されているセンサは全 UAV で共通であるものとする。また、各 UAV は電池により駆動し、移動によって電力を消費するものとする。なお、センシングや無線通信による消費電力は、移動によって消費される電力より非常に小さいため、本稿では考慮しないものとする。また、議論の簡単化のため、UAV に搭載される電池は全 UAV で共通であり、その電力容量は C であるものとする。

各 UAV u_i は、自身が動作を開始した地点（以降、拠点 b_i と呼ぶ）においてのみ充電が可能であるものとする。議論の簡単化のため、各拠点における充電効率 e_c は全拠点で共通であるものとする。

各 UAV および拠点は共通の無線通信デバイスを搭載しており、自身を中心とする半径 r_c の円内に存在する他の UAV および拠点と相互に無線通信可能であるものとする。

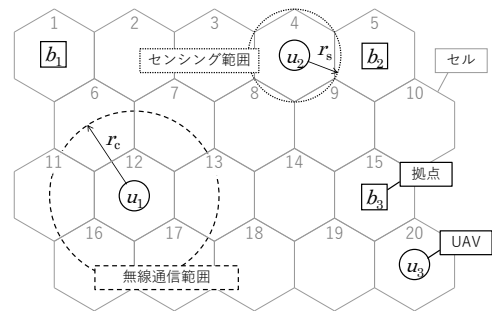


図 1: 想定環境 ($N = 3, M_c = 5, N_c = 4$ の場合)

Fig. 1 Assumed environment ($N = 3, M_c = 5, N_c = 4$).

2.2 対象領域

対象領域は二次元平面で与えられ、UAV のセンシング範囲に基づき、複数のセルに分割されているものとする。具体的には、図 1 に示すように、UAV のセンシング範囲に内接する正六角形のセルを定義し、これを用いて対象領域を分割する。本稿では、 M_c 個のセルの列が N_c 列並んでいる環境を想定し、各セルには一意の識別子 j ($j = 1, \dots, M_c \times N_c$) が与えられているものとする。図 1 では、各セルの上部に、当該セルの識別子を記載している。

各 UAV は、対象領域となる全セルの位置を把握しており、移動およびセンシングはセル単位で行うものとし、UAV が隣接するセルに移動する際に $e_m (< C)$ の電力を消費するものとする。また、議論の簡単化のため、各拠点はセルの中央に位置するものとする。

2.3 アプリケーション要求

1 章で述べたように、本稿で想定するアプリケーションでは、UAV が対象領域全体を繰返し、かつ頻繁に探索することが求められる。これを表す指標として、各セル j に対し、UAV によってどれだけ頻繁に探索が行われたかを表すカバレッジ c_j ($j = 1, \dots, M_c \times N_c$) という値を定義する。カバレッジの値は $[0.0, 1.0]$ の範囲で規定され、ある地点において UAV が存在しているセルのカバレッジは最大値である 1.0 で与えられるものとする。また、いずれかの UAV に最後に探索されてからの時間経過を表現するため、UAV が 1 セル分移動する時間（以降、単位時間と呼ぶ）ごとに、値が 0.0 になるまで一定値 δ だけ減衰するものとする。

以上の想定において、アプリケーションは、対象領域内のすべてのセルにおけるカバレッジの値をできるだけ高く維持することを要求する。

3. 先行研究

筆者らが文献 [4] において提案した手法では、無線通信可能となった UAV 間でカバレッジ等に関する情報を共有することで、各 UAV の移動経路を制御し、対象領域全体の探索効率を向上する。

前述したとおり、各 UAV は、自身が探索を開始した時点

では、他の UAV の存在を認識していない。そのため、稼働直後の UAV は、自身のみで対象領域全体を探索するよう、自身の移動経路を設定する。探索中に他の UAV と無線通信可能となると、その時点で他 UAV の存在を相互に認識し、両 UAV で互いが保持しているカバレッジ等に関する情報を共有することで、他 UAV の探索による影響も含めた各セルのカバレッジを把握できる。情報共有を行った UAV は、自身および他 UAV が最近探索していないものと考えられる、すなわちカバレッジの低いセルを優先的に探索するよう、自身の移動経路を制御することで、対象領域全体のカバレッジを高く保つ。

3.1 カバレッジマップおよび UAV 相互情報

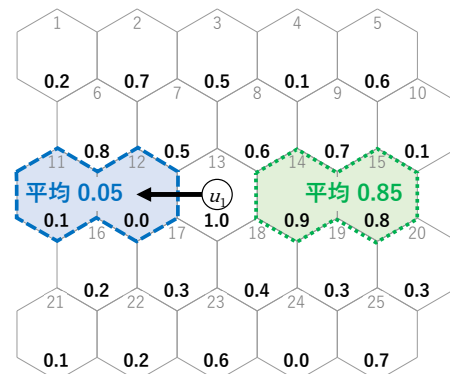
各 UAV は、各セルの情報として、自身が認識している当該セルのカバレッジをカバレッジマップとして保持する。UAV が探索を開始した時点では、その UAV が持つカバレッジマップにおける各セルのカバレッジの値は、自身が稼働したセルのみ 1.0、その他の全セルは 0.0 に設定する。

また、無線通信による情報共有により取得した他 UAV の情報として、当該 UAV の識別子、現在地、最後に共有を行った時刻であるタイムスタンプに関する情報を、UAV 相互情報として保持する。UAV が探索を開始した時点では、他 UAV の存在を認識していないため、UAV 相互情報には情報を保持しない。

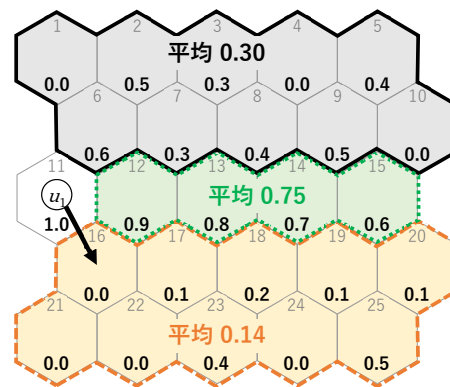
3.2 カバレッジを考慮した移動制御

各 UAV は、対象領域のカバレッジが高くなるよう、自身の移動経路を設定する。移動経路の設定は単位時間ごとに行い、各 UAV は、現在位置しているセルと隣接しているセルのうちいずれかを移動先として選択する。基本的には同一の列を構成するセルへの移動を行うが、移動方向のセルのカバレッジが十分高いと判断させる場合は、カバレッジの低い異なる列のセルへの移動を行う。便宜上、以下では、同一の列を構成するセル間の隣接関係を左右方向、異なる列間の隣接関係を上下方向として、各 UAV が移動先の隣接セルを選択する手順について述べる。

- (1) 同一の列を構成するセルに対し、左方向および右方向それぞれの全セルのカバレッジの平均値を算出し、それらの最小値が、予め設定された閾値 α を下回るか確認する。
- (2) 上述した最小値が α 未満であった場合は、左右方向のうち、カバレッジの平均値が小さい方向に位置する隣接セルへ移動する。図 2a に、 $\alpha = 0.5$ の環境において、UAV u_1 が移動先を選択する手順の例を示す。図中の各セルの下部に与えられている数値は、 u_1 のカバレッジマップにおいて保持されている各セルのカバレッジである。この図において、 u_1 の左方向に位置する 2 つのセルのカバレッジの平均値は 0.05、右方向に



(a) 列内における移動先選択



(b) 他の列への移動

図 2: カバレッジを考慮した移動制御

Fig. 2 Moving strategy based on coverage.

おけるカバレッジの平均値は 0.85 となる。カバレッジの平均値の最小値は、左方向を選択した場合の 0.05 であり、この値が閾値 α を下回るため、 u_1 は、左方向の隣接セルに移動する。

- (3) 最小値が α 以上となる場合は、後述する手順に従い上下に隣接する列への移動を行う。例えば図 2b において、領域の左端に位置する UAV u_1 は、右方向に位置するセルのカバレッジの平均値を算出するが、この値が 0.75 となり、閾値 α 以上となるため、上下方向への移動を行う。

上記の手順 (3) における上下方向の移動は、以下の手順に従って行う。

- (1) 隣接する列として、上下方向のいずれも選択可能な場合には、自身が持つカバレッジマップを参照し、自身が存在する列よりも上の全ての列のセルのカバレッジの平均値を算出する。下の列においても同様に平均値を算出し、この値が小さい方の列に移動する。たとえば、図 2b において上下方向の移動を行うことを決定した UAV u_1 は、自身の存在する列を除く上および下方向に存在する全てのセルのカバレッジの平均値をそれぞれ算出する。その結果、下方向のセルにおける平均値が小さいため、 u_1 は下方向への移動を行う。
- (2) 上方向もしくは下方向にセルが存在しない場合は、移

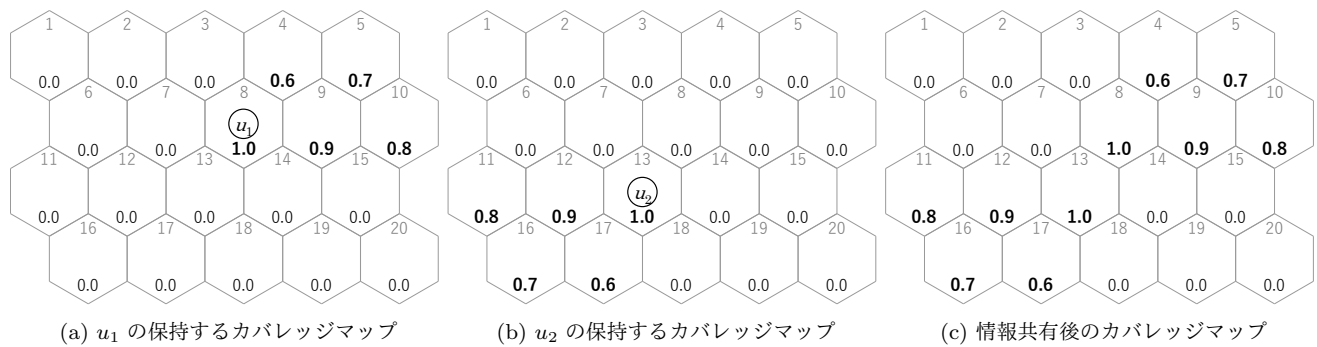


図 3: カバレッジマップの共有

Fig. 3 Sharing of coverage maps.

動可能な列に移動する。

3.3 無線通信による情報共有

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統合する。具体的には、無線通信可能となった UAV 間において、カバレッジマップに含まれる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を更新する。たとえば、図 3a に示すカバレッジマップを保持している u_1 と、図 3b に示すマップを保持している u_2 が無線通信可能となった場合、互いの持つマップを統合し、新たな情報として図 3c に示すカバレッジマップを生成し、各々の記憶領域に格納する。

また、過去に他の UAV と情報共有しており、UAV 相互情報に情報が格納されている場合は、自身の情報に加え、UAV 相互情報に含まれるすべての情報も、接続した UAV に送信する。これを受信した UAV は、他 UAV の情報として、より新しいものを自身の記憶領域に格納する。

3.4 他 UAV の動作の再現

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。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設定することを防ぐ。

4. 提案手法

提案手法では、先行研究と同様に、無線通信可能となった UAV 間でカバレッジ等に関する情報を共有することで、各 UAV の移動経路を制御し、対象領域全体の探索効率を

向上する。また、各拠点にも無線通信機能をもたせ、無線通信可能となった UAV と拠点との間でもカバレッジ等に関する情報共有を行う。これにより、拠点を介した情報共有によって、各 UAV の持つ情報をより多くの UAV に拡散でき、領域全体の探索効率のさらなる向上を図る。

また、UAV の電力に限りがあることを考慮し、残余電力に基づき、移動経路の制御動作を変更する。具体的には、残余電力が高い場合は探索効率を優先した移動制御を行い、残余電力が低下した場合は、自身の電池を充電するために、自身の拠点への帰還を優先した移動制御を行う。後者の移動制御を行う場合も、拠点への帰還を優先しつつ、各セルのカバレッジを考慮した移動制御を行うことで、対象領域全体のカバレッジを高く保つ。

さらに提案手法では、UAV 同士、もしくは UAV と拠点とで共有する情報として、拠点の位置情報を追加し、この情報から、各 UAV が巡回を担当する領域の分割を行う。このとき、各 UAV の担当領域を、当該 UAV の拠点に近い領域に限定することで、充電に伴う拠点への帰還による探索効率の悪化を防ぐ。

4.1 動作概要

各 UAV は、カバレッジマップおよび UAV 相互情報に加えて、各 UAV の拠点の位置に関する情報を保持する。さらに、各セルがどの UAV の担当領域に含まれるかを判別する情報を、担当領域マップとして保持する。UAV が探索を開始した時点では、他の UAV および拠点の存在を認識していないため、自身の拠点の位置情報のみを保持し、対象領域内の全セルを自身の担当領域に設定する。

一方、各拠点は、カバレッジマップと各拠点の位置情報を保持する。自身の保有する UAV が探索を開始し、無線通信可能な範囲を移動している時点では、当該 UAV が持つカバレッジマップを取得し、自身のカバレッジマップとして設定する。また、この時点では、拠点の位置情報としては、自身の情報のみを保持する。

各 UAV は、4.2 節で述べる手順に従い、自身の残余電

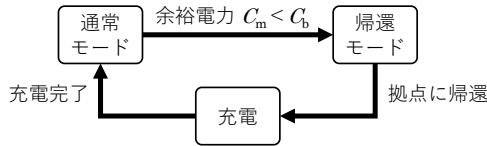


図 4: 残余電力によるモード切替え

Fig. 4 Mode transition based on residual energy.

力に応じて、探索効率を優先する通常モードと、充電のための帰還を優先する帰還モードの2種類のモードを切り替え、各モードに従って自身の移動経路を自律的に設定する。また、各 UAV および拠点は、他の UAV、もしくは拠点と互いに無線通信が可能となった場合、4.3 節で述べる手順に従い、自身および過去に無線通信を行った他 UAV に関する情報等を相互に共有する。さらに各 UAV は、共有した拠点の位置情報から、4.4 節の手順に従い、各 UAV が巡回を担当する領域の分割を行う。

4.2 残余電力とカバレッジを考慮した移動制御

各 UAV は、残余電力、および現在地から自身の拠点までの距離を用いて、自身に設定するモードを切り替える。ここで2つのセル間の距離は、隣接するセル間を1とし、これに基づき規定されるセル間の最短距離である。

移動経路の切替えは、図4に従って行う。図において、通常モードから帰還モードに遷移する際に用いる閾値 C_b は、予め全 UAV 共通で定められた閾値であり、次式で与えられる余裕電力 C_m が閾値以下となった場合、自身の電力に余裕がないものと判断し、帰還モードに遷移する。

$$C_m = C_{cur} - D \cdot e_m. \quad (1)$$

上式の C_{cur} は UAV の残余電力であり、 D は現在地から自身の拠点までの距離である。余裕電力は、現在地から最短経路で拠点まで帰還した場合に確保できる残余電力であり、この値を大きく設定することにより、帰還モードでの移動時に、各セルのカバレッジを向上させる迂回経路を設定できる可能性が大きくなる。

4.2.1 通常モード

通常モードで動作する UAV は、先行研究と同様の手順に従い、自身の移動経路を設定する。ただし、移動先に設定するセルは、自身の担当領域に設定されているもののみから選択するものとする。

4.2.2 帰還モード

帰還モードに遷移した UAV は、自身の電池を充電するために、自身の拠点へ帰還するための移動経路を設定する。このとき設定する経路は、電池を使い果たす前に拠点に到達できるものを設定するが、複数の候補が考えられる場合は、設定できる経路上のセルにおけるカバレッジを考慮し、できるだけカバレッジの増加が大きくなることが期待される経路を選択する。

まず、UAV は、図5に示すように、自身の担当領域に含

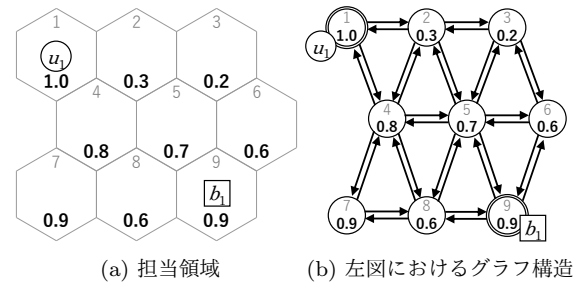


図 5: カバレッジに基づくグラフの構築

Fig. 5 Graph construction based on coverage.

まれる全セルを節点とし、隣接セル間をリンクで相互に接続した重み付き有向グラフを生成する。このグラフに対して、ダイクストラ法 [2] を拡張したアルゴリズムを用いて、以下の手順に従って、自身が存在するセルから拠点までの最短経路を導出する。

- (1) 各節点に対し、最短経路が確定したかどうか、現在 UAV が存在しているセルに対応する節点（始点）からの経路上におけるコストの総和（距離）、および最短経路が確定した場合の始点からの移動距離（ホップ数）を設定する。初期状態では、全節点に対し、すべての情報が未確定であるものとする。
- (2) 始点を経路確定済とし、その最短距離およびホップ数を0に設定する。
- (3) 経路未確定に設定されている節点のうち、後述するコスト設定に基づき、始点からの距離が最小となる節点を選択し、その距離を最短距離として当該節点に設定する。同時に、当該節点の状態を経路確定済に設定し、始点からのホップ数も設定する。
- (4) 手順(3)において経路確定済となった節点を現在地とし、現在地と隣接しており、かつ経路未確定となっている各節点に対し、手順(3)と同様のコスト設定に基づき、現在地を経由した場合の距離を算出する。その結果、これまで当該節点に設定されていた距離より小さくなる、あるいは当該節点に距離が設定されていない場合は、算出した距離を当該節点に設定する。また、当該節点までの距離が更新された場合、当該節点のホップ数を、現在地のホップ数に1を加えたものに設定する。
- (5) 自身の拠点が位置するセルに対応する節点が経路未確定に設定されている場合、手順(3)に戻る。一方、拠点が位置するセルに対応する節点が経路確定済となった場合は処理を終了する。

上記の手順(3)および(4)における節点 i から j へのリンクのコスト $cost_{i,j}$ は、当該リンクの終点となる節点（セル） j において期待されるカバレッジの増加量に基づき、次式を用いて導出する。



図 6: 対象領域の分割

Fig. 6 Division of target region.

$$cost_{i,j} = \frac{1.0}{1.0 - c_j(h_i + 1)}. \quad (2)$$

上式の h_i は, 上記の手順において, コスト導出時点でリンクの始点となる節点 i に設定されているホップ数を表している.

4.3 無線通信による情報共有

提案手法では、先行研究と同様、無線通信可能となった UAV 間において、互いの持つカバレッジマップの統合を行う。また、UAV と拠点とが無線通信可能となった場合も、同様の手順によりカバレッジマップの統合を行う。

さらに提案手法では、無線通信可能となった UAV および拠点間において、各々が把握している拠点の位置情報を相互に送信する。これを受信した UAV および拠点は、受信した情報のうち、自身の保持していない拠点に関するものを新たな拠点の位置情報として格納する。

4.4 対象領域の分割

各 UAV は、4.3 節で述べた情報共有を行うたびに、自身の把握している拠点の位置情報から、以下の手順で担当領域の分割を行う。

- (1) 各拠点の位置を、当該拠点において稼働した UAV の担当領域に設定する。
- (2) 各 UAV に対して設定した担当領域に隣接しており、いずれの UAV の担当領域にも設定されていないセルを、当該 UAV の担当領域に設定する。ここで、複数の拠点から等しい距離に位置するセルについては、それら拠点に対応する全 UAV の共通の担当領域として設定する。
- (3) 観測対象領域内の全セルが 1 つ以上の UAV の担当領域に設定されるまで、手順 (2) の動作を続ける。全てのセルがいずれかの UAV の担当領域に設定された時点で、処理を終了する。

たとえば, UAV u_1 および u_2 が, それぞれの拠点 b_1, b_2 の位置情報を共有した場合, 上記の手順に従って, 図 6 に示すような担当領域の分割が行われる.

5. 性能評価

提案手法の有用性を検証するため、シミュレーション実験を行った。実験では、複数の UAV が対象領域内の各セルを探索する動作を再現するシミュレーションプログラムを C++言語を用いて実装した。

5.1 評估環境

実験では、 10×10 個 ($M_c = N_c = 10$) のセルに分割された対象領域に 5 台 ($N = 5$) の UAV を配置した。各セルにおけるカバレッジの減衰率 δ は 0.005 とし、各 UAV の電力容量 C は 30、拠点における単位時間あたりの充電量 e_c 、および移動による単位時間あたりの消費電力 e_m をそれぞれ 5 および 1 とした。UAV の移動を切り替えるための閾値 C_b は 1 に設定した。また、互いに隣接するセルに位置する UAV と無線通信可能となるよう、無線通信範囲 r_c を設定した。各 UAV の初期位置は、対象領域内の全セルの中から、複数の UAV が同一のセルを選択しない範囲でランダムに設定し、各 UAV の初期位置に、当該 UAV の拠点を配置した。

以上の環境において、200 単位時間を経過させるシミュレーション実験を、UAV の初期位置を変えながら 100 回行った。

5.2 評価手法

実験では、UAV が電力を使い果たさず継続して探索できるよう、4.2 節で述べた残余電力に基づく移動制御を有効にした上で、4.3 節で述べた拠点との通信機能、および 4.4 節で述べた領域分割機能の効果を検証するため、それぞれの機能の有無を変更した 4 つの手法の性能を比較した。すべての機能を動作させる手法が、本稿の提案手法となる。

5.3 評估指標

実験では、提案手法によって対象領域全体が頻繁に観測されたか、すなわち領域内の全セルにおけるカバレッジが高く保たれたかを検証するため、以下の指標を評価した。

平均カバレッジ 対象領域の全セルのカバレッジの平均値の時間的推移. この値は, 対象領域内における各セルのカバレッジが高いほど高い値を示す.

カバレッジの分散値 対象領域の全セルのカバレッジの分散値の時間的推移。この値は、セルごとのカバレッジの偏りが小さく、全セルが均一に観測されているほど小さい値を示す。

5.4 評価結果

実験結果を図7に示す。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であり、縦軸はそれぞれ平均カ

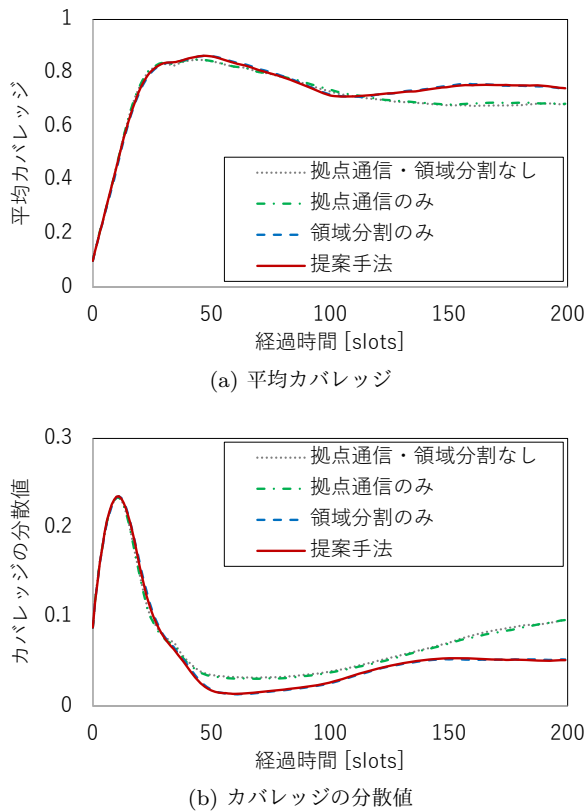


図 7: 評価結果

Fig. 7 Simulation results.

バレッジおよびカバレッジの分散値を表す。

図 7a の結果より、領域分割を行わない手法において、時間の経過に伴って平均カバレッジが減少する傾向にあることがわかる。これは、3.4 節で述べた他 UAV の動作再現において、他 UAV の動作を誤って推測してしまい、結果として長期に渡って探索されないセルが生じるためであると考えられる。一方、領域分割を行うことで、経過時間に関わらず高いカバレッジが維持できることがわかる。これは、担当領域を分割することにより、各 UAV が担当するセルがほぼ一意に定まり、他の UAV の動作再現による移動経路の変更が起りにくくなるためであるものと考えられる。また、領域の分割によって担当領域自体が縮小され、各 UAV が担当領域内の全セルを頻繁に観測できるようになったためであると考えられる。一方、拠点との通信機能については、その有無によって平均カバレッジがほぼ変化しないことがわかる。これは、各 UAV が、領域内を探索しながらカバレッジマップを更新し続けるため、各拠点よりも正確かつ新鮮なカバレッジマップを持つことが多く、拠点との通信が発生したとしても、通信後の UAV が自身に設定する経路が変動しないためであると考えられる。また、領域分割を行うと、各 UAV が他の UAV を稼働させた拠点と通信する機会がほぼなくなり、当該機能自体がほぼ動作しないためであると考えられる。

図 7b の結果より、領域分割を行わない手法において、

時間の経過に伴ってカバレッジの分散値が増加する傾向にあることがわかる。これは、上述したように、長期に渡って探索されないセルが生じるためであると考えられる。一方、領域分割を行うことで、分散値の増加を抑制できることがわかる。これは、上述したように、担当領域の分割により、他の UAV の動作再現による移動経路の変更が起りにくくなり、また、各 UAV が担当する領域自体が縮小されたためであると考えられる。一方、拠点との通信機能の有無によるカバレッジの分散値の増減がほぼ見受けられず、上述したように、当該機能が探索効率に与える影響がほぼないことがわかる。

6. おわりに

本稿では、UAV 協調型センシングにおいて、UAV の残余電力を考慮しながら、対象領域の効率的な探索を実現するための UAV の移動制御手法を提案した。また、シミュレーション実験によって、特に担当領域の分割を行うことで、高い探索効率が維持できることを確認した。

今後の課題として、各 UAV の担当領域を均等に分割し、担当領域ごとの探索効率の偏りを抑制する手法について検討する予定である。

謝辞 本研究は、JSPS 科研費・基盤研究 (C)(20K11767)、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] Cabreira, T.M., Brisolara, L.B. and Ferreira, P.R.: Survey on coverage path planning with unmanned aerial vehicles, *Drones*, vol.3, no.4, pp.1–38 (2019).
- [2] Dijkstra, E.W.: A note on two problems in connexion with graphs, *Numerische Mathematik*, vol.1, no.1, pp.269–271 (1959).
- [3] 伊藤太清, 神崎映光: UAV 協調型センシングにおける探索効率の向上について, 情報処理学会マルチメディア, 分散, 協調とモバイルシンポジウム (DICOMO 2019) 論文集, pp.957–962 (2019).
- [4] Kanzaki, A. and Akagi, H.: 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).
- [5] Majeed, A. and Lee, S.: A new coverage flight path planning algorithm based on footprint sweep fitting for unmanned aerial vehicle navigation in urban environments, *Applied Sciences*, vol.9, no.7, pp.1–17 (2019).
- [6] Sanchez-Garcia, J., Reina, D.G. and Toral, S.L.: A distributed PSO-based exploration algorithm for a UAV network assisting a disaster scenario, *Future Generation Computer Systems*, vol.90, pp.129–148 (2019).
- [7] Sun, J. and Masouros, C.: Deployment strategies of multiple aerial BSs for user coverage and power efficiency maximization, *IEEE Trans. Communications*, vol.67, no.4, pp.2981–2994 (2019).
- [8] Zeng, Y. and Zhang, R.: Energy-efficient UAV communication with trajectory optimization, *IEEE Trans. Wireless Communications*, vol.16, no.6, pp.3747–3760 (2017).