

UAV 協調型センシングにおけるグループ化を用いた探索手法

伊藤 太清¹ 神崎 映光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、UAV のグループ化を用いて、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、無線通信可能となった UAV 間においてリーダー・フォロワ関係を結び、1 台のリーダーと複数台のフォロワからなるグループを構築する。グループ内の各 UAV は、リーダーが定めた周期に基づき、定期的に定められた場所に集合する。グループ集合時、リーダーは、次の集合までの期間における自身と各フォロワの巡回経路を、対象領域を重複なく探索できるよう計画する。この計画に基づき、グループ内の UAV が探索を行うことにより、対象領域全体を頻繁に、かつ偏りなく探索可能とする。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。

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おり [1], [5], 大規模災害発災時における被災状況の把握や被災者への情報伝達などへの応用が期待されている [6], [7]. ここで、大規模災害発災時は、被災者の移動や災害の進行などによって被災地の状況は刻一刻と変化するため、被災地の状況を把握するためには、被災地域全域に渡る探索を繰り返し頻繁に行う必要がある。

一方、近年の UAV の小型化、低価格化に伴い、今後はさまざまな機関や一般家庭にも UAV が普及するものと考えられる。このような環境では、災害対策本部等の所有する UAV だけでなく、さまざまな機関や個人の所有する UAV も被災地の探索を行うことで、状況把握や情報伝達をより効率化できるものと考えられる。

筆者らの研究グループでは、通信インフラの崩壊した大規模災害発災直後を想定し、さまざまな機関や個人の所有する自律航行可能な UAV を積極的に利用し、これらの UAV を協調動作させて広範囲の探索を行う UAV 協調型センシングに関する研究を進めている [2], [3], [4]. これらの研究では、被災地等の探索対象領域内における各地点の探索頻度を評価する指標を導入し、その指標によって長い間探索されていない地点を優先的に探索する。また、巡回中に無線通信可能となった UAV 同士で、各地点の探索頻度に関する情報を共有することで、UAV が他の UAV が最近

探索した領域を冗長に探索することを防ぐ。しかし、これらの手法は、各 UAV が独立に自身の巡回経路を決定しており、決定した経路によっては複数の UAV によって冗長に探索される地点や、長時間どの UAV にも探索されない地点が発生する可能性がある。

本稿では、UAV 協調型センシングにおいて、より高い探索効率を実現するための 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 [2] で提案した手法に基づき、各 UAV が領域内を巡回し、探索を行う。また、巡回中に無線通信可能となった UAV 間においてリーダー・フォロワ関係を結び、1 台のリーダーと複数台のフォロワからなるグループを構築する。グループ内の各 UAV は、定められた周期に基づき、定期的に定められた場所に集合する。グループ集合時、リーダーは、次の集合までの期間における自身と各フォロワの巡回経路を、対象領域を重複なく探索できるよう計画する。この計画に基づき、グループ内の UAV が探索を行うことにより、対象領域全体を頻繁に、かつ偏りなく探索可能とする。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 [2] で提案した手法について述べ、4 章で本稿の提案手法について述べる。5 章で、提案手法の有効性を検証するために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、本稿における想定環境を示す。本稿では、先行

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

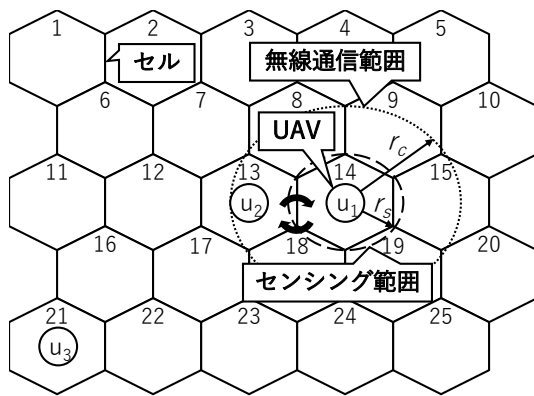


図 1: 想定環境 ($N = 3, M_c = 5, N_c = 5$ の場合)

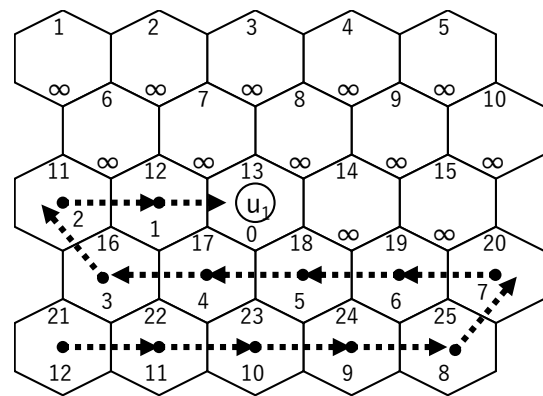


図 2: BT マップ

研究 [2] 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

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。UAV 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 と相互に無線通信可能であるものとする。

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 単位時間と定義する。

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 が対象領域を繰返しかつ頻繁に探索する必要がある。これを表す指標として、本稿では、上述した対象

領域を分割した各セルに対し、当該セルが UAV によって最後に探索されてからの経過時間を表すブランクタイム (Blank Time: BT) を導入する。BT は、当該セルがまだ一度も UAV によって探索されていない場合は無限大で与えられ、当該セルが UAV によって探索されるたびに 0 になるものとする。また、いずれかの UAV によって最後に探索されてからの経過時間を表現するため、単位時間ごとに、BT の値が 1 だけ増加するものとする。

以上の想定において、アプリケーションは、対象領域内における全セルの BT をできるだけ低く抑えることを要求する。

3. 先行研究

筆者らが文献 [2] で提案した手法では、各 UAV が、自身の持つ BT 情報に基づき、BT が大きい、すなわち長期に渡って探索されていな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 BT 情報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。

3.1 BT マップ

各 UAV は、自身が把握している各セルの BT に関する情報を BT 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 BT マップを生成している様子を示す。この図において、各セルの下部に記載している数値は、当該セルの BT 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 BT マップに基づき、次に移動する隣接セルを決定する。

まず、自身の保持する BT マップにおいて、現在位置しているセルと隣接しているセルのうち、BT の値が最大であるものを選択し、そのセルに移動する。BT の値が最大であるセルが複数存在する場合、それらのセルに隣接するセルのうち、BT の値が最大であるものを選択し、そのセルに向かう方向に位置する隣接セルに移動する。たとえば図

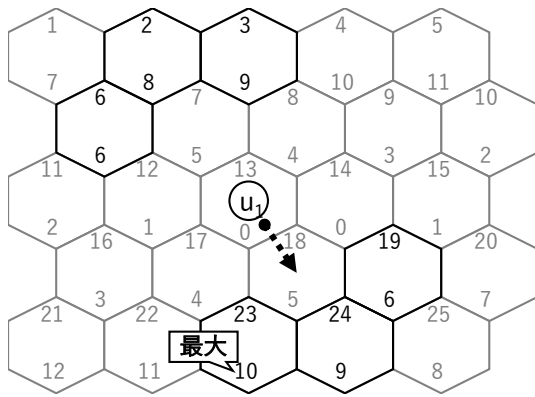


図 3: 移動先の決定

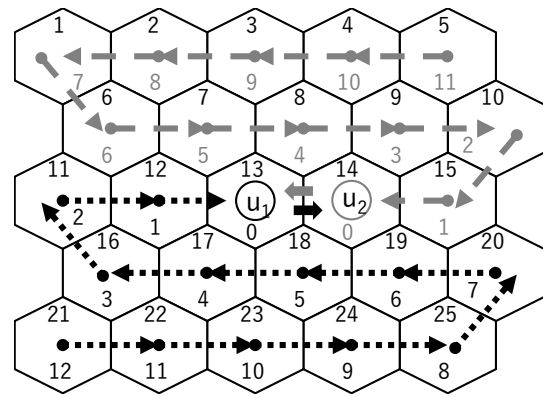
3においてセル13に位置する UAV u_1 は、隣接セルのうち BT が最大であるものがセル {7, 18} の2つであるため、これらのセルに隣接するセル {2, 3, 6, 19, 23, 24} の BT の値を参照する。これらのセルのうち、BT の値が最大であるのはセル23であるため、UAV u_1 は、セル23に向かう方向に位置する隣接セル18に移動する。これらのセルにおいても BT が最大であるものが複数存在する場合は、さらに遠方に位置するセルの BT を参照する操作を繰り返す。

3.3 BT マップの共有

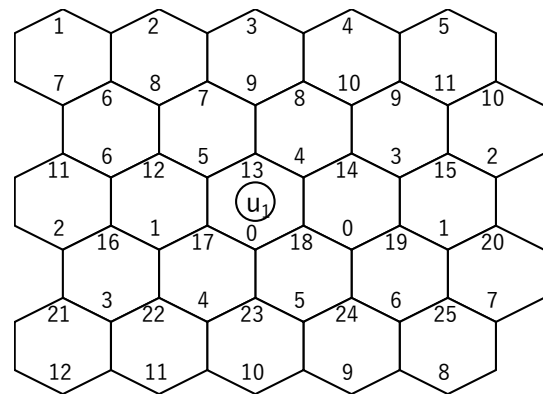
複数の UAV が互いに無線通信可能となった場合、UAV 間において互いの持つ BT マップを共有する。具体的には、無線通信可能となった UAV 間において、各セルの BT の値を比較し、それらの中で最小の値に、当該セルの BT の値を更新する。例えば図4(a)において、図2に示す BT マップを持ち、UAV u_2 と無線通信可能となった UAV u_1 は、 u_2 との間でマップを共有する。ここで、UAV u_2 が、図4(a)上部の破線で示す移動経路を通過しており、図中のセル {1, ..., 10, 14, 15} に記載されている BT をマップとして持つ場合、UAV u_1 は、自身の持つマップを図4(b)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 BT マップを、図4(b)に示す値に更新する。

3.4 BT マップ共有後の移動

無線通信によって他の UAV との情報共有を行った UAV は、他の UAV と同じセルを冗長に探索することを防ぐため、無線通信可能な UAV 同士で次に探索するセルを調整する。具体的には、無線通信可能な UAV が、1台ずつ順に、3.2節で述べた手順に従って次に探索するセルを決定し、決定した移動先のセルの識別子を通知する。これを受信した他の UAV は、当該セルを自身の移動先セルの候補から外す。これを無線通信可能な全 UAV が行うことにより、次の単位時間において複数の UAV が同一セルに移動することを防ぐ。



(a) 各 UAV の移動経路と BT マップ



(b) 共有後の BT マップ

図 4: BT マップの共有

3.5 他 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 BT マップに基づいて、過去に情報共有を行った UAV の移動先となるセルを推測する。また、自身の BT マップにおいて、推測した移動先セルの BT の値を0に更新する。この動作を、当該 UAV と最後に情報共有を行ったから τ 単位時間だけ行うことにより、各 UAV が、最近情報共有を行った 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

本章では、本稿で提案するグループ化を用いた探索手法について述べる。

4.1 設計方針

先行研究では、3.5節で述べた手順によって UAV 同士が互いの動作を再現し合い、他の UAV が探索するものと推測されるセルを避けた移動先決定を行うことにより、複数の UAV が同じセルを冗長に探索することを防いでいる。しかし、情報共有を行った UAV のうち一方のみが、以後の移動時に他の UAV と無線通信可能となり、情報共有によって BT マップを更新する場合など、情報共有を行った

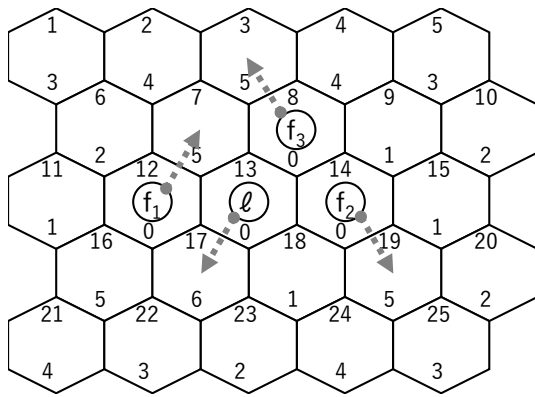


図 5: グループにおける移動先の決定

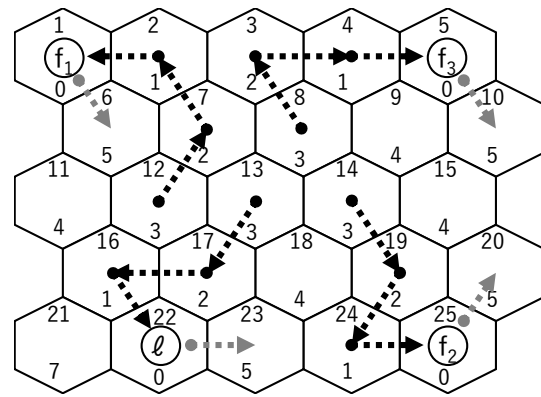


図 6: 再集合の動作の計画

UAV 間において BT マップに差異が生じる可能性がある。そのため、過去に情報共有を行った UAV でも、同一セルの冗長な探索を完全には排除できず、探索効率が低下してしまう可能性がある。

この問題に対し、提案手法では、無線通信可能となった UAV 間においてリーダー・フォロワ関係を結び、1 台のリーダーと複数台のフォロワからなるグループを構築する。グループ内の各 UAV は、予め定められた周期に基づき、定期的に定められた集合地点に集合する。グループ集合時、リーダーは、次の集合までの期間における自身と各フォロワの巡回経路を計画する。これにより、グループ内の UAV による同じセルの探索を完全に排除し、対象領域全体の探索効率を向上させる。

以下では、4.2 節において、提案手法で用いるグループについて述べる。4.3 節で、グループ内における巡回経路計画手順について述べ、4.4 節および 4.5 節においてグループの形成および統合について述べる。

4.2 グループ

前述の通り、各グループに所属する UAV は、定められた周期に基づき、定期的にリーダーが定めた集合地点に集合する。本研究では、この周期を集合周期と呼ぶ。グループ集合時、リーダーは自身が探索を開始したセルに移動し、フォロワはリーダーと無線通信可能な範囲にあるセルに移動する。すなわち、グループの集合地点はリーダーが探索を開始したセルとなる。各 UAV は、グループ形成時にリーダーとなる UAV を決定するために、 $[0.0, 1.0]$ の範囲からランダムに与えられる優先度を自身に設定する。また、グループに所属する UAV は、自身の所属するグループおよび他のグループに関する情報として、グループの優先度、集合地点となるセルの識別子、次の集合時刻、リーダーおよびフォロワの識別子からなるグループ情報を保持する。

4.3 グループの動作

グループ集合時、グループ内の UAV は、3.3 節で述べた手順に従い、BT マップの共有を行う。その後、リーダーは、

以下の手順に従って、各 UAV の次の集合時刻までの経路を計画する。

- (1) 現在の各 UAV の位置および BT マップに対し、3.2 節で述べた手順に基づき、自身の移動先となるセルを決定する。同様に、各フォロワの移動先セルについても、3.2 節で述べた手順に基づいて決定する。ただし、各フォロワの移動先決定の際、先に移動先を決定したリーダーまたはフォロワの移動先となるセルは、当該フォロワの移動先候補から除外する。たとえば図 5 において、4 台の UAV からなるグループが形成されており、これら UAV が集合した際、セル 13 に位置するリーダー l は、隣接セルのうち BT の値が最大であるセル 17 を移動先に決定する。次に、フォロワ f_1 の移動先を決定するが、 f_1 の隣接セルのうち、リーダー l の移動先となっているセル 17 を候補から除外し、3.2 節で述べた手順に従って、セル 7 を移動先に決定する。同様の手順により、 f_2 および f_3 の移動先を決定する。
- (2) 手順 (1) で決定した移動先に基づき、1 単位時間経過後の BT マップを生成する。具体的には、各セルの BT の値を 1 増やした後、各 UAV の移動先となるセルの BT の値を 0 にする。
- (3) 上記の手順を実行した後の各 UAV の位置および BT マップに対し、手順 (1) および (2) の手順を繰り返し実行する。

ここで、グループ内の各 UAV は次の集合時刻に再度集合する必要がある。そのため、上記の手順 (1) において、各 UAV の位置に対し、再度集合可能な位置に移動するまでに要する最短時間と集合時刻までの残り時間が等しくなった場合、当該 UAV の移動先セルを集合地点に近づく方向のみから決定する。たとえば、集合周期が 6 単位時間であり、図 5 から 3 単位時間分の経路を計画し、図 6 に示す UAV の位置および BT マップを生成しているリーダー l は、3 単位時間後に集合地点であるセル 13 に到達する必要がある。このとき、3.2 節で述べた手順に従うと、セル 21 が移動先となるが、このセルに移動すると集合時刻にセル 13 に到達できなくなる。そのため、リーダーはセル 21 を移動先候

補から除外し、セル 23 を自身の移動先とする。

以上の手順により次の集合時刻までの各 UAV の移動経路を決定したリーダーは、各フォロワに決定した移動経路に関する情報を送信した後、自身に設定した経路に従って巡回を開始する。一方、リーダーから情報を受信したフォロワは、自身に指定された移動経路に従って対象領域を巡回する。

4.4 グループの形成

いずれのグループにも属していない複数の UAV が互いに無線通信可能となった場合、3.3 節で述べた手順に従って BT マップを共有した後、当該 UAV において新たなグループを形成する。まず、各 UAV は、各々の優先度に関する情報を共有し、優先度が最大となる UAV をリーダーとし、その他の UAV をフォロワとする。

リーダーとなった UAV は、グループ集合地点となるセル、および自身が次に集合地点に移動する時刻に関する情報を、全フォロワに送信する。これを受信した各フォロワは、3.2 節で述べた手順に従って探索を再開する。ただし、リーダーから受信した時刻に集合できるよう、4.3 節でリーダーが行う移動先決定手順と同様の手順を用いて、自身の移動先となるセルを決定する。

集合地点にて互いに無線通信可能となった UAV は、4.3 節で述べる手順に従い、グループとしての移動制御を開始する。

4.5 グループの統合

4.4 節で述べた手順により、対象領域内では複数のグループが形成される可能性がある。提案手法では、複数のグループが無線通信によって互いの存在を認識した場合、それらのグループを統合する。グループの統合は、各グループのリーダーに設定された優先度に基づき、優先度の低いグループの UAV が、優先度の高いグループのフォロワとなることで行う。

ここで、グループ内の各 UAV は、集合時刻を除く多くの期間においてグループ内の全 UAV と相互に無線通信が行えないため、ある UAV が他のグループに所属する UAV の存在を認識しても、次の集合時刻まで自身の所属するグループ内の全 UAV に他グループの情報を共有できない。また、ある集合周期において、グループ内の複数の UAV が、それぞれ異なるグループの存在を認識する可能性がある。そのため提案手法では、集合周期内に他のグループの存在を認識した場合、次の集合時にグループ内での情報共有を行い、リーダーがグループの統合を決定するものとする。

また、統合後のグループにおいて経路を計画するためには、グループに所属する全 UAV が集合する必要がある。提案手法では、優先度の低いグループに所属する全 UAV が、優先度の高いグループの集合地点に移動することで、

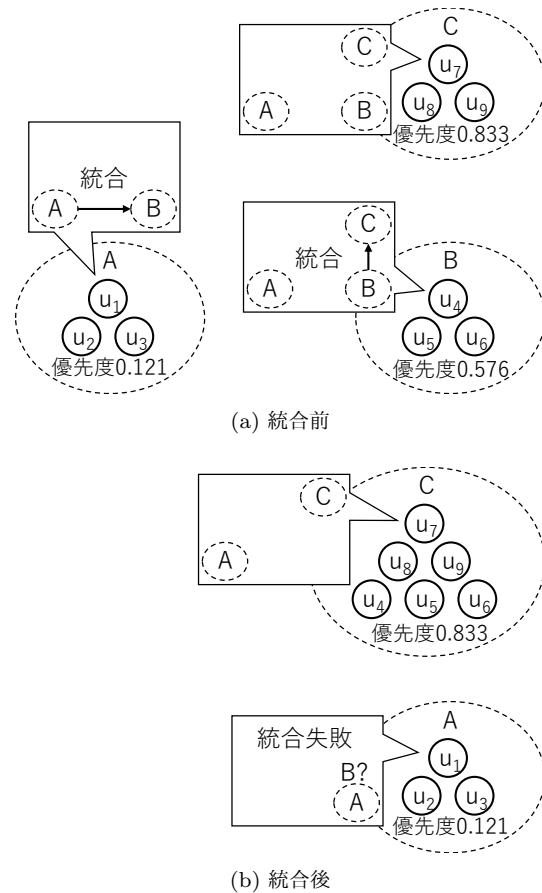


図 7: 統合の連鎖

これを実現する。このとき、優先度の高い、すなわち他グループの統合先となるグループに所属する UAV が、さらに優先度の高いグループの存在を認識することで、統合に失敗する可能性がある。たとえば図 7(a) において、3 つのグループ A, B, C が存在し、グループ B がグループ A および C との間で互いの存在を認識している場合、グループ A は、グループ B に統合される判断をし、グループ B の集合地点に移動する。しかし、グループ B はグループ C に統合される判断をし、グループ C の集合地点に移動するため、図 7(b) に示すように、グループ A の UAV がグループ B の UAV と無線通信が行えなくなり、結果として統合に失敗する。そのため提案手法では、統合先グループの集合地点において情報共有が行えた時点で統合処理を完了し、情報共有が行えなかった場合は統合処理を中断する。

以下では、グループ情報の共有、統合の判断および統合の完了について、それぞれの手順を説明する。

4.5.1 グループ情報の共有

UAV が他の UAV と無線通信可能になった場合、自身の所属するグループ情報を送信する。また、過去に情報共有を行ったグループについても、同様にグループ情報を送信する。

グループ情報の共有を行った UAV は、次の集合時刻において、新たに受信したグループ情報をリーダーに送信する。

これにより、リーダーは、自身のグループと情報共有を行った他グループの情報を集約できる。

4.5.2 統合の判断

リーダーは、集約したグループ情報の中から最も優先度の高いグループを選択し、この優先度が自身のものより大きい場合、当該グループに統合されることを決定する。統合を決定したリーダーは、統合先のグループ情報を全フォローに通知する。その後、リーダーは、4.3節に述べた手順に基づき、各 UAV の移動経路を計画するが、次の集合時刻および集合地点を、統合先グループのものとした経路を設定する。

4.5.3 統合の完了

4.5.2項の手続きにより、統合先グループの集合時刻において、統合を決定したグループの全 UAV が、統合先グループのリーダーと無線通信可能となる。リーダーと無線通信可能となった各 UAV は、統合先グループのリーダーに対し、グループへの加入を要求する。これを受信した統合先グループのリーダーは、各 UAV を自身のフォローとして受け入れる。以降、リーダーは、新たに加入したフォローも含む UAV を対象に、4.3節で述べた手順に基づき、次の集合周期までの移動経路を計画する。

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章で述べた手法（先行手法）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 ($M_c = N_c = 10$) のセルに分割された対象領域に、10台 ($N = 10$) の UAV を配置した。各 UAV は、ランダムに定められたセルを初期位置とし、シミュレーション開始時に一斉に探索を開始するものとした。各 UAV の無線通信範囲 r_c は、互いに隣接するセルに位置する UAV 間で無線通信可能となるよう設定した。また、提案手法におけるグループの集合周期は全 UAV で共通であるとし、20, 60, 100 単位時間の3通りとした。先行研究における他 UAV の動作再現期間は $\tau = 10$ とした。

以上の環境において、500 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 評価基準

実験では、探索効率を測定するために、先行研究 [2], [3], [4] で用いているカバレッジという指標を導入した。カバレッジ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

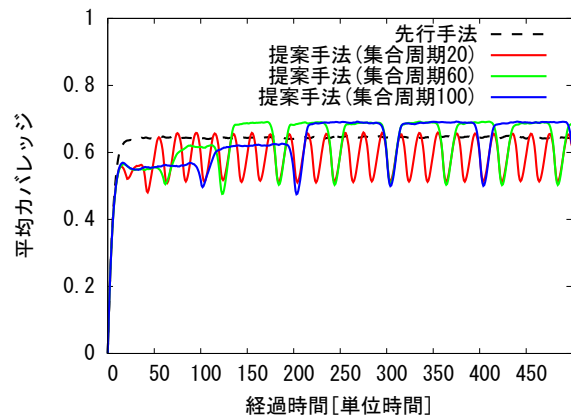


図 8: 平均カバレッジ

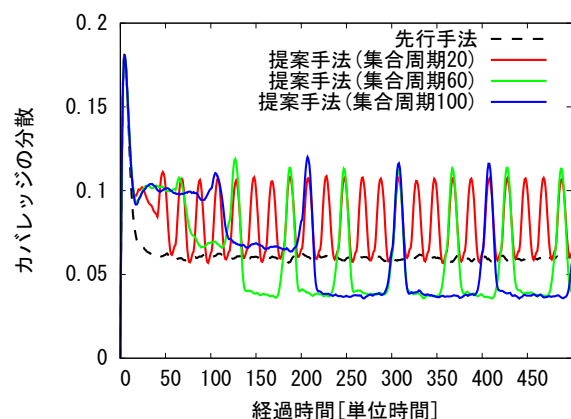


図 9: カバレッジの分散

よって探索されていない時点においては、単位時間ごとに、カバレッジの値が 0.0 になるまで、単位時間あたり 0.05 だけ低下する。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、BT の小さいセルほどカバレッジが高くなる。実験では、カバレッジに基づく以下の 2 つの指標の全試行における平均値を評価した。

平均カバレッジ 対象領域中の全てのセルにおける、カバレッジの平均値。この値が高いほど、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 対象領域中の全てのセルにおける、カバレッジの分散値。この値が低いほど、対象領域内の全てのセルが偏りなく探索されていることを表す。

5.3 評価結果

図 8 に平均カバレッジを、図 9 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、縦軸はそれぞれ各時刻における平均カバレッジおよびカバレッジの分散を表す。

図 8 の結果より、提案手法では、集合周期を 60 および 100 に設定したとき、多くの期間において先行手法よりも高い平均カバレッジを達成している。これにより、先行手

法で発生していた BT マップの差異による探索効率の低下を防ぎ、対象領域全体を重複なく探索できることがわかる。しかし、提案手法では、グループの集合時刻に平均カバレッジが大きく低下している。これは、グループの集合により、集合地点から離れた領域が一時的に探索されなくなるためである。また、提案手法では、平均カバレッジが十分に高くなるまでに大きな時間を要し、シミュレーション初期における平均カバレッジが先行手法より低くなる。これは、提案手法におけるグループの形成および統合に時間を要するためである。特に、集合周期が長いほど、この傾向は顕著である。一方、集合周期を 20 に設定した場合、平均カバレッジが十分に向上せず、先行手法と比較して探索効率が低下している。これは、対象領域に対して集合周期が短く、集合周期内に対象領域全体を探索できないためである。

図 9 の結果より、集合周期を 60 および 100 に設定した提案手法において、カバレッジの分散を小さく抑え、領域内を均等に探索できていることがわかる。また、提案手法では、グループの集合時刻にカバレッジの分散が大きく上昇している。さらに、提案手法では、カバレッジの分散が十分に低くなるまでに大きな時間を要し、シミュレーション初期におけるカバレッジの分散が先行手法より高くなる。これは、図 8 の結果に対して述べたものと同様の理由によるものである。一方、集合周期を 20 に設定した場合、カバレッジの分散が十分に低下せず、先行手法と比較してセルごとの探索頻度が偏っている。このことから、集合周期を短く設定した場合に、集合周期内に対象領域全体を探索できないことがわかる。

6. まとめ

本稿では、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、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、無線通信可能となった UAV 間においてグループを構築し、グループ内の各 UAV が巡回する経路を、対象領域を重複なく探索できるよう計画する。これにより、対象領域全体を頻繁に、かつ偏りなく探索可能とする。また、シミュレーション実験によって、提案手法によって、先行手法と比較して高い探索効率を実現できることを確認した。

提案手法には、グループが統合されるまでの探索効率が低く、またグループ集合時に探索効率が低下するという問題がある。今後は、これらの問題を緩和し、常に高い探索効率を維持できる手法について検討を行う予定である。

謝辞

本研究は、JSPS 科研費・基礎研究 (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] 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] 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 (DICOMO 2019) シンポジウム論文集, pp.957–962 (2019).
- [3] 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).
- [4] 神崎映光, 坂本大河, "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," 研究報告マルチメディア通信と分散処理 (DPS) vol.184, no.12, pp.1–7 (2020).
- [5] S. Rashed and M. Soyuturk, "Analyzing the effects of UAV mobility patterns on data collection in wireless sensor networks," *Sensors*, vol.17, no.2 (2017).
- [6] 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).
- [7] Y. Yang, X. Qiu, S. Li, J. Wang, W. Chen, P. C. K. Hung and Z. Zheng, "Energy-efficient data routing in cooperative UAV swarms for medical assistance after a disaster," *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science*, vol.29, no.6 (2019).