

推薦論文

UAV 協調型センシングにおける 残余電力を考慮した動作制御手法

神崎 映光^{1,a)} 坂本 大河²

受付日 2021年4月30日, 採録日 2021年11月2日

概要: 本論文では, さまざまな機関および個人の所有するドローン等の UAV (Unmanned Aerial Vehicle) を積極的に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良く探索する手法を提案する. 提案手法では, 筆者らの先行研究 [5] に基づき, UAV のセンシング範囲に基づいて分割した領域に対して, 各領域の探索頻度を評価する指標を定義し, これに基づいて UAV の移動経路を定めることで, 対象領域全体を効率的に探索する. また, 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. さらに, 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.

キーワード: UAV 協調型センシング, 残余電力, 動作制御

A Mobility Control Method Considering Residual Energy in UAV Collaborative Sensing

AKIMITSU KANZAKI^{1,a)} TAIGA SAKAMOTO²

Received: April 30, 2021, Accepted: November 2, 2021

Abstract: In this paper, we propose a method that achieves efficient monitoring of a wide region in *UAV collaborative sensing*, which monitors a target region using multiple UAVs (Unmanned Aerial Vehicles) owned by different organizations and individuals, while considering residual energy of each UAV. Based on our previous method[5], our proposed method divides the target region into multiple areas based on the sensing range, and defines a metric that evaluates the frequency of exploration for each divided area. By determining the moving path of each UAV using this metric, our method achieves an efficient exploration of a target region. In addition, each UAV changes its behavior based on its residual energy in order to monitor the target region while recharging battery. Furthermore, our proposed method improves the efficiency of monitoring by introducing i) information sharing using wireless communication between UAVs and base stations each of which launches its own UAV and ii) dividing region into multiple territories each of which is assigned to a UAV based on the locations of base stations.

Keywords: UAV collaborative sensing, residual energy, mobility control

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], [12]. 特に, UAV の飛行可能な特性を活かした応用として, 地震や台風等, 通信インフラの崩壊をともなう大規模災害が発災した直後の初動対応が考えられる [10]. たとえば, 大規模な地震が発生した直後に, 警察や自治体等の機関が所有する UAV を用いて, 温度, 画像および動画等の情報を上空から取得することで, 救助活動に

¹ 島根大学学術研究院理工学系

Institute of Science and Engineering, Academic Assembly, Shimane University, Matsue, Shimane 690–8504, Japan

² 株式会社ワールドインテック

World Intec Co., Ltd., Fukuoka 812–0011, Japan

a) kanzaki@zakilab.net

本論文の内容は 2020 年 9 月の第 184 回 DPS 研究発表会にて報告され, 同研究会主催により情報処理学会論文誌ジャーナルへの掲載が推薦された論文である.

必要となる情報を迅速に収集できる。また、UAVにWi-Fi等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等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、大規模災害発災直後は、建物の倒壊や被災者の移動等によって、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、対象とする地域全体に対し、UAVを繰り返し、かつ頻繁に巡回させることが好ましい。

一方、近年の急速なUAVの普及にともない、上述したような行政機関だけでなく、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。また近年では、遠隔操作なしに自律的に飛行可能なUAVの開発も進んでおり、これらのUAVを応用する研究開発が活発に行われている[10], [15]。これらの自律移動可能な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伝達が可能となるものと考えられる。しかし、大規模災害のような突発的なイベントが発生した直後は、各UAVの所有者が各々の意思でUAVを稼働させるため、誰が、いつ、どこでUAVを稼働させるかについての事前の情報共有が行えず、個々のUAVが稼働した時点では、他のUAVがどこで稼働しているかも不明な状態となる。

このような背景のもと、筆者らの研究グループでは、大規模災害発災時において、さまざまな機関や個人の所有する自律移動可能な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[4], [5]。これらの研究では、UAVどうし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。文献[4], [5]では、シミュレーション実験により、これらの動作の導入によって、対象領域全体を繰り返し、かつ頻繁に探索できることを確認している。

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、無線通信等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は稼働を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。

そこで本論文では、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の動作制御手法であるUCS/BR(UAV Collaborative Sensing with Battery Recharging)を提案する[6]。UCS/BRでは、筆者らが文献[5]で提案した手法に基づく動作制御を行いながら、各UAVが自身の残余電力を考慮し、電力がな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り返し探索を行う。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。

本論文の貢献は以下のとおりである。

- さまざまな機関および個人の所有する自律移動可能なUAVを利活用し、各UAVの残余電力を考慮しながら、特定の対象領域全体を繰り返し、かつ頻繁に探索する手法を提案する。筆者らの知る限り、このような環境を想定した研究はこれまでに存在しない。
- 提案手法では、筆者らの先行研究に対し、各UAVが探索を担当する領域の分割、および充電を行う拠点との無線通信を新たに導入することで、対象領域全体の探索効率向上を図る。
- シミュレーション実験により、提案手法において新たに導入した動作によって、対象領域全体の探索効率が向上することを確認する。

以下では、2章で本論文で想定する環境について述べ、3章で関連研究について述べる。4章で、先行研究[5]について述べ、5章で提案手法について述べる。6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7章で本論文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、本論文における想定環境を示す。本論文では、先行研究[5]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ーが搭載されており、自身を中心とする半径 r_s の円内に

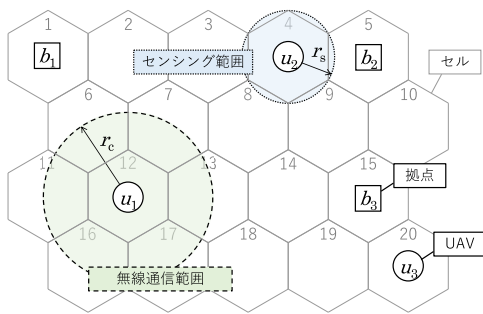


図 1 想定環境 ($N = 3, M_c = 5, N_c = 4$ の場合)

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

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、本論文では考慮しないものとする。また、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。

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。本論文では、左右方向に M_c 個のセルが並んだ列が N_c 列存在する環境を想定し、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、UAV の移動能力は全 UAV で共通であり、隣接するセルに移動するために要する時間は、その方向にかかわらず一定であるものとする。本論文では、この時間を単位時間と呼ぶ。さらに、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、本論文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り返し、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、単位時間ごとに、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. 関連研究

3.1 モバイルセンサの動作制御

UAV に限らず、移動可能なセンサ端末であるモバイルセンサを用いて特定の対象領域を観測するモバイルセンサネットワークに関する研究は活発に行われている [9]。特に、モバイルセンサの移動可能な特性を利用し、その移動を制御する研究は、これまでに数多く行われている。

Liu らは、文献 [7] において、センサによって観測されない領域を最小化するためのモバイルセンサの位置調整手法を提案している。この手法では、モバイルセンサ間の距離に応じて生じる仮想的な重力を算出し、この値に応じて各モバイルセンサを移動させることで、モバイルセンサを対象領域内に均一に配置し、観測されない領域を最小化している。また、Mahboubi らが文献 [8] で提案している手法では、各モバイルセンサのセンシング範囲および担当領域を動的に設定し、これに基づいて各モバイルセンサの位置を調整することで、観測されない領域を最小限に抑えつつ、各モバイルセンサの消費電力を抑え、対象領域全体の長期にわたる観測を実現している。これらの研究は、対象領域の観測のためにセンサ端末の移動を制御する点が本研究と類似している。しかし、対象領域の大半を同時に観測できる程度のモバイルセンサが利用可能な環境を想定しており、広大な領域を移動しながら探索する必要がある本論文の想定環境では、多くのセルが探索できなくなる。また、利用可能なモバイルセンサが既知であり、すべてのモバイルセンサの移動を集中的に制御可能な環境を想定しており、さまざまな組織および個人が稼働させる自律移動可能な UAV を利活用する本論文の想定環境には適用できない。

Gao らは、文献 [3] において、対象領域内に複数存在する探索対象地点を、複数のモバイルセンサを用いて繰り返し探索する環境を想定し、各地点が探索される時間間隔を最小化するためのモバイルセンサの巡回経路を導出するアルゴリズムを提案している。このアルゴリズムでは、対象地点間の距離に基づき複数の巡回経路を生成した後、生成し

た経路が利用可能なモバイルセンサ数と等しくなるよう、経路の分割を行うことで、各モバイルセンサの巡回経路を小さく抑えている。また、筆者らの研究グループでは、文献 [13] において、少数のモバイルセンサを用いて対象領域全体の効率的な観測を実現する手法を提案している。この手法では、一部のモバイルセンサを移動しない固定ノードとし、その他のセンサが移動しながら取得したセンサデータを固定ノードにいったん蓄積してから、データを収集・管理するシンクノードにまとめて転送することで、探索およびデータ収集に要するモバイルセンサの移動距離を削減し、対象領域全体の観測を効率的に行っている。これらの研究は、移動可能なセンサ端末を用いて対象領域を探索する点が本研究と類似している。しかし、前述した研究と同様、利用可能なモバイルセンサが既知であり、すべてのモバイルセンサの移動を集中的に制御可能な環境を想定しており、本論文の想定環境には適用できない。

3.2 UAV の動作制御

広範囲にわたる領域の探索を行うために UAV の動作制御を行う研究は、これまでも数多く行われている。

Wu らは、文献 [14] において、対象領域の分割を用いた UAV の移動制御手法を提案している。この手法では、あらかじめ領域全体をいくつかの領域に分割する。また、分割した領域内で、各 UAV が効率的に探索できる移動経路を設定することで、領域全体の探索にかかる時間の最小化を図っている。この研究は、領域分割および全 UAV の移動経路を探索開始前に設定するものであり、本研究の想定環境には適用できない。

Scherer らは、文献 [11] において、複数の拠点が存在する環境において、UAV の電力容量を考慮しつつ、対象領域の探索を行う移動制御手法を提案している。この手法では、あらかじめ拠点の位置情報から領域の分割を行い、各拠点の担当領域の大きさに応じて、当該担当領域の探索に必要な数の UAV を割り当てる。各 UAV は、自身が割り当てられた領域内において、無線通信による拠点との接続が維持できる範囲内を移動しながら探索を行う。また、自身の残余電力が少なくなると、拠点に戻り充電を行う。この研究は、探索開始前に全拠点の位置および利用可能な UAV が既知である環境を想定しており、文献 [14] の手法と同様、本論文の想定環境には適用できない。

これらの研究に対し、本論文では、近年さまざまな組織や個人が気軽に所有するようになりつつあるドローン等の UAV を、大規模災害発災時にその場で利活用することを想定し、これらの UAV の自律的な協調動作によって、対象領域の効率的な探索を目指す。

4. 先行研究：UCS/MR

本章では、筆者らの研究グループにおいてこれまでに

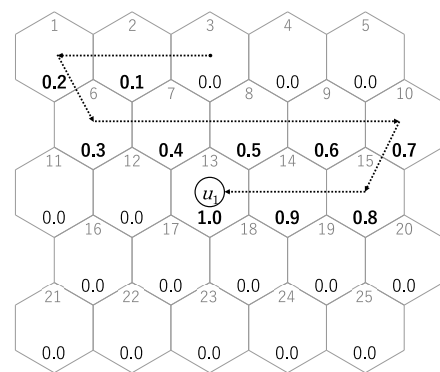


図 2 カバレッジマップ ($\delta = 0.1$)
Fig. 2 Coverage map ($\delta = 0.1$).

提案した手法のうち、本論文で提案する手法の基礎となる UCS/MR (UAV Collaborative Sensing with Mobility Reenactment) [5] について述べる。

UCS/MR 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させる。

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 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 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情報を共有することで、自身および他の UAV が探索を行った地点等を把握できる。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地点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、対象領域全体の頻繁な探索を実現する。

4.1 カバレッジマップおよび UAV 相互情報

UAV の協調動作により、対象領域全体を繰り返し、かつ頻繁に探索するためには、各 UAV が保持し、他 UAV と共有する情報として、対象領域内の全地点に対し、それぞれがどの程度最近探索されたかを表現する必要がある。これらの情報を表現するため、各 UAV は、センシング範囲に基づいて分割された各セルに対し、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。これにより、各 UAV は、各地点が最近探索されたか否かをセル単位で把握できる。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。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示している。

また、無線通信による情報共有により取得した他 UAV

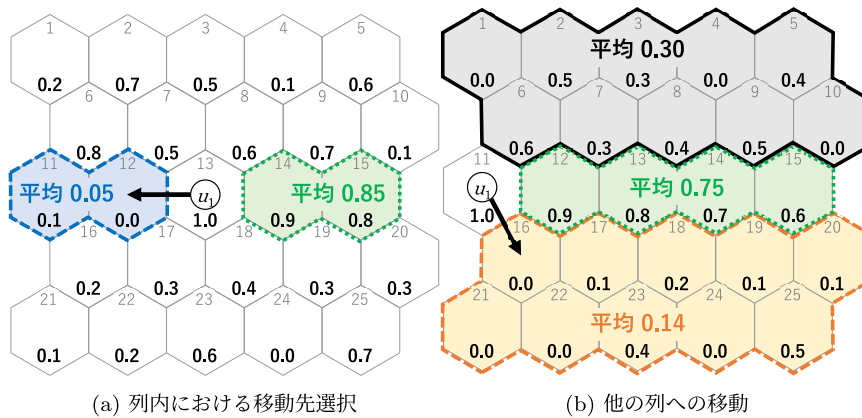


図 3 カバレッジを考慮した移動制御 ($\alpha = 0.5$)
 Fig. 3 Moving strategy based on coverage ($\alpha = 0.5$).

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。

4.2 カバレッジを考慮した移動制御

各 UAV は、自身が持つカバレッジマップに基づき、対象領域全体、すなわち全セルのカバレッジが高くなるよう、カバレッジの低いセルを優先的に探索する移動経路を自身に設定する。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、カバレッジの異なる列のセルへの移動を行う。以下では、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) 現在地から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、あらかじめ設定された閾値 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。たとえば図 3(a)において、UAV u_1 の左方向および右方向におけるカバレッジの平均値は、それぞれ 0.05, 0.85 となる。ここで、 $\alpha = 0.5$ のとき、平均値の小さい 0.05 が α を下回るため、 u_1 は、対応する方向である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。たとえば図 3(b)において、領域の左端に位置する UAV u_1 は、右方向におけるカバレッジの平均が 0.75 であり、この値が 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すべ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 3(b)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すべ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、移動可能な列に移動する。

4.3 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、互いを UAV 相互情報に登録した後、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 4(a) に示すカバレッジマップを保持している u_1 と、図 4(b) 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 4(c) 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 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。

4.4 他 UAV の動作の再現

無線通信によって他 UAV との情報共有を行った UAV は、4.2 節の動作によって自身の移動先となるセルを決定するたびに、自身の持つカバレッジマップに基づいて、

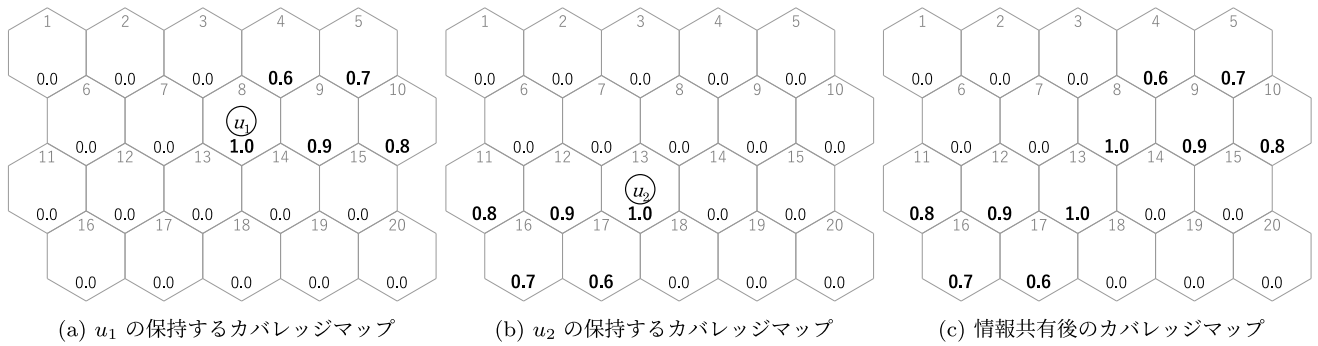


図 4 カバレッジマップの共有
Fig. 4 Sharing of coverage maps.

UAV 相互情報に情報が格納されている他 UAV に対しても 4.2 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。

5. 提案手法：UCS/BR

本章では、本論文で提案する UCS/BR (UCS with Battery Recharging) について述べる。

UCS/BR では、UCS/MR 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させる。また、各拠点にも無線通信機能を持たせ、無線通信可能となった UAV と拠点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 UCS/BR では、UAV どうし、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、充電にともなう拠点への帰還による探索効率の悪化を防ぐ。

5.1 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

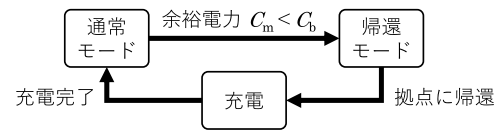


図 5 残余電力によるモード切替え
Fig. 5 Mode transition based on residual energy.

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 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。

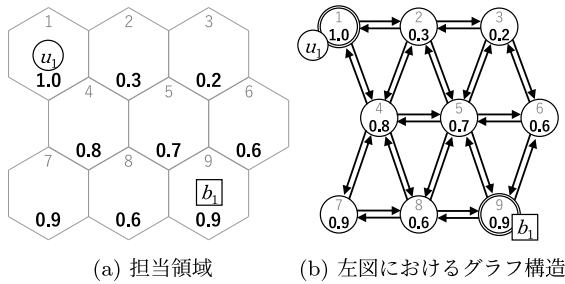
一方、各拠点は、カバレッジマップと各拠点の位置情報を保持する。自身の保有する UAV が探索を開始し、無線通信可能な範囲を移動している時点では、当該 UAV が持つカバレッジマップを取得し、自身のカバレッジマップとして設定する。また、この時点では、拠点の位置情報としては、自身の情報のみを保持する。

各 UAV は、5.2 節で述べる手順に従い、自身の残余電力に応じて、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 UAV、もしくは拠点と互いに無線通信が可能となった場合、5.3 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、5.4 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。

5.2 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 5 に従って行う。図において、



(a) 担当領域 (b) 左図におけるグラフ構造

図 6 カバレッジに基づくグラフの構築

Fig. 6 Graph construction based on coverage.

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、あらかじめ全 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。

5.2.1 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。

5.2.2 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を期待される経路を選択する。

まず、UAV は、図 6 に示すように、自身の担当領域に含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みに設定し、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。

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

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。

5.3 無線通信による情報共有

UCS/BR 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、UAV 相互情報への登録および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 UCS/BR 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。

5.4 対象領域の分割

各 UAV は、5.3 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。

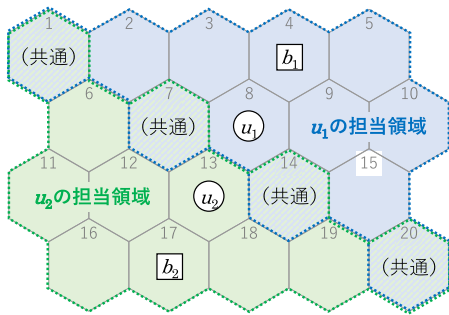


図 7 対象領域の分割

Fig. 7 Division of target region.

- (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。すべ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 7 に示すような担当領域の分割が行われる。

5.5 考察

UCS/BR では、無線通信可能となった UAV 間で、拠点の位置情報を共有することで、UAV が巡回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、拠点から離れた領域に移動することによる探索効率の悪化を抑制できるものと考えられる。さらに、各 UAV の拠点にも無線通信機能を持たせ、無線通信による UAV との無線通信を可能にすることで、情報共有の機会を増やし、探索効率をさらに向上させることができるものと考えられる。

6. 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。

6.1 評価環境

実験では、 $1,000 \times 1,000$ [m] 程度の領域を探索することを想定し、互いに隣接するセルの中心点間の距離が 100 [m] 程度となる 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 UAV は、シミュレーション開始時にいっせいに探索を開始す

るものとした。UAV および拠点間における無線通信には IEEE 802.11g を想定し、互いに隣接するセルに位置する UAV および拠点間において無線通信可能となるものとした。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。UAV としては、個人が所有するドローンの利活用を考慮し、一般向けに販売されている廉価なドローンを想定して、電力容量 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 30 および 1 とした*1。また、UAV の移動を切り替えるための閾値 C_b は 1 に設定し、拠点における単位時間あたりの充電量 e_c は 5 に設定した。

ここで、環境として 1 章で述べた被災地域を想定した場合、災害の規模や種類によって、各地点に要求される探索頻度が異なるものと考えられる。たとえば、大規模な津波の到来が予想される地震が発生した場合、安全な避難所および避難経路の把握や被災者への情報伝達をより迅速に行う必要があるため、各地点のより頻繁な探索が要求されるものと考えられる。このことを考慮して、要求される探索頻度の指標となるカバレッジの減衰率 δ を 0.005 および 0.03 に設定した実験を行った。それぞれ、前者は比較的余裕をもった探索を許容する環境、後者はより頻繁な探索が要求される環境に対応している。

以上の環境において、300 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。

6.2 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、5.2 節で述べた残余電力に基づく移動制御を有効にしたうえで、5.3 節で述べた拠点との通信機能、および 5.4 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、本論文の提案手法である UCS/BR となる。

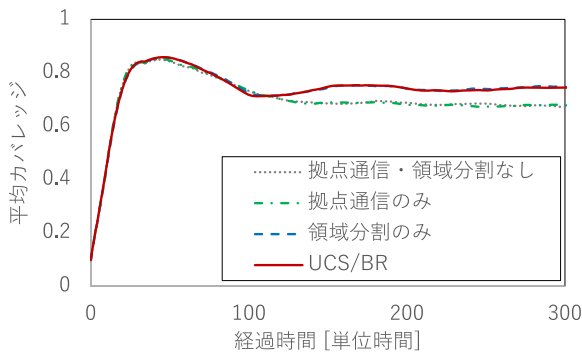
6.3 評価指標

実験では、UCS/BR 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。

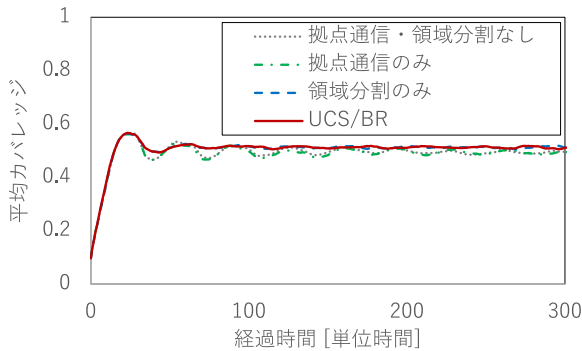
平均カバレッジ 対象領域の全セルのカバレッジの平均値の時間的推移。この値は、対象領域内における各セルのカバレッジが高いほど高い値を示す。

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

*1 たとえば、DJI 社製の MAVIC MINI (<https://www.dji.com/mavic-mini/specs>) は、無風で 12 [km/h] の速度で飛行した場合の最大飛行時間が 18 分であり、理論上は 3,600 [m] の連続航行が可能であるため、本章の環境において 30 セル程度は移動可能であるものと考えられる。



(a) $\delta = 0.005$



(b) $\delta = 0.03$

図 8 平均カバレッジ

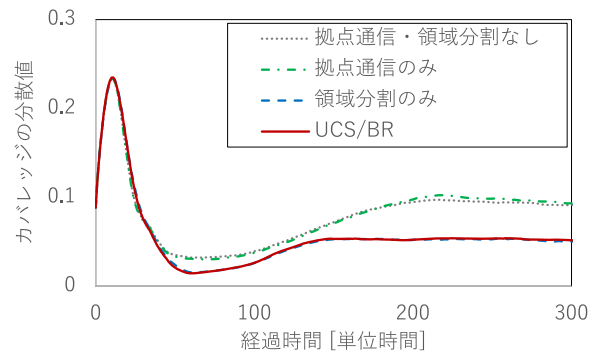
Fig. 8 Average coverage.

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.

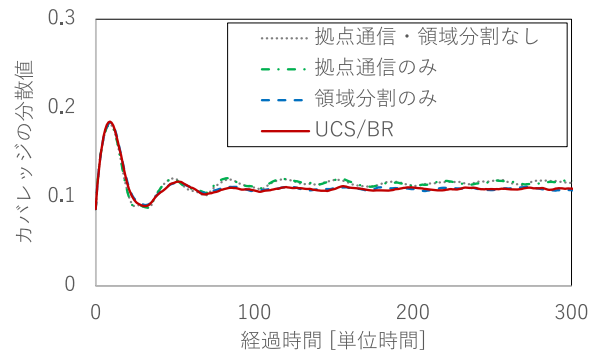
6.4 平均カバレッジ

実験結果を図 8 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, 縦軸は平均カバレッジを表す.

図 8(a) の結果より, 領域分割を行わない手法において, 時間の経過とともに平均カバレッジが減少する傾向にあることが分かる. これは, 4.4 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, 結果として長期にわた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, 経過時間にかかわらず高いカバレッジが維持できることが分かる. 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 UAV の動作再現による移動経路の変更が起こ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分かる. 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,



(a) $\delta = 0.005$



(b) $\delta = 0.03$

図 9 カバレッジの分散値

Fig. 9 Variance in coverage.

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.

一方, 図 8(b) の結果より, カバレッジの減衰率が大きい環境においては, すべての手法における平均カバレッジが減少することが分かる. 特に, 領域分割を行わない手法において, 時間の経過とともに平均カバレッジが変動を続けることが分かる. 領域分割を行わない手法では, 各 UAV が, 自身の拠点から離れた領域にも探索のために移動してしまい, 充電のための移動に多くの時間と電力を消費する. そのため, カバレッジを考慮した移動が行えない期間が多く生じ, その期間において各セルのカバレッジが大きく減少している. 一方, 領域分割を行う手法では, 分割を行わない手法との性能差が小さくなるものの, 平均カバレッジの変動を抑えられており, 各 UAV の担当領域を, 自身の拠点から近い領域に限定することで, 担当領域全体を効率良く探索できていることが分かる. また, 図 8(a) の結果と同様, 拠点との通信機能の有無が平均カバレッジに与える影響がほぼないことが分かる.

6.4.1 カバレッジの分散値

実験結果を図 9 に示す. グラフの横軸はシミュレーショ

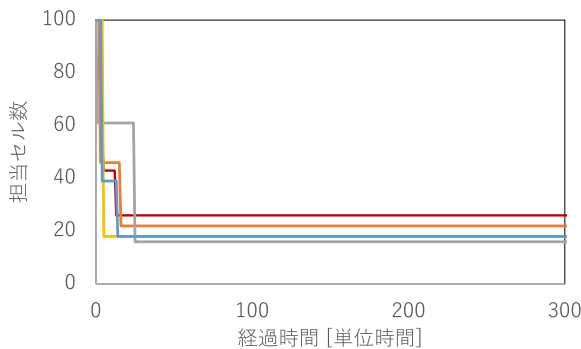


図 10 担当セル数の推移

Fig. 10 Number of cells assigned to each UAV.

ン実験開始からの経過時間であり、縦軸はカバレッジの分散値を表す。

図 9(a) の結果より、領域分割を行わない手法において、時間の経過とともにカバレッジの分散値が増加する傾向にあることが分かる。これは、上述したように、長期にわた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分かる。これは、上述したように、担当領域の分割により、他 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分かる。

図 9(b) の結果より、カバレッジの減衰率が大きい環境では、全体的にカバレッジの分散値が大きくなることが分かる。特に、領域分割を行う手法における分散値が、図 9(a) と比較して大きく増加し、手法間における分散値の差異が小さくなることが分かる。これは、担当領域を分割したとしても、拠点への帰還や充電を行う期間中に全セルのカバレッジが減少し、各担当領域内において、カバレッジの偏りが生じるためであるものと考えられる。

6.4.2 担当セル数の推移

以上の結果より、UCS/BR の動作のうち、特に領域分割機能によって性能の向上が見られることが確認できた。このことについて詳細に検証するため、ある試行において、UCS/BR に基づき動作する 5 台の UAV それぞれが、自身の担当領域として認識しているセル数の時間的推移を計測した。結果を図 10 に示す。グラフの横軸はシミュレーション開始からの経過時間であり、縦軸は各 UAV の担当セル数を表す。なお、領域分割機能については、拠点の位置が同等であれば、カバレッジの減衰率にかかわらず同等の分割が行われるため、単一の結果のみ掲載している。

結果より、すべての UAV において、シミュレーション開始後早い時点で担当セル数が大きく減少しており、UAV 間の情報共有に基づく領域の分割が効果的に行われている

ことが分かる。ただし、最終的な各 UAV の担当セル数に若干の差異が見受けられ、担当領域ごとの探索効率に偏りが発生することが分かる。これは、領域の分割が拠点の位置に基づいて行われるため、拠点の位置関係によっては、担当セル数に差が生じることがあるためである。

7. おわりに

本論文では、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 の移動制御手法である UCS/BR を提案した。UCS/BR では、各 UAV の拠点の位置情報を 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、拠点から離れた領域に移動することによる探索効率の悪化を防ぐ。また、拠点に無線通信機能を持たせ、拠点と UAV との間でも無線通信可能にすることにより、情報共有の機会を増やし、領域全体の探索効率を向上させる。シミュレーション実験によって、UCS/BR は時間経過にかかわらず安定した探索効率を維持でき、特に担当領域の分割による探索効率の向上が大きいことを確認した。

6.4.2 項で述べたとおり、UCS/BR では、拠点の位置関係によっては担当セル数に差が生じ、探索効率の偏りを発生させる要因となっている。今度は、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。また、UAV の充電だけでなく、各拠点へのデータ収集も考慮し、効率の良い探索およびデータ収集をともに実現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., Brisolará, 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] Gao, X., Fan, J., Wu, F. and Chen, G.: Approximation algorithms for sweep coverage problem with multiple mobile sensors, *IEEE/ACM Trans. Networking*, Vol.26, No.2, pp.990–1003 (2018).
- [4] 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).
- [5] Kanzaki, A. and Akagi, H.: A UAV-collaborative sensing method for efficient monitoring of disaster sites, *Proc. Int. Conf. Advanced Information Networking and Applications (AINA 2019)*, pp.775–786 (2019).

- [6] 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, 情報処理学会研究報告マルチメディア通信と分散処理研究会, Vol.2020-DPS-184, No.12, pp.1–7 (2020).
- [7] Liu, S., Zhang, R. and Shi, Y.: Design of coverage algorithm for mobile sensor networks based on virtual molecular force, *Computer Communications*, Vol.150, pp.269–277 (2020).
- [8] Mahboubi, H., Aghdam, A.G. and Sayrafian-Pour, K.: Toward autonomous mobile sensor networks technology, *IEEE Trans. Industrial Informatics*, Vol.12, No.2, pp.576–586 (2016).
- [9] Mohamed, S.M., Hamza, H.S. and Saroit, I.A.: Coverage in mobile wireless sensor networks (M-WSN): A survey, *Computer Communications*, Vol.110, pp.133–150 (2017).
- [10] 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).
- [11] Scherer, J. and Rinner, B.: Short and full horizon motion planning for persistent multi-UAV surveillance with energy and communication constraints, *Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. Intelligent Robots and Systems (IROS 2017)*, pp.230–235 (2017).
- [12] Sun, J. and Masouros, C.: Deployment strategies of multiple aerial BSs for user coverage and power efficiency maximization, *IEEE Trans. Commun.*, Vol.67, No.4, pp.2981–2994 (2019).
- [13] Treeprapin, K., Kanzaki, A., Hara, T. and Nishio, S.: An effective mobile sensor control method for sparse sensor networks, *Sensors*, Vol.9, No.1, pp.327–354 (2009).
- [14] Wu, Y., Zhu, J. and Gao, K.: Multi-UAVs area decomposition and coverage based on complete region coverage, *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, Vol.490, No.6, pp.1–8 (2019).
- [15] Zeng, Y. and Zhang, R.: Energy-efficient UAV communication with trajectory optimization, *IEEE Trans. Wireless Communications*, Vol.16, No.6, pp.3747–3760 (2017).

推薦文

本稿では、複数の UAV が協調し、かつそれらが稼働する時間を示す残余電力を考慮しながら、対象領域全体を効率良く探索する手法を提案している。この手法では、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ことに加え、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うことで、探索効率の向上を図っている。今後、様々な形での活用が機体される UAV の有用性の向上に貢献する技術の 1 つであることから、本論文を推薦いたします。

(マルチメディア通信と分散処理研究会主査
田上 敦士)



神崎 映光 (正会員)

2002 年大阪大学工学部情報システム工学科卒業。2004 年同大学大学院情報科学研究科博士前期課程修了。2005 年同大学院情報科学研究科博士後期課程中退後、同大学院情報科学研究科マルチメディア工学専攻特任助手、同助教を経て、2014 年より島根大学大学院総合理工学研究科准教授、2018 年より同大学学術研究院理工学系准教授、2021 年より同教授となり、現在に至る。博士 (情報科学)。2008 年、2009 年情報処理学会論文賞受賞。2009 年情報処理学会山下研究記念賞受賞。無線ネットワーク、通信プロトコル、分散処理に関する研究に従事。IEEE, ACM, 電子情報通信学会, 日本データベース学会各会員。本会シニア会員。



坂本 大河

2020 年島根大学総合理工学部数理・情報システム学科卒業。島根大学在学中、UAV 協調型センシングに関する研究に従事。