

UAV 協調型センシングにおける効率的なデータ収集に関する一考察 On Efficient Data Gathering in UAV-Collaborative Sensing

伊藤 太清[†] 神崎 映光^{††}

Taisei Ito[†] Akimitsu Kanzaki^{††}

[†] 島根大学大学院自然科学研究科理工学専攻 ^{††} 島根大学学術研究院理工学系

1 概要

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], 大規模災害発生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 [4]. ここで, 大規模災害発生時は, 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 だけではなく, 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生直後を想定し, 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]. 先行研究 [2] で提案している手法では, 各探索地点の探索効率を表す指標として, 当該地点が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) を導入し, この情報を用いて, 最近探索されていない領域を優先的に探索するよう, 各 UAV の移動を制御する. また, 無線通信可能となった UAV 同士で BT に関する情報を交換することで, 各 UAV が, 自身および他 UAV によって最近探索された領域を把握し, 自身の移動経路を調整する. これにより, 各地点が UAV によって探索される頻度の偏りを抑え, 領域全体の探索効率を向上させている. しかしこの手法では, 対象領域全体が UAV によって効率的に探索される一方, 各 UAV が探索によって取得したデータを情報収集地点に収集することを想定していない.

本稿では, 先行研究で実現した高い探索効率を維持しながら, 多くのデータを短時間で情報収集地点に収集する手法を提案する. 提案手法では, 各 UAV が先行研究に基づく探索を行いながら, 定期的に自身の情報収集地点へデータを持ち帰る. さらに, 探索中に無線通信可能となった別の UAV および情報収集地点ともデータの共有を行うことで, 複数の情報収集地点が存在する環境におけるデータ収集効率のさらなる向上

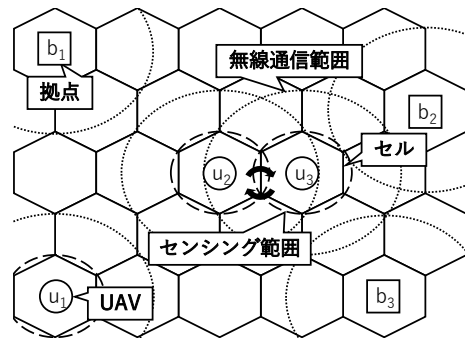


図 1: 想定環境

を実現する.

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

2.1 探索対象領域, UAV, 拠点

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. また, 各 UAV u_i は, その UAV の所有者が管理している拠点 b_i において稼働するものとする. 各拠点は, UAV が取得したデータを収集する情報収集地点としての役割を持つ.

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 および拠点は, 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 および拠点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

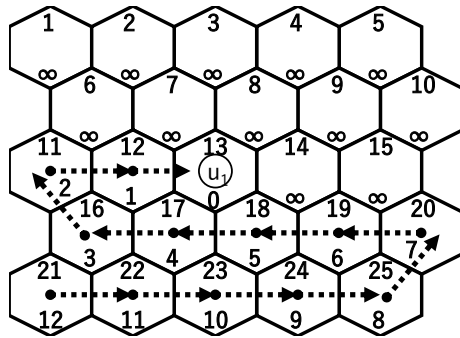


図 2: BT マップ

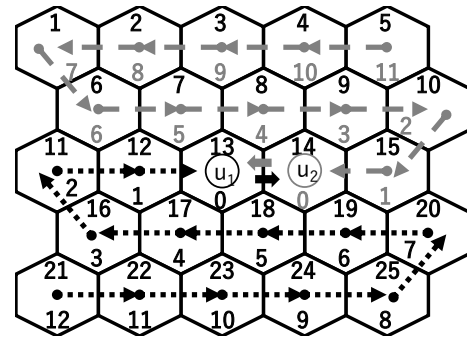


図 3: BT マップの共有

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。

2.2 アプリケーション要求

前述した通り、大規模災害発災時においては、探索対象領域である被災地全域に関する最新の情報を常に把握することが求められる。そのため、各 UAV が取得したデータは、可能な限り短時間で拠点に収集する必要がある。これを表す指標として、本稿では、先行研究 [2] において定義したブランクタイム (BT) を用いる。BT は各拠点において各セルに対して定義される値で、当該拠点が持っている対象セルに関する最新のデータに対し、当該データを UAV が取得してから経過時間として定義される。対象セルに関するデータを持っていない場合は、当該セルの BT は無限大となる。あるセルのデータを UAV から受信した場合、当該セルの BT は、UAV が当該セルを探索してから経過した時間となり、その後新たなデータを受信するまで、当該セルの BT は時間とともに増加する。

以上の想定において、各拠点におけるアプリケーションは、全てのセルの BT を、可能な限り小さく維持することを要求する。

3 先行研究

筆者らの研究グループでは、複数の UAV を用いて探索対象領域全体を効率的に探索する手法を提案している [2]。この手法では、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 BT の値を表している。

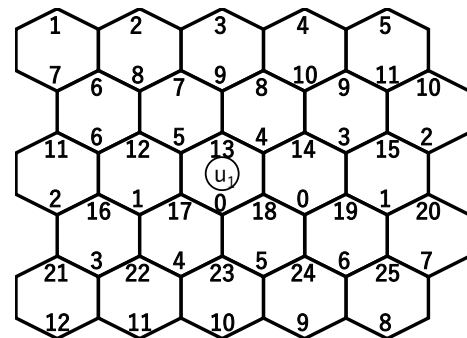


図 4: 共有後の BT マップ

3.2 移動先の決定

各 UAV は、自身の保持する BT に基づき、次に移動する隣接セルを決定する。具体的には、自身の管理する BT マップにおいて、現在地に隣接し、BT の値が最大であるセルのうち 1 つを次の移動先とする。

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 3 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 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 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 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 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

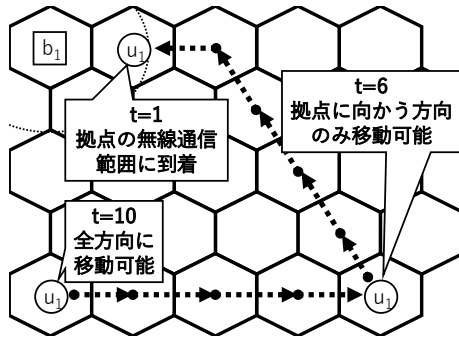


図 5: 探索データの持ち帰り

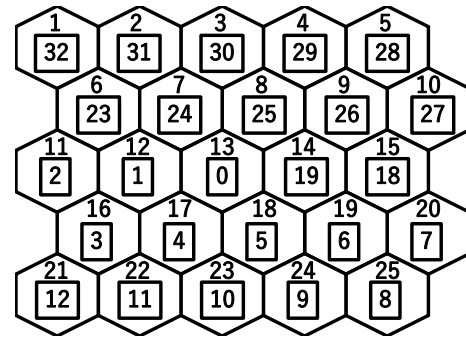


図 6: 自身が保持する探索データ

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、次のタイムスロットにおいて複数の UAV が同一セルに移動することを防ぐ。

また、UAV が互いの無線通信範囲外に移動した場合、各 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し、これに基づき、自身の BT マップを更新する動作を、当該 UAV と最後に通信を行ってから α タイムスロットだけ行う。

4 提案手法

3 章で述べた手法では、各 UAV が探索対象領域を効率的に探索できるものの、拠点へのデータ収集を考慮していない。提案手法では、3 章で述べた手法に基づく移動により、探索対象領域全体の探索を効率的に行いつつ、各拠点へのデータ収集を効率的に行う。具体的には、4.2 節で述べる手順によって、各 UAV が自身の拠点に定期的にデータを持ち帰ることにより、各拠点に最新のデータを提供する。また、4.3 節で述べる手順によって、無線通信可能となった拠点および UAV 間において、各々の持つデータを共有することで、最新のデータの収集効率向上を図る。

4.1 UAV の保持する情報

各 UAV は、先行研究で保持する情報に加え、稼働した以降の探索によって得られたデータとして、探索したセルの識別子、探索時刻、および取得したセンサデータを含む探索データを持つ。本稿では、各 UAV には十分な記憶領域が搭載されているものとし、各 UAV は、全てのセルにおける探索データを保持できるものとする。

4.2 移動先の決定

各 UAV は、先行手法と同様の手順に基づいて移動先となるセルを決定する。ただし、各 UAV は、取得した探索データを定期的に自身の拠点に持ち帰られる

よう、以下の手順に従って、移動先セルの候補を限定する。

まず、次のデータ持ち帰り時刻までの残り時間を t タイムスロットとし、あるセル c_i から、自身の拠点と無線通信可能になるセルの中で最も現在地に近いセルまで移動する場合に要する最短タイムスロットを t_i とする。また、閾値 α を予め定め、次のデータ持ち帰り時刻の α タイムスロット前までに自身の拠点と無線通信可能なセルに到達することを条件とする。

この条件を満たすため、各 UAV は、移動先セルを決定する際、隣接セル c_i に対し、 t_i が $(t - \alpha)$ 以下となるもののみを移動先の候補にする。

例えば図 5 において、 $\alpha = 1$ とすると、 $t = 1$ のときに UAV u_1 は拠点 b_1 の無線通信範囲内に到達していただなければならない。 $t = 10$ のとき、1 タイムスロット後は $t = 9$ であり、 $t - \alpha = 8$ となる。ここで、 u_1 が右上および右の隣接セルに移動した場合、 t_i はそれぞれ 2, 3 となり、いずれの場合も上記の条件を満たす、一方、 $t = 6$ のとき、1 タイムスロット後は $t = 5$ であり、 $t - \alpha = 4$ となる。ここで、 u_i が右上のセルに移動した場合、 $t_i = 5$ となり、データ持ち帰り時刻までに拠点と無線通信可能な位置まで移動できなくなる。そのため u_i は、右上の隣接セルを移動先の候補から除外し、他の隣接セルの BT に基づいて移動先を決定する。

4.3 データ共有

無線通信によって他の UAV または拠点と通信可能となった UAV または拠点は、BT マップに加え、互いに自身が保持する探索データを無線通信によって共有する。データを受信した UAV または拠点は、受信したデータと自身の保持するデータを比較し、各セルについて、より取得してからの経過時間が短い、すなわちより新しいもののみを自身の記憶領域に保持する。例えば、図 6 に示す探索データを保持する UAV が、図 7 に示す探索データを持つ UAV または拠点と無線通信可能となった場合、データ共有後、両者は図 8 に示すデータを自身の記憶領域に格納する。ここで、図中の矩形は探索データを表し、各データの数字は、当該セルにおいてデータが取得されてからの経過時間を表す。

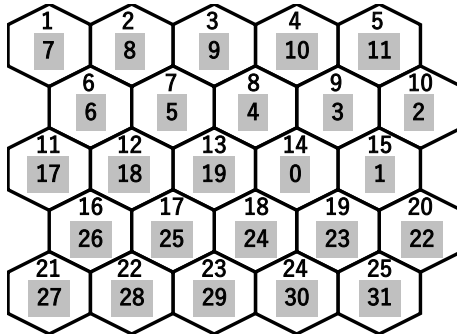


図 7: 通信相手が保持する探索データ

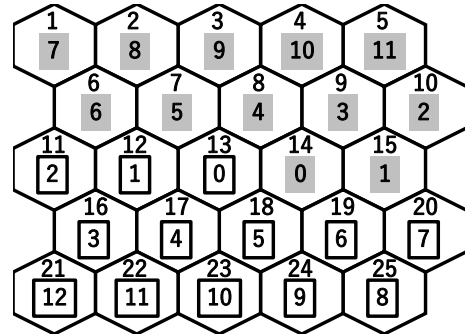


図 8: データ共有後の探索データ

4.4 考察

提案手法では、各 UAV が自身の拠点に定期的にデータを持ち帰ることにより、各拠点は定期的に最新のデータを取得できる。また、4.3 節で述べたデータ共有により、各 UAV が偶発的に無線通信可能となった拠点に対してもデータを送信できる。そのため、各拠点は、自身の保有する UAV が探索していないセルのデータも取得できる。さらに、各 UAV が、無線通信可能となった UAV および拠点からも最新のデータを受信するため、UAV が最新のデータを保持する範囲を拡張でき、各拠点におけるデータ収集効率をさらに向上できるものと考えられる。

5 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。

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。各 UAV の拠点は、互いに重複しないようランダムなセルに設置し、その拠点を UAV の初期位置とした。各 UAV は、シミュレーション開始時刻に一齐に探索を開始するものとした。各 UAV および拠点は、互いに隣接するセルに存在する場合に無線通信可能であるものとした。UAV がデータを自身の拠点に持ち帰る周期は 40 タイムスロットとした。UAV が拠点に戻る判断をする際の閾値 T は 0 タイムスロットとした。

5.2 比較手法

実験では、提案手法で導入した定期的なデータを持ち帰り、およびデータ共有それぞれの効果を検証するため、データ共有のみを行う手法と、データを持ち帰りのみを行う手法を比較手法とし、提案手法との性能を比較した。

5.3 評価基準

実験では、200 タイムスロット経過させる試行を 100 回行い、以下に示す指標を測定した。

遅延の頻度分布 : 各拠点がデータを受信した時点における、当該データの、探索が行われてから経過した時間の分布。遅延の小さいデータが多いほど、各

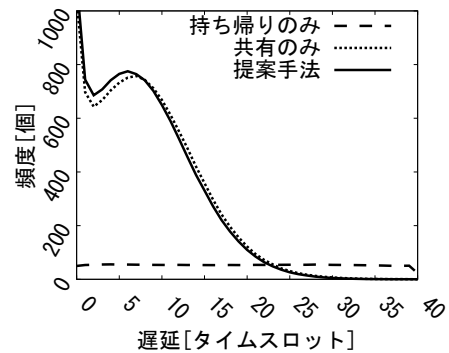


図 9: 遅延の頻度分布

拠点が最新のデータを収集できていることを示す。

平均新鮮度 : 各データに対し、探索によって当該データが生成された時点で 1 となり、その後 0 になるまでタイムスロットごとに 0.05 だけ減衰する値を、当該データの新鮮度として定義する。平均新鮮度は、ある時刻において各拠点が持っている各セルのデータの新鮮度の平均である。この値が高いほど、探索対象領域全体のデータが繰返し頻繁に各拠点到達していることを示す。

新鮮度の分散 : 実験期間内において各拠点が持っている各セルのデータの新鮮度の分散。この値が低いほど、探索対象領域全体のデータが偏りなく各拠点到達していることを示す。

5.4 評価結果

図 9 に遅延の頻度分布を示す。横軸は、拠点がデータを受信した時点における遅延を表し、縦軸は対応する遅延で収集できたデータの個数を表す。なお、データはセル単位で生成されるものとする。結果より、データ持ち帰りのみの手法に比べ、他の手法はより多くのデータを低遅延で収集していることがわかる。これは、データの共有によって UAV がより多くのデータを持ち、また各拠点が多くの UAV からデータを受信することで、多くの新鮮なデータを収集できるためである。

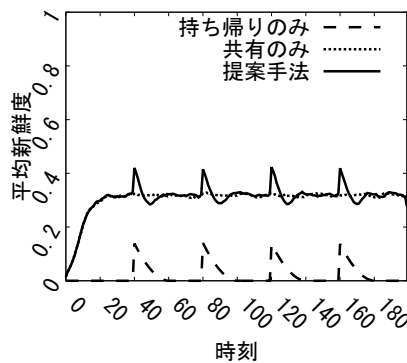


図 10: 平均新鮮度

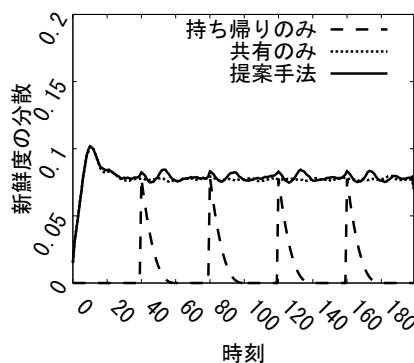


図 11: 新鮮度の分散

と考えられる。また、データ共有のみの手法に比べ、提案手法はより多くのデータを低遅延で各拠点に収集していることがわかる。この結果より、定期的なデータ持ち帰りとデータ共有を組み合わせることで、低遅延でのデータ収集が効率的に行えることがわかる。

図 10 に平均新鮮度を示す。グラフの横軸はシミュレーション開始からの経過タイムスロット数を示す。結果より、データ持ち帰りのみの手法に比べ、他の手法における新鮮度が常に高く、データ共有の導入により、各拠点に多く新鮮なデータが収集できることがわかる。また、データ共有のみの手法と提案手法でほぼ同じ性能を示しているが、提案手法における新鮮度が時間経過に伴って増減を繰り返す、時刻によってはデータ共有のみ行う手法を下回っている。これは、UAV が自身の拠点へデータを持ち帰る時点で、各拠点が新鮮なデータを収集できるものの、その後しばらくは UAV と拠点との無線通信が行われず、拠点がデータを収集できない期間が続くためであると考えられる。

図 11 に新鮮度の分散を示す。図 10 と同様、グラフの横軸はシミュレーション開始からの経過タイムスロット数を示す。結果より、データ持ち帰りのみの手法における分散が他の手法と比べて常に小さく、時刻によっては 0 に収束している。これは、図 10 の結果

からわかる通り、全てのセルのデータの新鮮度が 0 に収束しているためである。データ共有のみの手法と提案手法はほぼ同等の性能を示しているが、提案手法における分散が時間経過に伴って若干増減している。これは、データ持ち帰り時刻前において、各 UAV が自身の拠点付近のセルを探索し、取得するデータが地理的に偏るためである。一方、持ち帰り時刻後に関しては、持ち帰り後も自身の拠点の無線通信範囲内を移動する UAV が存在し、これらの UAV から最新のデータを収集する期間があるためであると考えられる。

6 まとめ

本稿では、UAV 協調型センシングにおいて、各拠点へのデータ収集を効率よく行う手法を提案した。提案手法では、UAV が定期的に自身の拠点にデータを持ち帰ることにより、多くのデータを短時間で各拠点に収集する。また、無線通信可能となった UAV および拠点間でデータを共有することにより、UAV および拠点がより新鮮なデータを得る。シミュレーション実験によって、提案手法によって高いデータ収集効率を実現できることを確認した。

今後は、データ収集効率をさらに向上させる手法や、データを収集する際のトラフィック削減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] 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] Y. Yang, X. Qiu, S. Li, J. Wang, W. Chen, P. C. K. Hung, 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).