

自律移動型 UAV の協調動作を用いた 効率的な探索データ収集手法

伊藤 太清¹ 神崎 映光²

受付日 2021年4月14日, 採録日 2021年11月2日

概要: 本論文では, さまざまな機関や個人の所有する自律移動可能な無人航空機 (Unmanned Aerial Vehicle: 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データを効率良く収集する手法を提案する. 提案手法では, 筆者らの先行研究 (Kanzaki ら, 2019) に基づき, 各探索地点の探索頻度を評価する指標を定義し, これに基づいて UAV が移動経路を定めることにより, 対象領域全体を効率的に探索する. また, 各 UAV が定期的に自身の情報収集地点へデータを持ち帰り, 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, 多くのデータを短時間で情報収集地点に収集する.

キーワード: UAV, 協調動作, データ収集

An Efficient Data Gathering Method Using Collaborative Operation of Autonomous UAVs

TAISEI ITO¹ AKIMITSU KANZAKI²

Received: April 14, 2021, Accepted: November 2, 2021

Abstract: In this paper, we propose a method that achieves efficient data gathering in a wide area, introducing collaborative operation of multiple autonomous UAVs (Unmanned Aerial Vehicles) owned by different organizations and individuals. Our proposed method defines a metric that evaluates the frequency of exploration for each location based on our previous method (Kanzaki et al., 2019). By determining the moving path of each UAV using this metric, our method achieves an efficient exploration of a target area. In addition, our method achieves data gathering to the base stations in a short time by introducing i) periodical returning to the basestation and ii) data sharing between UAVs and base stations via direct wireless communication.

Keywords: UAV, collaborative operation, data gathering

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) が普及し, 空中からの画像および映像の撮影などに広く利用されるようになった. また, これらの UAV に温度や湿度などを観測できる複数のセンサを搭載して, 特定の探索対象領域におけるセンサデータを

収集し, さまざまなアプリケーションへ利活用できるものと考えられる. 近年では, 遠隔制御なしに自律的に飛行可能な UAV の開発も進んでおり, これらの自律飛行型 UAV を用いてセンサデータを収集する研究開発が活発に行われている [3], [8], [10]. 特に, UAV の飛行可能な特性を活かした応用として, 山や崖などの人が入りにくい場所の探索や, 地震や台風など, 通信インフラの崩壊をともしなう大規模災害が発生した直後の初期対応が考えられる. 具体的には, UAV を活用した探索を行うことにより, 以下のような応用が実現可能になるものと考えられる.

- 地震などの大規模災害が発生した状況において, 警察

¹ SOLIZE 株式会社
SOLIZE Co., Ltd., Chiyoda, Tokyo 102-0075, Japan

² 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

や自治体などの機関が所有する自律飛行可能な UAV を稼働させる。これらの UAV は、被災地域を自律的に巡回しながら、道路の寸断状況や建物の倒壊状況をはじめとした被災状況に関する情報を、カメラなどを用いて上空から観測し、救助などに活用する。

- 同様に大規模災害発生直後において、行政機関が稼働させた UAV に被災地域を巡回させ、UAV に搭載した WiFi-Direct などの近距離無線通信などを用いて、最寄りの避難所や安全な避難経路に関する情報を、被災者が持つスマートフォンなどに通知する。

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、探索対象領域内全体に対し、UAV を繰返し、かつ頻繁に巡回させることが好ましい。このような背景のもと、UAV を用いた探索対象領域の効率的な巡回を目的として、UAV の動作を制御する研究が注目されている [4], [5], [9], [12], [14]。これらの研究は、ある単一の組織において 1 つまたは複数の UAV を稼働し、探索対象領域のセンシングを効率化する制御を行っているものが大半である。この場合、すべての UAV に対し、他の UAV の動作を考慮した制御が行え、探索を効率良く行うことができる。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、大学などの研究教育機関、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 を積極的に利用し、上記のような応用に活用できれば、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、このような環境では、1 つの場所において全 UAV が同時に稼働するとは限らず、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。

一方、UAV 間の直接的な無線通信を用いたネットワークの構築についても期待が高まっており、UAV によって構築されるアドホックネットワークである FANET (Flying Ad-hoc NETwork) [2] をはじめとして、さまざまな研究が行われている。さまざまな組織および個人が所有する UAV を用いて大規模災害時などにおける効率的な探索および情報拡散を実現するためには、これら技術の活用によって個々の UAV どうしが無線通信によって情報共有を行えるようにし、巡回中に相互に通信可能となった他の UAV との間で、互いの情報を共有することが有効である。

筆者らの研究グループでは、異なる所有者によって非同期に探索を開始した自律移動可能な UAV を無線通信によって協調動作させ、探索対象領域内の効率的な探索を実現する UAV 協調型センシングに関する研究に取り組んでいる [6]。これらの手法は、UAV が探索対象領域をどれくらい頻繁に巡回しているかを表す指標を導入し、長く探索

されていない地点を優先的に探索することで、対象領域全体の探索効率を向上している。また、巡回中に無線通信可能となった UAV 間で、互いが巡回した経路などに関する情報を共有し、相手が探索すると推測される領域を相互に避けて探索を行うことにより、特定の地点が冗長に探索されることを防いでいる。しかし、これらの手法では、探索対象領域全体が UAV によって探索される一方、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。

本論文では、この問題点を解消し、UAV 協調型センシングにおいて高いデータ収集率を実現する手法である UCS-DG (UAV Collaborative Sensing and Data Gathering) を提案する。UCS-DG では、各 UAV が先行研究 [6] を基礎とした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。また、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、多くのデータを短時間で情報収集地点に収集する。さらに、これらの動作を考慮して、各 UAV の移動経路を決定する方法に改良を加えることで、対象領域全体の効率的な探索を実現する。さらに本論文では、シミュレーション実験により、提案した各手法の有用性を検証する。

以下では、2 章で関連研究について述べ、3 章で先行研究について述べる。4 章で、提案手法 UCS-DG について述べ、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る。最後に 6 章で本論文のまとめと今後の課題について述べる。

2. 関連研究

2.1 UAV の応用

Sánchez-García らは、文献 [11] において、災害発生時に UAV の集団を自律的に展開し、被災者および災害対応者への通信サービスを提供する手法を提案している。この手法では、粒子群最適化 (Particle Swarm Optimization: PSO) に基づき UAV の経路を動的に生成することで、UAV の集団が効率的に被災地を探索し、被災者が多く存在する領域に集中させる。この研究は、無線通信デバイスを搭載した UAV を災害対応に応用している点が本研究と類似している。しかし、被災者への通信サービスの提供を目的としており、被災地域などの対象領域全体を対象とした探索およびデータ収集を行う本研究とは想定が異なる。

渡辺らは、文献 [13] において、特定の物体を複数の視点から撮影するアプリケーションを想定し、UAV の協調動作によってさまざまな視点からの撮影を効率化する手法を提案している。この手法では、対象物の周囲を UAV に巡回させ、最も情報量を取得できる視点を UAV の自律的な動作によって探索する。また、UAV が複数存在する場合に、各 UAV が撮影を行う視点に関する情報を共有し、すべての UAV から得られる情報量の総和を最大化するよう、UAV

の位置を自律的に調整する．この研究は，複数の UAV 間で情報共有を行う点や，共有した情報から各 UAV の動作を自律的に決定している点が本研究と類似している．しかし，特定の物体を撮影することを目的としている点が本研究の想定と異なる．

2.2 UAV の移動経路制御

Maza らは，文献 [8] において，単一の拠点において複数の UAV が利用可能な状況で，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．この手法は，全 UAV の共通の拠点となる基地局が，各 UAV の性能差などを考慮して探索対象領域を分割する．各 UAV は，分割された領域のうち，基地局によって自身に割り当てられた領域のみ巡回する．これにより，各 UAV が巡回する領域を縮小し，探索効率を向上している．この手法は，複数の UAV を用いて探索対象領域の探索を効率化している点が本研究と類似している．しかし，基地局がすべての UAV の存在を事前に把握している必要があり，本論文が想定する所有者の異なる個々の UAV が非同期に稼働する環境においては，適切な領域分割が行えない．

Khan らは，文献 [7] において，追跡対象となる複数の移動体が存在する環境において，複数の UAV が無線通信を用いて協調しながら移動体を追跡する手法を提案している．この手法は，対象となる移動体が探索対象領域内の各地点に存在する確率を表す確率マップを各 UAV に与え，この確率に従って，各 UAV が領域内の探索を行う．また，他の UAV と無線通信が可能となった UAV は，互いのもつ確率マップを共有し，確率マップの精度向上を図る．これにより，各 UAV は，対象となる移動体が高確率で存在する地点を導出し，移動体の追跡を行う．この手法は，無線通信による UAV 間の情報共有によって探索効率を向上させる点が，本研究の提案手法と類似している．しかし，移動体の追跡を目的としており，探索対象領域を満遍なく探索することが要求される本論文とは想定が異なる．

3. 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提案した手法であり，本論文で提案する手法の基礎となる UCS/MR (UAV-Collaborative Sensing with Mobility Reenactment) [6] について述べる．

3.1 想定環境

図 1 に，文献 [6] における想定環境を示す．以下では，この研究で想定する UAV，探索対象領域，およびアプリケーション要求について述べる．

3.1.1 UAV

探索対象領域内には N 台の UAV u_i ($i = 1, 2, \dots, N$) が存在するものとする．各 UAV には物理現象を観測する

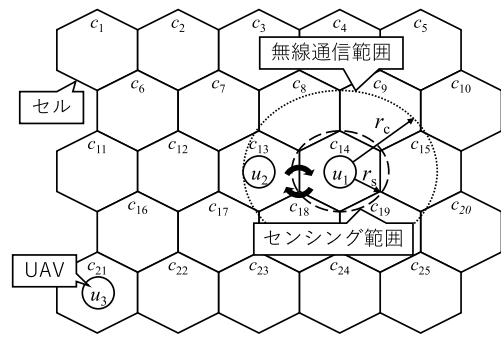


図 1 文献 [6] における想定環境 ($N = 3$, $M_c = 5$, $N_c = 5$)
Fig. 1 Assumed environment in Ref. [6] ($N = 3$, $M_c = 5$, $N_c = 5$).

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，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．また，動作開始時点においては，他の UAV の存在を把握していないものとする．すなわち，各 UAV は，他の UAV と無線通信が可能となった時点で，互いが稼働していることをはじめて認識できるものとする．

3.1.2 探索対象領域

探索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 c_i ($i = 1, 2, \dots$) に分割されているものとする．具体的には，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，これを用いて探索対象領域を分割する．図 1 においては，各セルの上部にセルの識別子を記載している．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するものとする．また，各 UAV の移動およびセンシングはセル単位で行うものとし，UAV が隣接セルに移動するために要する時間を単位時間と呼ぶ．

3.1.3 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 が探索対象領域を繰返し，かつ頻繁に巡回する必要がある．これを表す指標として，上述した各セル c_i 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を定義する．カバレッジは， $[0.0, 1.0]$ の範囲で規定され，ある時点において UAV が存在しているセルのカバレッジは 1.0 で与えられるものとする．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，探索対象領域内の全セルのカバレッジをできるだけ高く維持することを要求する．

3.2 設計方針および動作概要

UCS/MR では、各 UAV が、領域全体の各セルのカバレッジからなるカバレッジマップを管理する．図 2 に、 δ の値が 0.1 である環境において、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表している．たとえば、 u_1 が存在しているセル c_{13} のカバレッジは最大値である 1.0 となっており、過去に探索したセル $\{c_{12}, c_{11}, c_{16}, \dots\}$ のカバレッジは、探索してからの経過時間に応じて減衰した値となっている．また、この環境においてカバレッジが 1.0 から 0.0 まで減衰する 10 単位時間以上前に探索したセル $\{c_{21}, c_{22}, c_{23}\}$ のカバレッジは、すべて 0.0 となっている．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

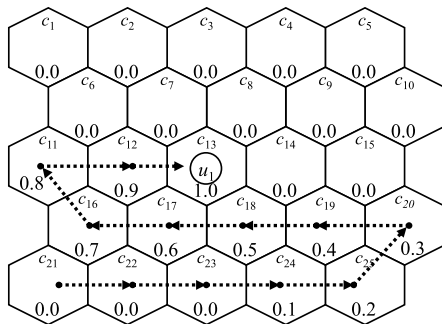


図 2 カバレッジマップ ($\delta = 0.1$)
Fig. 2 Coverage map ($\delta = 0.1$).

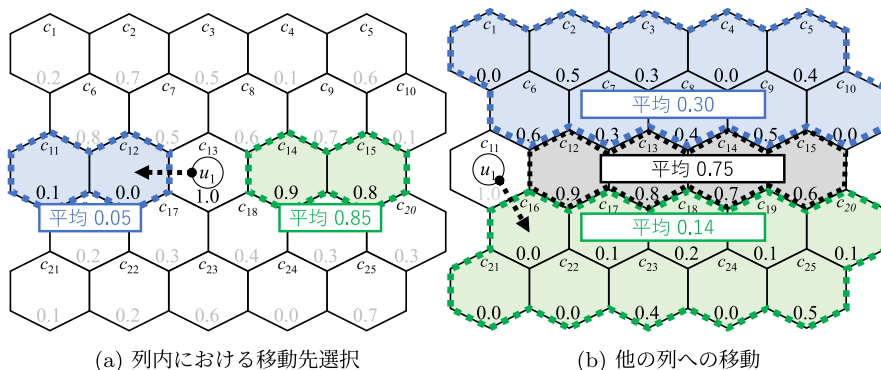


図 3 UAV の移動制御 ($\alpha = 0.5$)
Fig. 3 Moving strategy of a UAV ($\alpha = 0.5$).

くことで、無線通信後に他の 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、探索対象領域全体を偏りなく頻繁に探索できる．

3.3 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、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、カバレッジマップにおいて、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．このうち平均値が小さい方の値が、あらかじめ定められた閾値 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方向の隣接セルに移動する．平均値がいずれも閾値 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すべてのセルのカバレッジの平均と、下方向にあるすべ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．

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位置するセルのカバレッジの平均は、それぞれ 0.05、0.85 となる．ここで、閾値 α が 0.5 である場合、これらのうち値の小さい左方向の平均値 0.05 は閾値を下回るため、UAV は、左方向の隣接セルに進む．また、図 3(b) において、UAV u_1 の右方向のカバレッジの平均は 0.75 となり、閾値以上となるため、 u_1 は、自身がいる列が十分に探索されていると判断する． u_1 がいる列よりも上方向および下方向にあるすべてのセルのカバレッジの平均は、それぞれ 0.30、0.14 であり、下方向の平均値がより小さいため、 u_1 は下方向へ移動する．

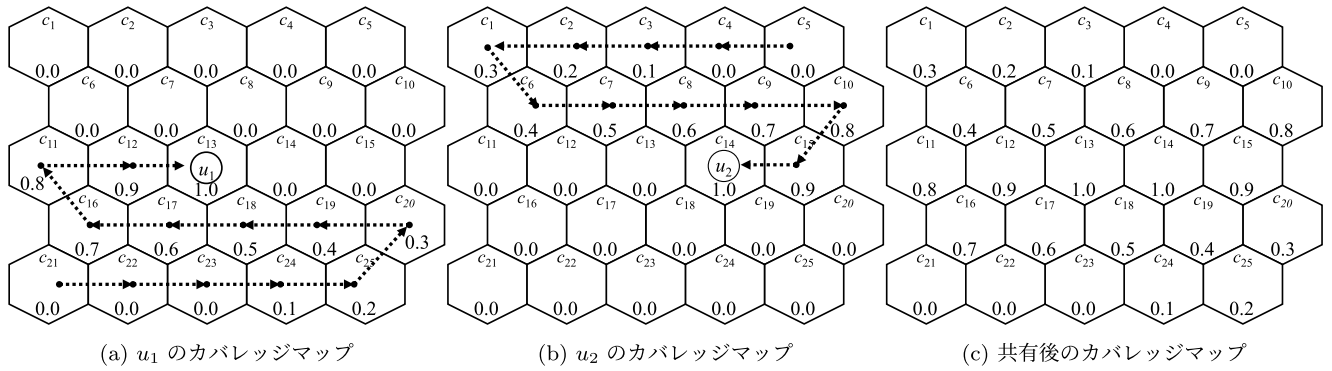


図 4 カバレッジマップの共有

Fig. 4 Coverage map sharing.

3.4 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。ただし、カバレッジの値が同じとなるセルについては、値の更新を行わない。たとえば図 4 (a) に示すカバレッジマップを持つ u_1 と、図 4 (b) に示すカバレッジマップを持つ u_2 が無線通信可能となった場合、 u_1 と u_2 はカバレッジマップを共有し、各々の持つカバレッジマップを図 4 (c) に示す値に更新する。

この動作により、各 UAV が、自身が把握している時刻よりも後に探索されたセルに関する情報を、無線通信を行った UAV から取得し、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。

3.5 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、3.3 節の動作によって自身の移動先となるセルを決定するたびに、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の UAV に対しても 3.3 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。たとえば図 5 では、図 4 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、 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あらかじめ定められた期間 τ 単位時間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の UAV が探索するセルを推定し、当該セルを自身の移動先を選択することを防ぐ。

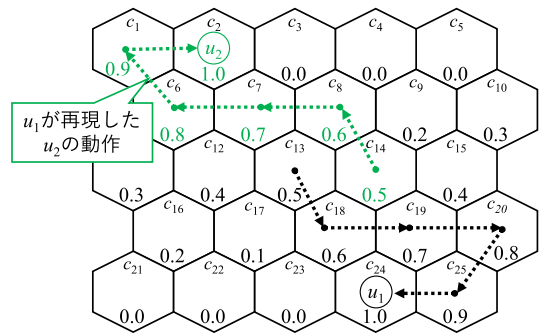


図 5 他の UAV の動作再現

Fig. 5 Mobility reenactment of other UAVs.

4. 提案手法：UCS-DG

本章では、本論文で提案する UCS-DG (UAV-Collaborative Sensing and Data Gathering) について述べる。UCS-DG では、3 章で述べた UCS/MR を基礎とし、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。

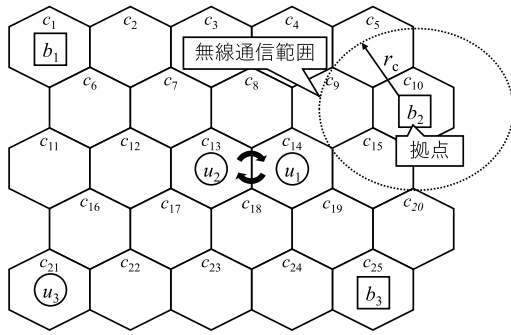
4.1 想定環境

図 6 に、本論文における想定環境を示す。本章では、基本的に 3.1 節で述べたものと同様の環境を想定する。以下では、本章の想定環境のうち、3.1 節で述べたものと異なる箇所について述べる。

4.1.1 UAV および拠点

UAV u_i ($i = 1, 2, \dots, N$) は、その所有者の位置する情報収集地点である拠点 b_i ($i = 1, 2, \dots, N$) において動作を開始するものとする。また、稼働した以降の探索によって得られたデータとして、自身が探索した各セルに関して、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ものとする。

各拠点は UAV と同様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 UAV および他の拠点と相互に無線通信可能であるものとする。また、大規模災害による通信インフラの崩壊などを想定し、

図 6 想定環境 ($N = 3, M_c = 5, N_c = 5$)Fig. 6 Assumed environment ($N = 3, M_c = 5, N_c = 5$).

基幹回線網などを用いた拠点間の通信は不可能であるものとする。

議論の簡単化のため、各 UAV および拠点には十分な記憶領域が搭載されているものとし、すべてのセルにおける探索データを保持できるものとする。

4.1.2 アプリケーション要求

本項では、3 章とは異なり、各拠点において収集されたデータに基づいてアプリケーション要求を定義する。データ収集効率を表す指標として、各拠点 b_i および各セル c_j に対し、データの新鮮度 $f_{i,j}$ という値を定義する。この値は $[0.0, 1.0]$ の範囲で規定され、拠点 b_i が保持するセル c_j に関する最新の探索データが n 単位時間前のものである場合、3 章において定義したカバレッジの減衰率 δ を用いて、次式で与えられるものとする。

$$f_{i,j} = \begin{cases} 1.0 - \delta \cdot n & (\delta \cdot n < 1.0) \\ 0.0 & (\text{otherwise}). \end{cases}$$

以上の想定において、アプリケーションは、探索対象領域内の全拠点に収集される全セルに関するデータの新鮮度をできるだけ高く維持することを要求する。

4.2 設計方針

4.1.2 項で述べたアプリケーション要求を満足するためには、各 UAV が拠点を出発した後、全セルを探索し、再び拠点に戻るために要する時間を最小化することが求められる。

ここで、環境内に 1 つの拠点のみが存在し、その拠点の所有する UAV 1 台が対象領域を探索する場合を考える。このとき、この拠点において上記の要求を満たす問題は、各セルを都市として、全都市を巡回するための移動経路長を最小化する巡回セールスマン問題 (Traveling Salesman Problem: TSP) に帰着する。この問題は NP 困難であることが知られており、最適解の導出が困難である [1]。また本論文では、複数の拠点が存在し、各拠点の所有する UAV を用いて、すべての拠点において新鮮度の高いデータを収集することが求められるため、問題がさらに複雑となり、

最適な移動経路設定が困難である。

そこで UCS-DG では、先行研究である UCS/MR と同様に、各 UAV が、自身の保持するカバレッジマップに基づき自律的に移動経路を決定し、また 4.3 節で述べる動作を導入することで、アプリケーション要求を満足するデータ収集を実現する。

4.3 動作概要

UCS-DG では、各 UAV が探索を行いながら、あらかじめ定められた周期に基づき、定期的に自身の拠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 および拠点ともデータの共有を行うことで、各拠点におけるデータ収集効率のさらなる向上を実現する。

ここで、各 UAV が定期的に自身の拠点に戻るため、各 UAV が探索できる範囲は自身の拠点を中心とした一定の範囲内に限られる。このような制約下で高い探索効率を維持するため、各 UAV は、探索対象領域全体ではなく、自身の近隣に位置するセルの探索頻度のみに基づく移動先の決定を行う。

4.4 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、探索対象領域全体のカバレッジマップではなく、現在地の周辺のセルにおけるカバレッジのみを参照する。また、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、移動先セルの候補を限定する。

4.4.1 移動先セル候補の選出

次のデータ持帰り時刻までの残り時間を t 単位時間とし、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単位時間を t_i とする。各 UAV は、移動先セルを決定する際、 t 単位時間以内に自身の拠点にデータを持ち帰られるよう、隣接セル c_i のうち、 t_i が t 以下となるもののみを移動先セルの候補にする。

たとえば図 7 において、隣接するセル間でのみ無線通信可能である場合を考える。UAV u_1 がセル c_{25} に位置しており、データ持帰りまでの残り時間が 5 単位時間であるとき、 u_1 が隣接セルに移動した後の残り時間は 4 単位時間 ($t = 4$) となる。ここで、 u_1 が隣接セル c_{20} に移動すると、このセルから拠点 b_1 と無線通信可能なセル $\{c_2, c_6\}$ への移動に 5 単位時間必要となり ($t_{20} = 5$)、この値が t ($= 4$) を上回る。そのため u_1 は、 c_{20} を移動先の候補から除外し、他の隣接セルを移動先セルの候補とする。

4.4.2 移動先セルの選択

移動先候補を選出した UAV は、自身の保持するカバレッジマップを参照し、移動先セルの候補のうち、カバレッジの値が最小であるセルに移動する。対象となるセルが複数

存在する場合、それらのセルに隣接するセルのうち、カバレッジの値が最小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 8 においてセル c_{13} に位置する UAV u_1 は、隣接セルのうちカバレッジが最小であるものがセル $\{c_7, c_{18}\}$ の 2 つであるため、これらのセルに隣接するセル $\{c_2, c_3, c_6, c_{19}, c_{23}, c_{24}\}$ のカバレッジの値を参照する。これらのセルのうち、カバレッジの値が最小であるのはセル c_{23} であるため、 u_1 は、セル c_{23} に向かう方向に位置する隣接セル c_{18} に移動する。これらのセルにおいてもカバレッジが最小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カバレッジを参照する操作を繰り返す。

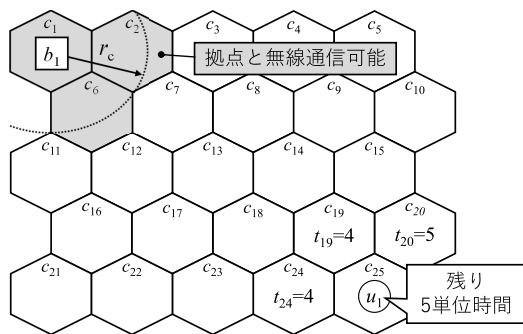


図 7 移動先候補セルの選出

Fig. 7 Candidate selection of the destination cell.

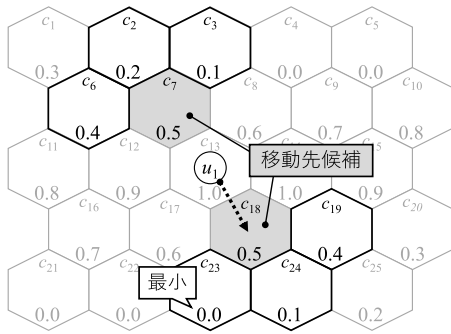


図 8 移動先の決定

Fig. 8 Decision of the destination cell.

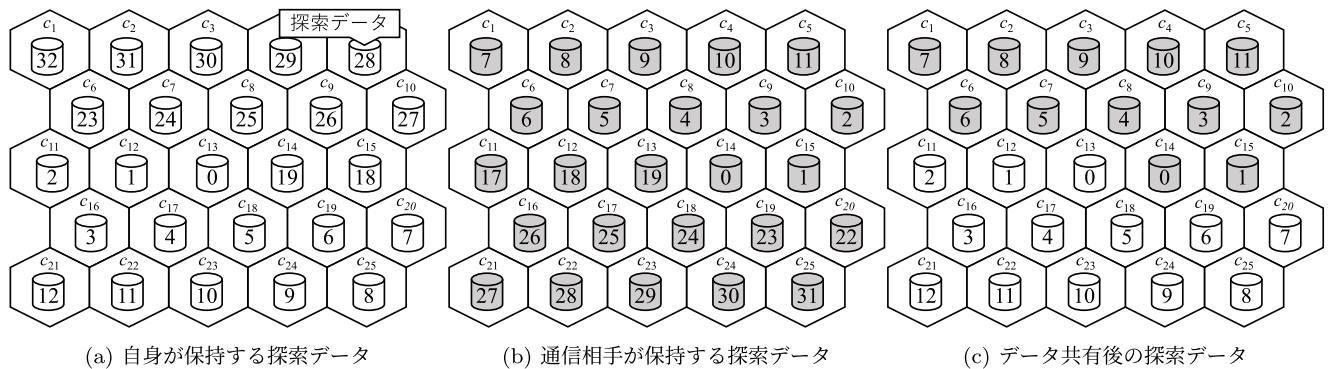


図 9 データ共有

Fig. 9 Data sharing.

4.5 カバレッジマップおよび探索データの共有

複数の UAV および拠点が互いに無線通信可能となった場合、3.4 節と同様の手順に従って、互いの持つカバレッジマップを共有する。

また、カバレッジマップに加え、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、取得してから経過時間がより短い、すなわちより新鮮度の高いもののみを自身の記憶領域に保持する。

たとえば、図 9(a) に示す探索データを保持する UAV が、図 9(b) 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 9(c) に示すデータを自身の記憶領域に格納する。ここで、図中の探索データに付与された数字は、当該データが取得されてからの経過時間を表す。

4.6 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、4.4 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、UCS/MR と同様、過去に情報共有を行った他の UAV の移動先となるセルを推測し、これに基づき、自身のカバレッジマップを更新する動作を、情報共有後 τ 単位時間だけ行う。

4.7 考察

UCS-DG では、各 UAV が自身の拠点到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、各 UAV が移動先セルを決定する際に、探索対象領域全体のカバレッジを参照せず、現在地の周辺のセルのカバレッジのみを参照することによって、データの持帰りを考慮した移動制御を行い、UCS/MR の高い探索効率を維持する。さらに、4.5 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. 性能評価

本章では、UCS-DG 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 ($M_c = N_c = 10$) のセルに分割された探索対象領域に、10 台 ($N = 10$) 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、そのセルを UAV の初期位置とした。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。各 UAV および拠点の無線通信範囲 r_c は、互いに隣接するセルに位置する UAV および拠点との間で無線通信可能となるように設定した。UAV がデータを自身の拠点到持ち帰る周期は 40 単位時間とし、カバレッジの減衰率 δ は 0.05 とした。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、予備実験を行った結果最も良い探索効率を得た 5 単位時間とした。

5.2 探索効率の評価

本節では、UCS-DG によって、UCS/MR における探索効率が維持できるか検証する。

5.2.1 評価指標

実験では、UCS-DG と UCS/MR における探索を 200 単位時間行う試行をそれぞれ 100 回実施し、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 探索対象領域中のすべてのセルにおける、実際のカバレッジの平均値。この値が高いほど、探索対象領域内のすべ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 探索対象領域中のすべてのセルにおける、実際のカバレッジの分散値。この値が低いほど、探索対象領域内のすべてのセルが偏りなく探索されていることを表す。

5.2.2 評価結果

図 10 および図 11 にシミュレーション結果を示す。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 10 の結果より、UCS-DG における平均カバレッジが、UCS/MR と比較して高くなっており、UCS-DG によって探索対象領域内のすべてのセルがより頻繁に探索されてい

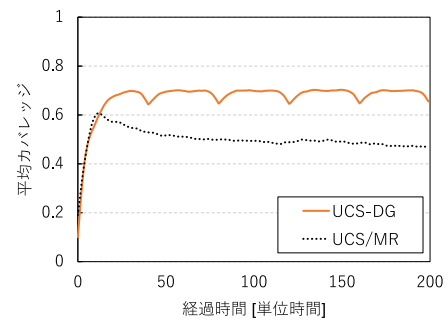


図 10 平均カバレッジ

Fig. 10 Average coverage.

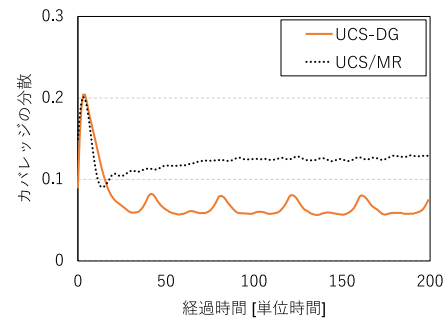


図 11 カバレッジの分散

Fig. 11 Variance in coverage.

ることが分かる。UCS-DG では、各 UAV が定期的に自身の拠点到探索データを持ち帰るために探索できる範囲が限られることを考慮して、探索対象領域全体ではなく自身の現在位置の周辺のセルのカバレッジのみを参照して移動先を決定しており、これが探索対象領域全体の探索効率をも改善していることが分かる。しかし、UCS-DG では、UAV が自身の拠点到探索データを持ち帰る時刻に平均カバレッジが低下していることが分かる。これは、UAV が自身の拠点到向かう際、UAV が移動できる方向が自身の拠点到向かう方向に限られ、それ以外の方向によりカバレッジの低い隣接セルがあったとしても移動できなくなるためである。

図 11 の結果より、UCS-DG におけるカバレッジの分散が、UCS/MR と比較して低くなっており、UCS-DG によって探索対象領域内のすべてのセルがより偏りなく探索されていることが分かる。一方、UCS-DG では、UAV が自身の拠点到探索データを持ち帰る時刻にカバレッジの分散が高くなっていることが分かる。これは、図 10 の結果で述べたとおり、UAV の移動先決定手順を変更したためである。

5.3 データ収集効率の評価

本節では、UCS-DG におけるデータ収集効率を評価する。ここでは、UCS-DG で導入した動作のうち、4.4.1 項で述べた移動制御による定期的なデータの持帰り、および 4.5 節で述べた UAV 間や UAV と拠点間におけるデータ共有それぞれの効果を検証するため、これらの動作の一方の

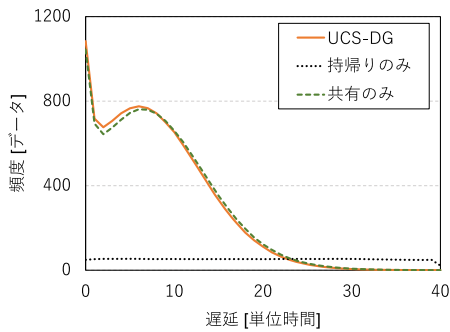


図 12 遅延の頻度分布

Fig. 12 Frequency distribution of delay.

みを有効にした手法として、データ共有のみを行う手法と、データの持帰りのみを行う手法を比較手法とした。

5.3.1 評価指標

実験では、前節と同様、各手法において 200 単位時間経過させる試行を 100 回実施し、以下に示す指標の全試行における平均値を測定した。

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 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値。平均新鮮度が高いほど、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。

5.3.2 評価結果

図 12 に遅延の頻度分布を示す。グラフの横軸は、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。結果より、データ持帰りのみの手法と比較して、他の手法は多くのデータを低遅延で収集していることが分かる。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、また各拠点が偶発的に無線通信可能となった多くの 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と考えられる。また、データ共有のみの手法に比べ、UCS-DG はより多くのデータを低遅延で各拠点到達していることが分かる。この結果より、偶発的な無線接続を利用するデータ共有と、データ収集のための明示的な移動制御を行う定期的なデータ持帰りと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分かる。

図 13 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時間を示す。結果より、データ持帰りのみの手法に比べ、他の手法における新鮮度がつねに高

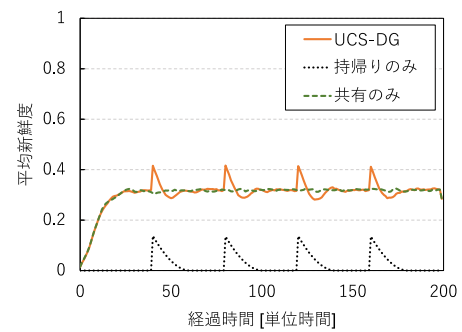


図 13 平均新鮮度

Fig. 13 Average data freshness.

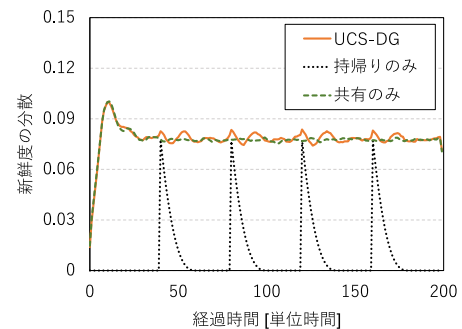


図 14 新鮮度の分散

Fig. 14 Variance in data freshness.

く、データ共有の導入により、各拠点到多く新鮮なデータが収集できることが分かる。また、データ共有のみの手法と UCS-DG ではほぼ同じ性能を示しているが、UCS-DG における新鮮度が時間経過にともな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 14 に新鮮度の分散を示す。図 13 と同様に、グラフの横軸はシミュレーション開始からの経過時間を示す。結果より、データ持帰りのみの手法における分散が他の手法と比べてつねに小さく、時刻によっては 0 に収束している。これは、図 13 の結果から分かるとおり、すべ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 UCS-DG はほぼ同等の性能を示しているが、UCS-DG における分散が時間経過にともなって若干増減している。これは、データ持帰り時刻前において、各 UAV が自身の拠点のセルを探索し、取得するデータが地理的に偏るためである。一方、持帰り時刻後に関しては、持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. おわりに

本論文では、UAV 協調型センシングにより、複数の UAV を用いて探索対象領域全体を効率的に探索し、探索によって得られた探索データを複数の情報収集地点に効率的に収集する手法である UCS-DG を提案した。

UCS-DG では、UAV が定期的に自身の情報収集地点である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、UCS-DG 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。

UCS-DG では、全拠点のデータ収集効率を向上させているが、本論文で想定している大規模災害発災直後では災害対策本部に多くのデータを収集する必要があるなど、特定の限られた拠点へのデータ収集が重要視される環境も考えられる。今後は、データ収集にかかる要件なども考慮した手法の拡張について検討する予定である。また、UAV の電力容量や、センシング能力の差異なども考慮し、実環境に適用可能な手法の設計についても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] Applegate, D.L., Bixby, R.E., Chivátal, V. and Cook, W.J.: *The Traveling Salesman Problem: A Computational Study*, Princeton University Press (2011).
- [2] Bekmezci, I., Sahingoz, O.K. and Temel, S.: Flying ad-hoc networks (FANETs): A survey, *Ad Hoc Networks*, Vol.11, pp.1254–1270 (2013).
- [3] Chen, Y., Zhang, H. and Xu, M.: The coverage problem in UAV network: A survey, *Proc. Int. Computing Communication and Networking Technologies (ICCCNT 2014)*, pp.1–5 (2014).
- [4] Flint, M. and Fernandez, E.: Approximate dynamic programming methods for cooperative UAV search, *IFAC Proc. Volumes*, Vol.55, No.2, pp.59–64 (2005).
- [5] Franco, C.D. and Buttazzo, G.: Energy-aware coverage path planning of UAVs, *Proc. Int. Conf. IEEE Autonomous Robot Systems and Competitions (ICARSC 2015)* (2015).
- [6] Kanzaki, A. and Akagi, H.: A UAV-collaborative sensing method for efficient monitoring of disaster sites, *Proc. Int. Conf. Advanced Information Networking and Application (AINA 2019)*, pp.775–786 (2019).
- [7] Khan, A., Yanmaz, E. and Rinner, B.: Information merging in multi-UAV cooperative search, *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation (ICRA 2014)*, pp.3122–3129 (2014).
- [8] Maza, I. and Ollero, A.: Multiple UAV cooperative searching operation using polygon area decomposition and efficient coverage algorithms, *Distributed Autonomous Robotic System 6*, pp.221–230 (2007).
- [9] Mirzaei, M., Sharifi, F., Gordon, B.W., Rabbath, C.A. and Zhang, Y.M.: Cooperative multi-vehicle search and coverage problem in uncertain environments, *Proc. Decision and Control and European Control Conf. (CDC-ECC 2011)*, pp.4140–4145 (2011).
- [10] Rashed, S. and Soyuturk, M.: Analyzing the effects of UAV mobility patterns on data collection in wireless sensor networks, *Sensors*, Vol.17, No.2 (2017).
- [11] Sánchez-García, 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).
- [12] Sujit, P.B., Lucani, D.E. and Sousa, J.B.: Joint route planning for UAV and sensor network for data retrieval, *Proc. IEEE Int. Systems Conf. (SysCon 2013)*, pp.681–687 (2013).
- [13] 渡辺大貴, 高橋淳二, 戸辺義人: 複数台の自律飛行 UAV から得られる情報の最大化の検討, 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 2017) 論文集, pp.1452–1455 (2017).
- [14] Yin, C., Xiao, Z., Cao, X., Xi, X., Yang, P. and Wu, D.: Offline and online search: UAV multi-objective path planning under dynamic urban environment, *IEEE Internet of Things Journal*, No.99, p.1 (2017).



伊藤 太清

2019 年島根大学総合理工学部数理・情報システム学科卒業。2021 年同大学院自然科学研究科博士前期課程修了。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。



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。