

# 複数 UAV 協調センシングにおける階層的カバー率の提案

大野木 優<sup>1,a)</sup> 尾崎 凌介<sup>2</sup> テープウィロージャナポン ニワット<sup>1,b)</sup>  
太田 義勝<sup>1</sup> 高橋 淳二<sup>2,c)</sup> 戸辺 義人<sup>2</sup>

概要：地上での観測が困難な状況において，UAV (Unmanned Aerial Vehicle) を用いた環境観測を実施することがさまざまな分野で考えられている．本研究では，複数の UAV が分担して対象エリアを観測するときに，センシングの即時性を考慮したカバー率に着目し，複数空間粒度を考慮したカバー率 MSCR (Multi-Scalesensing Coverage Ratio) を定義する．いくつかの飛行移動パターンをシミュレーションした結果，カバー率の指標として MSCR の有効性を示すことができた．

## 1. はじめに

UAV (Unmanned Aerial Vehicle) は無人航空機の総称であり，軍事利用を目的として，第二次世界大戦の時代から研究は始まっている．当時は軍で使用するミサイル発射訓練のための標的，または戦闘機の操縦技術・射撃技術向上のための標的として使用することを目的として開発が進められていた．その後，無線機の小型化や電子機器の機能向上により，写真や映像と取得することが可能になり敵地偵察任務に使用されたり，航空機関銃などの武装をし，爆撃や航空戦のための攻撃機として使用されたりした．技術が発展していくに連れて，軍事用の UAV の優位性・利用価値が高まり，全世界でより高性能な UAV の開発が進められ，運用されていくようになった．他軍事技術同様，民生利用が進み，多くの場合ドローンと称されるクアドコプターの小型化とともに，利用場面も増えてきた．その中でも，UAV は人間が到達できない場所の空中作業や，農業を搭載し人間の代わりに農業散布を行うなど人間作業の補助，カメラを使用した空撮や空中モニタリング，またセンサを使用したセンシングなど様々な場面で利用されている．

本研究で着目するのは，複数台の UAV である対象エリアを分担して，即時性が求められる観測を必要とする場合である．対象が広いエリアであると想定される場合には，局所的に詳細のデータが集まるのではなくて，全体が把握

できた上で時間の進行とともに，詳細情報が入手できることが望ましいと考えられる．そのため，全体の空間を粒度の異なる複数のメッシュで離散化し，各粒度のメッシュ内で観測を終えたか否かを加味した指標を作ることとして，MSCR (Multi-Scalesensing Coverage Ratio) を定義することとする．

UAV のネットワーク構成はさまざま考えられるが，今回，我々は，データ受信地点と直接通信可能な GN Gateway Node) と，通信距離が限定される SN(Sensor Node) の 2 種類で構成されるネットワークを検討した．SN は GN にデータを渡すことにより，データ受信地点へデータを届けることが可能となり，SN が常時 GN とつながる場合と，両者の通信が遮断される場合とを考える．さらに，SN，GN の動き方のポリシーを複数想定し，各々のポリシーでセンシング・移動を進める中で，MSCR の値の推移をシミュレーションで調べた．シミュレーションの結果，BFS (Breadth First Search) ポリシーで MSCR の高い時間立ち上がりが見られたほか，動き方と MSCR の対応が明確にわかり，MSCR がエリアカバー率の指標としてふさわしいことを示せた．

本論文では，以下，第 2 章にてセンシング地点とカバー率について，第 3 章にて MSCR の数学的な定義について述べる．その後，第 4 章にて想定する UAV ネットワークについて，その構成要素である SN(Sensor Node) と GN(Gateway Node)，それぞれの移動方式，接続方式について述べる．第 5 章にて SN,GN の移動方式と接続方式が様々な異なる状況において，MSCR の時間遷移をシミュレーションにより調べる．第 6 章で関連研究と本研究の違いについて述べ，第 7 章でまとめを述べる．

<sup>1</sup> 三重大学  
1577, Kurimamachiya-cho, Tsu, Mie 514-8507, Japan

<sup>2</sup> 青山学院大学  
1-10-5, Fuchinobe, Chuo, Sagami-hara, Kanagawa 252-5258, Japan

a) ohnogi@net.info.mie-u.ac.jp

b) wat@net.info.mie-u.ac.jp

c) takahashi@it.aoyama.ac.jp

## 2. 背景および目的

我々は、ある特定の対象エリアのデータを取得するエリアセンシングにおいて、エリア全体のデータを広く素早く取得しなければならない状況を想定している。例えば災害が発生したときなど全体の状況をいち早く把握したい場合などが挙げられる。すべてのデータを取得してから送信するのでは情報伝達に遅延が生じるため、被害が大きくなってしまいが、全体の状況を素早く把握することができれば、対策を講じやすくなり被害を最小限に抑えられる。複数のUAVで分担してセンシングする場合を考えてみる。

ここで、各々のUAVは、センシング地点で停止してセンシングし、次のセンシング地点に移動するという動作を繰り返すものとする。停止時間を0とすれば常時動き続けているという場合も含むし、移動距離を小さくすれば連続的にセンシングするという場合にも対応できるので、この仮定は一般的である。さて、このとき、センシング地点に停留しセンシングを完了したことを、そのセンシング地点が代表する領域をカバーしたと称することとする。さらに、対象領域全体の中に占めるカバー完了領域の割合をカバー率と定義すると、UAVがセンシング地点を移動するに伴い、時間経過とともにカバーされる領域も増加し、最終的には、カバー率は1に近づく。上述した「全体の状況を素早く把握する」というのは、カバー率の上昇が大きくなるような全体制御方式を選択するということになる。

ここで、領域というものを定義しなければならない。図1に示すように、1辺が $a$ の正方形領域があったときに、1つのセンシング地点を含む領域には、1辺を $\frac{a}{4}$ として16分割されたメッシュ領域や、1辺を $\frac{a}{8}$ として64分割されたメッシュ領域等、さまざまな空間粒度の領域が考えられる。本研究では、単一の空間粒度ではなく、複数の空間粒度のメッシュを同時に考慮したカバー率を示せる指標を確立することを目指す。

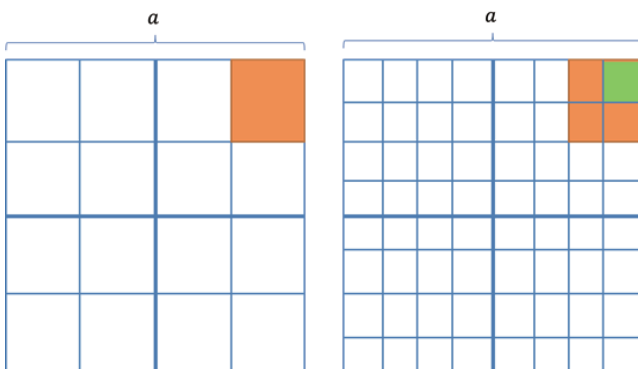


図1 センシング対象エリアの16分割(左)と64分割(右)

## 3. MSCRの定義

複数の空間粒度を考慮したセンシングカバー率として、MSCR(Multi-Scalesensing Coverage Ratio)を次の手順で定義する。

- (1) まず、注目する空間の深さが $N$ であるとき、エリアは $2^N \times 2^N$ 個のセンシングブロックに分割される。これを $N$ th levelとする。ここで、 $N$ th levelにおける全てのブロックに1から $4^N$ まで番号を付け、 $j$ 番目のブロックの状態を表す変数として $q_{N,j}$ を定義する。 $q_{N,j}$ はセンシングされていれば1、そうでなければ0の値をとる。このとき、 $N$ th levelにおけるセンシングカバー率 $r_N$ は次式となる、

$$r_N = \frac{1}{4^N} \sum_{j=1}^{4^N} q_{N,j}. \quad (1)$$

- (2) 次に、 $N-1$ th levelについて考える。 $N-1$ th levelでは、エリアは $2^{N-1} \times 2^{N-1}$ 個のブロックに分割され、各ブロックには、 $N$ th levelで分割されたブロックが4個含まれる。この時、 $N-1$ th levelで分割された各ブロックの内の4個の $N$ th levelで分割されたブロックのうち、1個でもセンシング済みであれば、そのブロックが含まれる $N$ th levelで分割されたブロックをセンシング済みとし、この時の $r_{N-1}$ は次式となる、

$$r_{N-1} = \frac{1}{4^{N-1}} \sum_{j=1}^{4^{N-1}} q_{N-1,j}. \quad (2)$$

- (3) (2)の処理を1st levelまで繰り返す。
- (4) 全てのlevelにおけるセンシングカバー率の和を取り、最下層のすべてのブロックが $q_{N,j} = 1$ のときのMSCRが1になるように調整すると、MSCRは次式となる、

$$Q = \frac{1}{N} (r_N + r_{N-1} + \dots + r_1). \quad (3)$$

$r_N$ を用いず、より一般的にMSCRを表すと、

$$Q = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{1}{4}\right)^i \sum_{j=1}^{4^i} q_{i,j}, \quad (4)$$

である。

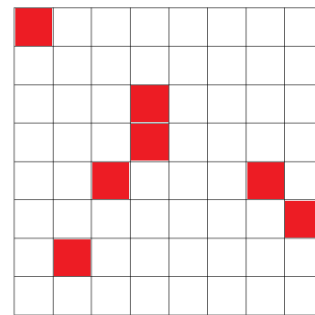


図2 3rd levelでのエリア分割

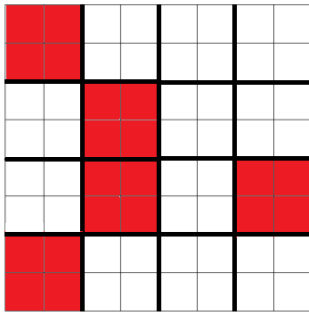


図 3 2nd level でのエリア分割

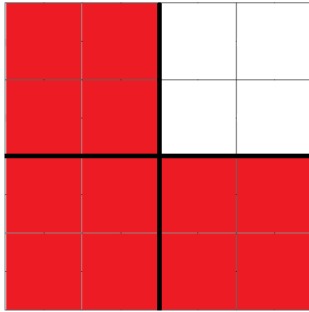


図 4 1st level でのエリア分割

以上の定義を用い、MSCR 計算の具体例を以下に挙げる。MSCR の深さ  $N = 3$  において、図 2 のようにエリアがセンシングされている時の MSCR の値を実際に求める。

まず 3rd level において、センシングブロックの総数は  $2^3 \times 2^3 = 64$  個であり、そのうちセンシング済みのセンシングブロックの個数は 7 個なので、

$$r_3 = \frac{7}{64} \quad (5)$$

となる。

2nd level においては、エリアは図 3 のように太線で分割される。この時、ブロックの総数は  $2^2 \times 2^2 = 16$  個であり、そのうち、センシング済みのブロックは 5 個なので、

$$r_2 = \frac{5}{16} \quad (6)$$

となる。

1st level においては、エリアは図 4 のように太線で分割される。この時、ブロックの総数は  $2^1 \times 2^1 = 4$  個であり、そのうち、センシング済みのブロックは 3 個なので、

$$r_1 = \frac{3}{4} \quad (7)$$

となる。

したがって、この時の MSCR の値は

$$Q = \frac{1}{3} \left( \frac{7}{64} + \frac{5}{16} + \frac{3}{4} \right) = 0.39 \quad (8)$$

となる。

## 4. 想定 UAV ネットワーク

我々の提案する MSCR は、UAV 間のネットワーク構成方

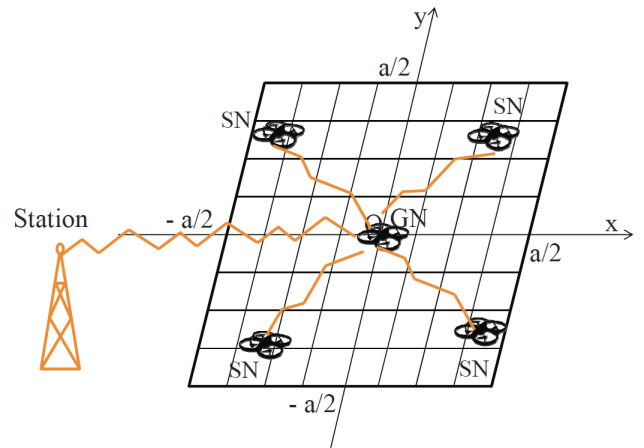


図 5 SN と GN の配置

法に依存しないが、本章では、具体的なネットワーク構成方法を決めて、MSCR 利用の意義を検証してみる。特に、UAV の動作および通信方式が、実際にセンシングデータを収集する地点で MSCR にいかに影響を及ぼすか調べることをとする。

本研究では、Sensor Node (SN) と Gateway Node (GN) の 2 種類の UAV を用いてエリアセンシングを行うものと想定する (図 5)。対象となるエリアは幾つかのエリアに分割され、それぞれのエリアに SN を 1 台ずつ割り当てる。SN は担当エリア内を移動しながらセンシングを行い、SN が取得したセンシングデータは GN を経由して遠隔局へ送信される。本章では UAV に関する仮定、SN の移動方式、SN-GN 間の接続方式について述べる。

### 4.1 UAV に関する仮定

SN および GN の機能を以下に示す

- Sensor Node  
センシング機能を持ち、無線によって他の UAV との近距離通信が可能である。
- Gateway Node  
センシング機能を持たず、無線によって他の UAV との近距離通信、遠隔局との遠距離通信が可能である。また、全ての UAV は GPS による位置情報の取得が可能であり、プログラムによって指定された座標へ自動で移動できるものとする。

### 4.2 SN の移動方式

以下に示す 3 種類の移動方式を考える。

- XY-sweep  
図 6 に示すように、担当エリアをジグザグに移動する。
- Eddy-sweep  
図 7 に示すように、担当エリアを外側から内側へ渦を描くように移動する。
- BFS

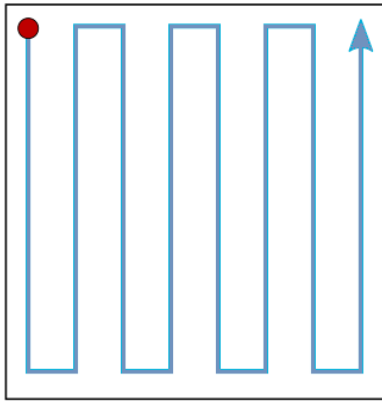


図 6 XY-sweep

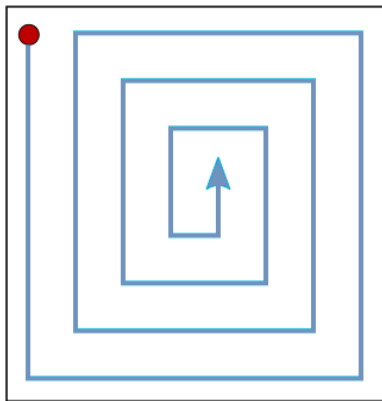


図 7 Eddy-sweep

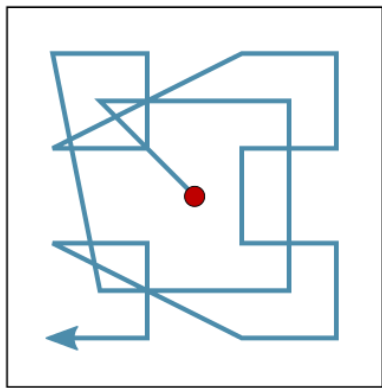


図 8 BFS

図8に示すように、担当エリアを Breadth First Search (幅優先探索) のアルゴリズムに従って移動する。アルゴリズムを表 1 に示す。

#### 4.3 SN-GN 間の接続方式

以下に示す 3 種類の接続方式を考える。

- 完全接続型 GN 固定方式  
SN は GN と常に通信が可能であり、GN はセンシングエリアの中央で静止している。SN はセンシングを終了後、直ちに GN へセンシングデータを送信する。
- 不完全接続型 GN 移動方式

表 1 BFS アルゴリズム

1.	$result = []$ と初期化する
2.	$depthMax = 5, depth = 1, dx = 0, dy = 0$ に初期化する
3.	$W = AreaW, H = AreaH, order = 0$ を代入
4.	BFS( $depth, dx, dy, W, H, order$ ) if $depthMax < depth$ break $depth += 1$ $result.add(depth - 1, dx + W/2, dy + H/2, order)$ $result.add(BFS(depth, dx, dy, W/2, H/2, order))$ $result.add(BFS(depth, dx + W/2, dy, W/2, H/2, order))$ $result.add(BFS(depth, dx + W/2, dy + H/2, W/2, H/2, order))$ $result.add(BFS(depth, dx, dy + H/2, W/2, H/2, order))$ end BreadFirstSearch
5.	UAV は $result$ に記載された順番でポイントを訪問する

SN と GN は、DTN (Delay Tolerant Network)[1] の考え方にのっとり、お互いに通信可能範囲に入った時のみ通信が可能であり、GN は SN の担当エリアを巡回する。SN は GN と通信可能になった時、GN へ保持しているセンシングデータを送信する。

- 不完全接続型 GN 固定方式  
SN と GN はお互いに通信可能範囲に入った時のみ通信が可能であり、GN はセンシングエリアの中央で静止している。SN は保持しているセンシングデータの数が一定数に達する度に GN と通信可能な地点まで移動し、GN へ保持している全てのデータを送信する。

### 5. シミュレーション

4 章で述べた 3 種類の SN の移動方式と 3 種類の SN と GN の接続方式の組み合わせによる計 9 パターンにおいてセンシングのシミュレーションを行う。GN が SN からデータを受け取った時刻における MSCR の値を算出し、パターンごとの MSCR の時間推移の相違を検証する。

#### 5.1 シミュレーションシナリオ

シミュレーションのパラメータを表 2 に示す。本シミュレーションでは、 $1024m \times 1024m$  の広さのエリアを  $2 \times 2$  分割し、SN を 1 台ずつ各エリアに割り当てる (図 5)。各 SN には特定のポリシーに従い、センシングポイントと訪れる順序が設定される。各 SN は設定されたセンシングポイントを  $5m/s$  の速度で設定された順序で訪問する。センシングポイントに到着した SN は 10 秒間停止してセンシングを行い、センシング終了後、移動を再開する。SN と GN がお互いに通信可能範囲内に入った時には SN は保持している全てのセンシングデータを GN へ送信する。GN は SN からデータを受信した時、直ちに受信したデータを遠隔局へ送信する。設定された全てのセンシングポイントのデータが遠隔局へ送信されればエリアセンシングを終了とする。

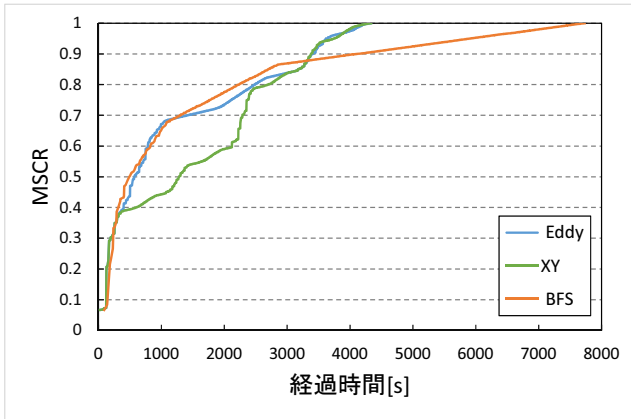


図 9 完全接続型 GN 固定方式における MSCR の時間推移

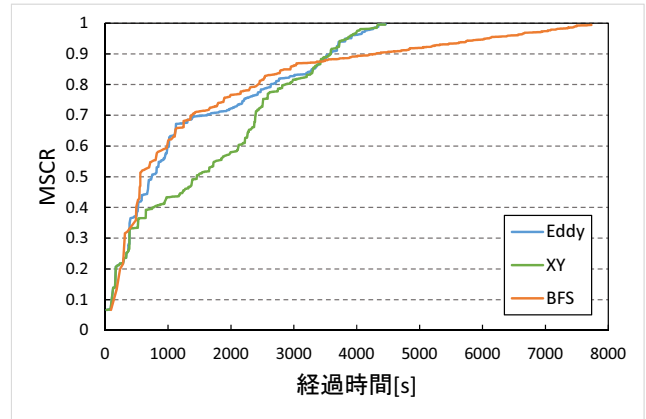


図 10 不完全接続型 GN 移動方式における MSCR の時間推移

### 5.2 シミュレーション結果

シミュレーション結果を以下に示す。図 9, 10, 11 より、どの接続方式においても、BFS の MSCR の上昇速度は初めは最も速いが、0.85 に達したあたりからは上昇が遅くなり、1 に達する時刻は最も遅い。これは、MSCR の 5th level から 1st level までの各ブロックを順に訪問するためであると考えられる。また、Eddy-sweep と XY-sweep はほぼ等しい時間で MSCR が 1 に達するが、途中、XY-sweep の MSCR の上昇速度が Eddy-sweep と比較して遅くなっている。これは MSCR の 2nd, 3rd level でのカバー率の上昇が XY-sweep よりも Eddy-sweep の方が速いためであると考えられる。不完全接続型 GN 移動方式と不完全接続型 GN 固定方式は完全接続型 GN 固定方式よりも全体的に MSCR の上昇の速度が遅くなっている。

これは完全接続型 GN 固定方式では SN と GN は常に通信が可能であるため、SN が取得したデータを GN へ直ちに送信できるのに対し、不完全接続型では SN と GN がお互いに通信可能範囲に入らないと通信が不可能であるため、SN がデータを取得してから GN へ送信されるまでの遅延が発生するためであると考えられる。また、不完全接続型 GN 移動方式は SN が移動している GN と通信可能になった時に GN へデータを送信するため、SN は特別な移動を必要としないのに対し、不完全接続型 GN 固定方式では SN が GN と通信可能な地点まで定期的に移動するため、特に遅延が大きくなる。

表 2 シミュレーションパラメータ

パラメータ項目	値	
センシングエリアのサイズ	1024 × 1024[m]	
1 台の SN の担当エリアのサイズ (AreaW × AreaH)	512 × 512[m]	
MSCR の深さ (depthMax)	5	
センシングブロックの最小サイズ	32 × 32[m]	
UAV の移動速度	5[m/s]	
センシング時間	10[s]	
GN ヘデータを届けに行く頻度	5[個/回]	
UAV 間の通信可能距離	完全接続型 GN 固定	724[m]
	不完全接続型 GN 固定	100[m]
	不完全接続型 GN 移動	362[m]

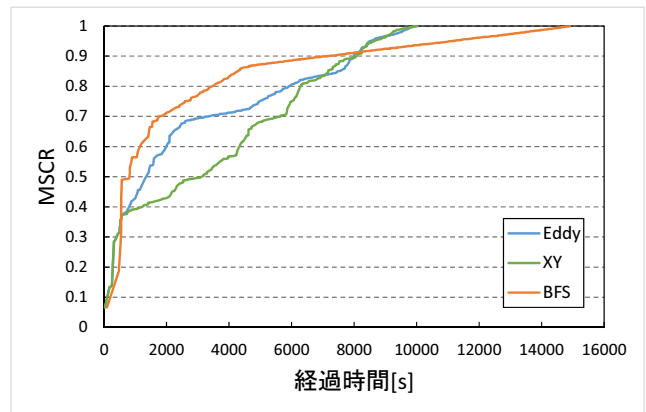


図 11 不完全接続型 GN 固定方式における MSCR の時間推移

### 5.3 考察

シミュレーション結果より、短時間でエリア全体を大まかにセンシングしたい場合には BFS が優れており、多少時間がかかってでも、きめ細かくエリア全体をセンシングしたい場合には Eddy-sweep 方式が優れていると考えられる。また、GN は一箇所に固定するよりも、SN の担当エリアを巡回するように移動した方がエリアセンシングにかかる時間を短縮できることが分かる。

今回のシミュレーションでは、ある限られた数種類の移動センシングパターンにおける MSCR を評価したに過ぎないが、XY-sweep と Eddy-sweep の比較から UAV の移動方向が一軸方向に縛られるのではなく常時平面全体を向いている方が MSCR の上昇が速いこと、Eddy-sweep と BFS の比較から最小単位の移動ごとにセンシングを行うのではなく間欠的にセンシングを行う方が MSCR の上昇が速いこと、が確認できた。

MSCR により、複数階層カバー率をとらえることが可能になることが示唆される。MSCR 上昇率から演繹的に移動センシングパターンを導き出すことは困難であるが、あらゆる可能性をシミュレーションで計算することは可能である。実際のエリアセンシングにおいては、MSCR だけでなく、エネルギー消費、飛行時間など他の要素も考える必

要がある。MSCR 上昇率を最適化するよりも、他の要素に加えて指標の一つとして最適化問題を考えることが適切であると考える。

## 6. 関連研究

これまでに UAV を利用した応用の試みは、森林の火災モニタリング [2], 大気汚染の状況調査 [3]. 農作物生育状況のモニタリング [4], 放射能汚染モニタリング [5], 災害マネジメントと市民の安全アプリケーションの実験 [6] 等多岐にわたっている。多くの応用では、センシング、モニタリングに留まっているのに対し、Bernard 等 [7] は、自律的に協調しあう UAV を用いて災害救助支援まで考慮している。

Jawhar 等 [8] の研究では、石油パイプラインなどの直線形状をした地上にある物体に対して設置されたセンサ群から、UAV がデータを収集する方式を提案する。これは、地上センサ間で無線通信を行うよりも電力消費を抑制できることを狙ったものである。同様に、UAV をデータ収集媒体として用い、エネルギー消費、ビットエラー率、UAV 飛行時間のすべてを最適化することを図るアルゴリズムも提案されている [9]。

DDAS[10] では、完全にデータ駆動で複数 UAV の環境センシングの動作を決める。シミュレーションが同時進行で行われていて、UAV の取得するデータはシミュレーションの入力として与えられ、データが必要とされる場所へ UAV を誘導する。Wang 等 [11] は、UAV をモバイルアドホックネットワークの中継ノードとして配置する場合の最適化問題をタブー探索とヒューリスティクスで解く。UAV 以外に、UGV (Unmanned Ground Vehicle) も含めて、障害物がある場合も考慮した通信の最適化問題が、Burdakov 等 [12] に解かれている。その他、UAV によるアドホックネットワークの研究はサーベイ論文として、文献 [13] で述べられている。以上のように、我々の研究に関連する研究は多くあるが、我々は、さまざまな空間解像度を考慮したセンシングカバー率を論じている点が異なる。

## 7. おわりに

本論では、複数の UAV が協調分担して対象エリアを観測する問題において、センシングの即時性と詳細性を同時に扱うことが可能な方法として、階層的な複数の空間粒度を考慮したセンシングカバー率である MSCR (Multi-Scalesensing Coverage Ratio) を提案した。また、SN の 3 通りの飛行移動パターンと SN と GN の 3 通りの通信接続パターンの組み合わせによる計 9 通りの協調センシングパターンにおいて、MSCR の時間発展をシミュレーションにより調査した。シミュレーション結果から、幅優先探索である BFS (Breadth First Search) がどの接続方式においても高い時間立ち上がりが見られることが分かった。特

に、不完全接続 GN 固定方式において BFS 方式が最も顕著に時間立ち上がりが高くなった。しかしながら、BFS 方式では MSCR が 0.85 を超える辺りから増加率が減少し、他の XY-sweep 方式や Eddy-sweep 方式に追い抜かれることが分かった。これは、BFS 方式ではまず空間階層の浅いエリアがカバーされることを優先してセンシングを行い、ある階層でのカバー率が充足された時点で、次に深い階層の未センシングのエリアを優先させてセンシングするという特性によるものである。このシミュレーション結果により、当初の予測していたとおりの BFS の有効性が示されるとともに、MSCR が即時性と詳細性を同時に扱えるエリアカバー指標としてふさわしいことが示されたと言える。実際のエリアセンシングにおいては、MSCR だけでなく、エネルギー消費、飛行時間など他の要素も考える必要がある。今回提案する MSCR はこれらの他の要素に加えるべき指標の一つとして最適化問題を考えることが適切であると考えられる。

今後の展開として以下のような拡張が考えられる。まず、複数 UAV を用いて広域エリアを探索するアプリケーションにおいて、ある空間粒度における情報が際立って必要であるということが考えられる。このような問題においては、空間階層ごとのエリアカバー率に重み付けを行うことで MSCR をよりアプリケーションに適したカバー率指標として運用することが可能となる。その他には、センシングエリアにおいて不確実性が時間発展するような系はより現実的であるといえる。また、MSCR 最大化規範に基づく SN 移動アルゴリズムなどの、UAV の適応的飛行計画技術などの展開も考えられる。

## 参考文献

- [1] S. Jain, K. Fall, and R. Patra, "Routing in a delay tolerant network," Proc. of the ACM Conf. on Applications, Technologies, Architectures, and Protocols for Computer Communications, pp.145–158, 2004.
- [2] L. Merino, f. Caballero, J.R. Mart inez-de Dios, I. Maza, A. Ollero, "An unmanned aircraft system for automatic forest fire monitoring and measurement," Journal of Intelligent & Robotic Systems, vol.65, no.1-4, pp.533–548, 2012.
- [3] B.A. White, A. Tsourdos, I. Ashokaraj, S. Subchan, and R. Zbikowski, "Contaminant cloud boundary monitoring using network of UAV sensors," Sensors Journal, IEEE, vol.8, no.10, pp.1681–1692, 2008.
- [4] J. Valente, D. Sanz, A. Barrientos, J.D. Cerro, A. Ribeiro, and C. Rossi, "An air-ground wireless sensor network for crop monitoring," Sensors, vol.11, no.6, pp.6088–6108, 2011.
- [5] J. Han, Y. Xu, L. Di, Y. Chen, "Low-cost Multi-UAV technologies for Contour Mapping of Nuclear Radiation Field," Journal of Intelligent and Robotic Systems, vol.70, no.1-4, pp.401–410, 2013.
- [6] I. Maza, F. Caballero, J. Capitan, J. Martinez-de Dios, and A. Ollero, "Experimental results in multi-UAV coordination for disaster management and civil security



- applications,” *Journal of intelligent & robotic systems*, vol.61, no.1-4, pp.563–585, 2011.
- [7] M. Bernard, K. Kondak, I. Maza, and A. Ollero, “Autonomous transportation and deployment with aerial robots for search and rescue missions,” *Journal of Field Robotics*, vol.28, no.6, pp.914–931, 2011.
- [8] I. Jawhar, N. Mohamed, J. Al Jaroodi, and S. Zhang, “A framework for using unmanned aerial vehicles for data collection in linear wireless sensor networks,” *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, vol.74, no.1-2, pp.437–453, 2014.
- [9] D.T. Ho, e. Grotli, S. Shimamoto, and T. Ajohansen, “Optimal relay path selection and cooperative communication protocol for a swarm of UAVs,” *Proc. of IEEE Globecom Workshops*, pp.1585–1590.
- [10] L. Peng, D. Lipinski, and K. Mohseni, “Dynamic data driven application system for plume estimation using UAVs,” *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, vol.74, no.1-2, pp.421–436, 2014.
- [11] H. Wang, D. Huo, and B. Alidaee, “Position unmanned aerial vehicles in the mobile ad hoc network,” *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, vol.74, no.1-2, pp.455–464, 2014.
- [12] O. Burdakov, P. Doherty, K. Holmberg, and P.M. Olsson, “Optimal placement of UV-based communications relay nodes,” *Journal of Global Optimization*, vol.48, no.4, pp.511–531, 2010.
- [13] I. Bekmezci, O.K. Sahingoz, and S. Temel, “Flying ad-hoc networks (fanets): a survey,” *Ad Hoc Networks*, vol.11, no.3, pp.1254–1270, 2013.