

# 災害復旧支援のためのアドホックネットワーク構築手法の研究

代表研究者  
共同研究者

伊藤 実  
柴田 直樹

奈良先端科学技術大学院大学 教授  
奈良先端科学技術大学院大学 准教授

## 1 はじめに

近年、地震、噴火や異常気象など世界中において大規模な自然災害が多発している。災害地における救助活動では、傷病者の位置情報やバイタルサインを用いた AID-N(Advanced Health and Disaster Aid Network) [1]や電子トリアージシステム[2]など、最先端の IT 技術を駆使して救助の効率を上げるための仕組みが研究開発されている。これらのシステムは無線ネットワークが使える環境を前提としている。そのため、被災地において通信インフラの復旧は急務の 1 つとなっている。通信インフラを素早く構築するための手段として、アドホックネットワークが挙げられ、近年盛んに研究が行われている。

アドホックネットワークとは、基地局を必要とせず無線通信ノードだけでネットワークを構成する技術であり、各ノードは通信範囲内に存在する隣接ノードと直接通信を行ったり、遠方に存在するノードは中間ノードの中継を介して通信を行ったりする。専用のインフラ機器や高度な知識を必要とせず、安価な市販の通信機器を用いて構築できるため、大規模な災害時において有効な通信補助手段になると見込まれている。アドホックネットワークを屋内に配置する手法はこれまでに多く提案されている[3][4]。被災地における救助活動では、危険な建物内で被災者の探索や救出を行うために建物内部に多数のノードを設置する必要がある。また、傷病者に治療を行う目的のため建物全体を無線ネットワークでカバーする必要もある。非常時における建物内部を対象としたものではパンくず法[5][6]がある。これらの手法は建物内に入って逐一ネットワークノードを配置していくというものであり、複数階建ての建物では非常に手間がかかり、救助活動の妨げとなる。そのため、建物内に入ることなく建物外から少ない時間で室内をカバーする手法が必要である。

本論文では、建物外から室内をカバーする無線ネットワークの構築法を目指し、それを実現するためのネットワークノードの配置手法を提案する。本手法のアイデアとして、風船にスマートフォンなどのバッテリー駆動のネットワークノードを結びつけて空中に配置を行う。それにより、無線電波はほぼ減衰することなく窓ガラスを貫通し、室内に配置する場合とあまり変わらない水平方向のカバー範囲を提供する。加えて、屋外に配置することによって天井や床の影響を受けずに見通し範囲を広く取ることができるため、1つのノードで複数階をカバーすることができる。屋内の通信ノードの位置推定への利用やネットワークの故障耐性の向上などの用途も考え、カバーされる領域が  $k$  個以上のノードに被覆される  $k$  重被覆を保証し、その上でノード数が最小になる配置の最適化を目指す。本手法は風船を利用し屋外の空中に配置するため、三次元の配置の組み合わせ最適化問題となる。これは NP 困難な問題のため[7]、本稿では遺伝的アルゴリズムをベースとしたヒューリスティックな解法を用いて近似解を求める。また、既存の減衰予測モデル[8][9][10]は本稿で想定している環境と大きく異なり、有効に利用できないため、提案手法においてノードの通信可能範囲を算出する際、実地実験に基づき、独自に定式化した減衰予測モデルを用いて行う。

提案手法の性能を評価するため、ランダム配置、局所探索配置、パンくず法と比較を行った。シミュレーションの結果、他の手法と比べて最大 50%のネットワークノード数を削減できることを確認した。次にシミュレーションの正当性を確認するため、シミュレーションで得られた配置座標に実際にネットワークノードの配置を行い、電波の受信強度(RSS)を測定しシミュレーション上の RSS と比較を行った。比較の結果、カバーレージの範囲及び RSS はシミュレーションとほとんど同じであることを確認した。最後に実環境下に 3-cover となるようにネットワークノードを配置し、RSS に基づいた 3 点測量を用いて位置推定の実験を行った。実験の結果、位置推定の平均誤差は 3.86m となった。

## 2 関連研究

ネットワークノードの配置手法の研究には、ネットワークのライフタイムの最大化やネットワークノード数の最小化、故障耐性の向上、通信速度の最大化など様々な目的に対して最適化を行っているものがある。被災地のような環境下でネットワークノードの配置を行う場合、ノード数が限られていることが考えられる

ため、カバレッジの最大化や決められたエリアをカバーするのに必要なノード数の最小化など、限られた資源で効率よくカバーすることが求められる。そのため、本章ではネットワークノード数の最小化に取り組んでいる研究においてそれぞれ二次元空間、三次元空間を対象としたものについて述べる。次に、風船や気球を用いてネットワークノードの配置を行う研究について述べ、最後に本研究の位置づけを示す。

### 2-1 二次元のノード配置法

Dhillon らは、エリアをグリッドに近似して配置する手法[11]を提案している。彼らはセンサーの周囲の影響や検出したデータの不正確さを考慮したセンシングモデルを定式化している。このモデルはセンサーが配置された格子点の識別及び障害物の検出に用いられる。図[1]に例を示す。図の格子点 14 に配置されたセンサーは格子点 11 をカバーすることはできない。同様に格子点(10, 15), (6, 3), (2, 7)の組み合わせもカバーすることができない。センサーの配置場所はグリーディなアルゴリズムによって求められる。このアルゴリズムは目標とするカバレッジを達成するか、センサーの数が上限に達するまで反復的に配置を行っていく。

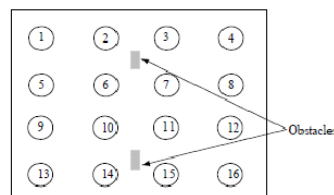


図 1 Dhillon らのセンシングモデルの例

Wang らは、障害物を考慮したエリア分割を行うノードの配置手法[12]を提案している。この手法では、ノードの通信範囲内に障害物が存在する場合、その障害物より以遠の範囲は通信範囲外として取り扱うため、配置する場所によってノードの通信範囲が異なる。配置するエリアを障害物の影響を受けにくい場所と受けやすい場所に分け、それぞれの場所に応じた配置を行うことで効率の良い方法を実現している。

Lin らは GASA[13]を用いたノードの配置手法[14]を提案している。この手法ではノードの通信範囲は円形として取り扱っており、円を隙間なく詰め込むパッキング問題として取り組んでいる。焼きなまし法と遺伝的アルゴリズムを交互に適用することでノード数が最小となるような組み合わせを探索している。約 150 世代の試行で最適解に近い解を見つけることに成功している。

これらの研究はいずれも高さ方向が考慮されていない二次元平面を対象としており、建物全体をカバーするには、各階ごとに配置を行わなければならない。そのため、建物全体としてみた場合、設置のコストが高くなり、また必要なノード数が多くなることが考えられる。

### 2-2 三次元のノード配置法

高さ方向を考慮した物として、Carle らはノードの通信範囲をひし形十二面体[8]に、Decayeux らは六角柱[9]に、Nazrul らは切頂八面体[10]にそれぞれ見立て、対象空間へのパッキング問題に定式化し、ノードの配置を行うことで必要なノード数を最小化する手法を提案している。しかし、これらの手法では対象空間内の配置が行えない場所を一切考慮しておらず、また、すべてのノードの通信範囲が同じであるという前提のため、障害物が多く存在する環境に適用することは困難である。

### 2-3 被災地への通信網提供手法

被災地へ無線ネットワークを提供する手段として風船や気球を使った手法が研究されている。手塚らは WiMax 機器を取り付けたバルーンを被災地から携帯電話の回線網が使用可能な地域まで配置することで中継ネットワークを構築する手法[18]を提案している。この研究では、建物の倒壊度合いと網容量を考慮したシミュレーションにより中継ネットワークの実用性について検討している。

間瀬らは気球を用いて上空にネットワークノードやアンテナを上げる手法[19]を提案している。気球は数 km 間隔に上げられ、広い範囲へ通信網を提供することが可能となっている。また Shibata らはネットワークノードに加えてビデオカメラなど様々な機器を気球に搭載し、無線ネットワーク機能の他にビデオストリー

ミングなどの機能を加えた手法[20]を提案している。これらの研究は実際に気球を打ち上げ無線ネットワークを構築しており、空中にネットワークノードを配置することで一時的な通信網が提供できることを検証している。しかし、この手法は設置に時間がかかることや専用設備が必要なこと、広範囲を対象としているため建物内などの細部のカバーを保証していないことなど、救助活動の現場には不向きであると考えられる。

## 2-4 本研究の位置づけ

被災地での無線ネットワークは、救助活動における屋内位置推定の利用や故障耐性を考慮したものが求められる。本稿で目指す無線ネットワークは、対象空間を  $k$  個のノードからカバーされていることを保証することで位置推定の精度や故障耐性を向上させる。また、風船を用いて屋外に配置を行うため余震に強く、配置の手間も屋内の配置と比べると少ない。ネットワークノードの配置では  $k$  個のノードからカバーされる、屋外に配置を行うという条件を満たした上でノード数が最小となる方法について提案する。ノードの配置方法に用いる電波減衰モデルについては実測データを基に独自に定式化したモデルを用いる。

## 3 問題設定

### 3-1 提案手法の概要

複数階建てのビルの内部を無線電波でカバーするために、風船に結びつけたネットワークノードを、ビル周囲の空中に配置する。そこで、ノード設置可能な場所や、ビルの材質（外壁、内壁、天井、床）による影響も踏まえ、本配置問題に対して以下の通りに利用可能な機材と情報を仮定して問題定義を行う。

### 3-2 仮定

(1) ネットワークノードは建物外に配置を行う際に適用する。糸の長さを調節することで任意の高さに配置が可能なものとする。風による風船の揺れは、風船を三箇所の地点からロープで固定することによって無視できる程度にまで抑えられるものとする。この仮定は、実際に風船を上げ、風船の揺れを検証する予備実験より得られたものである。予備実験では風船の高さ約 20m まで確認している。ネットワークノードはスマートフォンなどのアドホック通信機能を持つバッテリー駆動の機器とする。ネットワークノードの送信電力はバッテリーが完全に枯渇するまで常に一定であるものとし、受信感度などノードの性能に差異はないと仮定する。ネットワークノードと通信可能な最小電波強度を  $T[\text{dBm}]$  とする。ネットワークノード  $A$  の電波カバー範囲を  $R_A$  で表したとき、 $R_A$  に含まれるすべての地点は  $A$  から送信電力強度が  $T[\text{dBm}]$  以上である。送信機を  $A$ 、受信機を  $B$  としたときの  $AB$  間の電波強度の算出には、次章で示す減衰予測関数  $L(A, B)$  を用いる。

(2) 対象とする建物として、被災地のビルなどを想定する。本稿では、一辺の長さが  $1$  の立方体のセルの集合を用いて建物を表現する。各セルは対象建物のそれぞれの位置に対応し、ユニークな ID を持つ。すべてのセルは空気、内壁、外壁、天井（床）いずれかの材質の属性を  $1$  つ有する。セルの示す位置に複数の材質がある場合、占める割合が最も高い材質をセルの属性とする。セル  $1$  つ分を被覆判定の最小単位とする。

### 3-3 定式化

すべてのセルのうち、要求された割合以上のセルを  $k$ -cover するために必要なノード数を最小化する問題について定式化を行う。

入力以下の通り。

- 地形データ：対象建物の間取り図や、建物周辺の風船が設置可能な場所
- 電波減衰予測関数  $L$ ：空気、壁、窓など建物の材質を貫通する際、無線電波の減衰具合を求めるモデル
- 必要な電波被覆数  $k$
- 要求された被覆セルの割合  $s$

出力はネットワークノードの配置場所およびノードの個数である。

制約条件は、全セルの内、割合  $s$  以上が  $k$  個以上のノードでカバーされていることである。

目的関数は、要求された割合  $s$  以上のセルを  $k$ -cover するために必要なノード数を最小化することである。

## 4 電波減衰予測関数

ネットワークノードの通信可能範囲を求めるために、周囲の環境データを元に電波強度を予測する伝搬減衰モデルが必要である。本稿では屋内環境のカバーを対象とするため、より正確な結果を得るためには電波伝搬の障害となる壁、床、天井などが考慮されているモデルを使用しなければならない。既存の伝播モデルとして、ECC-33 モデル[8]やSUI モデル[9]、COST-231 モデル[10]、Okamoto らが提案している建物による減衰に焦点を当てたモデル[23]、Kitao らが提案しているモデル[24]などが挙げられる。これらのモデルはアクセスポイントと観測点の直線距離をベースとしたものであり、間にある障害物や電波の回り込みが考慮されていない。そこで本稿では、電波の回り込みと壁の枚数を考慮したモデルを提案する。一般に、電波の回り込みを考慮する場合は入力として詳細な建物のデータが必要となる。しかし、被災地での使用を考えると、建物の詳細な間取り図が得られない可能性がある。そのため提案する電波減衰モデルでは、簡単な間取り図からでも得ることのできるパラメータを用いて電波の回り込みを考慮し、既存手法より精度の高いモデルの提案を行う。

なお、[25][26]でパラメータの1つとして取り上げられている Floor height gain については本稿では考慮しない。このパラメータは地面からの反射や電波がネットワークノードから同心球状に放出されないことを考慮するためのものであると考えられる。しかしながら、今回行った実験では高さや電波強度について相関を得ることができなかった。そのため、送信機と受信機間の距離及び障害物をベースとしたモデルを構築する。

### 4-1 提案する予測関数

本稿で提案する測定点 A と B 間の電波減衰は、距離による減衰  $Loss_{distance}$  と障害物による減衰  $Loss_{obstacle}$  の和の形で表される。

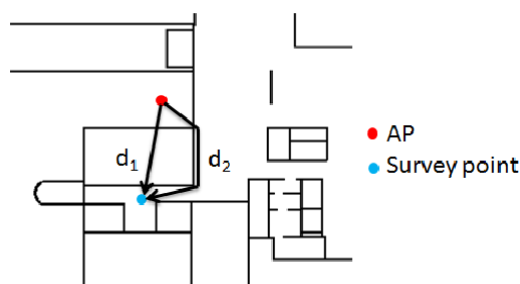
提案するモデルでは、測定点間の距離による減衰を、単純な距離による減衰だけでなく、電波の回折により回りこみの影響も考慮するために、AB間の直線距離  $d_1$  と、障害物の数が最も少ない経路(回りこみ距離)  $d_2$  の2つから、減衰を予測する。AB間に障害物がない場合、 $d_1=d_2$  となり、そうでない場合は  $d_1 < d_2$  となる。係数  $\alpha, \beta, \gamma, \delta$  は、計測により得られた測定値に対して回帰分析を行って得る。 $Loss_{distance}$  の式を以下に示す。

$$Loss_{distance} = \alpha \log(d_1) + \beta(d_2 - d_1) \log(d_2) + \gamma \log(d_2) + \delta$$

$Loss_{obstacle}$  は AB 間の直線距離  $d_1$  上の障害物による減衰を表す。AB を結ぶ線分上にある、障害物(壁など)の個数を  $O$  で表し、各障害物の減衰係数を  $\rho$  で表す。 $Loss_{obstacle}$  の式を以下に示す。

$$Loss_{obstacle} = \sum \rho_i O_i$$

本稿で対象とする環境の例を下図に示す。



赤い点はアクセスポイント (AP), 青い点は観測点を表し, その間の直線距離は  $d_1$ , 回り込み経路は  $d_2$  である.  $d_1$  は外壁 1 枚と内壁 1 枚を貫通しているのに対し,  $d_2$  は外壁 1 枚のみを貫通している.  $Loss_{obstacle}$  は  $d_1$  の経路上に存在する障害物を対象とする. この例では外壁 1 枚と内壁 1 枚である.

## 5 提案手法

三次元空間における無線ノード配置最適化問題は, NP 困難である. 最適解を実用時間で求めることは困難であるため, 本論文では, 遺伝アルゴリズムに基づくヒューリスティックな解法を提案する.

本研究で求められていることは,  $k$ -cover されているセルの総数が要求された割合  $s$  以上となるように, ネットワークノードを三次元上に複数配置することである. 提案手法では, 最も少ないネットワークノード数で制約を満たすパターンを作る配置組み合わせを探索する.

提案手法では,  $k$ -cover を満たすセルの総数が要求された割合  $s$  以上となるように, ネットワークノードを配置することを, ノードの数を減らしながら, 繰り返す. 十分な数のノード数から探索を開始し, 制約を満たす解が見つかった場合ノード数を減らして探索を再開する. これを制約を満たす解が見つからなくなるまで続ける. 初回探索時にランダム初期集団を生成して探索を開始し, 解が見つかった場合はその解の集団からノード数を 1 つ減らした解候補の集団を生成し, 次の初期集団として利用する.

### 5-1 アルゴリズムの詳細

提案するアルゴリズムの擬似コードを Algorithm1 に示す.  $n$  はノード数を,  $N$  は解候補の個数,  $P$  は解候補の集合, 解  $P'$  は暫定解,  $L$  は配置可能な場所の集合である.

本手法では, 各ノードの縦, 横, 高さの座標を整数値として持つベクトルを遺伝子とし, 遺伝子のリストを染色体とする. リスト内の遺伝子の順番で表現型や評価値が変わることはない.

関数 `initialPopulation()` では初期解の生成を行う. ノード数  $n$  の解候補を  $N$  個生成する. 各ノードの座標は一様な乱数によって決定される. 関数 `Search` は, 上記で説明した, ネットワークノードの配置組み合わせを探索する. 関数 `DecreaseNode` では, 求めた解の集合を次に `Search` 関数を実行するための初期解として使用するために, 引数で受け取った解集団のノード数を 1 つ減らして新しい初期集団を生成する操作を行う. ノード数の削減は  $n$  個の中からランダムに 1 つ選択して削除される.

関数 `Search` は, ネットワークノードの数が与えられたときに, それらの配置を GA に基づいた手法で探索する. 探索を実行して制約を満たす解が見つかった場合は探索を終了して解の集団を返し, 決められた世代数の間に解が見つからない, もしくは探索が収束してしまった場合は空集合を返す.

Algorithm2 に, このサブルーチンのアルゴリズムを示す.

以下に, 関数 `Search()` 内で呼ばれる各関数を説明する.

`Mutate()`: 遺伝的アルゴリズムの突然変異の部分に該当する. 新しくランダムに配置座標を付与した遺伝子を 1 つ生成し, 染色体中の遺伝子から 1 つランダムに選び交換する. 交換前と交換後の評価値を比較し, 交換後の評価値が高い場合は染色体を更新する. この操作はすべての染色体に対して 3% の確率で行われる.

`LocalSearch()`: 解候補集団  $P$  の内, 評価値の高い上位 5 つの染色体に対し, 局所探索を行う. 全ての遺伝子に対して定められた範囲内でランダムに座標を移動させ, 評価値が更新されれば上書きを行う.

`Crossover()`: 交叉方法として, 一様交叉を用いる. 通常の一様交叉では一定の確率で遺伝子を交換するかどうかを決めるが, 本手法では収束を早くさせるために交換されやすいノードを偏らせる. その際, ある程度評価値の高い解にするために, 良い位置に置いてあるノードが交換されやすくなるようにする. 交叉を行う確率は遺伝子, つまりノードが単体でカバーしているセル数によって決定される. あるノード  $ap$  が単体で覆うことができるセルの数を  $ap_{cover}$ , セルの総数を  $m$  とすると,  $ap_{cover}/m$  の確率で交換する良い位置に置いてあるノードは交叉される確率が高くなる. 提案手法では各  $n$  に対して段階的に探索を行なっていくため, この手法を取ることによって  $n$  が十分大きい初期段階での計算時間の短縮が期待できる. 交叉確率を決めるための遺伝子は, 交叉を行う 2 つの染色体のうち, 評価値の高い方から参照するものとする. また, 本手法

では染色体のリスト内に同じ遺伝子が現れてはならない。そのため、交叉を行う前に2つの染色体に同じ座標の遺伝子が含まれる場合は事前にリスト内の順番が同じになるようにソートしておき、仮に交換が行われても生成された染色体のリストはすべてユニークになるようにする。表現型が同じ染色体同士で交叉を行った場合、子供は必ず親と同じ表現型になる。

Evaluate() : k-cover を満たすセルの割合を染色体の評価値とする。ネットワークノードの位置に従い、各セルがカバーされているかを判定し、k-cover されているセルの割合を求める。

Converged() : 解の評価値が一定世代(10)の間更新されなかった場合に、探索が収束したと判定し、探索を終了する。

Select() : 交叉により生成された染色体の数を減らす淘汰を行う。ランダムに解候補2つを選択し、評価値の高い方を残すトーナメント選択により解の選抜を行う。交叉を x 回行った場合、解集団の個数は  $N+2x$  個になっている。この操作では解集団の個数が  $N$  になるまで行われる。

---

**Algorithm 1** Pseudocode for the Proposed Algorithm

---

```
1: Parameter :  $N$  = Number of elements
2: Input :
3:  $n$  = Number of nodes in a solution candidate
4:  $L$  = Set of deployable location
5:
6: //Generate set of initial solution candidates
7:  $P = \text{InitialPopulation}(n, N, L)$ 
8:
9: //Search better solution candidates until convergence
10: while true do
11:   //Generate population of the next generation
12:    $P' = \text{Search}(P)$ 
13:
14:   //if Search() returns  $\emptyset$ , convergence is detected
15:   if  $P' = \emptyset$  then
16:     break
17:   end if
18:   //generate a new candidate set by randomly removing a node from each
   solution candidate in  $P'$ 
19:    $P = \text{DecreaseNode}(P')$ 
20: end while
21: return the best solution in  $P$ 
```

---

---

**Algorithm 2** Pseudocode for Search function

---

```
1: Input :
2:  $P$  = Population
3:  $M$  = Set of all cells need to be covered in the building
4:
5: while Number of generations  $\leq 50$  do
6:   //Solution candidates are random changed to prevent convergence to local
   optima
7:   Mutate( $P$ )
8:
9:   //Local search is performed to speed-up convergence
10:  LocalSearch( $P$ , 5)
11:
12:  Crossover( $P$ )
13:
14:  Evaluate( $P$ ,  $M$ )
15:
16:  //If no new candidate with higher score appears for 10 generations, finish
   the search
17:  if Converged( $P$ , 10) then
18:    return  $\emptyset$ 
19:  end if
20:  //Tournament selection is performed to the set of solution candidates
21:  Select( $P$ )
22:
23:  if the best pattern in  $P \geq s$  then
24:    return  $P$ 
25:  end if
26: end while
27: //no solution
28: return  $\emptyset$ 
```

---

## 6 評価

提案手法の性能を評価するために、複数のベンチマーク手法を設け、比較実験を行った。さらに実機実験を用いて提案手法の有効性を確かめた。

対象建物として、奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究棟 1F-7F を利用した。縦、横、高さはそれぞれ 110m, 80m, 28m である。被覆判定を行う場所は建物内とし、ノードは建物外にのみ配置可能とする。セル 1 辺の長さは実験遂行の便利上 0.96m とし、電波強度の閾値  $T$  は Cisco 社が公表している Radio Sensitivity[28]よりビットレート 6Mbps を維持するのに必要な -86dBm とした。シミュレーションのプログラムを実行するコンピュータの環境は以下の通りである。

CPU: Intel Core i7 920 (2.66GHz)

Memory: 12 GB

OS: Windows 7 Professional x64

プログラミング言語: Java SE 1.6

最初の評価実験として、与えられたカバー率を満たすために必要となるノード数の比較をシミュレーションを用いて行った。次にシミュレーションの正当性を確認するために、シミュレーションで得られた配置場所にネットワークノードを実際に配置し、各ネットワークノードからの電波強度を測ることで実機とシミュレーションの差を検証した。最後に、本研究で提案した電波減衰予測モデルを用いて Range base の位置推定実験を行い、位置推定の精度を測定した。

### 6-1 比較手法

提案手法と比較を行う手法を三つ用意した。ランダムと反復局所探索における実行時間はいずれも提案手法でかかった計算時間と同じである。必要な電波被覆数  $k=1, 2, 3$ , 要求された被覆セルの割合  $s=85\%, 90\%, 95\%$  の場合においてそれぞれ 50 試行のシミュレーション実験を行った。

ランダム配置: ランダム配置では一定時間の間ランダムに座標を決定した解を生成し続け、その中で一番評価値が高いものを解とする。提案手法と同様にカバレッジの制約を満たす解が見つかった場合は、ノードの数を 1 つ減らして探索を続ける。

反復局所探索: 反復局所探索配置ではランダムに座標を決定した解を生成し、その解に対して提案手法と同じ LocalSearch() 関数を適用して局所探索を行う。解を生成する部分はランダム配置と同じである。この手法では解を生成した後、解が収束するか制約を満たす解が見つかるまで局所探索を行う。収束の判定は 5 回連続で評価値が更新されなかった場合とする。

パンくず法: この手法は[5][6]で提案されている手法である。パンくず法では、1 つ目のネットワークノードを建物の入口に配置し、以降のノードは等間隔に配置を行っていく。等間隔に配置した後にカバー率が要求されるセルの割合を下回っている場合、逐次カバーできていない場所にノードの配置を行う。この手法のみネットワークノードは室内に配置されるものとする。また、この手法のみ高さ方向のカバー範囲を考慮せず、各階毎に配置を行うものとする。要求されるセルの割合  $s=85, 90, 95\%$  に対して配置を行う間隔はそれぞれ 30, 25, 20m とする。

### 6-2 実験結果

シミュレーションによるベンチマーク手法との比較: 各被覆数  $k$  についての結果を図 18, 19, 20 に、実行時間を表 5 に示す。すべての場合において提案手法のノード数が最小の結果となった。特に  $k=3, s=95\%$  のケースにおいて提案手法と比較手法の差が最も大きく、ランダムと局所探索では約 50%, パンくず法とでは約 75% のノード数を削減できている。局所探索とランダム配置では  $k=1, s=95\%$  と  $k=3, s=95\%$  を比べると、ノード数が約 4 倍必要となっており複雑な配置条件になるほど無駄なノードが必要となる。一方、提案手法では約 3 倍の増加で比較手法と比べて無駄なノードの削減を行えることが分かる。パンくず法については、その性質上膨大なネットワークノード数が必要となる。この手法では、各階についてノードの配置を行うため今回のような 7 階建ての建物では提案手法やその他の比較手法と比べても非常に効率が悪くなる。提案手法では三次元空間での配置を行っているため 1 つのノードで複数階をカバーでき、パンくず法に比べ無駄なノードを配置しない組み合わせを探索できている。また図 18, 19, 20 のエラーバーが示すとおり、他の手法と比べアルゴリズムが出力するノード数はばらつきが少なく、安定した結果を出すことができています。

表 5 シミュレーションの実行時間 [min]

	$s = 85$	$s = 90$	$s = 95$
$k = 1$	3.23	3.74	3.76
$k = 2$	4.33	4.91	5.61
$k = 3$	6.81	7.56	8.93

実行時間は、最もノード数が多くなる場合でも約 9 分程度であった。入力として、災害時に医療キャンプ



や避難所として選ばれることの多い学校のデータを与えており、また、建物が7階建てであることを考えるとシミュレーションを行った環境は実際の災害現場を十分に想定できていると言える。この点において提案手法の実行速度は、実用的である。

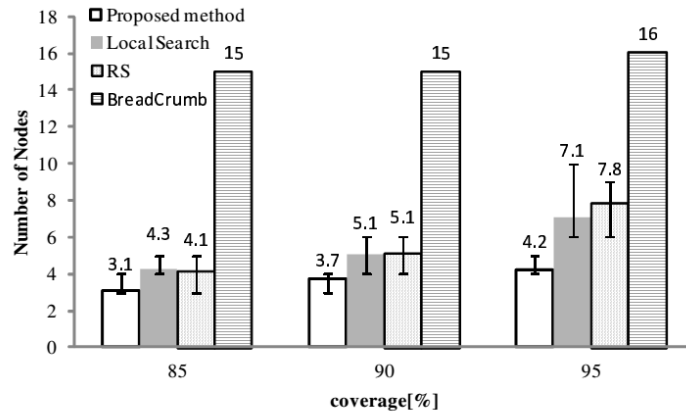


図 18  $k = 1$  における結果

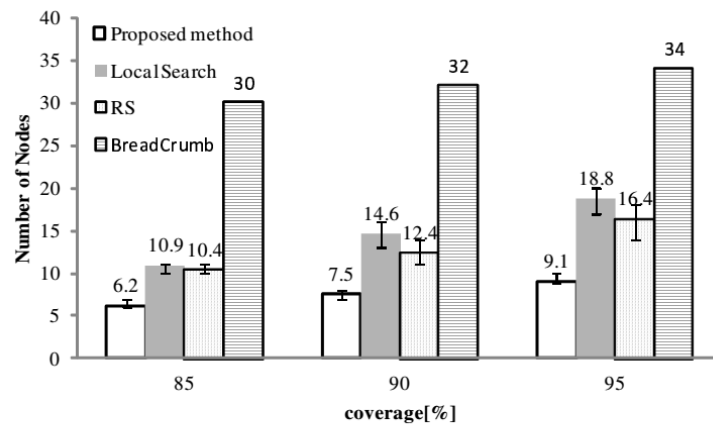


図 19  $k = 2$  における結果

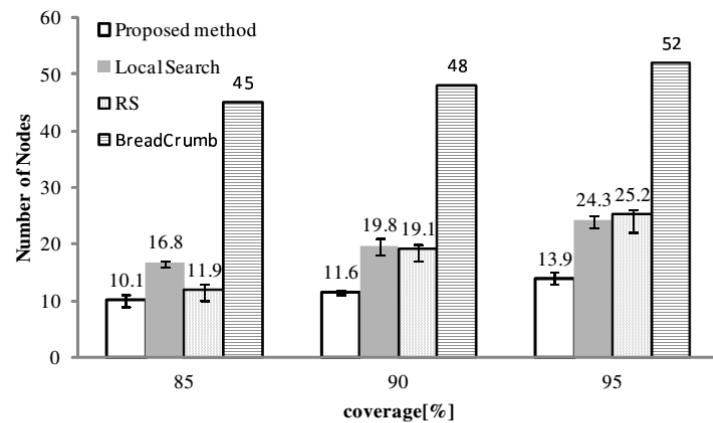


図 20  $k = 3$  における結果

### 6-3 実験結果

建物の 1F, 2F を対象とした 1-cover, ノード数 3, カバー率 92.6%の配置パターンについて実機を用いて検証を行った. 図 21, 22 にノードの配置場所及び電波強度の測定を行った場所, 測定値とシミュレーションの比較結果を示す. 色がついている点は電波強度の測定場所を, ×印はネットワークノードの配置場所をそれぞれ示す. 各色はシミュレーションで得られた電波強度と実験により得られた電波強度の差の絶対値を示し, 数値が大きくなるほどシミュレーションとの差が大きいことを表す. なお複数のノードから電波を受信できる箇所については, 誤差の平均を記している.

測定点 300 箇所の誤差の平均は 11.08[dB], カバー率は 86.6%となった. カバー率はシミュレーションに近い結果となった. 一部誤差が大きい場所が存在するため平均誤差が大きくなっているが, 測定点の多くは誤差が 10[dB]前後の範囲に収まっており, また電波強度が閾値より低い通信不可能な範囲の分布は概ねシミュレーションと一致しているため, 本稿で提案する電波減衰モデル及びシミュレーションは有効な手法であると言える.

## 7 おわりに

本稿では, 被災地における無線ネットワーク環境を迅速に構築するシステムを目指し, ネットワークノードの配置場所を決定するアルゴリズムを提案した. 提案するシステムでは, 無線ネットワークノードを風船に取り付け屋外に配置を行い, 外から建物全体をカバーする無線ネットワーク環境を構築する. 屋外に配置を行うことで, 室内に配置する場合よりも高さ方向の見通し範囲を広く取ることができる. また, 窓ガラスを通じて室内に伝搬するため外壁の影響は比較的少ない.

本研究では, このような配置方法を行う無線ネットワークにおいて, 室内の k-cover されているエリアのカバー率が与えられた値以上であるという条件を満たした上でネットワークノード数を最小化する問題を定式化した. この問題は NP 困難であるため, 遺伝的アルゴリズムをベースとしたヒューリスティックなアルゴリズムを提案した.

問題の定式化に当たり, 無線ネットワークノードの通信可能範囲を求めるために電波減衰予測モデルが必要となった. 既存のモデルには障害物や電波の回り込みを考慮している物がないため, これらの要素を考慮した独自の電波減衰予測モデルについても本研究では提案した.

提案手法の性能を評価するために本学の情報科学研究棟を建物の入力データとしたシミュレーションを行った. ランダム配置, 局所探索, パンくず法の 3 つのベンチマーク手法との比較を行った結果, 最大 50% のノード数を削減できることを確認した. 次に, シミュレーションの正当性を確認するための事件を行った. この実験ではシミュレーションより得られた配置場所に実際にネットワークノードを配置し, 建物内 300 箇所の電波強度を測って電波強度の分布を作成し, シミュレーション上の電波強度分布との比較を行った. 測定の結果, 誤差の平均は 11.08[dB], カバー率はシミュレーションに比べて 6%低くなった. 誤差がやや大きな値となったが, これは一部の誤差 20-40[dB]の箇所が存在するためであると考えられる. 測定点の多くは誤差が 10[dB]前後の部分であり, またカバー率の差もそれほど大きくないためシミュレーションの精度はある程度高いと言える. 最後に独自の電波減衰予測モデルを用いた位置推定の実験を行った. 位置推定の誤差は平均 3.86m となり, 非常に実用的な結果が得られた.

今後の課題として, 電波減衰モデルに人間による減衰の影響を取り入れることが挙げられる. 人体には多くの水分が含まれており, 送信機と受信機の間人間が存在すると受信強度に影響が生じる. 受信機を所持している人間の向きを減衰モデルのパラメータに取り入れることで, 精度の改善が期待できる. このパラメータを取り入れたモデルを用いて位置推定実験を再度行い, 減衰モデルの評価を行う予定である.

## 【参考文献】

- [1] Tia Gao, Dan Greenspan, Matt Welsh, Radford R. Juang and Alex Alm, "Vital Signs Monitoring and Patient Tracking Over a Wireless Network", the 27th Annual International Conference of the IEEE EMBS, pp.102-105, Jan. 2006.

- [2] Tia Gao, Tammara Massey, Leo Selavo, David Crawford, Bor-rong Chen, Konrad Lorincz, Victor Shnayder, Logan Hauenstein, Foad Dabiri, James Jeng, Arjun Chanmugam, David White, Majid Sarrafzadeh, and Matt Welsh, "The Advanced Health and Disaster Aid Network: A Light-Weight Wireless Medical System for Triage", IEEE TRANSACTIONS ON BIOMEDICAL CIRCUITS AND SYSTEMS, vol.1, NO.3, pp.203-216, Sep. 2007.
- [3] M Younis, K Akkaya, "Strategies and techniques for node placement in wireless sensor networks: A survey", The Journal of Ad-Hoc Networks, vol. 6, pp.621-655, June. 2008.
- [4] Pradnya Gajbhiye and Anjali Mahajan, "A Survey of Architecture and Node deployment in Wireless Sensor Network", Applications of Digital Information and Web Technologies, pp.426-430, Aug. 2008.
- [5] M. Souryal, J. Geissbuehler, L. Miller and N. Moayeri, "Real-Time Deployment of Multihop Relays for Range Extension", the 5th International Conference on Mobile Systems, Application and Services, pp.85-98, 2007.
- [6] M. Tamer Refaei, Nader Moayeri and Michael R. Souryal, "Interference Avoidance in Rapidly Deployed Wireless Ad hoc Incident Area Networks", INFOCOM Workshops, IEEE, pp.1-6, April. 2008.
- [7] Sameera Poduri, Sundeeo Patterm, Bhaskar Krishnamachari and Gaurav S. Sukhatme, "Sensor Network Configuration and the Curse of Dimensionality", In the third IEEE Workshop on Embedded Networked Sensors, Cambridge, MA, USA, May. 2006.
- [8] Electronic Communication Committee (ECC) within the European Conference of Postal and Telecommunications Administration (CEPT), "The analysis of the coexistence of FWA cells in the 3.4 - 3.8 GHz band", tech. rep., ECC Report 33, May. 2003.
- [9] Vinko Erceg, K. V. S. Hari, M.S. Smith, and Daniel S. Baum, "Channel models for fixed wireless applications", tech. rep., IEEE 802.16 Broadband Wireless Access Working Group, Jan, 2001.
- [10] J. E. Berg, "4.6 building penetration," in "Digital Mobile Radio Toward Future Generation Systems", COST Telecom Secretariat, Commission of the European Communities, Brussels, Belgium, pp.167-174, COST 231 Final Rep., sec. 4.6, 1999.
- [11] S. S Dhillon, K.Chakrabarty and S.S Iyengar, "Sensor placement for grid coverage under imprecise detection", International Conference on Information Fusion, pp.1581-1587, vol.2, July. 2002.
- [12] You-Chiun Wang, Chun-Chi Hu and Yu-Chee Tseng, "Efficient Deployment Algorithms for Ensuring Coverage and Connectivity of Wireless Sensor Networks", Wireless Internet, pp.114-121, July. 2005.
- [13] Anthony Roach and Rakesh Nagi, "A hybrid GA-SA algorithm for just-intime scheduling of multi-level assemblies", Computers and Industrial Engineering, pp.1047-1060, vol.30, Issue 4, Sep. 1996.
- [14] Meijin Lin, Caihong Su and Fei Wang, "GASA based Optimal Coverage Scheme in Wireless Sensor Networks", Energy Procedia 13, pp.7239-7244, 2011.
- [15] Carle J, Myoupo J F and Seme D, "A basis for 3-D cellular networks", Information Networking Proceedings. 15th International Conference, pp.631-636, 2001.
- [16] Decayeux C, Seme D, "A new model for 3D cellular mobile networks", Parallel and Distributed Computing, Third International Symposium on/Algorithms, Models and Tools for Parallel Computing on Heterogeneous Networks, Third International Workshop, pp.22-28, July. 2004.
- [17] S. M. Nazrul Alam and Zygmunt J. Haas, "Coverage and Connectivity in Three-Dimensional Networks" the 12th annual international conference on Mobile computing and networking, pp.346-357, Sep. 2006.
- [18] 手塚 奨, 中里 秀則, 太田 現一郎, 富永 英義, "大規模災害時における既存網を有効に利用するマルチホップ無線ネットワークの検討", 電子情報通信学会信学技報 IEICE Technical Report NS2008-214(2009-03).

- [19] 間瀬 憲一, “大規模災害時の通信確保を支援するアドホックネットワーク”, 電子情報通信学会誌 89(9), 796-800, 2006-09-01.
- [20] Yoshitaka Shibata, Yosuke Sato, Naoki Ogasawara and Go Chiba, “Ballooned Wireless Mesh Network for Emergency Information System”, Advanced Information Networking and Applications Workshops, pp.1118-1122, March. 2008.
- [21] M. Hata, “Empirical formula for propagation loss in land mobile radio services”, IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. VT-29, pp. 317-325, September 1981.
- [22] Y. Okumura, “Field strength and it’s variability in VHF and UHF landmobile radio-services”, Review of the Electrical Communications Laboratory, vol. 16, September-October 1968.
- [23] Hideaki Okamoto, Koshiro Kitao and Shinichi Ichitsudo, “Outdoor-to-Indoor Propagation Loss Prediction in 800-MHz to 8-GHz Band for an Urban Area”, IEEE TRANSACTION ON VEHICULAR TECHNOLOGY, vol.58, No.3, pp.1059-1067, Mar. 2009.
- [24] K. Kitao and S. Ichitsubo, “Path loss prediction formula for microcell in 400MHz to 8GHz band”, Electronics Letters, vol. 40, no. 11, pp.685-687, May. 2004.
- [25] E. H. Walker, “Penetration of radio signals into buildings in the cellular radio environment”, Bell Syst. Tech. J., vol.62, no. 9, pp.2719-2735, 1983.
- [26] A. M. D. Turkmani, J. D. Parsons and D. G. Lewis, “Radio propagation into buildings at 441, 900 and 1400 MHz”, the 4th International Conference on Land Mobile Radio, pp.129-138, Dec. 1987.
- [27] inSSIDer <http://www.metageek.net/products/inssider/>
- [28] Cisco Aironet 1130G series product specification [http://www.cisco.com/en/US/prod/collateral/wireless/ps5678/ps6087/product\\_data\\_sheet0900aecd801b9058.html](http://www.cisco.com/en/US/prod/collateral/wireless/ps5678/ps6087/product_data_sheet0900aecd801b9058.html)

### 〈発表資料〉

題 名	掲載誌・学会名等	発表年月
BalloonNet:無線ネットワークノードを用いた建物包围型三次元配置手法	情報処理学会論文誌, Vol. 55, No. 8, pp. 1743-1752	2014-08-15
BalloonNet: A Deploying Method for a Three-Dimensional Wireless Network Surrounding a Building	Proc. of the Eighth International Conference on Broadband and Wireless Computing, Communication and Applications (BWCCA-2013), pp. 120-127	2013-10-28
BalloonNet:災害復旧のための建物包围型無線ネットワークノード配置法	情報処理学会研究報告	2013-10-10