

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 12 日現在

機関番号：14603

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24700064

研究課題名(和文) 災害復旧支援のためのバルーンを利用したアドホックネットワークと位置推定

研究課題名(英文) A Deployment Method for a Three-Dimensional Wireless Network Surrounding a Building

研究代表者

柴田 直樹 (Shibata, Naoki)

奈良先端科学技術大学院大学・情報科学研究科・准教授

研究者番号：40335477

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：被災地におけるネットワーク環境を構築するため、ノードの配置場所を決定する。ノードを風船に取り付けて建物周囲の空中に配置し、建物をカバーするネットワークを構築するような配置の仕方を行うノードの配置場所を求める。無線電波が屋外から屋内へ伝搬する際の電波強度の減衰を求めるモデルについて、電波減衰予測モデルを提案する。取り組む問題は三次元配置問題であり、カバレッジの保証を満たしつつ必要なノード数を最小化する。この問題を解決する手法として遺伝アルゴリズムに基づくアルゴリズムを提案する。3つのベンチマーク手法と比較した結果、提案手法が他手法と比べて少なくなる配置パターンを生成できることを確認した。

研究成果の概要(英文)：Aiming at quick construction of a wireless network surrounding a multi-level building in a disaster area, an efficient method to determine the network nodes' locations in the air is proposed. The nodes are attached to balloons outside of a building and deployed in the air so that the network can be accessed from the entire building. We introduce an original radio propagation model for predicting path loss from an outdoor position to a position inside of a building. In order to address the three-dimensional deployment problem, the proposed method optimizes an objective function for minimizing the number of network nodes on guarantee the coverage (the target space need to be covered over a certain percentage by wireless network nodes). We propose an algorithm for solving this problem based on genetic algorithm. To evaluate the proposed method, we compared our method with three benchmark methods, and the results show that the proposed method requires fewer nodes than other methods.

研究分野：ネットワーク

キーワード：災害時通信 アドホックネットワーク

1. 研究開始当初の背景

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)や電子トリアージシステムなど、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。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手間ですべて室内をカバーする手法が必要である。

2. 研究の目的

本研究では、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。

3. 研究の方法

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、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、カバレッジの範囲及び 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。

4. 研究成果

4.1 提案手法の概要

本稿で想定したアプリケーション例のイメージを図 1 に示す。複数階建てのビルの内部を無線電波でカバーすべく、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。

4.2 仮定

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、実際に風船を打ち上げ、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 (図 2)。予備実験では風船の高さ約 20m まで確

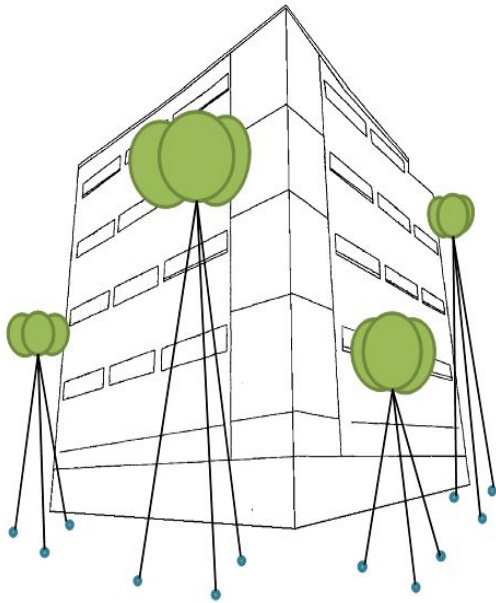


図1 システムのイメージ

図2 予備実験

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。ネットワークノードと通信可能な最小電波強度を T [dBm] とする。ネットワークノード A の電波カバー範囲を RA で表したとき、 RA に含まれるすべての地点は A から送信電力強度が T [dBm] 以上である。送信機を A 、受信機を B としたときの A, B 間の電波強度の算出には、減衰予測関数 $L(A, B)$ を用いる。この関数の詳しい定義は次章で示す。

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 l 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。

4.3 問題の定式化

入力：

- 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：ネットワークノードの配置場所およびノードの個数

制約：

配置するノード(アクセスポイント) の集合を N 、その総数を $|N|$ とし、セルの集合を M 、総数を $|M|$ 、被覆数を k とする。ノードを ap で表し、 i 番目のノードを api ($api \in N$) で表現する。個別のセルを c で表し、 j 番目のセルを cj ($cj \in M$) で表現する。 api がセル cj を被覆する状況を関数 $p(i, j)$ で表現する。関数 p は電波伝搬減衰関数 L を用いて以下のように定義される。 api によってセル cj が被覆されている場合は 1 を、そうでなければ 0 を出力する。

$$p(i, j) = \begin{cases} 1 & L(i, j) \geq T \\ 0 & otherwise \end{cases}$$

セル cj が k -cover されているかを表す関数 $kp(j)$ は以下の式で定義される。

$$kp(j) = \begin{cases} 1 & \sum_{i=1}^{|N|} p(i, j) \geq k \\ 0 & otherwise \end{cases}$$

従って、制約は以下の式で表される。

$$\frac{\sum_{j=1}^{|M|} kp(j)}{|M|} \geq s$$

4.4 提案手法

4.4.1 概要

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。ある場所にネットワークノードを配置した場合、3章で定義した関数 (1) を用いてカバーレッジパターン pt を作るができる。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。

4.5 評価

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 RadioSensitivity よりビットレート 6Mbps を維持するのに必要な -86dBm とした。

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。

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。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た。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った。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ていることが分かる。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、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た。実行時間においては、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、実用的であるといえる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 1 件)

松尾 真也, 孫 為華, 柴田 直樹, 木谷 友哉, 伊藤 実: BalloonNet:無線ネットワークノードを用いた建物包囲型三次元配置手法, 情報処理学会論文誌, 査読有り, Vol. 55, No. 8, 2014, pp.1743-1752.

<http://id.nii.ac.jp/1001/00102563/>

[学会発表](計 3 件)

Shinya Matsuo, Weihua Sun, Naoki Shibata, Tomoya Kitani and Minoru Ito: "BalloonNet: A Deploying Method for a Three-Dimensional Wireless Network Surrounding a Building," in Proc. of the Eighth International Conference on Broadband and Wireless Computing, Communication and Applications (BWCCA-2013), Oct. 2013, pp. 120-127, Compiègne(France).

[DOI:10.1109/BWCCA.2013.28](https://doi.org/10.1109/BWCCA.2013.28)

松尾 真也, 孫 為華, 柴田 直樹, 木谷 友哉, 伊藤 実: BalloonNet:災害復旧のための建物包囲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 年 10 月, pp.1-8, 館山寺サゴロイールホテル(静岡県浜松市).

<http://id.nii.ac.jp/1001/00095455/>

松尾真也, 木谷友哉, 柴田直樹, 孫為華, 伊藤実: 災害時における建物包囲型アドホック通信ノード配置手法の提案, DICOM2012 シンポジウム論文集, 2012.7.4., pp. 1137 - 1144, 山代温泉(石川県加賀市)

[図書](計 0 件)

[産業財産権]

出願状況(計 0 件)

取得状況 (計 0 件)

〔その他〕
ホームページ等

http://ito-lab.naist.jp/mediawiki/index.php/Topic_mobile/ja

6 . 研究組織

(1)研究代表者

柴田 直樹 (SHIBATA, Naoki)
奈良先端科学技術大学院大学・情報科学研究科・准教授
研究者番号：40335477