

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

孫 為華^{1,a)} 柴田 直樹² 木谷 友哉³ 松尾 真也² 伊藤 実²

受付日 2013年10月24日, 採録日 2014年4月4日

概要：災害地の建物で救助活動を行う際、アドホックネットワークは有効な通信手段であると見込まれている。本稿では、無線ネットワークノードを風船に取り付けて建物周囲の空間に設置し、建物内部をカバーする無線ネットワークの構築手法を提案する。その際、設置コストを下げ、かつ、短時間でネットワークを構築するためには、用いるノード数をできるだけ少なくすることは重要である。しかし、対象問題はNP困難な三次元配置問題であり、最適解を求めることは実際上困難である。そこで、ネットワーク被覆率を保証したうえで、実行時間でノード数を準最適化する遺伝的アルゴリズムを利用した手法を提案する。ノードを適切に設置するためには、建物の屋内外を伝搬する電波強度の減衰を正確に見積もることが重要であり、本稿では、実機で測定した結果に基づく電波強度の減衰モデルを利用した。提案手法を評価するために、3つのベンチマーク手法と比較を行った。その結果、提案手法が他手法と比べて、同じ実行時間では、ネットワークノード数が18–50%少なくなる配置パターンを生成できることを確認した。また、ネットワーク被覆率の誤差については、実機実験と提案電波減衰予測モデルでは6%程度に収まることが確認できた。

キーワード：遺伝的アルゴリズム, 電波減衰予測モデル, 災害, モバイルアドホックネットワーク

BalloonNet: A Three-dimensional Wireless Network Deploying Method Surrounding a Building

WEIHUA SUN^{1,a)} NAOKI SHIBATA² TOMOYA KITANI³ SHINYA MATSUO² MINORU ITO²

Received: October 24, 2013, Accepted: April 4, 2014

Abstract: Ad hoc Network is expected as an efficient means of communication in case of disaster rescue, especially in collapsed buildings. In this paper, we propose a method to deploy wireless network surrounding a target building. Nodes are attached to balloons outside a building and deployed in the air so that the network can be accessed from anywhere in the 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. For solving this problem, we propose an algorithm based on a genetic algorithm. We also introduce an original radio propagation model for predicting path loss from an outdoor position to a position inside a building. To evaluate the proposed method, we compared our method with three benchmark methods, and the results show that the proposed method requires 18–50% fewer nodes than other methods under the same execution time. Moreover, we confirmed that the error rate of radio coverage is about 6% through a real world experiment.

Keywords: genetic algorithm, disaster, radio propagation model, mobile ad hoc networks

¹ 滋賀大学
Shiga University, Hikone, Shiga 522–0069, Japan

² 奈良先端科学技術大学院大学
Nara Institute of Science and Technology, Ikoma, Nara 630–0192, Japan

³ 静岡大学
Shizuoka University, Hamamatsu, Shizuoka 432–8011, Japan

a) sunweihua@is.naist.jp

1. はじめに

災害地における救助活動のために、傷病者の位置情報を利用したAID-N (Advanced Health and Disaster Aid Network) [1] や傷病者の状態モニタリングや位置特定が可能な電子トリアージシステム [2] など、情報技術を駆使

した支援システム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おり、被災地において通信インフラを迅速に復旧させることは、こういったシステムを有効に利用するために重要である。無線アドホックネットワークは、専用のインフラ機器を必要とせず、市販の通信機器を用いて構築できるため、災害時において有効な通信手段になると見込まれている。被災地における救助活動では、建物全体を無線ネットワークでカバーするために、崩落の危険がある建物内で、被災者の探索や救助を行いつつ、多数のノードを設置する必要がある。アドホックネットワークのノードを配置する手法はこれまでに多く提案されている [3], [4]。非常時における建物内部での設置方法として、パンくず法 [5], [6] が提案されている。パンくず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手法であり、救助隊が、救助活動を行いつつ、同時にノード配置も行う必要がある。建物内に入ることなく、建物外から室内をカバーすることができれば、ネットワークの設置は救助活動と並行して素早く行うことができる。そのため、迅速に被覆率の高いネットワークを構築することが重要な目標である。したがって、このような状況では、ノードの配置プランは数分以内に作成されることが望ましい。

本稿では、建物外から室内をカバーする無線ネットワークを構築する方法の実現を目指し、ネットワークノードの配置手法を提案する。図 1 のように、スマートフォン程度の機能を持つバッテリー駆動のネットワークノードを風船に結び付け、空中に配置を行う。このような配置の利点として、無線電波がほぼ減衰することなく窓ガラスを貫通するので、室内に配置する場合に匹敵する水平方向のカバー範囲が提供できる一方、天井や床の影響を受けずに見通し範囲を広くと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ことがあげられる。提案手法では、複数階建てのビルの内部をすべて無線電波でカバーし、衛星経由でのインターネット接続を可能にするため、ノード設置可能な場所や、ビルの材質（外壁、内壁、天井、床）

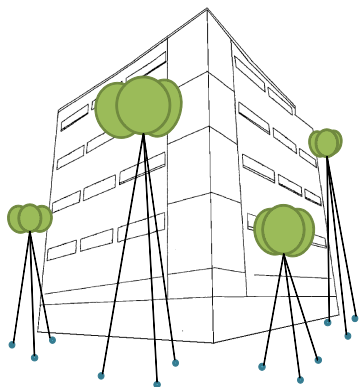


図 1 提案手法により設置したネットワークのイメージ

Fig. 1 Image of deployed balloon network.

による影響をふまえ、ノードを配置する位置の最適化を行う。また、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、そのうえ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、三次元の配置の組合せ最適化問題となる。これは NP 困難 [7] な問題であるため、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クス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異なり、有効に利用できない。想定環境において、精度の良い電波強度推定モデルがノード配置の決定や、位置推定に非常に重要である。本稿では新たな電波減衰予測モデルを用いて、ノードの通信可能範囲を算出する。

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、同じ実行時間のもとで、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、カバレッジの範囲および 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 3.86 m となった。

2. 関連研究

本章では、無線ネットワークノード数の最小化に関する既存研究と、風船や気球を用いてネットワークノードの配置を行う既存研究について述べる。ただし、風船とは、搭載能力が数百グラムまでで、直径 1 メートル以下の小型気球を意味する。一方、気球は搭載能力が数千以上、直径数メートル以上の大型気球のことを意味する。

Dhillon らは、センサ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、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。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。

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合

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際には，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．

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 [15] に，Decayeux らは六角柱 [16] に，Nazrul らは切頂八面体 [17] 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いっさい考慮しておらず，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．

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 [18] を提案している．無線ネットワークを構築することで評価を行っており，空中にネットワークノードを配置することで通信網が提供できることを確認している．手塚らは WiMax 機器を取り付けた風船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 [19] を提案している．また，建物の倒壊度合いとネット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．間瀬は気球を数 km 間隔に浮かべ，上空にネットワークノードやアンテナを設置する手法 [20] を提案している．

本稿で提案する方式は，対象となる建物の屋外に風船を用いて配置を行うため，余震に強く，配置の手間も屋内の配置と比べると少ない利点がある．電波により 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ことを目的とする．

3. 問題設定

3.1 仮定

風船 風船を 3 カ所の地点からロープで固定することによって，任意の高さに配置が可能とする．風船の風による揺れは無視できるとする．風船を用いた予備実験の風景は図 2 である．

ネットワークノード ネットワークノードは無線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．送信電力はバッテリーが枯渇するまで一定とし，受信感度などノードの性能に差はないとする．ネットワークノードと通信可能な最小電波強度を T [dBm] とする．ネットワークノード A からの受信電力強度が T [dBm] 以上である電波カバー範囲を R_A で表す．送信機を A ，受



図 2 予備実験の風景

Fig. 2 Preliminary experiment.

信機を B としたときの B の受信電力の算出には，減衰関数 $L(A, B)$ を用いる．この関数は次章で詳述する．
対象とする建物 ビルを想定し，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し，セル 1 つ分を被覆判定の最小単位とする．各セルはユニークな ID を持つ．すべてのセルは空気，内壁，外壁，天井（床）いずれかの材質でできているとする．

3.2 定式化

以下では，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

- 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 とする．セルの集合を 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 ap_i ($ap_i \in N$) で表現する．個別のセルを c で表し， j 番目のセルを c_j ($c_j \in M$) で表現する． ap_i がセル c_j 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， ap_i からの受信強度が T 以上であれば (ap_i によってセル c_j が被覆されていれば)，1 を，そうでなければ 0 を出力する．セル c_j が k -cover されているかを表す関数 $coverFlag(j)$ は式 (1) で定義される．

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

制約条件は式 (2) で表される．被覆されているセル数対全セル数の割合が，要求された被覆割合 s 以上でなければならない．

$$\frac{\sum_{j=1}^{|M|} \text{coverFlag}(j)}{|M|} \geq s \quad (2)$$

目的関数

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ことが提案手法の目的である．すなわち，制約である式 (2) を満たしながら，所要配置ノード数 n を最小にする．

4. 電波減衰予測関数

本稿では，三次元にネットワークノードを配置する方法がメインテーマであり，既存の電波減衰予測モデルに基づき，実地で求めた測定値を考慮した電波伝搬損失特性を仮定する．

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，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する．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 [21]，Kitao らが提案しているモデル [22] などがあげられる．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．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．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電波減衰の予測を行う．本研究では，前提とする条件が一致する Okamoto, Kitao らのモデルを比較対象として用いる．

4.1 既存の Outdoor to indoor モデル

Okamoto らが提案しているモデル [21] は外に配置された AP から外にある受信機と室内にある受信機の 2 か所で強度を測定し，その差をとることで建物を貫通する場合の電波減衰を測定している．このモデルは建物による減衰のみを表しているため，Kitao らが提案しているモデル [22] と組み合わせることで Outdoor to Indoor の減衰式が得られることを Okamoto らは述べている．屋外に配置した AP から室内にある受信機までの減衰 $Loss$ は以下のように表される． $Loss_{out}$ は文献 [22] で， $Loss_{in}$ は文献 [21] でそれぞれ提案されている式である．

$$Loss = Loss_{out} + Loss_{in} \quad (3)$$

$$Loss_{out} = 54 + 40 \log d - 30 \log h + 21 \log f \quad (4)$$

$$Loss_{in} = 0.6d_{in} - 0.6h + 10 \quad (5)$$

ここで， $Loss_{out}$ は屋外における電波の減衰を， $Loss_{in}$ は電波が屋外から屋内へ貫通するときの建物による減衰を表す．また， d は AP から窓（外壁）までの距離 [m]， d_{in} は窓（外壁）から受信機までの距離 [m]， h は地面からの高さ [m]， f は周波数 [MHz] を表す．

4.2 提案する予測関数

本稿で提案する測定点 A と B 間の電波減衰を，式 (6) に示す．これは，距離による減衰 $Loss_{dist}$ と障害物による減衰 $Loss_{obst}$ の和の形で表される．また，各種パラメータを表 1 にまとめる．

$$L(A, B) = Loss_{dist} + Loss_{obst} \quad (6)$$

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，電波の回折による回り込みの影響も考慮するために， AB 間の直線距離 d_1 と，伝搬損失が最小となる経路（回り込み経路）の距離 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 $d_1 \leq d_2$ となる．表 1 に示された各要素にかかる係数 (α , β , γ , δ) は，4.3 節で行った計測より得られた測定値に対して回帰分析を行って得た結果である．受信電力強度を求める際，各経路の受信レベルを求めて，合成する方法を採用する．伝搬損失 $Loss_{dist}$ を式 (7) に示す．経路 d_1 の伝搬損失（第一項）と d_2 の補正（第一項以降）を足し合わせ，補正後の伝搬損失 $Loss_{dist}$ の値は d_1 または d_2 単独の値よりも小さくなる．すなわち，直線経路および回り込み経路のうち，伝搬損失の小さい方を選ぶことになる．

$$Loss_{dist} = \alpha \log(d_1) + \beta(d_2 - d_1) \log(d_2) + \gamma \log(d_2) + \delta \quad (7)$$

本手法の想定状況では，(1) d_1 と d_2 は異なる経路で，かつ $d_2 \geq d_1$ ，(2) 障害物による減衰が顕著にある，とする．この場合， α , β , γ は有意だと考えられる．しかし，想定状況と異なる場合，回帰を行う際， $\log(d_1)$, $(d_1 - d_2) \log(d_2)$, $\log(d_2)$ の値の相関係数が高いときは正しく係数 α , β , γ

表 1 提案する伝搬モデルのパラメータ

Table 1 Parameters of propagation model.

項目	説明
$L(A, B)$	AB 間の減衰を返す関数．距離による減衰と障害物による減衰の項で構成される．単位は dB.
$Loss_{dist}$	AB 間の直線距離と回り込み距離による減衰を表す項 (dB)
$Loss_{obst}$	AB 間にある障害物による減衰を表す項 (dB)
$\alpha = 36.37$	直線距離による減衰の係数
$\beta = 0.12$	回り込み距離と直線距離の差による減衰の係数
$\gamma = -69.13$	回り込み距離による減衰の係数
$\delta = -28.51$	定数

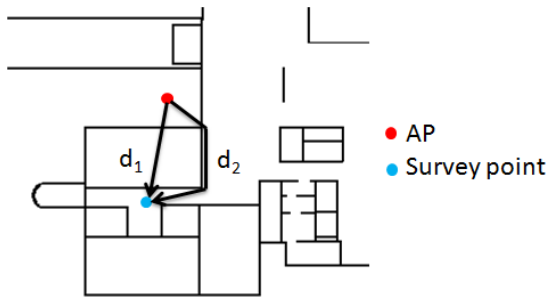


図 3 経路 d_1 , d_2 の例
Fig. 3 Example of path d_1 and d_2 .

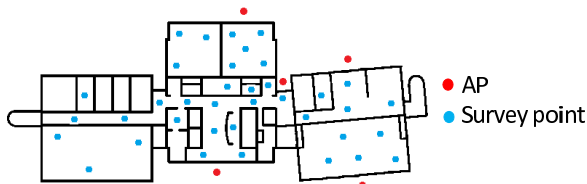


図 4 実測実験の計測箇所
Fig. 4 Survey points in real experiment.

が求められる可能性がある。

$Loss_{obst}$ 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 ρ で表す。 $Loss_{obst}$ を式 (8) に示す。

$$Loss_{obst} = \sum \rho_i O_i \quad (8)$$

本稿で対象とする環境の例を図 3 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。 $Loss_{obst}$ 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。

4.3 計測

本稿で考慮する障害物の材質として、内壁、外壁、床（天井）の 3 種類を考慮する。式 (7) で定義した各係数 (α , β , γ , δ) および障害物（外壁、内壁、床）の減衰係数を求めるための実験を奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究棟で行った。アクセスポイントを建物外に置き、室内の約 150 カ所からノート PC を用いて IEEE802.11g, 2.4 GHz 帯の電波強度の測定を行った。アクセスポイントには BUFFALO WZR-HP-G300NH, ネットワークインタフェースカードは Atheros AR9280, ソフトウェアは inSSIDer [23] を用い、測定値は、人体による減衰の影響を避けるためにアクセスポイントの方向を向き、PC とアクセスポイントの間に測定者の体が入らない状態で 15 秒間の値を連続的に測定し、得られた値の中央値を記録した。図 4 に計測箇所の一部を示す。計測は AP が配置されている階だけでなく、異なる階でも行った。

表 2 構造物の材質ごとの減衰 (dB)

Table 2 Obstacle coefficients.

	内壁	外壁	天井・床
提案するモデル	-0.72	-6.44	-3.41
w/o d_2	-1.59	-7.17	-7.25

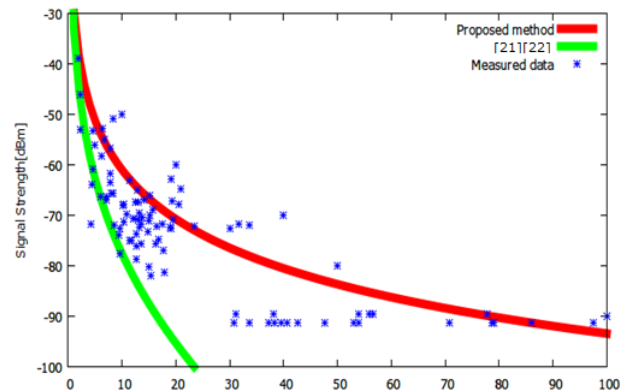


図 5 提案するモデルと文献 [21], [22] の比較. それぞれ $d_1 = d_2$ の場合と $d_1 = 0.95d_{in} + 0.05d$, $h = 20$, $f = 2,400$ の場合をプロットしてある。

Fig. 5 Comparison of proposed method and the model described in paper [21], [22]. The results are plotted respectively in the case of $d_1 = d_2$ and $d_1 = 0.95d_{in} + 0.05d$, $h = 20$, $f = 2,400$.

計測により得られたデータをもとに回帰分析を行い、式 (7) で定義した各係数および障害物の減衰係数を算出した。また、提案モデルと精度の比較を行うため d_2 を考慮しない場合についても同様の方法で係数を求めた。式 (9) に提案手法 (d_2 を考慮した場合) の結果を、式 (10) に d_2 を考慮しない場合の結果を示す。表 2 に両モデルの減衰係数を示す。

$$Loss_{dist} = 36.67 \log(d_1) + 0.12(d_2 - d_1) \log(d_2) \quad (9)$$

$$- 69.13 \log(d_2) - 28.51$$

$$Loss_{dist} = -29.34 \log(d_1) - 37.66 \quad (10)$$

提案するモデルと文献 [21], [22] の $Loss_{dist}$ のグラフを図 5 に示す。ただし、文献 [21], [22] は本稿が対象としている問題とは異なるため、優劣の比較ではなく、参考のために取り上げた。これら両モデルは、二次元のグラフにするためにいくつか条件を限定して描いている。同様に、グラフ中の Surveydata の点も操作を加えている。測定実験により得られた値から、障害物による影響、つまり表 2 で表される値を差し引いたものをプロットしている。ただし、測定機器の性能限界により -90 dBm 以下の電波を測定できなかったため、図 5 の下限を -90 dBm とした。提案手法および d_2 を考慮しないモデル、式 (10) を適用した場合の誤差の統計を表 3 に示す。ME, RMS, SD は予測誤差の平均、平均二乗根、標準偏差を、 R^2 は回帰分析の決定係数をそれぞれ表す。

Okamoto らが提案してるモデルの ME は 13.27 と他の 2

表 3 各モデルによる推定誤差の統計値 (dB)

Table 3 Statistics of error in model predictions (dB).

	ME	RMS	SD	R^2
Proposed model	4.06	5.36	3.51	0.86
w/o d_2	5.27	6.63	4.04	0.79
文献 [21], [22]	13.27	16.62	10.07	n/a

つのモデルと比べて比較的大きい数値となった。これは、測定値を使ってモデルを構築している提案手法に対して、他の環境の測定値を使ったモデルでありやや不利な条件であるため、この結果だけで一概に提案手法が優れているとはいえない。しかし、回帰式が標本データを再現する割合を表す決定係数 R^2 は提案手法が最も高い。また誤差のばらつきを表す RMS, SD とともに提案手法が良い結果となっており、本稿で想定した環境において、提案するモデルが最も安定した推定精度であることが分かる。提案手法の平均誤差は 4.06 [dB] となっており、屋内において、受信電波強度 (RSS) に基づく位置推定を行う場合においても実用精度の推定が可能と考えられる。以下では、このモデルを用いてシミュレーションおよび実機実験を行う。

5. 提案手法

提案手法では、 k -cover されているセルの総数が指定された割合 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。提案アルゴリズムでは、最も少ないネットワークノード数で制約を満たす配置パターンを探索する。 k -cover 被覆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、十分なノード数から探索を開始する。このノード数で制約を満たす配置パターン (解) が見つかった場合、ノード数を 1 個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、最後に残る解が提案手法の出力となる。

5.1 アルゴリズムの詳細

提案するアルゴリズムの疑似コードを Algorithm 1 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ではない。

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合せを探索する。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

Algorithm 1 提案アルゴリズムの疑似コード

```

1: Parameter :  $N$  = Number of elements
2: Input :
3:  $n$  = Number of nodes in a solution candidate
4:  $M$  = Set of all cells need to be covered in the building
5:  $L$  = Set of deployable location
6:  $P$  = InitialPopulation( $n, N, L$ ) //初期解を生成
7: //収束まで繰り返し上位の良い解を探索
8: while true do
9:    $P' = \text{Search}(P, M)$ 
10:  //Search() の戻り値が  $\emptyset$  の場合、収束と判定
11:  if  $P' = \emptyset$  then
12:    break
13:  end if
14:   $P = \text{DecreaseNode}(P')$  //  $P'$  内の各解からランダムに 1 つノードを削減して、新しい初期解集合を作成
15: end while
16: return the best solution in  $P$ 

```

Algorithm 2 Search 関数の疑似コード

```

1: Input :
2:  $P$  = Population
3:  $M$  = Set of all cells need to be covered in the building
4: Number of generations = 1
5: while Number of generations  $\leq 50$  do
6:  Mutate( $P$ ) //解候補がランダムに交差して局所解への収束を回避
7:  LocalSearch( $P, 5$ ) //上位 5 個の解候補に対してローカルサーチ
8:  Crossover( $P$ )
9:  Evaluate( $P, M$ )
10:  //十世代経過しても上位解が現れなければ、探索を終了
11:  if Converged( $P, 10$ ) then
12:    return  $\emptyset$ 
13:  end if
14:  Select( $P$ ) //解候補集団に対してトーナメント選択を行う
15:  if the best pattern in  $P \geq s$  then
16:    return  $P$ 
17:  end if
18:  number of generation ++
19: end while
20: return  $\emptyset$  //解なし

```

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 $\emptyset$ を返す。

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。

Algorithm 2 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() : 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．この操作は各染色体に対して 3% の確率で行われる．

LocalSearch()：解候補集団 P のうち、評価値の高い上位 5 つの染色体に対し、局所探索を行う．すべ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、本手法では収束を高速化するために交換されやすいノードを偏らせる．ある程度評価値の高い解にするために、良い位置に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っていくため、この手法をとることによって 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．

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()：解の評価値が引数で指定された世代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．実験では、10 世代とした．

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．この操作では解集団の個数が N になるまで行われる．

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．

6.1 実験環境

対象建物として、奈良先端大情報科学研究棟 1F～7F を利用した．縦、横、高さはそれぞれ 110 m, 80 m, 28 m 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 0.96 m とし、電波強度の閾値 T は Cisco 社が公表している Radio Sensitivity [24] よりビットレート 6 Mbps を維持するのに必要な -86 dBm とした．シミュレーションを実行するコンピュータとして、Intel Core i7 920 (2.66 GHz), Windows 7 Professional x64, Java SE 1.6 を使用した．

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．

6.2 比較手法

提案手法と比較を行う手法を 3 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．

6.2.1 パンくず法

この手法は文献 [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、各階ごと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, 20 m とする．

6.2.2 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．

6.2.3 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．

6.3 実験結果

6.3.1 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 6(a)～(c) に、実行時間を表 4 に示す．同じ実行時間のもとで、すべての場合に

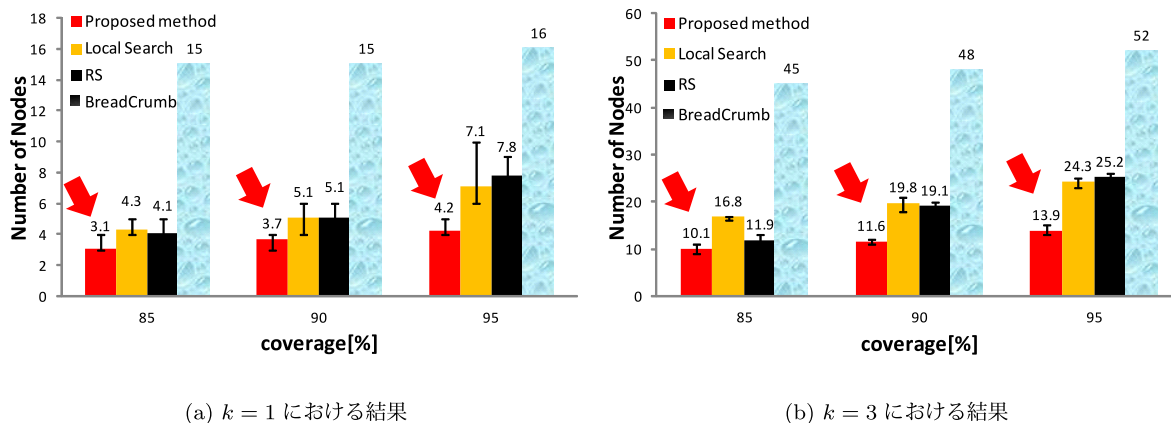


図 6 被覆数に関する比較結果

Fig. 6 Number of nodes needed depended on required coverage.

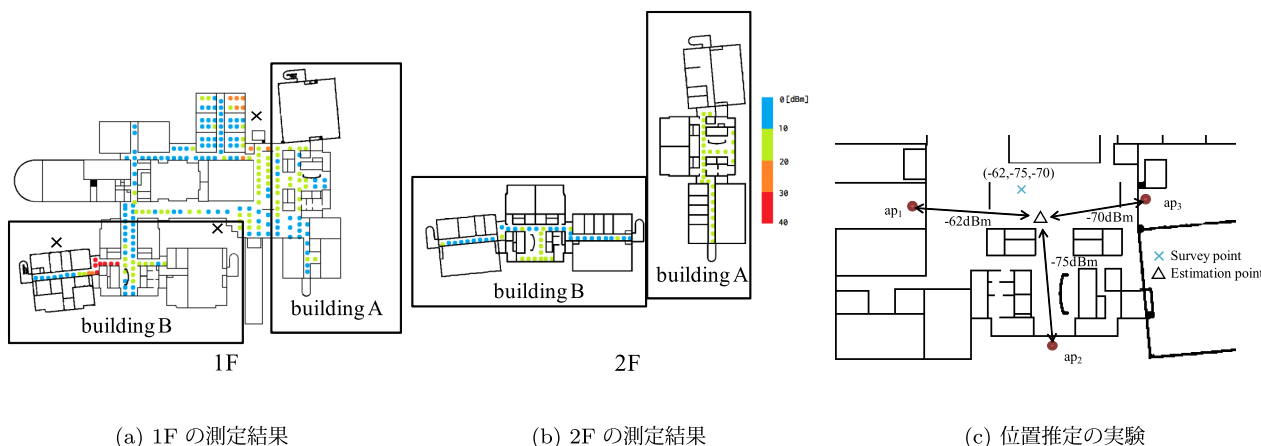


図 7 各階での測定および位置推定の結果

Fig. 7 Estimated results based on measured RSSI.

表 4 シミュレーションの実行時間 [min]

Table 4 Execution time [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

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合せを探索できている。また図 6 (a)~(c) 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。

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。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いえる。この点において提案手法の実行速度は、実用的である。

6.3.2 提案手法の性能評価実験

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 7 (a), (b) にノードの配置場所およ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、誤差の平均を示している。

測定点 300 カ所の誤差の平均は 11.08 [dB], カバー率は 86.6% となった。誤差については 4 章でモデリングした際の平均誤差を大きく上回り、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おおむ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およびシミュレーションは有効といえる。

6.3.3 室内位置推定

3-cover を満たすようにネットワークノードの配置を行い、位置推定の精度を測定した。実験方法を図 7(c) を用いて説明する。まず最初に室内のある場所での 3 つのネットワークノードからの電波強度の測定を行う。この測定は 4 章で行った測定とは別に行っている。このとき、測定点における 3 つのネットワークノード ap_1 , ap_2 , ap_3 からの信号強度はそれぞれ -62 , -75 , -70 [dBm] であったとする。続いてこれらの値を用いて位置推定を行う。位置推定では、4 章でモデリングした関数を用いて各ネットワークノードからの距離を求めることによって位置を定める。測定点と位置推定により求めた Estimation point の誤差を求めることで位置推定の精度を計測した。

70 カ所の測定点に対する誤差の平均は 3.86 [m] となった。今回の結果では、傷病者がどの部屋にいるかを判別できる程度の誤差となっており、被災地で電子トリアージなどを利用する場合、傷病者情報のオンライン伝送や、傷病者位置を取得するには十分な精度であるといえる。

7. まとめ

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。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、新たに電波減衰予測モデルの構築を行った。ランダム配置、局所探索、パンクズ法の 3 つのベンチマーク手法との比較を行った結果、同じ実行時間のもとで、最大 50% のノード数を削減できることを確認した。

実機実験の結果、受信機を所持している人間の向きが電波強度に影響を与える可能性があると考えられる。今後の課題として、受信機の向きを減衰モデルのパラメータに取り入れることで、精度の改善を試みる予定である。

謝辞 本研究は JSPS 科研費 24700064, 電気通信財団, そして文部科学省国家課題対応型研究開発推進事業—次世代 IT 基盤構築のための研究開発「社会システム・サービスの最適化のための IT 統合システムの構築」(2012~2016 年度) の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] Gao, T., Massey, T., Selavo, L., Crawford, D., Chen, B.-R., Lorincz, K., Shnayder, V., Hauenstein, L., Dabiri, F., Jeng, J., Chanmugam, A., White, D., Sarrafzadeh, M. and Welsh, M.: The Advanced Health and Disaster Aid Network: A Light-Weight Wireless Medical System for Triage, *IEEE Trans. Biomedical Circuits and Systems*, Vol.1, No.3, pp.203–216 (Sep. 2007).
- [2] Gao, T., Greenspan, D., Welsh, M., Juang, R.R. and Alm, A.: Vital Signs Monitoring and Patient Tracking Over a Wireless Network, *The 27th Annual International Conference of the IEEE EMBS*, pp.102–105 (Jan. 2006).
- [3] Younis, M. and Akkaya, K.: Strategies and techniques for node placement in wireless sensor networks: A survey, *The Journal of Ad-Hoc Networks*, Vol.6, pp.621–655 (2008).
- [4] Gajbhiye, P. and Mahajan, A.: A Survey of Architecture and Node deployment in Wireless Sensor Network, *Applications of Digital Information and Web Technologies*, pp.426–430 (Aug. 2008).
- [5] Souryal, M., Geissbuehler, J., Miller, L. and Moayeri, N.: Real-Time Deployment of Multihop Relays for Range Extension, *The 5th International Conference on Mobile Systems, Application and Services*, pp.85–98 (2007).
- [6] Refaei, M.T., Moayeri, N. and Souryal, M.R.: Interference Avoidance in Rapidly Deployed Wireless Ad hoc Incident Area Networks, *INFOCOM IEEE Workshops*, pp.1–6 (Apr. 2008).
- [7] Poduri, S., Patten, S., Krishnamachari, B. and Sukhatme, G.S.: Sensor Network Configuration and the Curse of Dimensionality, *The 3rd IEEE Workshop on Embedded Networked Sensors* (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, Technical Report, ECC Report 33 (May 2003).
- [9] Erceg, V., Hari, K.V.S., Smith, M.S. and Baum, D.S.: Channel models for fixed wireless applications, Technical Report, IEEE 802.16 Broadband Wireless Access Working Group (Jan. 2001).
- [10] Berg, J.E.: 4.6 building penetration, 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] Dhillon, S.S., Chakrabarty, K. and Iyengar, S.S.: Sensor placement for grid coverage under imprecise detection, *International Conference on Information Fusion*, Vol.2, pp.1581–1587 (July 2002).
- [12] Wang, Y.-C., Hu, C.-C. and Tseng, Y.-C.: Efficient Deployment Algorithms for Ensuring Coverage and Connectivity of Wireless Sensor Networks, *Wireless Internet*, pp.114–121 (July 2005).
- [13] Roach, A. and Nagi, R.: A hybrid GA-SA algorithm for just-in-time scheduling of multi-level assemblies, *Computers and Industrial Engineering*, Vol.30, No.4, pp.1047–1060 (Sep. 1996).
- [14] Lin, M., Su, C. and Wang, F.: GASA based Optimal Coverage Scheme in Wireless Sensor Networks, *Energy Procedia*, Vol.13, pp.7239–7244 (2011).
- [15] Carle, J., Myoupo, J.F. and Seme, D.: A basis for 3-D cellular networks, *Proc. 15th International Conference on Information Networking*, pp.631–636 (2001).

- [16] Decayeux, C. and Seme, D.: A new model for 3D cellular mobile networks, *Parallel and Distributed Computing, 3rd International Symposium on/Algorithms, Models and Tools for Parallel Computing on Heterogeneous Networks, 3rd International Workshop*, pp.22–28 (July 2004).
- [17] Nazrul Alam, S.M. and Haas, Z.J.: Coverage and Connectivity in Three-Dimensional Networks, *The 12th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*, pp.346–357 (Sep. 2006).
- [18] Shibata, Y., Sato, Y., Ogasawara, N. and Chiba, G.: Ballooned Wireless Mesh Network for Emergency Information System, *Advanced Information Networking and Applications Workshops*, pp.1118–1122 (Mar. 2008).
- [19] 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).
- [20] 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, Vol.89, No.9, pp.796–800 (2006).
- [21] Okamoto, H., Kitao, K. and Ichitsudo, S.: Outdoor-to-Indoor Propagation Loss Prediction in 800-MHz to 8-GHz Band for an Urban Area, *IEEE Trans. Vehicular Technology*, Vol.58, No.3, pp.1059–1067 (2009).
- [22] Kitao, K. and Ichitsubo, S.: Path loss prediction formula for microcell in 400MHz to 8GHz band, *Electronics Letters*, Vol.40, No.11, pp.685–687 (May 2004).
- [23] inSSIDer, available from (<http://www.metageek.net/products/inssider/>).
- [24] Cisco Aironet 1130G series product specification, available from (http://www.cisco.com/en/US/prod/collateral/wireless/ps5678/ps6087/product_data_sheet0900aecd801b9058.html).



孫 為華 (正会員)

2003年大阪大学基礎工学部卒業, 2005年同大学大学院情報科学研究科博士前期課程修了, 2008年同大学院情報科学研究科博士後期課程修了. 同年奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科助教, 2013年大阪大学サイバーメ

ディアセンター特任助教, 2014年より現在滋賀大学経済学部情報管理学科准教授. 博士(情報科学). モバイルアドホック, 車車間通信に関する研究に従事. IEEE 会員.



柴田 直樹 (正会員)

1996年大阪大学基礎工学部中退, 1998年同大学大学院基礎工学研究科博士前期課程修了, 2001年同大学院基礎工学研究科博士後期課程修了. 同年奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科助手. 2004年4月滋賀大学経済学

部情報管理学科准教授. 2012年9月より現在, 奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科准教授. 分散システム, ITS, 並列アルゴリズム等の研究に従事. ACM, IEEE 各会員.



木谷 友哉 (正会員)

2002年大阪大学基礎工学部情報科学科卒業. 2006年同大学大学院博士後期課程修了. 博士(情報科学). 2005年奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科助手. 2008年静岡大学若手グローバル研究リーダー育成拠点特任

助教, 2013年同大学大学院情報学研究科准教授, 現在に至る. 主として, 高度交通システム(ITS)の研究に従事. IEEE, 電子情報通信学会, 自動車技術会各会員.



松尾 真也

2011年より, 奈良先端科学技術大学院大学博士前期課程に入学. GA プログラミングを利用したワイヤレスセンサネットワーク, 計算量理論の研究に従事.



伊藤 実 (正会員)

1977年大阪大学基礎工学部卒業, 1979年同大学大学院基礎工学研究科博士前期課程修了. 1979年大阪大学基礎工学部助手. 1986年大阪大学基礎工学部講師. 1989年大阪大学基礎工学部

助教. 1993年より奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科教授. 現在に至る. 工学博士. データベース理論, 効率的なアルゴリズム開発等の研究に従事. ACM, IEEE, 電子情報通信学会各会員.