

## 異方性トポロジにおける 無線センサネットワークのノード位置推定方式

高島 優斗<sup>†1</sup> 安達 直世<sup>†2</sup> 滝沢 泰久<sup>†2</sup>

無線センサネットワークにおいて、センシングデータの取得位置は重要な情報である。そこで我々は自己組織化マップ (SOM, Self Organizing Maps) を用いた位置推定方式をしている。本方式は、測距デバイスを用いず、かつ極少数のアンカーノードを使用することによって高精度な位置推定が可能である<sup>7)</sup>。無線センサネットワークが用いられる環境は多様な環境が想定され、障害物などにより見通し内と見通し外の空間が混在し、トポロジは異方性となる。以上のことから、本稿では、異方性ネットワークトポロジにおいて高い位置推定精度を維持するための本方式の改良方式とその有効性について述べる。

### Self-Organizing Localization for Wireless Sensor Networks on Anisotropic Topology

YUTO TAKASHIMA,<sup>†1</sup> NAOTOSHI ADACHI<sup>†2</sup>  
and YASUHISA TAKIZAWA<sup>†2</sup>

On wireless sensor networks, the acquisition location of sensing data is a very important property. Therefore, we have proposed the self-organizing localization which can estimate accurate location of sensor nodes without distance measurement device, and with a few anchor nodes. On the other hand, the sensing environment is generally composed of line-of-sight and non-line-of-sight on radio propagation, and then the network topology becomes anisotropic. According to the above, in this report, the improvement and evaluation of the self-organizing localization for anisotropic network topology is described.

#### 1. はじめに

無線端末とセンサを組み合わせた無線センサネットワークは、リアルワールドなサービスを目指すユビキタスネットワーク社会において、重要な技術要素である。リアルワールドなサービスの実現には、物理的な位置情報が重要な要素となる。そのため、無線センサネットワークを用いたセンサノードの正確な位置を特定するための研究が数多く行われている。

現在、使用されている位置推定技術としては測距機能の有無から Range-Base と Range-Free に大別できる。Range-Base は位置推定処理に TDOA (Time Difference Of Arrival) や TOA (Time Of Arrival) といった測距デバイスによって求めた各ノード間の距離情報を利用する方式である。代表例として GPS (Global Positioning System)<sup>1)</sup> が挙げられる。GPS では GPS

衛星からの電波を受信するデバイスを使用することによって位置推定を行うため、衛星からの電波を受信できない山間部や屋内での使用が難しい。また、特別な測距デバイスをセンサノードに取り付けることはコストが高くなる問題点がある。一方、Range-Free としては、APIT<sup>4)</sup> や DV-Hop<sup>5)</sup> などがあり、アンカーノードとの距離関係から位置推定を行うため測距機能を必要としない。しかし、これらの方式で正確な位置情報を得るためには、アンカーノードを大量に配置する必要がある。そのため、使用環境が制限され、拡張性、柔軟性に乏しいという問題点がある。

以上のことから、我々は、測距デバイスを必要とせず、極少数のアンカーノードにおいてセンサノード位置を高精度に推定するため、自己組織化マップ<sup>8)</sup>を用いたセンサノード位置推定方式を提案している。SOM とは、T.Kohonen により考案された教師なし学習ニューラルネットワークの一種である<sup>9)</sup>。SOM を用いた位置推定方式 (以降、SOM 位置推定方式) は、この考えを応用し、各ノード間で相互に位置情報を交換することによって、各ノードが自律的に自己位置を測位する方式である。本方式は、シミュレーション評価により

<sup>†1</sup> 関西大学 理工学研究科

Graduate School of Engineering, Kansai University

<sup>†2</sup> 関西大学 環境都市工学部

Faculty of Environmental and Urban Engineering,  
Kansai University

既存方式と比較して、極少数のアンカーノードで高精度な位置推定が可能であることが確認されている。

本方式のシミュレーション評価では、障害物の存在しない理想的な環境を想定している。しかし、無線センサネットワークが用いられる環境は多様な環境が想定され、障害物などにより見通し内と見通し外の空間が混在すると考えられる。このような環境では、ネットワークトポロジは異方性となる。従って、本稿では、障害物などにより異方性トポロジを構成する無線センサネットワークを想定し、このような環境において、推定位置精度の劣化を抑制する方式を提案する。さらに、シミュレーション評価からその有効性を述べる。

## 2. 関連研究

ここでは現在、研究されている位置推定技術について概説する。位置推定技術は、測距機能を用いた方式と用いない方式である以下の二つに分類することができる。

- RangeBased 位置推定方式
  - RangeFree 位置推定方式
- それぞれについて説明していく。

### 2.1 Rangebased 位置推定方式

RangeBased 位置推定方式は、位置を推定するためにノード間の距離情報を利用する。このためセンサノードにノード間通信機能以外に測距デバイスが必要とする方式である。現在使用されている無線端末を利用した測距機能として TDOA(Time Difference Of Arrival), TOA(Time Of Arrival) を用いたデバイスが用いられている。

TDOA 方式は送信側と受信側で異なる伝送媒体による通信を行い、それらの電波伝搬往復時間の差からノード間の距離を計算する方式である。TDOA 方式を用いた位置推定技術としては Active Bat<sup>2)</sup> と Cricket<sup>3)</sup> などが挙げられる。これらの技術は測距機能で得られた情報を使用し、三辺測量を用いて位置推定を行う。

TOA 方式は送信側から受信側に信号が到着するまでの時間を測定し、伝送媒体(超音波、電波等)の伝送速度からノード間の距離を計算する方式である。TOA 方式を用いた位置推定技術としては GPS を利用した位置推定技術が挙げられる。これらの位置推定技術は位置推定の精度が高いが、特別な測距デバイスを用いる必要がある。

### 2.2 RangeFree 位置推定方式

一方、RangeFree 位置推定方式は、位置推定に測距デバイスを用いない方式である。例としては、Centroid 方式<sup>10)</sup> APIT<sup>4)</sup> や DV-Hop<sup>5)</sup> が挙げられる。

Centroid 方式では、まず、アンカーノードが自身の位置情報を含んだパケットを一定の時間間隔でブロードキャスト送信する。位置推定処理を行うノードは、このパケットを受信することで自身と通信可能なノード

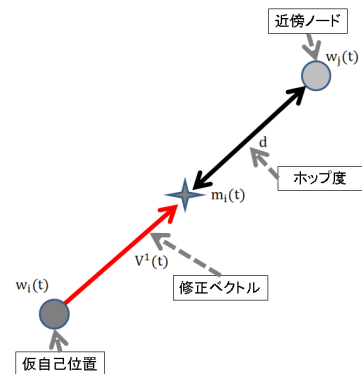


図 1 近傍ノードによる位置修正

Fig.1 Location update with 1 hop neighborhood node.

ド(以降、近傍ノード)の位置情報を取得し、それらの重心を利用し自身の位置を推定する。

APIT 方式は、アンカーノードが自身の位置情報を含んだパケットを一定の時間間隔でブロードキャスト送信する。位置推定処理を行うノードは、受信したパケットから3個のアンカーノードから構成できる三角形をすべて求める。その後、すべての三角形に対して自身が内側にいるのか外側にいるのかを判断することで自身の位置情報を推定する。

DV-Hop 方式は、アンカーノードからのホップ数と1ホップの平均距離の情報から、各ノードがアンカーノードまでの距離を見積もる。これを3つ以上のアンカーノードからの距離を見積もりことによって、多角測定により自らの位置を推定する。

これらの方式は少なくとも3つ以上のアンカーノードが必要であり、精度の向上には多量なアンカーノードが必要のため広範囲な空間への適用には十分な事前準備が必要である。

## 3. SOM 位置推定方式

本方式は、既存方式の問題を解決するため次の条件を満たすものとして提案している。

- アンカーノードへの依存性が極めて低い。具体的には、アンカーノード数が2点で相対位置を、3点で絶対位置を推定可能
- 事前に適用空間の各種特性情報を必要としない
- 測距機能などの特別なデバイスを必要としない

### 3.1 SOM 位置推定方式のアルゴリズム

本方式は、3つのステップにより本方式は位置推定を行う。

[Step.1] 各ノードは自己位置単独測位機能から自己位置を取得する。この機能がない際は自己位置をランダムに生成する。この仮の自己位置  $w_i(t)$  を自己位

置の初期値として、1次近傍ノードへ送信する。\$t\$は修正回数であり、仮自己位置の初期位置では\$t=0\$である。

[Step.2] 1次近傍ノード\$j\$から仮位置情報\$w\_j(t)\$を受信したノードはその仮位置情報とホップ数\$d\$により推定されるノード\$i\$の位置を入力ベクトル\$m\_i(t)\$とする。ホップ数とは、今回、測距デバイスがないためホップ数\$h\$をノード間距離として考える。\$X\$と\$Y\$はシミュレーション範囲\$X \times Y\$とする。その後、ノード\$i\$の仮自己位置と入力ベクトル\$m\_i(t)\$の距離\$|m\_i(t) - w\_i(t)|\$が最小となるような修正ベクトル\$V\_i^{1}(t)\$を生成することによってノード\$i\$の仮自己位置を入力ベクトル\$m\_i(t)\$に近づける(図1)。

$$V_i^{\{1\}}(t) = \frac{d - |w_i(t) - w_j(t)|}{|w_i(t) - w_j(t)|} (w_i(t) - w_j(t)) \quad (1)$$

また、修正処理の初期段階(繰り返し回数が少ない)では、近傍ノード\$j\$の近傍ノード集合のうち、ノード\$i\$から2ホップにあたるノード(以降、2次近傍ノード)\$k\$の仮位置とホップ数\$d\$により推定される位置を入力ベクトルとする。ここでの入力ベクトルは、ノード\$i\$と2次近傍ノード\$k\$とのホップ数\$d+d\$として生成する。その後、ノード\$i\$の仮位置をこの入力ベクトルに近づけるため、次のような修正ベクトルを生成する(図2)。

$$V_i^{\{2\}}(t) = \frac{d + d - |w_i(t) - w_k(t)|}{|w_i(t) - w_k(t)|} (w_i(t) - w_k(t)) \quad (2)$$

また、式(1)(2)による修正を実施した上で、2次近傍ノード\$k\$がホップ数\$d\$より近い(以後、トポロジの矛盾)場合、すなわち、\$d \geq |w\_i(t) - w\_k(t)|\$の場合、式(2)ネットワークトポロジの形成が誤っていると判断し、再度2次近傍ノードでの修正ベクトルを生成する。上記の修正ベクトル\$V\_i^1(t)\$から、次のように仮自己位置情報の更新を行う。

$$w_i(t+1) = \begin{cases} w_i(t) + \alpha_i(t) \cdot (V_i^{\{1\}}(t) + V_i^{\{2\}}(t)) & (t \leq \tau) \\ w_i(t) + \alpha_i(t) \cdot (V_i^{\{1\}}(t) + V_i^{\{2\}}(t)) & (t \geq \tau, d \geq |w_i(t) - w_k(t)|) \\ w_i(t) + \alpha_i(t) \cdot V_i^{\{1\}}(t) & (otherwise) \end{cases} \quad (3)$$

上式の\$\tau\$は修正処理を距離特性を優先したトポロジ形成から局所最適によるトポロジの形を整える段階へ移行する繰り返し回数のしきい値である。また、\$\alpha\_i(t)\$は\$t\$回目の修正時のノード\$i\$の学習関数であり、次のようになる。

$$\alpha_i(t) = \eta \alpha_i(t-1) (0 < \eta < 1) \quad (4)$$

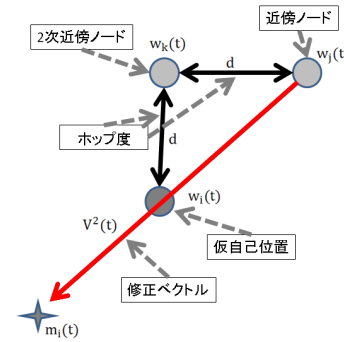


図2 2ホップ近傍ノードによる位置修正

Fig.2 Location update with 2 hop neighborhood node.

ただし、\$E\_i(t)\$は\$t\$回目の修正時のノード\$i\$の近傍ノードとの距離平均誤差、\$N\_i(t)\$はノード\$i\$の\$t\$回目修正時における近傍ノード数、\$\theta\$は近傍ノードとの距離平均誤差に関する閾値、\$\eta(0 < 1)\$は正の減衰定数である。

[Step.3] 前回の近傍ノードへの仮位置情報配信から一定時間経過後、修正された仮自己位置を含む仮位置情報を近傍ノードへ配信する。この情報を得たノードがStep.2を実施する。

以上のStep.2およびStep.3を繰り返し、各ノードは自己位置を推定し、ネットワークトポロジを再現する。

### 3.2 位置推定補正処理

本方式ではノード間は距離はホップ数を用いているため、相対的でありまた解像度が低い。従って、絶対位置を算出し、位置推定精度を向上させるため、次の2つの処理を行う。

- 推定トポロジにおけるトポロジ矛盾の判定と推定再試行の実施
- 推定トポロジを絶対座標への変換

#### 3.2.1 推定トポロジにおけるトポロジ矛盾の判定と推定再試行の実施

- 位置推定処理が収束状態(学習関数\$\alpha\_i(t)\$が一定の閾値以下)になった段階でトポロジの矛盾の判定を開始する
  - トポロジの矛盾が発生していると判定された場合、全ノードに対して位置推定処理の再試行を通知するメッセージを送信する
  - メッセージを受信した近傍ノードは、自身の学習関数\$\alpha\_i(t)\$を初期値の1に戻し、位置推定処理を再試行する
- 、また上記のトポロジの矛盾の判定には以下の式を用いる。

$$\frac{I_i^{\{2\}}}{N_i^{\{2\}}} < \theta \quad (5)$$

$I_i^{\{2\}}$  は、トポロジの矛盾の判定を行っているノード  $i$  における矛盾の発生回数、 $N_i^{\{2\}}$  は、矛盾の判定中の 2 次近傍ノードを用いた位置推定回数、 $\theta$  は、誤再現判定閾値である。

### 3.2.2 推定トポロジを絶対座標への変換

3 点のアンカーノードの真位置  $r_i$  と 3 点のアンカーノードの推定位置  $p_i$  を使用し、アフィン変換行列  $A$  を求める。求めたアフィン変換行列  $A$  をすべてのノードに与えることによって、推定トポロジを絶対座標へと変換する。  $A$  は下記の式 6 によって求められる。

$$\begin{pmatrix} r_{1x} & r_{1y} \\ r_{2x} & r_{2y} \\ r_{3x} & r_{3y} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} ap_{1x} + bp_{1y} + c & dp_{1x} + ep_{1y} + f \\ ap_{2x} + bp_{2y} + c & dp_{2x} + ep_{2y} + f \\ ap_{3x} + bp_{3y} + c & dp_{3x} + ep_{3y} + f \end{pmatrix} \quad (6)$$

$$A = \begin{pmatrix} a & b & c \\ d & e & f \end{pmatrix}$$

## 4. 異方性トポロジにおける方式改良

無線センサネットワークが用いられる環境は多様な環境が想定され、障害物などにより見通し内と見通し外の空間が混在すると考えられる。このような空間では、無線センサネットワークのトポロジは異方性となる。しかし、既存方式は異方性のネットワークトポロジにおいては、一部の方向の近傍ノード位置情報が欠落または減少するため、位置推定精度が劣化する可能性がある。そのため、異方性トポロジにおいて位置推定精度の劣化を抑制する方式として、下記点での改良を行い、それを提案する。

- ノード間トポロジ矛盾を解消するノード間ホップ度 (正の実数値)
- 3 次近傍ノードでの位置修正の追加

### 4.1 ノード間トポロジ矛盾を解消するノード間ホップ度 (正の実数値)

SOM 位置推定方式は測距デバイスを使用しない方式として提案している。そのため、ノード間の距離情報においてはホップ数を使用している。しかし、ホップ数は距離情報としては相対的かつ解像度が低いいためネットワークトポロジが形成されていた場合においてもトポロジの矛盾が発生してしまうケースも存在する。上記問題を解消するために、ネットワークトポロジの再現を再試行した場合ある程度のネットワークトポロジが形成されていると考え、トポロジの矛盾 (2 次近傍ノードが 1 次近傍ノードより近い位置にある) が発生する原因は、1 次近傍ノード間のホップ数 1 が距離情報として大きな値であるためと推定できる。従っ

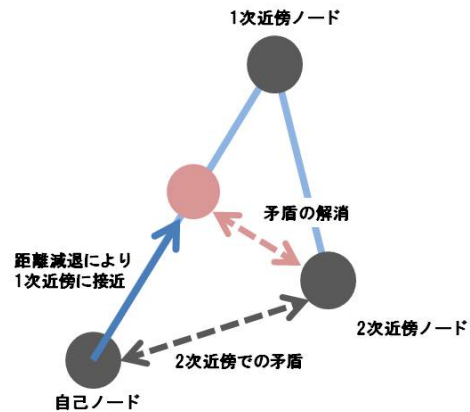


図 3 ノード間トポロジ矛盾を解消するノード間ホップ度 (正の実数値)

Fig. 3 Hop degree for avoidance of topology inconsistency.

て、ホップ数 1 (正の整数値) を減衰して、これをホップ度 (1 より小さい正の実数値) として、これによりトポロジ矛盾を解消して位置推定を行う (図 3)。ノード間ホップ度は式 (7) のように算出する。  $T$  は再試行回数である。これによりネットワークトポロジの再現の収束を早めると共に問題を解消する。

$$d_{T+1} = \frac{d}{T+1} \quad (7)$$

### 4.2 3 次近傍ノードでの位置更新の追加

SOM 方式での位置推定アルゴリズムは近傍ノードの位置情報が推定に重要な要素となる。しかし障害物の存在する環境においては、ノード配置によって近傍ノードが少数になる。そこで近傍ノード情報を増加させるため、3 次近傍ノードの位置情報  $w_i(t)$  を取得させた。その際、ここでの入力ベクトルは、ノード  $i$  と 3 次近傍ノード  $k$  との距離は、少なくとも、1 次近傍ノードより遠く位置することから 2 次近傍ノードと同様に次のように算出する。

$$V_i^{\{3\}}(t) = \frac{2d - |w_i(t) - w_l(t)|}{|w_i(t) - w_l(t)|} (w_i(t) - w_l(t)) \quad (8)$$

近傍ノードの位置情報は 1 次近傍、2 次近傍、3 次近傍をそれぞれ任意に 1 つ近傍ノードを選択するが、通信量を改良前と同等に抑制する。そこで、修正の段階を初期段階、以降の段階の 2 つに分ける。初期段階では 3 次近傍ノードと 1 次近傍ノードによる位置修正を行い、段階以降は 2 次近傍ノードと 1 次近傍ノードにより位置更新を行う。すなわち、位置推定初期段階では比較的速くのノード位置情報を用いて大域的な処理を行い、その後比較的近きのノード位置情報から、局所的な処理を行う。従って、通信量においては、改

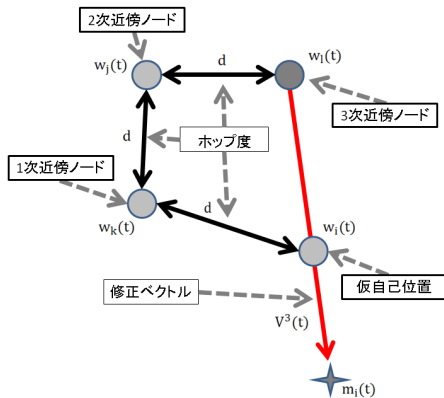


図 4 3 ホップ近傍ノードによる位置修正  
 Fig. 4 Location update with 3 hop neighborhood node.

良前と同等に、ノード間での位置情報交換は 2 つのノード位置に収まる。そのため、上記の修正ベクトル  $V_i^1(t)$  から、次のように仮自己位置情報の更新を行う (図 4)。

$$w_i(t+1) = \begin{cases} w_i(t) + \alpha_i(t) \cdot (V_i^{\{1\}}(t) + V_i^{\{3\}}(t)) & (t < \tau, d \geq |w_i(t) - w_l(t)|) \\ w_i(t) + \alpha_i(t) \cdot (V_i^{\{1\}}(t) + V_i^{\{2\}}(t)) & (t \geq \tau, d \geq |w_i(t) - w_k(t)|) \\ w_i(t) + \alpha_i(t) \cdot V_i^{\{1\}}(t) & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (9)$$

## 5. 評価

ここでは、同じ RangeFree 方式である DV-hop 方式と SOM 方式での位置推定結果を比較し、検証する。

### 5.1 評価方法

シミュレーションを実施するにあたり、位置推定を行う空間は  $1 \times 1$  の平面として定義する。この平面上に位置が既知であるアンカーノード 3 個と、位置が未知であるノードを複数個、また障害物として長方形の物体を配置し、ネットワークトポロジを形成する。また障害物での電波干渉を考慮したノード間の電波伝搬は考えず、障害物間に存在するノードは通信できないと定義する。また、DV-Hop では推定された位置座標が多角測量に最小二乗法を利用しているため、最小二乗法の解が収束しなかった場合アンカーノード 3 点の重心を位置座標として得る。

以下に、本シミュレーション評価方式で想定する条件を示す。

- ネットワーク空間は  $1 \times 1$  の平面領域と仮定
- 障害物は  $0.5 \times 0.4$  の長方形とし、各頂点を座標  $(0.5, 0.35), (0.5, 0.75), (1, 0.75), (1, 0.35)$  に

### 配置

- 領域にノード・アンカーノード 3 点をランダムに配置したネットワークトポロジを定義
- 距離減衰は、(一定距離/再試行回数)として減衰する

比較評価方法として絶対位置誤差  $E$  の各ノード間距離  $D_n$  に対する比率  $F$  (以降、相対誤差) とネットワーク全体のジオメトリの合同性により行う。相対誤差は次のように定義する

$$F = \frac{100}{n} \sum_{a=1}^n \frac{E}{D_a} \quad (10)$$

$n$  はノード数をである。ネットワーク全体のジオメトリのオリジナルジオメトリとの合同性の評価は、次のように求める。

$$M = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \frac{W_i - W_j}{R_i - R_j} \quad (11)$$

$$V = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{1}{n} \left( \sum_{j=1}^n \frac{W_i - W_j}{R_i - R_j} - M \right)^2 \right) \quad (12)$$

$W_a$  はノードの推定された位置、 $R_a$  は各ノードの真位置である。すなわち、上記式による分散値  $V$  が 0 に近いほど再現されたネットワークジオメトリはオリジナルの合同形に近いことを示す。

### 5.2 比較評価結果

相対誤差においてはノード数が少ない場合は、本方式が劣っている。これは、本方式が多数のノードが通信することによって位置推定を行う方式であるため、ノード数が少ない場合は位置精度が劣化してしまう。多数の点が重心の座標を推定するため、多数の点が重なって推定される。そのため分散が求められない。そのため、ネットワークトポロジの形は真値に比べて遠い形になっている。しかし、本方式と改良を行わなかった方式とでは、明らかに大きな差がみられる。これにより本方式の有効性が示される。(図 5,6) 次に、推定されたネットワークトポロジについて評価する。(図 7,8)

## 6. まとめ

本稿では、評価より精度誤差はノード数が増えるに対して提案方式は精度の向上が見られた。トポロジ形成精度については DV-Hop 方式は収束がしない場合には重心に推定されるため真値のトポロジーとは大きく異なってしまふ。提案方式はトポロジの形成がある程度できているとみられる。以上のことからどちらの評価に対しても提案方式が優れており、センシングデバイスを利用するサービスにおいて有用な方式であるといえる。今後は、相対精度の向上と電波伝搬を考慮したシミュレーションを行う予定である。



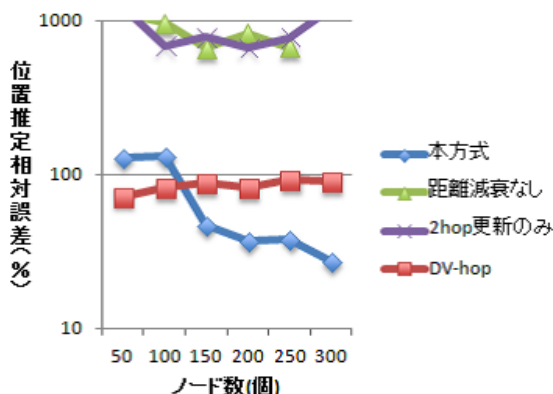


図 5 相対誤差

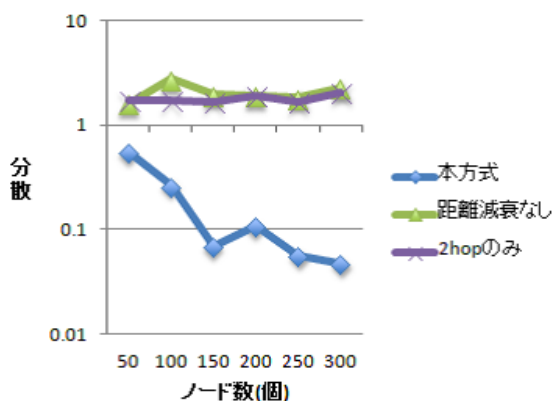


図 6 分散

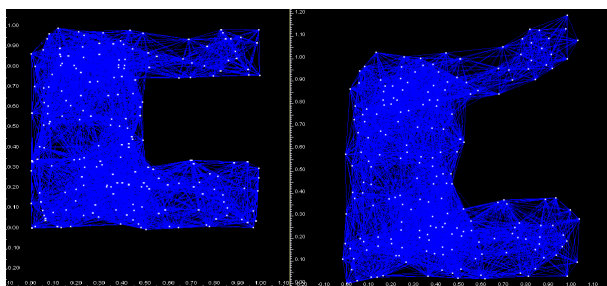


図 7 SOM 位置推定方式 ノード数 200 個  
 左図：真値トポロジ 右図：推定トポロジ

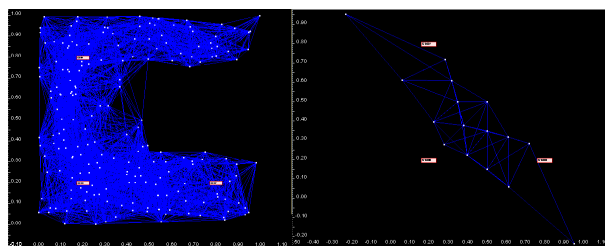


図 8 DV-Hop 方式 ノード数 200 個  
 左図：真値トポロジ 右図：推定トポロジ

- 2) A.Harter, A.Hopper, P.Steggles, A.Ward, and P.Webstar : The anatomy of a context-aware mobile applications, MOBICOM1999 (1999).
- 3) N.Priyantha, A.Miu, H.Balakrishman, and S.Teller : The cricket compass for context-aware mobile applications, MOBICOM2001 (2001).
- 4) Tian He, Chengdu Huang, Brian M.Blum, John A.Stankovic, and Tarek F.Abdelzaher : Range-free localization and its impact on large scale sensor networks, ACM Transactions on Embedded Computing Systems (TECS), v.4 n.4, p.877-906 (2005).
- 5) D.Niculescu and B.Nath : DV-based positioning in ad hoc networks, Telecommun.Syst, vol.22,pp267-280 (2003).
- 6) 滝沢泰久, デイビス ピーター, 岩井誠人, 川合 誠, 小花貞夫 : 無線アドホックネットワークによる自律的端末位置推定方式とその特性, 情報処理学会論文誌, Vol.46, No.12 (2005).
- 7) 大野, 安達, 滝沢 : 無線センサネットワークにおける自己組織化位置推定方式の提案, 情報処理学会論文誌, Vol.53, No.7, pp.1774-1782, (2012).
- 8) E.Bonabeau and F.Henau : Graph Partitioning with Self-Organizing Maps, Private Communication (1998).
- 9) T.Kohonen : Self-Organizing Maps, 3rd edition, Spriner (2001).
- 10) N.Bulusu, J.Heidemann, and D.Estrin : GPS-less low cost outdoor localization for very small devices, IEEE Personal Communications Magazine (2000).

### 参 考 文 献

- 1) B.Hofmann-Wellenhof, H.Lichtenegger, and J.Collins : Global Positioning System; Theory and Practice, 4th ed. (1997).