

# 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

大野 翔平<sup>1</sup> 安達 直世<sup>2</sup> 滝沢 泰久<sup>2,a)</sup>

受付日 2011年10月24日, 採録日 2012年4月2日

**概要:** 環境モニタリングシステム等に適用される大規模無線センサネットワークにおいて, センサノードの位置情報を知ることは重要な要件となっている. 位置推定方式は様々な方式が研究されているが, 高精度な位置推定を行うためには, 大量の位置情報が既知のノード (アンカノード) が必要となる. あるいは, ノード間距離を測定するデバイスの搭載が必要となる. これは無線センサネットワークでの利用を想定した場合に, 適用可能な環境や, 適用可能なセンサノードが限定されることになる. この問題を解決するため, 自己組織化マップ (SOM) を用いた適用制約がきわめて低い位置推定方式を提案する. 提案方式は, 測距デバイスを必要とせず, 極少数のアンカノードと単純な処理の繰返しにより正確な位置推定を行うことができる. 本論文では, 提案方式のアルゴリズムと通信手順を述べ, さらにネットワークシミュレータを用いた評価結果を示す.

**キーワード:** ノード位置推定, センサネットワーク, 自己組織化, アドホックネットワーク

## Self-Organizing Location Estimation Method for Wireless Sensor Networks

SHOHEI OHNO<sup>1</sup> NAOTOSHI ADACHI<sup>2</sup> YASUHISA TAKIZAWA<sup>2,a)</sup>

Received: October 24, 2011, Accepted: April 2, 2012

**Abstract:** Recently, large scale wireless sensor networks are aimed to apply to environmental monitoring system. The monitoring system requires the location where data is monitored. The conventional location estimation method, is GPS, however GPS is suitable for wireless sensor network because of its cost and power consumption. Therefore, many location estimation methods without GPS are proposed. However, they need an arranged space using a large number of anchor nodes whose locations are well known, or they need advance information such as information on radio conditions in the space. Furthermore, some localization assume the use of advanced distance measurements, such as TOA and TDOA, to achieve high accuracy in estimating locations, but these advanced distance measurement schemes cannot be used for ordinary sensor node systems. To resolve these problems, we propose Self-Organizing localization for wireless sensor networks. The proposed localization applies Self-Organizing Maps to localization, and needs no distance measurement scheme and needs no advance information on a space, and can estimate node location with accuracy. In this paper, the algorithm and communication process of the proposed localization is described, and its accuracy is shown.

**Keywords:** localization, sensor networks, Self-Organizing Map, ad-hoc networks

<sup>1</sup> 関西大学大学院理工学研究科  
Graduate School of Engineering, Kansai University, Suita,  
Osaka 564-0073, Japan

<sup>2</sup> 関西大学環境都市工学部  
Faculty of Environmental and Urban Engineering, Kansai  
University, Suita, Osaka 564-8680, Japan

a) takizawa@kansai-u.ac.jp

### 1. はじめに

各種センサを搭載した無線端末により構成される無線センサネットワークは, 周囲の状況に応じた情報処理サービスの実現を目指すユビキタスネットワーク社会の実現にお

いて、重要な技術要素である。無線センサネットワークを利用したサービスとしては、環境モニタリングや気象観測、災害対策等が考えられている。これらのサービスでは、センシングした情報の発生源を特定するために取得したデータの物理的な位置が重要な情報となるため、センサノードの位置を特定するための仕組みが必要となる。

現在、利用もしくは研究されている位置推定方式は、ノード間測距デバイスの使用の観点から分類すると、レンジベース方式とレンジフリー方式に分類できる。レンジベース方式は、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。位置推定方式として最も一般的である GPS (Global Positioning System) はレンジベース方式に分類でき、精度の高い位置推定を行うことができる。ただし、この方式は、無線センサノードにノード間距離を測定する測距デバイスを搭載する必要があるため、一般的なセンサノードでは利用が困難であり、適用可能なセンサノードが限られる。

一方、レンジフリー方式は、位置推定処理にノード間距離を測定する測距デバイスを利用しない方式である。例としては Centroid [1], DV-Hop [2], APIT [3] が提案されている。これらの方式は、単純な処理とセンサノード間の通信のみを用いて位置推定処理を行っているため、多様なセンサノードに適用可能である。しかし、これらの方式はレンジベース方式と比較すると精度が低く、位置推定精度を向上させるためには大量の位置情報が既知のセンサノード(以降、アンカノード)が必要となる。そのため、広範囲に大量のセンシングデバイスを散布することを想定した環境モニタリング等のサービスでは、十分な数のアンカノードにより構成された空間を必要とする。したがって、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。

上記の問題を解決するため、我々は測距デバイスを必要としないレンジフリー方式で、かつ極少数のアンカノードで位置推定を行うことができるスペースフリー位置推定方式を提案する。提案するスペースフリー位置推定方式は、次の要件を満たすものとする。

- 測距デバイスを必要としない。
- アンカノードへの依存性がきわめて低い。具体的には、アンカノード数が2点で相対位置、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(電波伝搬情報や空間に配置されている設備の情報等)を必要としない。

ここでいう相対位置とは、再現されたネットワークトポロジ上におけるアンカノード相対の位置であり、絶対位置とは、推定領域内の各ノードにおける真位置座標である。上記要件を満たすため、提案方式では、極少数のアンカノードで高精度な位置推定を行うことができる SOM (Self Organizing Maps, 自己組織化マップ) を用いた位置

推定方式 [4] (以降、既方式という) をベースとして使用する。SOM とは、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り、既方式は、この考えを応用し各ノードが周囲のノードとの情報共有により自己位置を推定する方式である。しかし、既方式は位置推定処理にノード間の距離情報を用いており、センサノードに測距デバイスが搭載されていることを想定しているため、現状ではレンジベース方式として提案されている。したがって、提案方式は、既方式において測距デバイスの利用を排除する。そのうえで、提案方式はノード間の相対的な位置関係を効率的に SOM へ適用することにより、他の手法と比較して極少数のアンカノードで高精度な位置推定を維持することを可能とした。本論文では、提案方式のアルゴリズムと通信手順を述べ、さらに無線センサネットワークでの利用を想定し、ネットワークシミュレータ Qualnet を用いた評価結果からその有効性を示す。

以下、2章では、位置推定方式の関連研究について述べる。3章では、提案方式のアルゴリズムと通信手順を述べる。4章では、ネットワークシミュレータを用いた提案方式の評価結果からその有効性を示す。最後に、5章では、まとめと今後の課題について述べる。

## 2. 関連研究

本章では、ノード位置の推定を行う関連技術について、ノード間測距デバイスの使用という点でレンジベース方式とレンジフリー方式に分類し説明する。また、各方式において、本論文で前提としているスペースフリー位置推定の要件との比較も示す。

### 2.1 レンジベース方式

レンジベース位置推定方式は、測距デバイスを用いる方式であり、ノード間距離の測定には TDOA (Time Difference Of Arrival) や TOA (Time Of Arrival) を利用している。

レンジベース方式の最も一般的な例としては、GPS (Global Positioning System) [5] を用いた位置推定方式がある。測距機能には TOA 方式、位置推定には GPS 衛星を利用した三辺測量を用いており、広範囲において比較的高精度な位置推定を行うことができる。室内での使用を想定した位置推定方式としては、Active Bat [6] や Cricket [7] が提案されている。これらの方式は測距機能に TDOA 方式を、位置推定には三辺測量を用いており、比較的精度の良い位置推定を行うことができる。また、測距機能に RSSI (Received Signal Strength Indicator) を用いた RADAR [8], SpotON [9] もある。ただし、これらの方式は、正確な位置推定を行うために領域内に大量のアンカノードを配置する必要があるため、拡張性や柔軟性に乏しいといった問題点がある。

以上のように、レンジベース方式は高精度な位置推定を

行うことができる。しかし、測距デバイスをセンサノードに搭載する必要があるため、前述のスペースフリー位置推定の要件は満たさない。

## 2.2 レンジフリー方式

レンジフリー位置推定方式は、測距デバイスを利用しないため、比較的単純なデバイスのみで位置推定を行うことができる。レンジフリー位置推定方式の例としては、Centroid方式 [1] や DV-Hop 方式 [2], APIT 方式 [3] がある。

Centroid 方式では、まず、アンカ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（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。各ノードの処理は単純な処理のみですが、高精度な位置推定を行うためには多数のアンカノードが必要となるため、スペースフリー位置推定の要件は満たさない。

DV-Hop 方式では、はじめに、アンカノードからのホップ数と 1 ホップの平均距離情報から各ノードがアンカノードまでの距離を推定する。アンカノードからのホップ数は、フラッディングにより取得する。その後、3つ以上のアンカノードとの距離を推定し、三辺測量を用いることで自身の位置を推定する。アンカノード 3 点での位置推定が可能であるが、高精度な位置推定を行うためにはアンカノードが多数必要となる。また、アンカノード数 3 点未満では位置推定不能である。したがって、スペースフリー位置推定の要件は満たさない。

APIT 方式では、アンカ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。この方式の位置推定精度は、アンカノードにより構成可能な三角形の数に依存するため、高精度な位置推定を行うためには多数のアンカノードが必要となる。したがって、スペースフリー位置推定の要件は満たさない。

他にも SOM を用いた位置推定方式 [10], [11], [12], [13] がある。既存研究 [10], [11] では位置推定にトレーニングセットと呼ばれる事前に入手した情報を用いている。既存研究 [12] では、位置推定に事前に入手した無線メディアの特性情報である最大通信範囲を利用し、推定精度はこの値に強く依存する。したがって、スペースフリー位置推定の要件を満たさない。また、位置推定アルゴリズムには、近傍ノード情報をいったん集約し位置情報を一括更新する方式を利用している。SOM はその特性上、一括更新の場合には最適解から乖離した点に収束する可能性が高くなるた

め、位置推定に誤差が生じる可能性が高い。既存研究 [13] では無線センサネットワーク上での利用を想定した検証が行われているが、TDOA や TOA の測距デバイスの利用を前提としており、スペースフリー位置推定の要件は満たさない。

## 3. 提案方式

前章で示したように、既存方式はスペースフリーの要件を満たさない。本論文では、無線センサネットワークにおいて求められるスペースフリー位置推定の要件を満たす位置推定方式を提案する。本章では、はじめに提案方式のベースとして使用した SOM (Self Organizing Maps, 自己組織化マップ) を用いた位置推定方式 [4] の概要とアルゴリズムについて説明する。その後、提案方式であるスペースフリー位置推定方式について説明する。

### 3.1 SOM を用いた位置推定方式

SOM (自己組織化マップ) は Kohonen により 1981 年頃に発表された教師なし学習ニューラルネットワークで、入力パターン群をその類似度に応じて分類する能力を自律的に獲得していくニューラルネットワークである [14]。この SOM の高次元データを低次元に変換する機能を利用し、各種研究が行われている。また、Bonabeau らは SOM をネットワークトポロジの再現に適用し、定式化している [15]。本論文でベースとして利用したアルゴリズムは、Bonabeau らの手法をもとにさらに改良されたものである [4]。

位置推定処理には、少数の位置情報が既知のアンカノードと、多数の位置情報が未知のノードを利用する。各ノードは自身の近傍ノードとブロードキャストによりデータの送受信を行い、得られた情報から自身の仮自己位置を修正する。ブロードキャストタイミングの一元制御等は行っていないため、各ノード間の通信はステートレスであり、自己位置修正処理はノードごとに非同期、かつ独立に行われる。また、位置推定処理の初期段階には自身の近傍ノードを経由して通信できるノード（以降、2 次近傍ノードという）を利用した修正処理も行っている。これは位置推定処理の初期段階において、本来通信できないノードからの情報を取得することでラフな大域的な位置を推測することを目的としている。一方、位置修正処理の後半では 2 次近傍ノードを用いた修正処理は行わず、1 次近傍ノードのみによる精密な位置の推定を行っている。以下に、そのアルゴリズムを説明する。

[Step.1] 各ノードにおいて自己位置単独測位機能から自己位置を取得する。この機能がない場合はランダムに自己位置を生成する。この自己位置を、仮の自己位置  $w_i(t)$  の初期値として、近傍ノードへ仮位置情報を配信する。 $t$  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] 近傍ノード  $j$  から仮位置情報を受信したノード

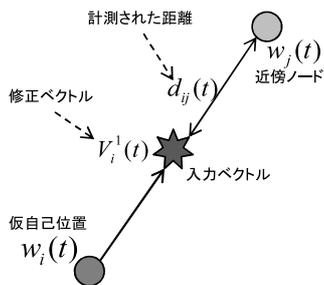


図 1 近傍ノードによる入力ベクトルと修正ベクトル

Fig. 1 Input vector and correction vector by neighbor node.

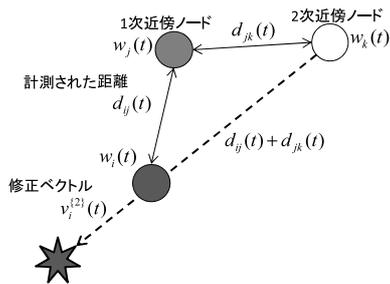


図 2 2次近傍ノードによる位置修正 1

Fig. 2 Positional correction with 2 hop neighborhood node 1.

ノード  $i$  は、端末間測距機能から近傍ノード  $j$  との距離  $d_{ij}(t)$  を取得する。近傍ノード  $j$  の仮位置  $w_j(t)$ 、その距離  $d_{ij}(t)$  により推定されるノード  $i$  の位置を入力ベクトル  $m_i(t)$  とし、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。すなわち、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 (図 1)。

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

また、修正処理の初期段階では、近傍ノード  $j$  の近傍ノード集合のうち、ノード  $i$  の 2 次近傍ノードの仮位置と距離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、精度より距離特性を優先させてトポロジの特徴を形成するためのベクトルとするため、ノード  $i$  と 2 次近傍ノード  $k$  との距離をノード  $i$  と近傍ノード  $j$  との距離  $d_{ij}(t)$  と近傍ノード  $j$  と 2 次近傍ノード  $k$  との距離  $d_{jk}(t)$  との和とする。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)。

$$V_i^{2}(t) = \frac{d_{ij}(t) + d_{jk}(t) - |w_i(t) - w_k(t)|}{|w_i(t) - w_k(t)|} \cdot (w_i(t) - w_k(t)) \quad (2)$$

また、式 (1), (2) による修正を実施したうえで、2 次近傍ノード  $k$  が近傍ノード  $j$  より近い (距離制約で矛盾がある) 場合、すなわち、 $|w_i(t) - w_j(t)| \geq |w_i(t) - w_k(t)|$  の場合、式 (2) 修正ベクトルの方向が誤っていると判断し、ノード  $i$  へのベクトル方向から近傍ノード  $j$  へのベクトル方向に

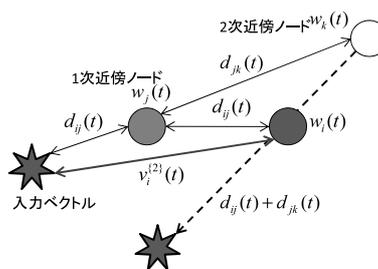


図 3 2次近傍ノードによる位置修正 2

Fig. 3 Positional correction with 2 hop neighborhood node 2.

変更し、次のような修正ベクトルを生成する (図 3)。

$$V_i^{2}(t) = w_j(t) - w_i(t) + \frac{d_{ij}(t)}{d_{jk}(t)} (w_j(t) - w_k(t)) \quad (3)$$

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。

$$w_i(t+1) = \begin{cases} w_i(t) + \alpha_i(t) \cdot \left( V_i^{1}(t) + \sum_{k=1}^{U_i^{2}} V_k^{2}(t) \right) & t \leq \tau \\ w_i(t) + \alpha_i(t) \cdot V_i^{1}(t) & t > \tau \end{cases} \quad (4)$$

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返し回数のしきい値である。  $U_i^{2}$  は、ノード  $i$  の 2 次近傍ノード数である。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。式 (5) 中の  $\eta$  は、学習関数  $\alpha_i(t)$  の減衰定数である。

$$\alpha_i(t) = \eta \cdot \alpha_i(t-1) (0 < \eta < 1) \quad (5)$$

[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。ここでいう一定時間とは、位置推定処理開始時に設定した一定の間隔である。ただし、提案方式では、キャリアセンスによって発生するデータリンク層の伝送処理遅延を利用しネットワークのトラフィック状況を推測し、パケット損失を抑制するため、送信間隔の制御を行っている [13]。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、ネットワークトポロジを再現することで、各ノードが自己位置を推定する。

### 3.2 ノード位置相関による位置推定処理の強化

既方式では、各ノードの仮位置情報とノード間の距離情報を送受信することで、ノード間の相関を示すベクトルを修正する処理を繰り返している。上記の処理を繰り返すことで、最終的にはネットワーク全体のトポロジを再現し、

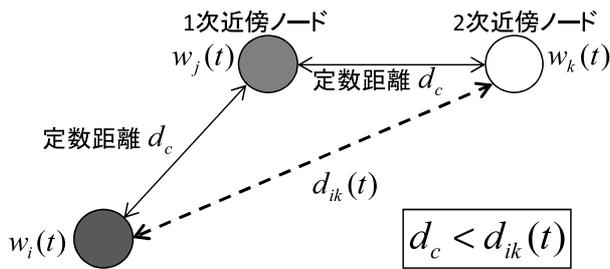


図 4 ネットワークトポロジ上での相対的位置関係

Fig. 4 Relative location on the network topology.

絶対位置情報を求める。また、既方式は、アンカノードが 2 点の場合においても相対位置を再現でき、さらに、アンカノードがない場合においてもオリジナルトポロジの図形的特徴を再現できる。

しかし、既方式はノード間測距デバイスの利用を前提としているため、スペースフリー位置推定の要件を満たさない。したがって、提案方式では、スペースフリー位置推定の要件を満たすため、既方式に対してノード間測距デバイスを不要とする改良を行う。この方針に基づき、1 次近傍ノード間の距離はすべてのノードで一定値に設定する。ここでいう一定値とは、位置推定処理開始時に無作為に設定される定数距離  $d_c$  である。1 次近傍ノード間の定数距離  $d_c$  は一定値であるため、2 次近傍ノード間の距離は 1 次近傍ノード間の距離よりも必ず大きくなる。したがって、1 次近傍ノードと 2 次近傍ノードとのネットワークトポロジ上での相対的位置関係に矛盾は生じない (図 4)。この定数距離  $d_c$  と各ノードの仮位置情報を SOM に適用し、ネットワークトポロジを再現する。また、ネットワークトポロジの再現処理には、相対的な位置関係のみを利用すればよいのでアンカノードの位置情報は用いずに位置推定処理を行う。その後、アンカノード情報を用いた位置補正機能により、相対位置または絶対位置を求める。

測距デバイスを利用しない場合、1 次近傍ノードと 2 次近傍ノードとの相対的な位置関係のみが利用可能であるため、各ノードにおいて、この関係を以下のように活用する。

- 位置推定処理の初期段階では、2 次近傍ノードを用いた修正処理を利用する。
- 2 次近傍ノードを用いた修正処理の終了閾値を超えた後も、距離制約に矛盾がある場合のみ追加的に修正処理を行う。
- 位置推定処理において、学習関数  $\alpha$  が小さくなり、位置推定アルゴリズムが収束に近づいた際に距離制約の矛盾を確認し、矛盾したトポロジとなる近傍ノード数が基準値を上回る場合、現在再現されたトポロジから位置推定処理を再試行する。

修正処理を行う修正ベクトルは図 2, 図 3 および式 (2), (3) で示したものを使用する。ただし、提案方式では、既方式で利用していた端末間距離  $d_{ij}(t)$  を無作為に設定した定

数距離  $d_c$  とする。位置推定処理の初期段階における 2 次近傍ノードを用いた修正処理では、3.1 節で説明した方式を利用している。提案方式では既方式と異なり、正確なノード間距離情報はなく、定数距離  $d_c$  による相対的な位置関係のみが利用可能である。したがって、提案方式では、近傍ノードのトポロジ情報 (1 次近傍ノードと 2 次近傍ノードの相対的位置関係) に注目する。既方式では、初期段階にのみ 2 次近傍ノードによる修正処理を実施していたが、提案方式では、初期段階終了後も近傍ノード間の相対的位置関係である距離制約の矛盾 (図 3 に示す関係) がある場合に、2 次近傍ノードによる修正処理を行う。しかし、2 次近傍ノードによる更新はその変数が大きいため、ネットワーク全体で頻繁に実施すると、再現処理が振動し、最適状態から乖離した状態で収束する。これを抑制するため、提案方式では、複数回連続して距離制約の矛盾を確認できた場合にのみ 2 次近傍ノードによる修正処理を実施している。

前述の追加的な 1 次近傍ノード情報と 2 次近傍ノード情報を用いた位置修正を実施した場合においても、1 次近傍ノードと 2 次近傍ノードとの限定された情報から位置推定処理を行っているため、ネットワークトポロジを正確に再現できないケースもある。このようなケースを低減するため、提案方式では以下の手順でネットワークトポロジの再現を再試行する。

- 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) になった段階で距離制約の矛盾の判定を開始する。
- 距離制約の矛盾の判定では、位置推定処理ごとに、1 次近傍ノード間の距離と 2 次近傍ノード間との距離の比較を行う。
- 距離制約の矛盾が発生していると判断された場合、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、位置推定処理の再試行判定には以下の式を用いる。

$$\frac{I_i^{[2]}}{N_i^{[2]}} < \theta \tag{6}$$

$I_i^{[2]}$  は、距離制約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。

既存研究 [4], [14], [15] より、SOM を適用することでその図形的特徴を再現できることは示されている。また、文献 [15] では、SOM を用いてネットワークトポロジを再現することも示している。以上のことから、提案方式の

改良アルゴリズムが有用であるならば、既方式と同様に、ネットワークポロジの図形的特徴を再現できると考えられる。しかし、定数距離  $d_c$  は無作為に設定された一定値であるため、再現されたネットワークポロジはオリジナルのネットワークポロジとはスケールが異なると考える。したがって、提案方式の改良アルゴリズムが有用であるという前提において、提案方式により再現されるネットワークポロジはオリジナルポロジに対して相似形であると仮定する。この仮定に基づき、アンカノード情報を用いることで、再現されたネットワークポロジにおけるノード位置関係を以下の処理により変換し、相対位置、および絶対位置を推定する。

- 2点のアンカノードを用いた場合、アンカノードの推定位置と実位置に基づき、再現されたネットワークポロジのスケールを補正し、相対位置を推定する。
- 3点のアンカノードを用いた場合、アンカノードの推定位置と実位置に基づくアフィン変換により、推定位置を絶対位置へと座標変換する。

2点のアンカノードを用いる場合、式(7)に示すスケール修正値  $r$  を利用する。

$$r = \frac{\tilde{d}_{ab}}{D_{ab}} \quad (7)$$

$$\tilde{d}_{ab} = |w_a - w_b| \quad d_{ab} = |W_a - W_b| \quad (8)$$

$\tilde{d}_{ab}$  はアンカノード  $a$  とアンカノード  $b$  間の推定距離、 $D_{ab}$  はアンカノード  $a$  とアンカノード  $b$  間の実距離である。 $w_a$  はアンカノード  $a$  の推定位置、 $W_a$  はアンカノード  $a$  の実位置である。式(7)で求めた修正値  $r$  を利用し、推定位置を次のように更新することでネットワークポロジのスケールを調整する。

$$\hat{w}_i = \frac{w_i}{r} \quad (9)$$

上記処理により、各ノードは推定位置をネットワーク上の相対位置へと座標変換する。

3点のアンカノードを用いた場合、アンカノードの推定位置  $w_a$  と実位置  $W_a$  を用いて、次のようにアフィン変換係数を求める。式中の  $p, q, r, s, t_x, t_y$  はアフィン変換用の係数である。

$$X_a = px_a + qy_a + t_x \quad Y_a = rx_a + sy_a + t_y \quad (10)$$

$$W_a = (X_a, Y_a) \quad w_a = (x_a, y_a) \quad (11)$$

求められた係数から、各ノードにおいて推定位置  $w_i$  を次のようにアフィン変換(拡大, 縮小, 回転, 平行移動, 対称移動)し、絶対位置の再現を行う変換座標  $\hat{w}_i$  を求める。

$$\begin{pmatrix} \hat{x}_i \\ \hat{y}_i \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} p & q & t_x \\ r & s & t_y \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_i \\ y_i \\ 1 \end{pmatrix} \quad (12)$$

$$\hat{w}_i = (\hat{x}_i, \hat{y}_i) \quad w_i = (x_i, y_i) \quad (13)$$

以上の処理により、再現されたネットワークポロジから絶対位置情報を推定する。

### 3.3 通信手順

本節では、前述の方式を実ネットワーク上で利用することを想定した通信手順について述べる。提案方式の通信手順の概要は以下のようになる。

- ネットワークポロジ再現フェーズ
- 位置推定処理再試行判定フェーズ
- アンカノード情報による位置情報補正フェーズ

ネットワークポロジ再現フェーズでは、各ノードが非同期にブロードキャスト送信を行う。その際、ブロードキャストパケットには、自身の仮位置情報と自身の1次近傍ノード情報(2次近傍ノードを用いた修正処理に使用)を付加する。ただし、提案方式はブロードキャストによる通信を用いるため、パケットの分割は行えない。したがって、パケットに付加できる1次近傍ノード情報は、ブロードキャストパケットのパケットサイズにより制限される。そのため、提案方式では、ブロードキャスト送信を開始する際に付加する1次近傍ノード情報を自身の近傍ノード情報中からランダムに選択している。

位置推定処理再試行判定フェーズでは、学習関数  $\alpha$  が一定の閾値以下になった場合に各ノードが非同期に再試行判定を行う。具体的には、再試行判定開始後に受信したブロードキャストパケットから、1次近傍ノードの位置情報と2次近傍ノードの位置情報を取得し、距離制約の矛盾が発生した回数を記録しておく。一定数のブロードキャストパケットを受信した後、距離制約の矛盾の発生回数とブロードキャストパケットの受信回数から矛盾の発生確率を算出する。この発生確率が閾値以上であった場合に再試行処理を行う。再試行処理時には、再試行と判定したノードがフラッディングを用いて位置推定処理の再試行を通知するパケットを送信する。このパケットを受信したノードは、自身の学習関数  $\alpha$  の値を初期値の1に戻し、現在の推定位置から位置推定処理の再試行を行う。

アンカノード情報による位置情報補正フェーズでは、再現したネットワークポロジの位置情報を座標変換し、絶対位置情報の推定を行う。このフェーズでは、位置推定処理再試行判定フェーズ終了後、アンカノードが自身の実位置と推定位置をフラッディングする。フラッディングされたパケットから各ノードはアンカノード情報を取得し、これらの情報から位置情報補正値を求める。アンカノード数が2点の場合、式(7)、式(8)、式(9)を利用し、推定された位置情報を相対位置へと補正する。また、アンカノード数が3点の場合、式(10)、式(11)、式(12)、式(13)を利用し、推定された位置情報を絶対位置へと補正する。

## 4. 検証と評価

### 4.1 評価方式について

本節では、提案方式の評価におけるシミュレーション条件について述べる。評価シミュレーションでは、位置推定を行う空間を 500 m × 500 m の平面領域とする。この領域内に、3 点以下のアンカノードと複数の位置情報が未知のノードをランダムな位置に配置する。評価シミュレーションで利用する無線メディアは IEEE802.11b (Wi-Fi) とし、最大転送レートは 1 Mbps とした。ただし、評価においては無線通信に利用する電波の送信範囲を 150 m に制限する。シミュレーション時間は 1,000 秒、ブロードキャストパケットの送信間隔は 0.5 秒とする。ノード間測距デバイスの使用は想定せず、全ノードにおいて各ノード間の距離は最大通信範囲の 150 m とした。

本評価では、はじめに、ネットワークトポロジの相似性を示す  $r_{ij}$  の分散  $V[r_{ij}]$  と平均値  $\bar{r}_{ij}$  を評価メトリックとして、アンカノードなしの状態で作成されたネットワークトポロジとオリジナルトポロジとの相似性検証を行う。評価に利用する式は以下に示すとおりである。

$$r_{ij} = \frac{\tilde{d}_{ij}}{d_{ij}} \quad (14)$$

$$\bar{r}_{ij} = \text{Mean}[r_{ij}] \quad (15)$$

$$V[r_{ij}] = \frac{(\text{Mean}[r_{ij}])^2}{(\text{Mean}[r_{ij}^2])}, \quad i, j \in N \quad (16)$$

ここでいう  $\tilde{d}_{ij}$  は位置推定処理後のネットワークトポロジにおけるノード  $i$  とノード  $j$  の距離 (推定距離)、 $d_{ij}$  はオリジナルのネットワークトポロジにおけるノード  $i$  とノード  $j$  の距離 (真値)、 $N$  はネットワーク内のノードの集合を示す。全ノード間の  $r_{ij}$  を求め、それらの分布を調べることで位置推定処理により求められたネットワークトポロジとネットワークのオリジナルトポロジとの相似性を判断する。また、 $r_{ij}$  の分散  $V[r_{ij}]$  が小さい場合ほど、ネットワークのオリジナルトポロジとの相似性が高く、正確なトポロジを再現できていると判断できる。さらに、 $r_{ij}$  は推定距離が真値に近いほど 1 に近い値をとるため、 $r_{ij}$  の平均値  $\bar{r}_{ij}$  が 1 に近くかつ分散  $V[r_{ij}]$  が小さい場合ほど、オリジナルのネットワークトポロジと合同なトポロジを再現できていると判断できる。以上のように、分散  $V[r_{ij}]$  を利用し再現されたネットワークトポロジの相似性を確認することを相似性検証、分散  $V[r_{ij}]$  と平均値  $\bar{r}_{ij}$  とを利用し再現されたネットワークトポロジの合同性を確認することを合同性検証と呼ぶ。

ネットワークトポロジの相似性および合同性検証を行った後、3 点のアンカノード情報による推定位置補正機能を利用した絶対位置での距離誤差  $Error$  による評価を行う。評価に利用する式は以下に示すとおりである。

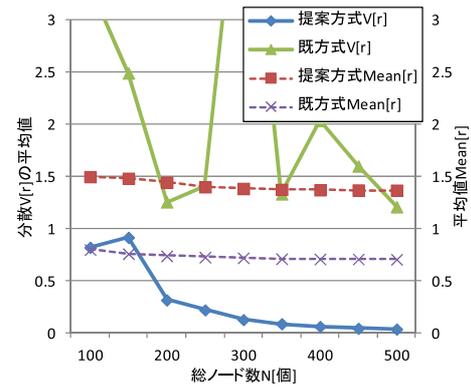


図 5 アンカノードなしでの相似性検証

Fig. 5 Similarity verification without anchor node.

$$Error = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |W_i - w_i(t)|^2} \quad (17)$$

$N$  は領域内の総ノード数、 $W_i$  はノード  $i$  の実位置、 $w_i$  はノード  $i$  の推定位置を示す。

### 4.2 評価結果

本節では、ネットワークシミュレータを用いた提案方式の評価結果について述べる。

図 5 では、アンカノードがない状態で位置推定処理を行った場合に再現されるネットワークトポロジとオリジナルのネットワークトポロジとの相似性検証の結果を示す。領域内の総ノード数は 100 ノードから 550 ノードで、位置はすべてランダムで配置している。提案方式では、各ノードは 1 次近傍ノードへのブロードキャスト送信しか行わないため、ノードの接続次数やノードの疎密は領域内の総ノード数に比例する。したがって、本評価では、総ノード数の変化によりノードの接続次数や疎密への依存性を検証できる。また、各ノード数において、ランダムに 100 通りのトポロジを用意し、それらの平均値により評価を行っている。相似性検証には、前述の分散  $V[r_{ij}]$  と平均値  $\bar{r}_{ij}$  を評価メトリックとして利用した。また、提案方式の改良アルゴリズムの有用性を検証するため、距離制約の矛盾に基づく 2 次近傍ノードを利用した位置修正処理と再試行処理を行っていない場合の分散と平均値を示す (図 5, 既方式  $V[r]$ , 既方式  $\text{Mean}[r]$ )。総ノード数が少ない場合には、分散  $V[r_{ij}]$ , 平均値  $\bar{r}_{ij}$  とともに高い値である。これは、近傍ノード数が少なく、距離の相関関係を求められるノード数が不十分であることが原因で、正しいネットワークトポロジを再現できない場合があるためである。総ノード数が増加した場合、提案方式の分散  $V[r_{ij}]$  の値は急速に小さな値となっている。一方、既方式の分散  $V[r_{ij}]$  は、総ノード数が増加した場合でも高い値のままである。ただし、平均値  $\bar{r}_{ij}$  は既方式、提案方式ともに 1 に近づいてはいない。したがって、提案方式では、距離制約の矛盾に基づく 2 次近

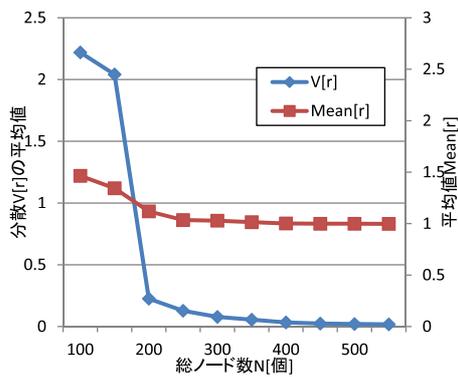


図 6 アンカノード 2 点での合同性検証

Fig. 6 Congruity verification two anchor nodes.

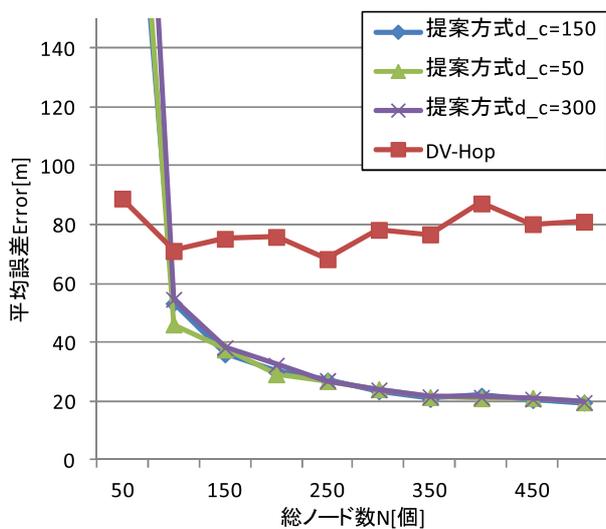


図 7 アンカノード 3 点での位置推定精度

Fig. 7 Location Estimate accuracy three anchor nodes.

傍ノードを利用した位置修正処理や再試行処理により、アンカノードなしでオリジナルのトポロジに対してスケールは異なるが図形的に相似なネットワークトポロジの再現が可能であることが分かる。

図 6 では、アンカノード 2 点で位置推定処理を行った場合に再現されるネットワークトポロジとオリジナルのネットワークトポロジとの合同性検証の結果を示す。評価には、2 点のアンカノードを用いることを除き、すべて図 5 の場合と同様の条件を用いた。この条件では、総ノード数が増加した場合に、平均値  $\bar{r}_{ij}$  が 1 に収束している。したがって、提案方式では、距離制約の矛盾に基づく 2 次近傍ノードを利用した位置修正処理や再試行処理により、2 点のアンカノードのみでオリジナルのトポロジに対して図形的に合同なネットワークトポロジを再現できることが分かる。

図 7 では、定数距離  $d_c$  の設定値がそれぞれ 150, 50, 300 の場合の提案方式により位置推定処理を行った結果と既存方式である DV-Hop 方式との位置推定精度の比較結果を示す。比較対象として DV-Hop 方式を選択した理由は、DV-Hop 方式がレンジフリー位置推定方式であり、か

つアンカノードへの依存性が小さい方式として提案されているためである。また、上記の条件を満たす位置推定方式は DV-Hop 方式以外にないため、提案方式の比較対象として選択した。精度の比較には、式 (5) で示した位置推定誤差 *Error* を利用する。本評価で利用する条件は、3 点のアンカノードを使用する以外、図 5, 図 6 の条件と同じである。また、比較対象である DV-Hop に関して、総ノード数、ネットワークトポロジとも提案方式と同じものを使用している。DV-Hop の位置推定方法については、2.2 節で説明したとおりである。総ノード数が 100 ノード以下の場合には、DV-Hop 方式が提案方式より平均誤差が少ない。これは、提案方式が近傍ノードとの相関関係を利用して位置推定を行っているため、各ノードの近傍ノード数が少ない場合には正確なネットワークトポロジの再現ができないためである。一方、総ノード数が 100 ノード以上の場合には、提案方式が DV-Hop 方式より平均誤差が大幅に少ない。これは、各ノードの近傍ノード数が増加したことにより得られる相関関係が増加し、正確なネットワークトポロジの再現ができるためである。また、DV-Hop 方式は、位置推定に利用しているアンカノード間の最小ホップ数が総ノード数 100 個以上では変化しないため、総ノード数が増加した場合でも精度に変化が少ない。さらに、提案方式は、位置推定処理開始時に無作為に設定する定数距離  $d_c$  の値には依存しないことも分かる。したがって、提案方式は、適当量のノード数があれば定数距離  $d_c$  の値にかかわらず、既存方式よりも精度の高い位置推定が可能であることが分かる。さらに、アンカノードなしでオリジナルトポロジの図形的特徴、アンカノード 2 点で相対位置、アンカノード 3 点で絶対位置を推定可能であることも分かる。ただし、提案方式では SOM の特性上、DV-Hop 方式と比較して、メッセージの送信回数が多く、収束までの時間も長い。これに関しては、今後の課題として検討予定である。

## 5. まとめ

本論文では、無線センサネットワーク上での利用を想定した、レンジフリー位置推定方式の提案を行った。さらに、ネットワークシミュレータを用いた精度評価から、提案方式が以下の特性を持つことを示した。

- アンカノードなしでもオリジナルのネットワークトポロジと相似形なネットワークトポロジを再現可能である。
- アンカノードが 2 点あれば、オリジナルのネットワークトポロジと合同なネットワークトポロジを再現可能であり、各ノードはネットワーク内の相対位置を推定できる。
- アンカノードが 3 点あれば、総ノード数が適当量の場合、既存方式よりも高い精度で位置推定を行うことができる。

以上の結果から、提案方式は、広範囲に大量のセンシングデバイスを散布することを想定した環境モニタリング等のサービスにおいても有用な方式であるといえる。今後の課題としては、領域内の総ノード数が少数の場合でもネットワークポロジの再現を正しく行える仕組みを考案する必要がある。また、提案方式では位置推定処理を行う際に、複数回のブロードキャスト通信を繰り返す必要があるため、位置情報収束までの通信量が他の位置推定方式と比較すると多い点も問題となる。この点に関しては、相当数の近傍ノードからブロードキャストパケット受信した場合には、自身のブロードキャスト送信間隔を間引く等の通信方式に関する対策を考案する予定である。

参考文献

[1] Bulusu, N., Heidemann, J. and Estrin, D.: GPS-less low cost outdoor localization for very small devices, *IEEE Personal Communications Magazine* (2000).

[2] Niculescu, D. and Nath, B.: DV-based positioning in ad hoc networks, *Telecommun. Syst.*, Vol.22, pp.267-280 (2003).

[3] He, T., Huang, C., Blum, B.M., Stankovic, J.A. and Abdelzaher, T.F.: Range-free localization and its impact on large scale sensor networks, *ACM Trans. Embedded Computing Systems (TECS)*, Vol.4, No.4, pp.877-906 (2005).

[4] 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).

[5] Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H. and Collins, J.: *Global Positioning System; Theory and Practice*, 4th Ed. (1997).

[6] Harter, A., Hopper, A., Steggles, P., Ward, A. and Webstar, P.: The anatomy of a context-aware mobile applications, *MOBICOM1999* (1999).

[7] Priyantha, N., Miu, A., Balakrishnan, H. and Teller, S.: The cricket compass for context-aware mobile applications, *MOBICOM2001* (2001).

[8] Bahl, P. and Padmanabhan, V.N.: RADAR An In-Building RF-Based User Location and Tracking System, *Proc. IEEE InfoCom 2000*, Vol.2, pp775-784 (2000).

[9] Hightower, J., Boriello, G. and Wat, R.: SpotOn An indoor 3D Location Sensing Technology Based on RF Signal Strength, University of Washington CSE Report 200-02-02 (2000).

[10] Ertin, E. and Priddy, K.: Self-localization of wireless sensor networks using self-organizing maps, *Proc. SPIE* (2005).

[11] Giorgetti, G., Gupta, S.K.S. and Manes, G.: Wireless localization using self-organizing maps, *Proc. 6th International Conference on Information Processing in Sensor Networks (IPSN'07)*, pp.293-302 (2007).

[12] 朝倉 茂, 梅原大祐, 川合 誠: SOM アルゴリズムを用いた移動端末の分散型位置推定法, *電子情報通信学会論文誌 B, 通信*, Vol.J85-B, No.7, pp.1042-1050 (2002).

[13] 大野翔平, 安達直世, 滝沢泰久: 無線センサネットワーク環境を考慮した端末自己位置推定方式の提案, *情報処理学会研究報告, マルチメディア通信と分散処理研究会報告*, Vol.2011-DPS-146, No.41, pp.1-7 (2011).

[14] Kohonen, T.: *Self-Organizing Maps*, 3rd Ed., Springer

(2001).  
 [15] Bonabeau, E. and Henaux, F.: *Graph Partitioning with Self-Organizing Maps*, Private Communication (1998).



大野 翔平 (学生会員)

2010 年関西大学工学部システムマネジメント工学科卒業。現在、関西大学大学院理工学研究科において無線センサネットワークにおけるノード位置推定の研究に従事。



安達 直世 (正会員)

1996 年立命館大学理工学部電気電子工学科卒業。1998 年奈良先端科学技術大学院大学博士前期課程修了。同年三洋電機(株)入社。2001 年奈良先端科学技術大学院大学博士後期課程修了。同年より同大学情報科学研究科助手。2006 年関西大学工学部助手。2007 年関西大学環境都市工学部助教。情報通信システムのモデル化と性能評価に関する研究に従事。博士(工学)。電子情報通信学会, システム制御情報学会各会員。



滝沢 泰久 (正会員)

1983 年京都工芸繊維大学工芸学部機械工学科卒業。同年日本ユニシス(株)入社。1990 年住友金属工業(株)入社。1998 年 ATR 環境適応研究所出向。2002 年 ATR 適応コミュニケーション研究所主任研究員。2008 年同研究所上級主任研究員。2009 年関西大学環境都市工学部准教授, ATR 適応コミュニケーション研究所客員研究員。現在、無線ネットワークにおける自己組織化等の研究に従事。博士(工学)。電子情報通信学会, IEEE, IEEE-CS 各会員。