

無線センサネットワーク環境における 自己組織化位置推定方式の提案

大野 翔平^{†1} 安達 直世^{†2} 滝沢 泰久^{†2}
石垣 泰輔^{†2} 堂垣 正博^{†2} 楠見 晴重^{†2}

環境モニタリングシステム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法が研究されているが、無線センサネットワーク上での利用を想定した場合、コストや消費電力の面においてその適用環境が限定される。この問題を解決するため、自己組織化マップ (SOM) を用いたスペースフリーな位置推定方式を提案する。提案方式は、端末間距離の測距デバイスを必要とせず、ネットワークポロジを再現し、正確な位置推定処理を目指すものである。本稿では、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。

Proposal of Self Location Estimation Method for Wireless Sensor Networks

SHOHEI OHNO,^{†1} NAOTOSHI ADACHI,^{†2}
YASUHISA TAKIZAWA,^{†2} TAISUKE ISHIGAKI,^{†2}
MASAHIRO DOGAKI^{†2} and HARUSHIGE KUSUMI^{†2}

Recently, large scale wireless sensor networks are aimed to apply to environmental monitoring system. The monitoring system requires the location where data is monitored. Location estimation method has been studied in various ways. However, when intended for use on wireless sensor network environment that is limited in terms of cost and power consumption. 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.

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おり、このようなサービスを提供できる背景としては、センサノードの小型化や低コスト化、省電力化といった技術的要因が挙げられる。これらのサービスにおいて、センシングした情報の発生源を特定するためには、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、ノード間測距機能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) も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、レンジベース方式は、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、センサノード 1 台ごとのコストや消費電力は増加する。そのため、無線センサネットワークを利用したサービスにおいて、低コスト、低消費電力が求められる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の距離情報を利用しない方式である。例としては Centroid¹⁾、DV-Hop²⁾、APIT³⁾ 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。ただし、レンジフリー方式はレンジベース方式と比較すると精度が悪く、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、アンカーノードという) 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

^{†1} 関西大学大学院 理工学研究科

Graduate School of Engineering, Kansai University

^{†2} 関西大学 環境都市工学部

Faculty of Environmental and Urban Engineering, Kansai University

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上で位置推定を行う際には、十分な数のアンカーノードにより構成された空間を必要とする。従って、適用できる環境(空間)が限定的となる。

上記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ーノードで位置推定を行うことができるスペースフリーな位置推定方式を提案する。本方式は、極少数のアンカーノードで高精度な位置推定を行うことが出来る 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。既方式は、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。ただし、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。また、既方式は位置推定処理のみを考慮して検証されているため、無線センサネットワーク環境での検証、評価は行われていない。従って、提案方式では、無線センサネットワーク上での利用を考慮し、測距デバイスを用いたノード間測距機能の排除と、無線センサネットワーク環境に適応した通信方式の構築とを行う。本稿では、提案方式によりアンカーノードがない状態でも相似形なネットワークポロジを再現可能であることをネットワークシミュレータ Qualnet を用いた評価結果から示す。

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、通信ノード間距離情報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。

2.1 レンジベース方式

レンジベース位置推定方式は、ノード間の距離情報を利用するため、センサノードにノード間通信機能の他に測距機能を持たせる必要がある。端末間距離の測距には、TDOA(Time Difference Of Arrival) や TOA(Time Of Arrival) を利用している。

本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 方式を、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 Bat⁶⁾ や Cricket⁷⁾ 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、比較的精度のよ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 RADAR⁸⁾、SpotON⁹⁾ 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ー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。一方、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、コスト面や消費電力の面で無線センサネットワークでの利用は不向きであり、また測距デバイスを搭載しない一般的なセンサノードには適用できない。

2.2 レンジフリー方式

レンジフリー位置推定方式は、ノード間の距離情報を利用しないため、センサノードに測距機能を持たせる必要がなく、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。本方式の例としては、Centroid 方式¹⁾、DV-Hop 方式²⁾、APIT 方式³⁾がある。

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(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。アンカーノードによるブロードキャスト送信以外に特別な通信を行わないため、ノード自体の処理は必要最小限ですむが、位置推定精度は低い。

DV-Hop 方式では、はじめに、アンカー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ーノードまでの距離を推定する。アンカー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 つ以上のアンカー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。上記の Centroid 方式よりは高精度であるが、アンカーノードとの推定距離は大きな誤差を含んでいる場合が多く、高精度な位置情報は得られない。

APIT 方式では、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。この方式の位置推定精度は、アンカー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ーノードが必要となる。

他にも SOM を用いた位置推定方式¹⁰⁾¹¹⁾があるが、これらの方式では位置推定にトレ

ニングセットと呼ばれる事前情報を用いている．ここでいう事前情報とは，位置推定を行う領域の地形や電波環境に応じたネットワークのトポロジ集合である．従って，事前に適応空間の地形や電波環境を正確に取得する必要があり，適用空間が限定的となる．

3. 提案方式

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 T.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¹²⁾．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 は SOM をネットワークポロジの再現に適用し，定式化している¹³⁾．本文献でベースとして利用したアルゴリズムは，Bonabeau 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ーノードと，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 1 次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．ここでいう仮位置情報とは，位置推定仮定におけるノードの推定自己位置である．ブロードキャストタイミングの一元制御等を行っていないため，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，1 次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，比較的広範囲のノードから情報を取得することで自身の位置推定領域内での大域的かつ特徴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局所的かつ正確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．

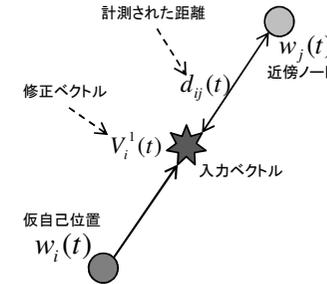


図 1 近傍ノードによる入力ベクトルと修正ベクトル
Fig. 1 Input vector and correction vector by neighbor node.

[Step.2] 近傍ノード j から仮位置情報を受信したノード 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）．

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

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 が近傍ノード j より近い（位置制約で矛盾がある）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変更し，次のような修正ベクトルを生成する（図 3）．

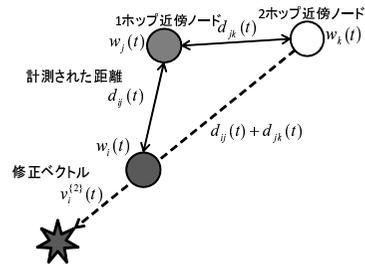


図 2 2 ホップ近傍ノードによる位置修正 1
Fig. 2 Positional correction with 2 hop neighborhood node 1.

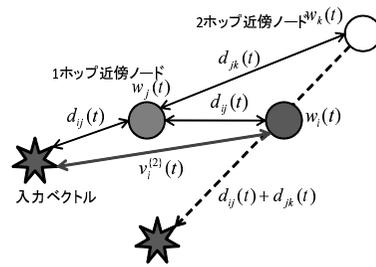


図 3 2 ホップ近傍ノードによる位置修正 2
Fig. 3 Positional correction with 2 hop neighborhood node 2.

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

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。

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

上式の τ 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、以下の式 (5) のようになる。式 (5) 中の η は、学習関数の減衰定数である。

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

[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 を繰り返すことで、ネットワークトポロジを再現し、各ノードは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、絶対的な位置情報を求める。また、オリジナルトポロジの再現のみに限定した場合、推定処理にノード間の相関を利用しているため、アンカーノードがない状態でもネットワークトポロジの再現が可能であり、相対的な位置関係を再現可能である。

提案方式では、ノード間測距デバイスを利用せずに位置推定を行う。そのため、1次近傍ノード間の距離情報は全てのノードで一定の値を設定する。ノード間の距離情報が一定である場合、ネットワークトポロジにおける1次近傍ノードは2次近傍ノードより近傍に位置する。すなわち、ノード間距離が任意の一定値である場合、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に矛盾は生じない。この一定値に設定したノード間距離情報と各ノードの仮位置情報から、相対的な位置関係を 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時には、相対的な位置関係のみを利用すればよいためアンカーノードは無いものと想定して位置推定処理を行う。ただし、アンカーノード情報がないため絶対位置の推定には、再現されたネットワークトポロジに対して座標変換を行う必要がある。ここでいう絶対位置とは、推定領域内の各ノードにおける真位置座標である。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、位置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 α 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位置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

ここでいう位置制約の矛盾とは、自ノード i の仮位置情報 $w_i(t)$ と近傍ノード j の仮位置情報 $w_j(t)$ 、2次近傍ノード k の仮位置情報 $w_k(t)$ において、2次近傍ノード k が近傍ノード j より近い ($|w_i(t) - w_j(t)| \geq |w_i(t) - w_k(t)|$) 状態のことをいう。修正処理を行う修正ベクトルは図 2, 3 で示したものを使用する。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。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は、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を確認し、位置制約の矛盾 (図 3) を判定する。ここで位置制約の矛盾が複数回連続で確認された場合にのみ、式 (2) を用いて追加的に2次近傍ノードによる修正処理を行う。位置制

約の矛盾が複数回連続で発生した場合にのみ修正処理を行う理由は、矛盾を確認するたびに修正処理を行うと、2次近傍ノードによる修正処理が頻繁に行われ、位置推定処理が収束しないためである。

前述の方式を用いて位置推定処理を実施した場合においても、ネットワークポロジを正確には再現できないケースもある。このようなケースに対応するため、本提案方式では以下の手順でネットワーク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) になった段階で位置制約の矛盾の判定を開始する
- 位置制約の矛盾の判定では、位置推定処理毎に、1次近傍ノード間の距離と2次近傍ノード間の距離との比較を行う
- 位置制約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、上記の位置制約の矛盾の判定には以下の式を用いる。

$$\frac{I_i^{\{2\}}}{N_i^{\{2\}}} < \theta \quad (6)$$

$I_i^{\{2\}}$ は、位置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、 θ は、誤再現判定閾値である。

上記処理により、ネットワークポロジが正確に再現できないケースを軽減し、オリジナルのネットワークポロジの図形的特徴を再現した相似形なネットワークポロジを高い精度で再現することができる。

3.3 通信方式

本節では、はじめに、提案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方式について述べる。次に、改良ノード間通信を用いた位置推定処理の通信手順について示す。

提案方式を無線センサネットワーク環境上で利用することを想定した場合、無線特性によるパケット損失への対策を取る必要がある。これは、既方式の特性上、取得できるパケット量が減少すると位置推定精度が低下するためである¹⁴⁾。従って、提案方式では、各ノードが位置情報を交換する際のブロードキャスト通信に対して簡易的なフロー制御機能を実装した。この機能は、OSI参照モデルのデータリンク層での処理遅延時間から帯域の輻輳状況を

推測し、輻輳状況に応じてブロードキャスト送信間隔を制御する。無線センサネットワークにおけるデータリンク層ではCSMA/CA方式が使用されており、各ノードはブロードキャスト送信を行う前に周囲の電波状況を確認し、他ノードが通信中であれば一定の時間間隔を置いてパケット送信を行っている。そのため、自ノードの周囲に通信中のノードが増加するほど待機時間が増加し、データリンク層での処理遅延時間も増加する。この特性を利用し、提案方式では処理遅延時間に一定の閾値を設け、測定された処理遅延時間が閾値以上になった場合には輻輳状態であると判断し、パケット損失を回避するためにブロードキャスト送信間隔を調整する。

また、上記の改良ノード間通信方式を用いた提案方式の通信手順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

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、本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。従って、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、本方式では、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 α 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、位置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、位置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全ノードに対して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 α 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。

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 500m × 500m の平面領域として定義する。この領域内に、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 1Mbps 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 150m に制限する。シミュレーション時間は 1000 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任意に決定する。

本評価では、はじめに、ネットワーク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、アンカーノード無しの状態 で推定されたネットワーク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の通りである。

$$r_{ij} = \frac{\tilde{d}_{ij}}{d_{ij}} \quad \bar{r}_{ij} = Mean[r_{ij}] \quad (7)$$

$$V[r_{ij}] = \frac{1}{D} \sqrt{\frac{1}{|N|} \sum (r_{ij} - \bar{r}_{ij})^2} \quad i, j \in N \quad (8)$$

ここでいう \tilde{d}_{ij} は位置推定処理後のネットワーク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, $|N|$ はノード数 (集合 N の要素数) を示す。また, D は位置推定処理時に任意に決定するノード間距離であり, $V[r_{ij}]$ はこの距離 D によって正規化されている。各ノードにおいて全てのノードとの 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ポロジと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、オリジナルのトポロジと相似性が高く、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 に近い値を取るため, r_{ij} の平均値 \bar{r}_{ij} が 1 に近かつ分散 $V[r_{ij}]$ が小さい場合ほど、オリジナルの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。

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 4 では、位置推定処理を行った場合に再現されるネットワークポロジとオリジナルのネットワーク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 50 ノードから 500 ノードで、位置は全てランダムで配置している。位置推定処理時に任意に決定するノード間距離は 150m とした。また、各ノード数において、ランダムに 50 通りのトポロジを用意し、それらの平均値を取ることで評価を行っている。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。図 4 から、総ノード数が少ない場合には、

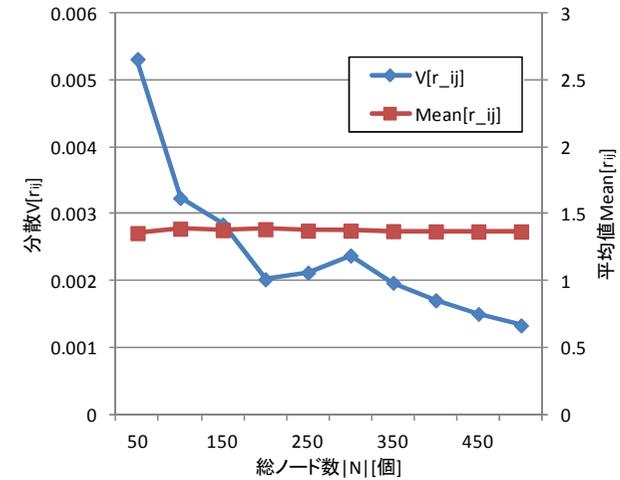


図 4 相似性検証結果 (D=150)
Fig. 4 Similarity verification results (D=150).

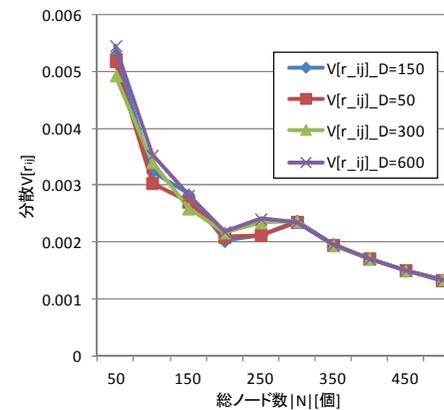


図 5 D による分散の比較
Fig. 5 Comparison with variance based on D value.

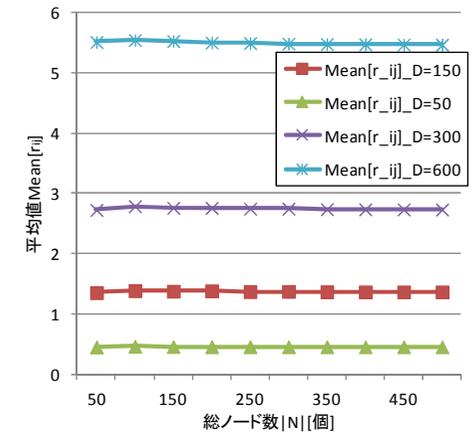


図 6 D による平均値の比較
Fig. 6 Comparison with average based on D value.

分散 $V[r_{ij}]$ が高い値をとっていることが分かる。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により、正しいネットワークトポロジを再現できないケースが存在することが原因である。総ノード数が増加した場合、分散 $V[r_{ij}]$ の値は小さな値となっている。ただし、平均値 \bar{r}_{ij} は総ノード数が増加した場合でも、1には近づかず1.4程度の値となっている。この結果から、領域内の総ノード数が増加することで分散 $V[r_{ij}]$ は小さな値をとるため、オリジナルのトポロジに対して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。一方、平均値 \bar{r}_{ij} は変化しないため、再現されたトポロジはオリジナルのトポロジに対してスケールが異なっているということがわかる。図4の例では、平均値 \bar{r}_{ij} が1.4であるため、約1.4倍のスケールのネットワークトポロジが再現されている。

図5、図6では、位置推定処理時に任意に決定するノード間距離 D を変化させることによるネットワークトポロジ再現への影響についての検証を行った結果を示す。任意に決定するノード間距離 D 以外の評価条件は図4で示した検証と同様の条件を用いている。図5では分散 $V[r_{ij}]$ の変化について示している。この結果から、任意に決定するノード間距離 D を変化させた場合でも分散 $V[r_{ij}]$ はほぼ変わらないことが分かる。従って、任意に決定するノード間距離 D の値に関わらずネットワークトポロジの再現が可能である。すなわち、提案方式ではノード間距離情報を省略した場合でも図形的に相似なトポロジを再現できる。図6では平均値 \bar{r}_{ij} の変化について示している。この結果から、再現されるネットワークトポロジのスケールは、任意に決定するノード間距離 D の値に依存することが分かる。総ノード数を増加させた場合でも平均値 \bar{r}_{ij} に大きな変化はない。この特性から、再現されたネットワークトポロジに対して適切に座標変換を行い、オリジナルトポロジのスケールと同様のスケールに修正することで、絶対位置を推定することも可能であると考えられる。

5. ま と め

本稿では、無線センサネットワーク上での利用を想定し、既方式から測距機能を省略したレンジフリー位置推定方式に関する評価を行った。この評価から、提案方式を用いることで測距機能の有無に関わらず、ネットワークトポロジの再現が可能であることを確認した。さらに、再現されたネットワークトポロジに対して座標変換を行うことで絶対位置の推定も可能であると考えられる。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サービスにおいても有用な方式であるといえる。今後は、再現されたネットワークトポロジに対して適切に座標変換を行い絶対位置を推定する必要がある。

また、既存の位置推定方式と提案方式の位置推定精度の比較も行う必要がある。

謝辞 本研究は、平成23年度関西大学大学院理工学研究科高度化推進研究費によって行った。

参 考 文 献

- 1) N.Bulusu, J.Heidemann, and D.Estrin: GPS-less low cost outdoor localization for very small devices, IEEE Personal Communications Magazine (2000).
- 2) D.Niculescu and B.Nath: DV-based positioning in ad hoc networks, *Telecommun.Syst*, vol.22,pp267-280 (2003).
- 3) 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).
- 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) B.Hofmann-Wellenhof, H.Lichtenegger, and J.Collins: *Global Positioning System; Theory and Practice*, 4th ed. (1997).
- 6) A.Harter, A.Hopper, P.Steggles, A.Ward, and P.Webstar: The anatomy of a context-aware mobile applications, *MOBICOM1999* (1999).
- 7) N.Priyantha, A.Miu, H.Balakrishnan, and S.Teller: The cricket compass for context-aware mobile applications, *MOBICOM2001* (2001).
- 8) P.Bahl and V.N.Padmanabhan: RADAR An In-Building RF-Based User Location and Tracking System, In *Proc. IEEE InfoCom 2000*, Vol.2, pp775-784 (2000).
- 9) J.Hightower, G.Boriello, and R.Wat: SpotOn An indoor 3D Location Sensing Technology Based on RF Signal Strength, *University of Washington CSE Report 200-02-02* (2000).
- 10) E.Ertin and K.Priddy: Self-localization of wireless sensor networks using self-organizing maps, *Proceeding of SPIE* (2005).
- 11) Gianni Giorgetti, Sandeep K.S.Gupta, and Gianfranco Manes: Wireless localization using self-organizing maps, In *Proceedings of the 6th international conference on Information processing in sensor networks(IPSNS'07)*. pp293-302 (2007).
- 12) T.Kohonen: *Self-Organizing Maps*, 3rd edition, Springer (2001).
- 13) E.Bonabeau and F.Henau: *Graph Partitioning with Self-Organizing Maps*, Private Communication (1998).
- 14) 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における自己位置推定方式の特性評価, *情報処理学会研究報告 DPS144 No.2* (2010).