

## ノード間の位置関係に基づく推定位置精度の評価手法

木山 昇<sup>†1</sup> 内山 彰<sup>†1,†2</sup>  
山口 弘純<sup>†1,†2</sup> 東野 輝夫<sup>†1,†2</sup>

本稿では、無線アドホックネットワークを用いた位置推定アルゴリズムの新たな評価方法を提案する。提案手法では、ノード間の位置関係の正しさについて、あるノードを視点として他ノードを参照する場合と、ノード全体の位置関係を俯瞰した場合において、それぞれ妥当と思われる定義を与える。その定義に基づき、推定位置におけるノード間距離や方向が実際のノード位置において本来満たすべき関係をどの程度満たしているかを、順位相関係数やガブリエルグラフを用いて定量的に判定する方法を提案している。提案手法の可用性を示すため、既存のいくつかの位置推定アルゴリズムが出力したノード推定位置に対し評価を行った。その結果、ノード間の位置関係の正しさが、それらアルゴリズムの特長に応じて異なることを確認できた。

### A Method for Evaluating Localization Accuracy in Wireless Ad-hoc Networks by Positions' Relation between Nodes

NOBORU KIYAMA,<sup>†1</sup> AKIRA UCHIYAMA,<sup>†1,†2</sup>  
HIROZUMI YAMAGUCHI<sup>†1,†2</sup> and TERUO HIGASHINO<sup>†1,†2</sup>

In this paper, we propose a new method to evaluate the accuracy of nodes' relative positions estimated by (wireless network-based) localization algorithms. In this method, we give definitions of relative positions' accuracy for two cases; nodes' positions are referred by a single point of view and by a multiple points of view. Based on the definitions, we represent the accuracy of relative positions by a rank correlation coefficient and the Gabriel graph to allow its quantitative evaluation. Several experiments have been conducted to show the effectiveness of the proposed method.

### 1. はじめに

近年、無線ネットワークにおけるモバイル通信端末(ノード)の位置推定を行うアルゴリズムの研究が盛んに行われている<sup>1)–3)</sup>。ユビキタス社会を実現する上でノードの位置情報は不可欠であり、ユーザの行動分析や位置依存サービス(Location-Based Service)の提供など、様々なサービスへの活用が期待されている<sup>4)–6)</sup>。これらの位置推定アルゴリズムでは、ノード密度、通信可能距離、位置基準局(ランドマーク)数など、環境に応じて推定位置に誤差が生じる。しかしこの誤差は一般に、実際のノード位置と推定されたノード位置との距離(絶対位置誤差)で表されることが多いため、推定された複数のノード位置が実際のノードの位置関係をどの程度正しく実現しているかは評価されておらず、そのための評価指標の研究もあまり行われていない。例えばコンピュータビジョンの分野では、2次元平面や3次元空間において、2つの物体の形状や向きなどからそれらの存在関係を表す指標を定義する研究が行われている<sup>7)</sup>。しかしこれらはロボットなどの空間認識用途で考慮されており、複数の周辺ノードとの位置関係からあるノードを特定する用途は考慮していない。一方、複数ノード間での相対的な位置関係を正しく認識する能力は、特定のノードを参照する行為に大きな影響を与える。例えば遊園地などで、位置推定結果を元に自身から見た仲間の位置を把握するような場合、推定位置がどの程度絶対位置誤差を生じているかという点よりは、人物の遠近関係にどの程度誤差を生じているかという点が重要視される。そのため、このような人や物を参照する行為を前提とした環境において実行される位置推定アルゴリズムに対しては、従来の絶対位置誤差ではなく、相対的な位置関係の正しさを定量的に評価するための方法論が望まれる。

本稿では、文献8)で、相対位置を表す可能性のあるいくつかの指標について、それらがどのような特性を表現できるかを予備実験的に調査している。本稿では、相対位置の正しさを形式的に定義するとともに、その定義に見合った評価指標を提案し、その妥当性を議論している。

<sup>†1</sup> 大阪大学大学院情報科学研究科

Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University

<sup>†2</sup> 独立行政法人科学技術振興機構, CREST

Japan Science Technology and Agency, CREST

## 2. 位置関係の正しさ

ノードの位置関係が重要となるアプリケーションでは、ノード位置を参照する視点として、あるノードから他ノードを俯瞰するか（同次元視点）、常にノード全体を俯瞰するか（高次元視点）の2通り存在する。前者は現場を移動するロボットや人間による空間認識などであり、一方後者は、例えば災害現場に散在する傷病者の位置情報を集約して地図を生成し、現場の医療従事者が傷病者の位置関係を把握するなどが考えられる<sup>9)</sup>。

そこで本章では、2つの視点それぞれについて“位置関係の正しさ”を定義した上で、3章にてそれを定量化する指標を与える。また、位置関係正しさの指標としての妥当性についても述べる。

### 2.1 同次元視点における位置関係の正しさの定義

2ノード間の相対的な位置関係の誤り（相対位置誤差）としては、例えば2ノードの推定位置を結んだベクトルがそれらの実際の位置を結んだベクトルとのなす角（偏角）や、それらのベクトル量の差異を表す関数などが自然である。しかし、複数のノードが存在する場合に、どの程度のベクトルの差異がノード参照の誤りに影響を与えるのかの議論及びそれを定量的に表す試みはなされていない。そこで本稿では、同次元視点における位置関係の正しさを、以下に示すノード間距離関係の一致度とノード間順列関係の一致度として定義する。

#### ● 距離関係の正しさの一致度

推定位置及び実際の位置におけるあるノードから他ノードへの距離関係の正しさの一致度とは、ノード間距離の大小関係が一致している割合である。例えば図1の場合、ノードCとノードDの距離関係が実際の位置と比較して逆転している推定位置1の方が、一致度が低いと判断する。

#### ● 順列関係の正しさの一致度

推定位置及び実際の位置におけるあるノードから他ノードへの順列関係の正しさの一致度とは、基準ノードを視点とした他ノードの左右関係が一致している割合である。例えば図2の場合、ノードAを基準としたノードBとノードCの左右が実際の位置と比較して逆転している推定位置1の方が、一致度が低いと判断する。

### 2.2 高次元視点における位置関係の正しさの定量化

高次元視点における位置関係の正しさとは全ノードの同次元視点における位置関係の正しさの総和（あるいは平均）と考えるのが一見自然である。しかし同次元視点における位置関係の正しさは、特定の1ノードを基準として他の複数ノードがどの位置に存在するかを

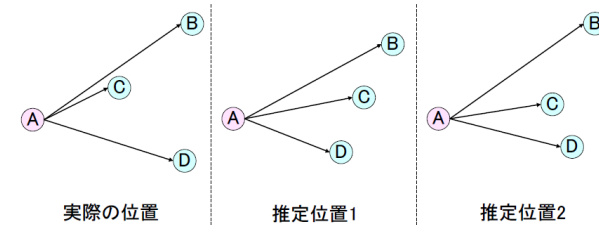


図1 距離関係の正しさの一致度例

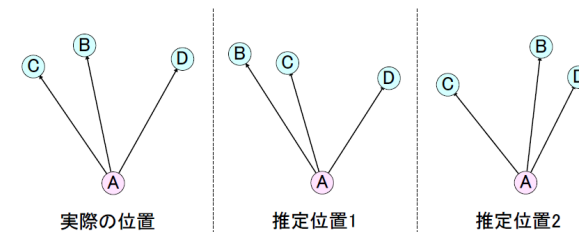


図2 順列関係の正しさの一致度例

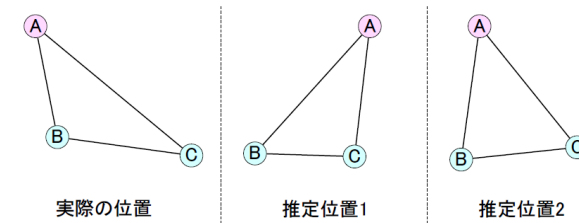


図3 辺関係の正しさの一致度例

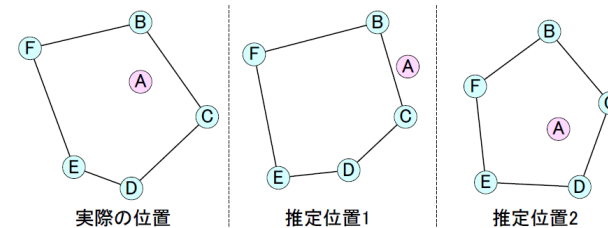


図4 周囲関係の正しさの一致度例

考慮しており、複数ノードに対する複数ノードの参照を行う可能性のある高次元視点の場合では、位置関係の正しさを十分に表せないと考えられる。そこで本稿では、高次元視点における位置関係の正しさを、以下に示すノードを頂点とした任意の三角形の辺関係の一致度と任意の多角形の内外関係の一致度として定義する。

● 辺関係の正しさの一致度

推定位置及び実際の位置におけるノードを頂点とした任意の三角形の辺関係の正しさの一致度とは、任意の3ノードから構成される三角形の辺の“大小関係”が一致する割合である。例えば図3の場合、辺ABと辺ACの大小関係が逆転し、その結果辺BCを基準としたノードAの位置が実際の位置と比較して左上側から右上側へ変化している推定位置1の方が、一致度が低いと判断する。

● 周辺関係の正しさの一致度

推定位置及び実際の位置における任意の複数ノードの周辺関係の正しさの一致度とは、あるノードを囲む凸多角形頂点集合である“周辺ノード集合”が一致する割合である。例えば図4の場合、ノードB~Fに囲まれたノードが実際の位置と比較して異なる推定位置1の方が、一致度が低いと判断する。

本章では、これら4つの位置関係の正しさを判定する評価関数を定義した上で、それらの関数がなぜ位置関係の正しさを評価しているかについての妥当性を述べる。

3. 位置関係の正しさの評価関数

3.1 同次元視点における位置関係の正しさの評価関数

3.1.1 距離関係の正しさの評価関数

距離関係の正しさの一致度の定義に基づき、距離関係の正しさを表す評価関数として、実際のノード位置におけるノード間のリンクをその距離で順位付けしたものと、推定したノード位置におけるノード間のリンクをその距離で順位付けしたものとを相関であるスピアマン順位相関係数 (Spearman Rank Correlation Coefficient)<sup>10)</sup> を提案する。以下、これをリンク距離の順位相関係数と呼び、 $SR_{dist}$  で表す。相関関係は推定結果の絶対位置誤差が小さくなる程強くなるが、順位が変動しない範囲で絶対位置誤差が生じている場合は係数値は変化しない。最も極端な例では、全ノードが同一方向に等しい距離の誤差を生じている場合、絶対位置誤差は大きいですが、順位相関係数値は1となり、最も強い正の相関を示す。これは、相対的なノード参照における距離関係の正しさの概念に一致するため、距離関係の正しさを表す評価関数として妥当であると言える。

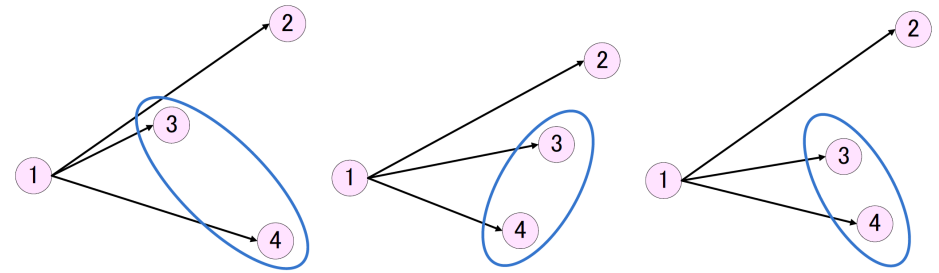


図5 実際の位置

図6 推定位置 1

図7 推定位置 2

ノードの位置 \ 順位	実際の位置	推定位置 1	推定位置 2
1	1 - 2	1 - 2	1 - 2
2	1 - 4	1 - 3	1 - 4
3	2 - 4	2 - 4	2 - 4
4	3 - 4	1 - 4	1 - 3
5	2 - 3	2 - 3	2 - 3
6	1 - 3	3 - 4	3 - 4

図8 ノード間ユークリッド距離の順位 ノード数  $n = 4$  , ノードの組の総数  $N = {}_4C_2 = 6$

3.1.2 順列関係の正しさの評価関数

順列関係の正しさの一致度の定義に基づき、順列関係の正しさを表す評価関数として、実際のノード位置におけるノード間のベクトルをその偏角で順位付けしたものと、推定したノード位置におけるノード間のベクトルをその偏角で順位付けしたものとを相関であるスピアマン順位相関係数を提案する。以下、これをリンクベクトルの偏角の順位相関係数と呼び、 $SR_{angle}$  で表す。リンク距離の順位相関係数と同様、相関関係は推定結果の絶対位置誤差が小さくなる程強くなるが、順位が変動しない範囲で絶対位置誤差が生じている場合は係数値は変化しない。最も極端な例では、全ノードが同一方向に等しい角度回転した推定位置の場合、絶対位置誤差は大きいですが、順位相関係数値は1となり、最も強い正の相関を示す。これは、相対的なノード参照における順列関係の正しさの概念に一致するため、順列関係の正しさを表す評価関数として妥当であると言える。以下では、スピアマン順位相関係数が評価関数としてどのような評価値を出力するかを簡単な例を通して確認する。

3.1.3 スピアマンの順位相関係数

スピアマンの順位相関係数  $\rho$  に基づいた場合、リンク距離 (リンクベクトルの偏角) の順

位相関係数は以下のように定義できる．

$$\rho = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n D_{ij}^2}{N(N^2 - 1)}$$

ここで  $D_{ij}$  は、 $n$  個のノードに  $1 \sim n$  の番号を割り当てた環境におけるノード  $i$  とノード  $j$  間のユークリッド距離（偏角）の順位を、実際の位置の場合は  $\overline{R}_{ij}$ 、推定位置の場合は  $R_{ij}$  と表すと

$$D_{ij} = (\overline{R}_{ij} - R_{ij})^2$$

である．したがって、 $\sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n D_{ij}^2$  は全てのノード間ユークリッド距離（偏角）における順位差の2乗和となる．また  $N$  はノードの組の総数、すなわち  $N = {}_n C_2 = \frac{1}{2}n(n-1)$  である．実際の位置及び推定位置の順位の順序が完全に一致するときは  $\sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n D_{ij}^2 = 0$  であるので  $\rho = 1$  となる（正の相関）．一方、逆順に完全に一致するときは  $\sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n D_{ij}^2 = (N^3 - N)/3$  であるので  $\rho = -1$  となる（負の相関）．

図5～図7に示すノードの位置及び図8に示すノード間ユークリッド距離の順位にて例を示す．実際の位置のノード間ユークリッド距離順位を対象とした順位相関係数の値は、ノード1からの最近ノードが、実際の位置と異なりノード4である図6の推定位置1の場合は

$$\begin{aligned} \rho &= 1 - \frac{6 \times (D_{13}^2 + D_{14}^2 + D_{34}^2)}{6 \times (6^2 - 1)} \\ &= 1 - \frac{6 \times ((2-6)^2 + (4-6)^2 + (6-4)^2)}{6 \times (6^2 - 1)} \simeq 0.3142 \end{aligned}$$

となり、最近ノードが実際の位置と同じである図7の推定位置2の場合は

$$\begin{aligned} \rho &= 1 - \frac{6 \times (D_{13}^2 + D_{34}^2)}{6 \times (6^2 - 1)} \\ &= 1 - \frac{6 \times ((4-6)^2 + (6-4)^2)}{6 \times (6^2 - 1)} \simeq 0.8857 \end{aligned}$$

となる．この評価値を比較することで、推定位置1の方が位置関係の正しさの一致度が低い、すなわち相対位置誤差が大きいとみなす．

### 3.2 高次元視点における位置関係の正しさの評価関数

#### 3.2.1 辺関係の正しさの評価関数

辺関係の正しさの一致度の定義に基づき、辺関係の正しさを表す評価関数として、ガブリエルグラフ (Gabriel Graph)<sup>11)</sup> を利用する．本稿では、実際の位置及び推定位置に対して各ノードを頂点とみなし、それぞれに対してガブリエルグラフを作成することを考える．ガ

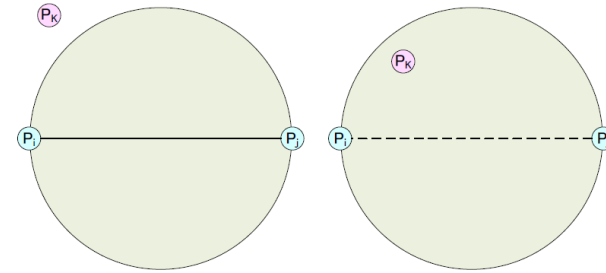


図9 ガブリエルグラフの辺生成条件

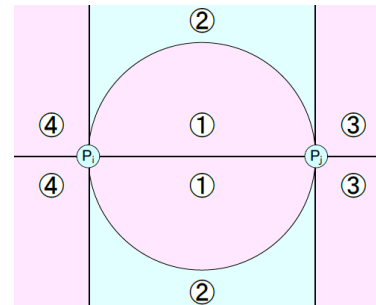


図10 ガブリエルグラフの辺構成が変化する第3のノード存在領域の区分

$P_k$ の領域	①	②	③	④
$P_i - P_j$	×			
$P_i - P_k$			×	
$P_j - P_k$				×

図11 第3のノード  $P_k$  が存在する領域に応じたガブリエルグラフ辺構成

ブリエルグラフでは、辺が満たすべき制約式を持つ．有限頂点集合に含まれる任意の頂点  $P_i$  と  $P_j$  について、2点間を直径とする円内に他の点  $P_k$  がない場合、 $P_i$  と  $P_j$  の間に辺を生成する（図9参照）．この制約により、ある2つのノードに対する第3のノードの位置に応じてガブリエルグラフの辺の構成が変化する．第3のノードの存在領域の区分と、それに対するガブリエルグラフの辺の有無をそれぞれ図10、図11に示す．したがって、ガブリエルグラフの辺構成の変化を利用することで、任意の2ノードに対する他の1ノードの存在領域が判断可能である．すなわち、他の1ノードが領域1, 3, 4に存在する場合は最大辺がどの辺であるかが判断可能であり、また領域2に存在した場合でもこれら3つのノード以外のノードを利用することで、同様に最大辺がどの辺であるかを判断できるため、辺関係の正しさを評価することが可能であると考えられる．一方で、同一領域に存在し三角形の最

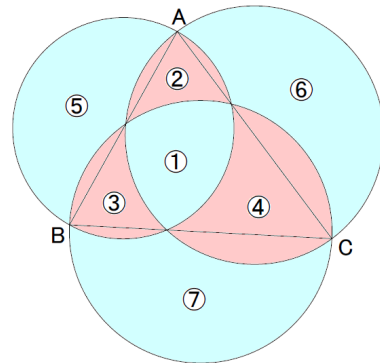


図 12 三角形における周囲関係の変化に伴う  
ガブリエルグラフ辺構成の変化領域

Dの領域	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦
A-B	×	×	×		×		
A-C	×	×		×		×	
A-D							×
B-C	×		×	×			×
B-D						×	
C-D					×		

図 13 第 4 のノード D が存在する領域に応じた  
ガブリエルグラフ辺構成

大辺が変化しない限り、ノードに絶対位置誤差が生じた場合でもガブリエルグラフの辺構成は変化しない。これは、辺関係の正しさの概念に一致するため、辺関係の正しさを表す評価関数としては妥当であると言える。

### 3.2.2 周囲関係の正しさの評価関数

一方、周囲関係を表す評価関数についても、前述のガブリエルグラフの特性を複数のノードに適用することで表現可能である。簡単な例を図 12, 図 13 を用いて述べる。3つのノード A, B, C を頂点とする任意の鋭角三角形について、ガブリエルグラフの辺の構成を考察する。図 10 で示した場合と同様、4つ目となるノード D の存在に応じてガブリエルグラフの辺構成は大きく変化する。領域 1~領域 4 はほぼ三角形の内部、領域 5~領域 7 ではほぼ三角形の外部と判断できるが、ノード D の存在領域に応じて図 13 で示すようなガブリエルグラフの辺構成の変化が発生する。実際のノード位置のガブリエルグラフの辺構成と推定結果のノード位置のガブリエルグラフの辺構成を比較することで、周囲関係の正しさの評価が可能となる。例えば、実際の位置ではノード D が領域 4 に存在する状況下で、推定位置ではノード D は領域 4 に隣接する領域 1 に位置すると推定された場合、ガブリエルグラフの辺構成が異なる辺は辺 AB の 1 つのみである一方、ノード D は領域 5 に位置すると推定された場合、ガブリエルグラフの辺構成が異なる辺は辺 AB, AC, BC, CD の 4 つとなる。一般に、推定位置のノード存在領域が実際のそれに隣接している程、ガブリエルグラフ

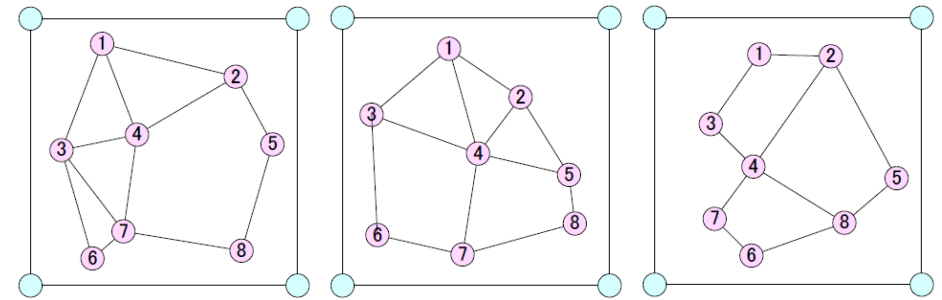


図 14 実際の位置

図 15 推定位置 1

図 16 推定位置 2

フの辺構成が実際の位置のそれと一致する辺の数は多くなるため、一致する辺の数が多い程周囲関係が正しいと判断することができる。一方で、同一領域に存在する限り、ノードに絶対位置誤差が生じた場合でもガブリエルグラフの辺構成は変化しない。これは、周囲関係の正しさの概念に一致するため、周囲関係の正しさを表す評価関数としては妥当であると言える。

鈍角三角形では最大辺を直径とする円が三角形全てを覆ってしまうため、この周囲関係の変化をガブリエルグラフを用いて比較することは不可能である。しかし、ノード数が十分大きく、かつ領域にノードがある程度分散して存在している環境では、その中から任意に選り出す  $k$  個 ( $k > 4$ ) のノードを頂点とした多角形を考えると、多角形は  $k - 2$  個の三角形に分割可能であり、その三角形の中に鋭角三角形が存在しない状況は非常にまれである。よってガブリエルグラフを用いることで、有限集合のノード群について、あるノードに対するノード群の周囲関係の正しさの評価することが可能であると考えられる。

### 3.2.3 ガブリエルグラフ乖離率

辺関係及び周囲関係の正しさを表す評価関数としては、実際の位置及び推定位置に対する 2 つのガブリエルグラフに対し、それらがどの程度乖離しているかを、推定結果のガブリエルグラフから実際の位置のガブリエルグラフに変形するために必要な辺の挿入、削除、置換の回数を用いて示す。これをグラフ編集距離と呼ぶ。グラフ編集距離が実際の位置のガブリエルグラフの辺数に占める割合を評価関数として提案する。この評価関数をガブリエルグラフ乖離率と呼び、 $E_{gg}$  で表す。これは、2 つのグラフがどの程度乖離しているかを、グラフサイズに対する割合として表したものである。

例えば図 16 に示すような、ノード 3, ノード 6, ノード 7 にて辺関係の正しさにおける

誤差が生じている推定位置 2 に対するガブリエルグラフでは、ノード 6-8 間やノード 6-3 間の辺の有無が実際のノード位置である図 14 と異なる。実際の位置と推定位置 1 の辺の有無が異なるノード組数は 2 であり、実際の位置と推定位置 2 の辺の有無が異なるノード組数は 5 である。したがって、図 16 の推定位置 1 に対するガブリエルグラフ乖離率は

$$E_{gg} = \frac{2}{12} \approx 16.7\%$$

となり、図 19 の推定位置 2 に対するガブリエルグラフ乖離率は

$$E_{gg} = \frac{5}{12} \approx 41.7\%$$

となる。この評価値を比較することで、推定位置 2 の方が位置関係の正しさの一致度が低い、すなわち相対位置誤差が大きいとみなす。

#### 4. 評価対象とする位置推定手法

本稿では、位置推定アルゴリズムとして (1) 多辺測量<sup>12)</sup> (2) DV-Hop<sup>13)</sup> (3) MDS-MAP<sup>14)</sup> (4) TRADE<sup>15)</sup> の 3 つのアルゴリズムを対象に相対位置誤差における評価を行った。

##### (1) 多辺測量

多辺測量 (Multilateration) とは、GPS に代表されるような、各ノードが複数の正確な位置基準 (ランドマーク) からの距離差や到達角度などを用いて測位を行う手法の総称である。ノード間の距離情報などは用いず、各ノードの位置を個別に決定する GPS を想定し、本稿では各ノード毎に誤差半径  $r$  を  $[0, 3](m)$  のランダム値として、誤差角  $\theta$  を  $[0, 2\pi]$  のランダム値として導出した後、実際のノードの位置  $(x, y)$  に対して  $(x + r \cos \theta, y + r \sin \theta)$  で導出される座標をノードの推定位置とした。

##### (2) DV-Hop

DV-Hop とは、無線アドホックネットワークを対象としたレンジフリー型の位置推定手法であり、多辺測量に分類される。ランドマーク間のホップ数から 1 ホップあたりの平均距離を導出し、さらに各ノードと複数のランドマークとのホップ数を元にノードとランドマーク間の距離を導出することで、各ノードがランドマークまでの距離を見積もる。最低 3 つのランドマークからの距離を見積もり、多辺測量を行うことで自らの位置を推定する。

##### (3) MDS-MAP

MDS-MAP とは、MDS (多次元尺度構成法) を位置推定アルゴリズムとして改良し

フィールド範囲	25 (m) × 25 (m)
最大無線到達距離 R	10 (m)
静止ランドマーク数	4
ノード数	20,30,40,50
ノードモビリティ	Random Way Point
ノードの移動速度	1.0 ~ 1.5 (m/s)
停止時間	0 (s)
シミュレーション時間	600 (s)

図 17 シミュレーション環境

たものである。レンジベース型の位置推定手法であり、各ノード間距離を電波強度を元に導出した後、行列計算により各ノードの位置座標近似解を導出する手法である。推定位置の回転体は全てノード間距離が同一であることから、位置座標は一意に決定しないため、ランドマークの座標は正確に分かるものとし、その座標に一致するよう回転補正を行う。隣接ノード数が増加する程、各ノード間の正確な距離が導出できるため、MDS-MAP はノード密度の増加に伴い絶対位置誤差の精度が向上する。

##### (4) TRADE: 近隣ノードの移動履歴情報を用いた位置推定手法

TRADE とは、無線アドホックネットワークを対象としたレンジフリー型の位置推定手法である。隣接ノードの接続 (非接続) 情報を元に、隣接状態である (隣接状態でない) にもかかわらず通信可能距離範囲外 (範囲内) であると推定されたノードに対しては引力 (斥力) を働かせることで推定結果を補正する。制約式が増加するほど、絶対位置の精度が向上するため、TRADE はノード密度の増加に伴い絶対位置誤差の精度が向上する。また TRADE では、遭遇した移動無線ノード間でアドホックによるメッセージを交換し、近隣ノードの現在および過去一定期間の推定位置情報 (移動履歴) を取得し、これを利用して過去の推定位置の精度をより向上させ、その結果を利用して現在の推定位置の精度をさらに向上させる。各ノードがこの操作を繰り返すことにより、ランドマークを基準に全ノードの位置情報が徐々に推定される。

#### 5. 実験結果と考察

本章では、4 章で示した位置推定アルゴリズムを用いてシミュレーション実験を行い、出力される推定位置に対して 3 章で提案した評価指標の評価値を確認した。

シミュレーション環境は図 17 に示す通りである。相対的な位置関係の正しさを実現する

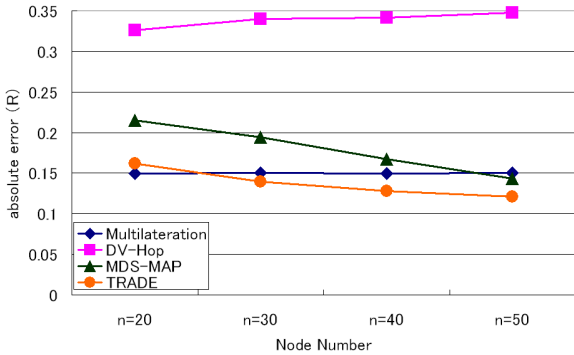


図 18 各位置推定アルゴリズムの推定結果に対する絶対位置誤差

のが困難なノード密度の高い環境について実験を行うことで、位置関係の正しさに誤差が生じやすくしている。さらに、TRADE、MDS-MAP はノード密度に応じて精度が変化するため、ノード数の異なる 4 つの環境についてシミュレーション実験を行った。また、レンジベース型である MDS-MAP では電波強度から得られる距離の精度誤差を 10%と設定した。シミュレーション結果及び各性能指標の評価値に関するグラフを図 18～図 21 に示す。実験の結果、位置推定アルゴリズムに応じて絶対位置誤差及び各評価値の増減関係が異なることが判明した。位置推定アルゴリズムと性能指標間の関連性を考察する。

図 18 では、各位置推定アルゴリズムの絶対位置誤差を示している。4 章で述べた通り、MDS-MAP、TRADE ではノード数の増加に伴い絶対位置誤差の精度が向上している。一方、多辺測量、DV-Hop ではノード数に応じた絶対位置誤差の変化はほとんど見られない。特に DV-Hop では、ランドマークからの Hop 数が同じ複数のノードは同一位置と推定されるため、比較的絶対位置誤差の精度が悪い値を示している。

図 19 では、各位置推定アルゴリズムの  $SR_{dist}$  を示している。多辺測量、DV-Hop では評価値が低い値を、TRADE、MDS-MAP では評価値が高い値を示しており、絶対位置誤差の精度をある程度反映した結果を出力している。各ノードが単独で位置を推定する多辺測量ならびに DV-Hop では、位置推定時に相対的な位置関係を考慮しないため、ノード数の増加に伴い距離関係の誤差が生じやすく、 $SR_{dist}$  は低い値を示していると考えられる。また、絶対位置誤差がほぼ同一である TRADE と MDS-MAP では、 $SR_{dist}$  に関してもほぼ同一の値を出力した。ノード間距離の順位を対象とする  $SR_{dist}$  では絶対位置誤差の精度に

ついて非常に大きな影響を受けるためだと考えられる。

図 20 では、各位置推定アルゴリズムの  $SR_{angle}$  を示している。 $SR_{dist}$  と同様に多辺測量、DV-Hop では評価値が低い値を、TRADE、MDS-MAP では評価値が高い値を示しており、絶対位置誤差の精度をある程度反映した結果を出力している。しかし、TRADE と MDS-MAP ではその評価値の絶対値にある程度の差異が見られた。ノード間の隣接情報から引力（斥力）を用いて位置推定を行う TRADE では左右の順位関係の逆転が発生しにくいためだと考えられる。

図 21 では、各位置推定アルゴリズムの  $E_{gg}$  を示している。前述の 2 つの順位相関係数と同様に多辺測量、DV-Hop では評価値が低い値を、TRADE、MDS-MAP では評価値が高い値を示している。しかし、 $SR_{dist}$ 、 $SR_{angle}$  共に TRADE より評価値が低い、あるいは同等である MDS-MAP は、 $E_{gg}$  においては TRADE より高い評価値を示している。MDS-MAP において利用される多次元尺度構成法は、各ノード間距離から実際のノード位置の回転体あるいは拡大（縮小）体を導出する。電波強度から得られるノード間距離に誤差を与えたため、左右の順序関係が逆転してしまうものの、周囲関係の正しさに影響を与える程大きい誤差ではないため、評価値の絶対値が低くなったと考えられる。一方 TRADE では位置推定時に引力（斥力）が働くため、周囲関係の正しさはある程度実現しているものの、各ノードの位置をガブリエルグラフによって区分される領域区分にまで正確には導出できなかったため、 $E_{gg}$  の値は悪化したものと考えられる。

6. あとがき

本稿では、無線アドホックネットワークを用いた位置推定アルゴリズムの新たな評価手法を提案した。提案手法では、あるノードを視点として他ノードを参照する場合と、ノード全体の位置関係を俯瞰した場合においてノード間の位置関係の正しさの定義を与えた。その定義に基づき、推定位置におけるノード間距離や方向が実際のノード位置において本来満たすべき関係を、順位相関係数やガブリエルグラフを用いて定量的に判定し、正しいノード間距離と方向が満たす関係をそれらがどの程度満足しているかの一致度として評価値を与えている。実験により、既存のいくつかの位置推定アルゴリズムが出力したノード推定位置に対して評価を行った。絶対位置誤差が同じ場合でも提案する手法の評価値はアルゴリズムごとに大きく異なり、アルゴリズムの特徴を反映した評価を行っていることが確認できた。

今後の課題としては、提案した評価指標が位置関係の認識をどの程度正しく反映できているかの検証が挙げられる。これには被験者による実験を行うことが望ましい。

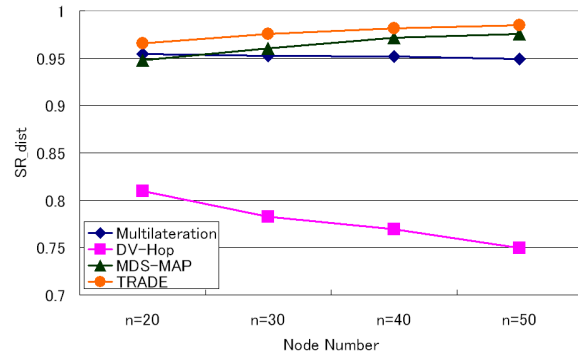


図 19 各位置推定アルゴリズムの推定結果に対する  $SR_{dist}$

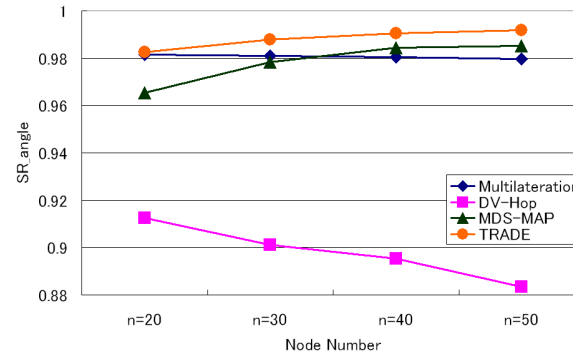


図 20 各位置推定アルゴリズムの推定結果に対する  $SR_{angle}$

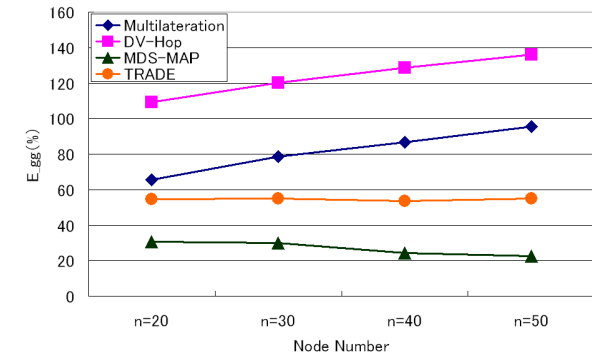


図 21 各位置推定アルゴリズムの推定結果に対する  $E_{err}$

## 参考文献

- Lee, H., Wicke, M., Kusy, B. and Guibas, L.: Localization of mobile users using trajectory matching, *In Proceedings of the first ACM International Workshop on Mobile Entity Localization and Tracking in GPS-less Environments*, pp.123–128 (2008).
- Li, M. and Liu, Y.: Rendered path: Range-free localization in anisotropic sensor networks with holes, *In Proceedings of the 13th Annual ACM International Conference on Mobile Computing and Networking*, pp.51–62 (2007).
- Uchiyama, A., Fujii, S., Maeda, K., Umedu, T., Yamaguchi, H. and Higashino, T.: Ad-hoc localization in urban district, *In Proceeding of the 26th IEEE International Conference on Computer Communications*, pp.2306–2310 (2007).
- Burrell, J., Gay, G., Kubo, K. and Farina, N.: Context-aware computing: A test case, *Lecture Notes in Computer Science*, Vol.2498, pp.1–15 (2002).
- VanSinderen, M., VanHalderen, A., Wegdam, M., Meeuwissen, H. and Eertink, E.: Supporting context-aware mobile applications: an infrastructure approach, *IEEE Communications Magazine*, Vol.44, No.9, pp.96–104 (2006).
- Chow, C., Mokbel, M. and Liu, X.: A peer-to-peer spatial cloaking algorithm for anonymous location-based service, *In Proceedings of the 14th Annual ACM International Symposium on Advances in Geographic Information Systems*, pp.171–178 (2006).
- Matsakis, P. and Wendling, L.: A new way to represent the relative position between areal objects, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol.21, No.7, pp.634–643 (1999).
- 木山 昇, 楠田純子, 山口弘純, 東野輝夫: 無線アドホックネットワークにおける位置推定の誤差がノード位置関係の認識に与える影響の評価, *情報処理学会研究報告 2009-MBL-49*, pp.37–44 (2009).
- 木山 昇, 楠田純子, 内山 彰, 廣森聡仁, 梅津高朗, 山口弘純, 東野輝夫: 災害時救急救命支援に向けた電子トリアージシステムの設計開発, *情報処理学会マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICOMO2009) シンポジウム論文集*, pp.1837–1848 (2009).
- Zar, J.H.: Significance testing of the Spearman rank correlation coefficient, *Journal of the American Statistical Association*, Vol.67, No.339, pp.578–580 (1972).
- de Berg, M., Cheong, O., van Kreveld, M. and Overmars, M.: *Computational geometry: algorithms and applications*, Springer, 3rd edition (2008).
- Hu, L. and Evans, D.: Localization for mobile sensor networks, *Proceedings of the 10th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*, pp.45–57 (2004).
- Niculescu, D. and Nath, B.: DV based positioning in ad hoc networks, *Telecommunication Systems*, Vol.22, No.1, pp.267–280 (2003).
- Shang, Y., Rumel, W., Zhang, Y. and Fromherz, M. P.J.: Localization from mere connectivity, *In Proceedings of the 4th ACM International Conference on Wireless Sensor Networks and Applications*, pp.201–212 (2003).
- Fujii, S., Nomura, T., Umedu, T., Yamaguchi, H. and Higashino, T.: Real-time trajectory estimation in mobile ad hoc networks, *In Proceedings of the 12th International Conference on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems (MSWiM 2009)* (2009).