

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

木 山 昇^{†1} 楠 田 純 子^{†1}
山 口 弘 純^{†1,†2} 東 野 輝 夫^{†1,†2}

本稿では、位置推定アルゴリズムによりその位置を推定されたノード群の相対的な“位置関係の正しさ”を定量的に示す性能指標を提案する。提案する指標では、周辺ノードとの位置関係に基づきあるノードを参照する行為において、正しいノードの位置を利用した場合と比較して参照誤りが発生しないことを位置関係の正しさの基準とし、それに基づき、推定位置におけるノード間距離や方向が本来満たすべき関係を順位相関係数や平面グラフを用いて表現する。その上で、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充足度として性能指標を与えている。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、絶対位置誤差に基づく指標が同じ場合でも、提案する指標の値はアルゴリズムごとに大きく異なることを示し、位置関係指標としての有用性を評価している。

Evaluation Impact of Position Estimation Errors on Recognition of Relative Positions in Wireless Ad hoc Networks

NOBORU KIYAMA,^{†1} JUNKO KUSUDA,^{†1}
HIROZUMI YAMAGUCHI^{†1,†2} and TERUO HIGASHINO^{†1,†2}

In this study, we propose a new quantitative performance metric for estimated positions of nodes generated by (wireless network-based) position estimation algorithms. Unlike the traditional metric that evaluates the absolute errors from the original node positions, this metric represents these nodes' relative positions which are important in referring a node's location as distance and directions from its surrounding nodes. Several experiments have been conducted to show the effectiveness of the proposed metric.

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¹⁾。ユビキタス社会を実現するためには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^{2),3)}。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の誤差が生じる。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）で表すことが多いため、推定されたノード位置が元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⁴⁾。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⁵⁾。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、例えば緊急事故現場における傷病者の認識など、対象物体の状況把握などの行為に大きな影響を与えるため、相対的な位置関係の正しさを定量的に評価するための指標が望まれる。

本稿では、位置推定アルゴリズムによりその位置を推定されたノード群の相対的な“位置関係の正しさ”を定量的に示す性能指標を提案する。提案する指標では、周辺ノードとの位置関係に基づきあるノードを参照する行為において、正しいノードの位置を利用した場合と比較して参照誤りが発生しないことを位置関係の正しさの基準とし、それに基づき、推定位置におけるノード間距離や方向が本来満たすべき関係を順位相関係数や平面グラフを用いて表現する。その上で、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充足度として性能指標を与えている。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、絶対位置誤差に基づく指標が同じ場合でも、提案する指標の値はアルゴリズムごとに大きく異なることを示し、位置関係指標としての有用性を評価している。

^{†1} 大阪大学大学院情報科学研究科

Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University

^{†2} 独立行政法人科学技術振興機構, CREST

Japan Science Technology and Agency, CREST

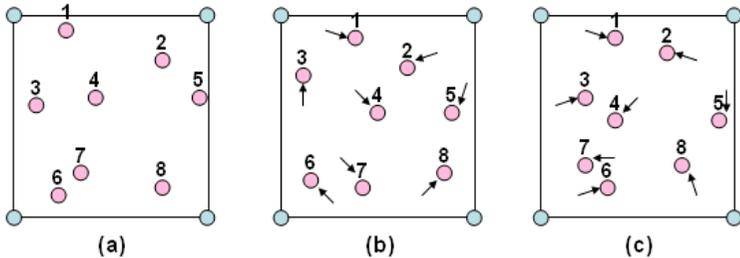


図 1 同じ絶対位置誤差で“位置関係”が異なる例 (a) 実際のノード位置 (b) 位置推定結果 1 (c) 位置推定結果 2

2. 提案する評価指標の概要

2.1 位置関係の正しさの議論

位置関係の正しさを定量化するための要因として、ノード間の距離及びその方向（すなわちノード間ベクトル）があげられる。ノード間距離もしくは方向が大きく異なる結果、他ノードとの“位置関係”が入れ替わってしまう場合、あるノード群から相対的に他ノードを参照する際の誤りの発生要因になると考えられる。これを単純な例で示す。例えば図 1(b)、図 1(c) は、各ノードの絶対位置誤差の平均が同じである 2 つの位置推定結果（順に位置推定結果 1 および位置推定結果 2 とよぶ）を示している。ここで、位置推定結果 2 では、例えばノード 3 を基準としたノード 6 やノード 7 の位置関係が実際の位置と比較して“逆転している”と見なすことができ、直感的には位置推定結果 1 が実位置（図 1(a)）が満たす位置関係をより“正しく”実現していると考えられる。

本稿では、このような曖昧で主観的な指標を、ある性質を満足するネットワークグラフのトポロジやその構成要素の特性分布に対する合致度により定義する。これにより、相対位置関係の正しさを定量的に表すことを試みるとともに、その妥当性を議論する。方式が異なるいくつかの既存の位置推定アルゴリズムが出力する位置推定結果がこの指標でどのように評価されるかを実験によって評価する。

前述のように、一般には位置関係に影響を与える要因は、ノード間距離および方向であると考えられるが、複数のノードの距離や方向が複雑に依存して相互の位置関係が決まるため、それらに関する指標は単純には考案できない。また、あるノードからの相対的な他ノードの参照を考慮する場合、同次元に存在する視点からの参照か、もしくは高次元の視点からの俯瞰による参照かにより指標が異なると考えられる。前者は現場を移動するロボットや人

間による空間認識において重要である。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現地本部に集約して一括地図表示し、現場の医療従事者に傷病者の配置情報をトランシーバなどで通知する場合などに必要となる。

我々は、後者の参照方法を対象とし、2次元平面俯瞰時のノードの位置関係の正しさを表現することを目的とした定量化を試みる。

2.2 位置関係の正しさの定量化

具体的には、以下のような誤差が相対位置によるノード参照に影響をおよぼす基本要因であると考えられる。

- 距離関係の誤差

各ノードから他ノードへの“距離間の関係”が、実際の位置におけるそれと異なるとき、位置関係の誤認識を生じる可能性が高い。例えば“ノード A から最も遠いノード”もしくは“最も近いノード”といったノード参照方法における誤りを生じる可能性がある。
- 順列の誤差

各ノードの“周辺ノード集合”ならびにその“順列”が実際の位置におけるそれと異なるとき、位置関係の誤認識を生じる可能性が高い。例えば、“ノード A, B, C に囲まれたノード”や、“ノード A の両隣に存在するノード B ならびにノード C”といったノード参照方法における誤りを生じる可能性がある。

これら両方の誤差を定量的に表す指標として、我々は、(i) 実ノード位置、推定ノード位置それぞれについて、すべてのノード間リンクの距離（またはノード間有向リンクの X 軸（もしくは Y 軸）成分）を大きさ（または正方向への大きさ）で順位付けしたリンク順位の相関係数、および、(ii) 実ノード位置、推定ノード位置それぞれについて、それらの平面グラフ（plane graph）のグラフ編集距離（graph edit distance）が実ノード位置の平面グラフのリンク数に占める割合、を提案する。以下でこれらの指標の概要を述べるとともに、これらが上述の誤差の一つを表現、もしくは両者を複合的に表現していることを示す。

2.2.1 リンク距離およびリンクベクトルの順位相関係数

距離関係の誤差を表すためには様々な指標が考えられるが、例えばノード間距離の順序関係が逆転している場合、相対的なノード参照に与える影響が大きいと考えられる。これをもとに、実ノード間リンクをその距離で順位付けしたものと、推定ノード間リンクをその距離で順位付けしたものとを相関を順位相関係数で表し、これを指標とする。以下、これをリンク距離の順位相関係数とよぶ。ここで、順位相関係数とは、2 つの順位データの相関を示す $[-1, 1]$ の係数であり、1 (-1) に近いほど、正 (負) の相関があり、0 のとき相関がないこと

を示す。この相関係数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変動しない。最も極端な例では、全ノードが同一方向に等しい距離誤差を生じている推定位置では、絶対位置誤差では誤差が大きいですが、順位相関係数は1となり、最も大きい相関値となる。

一方、ユークリッド距離でなくノード間ベクトルを考慮することで、ノード順列の誤差が与える影響も考慮できると考えられる。これに基づき、各ノード間ベクトルのある次元成分（X軸もしくはY軸成分）を正の方向で順位付けして得られる順位相関係数も指標として提案する。これをリンクベクトルの順位相関係数とよぶ。ノードの順列が異なる場合、ベクトルの次元成分も変動し、順位が大きく変動するため、この指標では、距離の誤差のみならず、順列の誤差もある程度表現できると考えられる。

なお、順位相関係数として、本来の順位からどの程度乖離しているかも反映するスピアマン順位相関係数と、順位の違いの有無のみを反映するケンドール順位相関係数の2種類の順位相関係数があるため、それぞれが指標としてどのように有用かも検討している。これについては後述する。

2.2.2 平面グラフのグラフ編集距離がリンク数に占める割合

リンク距離の順位相関係数を利用することで、距離関係の誤差の判定が可能であり、リンクベクトルの順位相関係数を用いれば順列の誤差もある程度表現可能であると思われるが、これらの順位に大きな変動が生じなくても、順列誤差が発生する状況も十分に考えられる。特に順位変動の大きさを考慮しないケンドール順位相関係数では、ノード順列の変化が係数に反映されにくい。そこで、順列の誤差をより高精度に検出することが可能な指標として、平面グラフ (plane graph) を利用する。

平面グラフは、平面上の頂点とそれらを交差なく接続する辺集合からなるグラフである。本稿では、実ノード、および推定ノードそれぞれに対して平面グラフを作成する。平面グラフは、その種類に応じて辺が満たすべき制約式を持つ。この制約式を満たす限りは、絶対位置誤差がある場合でも生成される平面グラフは実ノードと推定ノードとで同一になる。一方、これらの辺の制約式は、ノードの位置関係（距離および順位）により決定されるため、それらの誤差を反映することができる。提案手法では、2つの平面グラフに対し、それらがどの程度乖離しているかを示すため、それらのグラフ編集距離 (graph edit distance) が実ノード位置の平面グラフのリンク数に占める割合を指標として提案する。この指標を平面グラフ乖離率とよぶ。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。

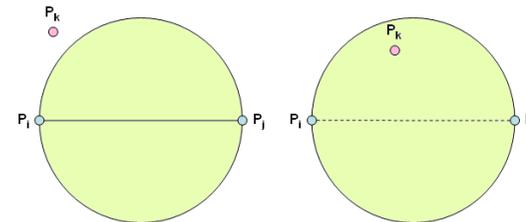


図2 ガブリエルグラフのリンク生成条件

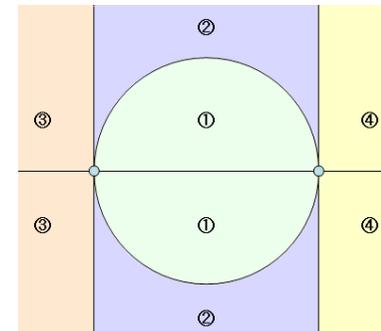


図3 ガブリエルグラフの辺構成が変化する3点目のノード領域区分図

次章以降では、平面グラフや順位相関係数の種類及びその特性について述べる。

3. 提案する評価指標の詳細

3.1 平面グラフ乖離率

3.1.1 ガブリエルグラフ乖離率

ガブリエルグラフ (Gabriel Graph)⁶⁾とは、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 の間に辺を生成したグラフである (図2参照)。このとき、 P_i - P_j 間に辺が生成可能であるかどうかの判定は、 P_k が円内にあることと、 $\angle P_i P_k P_j$ が鈍角であることが同義であることから、

$$P_i P_j^2 > P_i P_k^2 + P_j P_k^2 \quad (1)$$

によって判定することが可能である。この判定法を用いて、任意の3点が成す三角形が鈍角三角形である場合、その鈍角に対応する辺にはガブリエルグラフの辺を生成せず、それ以

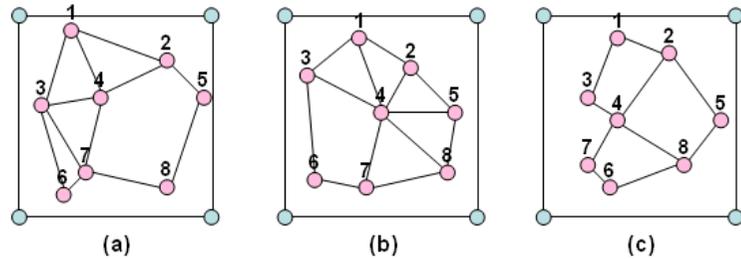


図 4 位置推定結果に対するガブリエルグラフの例
(a) 実際のノード位置 (b) 位置推定結果 1 (c) 位置推定結果 2

外，すなわち直角・鋭角三角形である場合は全ての辺にガブリエルグラフの辺を生成する．ガブリエルグラフを利用することで，任意の 2 ノードに対して他の 1 ノードがどの範囲に存在するかを判断することが可能となる．ガブリエルグラフでは鈍角三角形の最大辺に辺を生成しないため，2 点を選択した場合，3 点目のノードの位置に応じて辺の構成が異なる．辺構成が変化する領域区分を図 3 に示す．

例えば図 4(c) に示すようなノード 6 とノード 7 の位置関係の“逆転”が発生している位置推定結果 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 4(a) と異なる．実際の位置と位置推定結果 1 の辺の有無が異なるノード組数は 3 であり，実際の位置と位置推定結果 2 の辺の有無が異なるノード組数は 5 である．この辺の有無の違いの数を比較することで，位置推定結果 1 が位置関係をより正しく表現しているとみなす．以下では，ガブリエルグラフにおける平面グラフ乖離率をガブリエルグラフ乖離率とよぶ．

3.1.2 相対近傍グラフ乖離率

相対近傍グラフ (Relative Neighborhood Graph)⁶⁾ とは，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 点間を半径とする円を点 P_i と P_j のそれぞれを中心として描いたとき，それらの共通領域に他の点 P_k が存在しない場合， P_i と P_j の間に辺を生成したグラフである (図 5 参照)．このとき， P_i - P_j 間に辺が生成可能であるかどうかの判定は， P_k が共通領域にないことと，任意の k に対し三角形 $P_iP_jP_k$ において辺 P_iP_j が最大辺でないことが同義であることから，各辺の大小により判定することが可能である．この判定法を用いて，任意の 3 点が成す三角形に対して最大辺にのみ相対近傍グラフの辺を生成せず，残り 2 辺に関して各辺に相対近傍グラフの辺を生成する．相対近傍グラフを利用すること

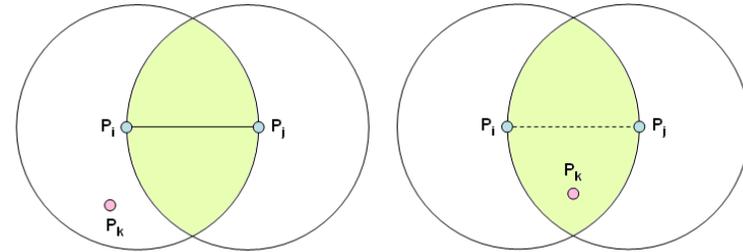


図 5 相対近傍グラフのリンク生成条件

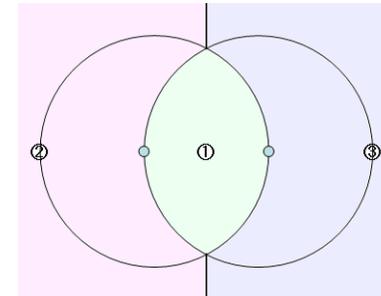


図 6 相対近傍グラフの辺構成が変化する 3 点目のノード領域区分図

でガブリエルグラフと同様に，任意の 2 つのノードに対して他の 1 ノードがどのあたりに存在するかを判断することが可能となる．辺構成が変化する領域区分図を図 6 に示す．

相対近傍グラフは，その辺生成条件からガブリエルグラフの部分グラフとなる．以下では，相対近傍グラフにおける平面グラフ乖離率を相対近傍グラフ乖離率とよぶ．

3.1.3 ガブリエルグラフと相対近傍グラフを併用した乖離率

図 3 及び図 6 では，任意の 2 ノードに対して，他の 1 ノードの位置に応じてグラフの辺構成が変化する領域を示した．各グラフでは，領域を 4 分割あるいは 3 分割して区分することが可能であるが，この領域分割を併用することで図 7 に示す 6 分割が可能となり，よりノードの相対的な位置を区分することが可能となる．そこで，ガブリエルグラフ乖離率と相対近傍グラフ乖離率を併用した乖離率を新たな平面グラフ乖離率として利用する．

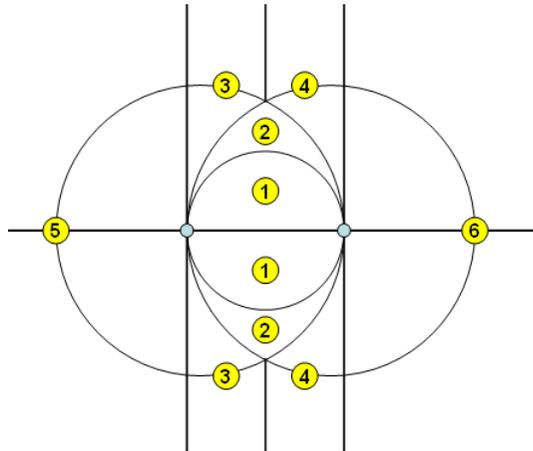


図7 ガブリエルグラフおよび相対近傍グラフの併用による領域区分図

順位	位置	実際の位置	推定結果
1		N(23) - N(41)	N(23) - N(41)
2		N(12) - N(9)	N(12) - N(9)
⋮		⋮	⋮
41		N(7) - N(43)	N(11) - N(50)
⋮		⋮	⋮
45		N(35) - N(4)	N(22) - N(39)
⋮		⋮	⋮
48		N(22) - N(39)	N(7) - N(43)
⋮		⋮	⋮
$\frac{1}{2}n(n-1)$		N(2) - N(28)	N(2) - N(28)

図8 リンク距離順位の例
 n はノード数, $N(\text{数字})$ はノード番号

3.2 順位相関係数

3.2.1 スピアマンの順位相関係数

スピアマンの順位相関係数⁷⁾ は次のように定義される。

$$\rho = 1 - \frac{6\sum D^2}{N(N^2 - 1)} \quad (2)$$

ただし、ここで D はある値の 2 つの順位間での順位差であり、 $\sum D^2$ は全ての値の順位差の 2 乗和のことを意味する。また、 N はノードの組の総数、すなわち $N = \frac{1}{2}n(n-1)$ である。スピアマンの順位相関係数は順位の違いが係数値に反映される。例えば、図 8 はノード 7 とノード 43 間の距離は推定結果では 48 位であるが、実際の位置では 41 位であるため順位差は 7 となり、 $D^2 = 7^2 = 49$ となる。2 つの順位の順序が完全に一致するときは $\sum D^2 = 0$ であるので $\rho = 1$ となる（正の相関）。一方、順位を逆順にしたものが、他方に完全に一致するときは $\sum D^2 = (N^2 - N)/3$ であるので $\rho = -1$ となる（負の相関）。

3.2.2 ケンドールの順位相関係数

ケンドールの順位相関係数⁸⁾ は次のように定義される。

$$\tau = \frac{2P}{\frac{1}{2}N(N-1)} - 1 \quad (3)$$

ここで N はスピアマンの順位相関係数と同様、ノードの組の総数すなわち $N = \frac{1}{2}n(n-1)$ であり、 P は順位の中から選んだある 2 つの組を考えたとき、2 つの順位での順序関係が一致する数である。ケンドールの順位相関係数は順位の違いが係数値に反映されない。すなわち、図 8 の場合、ノード 7 とノード 43 間の距離とノード 22 とノード 39 間の距離との順位が入れ替わっているため、 P には含まれないが、その順位の違いは考慮されない。2 つの順位の順序が完全に一致するときは $P = \frac{1}{2}N(N-1)$ であるので $\tau = 1$ となる。2 つの順位の順序が逆順に完全に一致するときは $P = 0$ であるので $\tau = -1$ となり、この性質はスピアマンの順位相関係数と同じである。

4. 評価対象とする位置推定手法

本稿では、位置推定手法として以下の (1) 多点測量 (2)MDS-MAP (3)TRADE の 3 つの手法を対象に評価を行う。

(1) 多点測量

多点測量とは、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）から電波強度などを用いて測位を行う手法である。本稿では、各ノード毎

に誤差半径 r を $[0, R]$ のランダム値として、誤差角 θ 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位置推定結果とした。

(2) MDS-MAP

MDS-MAP⁹⁾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、逆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。位置推定結果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。

MDS-MAPのノード間距離の正確性が高いという特性から、リンク距離のスピアマン順位相関係数やケンドール順位相関係数は非常に高い値が出力され、方向については考慮していないという特性から、ガブリエルグラフや相対近傍グラフの乖離率は高いと予測される。

(3) TRADE: 近隣ノードの移動履歴情報を用いた位置推定手法

TRADE¹⁰⁾は、モバイルアドホックネットワーク環境において利用される位置推定手法である。MDS-MAPとは異なり、レンジフリー型の位置推定手法となる。隣接ノードの接続/非接続情報を元に、ノードに対して引力/斥力を働かせる。隣接しているにもかかわらず通信範囲から離れていると推定されたノードに対しては引力を、隣接していないにもかかわらず通信範囲内にいると推定されたノードに対しては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誤差の精度が向上する。

TRADEでは、遭遇した移動無線ノード間のアドホック通信によるメッセージ交換により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、これを利用して自身の位置推定を行う。他ノードの移動履歴を利用することで、現在位置の推定だけでなく、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し行うことにより、正確な位置情報を発信する少数の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。ノード間の引力/斥力を用いて推定結果を補正するという特性から、ガブリエルグラフや相対近傍グラフの乖離率は低い、コネクティビティのみを考慮するという特性から、リンク距離のスピアマン順位相関係数やケンドール順位

相関係数の値は低くなると予測される。

5. 実験結果と考察

フィールド範囲	50m × 50m
最大無線到達距離 R	15m
静止ランドマーク数	4
ノード数	20,30,40,50
ノード配置	ランダム配置
シミュレーション回数	600回

図9 シミュレーション環境

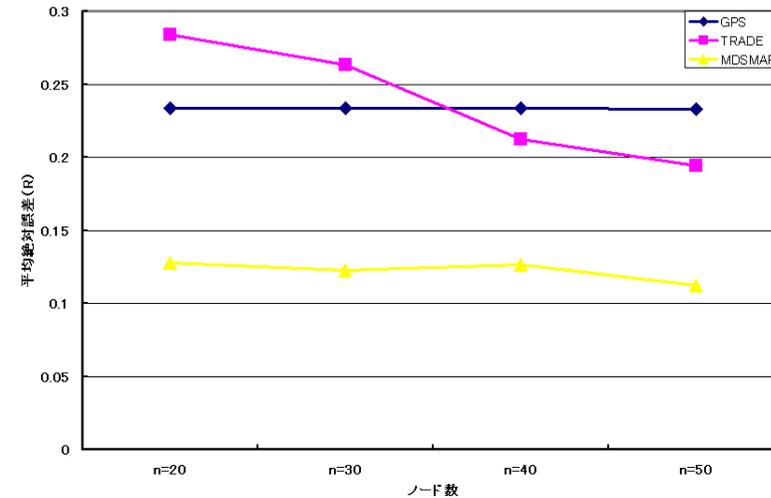


図10 各位置推定アルゴリズムの推定結果に対する絶対誤差

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

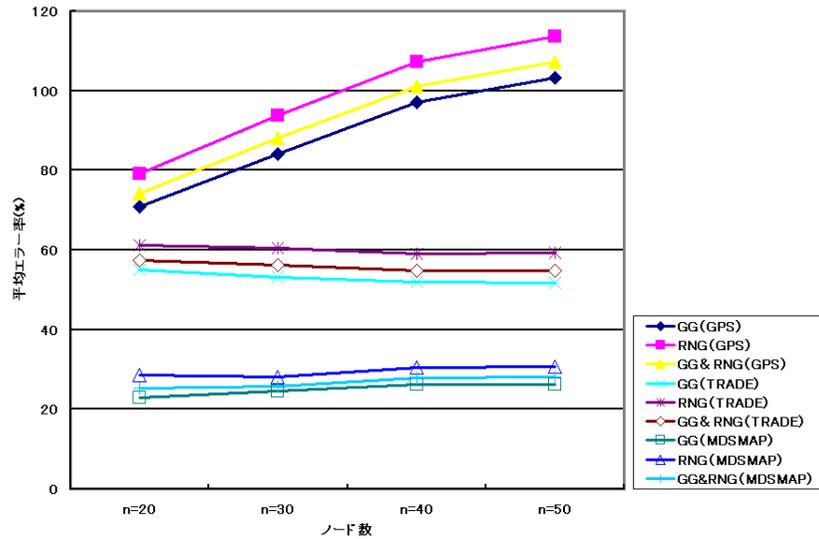


図 11 各位置推定アルゴリズムの推定結果に対する平面グラフのエラー率

力される位置推定結果に対して 3 章で提案した評価指標の数値を評価した。

シミュレーション環境は図 9 に示す通りである。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指標に関するグラフを図 10～図 13 に示す。

実験の結果、位置推定アルゴリズムに応じて絶対誤差及び各指標の増減関係が異なることが判明した。各ノードが単独で位置を推定できるアルゴリズムでは、相対位置の誤差を考慮しない位置推定結果が出力されるため、ノード密度の増加に伴い各評価指標の数値が悪化していく。一方、TRADE ではノード密度の変化に伴い絶対誤差が減少し、順位相関係数の数値が増加するが、平面グラフの乖離率は大幅に変動していない。引力/斥力を利用して位置補正を行う TRADE では、ノード密度が少なく絶対誤差が大きくなる環境に対しても、方向に関しては高精度な相対誤差を出力可能であることが判明した。また、レンジベース型の MDS-MAP は絶対誤差の精度が他の位置推定手法と比較して良く、各指標の精度も順位相関係数に偏ることなく良い結果となった。同じ絶対誤差を実現する 2 つの位置推定手

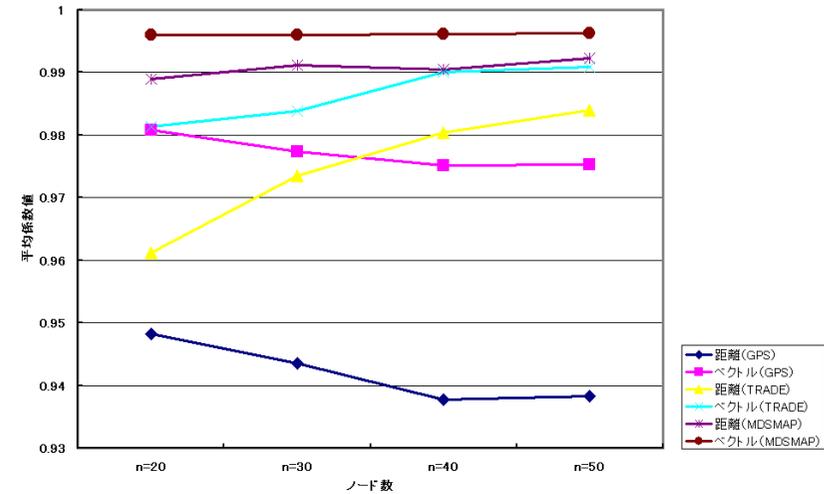


図 12 各位置推定アルゴリズムの推定結果に対するスピアマン順位相関係数

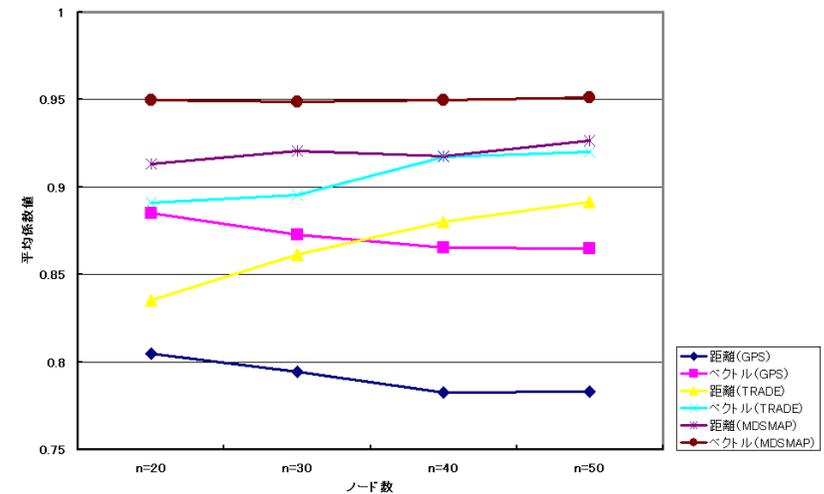


図 13 各位置推定アルゴリズムの推定結果に対するケンドール順位相関係数

法では相対誤差が異なる可能性はありうるが、絶対誤差を少なくすることが相対誤差の減少に繋がることが示された。各位置推定アルゴリズムについて、ガブリエルグラフ乖離率、相対近傍グラフ乖離率、併用の乖離率の増減率に大きな違いは見られなかった。ノード数の増加に伴い各グラフに誤差を生じるノードも同様に増加したためと考えられる。

6. あとがき

本稿では、位置推定アルゴリズムが出力した位置推定結果に対し、“位置関係の正しさ”を定量的に示す性能指標を提案した。提案する指標では、周辺ノードからの位置関係に基づき、推定位置におけるノード間距離や方向が本来満たすべき関係を順位相関係数や平面グラフを用いて表現し、その充足度として性能指標を与えている。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、絶対位置誤差に基づく指標が同じ場合でも、提案する指標の値はアルゴリズムごとに大きく異なることを示した。

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。提案した指標に関しても、各指標の特性をより深く分析する必要があると考えられる。

参 考 文 献

- 1) Goldenberg, D.K., Bihler, P., Cao, M., Fang, J., Anderson, B. D.O., Morseand, A.S. and Yang, Y.R.: Localization in sparse networks using sweeps, *Proc. of MobiCom 2006*, pp.110–121 (2006).
- 2) C, H.Y., Perring, A. and Johnson, D.: Packet leashes: a defense against wormhole attacks in wireless networks, *Proc. of INFOCOM 2003*, Vol.3, pp.1976–1986 (2003).
- 3) Burrell, J., Gay, G.K., Kubo, K. and Farina, N.: Context-aware computing: a test case, *Proc. of UbiComp 2002*, Vol.2498, Springer Berlin / Heidelberg, pp.647–653 (2002).
- 4) 中澤啓介, 井上智雄, 重野 寛, 岡田謙一: 地図作成学習における相対位置情報を用いた GPS の誤差低減手法, 情報処理学会研究報告 2006-MBL-38, pp.73–78 (2006).
- 5) Matsakis, P., Wendling, L. and Desachy, J.: A new way to represent the relative position between areal objects, *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell.*, Vol.21, pp.634–643 (1999).
- 6) de Berg, M., Cheong, O., van Kreveld, M. and Overmars, M.: *Computational geometry: algorithms and applications*, Springer, 3rd edition (2008).
- 7) Zar, J.H.: Significance testing of the Spearman rank correlation coefficient, *Journal of the American Statistical Association*, Vol.67, No.339, American Statistical

Association, pp.578–580 (1972).

- 8) Abdi, H.: The Kendall rank correlation coefficient, *Encyclopedia of Measurement and Statistics*.
- 9) Shang, Y., Rumel, W., Zhang, Y. and Fromherz, M. P.J.: Localization from mere connectivity, *Proceedings of the 4th ACM international conference on Wireless sensor networks and applications*, ACM, pp.201–212 (2003).
- 10) 野村崇志, 内山 彰, 梅津高朗, 山口弘純, 東野輝夫: 遭遇乗法の相互利用による移動端末の軌跡推定法の提案と現実的環境での評価, 情報処理学会マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICOMO2008) シンポジウム, pp.1066–1074 (2008).