

## 位置推定されたノード群の相対位置関係の評価

木山 昇† 内山 彰†‡ 山口 弘純†‡ 東野 輝夫†‡

†大阪大学 大学院情報科学研究科

‡独立行政法人科学技術振興機構 CREST

{ n-kiyama, utiyama, h-yamagu, higashino }@ist.osaka-u.ac.jp

### 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。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りが生じる。一般に位置推定における誤りとは、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, Absolute Position Error）で定義される。しかし多くのアルゴリズムでは、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、その正しさの指標の研究もほとんど行われていない。一方、複数ノード間の位置関係の正しさは、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、それ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を基準として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同様にノードの取り違えが発生しないことを位置関係の正しさの基準とする。次に、ノード位置を頂点としたドロネー三角形分割の類似度が、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の充足度を、前述の正しさの基準に基づき数値化していることを示す。本指標の有用性を示すため、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、絶対位置誤差が同じ場合でも、提案する性能指標の評価値はアルゴリズムごとに大きく異なることがわかった。

### 2 位置関係の正しさ

#### 2.1 位置関係の正しさの議論

複数ノードの位置関係の正しさの要因として、ノード間の距離及びその方向（ノード間ベクトル）が挙げられる。推定位置におけるノード間ベクトルが実際のノード間ベクトルと大きく異なると、他ノードとの“位置関係”が入れ替わる場合がある。このとき、あるノード群から相対的に他ノードを参照する行為（ノード参照）において、誤りの原因になると考えられる。

図1は、あるノード群の実際の位置と推定位置を示している。推定位置では、ノードXとノードY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、直感的にノードXとノードYを取り違える可能性が高い。この様な“位置関係の逆転”を、複数のノードを考慮した場合にどのように定義するかが課題となる。そこで本稿では、この“位置関係の正しさ”をある性質を満たすネットワークグラフのトポロジやその構成要素の

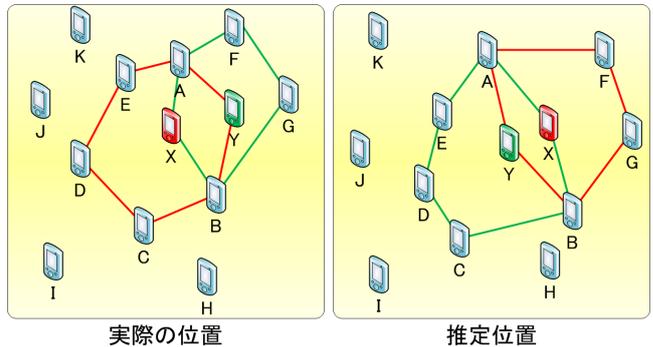


図1: 位置推定結果の比較

特性分布に対する一致度と定義する。これにより、相対的な位置関係の正しさを定量的に表す。

#### 2.2 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を定量的に表す方法として、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ある。しかし、複数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、位置関係の正しさを周辺ノード群を用いて定義する。ここで、ノードOの周辺ノード群 $S(O)$ を以下で定義する。

$$\forall X, \exists Y \in S(O), \forall Z \notin S(O), F(\triangle OXY) \leq F(\triangle OXZ)$$

ここでFは、三角形の3辺を引数とするある関数を表す。関数Fには角度、面積など様々な関数が考えられるが、本稿ではその三角形の外接円の半径と定義する。図2に示すように関数Fを与えられた三角形の外接円の半径とした場合、ノードZがノードOの周辺ノード群に属さない理由は、三角形OXZと比較してより小さい外接円を持つ三角形OXYが存在する、すなわちノードZと比較してよりノードO及びノードXに近く、周辺ノードとして“相応しい”ノードYが存在するためであり、これが人間の直感に一致していると考えられるためである。各ノードOに対し、この定義を満足するすべての周辺ノードX, Yを決定し三角形OXYを構成した場合、それはドロネー三角形分割に相当する。そこで、ドロネー三角形分割により生成されるグラフの辺の差異を位置関係の差異とみなす。ノードの入れ違えが発生している場合、ノードX及びノードYの周辺ノードに変化が生じる（図1）。

### 3 相対的な位置関係の誤りを表す評価関数

位置関係の正しさを表すため、実際の位置及び推定位置に対する2つのドロネー三角形分割について、それらがどの程度乖離しているかを数値化する評価関数を定義する。このため、推定結果から生成されたグラフを実際の位置から生成されたグラフに変形するために必要な辺

Evaluation of Estimated Positions based on Relative Positions among Mobile Nodes  
 †Noboru Kiyama ‡Akira Uchiyama †Hirozumi Yamaguchi †Teruo Higashino  
 †Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University  
 †Japan Science Technology and Agency, CREST

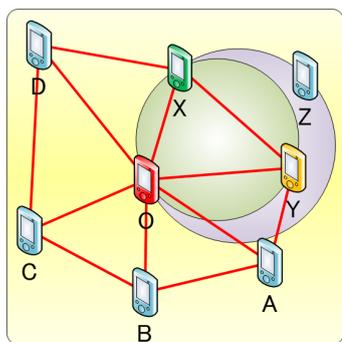


図 2: 外接円の半径による周辺ノードの定義

表 1: シミュレーション環境

フィールド範囲	25 (m) × 25 (m)
最大無線到達距離 R	10 (m)
ランドマーク数	4
ノード数	20,30,40,50
モビリティ	Random Way Point
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)

の挿入，削除，置換の回数（グラフ編集距離）を用いる．評価関数では，グラフ編集距離が実際の位置のドロネー三角形分割の辺数に占める割合を指標とする．以降では，この指標を相対位置誤差（Relative Position Error）と呼ぶ．

## 4 シミュレーション実験

### 4.1 評価環境

提案指標の有効性を確認するため（1）多辺測量（Multilateration）（2）MDS-MAP[1]（3）TRADE[2]の3つのアルゴリズムを対象に評価を行った．多辺測量では，各ノードが単独で複数の正確な位置基準局（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．これと比較して，各ノード間の距離や通信履歴を利用するMDS-MAP及びTRADEの方が相対位置誤差は小さいと予測される．シミュレーションでは多辺測量としてGPSを想定し，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．また，MDS-MAPでは電波強度から距離を算出する場合，最大で10%のランダムな測位誤差が発生するものとした．各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，出力された推定位置に対して相対位置誤差を算出した．シミュレーション環境は表1に示す通りである．

### 4.2 実験結果と考察

各位置推定アルゴリズムの絶対位置誤差を図3に，相対位置誤差を図4に示す．多辺測量，MDS-MAP，TRADEはどれも絶対位置誤差がほぼ同じであるが，相対位置誤差は大きく異なっている．多辺測量はノード数の増加に伴い相対位置誤差が大きくなるが，MDS-MAP及びTRADEでは変動は見られない．特にノード数が20の場合は，MDS-MAP及びTRADEは多辺測量と比較して絶対位置誤差が大きい一方で，相対位置誤差は小さい．この理由は，MDS-MAPやTRADEではノード間の距離や通信履歴を利用しており，ノード間の位置関係の逆転が起こりにくくなったためである．

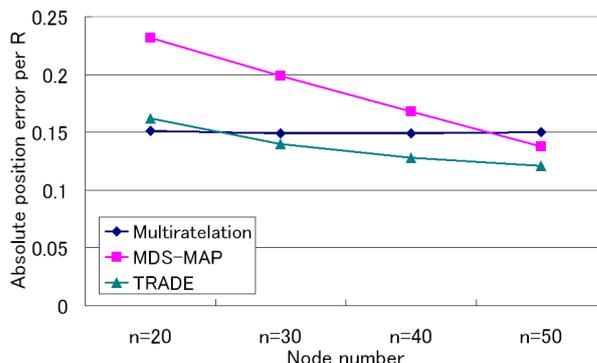


図 3: 絶対位置誤差

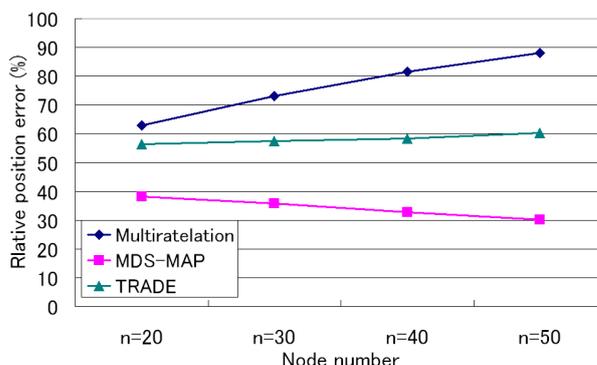


図 4: 相対位置誤差

## 5 まとめと今後の課題

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に対して，“位置関係の正しさ”を評価するための指標を提案した．この目的ため，各ノードの周辺ノードを定義することでノード間の位置関係の正しさを表現した．周辺ノードの定義に従う特性を持つドロネー三角形分割を用いて，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表現した．その上で，正しいノード間距離と方向が満たす関係との差異をグラフ編集距離により表し，相対位置誤差を数値化した．シミュレーション実験により，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ついて，絶対位置誤差が同じ場合でも相対位置誤差はアルゴリズムによって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人間の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．このためには被験者を交えてアプリケーションによる実験を行うことが望ましい．また，提案指標の特性をより詳細に分析する必要があると考えられる．

### 参考文献

- [1] Yi Shang, Wheeler Rumel, Ying Zhang, and Markus P. J. Fromherz. Localization from mere connectivity. In *Proc. of WSNA*, pp. 201–212, 2003.
- [2] Sae Fujii, Takashi Nomura, Takaaki Umedu, Hirozumi Yamaguchi, and Teruo Higashino. Real-time trajectory estimation in mobile ad hoc networks. In *Proc. of MSWiM2009*, pp. 163–172, 2009.