情報処理学会論文誌 Vol. 52 No. 1 209–219 (Jan. 2011)

ノード群の相対位置関係に基づく位置推定アルゴリズムの評価手法

木山 昇[†1] 内山 彰[†1,†2]
山口弘純[†1,†2] 東野輝夫[†1,†2]

本論文では，位置推定アルゴリズムにより位置を推定されたノード群の相対的な位置関係の誤りを示す評価方法を提案する．提案手法では，周辺ノードを基準にあるノードを参照する行為について，推定位置を用いた場合でも，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推定位置の相対的な位置関係の正しさの基準とする．その下で，正しい位置におけるノード間距離や方向を，推定位置がどの程度満たしていないかを両者の周辺ノード分布の不一致度により定義する．本論文では，この不一致度をドロネー三角形分割を用いて定義し，その妥当性を述べる．提案した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を，提案した指標で評価した．その結果，従来の絶対位置誤差に基づく評価値が同じである場合でも，提案する性能指標の評価値ではアルゴリズム間で 20%以上の差が生じ，アルゴリズムの特性に応じた数値が導出されることが確認できた．また，実証実験により人間の直感と提案指標に関連があることを確認した．

Evaluation of Localization Algorithms Based on Accuracy of Relative Positions

Noboru Kiyama,[†1] Akira Uchiyama,[†1,†2]
Hirozumi Yamaguchi[†1,†2] and Teruo Higashino[†1,†2]

In this paper, we propose a new method to evaluate performance of localization algorithms based on relationships among the estimated positions of nodes in wireless networks. In this method, such a relationship is observed as a relative position relationship between each node and a set of its neighbor nodes. Then we define the relative position error of a localization algorithm as degree of discrepancy of the relationships between estimated positions and real ones. In order to see the effectiveness of the proposed method, we have compared relative position errors of three localization algorithms. From the results, it turned out that the difference of the relative position errors was more than 20% although their absolute position errors were almost the same. We have also confirmed the relative position error relates to human intuition based on real experiments.

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さかんに行われている．ユビキタス社会を実現するうえ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[1)–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．

一方，複数ノード間での相対的な位置関係の正しさは，特定のノードを参照する行為に大きな影響を与える．たとえば，無線端末を保持する人物群の推定位置をモニタ上に表示するシステムを用い，モニタ中のある人物を実際の人物群から目視で特定したい場合，その特定には周辺の人物との位置関係を利用すると考えられる．そのような利用を想定した場合，各位置推定アルゴリズムに対する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．たと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[4)]．しかし，これらはロボットなどの空間認識用途を前提としており，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されていない．

本論文では，すべての位置推定アルゴリズムを対象に，位置を推定されたノード群の “相対的な位置関係の誤り”（**相対位置誤差**）を定量的に示す 1 つの指標を提案する．提案する指標では，あるノードをそのいくつかの周辺ノードとの位置関係から特定する行為におい

†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 Agnecy, CREST

© 2011 Information Processing Society of Japan

て，推定位置を用いた場合でも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，推定位置における位置関係の正しさの基準とする．これに基づき，推定位置における各ノードと，その “代表的な” 周辺ノードとの位置関係が，本来のノード位置におけるそれとどの程度一致していないかを不一致度（Degree of Discrepancy）と呼ばれる値で定義し，これを相対位置誤差と見なす．なお，あるノードに対して，どのノードが “代表的な” 周辺ノードであるかを決定する絶対的基準は存在しないが，一方で相対位置誤差を定量化するためには，人の周辺ノード認識基準に比較的近い基準を実現できる周辺ノードを選び，それに基づく不一致度の定式化を行う必要がある．そこで本論文では，あるノード A に対して，ノード A に近く（近接性），より “代表にふさわしい” ノードが周辺に存在しない（唯一性）ような各ノード B を，A の相対位置を特徴づける周辺ノードと見なす．本論文では，B が A に対し近接性と唯一性を満たすことが，A および B を含むドロネー三角形を構成できることと等価であることを説明し，本来のノード位置におけるドロネー三角形分割との乖離度を不一致度として用いる．

提案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判明した．また，11 名を対象としたアンケートを実施した結果，提案する指標と人間の直感によるノード参照誤りが発生する割合との間に関連性があることが判明した．さらに，提案指標による評価が重要な意味を持つ位置推定アルゴリズムの応用分野についても述べる．

2. 関 連 研 究

2.1 位置推定アルゴリズム

現在，無線ネットワークを用いた位置推定アルゴリズムが数多く提案されている．位置推定アルゴリズムでは，受信電波強度（Received Signal Strength Indicator，RSSI）や電波の到着時間差（Time Difference of Arrival，TDoA），電波受信角度（Angle of Arrival，AoA）などを測定し，ノード間の距離や角度などの地理的情報を推定して位置を特定する．相対位置の観点から位置推定アルゴリズムを分類した場合，2 種類に大別される．1 つはランドマークのみを基準とする手法[5)–7)] であり，もう 1 つは隣接ノードを基準とした手法[8)–11)] である．

ランドマークのみを基準とする手法には，Global Positioning System（GPS）をはじめ，DV-HOP[5)]，APIT[6)]，MCL[7)] などがあげられる．DV-HOP では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基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．このようにして最低 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．APIT では 3 つのランドマークにより構成される三角形の内部または外部に存在するかの情報を組み合わせて位置推定を行う．MCL では，各ノードは自身の存在領域（Area of Presence）を保持し，ランドマークと遭遇するたびに互いの存在領域を交換し，精度を向上させる．これらの手法ではランドマークからの地理的情報のみを利用するため，近隣に存在する他ノードとの地理的関係は考慮していない．

一方，隣接ノードを基準とした手法では，ランドマークを含む隣接ノードからの地理的情報を位置推定に用いるため，ランドマークのみを基準とする手法と比較して，相対的な位置関係が考慮されていると考えられる．MDS-MAP[8)] は Multi Dimensional Scaling（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．電波強度からノード間の相対的な距離関係を導出した後，行列計算により各ノードの位置座標近似解を導出する．また，DWMDS[9)] は，MDS-MAP に移動制約の概念を加えた手法である．また TRACKIE[10)] では，まず各ノードはランドマーク間を直線移動するものとして移動履歴を推定し，各ノード間の通信履歴と整合性がとれるよう移動履歴を修正する．TRADE[11)] は端末間の通信可否を基に，通信可能範囲内に存在するかどうか，という地理的制約を重ね合わせることで存在可能性のある範囲を絞り込み，位置を推定する．

2.2 画 像 認 識

2 つの入力の類似度を数値化する手法は，顔認識などをはじめとする画像認識におけるパターンマッチング問題において利用されている．パターンマッチング問題は主に特徴抽出と識別処理の 2 つの処理に分類される．特徴抽出では実世界から得られた入力から類似度を数値化するうえで重要視すべき点（たとえば顔認識の場合，鼻や目など）を抽出する．識別処理では抽出された特徴をクラス，カテゴリなどに分類し数値化を試みる．この識別処理には統計的パターン認識と構造的パターン認識の 2 種類が存在する．前者は大量の事前知識を用いた最尤判定であり，後者は構造そのものを特徴づけて類似度を判定する．後者については，たとえば文献 12) では顔認識における識別処理について固有値ベクトルを利用し，それを比較することで顔認識を行っている．さらに文献 13)–15) では，画像認識において特異点を利用し，その点の位置関係を基に画像の一致度を導出する．また，文献 16)，17) では指紋認証に対して，ドロネー三角形分割を利用して各特徴点の相対的な位置関係を導出し，構成された三角形の構造を比較することで認証を行っている．

© 2011 Information Processing Society of Japan

2.3　本研究の位置付け

本論文で提案する手法は以下の 2 点について上記の研究と異なる．(1) これまでに位置推定アルゴリズムを提案してきた文献では，絶対位置誤差を評価指標としており，相対位置誤差を定量化しそれを用いて性能を評価している文献は現在のところ見あたらない．(2) パターンマッチング問題では，前述のとおり 2 つの入力の類似度を数値化する研究が行われている．しかし，数値化手法は画像の特徴量の表現を目指しており，提案手法のように相対的な位置の正しさの表現を目指したものとはまったく異なる．本論文では，あるノード（点）を誤りなく特定するためにはどの周辺ノード群がどのような関係を満たすべきかを人間の感覚に沿う形で定義し，それを既知の領域分割方法と関連づけて定式化している．パターンマッチング問題を含め過去にそのような試みはなされていない．また，これまでの絶対位置誤差では性能差が分かりにくかった複数のアルゴリズムの性能差が提案手法で明らかにできることも示している．

3.　位置関係の正しさ

3.1　位置関係の正しさの議論

複数のノードの位置関係の正しさを特徴づける要因としては，直感的にはノード間の距離および方向（すなわちノード間ベクトル）があげられる．推定位置におけるノード間距離もしくは方向が実際のそれと大きく異なる結果，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における参照誤りの原因になると考えられる．これを簡単な例で示す．**図 1** は，あるノード群の実際の位置（実位置）と推定位置を示している．ここで (c) の推定結果では，ノード C を基準としたノード F とノード G の位置関係が，(a) に示す実位置と比較して “逆転している” と見なすことができる．したがって，直感的には (b) の推定結果の方が実位置が満たす位置関係をより “正しく” 表現しており，ノード F とノード G を取り違える可能性が低いと考えられる．位置関係の正しさを定量化するためには，このような “位置関係の逆転”，すなわち相対位置誤差をどのように定義するかが課題となる．

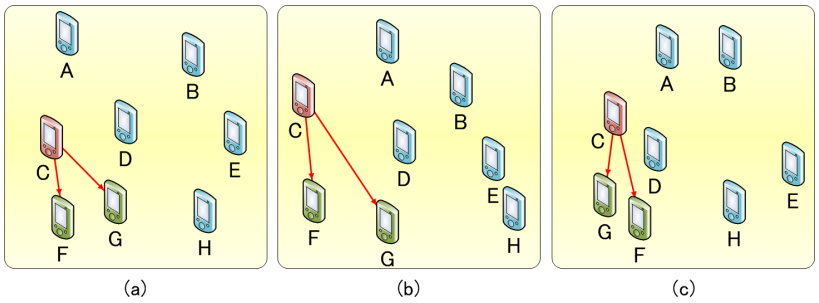


図 1　位置関係の逆転．(a) 実位置，(b) 一致，(c) 逆転
Fig. 1　Reverse in estimated locations. (a) Real position, (b) Consistent, (c) Inconsistent.

2 ノード間の相対位置誤差を表す値として，たとえば 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考えられる．しかし，複数ノードが存在する場合に，どの要因値のどの程度の差異がノード参照の誤りに影響を与えるかの議論やその裏づけはなされていないのが現状である．

3.2　位置推定結果の比較

複数ノード間の相対位置誤差を定量的に表す方法を，複数の位置推定結果を比較することで検討する．**図 2** に実位置および 8 つの推定結果を示す．図中の赤線は隣接するノード A〜H をアルファベット順に結んだものであり，各推定位置から伸びる緑色の線分は推定結果における実位置からのずれを表している．実位置および推定結果では，20 m × 20 m の広さを持つ領域内に 9 つのノードが配置されている．推定結果では，各ノードに固定値 3 m の絶対位置誤差を与えているが，絶対位置誤差の発生方向のみ $[\pi, 2\pi)$ の区間でランダムに与えている．実位置とこれらの推定結果を比較した場合，(a)〜(d) に示す推定結果は実位置 (e) と比較して位置関係が正しいといえ，(f)〜(i) に示す推定結果では実位置 (e) と比較して位置関係が正しくない（逆転しているノードが存在する）といえる．これは，中央に位置するノード O と周辺に分布するノード A〜H の位置関係について，推定結果 (f)〜(i) と比較して推定結果 (a)〜(d) の方がより類似度が高いためと考えられる．そこで本論文では，この推定位置の比較結果の下，位置関係の正しさをあるノードの周辺ノードが一致していることと定義する．

3.3　位置関係の正しさの定義

前節の議論に基づき，あるノード O に対し，その相対位置の参照基準となる代表的な周辺ノード群集合を定義する．あるノード O を相対位置で参照するときに用いる周辺ノードの選び方は人間の主観に依存する．しかし，その選択基準として，“ノード O との近さ”（近接性）という概念が存在すると考えられる．簡単な例を**図 3** に示す．図 3 ではノード O の周辺ノード群としてノード A〜E を選定している．この周辺ノードの選定は，“ある程度近い” という人の直感に沿っていると考えられる．ここでノード F を考慮した場合，人の直感

© 2011 Information Processing Society of Japan

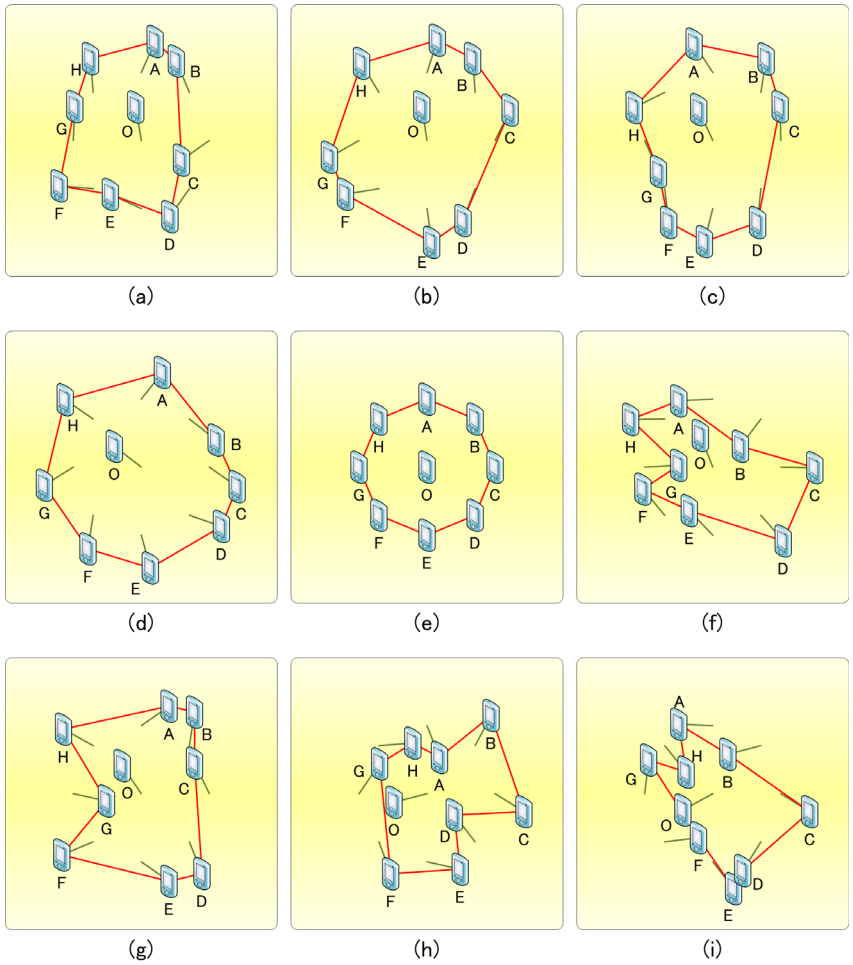


図 2　相対的な位置関係の比較．(a)〜(d)：周辺ノードの一致例，(e)：実位置，(f)〜(i)：周辺ノードの不一致例
Fig. 2　Comparison among relative positions. (a)〜(d): Consistent cases, (e): Real position, (f)〜(i): Inconsistent cases.

ではノード F はノード O の周辺ノードとして選択されやすいと考えられる．一方で，ノード G やノード H はノード O の周辺ノードとして選択されにくいと考えられる．OF と OG

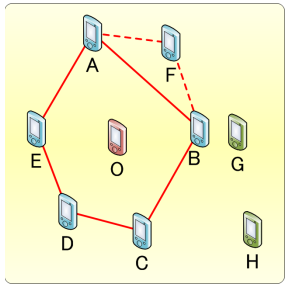


図 3　直感的な周辺ノードの例
Fig. 3　Intuitive example of neighbor nodes.

の距離はほぼ同じであることから，周辺ノードの基準はノード O との近接性だけではなく，それが参照基準としてどの程度代替がきかないか（唯一性）も関係すると思われる．たとえばノード G はノード B の存在により，ノード H はノード B，C の存在により，O の周辺ノードとしての存在の必要性が低くなっていると見なすことができる．

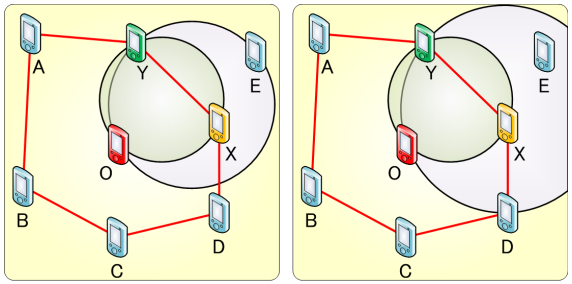
提案手法では，たとえば図 3 でノード F がノード O の周辺ノードであるためには，ノード F の近傍においてノード O の周辺ノードとなりうるノード A およびノード B との位置関係を考慮しなければならないものとする．この判断を，基準となるノード O およびそれらの周辺ノードであるノード A，ノード B を頂点とする三角形（以下三角形 OAB と示す）と，基準となるノード O および周辺ノードであるノード A（あるいはノード B），ノード F を頂点とする三角形 OAF（あるいは三角形 OBF）を比較することで行う．以上の議論を基に，本論文ではノード O の周辺ノード群 $N(O)$ を以下のように一般化して定義する．

定義 1：ノード全体の集合を V，ノード O の周辺ノード群を $N(O)$ で表す．ノード X が $N(O)$ の要素である必要十分条件を以下で定義する．

$$X \in N(O) \Leftrightarrow \text{各ノード } Z \in V - \{X, O\} \text{ に対し，以下が成り立つ：}$$
$$\exists Y \in N(O) - \{X\}, f(\triangle OYX) \leq f(\triangle OYZ)$$

この式は，周辺ノードが満たすべき条件を規定している．ノード X がノード O の周辺ノードであるとは，どのようなノード Z に対しても，それに対応する適当なノード O の周辺ノード Y が存在し，三角形 OYX は三角形 OYZ よりも関数 f の値が小さいこととして定義している．ここで f は，三角形の 3 辺を引数とするある関数を表す．f は，ノード X がノード O に “近接” し，周辺ノードとして “唯一性” の高いノードであることを，2 つの三角形の比較可能な値で表す必要がある．直感的には関数 f としては面積や角度などが考

© 2011 Information Processing Society of Japan



(a) 近接性　(b) 唯一性

図 4　外接円の半径に基づく周辺ノードの定義
Fig. 4　Definition of neighbor nodes in terms of circumscribed circles.

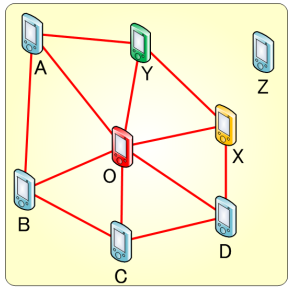


図 5　ドロネー三角形分割の例
Fig. 5　An example of Delaunay triangulations.

えられるが，いずれも適切ではないことを以下で述べる．たとえば面積とした場合にノード X が満たすべき条件は，底辺 OY に平行でノード Z を通る直線に対してノード O 側に存在することのみである．したがって，存在可能な領域が無限に広がるため近接性を表現することができない．また $\angle YOZ$ と $\angle YOX$ など角度の比較についても同様に，辺 OX の距離に関する制約を与えないため，条件を満たすノード X の存在可能な領域は無限に広がる可能性があり近接性を表現できない．そこで，本論文では引数として与えられた三角形の外接円の半径を返す関数を f として用いる（**図 4**）．ノード X がノード O の周辺ノード群に属する理由は

(1)　ノード E を定義式中のノード Z ととらえた場合，三角形 OYE と比較してより小さい外接円を持つ三角形 OYX が存在するためである．すなわち，図 4 (a) に示すとおりノード X はノード E と比較してノード O に “近接” している，

(2)　ノード D を定義式中のノード Z ととらえた場合，三角形 OYX は三角形 OYD と比較して外接円の半径が小さく，ノード X は三角形 OYD の外接円内に存在するためである．すなわち，図 4 (b) に示すようにノード X はノード O から見てノード Y やノード D の背後に存在することはなく，ノード X の必要性は低下しないため “唯一性” も満足している，

と判断できるためである．この選定基準は，“近接性”，“唯一性” を基準とする人間の直感に比較的近いと考えられる．一方で，人間が周辺ノードを判定する感覚を完全に数値で表現することは非常に困難である．したがって，三角形の外接円の半径の大小関係という数値関係で周辺ノードを判定する以上，位置の微小な差にもかかわらず周辺ノードが変化する状況も当然生じうる．そこで本論文では提案指標と人間の直感との関連性を 6 章で実証実験により確認している．

なお，**図 5** に示すように，各ノード O に対し本定義を満足する周辺ノード群 $N(O)$ を決定し，互いに近接する周辺ノード間で三角形を構成した場合，その三角形の集合はドロネー三角形分割[18] 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して，相対位置誤差を定義する．

4. 相対位置誤差を示す評価関数の定義

ドロネー三角形分割に基づき相対位置誤差を定義するため，提案手法では推定位置からドロネー三角形分割により生成されたグラフを，実位置から生成されたグラフに変形するために必要な辺の挿入，削除，置換の回数総和の最小値を用いる．これは，一般的にグラフ編集距離（Graph Edit Distance）[19] として知られている．

全ノード集合を V とし，実位置と推定位置におけるドロネー辺の辺集合をそれぞれ E_r, E_e とする．実位置と推定位置におけるドロネーグラフは $G_r = (V, E_r)$，$G_e = (V, E_e)$ で表される．このとき，G_r と G_e 間のグラフ編集距離は次の式で定義される．

$$Graph\ Edit\ Distance = \frac{\sum_{X,Y \in V} GED(X,Y)}{2}$$

$$GED(X,Y) = \begin{cases} 1 & \text{if } (X,Y) \in E_r \wedge (X,Y) \notin E_e \\ & \quad \vee (X,Y) \notin E_r \wedge (X,Y) \in E_e \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

© 2011 Information Processing Society of Japan

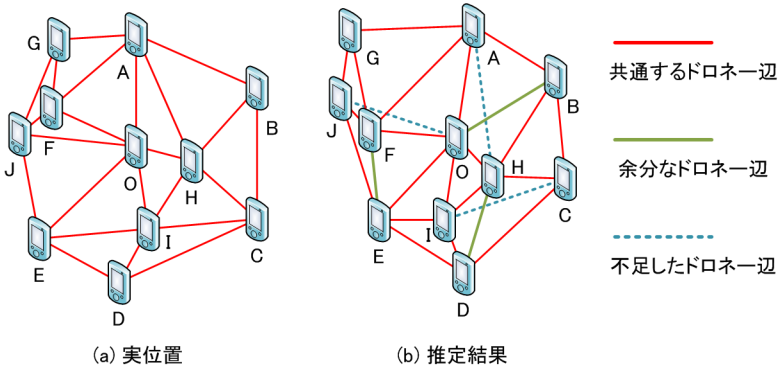


図 6　周辺ノード群の不一致例
Fig. 6　An example of discrepancy between neighbor sets.

相対位置誤差はグラフ編集距離を正規化した値とする．推定位置の全ドロネー辺が実位置のドロネー辺と一致しない場合に，グラフ編集距離は最大となるため，辺集合 E の要素数を $|E|$ とすれば，グラフ編集距離の最大値は $|E_r|+|E_e|$ である．本指標をドロネー三角形分割における不一致度（Degree of Discrepancy）と呼び，DoD と表す．DoD の定義式は次のとおりとなる．

$$DoD = \frac{Graph\ Edit\ Distance}{|E_r|+|E_e|}$$

たとえば **図 6** に示す実位置および推定結果の場合，$GED(F,E)$，$GED(D,H)$，$GED(O,B)$，$GED(O,J)$，$GED(A,H)$，$GED(C,I)$，および要素の順序を逆転したものが 1 となる．したがって，$Graph\ Edit\ Distance = 6$ となり，不一致度 DoD は

$$DoD = \frac{6}{23} \simeq 0.26$$

となる．

DoD は閉区間 $[0,1]$ の値をとる．DoD が 0 の場合，各ノードからのその周辺ノードへのドロネー辺が実位置と推定位置において完全に一致するため，推定位置におけるノードの参照誤りが最も起こりにくい．一方で DoD が 1 のとき，各ノードからその周辺ノードへのドロネー辺が実位置と推定位置においてすべて異なるため，ノードの参照誤りが最も発生しやすい．また提案手法では，あるノード群から相対的に他ノードを参照する行為において，回転や拡大縮小は影響を与えないと想定し，周辺ノードを定義している．したがって，推定位置が実位置の回転体や拡大縮小体である場合でも DoD は 0 となる．

5. シミュレーション実験

提案する指標が相対位置誤差を表していることを示すため，その特性から相対位置誤差が異なると予想されるいくつかの位置推定アルゴリズムに対し，それらが出力した位置推定結果を用いた評価を行った．評価対象となる位置推定アルゴリズムは多辺測量，MDS-MAP，TRADE である．2 章で述べたとおり，多辺測量はランドマークのみを基準とする手法であり，MDS-MAP，TRADE は隣接ノードを基準とした手法である．MDS-MAP は RSSI を利用して隣接ノード間の距離を推定する手法であり，TRADE は他ノードとの通信履歴と最大無線到達距離を基に他ノードとの地理的関係に対する制約条件を取得し，ノードが存在する可能性のある領域を絞り込む手法である．提案指標では隣接ノードの位置関係により周辺ノードが変化する．したがって，上記 3 つの位置推定アルゴリズムに対して DoD を評価することにより，隣接ノード間情報の利用の有無が相対位置誤差に及ぼす影響を確認することができる．

5.1 評価する位置推定アルゴリズム

5.1.1 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）からの直接辺の情報（距離差など）を用いて測位を行う手法の総称である．多辺測量は各ノードが独立して実行するため，隣接ノード間の位置関係は考慮されない．そのため，不一致率 DoD は高いと考えられる．

5.1.2 MDS-MAP

推定位置の回転体および拡大（縮小）体について全ノード間の距離関係が同一であることから，MDS-MAP では位置座標解が一意に決定しない．そのため，ランドマークの座標を基準として回転補正を行う．隣接ノード数が増加するほど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ともない絶対位置誤差の精度が向上する．MDS-MAP では，あるノードから他の全ノードに対する距離を基に位置推定を行うが，電波強度から得られた測位誤差の影響が全ノード間で最小となるように推定結果を導出する．そのため，不一致率 DoD は低いと考えられる．

5.1.3 TRADE

TRADE では，他ノードとの通信可否および他ノードの移動履歴から，通信制約，移動

© 2011 Information Processing Society of Japan

表 1　評価環境
Table 1　Simulation environment.

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)

制約を導出する．これらの制約式はノードが存在可能な地理的範囲を絞り込むものであり，制約式が増加するほど絶対位置の精度が向上する．したがって，TRADE はノード密度の増加にともない絶対位置誤差の精度が向上する．また，TRADE では位置推定を行う際，最大通信可能距離を基に通信制約を導出するため，最大通信可能距離内に存在するノードに対する相対位置誤差は比較的低いと予想される．一方で，最大通信可能距離外のノードの位置は考慮しないことから，不一致率 *DoD* は多辺測量より低いものの，MDS-MAP よりは高いと予想される．なお，TRADE では各ノードが位置推定を実行するが，本論文では簡単のため TRADE を集中型アルゴリズムへ改良したものを用いている．

5.2　評 価 環 境

シミュレーションでは多辺測量として GPS を想定し，各ノードごとに誤差半径 r を $[0,3]$ (m) 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%のランダムな距離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不一致率 *DoD* を算出した．シミュレーション環境は**表 1** に示すとおりである．MDS-MAP，TRADE ではノード密度に応じて絶対位置誤差の精度が変化するため，ノード数が異なる 4 つの環境で実験を行った．

5.3　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 7** に，相対位置誤差を**図 8** 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および相対位置誤差の値および増減関係が異なることが判明した．以下では，位置推定アルゴリズムと誤差の間の関連性を考察する．

図 7 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．5.1 節で述べたとおり，MDS-MAP，TRADE ではノード数の増加にともない絶対位置誤差が減少しているが，ノード数が 50 のとき，0.12 m〜0.15 m と近い値となっている．

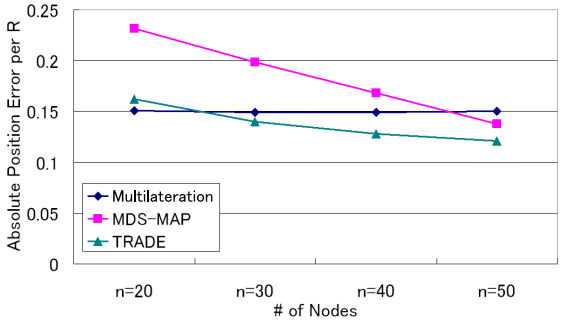


図 7　絶対位置誤差
Fig. 7　Absolute position error.

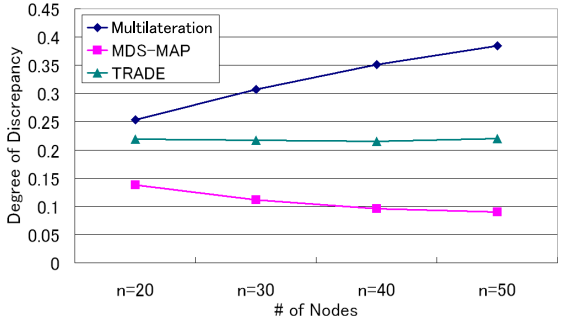


図 8　相対位置誤差
Fig. 8　Relative position error.

これに対し，図 8 では各位置推定アルゴリズムの *DoD* を示している．多辺測量では高い値を，TRADE，MDS-MAP では低い値を示している．特に，MDS-MAP は *DoD* が最も低い値を示している．前述のとおり，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おいて生じる誤差はすべてのノード間距離に伝搬するため，ノードの正確な位置を推定することは難しい．しかし，周辺ノードとの相対的な位置関係を把握できるため，実位置と比較して周辺ノード群が一致しており，*DoD* が低くなったと考

© 2011 Information Processing Society of Japan

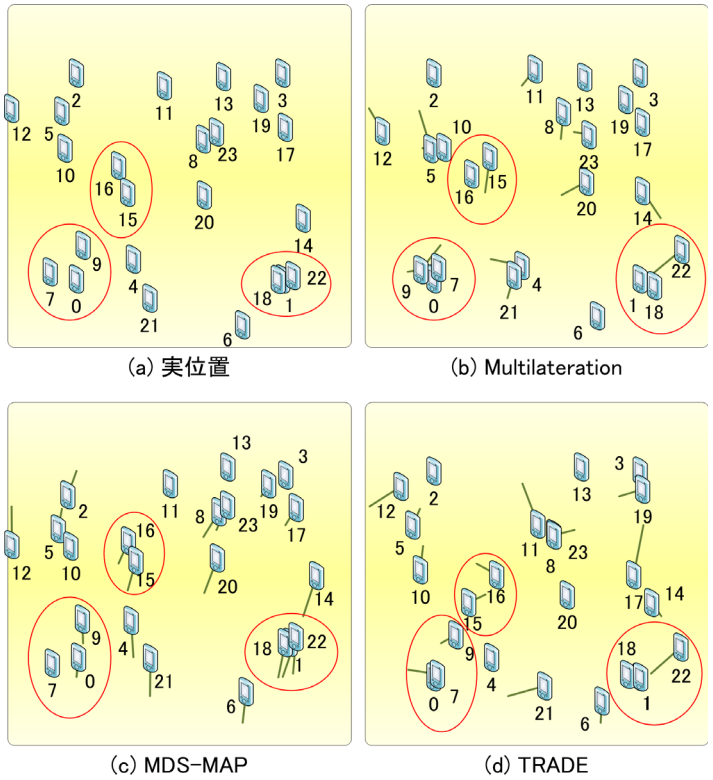


図 9　各アルゴリズムの位置推定結果
Fig. 9　Estimation results by different localization algorithms.

えられる．一方で，多辺測量ではノード数の増加にともない *DoD* の値が増加した．ノード間の位置関係を考慮しない多辺測量では，ノード数の増加にともないノード密度が増加した結果，入れ替わりの対象となるノード数が増加したため，*DoD* が増加したものと考えられる．

次に，ノード数が 20 の場合における各位置推定アルゴリズムの同時刻の位置推定結果および実位置を**図 9** に，それらの絶対位置誤差および相対位置誤差を**表 2** に示す．特に赤線で囲まれたノードに対して注目すると，実位置のノードの相対的な位置関係を最も維持した形で位置を推定した位置推定アルゴリズムが MDS-MAP であることが分かる．一方で，絶

表 2　各アルゴリズムの位置誤差
Table 2　Position errors of localization algorithms.

	Multilateratoin	MDS-MAP	TRADE
Absolute Position Error (per R)	0.168	0.188	**0.154**
Degree of Discrepancy	0.331	**0.127**	0.246

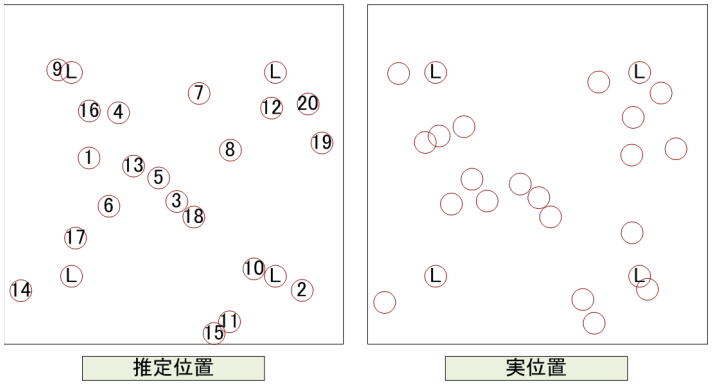


図 10　アンケート
Fig. 10　Questionnaire.

対位置誤差の数値は MDS-MAP が最大であることから，従来の絶対位置誤差による評価とは異なり，提案する *DoD* では人間の直感に沿った位置推定アルゴリズムの評価ができていることを示している．

6. 実証実験

人間の直感によるノード参照誤りの発生と *DoD* との関連性を調査するため，アンケートによる評価を行った．実験では**図 10** に示すような，推定位置と実位置を並べたアンケート用紙を複数作成した．推定位置にはノードの識別番号（ノード ID）が記載されており，実位置には記載されていない．被験者は推定位置に記載されたノード ID を基に，実位置の各ノードに対して ID を割り当てる．ランドマークの実位置はあらかじめ与えるものとした．各位置推定結果に対して，ノード参照誤りが何カ所発生しているかの割合（誤答率）と *DoD* との関連性を調査した．アンケートは 11 人の被験者，および *DoD* の値が異なる 21 個の推定位置に対して実施し，合計 231 データを収集した．得られた 231 データを誤答率を基に

© 2011 Information Processing Society of Japan

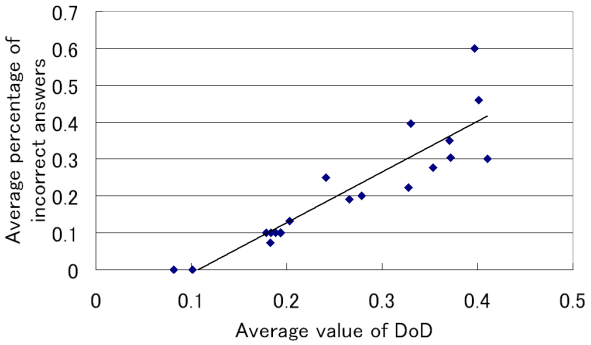


図 11　アンケート結果
Fig. 11　Questionnaire result.

昇順に並べ変え，11 データごとに誤答率および *DoD* の平均値を算出した．**図 11** に，11 データごとの平均誤答率に対する *DoD* の平均値およびそれらの近似直線を示す．

実験の結果，誤答率の増加にともない *DoD* も増加することが確認できた．特に誤答率が低い場合，*DoD* は誤答率の増加に対して線形に増加することが判明した．一方，*DoD* が 0.4 程度の場合は誤答率に大きなばらつきが発生することが判明した．この理由は *DoD* が大きくなると，ほとんどのノードで推定位置に入れ替わりが生じており，推定結果からノード ID を特定することが難しくなるためであると考えられる．

7. 応 用 分 野

近年，大事故や災害時の救急救命において，トリアージと呼ばれる救急救命方式が導入されつつある．トリアージとは，傷病者の脈拍や自発呼吸の状況（バイタルサイン）から重症度・緊急度を 4 段階（赤，黄，緑，黒）で判断し，傷病者の治療および病院への搬送の優先度を決定する手法であり，医療資源や医療従事者が限られた環境下でできる限り多くの人命を救助することを目的としている．トリアージの救命率向上を目指すため，多数の傷病者のバイタルサインをリアルタイムで一括監視し，現場での救命活動を支援する電子トリアージシステムの研究開発が実施されている[20]．電子トリアージシステムの概要を**図 12** に示す．このシステムではアドホックネットワーク構築機能を有するセンサ端末を装着した傷病者のバイタルサインを，アドホックネットワークにより現場に臨時で設置された災害対策本部のサーバへと集約する．また，医療従事者は専用端末を保持し，傷病者情報を把握する．

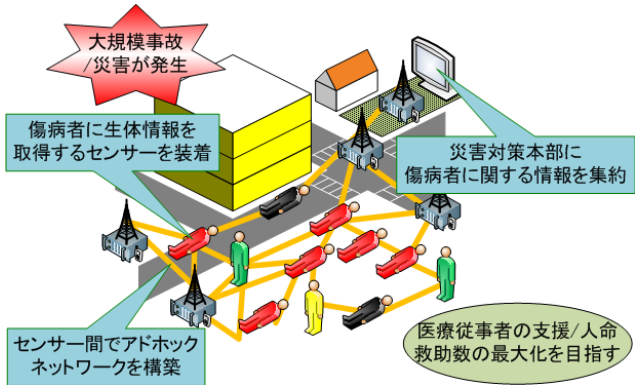


図 12　電子トリアージシステムの概要
Fig. 12　Overview of electronic triage system.

同時に，端末間アドホック無線通信情報を用いて傷病者や医療従事者の位置を推定し，現場全体の傷病者と医療従事者の位置関係を災害対策本部で一元表示して把握する機能の実現を目指している．

このようなシステムにおいて，傷病者のバイタルサイン情報を基に，優先して治療・搬送すべき傷病者を目視で特定する場合，位置推定アルゴリズムとしては相対的な位置関係を正しく実現し，周辺に存在する他の傷病者の中から対象となる傷病者を迅速に特定できることが望ましい．提案指標を用いることで，俯瞰する視点で端末に表示された位置推定結果を閲覧する医療従事者や災害対策本部の管理者が，ある特定の端末（傷病者）を参照する際の誤りの少なさを評価できる．

他にも，RFID による物品の位置管理システム[21] など，端末の取り違えを防止できることが望ましいアプリケーションへの応用も考えられる．

8. ま と め

本論文では，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した．提案手法では，ノード間の位置関係の正しさを周辺のノードの一致度と定義し，実際のノード位置におけるノード間距離と方向が満たす関係が推定位置においてどの程度満たされていないかをドロネー三角形分割に基づき定義し，それが人間の直感に比較的近いことの説明を与えた．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

© 2011 Information Processing Society of Japan

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，他ノード間の相対的な位置関係を考慮しない多辺測量では相対位置誤差が大きく，一方で相対的な位置関係を考慮しているMDS-MAPでは相対位置誤差が小さいことが分かった．これらより，従来の評価値である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異なることが判明した．また，アンケートの実施結果より，提案指標による相対位置誤差の評価と人間の直感に基づくノードの参照誤りには関連性があることが判明した．

今後の課題として，提案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を検証するため，様々な環境を想定した実証実験を行うことがあげられる．また，提案指標の特性を数学的に解析することも重要であると考えている．

参 考 文 献

1) 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).
2) van Sinderen, M., van Halteren, 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).
3) Chow, C., Mokbel, M. and Liu, X.: A peer-to-peer spatial cloaking algorithm for anonymous location-based service, *Proc. 14th Annual ACM International Symposium on Advances in Geographic Information Systems*, pp.171–178 (2006).
4) Matsakis, P. and Wendling, L.: A new way to represent the relative position between areal objects, *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol.21, No.7, pp.634–643 (1999).
5) Niculescu, D. and Nath, B.: DV based positioning in ad hoc networks, *Telecommunication Systems*, Vol.22, No.1, pp.267–280 (2003).
6) He, T., Huang, C., Blum, B., Stankovic, J. and Abdelzaher, T.: Range-free localization schemes for large scale sensor networks, *Proc. 9th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*, pp.81–95 (2003).
7) Hu, L. and Evans, D.: Localization for mobile sensor networks, *Proc. 10th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*, pp.45–57 (2004).
8) Shang, Y., Ruml, W., Zhang, Y. and Fromherz, M.: Localization from connectivity in sensor networks, *IEEE Trans. Parallel and Distributed Systems*, Vol.15, No.11, pp.961–974 (2004).
9) Cabero, J., De la Torre, F., Sanchez, A. and Arizaga, I.: Indoor people tracking based on dynamic weighted multidimensional scaling, *Proc. 10th ACM Symposium on Modeling, Analysis, and Simulation of Wireless and Mobile Systems*, pp.328–335 (2007).
10) Fujii, S., Uchiyama, A., Umedu, T., Yamaguchi, H. and Higashino, T.: An offline algorithm to estimate trajectories of mobile nodes using ad-hoc communication, *Proc. 6th Annual IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications*, pp.117–124 (2008).
11) Fujii, S., Nomura, T., Umedu, T., Yamaguchi, H. and Higashino, T.: Real-time trajectory estimation in mobile ad hoc networks, *Proc. 12th ACM International Conference on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems*, pp.163–172 (2009).
12) Turk, M. and Pentland, A.: Face recognition using eigenfaces, *Proc. IEEE Conferencce on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp.586–591 (1991).
13) Demirci, M., Platel, B., Shokoufandeh, A., Florack, L. and Dickinson, S.: The representation and matching of images using top points, *Journal of Mathematical Imaging and Vision*, Vol.35, No.2, pp.103–116 (2009).
14) Kanters, F., Platel, B., Florack, L. and Romeny, B.: Content based image retrieval using multiscale top points, *Proc. 4th International Conference on Scale Space Methods in Computer Vision*, pp.33–43 (2003).
15) Platel, B., Kanters, F., Florack, L. and Balmachnova, E.: Using multiscale top points in image matching, *Proc. 11th International Conference on Image Processing*, pp.389–392 (2004).
16) Parziale, G. and Niel, A.: A fingerprint matching using minutiae triangulation, Lecture Notes in Computer Science, Vol.3072, pp.1–50 (2004).
17) Bebis, G., Deaconu, T. and Georgiopoulos, M.: Fingerprint identification using Delaunay triangulation, *Proc. IEEE International Conference on Intelligence, Information and Systems*, pp.452–459 (1999).
18) Lee, D. and Schachter, B.: Two algorithms for constructing a Delaunay triangulation, *International Journal of Parallel Programming*, Vol.9, No.3, pp.219–242 (1980).
19) Bunke, H.: On a relation between graph edit distance and maximum common subgraph, *Pattern Recognition Letters*, Vol.18, No.8, pp.689–694 (1997).
20) 木山　昇，楠田純子，藤井彩恵，内山　彰，廣森聡仁，梅津高朗，中村嘉隆，大出靖将，田中　裕，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，情報処理学会論文誌，Vol.51, No.9, pp.1916–1929 (2010).
21) NTTアドバンステクノロジ株式会社：双方向通信方式のアクティブ型RFIDシステム『NIREタイプ3』（オンライン），入手先〈http://www.ntt-at.co.jp/page.jsp?id=1793&content_id=268〉（参照 2010-10-15）．

(平成22年 4 月 9 日受付)
(平成22年10月 4 日採録)

© 2011 Information Processing Society of Japan



木山　　昇（正会員）

平成 22 年大阪大学大学院情報科学研究科情報ネットワーク学専攻博士前期課程修了．在学中はアドホックネットワークに関する研究に従事．現在，株式会社日立製作所に勤務．



内山　　彰（正会員）

平成 15 年大阪大学基礎工学部情報科学科退学後，同大学大学院情報科学研究科博士前期課程進学．平成 20 年同大学院情報科学研究科博士後期課程修了．同年イリノイ大学客員研究員．平成 21 年より大阪大学大学院情報科学研究科特任助教．博士（情報科学）．位置推定法や無線ネットワークプロトコルに関する研究に従事．IEEE 会員．



山口　弘純（正会員）

平成 6 年大阪大学基礎工学部情報工学科卒業．平成 10 年同大学大学院基礎工学研究科博士後期課程修了．同年オタワ大学客員研究員．平成 11 年大阪大学大学院基礎工学研究科助手．平成 14 年同大学院情報科学研究科助手．平成 19 年より同大学院情報科学研究科准教授．博士（工学）．分散システムや通信プロトコルの設計および実装に関する研究に従事．IEEE，電子情報通信学会各会員．



東野　輝夫（フェロー）

昭和 54 年大阪大学基礎工学部情報工学科卒業．昭和 59 年同大学大学院基礎工学研究科博士後期課程修了．同年同大学助手．現在，同大学大学院情報科学研究科教授．平成 19 年 10 月より，独立行政法人科学技術振興機構，CREST，研究代表者．博士（工学）．分散システム，通信プロトコル，モバイルコンピューティング等の研究に従事．電子情報通信学会，ACM 各会員．IEEE Senior Member，本会フェロー．

© 2011 Information Processing Society of Japan