

統計的近似とばねモデルを用いた アドホックネットワークにおける端末位置決定手法

佐藤 雅幸[†] 松尾 啓志[†]

アドホック環境においてはサービス向上や通信の効率化のために位置情報が重要な情報となる。位置情報が GPS により取得できない場合、絶対位置を取得可能な端末から位置情報を取得し、位置を推定する必要がある。従来の位置推定手法では、推定精度が悪く、また、トラフィックを増大させる点や分散処理に向かない点で問題がある。本稿では、端末間距離を適切に近似し、端末の相互の接続関係から適切な位置を統計的に推定する近似手法を提案する。さらに、ばねモデルである KK モデルを適用することにより端末位置を推定し、位置推定精度の向上を可能にする。提案手法は、遠方ホップの情報転送を抑えた簡易的な通信で利用可能であり、かつ、従来に比べ、40%程度位置推定誤差を低減させることを確認した。

A Positioning System Using Statistical Approximation and Adapted Spring Model for Mobile Ad-Hoc Networks

MASAYUKI SATO[†] and HIROSHI MATSUO[†]

The location information is important for terminals in ad-hoc networks. Usually the location information makes service quality better and the communication of terminals effective. Location information is received by GPS. But in the case in which terminals can not receive the GPS location, it is necessary to estimate the terminal location alone. Conventional positioning systems are low accuracy and has some problems of increasing traffic and not fitting distributed processing. The proposed system has improved the location estimation accuracy and solves the communication problems by using statistical approximation and adapting spring embedder model, called KK-model. Finally we have confirmed that the proposal system reduces the location estimation error by about 40% with simulations.

1. 序 論

アドホックネットワークは事前に配備されたインフラに依存せず、端末の直接的な通信のマルチホップにより通信を確立する通信モデルとして研究されている。アドホックネットワークは、自律分散型のネットワークを形成し、短期的に構成トポロジが変化するネットワーク体系を持つ。アドホックネットワークの活躍の場として、簡易的に構築するのが求められるイベント会場、建設工事現場、砂漠、災害現場などで利用することが考えられている。災害現場では、救援支援の指揮系統確立や連携活動のための情報交換、情報の共有などに利用可能であると期待されている。また、同等な通信機器を持つセンシングデバイスをアドホックネットワークにより自動動作させ、必要な情報をモニ

タリングするという、センサネットワークへの利用にも期待されている。

アドホックネットワークは無線端末の位置情報を利用することで従来では考えられなかった質の高いサービスが期待できる。また、位置情報は新たなサービスを期待させるだけでなく、アドホックネットワークの経路制御にも利用可能である。位置情報により冗長なパケットの転送を減らし、通信の効率化が可能となる。無線端末の位置を推定し取得する手法としては GPS (Global Positioning System) が主流である。一方で、GPS の装備にかかる経済的なコストを削減する点、あるいは、GPS のカバーできない領域を補完する目的で、一部の GPS 装備端末から必要な情報を収集し、相対的な位置関係を求めることにより、GPS を装備しない端末の位置を推定する研究が行われている^{4),5),7)-13)}。本稿では、センサネットワークのように、事前に無線端末の最大通信可能距離が把握可能で、かつ同等な通信機器によりネットワークが形成される状況を想定し、

[†] 名古屋工業大学大学院工学研究科
Graduate School of Engineering, Nagoya Institute of
Technology

各無線端末位置を高精度に推定する方式を提案する。さらに提案手法は、GPS 設置端末を削減した場合でも有効であることを示す。

本稿では、1 章に序論を述べ、2 章に位置推定における関連研究を述べる。3 章では、電波特性を利用しない位置推定となる提案手法を述べる。4 章では、提案手法を計算機シミュレーションにより実験、評価を行う。5 章で結論を述べ、本稿を締めくくる。

2. 関連研究

無線通信を利用した位置推定手法は、電波特性を利用した手法と電波特性を利用しない手法がそれぞれ数多く提案されている。電波特性を利用した手法として、電波強度、電波伝搬時間や指向性アンテナを用いて得た電波の受信角度を利用することが考えられている。RADAR¹⁾、Active Badges²⁾ は基地局から受信した電波の強度により端末位置を推定する手法である。しかし、事前の綿密なインフラの敷設が必要となる。SpotON³⁾ は無線電波を発信するタグを装着したタグの発する電波の強度からタグ間の距離を推定する手法である。電波強度の測定による位置推定は、電波のマルチパスの影響が避けられない。また、無線電波を受発信するタグの事前の配備が必要となる。

電波の到達時間差を利用する手法として、TOA 方式⁴⁾ や TDOA 方式が提案されている。電波の到達時間は発信と受信の端末において時刻同期を必要とする。電波の角度差を利用する AOA 方式⁵⁾ は、指向性アンテナの精度に位置推定の精度は依存する。Cricket⁶⁾ は無線電波と超音波を用い、電波と超音波の到達時間差により距離を測定し、位置を推定する手法である。時刻同期は必要なくなるが、Cricket では正確な電波の発信機器を要する。なお、電波強度を用いた位置推定手法として GPS free positioning⁷⁾ や APIT 手法⁸⁾ が提案されている。GPS free positioning では電波の誤差として通信半径の 5% を標準偏差とする正規分布に基づく誤差を仮定している。APIT では GPS 位置を取得可能な端末を 30 程度配置した条件を仮定し、事前のインフラ構築を要する。DV-distance⁹⁾ は電波強度を利用した手法であるが、位置誤差が非常に大きい。

電波特性を利用した位置推定手法では、事前のインフラの敷設と位置推定のための高価な無線電波送受信デバイスを要する。したがって、アドホックネットワークのような短期的で安価な構築を目的としたネットワークにおいては電波特性を利用した位置推定は適合しない。一方、電波特性を利用しない手法は主に

GPS 設置端末の GPS 位置とホップ数という粒度の粗い情報のもとに位置推定を行う。Centroid 手法¹⁰⁾ は、GPS 設置端末から得られる GPS 位置の平均座標位置を推定位置とする。GPS 設置端末が偏った配置となった場合、誤差が非常に大きくなる。DV-hop¹⁰⁾ はすべての GPS 設置端末間に対して無線電波 1 ホップあたりの平均距離を算出する。1 ホップあたりの平均距離とランドマークからの到達ホップ数から GPS 設置端末との距離を計算する。DV-hop 手法は平均距離を利用するため、簡易的に構築可能な手法であるが、非常に誤差が大きい。

Gomashio 手法¹¹⁾ は GPS 設置端末から広告された最短ホップ数と通信半径から最大通信可能距離を求める。GPS 設置端末を中心として、最大通信可能距離を半径とする円を描く。複数の円から得られる重複部分の矩形の重心を推定点とする。遠方に存在する GPS 設置端末からの単一の情報しか得られない場合、GPS 位置がそのまま推定位置となる。得られる位置情報の数がきわめて少ない場合、推定精度は悪く、また、遠方から得られる位置情報は値が失われるため、方式に改良の余地がある。

SOM を用いた推定手法¹²⁾ は競合学習により位置推定を行う。各端末は周囲の端末と推定位置の情報を交換しつつ、推定トポロジを実際のネットワークトポロジへと近づける。1 度の学習で 1 度の情報交換が必要となり、数百の学習を仮定する同手法では膨大なトラフィックを発生させる。多次元尺度法 MDS を用いた手法¹³⁾ は、対象間の距離を入力とし、2 次元空間に座標を表示する手法である。距離は非類似性とも呼ばれ、似ているほど近く、似ていないほど遠い値を示す。MDS は端末間距離の類似性を表現することでデータの構造を可視的に解釈する。MDS を用いる手法では、全端末間の接続関係を収集し、コーディネータによる計算を要する。自律分散処理を前提とするアドホックネットワークにおいて、コーディネータを要することは望ましくない。また、遠方ホップの情報を要するため、トポロジの変化に弱い。

3. 統計近似と KK モデルを適応した位置推定

3.1 通信モデル

本研究で想定するアドホックネットワークの無線端末について前提条件を示す。端末は、既存のプロトコルにおけるパケット転送により、双方向通信可能であるとする。各端末の通信は混信の影響を受けず、複数の端末との同時通信を許容する。無線端末を正方形を全域とする領域にランダムに配置し、任意の無線端末

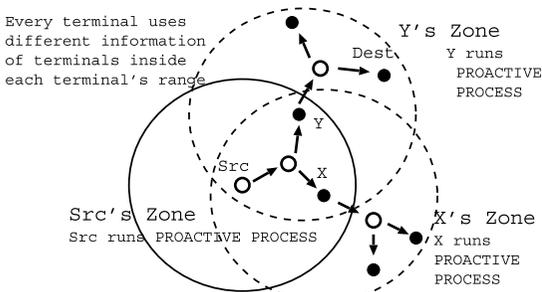


図1 ZRPに類似した通信モデル

Fig.1 Communication model similar with ZRP.

が自身もしくは任意の無線端末位置を推定することを考える。本稿では、GPS設置端末のように自身の存在位置を取得可能な端末、あるいはAP (Access Point) をランドマークと呼び、ランドマークの位置情報を位置推定に利用する。

アドホックネットワークにおける位置推定では、遠方ホップへの情報転送を禁止し、位置推定に要するコントロールパケットが増加するのを抑制する必要がある。許容する転送ホップ数が増大するほど、同一パケットの重複受信が発生する。したがって、電波特性非利用型の位置推定手法は近隣 ρ ホップまでの情報転送で利用可能である必要がある。一方で、情報の転送ホップ数を限定すると、任意の無線端末の位置を推定したい場合に、獲得する情報が不十分となる場合がある。すなわち、目的の端末が ρ ホップを越えた位置に存在する場合は、位置推定が可能ではない。推定の対象となる端末が ρ ホップを越えた位置に存在する場合は必要に応じて情報を獲得するようにする。

近隣の端末に対してのみに情報転送を限定する通信と、必要な場合に、遠方の端末に対して情報転送を行う通信を統合した通信モデルは、ZRP型¹⁴⁾の通信モデルが適合する。すなわち、近隣の無線端末から推定に必要な情報を適当な間隔で獲得するプロアクティブな通信処理と、必要に応じて遠方の無線端末に向けてコントロールパケットを転送するリアクティブな通信処理をあわせた処理が可能となる。図1に通信処理の様子を示す。各端末は自身を中心に近隣2ホップまでの情報を取得し、後述の手法により、自身を中心に近隣2ホップの端末すべてについて位置推定を行っている。送信元端末 (Src) が目的端末 (Dest) の位置推定を必要である場合に、 ρ ホップ目をボーダとして、ボーダキャストにより、目的端末の位置を推定可能となった端末から目的端末の推定位置情報を得る。

3.2 プロアクティブ位置推定処理

プロアクティブ処理では近隣 ρ ホップでつながれ

表1 プロアクティブ処理
Table 1 Proactive process.

1. サブセットからの情報収集 (3.2.1)
2. 端末間距離の計算 (3.2.2)(3.2.3)
3. サブセット端末の推定候補位置の決定 (3.2.4)
4. 全候補位置を結ぶグラフに対してばねエネルギー計算 (3.2.5)
5. 推定位置保存 (3.2.6)

た端末の位置を端末ごとに独立に推定し、各々の推定端末が ρ ホップでつながれた端末すべての推定位置を保持する。プロアクティブ処理は適当な更新間隔で実行され、最新の位置推定結果を保持する。各端末は自身の存在位置を推定するだけでなく、近隣に存在する他の端末位置も同時に、かつ独自に推定する。本稿では、 ρ の値を2に設定する。各端末において自身を中心とする2ホップ以内に存在する端末の集合をサブセットと定義し、サブセットに含まれる端末を推定対象とする。プロアクティブ処理の流れを表1に示す。提案するプロアクティブ処理において、情報の収集から位置推定、推定結果の保存までを1回の処理サイクルとする。

3.2.1 情報収集

自身を中心として近隣2ホップ以内に存在するサブセットに含まれる端末をプロアクティブ処理で取り扱う範囲とする。ホップ転送の数はパケットに *TTL* を設定することで制御可能である。*TTL* = 2と設定した Proactive Process Request (PPREQ) メッセージを送信する。PPREQを受信した端末は(自身の端末ID, 隣接する端末ID)の情報を記述した Proactive Process Reply (PPREP) メッセージを送信元端末に返信する。ランドマークがPPREQを取得した場合、そのランドマークの絶対位置情報を記述する。各推定端末は、サブセットに含まれる端末からの情報を収集し、接続関係を抽出する。サブセットに含まれる端末において2端末間のすべての組合せに対する最短ホップ数が取得可能となる。プロアクティブ処理では、サブセットに含まれる端末を頂点とし、1あるいは2ホップでつながれた端末どうしの接続リンクを辺とし、サブセットに含まれる端末をグラフとして扱う。

3.2.2 統計的手法を用いた1ホップ間の近似距離計算

1ホップで接続した端末どうしの端末間距離を近似することを考える。1ホップでつながれた端末と他の端末で構成される3つの端末が *CYCLE* を形成する確率に注目し端末間距離を近似する。*CYCLE* 形成とは3つの端末どうしが1ホップで相互接続可能な関係と定義する。図2のように、1ホップでつながれた

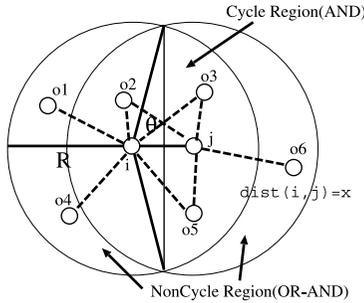


図 2 1 ホップ近隣端末間距離と CYCLE 領域比率

Fig.2 The distance between 1hop neighbors and the cycle region proportion.

端末 i, j が存在するとする．このとき i, j と第三の端末が *CYCLE* になる領域とは i, j を中心とする 2 円の重複領域 (AND) で表される．*CYCLE* にならない領域は i, j を中心とする 2 円の領域和から重複部分を引いた領域 (OR-AND) で表される．図 2 では o_2, o_3, o_5 が *CYCLE* を形成し, o_1, o_4, o_6 は *CYCLE* を形成しない．

CYCLE になる確率を, i, j 端末と 1 ホップでつながれている端末が i, j と *CYCLE* を形成する確率と定義する．図 2 のように端末 i と j が 1 ホップで接続されている場合に 1 ホップ間距離を *CYCLE* を形成する確率を利用して求めることを考える．1 ホップでつながれた i と j の端末間距離を x とする． i と接続している第 3 の端末が j と *CYCLE* になるときの理論的な確率 α_{ideal} は, 式 (1), 式 (2) を用い, *CYCLE* を形成する面積比から求められる．

$$\alpha_{ideal} = f(x) = \frac{2\theta}{\pi} - \frac{x \sin \theta}{\pi R} \tag{1}$$

$$\theta = \arg \left(\text{ArcCos} \frac{x}{2R} \right) \tag{2}$$

端末間距離が 0 すなわち, 2 端末がまったく同位置に存在する場合, 式 (1), 式 (2) に $x = 0$ を代入することにより, 理論確率 $\alpha_{ideal} = 1$ が得られる． i, j と接続する端末は必ず i, j と *CYCLE* を形成する．端末間距離が R , すなわち, 2 端末が最大通信可能距離で接続する場合, $x = R$ を代入することにより, 理論確率 $\alpha_{ideal} = 0.39$ が得られる．このとき, i, j と接続する端末は *CYCLE* を形成する確率が 0.39 であることを示す．関数 $f(x)$ は値域が 1 から 0.39 までの単調減少関数となる．*CYCLE* を形成する確率は, 3.2.1 項で得られた端末の接続関係を観測することで得る．1 ホップでつながれた端末 i, j について, i と 1 ホップで接続する別の端末 o が i, j と *CYCLE* を形成する端末数を $C_{(i,j)}$ とし, i と 1 ホップで接続する端末の

総数を N_i とするならば, *CYCLE* を形成する確率値 $\alpha_{observation}$ を式 (3) から統計的に求めることが可能となる．観測から得られた *CYCLE* を形成する確率値を式 (4) のように f の逆関数に入力し, 端末間距離が得られる．

$$\alpha_{observation} = \frac{C_{(i,j)} + C_{(j,i)}}{N_i + N_j} \tag{3}$$

$$x = f^{-1}(\alpha_{observation}) \tag{4}$$

3.2.3 三角不等式を用いた 2 ホップ間の近似距離計算

3 端末で構成される三角形の辺の関係では, 三角不等式の関係がつねに成り立つ．つまり, 三角形の辺において, どの 2 辺の長さの和も他の 1 辺の長さ以上になる．2 辺の和が他の 1 辺の大きさと等しい場合は, それら 3 頂点が一直線上に並ぶときである．アドホックネットワークにおいて, 2 ホップの端末間距離は中継端末により作られる 2 辺の和と関係する．

2 ホップでつながれた端末 i, j において i, j を中継する中継端末の集合を IN とすれば, i, j と IN に含まれる中継端末 k は 3 端末をそれぞれ結ぶ 3 辺で構成される三角形が描かれる．三角不等式の関係を利用して, 2 ホップの端末間距離は中継端末の 1 ホップ間距離の和の最小値として式 (5) のように近似する．ランダムに端末を配置した場合, 2 ホップ間の中継端末数が多いほど, 近似値が真値に近づく．

$$dist_{(i,j)} = \min(dist_{(i,IN_k)} + dist_{(IN_k,j)}) \tag{5}$$

3.2.4 推定候補位置の決定

3.2.1 項で得られたランドマークの位置情報と, 3.2.2 項と 3.2.3 項で得られた近似端末間距離を利用して推定候補位置を決定する．サブセットに含まれる各端末がランドマークと 1 ホップ, あるいは 2 ホップで接続している場合, ランドマーク絶対位置を中心として近似端末間距離を半径とした円を描く．対象となるランドマークが複数ある場合, 1 ホップで接続するランドマークを優先する．2 円の交点を推定候補点とし, 推定候補点の片方を推定点として決定する方法は 3.2.5 項に示す．2 円が重ならず, 交点ができない場合, ランドマーク間の中心位置を推定点として一意に決定する．サブセットに含まれる各端末において, 1 ホップあるいは 2 ホップで接続するランドマークが 2 以上存在しない場合, その時点では候補位置は決定されない．しかし, 推定結果の位置を新たなランドマーク位置として取り扱うことで, 位置推定を再帰的に行うことが可能となる．再帰的な位置推定を「推定の伝播」と呼び, 3.2.5 項に示す．

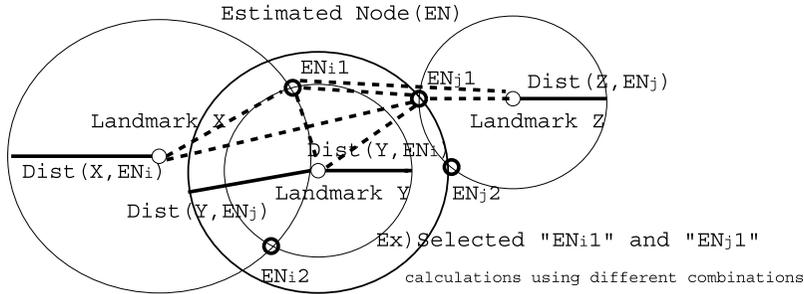


図3 選択した推定候補点におけるばねエネルギーの計算
Fig. 3 Spring energy calculation of selected estimated points.

3.2.5 ばねエネルギー計算

サブセット末端に対して、推定候補点が定まり、各推定候補点の片方を推定点として選択する。各推定位置とランドマークを頂点として、1 ホップあるいは2 ホップで接続した末端間の通信リンクを辺とすると、推定候補位置にある末端やランドマークは無向グラフとなる。位置を推定する末端が n 個の場合、推定候補位置がたかだか2点存在するため、形成しうる無向グラフは 2^n 以下の組合せを持つ。

3.2.2, 3.2.3 項により辺の長さが近似できる。すなわち、1 ホップあるいは2 ホップでつながれたすべての頂点間の頂点間距離が得られている。したがって、推定候補点を頂点として、辺が与えられたグラフにおいて、KK モデル¹⁵⁾と同様に、各辺をばねと見なし、ばねのエネルギーを計算することが可能となる。サブセット S 内の任意の2末端 i, j において、3.2.2, 3.2.3 項により得られた末端間の統計的近似距離が理想的な末端間距離であるとすると、この近似距離をばねモデルにおけるグラフの各頂点間の理想的なばね自然長距離 $length(i, j)$ と見なすことができる。次に、サブセット S の全頂点に対して、3.2.4 項で決定された推定候補位置の片方を選択し、最大 2^n 通りの無向グラフを形成する。各無向グラフにおける任意の2頂点 i, j の頂点間距離を $dist(i, j)$ とする。すべての無向グラフに対して、式(6)が示す系全体ばねエネルギーの計算を行い、最小の系全体ばねエネルギーを持つ無向グラフの各頂点位置を各末端における推定位置と決定する。また、 $k_{(i,j)}$ はばね定数を示し、頂点間のホップ数の違いにより重みとして設定可能となる定数である。本稿では、1 ホップ間と2 ホップ間の末端間距離に対してばね定数 $k_{(i,j)}$ による重み付けを行った。1 ホップ間の末端どうしのばね定数 $k_{(i,j)}$ は1を設定し、2 ホップ間の場合は経験的に0.2を設定した。3 ホップ以上の辺に関しては0を設定し、3 ホップ以上遠方の末端の影響を無視した。式(6)を最小化することは、

形成された無向グラフの各頂点どうしの距離が、すべての推定された2頂点間の距離と比べて、最も差異の小さい接続関係になることを示す。

$$E = \sum_{(i \in S)} \sum_{(j \in S)} \frac{1}{2} k_{(i,j)} (dist_{(i,j)} - length_{(i,j)})^2 \quad (6)$$

図3は、4パターンの無向グラフのうちの EN_{i1}, EN_{j1} を選択した無向グラフを示す。 $S = \{X, Y, Z, EN_{i1}, EN_{j1}\}$ として、図3における $dist(u, v)$ は、頂点 $u \in S$ と頂点 $v \in S$ のユークリッド距離で求められる。図3における各末端間ばね自然長 $length(u \in S, v \in S)$ は、無向グラフの形によらず等しく、3.2.2, 3.2.3 項で求められる統計的近似距離で与えられる。式(6)より、 EN_{i1}, EN_{j1} を選択した無向グラフについて系全体ばねエネルギーを計算する。このようにはねエネルギーの計算を行うことにより、すべての末端において隣接2ホップまでの末端との位置関係を考慮した位置推定が可能となる。同計算を別の推定候補点を頂点とするすべての無向グラフについて行う。最小のばねエネルギーを持つ組合せを各推定末端における推定点と決定する。系全体ばねエネルギーが最小となることは、グラフの各辺において、ばね自然長との差が小さいことを表す。これにより決定される推定位置は全推定位置候補の組合せの中で最もすべての末端の接続関係に合うよう出力される。以上の操作により、近隣2ホップをサブセットとするサブセット末端において接続関係に適合した位置の推定が可能となる。推定可能となった末端位置を新たにランドマーク位置とすることで、推定の伝播が可能になる。推定候補位置決定処理とばねエネルギー計算による推定点決定処理を収束するまで、再帰的に実行する。

3.2.6 推定位置の保存

最小のばねエネルギーを示した推定候補位置を、各サブセット末端における推定点とし、推定位置を更新、

表 2 リアクティブ処理
Table 2 Reactive process.

1. RPREQ 送信
2. RPREQ 受信
3. 収集した推定位置情報から最適な推定位置の選択

保存する．最小ばねエネルギー値も同時に保存する．

3.3 リアクティブ位置推定処理

近隣 2 ホップで接続されていない端末を目的端末として位置推定を行う場合，自身の処理するプロアクティブ処理では，目的端末をカバーできない．そこで，プロアクティブ処理におけるサブセット以外の端末に対して位置推定要求を送信する必要がある．オンデマンドに推定位置を要求する処理をリアクティブ処理と定義する．各端末は目的端末を探し，位置情報を得るため，アドホックネットワークに属する端末すべてに Reactive Process Request メッセージ (RPREQ) をフラッディング転送する．要求された端末 ID における位置情報を推定テーブルに持つ端末は RPREQ に対して Reactive Process Reply メッセージを返信する．返信する情報の内容は，RPREQ を受信した端末がプロアクティブ処理により位置推定を行ったときの系全体ばねエネルギーと目的端末の推定位置とする．リアクティブ処理の概要を表 2 に示す．

リアクティブ処理における経路制御は基本的に，他のアドホックルーティングを参照する．しかし，リアクティブ処理では目的端末の位置を知る端末が発見されたら，それ以後の packets 転送を停止するメカニズムを付加することにより，冗長な packets 転送は削減可能となる．すべての端末から目的端末の推定位置情報を得る場合，複数の推定位置から適切な推定位置を選択することが可能となる．リアクティブ処理により複数の端末から推定位置が得られる場合，いずれがより推定精度が良いかを決定することはできない．ここで，KK モデルにおける系全体ばねエネルギーが小さいほど，各辺においてばね自然長との差が小さいことを示すことから，本稿では，プロアクティブ処理で保持する系全体ばねエネルギーの小さい推定位置を優先し，最小のばねエネルギーを持つ推定位置を最終的な推定位置と選択した．リアクティブ処理において，トラヒックと推定位置精度はトレードオフの関係にある．

プロアクティブ処理では，定期的に近隣端末の位置推定を行い，リアクティブ処理では，必要に応じて推定位置の取得を行う．本手法により，パケットの転送範囲を必要最小限に抑え，通信モデルを考慮した，効率の良い位置推定が可能となる．

表 3 端末間距離が既知の場合 (5%の誤差)
Table 3 Knowing distance with 5% error.

パラメータ	値
全域	1x1
通信半径	0.10 (通信半径の 5%の誤差)
総端末数	150
1hop 間距離	正規分布誤差 (標準偏差は半径の 5%)
2hop 間距離	三角不等式を利用した近似
ランドマーク数	40%
配置	ランダム配置
測定端末数	300 (配置を変えて測定)
端末移動	なし (snapshot)
ばね係数 k	1 (1hop 接続), 0.2 (2hop 接続)
比較対象	候補点の中心座標を推定点と決定する 候補点の片方をランダムに推定点と決定する

4. シミュレーションによる性能評価

4.1 ばねモデルの有用性評価

ばねモデルを利用した位置推定により，推定精度が向上することを示すために，まず，1 ホップ間の距離が正確に得られる状況で位置推定の実験を行った．1 ホップの端末どうしにおける端末間距離が正規分布の誤差をとめない，取得可能であると仮定する．計算機シミュレーション上で，提案した位置推定手法の実験を行った．シミュレータは VisualBasic .NET により，独自に実装した．測定環境を表 3 に示す．ただし，1 ホップ間の端末間距離が既知の状態では，ばねモデルを適応した位置推定の性能を評価するために，ランドマーク数を多く，通信半径を小さく設定した．すなわち，ランドマーク数が多い場合，1 ホップでランドマークと接続する推定端末の割合が増加する．また，通信半径が小さい場合，2 ホップの端末間の接続情報が削減される．ここでは，全端末がランドマークの位置情報を 1 ホップで収集可能な値として，ランドマーク数を全端末のうちの 40%と設定した．各端末はそれぞれを始点ノードとして，サブセットに含まれる端末に対して必要な情報を収集する．1 ホップの端末間距離は通信半径の 5%を標準偏差とした正規分布に基づく誤差を仮定した．各端末はプロアクティブ処理によりサブセットに含まれる端末すべての位置を推定する．したがって，近隣 2 ホップの端末では，同端末の推定位置を保持する可能性がある．実験では，リアクティブ処理を考慮し，同端末に対する推定位置をすべて獲得するものとする．プロアクティブ処理とリアクティブ処理により得られたすべての推定結果のうち，最小のばねエネルギーを持つ推定位置を推定位置とした．推定位置と実際の配置位置の差を位置誤差とし，位置誤差の出現頻度を測定した．

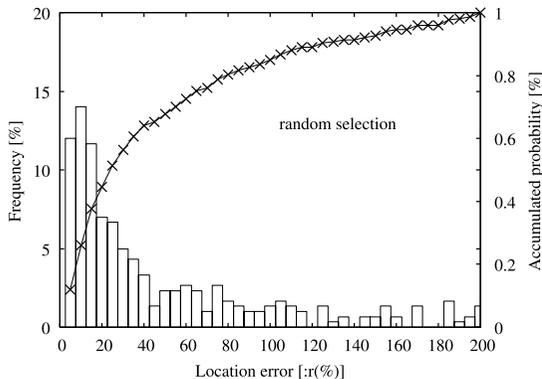


図 4 位置誤差と出現頻度 (ランダム選択)

Fig. 4 Location error and frequency (selected randomly).

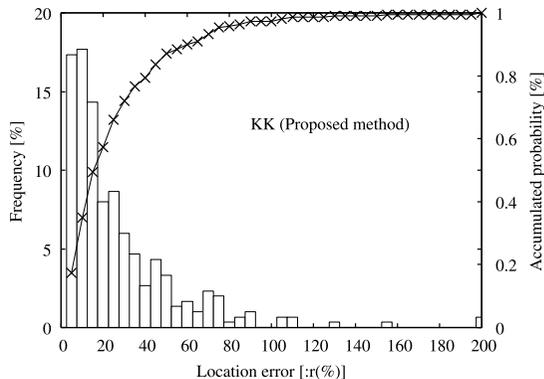


図 6 位置誤差と出現頻度 (KK モデルを用いた提案手法)

Fig. 6 Location error and frequency (using KK-model) proposed method.

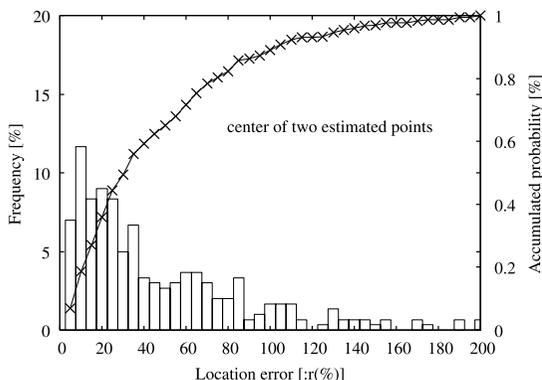


図 5 位置誤差と出現頻度 (中点)

Fig. 5 Location error and frequency (center of two estimated points).

比較対象には、プロアクティブ処理において、推定候補位置をランダムに決めたものを推定位置とした場合と、推定候補位置の中点位置を推定位置とした場合を与えた。

推定候補位置の片方をランダムに選択した位置推定結果を図 4 に、推定候補点の中点を推定点に決定した位置推定結果を図 5 に、ばねモデルを適応した提案手法の位置推定の結果を図 6 に示す。横軸に位置誤差をとり、縦軸第 1 軸に出現頻度、第 2 軸に累積確率をとる。図 5 より、中点を推定点にする場合、50% 付近の位置誤差が増大していることが分かる。推定位置が位置誤差の小さい候補位置と位置誤差の大きい候補位置の中点に決定されているためである。図 4 では、40% 程度から誤差が一様に分布しており、位置誤差が大きくなってしまふ可能性があることが確認できる。一方で、ばねモデルを適応した提案手法の場合、位置誤差の少ない割合が大きいことが図 6 より確認できる。

表 4 1 ホップ間距離の統計的近似に関する実験

Table 4 Experiment for statistical approximation of 1hop distance.

パラメータ	値
全域	1x1
通信半径 r	0.250
総端末数	100
1hop 端末間距離	CYCLE 確率による近似 (提案手法) 0.5r 近似 (従来手法)
配置	ランダム配置
測定端末対	300
端末移動	なし (snapshot)

4.2 1 ホップ間距離の近似性能の評価

本手法における 1 ホップ端末間距離の近似性能を計算機シミュレーションにより評価する。通信における通信半径は 0.25 とした。近似距離と実際の端末間距離の誤差を距離誤差とし、距離誤差の出現頻度を測定し、端末間距離を CYCLE 形成確率により統計的に近似する提案手法について測定を行った。1 ホップ間の端末間距離を通信半径の半分となる $0.5r$ に一意に近似する場合と比較した。すなわち、ランダムに端末を配置した場合、距離誤差は一様に分布することになる。表 4 に実験環境を示す。

提案手法による実験結果を図 7 に、通信半径の 2 分の 1 に近似した場合の実験結果を図 8 に示す。横軸は距離誤差を、縦軸は距離誤差の出現頻度を示す。提案手法では、図 7 のように誤差の小さい近似の割合が大きいことが確認できる。図 7 は、統計的にみて、平均 $\mu = -4.27\% (: r)$ 、標準偏差 $SD = 13.74\% (: r)$ の正規分布曲線に乗ることが確認できる。ただし、位置誤差は距離を通信半径で正規化している。端末間距離を通信半径の半分に近似する場合、図 8 のように、標準偏差 $SD = 23.74\% (: r)$ の一様分布に基づく距

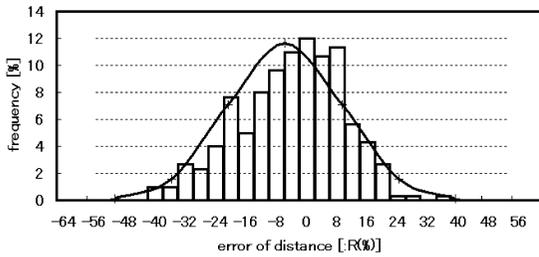


図 7 1 ホップ間距離誤差と出現頻度 (提案手法)

Fig. 7 One hop distance error and frequency (proposed method).

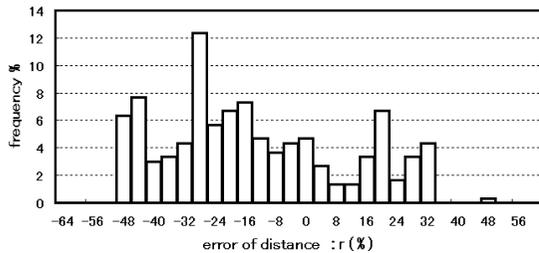


図 8 1 ホップ間距離誤差と出現頻度 (0.5R に近似)

Fig. 8 One hop distance error and frequency (approximation as 0.5R).

表 5 接続次数と 1 ホップ間距離近似誤差の標準偏差

Table 5 Connectivity and standard deviation of error.

接続次数	標準偏差 [r(%)]
4.7	23.59
6.3	20.57
8.3	16.91
12.3	15.84
17.2	14.59

離誤差が発生した。

次に、接続次数を可変とし、距離誤差の標準偏差を測定した結果を表 5 に示す。通信半径を大きくするほど端末密度が密になり、距離誤差の標準偏差が小さくなる。したがって、本稿で提案する位置推定手法は、端末密度が密なほど推定精度が向上する。

4.3 位置推定評価

4.3.1 接続次数と位置誤差の関係

提案する位置推定手法を計算機シミュレーションにより評価する。シミュレーションでは、CYCLE 形成確率を利用し、統計的に端末間距離の近似を行う。また、ばねモデルを適応した位置推定を行う。1 ホップどうしの端末間距離については、3.2.2 項に示した CYCLE を形成する接続関係を観測することで統計的に端末間距離を近似した。位置推定における推定位置は、接続関係に応じたばねエネルギーを計算することで得

表 6 基本パラメータ

Table 6 Basic parameters.

パラメータ	値
全域	1x1
通信半径	0.125, 0.167, 0.200, 0.250, 0.300
通信半径誤差	標準偏差 5%の正規分布に基づく誤差
総端末数	100
ランドマーク数	20%
測定端末数	10 配置分
配置	ランダム配置
比較対象の手法	Centroid, DV-hop, Gomashio
端末移動	なし (snapshot)
ばね係数 k	1 (1hop 接続), 0.2 (2hop 接続)

表 7 実験パラメータ (通信半径可変)

Table 7 Experimental parameters (changing radius).

パラメータ	値
通信半径 r	0.125, 0.167, 0.200, 0.250, 0.300
通信半径誤差	r の 5%の標準偏差
ランドマーク数	20%

表 8 実験パラメータ (ランドマーク数可変)

Table 8 Experimental parameters (changing landmark rate).

パラメータ	値
通信半径 r	0.250
通信半径誤差	r の 5%の標準偏差
ランドマーク数	5%, 10%, 15%, 20%, 25%

表 9 実験パラメータ (電波伝播誤差可変)

Table 9 Experimental parameters (changing radius error).

パラメータ	値
通信半径 r	0.250
通信半径誤差	r の 5%, 10%, 15%, 20%, 25%の標準偏差
ランドマーク数	20%

た。ただし、4.3 節では、通信の効率化を考え、情報収集をサブセット内に限定した。すなわち、4.3 節での位置推定はプロアクティブ処理のみとし、リアクティブ処理は行われぬ。実験における基本パラメータを表 6 に示す。また、通信半径、ランドマーク存在比率 (ランドマーク数/全無線端末数)、電波伝播誤差は実験ごとにそれぞれ、表 7、表 8、表 9 に示す。表 7 における通信半径 r (0.124, 0.167, 0.200, 0.250, 0.300) は、それぞれ、図 9、図 10 における接続次数 (4.7, 6.3, 8.3, 12.3, 17.2) に対応している。推定位置と配置位置の誤差を位置誤差とし、平均や中央値を測定した。比較対象として、従来手法の Centroid, DV-hop, Gomashio を用いた。ただし、Centroid 手法は、ランドマークから 2 ホップ以上で転送される位置情報も用いて位置推定を行っている。また、Gomashio 手法は

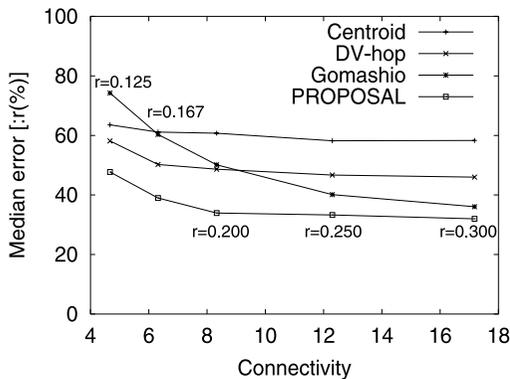


図 9 接続次数と位置誤差中央値

Fig. 9 Connectivity and median error.

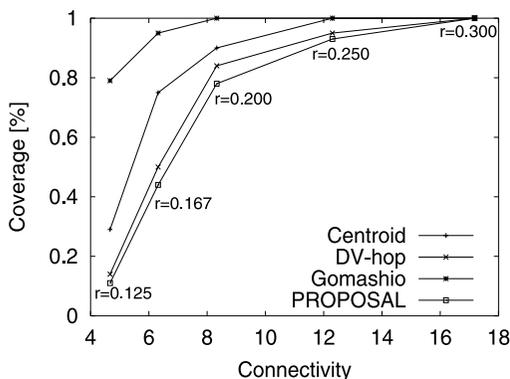


図 10 接続次数と推定カバー率

Fig. 10 Connectivity and coverage.

存在可能性のある面積の矩形部分の重心を推定位置としている。

まず、位置誤差の接続次数による影響を調べる。実験環境を表 7 に示す。位置誤差の中央値、カバー率を測定した結果を図 9、図 10 に示す。

図 9 は横軸に平均接続次数、縦軸に位置誤差の中央値を示す。接続次数が 5 程度の場合、サブセットに含まれるランドマークの数が少ない。そのため、gomashio 手法では、複数のランドマークから情報が得られず、単一のランドマークからしか位置情報が得られない端末が増加する。そのため、位置誤差が大きくなってしまふ。提案手法では、サブセットに含まれる端末数が少なく、端末間距離の近似が正確でない。したがって、接続次数が 5 程度の場合、提案手法による推定では位置誤差が大きくなる。接続次数を増やすほど、位置誤差は低減する。従来手法 Centroid, DV-hop, Goamshio に比べて、提案手法では中央値が大幅に小さいことが確認できる。

図 10 は、位置推定が可能な端末のカバー率と接続次数の関係を示す。カバー率が 1 であれば、すべての

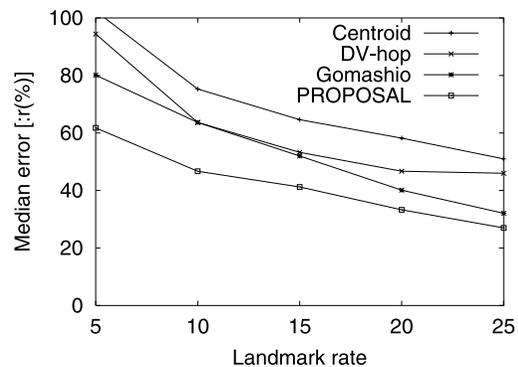


図 11 ランドマーク数と位置誤差中央値

Fig. 11 Landmark number and median error.

端末で位置推定が可能となり、同様に 0 であれば、すべての端末で位置推定が不可能であることを示す。提案手法ではサブセットに含まれるランドマーク数が 3 以上存在しない場合に推定ができず、従来手法に比べてカバー率は低い。一方で、サブセット内における他の端末から位置推定結果を取得するリアクティブ処理により、推定カバー率が向上することが予想される。

4.3.2 ランドマーク数と位置誤差の関係

次に、ランドマーク数が位置誤差に与える影響を評価する。少ないランドマークで位置誤差を小さくできるほど、良い位置推定手法であるといえる。同基本パラメータを用い、実験パラメータを表 8 のように可変とし、実験を行った。位置誤差の中央値を測定した結果を図 11 に示す。

Gomashio はランドマークが増加するほど、存在可能性のある範囲を小さくすることが可能となる。したがって、ランドマークが多い状況では、Gomashio 手法は推定精度が向上している。一方で、得られるランドマークの情報が単一であるようなランドマーク数が少ない場合には、位置誤差が大きい。提案手法では、端末間距離を近似し、位置推定を行う。前述の実験のように平均接続数の多い場合、端末間距離を適切に近似可能である。したがって、近似距離を利用し、ランドマーク数が少ない場合でも位置誤差を低減させることが可能となった。図 12 は、位置推定が可能な端末のカバー率とランドマークの関係を示す。4.3.1 項と同様な理由により、位置推定におけるカバー率は従来手法に比べ低くなる結果となった。

4.3.3 電波伝搬誤差と位置誤差の関係

次に、電波伝搬強度に誤差が含まれる場合の実験を行った。電波伝搬誤差が位置推定に与える影響を評価する。電波伝搬誤差は文献 (13), (16) で示されるように、正規分布に基づく誤差でモデル化し、マルチパス

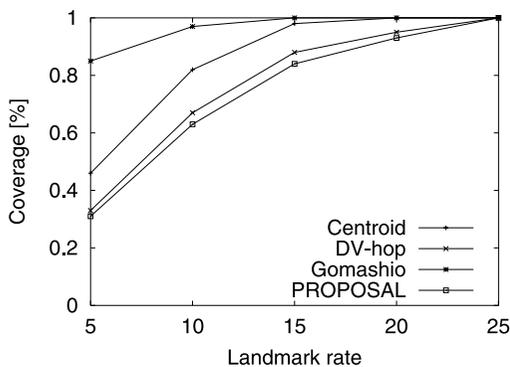


図 12 ランドマーク数と推定カバー率

Fig. 12 Landmark number and coverage.

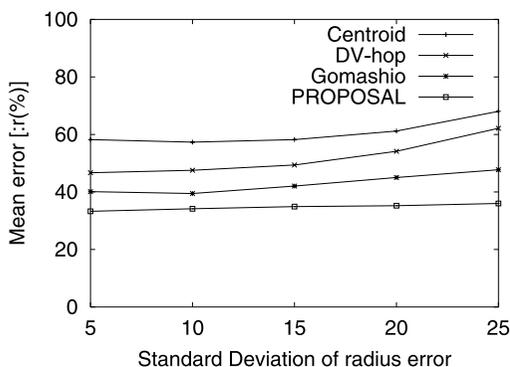


図 13 電波伝搬誤差と位置誤差平均

Fig. 13 Radius error and mean error.

によるフェージングの影響による大幅な電波減衰は考慮しない。最大通信半径に対して、正規分布に基づく減衰誤差が発生すると仮定し、通信半径を変動させる。同基本パラメータを用い、実験パラメータを表 9 に示すように可変とし、実験を行った。位置誤差の平均を測定した結果を図 13 に示す。

従来手法 Centroid, DV-hop, Gomashio と提案手法において、通信半径に誤差が生じる場合、誤差の標準偏差が増加するほど、推定誤差が大きくなる。一方で、どの手法においても、推定誤差の悪化は著しくならず、標準偏差の増大にともない徐々に精度が悪化することが確認された。

5. 結 論

アドホックネットワークにおける従来の位置推定手法は、位置誤差が大きく、また、使用される通信モデルはリアルタイム性を損なうという問題があった。本稿では、位置情報は遠方になるほど、情報価値が損なわれるという考えのもと、情報の収集範囲に制限を持たせた。近隣の 2 ホップを情報収集範囲としたプロア

クティブ処理では、端末間距離の適切な近似処理と、ばねモデルを適応し、接続関係に適合する各端末位置の推定を可能にした。また、プロアクティブ処理の推定結果を利用したオンデマンドなりアクティブ処理により、柔軟性のある位置推定手法となった。提案手法は、ランドマーク数を増やすことによる位置推定精度の改善効果よりも、接続次数を密にすることによる位置推定精度の改善効果のほうが高い結果となった。したがって、提案手法は接続次数が 10 程度まで密であれば、ランドマーク数が全体の 5% という少ない場合にも、従来手法に比べ大きく位置推定誤差を低減させることが可能となった。

今後の課題として、無線端末の移動性を考慮し、移動が発生した場合にも位置推定が可能となることを確認することがあげられる。提案手法は、プロアクティブ処理において、遠方端末からの情報を棄却し、近隣の端末からの情報のみを利用する。そのため、遠方に存在する無線端末から情報が必要となる従来手法に比べ、リアルタイム性を損なわず、移動性にも頑健な手法であることが期待できる。今後、実機を用いた実験を行い、様々なパラメータの検証と精度評価を行う予定である。

また、より様々な環境において精度の高い位置推定を行うために、電波特性を取り入れた位置推定について検討する予定である。

本研究の一部は、文部科学省科学研究費補助金（基盤 C (2) 15500037, 2003-04) の支援を受けた。

参 考 文 献

- 1) Bahl, P. and Padmanabhan, V.N.: RADAR: An In-Building RF-based User Location and Tracking System, *Proc. IEEE INFOCOM 2000*, Vol.2, pp.775-784 (2000).
- 2) Want, R., Hopper, A., Falcao, V. and Gibbons, J.: The Active Badge Location System, *ACM Trans. inf. Syst.*, pp.91-102 (1992).
- 3) Hightower, J., Boriello, G. and Want, R.: SpotON: An indoor 3D Location Sensing Technology Based on RF Signal Strength, University of Washington CSE Report#2000-02-02 (2001).
- 4) Caffery, J. Jr.: A New Approach to the Geometry of TOA Location, *IEEE Vehicular Technology Conference (VTC)*, pp.1943-1949 (2000).
- 5) Niculescu, D. and Nath, B.: Ad Hoc Positioning System (APS) Using AOA, *IEEE INFOCOM '03*, Vol.22, No.1, pp.1734-1743 (2003).
- 6) Priyantha, N.B., Miu, A.K.L., Balakrishnan, H. and Teller, S.: The Cricket Compass for

- Context aware Mobile Applications, *ACMIEEE Mobicom*, pp.1–14 (2001).
- 7) Capkun, S., Hamdi, M. and Hubaux, J.P.: GPS-free positioning in mobile Ad-Hoc networks, *Hawaii International Conference On System Sciences*, HICSS-34, pp.3481–3490 (2001).
 - 8) He, T., Huang, C., Blum, B.M., Stankovic, J.A. and Abdelzaher, T.: Range-Free Localization Schemes for Large Scale Sensor Networks, Technical Report CS-2003-06, University of Virginia, Computer Science Department (2003).
 - 9) Niculescu, D. and Nath, B.: DV-based Positioning in Ad hoc Networks, *Telecommunication Systems*, Vol.22 (1-4), pp.267–280 (2003).
 - 10) Niculescu, D. and Nath, B.: Ad Hoc Positioning System (APS), *Proc. IEEE GLOBECOM*, pp.2926–2931 (2001).
 - 11) 岩谷晶子, 西尾信彦, 村瀬正名, 徳田英幸: ごましお: アドホックセンサネットワークにおけるノード位置決定方式, 情報処理学会モバイルコンピューティングとワイヤレス通信研究会 Vol.2001 (108), pp.22–30 (2001).
 - 12) 保坂幸治, 呉屋 健, 梅原大祐, 川合 誠: SOM アルゴリズムを用いたネットワークポロジの再現, 電気通信学会電子・情報・システム部門誌, Vol.122-C, No.2, pp.208–216 (2002).
 - 13) Shang, Y., Rumi, 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).
 - 14) Haas, Z.J. and Pearlman, M.R.: The Zone Routing Protocol (ZRP) for ad hoc networks, *IETF Mobile Ad-hoc Network (MANET) Working Group* (1998).
 - 15) Kamada, T. and Kawai, S.: An Algorithm for Drawing General undirected Graphs, *Information processing Letters*, Vol.31, No.1, pp.7–15 (1989).
 - 16) Beutel, J.: Geolocation in a PicoRadio Environment, MS thesis, ETH Zurich, Electronics Lab (1999).

(平成 17 年 3 月 30 日受付)

(平成 17 年 10 月 11 日採録)



佐藤 雅幸 (正会員)

1980 年生 . 2003 年名古屋工業大学電気情報工学科卒業 . 2005 年同大学院工学研究科情報工学専攻修士課程修了 . 同年日本電気 (株) 入社 .



松尾 啓志 (正会員)

1983 年名古屋工業大学情報工学科卒業 . 1985 年同大学院修士課程修了 . 1986 年同大学院博士後期課程入学 . 1989 年同修了 . 同年同大学助手 . 講師, 助教授を経て, 2003 年同大学教授, 現在に至る . 分散システム, 分散協調処理に関する研究に従事 .