

推薦論文

存在確率分布の伝播を用いた自己位置推定手法

春 本 要^{†1} 藤原 謙太郎^{†2,*1} 寺 西 裕 一^{†2,†3}
秋 山 豊 和^{†4} 竹 内 亨^{†3} 西尾 章治郎^{†2}

利用者の位置を利用する情報サービスでは、利用者の位置座標を把握したい場合（座標推定）や、利用者がある特定の領域にいるかどうかを判定したい場合（領域判定）がある。しかし、無線基地局の位置情報などを利用した位置推定法において、座標推定および領域判定の双方を精度良く実現する方法は存在しない。特に、基地局の密度が疎な環境における推定精度の向上が課題となる。そこで本論文では、受信したアンカノードの座標と受信信号強度を隣接するモバイルノードに伝播させることにより、隣接モバイルノードの存在確率分布も考慮した自ノードの存在確率分布を求めることによる位置推定手法を提案する。シミュレーション実験により、提案手法は従来手法と比較しアンカノード数が少ない場合で約3倍から5倍、アンカノード数が多い場合でも約3倍の座標推定精度が得られることを示す。また、領域判定においては従来手法より優れた性能が得られることを示す。

A Self-localization Method Using Propagation of Existence Probability Distribution

KANAME HARUMOTO,^{†1} KENTARO FUJIWARA,^{†2,*1}
YUICHI TERANISHI,^{†2,†3} TOYOKAZU AKIYAMA,^{†4}
SUSUMU TAKEUCHI^{†3} and SHOJIRO NISHIO^{†2}

In location-aware information services, the coordinates of users should be estimated, but we often need to judge whether a user is in a specified area or not (area-judgment). However, existing methods which utilizes locations of wireless access points cannot deal with coordinate-estimation and area-judgment simultaneously with high accuracy. In particular, improvement of the estimation accuracy in sparse access point environment is required. In this paper, we propose a self-localization method using propagation of geographical existence probability distribution based on RSSI (Received Signal Strength Indication). In the proposed method, each mobile node propagates information on neighbor-

ing anchor nodes to its neighboring mobile nodes, and estimates its existence probability distribution by using not only information on neighboring anchor nodes but also information propagated from the neighboring mobile nodes. By simulation experiments, we show that the proposed method can improve average location error by 3 to 5 times in sparse access point environment and by 3 times even in dense access point environment. Further, we show that it can improve area-judgment performance compared to the existing methods.

1. はじめに

近年、位置情報を取得可能なGPSレシーバの小型化、低価格化にともない、GPSによる位置取得が可能な携帯端末やスマートフォンが普及し、位置情報を利用した種々のサービスの提供がさかに行われるようになってきた。しかし、GPSには測位が安定するまでに時間がかかってしまう点や、屋内での測位が不可能である点で問題がある。こうした問題に対処するため、無線通信のためのAP（Access Point；基地局）の位置とRSSI（Received Signal Strength Indication；受信信号強度）を基にノードの位置を推定する方法について、様々な研究開発が行われてきた。

従来のAPの位置とRSSIに基づく位置推定手法の多くは、ノードの位置座標を推定する座標推定を目的としてきた。しかし、ノードの位置を利用するアプリケーションでは、単純にノードの存在する座標を推定するだけでなく、ノードがある領域に存在するかどうかを判定する「領域判定」が必要になる場合がある。たとえば、利用者が自分のいる街、キャンパス、店舗といった領域に紐付けられた情報を得たい場合、利用者が存在する領域を推定できることが重要である。また、ある情報を特定の対象領域に存在する利用者に対して配信した

†1 大阪大学大学院工学研究科

Graduate School of Engineering, Osaka University

†2 大阪大学大学院情報科学研究科

Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University

†3 独立行政法人情報通信研究機構

National Institute of Information and Communications Technology

†4 京都産業大学コンピュータ理工学部

Faculty of Computer Science and Engineering, Kyoto Sangyo University

*1 現在、株式会社NTTデータ

Presently with NTT Data Corporation

本論文の内容は2010年3月のマルチメディア通信と分散処理研究会にて報告され、同研究会主査により情報処理学会論文誌ジャーナルへの掲載が推薦された論文である。

い場合、その対象領域内にいる利用者を特定する必要があるが、特に、災害情報などは対象領域に存在する可能性が少しでもある利用者に配信したいのに対し、店舗のセールス情報などは対象領域に存在する可能性が高い利用者に配信したいなど、利用者が対象領域に存在する確率を考慮することが求められる。

一方、従来手法の多くは、APなどの座標情報を持つノード（以降、アンカノードと呼ぶ）が発信するビーコンのみを用いて位置推定を実現しているが、アンカノードの密度がある程度高くなければ精度の良い位置推定ができないという問題がある。したがって、精度の良い位置推定を可能とするためには多くのアンカノードを配置しなければならない。これを解決するためには、一般にアンカノードの数よりも座標情報を持たないノード（以降、モバイルノードと呼ぶ）の数の多いことを考慮すると、アンカノードだけでなくモバイルノードにビーコンを発信させることが考えられる。しかし、モバイルノードの位置は固定ではないため、その位置をデータベース化したものを位置推定に利用するのは現実的ではない。

そこで本論文では、各モバイルノードが推定位置情報をビーコンパケットに乗せて伝播させることにより、アンカノードの密度がある程度疎であっても精度の良い位置推定を可能にする手法を提案する。提案手法では、各モバイルノードはアンカノードから受信したビーコンパケットをもとに、そのアンカノードの座標情報とRSSIをビーコンパケットに乗せて近隣のモバイルノードに伝播させる。また、各モバイルノードは自身の位置を推定する際、アンカノードから受信したビーコンパケットとそのRSSIだけでなく、モバイルノードから受信したビーコンパケットとそのRSSIも用いて自身の存在確率分布を求める。このように確率分布により位置を推定することにより、座標推定だけでなく領域推定も可能になる。

以下、2章では関連研究について述べ、3章では提案手法の詳細を説明する。また、提案手法のシミュレーション評価結果について4章で述べ、5章にまとめと今後の課題を述べる。

2. 関連研究

無線を用いた位置推定は、センサネットワークにおけるセンサの位置推定や、移動型ロボットの位置推定などの分野で多数の研究があり、それらは主にアンカノードから受信したビーコンを位置推定に利用している。これらの研究は、電波の到着角度（Angle of Arrival; AOA）、複数ビーコンの到着時間差（Time Difference of Arrival; TDOA）、受信信号強度値（RSSI）をアンカノードとモバイルノード間の相対位置の推定に用いるRange-basedアプローチと、ビーコンを受信したかどうかだけを用いるRange-freeアプローチに大別できる。

Range-freeアプローチの例として、APIT¹⁾、ROCRSSI²⁾、ごましお³⁾、Othello⁴⁾などがある。これらはアンカノードの位置情報からモバイルノードの存在可能範囲を求める手法であり、その重心を推定座標とする手法である。存在可能範囲を求めるため領域判定にも応用が可能であるが、その存在可能範囲内のどこに存在するのが尤もらしいかという存在確率の分布は推定できない。また、APITやROCRSSIでは隣接するアンカノード数が少なくとも3個存在しなければ位置推定ができない。ごましおやOthelloではモバイルノードがアンカノードの位置情報を伝播させるため、隣接するアンカノード数が少ない場合でも隣接するモバイルノードから2ホップ以上離れたアンカノードの座標情報を取得でき、位置推定が可能である。しかし、無線の通信半径が固定であるという前提で存在可能範囲を推定するため、無線通信距離が不安定な状況、つまり、前提とする通信半径内に存在するにもかかわらずビーコンが受信できない状況や、前提とする通信半径外に存在するにもかかわらずビーコンを受信してしまう状況での位置推定精度は不明である。

Range-basedアプローチに分類されるAOAを用いる手法⁵⁾やTDOAを用いる手法⁶⁾は、特別なハードウェアが必要であり、一般的な受信デバイスだけでは実現できない。一方で、一般的な受信デバイスで利用できるRSSIを用いた手法が提案されている^{7)–10)}。これらの手法では、受信したビーコンのRSSIから距離を推定し、重み付き平均や最尤推定を用いて推定座標を求める手法である。これらの手法も座標推定のみを目的としているため、領域判定を精度良く実現することは困難である。

これらのいずれのアプローチにおいても、アンカノードの密度が疎な環境においては、端末が位置を推定するための情報を十分に得ることが難しく、精度の良い推定を行うことは困難である。本論文では、特にアンカノードの密度が疎な環境においても精度の良い位置推定を実現することを目的としている。

3. 存在確率分布を用いた位置推定手法

3.1 想定環境

想定する環境には、少数のアンカノードと多数のモバイルノードが存在しており、モバイルノードは徒歩程度の速度で移動する場合もある。具体的には、街中に点在する無線LANのAPがアンカノードとなり、人々が携帯する端末がモバイルノードになるといった例が考えられる。アンカノードおよびモバイルノードはともに無線通信機能を有しており、RSSIを取得することが可能であるとする。アンカノードは、自身の位置情報を含んだパケットを定期的送信する。また、推定において必要な情報を伝播させるモバイルノードを中継ノード

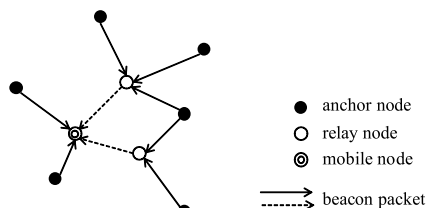


図 1 モバイルノードが受信するビーコンパケット
Fig. 1 Beacon packets received by a mobile node.

ドと呼ぶ．推定のために送受信される位置情報を含んだパケットをビーコンパケットと呼び，アンカノードから送信されるパケットや，中継ノードにより伝播される位置情報を含んだパケットなどがこれに該当する．モバイルノードは，受信したビーコンパケットおよび受信時の RSSI を用いて，特殊なサーバに問い合わせることなく自身で位置推定を行う（図 1）．

3.2 位置推定手法

RSSI を用いた位置推定手法の代表例である最尤法を用いた位置推定手法では，アンカノードからの距離 R を条件とする RSSI 値 P の条件付き確率密度関数 $f(P|R)$ が定義されていることを前提としている．モバイルノードが n 個のアンカノードからビーコンパケットを受信した場合，その発信元のアンカノードの座標が (x_i, y_i) ，RSSI が p_i であったとすると，条件付き確率密度関数の積

$$\prod_{i=1}^n f(p_i | r_i) \quad (r_i = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2})$$

を最小にする座標 (x, y) を求めることによってモバイルノードの位置推定を行う¹⁰⁾．

また，座標推定に重み付き平均を用いる手法では，以下のようにそれぞれのアンカノードの座標に対して，受信した RSSI 値から得られる平均距離 $\hat{r}(P)$ に反比例する重み付き平均で座標を推定する⁸⁾．なお，式中の A, B は適用する環境に応じて定義される定数である．

$$(x, y) = \left(\frac{1}{W} \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{\hat{r}(p_i)}, \frac{1}{W} \sum_{i=1}^n \frac{y_i}{\hat{r}(p_i)} \right) \quad (1)$$

$$W = \sum_{i=1}^n \frac{1}{\hat{r}(p_i)}$$

$$\hat{r}(P) = 10^{\frac{A-P}{B}}$$

これに対し，提案手法では，ビーコンパケットを送信したノード（アンカノードまたはモバイルノード）からの距離 R の分布が，受信したビーコンパケットの RSSI 値 P のもとでの条件付き確率密度関数 $f_R(R|P)$ によって事前に定義されていることを前提とする．この条件付き確率密度関数は，対象とする無線環境に応じて任意の確率密度関数を適用することが可能であり，それは予備実験などを通じて定義できるものとする．たとえば，文献 8) では RSSI 値と実際の距離との関係を予備実験において詳細に測定しているが，その環境では，送信ノードからの平均距離は RSSI 値に依存し，また，受信電波強度が弱くなるにつれて実際の距離の分散が大きくなることが分かる．このような環境では，ビーコンパケットの送信ノードからの平均距離が RSSI 値 P から求められる値 $\hat{r}(P)$ であり，分散が平均距離に比例するような正規分布を持つ以下のような確率密度関数を定義できるものとする．式中の C は定数である．

$$f_R(R|P) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_P} \exp\left(-\frac{(R - \hat{r}(P))^2}{2\sigma_P^2}\right) \quad (2)$$

$$\sigma_P = C \cdot \hat{r}(P)$$

このような条件付き確率密度関数に基づき，提案手法では以下のように位置推定を行う．

- (1) 各アンカノードは，自身の座標情報を含むビーコンパケットを定期的送信する．
- (2) 各モバイルノードは，中継ノードとして，自ノードが受信したすべてのアンカノードの座標情報および受信時の RSSI をビーコンパケットに含めて送信することにより，間接的に自ノードの存在確率分布を伝播させる．なお，必ずしもすべてのモバイルノードが中継ノードとして機能する必要はない．また，この中継ノードによるビーコンパケットに含まれるのは周囲のアンカノード数分の座標情報と RSSI 値のみであり，周囲の中継ノードから受信したビーコンパケットの内容は含まない．したがって 1 つのデータパケットに十分に収まるデータサイズであるため，通信量の増大は問題とならない．
- (3) 各モバイルノードは，ビーコンパケットを受信したアンカノードおよび中継ノードのそれぞれから見た自ノードの存在確率分布を求め，それらの積をとることによって自身の存在確率分布を求める．これにより，存在確率分布において値が最大となる点を推定座標とする．また，領域判定を行う場合は，存在確率分布の積分値を求めることによって，与えられた領域 S 内に存在する確率を求める．

以下では，具体的な手順を説明する．

モバイルノードが n 個のアンカノードからビーコンパケットを受信した場合，その発信

元のアンカノードの座標が (x_i, y_i) , RSSI が p_i ($i = 1, \dots, n$) であったとすると, 各アンカノードから見た自ノードの存在確率分布 $f^i(x, y | p_i)$ は以下のように求められる.

$$f^i(x, y | p_i) = \frac{1}{2\pi r} f_R(r | p_i) \quad (r = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2}) \quad (3)$$

中継ノードによるアンカノード情報の伝播を用いない場合, モバイルノードの存在確率分布 $f_{\text{EPD-NP}}(x, y | p_1, \dots, p_n)$ は以下のように各アンカノードから見た自ノードの存在確率分布の積によって得られる. このようにして得られた存在確率分布を位置推定に利用する手法を EPD-NP 手法と呼ぶ.

$$f_{\text{EPD-NP}}(x, y | p_1, \dots, p_n) = \frac{\prod_{i=1}^n f^i(x, y | p_i)}{\iint \prod_{i=1}^n f^i(x, y | p_i) dx dy} \quad (4)$$

なお, EPD-NP 手法においては, 隣接するアンカノード数が 3 個未満の場合は精度の良い座標を推定することができないため, 座標推定は失敗とする. ただし, 領域判定は隣接アンカノード数が 1 個以上の場合には失敗とせず, 推定された存在確率分布を用いて判定を行うものとする.

次に, 中継ノードによる伝播を用いる場合, 各中継ノードの存在確率分布 $g^j(x, y)$ ($j = 1, \dots, m$) は, 中継ノードからのビーコンパケットに含まれるアンカノードの座標情報 (x_{j_i}, y_{j_i}) および RSSI 値 p_{j_i} ($i = 1, \dots, l$) から, 以下のように導出される.

$$g^j(x, y | p_{j_1}, \dots, p_{j_l}) = \frac{\prod_{i=1}^l f^{j_i}(x, y | p_{j_i})}{\iint \prod_{i=1}^l f^{j_i}(x, y | p_{j_i}) dx dy}$$

この中継ノードからのビーコンパケットを p'_j の RSSI で受信したとき, その中継ノードから見た自ノードの存在確率分布は, 以下のように二次元畳み込み積分で表現される.

$$h^j(x, y | p'_j) = \iint f^i(x, y | p'_j) g^j(x - \alpha, y - \beta) d\alpha d\beta \quad (5)$$

なお, この式では中継ノードからの RSSI がアンカノードからの RSSI と同じ特性を持つ, つまり, 同じ条件付き確率密度関数 $f_R(R | P)$ に従う距離分布を有していると仮定している

が, 無線デバイスの差異などにより異なる距離分布を有しているような環境においては, 中継ノードに対して別の条件付き確率密度関数 $f'_R(R | P)$, および, それに基づく存在確率分布 $f'^i(x, y | p'_j)$ を式 (3) と同様に定義し, $f^i(x, y | p'_j)$ のかわりに用いてもよい.

最終的に, 自ノードの存在確率分布 $f_{\text{EPD-P}}(x, y | p_1, \dots, p_n, p'_1, \dots, p'_m)$ は, ビーコンパケットを受信したアンカノードおよび中継ノードから見た存在確率分布の積により以下のように求める. このようにして得られた存在確率分布を位置推定に用いる手法を EPD-P 手法と呼ぶ.

$$\begin{aligned} f_{\text{EPD-P}}(x, y | p_1, \dots, p_n, p'_1, \dots, p'_m) \\ = \frac{\prod_{i=1}^n f^i(x, y | p_i) \times \prod_{j=1}^m h^j(x, y | p'_j)}{\iint \left(\prod_{i=1}^n f^i(x, y | p_i) \times \prod_{j=1}^m h^j(x, y | p'_j) \right) dx dy} \end{aligned} \quad (6)$$

なお, EPD-NP 手法と同様に, 隣接するアンカノードと中継ノードからのビーコンパケットに含まれる 2 ホップ離れたアンカノードを合わせたユニークなアンカノード数が 3 個未満の場合は, 精度の良い座標を推定することができないため, 推定失敗とするが, 領域判定においては 1 個以上のアンカノードがあれば失敗とせず, 推定された存在確率分布を用いて判定を行うものとする.

このように, 隣接するアンカノードおよび中継ノードからのビーコンパケットの RSSI, および, 中継ノードからのビーコンパケットに含まれるアンカノードの情報から, 受信ノードの存在確率分布を求めることが可能である. また, 座標推定においては, 求められた存在確率分布 $f(x, y)$ において値が最大となる座標 (x, y) を推定座標とする. 領域判定においては, ある領域 S が指定されたとき, S 内に存在する確率は,

$$p(S) = \iint_{(x,y) \in S} f(x, y) dx dy \quad (7)$$

で求めることができる.

3.3 実装方法

前節で述べた手法を実装する際, 地理的に連続な空間における確率分布をそのまま扱うことは困難である. したがって, 実装においては地理的空間を格子状に分割することによって離散化して確率計算を行う. また, 中継ノードから伝播された 2 ホップ先のアンカノードの位置情報も利用して存在確率分布を計算するため, 少なくとも半径が想定される通信限界距

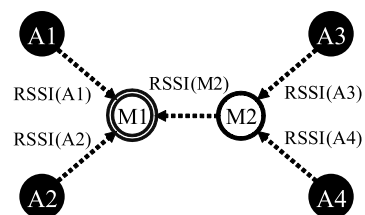


図 2 推定例で用いるノード配置
Fig. 2 A topology used in the example.

離の 2 倍の円が余裕をもって包含される範囲を計算範囲とするべきである。その際、計算範囲の中心は、計算に使用するすべてのアンカノードの座標を包含する MBR (Minimum Bounding Rectangle) の中心とする。離散化の際の格子の大きさは、位置推定精度および計算コストに影響を与える。これらはトレードオフの関係にあるため、適切に設定する必要がある。

格子状に離散化することにより、式 (5) の二次元畳み込み積分は、高速フーリエ変換 (FFT) と逆高速フーリエ変換 (IFFT) を用いることにより単純な掛け算で計算することが可能である。

3.4 推定例

ここでは、図 2 の例を用いて、存在確率分布の推定例を示す。この図において、A1 から A4 はアンカノード、M2 は中継ノードであり、M1 が自身の存在確率分布を推定するものとする。

図 3 は、その計算の様子を図示したものである。まず、M1 は A1 および A2 から受信したビーコンパケットの RSSI 値 $RSSI(A1)$, $RSSI(A2)$ と A1, A2 の座標情報をもとに、それぞれについて式 (3) を用いて存在確率分布 (a1), (a2) を求め、それらの積を求める (a12)。

また、M2 から受信したビーコンパケットに含まれる、M2 が A3 および A4 からビーコンパケットを受信した際の RSSI 値 $RSSI(A3)$, $RSSI(A4)$ と A3, A4 の座標情報から、A3 から見た M2 の存在確率分布 (a3) ならびに A4 から見た M2 の存在確率分布 (a4) を求め、それらの積によって M2 の存在確率分布を求める (a34)。さらに、M2 からビーコンパケットを受信した際の RSSI 値 $RSSI(M2)$ から、式 (3) によって M2 がある点に存在したと仮定した場合の存在確率分布 (x1) を求め、それを M2 の存在確率分布 (a34) と畳み込み積分を行うことにより、M2 から見た M1 の存在確率分布 (m2) が得られる。

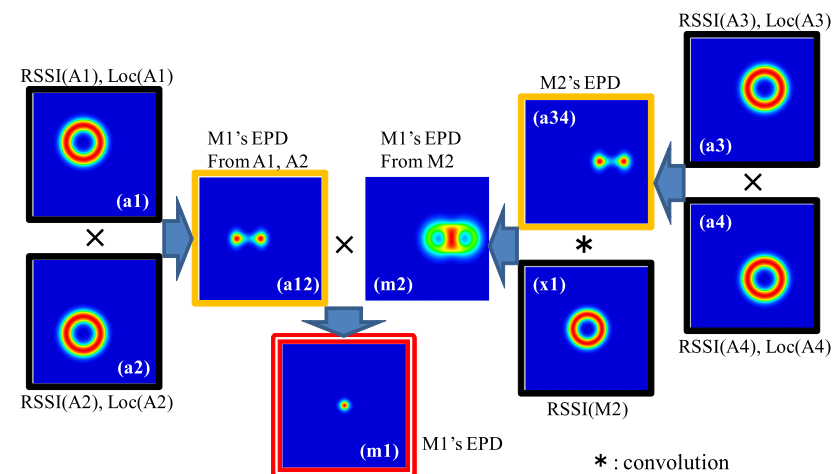


図 3 存在確率分布の計算例

Fig. 3 Existence probability distribution calculation example.

最後に、隣接するアンカノードから得られた存在確率分布 (a12) と、隣接する中継ノードから得られた存在確率分布 (m2) の積をとることによって、M1 の存在確率分布 (m1) が得られる。

この例からも分かるように、提案手法では隣接するアンカノードのビーコンパケットから計算される存在確率分布は、アンカノードの位置が既知であるため、(a1) や (a2) のように一般にドーナツ状になる。一方、中継ノードのビーコンパケットから計算される存在確率分布は、中継ノードの位置そのものが (a34) のように確率的に分布するため、(m2) のように一般に広い分布を持つ存在確率分布となる。このような中継ノードから見た存在確率分布をアンカノードのビーコンパケットのみから計算される存在確率分布に対して補助的に掛け合わせるにより、隣接アンカノード数が少ない場合でも精度の良い位置推定が期待できる。

4. 評価

本章では、提案手法の有効性を確認するために行ったシミュレーション評価結果について述べる。

評価においては、提案手法である EPD-P 手法に対して、3.2 節で述べた EPD-NP 手法、

表 1 シミュレーションパラメータ
Table 1 Simulation parameter settings.

シミュレーション領域	1000×1000 の 2 次元トーラス空間
モバイルノード数	50 .. 300
アンカノード数	40 .. 120
電波到達距離	100 ± 20
距離測定誤差	$N(0, 0.01r^2)$ に従う誤差 (r は実際の距離)
GM 手法における通信半径	120

および、以下の 3 つの手法との比較評価を行った。

- (1) ごましお³⁾ 手法: 座標推定においては、ごましおの手法で求められる存在可能領域の MBR を求め、その中心を推定座標とする。ただし、存在可能領域が存在しない場合は推定失敗とする。また、領域判定においては、存在可能領域のうち、存在可能領域と対象領域が重なる部分の面積の割合を、対象領域内に存在する確率とする。以下、本手法を GM 手法と記す。
- (2) 重み付き平均手法 (伝播なし): 座標推定においては、3.2 節の式 (1) によって求められる座標を推定座標とする。また、領域判定においては、対象領域内に推定座標が含まれる場合に存在確率を 1 とし、含まれない場合に存在確率を 0 とする。以下、本手法を WM-NP 手法と記す。
- (3) 重み付き平均手法 (伝播あり): 提案手法と同様に、中継ノードが隣接するアンカノードの座標情報ならびに RSSI を伝播させる。中継ノードからのビーコンパケットから各中継ノードの推定座標を重み付き平均によって求める。それらの中継ノードをアンカノードと見なし、自ノードに隣接するアンカノードの座標および RSSI を合わせた重み付き平均によって自ノードの座標を推定する。領域判定については WM-NP 手法と同様とする。以下、本手法を WM-P 手法と記す。

シミュレーション実験で用いたパラメータは表 1 のとおりである。本シミュレーション実験では、電波到達距離のばれや測定される RSSI 値のばれが各手法に与える影響の基礎的な評価を目的とする。電波到達距離は実環境においては送受信ノード周囲の電磁ノイズ、無線通信状況、障害物の有無、送信デバイスや受信デバイスの特性などの様々な要因により決定されると考えられるが、本シミュレーション実験においてはそのような状況を到達率の変化によって簡略化して表現する。具体的には、任意の 2 ノード間において距離が 80 までの場合は必ず到達し、距離が 80 から 120 までの場合は到達率が 1.0 から 0.0 まで一様に減少し、距離が 120 以上の場合は届かないという想定をした。また、文献 8) の予備実験の結果

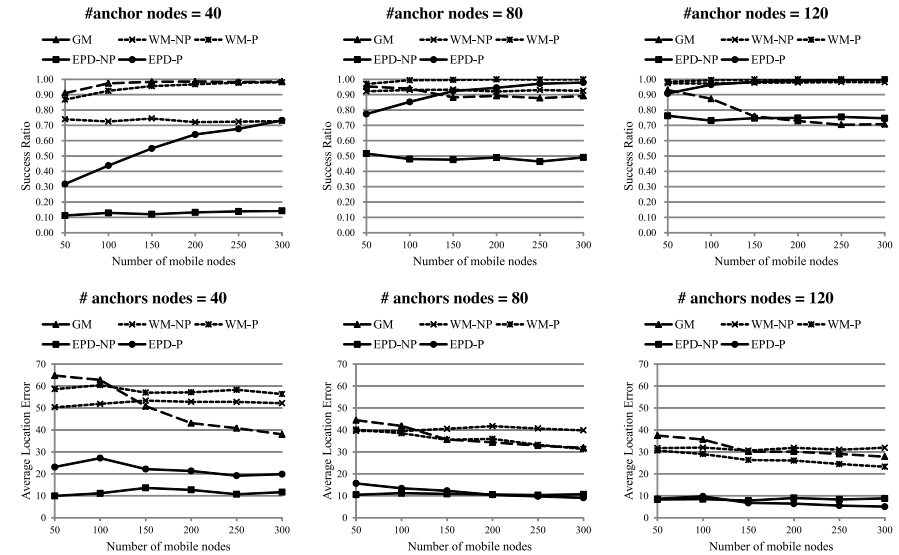


図 4 推定成功率および座標推定誤差

Fig.4 Success ratio and average location error.

のように、RSSI によって測定される平均距離 $\hat{r}(P)$ と実際の距離 r の間には距離 r に依存したばれが発生すると考えられる。本シミュレーション実験においては、 $\hat{r}(P)$ が $0.1r$ の標準偏差 ($0.01r^2$ の分散) を持つ正規分布 $N(0, 0.01r^2)$ で与えられる距離の誤差が含まれるような RSSI が測定されるものとした。

4.1 座標推定の評価

座標推定による評価では、推定座標と実座標との距離である推定誤差、および、推定成功率を指標とし、推定精度の評価を行った。

図 4 は、アンカノード数 40, 80, 120 においてモバイルノード数を 50 から 300 まで変化した場合の平均推定誤差および推定成功率である。アンカノード数が少ない状況では、隣接するアンカノード数が 3 個未満であることが多いため、EPD-NP 手法の推定成功率は低く、アンカノード数が 40 の場合では 0.13 程度、80 の場合でも 0.49 程度となっている。一方、中継ノードによる伝播を用いる EPD-P 手法では、アンカノード数が少ない状況においてもモバイルノード数の増加、つまり中継ノード数の増加にともなって推定成功率は大き

く上昇していくことが分かり、特にアンカノード数が 40 の場合、モバイルノード数の増加にともなって 0.32 から 0.73 まで上昇している。WM-NP 手法はアンカノードが 1 個でも隣接していればよいいため推定成功率は高く、アンカノード数が 40 の場合でも 0.73 となっている。WM-P 手法はモバイルノードを介した 2 ホップ以内に 1 個でもアンカノードが存在すればよいため、さらに推定成功率は高い。GM 手法は中継ノードが多ホップ離れた多くのアンカノードの情報を伝播させるため、隣接するアンカノード数が少ない場合でも多数のアンカノード情報を利用できることから推定成功率は非常に高いが、アンカノード数が 120 の場合ではモバイルノード数の増加にともない推定成功率が 0.93 から 0.71 まで減少している。これは、GM 手法の性質上、最長の電波到達距離（本評価においては 120）を想定した存在可能領域を求めようとするために、電波到達距離が不安定な状況においてはアンカノード数が多くなるにつれてアンカノードからのホップ数によって正確な存在可能範囲が求められず、存在可能範囲が存在しなくなるためである。

一方、推定が成功した場合の平均推定誤差は、EDP-NP 手法や EDP-P 手法が他の手法よりも優れていることが分かる。特にアンカノード数が少ない環境においては、EDP-P 手法は EDP-NP 手法よりも推定誤差が 2 倍程度大きいものの、推定成功率は大きく勝っており、GM 手法、WM-NP 手法、WM-P 手法は推定成功率は高いものの、推定誤差は EDP-P 手法と比較して約 3 倍から 5 倍大きくなることが分かる。アンカノード数が多い環境でも、EDP-P 手法の推定誤差は GM 手法、WM-NP 手法、WM-P 手法よりも約 3 倍改善されている。

4.2 エリアキャストによる評価

提案手法による領域判定の精度を評価するために、エリアキャストを想定した評価を行った。エリアキャストとは、対象領域に存在する確率が、指定された閾値以上であるモバイルノードに対して情報を配信することをいう。この配信先のモバイルノードの選択について、 250×250 の矩形領域を対象領域とし、以下に示される指標によって推定精度の評価を行った。

- 誤配信数 (false positives): 対象領域に存在しないモバイルノードのうち、閾値以上の存在確率があると判定されたモバイルノード数
- 配信漏れ数 (false negatives): 対象領域に存在するモバイルノードのうち、閾値以上の存在確率がないと判定されたモバイルノード数

モバイルノード数が 200 のとき、閾値の変化に対する平均誤配信数と平均配信漏れ数の評価結果を、アンカノード数が 40, 80 の場合について図 5 に示す。なお、WM-NP 手法

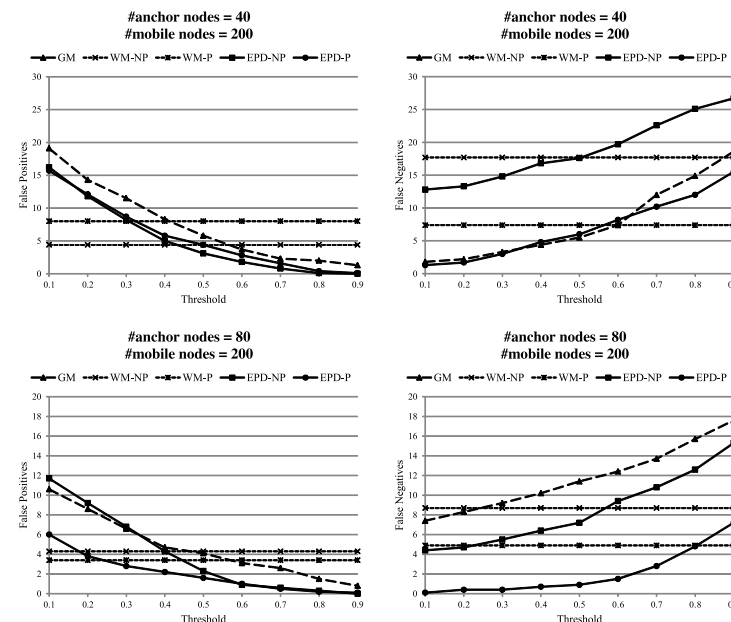


図 5 エリアキャストにおける平均誤配信数と平均配信漏れ数
Fig.5 False positives and false negatives on area-casting.

と WM-P 手法では、存在するかしないかの 2 値で判定されるため、誤配信数や配信漏れ数は閾値によらず一定である。

この結果から、提案する EDP-P 手法は、GM 手法よりも誤配信数が少なく、配信漏れ数を大きく減少させることができていることが分かる。また、誤配信数と配信漏れ数はトレードオフの関係にあるが、誤配信数を少なくしたい場合には閾値を大きく、配信漏れを少なくしたい場合には閾値を小さく設定することにより、閾値によって誤配信数と配信漏れ数のトレードオフをうまく調整しながら、GM 手法よりもよい性能が得られることが分かる。

5. まとめと今後の課題

本論文では、位置情報依存サービスにおけるアプリケーションにおいて要求される、座標推定および領域判定に対し、それらに同時に対応可能な位置推定手法を提案した。提案手法では、RSSI をもとにユーザの存在確率を地理的な確率分布によって表現することで、位置

と領域の推定に対応でき、さらにモバイルノードが中継ノードとして存在確率分布を伝播させることによって、アンカノードが疎な環境においても優れた性能を持つことを示した。

提案手法は、RSSI が与えられたときに式 (2) のような推定距離に関する条件付き確率密度関数を適用することを前提としているため、適用する実環境に対して適切なモデルを与えることが精度を向上させるために重要である。また、4 章のシミュレーション評価においては、ビーコンパケット発信ノードから方位や観測位置によらず、実距離だけに依存した確率で減衰あるいは増幅された RSSI が観測されるという条件での評価であったが、実環境においては障害物や電磁ノイズなどの様々な要因によって、減衰された RSSI が観測されやすい、あるいは増幅された RSSI が観測されやすい方位や観測位置が存在すると考えられる。そのため、シミュレーション評価の環境のようにモデルどおりの振舞いをしないため、実環境における実証実験によって提案手法の適用可能性を調査する必要がある。

また、センサネットワークにおけるセンサノードの座標推定など、ノードが移動しない環境では、多くのビーコンパケットを同じノードから受信できるため、受信した RSSI を平均することによって位置推定精度がより向上すると考えられるが、観測位置によっては特定のノードからのビーコンパケットの RSSI がつねに偏って観測されるような環境も考えられ、その場合には提案方式の位置推定精度が悪化すると考えられる。一方、ノードが移動する環境ではつねに周囲のノードとの距離が変わるため、過去に受信したビーコンパケットの RSSI を利用することができない。そのため、ビーコンパケットを受信したときの環境に依存した位置推定を行わざるをえず、ノードが移動しない場合よりも推定精度が悪くなることが予想される。また、IEEE802.11 のように 100 ミリ秒程度の間隔でビーコンパケットが発信されていれば受信したビーコンパケット間の時間的なずれがあまりないため位置推定精度に大きな影響を与えないが、ビーコンパケットの発信間隔が長い環境では、受信したビーコンパケット間に時間的なずれが生じるため、それらをどのように扱うかも解決すべき課題である。

謝辞 本研究の一部は、総務省委託研究「ユビキタス・プラットフォーム技術の研究開発 (ユビキタスサービスプラットフォーム技術)」による成果である。

参 考 文 献

- 1) He, T., Huang, C., Blum, B.M., Stankovic, J.A. and Abdelzaher, T.: Range-Free Localization Schemes for Large Scale Sensor Networks, *Proc. 9th Annual Int. Conf. on Mobile Computing and Networking (MobiCom 2003)*, pp.81–95 (2003).

- 2) Liu, C., Scott, T., Wu, K. and Hoffman, D.: Range-free sensor localisation with ring overlapping based on comparison of received signal strength indicator, *International Journal of Sensor Networks*, Vol.2, No.5/6, pp.399–413 (2007).
- 3) 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法, 情報処理学会研究報告, Vol.2001, No.108 (2001-MBL-019), pp.23–30 (2001).
- 4) 佐藤雅幸, 若山公威, 松尾啓志, 岩田 彰: アドホックネットワークにおける推定精度を考慮した位置範囲推定法, 情報処理学会研究報告, Vol.2004, No.21 (2003-MBL-028), pp.179–186 (2004).
- 5) Niculescu, D. and Nath, B.: Ad Hoc Positioning System (APS) Using AOA, *Proc. 22nd Annual Joint Conf. of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM 2003)*, Vol.3, 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, *Proc. 7th Annual Int. Conf. on Mobile Computing and Networking (Mobicom 2001)*, pp.1–14 (2000).
- 7) LaMarca, A., Chawathe, Y., Consolvo, S., Hightower, J., Smith, I., Scott, J., Sohn, T., Howard, J., Hughes, J., Potter, F., Tabert, J., Powledge, P., Borriello, G. and Schilit, B.: Place Lab: Device Positioning Using Radio Beacons in the Wild, *Pervasive Computing*, Gellersen, H.W., Want, R. and Schmidt, A. (Eds.), Lecture Notes in Computer Science, Vol.3468, pp.116–133, Springer Berlin / Heidelberg (2005).
- 8) 暦本純一, 塩野崎敦, 末吉隆彦, 味八木崇: PlaceEngine: 実世界集合知に基づく WiFi 位置情報基盤, インターネットコンファレンス 2006, pp.95–104 (2006).
- 9) 伊藤誠悟, 吉田廣志, 河口信夫: 無線 LAN を用いた広域位置情報システム構築に関する検討, 情報処理学会論文誌, Vol.47, No.12, pp.3124–3136 (2006).
- 10) 趙 大鵬, 高島雅弘, 柳原健太郎, 武次潤平, 福井 潔, 福永 茂, 原 晋介, 北山 研一: センサネットワークにおける受信信号強度を用いた最尤位置推定法, 電子情報通信学会技術研究報告 (NS), Vol.104, No.690, pp.409–414 (2005).

(平成 22 年 9 月 4 日受付)

(平成 23 年 2 月 4 日採録)

推 薦 文

本論文では、無線の電波強度を基に求めた端末の存在確率分布を伝播させ、端末の位置座標および存在領域を精度良く推定する手法を提案している。位置情報配信源となる基地局が疎な状況でも位置情報の精度を確保する手法として、存在確率分布の伝搬に着眼した点がユニークであり、高い新規性が認められる。シミュレーションによる精度評価でも、従来手法に比べ明確な優位性が示されており、また、位置座標推定に加えて、提案手法の自然な応

用として領域判定の高精度化が期待されるなど適用範囲も広く、高い有用性が認められる。
以上より本論文は推薦に値する。

(マルチメディア通信と分散処理研究会主査 勝本道哲)



春本 要 (正会員)

平成 4 年大阪大学基礎工学部情報工学科卒業。平成 6 年同大学院基礎工学研究科博士前期課程修了。同年大阪大学大学院工学研究科情報システム工学専攻助手。平成 11 年大阪大学大型計算機センター講師。平成 12 年同大学サイバーメディアセンター講師を経て、平成 16 年同大学大学院工学研究科助教授 (平成 19 年より准教授) となり、現在に至る。博士 (工学) (平成 10 年 2 月, 大阪大学)。データベースシステム, 分散データ管理システム等の研究に従事。電子情報通信学会, IEEE 各会員。



藤原謙太郎

平成 20 年大阪大学工学部電子情報エネルギー工学科卒業。平成 22 年同大学院情報科学研究科博士前期課程修了。同年株式会社 NTT データ入社。現在に至る。



寺西 裕一 (正会員)

平成 5 年大阪大学基礎工学部情報工学科卒業。平成 7 年同大学院基礎工学研究科博士前期課程修了。同年日本電信電話株式会社入社。平成 17 年大阪大学サイバーメディアセンター講師。平成 19 年同大学院情報科学研究科准教授。現在に至る。博士 (工学) (平成 16 年 3 月, 大阪大学)。マルチメディア情報システム, ユビキタス応用システム等の研究に従事。

IEEE 会員。



秋山 豊和 (正会員)

平成 11 年大阪大学大学院工学研究科修士課程修了。平成 12 年同大学院博士後期課程中退後、同大学サイバーメディアセンター助手。平成 17 年 1 月同センター講師。平成 20 年 4 月より京都産業大学コンピュータ理工学部講師。現在に至る。分散システムの研究開発に従事。博士 (工学) (平成 15 年 9 月, 大阪大学)。電子情報通信学会, IEEE CS 各会員。



竹内 亨 (正会員)

平成 13 年大阪大学基礎工学部情報科学科卒業。平成 15 年同大学院基礎工学研究科博士前期課程修了。平成 18 年同大学院情報科学研究科博士後期課程修了。博士 (情報科学)。同年同研究科マルチメディア工学専攻助手。平成 19 年同助教。平成 21 年情報通信研究機構専攻研究員。現在に至る。ソーシャルネットワークやオーバーレイネットワークを活用した応用情報システムの研究開発に従事。



西尾章治郎 (フェロー)

昭和 50 年京都大学工学部数理工学科卒業。昭和 55 年同大学院工学研究科博士後期課程修了。工学博士。京都大学工学部助手。大阪大学基礎工学部および情報処理教育センター助教授。大阪大学大学院工学研究科情報システム工学専攻教授を経て、平成 14 年より大阪大学大学院情報科学研究科マルチメディア工学専攻教授となり、現在に至る。平成 12 年より大阪大学サイバーメディアセンター長。平成 15 年より大阪大学大学院情報科学研究科長。その後平成 19 年より大阪大学理事・副学長に就任。この間、カナダ・ウォータールー大学、ピクトリア大学客員。データベース, マルチメディアシステムの研究に従事。現在, Data & Knowledge Engineering 等の論文誌編集委員。本会理事を歴任。本会論文賞を受賞。電子情報通信学会フェローを含め, ACM, IEEE 等 8 学会の各会員。