

## 存在確率分布の伝播を用いたユーザ位置推定手法

藤原 謙太郎<sup>†1</sup> 寺西 裕一<sup>†1,†4</sup> 秋山 豊和<sup>†2</sup>  
春本 要<sup>†3</sup> 竹内 亨<sup>†4</sup> 西尾 章治郎<sup>†1</sup>

利用者の位置を利用した情報サービスでは、利用者の位置座標を把握（座標推定）したい場合や、利用者がある特定の領域に居るかどうかを判定（領域判定）したい場合がある。しかし、これまで盛んに行われている、無線基地局の位置情報等を利用した位置推定研究において、座標推定及び領域判定の双方を精度良く実現する方法は見当たらない。特に、基地局が疎な環境における推定精度の向上が課題となる。そこで本研究では、無線電波強度に基づく存在確率分布を伝播させ、ユーザの位置推定を行う手法を提案する。提案手法では、座標推定の結果ではなく、存在確率分布を伝播させることで、推定に必要な情報が欠落せず、推定精度の向上を図るとともに、座標推定及び領域判定の双方に対応可能とする。

### A Self-Localization Using Propagation of Existence Probability Distribution

KENTARO FUJIWARA,<sup>†1</sup> YUICHI TERANISHI,<sup>†1,†4</sup>  
TOYOKAZU AKIYAMA,<sup>†2</sup> KANAME HARUMOTO,<sup>†3</sup>  
SUSUMU TAKEUCHI<sup>†4</sup> and SHOJIRO NISHIO<sup>†1</sup>

In the location dependent information services, estimation of the coordinates of users (coordinate-estimation) and judging whether the user is in a particular area or not (area-judgement) are required. However, no existing research based on location of wireless access points can deal with coordinate-estimation and area-judgement simultaneously with high accuracy. In particular, improvement of the estimation accuracy is a problem in the sparse access point environment. Therefore in this research, we propose a self-localization method using propagation of geographical existence probability distribution based on RSSI. Proposed method can improve the accuracy of estimation because the needed information for the estimation will not be lost by using propagation of existence probability distribution instead of the coordinate-estimation result. Moreover, it can deal with coordinate-estimation and area-judgement simultaneously.

### 1. はじめに

近年、位置情報を取得可能な GPS チップの小型化、低価格化にともない、GPS を利用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盛んに行な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、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、無線通信のための基地局 (Access Point, AP) の位置と、電波強度を基に端末の位置を推定する方法について、さまざまな研究開発が行なわれてきた。例えば、一般的なスマートフォンでも利用されるようになってきたアシスト GPS (AGPS) では、携帯電話公衆網の AP の位置と電波強度を基に端末の位置を推定する方法と GPS とが併用されている。また、PlaceLab<sup>1)</sup>、PlaceEngine<sup>2)</sup>、Locky.jp<sup>3)</sup> などでは、集合知に基づき無線 LAN の AP と端末の位置を推定する手法を提案し、実際に運用を行なっている。

従来の無線 AP の位置と電波強度に基づく位置推定手法の多くは、端末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、位置を利用するアプリケーションでは、単純に精度よく端末の位置座標を推定できることだけでなく、利用者がある領域 (エリア) にいるかどうかを判定する「領域判定」が重要になる場合がある。例えば、利用者が自分の居る街、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、自分の居る座標ではなく、利用者があるエリアを取得できることが重要である。また、たとえばある情報を特定の領域に存在する利用者に対して配信する (エリアキャスト) 場合、特定の領域内に居る利用者を特定する必要がある。

推定によって求められた座標情報を用いて領域判定をすることも可能であるが、推定座標以外の情報がないため、高精度の判定を行うことは難しい。

†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 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

†3 大阪大学 大学院工学研究科

Graduate School of Engineering, Osaka University

†4 独立行政法人 情報通信研究機構

National Institute of Information and Communications Technology

また、一部の研究では、端末の存在する領域を推定する手法が提案されている<sup>4)~6)</sup>。これらでは、推定結果として存在する可能性があるかどうかの二値で表現されるため、領域判定の対象となるエリアと、推定されたユーザの存在領域が少しでも重複する部分を持つ場合、対象領域内にユーザが存在すると判断されることになり、領域判定における適合率は低下してしまう。

また、いずれの手法においても、基地局が疎な環境においては、位置を推定するための有効な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難しい。

そこで本研究では、無線電波強度に基づく存在確率分布を伝播させ、ユーザの位置推定を行う手法を提案する。本手法では、地理的な存在確率分布を表現することで、位置座標推定及び領域判定の両立を図る。例えば、最高確率点を選択することで座標の推定が可能であり、ある領域におけるユーザの存在確率を算出することも可能となり、精度良く領域判定を行うことができる。また、推定座標ではなく、存在確率分布を伝播させることにより、基地局が疎な環境にいても推定に必要な情報が欠落せず、推定精度の向上を図ることができる。本稿では、シミュレーション実験により、提案手法の有効性を確認している。

## 2. 従来の端末位置推定手法

従来の無線による位置推定技術は、推定に用いる情報から Range-Free と Range-Based の二つに大別される。Range-Free では、基本的に端末同士の接続情報を利用して推定を行うため、専用の機器を搭載する必要はなく簡易な機器での測定が可能であるが、高い精度での推定を行うことは難しい。一方、Range-Based は、無線電波強度や赤外線などを用いて距離や角度を計算し、それらを基に推定を行うものであり、一般的に高い精度を得ることができる<sup>7),8)</sup>。近年、Range-Based に分類される手法として、無線 LAN のアクセスポイントの位置情報及び、通信時の電波強度を用いて端末の位置を推定する手法に注目が集まっている。

従来の無線 LAN アクセスポイントの位置情報と受信電波強度に基づく推定手法としては、文献 2) の方法が代表的である。文献 2) では、無線 LAN アクセスポイントが定期的に発信するビーコンパケットを端末が受信し、その際に得られるアクセスポイント ID (MAC アドレス) と受信電波強度値 (RSSI) を位置推定に用いている。この方法では、端末の位置推定を行う際には、アクセスポイントの位置データベースを利用し、重み付き平均値推定を計算している。ある端末が周囲に存在するアクセスポイントからのビーコンパケットを受信した結果が  $[(AP_1, RSSI_1), \dots, (AP_n, RSSI_n)]$  であった時 (AP はアクセスポイントの

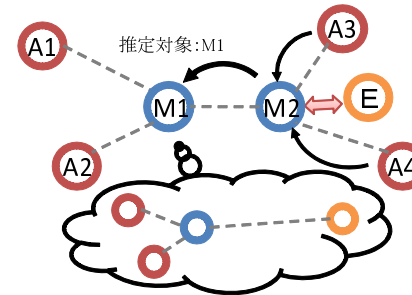


図 1 位置情報伝播における誤差の影響  
 Fig. 1 The influence of error in the propagation of location information.

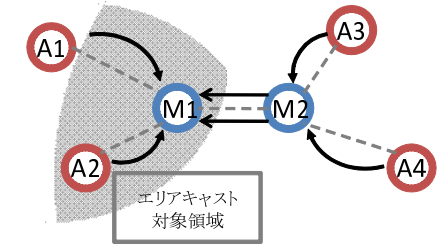


図 2 領域推定の例  
 Fig. 2 An example of area estimation.

ID, RSSI は電波強度), 端末の位置を観測したアクセスポイントの位置から,

$$pos = \frac{1}{W} \sum_{i=1}^n \frac{1}{dist(RSSI_i)} pos(AP_i) \quad (1)$$

$$W = \sum_{i=1}^n \frac{1}{dist(RSSI_i)} \quad (2)$$

として推定される。すなわち、複数のアクセスポイントの中で電波強度が高いものに近い位置座標が推定結果として得られる。そのため、基地局が疎な環境においては、端末が受けるビーコンパケットが少なく、利用可能な情報が少ないため精度の良い推定を行うことは難しい。

端末において利用可能な情報を増やすためには、位置情報を伝播させることが考えられ、図 1 にその例を示す。図 1 では、M1 が推定対象端末となっており、基地局 A1, A2 及び端末 M2 と隣接している。位置情報の伝播を行わない場合には、A1, A2 から受けるビーコンパケットを基に自身の位置推定を行うことになるが、伝播を行う場合は、A3, A4 から推定された M2 の位置情報を新たに受け取ることで、自身の推定に用いることのできる情報を増やすことができる。しかし、基地局が疎な環境では推定された M2 の位置も大きな誤差を含んでおり (図中 E で表現)、位置情報の伝播に際して、誤差の影響が大きく、推定精度向上の大きな妨げとなることが考えられる。

また、ごまお 4) など、端末の存在する領域を推定する研究も行われている。この手法では、自身の位置を把握しているごまノードが自身の位置情報を周囲に送信し、それを受け

取ったしおノードは、その位置情報をさらに隣接するしおノードに転送することで位置情報の伝播を行っている。しおノードは受け取った情報から、各ごまノードの位置とごまノードまでのホップ数を知ることができる。1ホップの距離（通信可能距離）を既知のものとし、存在する可能性のある領域を推定している。推定の結果として領域を表現しているため、ある領域に存在するかどうかを判定するような場合には、座標を推定する手法に比べ精度の向上が期待できる。しかし、ごまノードが疎な環境においては、存在領域を絞り込むことが難しい。図2では、色で塗られた部分が推定された存在領域を示しており、例えばエリアキャストを考えた場合、高い適合率の実現は難しい。

このように、従来の位置推定手法では、位置情報を配信する端末が疎な環境において精度の良い推定を行うことは困難である。また、ユーザの座標推定及び領域判定の双方を精度良く推定する手法は提案されていない。

### 3. 提案手法

本章では、本研究で提案する、アクセスポイントの電波強度を基にした端末の存在確率分布を求め、また、その確率分布を伝播させることで、アクセスポイントが疎な環境においても、端末の位置座標及び存在領域を精度良く推定する手法について述べる。

#### 3.1 想定環境及び用語定義

まず、推定対象となる自身の絶対位置を取得できない端末をモバイルノードと呼び、何らかの手段で自身の絶対位置を把握している端末をアンカーノードと呼ぶ。想定する環境には、少数のアンカー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のアクセスポイントがアンカーノードとなり、街行く人々が持つ携帯端末がモバイルノードになるといった例が考えられる。アンカーノード及びモバイルノードは、共に無線通信機能を有しており、信号受信時の電波強度 (RSSI: Received Signal Strength Indication) を取得することが可能である。アンカーノードは、自身の位置情報を含んだパケットを1秒に数回程度の頻度で、定期的送信する。また、推定において位置情報を伝播させるモバイルノードを中継ノードと呼ぶ。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、アンカー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等がこれに該当する。モバイルノードは、受信したビーコンパケット及び受信時の伝播強度を用いて、自身で位置推定を行う (図3)。

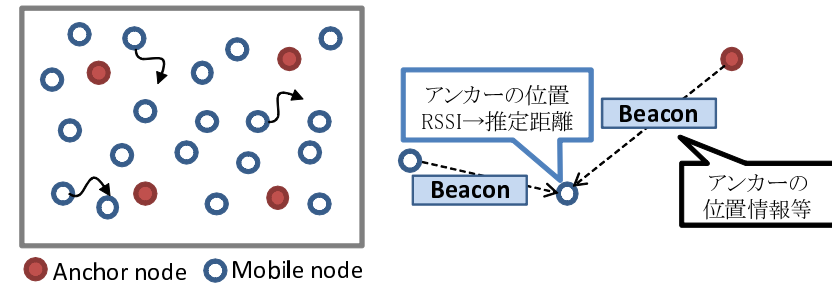


図3 位置推定イメージ  
Fig. 3 An image of localization.

#### 3.2 存在確率分布の推定

提案手法の概要を図4に示す。提案手法では、推定対象となるモバイルノードが取得したビーコンパケットと、受信電波強度を基にそれぞれの存在確率分布を算出する。それぞれの確率分布が独立であれば、それらすべての確率分布を掛け合わせることでモバイルノードの存在確率分布を推定することができる。推定結果として、地理的な存在確率を表現することで、座標の推定及び、領域の推定の両方に精度良く対応することが可能である。例えば、推定された存在確率分布から最高確率点を選択することで座標推定を行うことが可能であり、エリアキャストを行う際には、対象となる領域内に存在する確率が20%以上のユーザに対して情報を配信するといったことが可能となり、エリアキャストにおいて、過不足の少ない情報配信が実現できる。また、図4において、M2からM1への矢印の部分では、存在確率分布の伝播を行っている。位置情報を伝播させる際に、座標情報などではなく存在確率分布を伝播させることで、位置情報の伝播に伴う推定誤差伝播の抑制が期待できる。本提案手法では、受信するビーコンパケットに含まれる位置情報は、座標値や任意の分布など、様々な場合に対応することが可能である。例として、各ノードが図4に示される様に配置され、各アンカーノードから自身の位置座標情報をビーコンパケットに載せて送信される場合について、提案手法を適用した場合の推定の様子を以下で述べる。なお、これ以降で記載する存在確率分布図では、赤色が濃いほど高確率であることを示す。

今回の例では、推定対象端末M1は隣接する2つのアンカーノードA1, A2及びモバイルノードM2からビーコンパケットを受け取る。アンカーノードからビーコンパケットを受け取る場合は、それぞれのアンカーノードの位置座標と電波強度を元に推定を行う。受信さ

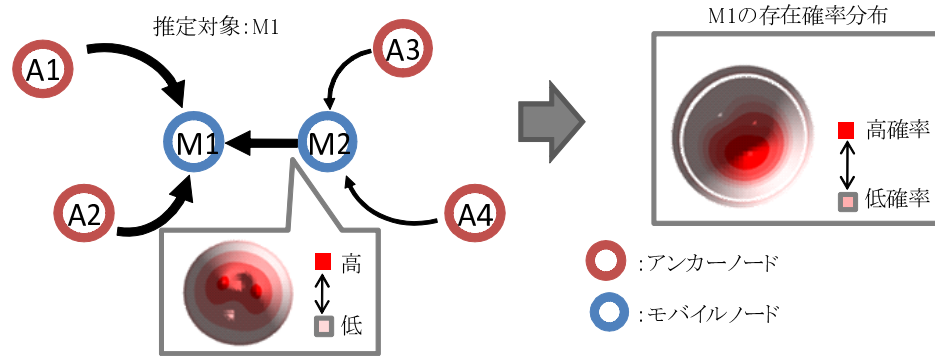


図 4 提案手法の概要

Fig. 4 The outline of proposed method.

れる電波強度と、ノード間の距離には相関性があるため、それを利用することでそれぞれの存在確率分布を推定することができる。例えば、受信電波強度とノード間距離の関係式が与えられる場合には、受信電波強度からノード間距離を算出し、アンカーノードを中心とし、算出された距離を半径とするような円周上から遠ざかるほど確率が低下するような存在確率分布を得ることができる。このようにして、アンカーノード A1, A2 から受けるビーコンパケットにより、図 5 に示すような存在確率分布がそれぞれ算出される。ここで得られた 2 つの存在確率分布は、互いに独立した分布であるため、掛け合わせを行うことにより、A1 及び A2 からの影響を合わせた存在確率分布を算出することができる。この様子を図 6 に示す。

M2 から M1 の部分では確率分布の伝播が行われる。まず、中継ノードとなる M2 の存在確率分布は、先の例と同様にして求めることができる。M1 に対しては、この M2 の存在確率分布が伝播されることとなる。確率分布の伝播は、M2 の存在確率分布と、M1 M2 間の受信電波強度を基にした確率分布を利用し、以下に示される式を用いて 2 次元の畳み込み演算を行うことで表現できる。この様子を図 7 に示す。

$$(f * g)(x, y) = \sum_{\alpha} \sum_{\beta} f(\alpha, \beta)g(x - \alpha, y - \beta) \quad (3)$$

式 3 中の  $f$  および  $g$  はそれぞれ分布関数を表しており、M2 の存在確率分布と M1 M2 間の受信電波強度を基にした確率分布がそれに該当する。実際に計算を行う場合は、細かい

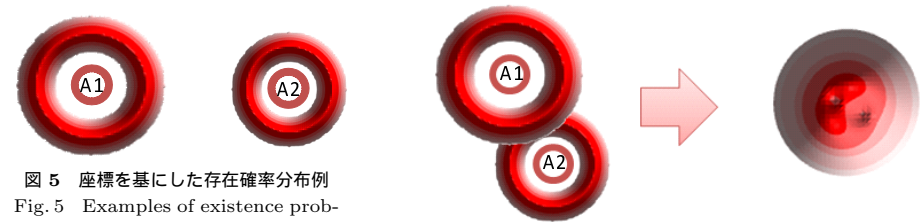


図 5 座標を基にした存在確率分布例  
Fig. 5 Examples of existence probability distribution from the coordinate of anchor node.

図 6 確率分布の掛け合せ  
Fig. 6 Multiplying the probability distributions.

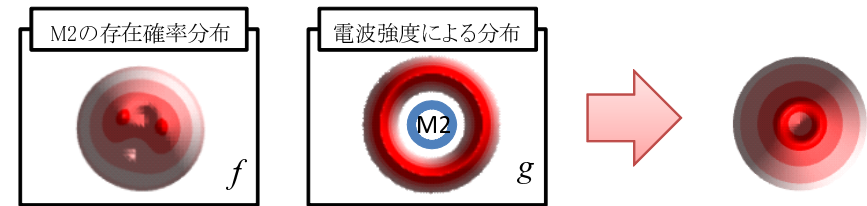


図 7 畳み込み演算による存在確率分布の伝播

Fig. 7 Propagation of existence probability distribution with convolution operation.

粒度でメッシュ化されたサンプリング点において、確率分布を離散化した値を用いる。サンプリングの粒度はより細かい方が、本来の分布を正確に表現することができるが、畳み込み演算においてはサンプリング点が増加すると計算量が指数関数的に増加してしまう。この問題には、高速フーリエ変換を用い計算量の削減を図ることで対応可能である。これによって、計算能力が高くない携帯端末等による推定においても、短時間で行うことができる。

以上のように、M1 は隣接するノードからの存在確率分布をそれぞれ算出することができ、最終的には、得られたすべての独立な確率分布を掛け合わせ、図 4 中右側に示すような存在確率分布を推定することができる。

#### 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実験について述べる。また、提案手法において確率分布を伝播させる回数は 1 回とする。

##### 4.1 座標推定による評価

座標推定による評価では、端末の推定された座標と実際に存在する座標との距離である推

定誤差を指標とし、推定精度の評価を行う。

#### 4.1.1 評価環境と比較手法

評価を行った環境における主なパラメータ設定は以下の通りである。

- シミュレーションフィールド：100\*100m
- 電波到達距離：10m
- モバイルノード数：200
- アンカーノード数：可変

比較手法には、重み付平均値計算を用いて座標の推定を行う手法を用いる。また、比較手法において、推定される位置情報を伝播させる場合とも比較を行う。さらに、提案手法における存在確率分布を伝播させることによる影響を見るため、存在確率分布を伝播させない場合との比較も行う。

#### 4.1.2 評価結果とその考察

アンカーノード数を変化させた際の結果を図8に示す。この図に示すように、提案手法では、アンカーノード数が少ない環境においても精度のよい推定ができていことがわかる。また、重み付平均による推定では、位置情報の伝播を行った場合でも、大きな精度向上は見られず、推定誤差の伝播が影響し、効果的な位置情報の伝播が行えていないことがわかる。それに比べ、提案手法では、存在確率分布の伝播を行わない場合に比べ、大きく精度が向上しており、効果的な位置情報の伝播が行えていることがわかる。

#### 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、エリアキャストによる評価を行う。エリアキャストでは、対象となる領域に存在する確率が、ある閾値以上あるユーザに対して情報の配信が行われるものとし、その際、以下に示される再現率および、適合率を指標に推定精度の評価を行う。

$$\text{再現率} = \frac{\text{対象となるモバイルノードに配信された数}}{\text{対象領域に存在するモバイルノード数}}$$

$$\text{適合率} = \frac{\text{対象となるモバイルノードに配信された数}}{\text{推定により配信が行われた数}}$$

#### 4.2.1 評価環境と比較手法

評価実験の際の主なパラメータは、座標推定の評価時と同じであるが、アンカーノード数については、50に固定して行った。また、対象領域の面積を10\*10とし、エリアキャスト時の閾値は0%から50%の間で変化させた。

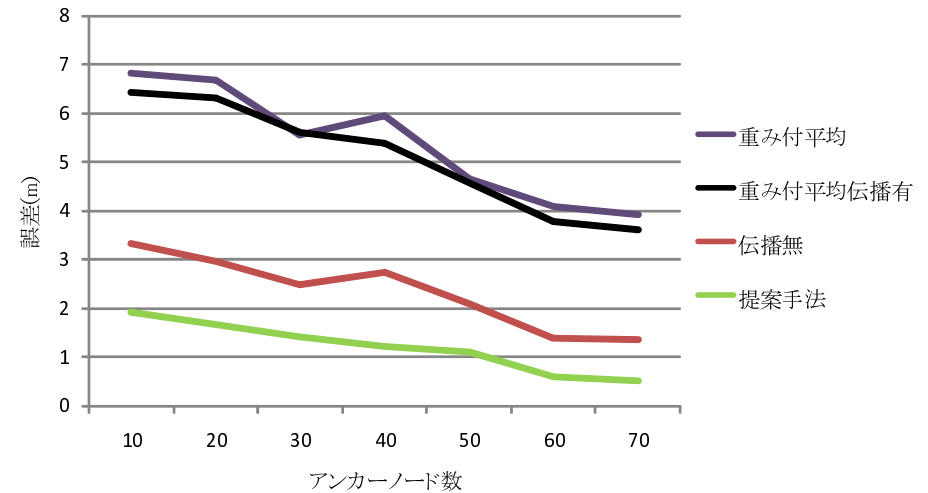


図8 座標推定時の誤差  
Fig.8 The error in the coordinate estimation.

比較手法には、2章において例に挙げた、接続情報を利用しユーザの存在領域を推定する手法を用い、本シミュレーションにおいては2ホップ先のアンカーノードの情報まで利用している。また、エリアキャストにおいても、提案手法において存在確率分布を伝播させない場合との比較を行う。

#### 4.2.2 対象領域におけるユーザの存在確率

エリアキャストにおいては、対象領域内におけるユーザの存在確率によって、情報の配信を行うかどうかを決定する。本シミュレーションにおいて、対象領域におけるユーザの存在確率の定義は以下の通りである。提案手法の場合、推定された存在確率を、対象領域において積分した値を用いる。比較手法の場合、推定された存在領域の面積を  $S1$ 、推定された存在領域と対象領域の重なる面積を  $S2$  とした時、 $S2/S1$  を対象領域におけるユーザの存在確率として用いる。この存在確率が設定された閾値を超えた場合に、ユーザに対し情報が配信される。例えば、閾値を0とした場合は、対象領域に少しでも存在する可能性があるユーザに対して情報が配信されることになる。

#### 4.2.3 評価結果及び考察

エリアキャストの閾値を変化させた際の評価結果を、図9に示す。この図では、折れ線グ

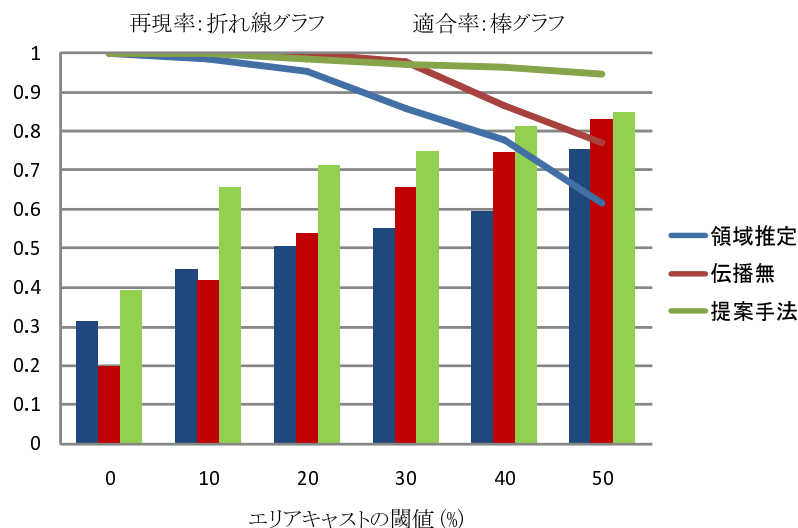


図9 エリアキャストにおける再現率と適合率  
Fig.9 Recall and relevance ratio in Area-Cast evaluation.

ラフによって再現率を、棒グラフによって適合率を表している。まず、再現率に関して、提案手法では閾値を増加させていった場合でも、他の手法に比べ高い数値を維持できていることがわかる。また、伝播を行わない場合でも、閾値が30%を超える範囲では、比較手法に比べ高い再現率を達成している。閾値が20%以下となるような範囲では、いずれの手法においても高い再現率を達成しているが、適合率については提案手法が他の手法に比べ高い精度を達成できていることがわかる。これらの結果により、提案手法では存在確率分布を算出することで精度の高い領域判定を行っており、さらに確率分布を伝播させることで、その精度をさらに向上させていることがわかる。提案手法は、高い再現率を維持したまま適合率も高められているため、過不足の少ないエリアキャストが実現できると言える。

## 5. まとめと今後の課題

本稿では、位置情報依存サービスにおけるアプリケーション要求である、座標推定及び領域判定に対し、同時に対応可能なユーザ位置推定手法を提案した。提案手法では、無線電波

強度を基にユーザの存在確率を地理的な分布によって表現することで、位置及び領域の推定に対応し、確率分布を伝播させることで、アンカーノードが疎な環境における推定精度の向上を図っている。また、提案手法の有効性を確認するためのシミュレーション実験を行い、アンカーノードが疎な環境において、確率分布の伝播による推定精度の向上を確認するとともに、エリアキャストにおいて、高い再現率を維持しつつ、他の手法に比べ余分な配信が抑えられていることを確認した。

今後の課題としては、伝播の回数を増やした場合の評価実験や、実環境における電波強度測定評価実験を行い、本手法の実証評価を行うことを考えている。

## 参考文献

- 1) Anthony LaMarca, Yatin Chawathe, Sunny Consolvo, Jeffery Hightower, Ian Smith, James Scott, Timothy Shon, James Howard, Jeff Hughes, Fred Potter, Jason Tabert, Puline Powledge, Gaetano Borriello and Bill Shilit: Place Lab: Device Positioning Using Radio Beacons in the Wild, Pervasive 05, LNCS 3468, Springer, pp.87-104(2005).
- 2) 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).
- 3) 伊藤誠悟, 河口信夫: locky.jp: 無線 LAN を用いた位置情報・測位ポータル, 情報処理学会研究報告 モバイルコンピューティングとユビキタス通信, No.2005-MBL-34(4), pp.25-31(2005).
- 4) 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(208), pp.22-30(2001).
- 5) 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, モバイルコンピューティングとワイヤレス通信研究会研究報告, vol.2004(No.21), pp.179-186, Mar. 2004.
- 6) Tian He, Chengdu Huang, B. M. Blum, John A. Stankovic and Tarek F. Abdelzaher: Range-Free Localization Schemes in Large Scale Sensor Networks, the Ninth Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom 2003), Sept. 2003.
- 7) Niculescu, D. and Nath, B.: Ad Hoc Positioning System (APS) Using AOA, INFO-COM '03, vol.22, no.1, pp.1734-1743(2003).
- 8) Priyantha, N.B., Miu, A.K.L., Balakrishnan, H. and Teller, S.: The Cricket Compass for Context aware Mobile Applications, Mobicom '01, pp.1-14(2001).