

多次元信号部分空間を用いた拡張位置指紋法による屋内無線端末位置推定

黒崎 雄太^{a)} 山田 寛喜^{b)} 山口 芳雄^{††}

Estimation of Indoor Radio Terminal Location by Extended Fingerprinting Techniques with Multi-Dimensional Signal Subspace

Yuta KUROSAKI^{a)}, Hiroyoshi YAMADA^{b)}, and Yoshio YAMAGUCHI^{††}

あらまし 近年、屋内や市街地での無線局位置推定においてアレーアンテナを用いた手法が注目を集めている。アレーアンテナを用いた無線局位置推定法として、アレーアンテナで受信される信号の空間情報を利用した手法が提案されている。この手法では、アレーアンテナで受信される信号の信号部分空間を位置指紋 (location fingerprint) とし、あらかじめ取得しておいた各位置からの受信信号部分空間のデータベースとのパターンマッチングにより位置推定を実現している。しかし、参照点データが得られていない位置に端末が存在する場合や、データベース作成時と伝搬に変化が生じる場合には推定精度が著しく劣化する。本論文ではそのような変化に対してロバストな位置推定を実現する改良手法として、主要素波が張る信号部分空間を利用した拡張位置指紋法を提案する。この提案手法では、レイトレース法等のシミュレータによって推定される到來方向を用いて近似データベースを構築する。本論文では計算機シミュレーションにより提案法の有効性を検証している。

キーワード 無線局位置推定, 信号部分空間, マルチパス, 位置指紋

1. まえがき

米国の連邦通信委員会 (FCC) における携帯電話の位置推定の勧告 (E-911) をきっかけに、携帯電話のみならず、近年、屋内/屋外における様々な無線端末位置推定に関する研究が盛んに進められている。無線端末の位置推定に関しては、用途に応じて様々な形態があるが、ここではアクセスポイント (以降、単に AP とする) や基地局側から端末位置を推定する場合に関して議論する。そのような AP における推定では、バックボーンのネットワークを仮定し、複数の基地局における受信データから、電波到來方向 (Angle-Of-Arrival, AOA), 到來時間 (Time-Of-Arrival, TOA), 到來時

間差 (Time-Difference of Arrival, TDOA), あるいは受信信号強度 (Received Signal Strength Indication, RSSI) など、様々な手法 (及びその組合せ) による推定が試みられている [1], [2]。これらの手法を用いて端末位置の推定を行う場合、ある程度離れて設置された複数の AP が必要となり、それらの測定値をどのように処理するか (分散的に処理/サーバにおいて中央集中処理) という問題が存在し、更に見通し外環境や強いマルチパス環境下では、それらにより生じる誤差をどのように軽減するかが問題となる。設置コストや、更に中央集中処理時にはトラヒックの観点からも、AP の数を増加させることは現実的とは言えず、例えば RSSI に基づく推定法では、各 AP (あるいはノード) における RSSI 履歴 (時系列) の平滑化によるマルチパス軽減 [3] や、しきい値を設定し、推定に有効な AP (ノード) のみを用いる推定法 [4] など数多くの改良手法が提案されている。

一方、マルチパスが多い環境や、見通し外環境での位置推定を可能とする手法の一つとして位置指紋方式 (location fingerprinting technique) [5], [6] があ

^{a)} 新潟大学大学院自然科学研究科、新潟市

Graduate School of Science and Technology, Niigata University, Niigata-shi, 950-2181 Japan

^{††} 新潟大学工学部、新潟市

Faculty of Engineering, Niigata University, Niigata-shi, 950-2181 Japan

a) E-mail: kuroasaki@wave.ie.niigata-u.ac.jp

b) E-mail: yamada@ie.niigata-u.ac.jp

る。この手法は事前に取得しておいた各位置から端末信号を受信したときの伝搬特性情報と、推定対象端末の伝搬特性情報とのパターンマッチングにより位置を求める手法である。文献[6]で提案されている手法（以降、本論文では従来法と呼ぶ）では、APにアレーランテナを用いることにより、受信される信号の空間情報（信号部分空間）を位置指紋とし、屋内環境などのマルチパスが多い環境や、見通し外環境での位置推定を可能にしている。この手法は前出の手法とは異なり、単独のAPで位置推定が実現できる点に特徴がある。

しかし、従来法ではたとえ同一位置の端末からの信号であっても、事前の取得データ（参照データ、データベース）と観測時のデータが変化する場合には正確な位置推定が実現されない。このような変化として、例えば、端末アンテナの指向性が変化した場合を考えられる。同様に、端末が参照点データの得られていない位置にいる場合にも同じことがいえる。一般にマルチパスリッチな多重伝搬環境では、半波長程度の位置の変位で信号相関が著しく低下する。すなわち半波長程度の位置変化でAPの受信データは大きく変化する。これは多重伝搬環境において従来の位置指紋法を用いる場合、半波長以下の空間分解能での参照データ（データベース）の取得が必要であることを意味する。広いエリアで位置推定を行う場合を考えると、事前に各位置から受信を行い信号部分空間のデータベースを作成することは現実的とはいえない。

アレーの受信データ自体に着目した場合、先の空間相関低下の問題は避けられない。そこで本論文では主要素波の到来方向（AOA）に着目し、それらのモードベクトルが張る部分空間とのマッチングを行う改良手法を提案する。以降、この提案手法を拡張位置指紋法と呼ぶ。図1に示すように、素波の到来方向は端末位置変化に対して、一般に緩やかに変化するため、先の空間相関の問題は大幅に軽減されることが期待できる。すなわち、先の議論のように、全受信信号（素波の合成波）の場合は伝搬距離差の変動に伴い受信データは大きく変化することとなるが、各素波に着目した場合、受信アレーの各素子における素波電力の変化はわずかな伝搬距離変化による変動のみとなる。さて、参照データ作成の際にどのように到来方向を決定するかが問題となるが、事前の測定が可能な場合は、そのデータに対してSAGE法[7]等の到来方向推定手法を適用すればよい。

ただし本論文では、伝搬環境が、ほぼ事前に既知で

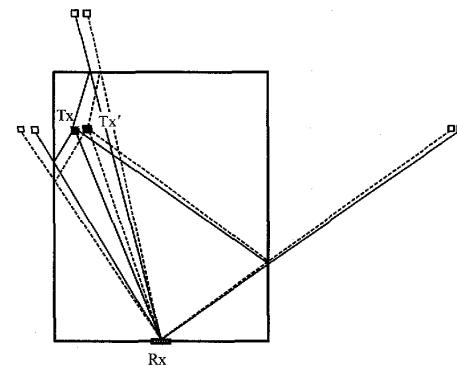


図1 端末位置の微小変化と素波到来角度

Fig. 1 DOA of each waves in small displacement of the terminal.

あるものと仮定し、レイトレーシングに基づくシミュレーションにより参照データベースを構築している。近年、レイトレース法[8]（イメージ法[9]、レイラウンチング法[10]）による電波伝搬シミュレータは著しく進歩してはいるが、受信信号レベル自体の精度に関しては十分とはいえない。提案手法では受信信号自体ではなく、素波に着目し、その到来方向のみを利用している点に注意されたい。このような拡張は、空間相関の問題を解決するばかりではなく、伝搬環境の変化に対してもロバスト（位置推定誤差を小さく抑えることが可能）となる。なぜならば主要素波の到来方向に着目しているため、その信号部分空間は素波の電力レベル変化に対して不偏となるからである。これより先に述べた端末の指向性変化や、電波の遮断に対してもロバストな位置推定の実現が期待される。

以下に本論文の構成を示す。2.では本論文で用いる信号モデルについて示す。3.は従来法の基本概念とその問題点を示す。4.では提案法の基本概念と位置推定方法について示す。5.では計算機シミュレーションにより提案法の効果を示す。6.はむすびである。

2. アレー信号モデルと信号部分空間

本論文では、図2で表されるような L 素子アレーランテナをAPとし、一つの送信アンテナ（送信端末）からのマルチパス波を受信することを考える。APとなる各アレー素子の位置 $x_i (i = 1, 2, \dots, L)$ において、单一周波数（波長 λ ）でデータの測定を行うものとする。このとき、複素振幅 $s_k(t) (k = 1, \dots, K)$ の信号が入射する場合の受信信号は以下のように表される。

$$\mathbf{x}(t) = \sum_{k=1}^K \mathbf{a}(\theta_k) s_k(t) + \mathbf{n}(t) \quad (1)$$

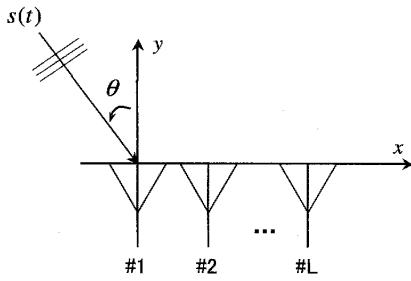


図 2 L 素子アレー アンテナ入射波
Fig. 2 L-element array antenna and incident wave.

$$= \mathbf{A} \mathbf{s}(t) + \mathbf{n}(t) \quad (2)$$

$$\mathbf{A} = [\mathbf{a}(\theta_1), \dots, \mathbf{a}(\theta_K)] \quad (3)$$

$$\mathbf{a}(\theta_k) = [e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}x_1 \sin \theta_k}, \dots, e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}x_L \sin \theta_k}]^T \quad (4)$$

$$\mathbf{s}(t) = [s_1(t), \dots, s_K(t)]^T \quad (5)$$

$$\mathbf{n}(t) = [n_1(t), \dots, n_L(t)]^T \quad (6)$$

ここで、 $\mathbf{n}(t)$ は各素子で付加される雑音（平均 0, 分散 σ^2 ）を要素としたベクトルであり、 T は転置を表す。また、受信データ相関行列は以下の式により定義される。

$$\mathbf{R}_{xx} = E[\mathbf{x}(t)\mathbf{x}(t)^H] \quad (7)$$

ここで、 $E[\cdot]$ はアンサンブル平均、 H は複素共役転置を表す。

受信データ相関行列 \mathbf{R}_{xx} は以下のように固有値展開できる。

$$\mathbf{R}_{xx} = \sum_{i=1}^L \lambda_i \mathbf{e}_i \mathbf{e}_i^H = \mathbf{E} \Lambda \mathbf{E}^H \quad (8)$$

$$\mathbf{E} = [\mathbf{e}_1, \dots, \mathbf{e}_L] \quad (9)$$

$$\Lambda = \text{diag}\{\lambda_1, \dots, \lambda_L\} \quad (10)$$

ここで λ_i は i 番目の固有値を表し、 \mathbf{e}_i は λ_i に対応する固有ベクトルである。受信データ相関行列の固有値、固有ベクトルは信号成分に対応するものと雑音成分に対応するものに分けることができる。伝搬環境が変化しない静的なマルチパス環境において、一つの端末（波源）からのマルチパス波を受信する場合、それぞれの到來波はコヒーレントとなり、信号部分空間は一つの固有ベクトルで特徴づけられる。そのため、信号成分と雑音成分に対応する固有ベクトルを要素とした行列 \mathbf{E}_S と \mathbf{E}_N は以下の式で表される。

$$\mathbf{E}_S = [\mathbf{e}_1] \quad (11)$$

$$\mathbf{E}_N = [\mathbf{e}_2, \dots, \mathbf{e}_L] \quad (12)$$

ただし、

$$\lambda_1 > \lambda_2 = \dots = \lambda_L = \sigma^2 \quad (13)$$

の条件を満たすものとする。

3. 位置指紋法とその基本概念

位置指紋法 [6] は、事前に作成された探索対象空間内の各々の位置における受信データのデータベースを用い、データベースと端末からの受信信号のマッチングにより位置推定を行う手法である。

3.1 従来法における推定手順

文献 [6] で提案されている手法では、端末からの受信信号の信号部分空間を各位置を識別するための特徴量（位置指紋）として位置推定を行う。従来法では推定対象端末から受信した信号部分空間の、データベース信号部分空間への射影の長さを用いて評価を行う。従来法による位置推定手順を以下に示す。

(1) 探索対象区間において参照点となる位置を設定し、その位置にある端末から受信を行う。このとき、式 (8)～(13) に従い受信信号部分空間 \mathbf{u} ($= \mathbf{e}_1$) を求め、データベースとして保存する。

(2) 探索対象端末からの信号を受信し、データベース作成時と同様の手順で受信信号部分空間を求め \mathbf{v} (受信信号のスナップショットが有効な場合は式 (11) に基づき $\mathbf{v} = \mathbf{e}_1$ 、そうでない場合は $\mathbf{x}(t)/|\mathbf{x}(t)|$) とする。

(3) データベースと受信信号部分空間の角度 α_k の計算を行う。すべての参照点とのマッチングを行い、送信場所を推定する。マッチングには次式で計算される $\cos \alpha_k$ を利用する。

$$\cos \alpha_k = |\mathbf{u}_k^H \mathbf{v}| \quad (14)$$

手順 (3) の式 (14) が最大となる参照点がこの手法における推定位置となる。

マルチパス波の有無を無視すれば、このアプローチは AOA 推定アルゴリズムの実測モードベクトルを事前に測定し、実測されたアレーマニフォルド上で走査していることにはかならない。マルチパス波が存在する場合、それらはコヒーレント合成されるため、1. での空間相関の議論のようにわずかな位置の変位で実測モードベクトルは大きく変化する。その性質を利用して、端末位置を推定する。したがって、一般にマルチパスリッチな環境ほど、データベース作成時の煩雑さは増すものの位置推定精度自体は向上する。

3.2 従来法における問題点

この手法でパターンマッチングを利用する信号部分空間は、アレーに入射するマルチパス信号が合成されたものである。そのため、各位置を特徴づけている主要なパラメータは、マルチパス波の到来方向、伝搬遅延、信号強度である。これらの要素により近接した2地点においても、受信データベクトルには大きな違いが現れる。そのため、理想状態（端末位置と参照点位置が一致、かつデータベース作成時との伝搬環境変化がない状態）で位置推定を行うことができれば、高い推定精度が得られる。その反面、端末アンテナの指向性の変化や、人の移動に伴う電波の遮断などの伝搬環境変化が生じる場合や、無線端末位置に対応する参照点データが与えられていない（端末位置と参照点位置が不一致）場合には推定精度が劣化してしまう。

また、この手法では位置推定を行うためには、あらかじめ各々の位置からの受信を行いデータベースを構築する必要がある。そのため広範囲への適用を考えると、その実用性には問題があると言わざるを得ない。

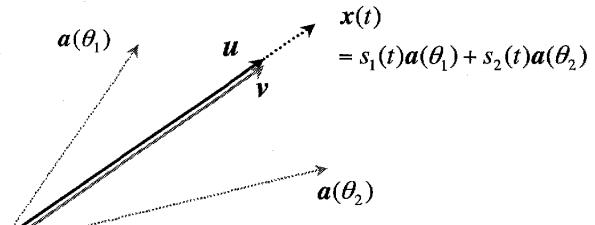
4. 拡張位置指紋法

4.1 主要素波到来方向を用いたマッチング精度の改善

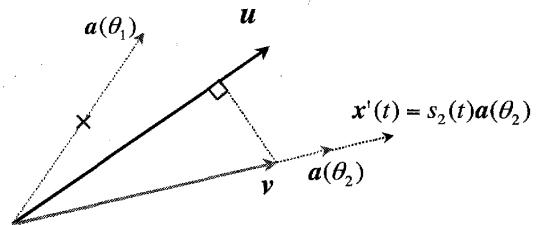
前章において、従来法では伝搬環境に変化が生じると精度の劣化が生じることに触れた。ここでは伝搬環境の変化をアレーに入射する信号の一部が遮断されることに置き換え、その影響について考える。

簡単のため、受信信号 $x(t)$ が到来方向 θ_1, θ_2 の2波のマルチパス信号（素波）により特徴づけられている場合を考える（図3(a)）。このとき、2波の信号のうち1波が受信できない場合 ($s_1(t)a(\theta_1)$ が遮断) の信号部分空間の変化について示したものが図3(b)である。同図に示すように信号が遮断された場合ではベクトルの向きに変化が生じてしまいマッチング精度が低下する。

そこで、図4のように、これら二つの素波により定義される信号部分空間に受信データを射影することを考える。同図から明らかのように、信号のうち1波が受信できずに信号部分空間が変化した場合でも、その受信信号は二つの素波から定義される信号部分空間（図4の場合、ベクトル u_1, u_2 で定義される平面）上に存在するため、完全に射影することが可能である。本論文ではこのように、受信信号をあらかじめ用意した到来方向から定義される多次元信号部分空間へ射影



(a) Without propagation environment change



(b) With propagation environment change

図3 従来法の位置指紋法における推定精度変化要因（2波モデル）

Fig. 3 Cause of error for conventional location fingerprinting technique.

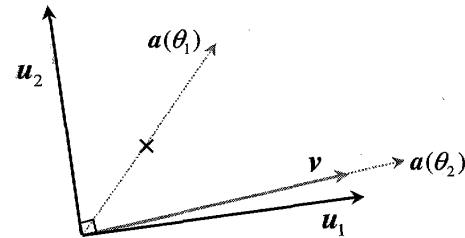


図4 拡張位置指紋法
Fig. 4 Concept of the proposed technique.

し、その射影の大きさを用いて端末位置を推定する拡張位置指紋法を提案する。

4.2 拡張位置指紋法による位置推定

屋内環境において端末から信号を受信するとき、APとなるアレーアンテナには無数のマルチパス波が入射する。しかし、通常、受信信号において支配的なものは壁面、床や大型什器等からの鏡面(specular)反射を主要素波とした、たかだか数個のクラスタからの到来波（主要な素波は直接波及び一回反射波）であると予想される[11]。そこで、本論文ではそのクラスタを代表する支配的な素波の到来方向に着目し、位置推定を行う手法を提案している。もちろん実測データが得られる場合、SAGE法[7]などで素波AOAを実際に推定してもよい。なお、ここでは、従来法のように実測でデータベースを構築することなく、伝搬シミュレータ等を使用しデータベースを構築するものとする。

本論文では探索対象となる領域のモデルを作り、レイトレーシング法により各位置から受信を行ったときの到来方向、到来波電力を求め近似信号部分空間のデータベースを構築する。ここでは近似信号部分空間の定義が異なる二つの手法に関して考察する。

提案法 1

(1) 探索対象区間と参照点位置を決める。各参照点から受信を行ったときの直接波と一回反射波の到来方向を伝搬シミュレータ等で調べ、その到来方向が張る空間への射影行列を求める。射影行列は以下の式で導出される。

$$\mathbf{P}_S = \mathbf{A}(\mathbf{A}^H \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^H \quad (15)$$

$$\mathbf{A} = [\mathbf{a}(\theta_1), \dots, \mathbf{a}(\theta_D)] \quad (16)$$

このとき D は考慮する波の数（主要素波数）であり、アレー素子数未満であるものとする ($D < L$)。全参照点において射影行列を作成しデータベースとして保持する。

(2) 探索対象端末から信号を受信し、受信信号部分空間を求め \mathbf{v} とする。

(3) 受信信号部分空間 \mathbf{v} と各位置の多次元置信号部分空間 \mathbf{P}_{Sk} の角度 α_k の計算を行う。すべての参照点とのマッチングを行い、送信場所を推定する。マッチングには次式で計算される $\cos \alpha_k$ を利用する。

$$\cos \alpha_k = |\mathbf{v}^H \mathbf{P}_{Sk} \mathbf{v}|^{\frac{1}{2}} \quad (17)$$

上記の $\cos \alpha_k$ は各参照点の到来方向空間への射影の長さを表すものである。

提案法 2

提案法 1 では直接波、一回反射波の到来方向（主要素波）のみを用いて近似信号部分空間を作成した。しかし、実際にはアレー素子数を超える無数のマルチパス波（二回以上の反射波、回折波）が存在する。そこで、直接波、一回反射波以外の到来方向及び到来波電力にも着目し、以下のような手順でデータベース作成・位置推定を行う。これを提案法 2 とする。

(1) 探索対象区間と参照点位置を決める。シミュレータを用いて各参照点から受信を行ったときの N 波までの信号の素波到来波方向 θ_i 、電力 P_i を計算し、以下のように受信データ相關行列を作成する。

$$\mathbf{R}_{xx} = \sum_{i=1}^N P_i \mathbf{a}(\theta_i) \mathbf{a}(\theta_i)^H \quad (18)$$

このとき N はシミュレーションで考慮する素波数で

あり、アレー素子数以上であってもよい。 \mathbf{R}_{xx} の固有ベクトルを用いて全受信電力の大部分を射影する D 次元空間への射影行列 \mathbf{P}_S を作成する。なお、 D は \mathbf{R}_{xx} の固有値分布を基に、適切な値を設定するものとする。

$$\mathbf{P}_S = \mathbf{E}_S \mathbf{E}_S^H \quad (19)$$

$$\mathbf{E}_S = [\mathbf{e}_1, \dots, \mathbf{e}_D] \quad (20)$$

(2) 探索対象端末から信号を受信し、受信信号部分空間を求め \mathbf{v} とする。

(3) 提案法 1 と同様に式 (17) を用いて位置を推定する。

提案法はシミュレータを用いることを前提としているが、従来法でもシミュレータを用いてデータベース構築を行うことは可能である。しかし、従来法の場合はマルチパスが合成されたアレー受信データそのものを用いるため、各素波の振幅のみならず、位相（差）も正確に計算しなければ正しく位置推定を行うことは不可能である。そのため、シミュレータによるデータベース構築をする際には、推定対象区間の厳密なモデルを構築する必要がある。一方、提案法は素波到来方向（と提案法 2 ではおよその受信電力）を用いてデータベース構築を行うため、正確な複素振幅の計算は必要としない。また、到来方向はモデル化誤差を受けにくいため推定対象区間のおよその形状が分かればデータベース構築が可能と考えられる。

5. 計算機シミュレーション

5.1 シミュレーションの概要

本章では、計算機シミュレーションにより提案法の位置推定精度について検討する。シミュレーションでは、図 5 で示されるような $9 [m] \times 7 [m]$ のコンクリート壁で囲まれた部屋を想定する。簡単のため推定領域は平面（二次元）とした。参照点位置は図 5 で示される 528 地点（設置参照点数）とし、 x 方向、 y 方向の参照点間隔はそれぞれ 2 波長間隔 (2.4 [GHz]) である。部屋の諸元は表 1、シミュレーション諸元は表 2 に示すとおりである。ここで SNR は伝搬環境変化がない（電波の遮断を考えない）場合の、第 1 素子の直接波受信電力と雑音比として定義した。提案法 1 で用いる各参照点の近似信号部分空間は、その位置からの直接波と一回反射波の到来方向から作成し、四次元 ($D = 4$) の信号部分空間とした。同様に提案法 2 で作成する近似信号部分空間も四次元とした。シミュレーションで

論文／多次元信号部分空間を用いた拡張位置指紋法による屋内無線端末位置推定

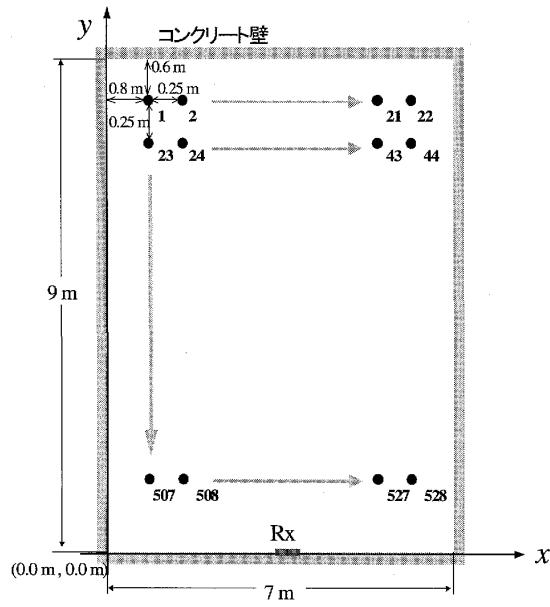


図 5 部屋のモデル（二次元モデル）

Fig. 5 Propagation environment model (2-D model).

表 1 部屋の諸元

Table 1 Propagation environment specification.

部屋の大きさ	9 [m] × 7 [m]
最大反射回数	3 (Ray-Tracing 法使用)
設置参照点数	528
壁反射	フレネル反射 (TE 入射)
壁の比誘電率	6.25
壁の導電率 [S/m]	0.0814

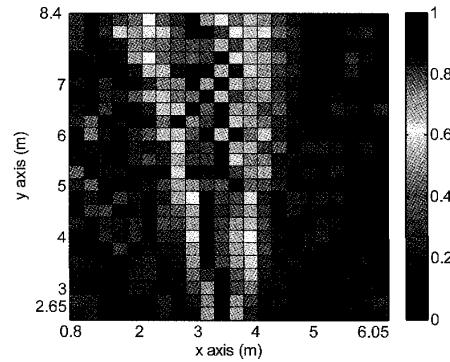
表 2 シミュレーション諸元
Table 2 Simulation parameters.

受信アレー形状	等間隔リニアアレー
受信アレー素子数	8
受信アレー素子間隔	0.5λ
周波数	2.4 [GHz]
SNR	データベース作成時：雑音なし 受信データ取得時：20 [dB]
スナップショット数	512

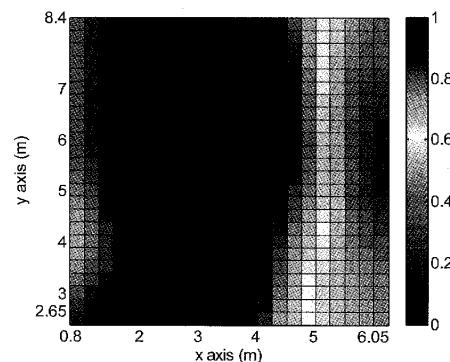
は、まず、端末位置・参照点位置と位置推定精度について検証し、次に伝搬環境変化（遮断）と位置推定精度について検証する。

5.2 端末位置・参照点位置と位置推定精度

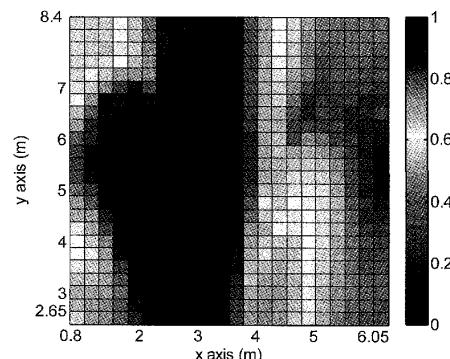
ここでは、端末位置が参照点位置と一致する場合としない場合の位置推定精度について検証する。まずは端末が参照点上にいる場合を考える。図 6 は端末が 142 番目の参照点 $(x, y) = (3.05 \text{ m}, 6.90 \text{ m})$ にいる場合の式 (14) 及び (17) の値を示したものである。この図より、従来法では端末位置（推定位置）に隣接する参照点においても推定値が低く、高分解能であること分かる。一方、提案手法では端末位置周辺の広い領



(a) Conventional method



(b) Proposed method 1



(c) Proposed method 2

図 6 理想環境での推定結果：波源位置 $(x, y) = (3.05 \text{ m}, 6.90 \text{ m})$ Fig. 6 Estimation results of ideal environment: terminal location $(x, y) = (3.05 \text{ m}, 6.90 \text{ m})$.

域で推定値が高い。このことは、提案手法による端末自体の位置精度は従来法よりも劣ることを示しているが、参照点上に端末が存在しない場合であってもこの周辺の推定値をもたらす（位置推定誤差が小さい）ロバストな位置推定を保証しているということができる。

図 7 に、各参照点上に端末がいることを想定し、位置推定を行った場合の全参照点を対象とした位置推定誤差の累積確率分布関数 (Cumulative Distribution

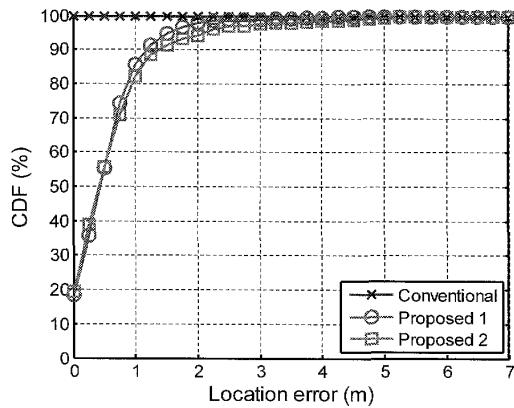


図 7 端末が参照点上にいる場合の推定精度

Fig. 7 CDF of location estimation error of terminals on the 528 reference points.

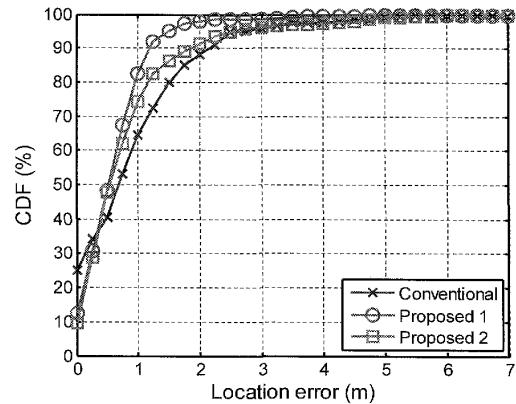


図 8 参照点を間引いたときの推定精度

Fig. 8 CDF of location estimation error of terminals by using 132 reference data sets.

Function, CDF) を示す。この図より従来法では参照点上の端末で、かつ伝搬変化がない場合、すべての端末位置が正しく推定されていることが分かる。提案法 1 及び提案法 2 では正しく推定できた位置（位置推定誤差 0 m）は 2 割ほどであるが、誤差距離が 1 m 以内となる位置は 8 割以上となっている。従来法では端末が参照点上に存在する場合、データベースと測定値が高い精度でマッチングされ、ほぼ 100% の推定結果をもたらしている。今回のシミュレーションでは高精度の推定が実現されているが、その精度は SNR や参照点位置、参照点間隔等に依存することに注意されたい。一方、提案法は、主要な 4 波の AOA のみを用いた近似データベースによる推定手法である。そのため、たとえ端末が参照点上にいる場合であっても従来法に比べ位置推定精度は劣化してしまう。しかし、この結果より、主要波 AOA 情報のみで比較的良好な精度（誤差 1 m 以下の評価点 80%）が実現可能であることが分かる。

次に、 x 方向、 y 方向の参照点の間隔が 4 波長間隔 (50 cm) となるように参照点を間引いた場合の推定精度を比較する。このとき、参照点数は 528 から 132 に減少する。推定を行う位置は参照点を減らす前の位置と同じであるものとする。すなわち 528 点の評価点のうち、位置の一致している参照点が 132 点しか存在せず、他の点に対応する参照データが存在しないケースである。このときの位置誤差の評価結果を図 8 に示す。この結果から、従来法では推定誤差 1 m 以内となる位置が 65% 程度まで落ち、推定精度が急激に劣化していることが分かる。一方提案法 1 では推定誤差 1 m 以内となる位置が 80% 程度、提案法 2 では 75% 程

表 3 遮断角度範囲

Table 3 Blocking angle range.

遮断角度範囲 1	-20° ~ 20°
遮断角度範囲 2	-20° ~ -40°, 20° ~ 40°

度である。これらの結果より、提案法 1 及び提案法 2 では端末が参照点上に存在しない場合でも従来法に比べ位置推定誤差を小さく抑えられることが分かる。

5.3 伝搬環境変化（遮断）と位置推定精度

ここでは人の移動などに伴い、受信信号の一部が遮断（ほぼ吸収体による遮断とみなせると仮定）される場合と反射波電力の高い金属反射体により電波が遮断されるときの位置推定精度について検証する。遮断される角度範囲は表 3 で示される 2 パターンとする。データベース作成時には、このような遮断ではなく、理想的な受信環境としている点に注意されたい。また、位置推定を行う位置はすべて参照点上とする。

まず人の移動などによる遮断（吸収体による遮断と仮定）を考える。ここでは簡単のため、人の移動などによる遮断は、表 3 の角度から受信アレーに入射する信号が完全に受信できないことを仮定する。このときの推定結果を図 9、図 10 に示す。図 9 は $-20^\circ \sim -40^\circ$, $20^\circ \sim 40^\circ$ 方向、図 10 は $-20^\circ \sim 20^\circ$ 方向を遮断したときの結果である。図 9、図 10 より、従来法では推定誤差 1 m 以内となる位置がそれぞれ 65% 程度と 30% 程度まで落ち、推定精度の劣化が見られる。一方提案法 1、提案法 2 では推定誤差 1 m 以内となる位置が図 9 ではそれぞれ 80% 程度と 70% 程度であり、図 10 で両手法とも 70% 程度である。これらの結果より従来法では位置推定誤差が増大し推定精度の劣化が見られる。一方、提案法 1、提案法 2 では位置推定誤

論文／多次元信号部分空間を用いた拡張位置指紋法による屋内無線端末位置推定

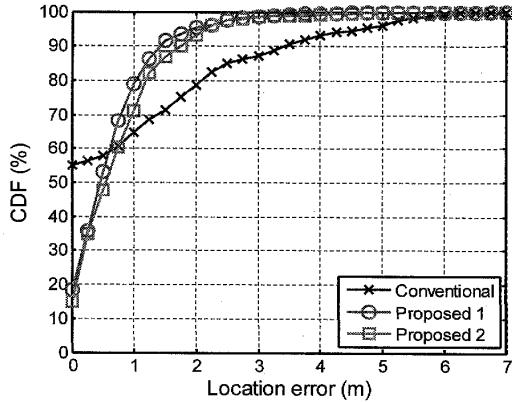


図 9 $-20^\circ \sim -40^\circ, 20^\circ \sim 40^\circ$ 遮断時の推定精度（吸収体による遮断）

Fig. 9 CDF of location estimation error of terminals with blocking angles of $[-20^\circ, -40^\circ]$ and $[20^\circ, 40^\circ]$ (blocking by wave absorber).

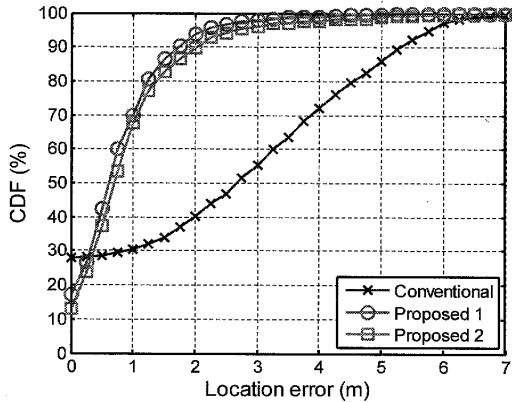


図 10 $-20^\circ \sim 20^\circ$ 遮断時の推定精度（吸収体による遮断）

Fig. 10 CDF of location estimation error of terminals with blocking angles of $[-20^\circ, 20^\circ]$ (blocking by wave absorber).

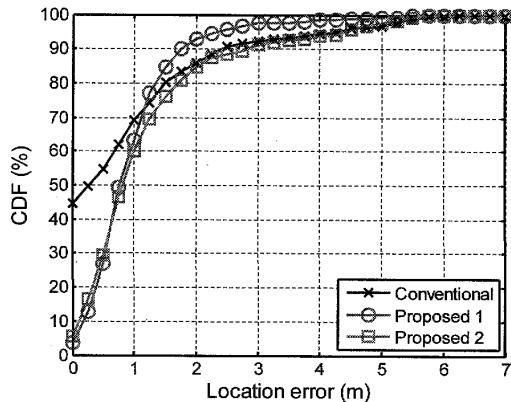


図 11 $-20^\circ \sim -40^\circ, 20^\circ \sim 40^\circ$ 遮断時の推定精度（金属パーテイションによる遮断）

Fig. 11 CDF of location estimation error of terminals with blocking angles of $[-20^\circ, -40^\circ]$ and $[20^\circ, 40^\circ]$ (blocking by metal partition).

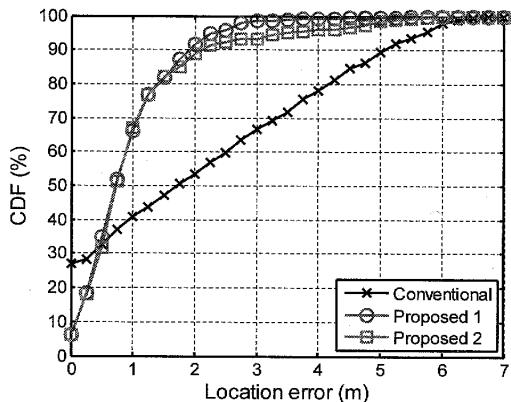


図 12 $-20^\circ \sim 20^\circ$ 遮断時の推定精度（金属パーテイションによる遮断）

Fig. 12 CDF of location estimation error of terminals with blocking angles of $[-20^\circ, 20^\circ]$ (blocking by metal partition).

差を小さく抑えることができ、推定精度の急激な劣化がない。これは、4.1で述べたように提案法1、提案法2では、信号部分空間を主要な到来方向に分離しているためマッチング精度が落ちなかったためと考えられる。また、提案法2では二回反射波以上の波も考慮した近似信号部分空間を使っているが、顕著な差異はなくシミュレーション結果では提案法1の方がやや良好な推定精度となっている。そのため、提案法1のように直接波と一回反射の方位のみを用いた近似信号部分空間でも十分であるといえる。

次に金属反射体により、電波が遮断される場合を考える。図11、図12は受信アレーがある壁から2mの距離に、厚さ3cmの金属パーテイション（導電率 1.03×10^7 [S/m]）が設置された状況を仮定し、 $-20^\circ \sim -40^\circ, 20^\circ \sim 40^\circ$ 方向、 $-20^\circ \sim 20^\circ$ 方向か

らの電波を遮断し、位置推定を行った結果である。このとき、受信される素波は反射3回、回折1回までの素波としている。この結果より、提案法は先の吸収体による遮断時よりも推定精度が劣化していることが分かる。これは金属パーテイションより発生する回折波の影響であると考えられる。従来法については遮断条件（吸収体あるいは金属パーテイション）により位置推定精度の劣化の程度は異なるが、例えば、CDF値80%を基準とすれば提案手法はいずれの場合においても1m程度以内の誤差となるが、従来法では最大で4.5m（図10）となり、提案法に比べ劣化の程度が大きい。

図13、図14はそれぞれ吸収体遮断、金属反射体遮断における $-20^\circ \sim 20^\circ$ 遮断時の従来法、提案法のいくつかの参照点での推定位置を図示したものであ

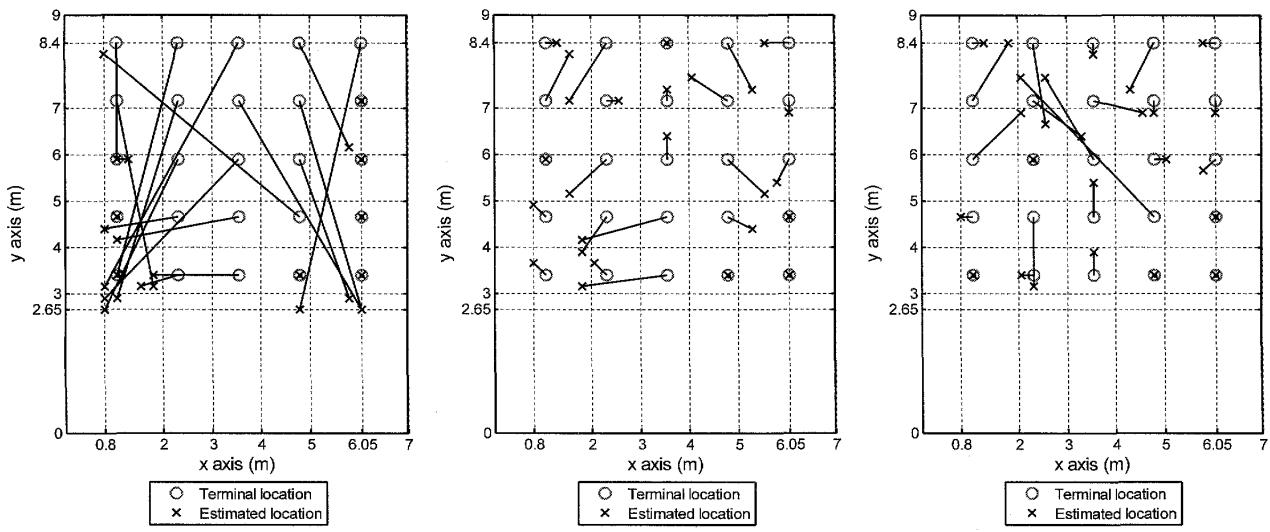


図 13 $-20^\circ \sim 20^\circ$ 遮断時の推定位置（吸収体による遮断）
Fig. 13 Estimated location of terminals with blocking angle of $[-20^\circ, 20^\circ]$ (blocking by wave absorber).

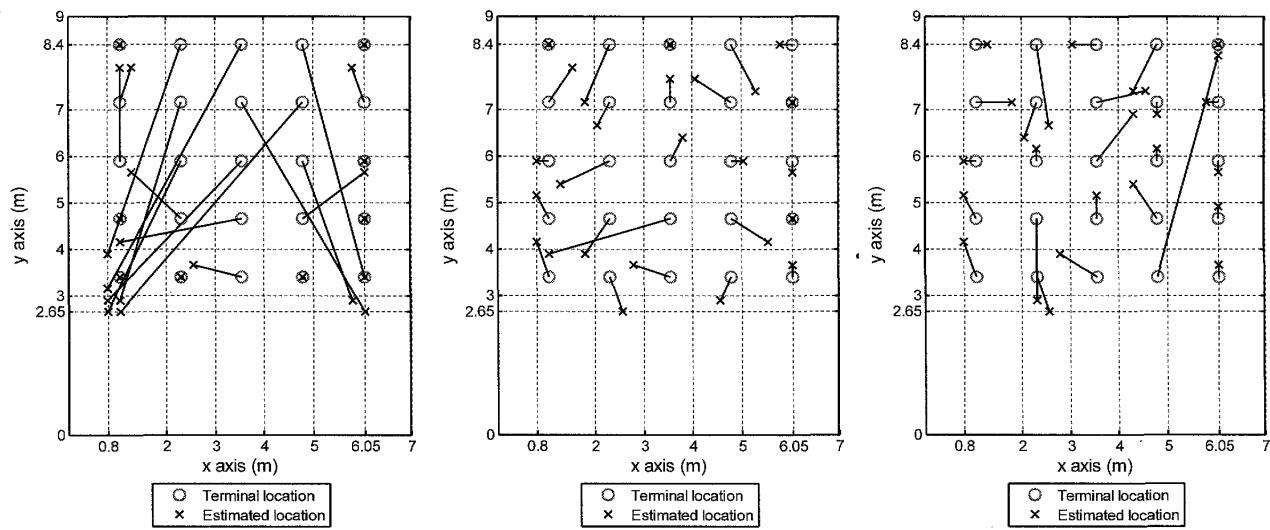


図 14 $-20^\circ \sim 20^\circ$ 遮断時の推定位置（金属パーティションによる遮断）
Fig. 14 Estimated location of terminals with blocking angle of $[-20^\circ, 20^\circ]$ (blocking by metal partition).

る。同図の○が端末位置、×が推定された位置である。これら結果より、従来法では直接波が遮断される位置（ $-20^\circ \sim 20^\circ$ の範囲に入る位置）において真の端末位置と推定位置のずれ（変位）が大きくなっている。また、従来法では、直接波が遮断された場合の推定位置が、遮断されずに受信された一回反射波のパス上の位置に現れる傾向が見られる。提案法 1、提案法 2 はいずれも直接波が遮断される位置においても従来法に比

べ、真の端末位置と推定位置が大きく離れることがなく、従来法に比べてロバストであることが分かる。

6. むすび

本論文では、信号部分空間を位置指紋とした位置推定手法に着目し、その手法の改良手法について提案した。従来法による位置推定では端末が参照点上に存在しない場合や受信信号の一部（特に直接波）が遮断さ

論文／多次元信号部分空間を用いた拡張位置指紋法による屋内無線端末位置推定

れる場合には推定精度が劣化し、眞の端末位置に対して推定位置が大きく変位する場合があるが、提案法では、端末が参照点上に存在しない場合や受信信号の一部が遮断される場合においてもロバストな位置推定が実現されることを確認した。

今回は提案手法のコンセプトの妥当性を検討するための数値シミュレーション結果を報告したが、実用上の精度を評価するためには、実験を通して、三次元モデルとしての素波数、モデル化誤差に対する要求等を明らかにすることが不可欠である。これらの点に関する検討が今後の課題である。また、端末のMIMO化や、複数APによる更なる位置推定精度の改善が期待できる。それらの問題についても検討する予定である。

謝辞 本研究は科研費（基盤研究（C）2056349）の助成により行われたものである。

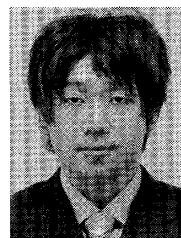
文 献

- [1] F. Gustafsson and F. Gunnarsson, "Mobile positioning using wireless networks," IEEE Signal Process. Mag., vol.22, no.4, pp.41–53, July 2005.
- [2] A.H. sayed, A. Tarighat, and N. Khajehnouri, "Network-based wireless location," IEEE Signal Process. Mag., vol.22, no.4, pp.24–40, July 2005.
- [3] E.-E.-L. Lau and W.-Y. Chung, "Accuracy refinement algorithm for mobile target location tracking by radio signal strength indication approach," IEICE Trans. Fundamentals, vol.E91-A, no.7, pp.1659–1665, July 2008.
- [4] R. Zemek, S. Hara, K. Yanagihara, and K. Kitayama, "A traffic reduction method for centralized RSSI-based location estimation in wireless sensor networks," IEICE Trans. Commun., vol.E91-B, no.6, pp.1842–1851, June 2008.
- [5] K. Kaemarungsi, P. Pahlavan, and N. Krishnamurthy, "Modeling of indoor positioning systems based on location fingerprinting," Proc. 23rd Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies, vol.2, pp.1012–1022, March 2004.
- [6] 辻 宏之, "アレーアンテナを用いた屋内外の無線局位置推定の実験的検証," 信学論 (B), vol.J90-B, no.9, pp.784–796, Sept. 2007.
- [7] J.A. Fessler and A.O. Hero, "Space-alternating generalized expectation-maximization algorithm," IEEE Trans. Signal Process., vol.42, no.10, pp.2664–2677, Oct. 1994.
- [8] 今井哲朗, 犬飼裕一郎, 藤井輝也, "レイトレース法を用いた屋内エリア推定システム," 信学論 (B), vol.J83-B, no.11, pp.1565–1576, Nov. 2000.
- [9] J.W. McKown and R.L. Hmilton, "Ray tracing as a design tool for radio networks," IEEE Netw. Mag., vol.5, no.6, pp.27–30, Nov. 1991.
- [10] W. Honcharenko, H.L. Bertoni, J.L. Dailing, J. Qian,

and H.D. Yee, "Mechanisms governing UHF propagation on single floors in modern office buildings," IEEE Trans. Veh. Technol., vol.41, no.4, pp.496–504, Nov. 1992.

- [11] 阪口 啓, 高田潤一, "MIMO 伝搬特性の測定装置・測定方法・解析方法・モデル化," 信学論 (B), vol.J88-B, no.9, pp.1624–1640, Sept. 2005.

(平成 21 年 5 月 27 日受付, 9 月 24 日再受付)



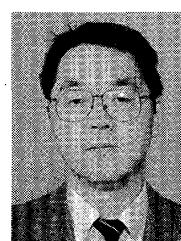
黒崎 雄太 (学生員)

平 21 新潟大・工・情報工学卒。現在、同大大学院自然科学研究科博士前期課程在学中。主として無線端末の位置推定に関する研究に従事。



山田 寛喜 (正員: シニア会員)

昭 63 北大・工・電子卒。平 5 同大大学院博士課程了。同年新潟大・工・助手。現在、同大・工・情報・教授。平 12~13 NASA ジェット推進研究所・客員研究員・併任。平 15 ATR 適応コミュニケーション研究所(現 ATR 波動情報工学研究所)・客員研究員・併任。現在に至る。この間、スーパーレゾリューション法を用いた波源の到来方向推定・遅延時間推定、MIMO システム、スマートアンテナ、SAR 画像処理に関する研究に従事。工博。平 3 IEEE AP-S 東京支部 Young Engineer Award, 平 9 本会学術奨励賞受賞。IEEE 会員。



山口 芳雄 (正員: フェロー)

昭 51 新潟大・工・電子卒。昭 53 東大大学院修士課程了。同年新潟大・工・助手。現在、同大・工・情報・教授。トンネル内等損失媒質での電波伝搬、地中・雪中用 FM-CW レーダ、マイクロ波リモートセンシング、ポーラリメトリの研究に従事。工博。平 19 本会チュートリアル論文賞受賞。著書「偏波（ポーラリメトリック）レーダの基礎と応用」、「レーダポーラリメトリの基礎と応用」。IEEE フェロー。