

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

辻 宏之^{†a)}Experiential Evaluation of Indoor and Outdoor Radio Source Localization
Using Array AntennasHiroyuki TSUJI^{†a)}

あらまし 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無線局位置推定手法について提案し、実験により基礎的な検証を行う。本論文では従来の位置推定手法を紹介するとともに、アレーアンテナで受信される信号の空間情報及び信号強度を含む信号部分空間を特徴量とする Fingerprint 手法に基づく無線局位置推定法を提案し、屋内及び屋外の無線局の位置推定実験を通して提案の位置推定法の特徴や有効性の基礎的な検証を行っている。

キーワード 無線局位置推定, アレーアンテナ, 信号部分空間, 位置指紋

1. ま え が き

電波を利用した無線局端末の位置推定は様々なアプリケーションに利用でき、また、ユビキタスネットワークシステムのような新たなサービスにおいても重要であると考えられているため最近注目を集めている [1] ~ [3]。近年、携帯電話による緊急時の通報が増加する中、米国の連邦通信委員会 (FCC) が緊急サービスの向上のため、緊急時の携帯電話利用者の居場所を特定できる機能 Enhanced 911 (E-911) について制定を行った。例として緊急時の発信に対し、移動局の位置を半径 125 m 以内に 67% の確率で報告することを求めている。このことも位置推定が注目される理由の一つとして考えられる [2], [4]。

電波を利用した位置推定方法として Global Positioning System (GPS) が挙げられる。GPS は衛星からの電波到来時間の情報に基づいて位置を推定している。近年では GPS のデバイスも安価になり、最も普及し様々な分野で利用されている位置推定システムといっても過言ではない。しかしながら、GPS には専

用のデバイスが端末に必要であり、端末における電力消費の問題、屋内環境やビル影による GPS 衛星からの電波が届かない場合には位置が推定できないなどの問題がある。このため屋内や屋外における GPS を利用しない無線局の位置推定方法が注目されている [5]。

無線局端末の位置推定は、その用途や仕組みなどにより様々な分類できるが、ここでは端末自身が位置を把握する端末型位置推定とネットワーク側で端末の位置を把握するネットワーク型位置推定に分け、本論文では後者のネットワーク型位置推定を取り上げる。この方式は、端末から発信された電波を固定の局 (ここでは基地局とする) で受信し、端末の位置を計算しネットワーク側に伝えるものである。この場合、端末側に位置推定の仕組みを必要としないことが利点の一つである。

ネットワーク型位置推定としてこれまで多くの方法が提案されている。代表的な方法として、基地局と無線局端末間の距離若しくは電波到来方向 (Angle of Arrival, AOA) 情報から三角測量に基づいて位置を求める手法がある [6] ~ [8]。基地局と無線局間の絶対距離を求めるには、基地局における受信信号強度 (Received Signal Strength, RSS) 情報から距離に換算する方法や、電波の電波到来時間 (Time of Arrival, TOA) 若しくは電波到来時間差 (Time Difference of Arrival, TDOA) から距離情報を得る方法がある。しかし RSS, AOA, TOA や TDOA を利用する手法は、

[†] 独立行政法人情報通信研究機構新世代ワイヤレス研究センター、横須賀市

New Generation Wireless Communications Research Center, National Institute of Information and Communications Technology, 3-4 Hikarino-oka, Yokosuka-shi, 239-0847 Japan

a) E-mail: tsuji@nict.go.jp

見通し外やマルチパスが多い環境ではうまく動作しない場合がある。これらの手法は一般に見通し内伝搬路を仮定し、距離若しくは方位から位置を推定するため、伝搬路が複雑になる環境では距離や方位の推定に誤差を生じるためである。このため、AOA の空間的情報と TOA の時間的情報を組み合わせた手法も提案されている [9] ~ [11]。AOA を推定する場合や AOA と TOA の情報を組み合わせて利用する場合、空間情報を利用できる特徴からアレーアンテナが一般に用いられている。アレーアンテナはレーダシステムにおける電波の到来方向で代表される空間情報の検出、通信システムの高度化に伴う通信速度の向上や電波の有効利用への応用など、近年様々な分野で利用されるようになってきている。

一方、送信点を幾何学的に求めない方法として、受信信号の伝搬特性の情報を位置指紋 (location fingerprint) とし、データベースとのパターンマッチングによる位置推定法がある [12], [13]。その特徴から位置指紋を利用する手法は、都市部や屋内の無線局位置推定に有利であると考えられている [14]。位置指紋としては、RSS や遅延プロファイルが主に利用されている。ただし RSS のみを利用する場合は、精度を向上させるために受信センサを複数の地点に設置する必要がある。また、精度の良い遅延プロファイルを測定するためには広い帯域の信号が必要である。このため送信信号が限定されたり、システムの構成が複雑になるなどの問題があった。

本論文では、アレーアンテナが空間情報を利用できるという特徴を利用した位置指紋方式の新たな位置推定方法を提案し、屋内外の実験により基礎的な検証及び考察を行う。提案の手法は、受信信号の空間情報を有効に利用することにより、基本的に受信点の一つで位置推定が可能であり、送信信号の種類を限定せず、簡単な規範により位置を特定できるという特徴をもつ。本論文の構成は以下のとおりである。最初にネットワーク型無線局位置推定手法に関してその原理と特徴を示す。3. では本論文で使用する信号モデルについて定義を行い、4. においてアレーアンテナからの信号部分空間を利用した手法の提案を行う。5. 及び 6. では屋内及び屋外での実験を通して提案の手法を検証する。7. は結論であり本論文をまとめる。

2. ネットワーク型位置推定法

ここではネットワーク型位置推定システムに利用

されている主な手法の原理と特徴を簡潔にまとめる。TOA, TDOA, AOA, 位置指紋の手法については、文献 [1] や [5] にその方式や特徴などがまとめられているので参照されたい。

2.1 RSS による位置推定

RSS を用いる手法は、送受信間の伝搬損モデルから距離若しくは範囲を計算し、三つ以上の基地局を用いて位置を推定するものである。図 1 のように各基地局において受信強度と伝搬損モデルにより送信点の候補位置を示す円を求め、各円の交点が無線局の推定位置となる。受信信号強度のみを利用するため仕組みが簡単である。この手法では、マルチパスや見通し外環境などが位置推定誤差の原因となる。

2.2 AOA による位置推定

AOA から平面上の位置を求める手法の基本的な原理は、図 2 で示すように最低二つの基地局で求められた方位により決定される 2 軸若しくは複数の軸の交点から位置を推定する。このため基地局において電波の到来方向を推定する必要があり、アレーアンテナを利用することが一般的である。AOA 方式は基地局間で同期をとる必要はないが、AOA の推定精度が位置推定精度に直接影響を与えるため、AOA 推定法やアレーアンテナのキャリブレーションなど検討すべき問題がある [15]。

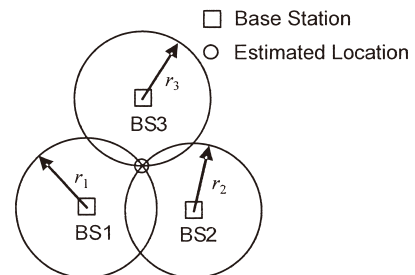


図 1 RSS を利用した位置推定原理
Fig. 1 RSS localization.

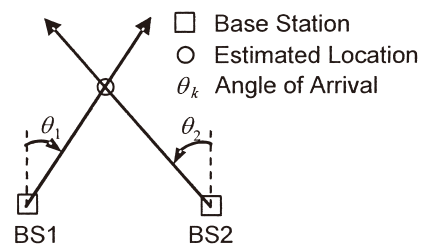


図 2 AOA による位置推定原理
Fig. 2 AOA localization.

2.3 TOA/TDOA による位置推定

TOA 方式は、送信側と受信側の伝達時間を直接測定することにより到達距離を求め、図 1 の RSS の手法と同様に伝搬時間から距離に変換され位置を推定する方式である。この方式では、すべての送信機と受信機が同期をとる必要があり、送信信号にはタイムスタンプが必要となる。このため時間精度が推定精度に影響を与える（ $1 \mu\text{s}$ の誤差は距離にして 300 m の誤差になる）。一方、TDOA 方式では各受信側での到達時間差情報を利用し、基地局間の時間同期のみで位置を推定できるため TOA 方式より実用的といえる [16]。この場合、GPS の時間信号が同期に利用できる。TOA や TDOA による手法では見通し内伝搬路を仮定し距離を推定するため、見通し外環境ではマルチパスなどにより、TOA や TDOA の推定値から推定された距離が実際と異なる場合があり、その結果位置精度が劣化する。また、TOA や TDOA を推定する際に、受信点でのマルチパス信号の影響を受ける場合がある [17], [18]。このため伝搬路のモデルを考慮した対策が必要となる。

2.4 位置指紋による位置推定

RSS, AOA や TDOA を利用する手法は、一般に非線形問題となる [8]。また、見通し外やマルチパスが多い環境ではうまく動作しない場合がある。これは、建物が密集した地域や屋内における電波伝搬の複雑さに起因するとされている [5]。一方、受信信号の伝搬特性の情報を利用した位置指紋方式 (location fingerprinting technique) は、都市部や屋内の位置推定には有利とされている [5], [12], [19], [20]。この位置指紋方式の基本的な考え方は、図 3 のように基地局で受信されたマルチパス信号パターンとあらかじめ用意しておいた位置に関するデータベースとのパターンマッチング手法により位置を求める方法である。受信

信号の RSS, マルチパスによる遅延プロファイル特性, AOA, TOA などの情報がパターンマッチングの情報として利用できる [14], [21]。この位置指紋方式は、前述の AOA や TDOA などの方式で困難であったマルチパスや見通し外の場合でも位置を推定することができるという特徴をもつ [22]。一方、この方式は屋外のような電波伝搬が変化しやすいアプリケーションへの適用には不向きである。これは、この手法がデータベースを必要とするため、電波伝搬が安定した状態を想定しているからである。また、パターンマッチングに使用する特徴量においてもいくつかの課題がある。例えば RSS を用いる場合、位置推定精度を良くするためには複数の位置に受信点を設置する必要がある。また、遅延プロファイルを用いる場合は、十分な時間分解能を得るために送信信号に広い帯域が必要であることや、遅延プロファイルを推定するばかりではなく、複雑な遅延プロファイルから特徴量を抽出し、パターンマッチングを行う必要がある。このような問題を解決するため、本論文で提案する位置指紋に基づく方式は、基本的に一つの受信点を使用し、送信信号の種類を選ばない手法である。

3. アレーアンテナ信号モデルと信号部分空間

本論文におけるアレーアンテナで受信される信号モデルと信号部分空間を定義する。

最初に、素子数 M のアレーアンテナに P 個の複素狭帯域信号が、角度 $\theta_k(t)$, $k = 1, \dots, P$ で入射する一般的な場合を考える。ここでは簡単のため素子間隔 D の直線アレーアンテナを仮定し、以下の信号モデルで表す。

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

$$\mathbf{a}(\theta) = [1, e^{j\xi \sin \theta}, \dots, e^{j\xi(M-1) \sin \theta}]^T, \quad \xi = 2\pi D/\lambda$$

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

ここで、 λ は搬送波の波長、 T は転置、 $\mathbf{x}(t) = [x_1(t), \dots, x_M(t)]^T$ と $\mathbf{n}(t) = [n_1(t), \dots, n_M(t)]^T$ はそれぞれ $M \times 1$ の複素受信信号ベクトルと観測雑音ベクトルを示す。また、 θ_k は k 番目の信号 $s_k(t)$ の到来方向を示す。更に、 $\mathbf{s}(t) \equiv [s_1(t), s_2(t), \dots, s_P(t)]^T$ と定義することにより、ステアリング行列 \mathbf{A} を以下のように定義する。

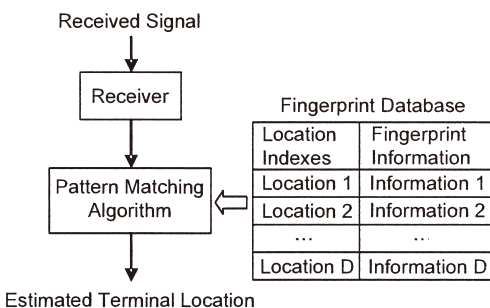


図 3 位置指紋による位置推定

Fig. 3 Location fingerprinting localization.

$$A \equiv [a(\theta_1) a(\theta_2) \cdots a(\theta_P)] \quad (2)$$

また、アレーアンテナで受信される信号の共分散行列 R は次のように定義される。

$$R = E \{x(t)x(t)^H\} \quad (3)$$

ここで $E\{\cdot\}$ は平均 (集合平均) をとることを示し、 H は共役転置を示す。実際にはサンプルされた有限個の信号から共分散行列を推定することになり、

$$\hat{R} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \tilde{x}(n) \tilde{x}^H(n) \quad (4)$$

と計算できる。ここで $\tilde{x}(n)$ は $x(t)$ から離散時間でサンプルされた信号ベクトル、 N はスナップショット数とした。また、観測雑音は信号 $s_k(t)$ とは無相関であり、 σ^2 の分散をもつガウス雑音とすると、式 (3) の定義から共分散行列 R は以下のように表現される。

$$R = ASA^H + \sigma^2 I \quad (5)$$

ここで I は単位行列であり

$$S \equiv E \{s(t) s^H(t)\}, E \{n(t) n^H(t)\} = \sigma^2 I$$

と定義している。

ここで $Rv_i = \lambda_i v_i$ の関係を満たす R の固有値を λ_i ($\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \cdots \geq \lambda_M > 0$)、固有ベクトルを v_i と定義する。次に P 個の複素狭帯域信号 $s_k(t)$ に対し、(1) 信号の個数 P はアレー素子数 M よりも小さく、(2) 角度 θ_k ($k = 1, \dots, P$) はそれぞれ異なり、(3) 信号 $s_k(t)$ はそれぞれが完全相関でないとして仮定すると、以下のように示すことができる。

- $\lambda_{P+1} = \cdots = \lambda_M = \sigma^2$
- $V_s = [v_1 \cdots v_P]$ の列ベクトルで張る空間は信号部分空間と呼ばれ、式 (2) のステアリング行列 A の張る空間と同じである。

また、 $V_n \equiv [v_{P+1} \cdots v_M]$ の列ベクトルで張る空間は、雑音部分空間と呼ばれている。多くの到来方向推定アルゴリズムは、式 (5) の共分散行列及び構造から到来方向の推定値を得ている。特に MUSIC (Multiple Signal Classification) で代表される高分解能推定アルゴリズムは、信号部分空間と雑音部分空間の直交性を利用している [23]。

一般の電波伝搬環境では、ある地点から送信された信号は、受信点で直接波及び反射波を含んで受信される。このため無線局位置の推定において到来方向情報

を利用する場合考慮すべき問題がいくつかある。例えば、入射する信号が無相関であるか否かにより到来推定方法が異なることや、マルチパスが支配的な環境では、到来方向推定値の方向に無線局が存在しない場合があり位置推定を難しくする原因の一つとなっている。

4. アレーアンテナによる無線局位置推定

本章ではマルチパスの影響が強い環境でも位置推定が行える位置指紋方式 (Location fingerprinting technique) に基づいた手法に着目し、アレーアンテナによる空間情報を利用した新たな手法を提案する。

4.1 アレーアンテナを使用した無線局位置推定

従来の位置指紋方式に基づいた位置推定法では、信号の強度分布を利用するものや遅延プロファイル情報などを利用する手法が一般的である [19]。これらの手法では、無線局の位置と受信点で決まる特徴量 (位置指紋) を利用している。RSS を利用する場合は、無線局の位置に応じた受信信号強度分布をあらかじめ取得し、位置が未知である無線局の受信信号強度と比較することにより推定位置を得ることができる。受信点の数を増加させることは、推定精度を向上させる方法の一つであるが、多くの受信点を設置することは実用的ではない。ここで、マルチパス環境にて送信点から発信された信号が受信点に到達する場合を考える。このとき、複数の角度から信号が入射することが考えられるため、入射角度の分布が無線局の送信点の位置により特徴づけられるとすれば、この角度分布に関する情報を特徴量として利用できることが期待される。そこでアレーアンテナが空間情報を利用できるという特徴を生かし、到来方向そのものを利用せず、受信された信号の信号部分空間を無線局の位置の特徴量と考え位置推定に利用する。これはアレーアンテナで受信される信号の強度と空間情報を利用することと同じである。

これまでに屋外の位置推定に関して文献 [24] のように部分空間のフィッティングによる検討を行ってきた。そこでこの考えを屋内に適用し、実験によりその有効性について検討を行った [25], [26]。これは屋内環境ではマルチパスの影響が屋外より強くなり、アレーアンテナの受信信号から得られる信号部分空間が位置指紋として効果的に利用できることと期待されるからである。

4.2 信号部分空間と位置推定のための部分空間マッピング

3. より、受信信号の共分散行列から得られる固有値及び固有ベクトルにより信号部分空間と雑音部分空間

に分けることができる。この信号部分空間では、固有ベクトルで張られる空間と到来方向で張られる空間は同じである。これより提案の手法では、受信された信号の信号部分空間を無線局の位置の特徴量と考え位置推定に利用する。つまり、固有値で張られる空間を位置推定のための特徴量（位置指紋）として利用する。これは位置指紋に基づく方式であり、位置を推定したい無線局からの受信信号の信号部分空間と、位置が既知である場合の信号部分空間（位置をインデックスとする信号部分空間のデータベース）の類似性を比較することにより位置を推定する。この比較のための規範はいくつか考えられるが、ここでは同じ次数で同じ絶対値をもつ複素ベクトル間の類似性をスカラとして扱えるベクトル間の角度に注目し、以下のように計算される角度を使用した規範を考える。

[定義1] E_1 と E_2 を M 個の要素をもつ複素ベクトルで構成される d 次元の部分空間を考える。ここで部分空間 E_1 と E_2 との角度 (principal angle) を以下のように定義する [27]。

$$\cos \alpha_i = \max_{u \in E_1} \max_{v \in E_2} |u^H v| = |u_i^H v_i| \quad (6)$$

ただし、ベクトル u, v は以下の拘束条件を満たす

$$u^H u_q = 0, \quad q = 1, \dots, i-1$$

$$v^H v_q = 0, \quad q = 1, \dots, i-1$$

$$\|u\| = \|v\| = 1$$

具体的には以下の手順により角度を求める。最初 $i = 1$ とし、式 (6) により E_1 と E_2 から $u^H v$ を最大にするベクトル u_1 と v_1 を求め、このときの値 $\cos \alpha_1$ の α_1 を角度とする。次に $i = 2$ とし、拘束条件により E_1 と E_2 に属し、かつ u_1 と v_1 と直交するベクトル u と v の中から、 $u^H v$ を最大にするベクトル u_2 と v_2 を求め、 $i = 1$ と同様に α_2 を得る。 i を順に増加させこれを d まで繰り返す。

この結果、 $0 \leq \alpha_1 \leq \alpha_2 \leq \dots \leq \alpha_d \leq \pi/2$ となり、 α_1 は E_1 と E_2 の最小のずれであり、 α_d は最大のずれを示すことになる。これらの角度は principal angle と呼ばれる [27]。本手法ではこれらの角度を位置指紋のための規範とする。この特徴は複雑な部分空間の関係をスカラ量として扱うことができることである。

送信点が一つであり、受信される複数の信号が完全に相関をもつ場合、つまり式 (1) において $s_k(t) = \beta_k s_1(t)$, $k = 1, \dots, P$ (β_k は複素数であり $\beta_1 = 1$)

と記述される時、式 (1) は次のように書き換えられる。

$$\begin{aligned} x(t) &= \sum_{k=1}^P a(\theta_k) s_k(t) + n(t) \\ &= \sum_{k=1}^P a(\theta_k) \beta_k s_1(t) + n(t) \\ &= \beta s_1(t) + n(t). \end{aligned} \quad (7)$$

ただし、

$$\beta = \sum_{k=1}^P a(\theta_k) \beta_k$$

である。このとき共分散行列から得られる固有値の分布は、第 1 固有値が最も大きく、他は観測雑音分散と同じになることが知られている。このため信号部分空間の次元は 1 となる。しかしながら実際の適用において次元が 1 とならない場合もある。例として、有限個のスナップショットから計算される共分散行列の推定値を利用する場合、後に述べる空間平均処理 [28] を利用する場合、複数の発信源やある程度の帯域をもつ信号を扱う場合などは次元が 1 以上になるか、若しくは信号部分空間と雑音部分空間をはっきりと区別できない場合がある。このような場合、一つ以上の部分空間の次元から角度を計算することになる。

4.3 信号部分空間の角度を利用した位置推定

提案する無線局位置推定方法は以下のとおりである。

(1) 信号部分空間のデータベースを作成するために、あらかじめ設定した場所 l にアンテナを置き、アレーアンテナで受信を行う。各地点での受信信号の共分散行列から信号部分空間 $u_i(l)$ を計算しデータベースとして保存する。

(2) 位置が未知の送信機からの受信を行い、信号部分空間を求め v_i とする。

(3) 式 (6) に基づき、データベースと受信信号の信号空間との角度 α_i の計算を行い、角度若しくは $\cos \alpha_i$ を比較することにより送信点場所の推定値を得る。

5. 屋内実験と解析

5.1 実験システム概要

屋内実験により提案法の有効性の検証を行った。実験は図 4 の写真で示される部屋を模擬した $9\text{m} \times 7\text{m}$ の場所で実施された。図 5 に部屋のレイアウト及び

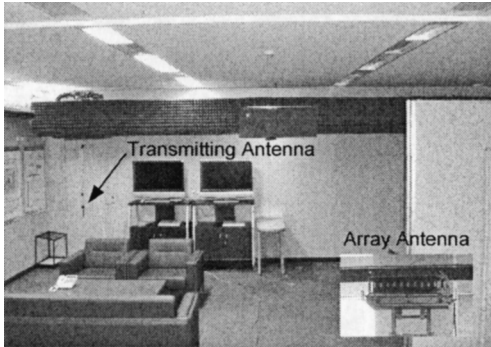


図 4 実験の部屋とアレーアンテナの写真
Fig. 4 Photo of room and array antenna.

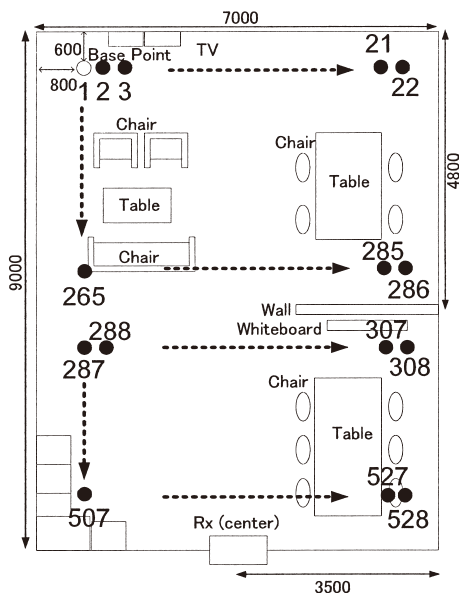


図 5 実験場所の配置 (●は送信機の位置)
Fig. 5 A Layout of test area (Transmitter locations are indicated by filled circles).

受信点 (アレーアンテナ) の配置を示す。また、実験を行った部屋は、三次元に移動できるポジションを装備しミリ単位で送信アンテナを移動できる。壁は金属性であり、送信機と受信機の間には多くのマルチパス波が存在すると考えられる。受信用のアレーアンテナは 8 素子のパッチアンテナ素子をもち、送信信号の搬送波の半波長間隔で直線に配置されている。また、受信アレーアンテナの場所は図 5 の “Rx” で示され、受信アンテナの高さは 2.0 m である。一方、送信アンテナは、高さ 0.85 m の位置にダイポールアンテナ垂直に設置し、縦横 0.25 m の格子状に水平移動させた。

表 1 アレーアンテナシステム諸元
Table 1 Array antenna system parameters.

RF Frequency	2.335 GHz
RF Output	-17 dBm (0.02 mW)
Modulation	$\pi/4$ -shift QPSK, 42 kbit/s
Array Antenna Type	8-element Linear Array
Element Spacing	Half-wavelength of Carrier
Antenna Element	Microstrip Antenna
IF Frequency	450 kHz
AD Converter	12 bit, 2 MHz

このとき図 5 の左上の Base Point の場所を 1、右に 0.25 m 移動させた場所を 2 というように、数字は送信機の場所のインデックス番号を示している。このときインデックス番号 22 や 286 の地点は受信点から見通し外の位置となる。

アレーアンテナで受信された信号は、IF 周波数 450 kHz に変換され、2 MHz のサンプリング周波数でサンプルし保存された。実験で使用したアレーアンテナ及び送信機的主要諸元を表 1 に示す。装置の詳細は文献 [29] を参照されたい。

5.2 位置指紋による位置推定

送信アンテナを数字で示されるインデックスの場所に従って位置を変え、それぞれの位置からの信号を Rx の位置に固定されたアレーアンテナにより受信した。各地点での受信データからスナップショット数 512 を使用して共分散行列を計算し、次元 d ($d = 8$) の信号部分空間の計算を行った。そして位置の番号を場所インデックスとするデータベースを作成した。次に、再び送信アンテナを場所インデックスの位置に移動させてデータを取得し、受信された信号の信号部分空間とデータベースの信号部分空間との角度の計算を行った。すべての場所インデックスにおいて、角度 α_1 が最も小さくなる (若しくは $\cos \alpha_1$ の最大となる) データベースの場所インデックスの位置を送信機の位置の推定値とし、各インデックス位置に送信アンテナを置いたときに推定された位置の結果を図 6 に示す。横軸は実際の送信機の場所 (インデックス番号) であり、縦軸はそのときの推定位置である。このとき使用したアレーアンテナ素子数は 8 ($d = 8$)、推定に使用されたサンプル数は 512 個である。結果より、この条件ではすべての位置が推定でき、提案の方法の有効性が確認された。

次に、角度が最も大きくなる角度を特徴量として推定した結果を図 7 に示す。その他の条件は前と同じである。結果より、角度が最も小さいものを利用した場

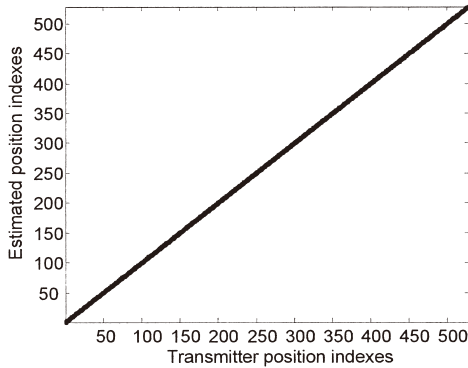


図 6 送信機の位置推定結果 (α_1 使用)
Fig. 6 Estimated terminal locations with α_1 .

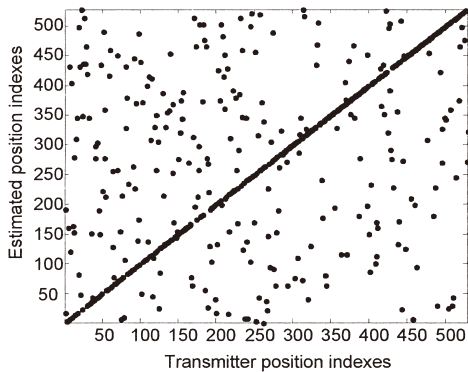


図 7 送信機の位置推定結果 (α_8 使用)
Fig. 7 Estimated terminal locations with α_8 .

合と比べ推定結果に多くの誤りが発生している．この結果より，この手法における位置推定のための特徴量として最小の角度 α_1 を用いることが有効であることが分かる．

更に，前処理としてサブアレーサイズ 4 の空間平均処理 [28] を行い，最小となる角度を特徴量として位置推定を行ったところ，図 5 の 528 個の地点において約 3% の推定の誤りが発生した．

次に，送信点が場所インデックス 142 (Base Point から 1.25 m 右，1.25 m 下，見通し内) に置かれた場合に，受信信号とデータベースから計算される $\cos \alpha_1$ を図 8 (上) に示す (図では特徴を視覚的に識別しやすくするため角度 α_1 ではなく $\cos \alpha_1$ で表示)．横軸はデータベースの場所インデックス，縦軸は場所インデックス 142 から得られた信号空間とデータベースから計算された $\cos \alpha_1$ である．結果より，場所インデックス 142 において $\cos \alpha_1$ が最大の値 (角度 α_1 は最

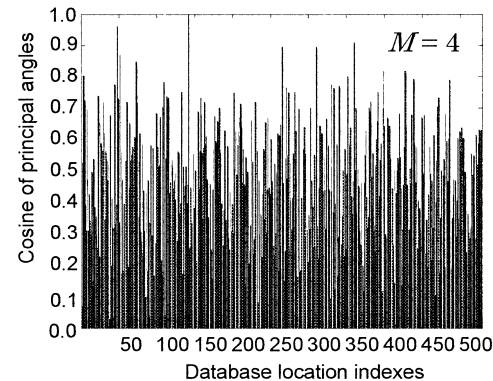
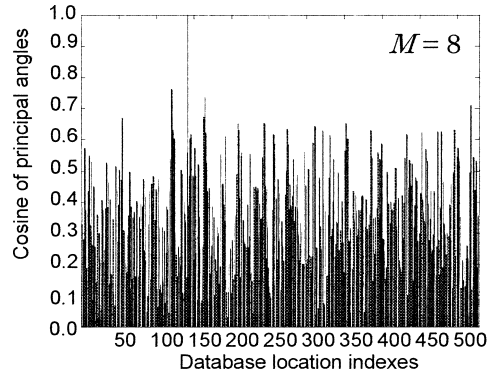


図 8 データベースと位置 142 の観測信号の信号部分空間の $\cos \alpha_1$ (上：素子数 8，下：素子数 4)
Fig. 8 Calculated cosine of principal angles between signal subspaces of database and measured signals (for transmitter located at 142, Above: $M = 8$, Below $M = 4$).

小の値) をもつが，142 に近接した場所を含めその他のインデックス (場所) では $\cos \alpha_1$ はどれも低い値になっている．つまり，場所インデックス 142 以外のデータベースと場所インデックス 142 における信号部分空間間の角度が大きいことを示す．また，使用するアンテナ素子数を 4 とした場合の結果を図 8 (下) に示す．8 素子の場合には α_1 の平均値は 71.3 度 ($\cos \alpha_1$ の平均値は 0.32) に対し，4 素子の場合には平均値が 63.9 度 ($\cos \alpha_1$ の平均値は 0.44) となり，素子数を 4 に減少させた場合，正しい場所以外の α_1 の値が小さくなる傾向にあるが，この実験では 4 素子でも正しい位置が推定可能であることが確認できた．更に素子数を 8，場所インデックス 240 の場合の結果を図 9 に示す．ここは見通し外であるが．見通し内の場合と同様に位置が識別できていることが分かり， α_1 の分布も見通し内の場合と大差がないことが確認された．

以上の結果より，規範として最小角度を利用する理

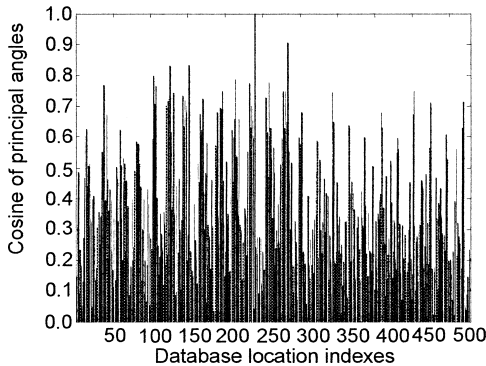


図 9 データベースと位置 240 の観測信号の信号部分空間の $\cos \alpha_1$ (素子数 8)

Fig. 9 Calculated cosine of principal angles between signal subspaces of database and measured signals (for transmitter located at 240, $M = 8$).

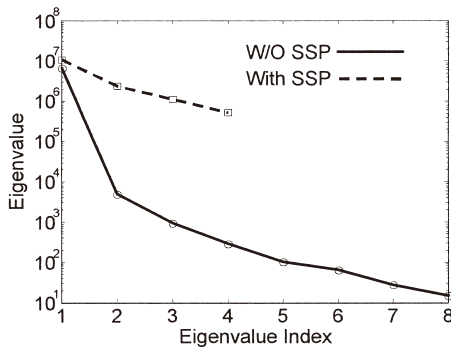


図 10 位置 240 における固有値分布 (実線: 空間平均処理なし, 破線: サブアレーサイズ 4 の空間平均処理あり)

Fig. 10 Calculated eigenvalue distribution with/without spatial smoothing processing (SSP) for transmitter located at 240, $M = 8$ and subarray-size= 4.

由と空間平均処理を行ったときの結果について考察を行う。図 10 に、場所インデックス 240 におけるスナップショット数 512 を使用して空間平均処理なし (素子数 8, 実線) と空間平均処理 (サブアレーサイズ 4, 破線) の場合の固有値の分布を示す。これより、空間平均処理なしの場合は、第 1 (最大) 固有値とその他の固有値の差が大きいことが分かる。これは相関の高い狭帯域信号がアレーアンテナに入射しているため (つまりマルチパス環境のため)、式 (7) で示したようにステアリング行列で張られる空間のランクが減少することに起因している。このため最大固有値に対する固有ベクトルが受信信号を特徴づける主たる要素として機能

していると考えられる。提案の手法では二つの部分空間を構成するベクトル間の角度を比較している。この結果のようにスナップショット数が比較的大きく、狭帯域信号を扱う場合、二つの信号部分空間の類似性の比較を行うには、最大固有値に対する固有ベクトル間の角度を比較することが合理的であり、結果として最小角度を採択することが良い結果となると考えられる。

一方、空間平均処理を行った場合、アンテナ素子数の自由度の制限はあるが、信号部分空間のランクは保たれ、それに対応する固有値と固有ベクトルが得られることになる。つまり、到来波数に対応した固有ベクトルが得られ、受信点における複数の入射波の情報が分離される形になる。本手法で特徴量として利用する固有ベクトルは一つであるため、空間平均を行わない場合の方が一つの固有ベクトルに複数の入射角の情報が積分され、結果として本手法で利用する特徴量として有効に機能していると考えられる。

5.3 屋内位置推定のまとめ

提案の手法により屋内の無線局の位置推定を行った結果を以下にまとめる。

- データベースと受信信号の信号部分空間の特徴量を比較する場合、部分空間間の角度を位置推定の規範として利用できる。また狭帯域信号を扱うとき、信号部分空間の角度は最小となるものを採用する。
- 正確な信号部分空間のデータベースが構築できれば一次元のアレーアンテナを使用した場合でも高精度な二次元位置推定が行える。
- 屋内のようなマルチパスが多い環境において信号部分空間間の角度を特徴量とする場合、隣接する場所も含めて他の場所との相関は低い。
- 多くのインデックスをもつデータベースを作成することは現実的には難しい場合があるため、インデックスをもたない場所のデータベースを補間するような検討が必要である。
- 空間平均処理は提案の手法の規範を狭帯域信号に使う限りでは有効な処理ではない。しかし、固有値の分布に応じて複数の principal angle を使用した規範を今後検討する必要がある。

6. 屋外無線局位置推定

提案の手法を屋外実験において取得されたデータに適用し、屋外における位置推定について検討を行った。

6.1 実験概要

モータースポーツ無線協会では、モータースポーツ

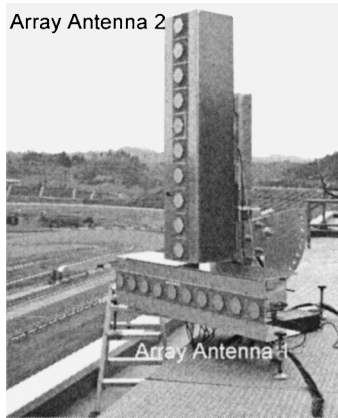


図 11 受信アレーアンテナの概観

Fig.11 Receiving array antennas overview.

表 2 アレーアンテナシステム諸元
Table 2 Receiving array antenna specifications.

Receiving antenna	10 elements linear array antenna
Element spacing	0.8 wavelength of carrier wave
Type of antenna	Patch antenna
IF output frequency	1.9648 MHz

の振興や安全で効率的な競技の運営を図るために、競技車両（2 輪車または 4 輪車）の走行位置をいっせいに把握し表示させることなどを目標に検討を行っている^(注1)。このような背景のもと、GPS やアレーアンテナなどを使用してサーキット場における車両の位置推定方法を検討するため、モータースポーツ無線協会と共同で栃木県「ツインリンクもてぎ」にて実験を行った。

使用した受信アレーアンテナ装置は 1.74 GHz 帯の 10 素子等間隔直線アレーアンテナである [30]。ただし記録装置の制約上、実験では 8 素子を使用した。水平方向と垂直方向の逆 T 字に配置された二つの直線アレーアンテナで受信された信号は、約 1.9 MHz へ変換された後、4.375 MHz で A-D 変換され記録された。設置されたアレーアンテナの外観を図 11 に示し、主な仕様を表 2 に示す。

自動車（移動局）の位置、基準局の位置及びアレーアンテナの位置を示すために、サーキットのスタートラインを原点 (0,0,0) として図 12 に示されるようにコースに沿って Y 軸、コースに垂直に X 軸、そして、地面からの高さ方向を Z 軸として座標を設定した。図 13 は座標原点（スタートライン）近くの拡大図である。地上高 1.5 m のアンテナをもつ車を移動局

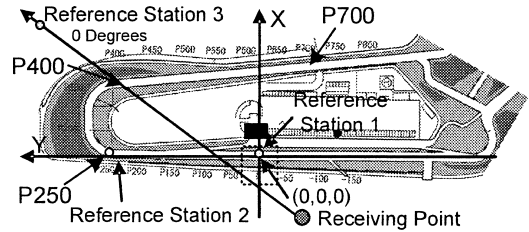


図 12 送信点及び受信点の配置

Fig.12 Locations of array antenna and transmitters.

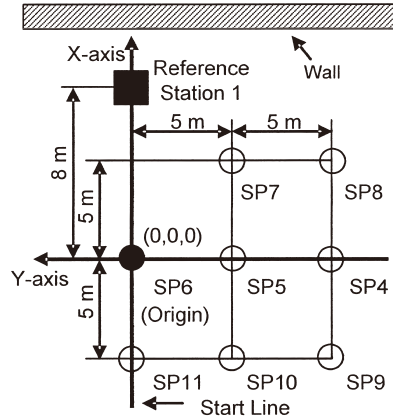


図 13 座標原点近くの拡大図

Fig.13 Enlargement of area shown in Fig.12.

として位置を変え、図 12 及び図 13 で示される地点に停止させ、サーキットの観客席にある地上高 31 m の屋上に設置されたアレーアンテナで受信しデータを記録した。また位置を固定した三つの異なる周波数の送信機を基準局（Reference Station1-3 と記述）として、図 12 で示される位置に配置した。

水平方向の角度を推定するアレーアンテナ 1 は基準局 3 の方向を 0 度とし、垂直方向を推定するアレーアンテナ 2 は垂直に設置した。このアレーアンテナを設置した地点からの景観を図 14 に示す。また、表 3 にアレーアンテナ設置点、各基準点、主な測定点の座標を示す。このコースでは図 12 の -150 と記される地点から P550 地点まではほぼ見通し内となっているが、P400 及び P700 以降の地点は見通し外となっている。

6.2 到来方向による位置推定

各測定点において 20000 サンプルを用意し、それを

(注1): モータースポーツ無線協会はモータースポーツの振興の一環として、競技車両の位置を表示するシステム (CAR Position Information System, CARPIS) を提唱し、検討委員会を 2005 年に設立した。

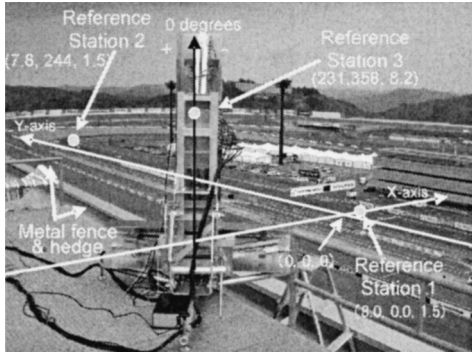


図 14 実験で使用したサーキット (ツインリンクもてぎ西コース)

Fig. 14 Experimental field overview (West course of Twin-Ring Motegi).

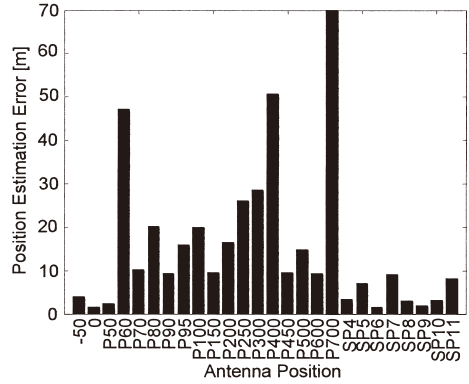


図 15 移動局の位置推定値誤差

Fig. 15 Estimation errors of mobile terminal positions.

表 3 図 12 の主な移動局位置座標

Table 3 Position coordinates of positions in Fig. 12.

Locations	x [m]	y [m]	z [m]
Array1	-107.0	-78.0	31.7
Array2	-107.0	-78.0	32.5
Reference Station 1	8.0	0.0	1.5
Reference Station 2	7.8	244.0	1.5
Reference Station 3	231.0	358.0	8.2
-50	0.0	-50.0	1.5
P50	0.0	50.0	1.5
P60	0.0	60.0	1.5
P70	0.0	70.0	1.5
P80	0.0	80.0	1.5
P90	0.0	90.0	1.5
P150	0.0	150.0	1.5
P200	0.0	200.0	1.5
P250	6.4	249.0	1.5
P400	115.0	207.0	1.5
P450	120.0	157.3	1.5
P600	135.0	8.2	1.5
P700	145.0	-91.2	1.5
SP6	0.0	0.0	1.5

256 サンプルのブロックに分け、各ブロックに対して FFT を適用し各基準局及び移動局を分離した。その後、各周波数別に共分散行列を計算した。使用する各アレーアンテナの素子数を 8 とし、到来方向推定法として (1) サイドローブ 20 dB のチェビシェフ分布をもつビームフォーマ法 (2) MUSIC (3) 空間平均付き MUSIC (サブアレー素子数 4, 推定信号個数 1), 以上三つの手法により、水平及び垂直方向の到来方向を推定した。各手法に関しては [31] などの文献を参照されたい。それぞれの手法による結果を比較したところ、この実験ではどの推定方法でも推定値がほぼ一致することが確認されたため (1) のビームフォーマ法

で 3 回推定を行い、その結果の平均値を到来方向として採用した。

次に移動局のアンテナ高を 1.5 m, サーキットは水平と仮定し、推定された二つの到来方向情報のみを使用し、図 12 の座標系により位置に換算したときの位置推定誤差を図 15 に示す。この結果、見通し内の地点では 10 m 程度の位置推定精度が得られているが、特異点の P60 と見通し外の P400 及び P700 では、誤差が大きくなっている。一般に角度から位置を推定する場合、位置推定精度は送信点と受信点間の距離に依存する。この実験の場合、送受信点間の距離は最短で約 110 m であり、最長で約 330 m である。このため同じ角度推定精度を仮定すると、最大で 3 倍ほど遠方の推定精度が悪くなる。一方、実験結果では、遠方にある P400 及び P700 地点に移動局がいるとき誤差が 50 m 以上となっているため、距離による影響よりも見通し外による角度推定誤差の影響が大きいと考えられる。また、スタートラインに近い地点 (SP4 から SP11) では、送受信点間距離が近く、送信点周囲の状態からマルチパスの影響は少ないと考えられるため、10 m 程度の位置推定精度が得られている。

6.3 位置指紋による屋外無線局位置推定

到来方向推定値のみを使用した位置推定では、見通し外などにおいて推定値が大きく劣化することが確認された。4. で提案した位置指紋による位置推定法を、この屋外の無線局位置推定に適用し位置推定を試みた。適用方法は屋内の場合と基本的に同じであるが、ここでは水平及び垂直方向の array 1 と array 2 で観測された二つの信号を合わせ、次数が 16 の共分散行列を

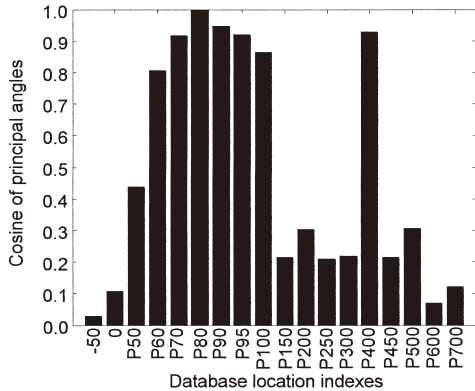


図 16 データベースと位置 P80 の観測信号の信号部分空間の $\cos \alpha_1$

Fig. 16 Calculated cosine of principal angles between signal subspaces of database and measured signals (for transmitter located at P80).

利用した。適用した結果、3 回の試行のうち測定点における移動局すべての位置が正確に推定された。つまり、屋内の結果と同様にデータベースの同じ位置に移動局がいれば、見通し内及び見通し外にかかわらず推定できることになる。

移動局が P80 (見通し内) に置かれたとき、到来方向を推定したときと同じ条件で計算されたデータベースと受信信号間の $\cos \alpha_1$ を図 16 に示す。このとき、 $\cos \alpha_1$ が最も大きな値を指す地点は、実際の無線局の位置と一致しているが、P80 地点から ± 30 m 以内では、 $\cos \alpha_1$ の値が互いに近接していることが分かる。また P400 でも値が大きくなっている。このことは P400 地点及び P80 地点 ± 30 m 程度の範囲では特徴量の相関が高いことを示している。屋内の結果では近接した地点でも $\cos \alpha_1$ の値が大きく変化しているのに対して、屋外の場合は変化が少ないことが特徴である。また、P80 と P400 は受信点からほぼ直線上に配置していることは興味ある結果といえる。

更に、図 13 に示す座標原点近くで測定されたデータを利用して、座標原点 SP6 の位置における信号部分空間とデータベース上の SP6 に近接する他の位置の信号部分空間から計算された $\cos \alpha_1$ の値を図 17 に示す。この結果も屋内の結果とは異なり、5 m 間隔の位置の違いでも特徴量に相関が高いことが分かる。

6.4 屋外位置推定のまとめ

実験により屋外の無線局の位置推定を行った結果を以下にまとめる。

- 実験で用いた環境及びシステムでは、到来方向

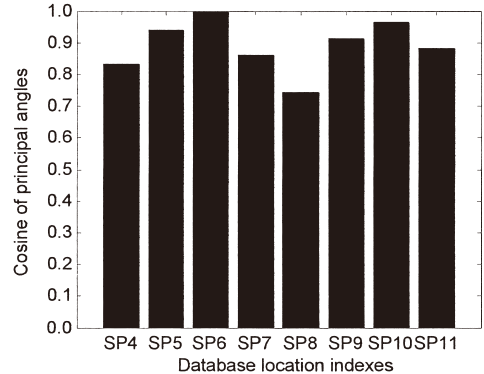


図 17 データベースと位置 SP6 の観測信号の信号部分空間の $\cos \alpha_1$

Fig. 17 Calculated cosine of principal angles between signal subspaces of database and measured signals (for transmitter located at SP6).

情報のみを用いた場合、見通し内の約 300 m 以内の範囲では 10 m 程度の位置推定精度が得られるが、見通し外では誤差が大きくなり実用的ではない。

- データベースと受信信号の信号部分空間の特徴量を比較する場合、屋外においても部分空間間の角度を位置推定の規範として利用できる。

- 提案の信号部分空間間の角度を特徴量とする場合、マルチパスが多い屋内の環境と比較すると屋外では隣接する場所の相関は高い。

- 推定範囲が広い場合は、多くのインデックスをもつデータベースを作成することになり実用的でない場合がある。屋内と同様にインデックスをもたない場所のデータベースを補間するような検討が必要である。

7. む す び

本論文では屋内外の無線局の位置推定について、アレーアンテナから得られる信号部分空間の情報を利用した手法について位置推定手法を提案し、実験を通してその有効性の基礎的な検討を行った。屋内では、データベースを詳細に構築すれば、一次元のアレーアンテナで屋内の無線局の位置を推定できることが確認された。また屋外の実験では、見通し外において到来波の角度情報のみでは位置がうまく推定できない場合でも、提案の手法では見通し外を含め無線局の位置が精度良く推定できる可能性を示すことができた。ただし、提案の手法は推定のためのデータベースが必要になるため、詳細なデータベースの構築方法や広範囲へ適用する場合の課題などが残されている。今後、角度

や時間情報などを用いる手法の長所も取り入れることやデータベースの作成方法の検討を通して無線局位置推定手法を発展させる予定である。

文 献

- [1] T.S. Rappaport, J.H. Reed, and B.D. Woerner, "Position location using wireless communications on highways of the future," *IEEE Commun. Mag.*, vol.34, no.10, pp.30–41, Oct. 1996.
- [2] J.H. Reed, K.J. Krizman, B.D. Woerner, and T.S. Rappaport, "An overview of the challenges and progress in meeting the E-911 requirement for location service," *IEEE Commun. Mag.*, vol.36, no.4, pp.30–37, April 1998.
- [3] J. Hightower and G. Borriello, "Location systems for ubiquitous computing," *Computer*, vol.34, no.8, pp.57–66, Aug. 2001.
- [4] S. Tekinay, E. Chao, and R. Richton, "Performance benchmarking for wireless location systems," *IEEE Commun. Mag.*, vol.36, no.4, pp.72–76, April 1998.
- [5] S. Guolin, C. Jie, G. Wei, and K.J.R. Liu, "Signal processing techniques in network-aided positioning: a survey of state-of-the-art positioning designs," *IEEE Signal Process. Mag.*, vol.22, no.4, pp.12–23, July 2005.
- [6] A.J. Weiss, "On the accuracy of a cellular location system based on RSS measurements," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol.52, no.6, pp.1508–1518, Jun. 2003.
- [7] M. Hata and T. Nagatsu, "Mobile location using signal strength measurements in a cellular system," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol.29, no.2, pp.245–251, May 1980.
- [8] 川端 学, 朝生雅人, 齋川貴彦, 服部 武, "セルラーシステムにおける最ゆう推定法に基づく TDOA システムの位置検出性能評価" ; 信学論 (B), vol.J87-B, no.2, pp.285–291, Feb. 2004.
- [9] L. Cong and W. Zhuang, "Hybrid TDOA/AOA mobile user location for wideband CDMA cellular systems," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol.1, no.3, pp.439–447, 2002.
- [10] A. Tarighat, N. Khajehnouri, and A.H. Sayed, "Improved wireless location accuracy using antenna arrays with interference cancellation," *Proc. IEEE Int. Conf. Acoustics, Speech, and Signal Processingk'03*, vol.4, pp.616–619, April 2003.
- [11] J. Kennedy and M.C. Sullivan, "Direction finding and "smart antennas" using software radio architectures," *IEEE Commun. Mag.*, vol.33, no.5, pp.62–68, May 1995.
- [12] S. Mangold and S. Kyriazakos, "Applying pattern recognition techniques based on hidden Markov models for vehicular position location in cellular networks," *Proc. IEEE 50th Vehicular Technology Conference*, vol.2, pp.780–784, Sept. 1999.
- [13] 菊池祥平, 辻 宏之, 三浦 龍, 佐野 昭, "マルチバス環境における周辺散乱モデルに基づく無線局の位置特定法" ; 信学論 (B), vol.J87-B, no.12, pp.2020–2028, Dec. 2004.
- [14] C. Nerguizian, C. Despins, and S. Affes, "A framework for indoor geolocation using an intelligent system," 3rd IEEE Workshop on WLANs, pp.1–38, Boston, Sept. 2001.
- [15] A. Pages-Zamora, J.V. Manzano, and D.H. Brooks, "Closed-form solution for positioning based on angle of arrival measurements," *Proc. 13th IEEE Int. Symp. Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, pp.1522–1526, Lisbon, Portugal, Sept. 2002.
- [16] Y.T. Chan and K.C. Ho, "A simple and efficient estimator for hyperbolic location," *IEEE Trans. Signal Process.*, vol.42, no.8, pp.1905–1915, Aug. 1994.
- [17] N. Khajehnouri and A.H. Sayed, "A non-line-of-sight equalization scheme for wireless cellular location," *Proc. IEEE Int. Conf. Acoustics, Speech, and Signal Processing*, vol.6, pp.VI549–52, April 2003.
- [18] W. Hahn and S. Tretter, "Optimum processing for delay-vector estimation in passive signal arrays," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol.19, no.5, pp.608–614, Sept. 1973.
- [19] K. Kaemarungsi and P. 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.
- [20] L. Xinrong, K. Pahlavan, M. Latva-Aho, and M. Ylianttila, "Indoor geolocation using OFDM signals in HIPERLAN/2 wireless LANs," *Proc. PIMRC2000*, vol.2, pp.1449–1453, Sept. 2000.
- [21] P. Bahl and V.N. Padmanabhan, "RADAR: An in-building RF-based user location and tracking system," *Proc. IEEE Nineteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM 2000)*, vol.2, pp.775–784, March 2000.
- [22] Y. Gwon, R. Jain, and T. Kawahara, "Robust indoor location estimation of stationary and mobile users," *Proc. Twenty-third Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM 2004)*, vol.2, pp.1032–1043, March 2004.
- [23] R.O. Schmidt, "Multiple emitter location and signal parameter estimation," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol.AP-34, no.3, pp.276–280, March 1986.
- [24] M. Nezafat, M. Kaveh, H. Tsuji, and T. Fukagawa, "Subspace matching localization: A practical approach to mobile user localization in microcellular environments," *Proc. IEEE 60th Vehicular Technology Conference*, vol.7, pp.5145–5149, Sept. 2004.
- [25] H. Tsuji, S. Kikuchi, and M. Kaveh, "Indoor localization using subspace matching: An experimental evaluation," *Proc. Fourth IEEE Workshop on Sensor Array and Multichannel Processing*, pp.541–545,

July 2006.

- [26] M. Nezat, M. Kaveh, and H. Tsuji, "Indoor localization using a spatial channel signature database," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol.5, no.1, pp.406-409, Dec. 2006.
- [27] G. Golub and C.V. Loan, *Matrix Computations*, The Johns Hopkins University Press, 1996.
- [28] S.U. Pillai and B.H. Kwon, "Forward-backward spatial smoothing techniques for the coherent signal identification," *IEEE Trans. Acoust. Speech Signal Process.*, vol.37, no.1, pp.8-15, Jan. 1989.
- [29] A. Kanazawa, H. Tsuji, H. Ogawa, Y. Nakagawa, and T. Fukagawa, "An experiment study of DOA estimation in multipath environment using an adaptive array antenna equipment," *Proc. Asia-Pacific Microwave Conf.*, pp.804-807, Australia, Dec. 2000.
- [30] H. Tsuji, N. Hirosaki, H. Matsuno, and R. Miura, "An experiment of mobile localization system using a low altitude stationary flight test vehicle and array antennas," *Proc. International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications*, pp.1895-1899, Sept. 2005.
- [31] 菊間信良, *アレーアンテナによる適応信号処理*, 科学技術出版, 東京, 1998.

(平成 19 年 1 月 22 日受付, 5 月 14 日再受付)



辻 宏之 (正員)

昭 62 慶大・理工・電気卒・昭 64 同大大学院修士課程了・平 4 同大学院博士課程了・同年郵政省通信総合研究所(現情報通信研究機構)入所, 現在に至る。以来, 通信における信号処理等の研究に従事。平 7 本会学術奨励賞受賞。工博。