

# 電波伝搬と位置推定

RADIO WAVE PROPAGATION AND WIRELESS LOCATION ESTIMATION

山田寛喜

Hiroyoshi Yamada

新潟大学工学部 情報工学科

Department of Information Engineering, Faculty of Engineering, Niigata University

## 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の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や基地局側（以降、単に AP とする）から端末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、電波到来方向 (Angle-Of-Arrival, AOA), 到来遅延時間 (Time-Of-Arrival, TOA), 到来時間差 (Time-Difference of Arrival, TDOA), あるいは受信信号強度 (Received Signal Strength, RSS) など、様々な手法（およびその組み合わせ）による推定が試みられている [1], [2]。このように無線端末の位置推定においては、見通しの有無、マルチパス波の存在のため、精度のよい推定を行うには、複数の手法を併用したネットワーク型の推定が必須であるのが現状である。

位置推定精度を改善する一つのアプローチは、上述の個々の手法のマルチパス環境におけるロバスト性を高めることと言える。筆者等の研究グループではアレーアンテナを用いた到来推定 (AOA) に関する研究を行っている。MIMO システムの普及に伴い、アレー信号処理の応用の進展が期待される。そこで本稿では AOA ベースの位置推定システムに限定して、屋内などの強いマルチパス環境下における位置推定の難しさ、およびロバスト性を高めるための試みに関して議論している。

## 2 アレーアンテナを用いた位置推定手法

アレーアンテナを用いた到来方向推定としては、古典的なビームフォーマーから、部分空間の概念を用いた MUSIC 法など様々な手法が存在する。見通し (LOS) 環境において直接波が非常に強い場合には、それらの手法で端末の方位、さらに比較的端末が近距離（球面波としてアレーに到来する場合）ならば、方位と距離、すなわち位置の推定が可能となる。しかし、屋内伝搬のように多数のコヒーレントマルチパス波が到来する場合、これらのアプローチは機能せず、またアレー素子数の制約から、素波の分離も現実的とは言えない。

アレーアンテナを用いた無線端末位置推定手法として、アレー空間データを位置指紋とした推定手法が提案されている [3]。この手法では、個々のマルチパス波ではなく、アレー受信データ自体（合成波）に着目することで、

素波数問題を回避している。いうまでもなく、複雑なマルチパス環境になるほど、AP での受信データの端末位置依存性は高くなる。その性質を利用して位置推定を行う手法である。まず、この手法の特性を通して、アレーによる位置推定問題を考察する。

### 2.1 位置指紋による端末位置推定

位置指紋アルゴリズムは、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。マルチパス環境では全ての素波はコヒーレントなので、探索対象空間の個々のデータベース作成点（以降、参照点）からの到来波が張る信号部分空間は1つの固有ベクトル  $u$  で特徴付けられる。端末位置推定においては、位置推定では、観測信号から得られた信号部分空間  $v$  と上記参照点データの信号部分空間との一致度を次式により評価する [3]。

$$\cos \alpha_k = |u_k^H v|, \quad k = 1, 2, \dots, K \quad (1)$$

ここで  $K$  は参照点の数である。この  $\cos \alpha_k$  を最大とする  $k$  が推定位置となる。

簡単な2次元屋内伝搬シミュレーションにより、この手法の特徴と問題点を考察しよう。シミュレーション環境は図1のような  $9 \text{ m} \times 7 \text{ m}$  の屋内とした。AP は周波数は  $2.4 \text{ GHz}$  の8素子等間隔リニアアレーで、壁面は全てコンクリート、最大反射回数を3回としてレイトラッキングにより評価した。図中の  $0.25 \text{ m}$  間隔の点がデータベースを作成した評価点である。図2が  $(x, y) = (3.05 \text{ m}, 6.90 \text{ m})$  地点の端末位置を推定した結果である。図中の濃淡は式(1)の  $\cos \alpha_k$  の大きさである。同図から分かるように端末に一致した地点で最大値となり、隣接した地点においても  $0.7$  以下の値をとり、高精度な位置推定を可能としている。マルチパス波が多いほど、位置変化による素波間伝搬距離差、それに伴う位相変化が生じ、受信データの大きな変化となる。このため高精度な位置推定が実現される。

この結果は、アレーを用いた位置推定の難しさを如実に表している。素波に着目するマイクロな視点からの推定が難しいため、受信データ自体に着目したマクロなアプローチしたものであるが、波長オーダーの位置変位が問題となってしまう。すなわち、波長オーダーの位置精度のデータベースが必要となることを意味し、実測に基づくデータベース構築は難しい。伝搬シミュレータによる

データベース構築では、モデリングの精度にもよるが、受信データ自体の精度は十分とは言えない。また、正確なデータベースが構築できたとしても、環境の変動に対してロバストな推定は難しいことが予想される。このように素波に着目したマイクロなアプローチ、合成波に着目したマクロなアプローチ共に実用上の大きな困難を抱えているのが、アレー位置推定問題の現状である。

### 3 マルチパス伝搬と信号部分空間

近年の伝搬モデル研究の発展により、多数のマルチパス波が存在する屋内外の伝搬路を、いくつかの角度方向からのクラスタとして取り扱うことで精度の良いモデルとなることが示されている。これをアレー信号処理的な簡単から考えると、これらのクラスタが代表する数個の角度方向により張られた信号部分空間に受信信号のほとんどが射影されることとなる。たとえ受信時にあるクラスタが遮蔽（素波複素振幅が変動）した場合であっても、受信データはほぼ射影されることとなる。このように、クラスタに着目することにより、振幅変動に対してロバストな推定が実現されるものと予想される。

上記コンセプトの妥当性を検証するために行った数値計算結果の一例を図3に示す。これはデータベース作成時に基準点および $\pm x$ 方向に $0.5\lambda$ シフトした地点のデータを用いた送信側SSPによる相関抑圧[4]により3次元の信号部分空間としてクラスタ分解を行った個々の参照点の位置推定誤差である。参照点位置の評価式は、

$$\cos \alpha_k = |\mathbf{v}^H \mathbf{E}_{S_k} \mathbf{E}_{S_k}^H \mathbf{v}|^{1/2}, \mathbf{E}_{S_k} = [\mathbf{u}_{1k}, \mathbf{u}_{2k}, \mathbf{u}_{3k}] \quad (2)$$

となる。なお、図3の推定では、端末受信データ取得時に、APで $20^\circ \sim 50^\circ$ 方向が遮蔽された環境変化を与え、図1の各評価点の位置誤差を評価している。図3より、提案手法では環境変化に対してロバストで安定した推定が実現されていることが分かる。

ここでは主要な到来方向の分解手法として送信SSPを施し、データベース構築を行ったが、実測によるデータベースの構築は現実的ではなく、伝搬シミュレータの活用が期待される。提案するアプローチでは主要クラスタ（多くの場合、直接波、1回反射波）の方位のみが重要なパラメータであり、実際の電界値は不要である。すなわち、屋内環境の概形に基づく簡易な伝搬シミュレーションでデータベースの構築が可能となることが予想される。計算機の発展に伴い、このようなシミュレータとの融合手法も実現可能なレベルになるものと考えている。

### 4 まとめ

多数のマルチパス波が存在する移動伝搬環境において、品質の高い位置情報サービスを実現するには所望の精度、伝搬環境、システム要件に応じて、各種の推定手法から適切なものを選択・融合した推定が必要となる。推定精度の向上には、個々の推定手法の改善が必要である。本稿ではマルチパス環境下でのAOAに基づく位置推定の問題点と可能性に関して論じた。

謝辞 本研究は科研費 基盤研究(C)20560349の助成を

受けたものである。なお、シミュレーション結果は研究室学生黒崎雄太君の協力によるものである。

### 参考文献

- [1] A. H. Sayed, *et. al.*, IEEE Signal Processing Magazine, vol.22, no.7, pp. 24–40, July 2005.
- [2] F. Gustafsson, *et. al.*, IEEE Signal Processing Magazine, vol.22, no.7, pp. 41–53, July 2005.
- [3] 辻 宏之, 信学論B, vol.J90–B, no.9, pp. 784–796, 2007年9月.
- [4] N. Endo, *et. al.*, IEICE Trans. Commun., vol.E90–B, no.9, pp. 2297–2302, Sept. 2007.

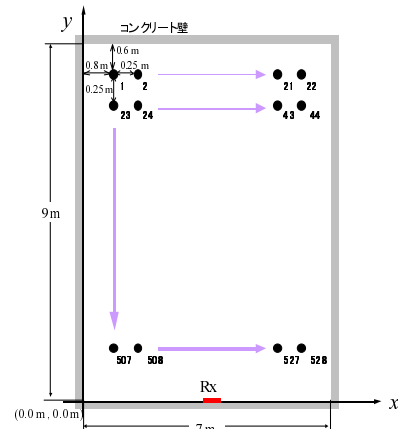


図1 シミュレーション環境と参照点配置

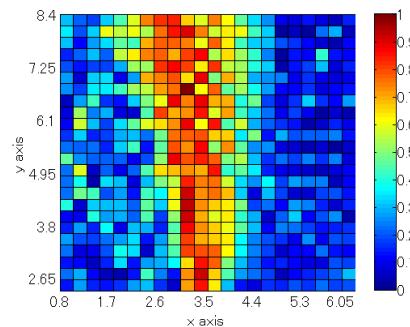


図2 位置指紋法推定結果例。(x, y) = (3.05m, 6.90m).

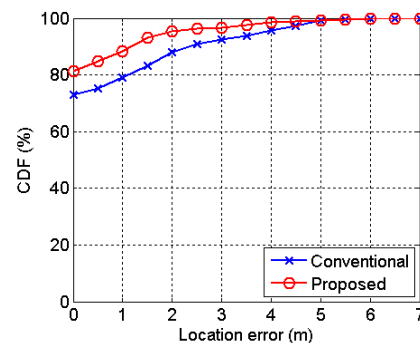


図3 従来法および改良手法による位置推定精度。(20° ~ 50° 方向遮蔽あり)