

鏡像法による電界強度分布モデリングに基づく 位置推定手法

寺本 やえみ^{1,a)} 浅原 彰規^{1,b)}

受付日 2012年4月7日, 採録日 2012年10月10日

概要: 本研究では, 無線電界強度分布のモデリングに基づく屋内測位技術の精度向上の検討を行った. 屋内で無線電波強度を利用した測位を行う場合, 壁などの障害物による反射波の影響で電波強度が変動することが問題となる. そこで, 反射の影響を組み込んだ電界強度分布モデルを考案し, 教師データを用いてモデルパラメータを学習したうえで, このモデルを利用して測位を行う手法を提案した. 提案手法について, 実際に測位環境を構築し評価実験を行った. その結果, 提案手法は平均測位誤差 3.1 m を実現し, 従来手法に対して測位誤差を 0.6 m 低減させたことを確認した. また提案手法は, 教師データの数や選び方によらず, さらに測位デバイス数を減らした場合でも, 平均測位誤差 3.1~5.4 m を実現することを確認した.

キーワード: 屋内測位, WiFi 測位, 電界強度分布モデル, 鏡像法, 反射波

Positioning Technology Based on Received Signal Strength Distribution Modeling Using Mirror Image Method

YAEMI TERAMOTO^{1,a)} AKINORI ASAHARA^{1,b)}

Received: April 7, 2012, Accepted: October 10, 2012

Abstract: Aiming to solve one of the serious problems of received signal strength (RSS) indoor positioning (namely, fluctuation of RSS values due to reflective waves), a novel indoor-positioning method based on RSS distribution modeling (called “RSS distribution modeling using the mirror-image method,” RDMMI), was developed and evaluated. With RDMMI, a model of RSS distribution is created by using measured RSS and considering reflective waves. RDMMI achieves an average positioning error of 3.1 m, which exceeds that of conventional nearest-neighbor method by 0.6 m. Furthermore, it accomplishes average positioning error of 3.1 to 5.4 m even with few devices or a small set of randomly chosen RSS measurements.

Keywords: indoor positioning, WiFi positioning, RSS distribution model, mirror image method, reflective wave

1. はじめに

近年, 高機能携帯端末 (スマートフォン) の登場と, 携帯端末への GPS (Global Positioning System) 機能搭載の法制化 [1] にともない, 位置情報サービスが急速に普及しつつある. 位置情報サービスとは, 現在地や指定場所に関する情報を取得可能なサービスである. 民生分野では, 経

路案内サービス [2] や見守りサービス [3] などが実用化されている.

位置情報サービスは屋外・屋内を問わずニーズは大きい. その中の 1 つの例としては, 人や物の測位データの分析に基づく意思決定支援があげられる. 他にも, 物流倉庫における従業員や物などの管理, プラントの設備保守点検の支援, 商業施設や公共施設におけるモバイル広告や避難誘導支援があげられる. 商業施設の施設管理者向けには, 当該施設内の歩行者の平均行動パターン [4] や歩行者行動予測の提示 [5], 例外行動の検出 [6], 当該施設の店舗設備の稼働率定量化, 店員配置の推薦など, 意志決定を支援する情

¹ 日立製作所中央研究所
Hitachi, Ltd., Kokubunji, Tokyo 185-8601, Japan

a) yaemi.teramoto.xy@hitachi.com

b) akinori.asahara.bq@hitachi.com

報提示ができる。また、その他の機器と連動することにより、たとえば歩行者が近づく直前まで機器を待機状態にしてエネルギー消費を抑えるといった機器制御 [7] などにも利用できる。

このようなニーズの高まりにもかかわらず、屋内向けの位置情報サービスはまだあまり実用化されていない。これは、屋外よりも地図や測位インフラの整備の遅れているためである。そこで、その整備に向けた様々な取り組みが行われており [8], [9], [10], [11], 屋内向けの測位装置の開発が進められている。屋外での GPS (Global Positioning System) 衛星に加え、無線 LAN の電波を用いた測位基地局 [12] や屋内設置型の GPS 発信器 [13], または多数の人や物の位置を計測・追跡できるカメラやレーザ装置など屋内でも利用できる測位装置の研究開発がさかんに進められている [14]。

本研究では、屋内向け測位装置としては最も安価であり PC やモバイル端末の無線通信に広く普及している、WiFi アクセスポイントを用いた測位技術について提案する。図 1 に本測位技術を実現するシステムの構成を示す。無線電波を用いた測位の方法としては、無線電波強度が発信機と受信機の距離に基づき減衰することを利用した三辺測量がある [16]。しかし、屋内では反射波や障害物の影響が大きく三辺測量では大きく測位精度が低下してしまうという問題がある。そこで、事前に場所とそこで取得できる電波強度の対応表を作成しておき、それに基づき位置を推定するフィンガープリント法と呼ばれる位置推定手法が研究されている [15], [16]。しかし、一般的なフィンガープリント法では環境中のあらゆる地点での電波強度をまんべんなく事前収集しなければならず、測位環境の構築に多くの時間がかかるという問題があった。そこで本研究では、三辺測量と同様に物理モデルを仮定しつつ、フィンガープリント法のように反射波などの影響を加味できる方法として、仮想的な電波発信源において電波伝搬のモデル化する鏡像法による電界強度分布モデリング (Radio Signal Strength Distribution Modeling using

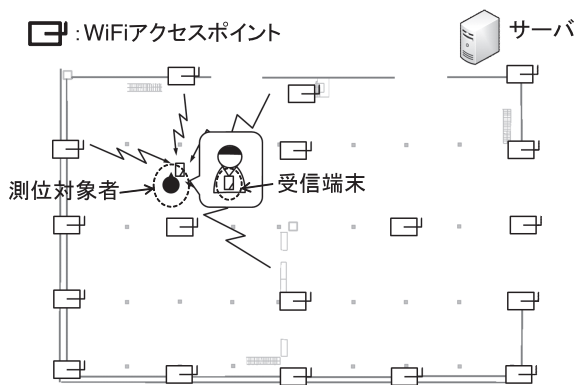


図 1 測位システムの構成
Fig. 1 Positioning system.

Mirror Image Method (RDMMI)) を提案する。また、実際に測位環境を構築して提案手法の測位誤差を計測し、その有効性を評価する。

2. 関連研究

無線電波強度を用いた位置推定の従来手法には、大きく 2 つのアプローチがある。1 つが三辺測量であり、これは電波強度を距離に変換し、距離情報から位置を特定するアプローチである。もう 1 つは教師データを用いるアプローチであり、これは、あらかじめ測位環境内で測定した電波強度を教師データとして、電界強度分布や電波の伝搬をモデル化し、モデルを用いて位置を推定するアプローチである。

2.1 三辺測量

三辺測量は電波強度から位置を推定する最も基本的なアプローチである。この手法では、受信機が受信する電波強度が発信源と受信機の間の距離に従って減衰するという特性を利用して受信機の位置を推定する。図 2 に無線電波強度と発信源からの距離の関係を示す。図では、無線電波強度の単位に、1 mW を基準としたログスケールの単位である dBm を用いた。電波強度は距離の二乗に反比例して単調減衰するので、ログスケールの単位では、図に示すように距離に従って単調減衰する。電波強度の減衰式を次に示す。

$$R[\text{dBm}] = f(x, y, z) = \log_{10}(\text{const}/d^2) \quad (1)$$

式 (1) の定数は、電波発信強度や電波の波長から算出される係数である。 d は発信源と受信位置の間の距離であり、 $d = \sqrt{(x - x'_i)^2 + (y - y'_i)^2 + (z - z'_i)^2}$ で表される。ここで、 (x, y, z) は受信位置、 (x'_i, y'_i, z'_i) は発信源の位置である。

測定した電波強度をこの式 (1) に代入することにより、電波強度の値から発信源と受信位置との距離を逆推定できる。もし、複数の発信源からの電波強度を計測できれば、各発信源と受信機の距離が推定できることになるため、それを用いて受信位置を特定することができる。この式の未知数は x, y, z の 3 つであるので、最低 3 つの発信源の電波が受信できれば、位置の推定ができることになる。三辺

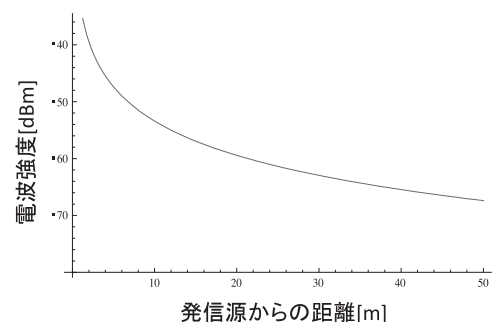


図 2 電波強度の減衰曲線の例
Fig. 2 Example of decreasing radio signal strength.

測定の利点は、あらかじめ教師データを収集するなどの事前作業が不要な点である。欠点は、測位環境による電波強度の揺らぎ（反射波の影響など）を考慮できない点と、発信源の位置が既知である必要がある点である。

2.2 教師データを用いる方法

教師データを用いる方法では、測位環境の電波強度をあらかじめ測定しておく。これを教師データとして電波強度と位置の関係を表すモデルを構築し、このモデルを用いて電波強度から位置を推定する。教師データを用いる方法には、電波強度と位置の確率モデルを生成する方法と、電波伝搬をモデル化する方法の大きく2通りがある。

(1) 電波強度と位置の確率モデルを生成する方法

この方法では、事前に測定した教師データの集合を $\mathbf{C}$ 、各発信源からの電波強度を並べたベクトルを $\mathbf{R} = (R_1, R_2, \dots, R_i)$ とすると、事後確率 $P(x, y, z | \mathbf{R}, \mathbf{C})$ が最大となる受信位置 (x, y, z) を求める。この方法は、フィンガープリント法とも呼ばれる。このアプローチの最も基本的な手法は、最近傍法（Nearest Neighbor 法；NN 法）である。最近傍法では、教師データ $\mathbf{C}$ のうち $\mathbf{R}$ と最も近いものが測定された位置 (x, y, z) を位置推定結果とする。確率モデルを用いた方法の従来研究には、Roos らの機械学習を用いた屋内測位フレームワークがある [15]。Roos らは、最近傍法、カーネル法、ヒストグラム法の3種の方法を比較しており、カーネル法とヒストグラム法が、最近傍法に対して25%~30%平均測位誤差が小さいとの結果を示している。また、Bahl ら [16] は、最近傍法を用いた屋内測位手法について、建物内の廊下に沿って移動した場合の測位誤差が平均3mであったと報告している。また、藤田ら [17] は、大規模な教師データを Gaussian Mixture Model (GMM) でモデル化することによって軽量化し、高速なりアルタイム測位を6~10mの精度で実現した結果について報告している。

(2) 電波伝搬をモデル化する方法

この方法では、電波強度の実測データを用いて、測位環境の電波伝搬特性を数式的にモデリングする。三辺測量で用いる電波強度の減衰式を、教師データを用いて補正することに相当する。Bahl ら [16] は、電波を遮断する障害物の影響を取り入れた Wall Attenuation Factor model (WAF) を提案している。WAF では、発信源と受信位置の間にある障害物数に応じた電波減衰分を、本来とりうる電波強度から差し引く形で、電波伝搬を定式化している。なお、電波強度の減衰は、基本的には障害物数に比例するという単純な定式化を用いている。

これらの方法には、測位環境に依存した反射波の影響などによる電波強度の揺らぎを考慮できるという利点がある。

一方、欠点として、教師データ収集の人的コストが大きい点がある。ただし、電波伝搬をモデル化する方法では、適切なモデリング関数を選べば、少数の教師データのみから有効な電波伝搬モデルを学習できると考えられる。

3. 電界強度分布モデルを用いた測位手法

三辺測量の大きな問題点は、障害物や反射波などによる電波強度の変動を考慮できないことであった。一方、教師データを用いた方法では、教師データ収集のコストが問題となった。そこで本研究では、反射波の影響を加味した電界強度分布モデルを仮定し、教師データを用いて電界強度分布モデルのパラメータを学習する方法を提案する。提案手法では、まず、位置 (x, y, z) における発信源 i から受信した電波強度を、反射波を加味した電界強度分布モデル $f_i(x, y, z; \Theta_i)$ で表現する。 Θ_i は電界強度分布モデルの形状を決めるパラメータであり、詳細は後述する。次に、実測した教師データが電界強度分布モデルと合うように、最尤法によりモデルパラメータ Θ_i を学習する。最後に、学習したモデルパラメータを用いて、事後確率 $P(x, y, z | \mathbf{R}, \Theta)$ が最大となる位置 (x, y, z) を受信位置と推定する。提案手法により、屋内で特に問題となる反射波の影響を考慮することができる。また、教師データをモデルで補間できるため、教師データ収集のコストが低減される。

3.1 電界強度分布モデルの推定

モデルパラメータ Θ_i を推定するステップでは、対数尤度 $\ln P(\Theta | \mathbf{C})$ が最大となるモデルパラメータを決定する。 $\mathbf{C}$ は全発信源の電波強度の実測データの集合を表し、

$$\mathbf{C} = \{(x_1, y_1, z_1, \mathbf{R}_1), (x_2, y_2, z_2, \mathbf{R}_2), \dots, (x_n, y_n, z_n, \mathbf{R}_n)\} \quad (2)$$

である。 (x_n, y_n, z_n) は n 番目の測定の測定位置であり、 $\mathbf{R}_n$ は n 番目の測定の各発信源からの電波強度を表すベクトルである。ここで、各発信源の電波伝搬は独立であると仮定し、 $P(\Theta_i | \mathbf{C})$ を最大にするモデルパラメータ Θ_i を発信源ごとに独立に推定する。すなわち、発信源 i の電界強度分布モデルの最適なパラメータは、次式の対数尤度を最大にする Θ_i である。

$$\ln P(\Theta_i | \mathbf{C}) = \sum_n \ln P(\Theta_i | x_n, y_n, z_n, R_{n,i}) \quad (3)$$

なお $R_{n,i}$ は、 n 番目の測定の発信源 i からの電波強度を表す。ここで、ベイズの定理により、

$$P(\Theta_i | x_n, y_n, z_n, R_{n,i}) \propto P(R_{n,i} | x_n, y_n, z_n, \Theta_i) P(\Theta_i) \quad (4)$$

であり、対数尤度は、

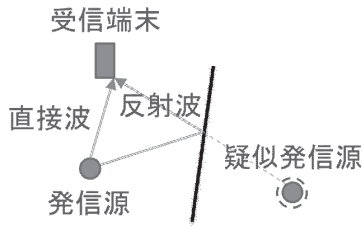


図 3 鏡像法による反射波の足し合わせ

Fig. 3 Mirror image method.

$$\ln P(\Theta_i | \mathbf{C}) = \sum_n (\ln P(R_{n,i} | x_n, y_n, z_n, \Theta_i) + \ln P(\Theta_i)) + \text{const} \quad (5)$$

となる．ここで、 $P(R_{n,i} | x_n, y_n, z_n, \Theta_i)$ が $f_i(x_n, y_n, z_n; \Theta_i)$ を平均とする分散 σ のガウス分布に従うと仮定する．さらに、 $P(\Theta_i)$ は一様分布であると仮定する．これにより、モデルパラメータの対数尤度 $\ln P(\Theta_i | \mathbf{C})$ は次式で表され、式 (6) を最大化するパラメータ Θ_i を求める．

$$\ln P(\Theta_i | \mathbf{C}) = -\frac{1}{2\sigma^2} \sum_n (R_{n,i} - f_i(x_n, y_n, z_n; \Theta_i))^2 + \text{const} \quad (6)$$

式 (6) の最大化は、負の対数尤度 $\frac{1}{2\sigma^2} \sum_n (R_{n,i} - f_i(x_n, y_n, z_n; \Theta_i))^2$ の最小化問題として、最小二乗法（最適解の探索には、ニュートン法 [18]，進化的アルゴリズム [19] などを利用）を用いて解くことができる．分散 σ も本来ならば推定すべきであるが、今回は簡単のため定数とした．

次に、 $f_i(x, y, z; \Theta_i)$ をどのように定式化するかであるが、提案手法では、図 3 に示すように、受信電波は発信源から直接届いた電波（直接波）の強度と、周囲の壁や障害物に反射して届いた電波（反射波）の強度の和で表現されると考えて電波伝搬をモデリングした．反射波は、発信源から反射面に関して対象な位置を疑似的な発信源とし、この疑似発信源から発信されていると考える．これは、電磁気学の分野で鏡像法 [20] と呼ばれるアプローチである．このことから、本手法を、Mirror Image Method for RSS distribution modeling (RDMMI: 鏡像法を用いた電界強度分布モデリング) と呼ぶ．

これらのアイデアに基づき、電波強度は距離の定数乗に反比例して減衰するという電波伝搬特性を仮定して、位置 (x, y, z) における発信源 i からの電波強度を次式で表す．

$$f_i(x, y, z; \Theta_i) = 10 \log_{10} \sum_k \frac{b_{k,i}}{(\mathbf{r} - \mathbf{r}_{k,i})^{a_{k,i}}} \quad (7)$$

ここで、 $\mathbf{r} = (x, y, z)$ である． k は発信源 i の電界強度分布をモデル化する直接波発信源（アクセスポイント設置位置）および疑似発信源の識別子であり、モデルの次元数と呼ぶ． $\mathbf{r}_{k,i} = (x_{k,i}, y_{k,i}, z_{k,i})$ であり、発信源 i の直接波発

信源および疑似発信源の位置を示す．式 (7) において、モデルパラメータ Θ_i は、電波強度が距離の何乗に比例して減衰するかを表す減衰係数に相当する $a_{k,i}$ ，直接波発信源および疑似発信源の送信電波強度に関連する $b_{k,i}$ ，発信源の位置を表す $(x_{k,i}, y_{k,i}, z_{k,i})$ の 3 種である．モデルの次元数は、今回はハイパーパラメータとしてあらかじめ定められているとする．なお、モデルの次元数は何らかの方法で最適なものを選定する必要があるが、本報告では今後の課題とし決定方法については議論しない．一般的には、次元数が大きいほど多くの疑似発信源を想定した複雑なモデルを表現できるが、パラメータ数が増えるためより多数の学習データが必要となる．

ここで、式 (7) をさらに下記のように変形する．その狙いは、直接波発信源の送信電波強度を基準とし、疑似発信源の送信電波強度をそれに対する割合で表現するためである

$$f_i(x, y, z; \Theta_i) = 10 \log_{10} \left(\frac{1}{(\mathbf{r} - \mathbf{r}_0)^{a_{0,i}}} + \sum_k \frac{b'_{k,i}}{(\mathbf{r} - \mathbf{r}_k)^{a_{k,i}}} \right) + c_i \quad (8)$$

ここで、 $b'_{k,i} = \frac{b_{k,i}}{b_{0,i}}$ ， $c_i = 10 \log_{10} b_{0,i}$ である．なお $k=0$ の項は、直接波発信源の位置と考え、 $(x_{0,i}, y_{0,i}, z_{0,i})$ を実際の発信源 i の座標に固定してもよいし、これも未知として推定することも可能である．4 章の評価実験では、両方の場合について評価した結果を示す．

3.2 電界強度分布モデルを用いた位置推定

モデルパラメータが推定されたら、このモデルを用いて電波強度から位置推定を行う．位置推定の際は、事後確率 $P(x, y, z | \mathbf{R}, \Theta)$ が最大となる受信位置 (x, y, z) を求める．ここで、 $\mathbf{R}$ は全発信源からの受信電波強度を並べたベクトルである．受信位置の事後確率は、ベイズの定理により、

$$P(x, y, z | \mathbf{R}, \Theta) \propto P(\mathbf{R} | x, y, z, \Theta) P(x, y, z) \quad (9)$$

であり、これの対数をとると、

$$\begin{aligned} \ln P(x, y, z | \mathbf{R}, \Theta) &= \ln P(\mathbf{R} | x, y, z, \Theta) + \ln P(x, y, z) + \text{const} \\ &= \sum_i \ln P(R_i | x, y, z, \Theta_i) + \ln P(x, y, z) + \text{const} \end{aligned} \quad (10)$$

となる．ここで、 $P(R_i | x, y, z, \Theta_i)$ が $f_i(x, y, z; \Theta_i)$ を平均とする分散 σ のガウス分布に従うと仮定すると、式 (10) は次式で表される．

$$\begin{aligned}
& \ln P(x, y, z | \mathbf{R}, \Theta) \\
&= -\frac{1}{2\sigma^2} \sum_i (R_i - f_i(x, y, z; \Theta_i))^2 \\
&+ \ln P(x, y, z) + \text{const}
\end{aligned} \quad (11)$$

ここで、 $P(x, y, z)$ は受信位置の確率分布であるが、今回は簡単のため一様分布と仮定した。最終的に、受信位置 (x, y, z) は、 $\sum_i (R_i - f_i(x, y, z; \Theta_i))^2$ を最小化することで得られる。 $\sum_i (R_i - f_i(x, y, z; \Theta_i))^2$ の最小化の最も簡単な方法は、モデル $f_i(x, y, z)$ を用いてメッシュ状に疑似教師データを作成し、 $\mathbf{R}$ との二乗誤差が最も小さい疑似教師データのメッシュ状のポイントを特定する方法である。なお、移動軌跡を推定する場合は、モデル $f_i(x, y, z)$ をパーティクルフィルタ [21] やカルマンフィルタ [22] に適用して、受信位置 (x, y, z) を推定することも可能である。

4. 実験

4.1 実験条件

提案手法の測位誤差を評価するため、屋内に測位環境を構築して評価実験を行った。実験には、Logitec 社の WiFi アクセスポイント (LAN-W150N/AP) 17 台を利用した。測位環境の床面積は約 350 m² であった。アクセスポイントの配置を図 4 に示す。測位環境は 3 部屋 (部屋 1~3) および廊下からなり、部屋は壁またはカーテン (部屋 1 と 2 の間) で仕切られている。壁に挟まれて、部屋の入口となる開口部が各部屋複数ある。図 4 では、壁および柱を長方形で、外壁およびカーテンを直線で示した。アクセスポイントの電源については、コンセントボックスがある場所は

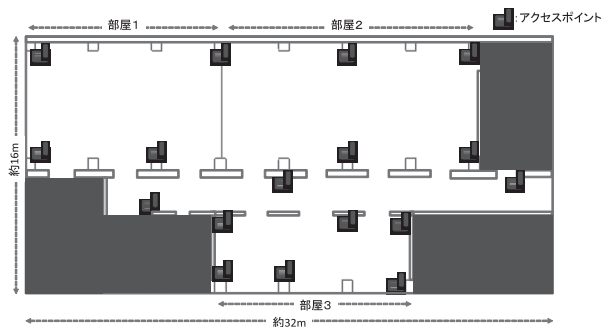


図 4 アクセスポイントの配置

Fig. 4 Arrangement of access points.

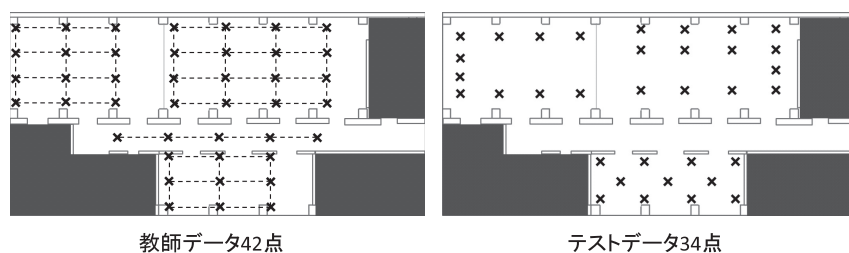


図 5 データ測定位置

Fig. 5 Data positions.

それを利用し、ない場所はバッテリー (日本トラスコテクノロジー社 Energizer XP18000) を用いた。この測位環境において、アンドロイド端末を用いて、アクセスポイントから受信した電波強度を測定した。測定のサンプリングレートは約 0.5 秒に 1 回とした。

この測位環境において、110 カ所でサンプルデータを測定した。教師データ、テストデータとして用いるデータの測定位置は、評価内容によって異なるため後述する。データ測定の際は、各測定位置にアンドロイド端末を持って停止した状態で、約 40 サンプル (約 20 秒間) の電波強度を測定した。測定したデータを教師データとして利用する際は、各測定位置について、測定時刻の後ろから 30 サンプルの平均値を用いた。

また、提案手法のほかに、比較のための従来手法として最近傍法、三辺測量、0 次検知の測位精度を評価した。最近傍法については、教師データに対して、テストデータの電波強度ベクトルとの距離が最も近いものの測定箇所を測位結果とした。三辺測量については、各テストデータについて、アクセスポイントのうち電波強度の値が閾値 (-65 [dBm]) より大きいものに絞り、式 (1) を用いて電波強度値を距離に変換した。式 (1) の定数項は、評価実験に使用したアクセスポイントを用いて、距離と電波強度の関係を実測して決定した。絞り込んだアクセスポイントのすべての 3 台の組合せについて、3 台が一直線に並んだ組合せ (3 台が作る角度を θ としたとき $\sin(\theta) < 0.2$ のもの) を除外したうえで、各組合せで三辺測量によって算出した位置の平均値を測位結果とした。0 次検知については、各テストデータについて、最も受信電波強度の強いアクセスポイントの位置を測位結果とした。

4.2 実験結果

4.2.1 測位誤差比較

最初に、測位精度の比較のための評価実験を行った。この評価では 17 台のアクセスポイントからの受信強度を用い、RDMMI のモデル生成と最近傍法には図 5 に示した 42 カ所の教師データを用いた。測位誤差評価用データとしては、図 5 に示した 34 カ所のテストデータを用い、30 サンプル $\times$ 34 カ所 = 1,020 サンプルの測位誤差の平均値を平均測位誤差とした。なお、提案手法の評価結果は、アク

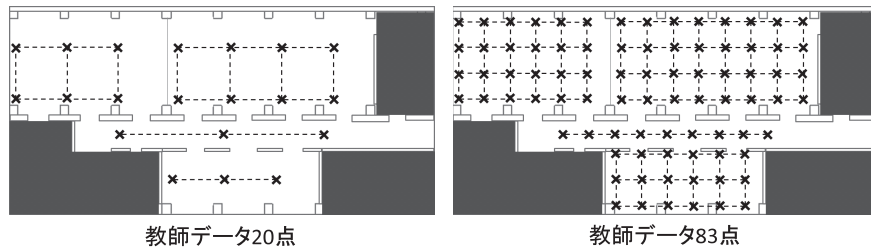


図 7 教師データ測定位置

Fig. 7 Positions of training data.

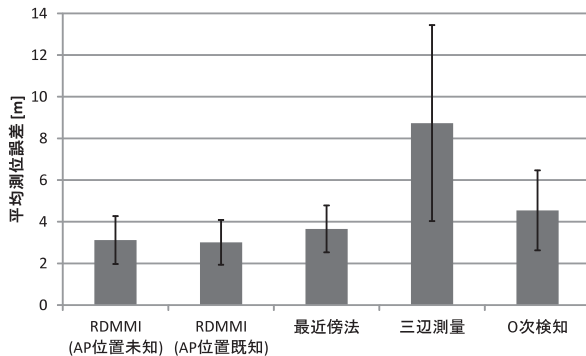


図 6 測位誤差比較

Fig. 6 Comparison of positioning errors.

セスポイントの設置位置をパラメータとして推定した場合と、アクセスポイントの設置位置を既知として与えた場合の両方を示す。また、提案手法のモデルの次元数は、0次元から15次元まで変化させて平均測位誤差を計算し、最も誤差が小さい次元数の結果を用いた。最も誤差の小さい次元数は、アクセスポイント位置を推定した場合5次元、アクセスポイント位置を与えた場合2次元であった。

提案手法 (RDMMI) と従来手法 (最近傍法, 三辺測量, 0次検知) の平均測位誤差を図6に示す。平均測位誤差は、提案手法が、アクセスポイント位置をパラメータとして推定した場合 (「AP位置未知」と表記) 3.1m, アクセスポイント位置を与えた場合 (「AP位置既知」と表記) 3.0m, 最近傍法が3.7m, 三辺測量が8.7m, 0次検知が4.5mとなっており、提案手法は最近傍法に対し、AP位置未知の場合で誤差を16.2% (0.6m) 低減させた。なお、評価実験の環境は中央部分が壁で仕切られた構造であるため、電波強度が単純に距離の定数乗に反比例して減衰することを仮定した三辺測量では誤差が大きくなったものと考えられる。また、今回の測位環境ではアクセスポイントの設置間隔が平均約5.5m (350m²に対して17台) と密であるため、0次検知でも誤差が4.5mにおさまっている。

4.2.2 教師データの選び方の測位誤差への影響

提案手法の利点の1つに、少数の教師データから電界強度分布をモデル化できれば、データ収集コストを低減させることができる点があげられる。そこで、教師データ数の違いによる測位誤差の変化を調べた。教師データ数は、

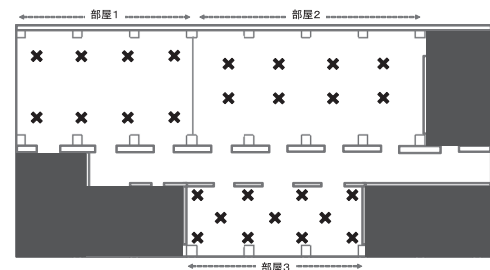


図 8 テストデータ測定位置

Fig. 8 Positions of test data.

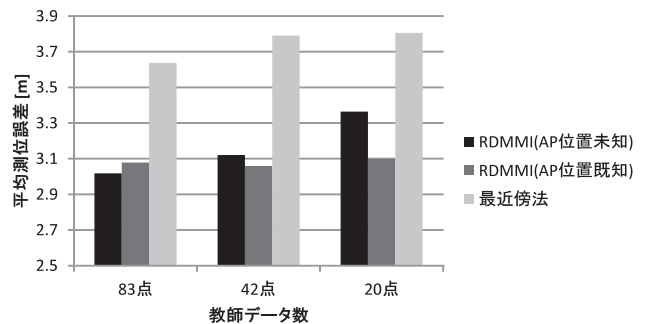


図 9 教師データ数と平均測位誤差

Fig. 9 Average positioning error.

20, 42, 83カ所の3パターンとした。20カ所, 83カ所のパターンの教師データ位置を図7に示す。テストデータの測定位置を図8に示す。テストデータで測位誤差を評価した結果を図9に示す。提案手法の評価結果は、アクセスポイントの設置位置をパラメータとして推定した場合と、アクセスポイントの設置位置を既知として与えた場合の両方を示す。なお、提案手法のモデルの次元数は0次元から15次元のうち最も平均測位誤差の小さいものを採用した。提案手法の平均測位誤差は、AP位置未知の場合、20, 42, 83カ所のそれぞれの教師データ数で、3.4, 3.1, 3.0mであった。AP位置既知の場合、いずれの教師データ数の場合も約3.1mであった。最近傍法の平均測位誤差は、20カ所と42カ所の場合で3.8m, 83カ所の場合で3.6mであった。評価結果より、提案手法では、AP位置も推定する場合、教師データ数が少ない方がAP位置の推定精度が下がり測位誤差が大きくなっているが、教師データ20カ所の場合でも、最近傍法に対して測位誤差を10.4% (0.4m) 低

減させた。AP 位置既知の場合、教師データ数を 83 カ所から 20 カ所に減らしても測位誤差にあまり差がなく、少数の教師データでも実用的な測位精度を実現した。

次に、教師データを収集する際に、測位環境内で万遍なくデータ収集ができればよいが、状況によっては偏った場所でしかデータ収集ができない場合がありうる。よって、教師データの測定ポイントをどのように選んでも高い測位精度を実現することが求められる。この点について評価するため、全教師データからランダムに 20 カ所を選んだ教師データセットを 10 セット作成し、各セットを教師データとした場合の平均測位誤差とその標準偏差を評価した。評価結果を図 10 に示す。提案手法の評価結果は、アクセスポイントの設置位置をパラメータとして推定した場合と、アクセスポイントの設置位置を既知として与えた場合の両方を示す。なお、提案手法のモデルの次元数は、図 9 の教師

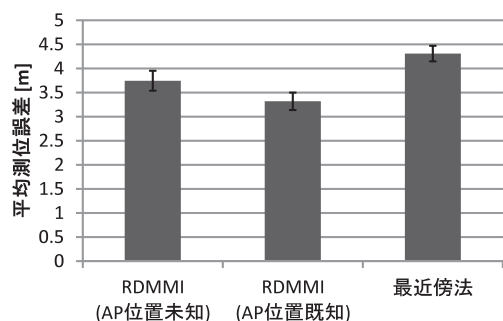


図 10 教師データをランダムに選んだ場合の測位誤差

Fig. 10 Comparison of positioning errors.

データ 20 点の評価で最適であった次元数を用いた。測位誤差は、提案手法では、AP 位置未知の場合、平均 3.7m、標準偏差 0.2m、AP 位置既知の場合、平均 3.3m、標準偏差 0.18m、最近傍法では、平均 4.3m、標準偏差 0.16m となった。提案手法は、教師データの選び方によらず、最近傍法よりも AP 位置未知の場合で 0.6m、AP 位置既知の場合で 1m 小さい誤差で、安定した測位精度を実現することが示された。

4.2.3 アクセスポイント数の測位誤差への影響

無線電波測位技術を実用化するには、必要なアクセスポイントの数はできる限り少なくしたい。そこで、利用するアクセスポイントの数を変化させて、測位誤差への影響を評価した。図 11 にアクセスポイントの配置パターンを示す。本実験では、4 台、8 台、12 台、17 台の 4 パターンのアクセスポイントの配置で測位誤差を評価した。アクセスポイント 17 台のときの配置は、図 4 に示したものと同じである。なお、教師データは図 5 に示した 42 カ所とし、提案手法のモデルの次元数は 0 次元から 15 次元のうち最も平均測位誤差の小さいものを採用した。提案手法の評価結果は、アクセスポイントの設置位置をパラメータとして推定した場合と、アクセスポイントの設置位置を既知として与えた場合の両方を示す。

図 12 に測位誤差評価結果を示す。アクセスポイント数は電波強度ベクトルの次元数であり、すなわち特徴ベクトルの情報量に影響するため、アクセスポイント数が少ないと測位誤差が大きくなる。提案手法と最近傍法とで測位誤

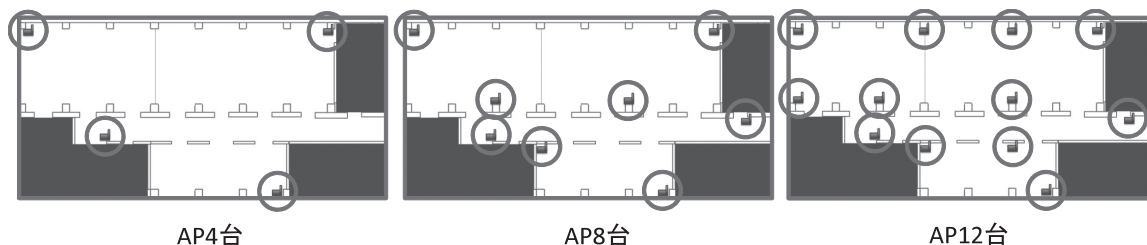


図 11 アクセスポイントの配置

Fig. 11 Arrangement of access points.

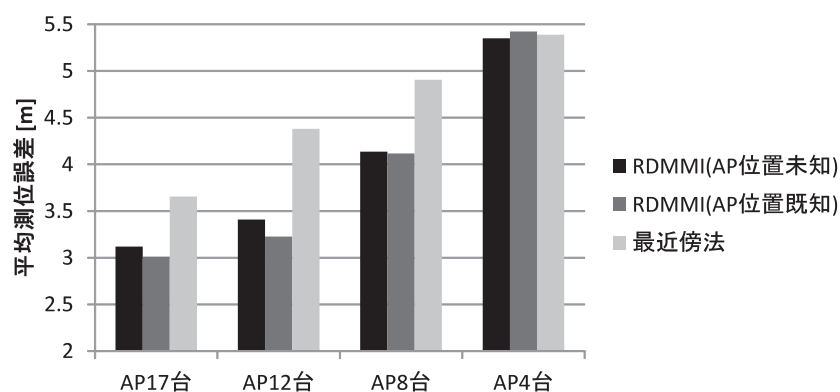


図 12 アクセスポイント数と平均測位誤差

Fig. 12 Average positioning error.

差を比較すると、アクセスポイント数が比較的多い場合は提案手法は最近傍法より小さい測位誤差を実現しているが、アクセスポイント数が4台まで少なくなると、最近傍法と同等の測位誤差となっている。これはおそらく、電界強度分布モデルの推定精度の悪い位置が各アクセスポイントのモデルについて存在し、アクセスポイント数が少なくなると、どのアクセスポイントのモデルの推定精度も悪い位置が存在してしまうため、測位誤差が最近傍法と変わらない程度まで低下したと考えられる。モデルの推定精度が低下する要因の特定とその改善は今後の課題である。

5. おわりに

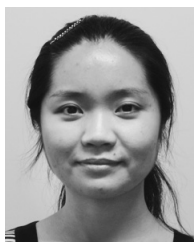
本研究では、電界強度分布モデルの推定に基づく無線LAN測位技術を提案した。提案手法は、特に障害物の多い屋内環境を想定し、反射波の影響を考慮した電界強度分布モデルを仮定してモデルパラメータを学習し、これを用いて測位を行うものである。評価の結果、提案手法は従来手法（最近傍法、三辺測量、0次検知）に対して、平均測位誤差を0.6m以上低減させたことが確認された。また、教師データの数、選び方に対する測位誤差変動を評価し、提案手法が、教師データの選び方によらず、少数の教師データによっても3.1~5.4mの測位精度を実現することを確認した。さらに、測位デバイス数を減らした場合でも、提案手法が従来手法に対して誤差を低減させることを確認した。

今後の課題として、次の3点があげられる。第1の課題は、電界強度分布モデルの定式化の改善である。現在のモデルは障害物による電波の減衰の影響を組み込んでおらず、反射波以外の要因による電波強度の変動も考慮したモデルにするなどの改善が考えられる。第2の課題は、実用環境でのフィールドテストである。提案手法が実用環境に適しているか、実用に際して他に解決すべき課題はないかなどの検討が必要である。最後の課題は測位環境構築の低コスト化の検討である。既設のデバイスを利用した測位や、効率的に測位精度を向上させるデバイスの配置の提示などが考えられる。

参考文献

- [1] 総務省：事業用電気通信設備規則 (2011), 入手先 <http://law.e-gov.go.jp/htmldata/S60/S60F04001000030.html>.
- [2] 株式会社ナビタイムジャパン：NAVITIME, 入手先 <http://www.navitime.co.jp/>.
- [3] セコム株式会社：ココセコム, 入手先 <http://www.855756.com/>.
- [4] 日本アイ・ビー・エム株式会社：2007年10月12日プレスリリース (2007), 入手先 <http://www-06.ibm.com/jp/press/20071012001.html>.
- [5] 青木茂樹, 大西正輝, 小島篤博, 福永邦夫：HMMによる行動パターンの認識, 電子情報通信学会論文誌 D-II, Vol.J85-D-II, No.7, pp.1265-1270 (2002).
- [6] 鈴木直彦, 平澤宏祐, 田中健一, 小林貴訓, 佐藤洋一, 藤野

- 陽三：人物動線データ分析による逸脱行動人物の検出, 情報処理学会研究報告 2007-CVIM-158 (15) (2007).
- [7] 神田崇行, 塩見昌裕, 野村竜也, 石黒 浩, 萩田紀博：RFIDタグを用いた科学館来館者の移動軌跡の分析, 情報処理学会論文誌, Vol.49, No.5, pp.1727-1742 (2008).
- [8] 日立製作所：光のマジカルクエスト in 阪急三番街北館—ポン・デ・ライオンと宝探し (2010), 入手先 <http://www.hitachi.co.jp/New/cnews/month/2010/02/0210.html>.
- [9] 経済産業省 G 空間プロジェクト：クイーンズ探検隊 (2011), 入手先 <http://www.g-project.go.jp/>.
- [10] 日立製作所：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」の実証実験 (2011), 入手先 <http://www.hitachi.co.jp/New/cnews/month/2010/11/1102a.html>.
- [11] 日本電気株式会社：総務省委託研究「高度位置認識技術の研究開発」の実証実験, 入手先 <http://www.ubin.jp/press/pdf/UNL120220-01.pdf>.
- [12] 日立ワイヤレスインフォベンチャーカンパニー：Hitachi Air Location™ (2007), 入手先 <http://www.hitachi.co.jp/wirelessinfo/airlocation/index.html>.
- [13] 日立製作所：ニュースリリース：2月18日 (2009), 入手先 <http://www.hitachi.co.jp/New/cnews/month/2009/02/0218.html>.
- [14] 興梠正克, 大隈隆史, 蔵田武志：歩行者ナビのための自蔵センサモジュールを用いた屋内測位システムとその評価, モバイル学会シンポジウムモバイル 08 予稿集, pp.151-156 (2008).
- [15] Roos, T., Myllymaki, P., Tirri, H., Misikangas, P. and Sievanen, J.: A Probabilistic Approach to WLAN User Location Estimation, *International Journal of Wireless Information Networks*, Vol.9, pp.155-164 (2002).
- [16] Bahl, P. and Padmanabhan, V.: RADAR: An in-building RF-based user location and tracking system, *Proc. INFOCOM 2000, 19th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies*, Vol.2, pp.775-784, IEEE (online), DOI: 10.1109/INFOCOM.2000.832252 (2000).
- [17] 藤田 迪, 梶 克彦, 河口信夫：Gaussian Mixture Modelを用いた無線LAN位置推定手法, 情報処理学会論文誌, Vol.52, No.3, pp.1069-1081 (2011).
- [18] William, H. and Teukolsky, S.: *Numerical Recipes in C: The art of scientific computing*, Cambridge university press (1988).
- [19] Hansen, N.: The CMA evolution strategy: A comparing review, *Towards a new evolutionary computation*, pp.75-102 (2006).
- [20] Jackson, J.: *Classical Electrodynamics 3rd Edition*, Wiley, New York (1998).
- [21] 中村和幸, 上野玄太, 樋口知之：データ同化：その概念と計算アルゴリズム, 統計数理, Vol.53, No.2, pp.211-229 (2005).
- [22] 有本 卓：カルマン・フィルター, 産業図書 (1977).



寺本 やえみ (正会員)

1980 年生. 2003 年早稲田大学理工学部電子情報通信学科卒業. 2005 年早稲田大学大学院理工学研究科情報・ネットワーク専攻修士課程修了. 同年(株)日立製作所入社, 以来, 中央研究所にてテキスト解析システムおよび

空間情報システムの研究に従事.



浅原 彰規

1979 年生. 2002 年北海道大学理学部物理学科卒業. 2004 年北海道大学大学院理学研究科物理学専攻修士課程修了. 同年(株)日立製作所入社, 以来, 中央研究所にて空間情報システムの研究に従事. 電子情報通信学会員.