

無線 LAN を用いたモバイル端末の位置検出法について (第二報)

伊沢 亮[†] 毛利 公美[†] 森井 昌克[†]

[†] 徳島大学 工学部 知能情報工学科

〒 770-8506 徳島市南常三島町 2-1

E-mail: †{isawa,mmohri,morii}@is.tokushima-u.ac.jp

あらまし 地下街等の屋内空間において、安価かつより正確なモバイル端末の位置を推定するための手法を提案する。提案手法は、安価かつ屋内でも利用可能な無線 LAN を応用して、端末の位置を推定する方法である。市販の無線 LAN 用アクセスポイントから得られる電界強度を利用して端末位置を推定する方法は、これまでいくつか提案されているが、それらによって推定された位置の精度は、非常に悪く、実用に耐えるものでなかった。著者は、先にアクセスポイントから得られる電界強度に対して統計的な手法を用いることにより、従来法に比べて推定位置の精度を格段に向上させる方法を提案している (提案手法 1)。本研究では、まず、端末の移動状態を状態遷移モデルとして与え、このモデルをもとにして、先に提案した方法の位置推定結果に対して補正を加えることで、受信電界強度を用いたモバイル端末の位置推定精度をさらに向上させる方法を提案する (提案手法 2)。

キーワード 位置検出, 無線 LAN, モバイル端末, 電界強度, 判別分析

A New Method for Detecting the Position of Mobile Computer using Wireless LAN(II)

Ryoichi ISAWA[†], Masami MOHRI[†], and Masakatu MORII[†]

[†] Dept. of Information Science and Intelligent Systems, Faculty of Engineering, The University of Tokushima,
2-1 Minamijyousanjima-cho, Tokushima-shi 770-8506 Japan.

E-mail: †{isawa,mmohri,morii}@is.tokushima-u.ac.jp

Abstract We have proposed a method for detecting the position of mobile computer using wireless LAN (Method 1). In this method, the electric field intensities are used in order to detect the position of mobile computer. These values are obtained by measuring the electric field intensities of radio wave from some access points of wireless LAN. In this paper, we propose a new method in order to improve the accuracy of Method 1. Our method is based on the Method 1, and it uses the information of previous mobile computer's location and the model of speed of moving the mobile computer. It is very efficient method from the viewpoint of accuracy compared with conventional methods.

Key words detecting the location, wireless LAN, mobile computer, electric field intensities, discriminant analysis

1. はじめに

ユビキタス社会を支える技術の一つとして、モバイル端末の位置検出手法に関する研究が盛んになされている。中でも GPS (Global Positioning System) を用いた位置検出手法は、カーナビをはじめとして様々な運用システムで既に実用化されている。しかしながら、一方では衛星からの GPS 信号が受信できないビル陰や地下街等の屋内空間等において、人や物の位置情報を把握したいという要求も高まっている。これに対しては、屋内用の様々な測位インフラの検討が進められているが、新たに測位専用のインフラを整備することはコスト面から考えると、得策であるとは言い難い。

そこで、本研究では、既に広く普及がなされている無線 LAN を測位インフラとして応用するという立場から、低コストかつ高精度なモバイル端末の位置検出を実現する方法の開発を行った。開発したモバイル端末の位置検出法は、主にニーズの高まっている地下街での位置検出を想定しており、地下街の環境に適した方法である。

無線 LAN を測位インフラとして応用する方法は、現在盛んに研究がなされており、その検出手法は次の 2 つに大別される。

1. 複数のアクセスポイントからの信号到達時間を利用して位置検出を行う方式。
2. 複数のアクセスポイントから得られる受信電界強度を利用して位置検出を行う方式。

前者では、位置検出精度に関しては十分な精度が保証される方法も提案されている。代表的な例としては、既に製品化がなされている (株) 日立製作所の AirLocation [1] が良く知られている。この方法では、複数のアクセスポイント (以下では AP と称する) から送信された無線信号の到達時間差 (TDOA: Time Differential Of Arrival) を用いて三角測量を行うことで端末の位置を算出している。この手法で算出された端末位置は精度が良いことが報告されているが、システム導入の際に、時刻同期用 AP が必要となる等、低コストでの実現が困難である。

後者では、複数の AP から得られる受信電界強度を利用して三角測量

を行い、端末位置を推定する小川らの学習型ロケーション検出法 [2] や、北須賀らの屋内向け測位方式 [3] が知られている。これらの手法は、導入時に特別な機材を必要とせず、既設の無線 LAN インフラを利用して構築できるため低コストでの実現が可能である。しかしながら、受信電界強度は障害物等の環境の変化によって変動しやすい性質があることから、端末位置の検出精度は 1. の位置推定法に比較して非常に悪く、実用に耐えるとは言い難い。

先に、筆者らは文献 [4] において後者の立場から低コストかつ高い精度で位置検出を行う方法を提案した。以下ではこの方法を提案手法 1 と称す。提案手法 1 では、受信電界強度が環境の変化によって受ける影響を最大限少なく抑えるために、複数の AP から得られる受信電界強度のデータベースに対して統計的な手法を用いることで現在の端末位置を推定する。具体的には、現在の地点で得られた受信電界強度を受信電界強度データベースを用いて判別分析し、さらに過去の端末位置の情報を用いて現在位置を推定した結果を補正することによって、端末位置の検出精度を向上させる。提案手法 1 でも、精度 50cm 程度で位置検出が可能であり、既存手法 [1] [2] [3] に比べて、位置検出の精度は高い。しかし、提案手法 1 で使われる過去の端末の位置情報は、端末が次に移動可能である範囲を予測する際に利用するだけで、有効に利用できているとは言えなかった。また、最近、セルラーシステムを対象に端末の移動速度と過去に測定した電界強度を用いて位置検出精度を向上させる位置検出法が報告されている [5]。この方法も筆者らの手法と同様に過去の端末位置の情報を利用することによって位置検出を行う方法となっているが、セルラーを対象とした手法であり、端末の位置検出精度は、累積確率 67% で 110m である。

本稿では、提案手法 1 よりも過去の端末位置の情報を有効に利用する手法を提案する。以下では、本稿で提案する手法を提案手法 2 と称する。提案手法 2 では、提案手法 1 に加え、端末の移動状態遷移モデルと各移動状態毎の端末の移動速度を考慮することによって、過去の端末位置の情報を有効に利用する。これにより、提案手法 2 の位置検出精度を提案手法 1 の位置検出の精度より向上させることが可能である。提案手法 2 を用いることによって、地下街等の屋内空間においても低コストかつ従来より高い精度でモバイル端末の位置検出が可能となる。

2. 受信電界強度を利用した精度の高いモバイル端末の位置検出方法

提案手法 1 では、モバイル端末の位置検出を行うエリア内の複数箇所、あらかじめ各 AP からの受信電界強度を測定しておき、それをデータベース化したものを利用して、モバイル端末の位置検出を行う。データベースには、各地点の障害物による電波の減衰や反射波の影響を受けた状態での電界強度が保存されている。このデータベース内の電界強度情報を随時、最新の情報に更新しながら保持することによって、障害物による電波の減衰や反射波の影響に左右されない端末の位置検出が可能となる。

AP からの電界強度は AP とモバイル端末の距離の二乗に反比例して低くなる、といった性質がある。また、障害物のある環境では、電界強度は AP からモバイル端末までの距離だけでなく、障害物によっても変化する。AP とモバイル端末の間に障害物がある場合は、AP からの電波が障害物に遮断され電界強度は低くなる。また、モバイル端末の周りに壁などがある場合は、反射波の影響により AP からの電界強度は変化する。

このように電界強度は障害物などの周りの環境の影響を受けて変動しやすいため、AP からの受信電界強度と AP までの距離の近似式を利用した位置検出手法は、精度が低いことが知られている。提案手法 1 では、各地点での受信電界強度をデータベース化しておき、測位の際に各 AP から得られた受信電界強度に対して先のデータベースを用いて判別分析を行うことで、端末位置を推定する。その場合、データベー

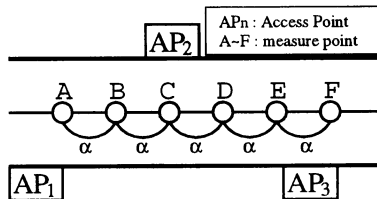


図 1 モバイル端末の位置検出をする場所

表 1 電界強度データベースに保存されている電界強度 [dBm]

	AP ₁	AP ₂	AP ₃		AP ₁	AP ₂	AP ₃
A	-33	-52	-74	D	-52	-42	-43
	-34	-49	-72		-55	-44	-47

B	-43	-59	-69	E	-59	-57	-43
	-41	-49	-66		-62	-53	-39

C	-47	-34	-59	F	-62	-59	-35
	-49	-32	-59		-65	-62	-35

スを随時、最新の情報に更新することで、環境の変化による電界強度の変動を吸収することが可能であり、他の方法に比べて高い精度 (誤差 50cm 以内での位置検出成功率約 90%) を実現できる。しかし、提案手法 1 は、先述のように、過去の端末の位置情報を有効に利用できていない。以下では、提案手法 1 の判別分析の結果に加えて過去の端末の移動状態を考慮することによって、位置検出の精度をさらに向上させる方法を与える。

提案する位置検出法では、

- 電界強度データベース
- 判別分析
- 端末の移動状態遷移モデル
- 各移動状態毎の端末の移動速度

を用いることにより位置を検出する。提案手法 1 では、主に電界強度データベースと判別分析を位置検出に用い、端末の過去の位置情報については端末の移動速度を考慮しただけであった。今回提案する手法では、端末の過去の位置情報を提案手法 1 よりも有効に利用するため、電界強度データベースと判別分析に加え、端末の移動状態遷移モデルと各状態毎の端末の移動速度を用いる。

2.1 電界強度データベース

提案手法 1 および提案手法 2 では、複数の AP が設置されている環境下で、ある地点を起点として定め、起点から一定間隔ごとに各 AP からの受信電界強度を測定して保存したデータベースを利用して位置検出を行う。以下ではこのデータベースを電界強度データベースと呼ぶ。

本節では提案手法 2 で用いる電界強度データベースを作成・更新する方法を与える。提案手法 2 では、図 1 に示すような環境での位置検出を想定している。図 1 は四方を壁で囲まれた廊下のような空間に 3 つの AP が設置されている環境を示している。図 1 の AP_n は無線 LAN Access Point を示している。また、A から F は電界強度データベースを作成するために各 AP からの受信電界強度を測定する位置を表す。A から F の各地点間の間隔は α とする。以上のような環境で作成された電界強度データベースは表 1 のようになる。A から F の各地点ごとに一定時間、受信電界強度を測定して電界強度データベースに保存する。各地点で得られる受信電界強度の大きさの範囲はある程度決まっているが、先述のようにいずれの地点においても環境の変化によって若干の変動がある。

図2はある地点において1つのAPから得られる受信電界強度が環境の変化によって変動している様子を示したものである。図2の横軸は受信電界強度 [dBm] を示している。縦軸は30分間電界強度を測定(2502回)したときの電界強度の出現頻度を表している。図2の'x'は電界強度データベース内のある地点における電界強度の出現頻度を示している。'o'は、別の時刻に同じ地点で得られた電界強度の出現頻度を示している。図2の'x'と'o'を比較すると、電界強度データベースを作成してから時間が経過すると、たとえ同じ地点であっても、環境の変化によって得られる受信電界強度に違いが生じるということが分かる。このことから分かるように、精度の高い端末位置の検出を行うためには、常に電界強度データベース内の電界強度情報を最新の状態にしておく必要がある。

以下に環境の変化に伴って変動する電界強度に対応するために、電界強度データベースを更新する方法を与える。電界強度データベースは常に最新の電界強度を保持する必要があることから、端末位置検出のために測定した電界強度を利用して位置推定と同時に更新を行う。以下の手順 step 1 から step 4 に従ってデータベースを随時更新する。

電界強度データベース更新ルール

- step 1. モバイル端末の位置を検出するための電界強度 X を測定する。
step 2. 電界強度 X からモバイル端末の位置 L を検出する。
step 3. 測定した電界強度が $(D_{min})_n^L$ から $(D_{max})_n^L$ の範囲内なら、測定した電界強度を電界強度データベースに追加する。

$$(D_{min})_n^L = \beta_n^L x_n + \gamma_n^L + (D_f)_n^L \quad (1)$$

$$(D_{max})_n^L = (D_f)_n^L - (\delta_n^L x_n + \epsilon_n^L) \quad (2)$$

ここで、 $\beta_n^L, \gamma_n^L, \delta_n^L, \epsilon_n^L$ は最小二乗法によって与えられる定数、 $(D_f)_n^L$ は電界強度データベースの地点 L の AP_n からの電界強度の中で最も出現頻度が高い電界強度、 x_n は端末と AP_n との距離をそれぞれ表している。

- step 4. step 3 で電界強度データベースにデータが追加された場合は、電界強度データベース内の最も古い時刻に測定された電界強度を削除する。

図2の'x'と'o'の例からも分かるようにある地点で測定された電界強度は、最も多く得られている電界強度を中心としてある範囲内 $(D_{min})_n^L$ から $(D_{max})_n^L$ に集中する。図2の例では、 $(D_{min})_n^L = -4$ 、 $(D_{max})_n^L = 4$ とするとき、9割以上がこの範囲内の値をとっている。ここで、 -4 から $+4$ の範囲以外の電界強度は雑音を多く含んだ電界強度であると考え、そのようなデータを電界強度データベースに追加しないようにするために、提案手法2では、step 3. で式(1)から式(2)の制限を設けている。なお、式(1)の定数 β_n^L, γ_n^L と式(2)の定数 δ_n^L, ϵ_n^L は以下のようにして求められる。地点 L において AP_n の最も出現頻度の高い電界強度と信頼区間 99%としたときの信頼限界にお

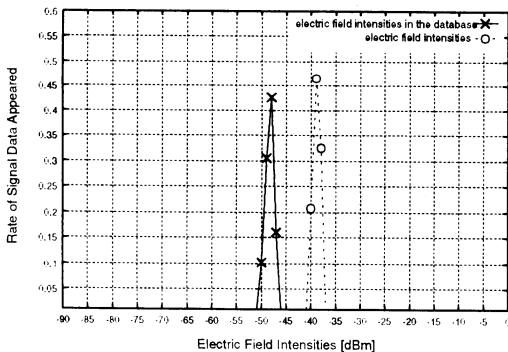


図2 環境の変化によって変動する受信電界強度

る電界強度の差を A とする。 AP_n と地点 L 間の距離を B とする。このとき、

$$A > 0 \text{ のとき, } A = \beta_n^L B + \gamma_n^L \quad (3)$$

$$A < 0 \text{ のとき, } A = \delta_n^L B + \epsilon_n^L \quad (4)$$

を全ての地点 L に対して考え、最小二乗法を用いて、誤差が最小になるような $\beta_n^L, \gamma_n^L, \delta_n^L, \epsilon_n^L$ を求める。

2.2 電界強度を用いた端末位置の判別分析

提案手法1および提案手法2では位置検出を行うために各APからの受信電界強度を測定し、2.1節で与えた電界強度データベースを用いて判別分析を行うことによって端末位置を検出する。

判別分析とは、データがいくつかのグループに分類されている場合、あるデータがどのグループに属しているかを判別する手法である。提案手法2では、電界強度データベースに格納されている各地点ごとのデータをグループとし、測定された電界強度をデータとして判別分析を行う。モバイル端末の位置検出の際には、位置検出のために測定した電界強度(データ)がデータベース内のどの地点(グループ)に属するのかを判別することによってモバイル端末の位置を検出する。

以下に提案手法2で判別分析を行う際に必要となる式を与える。 q 個のAPが設置されている場所でのモバイル端末の位置検出について考える。また、電界強度データベースはそれぞれの点が一定間隔ごとに離れた k 個の地点の電界強度を測定し作成するものとする。

各地点の電界強度のサンプル数を p 、APの数を q とする。ある地点 j ($j=0, 1, \dots, k-1$) において各APから得られる受信電界強度のサンプル集合 x_j を

$$x_j = \begin{bmatrix} x_{j(0,0)} & \cdots & x_{j(0,q-1)} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{j(p-1,0)} & \cdots & x_{j(p-1,q-1)} \end{bmatrix} \quad (5)$$

とする。さらに地点 j ($j < k$) で得られる電界強度のサンプルを各APごとに平均した値を

$$\bar{x}_j = (\bar{x}_{j0}, \bar{x}_{j1}, \dots, \bar{x}_{j(q-1)})^T \quad (6)$$

と表す。位置検出を行うために測定した電界強度 X を

$$X = (X_0, X_1, \dots, X_{(q-1)})^T \quad (7)$$

とする。 x_j の分散共分散行列 σ_j を

$$\sigma_j = \begin{bmatrix} V_{j(0,0)} & \cdots & V_{j(0,q-1)} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ V_{j(q-1,0)} & \cdots & V_{j(q-1,q-1)} \end{bmatrix} \quad (8)$$

とする。 σ_j の各要素 $V_{j(y,z)}$ は

$$V_{j(y,z)} = \frac{1}{p-1} \sum_{\tau=0}^{p-1} (x_{j(\tau,y)} - \bar{x}_{jy})(x_{j(\tau,z)} - \bar{x}_{jz}) \quad (9)$$

で表まる。

σ_j の逆行列を σ_j^{-1} とするとき、式(10)によって、測定位置での電界強度 X と各地点 j (グループ) での平均電界強度 \bar{x}_j 間のマハラノビス距離 d_j^2 を計算する。

$$d_j^2 = (X - \bar{x}_j)^T \sigma_j^{-1} (X - \bar{x}_j) \quad (10)$$

最も d_j^2 の値が小さい地点 j に端末があると判別する。

電界強度 X が得られたときに地点 j に端末が存在する確率 $P_d(X, j)$ をマハラノビス距離 d_j^2 を用いて以下のように与える。

$$P_d(X, j) = \frac{\sum_{i=0}^{k-1} \frac{d_i^2}{d_j^2}}{\sum_{m=0}^{k-1} \left(\sum_{i=0}^{k-1} \frac{d_i^2}{d_m^2} \right)} = \frac{1}{d_j^2 \sum_{m=0}^{k-1} \left(\frac{1}{d_m^2} \right)} \quad (11)$$

式(11)の確率はマハラノビス距離 d_j^2 の値が小さいほど電界強度 X が地点 j における電界強度である確率が高いことから、その逆比によって与えられる。

2.3 端末の移動状態遷移モデル

本節では端末の移動状態を考慮した位置検出を行うために、移動状態遷移モデルを与える。

2.2節で与えた電界強度を用いた判別分析では、ある地点で測定された電界強度が何らかの理由でデータベース内の電界強度と大きくかけ離れている場合、正しい位置検出を行うことができない。すなわち推定した端末位置と実際の位置との差が非常に大きくなるという問題がある。これはモバイル端末の位置検出時に電界強度データベースに保存されている範囲外の電界強度が得られた場合は、判別分析に失敗することに起因する。これによって位置検出の精度が著しく劣化する。そこで、本節では2.2節の判別分析による位置検出精度をさらに向上させるために、端末の過去の移動状態の遷移を用いて判別分析の結果に補正を加える方法を考える。モバイル端末の位置を検出する際に、過去の時刻における端末の移動状態を考慮すれば次の時刻での端末の移動状態を予測することが可能でありその結果、位置検出の精度を更に向上させることができる。

本研究では地下街での端末の位置検出を想定している。地下街では多くの人が一定方向に移動していて、例えば、その多くの人の中で端末が走ったり、急に向きを変えて移動することは極稀であると考えられる。このことは、地下街で端末がとり得る移動状態がある程度限定されるため、端末の移動状態の遷移をモデル化できることを意味している。以下では、まず、端末の移動状態を定義し、端末の状態遷移をモデル化する。端末の移動状態遷移モデルにより、端末の過去の移動状態から端末が次に移動する位置を予測することが可能となり、判別分析を用いた位置検出法の精度を更に向上できる。

端末の移動状態

端末の移動状態遷移モデルを図3に示す。図3の端末の移動状態遷移モデルでは、 S_w (歩く)、 S_s (止まる)、 S_t (向きを変えて歩く)の3つの端末の移動状態を定義している。現在の時刻 T での端末の位置を x_T とするとき、端末の各移動状態は表2が示すように過去の時刻を含む3つの位置を与えることにより決定される。例えば、図1の端末位置AからFのうち、 $x_{T-2}=A$ 、 $x_{T-1}=B$ 、 $x_T=C$ が与えられたとする。この場合、 $x_{T-2} < x_{T-1} < x_T$ のような大小関係が成り立つので、端末の移動状態は " S_w "(歩く)であると決定される。

端末の移動状態の遷移

端末の移動状態の遷移は、 x_{T-3} 、 x_{T-2} 、 x_{T-1} 、 x_T の4つの位置を与えることで表2より決定される。 W_T を時刻 T での移動状態とすると、まず、 x_{T-3} 、 x_{T-2} 、 x_{T-1} により W_{T-1} が決定され、 x_{T-2} 、 x_{T-1} 、 x_T により W_T が決定される。このとき、端末の移動状態は W_{T-1} から W_T に遷移したと考えることができる。また、図3中の $P_{\{S_w, S_s, S_t\} | \{S_w, S_s, S_t\}}$ は各移動状態が遷移する確率を表しており、 $\{S_s, S_w, S_t\}$ は、 S_s 、 S_w 、 S_t の内どれか一つが選択されることを示している。なお、これら3つの移動状態は端末が地下街でとることのできる移動状態を考慮して定義している。例えば、 $x_{T-3}=B$ 、 $x_{T-2}=D$ 、 $x_{T-1}=C$ 、 $x_T=B$ が与えられたとする。この場合、 $x_{T-3} < x_{T-2} > x_{T-1}$ より S_t が、 $x_{T-2} > x_{T-1} > x_T$ より S_w が決定され、 $W_{T-1} = S_t$ から $W_T = S_w$ に遷移したことになる。こ

表2 端末の移動状態の定義

移動状態	端末の位置関係
S_w	$x_{T-2} < x_{T-1} < x_T$
	$x_{T-2} > x_{T-1} > x_T$
	$x_{T-2} = x_{T-1} < x_T$
	$x_{T-2} = x_{T-1} > x_T$
S_s	$x_{T-2} < x_{T-1} = x_T$
	$x_{T-2} > x_{T-1} = x_T$
	$x_{T-2} = x_{T-1} = x_T$
S_t	$x_{T-2} < x_{T-1} > x_T$
	$x_{T-2} > x_{T-1} < x_T$

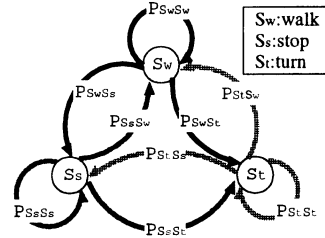


図3 端末の移動状態遷移モデル

のとき、 W_{T-1} から W_T へ遷移する確率は

$$P_s(x_{T-3}, x_{T-2}, x_{T-1}, x_T) = P_{W_{T-1} W_T} \quad (12)$$

$W_{T-1}, W_T \in \{S_w, S_s, S_t\}$

で与えられる。ここで、 W_{T-1} および W_T はそれぞれ $\{x_{T-3}, x_{T-2}, x_{T-1}, x_T\}$ の値から表を使って決定される移動状態である。 $W_{T-1} = S_t$ 、 $W_T = S_w$ の例では、端末の移動状態遷移確率は $P_{S_t S_w}$ で与えられる。2.2節述べた判別分析と式(12)を同時に考慮することによって位置検出の精度を上げることができる。

2.4 各移動状態毎の端末の移動速度

提案手法2では、端末の移動状態遷移確率だけでなく、端末の移動速度も考慮して位置を検出する。2.3節でも述べた通り、本研究は地下街での位置検出を想定している。地下街では多くの人がほぼ一定の速度で移動しているため、端末が移動する速度もほぼ一定の速度で移動すると仮定する。以下では式(13)が示すように、端末の移動速度 v は端末の移動速度の平均 M_v [cm/s]、端末の移動速度の分散 σ_v^2 の正規分布に従うと仮定する。

$$P_v(v) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_v^2}} \exp\left(-\frac{(v - M_v)^2}{2\sigma_v^2}\right) \quad (13)$$

$P_v(v)$ は、時刻 $T-1$ から時刻 T 間の端末の移動速度が v である確率を示している。提案手法2では2.3節の端末の状態遷移モデルに加え、端末の状態毎の移動速度も考慮して、2.2節の判別分析の位置検出の結果を補正する。

以下では、1時刻の間隔 $T - (T-1)$ を約0.5秒として考える。時刻 $T-1$ から時刻 T 間に端末が移動する距離を $\|x_{T-1} - x_T\|$ とすると、端末の速度は $v = 2\|x_{T-1} - x_T\|$ で与えられる。このとき、時刻 $T-1$ から時刻 T 間の端末の移動距離が $\|x_{T-1} - x_T\|$ である確率 $P_v(2\|x_{T-1} - x_T\|)$ は以下ようになる。

$$P_v(2\|x_{T-1} - x_T\|) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_v^2(2\|x_{T-1} - x_T\|)}} \times \exp\left(-\frac{\{(2\|x_{T-1} - x_T\|) - M(2\|x_{T-1} - x_T\|)\}^2}{2\sigma_v^2(2\|x_{T-1} - x_T\|)}\right)$$

(14)

提案手法 2 では式 (14) の $M_{(2||x_{T-1}-x_T||)}$ および $\sigma_{(2||x_{T-1}-x_T||)}$ の値を端末の各移動状態毎に与える。例えば、 S_w と S_s は共に端末が移動している状態であることから、 $M_{(2||x_{T-1}-x_T||)}$ の値は、歩く時の速度 (100 から 150[cm/s]) を考慮して S_w , S_s いずれの状態に対しても $M_{(2||x_{T-1}-x_T||)}=120$ とする。また、 S_s は端末が止まっている状態であることから $M_{(2||x_{T-1}-x_T||)}=0$ とする。 $\sigma_{(2||x_{T-1}-x_T||)}$ については、全ての移動状態で端末の速度のばらつきが 30[cm/s] 程度であるものとし、 $\sigma_{(2||x_{T-1}-x_T||)}=900$ とする。

2.5 モバイル端末の位置検出法

時刻 $T-3$ から T に測定した各 AP からの電界強度 $\{X_{T-3}, X_{T-2}, X_{T-1}, X_T\}$ が与えられたとき、式 (11), (12), (15) を用いることによって、現在の時刻 T に端末が位置 x_T に存在する確率は以下のように与えることができる。

$$\begin{aligned} P(x_{T-3}, X_{T-3}, x_{T-2}, X_{T-2}, x_{T-1}, X_{T-1}, x_T, X_T) = \\ P_d(x_{T-3}, X_{T-3}) \times P_d(x_{T-2}, X_{T-2}) \times P_d(x_{T-1}, X_{T-1}) \\ \times P_d(x_T, X_T) \times P_s(x_{T-3}, x_{T-2}, x_{T-1}, x_T) \\ \times P_v(2||x_{T-1}-x_T||) \end{aligned} \quad (15)$$

式 (15) の $\{x_{T-3}, x_{T-2}, x_{T-1}, x_T\}$ は $\{X_{T-3}, X_{T-2}, X_{T-1}, X_T\}$ が与えられたとき時刻 $T-3$ から T に端末が存在し得る位置である。

モバイル端末の位置検出には、過去の時刻 $T-3$ から $T-1$ に測定した電界強度 X_{T-3} から X_{T-1} と現在の時刻 T の電界強度 X_T を用いる。提案手法 2 では式 (15) に代入する $\{x_{T-3}, x_{T-2}, x_{T-1}, x_T\}$ の値を過去の位置検出の結果を用いて決定する。時刻 $T-n$ ($n=1, 2, 3, 4$) の位置検出結果を R_{T-n} とすると、 x_{T-n-1} は $|x_{T-n-1} - R_{T-n}| < \alpha M_{(2||x_{T-1}-x_T||)}$ を満たす。提案手法 2 では、 $|x_{T-n-1} - R_{T-n}| < \alpha M_{(2||x_{T-1}-x_T||)}$ を満たす $\{x_{T-3}, x_{T-2}, x_{T-1}, x_T\}$ のうち、

$$\begin{aligned} P_{max}(x_{T-3}, X_{T-3}, x_{T-2}, X_{T-2}, x_{T-1}, X_{T-1}, x_T, X_T) = \\ \max\{P(x_{T-3}, X_{T-3}, x_{T-2}, X_{T-2}, x_{T-1}, X_{T-1}, x_T, X_T) : \\ x_{T-n} \mid |x_{T-n} - R_{T-n-1}| \leq \alpha M_{(2||x_{T-1}-x_T||)}, n=1, 2, 3, 4\} \end{aligned} \quad (16)$$

が示す端末が存在する確率 P が最も高い x_T を端末の位置として推定する。ここで、 α は任意に決定する定数で、本稿では $\alpha=2$ とした。式 (16) において $|x_{T-n-1} - R_{T-n}| < \alpha M_{(2||x_{T-1}-x_T||)}$ の条件を与えたのは、2.4 節の仮定より、一時刻の間に前の位置検出結果から $\alpha M_{(2||x_{T-1}-x_T||)}$ 以上離れた位置 x_{T-n-1} に端末が移動できないためである。

式 (16) を用いることによって、提案手法 1 よりも過去の位置情報を有効に利用できる。例えば、判別分析の結果、 $P_d(x_{T-3}, X_{T-3}) \times P_d(x_{T-2}, X_{T-2}) \times P_d(x_{T-1}, X_{T-1}) \times P_d(x_T, X_T)$ を最大にする位置の組 $\{x_{T-3}, x_{T-2}, x_{T-1}, x_T\}$ が解として得られたとする。それらが一時刻の間に端末が移動できない距離 ($|x_{T-1} - x_T| > \alpha M_{(2||x_{T-1}-x_T||)}$) にある端末位置を含んでいる場合も、移動速度を考慮した $P_v(2||x_{T-1}-x_T||)$ によって補正し、位置検出を成功させることができる。同様に、地下街では稀な移動状態の遷移が判別分析の結果によって決定された場合にも移動状態遷移モデルによって判別分析の結果に補正を加え、位置検出の成功確率を向上させることができる。

以上をまとめたものを判別分析を用いた位置検出法のアルゴリズムとして与える。

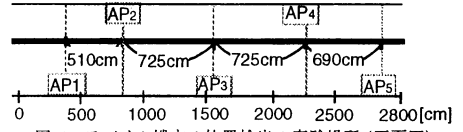


図 4 モバイル端末の位置検出の実験場所 (平面図)

表 3 位置検出実験の環境

実験場所	28.5m×2.4mの廊下
モバイル端末	Panasonic Let's note CF-S21
CPU	Intel MMX Pentium 233Mhz
物理メモリ	96MB
OS	Windows Millennium Edition
無線インターフェース	WLI-PCM-L11GP(無線 LAN カード)
電界強度測定ツール	NetworkStumbler
APの種類と数	BUFFALO WLA-G54×5台

モバイル端末の位置検出方法のアルゴリズム

- step 1. 各地点の電界強度を一定時間測定し、電界強度データベースを作成する。
- step 2. モバイル端末の位置検出をするために、現在地の電界強度を測定する。
- step 3. 式 (16) によってモバイル端末の位置を検出する。
- step 4. step 2. で測定した電界強度に対して、2.1 節で述べた電界強度データベースの更新のルールを適用する。

(アルゴリズム終了)

step 1 から step 4 によってモバイル端末の位置を検出することができる。

3. 端末の位置検出方法の評価実験

3.1 実験目的

本研究では、AP と無線 LAN 端末の間に障害物がある環境や人の往来のある環境など、複雑な環境下でのモバイル端末の精度の高い位置検出を目標としているが、今回はその予備実験として、以下のような仮定の下で提案手法 2 の評価を行った。

- モバイル端末の移動は廊下の中央 (図 4 の太い線上) のみとする。
- モバイル端末の移動速度は秒速 1m から 2m とする。
- AP とモバイル端末の間には障害物が存在しない。
- モバイル端末の位置検出実験時に人の往来はない。

3.2 実験環境

表 3 に実験環境を示す。モバイル端末にはノート PC、無線インターフェースは、無線 LAN カードを使用した。電界強度を測定するツールは、AP からの受信電界強度を 1 秒間に 1~3 回測定できる NetworkStumbler[7] を使用した。

図 4 は実験場所の平面図で、AP の配置を示している。本実験で使用した AP の数は 5 台で各 AP の間隔は約 7m になるように設置している。(注 1)

3.3 実験方法

被験者は、表 3 で示したモバイル端末を持って廊下の中央を移動し、各地点において端末位置の検出が正しく行われるか否かの実験を行う。式 (14) のパラメータは、 S_w のとき $M_{(2||x_{T-1}-x_T||)}=60$, S_s のとき $M_{(2||x_{T-1}-x_T||)}=0$ とし、 $\sigma_{(2||x_{T-1}-x_T||)}=60$ とし、 S_s のとき $M_{(2||x_{T-1}-x_T||)}=0$ とし、 $\sigma_{(2||x_{T-1}-x_T||)}$ は全ての移動状態で $\sigma_{(2||x_{T-1}-x_T||)}=900$ とした。また、端末の移動状態遷移確率は、 $P_{S_w S_w} = 0.7$, $P_{S_w S_s} = 0.2$

(注 1): AP1 と AP2 の間隔が 5.1m となっているのは実験場所の構造上 AP1 と AP2 の間隔を 7m にすることができなかったためである。

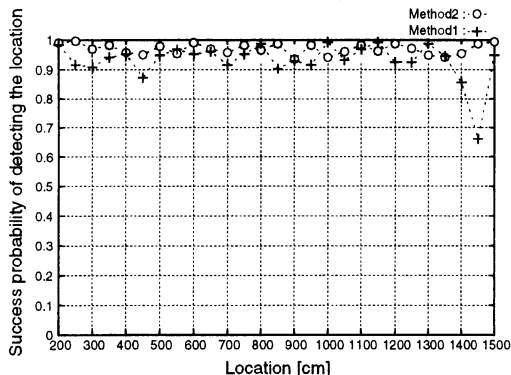


図5 モバイル端末の位置検出実験の結果 (200cm~1500cm)

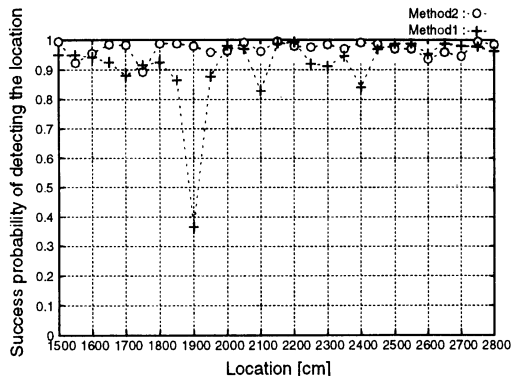


図6 モバイル端末の位置検出実験の結果 (1500cm~2800cm)

, $P_{SwSt} = 0.1$, $P_{SsSw} = 0.2$, $P_{SsSs} = 0.7$, $P_{SsSt} = 0.1$, $P_{StSw} = 0.4$, $P_{StSs} = 0.5$, $P_{StSt} = 0.1$ とした。

実験手順

手順1. 電界強度データベースを作成する。電界強度データベースに格納するデータは、廊下の中央(図4の太線上)上の地点における電界強度を50cm間隔で測定したものを用いる。各地点ごとに各APからの電界強度を30分間測定し、電界強度データベースを作成する。今回の実験場所は28.5mの廊下であるため合計57箇所の地点の電界強度を測定する。

電界強度データベースを更新のための式(1)と式(2)の定数 β_n^L , $\gamma_n^L, \delta_n^L, \epsilon_n^L$ を求める。

手順2. 被験者は端末を持って図4の0cmの位置から2800cmまで各APからの電界強度を測定しながら歩く。

手順3. 手順2で得られた電界強度に対して提案手法2を適用し、各地点ごとにモバイル端末の位置検出が成功か失敗か判定する。

手順4. 手順2から手順3までを250回試行する。

3.4 実験結果

実験結果を図5, 6に示す。図5, 6の横軸は図4でのモバイル端末が実際に存在する地点[cm]を示している。縦軸は、横軸が示している地点での位置検出の成功確率を示している。図5, 6の'o'は提案手法2の結果、'+'は提案手法1の結果を示している。図5, 6を見ると、提案手法1の成功確率が低い1900[cm]などの点においても提案手法2は成功確率97.8%で位置検出に成功している。これは提案手法2の端末の移動状態遷移モデルと端末の移動速度を考慮したことの効果によるものである。また、'o'は全ての地点において位置検出の成功確率が90%を越えている。実験結果から、提案手法2は提案手法1より位置検出の精度が高いと言える。

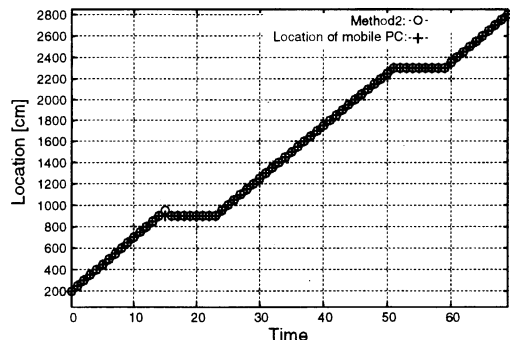


図7 実際に移動した経路を予測した結果

図7は実験時の端末が廊下の端から端まで移動した経路を検出した結果である。図7の横軸は廊下の端から移動したときに経過した時間、縦軸は横軸が示す時間に端末が存在する図4の廊下の地点を示している。'+'は実際に端末が移動した位置、'o'は提案手法2によって検出された位置である。横軸が15の箇所は位置検出の誤差50cmであるがそれ以外は全て誤差0cmで位置検出に成功している。

実験結果から、提案手法2は従来の手法に比べて非常に有効であると言える。また、今回の実験結果では各地点間の距離が50cmという狭さにもかかわらず、ほぼ全ての地点において正しく位置検出の成功確率は90%以上であった。このことより、提案手法2による位置検出の精度は誤差50cmであると言える。また、提案手法1に比べ、提案手法2の方が有効であることが実証された。

4. まとめ

本研究では、低コストかつ提案手法1より精度の高いモバイル端末の位置検出法を提案した。提案手法1および提案手法2では、受信電解強度が環境の変化によって受ける影響を最大限少なく抑えるために、電解強度のデータベースを最新の状態になるように随時更新しながら統計的な手法を適用して精度の高い位置検出を行う。特に、提案手法2では、端末の移動状態遷移モデルと各移動状態毎の端末の移動速度を考慮し過去の端末の位置情報を有効に利用することによって、位置検出精度を向上させた。実験結果から提案手法1より提案手法2の方が位置検出の成功確率が高く、提案手法2は提案手法1より有効であることが実証された。

提案手法2を用いることによって、地下街等の屋内空間においても低コストかつ高い精度でのモバイル端末の位置検出が可能となる。

- 文 献
- [1] 無線 LAN 位置検知システム「日立 AirLocation(TM)」, available at <http://www.hitachi-cable.co.jp/infosystem/airlocation/>
 - [2] 小川智明, 吉野修一, 清水雅史, “学習機能を用いたロケーション検出方法の検討,” 信学技報 NS2002-79, RCS2002-107, pp.13-18, 2002.
 - [3] 北須賀輝明, 中西恒夫, 福田見, “無線 LAN を用いた屋内向け測位方式 WiPS のための予備実験,” 情処マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICOMO2003) シンポジウム論文集, pp.401-404, 2003.
 - [4] 伊沢亮一, 毛利公美, 森井昌克, “無線 LAN を用いたモバイル端末の位置検出法について,” 信学技報 OIS2004-3, pp.13-18, 2004.
 - [5] 朝生雅人, 斎川貴彦, 服部武, “セルラーシステムにおける電界強度と移動速度情報を用いた最尤位置検出法,” 情報処理学会論文誌, pp.1409-1417, 2004.
 - [6] Bluesoft inc., available at <http://www.bluesoft-inc.com/wlan.asp>
 - [7] NetStumbler.com - The World Of WiFi, available at <http://www.netstumbler.com/>