

無線 LAN 端末を利用した移動体位置推定法

伊 沢 亮^{†1} 毛 利 公 美^{†2} 森 井 昌 克^{†3}

近年、地下街での移動体の位置推定問題が注目されている。すでに設置されている通信インフラとしての無線 LAN の利用が考えられるが、一般には精度の高い位置推定を行うことは困難である。その一因としては、反射波や障害物の影響等が無線 LAN 基地局からの受信電界強度を大きく揺るがすことにあると考えられる。本論文では電界強度データベースと測位端末の移動状態遷移モデルを用い、受信電界強度の揺らぎから受ける影響を減少させることで精度を向上させることを試みる。電界強度データベースでは位置推定を行う場所の電界強度をデータベース化し、移動状態遷移モデルでは地下街での人の動きを予測することで精度の向上を実現している。提案方式は 1 m の誤差で位置推定が可能である。GPS の利用が困難な屋内において本方式は有効であり、特に人の移動が直線的で自由度が制限される地下街において効果的であると考えられる。

A New Localization Method Using Wireless LAN Terminal

RYOICHI ISAWA,^{†1} MASAMI MOHRI^{†2}
and MASAKATU MORII^{†3}

Recently, the study of the localization inside buildings is focusing much attention by researchers. Although the wireless LAN infrastructures are available with low cost, no method can estimate a location with high precision. The main reason is the sensitization of the electric field intensity against the noise and the reflected signals from obstacles. In this paper, we first experimentally measure the changes of the intensity and summarize the results as the database. Then, we introduce the moving state transition model for the estimation of location combined with the database. From our experimental results, it is confirmed that our method can estimate a location with the precision of ± 1 m. Because our method requires only wireless LAN infrastructure, it is applicable at the inside buildings and underground mall where the conventional methods based on GPS are useless.

1. ま え が き

近年、移動体の位置推定法に関する研究がさかんに行われている。特に GPS (Global Positioning System) を用いた位置推定法はモバイル端末のナビゲーションシステムをはじめとして様々なシステムですでに実用化されている。ナビゲーションシステムを利用することにより、モバイル端末を保持するユーザは自身の現在位置や周辺の店舗の情報、目的地までの経路等の情報を得て、観光や買い物をする際に役立てることができる。一方、GPS 信号を受信できない屋内空間では位置推定の精度が極度に低下するため、屋内空間においても端末の位置情報を把握する方法が求められている。本研究ではすでに広く普及している無線 LAN を測位インフラとして用い、地下街等の屋内で利用可能である精度の高い位置推定法を提案する。

無線を利用した測位システムとしては、測位対象から発生した基準電波を複数の固定された地点で観測、あるいはその逆で、固定された地点から電界強度を発生、移動する測位対象で観測した電界強度を用い、その三角測量から位置を推定する方法が一般的である。すでに Locky.jp¹⁾ や PlaceEngine²⁾ 等により無線 LAN アクセスポイントの電界強度を利用した位置推定ツールがインターネット上に公開されており、位置推定は一般に普及している。しかしながら、電界強度を用いた方式は位置推定の精度を十分大きくとれないことが一般に知られている。これは障害物等の反射波や電波伝搬環境の影響によって、電界強度に著しい揺らぎが生じるためである。精度の高い位置推定を行うためには電界強度の揺らぎによる位置推定の誤差を抑制する必要がある。

本論文ではこの電界強度の揺らぎの影響を抑制するため、電界強度データベースを利用した方法と、それに加えて測位対象の移動状態遷移モデルを利用した 2 つの方法を提案する。前者ではあらかじめ位置推定を行う場所において電界強度を測定しその平均と分散を含めてデータベース化する。この電界強度データベースと得られた測位対象の電界強度から判別分析により、位置推定を行う。後者では前者の方法に加えて、測位対象の状態と移動パターンを予測し、その電界強度との予測誤差によって位置を推定する。特に本提案での移動パ

^{†1} 神戸大学大学院自然科学研究科
Graduate School of Science and Technology, Kobe University

^{†2} 岐阜大学総合情報メディアセンター
Information and Multimedia Center, Gifu University

^{†3} 神戸大学大学院工学研究科
Graduate School of Engineering, Kobe University

ターンを予測するための移動状態モデルでは地下街のような直線的な道路を想定している．実際の地下街での十字路や L 字路を含む碁盤状の通路においても左折，右折等の移動状態モデルを加えることで対処できる．本論文の構成は以下のとおりである．2 章で既存方式について述べる．3 章で提案方式の概要と位置付けを明確にする．4 章で電界強度データベースを利用した方法を提案し，5 章で移動状態遷移モデルを加えた方法を提案する．6 章で評価実験を行い提案方式の有効性を実証し，7 章でまとめる．

2. 無線方式による位置推定法

2.1 TDOA 方式による移動体の位置推定法

TDOA 方式とは移動体が電波を送信した時刻とその電波を観測する複数の地点での時刻によって三角測量により位置推定を行う方法である．TDOA 方式を用いた位置推定法として，AirLocation³⁾ や川端らの方式⁴⁾ があげられる．AirLocation は無線 LAN をインフラに用いており位置推定精度が高く，AirLocation の位置推定精度は 1m から 3m である．川端らの方式は携帯電話等のセルラーシステムをインフラに想定しており，5,000m×5,000m 程度の広い空間において累積確率 67%，誤差 100m 内で位置推定が可能である．TDOA 方式は位置推定の精度は高いものの，システムを導入するためのコストが高くなる．なぜなら TDOA 方式は観測端末間の時刻同期が必要であり，位置推定専用の無線端末が必須となる．また朝生らにより TDOA 方式と電界強度をあわせた方式⁵⁾ が提案されている．

2.2 受信電界強度を利用した位置推定法

受信電界強度を利用した位置推定法では電波を発生する複数の固定された基準点からの受信電界強度が，基準点と移動体，すなわち受信端末間の距離の二乗に反比例することを利用している．しかしながら，基準点と移動体間の障害物等による電波の減衰や天井・床・壁等による反射波の影響，フェージング雑音等の影響によって受信電界強度が不規則に変動するため，位置推定の精度が大幅に低下することが知られている．

受信電界強度を利用した位置推定において，その精度を向上させる方法として，たとえば

- (1) 電界強度を学習する
- (2) 端末を AP として利用する
- (3) 端末位置の遷移をモデル化する
- (4) 端末の移動速度情報を利用する
- (5) 複数アンテナを利用する

方法等がある．(1)として小川らの方式⁶⁾ や Fang らの方式⁷⁾ があり，ともに無線 LAN を

測位インフラに用いている．小川らの方式は位置推定時に得られた電界強度を LVQ (学習ベクトル量子化法) により学習し，位置推定精度を向上させる方式である．Fang らは ML アルゴリズムによる位置推定法の計算量を課題としてあげ，ML アルゴリズムの位置推定精度を維持しながらも計算量を削減する方式を提案している．(2)では北須賀らの方式⁸⁾ や藤井らの方式⁹⁾ がある．北須賀らの方式も無線 LAN を測位インフラに用いるが，移動体と基準点間の電界強度のみを利用するのではなく，同時に複数の移動体の測位を想定し，移動体間の電界強度から各移動体間の距離を求め，それを利用することによって精度を向上させる方式である．藤井らの方式⁹⁾ は Bluetooth や Zigbee 等の PAN デバイスを装着したノードが複数存在する環境での位置推定を想定している．位置が固定されている基準ノードの電界強度と位置情報に加え，遭遇した移動ノードの推定位置情報も位置推定に利用する．また道路の形状等，対象領域の移動可能領域を各移動端末に与え，端末の実移動距離を考慮することで精度向上を図っている．(3)として Nuño-Barrau らの方式¹⁰⁾ がある．Nuño-Barrau らの方式は判別分析による位置推定法に加え，隠れマルコフモデルを用いて位置推定精度を向上させる方式である．位置推定を行う場所を 0.6m² 程度の格子状に区切り，端末が各エリア間を移動する確率を与える．これらの確率を隠れマルコフモデルの遷移確率，各エリアを内部状態，判別分析による推定結果を観測および出力確率としてモデル化する．(4)として朝生らの方式¹¹⁾ や Particle filter を用いた位置推定法¹²⁾，Kushki らの方式¹³⁾ がある．朝生らの方式はセルラーシステムを測位インフラとして用い，端末の移動速度情報を位置推定に利用することにより位置推定精度を向上させる方式である．朝生らは端末の移動速度を平均速度 M_v と標準偏差 σ_v の正規分布としてモデル化している．Particle filter を用いた位置推定法は端末の移動速度情報をベイズ推定等でモデル化し，モデルのパラメータを動的に学習する方式で，位置推定精度が初期値に依存しないことを特徴とする．移動速度情報として移動速度や移動速度ベクトル，加速度を定義している．Kushki らの方式もモデルのパラメータを動的に学習する方式であるが NI filter (Nonparametric Information filter) を用いており Particle filter に比べ計算量が小さい¹³⁾．Kushki らの方式では移動速度情報として移動速度や移動速度ベクトルを定義し，端末の移動を linear Gaussian model でモデル化している．パラメータの学習には Gaussian kernel density を用いる．(5)として安在らの方式¹⁴⁾ がある．安在らの方式はセンサネットワークを対象としており，センサノードの位置を推定する方式である．安在らの方式ではセンサノードに複数のアンテナを設置し，各センサノードが異なるアンテナを使用することにより，電力の揺れを少なくすることで精度を向上させている．

2.3 測位対象の移動状態を用いた位置推定法

移動体の状態を用いた位置推定法として鶴沼らの方式¹⁵⁾がある。鶴沼らの方式では上下方向の振動波形を計測する加速度センサと磁気方位センサを用いて推定する。加速度センサにより速度等の歩行状態を検知し、歩幅を定式化し、その歩数と各状態の歩幅により距離を求め、その距離と方位により位置推定を行う。

3. 提案方式の概要と位置付け

本章では提案方式の概要を述べた後、既存方式との違いを明確にする。

3.1 提案方式の概要

本研究では市販の無線 LAN アクセスポイント (AP) を利用した、無線 LAN 端末の電界強度に基づく位置推定法を提案する。

提案方式では地下街のような閉じられた空間での通路に AP が複数台設置されている環境下での位置推定を想定している。端末が各 AP から受信した受信電界強度を利用することによって端末の位置を推定する。本論文ではあらかじめ学習させることによって得られた端末の受信電界強度のデータベースとそのデータベースを利用した判別分析による位置推定法を提案する。次にその方法に加えて、端末の移動状態遷移モデルと各移動状態ごとの端末の移動速度モデルを利用した位置推定法を与える。前者を提案方式 1、後者を提案方式 2 とする。

提案方式 1 での電界強度データベースでは端末の位置を推定するエリア内の複数地点において、あらかじめ各 AP からの受信電界強度を測定し、それらの値を保存している。電界強度データベースに保存されるデータは推定する各地点での環境の変化による影響 (障害物による電波の減衰や反射波の影響) を受けた電界強度である。提案方式 1 では端末が各 AP からの受信電界強度を測定し、あらかじめ電界強度データベースに格納されているデータをもとに判別分析によって位置推定を行う。さらに端末の位置を推定すると同時に、電界強度データベースを適応的に更新することによって、精度の高い位置推定を可能にしている。

提案方式 2 では提案方式 1 における判別分析の結果を端末の移動状態遷移モデルおよび各移動状態ごとの端末の移動速度モデルを用いて補正を行う。端末の移動状態遷移モデルと各移動状態ごとの端末の移動速度モデルとは次の時刻における端末の状態を予測するため、人の動きに着目し、“歩く”、“止まる”、“向きを変える”といった端末の移動状態の遷移や各移動状態に応じた端末の移動速度をモデル化している。

3.2 既存方式との比較

北須賀らの方式⁸⁾、藤井らの方式⁹⁾は位置推定をする場所に複数の端末が存在する場合は有効な方式であるが、提案方式では市販の AP と 1 台の無線 LAN 端末のみで位置推定を行うことを想定している。安在らの方式は複数のアンテナをセンサノードに設置させる必要がある。安在らの文献 14) では低コストで実装できると述べているが、提案方式が想定している環境とは異なる。小川らの方式⁶⁾や Fang らの方式⁷⁾では位置推定するたびに位置推定精度が向上する点は同じであるが、電界強度の学習の方法や提案方式が端末の移動状態に着目している点で異なる。鶴沼らの方式¹⁵⁾では人の移動状態に着目している点では同じであるが、提案方式は加速度センサや磁気方位計を用いず、事前に端末の移動状態に関するモデルを与えることで位置推定を行うため端末と市販の AP のみで位置推定が可能である。Nuño-Barrau らの方式¹⁰⁾では判別分析を用いる点は提案方式と大きな違いはないが、端末の移動に関するモデルの与え方が異なる。Nuño-Barrau らは各エリア間の移動に対して確率を与えているが、本論文が想定している直線的な道路をエリアに区切ったとしても、各エリア間の遷移に偏差はないといえる。提案方式では歩いている人はそのまま歩き続ける確率が高いといった移動パターンに対して確率を与えることでモデル化している。朝生らの方式¹¹⁾は過去の電界強度と移動速度を用いて位置推定精度を向上させる点については同じであるが、端末の移動状態に着目している点で異なる。Particle filter を用いた位置推定法¹²⁾と Kushki らの方式¹³⁾では端末の移動速度と移動速度ベクトルをモデル化している。移動速度を利用する点や向きという概念が提案方式と共通する。Particle filter を用いた位置推定法よりも計算量が小さい Kushki らの方式に対して実験を行い提案方式のモデルの有効性を示す。なお、提案方式の端末の移動状態に関するモデルを他の方式に適用することで他の方式の位置推定精度を向上させることが可能である。

4. 受信電界強度を用いたモバイル端末の位置推定法 (提案方式 1)

本章では提案方式 1 で用いる電界強度データベースの作成、データ更新方法、および判別分析の適用方法を与える。

4.1 電界強度データベース

本節では想定環境に基づく電界強度データベースを与える。図 1 は四方を壁で囲まれた廊下に n 個の無線 LAN アクセスポイント $AP_0, AP_1, \dots, AP_{n-1}$ が設置されている様子を示している。また L_i ($i = 0, 1, 2, \dots, r-1$) は電界強度データベースに記録するためのデータを測定する地点を与えている。さらに L_0 を起点 (0 m) として一定間隔 γ [m] ごと

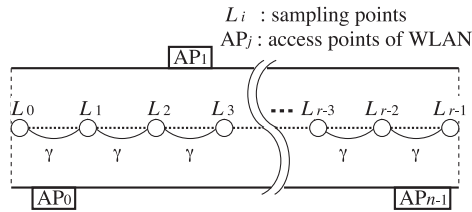


図 1 モバイル端末の位置推定を行う物理的な環境
Fig. 1 The environment for localizing a mobile terminal.

表 1 電界強度データベース (測定地点: $L_0 \sim L_{r-1}$, AP: $AP_0 \sim AP_{n-1}$, サンプル数: p)

Table 1 The database of electric field intensity (sampling points: $L_0 \sim L_{r-1}$, access point: $AP_0 \sim AP_{n-1}$, the number of sampling data: p).

測定地点	AP ₀ からの 受信電界強度 [dBm]	AP ₁ からの 受信電界強度 [dBm]	...	AP _{n-1} からの 受信電界強度 [dBm]
L_0	$x_{L_0(0,AP_0)}$	$x_{L_0(0,AP_1)}$	...	$x_{L_0(0,AP_{n-1})}$
	$x_{L_0(1,AP_0)}$	$x_{L_0(1,AP_1)}$	...	$x_{L_0(1,AP_{n-1})}$
	⋮	⋮	⋮	⋮
	$x_{L_0(p-1,AP_0)}$	$x_{L_0(p-1,AP_1)}$	...	$x_{L_0(p-1,AP_{n-1})}$
L_1	$x_{L_1(0,AP_0)}$	$x_{L_1(0,AP_1)}$	...	$x_{L_1(0,AP_{n-1})}$
	$x_{L_1(1,AP_0)}$	$x_{L_1(1,AP_1)}$	...	$x_{L_1(1,AP_{n-1})}$
	⋮	⋮	⋮	⋮
	$x_{L_1(p-1,AP_0)}$	$x_{L_1(p-1,AP_1)}$	...	$x_{L_1(p-1,AP_{n-1})}$
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
L_{r-1}	$x_{L_{r-1}(0,AP_0)}$	$x_{L_{r-1}(0,AP_1)}$	...	$x_{L_{r-1}(0,AP_{n-1})}$
	$x_{L_{r-1}(1,AP_0)}$	$x_{L_{r-1}(1,AP_1)}$	...	$x_{L_{r-1}(1,AP_{n-1})}$
	⋮	⋮	⋮	⋮
	$x_{L_{r-1}(p-1,AP_0)}$	$x_{L_{r-1}(p-1,AP_1)}$	...	$x_{L_{r-1}(p-1,AP_{n-1})}$

に $L_i = i \cdot \gamma$ [m] のように与えられるものとする。地点 L_i に対して一定時間、各 AP からの受信電界強度を測定し、それらの値を表 1 で与える電界強度データベースに記録する。表 1 での $x_{L_i(l,AP_j)}$ は L_i において $l (< p)$ 回目に測定された、 AP_j ($j = 0, 1, 2, \dots, n-1$) からの受信電界強度である。

4.2 電界強度の時間的変動

電界強度は同じ地点であったとしても必ずしも一定ではない。障害物等が原因となり反射

波や電波の減衰が起こり電界強度が大きく揺らぐ、もしくは障害物がない場合においてもマルチパス環境や気温等の変化により時間の経過とともに緩やかに変化する。提案方式 1 では後者のような比較的緩やかな変化を吸収するために端末の位置推定と同時に電界強度データベースの更新を行う。具体的な更新手順を以下に与える。

電界強度データベース更新手順

step1. 端末が存在している L において各 AP_j からの受信電界強度

$$\mathbf{X}_L = (X_{L(AP_0)}, X_{L(AP_1)}, \dots, X_{L(AP_{n-1})})$$

を測定する。

step2. \mathbf{X}_L から端末の位置 $\tilde{L} \in \{L_0, L_1, L_2, \dots, L_{r-1}\}$ を 4.4 節に与える方法によって推定する。

step3. すべての AP_j に対して以下の条件を満たすとき、測定した $\mathbf{X}_L = (x_{L(AP_0)}, x_{L(AP_1)}, \dots, x_{L(AP_{n-1})})$ を電界強度データベースに追加する。

$$D_{x_{\tilde{L}(AP_j)}}^{\min} \leq X_{L(AP_j)} \leq D_{x_{\tilde{L}(AP_j)}}^{\max} \quad (1)$$

$$D_{x_{\tilde{L}(AP_j)}}^{\min} = D_{x_{\tilde{L}(AP_j)}}^f - \sigma_{\tilde{L}(AP_j)}$$

$$D_{x_{\tilde{L}(AP_j)}}^{\max} = D_{x_{\tilde{L}(AP_j)}}^f + \sigma_{\tilde{L}(AP_j)}$$

ここで、 $D_{x_{\tilde{L}(AP_j)}}^f$ は電界強度データベースに格納されている、地点 \tilde{L} と AP_j の組に対する p 個の電界強度 $x_{\tilde{L}(l,AP_j)}$ ($l = 0, 1, 2, \dots, p-1$) の中で最も出現頻度が高い電界強度の値を表し、 $\sigma_{\tilde{L}(AP_j)}$ は $x_{\tilde{L}(l,AP_j)}$ の標準偏差を表している。 $D_{x_{\tilde{L}(AP_j)}}^{\min}$ は式 (1) が示す条件の最小値、 $D_{x_{\tilde{L}(AP_j)}}^{\max}$ は最大値を示す。

step4. 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。

4.3 判別分析による端末位置の推定

提案方式 1 では端末位置 L において各 AP_j からの受信電界強度 $\mathbf{X}_L = (X_{L(AP_0)}, X_{L(AP_1)}, \dots, X_{L(AP_{n-1})})$ を測定し、電界強度データベースを用い、判別分析を行うことによって端末位置 $\tilde{L} (\in \{L_0, L_1, L_2, \dots, L_{r-1}\})$ を推定する。判別分析とはいくつかのグループに分類されたデータ群が存在するとき、ある未知のデータがどのグループに属しているかを判別する統計解析法である。提案方式 1 では L_i ごとに観測した各 AP_j からの受信電界強度のサンプル値の組を各グループのデータ群、現在の端末位置で測定した電界強度 \mathbf{X}_L を未知のデータとし、 \mathbf{X}_L がどの地点のグループに属しているかを判別分析によって推定する。

電界強度データベースに格納されている L_i ごとの電界強度の観測数を p 、AP の数を n

とするとき、地点 L_i において各 AP_j から得られる受信電界強度の行列 \mathbf{x}_{L_i} を

$$\mathbf{x}_{L_i} = \begin{bmatrix} x_{L_i(0,AP_0)} & \cdots & x_{L_i(0,AP_{n-1})} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{L_i(p-1,AP_0)} & \cdots & x_{L_i(p-1,AP_{n-1})} \end{bmatrix} \quad (2)$$

とする。また L_i における電界強度を各 AP_j ごとに平均した値を $\bar{x}_{L_i(AP_j)}$ とするとき、 L_i に対する平均電界強度ベクトルを

$$\bar{\mathbf{x}}_{L_i} = (\bar{x}_{L_i(AP_0)}, \bar{x}_{L_i(AP_1)}, \dots, \bar{x}_{L_i(AP_{n-1})})^T \quad (3)$$

とする。 \mathbf{x}_{L_i} の分散共分散行列 σ_{L_i} は

$$\sigma_{L_i} = \begin{bmatrix} V_{L_i(AP_0,AP_0)} & \cdots & V_{L_i(AP_0,AP_{n-1})} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ V_{L_i(AP_{n-1},AP_0)} & \cdots & V_{L_i(AP_{n-1},AP_{n-1})} \end{bmatrix} \quad (4)$$

で与えられる。ここで、 σ_{L_i} の各要素 $V_{L_i(a,b)}$ は

$$V_{L_i(a,b)} = \frac{1}{p-1} \sum_{\tau=0}^{p-1} (x_{L_i(\tau,a)} - \bar{x}_{L_i(a)})(x_{L_i(\tau,b)} - \bar{x}_{L_i(b)}) \quad (5)$$

である。 σ_{L_i} の逆行列を $\sigma_{L_i}^{-1}$ とするとき、推定しようとする端末位置 L で測定された電界強度 $\mathbf{X}_L = (X_{L(AP_0)}, X_{L(AP_1)}, \dots, X_{L(AP_{n-1})})$ と L_i における平均電界強度 $\bar{\mathbf{x}}_{L_i}$ 間のマハラノビス距離 $d_{L_i}^2$ は

$$d_{L_i}^2 = (\mathbf{X}_L - \bar{\mathbf{x}}_{L_i})^T \sigma_{L_i}^{-1} (\mathbf{X}_L - \bar{\mathbf{x}}_{L_i}) \quad (6)$$

で与えられる。判別分析において未知のデータはマハラノビス距離が小さいグループに属する可能性が高いため、 $d_{L_i}^2$ の値が小さいほど \mathbf{X}_L が L_i における電界強度である可能性が高いことを意味している。 L_i に端末が存在する確率 $P_d(L_i, \mathbf{X}_L)$ は、マハラノビス距離 $d_{L_i}^2$ を用いて次のように与えることができる。

$$P_d(L_i, \mathbf{X}_L) = \frac{\sum_{k=0}^{r-1} d_{L_k}^2}{d_{L_i}^2} \left(\sum_{h=0}^{r-1} \left(\frac{\sum_{k=0}^{r-1} d_{L_k}^2}{d_{L_h}^2} \right) \right)^{-1}$$

$$= \frac{1}{d_{L_i}^2 \sum_{h=0}^{r-1} \left(\frac{1}{d_{L_h}^2} \right)} \quad (7)$$

提案方式 1 では \mathbf{X}_L が得られたとき、すべての L_i ($i = 0, 1, 2, \dots, r-1$) に対する $d_{L_i}^2$ を計算し、 $P_d(L_i, \mathbf{X}_L)$ が最大となる L_i を端末位置として推定する。以下に電界強度データベースと判別分析を用いた端末の位置推定アルゴリズムを提案方式 1 として与える。

4.4 提案方式 1

step1. 電界強度データベースを作成する。

step2. 位置推定のための電界強度測定：

端末が存在している地点 L において各 AP_j からの受信電界強度 \mathbf{X}_L を測定する。

step3. 判別分析による端末位置推定：

電界強度データベースを用いてすべての L_i に対する $d_{L_i}^2$ を計算し、現在の端末位置を

$$\tilde{L} = \left\{ L_i \mid \max_{0 \leq i < r-1} (P_d(L_i, \mathbf{X}_L)) \right\}$$

として推定する。

step4. 電界強度データベースを更新する。

step5. step2.へ。

(アルゴリズム終了)

5. 端末の移動状態を用いた端末の位置推定法

5.1 移動状態遷移モデル

移動状態遷移モデルを図 2 に与える。移動状態遷移モデルでは“ S_w ”（歩く），“ S_s ”（止まる），“ S_t ”（向きを変える）の 3 つの移動状態を定義している。

移動状態の決定方法を述べる。図 1 のような位置推定を行う場所の地点 L_i は 4.1 節で述べたように $L_i = i \cdot \gamma$ [m] で与えるため各 L_i において $L_0 < L_1 < \dots$ が成り立つ。時刻 T の端末の移動状態を S_T ($\in \{S_w, S_s, S_t\}$) としたとき、 S_T は時刻 T から $T-2$ における任意の端末位置 y_T から y_{T-2} と表 2 により決定される。表 2 に移動状態を決定する条件を与えており、表中の m は T もしくは $T-1$ であり $y_m \in \{L_0, L_1, L_2, \dots, L_{(r-1)}\}$ である。たとえば $y_{T-2} = L_0$, $y_{T-1} = L_1$, $y_T = L_2$ を与えると条件 1 に該当するため S_T は S_w となる。これは端末が 1 方向に移動していることから歩いている状態とした。時刻 $T-1$ の移動状態は S_{T-1} ($\in \{S_w, S_s, S_t\}$) とし y_{T-1} から y_{T-3} と表 2 により決定される。

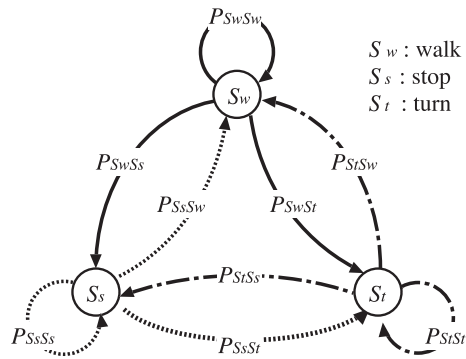


図 2 端末の移動状態遷移モデル

Fig. 2 The moving state transition model of a mobile terminal for the estimation of location.

表 2 移動状態を決定する条件

Table 2 The condition for deciding the movement of a mobile terminal.

移動状態	条件
S_w	1: $y_{m-2} < y_{m-1} < y_m$
	2: $y_{m-2} > y_{m-1} > y_m$
	3: $y_{m-2} = y_{m-1} < y_m$
	4: $y_{m-2} = y_{m-1} > y_m$
S_s	5: $y_{m-2} < y_{m-1} = y_m$
	6: $y_{m-2} > y_{m-1} = y_m$
	7: $y_{m-2} = y_{m-1} = y_m$
S_t	8: $y_{m-2} < y_{m-1} > y_m$
	9: $y_{m-2} > y_{m-1} < y_m$

次に移動状態の遷移とその遷移確率について述べる．移動状態の遷移とは S_{T-1} から S_T に遷移することを意味し， y_T から y_{T-3} を与えることで決定される． S_{T-1} は y_{T-1} から y_{T-3} により決定し S_T は y_T から y_{T-2} により決定する． S_{T-1} から S_T に遷移する確率を移動状態の遷移確率と呼び $P_{S_{T-1}S_T}$ と表す．たとえば S_{T-1} が S_w ， S_T が S_w のとき遷移確率を $P_{S_wS_w}$ と表す． $P_{S_{T-1}S_T}$ は位置推定を行う環境に合わせて与える値であり式 (8) ~ (10) を満たす．ここで，式 (8) ~ (10) は S_{T-1} に 1 つの移動状態を与えたとき， S_T がとりうる各状態に遷移する確率の合計が 1 であることを示している．地下街のような直線的な通路では人の移動はある程度限定されているため，その環境を観測し各確率を経験則で与えることができると考えられる．たとえば測位対象が歩き続ける確率が高い環境においては

$P_{S_wS_w}$ に $P_{S_wS_s}$ や $P_{S_wS_t}$ よりも高い値を与える．

$$P_{S_wS_w} + P_{S_wS_s} + P_{S_wS_t} = 1 \tag{8}$$

$$P_{S_sS_w} + P_{S_sS_s} + P_{S_sS_t} = 1 \tag{9}$$

$$P_{S_tS_w} + P_{S_tS_s} + P_{S_tS_t} = 1 \tag{10}$$

以上より移動状態遷移モデルを式 (11) に与える．

$$P_S(S_{T-1}, S_T) = P_{S_{T-1}S_T} \tag{11}$$

ここで， $P_S(S_{T-1}, S_T)$ は S_{T-1} と S_T を与えたときの遷移確率を示す．

移動状態遷移モデルの妥当性を考える．図 1 のような地下街の直線的な通路を人が移動するとき中央 (L_i 上) を移動すると仮定する．このとき人の移動は S_w ， S_s ， S_t ですべて表すことができる．地下街において歩き続ける移動 (S_s から S_s の遷移) の確率の方が向きを変え続ける移動 (S_t から S_t の遷移) よりも確率が高いと考えることができ，この確率の偏差を位置推定に利用する． S_t は $S_w \rightarrow S_s \rightarrow$ (逆方向への) S_w の遷移と考えることもできるが S_t を定義することで人の移動をより容易にモデル化することができる．一例として，ある地点 L_i と L_{i+1} を行き来する，つまり向きを変え続ける移動を考える．このとき移動状態の遷移を決定する端末位置として $y_{T-3} = L_i$ ， $y_{T-2} = L_{i+1}$ ， $y_{T-1} = L_i$ ， $y_T = L_{i+1}$ が与えられ，移動状態遷移モデルでは S_t から S_t に遷移すると判定され，その遷移確率が出力される．次の時刻には $y_{T-2} = L_{i+1}$ ， $y_{T-1} = L_i$ ， $y_T = L_{i+1}$ ， $y_{T+1} = L_i$ が与えられ，この場合においても S_t から S_t に遷移したと判定される．すなわち必ず 4 つの端末位置から S_t から S_t の遷移が判定できる．これに対し“歩く”と“止まる”の状態だけでは向きという概念がないためモデル化することが難しい．また Kushki らの方式のように移動速度と移動速度のベクトルをモデル化し移動速度 0 の状態を S_s とし，移動速度のベクトルを反転させることで S_t を表現することも考えられるが移動状態遷移モデルの方が容易にモデル化できる．Kushki らの方式では移動速度の平均と共分散行列を与えた linear Gaussian model により移動速度をモデル化している．このとき各移動状態に遷移する確率は移動速度の平均と共分散行列に依存してしまう．人は，歩いている速度に関係なく止まることや向きを変えることが可能で，移動速度と移動状態の遷移には大きな相関はない．このことから移動速度と移動状態の遷移確率は独立して定義できる方が望ましい．

5.2 端末の移動速度

提案方式 2 では式 (12) で与えるように，端末の移動速度 v は v の平均 M_{S_T} [m/s]， v の分散 $(\sigma_{S_T})^2$ の正規分布に従うと仮定する．

$$P_v(v, S_T) = \frac{1}{\sqrt{2\pi(\sigma_{S_T})^2}} \exp\left(-\frac{(v - M_{S_T})^2}{2(\sigma_{S_T})^2}\right) \quad (12)$$

ここで, $S_T \in \{S_w, S_s, S_t\}$ であり, M_{S_T} および $(\sigma_{S_T})^2$ の値は移動状態ごとに与える. v は $T-1$ と T 間の端末の移動速度を示す. $P_v(v, S_T)$ は端末の移動状態が S_T であるときに v である確率を示す. 式 (12) を移動速度モデルと呼ぶ.

5.3 提案方式 2

時刻 $T-3$ から T に測定した各 AP からの電界強度のベクトル $\hat{\mathbf{X}} = (\mathbf{X}_{T-3}, \mathbf{X}_{T-2}, \mathbf{X}_{T-1}, \mathbf{X}_T)$ が与えられたとき, 式 (7), (11), (12) を用いることにより, T に端末が位置 y_T に存在する確率は以下のように与えることができる.

$$P(y, \hat{\mathbf{X}}) = \prod_{k=0}^3 P_d(y_{T-k}, \mathbf{X}_{T-k}) \times P_S(S_T, S_{T-1}) \times P_v(v, S_T) \quad (13)$$

ここで, $\mathbf{y} = (y_{T-3}, y_{T-2}, y_{T-1}, y_T)$ であり任意の組合せを与える. v は 1 時刻間に移動した距離 $\|y_T - y_{T-1}\|$ として速度の近似値を与える. なお, 端末の移動速度の最大値を V_{\max} として任意の値を与え $v < V_{\max}$ とする.

モバイル端末の位置推定方法のアルゴリズム

step1. 電界強度データベースを作成する.

step2. 位置推定のための電界強度測定:

端末が存在している地点 L において各 AP $_j$ からの受信電界強度 $\hat{\mathbf{X}}_L$ を測定する.

step3. $v < V_{\max}$ を満たす \mathbf{y} の任意の組合せ \mathbf{Y} を与える.

step4. 式 (13) により $P(\mathbf{Y}, \hat{\mathbf{X}}_L)$ を求める.

step5. すべての \mathbf{y} の組合せに対し step4. を行い, $P(\mathbf{Y}, \hat{\mathbf{X}}_L)$ が最も高い \mathbf{Y} の y_T を時刻 T の端末位置とする.

step6. 電界強度データベースを更新する.

step7. step2. へ.

(アルゴリズム終了)

6. 評価実験

提案方式 1 と提案方式 2 を用いて端末の位置推定を行った結果を示す.

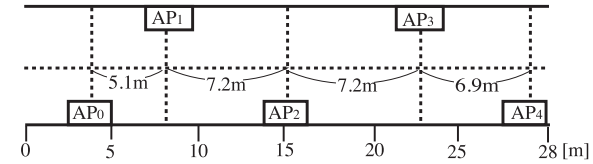


図 3 実験場所 (平面図)

Fig. 3 The environment of experiment (plan).

6.1 実験環境

本実験の場所として地下街の通路を想定し, 四方が壁で囲まれた $28.0\text{m} \times 2.4\text{m}$ の廊下を選んだ. 廊下の天井には 5 つの AP を設置している (図 3). 本実験では式 (11) の移動状態遷移モデルのパラメータとして次の値を用いた.

$$P_{S_w S_w} = 0.7, P_{S_w S_s} = 0.2, P_{S_w S_t} = 0.1$$

$$P_{S_s S_w} = 0.2, P_{S_s S_s} = 0.7, P_{S_s S_t} = 0.1$$

$$P_{S_t S_w} = 0.4, P_{S_t S_s} = 0.5, P_{S_t S_t} = 0.1$$

これらの値は次の仮定により決定した. 地下街のような直線の通路において人は, 1) 1 方向に歩き続けることが多く, 2) 止まったときはしばらく止まり続ける, 3) 向きを変え続けることは少ない. また式 (12) の移動速度モデルのパラメータとして次の値を用いた.

$$M_{S_w} = 0.6000, (\sigma_{S_w})^2 = 0.0225$$

$$M_{S_s} = 0.0000, (\sigma_{S_s})^2 = 0.0225$$

$$M_{S_t} = 0.3000, (\sigma_{S_t})^2 = 0.0225$$

6.2 節で述べるように本実験での単位時刻 (1 [t]) は約 0.5 秒である. 人の歩く平均速度を 1.2 [m/s] と仮定し $M_{S_w} = 0.6\text{ [m/t]}$ とした. M_{S_s} は止まっている状態を示すため 0 [m/t] , M_{S_t} は向きを変える時間を考慮し 0.3 [m/t] とした. 式 (13) の v の最大値 V_{\max} は 1 [m/t] とした. Kushki らの方式に与えるパラメータを表 3 に示す. 各値は Kushki らの文献 [13] に従い与えた.

実験の準備として廊下中央の 0 m から 28 m 地点まで $\gamma = 0.5\text{ [m]}$ 間隔ごとに各 AP からの受信電界強度 (サンプル数 $p = 666$) を測定し電界強度データベースを作成した. 電界強度の測定にはノート PC に Network Stumbler¹⁶⁾ をインストールし, RSSI 値 (Received Signal Strength Indicator) を測定した. この環境をノート PC を持った人が移動してそのノート PC の位置を推定する.

表 3 Kushki らの方式に与えるパラメータ
Table 3 The parameters given to Kushki, et al.'s method.

パラメータ	値
Δ	1.0
q	2
Σ_r	1.0
Σ_x	$\begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$
$w_i(\mathbf{r}(k))$	文献 17) の式 (4)
$\mathbf{P}_r(0)$	文献 17) の式 (24)
$\hat{\mathbf{x}}_r(0)$	$[0.5 \ 1.0 \ 0 \ 0]^T$

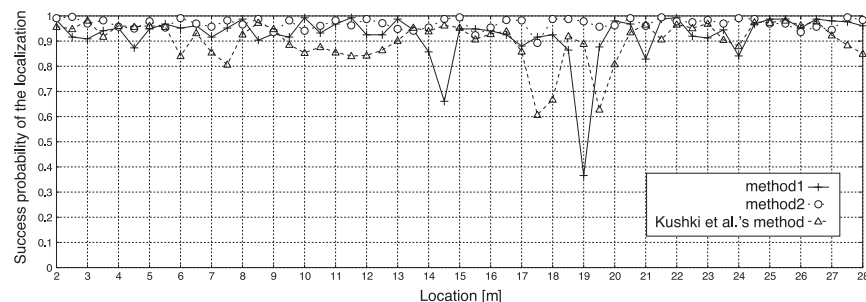


図 4 提案方式 1 と提案方式 2, Kushki らの方式の比較

Fig. 4 The success probability of the localization by method1, method2 and Kushki, et al.'s method.

6.2 各方式による位置推定実験

廊下中央の 0m から 28m まで移動すると同時に提案方式 1 と提案方式 2, Kushki らの方式¹³⁾ を用い端末の位置を推定する．移動状態は移動状態遷移モデルに従い S_w を基本とし途中 S_s と S_t を何度か行う．ビデオ撮影（時刻同期含む）により移動した経路と各地点を通過した時刻を記録することで，位置推定の成否を判定する．これを 250 回試行して各地点での位置推定の誤差を調べそれぞれの方式を評価する．なお，受信電界強度のサンプリング間隔は 1 秒間に約 2 回で，サンプリングのたびに位置推定を行うため提案方式 1 と提案方式 2, Kushki らの方式の単位時刻 (1 [t]) は約 0.5 秒となる．

提案方式 1 と提案方式 2, Kushki らの方式を用いて位置推定した結果を図 4 に示す．横

軸は廊下中央の各地点 [m] を示し縦軸は横軸の地点における位置推定の成功確率を示している．提案方式 1 と提案方式 2 については端末が実際に存在する位置と推定した位置の誤差が 0m である場合に位置推定に成功したものとす．Kushki らの方式は位置推定の結果が連続値で出力されるため誤差が 0.5m 未満である場合に位置推定に成功したものとす．式 (14) に成功確率の定義を与える．

$$\text{成功確率} = \frac{\text{位置推定に成功した回数}}{\text{位置推定を行った回数}} \quad (14)$$

図 4 から提案方式 1 は大部分の地点において位置推定が 90%以上の確率で成功していることが分かる．14.5m と 19.0m の地点においては成功確率が下がっている．これらの地点の近くには靴箱やダンボールといった障害物が存在し電界強度の揺れが他の地点より大きいことが原因だと考えられる．提案方式 2 では提案方式 1 の成功確率が低い地点においても位置推定の成功確率が高く移動状態遷移モデルと移動速度モデルが有効であるといえる．Kushki らの方式は電界強度の揺れを Gaussian kernel という単純な方法で近似しているにもかかわらず大部分の地点において位置推定が 80%以上の確率で成功している．これは端末の移動速度情報を位置推定に利用しているためだといえる．しかしながら，17.5m や 18.0m, 19.5m の地点では位置推定の成功確率が下っており，障害物の影響による電界強度の揺れを吸収しきれなかったことが原因だと考えられる．

実験で行った移動の仕方を図 5 に 2 つあげる．Example 1 では 9.0m の地点で 9 [t] の間止まり，23.0m の地点で 8 [t] の間止まったことを示している．この試行において提案方式 2 では 9.0m の地点で止まったとき，つまり S_w から S_s に遷移したとき位置推定に失敗したがそれ以外では位置推定に成功した．歩き続ける状態や止まり続ける状態のように移動状態遷移モデルに従う場合は高い確率で位置推定に成功する．Example 2 では 13.0m と 6.0m の地点で向きを変えている．この試行では 13.0m で向きを変えた直後の 12.5m の地点での位置推定には失敗したが，6.0m で向きを変えた直後の 6.5m の地点では位置推定に成功した．位置推定の結果は移動状態遷移モデルだけに依存しているわけではなく判別分析の結果も位置推定の成功に寄与している．

実際の端末位置と推定位置の誤差に許容を持たせ，その誤差以下であれば位置推定に成功したものと考える．提案方式 2 の推定結果に対し許容した誤差ごとの成功確率を図 6 に示している．たとえば許容した誤差が 1.0m のとき約 98.5%の成功確率で位置推定に成功している．

提案方式 2 の性能が低下する移動の例を図 7 にあげる．図 7 では 14.5m の地点と 15.5m

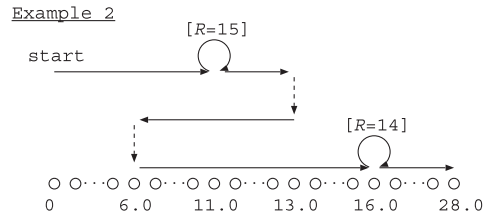
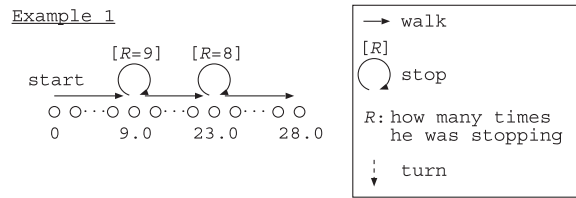


図 5 実験で行った移動の例

Fig. 5 Two examples of motion in the experiment.

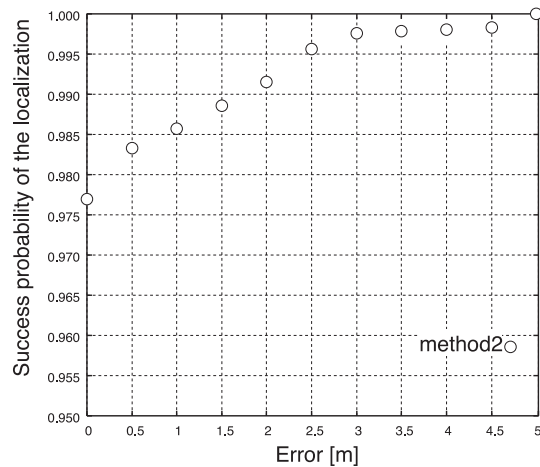


図 6 誤差ごとの成功確率

Fig. 6 The success probability of each error.

の地点を行き来しており、向きを変え続けている。このような移動は 6.1 節で述べた仮定に従っていないため実験では行っていない。15.0 m の地点で位置推定を 7 回行っているが 5 回失敗している。移動状態遷移モデルに与えた確率の低い移動状態の遷移を行い、かつ判

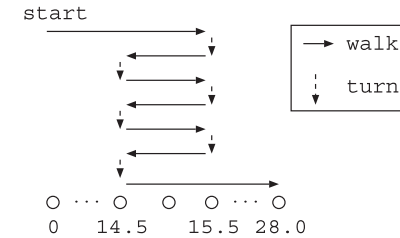


図 7 提案方式 2 の性能が低下する移動の一例

Fig. 7 An example of motion which can degrade localization accuracy of method 2.

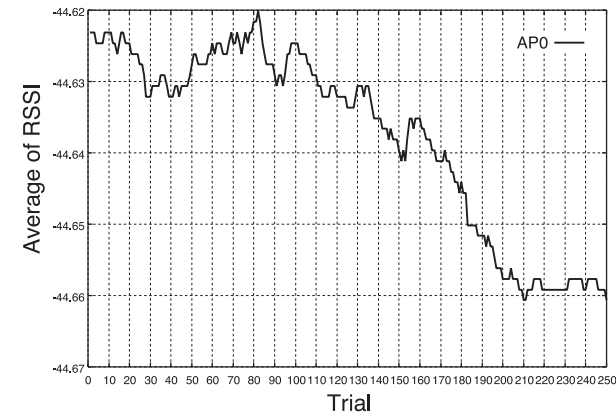


図 8 電界強度データベース (地点 8.0 m, AP₀) の平均値の変化

Fig. 8 Average of RSSI in the database (8.0 m, AP₀).

別分析の位置推定精度が低い地点では提案方式 2 の性能は低下する。

6.3 電界強度データベース更新機能の有効性

提案方式では 4.2 節で述べたようにマルチパス環境や気温等による電界強度の変化を吸収するために電界強度データベースの更新を行う。提案方式 1 による更新の結果として図 8 に電界強度データベース (8.0 m 地点, AP₀) の平均値の変化を示す。試行回数を重ねるたびに平均値は変化しており更新が行われていることが分かる。測定した電界強度は位置推定結果の地点のもと見なして更新するため、電界強度データベースの更新の有効性は位置推定精度に依存する。しかしながら、提案方式では位置推定に失敗した際、その電界強

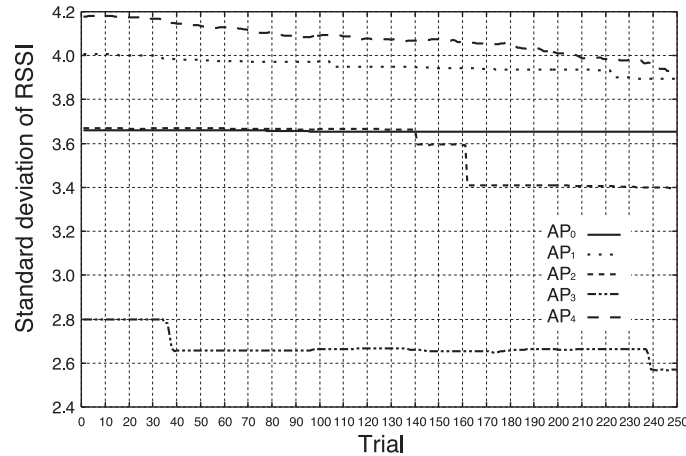


図 9 電界強度データベース (8.0m 地点) の標準偏差の変化
Fig. 9 Standard deviation of RSSI in the database (8.0m).

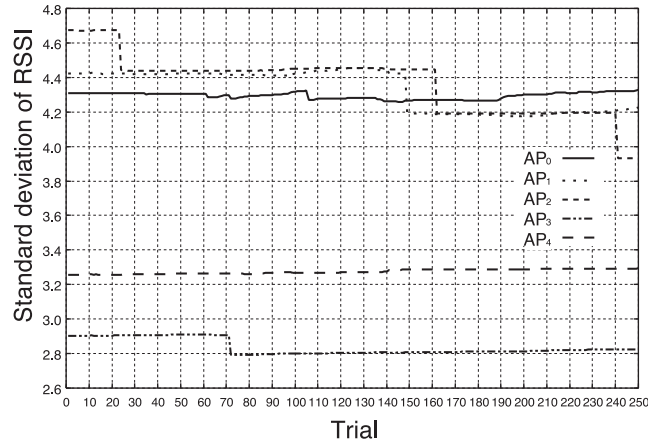


図 10 電界強度データベース (21.0m 地点) の標準偏差の変化
Fig. 10 Standard deviation of RSSI in the database (21.0m).

表 4 最頻値の変化 (8.0m 地点)
Table 4 Mode of RSSI in the database (8.0m).

	最頻値 [dBm]	
	実験開始時	実験終了時
AP ₀	-44	-45
AP ₁	-38	-39
AP ₂	-58	-58
AP ₃	-51	-51
AP ₄	-60	-60

度をそのまま電界強度データベースに反映させるのではなく、電界強度データベースの更新手順 step3. により電界強度の妥当性を判定することで性能の低下を防ぐ。電界強度データベース内の 8.0m 地点と 21.0m 地点の標準偏差の変化をそれぞれ図 9 と図 10 に示す。成功確率の高い 8.0m 地点については試行を重ねるたびに標準偏差が全体的に小さくなっており更新は成功していると考えられる。図 10 では AP₀ の標準偏差はやや上がっているものの、その他の AP の標準偏差は小さくなっている。表 4 は実験開始時と終了時の最頻値を示しており、AP₀ と AP₁ の最頻値が更新されている。継続して位置推定を行うことで時間による電界強度の変化を吸収できると考えている。

7. むすび

本論文では電界強度を利用したモバイル端末の位置推定法を提案した。提案方式 1 ではあらかじめ環境の影響を含んだ電界強度を位置推定に用いることで、位置推定の精度を向上させた。提案方式 2 では提案方式 1 に端末の移動に関するモデルを与えることで、提案方式 1 の位置推定の精度をさらに向上させた。端末が移動した経路を推定した実験では 28.0m×2.4m の廊下において、誤差 1m で位置推定が可能で、提案方式 2 の有効性を実証するとともに、端末の移動状態に関するモデルが位置推定に有効であることを示した。地下街には十字路や L 字路を含む碁盤状の通路も存在するが、直進する通路における位置推定が基本となる。移動状態遷移モデルにおいて左折、右折等のモデルを追加することによって対応できると考えられる。

参考文献

- 1) Locky.jp project : Locky.jp 無線 LAN を用いた位置情報・測位ポータル, Locky.jp (オンライン), 入手先(<http://locky.jp/>) (参照 2010-06-25).

- 2) クウジツ (株): 無線 LAN・位置情報 PlaceEngine, クウジツ (株) (オンライン), 入手先<<http://www.placeengine.com/>> (参照 2010-06-25).
- 3) (株) 日立製作所: 無線 LAN 位置情報システム日立 AirLocation™II, (株) 日立製作所 (オンライン), 入手先<<http://www.hitachi.co.jp/wirelessinfo/pdf/al2-catalogue-system.pdf>> (参照 2010-06-25).
- 4) 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, 電子情報通信学会論文誌 B, Vol.J87-B, No.2, pp.285-291 (2004).
- 5) 朝生雅人, 服部 武: セルラシステムにおける到来時間差と電界強度を用いたハイブリッド最ゆう位置検出方式, 電子情報通信学会論文誌 B, Vol.J92-B, No.1, pp.312-319 (2009).
- 6) 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).
- 7) Fang, S.-H., Lin, T.-N. and Lin, P.-C.: Location Fingerprinting in a Decorrelated Space, *IEEE Trans. Knowledge and Data Engineering*, Vol.20, No.5, pp.685-691 (2008).
- 8) 北須賀輝明, 中西恒夫, 福田 晃: 無線通信網を用いた屋内向け測位方式, 情報処理学会論文誌: コンピューティングシステム, Vol.44, No.SIG 10(ACS 2), pp.131-140 (2003).
- 9) 藤井彩恵, 内山 彰, 前田久美子, 梅津高朗, 山口弘純, 東野輝夫: 少数の基準位置情報を移動無線端末間で補完する位置推定手法の提案と評価, 情報処理学会論文誌, Vol.48, No.12, pp.3977-3986 (2007).
- 10) Nuño-Barrau, G. and Páez-Borrillo, J.M.: A New Location Estimation System for Wireless Networks Based on Linear Discriminant Functions and Hidden Markov Models, *EURASIP Journal on Applied Signal Processing*, Vol.2006, No.1, pp.159-175 (2006).
- 11) 朝生雅人, 齋川貴彦, 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手法, 情報処理学会論文誌, Vol.45, No.5, pp.1409-1416 (2004).
- 12) Hightower, J. and Borriello, G.: Particle Filters for Location Estimation in Ubiquitous Computing: A Case Study, *Proc. 6th International Conference on Ubiquitous Computing*, pp.88-106 (2004).
- 13) Kushki, A., Plataniotis, K.N. and Venetsanopoulos, A.N.: Intelligent Dynamic Radio Tracking in Indoor Wireless Local Area Networks, *IEEE Trans. Mobile Computing*, Vol.9, No.3, pp.405-419 (2010).
- 14) 安在大祐, 原 晋介: センサネットワークにおける複数送信アンテナによる位置・方向推定法, 電子情報通信学会論文誌 B, Vol.J91-B, No.6, pp.666-676 (2008).
- 15) 鶴沼宗利, 倉田謙一郎, 外山敦也, 堀江 武: 人の歩行動作認識技術を応用した自律的位置検出手法, 電子情報通信学会論文誌 A, Vol.J87-A, No.1, pp.78-86 (2004).

- 16) NetStumbler.com: NetStumbler.com, NetStumbler.com (online), available from (<<http://www.netstumbler.com/>>) (accessed 2010-12-23).
- 17) McGuire, M. and Plataniotis, K.N.: Dynamic Model-Based Filtering for Mobile Terminal Location Estimation, *IEEE Trans. Vehicular Technology*, Vol.52, No.4, pp.1012-1031 (2003).

(平成 22 年 8 月 9 日受付)

(平成 23 年 6 月 3 日採録)



伊沢 亮一 (学生会員)

2004 年徳島大学工学部知能情報工学科卒業。2006 年同大学大学院工学研究科知能情報工学専攻博士前期課程修了。現在、神戸大学大学院自然科学研究科情報・電子科学専攻博士後期課程在学中。主に無線環境における位置推定、情報セキュリティ等の研究に従事。電子情報通信学会会員。



毛利 公美

1993 年愛媛大学工学部情報工学科卒業。1995 年同大学大学院工学研究科情報工学専攻博士前期課程修了。同年香川短期大学経営情報科助手。1998 年徳島大学工学部知能情報工学科助手, 2003 年同講師, 2002 年博士 (工学)。2007 年岐阜大学総合情報メディアセンター准教授, 現在に至る。主に符号理論, 情報セキュリティ, 暗号理論等の研究, 教育に従事。

IEEE 会員。電子情報通信学会シニア会員。



森井 昌克

1983年佐賀大学工学部卒業．1989年大阪大学大学院工学研究科通信工学専攻博士課程修了．工学博士．同年京都工芸繊維大学工芸学部電子情報工学科助手．1990年愛媛大学工学部情報工学科講師，1992年同助教授，1995年徳島大学工学部知能情報工学科教授を経て，2005年神戸大学工学部電気電子工学科教授．現在，同大学院工学研究科教授．情報セキュリティ，代数的符号理論，離散数学，デジタル信号処理アルゴリズム，コンピュータネットワーク等の研究，教育に従事．電子情報通信学会情報セキュリティ研究会専門委員会，同ライフログとオフィスシステム研究専門委員会，同情報通信システムセキュリティ研究専門委員会，各委員長を歴任．平成19年度電子情報通信学会功労賞，平成22年度FIT船井ベストペーパー賞．電子情報通信学会シニア会員，IEEE，情報理論とその応用学会各会員．
