

指向性アンテナを用いた無線 LAN アクセスポイントの位置推定手法

佐藤 弘和^{†a)} 伊藤 誠悟[†] 河口 信夫^{†,††}

Position Estimation Technique of Wireless Access Point Using Directional Antenna

Hirokazu SATOH^{†a)}, Seigo ITO[†], and Nobuo KAWAGUCHI^{†,††}

あらまし 近年、無線 LAN 技術の普及に伴い、無許可での無線 LAN アクセスポイントの設置などの問題が生じている。このような状況において、アクセスポイントの位置を特定したいというニーズは大きく広がってきている。例えば、無許可で設置されたアクセスポイントによる通信障害などの問題が発生した場合、ネットワーク管理者は原因となるアクセスポイントの位置を特定し、それを除去する必要がある。そこで本研究では無線 LAN アクセスポイントの位置特定の支援を目的とし、指向性アンテナを用いた位置推定手法を提案する。本手法は事前に作成した距離と受信側の方向に基づく電波強度のモデルを用いて位置推定を行い、それをユーザに逐次提示することでアクセスポイントの位置特定の支援を行う。距離と受信側の方向に基づく非対称なモデルを推定に用いることによって、距離のみに基づく対称なモデルに比べてアクセスポイントの存在確率分布をより速く先鋭化することができる。本手法に基づくアクセスポイント探索支援システムを開発し、それをを用いて評価実験を行い、本手法の有効性を確認した。

キーワード 位置推定, 無線 LAN, 指向性アンテナ, セキュリティ

1. まえがき

近年、無線 LAN 技術の普及は著しい。ノート PC や PDA をはじめ携帯電話 [24] やデジタルカメラなど、多くの機器に無線 LAN 機能が搭載されており、駅構内やホテルなどでは公衆無線 LAN サービスが展開されている [26]。無線 LAN 技術の普及に伴い、新たなサービスが登場しつつある。サービスの一例として、無線 LAN を用いた測位システムや位置依存サービスなどが挙げられる [1], [4], [5], [23]。一方、普及に伴い新たな問題も生じてきている。例えば、無許可で設置されたアクセスポイントにより、展示会などにおいてネットワークの通信障害が発生したり、セキュリティが不十分なアクセスポイントの設置により、ネットワークへの不正侵入が発生したり、ESSID を詐称したアクセスポイントに正規のユーザがアクセスすることにより、Web 認証などの ID、パスワードが盗まれ

る危険性などが挙げられる。

このような状況において、アクセスポイントの位置を特定したいというニーズが生じている。例えば、無線 LAN を用いた測位システムや位置依存サービスの多くは、アクセスポイントの位置情報を用いてユーザの測位を行っている。このため、これらのシステムを構築する際は、測位に用いるアクセスポイントの位置情報を収集し登録する作業が必要となる [6]。また、無許可で設置されたアクセスポイントによってネットワークに通信障害が生じた場合、ネットワーク管理者は原因となっているアクセスポイントの位置を特定し、それを除去する必要がある。

しかしながら、現在までにアクセスポイントの位置を用いてユーザの位置を特定する手法については様々な提案がなされてきたが [1], [2], [4], [23]、逆にアクセスポイントの位置を特定する手法については今までほとんど議論されていない。そこで、本論文ではアクセスポイントをはじめとする無線 LAN ネットワークノードの位置特定の支援を目的とし、指向性アンテナを用いた位置推定手法を提案する。提案手法では、無線通信における距離特性と指向性アンテナを利用することにより、ユーザのもつアンテナと探索対象となるアクセスポイントとの間の距離だけでなくアンテナの

[†] 名古屋大学大学院情報科学研究科, 名古屋市
Graduate School of Information Science, Nagoya University,
1 Furo-Cho, Chikusa-ku, Nagoya-shi, 464-8601 Japan

^{††} 名古屋大学情報連携基盤センター, 名古屋市
Information Technology Center, Nagoya University, 1 Furo-
Cho, Chikusa-ku, Nagoya-shi, 464-8601: Japan

a) E-mail: hsato@el.itc.nagoya-u.ac.jp

方向によっても受信電波強度の変化を得ることができる。このため、アクセスポイントの存在確率分布をより迅速に先鋭化させることができる。

2. 無線 LAN アクセスポイントの位置特定

2.1 既存の測位技術

既存の測位システムの測位手法の多くは, Triangulation, Proximity, Scene Analysis に大別される。

2.1.1 Triangulation

位置が既知である基準点からの相対的な位置関係を用いて測位を行う技術として Triangulation がある。この方法は複数の基準点を必要とする。

三つ以上の基準点からの距離を用いて測位を行う方法を Lateration と呼ぶ (図 1)。二つ以上の基準点からの方向を用いて測位を行う方法を Angulation と呼ぶ (図 2)。

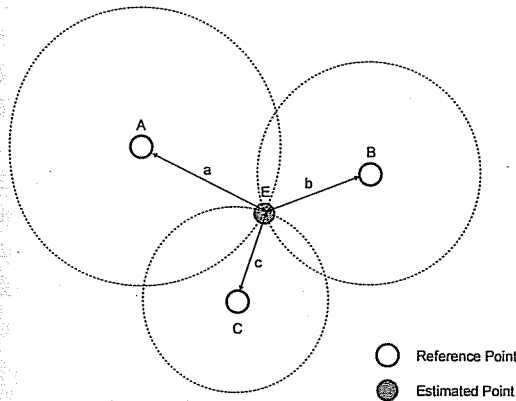


図 1 Lateration
Fig.1 Lateralation.

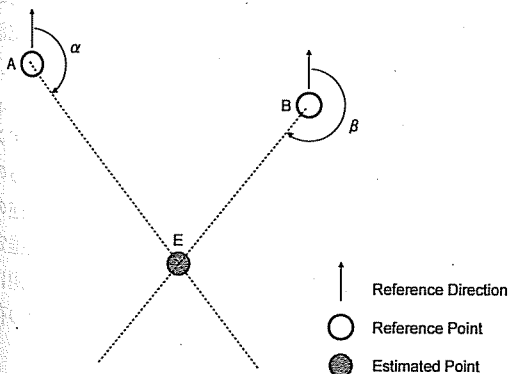


図 2 Angulation
Fig.2 Angulation.

2.1.2 Proximity

何らかの物理現象を用いて, 測位対象がどの基準点の近くに存在するかを決定する方法として Proximity がある (図 3)。例えば, ESSID の異なるアクセスポイントが複数設置されていた場合, ユーザの端末がどの ESSID のアクセスポイントに接続しているかを監視することで, ユーザがどのアクセスポイントの側に存在するかを決定する。

2.1.3 Scene Analysis

この手法では, 測位を行う領域中の複数の特定の位置で Scene を観測し, 各 Scene とその Scene を観測した場所を対応づけるデータベースを学習データとして事前に構築しておく。測位時は, Scene を観測し, それを用いて事前に構築したデータベースからその位置を引くことで測位を行う。

2.2 本手法のアプローチ

本研究では, アクセスポイントを探索するユーザを支援することを目的としており, ユーザの置かれた状況から得られる情報を用いて支援を行うことと仮定する。前述した三つの測位技術のうち, Scene Analysis ではアクセスポイントの設置場所ごとに標本となる位置で Scene を観測して学習データを構築しなければならず, 本研究の目的に適していない。また, 推定精度の観点から Proximity では不十分であると考えられる。Triangulation では Lateration と Angulation があるが, ユーザの置かれた状況から得られる情報を用いて支援を行う場合, ユーザの場所が基準点となり, ユーザが移動して計測することで基準点の数は増加していく。Angulation のように方向の情報を使うことで, より少ない基準点で測位が可能となり, ユーザの移動の

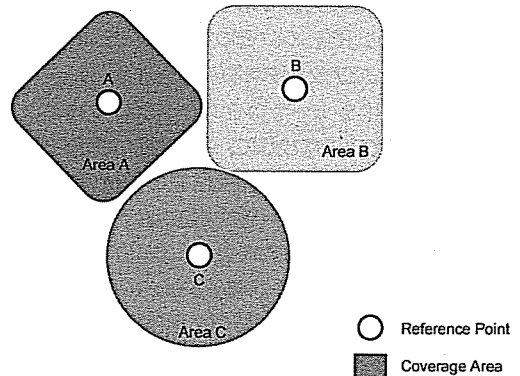


図 3 Proximity
Fig.3 Proximity.

負担を軽減させることができる。

以上のような観点から、本研究では Triangulation (Angulation) に基づく手法を提案する。

3. 指向性アンテナを用いたアクセスポイントの位置推定手法

本章では、無線 LAN アクセスポイントの位置特定の支援を目的とした位置推定手法を提案する。

3.1 アプローチ

本手法ではアクセスポイントの位置特定を支援するために、それまでに得られる情報からアクセスポイントの位置推定を行い、その結果を逐次ユーザに提示することを目的とする。本論文では、より迅速な探索支援のために、事前に作成した距離と受信側の方向に基づく非対称な電波強度モデルを用いて確率的に推定を行う。非対称なモデルを推定に用いることによって、対称なモデルに比べてアクセスポイントの存在確率分布をより迅速に先鋭化させることができる。非対称なモデルの実現のために提案手法では指向性アンテナを用いる。

3.2 手法の概要

本手法は、ユーザの位置、ユーザのもつ指向性アンテナの方向、アクセスポイントからの受信電波強度を用いてアクセスポイントの位置推定を行う。前提条件として、探索対象となるアクセスポイントは無指向性であるとする。

まず、事前にアンテナとアクセスポイントとの間の距離とその方向について電波強度のモデルを学習データとして構築しておく。探索時には、ユーザの位置、ユーザのもつ指向性アンテナの方向、アクセスポイントからの受信電波強度を繰り返し計測し、計測したデータと電波強度モデルを用いてアクセスポイントの位置推定を行う。そして、その推定結果をユーザに逐次提示することでアクセスポイントの位置特定の支援を行う。

本手法の特徴の一つとして、指向性アンテナを用いる点が挙げられる。つまり、受信側と送信側の間の距離とその方向に基づく非対称な電波強度モデルを用いて推定を行う点である。このため、無指向性アンテナのような距離のみに基づく対称なモデルを用いた場合に比べて、アクセスポイントの存在確率分布をより速く先鋭化させることができる。また、位置推定の尺度として、ベイズアプローチに基づく事後確率を用いている。このため、計測ごとの確率の更新において、更新

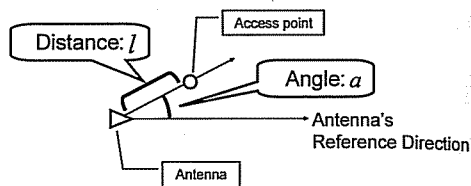


図4 電波強度モデルにおける相対的な位置関係
Fig. 4 Relative positioning in signal strength model.

における計算量や必要となるメモリサイズは計測回数にかかわらず一定となる。

3.3 受信側の方向を考慮した電波強度モデルの構築

まず、推定に用いる学習データとして電波強度のモデルを構築する。送信側と受信側との間の距離に関する電波強度の伝搬モデルは数多く提案されているが[3]、本手法では距離と方向に関するモデルを構築する。

本手法において、電波強度モデルは、アンテナとアクセスポイントとの相対的な位置関係を入力とし、そのときのアンテナにおける受信電波強度の確率密度関数を出力とするような関数である。相対的な位置関係は、アンテナとアクセスポイントとの間の距離 l と、アンテナ側から見たアクセスポイントの方向と指向性アンテナの基準方向との間の角度 a によって決められる(図4)。これらを電波強度モデル $SignalModel$ に入力することにより、相対位置関係 (l, a) における受信電波強度の確率密度関数 $pdf_{l,a}$ を得る。

$$pdf_{l,a} = SignalModel(l, a) \quad (1)$$

モデルの構築は、アンテナとアクセスポイントとの相対的な位置関係が既知の状態においてアンテナの受信電波強度を計測することで行う。それぞれの相対的な位置関係において、計測されたデータから受信電波強度の確率密度関数を定める。

3.4 アクセスポイントの位置推定

探索時には、ユーザの現在位置とユーザのもつアンテナの方向、探索対象であるアクセスポイントからの受信電波強度を逐次計測し、その計測データと前述の電波強度モデルを用いてアクセスポイントの位置推定を行う。ベイズの定理より得られるそれまでの観測における各候補位置の事後確率をアクセスポイントの存在確率として推定を行う。

まず、計測データと探索対象とする候補位置について定義する。アクセスポイントの探索時に計測する

データを観測と呼び、観測の集合を O とする。各観測 o は、そのときのユーザの現在位置 p とアンテナの方向 d 、探索対象のアクセスポイントからの受信電波強度 s の組で構成される。

$$O = \{o_1, o_2, \dots, o_m\} \quad (2)$$

$$o_i = (p_i, d_i, s_i) \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (3)$$

また、アクセスポイントの位置推定の候補位置の集合を C とする。アクセスポイントは C のどれかに存在すると仮定して推定を行う。

$$C = \{c_1, c_2, \dots, c_n\} \quad (4)$$

これまでの観測と電波強度モデルを用いて、これまでの観測における各候補位置の事後確率 $P(c_j | o_1, \dots, o_m)$ を求める。これを各候補位置におけるアクセスポイントの存在確率とする。

まず、ユーザがある観測 o_i を得たときの s_i の事後確率 $P(s_i | p_i, d_i, c_j)$ を電波強度モデルを用いて求める。観測 o_i の構成要素のうちの現在位置 p_i とアンテナの方向 d_i 、それに候補位置 c_j から、相対的な位置関係 (l, a) を得る。これを構築した電波強度モデルに入力することにより、受信電波強度の確率密度関数 $pdf_{l,a}$ を得る。 $pdf_{l,a}$ と観測 o_i の構成要素である受信電波強度 s_i より、 s_i の事後確率 $P(s_i | p_i, d_i, c_j)$ を得る。

次に、受信電波強度の事後確率 $P(s_i | p_i, d_i, c_j)$ を用いて、観測における各候補位置の事後確率を求める。まず、観測における各候補位置の事後確率は、ベイズの定理より次のようになる。

$$P(c_j | o_1, \dots, o_m) = \frac{P(o_1, \dots, o_m | c_j) \cdot P(c_j)}{\sum_{l=1}^n P(o_1, \dots, o_m | c_l) \cdot P(c_l)} \quad (5)$$

ここで、各観測 o は独立とみなすと、観測集合 o_1, \dots, o_m の事後確率は次のようになる。

$$\begin{aligned} P(o_1, \dots, o_m | c_j) &= \frac{P(o_1, \dots, o_m, c_j)}{P(c_j)} \\ &= \frac{\prod_{k=1}^m P(o_k, c_j)}{P(c_j)} \\ &= \frac{\prod_{k=1}^m \{P(o_k | c_j) \cdot P(c_j)\}}{P(c_j)} \end{aligned} \quad (6)$$

観測 o_i の事後確率 $P(o_i | c_j)$ は s_i の事後確率を用

いて次のように表すことができる。

$$\begin{aligned} P(o_i | c_j) &= P(p_i, d_i, s_i | c_j) \\ &= \frac{P(p_i, d_i, s_i, c_j)}{P(c_j)} \\ &= \frac{P(s_i | p_i, d_i, c_j) \cdot P(p_i, d_i, c_j)}{P(c_j)} \\ &= P(s_i | p_i, d_i, c_j) \cdot P(p_i, d_i) \end{aligned} \quad (7)$$

(because $P(c_j)$ is independent of $P(p_i, d_i)$)

各候補位置 c の事前確率は一様であるとする、各候補位置 c の事後確率は式 (5), (6), (7) より、次のようになる。

$$\begin{aligned} P(c_j | o_1, \dots, o_m) &= \frac{\prod_{k=1}^m P(o_k | c_j)}{\sum_{l=1}^n \left\{ \prod_{k=1}^m P(o_k | c_l) \right\}} \\ &= \frac{\prod_{k=1}^m P(s_k | p_k, d_k, c_j)}{\sum_{l=1}^n \left\{ \prod_{k=1}^m P(s_k | p_k, d_k, c_l) \right\}} \end{aligned} \quad (8)$$

各候補位置において、各観測での受信電波強度の事後確率の積を存在確率とは別にメモリ上に保持しておくことにより、1回の推定結果の更新にかかる計算量や計算に必要となるメモリサイズは観測回数にかかわらず一定になる。この特性は、本手法のように繰り返し得られるデータを処理するのに適している。

3.5 アンテナパターンと提案手法の有効性

提案手法のように非対称な電波強度モデルを用いて推定を行う場合、指向性アンテナのパターン、つまり電波強度モデルのひずみ方にかかわらず、対称なモデルと比べて存在確率分布をより速く先鋭化することができる。

計測位置に対して対称な電波強度モデルを用いて推定を行った場合、方向のみを変化させて計測した各データにおける存在確率が最大となる領域はそれぞれ同じとなるので、それらのデータを用いた推定結果では存在確率が最大となる領域は個々のデータのそれと変わらない。一方、提案手法のように非対称な電波強度モデルを用いて推定を行った場合、方向のみを変化させて計測した各データにおける存在確率が最大となる領域はそれぞれ異なるので、それらのデータを用いた推定結果では存在確率が最大となる領域は先鋭化する。

3.6 位置推定の例

提案手法における位置推定例を図 5 に示す。候補位

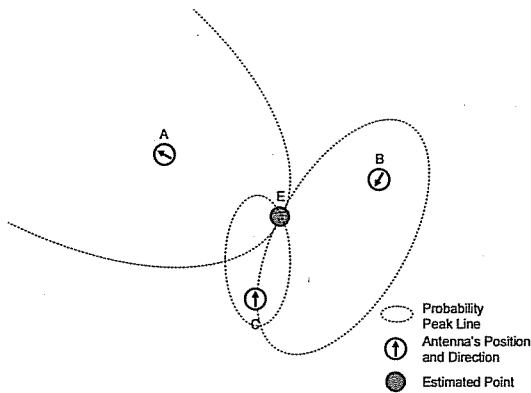


図5 提案手法における位置推定例

Fig. 5 An example of position estimation in proposal method.

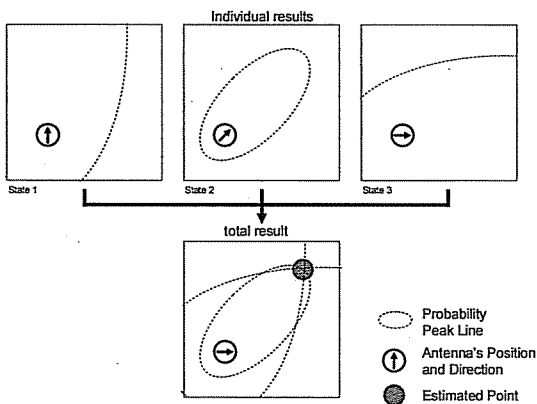


図6 アンテナの方向の変化のみからの位置推定例

Fig. 6 An example of position estimation (only antenna direction is changed).

置集合Cを極めて短い間隔のマトリックス上の格子点上と仮定した場合、図上の3点における計測による存在確率がピークとなる部分は点線のようになる。距離だけでなく受信側の方向を考慮した電波強度モデルを用いているため、点線は計測位置を中心とした円ではなく、ひずんだ閉曲線となっている。

また、計測時において、アンテナの位置を変化させずに方向のみを変化させて計測を行った場合の位置推定の例を図6に示す。状態1では受信電波強度が -60 dBmだったとして、存在確率がピークとなる曲線は図のようになったとする。次に方向のみを右に変化させて計測した状態2では、受信電波強度は -40 dBmだったとする。先ほどよりも受信電波強度は強いので、存在確率がピークとなる曲線は状態1のときよりも小さくなる。更に方向のみを右に変化させて計測した状

態3では、受信電波強度は -62 dBmだったとする。状態2のときよりも受信電波強度は弱いので、存在確率がピークとなる曲線は状態2のときよりも大きくなる。電波強度モデルが対称なモデルではなくひずんでいるため、方向のみを変化させたこれらの計測データを重ね合わせた場合でもアクセスポイントの存在確率を先鋭化させることができ、確率の高い領域が収束するのが分かる。

4. アクセスポイント探索支援システム

本手法を利用するには多くの機器を必要とする。しかしながら、それらの機器をユーザが手で持ち運びながら探索を行うのは非常に煩雑である。そこで、本手法に基づくアクセスポイント探索支援システムを開発した。

4.1 探索支援システムが備えるべき機能

指向性アンテナを用いた位置推定手法に基づくアクセスポイント探索支援システムが備えるべき要件として次の項目が挙げられる。

- 観測データの計測機能

我々の手法では、ユーザの現在位置とアンテナの方向、アクセスポイントからの受信電波強度を用いて位置推定を行う。そのため、これらの情報を計測するための機器を備えている必要がある。

- ユーザへの推定結果提示機能

我々の目的は位置特定の支援であるので、探索支援システムは推定結果をユーザに提示する機能を備えている必要がある。

- 屋内外での優れた機動性

データを計測し、そのデータを用いた推定結果をユーザへ提示する機能を備えていても、システムとしての機動性が損なわれては迅速な探索の支援はできない。我々の手法では、ユーザの位置やアンテナの方向を変化させた場合の計測データを収集することにより推定を行うので、その収集を短時間でできることが望ましい。また、アクセスポイントは屋内外に設置されているので、そのどちらにおいてもシステムの機動性を確保する必要がある。

4.2 Wireless Search Assistant

前述の要件を満たす探索支援システムとして、我々はWireless Search Assistant (以下、WSA)を開発した。本システムは、指向性アンテナ、無指向性アンテナ(評価実験用)、方向センサ、GPS [15]、光ファイバセンサ、ノートPC、HMD、Segway [19]と推定

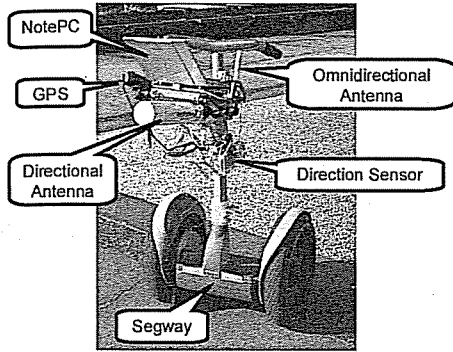


図 7 アクセスポイント探索支援システム
Fig. 7 Wireless search assistant.

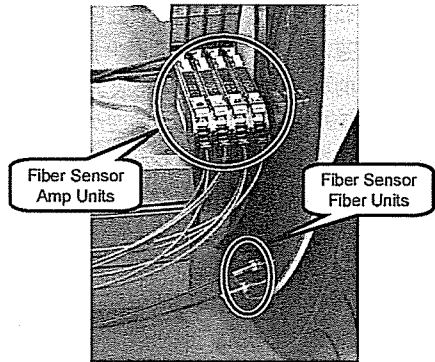


図 9 光ファイバセンサによるタイヤの回転量と回転方向の計測
Fig. 9 Measurement of amount and direction of rotation of tire using fiber sensor.

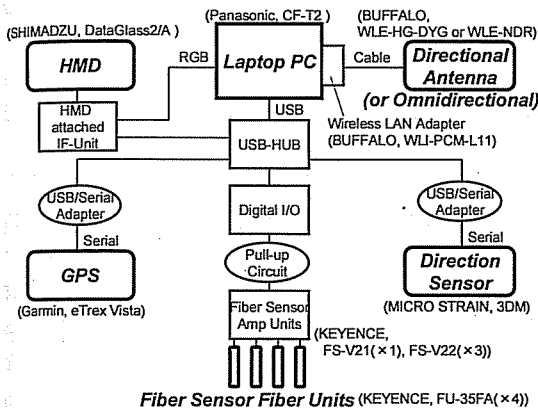


図 8 システム構成図
Fig. 8 System architecture.

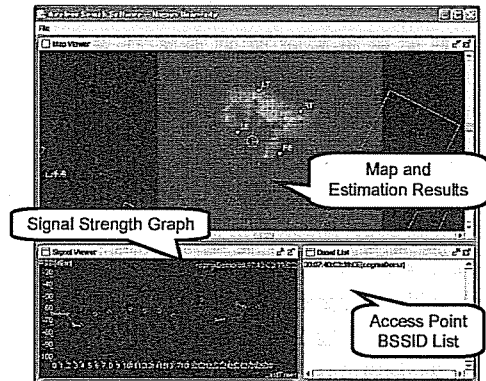


図 10 推定ソフトウェアのスクリーンショット
Fig. 10 Estimation software screenshot.

ソフトウェアから構成される。本システムの概観図を 図 7 に示す。

4.2.1 ハードウェア構成

本システムの構成図を 図 8 に示す。

観測データは指向性アンテナ、方向センサ、GPS、光ファイバセンサを用いて取得する。アクセスポイントからの受信電波強度とアンテナの方向は、それぞれ指向性アンテナと方向センサを用いて取得する。屋外においては、ユーザの位置は GPS を用いて取得する。しかしながら、GPS は屋内では利用できない。そこで Segway の左右のタイヤの回転量と回転方向を計測することにより、GPS で計測された位置からの相対的な移動距離と方向を求めてユーザの位置を取得する。両タイヤともタイヤのホイールの裏側に等間隔で反射板を張り、それをそれぞれ二つの光ファイバセンサで読み取り、タイヤの回転量と回転方向を計測する (図 9)。

ユーザへの推定結果の提示は、ノート PC のディスプレイや HMD を通じて行われる。ユーザは WSA に搭乗し、これらの機器からの提示情報を見ながら探索を行う。

本システムは、必要となる機器をすべて Segway 上に搭載しており、多数の機器で構成されているにもかかわらず、屋内外での優れた機動性を確保している。このため、アクセスポイントの迅速な探索の支援を可能としている。

4.2.2 ソフトウェア構成

図 10 に推定ソフトウェアのスクリーンショットを示す。推定ソフトウェアの GUI は、上部のマップウィンドウと左下の電波強度グラフウィンドウと右下のアクセスポイントリストから構成される。マップウィンドウには、ユーザの現在位置、アンテナ方向と推定結

果が地図に重ねて表示される。電波強度グラフウィンドウには、周辺にあるアクセスポイントの電波強度についての時間的な変化がグラフとして表示される。アクセスポイントリストには、電波強度が現在取得可能なアクセスポイントが表示される。ユーザは、アクセスポイントリストから探索対象のアクセスポイントを指定し、メニューから推定に用いる電波強度モデルと計測間隔を指定して探索を開始する。計測が行われるたびにマップウィンドウ上の表示が更新され、その情報を見ながら探索を行う。

5. 評価実験

アクセスポイントの位置特定における本手法の推定精度と探索時間について調べるため、指向性アンテナを使用した場合と無指向性アンテナを使用した場合において本手法に基づく探索支援システムを用いて評価実験を行い、その結果について考察を行った。

5.1 実験環境

実験は屋外と屋内の各環境で実施した。

5.1.1 屋外における実験環境

屋外における実験は、晴天時に屋外の上空が開けた場所で実施した。地面に7m間隔で4×4のマトリックスを作成し、その格子点上に16個の箱を設置した。ユーザは箱の中身を確認できないものとする。屋外の実験環境の概観を図11に示す。

5.1.2 屋内における実験環境

屋内における実験は、テーブルなどが置かれたプレゼンテーションスペースで実施した。プレゼンテーションスペースに14.4m間隔で5個の箱を1列に並べて設置した。ユーザは箱の中身を確認できないもの

とする。屋内の実験環境の概観を図12に示す。

5.2 設定

実験に用いた機器は次のとおりである。このうち、無線LANアクセスポイントを除く機器は、前述の探索支援システムに搭載したものである。

- 指向性アンテナ (BUFFALO, WLE-HG-DYG)
- 無指向性アンテナ (BUFFALO, WLE-NDR)
- GPS (Garmin, eTrex Vista-J)
- 光ファイバセンサ (KEYENCE, FU-35FA)
- 方向センサ (MicroStrain, 3DM)
- 無線LANアクセスポイント (BUFFALO, WHR2-G54)

電波強度モデルの構築時と評価実験時において、同一の無線LANアクセスポイントを使用し、通信規格はIEEE802.11bのみとした。また、屋外実験においてユーザへ推定結果を提示するとき使用する地図として、国土地理院の数値地図2500(空間データ基盤) [25] を利用した。

推定時の設定としては、推定時のアクセスポイントの候補位置を、平面直角座標において南北方向と東西方向について1m間隔の格子点の位置とした。システムの移動速度については、最高速度を時速10kmと設定した。システムの測位については、屋外ではGPSを利用し、屋内では光ファイバセンサを用いて測位を行った。光ファイバセンサによる測位の精度はGPSと同程度である。

5.3 本実験に使用した電波強度モデルの構築

本実験では、指向性アンテナと無指向性アンテナの場合においてそれぞれ電波強度モデルを事前に構築したものを利用した。屋外の見晴らしの良い場所におい

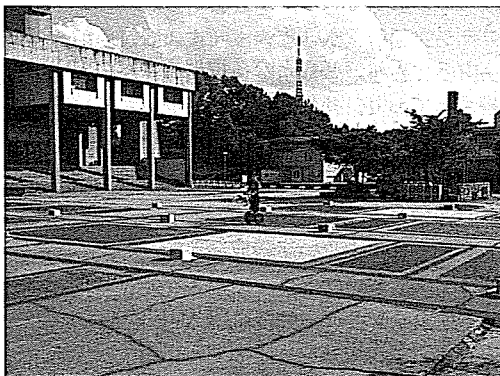


図11 屋外実験環境概観

Fig. 11 Outdoor experiment environment overview.

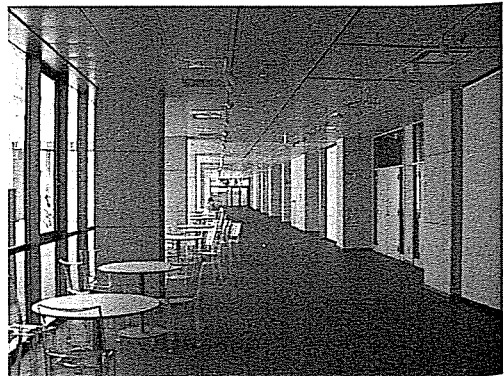


図12 屋内実験環境概観

Fig. 12 Indoor experiment environment overview.

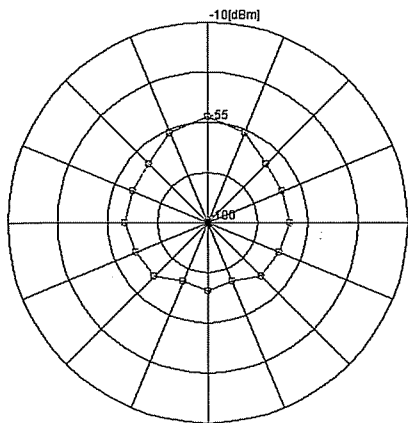


図 13 指向性アンテナの電波強度分布 (16m)

Fig. 13 Directional pattern of directional antenna (16 meters).

て、アンテナとアクセスポイントの間には障害物がない状態で計測を行うことで構築を行った。

電波強度の確率密度関数は正規分布を仮定し、計測データから最尤法を用いて特性量である期待値と分散を求めてモデルを構築した。また、測定した相対位置以外の位置については、今回は重みを距離の逆数とした場合の逆距離加重法を用いて特性量を補間することにより、出力である確率密度関数の補間処理を行った。具体的には、補間する点を p 、補間に用いる標本点を q_1, \dots, q_n 、それらがもつ値をそれぞれ v_1, \dots, v_n 、 p とそれらとの距離をそれぞれ l_1, \dots, l_n とすると、 p における値 v_p を式 (9) で補間した。

$$v_p = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{v_i}{l_i}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{l_i}} \quad (9)$$

5.3.1 指向性アンテナの電波強度モデル

アンテナとアクセスポイントとの間の距離が 1m, 2m, 4m, 6m, 8m, 12m, 16m, 32m, 64m, 128m のそれぞれの場合において、アンテナから見たアクセスポイントの方向と指向性アンテナのビームの最大方向との間の角度が $0^\circ, 22.5^\circ, 45^\circ, 67.5^\circ, 90^\circ, 112.5^\circ, 135^\circ, 157.5^\circ, 180^\circ$ の 9 方向のそれぞれの場合について受信電波強度の計測を行った。各測定は、0.1 秒ごとに受信電波強度を計測して 30 秒間行った。距離が 16m の場合における各方向の電波強度を図 13 に示す。

5.3.2 無指向性アンテナの電波強度モデル

アンテナとアクセスポイントとの間の距離が 1m, 2m, 4m, 6m, 8m, 12m, 16m, 32m, 64m, 128m

のそれぞれの場合について受信電波強度の計測を行った。各測定は、0.1 秒ごとに受信電波強度を計測して 30 秒間行った。測定の際、アクセスポイントの方向は正面方向固定とした。無指向性の電波強度モデルでは、入力であるアンテナの方向は出力である確率密度関数に影響を与えないものと仮定する。

5.4 屋外における推定精度に関する実験

本手法における推定精度に関して屋外で評価実験を行い、指向性の場合と無指向性の場合について比較を行った。ここでいう推定精度とは、推定結果の中で存在する確率が最も高い推定位置と実際にアクセスポイントが存在する位置との間の距離のこととし、この距離を推定誤差と呼ぶことにする。

5.4.1 実験方法

4×4 のマトリックスの格子状にある 16 個の箱のうちの一つに、アクセスポイントを設置した。ユーザはどの箱にアクセスポイントが存在するか知らない状態で、アクセスポイントの探索を 1 分間行った。システムは、1 秒ごとに現在位置、アンテナの方向、探索対象であるアクセスポイントの受信電波強度を計測した。このとき、推定誤差についての時間的な推移を調べた。

この実験においては、二つの提示モードについてそれぞれ実験を行った。探索時に推定結果をユーザに逐次提示するモード（以下、提示モードと呼ぶ）と、推定結果を提示せず受信電波強度の変化のみを提示するモード（以下、非提示モードと呼ぶ）である。指向性アンテナと無指向性アンテナの場合について、それぞれのモードで実験を行った。3 名の被験者が各場合の実験を 1 回ずつ行った。

5.4.2 実験結果

提示モードでの実験結果と非提示モードでの実験結果を、それぞれ図 14 と図 15 に示す。縦軸が推定誤差で横軸が時間を表す。

どちらの場合も、時間が経ち計測データが増えるにつれ、推定誤差が減少し、推定精度が向上しているのが分かる。無指向性アンテナの場合に比べて、指向性アンテナの方がより少ない時間で推定精度が向上した。推定精度の向上の速さの指標として 60 秒間での推定誤差の平均を用いて無指向性アンテナと指向性アンテナの場合を比較すると、無指向性アンテナの場合では提示モードと非提示モードでの推定誤差の平均はどちらも約 18m であったのに対し、指向性アンテナの場合では提示モードと非提示モードでの推定誤差の平均はどちらも約 9m であり、無指向性の場合に

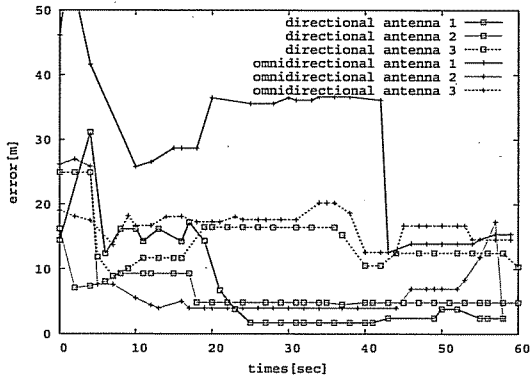


図 14 推定結果を逐次提示した場合 (提示モード)

Fig. 14 Time transition of estimation error (estimation result is presented).

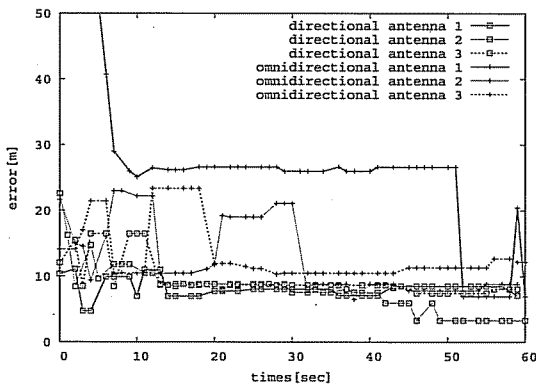


図 15 電波強度の変化のみを提示した場合 (非提示モード)

Fig. 15 Time transition of estimation error (only signal strength is presented).

比べておよそ半分の推定誤差となった。また、無指向性アンテナの場合、提示モードに比べて非提示モードの方がより少ない時間で推定精度の向上が見られた。

5.4.3 考察

実験時の計測データより、提示モードと非提示モードとでユーザの行動に違いが見られた。提示モードの場合、ユーザは推定によりアクセスポイントの存在する可能性が高いと思われる位置に近づこうとする傾向が見られた。一方、非提示モードの場合、マトリックス上を広く移動する傾向が見られた。このことが、無指向性アンテナの場合において提示モードに比べて非提示モードの方が少ない時間で推定精度の向上が見られた原因として考えられる。無指向性アンテナの場合、アンテナ方向の情報が推定結果に影響を与えないため、ユーザの位置の移動が推定に大きく影響を与えると考

えられるためである。

指向性と無指向性の両方の場合において複数回計測を行ったが、同じ条件の探索において精度に差が生じた。この原因としては複数考えられ、一つには探索開始位置が固定されていないことが挙げられる。また、GPS から得られる位置情報の精度に差が生じていた可能性も考えられる。

指向性の場合に比べて無指向性の場合の推定精度が低い原因としては、提案手法の影響とは別に、無指向性アンテナの場合の電波強度モデルが十分でなかった可能性が挙げられる。今回、無指向性アンテナは指向性がないと仮定してモデルを構築したが、実際にはユーザやシステムが障害物となり若干の指向性を作り出していた可能性がある。

5.5 屋外における探索時間に関する実験

本手法における探索時間に関して屋外で評価実験を行い、指向性の場合と無指向性との場合について比較を行った。ここでいう探索時間とは、探索を開始してからユーザが最初にアクセスポイントの位置を決定するまでの時間とする。

5.5.1 実験方法

16個の箱のうちの一つにアクセスポイントを設置し、ユーザはアクセスポイントの場所を知らない状態でアクセスポイントの探索を行った。システムは、1秒ごとに現在位置、アンテナの方向、探索対象であるアクセスポイントの受信電波強度を計測し、推定結果をユーザに逐次提示する。

このとき、探索を開始してからユーザが最初にアクセスポイントの存在する位置を決定するまでの間の時間と、ユーザが選択したアクセスポイントの位置の可否を調べた。この実験について指向性の場合と無指向性の場合について、3名の被験者で実験を行った。

5.5.2 実験結果

指向性アンテナの場合と無指向性アンテナの場合の実験結果をそれぞれ表1と表2に示す。無指向性アンテナの場合に比べて、指向性アンテナの場合の方は探索時間がおよそ半分の時間になっている。また、ユーザによるアクセスポイントの位置選択の可否についても、無指向性の場合には3名とも誤った結果となったのに対して、指向性の場合には3名とも正しい場所を選択する結果となった。

被験者1における探索時の移動軌跡を、指向性アンテナの場合と無指向性アンテナの場合についてそれぞれ図16と図17に示す。正方形は箱を表しており、円

表 1 指向性アンテナの場合
Table 1 Directional case results.

被験者 ID	探索時間 (秒)	位置選択の可否
被験者 1	30	正解
被験者 2	33	正解
被験者 3	36	正解

表 2 無指向性アンテナの場合
Table 2 Omnidirectional case results.

被験者 ID	探索時間 (秒)	位置選択の可否
被験者 1	52	不正解
被験者 2	66	不正解
被験者 3	96	不正解

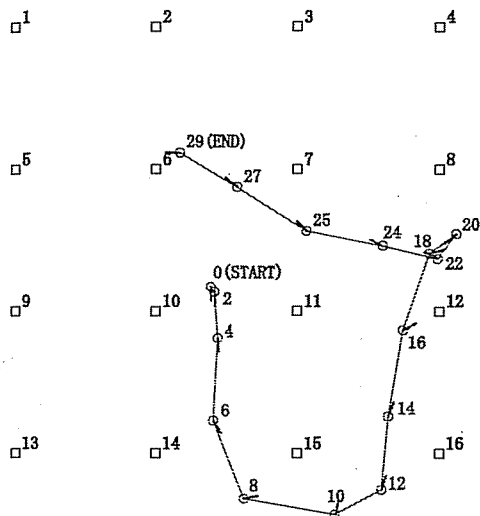


図 16 探索時の移動軌跡 (被験者 1, 指向性)
Fig. 16 Trajectory (subject 1, directional).

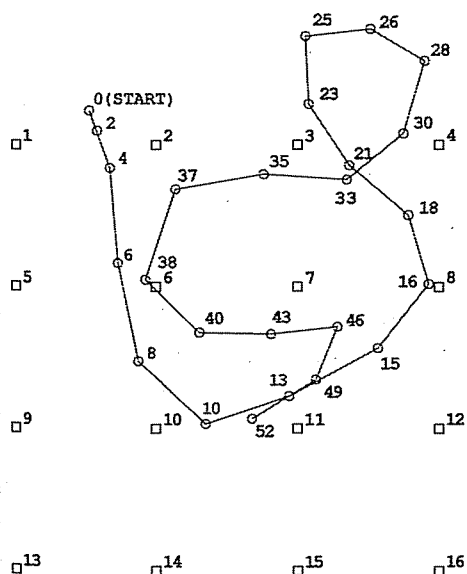


図 17 探索時の移動軌跡 (被験者 1, 無指向性)
Fig. 17 Trajectory (subject 1, omnidirectional).

が各時間におけるユーザの位置を表している。指向性アンテナの場合は、位置だけでなくそのときの指向性アンテナの方向も示した。アクセスポイントは 6 番の箱に存在したが、無指向性の場合において被験者 1 は 2 番の箱にあると判断した。

5.5.3 考 察

無指向性アンテナの場合に比べて指向性アンテナの場合に探索時間がより短くなった原因としては、指向性アンテナの方がより短い時間で、存在確率の高い候補位置が局所的に集中することが考えられる。この理由としては指向性アンテナの場合はアンテナ方向の情報が寄与していると考えられる。

ユーザの位置選択の可否について、無指向性アンテナの場合に比べて指向性アンテナの場合の方が正解するケースが多かった原因として、本手法における推定精度の差が考えられる。

図 16 と図 17 より、指向性の場合には、探索途中で推定結果が収束したためユーザはアクセスポイントの近くへ移動していると考えられる。一方、無指向性の場合には、推定結果が収束しないためあたりを広く移動して探索をしていると考えられる。

5.6 屋内における推定精度に関する実験

本手法における推定精度に関して屋内で評価実験を行い、指向性の場合と無指向性との場合について比較を行った。

5.6.1 実験方法

14.4m 間隔で 1 列に置かれた 5 個の箱のうちの一つに、アクセスポイントを設置した。ユーザはどの箱にアクセスポイントが存在するか知らない状態で、アクセスポイントの探索を 1 分間行った。システムは、1 秒ごとに現在位置、アンテナの方向、探索対象であるアクセスポイントの受信電波強度を計測した。箱の位

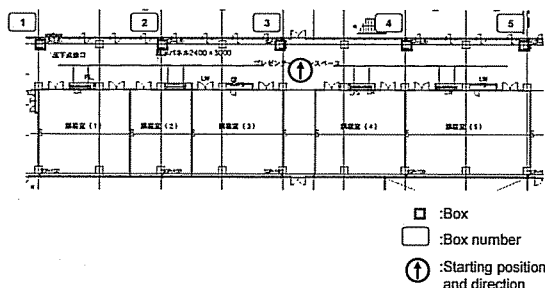


図 18 屋内実験環境見取り図
Fig. 18 Floor layout of indoor experiment environment.

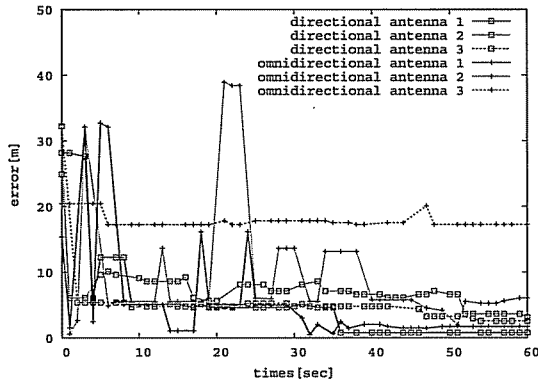


図 19 推定結果を逐次提示した場合 (提示モード, 屋内)
Fig. 19 Time transition of estimation error in indoor case (estimation result is presented).

置と探索開始時のユーザの位置と方向を図 18 に示す。このとき、推定誤差についての時間的な推移を調べた。

システムの提示の設定は、探索時に推定結果をユーザに逐次提示するモードとした。指向性アンテナと無指向性アンテナの場合について、3名の被験者が各場合の実験を1回ずつ行った。

5.6.2 実験結果

実験結果を、図 19 に示す。縦軸が推定誤差で横軸が時間を表す。

どちらのアンテナを用いた場合も、時間が経ち計測データが増えるにつれ、概して推定誤差が減少し、推定精度が向上しているのが分かる。無指向性アンテナの場合に比べて、指向性アンテナの場合の方がより少ない時間で推定精度が向上した。推定精度の向上の速さの指標として 60 秒間での推定誤差の平均を用いて無指向性アンテナと指向性アンテナの場合を比較すると、無指向性アンテナの場合での推定誤差の平均は約 11m であったのに対し、指向性アンテナの場合での平均は約 6m であり、無指向性の場合に比べておよそ半分の推定誤差となった。無指向性アンテナの用いた場合のいくつかの結果では、所々で推定精度の大きな変動が見られた。

5.6.3 考察

無指向性アンテナの場合のいくつかの結果で推定精度に大きな変動が見られた原因としては、壁や障害物によるマルチパスにより受信電波強度が大きく変化したことが考えられる。

無指向性アンテナの場合に比べて指向性アンテナの

場合は推定精度の変動が小さい原因としては、指向性アンテナの方向による受信電波強度の変化の大きさが考えられる。無指向性アンテナの場合、全方向からの電波を同等に受信するので、マルチパスの影響を受けやすいと考えられる。一方、指向性アンテナの場合、アンテナの向けた方向からくる電波に比べて、そうではない方向からの電波は受信しにくい。このことが、マルチパスによる受信電波強度の変化が推定精度に与える影響を緩和した可能性が考えられる。

6. 関連研究

関連研究として、無線 LAN を用いた測位システムが挙げられる。Microsoft Research による RADAR [1] では、位置が既知である複数のアクセスポイントにおいてユーザのもつ端末からの受信電波強度を計測する。その計測値と各位置における理論値との差異を最小とするような位置をユーザの位置として測位する。RADAR の場合、理論値として、複数の標本点における事前の計測により学習した値を用いる方法と、電波伝搬モデルを用いて与える方法の二つを提案している。前者はシーン解析、後者は Triangulation (Lateration) に基づく測位といえる。前者の方法において学習を行う際、RADAR では端末をもつユーザの方向も考慮し、標本点におけるユーザの各方向 (東西南北の四方向) のそれぞれの場合において、受信電波強度を計測している。日立製作所の AirLocation [23] は、信号遅延によってアクセスポイントと端末との距離を求めることで、Lateration を行う無線 LAN 測位システムである。このように信号遅延を利用して求めた距離を用いて行う Lateration は TDOA (Time Difference of Arrival) とも呼ばれる [17]。しかしながら、AirLocation では専用の基地局が必要となる。北須賀らによる WiPS [2] は、電波強度を用いて距離を測定することによる Lateration で測位を行う。WiPS の特徴は、基地局と端末との間の距離だけでなく端末同士間の距離も計測して測位に用いることで、測位対象が密集している場所ほど測位精度が向上する点と基準点が疎であっても測位精度の低下が少ない点である。伊藤らによる無線 LAN 測位システム [10], [12], [13] は、事前に各標本位置で事前に計測を行うことで学習データベースを構築する。測位時は、ベイズ推定を用いて構築時の計測と測位時の計測における候補位置の事後確率を求め、それを用いて測位を行っている。石原らによる無線 LAN 測位システム [14] は、事前に

表 3 他のシステムとの比較
Table 3 Comparison of positioning system using wireless LAN.

System/Method	Base technique	The numbers of needed reference points for positioning	Measured information
RADAR [1]	Scene Analysis, Triangulation (Lateration)	None, Multiple	Signal Strength
AirLocation [23]	Triangulation (Lateration)	Multiple	Signal Delay
WiPS [2]	Triangulation (Lateration)	Multiple	Signal Strength
Ito's system [10], [12], [13]	Scene Analysis	None	Signal Strength
Ishihara's system [14]	Scene Analysis	None	Signal Existence
GUIDE Project [9]	Proximity	Single	Signal Existence
Our method	Triangulation (Angulation)	Single, Multiple (user position is moved)	Signal Strength, Antenna Direction

GPS を用いながら各アクセスポイントからの電波の有無を計測する。電波が計測された各位置の最北端、最南端、東端、最西端からそのアクセスポイントの領域としてその端点を通る直方体を定める。測定時には、電波を受信したいいくつかのアクセスポイントの各領域を用いて、それらの領域が重なるところに端末が存在すると推定する。Keithらによる GUIDE Project [9] では、街の周辺に設置された各アクセスポイントからユーザの端末へそのアクセスポイント周辺のガイド情報を提供するシステムを開発している。それぞれのアクセスポイントは受信可能範囲が被らないように配置されている。このシステムの測位方法は、アクセスポイントへの接続性を用いた Proximity に基づくものといえる。これらのシステムと本研究との比較を表 3 に示す。他のシステムと本研究との違いの一つとして、本研究ではアンテナ方向の情報を推定に用いている点が挙げられる。

方向を用いた測位技術である Angulation の一例として、AoA (Angle of Arrival) がある [11]。AoA と提案手法との違いは、AoA が方向を用いて決定的に測位を行うのに対し、提案手法は確率分布を用いて推定を行う点である。

また、無線 LAN の調査を行うツールとして Ekahau の Ekahau Site Survey [18] (以下、ESS) がある。ESS には地図上を移動し各位置での電波強度を計測することで既設アクセスポイントの位置を推定する機能がある。本研究との違いとして、ESS は推定に方向の情報を用いていない点が挙げられる。

類似点の多い行為として、Wardriving と呼ばれるノート PC や PDA などをもって車や自転車に乗りながら無線ネットワークを探る行為 [20] があるが、そのためのツールの多く [21], [22] は位置特定に有用な情報

としてアクセスポイントの電波強度しかユーザに提示しない。

7. む す び

本研究では、無線 LAN アクセスポイントの位置特定のための支援を目的とし、指向性アンテナを用いた位置推定手法を提案した。本手法は、事前に受信側と送信側の間の距離と受信側の方向に関して学習データとして電波強度モデルを構築しておく。探索時には、ユーザの位置、ユーザのもつ指向性アンテナの方向、探索対象からの受信電波強度を繰り返し計測し、計測データと電波強度モデルからネットワークノードの位置推定を行い、その結果をユーザに逐次提示することで位置特定のための支援を行う。距離と方向に基づく非対称なモデルを用いて推定を行うことで、無指向性アンテナのように距離のみに基づく対称なモデルを用いた場合に比べて、探索対象の存在確率分布をより速く先鋭化することができる。本手法に基づく探索支援システムを開発し、それを用いて評価実験を行い、本手法の有効性を確認した。

今後の課題の一つとして、異なるフロアに存在するアクセスポイントの位置推定が挙げられる。現在の手法では、探索対象となるアクセスポイントと探索するユーザとの高さの違いに考慮していない。そのため、異なるフロアに存在するアクセスポイントの推定を正しく行うことができない。この問題に対しては、三次元の電波強度モデルを用いることを検討している。また、位置特定のための支援としてユーザに対してより高度な情報提示も課題として挙げられる。現在ではユーザに対して推定結果のみを提示するが、次にどのような位置と方向で計測を行えばより迅速に推定を進めることができるかを推定結果を用いて算出し、その情報を

ユーザに提示できないかを考えている。ほかに、位置推定に利用するモデルの構築の支援についても検討している。本手法において推定に適切なモデルを用いることは重要だが、そのモデルを構築するのは煩雑である。例えば、屋内用の間取りをモデルに反映させるためには、その屋内用のレイアウトデータを事前に用意する必要がある。屋内において位置が既知のアクセスポイントに対して計測を行うことで、このレイアウトデータを近似的に構築できないかと考えている。また、今回の評価実験においては、モデル構築時と探索時において同じアクセスポイントを利用したが、異なるアクセスポイントである場合についても評価していく必要があると考えている。

文 献

- [1] P. Bahl and V.N. Padmanabhan, "RADAR: An in-building RF-based user location and tracking system," Proc. IEEE Infocom, pp.775-784, Tel Aviv, Israel, 2000.
- [2] T. Kitasuka, T. Nakanishi, and A. Fukuda, "Wireless LAN based indoor positioning system WiPS and its simulation," 2003 IEEE Pacific Rim Conference on Communications, Computers and Signal Processing (PACRIM'03), pp.272-275, Aug. 2003.
- [3] A. Neskovic, N. Neskovic, and G. Paunovic, "Modern approaches in modeling of mobile radio systems propagation environment," IEEE Communications Surveys, Third Quarter 2000.
- [4] B. Schilit, A. LaMarca, G. Borriello, W. Griswold, D. McDonald, E. Lazowska, A. Balachandran, J. Hong, and V. Iverson, "Challenge: Ubiquitous location-aware computing and the place lab initiative," Proc. of WMASH 2003, pp.29-35, San Diego, CA, Sept. 2003.
- [5] J. Hong, G. Borriello, J. Landay, D. McDonald, B. Schilit, and D. Tygar, "Privacy and security in the location-enhanced World Wide Web," Proc. UbiComp 2003, Seattle, WA, Oct. 2003.
- [6] B. Schilit, A. LaMarca, D. McDonald, J. Tabert, E. Cadag, G. Borriello, and W.G. Griswold, "Bootstrapping the location-enhanced World Wide Web," Proc. UbiComp 2003, pp.1-4, Seattle, WA, Oct. 2003.
- [7] P. Bahl, A. Balachandran, A.K.L. Miu, W. Russell, G.M. Voelker, and Y.-M. Wang, "PAWNS: Satisfying the need for ubiquitous connectivity and location services," IEEE Pers. Commun. Mag., vol.9, no.1, pp.40-48, Feb. 2002.
- [8] J. Hightower and G. Borriello, "Location systems for ubiquitous computing," Computer, vol.34, no.8, pp.57-66, Aug. 2001.
- [9] K. Cheverst, N. Davies, K. Mitchell, and A. Friday, "Experiences of developing and deploying a context-aware tourist guide: The GUIDE project," Proc. MOBICOM 2000, pp.20-31, ACM Press, Boston, Aug. 2000.
- [10] S. Ito and N. Kawaguchi, "Bayesian based location estimation system using wireless LAN," IEEE PerCom Workshop on Pervasive Wireless Networking (PWN05), pp.273-278, March 2005.
- [11] D. Niculescu and B. Nath, "Ad hoc positioning system (APS) using AoA," Proc. INFOCOM 2003, San Francisco, CA, April 2003.
- [12] 伊藤誠悟, 河口信夫, "実環境における無線 LAN を用いた位置推定システムとその応用," 情処学研報, IPSJ-MBL-30, pp.33-40, 2004.
- [13] 伊藤誠悟, 佐藤弘和, 河口信夫, "ベイズ推定を用いた位置推定システムと応用アプリケーション," 情処学第 67 回全大, pp.3-755-3-756, 2005.
- [14] 石原孝通, 西尾信彦, "GPS と無線基地局検出ツールを排他利用する位置情報システム," 情処学研報, 2004-UBI-6, pp.91-96, 2004.
- [15] R. Bajaj, S.L. Ranaweera, and D.P. Agrawal, "GPS: Location-tracking technology," Computer, vol.35, no.4, pp.92-94, 2002.
- [16] Wireless Security Auditor, Global Security Analysis Lab., IBM Research, <http://www.research.ibm.com/gsal/wsa/>
- [17] Location Methods for E-911 Phase II, RADD-COMM, <http://www.raddcomm.com/E-911%20Location%20Methods.htm>
- [18] Ekahau Site Survey, Ekahau, <http://www.ekahau.com/products/sitesurvey/>
- [19] Segway, <http://www.segway.com/>
- [20] wardriving.com, <http://www.wardriving.com/>
- [21] NetStumbler, <http://www.netstumbler.com/>
- [22] Kismet, <http://www.kismetwireless.net/>
- [23] WiFi positioning system, Hitachi AirLocation(TM), <http://www.hitachi.com/>
- [24] N900iL, <http://www.nttdocomo.co.jp/>
- [25] Geographical Survey Institute, <http://www.gsi.go.jp/>
- [26] Tokyo Metro, <http://www.tokyometro.jp/>

(平成 17 年 1 月 31 日受付, 5 月 24 日再受付)



佐藤 弘和

2003 名大・工・情報卒。2005 同大学院情報科学研究科情報システム学専攻修士課程了。無線 LAN 端末の探索に関する研究に従事。現在、ブラザー工業(株) NID 開発部所属。



伊藤 誠悟

2000 東京理科大・理工・情報卒。2002 同大大学院理工学研究科情報科学専攻修士課程了。同年、日本電信電話(株)情報流通プラットフォーム研究所入所。2004 より名古屋大学大学院情報科学研究科情報 COE 研究員。ユビキタスマドルウェアシステム、ユビキタス環境における位置コンテキストに関する研究に従事。IEEE, 情報処理学会各会員。



河口 信夫 (正員)

1990 名大・工・電気卒。1995 同大大学院情報工学専攻博士課程了。同年同大・工・助手。同大講師, 助教授を経て, 2002 より同大・情報連携基盤センター・助教授。モバイルコミュニケーション, マルチモーダルユーザインタフェース, ユビキタスコンピューティングの研究に従事。2004 より大学発ベンチャー企業(有)ユビグラフ取締役兼務。工博。ACM, IEEE, 情報処理学会, ソフトウェア科学会, 人工知能学会, 日本音響学会各会員。