

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

佐藤 弘和[†] 河川 信夫^{†,‡} 稲垣 康善^{*}

[†]名古屋大学大学院情報科学研究科

[‡]名古屋大学情報連携基盤センター

^{*}愛知県立大学情報科学部

無線 LAN 技術の普及により、無線 LAN を用いた測位システムといった新たなサービスが登場しつつある。一方、無許可での無線 LAN アクセスポイントの設置やセキュリティが不十分であるといった問題も生じている。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。本手法は探索するユーザの位置、指向性アンテナの方向、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定期的に計測し、逐次推定を行う。蓄積されたデータと、距離と方向により決まる相対的な位置関係に関する受信電波強度のモデルを用いてアクセスポイントの位置推定を行い、推定結果をユーザに逐次提示することで位置特定を支援する。本手法についての評価実験を行い、その有効性を確認した。

Position Estimation of Wireless Access Point using Directional Antenna

Hirokazu Satoh[†] Nobuo Kawaguchi^{†,‡} Yasuyoshi Inagaki^{*}

[†]Graduate School of Information Science, Nagoya University

[‡]Information Technology Center, Nagoya University

^{*}Faculty of Information Science and Technology, Aichi Prefectural University

In recent years, wireless LAN technologies has experienced unprecedented growth and new services and problems has occurred. In this paper, we propose a position estimation technique using directional antenna to assist users detecting wireless access points. In our technique, the system measures the current position of the user, the direction of the antenna and the received signal strength of the wireless access point periodically, and estimates the position of the wireless access point from accumulated data using the signal strength model based on directivity to assist the user in real-time. We also conducted an evaluation experiment to exemplify the effectiveness of the proposed technique.

1 はじめに

近年、無線 LAN 技術の普及により、様々な機器に無線 LAN 機能が搭載されている。例えば、ノート PC、PDA の他に、最近では携帯電話 [9]、プリンタ、デジタルカメラなどが挙げられる。

無線 LAN の普及に従い、新たなサービスや問題が出てきている。例えば、新たなサービスの一つとして無線 LAN を用いた測位システムが提案されている [1, 8, 6, 2]。また、懸念されている問題として、セキュリティが不十分な無線 LAN アクセスポイント（以下、アクセスポイント）の設置により、部外者によるネットワークへの侵入の危険性が挙げられる [5]。他にも、ESSID を詐称した無線 LAN アクセスポイントに正規のユーザがアクセスすることで WEP のキーなどが盗まれる危険性や、展示会などにおいて無許可で設置されたアクセスポイントによる通信障害が挙げられる。

2 動機と目的

アクセスポイントの位置を特定したいというニーズは広く存在する。例えば、無線 LAN を用いた測位システムのいくつかはアクセスポイントの位置情報を用いて測位を行うため、システム構築時にアクセスポイントの位置を収集し、登録する必要がある。また、ネットワークのセキュリティを確保する方法の一つとして、ネットワーク内に無許可で設置されたアクセスポイントを発見し、除去することが挙げられる。

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。指向性アンテナを用いた場合、受信側と送信側との間の距離だけでなくアンテナの方向によっても電波強度が大きく変化する。このため、ユーザの位置の変化からだけでなく方向の変化からも位置推定に有用な情報を得ることが出来る。

3 提案手法

本手法では、ユーザが指向性アンテナを用いてアクセスポイントを探査する時、定期的に現在位置、指向性アンテナの方向、探査対象であるアクセスポイントからの受信電波強度を計測し、それまでに蓄積された計測データの集合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へ逐次提示することにより位置特定を支援する。

3.1 方向を考慮した電波強度モデルの構築

送信側と受信側との間の距離に関する電波強度の伝播モデルは数多く提案されているが [4]、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。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。

3.2 位置推定

ユーザは指向性アンテナを用いてアクセスポイントの探索を行う。この時、定期的に現在位置とアンテナの方向、受信電波強度を計測し、この観測の集合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。

アクセスポイントの探索時に計測する観測の集合を 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。 C は全体集合 Ω の分割とし、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。

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

ここでまず、ユーザがある観測 o_i を得たときの候補位置 c_j における o_i の事後確率を求める。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。この時、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。

$$\begin{aligned} P(o_i | c_j) &= P(p_i, d_i, s_i | c_j) \\ &= \frac{P(p_i, d_i, s_i, c_j)}{P(c_j)} \\ &= \frac{P(s_i | p_i, d_i, c_j) \cdot P(p_i, d_i, c_j)}{P(c_j)} \\ &= P(s_i | p_i, d_i, c_j) \cdot P(p_i, d_i) \\ &\quad (P(p_i, d_i, c_j) = P(p_i, d_i) \cdot P(c_j)) \end{aligned} \quad (5)$$

観測における各候補位置 c の事後確率は、ベイズの定理より次のようになる。

$$\begin{aligned} P(c_j | o_1, \dots, o_m) &= \frac{P(o_1, \dots, o_m | c_j) \cdot P(c_j)}{\sum_{l=1}^n P(o_1, \dots, o_m | c_l) \cdot P(c_l)} \end{aligned} \quad (6)$$

ここで、各観測 o は独立なので、観測集合 o_1, \dots, o_m の事後確率は次のようになる。

$$\begin{aligned} P(o_1, \dots, o_m | c_j) &= \frac{P(o_1, \dots, o_m, c_j)}{P(c_j)} \\ &= \frac{\prod_{k=1}^m P(o_k, c_j)}{P(c_j)} \end{aligned} \quad (7)$$

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。

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

観測 o の数が増加するに従い、 c の事後確率による推定精度が向上していく。

4 探索支援システム

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。

本システムは、指向性アンテナ、GPS、方向センサ、ノートPC、HMD、Segway[3] と推定ソフトウェアから構成される。GPS[7] と方向センサと指向性アンテナを用いて、ユーザの現在位置、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の情報を定期的に計測し、蓄積する。推定ソフトウェアが蓄積されたデータから位置推定を行い、ノートPCのディスプレイやHMDを通じてユーザに推定結果を逐次提示する。これらの機器をSegwayに搭載している。Segwayに搭載することにより、本システムは多数の機器から構成されるにもかかわらず優れた機動性を確保しており迅速な探索の支援を実現している。本システムの概観を図1に示す。

ユーザはHMDやノートPC上に提示される推定結果を見ながら探索を行う。推定ソフトウェアのGUIは、現在地の地図

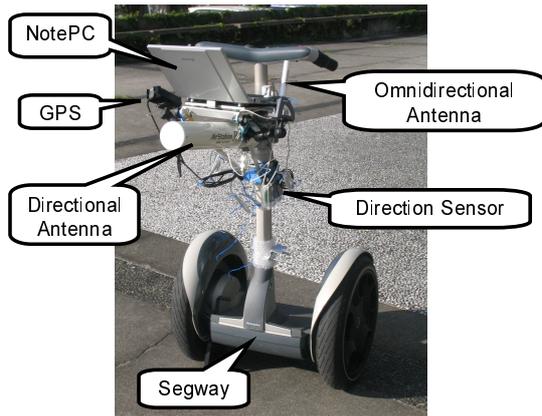


図 1: 探索支援システム



図 3: 実験環境

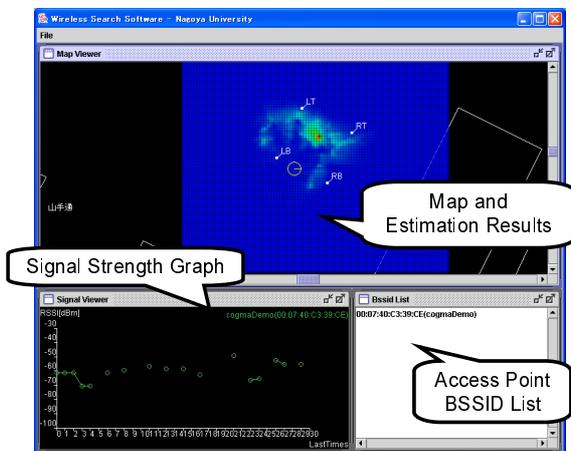


図 2: 推定ソフトウェアのスクリーンショット

と推定結果を表示するウィンドウと、電波強度の時間的な変化をグラフで表示しているウィンドウ、電波を受信したアクセスポイントのリストのウィンドウから構成される(図2)。ユーザは、地図を表示しているウィンドウを見ることにより、現在地と向いている方角を知ることが出来る。ユーザがアクセスポイントのリストから探索対象となるアクセスポイントを選択し、メニューから推定に用いる電波強度のモデルを選択すると、各機器からの定期的な計測を開始して逐次推定を行い、推定結果を地図上に重ねて表示する。推定結果は確率を基に色で段階的に表示される。

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、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のマトリクスを作成し、その格子上に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。実験環境の概観を図3に示す。

実験に用いた機器は次の通りである。

- 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)
- 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、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) 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。候補位置集合 C は実験場所である4×4のマトリクスを十分覆うようにした。

5.2 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モデルを構築した。屋外の見晴らしのよい場所において、アクセスポイントは無指向性であると仮定して、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った。

今回、どちらの場合においても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

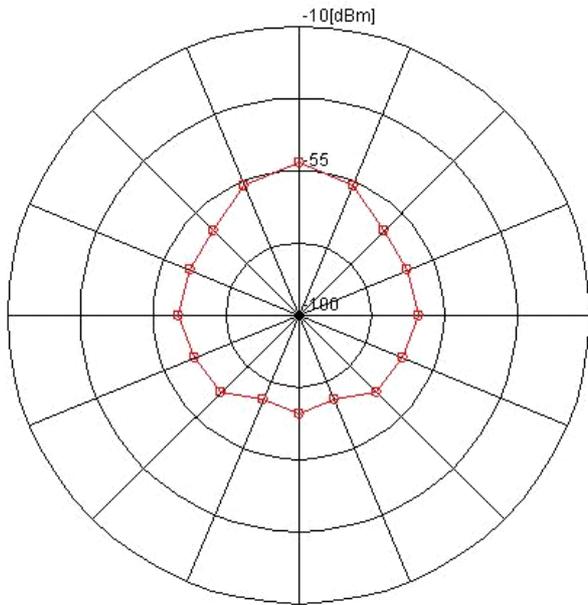


図 4: 指向性アンテナの電波強度分布 (16m)

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 を次の式で補間した。

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

5.2.1 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 4 に示す。

5.2.2 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。無指向性のモデルでは、入力であるアンテナの方向は出力である特性量に影響を与えないものとする。

5.3 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。ここで言う推定精度とは、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する。

5.3.1 実験方法

4×4 のマトリ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、逐次提示される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について時間的な推移を調べた。

この実験について、探索時に推定結果をユーザに逐次提示する場合と受信電波強度の変化のみを提示する場合において、それぞれ指向性アンテナと無指向性アンテナの場合について実験を行った。3 名の被験者が各場合の実験を 1 回ずつ行った。

5.3.2 実験結果

探索時に推定結果をユーザに逐次提示した場合と受信電波強度の変化のみを提示した場合の実験結果を、それぞれ図 5 と図 6 に示す。縦軸が存在確率の最も高い候補位置とアクセスポイントの実際の位置との間の距離で、横軸が時間である。

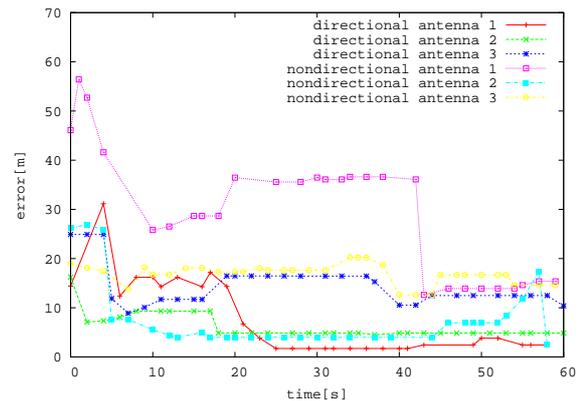


図 5: 推定結果を逐次提示した場合

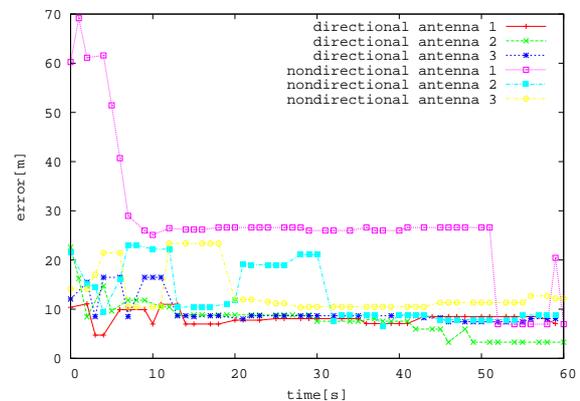


図 6: 電波強度の変化のみを提示した場合

どちらの場合も、時間が経ち計測データが増えるにつれ、推定位置が実際の位置に近づいているのがわかる。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少ない時間で推定精度が向上した。推定精度が 5 秒以上 14m(7 × 2) 以内に収まるまでの経過時間は、無指向性の場合に比べて指向性の場合の方がおよそ半分の時間となった。

無指向性アンテナの場合、推定結果を逐次提示した場合に比べて電波強度の変化のみを提示した場合の方が少ない時間で推定精度の向上が見られた。

5.3.3 考察

実験時の計測データより、探索時に推定結果を逐次提示した場合と電波強度の変化のみを提示した場合とでユーザの行動に違いが見られた。推定結果を逐次提示した場合、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、電波強度の変化のみを提示した場合、マトリ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推定結果を逐次提示した場合に比べて電波強度の変化のみを提示した場合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。

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かったことが挙げられる。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。

5.4 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。ここで言う探索時間とは、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。

5.4.1 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合否を調べた。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。

5.4.2 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合否についても、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。

表 1: 指向性アンテナの場合

被験者 ID	探索時間 (秒)	位置選択の合否
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

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

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 7 と図 8 に示す。正方形は箱を表しており、円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には、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。

5.4.3 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に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合否について、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場合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 7 と図 8 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辺りを広く移動して探索をしていると考えられる。

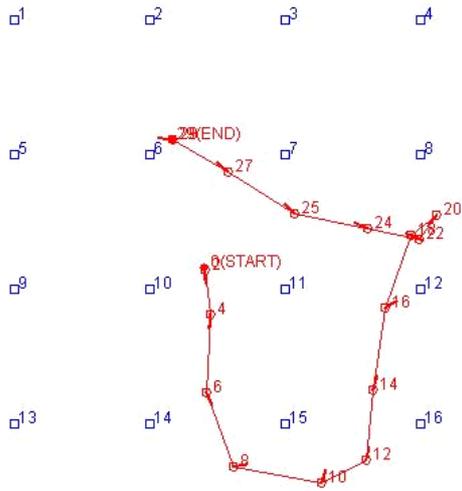


図 7: 探索時の移動軌跡 (被験者 1, 指向性)

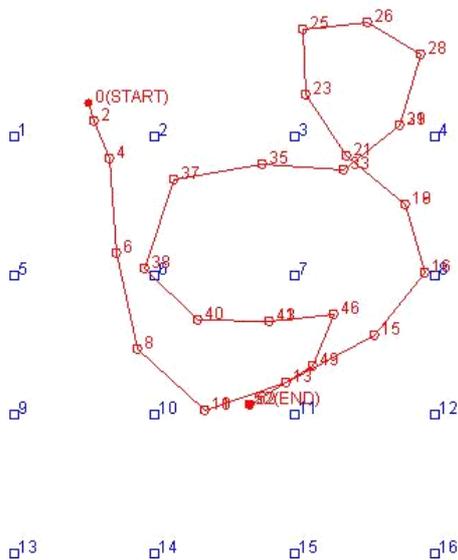


図 8: 探索時の移動軌跡 (被験者 1, 無指向性)

6 まとめと今後の課題

本論文では、無線 LAN アクセスポイントの位置特定の支援を目的とする指向性アンテナを用いた位置推定手法を提案した。本手法では、距離と方向により決まる相対的な位置関係に関する受信電波強度のモデルを事前に構築し、そのモデルを用いて推定を行う。本手法について、指向性アンテナの場合と無指向性アンテナの場合において評価実験を行い、本手法の有効性を確認した。

今後の課題として、屋内での利用やユーザとの高さが異なるアクセスポイントに対する位置推定などが挙げられる。現在のシステムはユーザの位置取得に GPS を用いており、屋内の利用はできない。この課題に対して、現在屋内でシステムの位置を測位可能とする機器の実装、搭載を検討している。また、現在のシステムではユーザとの高さの異なるアクセスポイントに対

する位置推定を考慮していない。この課題に対しては、受信電波強度モデルの三次元への拡張による対応を検討している。

謝辞 本研究の一部は平成 16 年度産業技術研究助成事業事業費助成金(「安全なコピキタス社会を実現する組み込み機器用アドホックネットワーク基盤ソフト」)からの支援を受けて行ったものです。ここに記して謝意を表します。本研究について叱咤激励していただいた名古屋大学 伊藤様に感謝します。評価実験に協力していただいた名古屋大学 岩崎様、佐伯様、田中様、Karim 様、根岸様に感謝します。本研究に協力していただいた EL Project の皆様に感謝します。

参考文献

- [1] Paramvir Bahl and Venkata N. Padmanabhan, RADAR: An In-Building RF-based User Location and Tracking System, in Proc. of IEEE Infocom, Tel Aviv, Isreal, 2000.
- [2] 北須賀 輝明, 中西 恒夫, 福田 晃, 無線 LAN を用いた屋内向けユーザ位置測定方式 WiPS の実装, 情報処理学会 マルチメディア、分散、協調とモバイル (DICOMO2004) シンポジウム論文集, pp.349-352, 2004 年 7 月.
- [3] Segway, <http://www.segway.com/>
- [4] Aleksandar Neskovic, Natasa Neskovic and George Paunovic, Modern Approaches in Modeling of Mobile Radio Systems Propagation Environment, IEEE Communications Surveys, Third Quarter 2000.
- [5] 無線 LAN のセキュリティに関するガイドライン, 社団法人電子情報技術産業協会, <http://it.jeita.or.jp/perinfo/committee/pc/wirelessLAN2/index.html>
- [6] Bill Schilit, Anthony LaMarca, Gaetano Borriello, William Griswold, David McDonald, Edward Lazowska, Anand Balachandran, Jason Hong and Vaughn Iverson, Challenge: Ubiquitous Location-Aware Computing and the Place Lab Initiative, In Proc. of WMASH 2003, San Diego, CA. September 2003.
- [7] Rashmi Bajaj, Samantha Lalinda Ranaweera and Dhara P. Agrawal, GPS: Location-Tracking Technology, IEEE Computer, Vol 35, No.4, pp.92-94, 2002.
- [8] 無線 LAN 位置検知システム AirLocation, <http://www.hitachi.co.jp/>
- [9] N900iL, <http://www.nttdocomo.co.jp/>