

無線 LAN の受信電波強度分布間類似度による方向推定手法

伊藤 誠 悟[†] 佐藤 弘 和[†] 河口 信 夫^{††}

近年、無線 LAN の急速な普及により無線 LAN を利用した位置推定システムや情報支援サービスが多く提案されている。いくつかのシステムでは無線 LAN の受信電波強度を利用し端末の位置を推定する。しかし、無線 LAN の受信電波強度は同じ場所で観測した場合においても端末が向いている方向により大きく異なる。本論文では無線 LAN の受信電波強度の方向による違いについて調査を行い、受信電波強度分布の違いを利用した方向推定手法の提案を行う。本手法においては無線 LAN の受信電波強度分布間における類似度を定義し、この類似度を用いて、端末が向いている現在方向の推定を行う。方向推定では無線 LAN の受信電波強度の情報のみを用いるため、無線 LAN 機能を備えている端末であればどのような端末でも本手法を用いることができる。実験の結果、4 個のアクセスポイントを利用し、2 秒間の受信電波強度分布測定で、2 方向の推定においては正解率 88%、4 方向の推定においては正解率 77%の結果を得た。

Direction Estimation Using Divergence of Signal Strength Distribution

SEIGO ITO,[†] HIROKAZU SATOH[†] and NOBUO KAWAGUCHI^{††}

Over the last few years, many positioning systems and information support systems using wireless LAN have been developed. Some systems use received signal strength of wireless LAN for positioning. But the distribution of received signal strength differs depending on the orientation of the terminal. In this paper, we examine the difference of received signal strength distribution to each orientation, and propose an orientation estimation method using divergence of received signal strength distribution. By using our method, users can know their direction only using wireless LAN adapter. The results of the evaluation experiment show that the accuracy of 2-way estimation is 88% and 4-way estimation is 77% under 2 seconds observation of 4 access points.

1. はじめに

近年、多くの場所において無線 LAN の利用が可能となってきた。大学や企業にとどまらず、自宅、駅、空港、アミューズメント施設やショッピングセンター等のあらゆる場所で無線 LAN の利用が可能である。このようにどこでも無線 LAN が利用可能となりつつある状況で、多くの研究グループにより無線 LAN を用いた位置推定システム^{1)~7)}の提案が行われてきた。いくつかの位置推定システムでは、ある場所における無線 LAN の受信電波強度の情報を利用して位置推定を行う。しかしながら、同一場所においても端末の向いている方向や持ち方等により受信電波強度は異なることが経験的に知られている。同一場所におけ

る方向ごとの受信電波強度の違いは位置推定精度にも大きく影響するため、方向により受信電波強度がどの程度変化するかについて調査する必要がある。本論文では端末とアクセスポイントの方向関係による無線 LAN 受信電波強度分布の違いに関する調査と、方向による受信電波強度分布の違いを利用した方向推定手法の提案を行う。本方向推定手法では受信電波強度分布間の類似度を定義し、複数の基地局から得られる受信電波強度分布間での類似度を利用することにより端末の方向推定を行う。無線 LAN による受信電波強度分布類似度を用いた方向推定手法に基づくシステムを実装し、実装したシステムを用いて方向推定手法に関する評価実験を行い、本方向推定手法の有用性の確認することができた。以下、2 章では方向による無線 LAN の受信電波強度分布の違いに関する調査とその結果について、3 章では提案手法である無線 LAN の受信電波強度分布間の類似度を用いた方向推定手法について、4 章では方向推定手法に関する評価実験とその結果について、5 章では方向情報を利用したサービ

[†] 名古屋大学大学院情報科学研究科
Graduate School of Information Science, Nagoya University

^{††} 名古屋大学情報連携基盤センター
Information Technology Center, Nagoya University

スについてそれぞれ述べる。

2. 方向による無線 LAN 受信電波強度分布の相違

本章では方向による無線 LAN の受信電波強度分布の違いについての調査を行う。いくつかの位置推定システムでは、端末が観測できる無線 LAN の受信電波強度の情報を位置推定のために利用する。しかし、端末が無線 LAN アクセスポイントから観測できる受信電波強度は、同一場所においても端末とアクセスポイントとの方向関係等により異なることが経験的に知られている。方向による無線 LAN の受信電波強度の違いを調査するため、図 1 のようにアクセスポイントから 10 m 離れた地点において受信電波強度の観測を行った。この観測では、マルチパスやフェージング等の影響による受信電波強度の違いをできる限り避け、方向による受信電波強度の違いを調査するために、見通しの良い屋外環境において調査した。このとき、アクセスポイントとの相対角度が 45° ごとの 8 方向に対して 2 分間ずつ受信電波強度の観測を行った。ユーザ自身の受信電波強度への影響を調査するために、ユーザが端末を持ちながら受信電波強度を観測する場合と、ユーザが端末を持たず、円卓上に端末を設置して受信電波強度を観測する場合において調査を行った。さらに、異なる無線 LAN アダプタ間での受信電波強度の違いを調査するために 3 種類の無線 LAN アダプタにおいて調査を行った。

図 2 はユーザが端末を持ちながら各方向に対して受信電波強度の観測を行った場合における受信電波強度の平均値を表した図である。図 2 において中心からの各軸は端末とアクセスポイントの相対角度を表し、中心からの距離は受信電波強度の強さを表す。図 2 より、どの無線 LAN アダプタを用いた場合でも方向により受信電波強度の平均値が異なっていることが分かる。また同一の方向の場合でも無線 LAN アダプタが異なると端末が観測できる受信電波強度は異なることが分かる。図 3 は端末のみで各方向における受信電波強度の観測を行った結果である。図 3 (端末のみで観測) の場合においては、図 2 (ユーザが端末を保持)

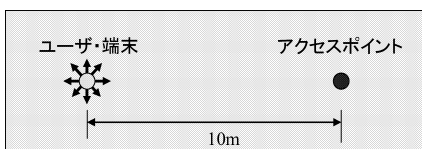


図 1 8 方向での受信電波強度の観測

Fig. 1 Observation of received signal strength to 8-ways.

の場合のように大きな違いはないが、方向ごとに受信電波強度の違いが見られた。たとえば、無線 LAN アダプタ A の相対角度 45° における受信電波強度平均が -71 dbm と他の角度に比べ低く、無線 LAN アダプタ A の全相対角度の受信電波強度平均 -61 dbm より 10 dbm 低い。また、無線 LAN アダプタ C における相対角度 135° での受信電波強度平均は -48 dbm であり、無線 LAN アダプタ C の全相対角度の受信電波強度平均 -54 dbm より 8 dbm 高い。原因として考えられるものとして、無線 LAN アダプタが装着されている場所 (PCMCIA スロット用無線 LAN アダプタや内蔵無線 LAN アダプタ等) や端末の形状等による影響があげられる。これらの影響により方向ごとに受信電波強度が異なり、受信電波強度の指向性が出てい

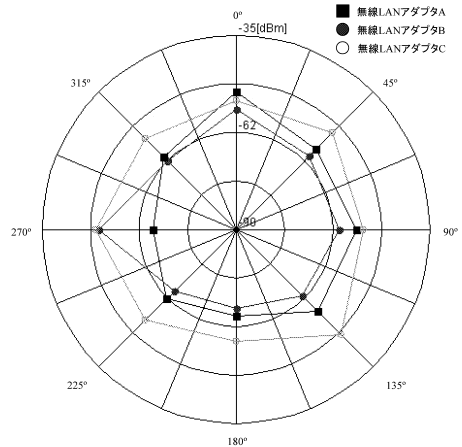


図 2 各方向における受信電波強度平均 (ユーザが端末を保持)
Fig. 2 Average of received signal strength to each direction (with human).

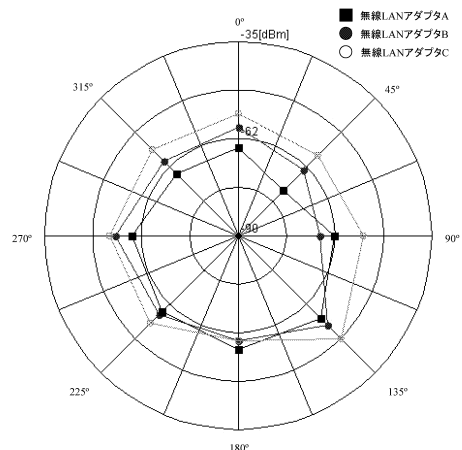


図 3 各方向における受信電波強度平均 (端末のみで観測)
Fig. 3 Average of received signal strength to each direction (without human).

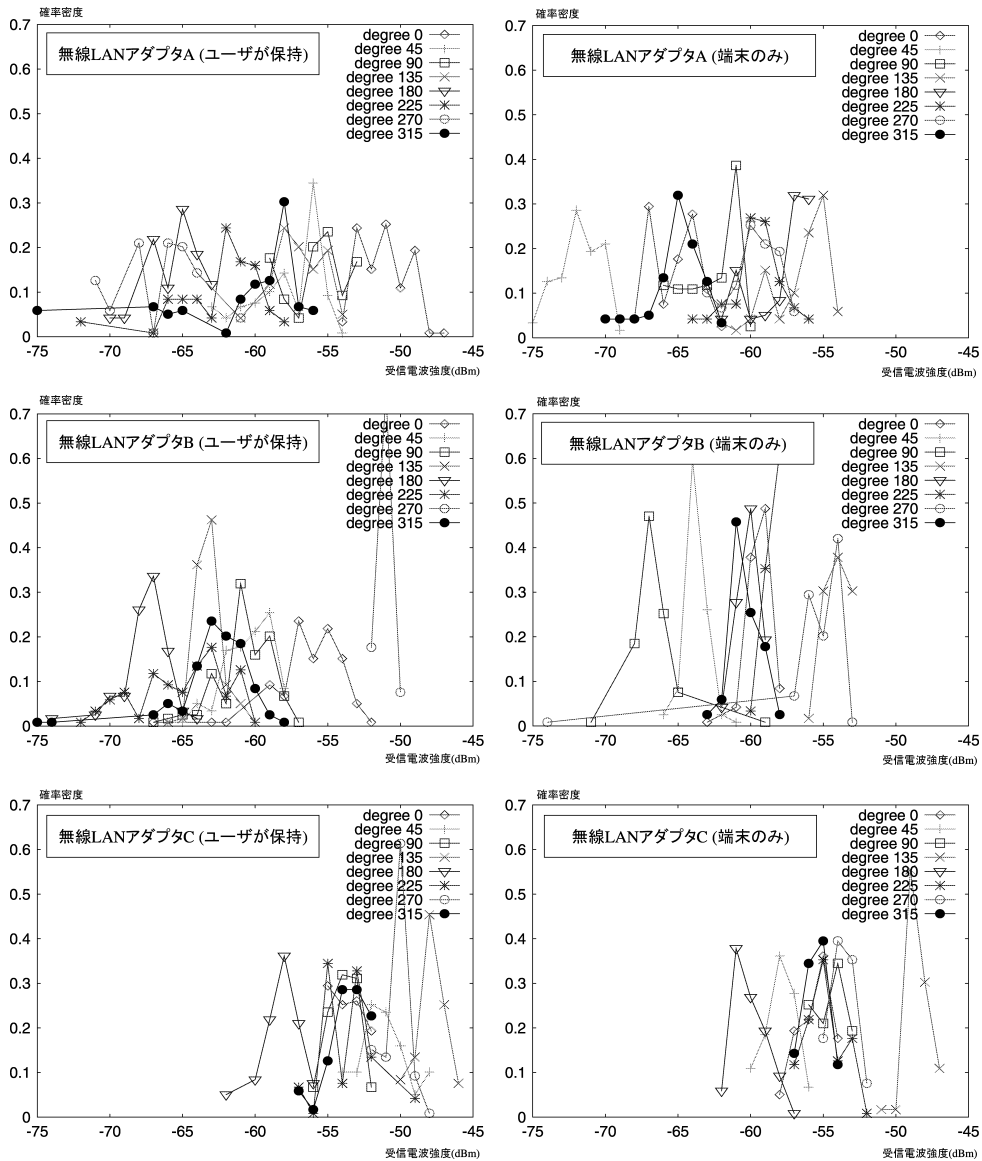


図 4 それぞれの状態での観測における無線 LAN 受信電波強度分布
 Fig. 4 Signal strength distribution in each observation.

と考えることができる。さらに方向による受信電波強度の違いについて調査するため、図 4 に各観測における受信電波強度分布を示す。図 4 中の各図は、無線 LAN アダプタ 3 種類に対しユーザが端末を保持している場合と、端末のみで受信した場合の計 6 種類の調査における受信電波強度分布を示す。各図の x 軸は観測された受信電波強度の値、y 軸はある方向において受信電波強度が観測全体に占める割合を示す。それぞれの線グラフは各方向における受信電波強度分布である。図 4 上段は無線 LAN アダプタ A に関する受信電波強度分布の結果である。上段右図（無線 LAN アダ

プタ A、端末のみ）と上段左図（無線 LAN アダプタ A、ユーザが保持）において相対角度 180° の受信電波強度分布を比べた場合、ユーザが端末を保持している場合の受信電波強度が弱くなっている。これはユーザ自身が端末とアクセスポイントとの間に位置しているため、端末からアクセスポイントが死角となりこのような受信電波強度の違いが出ていると考えられる。図 4 中段の図は無線 LAN アダプタ B を用いた場合の受信電波強度分布である。この中段右図（無線 LAN アダプタ B、端末のみ）において相対角度 180° の場合は受信電波強度分布が -60 dbm 付近であるが、中

段左図(無線 LAN アダプタ B, ユーザが保持)の相対角度 180° での受信電波強度分布は -68 dbm 付近である。また, 無線 LAN アダプタ A, B, C が観測した受信電波強度分布全体を見た場合, 無線 LAN アダプタ A と無線 LAN アダプタ B は類似した範囲の受信電波強度を観測しているが, 無線 LAN アダプタ C は全体的にグラフが左に寄っており感度が良い。このように方向による受信電波強度の違い, 無線 LAN アダプタごとの受信電波強度の違い, ユーザの影響による受信電波強度の違いがあることが分かった。前述の位置推定システムや今後構築されるユビキタス環境における無線 LAN を用いた位置推定システムでは, 無線 LAN アダプタの違いによる位置推定精度の差異, 同一場所で異なる方向での受信電波強度分布の違いによる位置推定精度の差異, ユーザ自身の影響による位置推定精度の差異について考慮されているものは少なく, 受信電波強度の違いを考慮に入れることが必要である。このような影響による受信電波強度の違いを考慮することが, ユビキタス環境で異なる端末を持つユーザどうしがどこでも使える位置推定システムを構築するための重要な鍵の 1 つである。調査を進めていくうちに, 方向による無線 LAN の受信電波強度分布の違いを利用して端末の方向推定を行うことができないだろうかという本提案手法の考えに至った。

3. 受信電波強度分布間の類似度を用いた方向推定手法

本章では提案手法である無線 LAN の受信電波強度分布間の類似度を用いた方向推定手法について述べる。本方向推定手法においては, 前章で確認した方向による無線 LAN の受信電波強度分布の違いを利用することにより端末の方向推定を行う。事前段階として, 方向推定を行いたい場所においてあらかじめ無線 LAN の受信電波強度分布の観測を行う。次に, 事前観測した受信電波強度分布のデータとユーザがその時点で観測できる無線 LAN の受信電波強度分布のデータを類似度により比較しユーザの方向推定を行う。以下, 本方向推定手法について詳説する。本手法における方向推定は次の 2 つの段階から構成される。

- **Survey Phase** : Survey Phase では, 端末はある状態において各アクセスポイントからの受信電波強度分布の観測を行う。無線調査には我々が実装した無線調査ソフトウェア⁸⁾を使用し, 調査した無線 LAN 受信電波強度分布のデータを蓄積する。蓄積したデータは Estimation Phase における方向推定のための事前学習データベースとし

て利用する。Survey Phase における観測データベースの構築方法としては, サービス提供者が事前 Survey を行い, イベント等における Survey データを構築する方法と, 個々のユーザが観測したデータを集めてデータベースを構築するユーザコラボレーションによるデータベース構築を考えている。どちらの方法を用いる場合においても, 異なる無線 LAN アダプタで観測されたデータを共用利用するためには, 2 章で示した無線 LAN アダプタごとの受信能力の違いを吸収する手法が必要であり, 現在別途検討を進めている。4 章の実験では, Survey Phase と Estimation Phase とともに同一の無線 LAN アダプタを用いた場合に得られる方向推定正解率について検証する。

- **Estimation Phase** : Estimation Phase では, ユーザは方向推定を行いたい場所において一定時間の間, 各アクセスポイントからの受信電波強度分布の観測を行う。端末が Estimation Phase で観測したデータと Survey Phase で事前観測されたデータと後述の方向推定アルゴリズムを用いて端末の方向推定を行う。

3.1 方向推定における各段階

本節では本方向推定手法における事前準備段階と方向推定段階それぞれの段階の詳細について述べる。

3.1.1 Survey Phase

Survey Phase では, 端末はある状態において受信電波強度の事前観測を行い, それらの観測を事前モデルとしてデータベースに蓄積する。初めに状態の集合 S を定義する。 S は各状態 s_i より構成され, s_i は端末が Survey Phase において観測を行う際の状態である。

$$S = \{s_1, s_2, s_3, \dots, s_k\} \quad (1)$$

式 (1) に示した各状態 s_i は端末の方向 θ_i と座標 x_p, y_p より構成される。端末の座標 x_p, y_p は我々の無線 LAN を用いた推定システム⁴⁾により推定されており既知であるものとする (k は状態の数である)。

$$s_i = (\theta_i, x_p, y_p) \quad (2)$$

次に観測集合 O を定義する。 O はそれぞれの観測 o より構成される。ある状態 s_i において, 端末はそれぞれのアクセスポイントの受信電波強度を観測する。それぞれの観測 o はアクセスポイントの MAC Address β と受信電波強度の値 α より構成される (n はアクセスポイントの数, m は観測回数である)。

$$O = (o_1, o_2, o_3, \dots, o_m) \quad (3)$$

$$o_i = \{(\beta_1, \alpha_{1i}), (\beta_2, \alpha_{2i}), (\beta_3, \alpha_{3i}), \dots, (\beta_n, \alpha_{ni})\} \quad (4)$$

式 (3), (4) より端末はそれぞれのアクセスポイントに対してある状態 s_i における受信電波強度の確率分布 $P(\alpha|\beta, s_i)$ を計算する. $P(\alpha|\beta, s_i)$ は, ある状態 s_i においてアクセスポイント β から得られる受信電波強度 α の確率分布を表す.

$$P(\alpha|\beta, s_i) = \frac{\text{状態 } s_i \text{ において } \beta \text{ から } \alpha \text{ が観測された回数}}{\text{状態 } s_i \text{ において } \beta \text{ が観測された回数}} \quad (5)$$

3.1.2 Estimation Phase

Estimation Phase において端末が観測を行っている状態を s_j と定義する. 状態 s_j は端末の方向 θ_j と座標 x_p, y_p より構成される (x_p, y_p は無線 LAN を用いた位置推定システムにより既知とする).

$$s_j = (\theta_j, x_p, y_p) \quad (6)$$

端末は状態 s_j において一定時間の間, 各アクセスポイントからの受信電波強度を観測する. これらの観測を O_1 とする. O_1 より式 (5) で示した確率分布 $P_{O_1}(\alpha|\beta, s_j)$ を計算する. 次に, Survey Phase における各状態 s_i の観測を O_2 とし, O_2 から同様に式 (5) を用いて確率分布 $P_{O_2}(\alpha|\beta, s_i)$ を計算する. 次に, O_1, O_2 から集合 Λ_1, Λ_2 を以下のように定義する.

$$\Lambda_1 = \text{観測 } O_1 \text{ において } \beta \text{ から観測された } \alpha \text{ の集合} \quad (7)$$

$$\Lambda_2 = \text{観測 } O_2 \text{ において } \beta \text{ から観測された } \alpha \text{ の集合} \quad (8)$$

式 (7), (8) より集合 Q を次のように定義する.

$$Q = \{q | q \in \Lambda_1 \cup \Lambda_2\} \quad (9)$$

これらより,

$$P_{O_1}(Q) = P_{O_1}(\alpha|\beta, s_j) \quad (10)$$

$$P_{O_2}(Q) = P_{O_2}(\alpha|\beta, s_i) \quad (11)$$

となる. 式 (10), (11) の確率分布を用いて, それぞれの分布間の類似度を Jensen-Shannon Divergence⁹⁾ を用いて以下のように定義する. 確率分布間比較の類似度としての Jensen-Shannon Divergence の有効性は文献 10) 中において報告されている. このため本論文では受信電波強度分布間の確率分布類似度として Jensen-Shannon Divergence を用いた.

$$JSD(P_{O_1}(Q), P_{O_2}(Q)) = \frac{1}{2} [D(P_{O_1}(Q) || \text{ave}_{P_{O_1}(Q), P_{O_2}(Q)}}) + D(P_{O_2}(Q) || \text{ave}_{P_{O_1}(Q), P_{O_2}(Q)}})] \quad (12)$$

式 (12) において $\text{ave}_{P_{O_1}(Q), P_{O_2}(Q)}$ は $P_{O_1}(Q)$ と $P_{O_2}(Q)$ の平均である.

$$\text{ave}_{P_{O_1}(Q), P_{O_2}(Q)} = \frac{P_{O_1}(Q) + P_{O_2}(Q)}{2} \quad (13)$$

D は Kullback-Leibler divergence¹¹⁾ により以下のように定義する.

$$D(P_{O_1}(Q) || P_{O_2}(Q)) = \sum_{q \in Q} P_{O_1}(q) \log \frac{P_{O_1}(q)}{P_{O_2}(q)} \quad (14)$$

たとえば, $P_{O_1}(Q)$ と $P_{O_2}(Q)$ が同一の確率分布であった場合, $JSD(P_{O_1}(Q), P_{O_2}(Q))$ は 0 となる. 本手法では式 (12), (13), (14) を用いてそれぞれのアクセスポイントに対して JSD の値を計算する. そして計算されたすべてのアクセスポイントの JSD 値の和をある観測における受信電波強度分布類似度として計算する. そして最後に式 (15) によってある状態 s_i における観測の類似度を計算する. 式 (15) の値が最も低かった状態 (すなわち類似度が最も高かった状態) を方向推定の結果とする.

$$\text{Divergence}(O_1, O_2) = \sum_{\beta=1}^n JSD(P_{O_1}(Q_\beta), P_{O_2}(Q_\beta)) \quad (15)$$

4. 評価実験

3 章において示した方向推定手法に従い, Java2 Platform Standard Edition 1.4.2 上において方向推定システムを実装した. 本方向推定手法の有効性を検証するために実装した方向推定システムを用いて, 名古屋大学において評価実験を行った. 名古屋大学内にはすでに約 300 以上のアクセスポイントが設置されており, 学内のいたるところにおいて無線 LAN の利用が可能である. 方向推定を行う際にどの程度の方向に対して方向推定を行うか考えた場合, 2 章の検証における 8 方向の受信電波強度分布を比較すると, 方向によっては類似した受信電波強度分布が得られる方向がある (図 5 左図). これに対し 90° ごとに 4 方向の受信電波強度分布を比較した図が図 5 右図である. この例においては 4 方向の受信電波強度分布は明確に分かれている. また現在我々が想定している方向情報を利用したアプリケーションにおいてはたかだか 4 方向を取得できればよい. これらより本論文では屋内環境において 4 方向推定と 2 方向推定の正解率を検証するための実験を行う.

4.1 ハードウェア

本実験においては以下のハードウェアを利用した. 本実験においては, 同一の端末を利用して Survey Phase, Estimation Phase を実施し, 同一端末を用いた場合に本手法により得られる方向推定正解率について検証した.

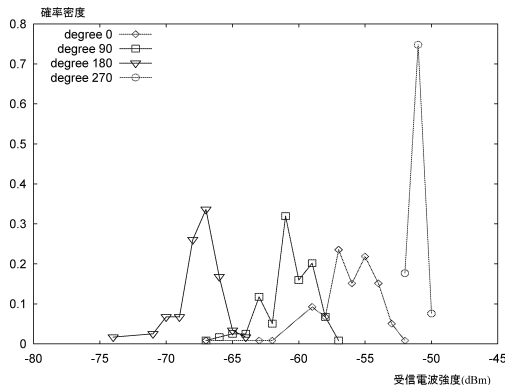
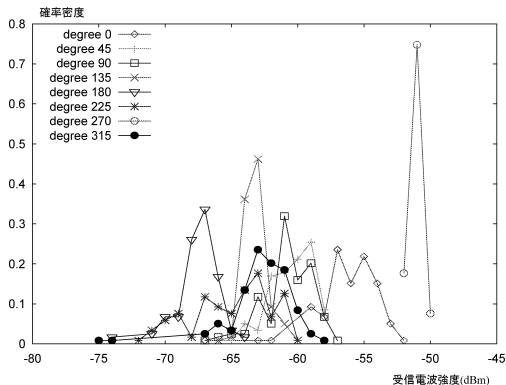


図 5 8方向と4方向での無線 LAN 受信電波強度分布
Fig. 5 Received signal strength distribution in 8-ways and 4-ways.

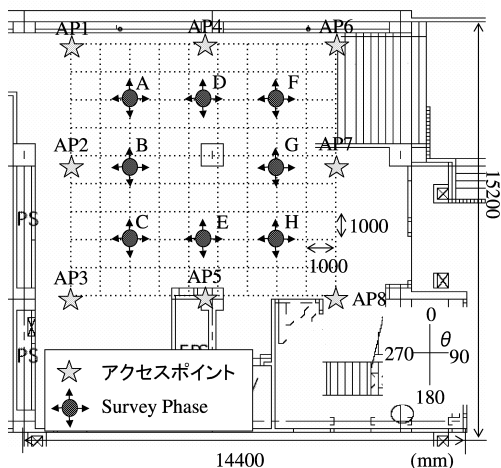


図 6 実験環境全体図

Fig. 6 Overall view of experimental environment.

- ノート PC : Toshiba DynaBook SS3500 DS/EP/2
- 無線 LAN アダプタ : PROXIM ORiNOCO 11a/b/g Combo Card

本実験では以下のアクセスポイントを利用し、アクセスポイントが送信するビーコン間隔は 0.1 秒である。

- アクセスポイント : Colubris Networks CN-320

4.2 実験環境全体図

図 6 に実験環境全体図を示す。本実験は屋内環境において実施し、図中の星印はアクセスポイントの場所を、丸印は Survey Phase を行った場所をそれぞれ示す。

4.3 Survey Phase

Survey Phase では、図 6 中に示された各場所において 4 方向、各方向につき 2 分間ずつの受信電波強度分布の事前観測を行った。本実験において、ユーザは図 7 のように自身の真正面にノート PC を持ちながら



図 7 実験時におけるノート PC の持ち方
Fig. 7 How to hold laptop in experiment.

受信電波強度の観測を実施した。各場所・各方向における Survey Phase 実施時間については、無線 LAN を用いたベイズ推定による位置推定システム⁴⁾において受信電波強度分布を利用した際の経験的な値より、推定のために十分と考えられる観測時間として 2 分間と設定した。

4.4 Estimation Phase

Estimation Phase において、本方向推定を行うにあたって重要と思われる次の観点から方向推定正解率に関する実験を行った。

- 観測時間の違いによる方向推定正解率の違い
- アクセスポイントの配置による方向推定正解率の違い
- 位置推定と方向推定を組み合わせた場合の正解率加えて、アクセスポイントの配置と指向性に関する検討を行った。

4.5 リクエスト観測時間の違いに関する実験

第 1 の実験として、ユーザが受信電波強度を観測する 1 リクエストの時間と方向推定正解率の関係についての実験を行った。ユーザが無線 LAN の受信電波

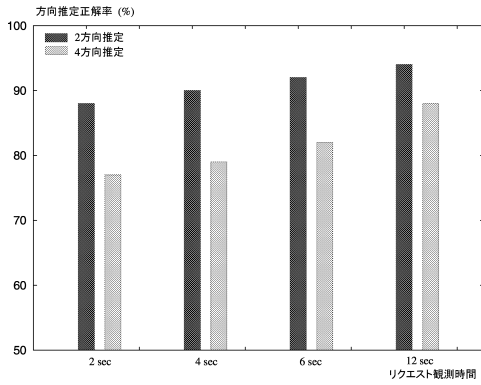


図 8 リクエスト収集時間による方向推定正解率の違い

Fig. 8 Difference of estimation accuracy in experiment 1.

強度を観測する際に、どの程度の時間観測を行えば十分な方向推定の正解率が得られるかについて検証する実験である。実験 1 では図 6 中の Survey Phase を行った任意の場所と方向で Estimation Phase における 1 つの観測時間を 2 秒、4 秒、6 秒、12 秒と分け、それぞれの観測時間による方向推定正解率の違いについて検証した。さらに 2 方向推定 (図 6 における 0°, 180° もしくは 90°, 270° の推定)・4 方向推定 (図 6 における 0°, 90°, 180°, 270° の推定) のそれぞれに対して方向推定正解率の比較を行った。各場所において、2 方向推定時には縦方向推定 (図 6 における 0°, 180°) と横方向推定 (図 6 における 90°, 270°) を同じ回数実施し、それらを平均した結果を 2 方向推定正解率とした。この実験における方向推定を行った総リクエスト数は 8,320 リクエストである。

実験 1 結果

図 8 は本方向指定手法を用いた場合の観測時間による方向推定正解率の違いについての結果である。x 軸はリクエスト観測時間を示し、y 軸はあるリクエスト観測時間に対する 2 方向推定・4 方向推定それぞれの方向推定正解率を示す。2 秒間観測した受信電波強度分布を 1 リクエストとした場合、2 方向推定では 88%、4 方向推定では 77% の正解率であった。次に、1 リクエストあたりの観測時間を 4 秒に増やした場合、2 方向推定では 90%、4 方向推定では 79% の方向推定正解率を得た。さらに、観測時間を 6 秒にした場合、2 方向推定では 92%、4 方向推定では 83% の方向推定正解率を得た。最後に 1 リクエストの観測時間を 12 秒とした場合、2 方向推定では 95%、4 方向推定では 88% の方向推定正解率となった。2 方向推定・4 方向推定においてともにリクエスト収集時間を増やした場合、方向正解率が向上するのが分かる。目的とするサービスの要件ごとにリクエスト収集に許される時間は異なる

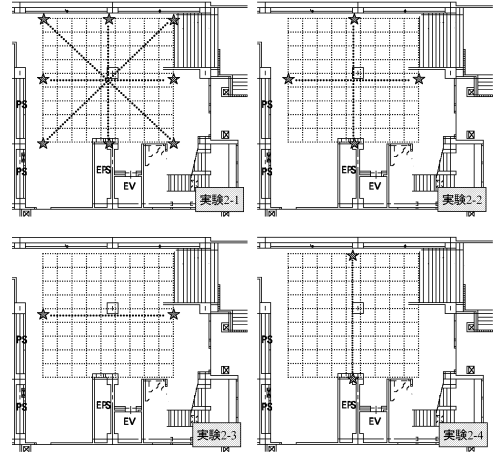


図 9 異なる配置関係のアクセスポイント

Fig. 9 Different allocation of wireless access points.

ため、推定正解率との関係を考慮しなければならない。たとえば、頻繁にユーザが方向を変更する状況においてはリクエスト収集時間は短く設定する必要があり、その結果推定正解率は下がる。一方、ユーザの方向変更の間隔がある程度の時間以上 (たとえば 6 秒程度の間隔) のサービスであれば、2 方向推定・4 方向推定ともに 8 割以上の方向推定正解率が得ることができる。

4.6 アクセスポイント配置の違いに関する実験

第 2 の実験として、アクセスポイントの配置関係により方向推定正解率がどのように変化するかの違いについて検証を行った。たとえば、ある場所においてユーザは方向推定のために十分な数のアクセスポイントからの受信電波強度分布を観測でき、ある場所では方向推定のために十分な数のアクセスポイントからの受信電波強度分布を観測できないかもしれない。これらの違いを検証するため、アクセスポイントの位置関係が方向推定正解率にどのような影響を及ぼすかについて、我々は図 9 のように 4 通りの配置でアクセスポイントを設置し方向推定実験を行った。実験 2-1 においては実験環境を囲む 8 つのアクセスポイントからの受信電波強度を利用して方向推定を行う。実験 2-2 においては実験環境に対して縦方向と横方向それぞれ 2 つずつのアクセスポイントからの受信電波強度を利用する。実験 2-3、実験 2-4 においては実験環境に対して縦方向と横方向の 2 つの受信電波強度を利用する。実験 2 における 1 リクエスト収集時間は実験 1 の結果より 6 秒とした。2 方向推定実験においては、4.5 節と同様に縦方向と横方向の平均正解率を示した。この実験における方向推定を行ったリクエスト総数は 5,120

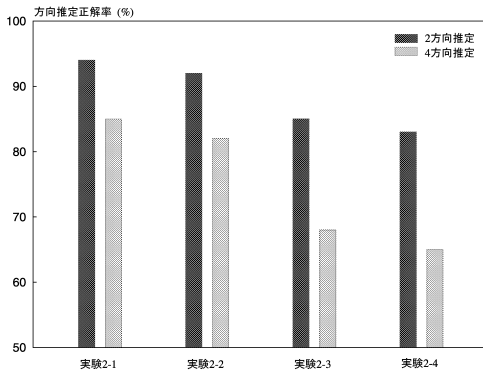


図 10 各配置による方向推定正解率の違い

Fig. 10 Difference of estimation accuracy in each allocation.

リクエストである。

実験 2 結果

図 10 に実験結果を示す。図 10 において x 軸は各実験におけることなるアクセスポイントの配置、y 軸は各アクセスポイントの配置に対する 2 方向・4 方向それぞれの方向推定正解率を表す。実験 2-1 のように 8 個のアクセスポイントを実験環境の周囲に配置した場合は 2 方向推定については 94%、4 方向推定については 85%の方向推定正解率が得られた。実験 2-2 のようにアクセスポイントを 4 カ所に減らした場合においても 2 方向推定については 92%、4 方向推定については 82%の方向推定正解率が得られた。しかし実験 2-3 や実験 2-4 のアクセスポイントの配置の場合では 2 方向推定についてはどちらも 80%以上の方向推定正解率であるが、4 方向推定においては 60%~70%と方向推定正解率が著しく低下した。4 方向の推定を行いたい場合アクセスポイント 2 つのみでは不十分であると考えられる。これらの結果より屋内環境において 4 方向推定を行い十分な推定正解率を得たい場合には実験 2-1 や実験 2-2 のようなアクセスポイントの配置が求められる。

4.7 位置推定と方向推定を組み合わせた実験

第 3 の実験として、無線 LAN アダプタのみを用いて位置推定と方向推定を行った場合の推定正解率を検証するために、位置推定と方向推定を組み合わせた実験を行った。位置推定には我々が開発した位置推定ソフトウェア⁴⁾を用いた。本実験では図 6 の A~H における 8 カ所で位置推定と方向推定をそれぞれ行った。位置推定においては位置推定誤差が 2.5 m 以内の場合を正解とし、方向推定の場合は正しい方向が得られた場合を正解と定義した。方向推定においては 4 方向推定・2 方向推定それぞれの場合において実施し、2 方

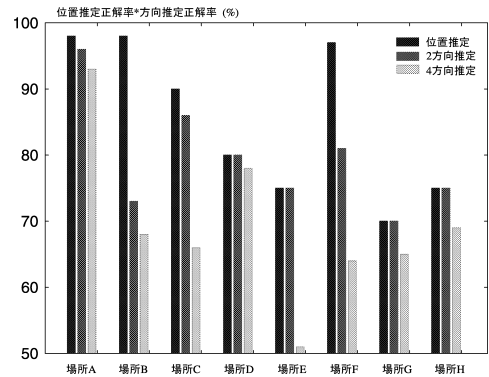


図 11 位置推定・方向推定を組み合わせた推定正解率

Fig. 11 Accuracy of location estimation and direction estimation.

向推定時には縦方向推定 (図 6 における 0° , 180°) と横方向推定 (図 6 における 90° , 270°) を同じ回数行い、それらを平均した結果を 2 方向推定正解率とした。実験における 1 リクエストの収集時間は実験 1 の結果より 6 秒、アクセスポイントの配置は実験 2-1 と同様の配置で行った。

実験 3 結果

図 11 に実験結果を示す。図 11 の横軸は推定を行った場所を表し、縦軸は推定正解率 (位置推定正解率は位置推定のみ結果、方向推定正解率はその場所における位置推定正解率 \times 方向推定正解率) を表す。図 11 より場所ごとに推定正解率に大きな差が出ているのが分かる。たとえば場所 A においては位置推定と方向推定ともに正解率が高いため、全体として高い正解率となっている。しかし一方で、場所 E における 4 方向推定では位置推定が 75%の正解率であり方向推定が 69%であったため全体としての推定正解率が 51%と低くなっている。原因として考えられることは、本実験を行った実験環境は図 6 のような屋内の場所において実施したためマルチパス等の影響が非常に大きく場所により無線 LAN の電波状態が大きく変化したためであると考えられる。そのような状況下においても本手法を用いることにより位置推定・方向推定実験全体での正解率は位置推定 + 2 方向推定の場合で 81%、位置推定 + 4 方向推定の場合で 70%を得ることができた。

4.8 アクセスポイントの配置と指向性に関する検討

本節ではアクセスポイントの配置と指向性に関する検討を行う。アクセスポイントの場所による端末の受信電波強度の違いを調べるために、端末の場所を図 6 における場所 A に固定する。アクセスポイント AP1 を 1 つだけ配置し、場所 A における AP1 からの各

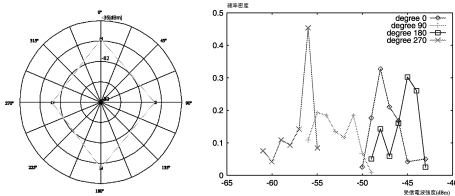


図 12 各方向における受信電波強度分布 (AP6 の場合)
Fig. 12 Signal strength distribution of AP6.

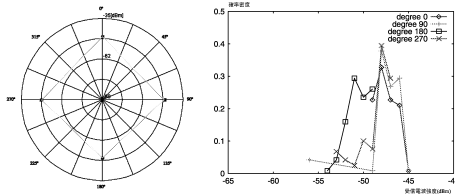


図 13 各方向における受信電波強度分布 (AP8 の場合)
Fig. 13 Signal strength distribution of AP8.

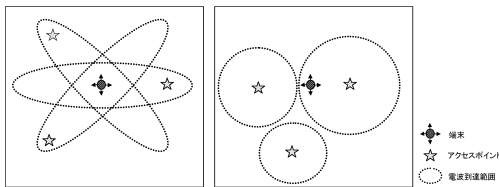


図 14 アクセスポイントの配置と指向性
Fig. 14 Allocation and directivity of access point.

方向に対する受信電波強度を観測する。同様の観測を AP2 ~ AP8 に対して行う。図 12 と図 13 に特徴的であった 2 つの結果を示す。図 12 は AP6 を観測した各方向における受信電波強度の平均 (右) と各方向における受信電波強度分布 (左) である。図 13 は AP8 を観測した各方向における受信電波強度の平均 (右) と各方向における受信電波強度分布 (左) である。図 12 (右) の結果より AP6 の受信電波強度分布は各方向とも明確に異なる。一方、図 13 の結果では 180° における観測以外の 3 方向については類似した受信電波強度分布である。受信電波強度分布の違いは端末の指向性、アクセスポイントの指向性、マルチパスの影響等々、様々な要因が関係しており一概にいうことはできない。しかし、サービス等を提供する際にアクセスポイントの指向性を考慮して配置を行うことにより、方向推定の正解率を上げることは可能であると考えられる。たとえば、指向性があるアクセスポイントを図 14 (左) に示すとおり配置した場合、端末が各アクセスポイントから受信する受信電波強度は方向ごとに異なり、本手法における受信電波強度分布類似度の変化が大きくなるため方向推定正解率が上がることが期待できる。

一方、指向性がないアクセスポイントを図 14 (右) に示すとおり配置した場合、図 14 (左) の場合より、方向ごとの受信電波強度分布の違いが小さくなるため方向推定正解率が下がると考えられる。このように、方向推定の正解率を向上させるためにはアクセスポイントの指向性を考慮して配置を行うことが必要である。

5. 方向情報を利用したサービス

本論文の方向推定手法を用いることにより、無線 LAN 機能付き端末を持っているユーザの方向を容易に推定することができ、方向情報を考慮したサービスを提供することが可能となる。加えて、我々の位置推定システム⁴⁾と無線 LAN を用いることによりユーザの位置情報を取得することが可能である。本章では本方向推定手法によって取得した方向情報を利用したサービス例として、学会等のポスターセッションにおける付加情報提示サービスを提案する。以下に利用シナリオを示す。初めに、方向情報を利用したサービスを提供する準備段階として、サービス提供者 (この場合はポスターセッション開催者) は方向推定を行いたい場所において無線 LAN 受信電波強度分布の事前観測を実施する。サービス提供者は、事前観測を実施した端末と同一の無線 LAN アダプタを持つ端末を付加情報提示端末としてユーザへ貸し出す。ユーザが自身の端末を用いて付加情報提示サービスを受けたい場合、ユーザは事前準備としてサービス提供者が観測した無線 LAN 受信電波強度分布のデータを取得する。この際にユーザがサービス提供者が観測した事前観測データを利用するためには、サービス提供者が利用した無線 LAN アダプタとユーザの無線 LAN アダプタ間での受信能力の違いを考慮する必要がある。この点に関して現在我々は次のような方法を考えている。ユーザは事前観測を行った無線 LAN アダプタとユーザが保持している無線 LAN アダプタの受信能力の違いを吸収するために無線 LAN アダプタの受信能力モデル作成スペースを訪れる。そのスペースにおいて、ユーザは各アクセスポイントからの距離と方向が既知である一点で一定時間の間、各方向にあるアクセスポイントからの受信電波強度がどのように得られているかを観測する。この観測を用いてユーザの無線 LAN アダプタの受信能力モデルを作成する。ユーザがその場で作成したモデルとサービス提供者の無線 LAN アダプタのモデルを利用し受信能力の差異を吸収する。このようにすることにより異なる無線 LAN アダプタで観測された事前準備データの利用が可能となると考えている。端末の準備が整ったユーザに対して、我々のソ

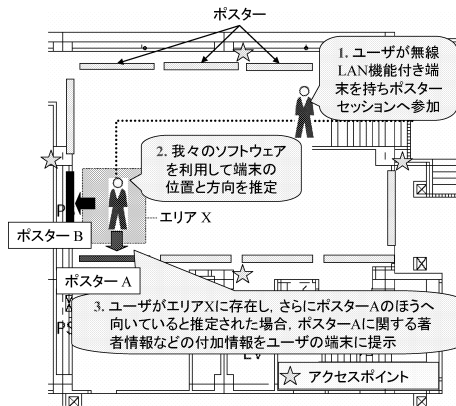


図 15 ポスターセッションにおける方向情報を利用したサービス
Fig. 15 Directional service application in a poster session.

ソフトウェアが無線 LAN の受信電波強度を用いてユーザの現在方向を推定する。たとえば図 15 においてユーザはエリア X におり、ポスター A の方向を向いているとする。このとき、本ソフトウェアがポスター A に関する付加的な情報（たとえば、著者情報の詳細情報や、ポスターと関連しているプロジェクトのプロジェクトホームページや、過去の関連研究の情報等）をユーザの端末へ提示する。このようにしてユーザに方向情報を考慮した情報支援サービスを提供する。本ソフトウェアは無線 LAN 機能付き端末さえあれば方向の推定を行うことができるため、ユーザは非常に容易に方向情報を考慮したサービスを享受することができる。

6. 関連研究

本章では無線 LAN を用いた位置推定システム、方向依存サービスの関連研究について述べる。

6.1 無線 LAN を用いた位置推定システム

無線 LAN を用いた位置推定システムとしては大きく次の 3 つに分類することができる。

- **Cell-ID System** : 端末が現在接続しているアクセスポイントのカバーする範囲 (Cell) を現在の端末の位置として推定する方式。端末側にアクセスポイントの MAC アドレスと所在データを保持するだけで位置推定できるが、アクセスポイントの通信エリア全域が位置推定の精度となり、位置推定精度が低いという問題がある。
- **TDOA (Time Difference of Arrival) System** : AirLocation³⁾ が採用している方式。端末が発する位置要求エコーを、複数の AP が受信し、AP 間におけるエコー受信タイミングのずれと、各 AP が保持する内部時計の誤差を加味して

端末の位置を推定する方式。このシステムでは汎用の AP ではなく専用の AP を必要とする。

- **Received Signal Strength System** : 無線 LAN の受信電波強度を利用して端末の位置推定を行う方式。電波強度の利用方法によりさらに複数の方式がある。RADAR¹⁾ 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持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 2 つを提案している。前者の方法において学習を行う際、RADAR では端末を持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) 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。RADAR システムにおいては学習および推定を行う際に受信電波強度の分布ではなく、受信電波強度の値を対象としてユークリッド距離の計算を行っている。無線 LAN においてはマルチパス、フェージング等の影響により同一の場所で同一の方向においても受信電波強度は大きく変化する。この点を考慮し受信電波強度の分布を類似度の対象としている点において本手法は異なる。WiPS²⁾ では電波強度を測定する側と測定される側の役割をなくしすべての無線 LAN 端末を用いてそれらの距離特性を加味し位置推定を行う。上記システムは電波の距離特性から位置を推定しているためマルチパス等の問題がある。Eka-hau⁶⁾ では事前に受信電波強度を測定しておき、それらをサーバに保存しユーザからの問合せに応じて位置推定を行う。

これらの無線 LAN を用いた位置推定システムは本論文において指摘した方向の影響、ユーザの影響、無線 LAN アダプタ間の違いによる影響によって生じる受信電波強度の違いについて考慮しなければならない。

6.2 方向依存サービス

- **Active Belt** : ActiveBelt¹²⁾ とは方向情報を送ることのできるベルトタイプで触知性のウェアラブルデバイスである。ユーザへ方向を直接的に指示する触知性デバイスは、モバイル環境での利用を目的としている。このベルトの注目すべき点として、ベルトを使うことによりユーザは物理的な信号により方向を指示されることができ、方向ナビゲーションサービスを受けることができる点で

ある．方向情報を利用したサービスを提供するためには専用のベルトデバイスを必要とする．

- Azim : Azim^{13),14)} とはポインティングタイプの，方向センサを用いた位置推定システムである．このシステムでは，ユーザの位置をマークと方向センサから得られる方位情報から推定する．このポインティングタイプのシステムは利用することが容易で直感的なインタフェースである．Azim を使ったアプリケーション例としてある機器の画面を他のディスプレイに表示させるアプリケーション等が実装されている．このシステムにおいて方向情報は方向センサより取得する．

専用デバイスや方向センサ等で方向情報を取得し方向情報を利用したサービスを提供している関連研究は上記のとおりであるが，無線 LAN の受信電波強度分布の違いから方向推定を行っている関連研究は我々の知る限りまだない．

7. ま と め

本論文では，方向による無線 LAN の受信電波強度の違いについて調査し，無線 LAN の受信電波強度分布の違いを利用した方向推定手法の提案を行った．本論文では，無線 LAN の受信電波強度分布は同一の場所においても，方向による影響，ユーザ自身の影響，無線 LAN アダプタの違いによる影響等により異なることを示した．今後構築される無線 LAN の受信電波強度を用いた位置推定システムやその他の情報システムにおいては，様々な異なる端末を持つユーザに対応するために，これらの受信電波強度の違いについて考慮していかなければならない．本実験においてはノート PC 用の無線 LAN アダプタを用いてある程度の方向推定が可能であることを示したが，より指向性の高い種類のアンテナを用いることにより，方向ごとの受信電波強度の違いを明確にすることができる．これにより本手法における方向ごとの無線 LAN 受信電波強度分布類似度の違いが大きくなり推定正解率を上昇させることが期待できる．また，Survey Phase のデータを解析することにより，ある場所においては 0° ， 90° の方向推定を行い，またある場所においては 45° ， 225° の 2 方向推定を行うといったより柔軟な方向推定についても検討を進める．本実験においては位置推定の後に方向推定を行ったが，受信電波強度分布類似度を用いた本方向推定手法を我々の位置推定手法⁴⁾に取り入れることによる位置推定システムの推定精度の改善を検討している．本方向推定手法を利用するためには無線 LAN 環境と無線 LAN 機能付き端末さえあればよ

く，方向推定のための特別なハードウェアを必要としない．このため昨今の急速な無線 LAN の増加にとまない，あらゆるところで本方向推定手法によって得られた方向情報を利用したサービスの提供が期待できる．

謝辞 本研究の一部は，科学技術振興調整費若手任期付研究員支援および文部科学省科研費，若手研究 (B) (課題番号：17700146) による助成を受けている．

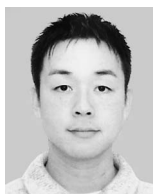
参 考 文 献

- 1) Bahl, P. and Padmanabhan, V.N.: RADAR: An In-Building RF-based User Location and Tracking System, *IEEE Infocom 2000*, pp.775–784 (2000).
- 2) Kitasuka, T., Nakanishi, T. and Fukuda, A.: 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 (2003).
- 3) 荻野 敦, 恒原克彦, 渡辺晃司, 藤嶋堅三郎, 山崎良太, 鈴木秀哉, 加藤 猛: 無線 LAN 統合アクセスシステム—位置検出方式の検討, マルチメディア分散協調とモバイルシンポジウム (DICOMO2003), pp.569–572 (2003).
- 4) Ito, S. and Kawaguchi, N.: Bayesian based Location Estimation System using Wireless LAN, *3rd IEEE Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops*, pp.273–278 (2005).
- 5) Satoh, H., Ito, S. and Kawaguchi, N.: Position Estimation of Wireless Access Point using Directional Antenna, *International Workshop on Location and Context-Awareness (LoCA2005) in cooperation with Pervasive 2005*, LNCS3479, pp.144–156 (2005).
- 6) Kontkanen, P., Myllymaki, P., Roos, T., Tirri, H., Valtonen, K. and Wettig, H.: Topics in Probabilistic Location Estimation in Wireless Networks, *Proc. 15th IEEE Int. Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications* (2004).
- 7) LaMarca, A., Chawathe, Y., Consolvo, S., Hightower, J., Smith, I., Scott, J., Sohn, T., Howard, J., Hughes, J., Potter, F., Tabert, J., Powledge, P., Borriello, G. and Schilit, B.: Place Lab: Device Positioning Using Radio Beacons in the Wild, *3rd International Conference Pervasive 2005*, LNCS3468, pp.116–133 (2005).
- 8) 佐藤弘和, 伊藤誠悟, 河口信夫: 指向性アンテナを用いた無線 LAN 基地局位置推定手法に基づく基地局探索支援システムの設計と実装, 情報処

- 理学会第 67 回全国大会, pp.3-756-3-758 (2005).
- 9) Lin, J.: Divergence measures based on the Shannon entropy, *IEEE Trans. Inf. Theory*, Vol.37, No.1, pp.145-151 (1991).
 - 10) Lee, L.: On the effectiveness of the skew divergence for statistical language analysis, *Proc. 8th International Workshop on Artificial Intelligence and Statistics*, pp.65-72 (2001).
 - 11) Dagon, I., Lee, L. and Pereira, F.C.N.: Similarity-Based Models of Word Co-occurrence Probabilities, *Machine Learning*, Vol.34, No.1-3, pp.43-69 (1999).
 - 12) Tsukada, K. and Yasumura, M.: Active-Belt: Belt-type Wearable Tactile Display for Directional Navigation, *Proc. UbiComp2004*, LNCS3205, pp.384-399 (2004).
 - 13) Iwasaki, Y., Kawaguchi, N. and Inagaki, Y.: Design, Implementation and Evaluations of a Direction Based Service System for both Indoor and Outdoor, *2nd International Symposium on Ubiquitous Computing Systems*, (UCS2004), pp.7-14 (2004).
 - 14) Iwasaki, Y., Kawaguchi, N. and Inagaki, Y.: Azim: Direction Based Service using Azimuth Based Position Estimation, *24th International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS2004)*, pp.23-26 (2004).
 - 15) Tarumi, H., Morishita, K., Nakao, M. and Kambayashi, Y.: SpaceTag: An Overlaid Virtual System and its Application, *International Conference on Multimedia Computing and Systems*, Vol.1, pp.207-212 (1999).
 - 16) Harter, A., Hopper, A., Steggle, P., Ward, A. and Webster, P.: The anatomy of context-aware applications, *Proc. 5th annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking (MOBICOM'99)*, pp.59-68 (1999).

(平成 17 年 6 月 1 日受付)

(平成 17 年 11 月 1 日採録)



伊藤 誠悟 (正会員)

2000 年東京理科大学理工学部情報工学科卒業。2002 年同大学大学院理工学研究科情報科学専攻修士課程修了。同年日本電信電話株式会社情報流通プラットフォーム研究所入所。2004 年より名古屋大学大学院情報科学研究科情報 COE 研究員。ユビキタスミ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 会員。



佐藤 弘和

2003 年名古屋大学工学部情報工学科卒業。2005 年同大学大学院情報科学研究科情報システム学専攻修士課程修了。無線 LAN 端末の探索に関する研究に従事。現在、ブラザー工業株式会社 NID 開発部所属。



河川 信夫 (正会員)

1990 年名古屋大学工学部電気工学科卒業。1995 年同大学大学院情報工学専攻博士課程修了。同年同大学工学部助手。同大学講師、助教授を経て、2002 年より同大学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 年より大学発ベンチャー企業(有)ユビグラフ取締役兼務。工学博士。ACM, IEEE, ソフトウェア科学会, 人工知能学会, 日本音響学会各会員。