

# アクセスポイントの選択を考慮したベイズ推定による 無線 LAN ハイブリット位置推定手法とその応用

非会員 伊藤 誠悟\* 正員 河口 信夫\*\*

Wireless LAN Based Hybrid Positioning System  
Using Bayesian Inference and Access Point Selection

Seigo ITO\*, Non-member, Nobuo KAWAGUCHI\*\*, Member

本論文では、既設の無線 LAN アクセスポイントと、既存の無線 LAN アダプタを用いて端末の位置推定を行う手法を提案する。本手法では、位置推定を行う場所において各無線 LAN アクセスポイントからの電波強度を事前に測定し、ユーザはそれらを事前モデルとして保持する。ユーザは事前モデルと現在ユーザが観測できる無線 LAN アクセスポイントの電波強度を用いて現在位置を推定する。しかし、屋内環境において無線 LAN の受信電波強度はマルチパス等の影響により複雑に変化するため、位置推定を行う際に利用するアクセスポイントを適切に選択する必要がある。本手法においては端末の位置推定時に、アクセスポイントを選択する段階と位置推定を行う段階の 2 段階に分けることにより、位置推定のために有用な情報を提供するアクセスポイントを選択し、選択されたアクセスポイントの情報を利用して位置推定を行う。実験の結果、適切なアクセスポイントを選択し位置推定を行うことにより、位置推定精度の向上を確認したので報告する。加えて、無線 LAN による位置依存アプリケーションを紹介する。

キーワード：無線 LAN，位置依存アプリケーション，位置推定，ユビキタス

**Keywords:** Wireless LAN, Location Based Application, Location Estimation, Ubiquitous

## 1. まえがき

近年、無線 LAN の利用は大学、企業といった環境だけではなく、駅、空港、娯楽施設といったあらゆる場所で可能となってきた。さらに一般家庭においては情報家電が無線対応となり、最近では無線 LAN 機能を持っていない情報家電を無線 LAN 化する機器や、無線 LAN 機能を搭載した携帯電話も発表されている。このようにホームネットワーク環境における無線 LAN はすでに身近なものである。あらゆる場所において無線 LAN の利用が可能となりつつある状況下でいくつかの無線 LAN を用いた位置推定システム<sup>(1)-(11)</sup>が提案されてきた。しかしいくつかのシステムにおいては位置推定用の専用ハードウェアを必要とする。また、既設の無線 LAN アクセスポイントを利用できる位置推定システムにおいても、位置推定のために利用するアクセスポイントに関して、どのアクセスポイントの情

報を利用すべきかを考慮しているシステムは筆者の知る限りない。屋内環境ではマルチパス等の影響により無線 LAN の受信電波強度はアクセスポイントとユーザの相対位置や内壁との関係により大きく変化することが知られている。このため無線 LAN を用いた位置推定システムにおいては推定対象の場所に適した位置にあるアクセスポイントを選択し位置推定を行う必要がある。本論文では、まず初めにアクセスポイントからの受信電波強度の強さによる変化量の違いを調査し、それらの調査結果を考慮した無線 LAN ハイブリット位置推定手法について提案する。我々の手法では位置推定の際の第一段階として無線 LAN 受信電波強度情報から近接性 (Proximity) に基づき位置推定に使用するアクセスポイントを選択する。そして選択されたアクセスポイントの情報を利用してベイズ推定を用いた位置推定 (Scene Analysis) を行う。以降、2 節では無線 LAN を用いた位置推定手法と関連研究について紹介する。3 節では受信電波強度の変化量の違いに関する調査を行い、4 節では 3 節の調査結果を考慮し、アクセスポイントの選択を考慮したベイズ推定による無線 LAN ハイブリット位置推定手法を提案する。5 節において本提案手法の評価実験を行い、6 節において無線 LAN 位置推定を利用した位置依存アプリケーションを紹介する。最後に 7 節においてまとめを述べる。

\* 名古屋大学大学院 情報科学研究科  
〒464-8601 名古屋市千種区不老町  
Graduate School of Information Science, Nagoya University  
1, Furo-Cho, Chikusa-ku, Nagoya, 464-8601

\*\* 名古屋大学大学院 工学研究科  
〒464-8603 名古屋市千種区不老町  
Graduate School of Engineering, Nagoya University  
1, Furo-Cho, Chikusa-ku, Nagoya, 464-8601

## 2. 無線 LAN を用いた位置推定手法

2.1 既存の無線 LAN を用いた位置推定手法 無線 LAN を用いた既存の位置推定手法の多くは次の 3 種類の手法 (Triangulation, Proximity, Scene Analysis) に大別することができる。

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位置推定を行う技術として, Triangulation<sup>(1)-(5)</sup>がある(図1)。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距離を用いて推定を行う方法を Lateration, 二つ以上の基準点から方向を用いて位置推定を行う方法を Angulation と呼ぶ。図1に Triangulation (Lateration) の例を示す。例えばアクセスポイントの場所が既知である状態で, ある端末がアクセスポイント A から -50dBm, アクセスポイント B から -60dBm, アクセスポイント C から -40dBm の受信電波強度を観測したとする。このとき無線の距離特性により端末がアクセスポイントからどの程度の距離離れているか推定することができる(図1中の各点線)。図1においてはそれらの点線が交わっている場所 X を端末の位置として推定する。

2.1.2 Proximity 基準点から得られる何らかの情報を用いて, 位置推定対象がどの基準点の近くに存在するかを推定する方法として Proximity<sup>(6)(7)</sup>がある(図2)。例えば, BSSID (Basic Service Set Identifier) が異なるアクセスポイントが複数設置されている場合, 端末がどのアクセスポイントから最も強い受信電波強度を受けているかを監視することにより端末がどの場所にいるか決定する。図2において端末がもっとも強い受信電波強度をアクセスポイント A から観測した場合, アクセスポイント A がカバーする範囲 X を端末の位置として推定する。推定アルゴリズムが簡単で, 位置推定のための事前準備としてアクセスポイントの場所情報と BSSID 情報のみを保持すればよいため容易にシステムを構築することができる。しかしながら, アクセスポイントがカバーしている範囲全体が推定場所となるため推定精度が低いという問題点がある。

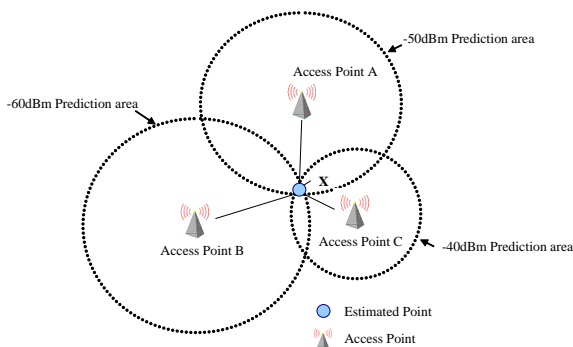


図1 Triangulation  
Fig. 1. Triangulation

2.1.3 Scene Analysis 推定を行う領域中の複数の特定の位置でシーン (Scene:場面) の観測を行い, 各シーンとそのシーンを観測した場所を対応付けるデータを学習データとして事前に構築し, 構築した学習データを用いて位置推定を行う方式として Scene Analysis がある<sup>(1)(8)-(11)</sup>(図3)。シーンとしてどのような情報を扱うかについては, 各位置推定システムにより異なる。各アクセスポイントからの受信電波強度の情報を用いる手法<sup>(1)(8)-(10)</sup>, アクセスポイントの MAC アドレスとアクセスポイントが観測できた範囲の情報を用いる手法<sup>(11)</sup>などがある。図3に Scene Analysis の例を示す。例えば, 図中の黒丸(図3中の Scene Observation Point)の地点において端末は一定時間, シーンを観測する。観測したシーンをデータベースとして保存し, その観測場所における事前観測データとする。位置推定時には端末がある場所で観測できるシーンと事前観測におけるシーンを比較し位置推定を行う。本手法においては, 各アクセスポイントからの受信電波強度分布の情報を事前観測する。事前観測を行っていない場所においては無線 LAN の距離特性を用いて, 付近のシーンを観測した地点から事前観測していない場所におけるシーンを推定し補完する(図3中の Interpolated Point)。

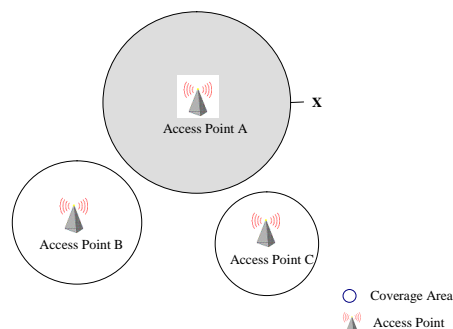


図2 Proximity  
Fig. 2. Proximity

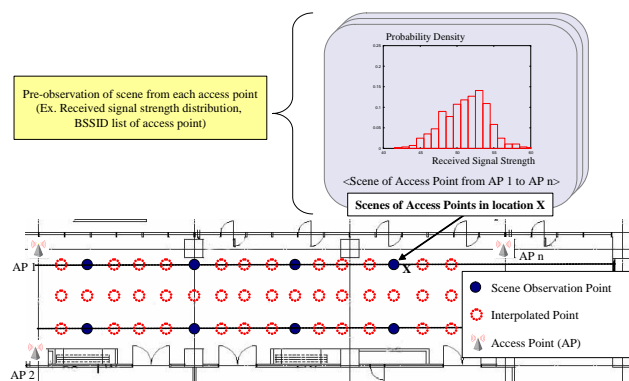


図3 Scene Analysis  
Fig. 3. Scene Analysis

2.2 関連研究 前節で分類した無線 LAN を用いた位置推定システムについて、本節ではいくつかのシステムについて紹介する。無線 LAN を用いた先駆的な位置推定システムとしては Bahl らによる RADAR<sup>(1)</sup> がある。RADAR では位置が既知である複数のアクセスポイントを利用し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違いを最小とする位置をユーザの位置として推定する。RADAR においては Scene Analysis と Triangulation に基づく位置推定をそれぞれ提案している。また、RADAR では位置推定を行う際に受信電波強度分布ではなく、受信電波強度の値を対象として、Scene の比較にユークリッド距離を用いている。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推定対象としている点及びアクセスポイントの選択性について考慮している点において本手法は異なる。北須賀らによる WiPS<sup>(2)</sup> は、受信電波強度を用いて距離を測定することによる Lateration での推定システムである。WiPS の特徴は、基地局と端末間の距離のみではなく端末間の距離も利用して位置推定に用いることにより、推定対象が多い場所ほど位置推定精度が向上する点である。萩野らによる AirLocation<sup>(3)</sup> は、端末が発する位置要求のエコーを複数のアクセスポイントが受信し、アクセスポイント間におけるエコーの受信タイミングのずれと、各アクセスポイント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 Lateration ベースのシステムである。このような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。AirLocation では位置推定のために専用の基地局が必要となる。岩崎らによる Azim<sup>(5)</sup> は Angulation に基づく位置推定システムである。方位センサーを用いてランドマークの方位を 2 つ計測しそれらの交点を求めることで位置の特定が可能である。Intel Research による PlaceLab<sup>(4) (17)</sup> システムでは、無線 LAN アクセスポイントの情報に GPS による緯度経度情報を加えたデータベースをユーザコラボレーションにより構築し、メトロポリタンレベルでの位置推定システムの構築を行っている。これらデータベース情報より Triangulation を用いて PlaceLab システムでは位置推定を行う。

### 3. 受信電波強度変化の違い

本節では各場所での異なるアクセスポイントから、端末が受信する受信電波強度の変化の違いについての調査を行う。いくつかの無線 LAN を用いた位置推定システムにおいては、アクセスポイントから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、端末がアクセスポイントから観測できる受信電波強度は、ある距離を移動した場合に、一様に変化するのではなく、アクセスポイントと端末の距離関係により変化量が異なる。

#### 3.1 実環境における調査 屋内環境における各ア

セスポイントからの受信電波強度の変化量を調査するため、図 4 の屋内環境において A 地点から B 地点の間を 2m ずつ移動し (A 地点からの距離が 2m ~ 18m までの 9 地点、図 4 の丸印の地点)、各場所において 2 分間の間、無線 LAN アクセスポイントからの受信電波強度を観測し受信電波強度の変化量を調査した。環境内で観測されたアクセスポイントのうち、A 地点から B 地点に移動するに従い受信電波強度が強くなったアクセスポイント 1 (AP1) からアクセスポイント 7 (AP7) までの観測結果を図 5 に示す。図 5 の横軸は A 地点からの距離、縦軸は各場所において端末がアクセスポイントから観測した受信電波強度 (dBm) の平均値を表す。どのアクセスポイントにおいても A 地点から B 地点の間を移動する間にある程度の受信電波強度の変化が見られる。図 5 において、受信電波強度の強さによって同一距離を移動した場合においても変化量が異なるという点に注目する。各アクセスポイントからの受信電波強度の観測結果に対し式  $f(x) = ax + b$  を用いて簡単のために直線回帰させた場合の  $a$  (傾き) の値と観測全体における各アクセスポイントの受信電波強度の平均値を表 1 に示す。表より、AP1, AP2 といった比較的強い受信電波強度を観測したアクセスポイントにおいては  $a$  の値が他のアクセスポイントと比較すると大きく、同一距離を移動した場合においても受信電波強度の変化量が多いということが分かる。

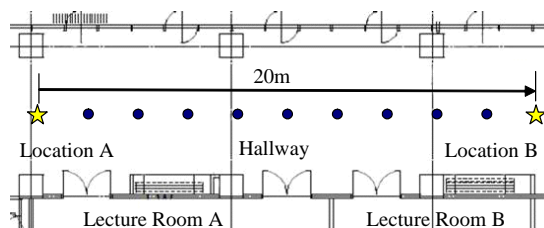


図 4 受信電波強度変化の違いに関する実験

Fig. 4. Experiment of Variation Difference of Received Signal Strength

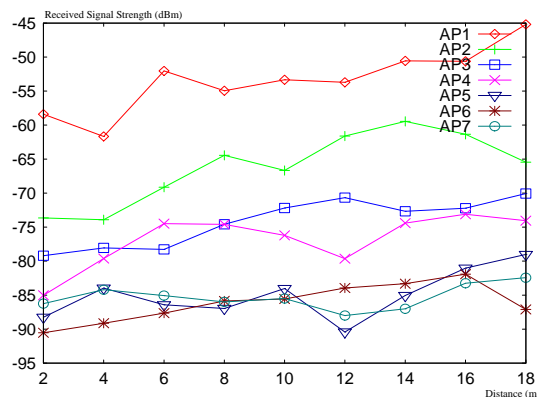


図 5 各アクセスポイントからの受信電波強度の違い

Fig. 5. Difference of Received Signal Strength from Each Access Point

AP	AP1	AP2	AP3	AP4	AP5	AP6	AP7
Slope ( $10^{-4}$ )	7.51	7.71	5.77	4.88	3.75	3.82	1.01
Average (dBm)	-53.3	-66.1	-74.2	-76.7	-85.0	-86.1	-84.2

表 1 回帰直線における傾きの違い

Table 1. Gradient Difference of Regression Line

一方, AP5, AP6, AP7 など他のアクセスポイントより弱い受信電波強度が観測されたアクセスポイントにおいては  $a$  の値が小さく同一距離を移動した場合においても受信電波強度の変化が小さいということがわかる. つまり AP1 や AP2 の受信電波強度情報を用いて端末の位置推定を行う場合は, 少しの距離を移動しただけの場合でも場所毎に受信電波強度に変化が出やすく位置推定精度が高くなると予想され, AP7 の受信電波強度情報を用いて端末の位置推定を行った場合は, 長い距離を移動しても受信電波強度に変化が現れにくく, 位置推定精度が低くなると予想することができる.

**3.2 本手法のアプローチ** 本手法では前節の調査に基づき, 無線 LAN の受信電波強度情報を用いた位置推定を行う際に有用な情報を提供するアクセスポイントを選択し, 選択したアクセスポイントの情報を利用して位置推定を行う. 3.1 節の調査結果より, 強い受信電波強度を得ることができるアクセスポイントにおいては, 少しの距離を移動しただけでも受信電波強度の変化が大きく見られることが分かる. ここで, 伝播損失距離特性という観点から 3 節の結果を考える. 環境を自由空間であると仮定した場合, 無線において自由空間における電波の伝播損失は式 (1) で表すことができる<sup>(16)</sup>. 式において  $L_{fs}$  は自由空間伝播損失 (dB),  $d$  は送受信点間距離 (m),  $f$  は周波数 (MHz),  $\pi$  は円周率,  $c$  は光速 (m/s) を表す.

$$L_{fs} = 20\log_{10}f + 20\log_{10}d + 20\log_{10}(4\pi/c) + 120 \quad (1)$$

周波数を 2442MHz (IEEE 802.11b における第 7 チャンネル) とした場合の, 式 (1) を表した図が図 6 である. 図 6 において横軸は送受信点間の距離 (m), 縦軸は自由空間伝播損失 (dB) を表す. 図 6 において, アクセスポイントと端末間の距離が 0~20m 付近においては伝播損失 (dB) の変化が大きいのにに対しそれ以上の距離においては変化量が比較的少ない. つまり端末とアクセスポイントの相対距離が近い場所においては端末が少し移動しただけでも受信電波強度の値が変化しやすく, 逆に端末とアクセスポイントの相対距離が遠い場合においては, 端末が大きく移動したとしても受信電波強度の値が変化しづらいことを表している. 本手法はこの点に着目した. 本手法で端末は位置推定を行う場所において一定時間の間, 各アクセスポイントから受信電波強度の観測を行う. 観測を行った受信電波強度のデータに対して, 第一段階として各アクセスポイントからの受信電波強度の平均値を計算する. この時に受信電波強度平均値により閾値を定め, どのアクセスポイントの情報を位置推定のために利用するかを選択する. 第一段階は

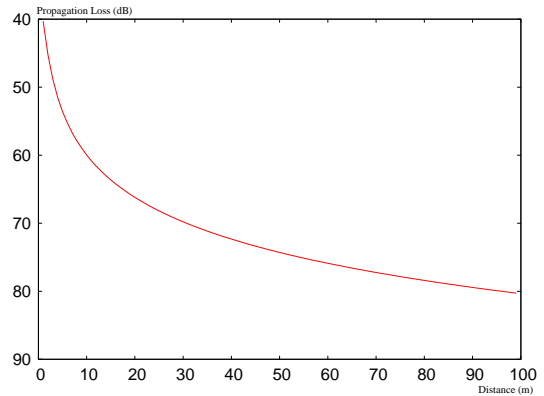


図 6 自由空間伝播損失

Fig. 6. Propagation Loss in Free Space

Proximity ベースであるといえる. 次に位置推定に利用するアクセスポイントを選択した後, 第二段階としてベイズ推定<sup>(15)</sup>を用いて Scene Analysis による位置推定を行う. このように本手法では, Proximity と Scene Analysis を 2 段階でハイブリットに利用して位置推定を行う.

#### 4. アクセスポイントの選択を考慮したベイズ推定による位置推定手法

本節では提案手法であるアクセスポイントの選択を考慮したベイズ推定による無線 LAN ハイブリット位置推定手法について述べる. 本位置推定手法においては, 前節で確認したアクセスポイントとユーザの位置関係による受信電波強度の違いを考慮し, 位置推定を行う場所に応じて, 推定のために利用するアクセスポイントの情報を変更する. 本手法における事前段階として, 位置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 (4.1 節: Survey Phase). 次に位置推定を行う段階となる (4.2 節: Estimation Phase). Estimation Phase の第一段階としてユーザが現在観測することのできる無線 LAN 情報から位置推定のために適切なアクセスポイントを選択する (4.2.1 節: Proximity). 第二段階として事前観測した受信電波強度分布のデータ, 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及びベイズ推定を用いてユーザの位置推定を行う (4.2.2 節: Scene Analysis).

**4.1 Survey Phase** はじめに, 計測データと推定対象とする候補状態について定義する. 端末位置を推定する際の受信電波強度のデータを観測と呼び, 観測の集合を  $O$  とする. 各観測  $o$  は, その時に端末が各アクセスポイントから観測する受信電波強度の値  $\alpha$  とアクセスポイントの BSSID (Basic Service Set Identifier)  $\beta$  の組で構成する ( $n$  はアクセスポイントの数,  $m$  は観測回数である).

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

$$o = \{(\alpha_1, \beta_1), \dots, (\alpha_i, \beta_i)\} \quad i = 1, \dots, n \dots \dots (3)$$

次に、端末の位置推定における推定候補状態の集合を  $C$  とする。端末は  $C$  のどれかに存在すると仮定して推定を行う。各状態  $c$  は端末の座標  $x, y$  の組で構成される ( $l$  は推定対象の状態の数である)。

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

$$c_j = (x_j, y_j) \quad j = 1, 2, \dots, l \dots \dots \dots (5)$$

(2)(3) より端末はそれぞれのアクセスポイント  $\beta$  に対して状態  $c_j$  における受信電波強度の確率分布  $P(\alpha|\beta, c_j)$  を計算する。 $P(\alpha|\beta, c_j)$  は、状態  $c_j$  において端末がアクセスポイント  $\beta$  から得られる受信電波強度  $\alpha$  の確率分布を表す。

$$P(\alpha|\beta, c_j) = \frac{\text{状態 } c_j \text{ で } \beta \text{ から } \alpha \text{ が観測された回数}}{\text{状態 } c_j \text{ で } \beta \text{ が観測された回数}} \dots (6)$$

4.2 Estimation Phase

4.2.1 アクセスポイントの選択 Estimation Phase

において端末は一定時間の間、各アクセスポイントからの受信電波強度を観測する。この時ユーザが観測することができたアクセスポイントの集合を  $AP$  とする。

$$AP = \{ap : \text{端末が観測したアクセスポイント}\} (7)$$

端末は各アクセスポイントから観測した受信電波強度の平均を計算し、これらの値を  $ave_{ap_1}, ave_{ap_2}, \dots, ave_{ap_v}$  とする ( $v$  は集合  $AP$  の要素数)。次に、アクセスポイントの集合  $R$  を以下のように定義する ( $TH_{max}$  および  $TH_{min}$  は閾値の上限、下限とする)。

$$R = \{r : r \in AP, TH_{max} > ave_{ap} > TH_{min}\} (8)$$

4.2.2 節においては (8) に示す集合  $R$  に属するアクセスポイントの受信電波強度情報を利用して位置推定を行う。つまり端末が観測できる受信電波強度の平均値が一定の閾値内のアクセスポイントの情報のみ位置推定のための情報として利用する。

4.2.2 ベイズ推定による位置推定 状態  $c_j$  において

観測  $o$  の確率的生成モデルは Survey Phase における (6) を用いて次のように計算する。

$$P(o|c_j) = \prod_{i=1}^n P(\alpha_i|\beta_i, c_j) \dots \dots \dots (9)$$

次に Estimation Phase での観測における事後確率はベイズの定理より次のようになる。

$$P(c_j | o_1, \dots, o_m) = \frac{P(o_1, \dots, o_m | c_j) \cdot P(c_j)}{\sum_{t=1}^l P(o_1, \dots, o_m | c_t) \cdot P(c_t)} \dots \dots \dots (10)$$

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。

$$P(o_1, \dots, o_m | c_j) = \frac{P(o_1, \dots, o_m, c_j)}{P(c_j)}$$

$$= \frac{\prod_{k=1}^m P(o_k, c_j)}{P(c_j)} = \frac{\prod_{k=1}^m \{P(o_k | c_j) \cdot P(c_j)\}}{P(c_j)} \dots \dots \dots (11)$$

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  $c_j$  の事後確率は式 (10), (11) より、次のようになる。

$$P(c_j | o_1, \dots, o_m) = \frac{P(o_1, \dots, o_m | c_j) \cdot P(c_j)}{\sum_{t=1}^l P(o_1, \dots, o_m | c_t) \cdot P(c_t)} = \frac{\prod_{k=1}^m \{P(o_k|c_j) \cdot P(c_j)\} \cdot P(c_j)}{\sum_{t=1}^l \left\{ \frac{\prod_{k=1}^m \{P(o_k|c_t) \cdot P(c_t)\}}{P(c_t)} \cdot P(c_t) \right\}} = \frac{\prod_{k=1}^m P(o_k | c_j)}{\sum_{t=1}^l \left\{ \prod_{k=1}^m P(o_k | c_t) \right\}} \dots \dots \dots (12)$$

式 (12) における  $P(c_j | o_1, \dots, o_m)$  とは、Estimation Phase において端末が  $o_1, \dots, o_m$  を観測した際の候補位置  $c_j$  における端末の存在確率である。式 (9) および (12) を用いて各アクセスポイントからの受信電波強度の観測を得た際の各候補位置における端末の存在確率を計算し、最も確率が高い位置を端末の位置推定結果とする。

5. 評価実験

4 節において示した位置推定手法に従い、Java2 Platform Standard Edition 1.4.2 上において位置推定システムを実装した。本位置推定手法の有効性を検証するために実装した位置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。名古屋大学内には約 300 個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。

5.1 ハードウェア 本実験においては以下の端末を利用して位置推定実験を行った。

- ノート PC : IBM Think Pad G41
- 無線 LAN アダプタ : BUFFALO WLI-PCM-L11

また、実験に用いたアクセスポイントは以下のアクセスポイントである。

- Colubris Networks CN-300
- Colubris Networks CN-320

5.2 実験環境全体図 図 7 に実験環境の概観、図 8 に実験環境におけるアクセスポイントの配置と事前観測

をおこなった地点を示す。図 8 に示した場所以外にも実験環境の建物内にはアクセスポイントが多数配置されており、それらのアクセスポイントからの電波を観測することが可能である。図 8 において丸印は無線 LAN の受信電波強度を事前観測した地点を示す。事前観測は図 8 中の各丸印の地点において 2 分間、総計 128803 個の無線 LAN パケット観測 (アクセスポイントの BSSID と受信電波強度の組) を行った。

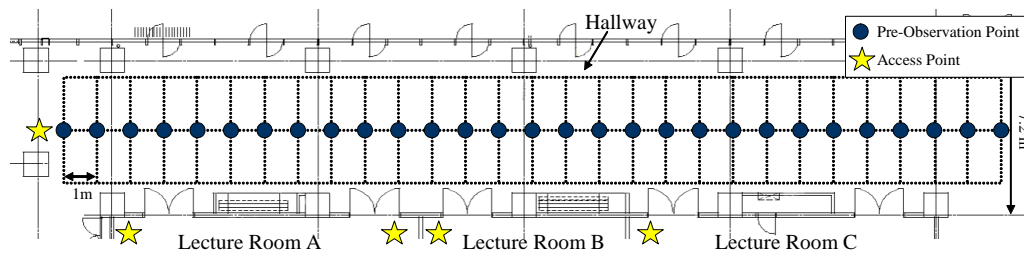


図 8 実験環境全体図

Fig. 8. Overall View of Experimental Environment



図 7 実験環境概観

Fig. 7. Indoor Experiment Environment Overview

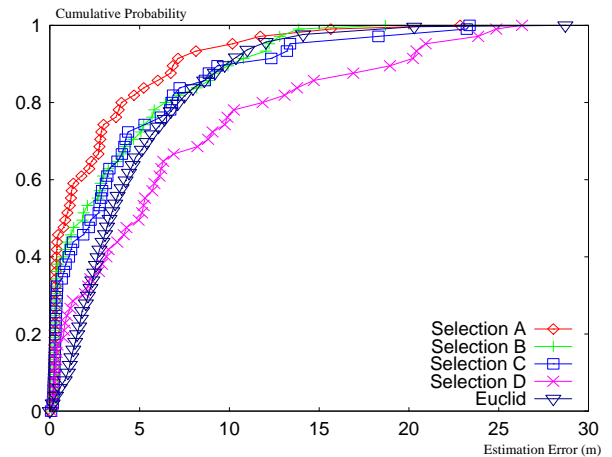


図 9 実験結果 (実験 1)

Fig. 9. Result (Experiment 1)

### 5.3 アクセスポイントの選択に関する実験

#### 5.3.1 実験設定 第 1 の実験として、本手法によ

ってアクセスポイントを選択し位置推定を行った場合の位置推定精度の違いに関する実験を行った。本実験においては位置推定におけるアクセスポイント選択段階での受信電波強度平均値による閾値を次の 4 種類に分け位置推定精度の比較を行った。

- Selection A : -50 dBm から -59dBm
- Selection B : -60 dBm から -69dBm
- Selection C : -70 dBm から -79dBm
- Selection D : -80 dBm から -89dBm

上記 4 種類の各場合において 1740 リクエストずつ、総計 6960 リクエストの位置推定を実施した。

#### 5.3.2 実験結果 図 9 に実験結果を示す。図 9 に

おいて横軸は、正しい場所から本システムによって推定された推定場所までの位置推定誤差、縦軸はリクエスト全体に対する割合を 20% 間隔で示した。実験結果については全体のリクエストに対する割合が 2% 間隔で表示されている。例えば、Selection A においては全位置推定リクエストのおよそ 6 割が位置推定誤差 2m 以内であることを示す。加えて、Bhal らによる、位置推定時にユークリッド距離を用いた手法<sup>(1)</sup>を実装し、本環境において位置推定した結果を併せて示す。図 9 より、最も位置推定精度が低かったものは Selection D (受信電波強度平均 -80 dBm から -89 dBm) であり、全リクエストの 30% のみが位置推定精度 2m 以内である。逆に最も位置推定精度が高かったものは Selection

A (受信電波強度平均値 -50 dBm から -59 dBm) であり、リクエスト全体の 64% が位置推定精度 2m 以内であり、Selection D の場合と比べると約 2 倍の推定精度の違いが見られる。Selection B (受信電波強度平均 -60 dBm から -69 dBm) および Selection C (受信電波強度平均 -70 dBm から -79 dBm) に関しては、それぞれ全リクエストの 52%、46% が位置推定精度 2m 以内であった。また、ユークリッド距離を用いた手法においては、全リクエストの 33% が位置推定精度 2m 以内であった。これらより、位置推定を行う際に、受信電波強度が強いアクセスポイント、つまり端末から近い位置にあるアクセスポイントを選択して位置推定を行うことにより、位置推定精度の向上が可能となる。

### 5.4 リクエスト観測時間に関する実験

#### 5.4.1 実験設定 第 2 の実験として、端末が受信電

波強度を観測する 1 リクエストの時間と位置推定精度の関係についての実験を行った。端末が無線 LAN の受信電波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位置推定精度が得られるかについて検証する実験である。実験 2 では Estimation Phase における 1 リクエストあたりの観測時間を 1 秒、2 秒、4 秒、8 秒と分け、それぞれの観測時間による位置推定精度の違いについて検証した。本実験においては総計 6525 リクエストの位置推定を実施した。

#### 5.4.2 実験結果 図 10 に実験結果を示す。図 10 に

において横軸は、正しい場所から本システムによって推定された推定場所までの位置推定誤差、縦軸はリクエスト全体に対する割合を示す。例えば、リクエスト観測時間を 1 秒とした場合においては全位置推定リクエストのおよそ 5 割が位置推定誤差 2m 以内であることを示す。図 10 より、位置推定のためのリクエスト観測時間を増加させていくに従い位置推定精度が向上しているのが分かる。リクエスト観測時間が 1 秒の場合は全位置推定リクエストのうち 51% が位置推定誤差 2m 以内であるのに対し、リクエスト観測時間が 2 秒の場合は 61% が位置推定誤差 2m 以内、4 秒の場合では 67%、8 秒の場合では 75% が位置推定誤差 2m 以内であった。これらは多重波伝播路（マルチパス）<sup>†</sup> によるフェージング<sup>††</sup>の影響が関係していると考えられる。マルチパス等の影響により同一場所においても端末が観測できる受信電波強度は一定ではなく変化することが知られている。図 11 にアクセスポイントから 20m 離れた地点において 2 分間の間、受信電波強度を観測した場合の受信電波強度分布を示す。図 11 において横軸は受信電波強度、縦軸は観測全体における確率密度を表す。図 11 に示すように同一場所においても -75dBm から -68dBm の間で受信電波強度が観測されているのが分かる。例えば図 11 のデータを用いて同一場所で位置推定を行う際、リクエストの観測時間が短く -75 dBm の観測しか行われなかった場合、この場所での端末の存在確率は低くなり（事前観測における確率密度が低い）ため、その結果、正しい場所と異なる場所に位置推定される。

5.5 時間による受信電波強度の違いに関する検討  
前節において示したように無線 LAN においては、人や建

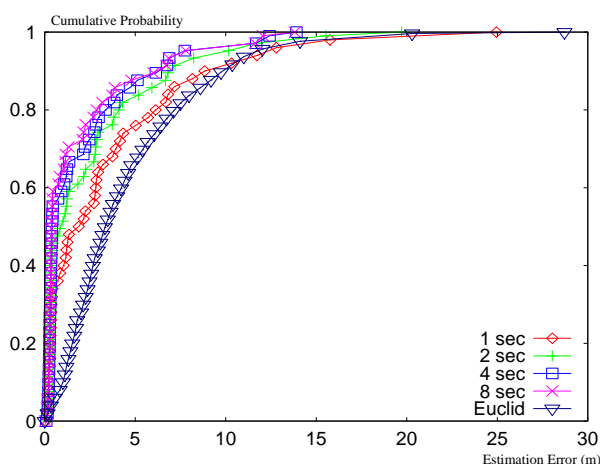


図 10 実験結果（実験 2）  
Fig. 10. Result (Experiment 2)

<sup>†</sup> 多重波伝播（マルチパス）とは建物や障害物などによる反射波や散乱波が、送信アンテナから受信アンテナに直接到来する直接波と共に受信されること

<sup>††</sup> フェージングとはマルチパスにより受信波が直接波と反射・散乱波などの多重に伝播する波が合成されたものになり、受信波のレベルに変動が生じること

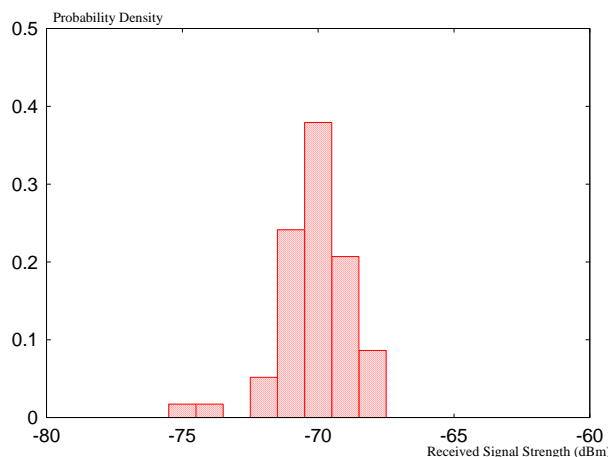


図 11 定点における受信電波強度分布  
Fig. 11. Received Signal Strength Distribution in a Fixed Point

物といった障害物での反射、吸収、回折、屈折等によるマルチパスの影響が大きい。そのため屋内環境では同一場所においても受信電波強度が変化しやすい<sup>(12)</sup>。これらの変化は無線 LAN を用いた位置推定システムにおける位置推定精度に影響を与えるため、どの程度の変化があるか把握しておく必要がある。本節では時間による受信電波強度の違いに関する検討を行う。屋内環境においてある定点に端末を設置し、5 秒に 1 回、3 つの無線 LAN アクセスポイントからの受信電波強度の観測を 48 時間・計 103680 観測を行い時間による無線 LAN 受信電波強度の違いに関する調査を行った。

図 12 および図 13 に観測結果を示す。図 12 において横軸は時間（24 時間表示）、縦軸は受信電波強度の平均値（1 分毎）を示す。図 13 において横軸は時間（24 時間表示）、縦軸は受信電波強度の標準偏差（1 時間毎）を示す。図 12、13 よりアクセスポイント毎に多少の違いはあるが、10 時～22 時までの、主に人々が活動している時間帯において特に受信電波強度の変化が激しいことが分かる。文献<sup>(14)</sup>においては人体の影響による無線 LAN の減衰に関して、状況により異なるが十数 dB 前後の変化があることを報告している。例えば図 12、図 13 のアクセスポイント B の結果を見た場合、10 時～18 時にかけては端末がアクセスポイントから観測できる受信電波強度が大きく変化し受信電波強度分布も大きく散らばっている。しかし、その他の時間帯においては受信電波強度は安定しており散らばりも少ない。アクセスポイント B の情報を利用して位置推定を行う際に事前観測を深夜に行いそのデータを用いて日中に位置推定を行う場合は位置推定精度が低下してしまう可能性があることを覚えておかなければいけない。これらの結果より、事前観測や位置推定を行う際に、時間に関する違いも考慮する必要がある。

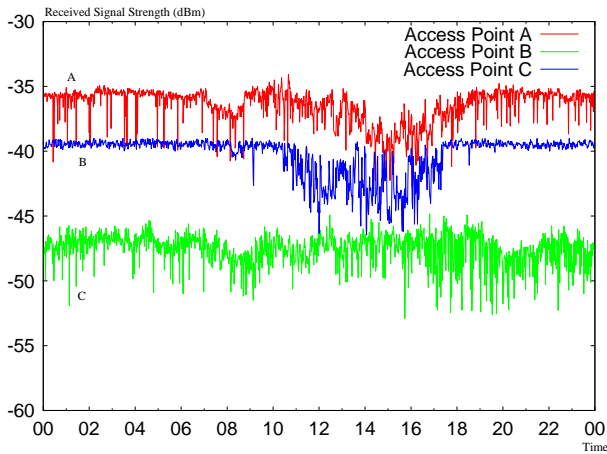


図 12 時間による受信電波強度の違い (平均)  
Fig.12. Time Difference of Received Signal Strength (Average)

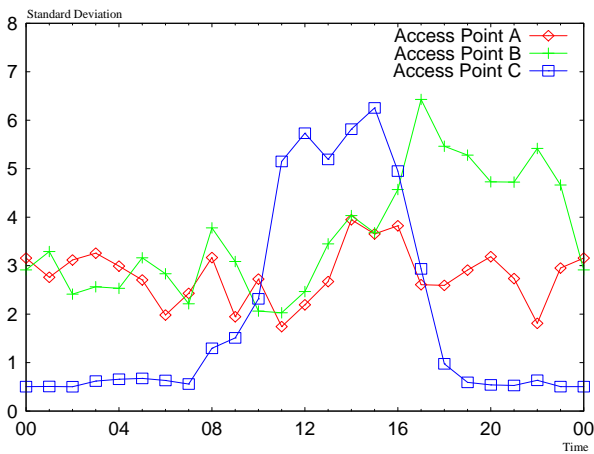


図 13 時間による受信電波強度の違い (標準偏差)  
Fig.13. Time Difference of Received Signal Strength (Standard Deviation)

## 6. 無線 LAN を用いた位置依存アプリケーション

本論文の位置推定手法を用いることにより、オフィスネットワークやホームネットワーク等の無線 LAN が利用可能な環境において、無線 LAN 機能付き端末に対して端末の位置を推定することが出来る。本節では本位置推定手法によって取得した位置情報を利用したアプリケーション実装例として「インスタントメッセージ等のプレゼンスツールに対し、ユーザの位置情報を自動的に付与するアプリケーション」を図 14 に示す。図 14 のアプリケーションにおいて端末は本手法を用いて自身の位置を推定する。推定した位置情報を利用しアプリケーションはプレゼンスツールに対し位置のプレゼンス情報を付与する。図 14 では「氏名@位置情報」のように氏名の後ろに位置に関するプレゼンス情報を自動付与している。アプリケーションは一定時間おきに無線 LAN による位置推定を行いプレゼンスツールの

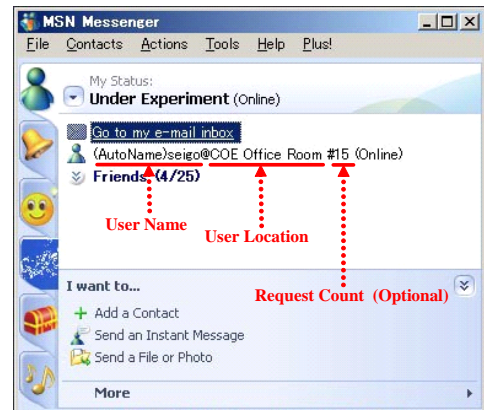


図 14 プレゼンス情報自動付与アプリケーション  
Fig.14. Auto Presence Application

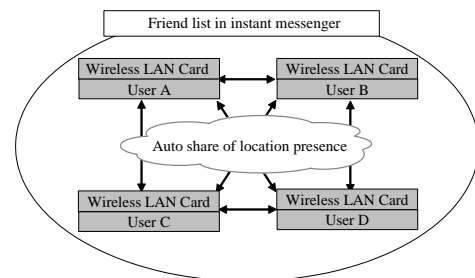


図 15 ユーザ間での自動位置プレゼンス表示  
Fig.15. Auto Presence Application.

「@位置情報」の箇所を自動更新する。本アプリケーションでは無線 LAN 機能付き端末さえあれば位置の推定を行うことが出来るためユーザは非常に容易に位置情報を考慮したアプリケーションを利用することが出来る。また、インスタントメッセージツールを介することによりユーザ間での位置プレゼンス情報を互いに容易に提示することが可能となる (図 15)。

## 7. まとめ

本論文では、受信電波強度変化の違いに関する調査を行い、それらの考察に基づく、アクセスポイントの選択を考慮したベイズ推定による無線 LAN ハイブリット位置推定手法について提案した。本手法においては無線 LAN 機能付き端末とホームネットワークやオフィスネットワーク等におけるアクセスポイントさえあれば、位置推定を行うことが出来るためユーザは容易に位置を推定することが可能となる。しかしながら、位置推定に利用するアクセスポイントの閾値を高く設定した場合、位置推定に使用できるアクセスポイント数が減少し、位置推定精度が劣化するというトレードオフの関係が発生する。Jie らの報告<sup>(13)</sup>では、位置推定に使用するアクセスポイントが 6 個以下の場合、アクセスポイントが減少するに従い位置推定精度が下がったと報告している。例えば、閾値をアクセスポイントの数に応じて変化させるなど、このようなトレードオフについ



ても考慮する必要がある。本論文の要点を以下にまとめる。

- 同一距離を移動した場合において無線 LAN の受信電波強度の変化量は一様ではなく、アクセスポイントと端末の距離関係により異なる。
- 上記結果を考慮し、位置推定のために適切な無線 LAN アクセスポイントを選択することにより位置推定システムにおける位置推定精度の改善を行うことが可能である。
- 位置推定を行う際においては、受信電波強度の観測時間を増やすことにより位置推定精度の改善を行うことが可能である。
- 端末が観測する受信電波強度分布は時刻によっても変化するため、これら時間による変化について把握し無線 LAN 位置推定システムを構築していく必要がある。

謝 辞

本研究の一部は、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。また、有益なコメントを頂いた査読者に感謝する。

(平成 18 年 1 月 23 日受付,平成 18 年 6 月 12 日再受付)

## 文 献

- (1) Paramvir Bahl, and Venkata N. Padmanabhan: *RADAR: An In-Building RF-based User Location and Tracking System*, ssdIEEE Infocom 2000, pp. 775-784, (2000).
- (2) Teruaki Kitasuka, Tsuneo Nakanishi, and Akira Fukuda: *Wireless LAN based Indoor Positioning System WiPS and Its Simulation*, 2003 IEEE Pacific Rim Conference on Com-munications, Computers and Signal Processing (PACRIM'03), pp. 272-275, (2003).
- (3) A.Ogino, K.Tsunehara, K.Watanabe, K.Fujishima, R.Yamasaki, H.Suzuki, T.Kato: *Integrated Wireless LAN Access System - Study on Location Method -*, Multimedia, Distributed, Cooperative and Mobile Symposium, DICOMO2003, pp.569-572, (2003) (in Japanese)  
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) Anthony LaMarca, Yatin Chawathe, Sunny Consolvo, Jeffrey Hightower, Ian Smith, James Scott, Tim Sohn, James Howard, Jeff Hughes, Fred Potter, Jason Tabert, Pauline Powledge, Gaetano Borriello and Bill Schilit: *Place Lab: Device Positioning Using Radio Beacons in the Wild*. Third International Conference PERVASIVE 2005, Lecture Notes in Computer Science (LNCS3468), pp. 116-133 (2005).
- (5) Yohei Iwasaki, Nobuo Kawaguchi, and Yasuyoshi Inagaki: *Design, Implementation and Evaluations of a Direction Based Service System for both Indoor and Outdoor*, Second International Symposium on Ubiquitous Computing Systems, (UCS 2004), pp. 7-14, (2004).
- (6) John Krumm and Ken Hinckley : *The NearMe Wireless Proximity Server*. In Proceedings of the Sixth International Conference on Ubiquitous Computing (UbiComp2004), pp.283-300, (2004).
- (7) Cheverst K., Davies N., Mitchell K. and Friday A. : *Experiences of Developing and Deploying a Context-Aware Tourist Guide: The GUIDE Project*. In Proceedings of The Sixth of an Annual International Conferences on Mobile Computing and Networking (MOBICOM 2000), pp.20-31, (2000).
- (8) Seigo Ito, and Nobuo Kawaguchi: *Bayesian based Location Estimation System using Wireless LAN*, Third IEEE Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops, pp. 273-278 (2005).
- (9) Petri Kontkanen, Petri Myllymaki, Teemu Roos, Henry Tirri, Kimmo Valtonen, and Hannes Wettig: *Topics in Probabilistic Location Estimation in Wireless Networks*, Proc. 15th IEEE Int. Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (2004).
- (10) Moustafa A. Youssef, Ashok Agrawala, A. Udaya Shankar : *WLAN Location Determination via Clustering and Probability Distributions*. In Proceedings of The First IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications (PerCom2003), pp.143-152, 2003.
- (11) Takamichi Ishihara, Nobuhiko Nishio: *A Positioning System Exclusively Utilizing GPS and Wireless Network Detector* Vol.2004, No.112, pp.91-96, (2004) (in Japanese)  
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*, 情報処理学会ユビキタスコンピューティングシステム研究会, Vol.2004, No.112, pp.91-96, (2004)
- (12) H. Hashemi: *The Indoor Radio Propagation Channel*, Proc. IEEE, vol. 81, pp. 943-968, (1993).
- (13) Jie Yin, Qiang Yang, Lionel Ni : *Adaptive Temporal Radio Maps for Indoor Location Estimation*. In Proceedings of The Third IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications (PerCom2005), pp.85-94, 2005.
- (14) J. Wang and O. Fujiwara: *EM interaction between a 5 GHz band antenna mounted PC and a realistic human body model* IEICE Trans. Commun., vol.E88-B, no.6, pp.2604-2608, (2005)
- (15) Watanabe Hiroshi: *INTRODUCTION TO BAYESIAN STATISTICS*, Fukumura Shuppan, (1999) (in Japanese) 渡部洋: *ベイズ統計学入門*, 福村出版, (1999)
- (16) Masahiro MORIKURA, Syuji KUBOTA: *802.11 HIGH-SPEED WIRELESS LAN TEXTBOOK* (in Japanese)  
守倉正博, 久保田周治: *改訂版 802.11 高速無線 LAN 教科書*
- (17) PlaceLab - <http://www.placelab.org/>

伊藤 誠 悟 (非会員) 昭和 52 年生。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,日本電信電話株式会社 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, 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,2006 より同大・工学研究科・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, ソフトウェア学会, 人工知能学会, 日本音響学会各会員。

