

indoor.Locky : UGC を利用した 無線 LAN 屋内位置情報基盤

梶 克彦^{†1} 河 口 信 夫^{†1}

我々は、様々な建物において屋内位置情報を一般に利用できる環境の実現を目指し、GMM に基づく無線 LAN 位置推定技術を用いた屋内位置情報基盤 indoor.Locky の研究開発を行っている。本基盤の実用化に向けた最も大きな問題は、一般ユーザが行う事前の無線 LAN 観測の作業コストが高いという点である。そこで、この作業を複数ユーザで分担できるよう UGC (User Generated Content) のアプローチを採用する。商業施設において実証実験を行い、複数ユーザの観測情報が Web サービス側で正常に統合されることを確認した。また最も作業コストと位置推定精度のバランスがとれた観測地点の間隔が 5 m 程度であることを明らかにした。これにより、一般ユーザが行う観測作業の適切な間隔を提示可能になるため、多くの箇所の観測を行ってしまい作業コストが必要以上増加してしまうのを防ぐことができる。

indoor.Locky: Wireless LAN Indoor Location Platform Using UGC

KATSUHIKO KAJI^{†1} and NOBUO KAWAGUCHI^{†1}

In this paper, we describe an indoor location information platform based on wireless LAN named indoor.Locky. The platform adopts GMM based WLAN location estimation method, and the platform intends to be practical use. Though, there is a cost problem to put the platform to practical use. The estimation method needs observation of WLAN information of the floor at intervals of short distance previously. The platform supposes that general users do the observation work. Therefore, the platform adopts UGC (User Generated Content) approach to share the work in multiple users. If the user does not know the proper interval of observation, the user may observe more than necessary. We conducted experiments in the shopping center to verify the possibility of the practical use of the platform. In the experiments, we figured out that the platform can collect wireless LAN observation information from multiple users. Additionally, we found that the most effective interval between observation points is about 5 m.

1. はじめに

近年、モバイル端末の普及やユビキタス環境の整備にともない、ユーザや端末の現在位置に基づいたサービスやアプリケーションの需要が高まってきている。屋外にいるユーザや端末の現在位置は GPS により得ることができるが、屋内では GPS の電波が届かない場合が多い。そこで、屋内でも位置推定を可能にするために、無線 LAN、RF タグ、赤外線、IMES などを用いた研究が進められている^{1),3),7),8),10),13),19),22),23)}。特に、無線 LAN に基づく位置推定は、すでに家庭や公共施設に広く設置されている無線 LAN 基地局を利用可能であるという利点から注目を集めている。

我々はこれまでに GMM (Gaussian Mixture Model) に基づく無線 LAN 屋内位置推定手法を提案してきた²³⁾。本手法は、軽量のデータベースを用い、計算量を制御可能とすることで、携帯端末でのリアルタイム位置推定を可能にしている。位置推定に求められる精度はアプリケーションにより異なるが、一般に屋内では屋外に比べて高い精度が求められる。本手法では、6~10メートル程度の精度での屋内位置推定精度を達成している。この精度であれば、屋内位置情報を用いたナビゲーションやチェックインサービス、店舗情報案内など様々な用途に適用可能であろう。

すでにいくつかの無線 LAN に基づく位置情報プラットフォームが一般に利用可能であり^{19),25)}、GPS を備えていない端末からでも位置情報サービスを利用できる。しかしこれらのプラットフォームは主に屋外での使用を想定した設計となっている。そのため、これらを屋内で使用したとしても誤差が大きくなったり、建物のフロアを推定することができなかつたりするなどの問題がある。屋内に特化した無線 LAN 位置情報基盤を構築できれば、既存の位置情報プラットフォームとの連携により、屋外・屋内をシームレスに接続する位置情報サービスが実現可能になろう。しかし現在、一般に利用可能な屋内位置情報基盤は存在しない。

実用的な無線 LAN 屋内位置情報基盤を実現するためには、事前に行う無線 LAN 電波観測の作業に必要なコスト (以下作業コストと呼ぶ) が高いという問題を解決する必要がある。無線 LAN などの電波に基づく位置推定手法の多くは、あらかじめ各地点で無線 LAN の電波を観測して位置と電波情報の関係を収集し、その情報をもとに位置推定を行うとい

^{†1} 名古屋大学大学院工学研究科
Graduate School of Engineering, Nagoya University

う, Scene Analysis の手法に基づいている^{5),8),18),19),23)}。一般に Scene Analysis の手法は, 高精度な位置推定を実現できる一方, 事前に位置推定対象となるエリアの電波環境を観測して回らなければならない。屋外であれば, GPS で得られる絶対座標と電波観測情報を関連付ける War Driving が可能であり, 観測端末を車や自転車に乗せて走るだけでよい。しかし, 屋内では多くの場合 GPS を利用できない。よって, 各観測地点の位置をシステムに通知し, そのときの電波観測情報と合わせて記録するという作業を細かい間隔で繰り返すことになる。この作業は, たとえば 1 人でビルの 1 フロアを観測するのに 1 時間 30 分を要するほどであり²³⁾, 実用の際に大きな障害となる。

近年では, 口コミサイトや動画共有サービスなどにおいて, 情報やコンテンツを一般ユーザから収集し共有する UGC (User Generated Content) のアプローチが注目されている*1。いくつかの位置情報基盤でも UGC のアプローチを採用している^{12),19),24),25)}。多くのユーザが位置に関する情報の収集やコンテンツ作成に参加することで, 1 人ひとりの作業コストを小さく抑えつつ大規模なメディアを形成することが可能となる。UGC のアプローチを用いた屋内位置情報基盤を構築すれば, 屋内の無線 LAN 電波観測を複数のユーザで分担できるため, 幅広い建物の無線 LAN 電波情報が効率的に収集可能になると考えられる。

また, フロア内の無線 LAN 観測を複数人で分担できたとしても, 適切な観測間隔が明らかになっていなければ, ユーザはどの程度の間隔で観測を行えばよいか分からず, 必要以上に多くの箇所の観測を行ってしまう可能性がある。無線 LAN は移動するオブジェクトの反射の影響を受けやすい。多くの人が常時移動しているような実環境で細かすぎる間隔で観測したとしても, 必ずしもその作業コストに見合うだけの位置推定精度の向上は望めない。位置推定精度と観測地点密度の関係を明らかにすれば, 最も作業コストと位置推定精度のバランスがとれた観測地点の間隔をユーザに提示できるようになる。

本稿では, 実社会で運用可能な屋内位置情報基盤の実現を目指して構築している indoor.Locky について述べる。indoor.Locky は GMM に基づく無線 LAN 位置推定手法²³⁾を採用している。任意の建物内の位置情報を利用可能にするため, 一般ユーザの協力に基づく UGC ベースのアプローチを採用し, 屋内無線 LAN 観測を複数ユーザで分担できるように設計されている。indoor.Locky の実社会における運用可能性を示すために評価実験を行った。本実験では, 1. 複数人が分担して無線 LAN 観測を行い, それを統合可能であることを確認する, 2. 観測地点密度と位置推定精度の関係を検証し, 最も作業コストと位置

推定精度のバランスがとれた観測地点の間隔を明らかにすることを目的としている。

本稿の構成は以下のとおりである。2 章において, 我々が採用している GMM に基づく無線 LAN 位置推定手法について述べ, 3 章において屋内位置情報基盤に求められる要件について考察する。次に 4 章では位置情報基盤 indoor.Locky について述べる。5 章では indoor.Locky の実証実験について述べ, 最後に 6 章において今後の課題をあげる。

2. GMM に基づく無線 LAN 屋内位置推定

モバイル端末でリアルタイムに高精度の位置推定を行うためには, 軽量のデータベースを用い, 計算量をリアルタイム処理が可能な程度に抑える必要がある。しかし従来手法で高精度な位置推定を実現するためには, 大きなデータ量と計算量を必要とする¹⁸⁾。屋内における無線 LAN の電波は, 障害物や壁の存在により一様には減衰しないことから, あらかじめ無線 LAN 電波環境を測定しておく Scene Analysis に基づく位置推定が適しているが, 本手法では収集されるデータ量が観測点数に比例して増加してしまう。また, 従来の位置推定手法では, 利用する無線 LAN 基地局の数や推定範囲が大きくなるほど多くの計算量を必要とするため, モバイル端末の負担が大きくなってしまふ。本稿で採用する屋内無線 LAN 位置推定手法²³⁾では, これらの問題を以下のアプローチにより解決している。

本手法では各基地局の無線 LAN 観測情報を複数の正規分布の合成である Gaussian Mixture Model (GMM) に変換することによって大幅に軽量化する。モデル化の手順は以下のとおりである。ある基地局について, その基地局が観測された各地点 (図 1 左) をポロノイ領域に分割し, 各領域にランダムに点を分布させる。この際, 電波強度の強い地点の領域ほど点の密度の高くなる (図 1 中央)。次に点分布から GMM を推定する (図 1 右)。このように基地局ごとに観測情報を GMM に変換する。GMM 推定の際, GMM の混合数は手入力を与え, 確率モデルのパラメータを最尤法に基づいて推定する EM アルゴリズムを用いている。観測情報データは地点数に応じてデータ量が増加するのに対し, GMM のデータ量は観測地点数には依存せず, 主に基地局数に依存する。GMM へのモデル化によって, データ量を 5%程度に軽量化できることが確認されている。

モバイル端末でのリアルタイムな位置推定を実現するためには計算量を抑える必要があるが, 本手法では, Particle Filter⁶⁾を用いることでこの制約を満たす。Particle Filter は, 任意の確率密度関数を扱うことができる時系列フィルタリング手法の一種であり, 多数の状態を数百~数千の Particle に見立て, 全 Particle の尤度に基づいて重みつき平均を次状態として予測しながら追跡を行う。図 2 は正解座標 (青い円) と Particle Filter (赤い点) を

*1 Crowd sourcing ともいう。

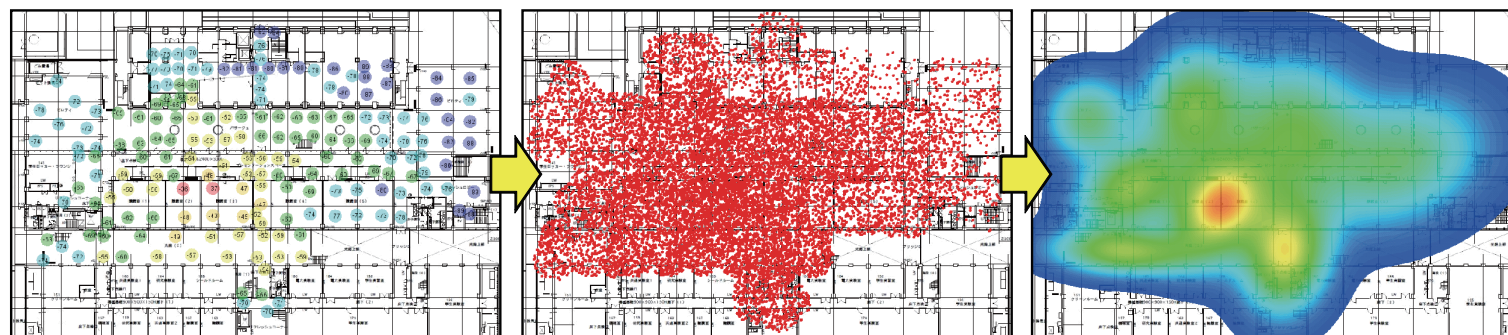


図 1 モデル化の手順．左：ある基地局が観測された地点．中央：二次元点分布への変換，右：GMM への変換（混合数 8）
Fig. 1 Procedure of modeling. (Left) RSSI, (Center) Convergence of points, (Right) GMM (mixture number: 8).

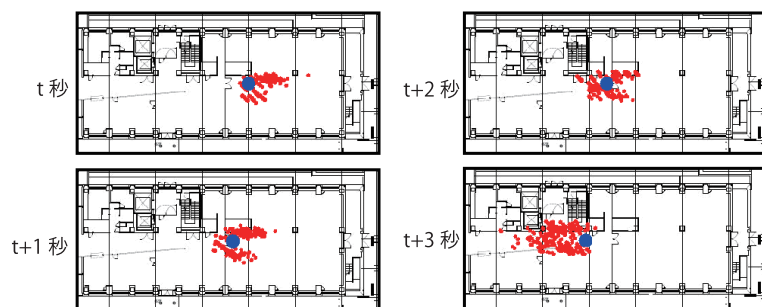


図 2 Particle Filter による位置推定結果の提示
Fig. 2 Visualization of the location estimation using particle filter.

例示したものである．時刻が進むにつれて，正解座標に Particle が追従していくのが分かる．Particle Filter では，Particle の数が少なすぎると十分な推定精度が得られず，数が多すぎると計算量が大きくなる．そのため推定精度を高く保ちながら計算量をなるべく少なく抑えることが必要である．評価実験より，屋内の位置推定には Particle の数は 200～300 程度が最も適切であることが示されている．またこのときの位置推定精度は 6～10 m 程度であった．

3. 屋内位置情報基盤の要件に関する考察

モバイル端末の普及や位置情報プラットフォームを一般に利用可能になったことで，コミュニティ形成支援やコミュニケーション支援など，位置情報に基づいた多様なサービスが提供されてきている^{2),4),9),11),17)}．たとえば位置情報をもとにしたコミュニケーションサービスである Foursquare は，2011 年 6 月の時点で 1,000 万人以上のユーザが参加している．また 1 週間に 20 万人以上の新規ユーザを獲得していることから，位置情報サービスは今後さらに隆盛すると考えられる．現在これらのサービスでは屋内の位置情報を利用していないが，屋内の位置情報プラットフォームを構築できれば，これらのサービスの利便性を大幅に改善できるだろう．

従来の位置情報に関するプロジェクトとして，Place Lab⁷⁾，Loki¹⁴⁾，PlaceEngine²⁵⁾，Locky.jp¹⁹⁾，OpenStreetMap¹²⁾ などがある．Place Lab は無線 LAN，GSM（携帯電話用無線），Bluetooth などの電波情報を共有しており，Loki，PlaceEngine は，無線 LAN 情報に基づいた屋外位置推定プロジェクトである^{*1}．OpenStreetMap は，道路地図などの地理情報データを誰でも利用できるよう，フリーの地理情報データを作成することを目的としたプロジェクトである．ユーザが GPS のトレースを投稿し，そのトレースを地図上に転写する作業を行うことで，少しずつ地図が作成されていく．

*1 PlaceEngine は 2010 年 6 月に無線 LAN 情報を用いた屋内位置推定サービスも開始している．

これらのプロジェクトでは、広範囲の情報を効率的に収集するために、UGC のアプローチを採用しており、ユーザから少しずつ提供される情報によって大規模 DB を構築している。たとえば無線 LAN に基づく位置情報ポータルサイトである Locky.jp では、プロジェクト立ち上げから 5 年の運用期間中に、延べ 5,600 万の観測地点から 1.4 億件の無線 LAN 電波情報、97 万個以上の基地局情報を収集した (2011/3/17 時点)。UGC ベースのアプローチが成功している理由は、情報のエコシステムとして成立していることである。ユーザは情報を提供する代わりに、無線 LAN 情報のデータベースをダウンロードできたり¹⁹⁾、API を通して位置推定結果を利用したりできる²⁵⁾。

屋外の位置推定では、GPS から得られる緯度経度とそのとき観測された無線 LAN 情報の組を記録した DB に基づき、現在観測されている無線 LAN 情報から緯度経度を推定し提示する^{19);25)}。一方、屋内位置推定を行うためには、複数階層の建物を対象とする必要があり、緯度経度や高度の情報だけでは建物内フロア中のどこにいるかをユーザが直観的に理解できない。いくつかの屋内位置情報システムで用いられている、フロアマップであればユーザが直感的に理解可能である^{11);25)}。また、屋外の地理座標系と相互変換可能な屋内の空間情報フォーマットの策定が必要であることが指摘されている²⁰⁾。フロアマップ内の座標と地理座標を相互変換可能にすることで、既存の屋外位置推定システムとのシームレスな連携が可能になる。

位置推定結果は、特定のアプリケーションのみで利用できるようにするのではなく、ライブラリとしてアプリケーションから利用できることが望ましい。たとえば PlaceEngine は位置推定 API を提供しており、PlaceEngine クライアントソフトウェアを起動している PC であれば、任意のアプリケーションが PlaceEngine のプラットフォームの位置情報を利用できる。また W3C は Web ブラウザからの位置情報利用フォーマットを統一化する Geolocation API を提案している¹⁶⁾。現在、Mozilla、Google Chrome、Opera、Mobile Safari などの複数のブラウザが Geolocation API を採用している^{*1}。本 API によって、ブラウザベースのサービスである Twitter¹⁵⁾ でも、Tweet に位置情報を関連付けられるようになった。

これらをまとめると、屋内無線 LAN 情報プラットフォームの要件として以下の 3 点を満たすことが求められる。

- 様々な建物で位置情報サービスを利用できるように、任意の建物の無線 LAN 電波情報が収集可能

- フロアマップを利用し、かつ屋外の地理座標系と互換性のあるフォーマットを利用
- 無線 LAN 情報の観測や投稿をするユーザのために、ブラウザや任意のアプリケーションから位置情報を利用できるライブラリを提供

4. indoor.Locky

無線 LAN 屋内位置情報基盤 indoor.Locky は、前章であげた要件を満たすよう設計した。ユーザから投稿される建物情報や無線 LAN 情報を統合し管理する Web サービス、個人が持つ端末で動作するクライアントソフトウェア (以下クライアントと呼ぶ)、任意のアプリケーションが位置情報を利用するための API に分割して実装している。様々な端末で屋内位置情報を扱えるよう、クライアントは PC 用と iPhone/iPad 用を実装している。

indoor.Locky は UGC に基づいたシステムとして設計した。概要を図 3 に示す。各ユーザは indoor.Locky クライアントがインストールされた端末を使用する。以下の工程により、任意の建物での位置情報が利用可能になる。

- 任意のユーザが建物やフロアの情報 (建物情報) を入力する。
- 任意のユーザが各フロアで無線 LAN 観測を行い、アップロードする。
- indoor.Locky の Web サービスがアップロードされた観測情報を統合し、随時 GMM (無線 LAN モデル) に変換する。

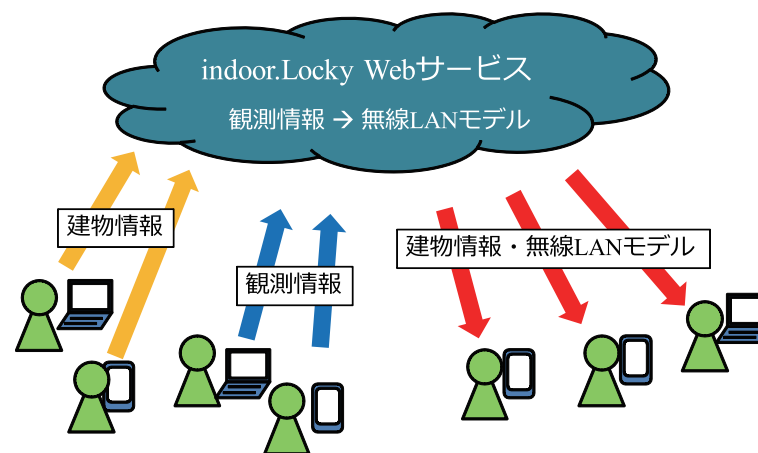


図 3 indoor.Locky の概要

Fig. 3 Abstract of indoor.Locky platform.

*1 Mozilla や Opera などの複数のブラウザでは、位置認識に Loki の技術を利用している。



図 4 建物登録画面

Fig. 4 Registration form of building.

- 任意のユーザは建物情報と無線 LAN モデルを端末にダウンロードする。

現時点では、ユーザが持つ端末側で位置推定を行うよう実装されているが、Loki¹⁴⁾ のようにサーバ側で位置推定を行いその結果を端末が受信するという拡張も考えられる。オフラインでの使用の場合は端末側で計算し、位置推定の計算による電力消費を抑えたい場合にはサーバで計算させるといった柔軟性を持たせることができよう。

4.1 建物情報の登録

位置推定の対象となる建物情報は、Web ブラウザから入力する。図 4 は建物登録画面である。建物名、地上と地下の階層数をフォームから入力し、Google Maps の操作により、建物の代表点の座標を 1 つ登録する。

次に建物の各階層のフロアマップを登録する。現在のところ、ほとんどの建物で CAD データのような詳細なフロアマップは一般公開されていないため、そのようなデータが取得できないときは、建物内に設置されているフロアマップをカメラで撮影した画像をアップロードする。

ここで、ユーザが投稿するフロア画像の管理方法について考察する。まず、フロアマップの表現方法は一般に統一されていない。まず、必ずしも 1 枚のフロア画像に 1 つのフロア

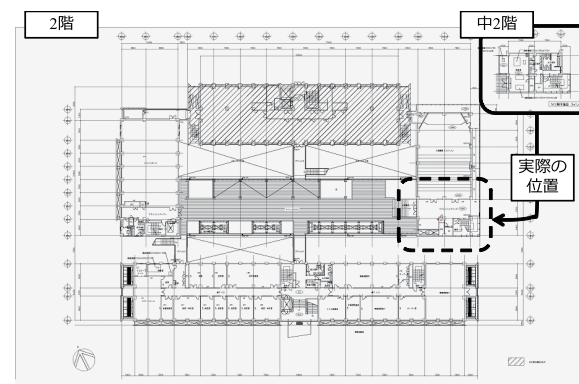


図 5 フロア画像例 1 : 複数フロア間の位置関係が崩れている

Fig. 5 An example of floor map. Physical relationships of these floors are not consistent.

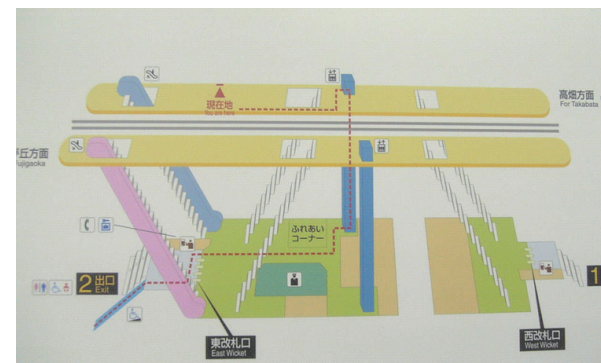


図 6 フロア画像例 2 : 複数のフロアが立体的に表示されている

Fig. 6 An example of floor map. The floors are as three-dimensionally.

しか存在しないわけではなく、1 枚のフロア画像に複数のフロアが存在するものもある。たとえば図 5 では、2 階と中 2 階が 1 枚のフロア画像に収まっている。また、複数フロア間の位置関係が崩れている場合もある。図 5 では、実際に中 2 階のある箇所は点線で囲った位置である。さらに、必ずしも平面的に表現されているわけではなく、図 6 のように立体的に表現されている場合もある。

これらをふまえ、以下のようにフロア画像をフロア領域という単位ごとに管理することに

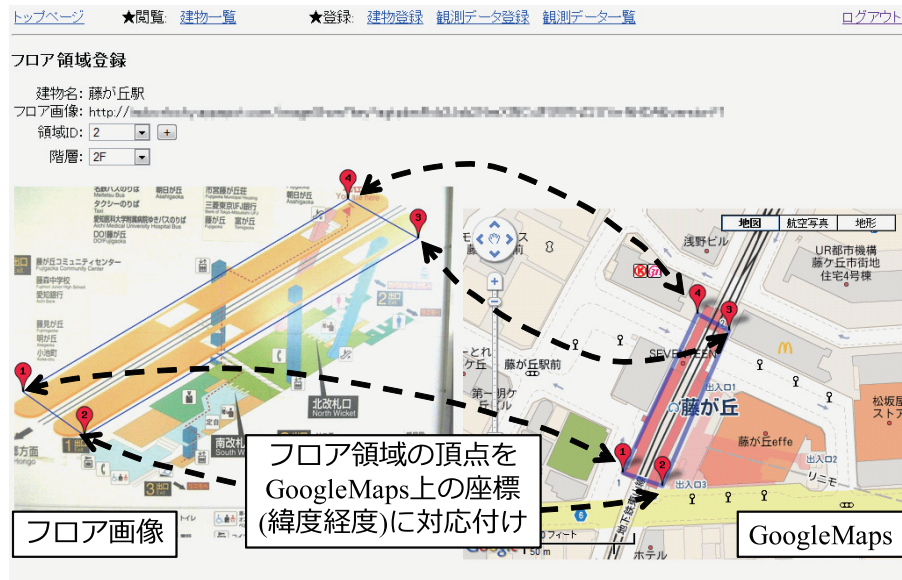


図 7 フロア領域の作成と地理座標系との対応付け

Fig. 7 Mapping between a floor area and geographical coordinates.

した。1つのフロア領域は、フロア画像中の3点以上を指定することで作成される。図7左では、駅の2階の部分（頂点にピンが表示され、頂点間が線で結ばれた領域）を1つのフロア領域としている。フロア画像に複数のフロアが存在する場合は、フロア領域を複数作成する。これにより、1枚のフロア画像中に複数のフロアが存在する問題に対応でき、かつ台形やひし形で表現される立体的なフロアマップに対応でき、多角形のフロア領域を作成することもできる。次に、それぞれのフロア領域の該当する階層を選択する。さらに、地理座標系と関連付けるため、フロア領域の多角形の各頂点に対応する地理座標（緯度、経度）をGoogle Mapsへのマウス操作により入力する（図7右）。フロア領域のアフィン変換を行うことで、フロア画像中の座標と地理座標の相互変換が実現される。フロア領域ごとに緯度経度の対応付けを行うため、フロア画像内の複数フロアの位置関係が図5のように崩れていても、各フロア領域内の座標を地理座標系に正しく対応付けることができる。建物で1つの代表座標を指定し、さらにフロア領域の頂点の座標と階層（高度）を指定する方式は、経済産業省が検討している3次元空間参照系フォーマットの1つとほぼ同等である²¹⁾。ただし、



図 8 屋内無線 LAN 情報観測クライアント (iPad)

Fig. 8 Indoor WLAN observation client.

経済産業省ではフロア情報としてフロアの CAD データを利用することを想定している。

フロア領域の各頂点と地理座標系との対応付けは必須ではなく、対応関係が正確に分かる場合にのみ行われる。地理座標としての位置情報の提示は、地理座標系との対応付けが完了しているフロア領域に限定される。

4.2 無線 LAN 情報の観測

ユーザは端末にインストールされた indoor.Locky クライアントを用いて、屋内での無線 LAN 観測を行う。無線 LAN 観測を行う各地点において、自身がフロア画像をタップしたりクリックしてどこにいるのかをシステムに通知し、そのときの位置と無線 LAN 観測情報を対応付けて記録していく（図8）。すでに自分自身または他のユーザによって観測が行われている地点にはピンが表示されており、ユーザはピンが表示されていない箇所への移動と観測を繰り返す。

無線 LAN 観測の作業を行うことのできるユーザは、自身が立っている現在位置がフロア画像のどこに対応しているか認識できる人に限定される。ここで、正確に現在位置とフロア画像の対応を認識できている場合でも、タッチパネル式のデバイスを用いて現在位置をシステムに通知する際、現在位置としてタップする位置がユーザごとに揺らぐことが考えられる。数 cm ~ 1 m 単位のような精度での位置推定を行うシステムの場合には、このような観



図 9 GMM によりモデル化された無線 LAN 情報
Fig.9 WLAN information model using GMM.

測時の揺らぎが影響するため正確な位置の通知が必要となるが、本システムで採用している手法は 6m 程度の位置推定精度であり、大きな問題にはならないと考える。

4.3 観測情報から無線 LAN モデルへの変換

ユーザが観測データを indoor.Locky Web サービスに送信すると、Web サービスは複数ユーザがアップロードしたデータを用いて、各フロアの基地局ごとに GMM (無線 LAN モデル) に随時変換する。複数のユーザが同一フロアの観測情報を投稿した場合、それら複数の観測情報を統合して無線 LAN モデルへの変換を行う。またすでにモデルへの変換が完了した後も、無線 LAN 観測データが追加投稿された際には再度変換を行い、無線 LAN モデルを更新する。

ここで、2 章で述べた手法では GMM の混合数は手動で決定する必要があったが²³⁾、本システムでは各基地局が観測された地点数が多いほど混合数を多くするよう設定することでこの作業を自動化させている。混合数が少ないと複雑な電波分布形状を十分に近似することができないが、逆に単純な電波分布形状を近似する際に混合数が多すぎて失敗するということが少ないという経験に基づき、観測点数と混合数の具体的な対応を決定している。

4.4 位置推定結果の利用

ユーザは Web サービスにアクセスし、無線 LAN モデルをダウンロードすることで、その

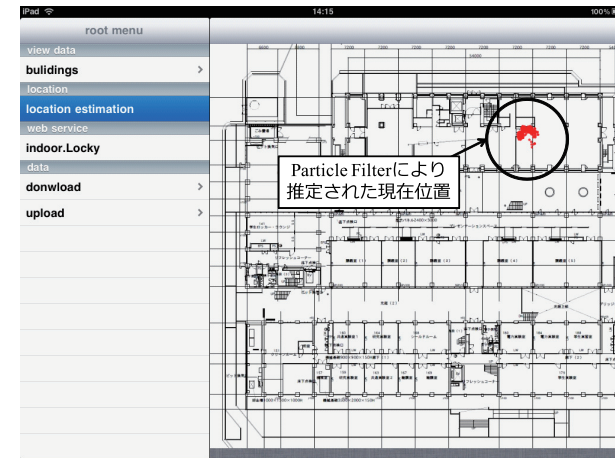


図 10 Particle Filter によるリアルタイム屋内位置推定の様子
Fig. 10 A scene of real-time indoor location estimation using particle filter.

フロアの位置推定を行う準備が完了する。ダウンロード後は、各基地局のモデルを確認できるようになる (図 9)。indoor.Locky クライアントの現在位置表示機能を用いると、Particle Filter がフロア画像に重畳表示され、ユーザはリアルタイム位置推定の結果を Particle の分布として閲覧することができる (図 10)。またブラウザや任意のアプリケーションは API を通じてクライアントにアクセスし、推定位置 (Particle の重心) を利用することになる。ただし、現在の実装では位置推定情報を利用するブラウザやアプリケーションは、クライアントと同一端末で動作する必要がある。

4.1 節で述べた、フロア領域の各頂点が緯度経度に関連付ける作業が完了している場合には、位置推定結果を、フロア画像中の座標としてだけでなく、地理座標 (緯度経度) として取得することも可能である。フロア画像中の座標は、屋内の相対的な位置関係が重要なサービス (たとえば屋内ナビゲーションや店舗案内) で有用である。一方地理座標は、緯度経度を用いている従来の多くの位置情報サービスにそのまま適用できるという利点があり、屋内外をシームレスに接続する位置情報サービスにも有用であると考えられる。

5. 評価実験

本評価実験の目的は、以下の 2 点を検証し、indoor.Locky の実用可能性を示すことであ

る。1 つ目は複数ユーザが無線 LAN 観測を行い、それを Web サーバ側で統合できることを確認することである。複数ユーザの無線 LAN 観測が可能であれば、無線 LAN 観測に関する作業コストを複数ユーザに分散させられるため、1 人あたりの負担を軽減できる。2 つ目は無線 LAN 観測地点の密度と位置推定精度の関係を検証し、作業コストと位置推定精度のバランスのとれた観測地点の間隔を明らかにすることである。indoor.Locky が採用している位置推定手法は、現在までに無線 LAN 観測地点の密度と位置推定精度の関係は明らかにされていない。どの程度の間隔で観測を行えばよいかを明らかにすることで、必要以上に多くの箇所の観測を行ってしまうのを回避できるため、1 人ひとりの作業コストが必要以上に増加するのを防ぐことができる。

本実験は、横浜の商業施設クイーンズスクエアにおいて行った。実験期間中、本施設の一部であるクイーンズイーストでは、経済産業省 G 空間プロジェクトの一環である位置情報サービス体験イベントが行われ、無線 LAN 基地局はクイーンズイーストの B1F, 1F, 2F に、各フロアにつき 15 個程度ずつ分散して設置された。今回の実験では、このプロジェクトのために設置された無線 LAN 基地局の電波情報のみを利用した。実験日（2011 年 2 月 16 日）には、本施設は平常営業しており、多くの一般客が来館した。

本実験では、実験対象フロアをクイーンズイースト 1F（図 11）のみに限定し、フロア間移動は行わないものとした。上下階のフロアにも計画的に基地局が設置されているのは 1F のみであり、他のフロア（2F, B1F）は 1F とは同等の条件に合わせられなかったのがフロア間移動を除外した理由である。電波観測の際、現在いるフロアの上下階の電波情報が観測されることが多く、これらの電波情報の存在は位置推定精度に影響すると考えられる^{*1}。

5.1 複数ユーザによる無線 LAN 観測とその統合に関する検証

まず、複数ユーザによる無線 LAN 観測と、その統合が可能であることを検証するため、3 人の実験者が分担してフロア内の無線 LAN 観測を行った。観測の手順は以下のとおりである。まず、クイーンズイースト 1F の縮尺の正しいフロアマップを CAD データを基に作成し、indoor.Locky の Web サービスに建物情報の登録を行った。次に、各実験者が iPhone の indoor.Locky クライアントを用いて、フロア内を手分けして無線 LAN 観測を行った。商業施設のような実環境において、長時間同じ場所に立ち止まっていたり、数十 cm 程度の間隔で無線 LAN 観測を行ったりするのは現実的でないと考え、データ収集の際には、各地



図 11 実証実験フロアの風景
Fig. 11 A snapshot of evaluation floor.

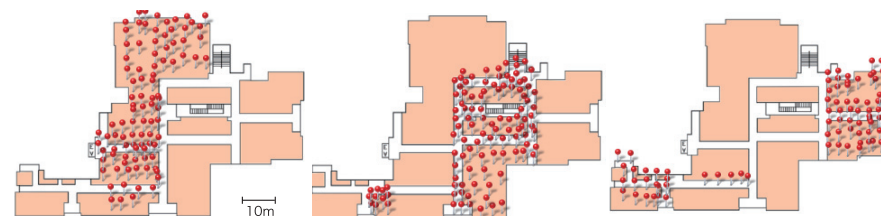


図 12 3 人の実験者の観測地点
Fig. 12 Observation points of three users.

点につき 1 回無線 LAN 観測を行い、かつ各観測地点の間隔は約 3 m とした。観測対象のフロア面積は約 2,870 m² であり、合計 285 地点で観測を行ったため、約 100 m² に 10 カ所の割合で観測したことになる。図 12 は、各実験者が観測した地点を表している。これらの観測情報を Web サービスにアップロードし、Web サービス側で統合して無線 LAN モデルに変換した。図 13 に生成した GMM の例を示す。各ユーザが観測した地点をまたがった GMM が生成できていることが分かる。これより、複数ユーザによる無線 LAN 観測を Web サーバ側で正常に統合できることが確認された。

5.2 観測地点密度と位置推定精度の関係の検証

位置推定精度評価用の移動データとして、2 人の実験者がフロア内をウィンドウショッピング

*1 場所によっては 2 階以上はなれた場所に設置されている基地局も観測される場合があるが、それらの電波強度は微弱であることが多いため位置推定精度に大きく影響しないと考える。

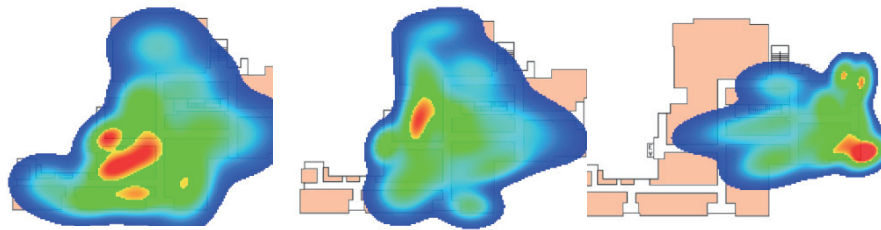


図 13 生成された GMM の例
Fig. 13 Examples of generated GMM.



図 14 評価用移動データ
Fig. 14 Sequence data for the test.

ングするように自由に移動し、3m 程度の間隔で、各地点につき 1 回無線 LAN 観測を行った。図 14 に移動データを示す。移動データの 2 人分の合計は 666 m (220 力所) である。

位置推定の実験は以下のとおりに行った。まず indoor.Locky クライアントの位置推定に関する機能を拡張し、移動データをもとに無線 LAN 電波環境をシミュレート可能にした。位置推定の精度検証はこのシミュレーション機能を用いて実施した。位置推定に用いるパラメータは表 1 のとおりである。Particle Filter に関するパラメータは藤田らの行った評価実験に基づいて決定した²³⁾。また、歩行速度はウィンドウショッピングを想定し 1m/s とした。移動データの観測地点間隔はおよそ 3m であるため、無線 LAN 電波の更新は 3 秒に 1 回程度の間隔となる。iPhone では 3 秒に 1 回程度の無線 LAN 電波観測は可能である。本実験では、Particle Filter を 1 回更新するごとに Particle の重心と移動データの正解座標との距離を求め、それらを全移動データにおいて平均したものを位置推定誤差とした。ただし、Particle の分散が一定以上 (標準偏差: 7m 以上) の場合には、Particle が広範囲を探索中であると見なし、位置推定誤差を算出しないものとした。

表 1 実験の条件設定

Table 1 Parameters of experiments.

Particle 数	300 個
Particle Filter 更新	1 秒に 1 回
使用する電波強度の閾値	-70 dBm
歩行速度	1 m/s
無線 LAN 電波更新	3 秒に 1 回程度

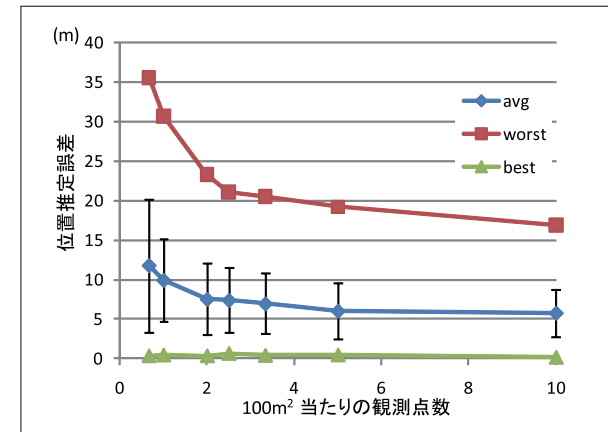


図 15 位置推定精度と観測地点密度の関係

Fig. 15 Relationship between accuracy of location estimation and the density of observation points.

無線 LAN 観測地点密度と位置推定精度の関係を明らかにするために、観測地点をランダムに間引きし、位置推定精度の検証を行った。図 15 は、横軸が観測地点の密度 (100m² あたりの観測点数)、縦軸を位置推定誤差としたときの位置推定誤差を表している。中央の線は誤差平均と標準偏差を、上下の線は最も位置推定精度が悪くなったときと良くなったときの誤差を示している。この図から、観測地点密度が大きくなるほど位置推定精度が向上し、位置推定精度は 5m 付近まで改善できることが分かる。しかし、100m² あたりの観測点数が 5 力所のとときと 10 力所のとときを比較すると、誤差平均、標準偏差ともほぼ変化していない (5 力所: 誤差 5.8m, 10 力所: 誤差 6.0m)。いいかえれば、100m² あたりの観測点数を 5 力所から 10 力所に倍増させても、誤差は 20cm 程度しか改善されない。

また、100m² あたりの観測点数が 5 力所よりも少なくなると、徐々に位置推定精度が低

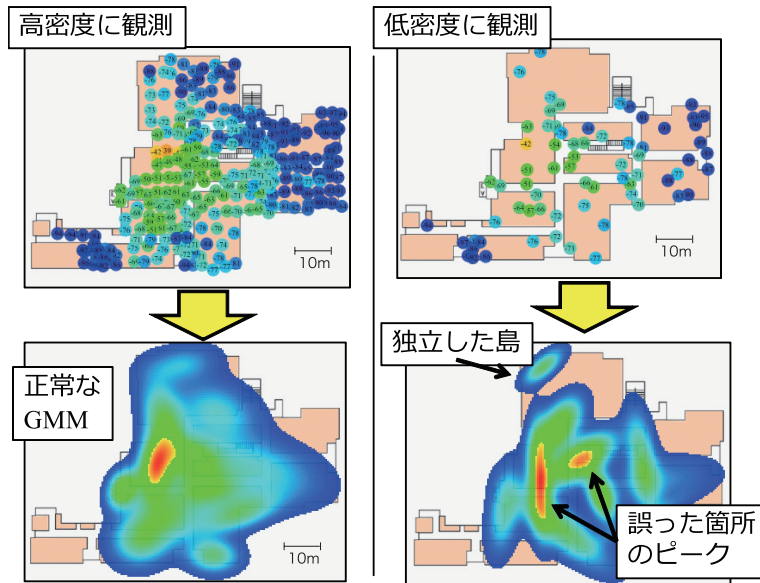


図 16 観測密度の違いによる GMM 形状の違い

Fig. 16 Difference of GMM's form related to the number of observation points.

下していくことが分かる。観測地点の密度が低い場合の位置推定精度低下の原因を考察する。観測地点密度の違いで GMM の形状がどのように変化するかを図 16 に示す。図 16 左は、本実験で 100 m^2 あたり 10 カ所で観測したデータを使用して生成した GMM であり、右は 100 m^2 あたり 2.5 カ所で観測した状態に観測データをランダムに間引きし、その観測データを用いて生成した左と同一基地局の GMM である。高密度に観測した場合には各基地局の GMM はなめらかな形状となることが分かる。一方観測密度が不十分な場合、独立した島ができてしまったり、本来はない箇所にピークが表れてしまったりする。このような島や誤った箇所のピークが存在すると、Particle Filter による位置推定の際にそれらの極値に陥る可能性が高くなるため、位置推定精度低下の原因のとなる。 100 m^2 あたりの観測点数が 5 カ所より少ない場合、生成される GMM には図 16 右に示すような独立した島や誤ったピークが存在することが多くなり、その結果 Particle がそれらの狭い範囲の極値に陥ることが多くなり、位置推定精度が低下したと考えられる。

以上の結果より、 100 m^2 あたりの観測点数が 5 個程度、つまり 5 m 間隔程度で観測を行

えば、最も作業コストと位置推定精度のバランスがとれるといえる。各地点で 1 回無線 LAN 観測を行い、1 地点の観測と次の 5 m 先の地点への移動に 15 秒程度かかるとすると、1 人で同規模のフロアを観測するためには 30~40 分程度、本評価実験のように 3 人で手分けをすれば 10~14 分程度で観測作業を完了することができる。さらに多くのユーザで分担すれば、1 人あたりの作業時間は数分程度に短縮できることから、indoor.Locky は十分に実社会で運用可能であると考えられる。

6. おわりに

本稿では無線 LAN 屋内位置情報基盤 indoor.Locky について述べた。indoor.Locky は GMM に基づく位置推定手法を採用している。また、UGC ベースのアプローチを採用しており、高い作業コストのかかる事前の無線 LAN 観測を複数ユーザで分担することができるように設計された。indoor.Locky の実用可能性を示すため、商業施設における実証実験を行った。複数ユーザが作業を分担して無線 LAN 観測を行い、それを Web サーバ側で正常に統合可能であることを確認することができた。また、観測地点密度と位置推定精度の関係を検証し、最も作業コストと位置推定精度のバランスがとれた観測地点の間隔は 5 m 程度であることを示した。1 フロアの観測作業を複数人で分担して行えば、1 人あたり数分~十数分程度の作業で済むことから、indoor.Locky は十分に実社会で運用可能であると考えられる。

今後は、屋内位置情報基盤としての機能を充実させ、一般公開を目指す。また、現在は屋内位置情報のベースとしてユーザから投稿されるフロアマップの画像を使用しているが、その画像を半自動的に構造化し、ナビゲーションや位置に基づく情報提示など様々なアプリケーションに適用可能にすることを検討している。

謝辞 本稿の評価実験では、経済産業省「G 空間プロジェクト」の実証実験会場を利用させていただきました。関係者の皆様に感謝いたします。特に、財団法人日本情報処理開発協会（現：一般財団法人日本情報経済社会推進協会）、クウジツ株式会社には多大なる協力をいただき、深く感謝いたします。

参考文献

- 1) Bahl, P. and Padmanabhan, V.N.: RADAR: An In-Building RF-based User Location and Tracking System, *Proc. IEEE Infocom 2000*, pp.775-784 (2000).
- 2) Booyah: MyTown, available from (<http://www.booyah.com/>) (accessed 2011-07-08).
- 3) Cheverst, K., Davies, N., Mitchell, K. and Friday, A.: Experiences of developing

- and deploying a context-aware tourist guide: the GUIDE project, *Proc. 6th of an Annual International Conferences on Mobile Computing and Networking (MOBI-COM 2000)*, pp.20–31 (2000).
- 4) foursquare, available from <http://foursquare.com/> (accessed 2011-07-08).
 - 5) Hansen, R., Wind, R., Jensen, C.S. and Thomsen, B.: Seamless Indoor/Outdoor Positioning Handover for Location-Based Services in Streamspin, *Proc. 10th International Conference on Mobile Data Management*, pp.267–272 (2009).
 - 6) Hightower, J. and Borriello, G.: Particle Filters for Location Estimation in Ubiquitous Computing: A Case Study, *UbiComp 2004: Ubiquitous Computing*, Vol.3205, pp.88–106 (2004).
 - 7) LaMarca, A., Chawathe, Y., Consolvo, S., et al.: Place Lab: Device Positioning Using Radio Beacons in the Wild, *3rd International Conference Pervasive 2005*, Lecture Notes in Computer Science, Vol.LNCS3468, pp.116–133 (2005).
 - 8) Lim, H., Kung, L.C., Hou, J.C. and Luo, H.: Zero-configuration indoor localization over IEEE 802.11 wireless infrastructure, *Wireless Networks*, Vol.16, No.2, pp.405–420, Springer Netherlands (2010).
 - 9) livedoor: ロケタッチ, 入手先<http://tou.ch/> (参照 2011-07-08).
 - 10) Manandhar, D., Kawaguchi, S., Uchida, M., et al.: IMES for Mobile Users Social Implementation and Experiments based on Existing Cellular Phones for Seamless Positioning, *International Symposium on GPS/GNSS* (2008).
 - 11) micello, available from <http://www.micello.com/> (accessed 2011-07-08).
 - 12) OpenStreetMap, available from <http://www.openstreetmap.org/> (accessed 2011-07-08).
 - 13) Seidel, S. and Pappert, T.: 914 Mhz Path Loss Prediction Model for Indoor Wireless Communications in Multifloored Buildings, *Proc. IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, pp.207–217 (1992).
 - 14) Skyhook Wireless Inc.: Loki, available from <http://loki.com/> (accessed 2011-07-08).
 - 15) twitter, available from <http://twitter.com/> (accessed 2011-07-08).
 - 16) W3C: Geolocation API Specification, available from <http://dev.w3.org/geo/api/spec-source.html> (accessed 2011-07-08).
 - 17) コロブラ, 入手先<http://pc.colopl.jp/pages/wl/welcome.html> (参照 2011-07-08).
 - 18) 伊藤誠悟, 河口信夫: 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 ハイブリッド位置推定手法とその応用, *電気学会論文誌 C*, Vol.126, No.10, pp.1212–1220 (2006).
 - 19) 伊藤誠悟, 吉田廣志, 河口信夫: 無線 LAN を用いた広域位置情報システム構築に関する検討, *情報処理学会論文誌*, Vol.47, No.12, pp.3124–3136 (2006).
 - 20) 経済産業省: 地理空間情報サービス産業の将来ビジョン, 報道発表 (2008), 入手先<http://www.meti.go.jp/press/20080703007/20080703007.html> (参照 2010-08-09).
 - 21) 経済産業省: 3次元空間参照系データベース構築流通フォーマットの要件(案), 3次元地理空間情報データベース検討会(第4回)(2009), 入手先http://www.meti.go.jp/policy/it_policy/GIS/090319/090319.html (参照 2010-08-09).
 - 22) 中村嘉志, 並松祐子, 宮崎伸夫, 松尾 豊, 西村拓一: 複数の赤外線タグを用いた相対位置関係からのトポロジカルな位置および方向の推定, *情報処理学会論文誌*, Vol.48, No.3, pp.1349–1360 (2007).
 - 23) 藤田 迪, 梶 克彦, 河口信夫: Gaussian Mixture Model を用いた無線 LAN 位置推定手法, *情報処理学会論文誌*, Vol.52, No.3, pp.1069–1081 (2011).
 - 24) 矢野幹樹, 岩崎陽平, 河口信夫: 駅.Locky: 無線 LAN 位置推定を用いた時刻表アプリの開発, *情報処理学会全国大会*, 6ZP-4 (2010).
 - 25) 暦本純一, 塩野崎敦, 末吉隆彦, 味八木崇: PlaceEngine: 実世界集合知に基づく WiFi 位置情報基盤, *インターネットコンファレンス*, pp.95–104 (2006).

(平成 23 年 4 月 4 日受付)

(平成 23 年 9 月 12 日採録)



梶 克彦 (正会員)

2002 年名古屋大学工学部電気電子工学科卒業 . 2007 年同大学大学院情報科学研究科博士課程修了 . 博士 (情報科学) . 同年 NTT コミュニケーション科学基礎研究所リサーチアソシエイトを経て, 2010 年より, 名古屋大学大学院工学研究科助教 . 人工知能学会, 日本ソフトウェア科学会, ヒューマンインタフェース学会各会員 . 実世界コミュニケーション, Web コンテンツ処理, 音楽情報処理に関する研究に従事 .



河口 信夫 (正会員)

1990 年名古屋大学工学部電気電子工学科卒業 . 1995 年同大学大学院工学研究科情報工学専攻博士課程満了 . 同年同大学工学部助手 . 同大学講師, 准教授を経て, 2009 年より, 同大学大学院工学研究科教授 . モバイルコミュニケーション, ユビキタスコンピューティング, 行動センシングの研究に従事 . 博士 (工学) . ACM, IEEE, 人工知能学会, 日本ソフトウェア科学会, 電子情報通信学会, 日本音響学会各会員 .