

プレゼンスシステム実現のための 無線 LAN を用いた高精度な屋内エリア推定方式

山田 直治^{†1,†2} 磯田 佳徳^{†1}
南 正輝^{†2} 森川 博之^{†2}

人の位置や状況などをユーザ間で共有・利用するプレゼンスシステムを実用化する
うえでは、屋内空間でユーザの位置を正確に把握する位置情報システムが重要となる。
これまでも様々な屋内位置情報システムが提案されてきたが、プレゼンスシステム
で重要なユーザの存在エリアの安定的推定に注目した研究は少なかった。本研究では
ビジネス向けの携帯電話に標準搭載されている無線 LAN を利用し、RSSI を用いて
高精度かつ安定的にユーザの存在エリアを推定する手法を提案する。本手法は RSSI
を検出するアンカノードを空間的に密に配置することで位置検出精度を高めるとも
に、ユーザの滞在・移動の情報を効果的に利用することで安定的なエリア推定を実現
する。また、取得された RSSI の相対比を利用することで、統計モデルなどを構築す
ることなくエリア推定を行うことができる。実オフィス環境における評価実験を通じ、
平均 1.8 エリアの解像度、95%の確度でエリア推定が可能であることが示される。

Wireless LAN-based Reliable Indoor Area Estimation for Presence Systems

NAOHARU YAMADA,^{†1,†2} YOSHINORI ISODA,^{†1}
MASATERU MINAMI^{†2} and HIROYUKI MORIKAWA^{†2}

Reliable indoor positioning system is required to achieve practical presence
system that enables users to check or share user locations or situations. Al-
though many indoor positioning systems are proposed, few focus on stable
estimation of user location. This paper proposes the accurate and reliable po-
sitioning system using RSSI of wireless LAN that regularly mounted on mobile
phones targeted at corporate users. Anchor nodes acquiring RSSI are densely
set to improve positioning accuracy, and user situations of move or stay are
utilized to achieve reliable estimation. Furthermore, user location is identified
based on relative ratio of RSSI without establishing statistical model. Exper-
iments in an actual office demonstrate the proposed method can identify user
location by the accuracy of average 1.8 areas and the average 95% reliability.

1. はじめに

近年、決まった席を持たず、業務内容などに応じて席を選択するフリーアドレス・オフィ
スを導入する企業が増えている。このようなオフィスでは、社員の居場所や状況の把握が難
しく、ユーザ間のコミュニケーションが円滑に行えないことから業務効率が低下することが
あった。この課題を解決する方法として、プレゼンスシステムの導入が考えられる。プレゼ
ンスシステムとは、人の位置や状況を示すプレゼンス情報をユーザ間で共有、利用するシ
ステムであり、具体的にはプレゼンスをユーザ間で共有するプレゼンス共有サービス、プレゼ
ンスに応じてメールや電話といった最適な連絡手段を提供するサービス、さらにはある
ユーザが自席など特定の領域に戻ったことを別のユーザにメールなどによって通知するリ
マインダサービスなどがある。上司の決裁やサインが必要な場合など対面でのコミュニケー
ションをとりたいユーザは、相手がコミュニケーションをとれる状態にあるかをプレゼンス
共有サービスで確認することができ、会議中などの場合には自席に戻ったことを通知するリ
マインダサービスにより、確実にコミュニケーションをとることができる。このようにプレゼ
ンスシステムを導入することで、オフィス内におけるコミュニケーション・業務の効率化
を図ることが可能となる。

実用的なプレゼンスシステムの実現に際しては、屋内空間でユーザの位置を正確に把握す
る屋内位置情報システムが重要となる。これまでも屋内位置情報システムが数多く提案さ
れてきたが⁵⁾、いずれのシステムもプレゼンスシステムで重要となるユーザの存在エリアの
安定的な取得を実現することはできていない。

プレゼンスシステムを実現するための屋内位置情報システムは以下の 4 つの要件を満た
す必要がある。

(1) 携帯電話の利用：従来の屋内位置情報システムではユーザに超音波タグや赤外線タグな
どのデバイスを所持させる必要があった。しかしながら、このようなデバイスの所持はユー
ザにとって負担となる。また、普段持ち歩く携帯電話などに比べ、置き忘れや付け忘れなど
が発生する可能性も高い。したがって、屋内測位システムにおいては携帯電話に一般的に搭
載されている機能を利用できることが望ましい。

^{†1} 株式会社 NTTドコモサービス&ソリューション開発部
Service & Solution Development Department, NTT DOCOMO, Inc.

^{†2} 東京大学先端科学技術研究センター
Research Center for Advanced Science and Technology, The University of Tokyo

(2) 高精度位置検出：ユーザに提供できるサービスの種類を多くするためには、できる限り高い分解能でユーザの存在するエリア（会議室や更衣室といった論理的な位置）を特定できることが望ましい。これに向けては、ユーザの位置検出はできる限り高精度に行えることが望ましい。

(3) 確度を指定できるエリアの特定：リマインダサービスなどはユーザの存在するエリアに応じてメッセージ送信を行うが、このようなサービスを提供する際には、誤ってメッセージが送信されてしまう確率を制御する必要がある。たとえば、会議室に隣接する形で更衣室が存在する状況で、ユーザが 95% の確度で会議室にいるときのみメッセージを送信するような場合、リマインダサービスはユーザが 95% の確度で存在するエリアを位置情報システムに問い合わせ、その応答に更衣室が含まれる場合にはサービスを起動しないといった動作が求められる。すなわち、サービスが要求する確度でユーザが存在するエリアを特定できる位置情報システムが必要となる。

(4) 既存システムとの共存：屋内空間では様々な通信システムが存在するが、位置情報システムを導入した結果、これら通信システムのパフォーマンスが著しく低下することは望ましくない。このため、位置情報システムには、既存システムとの共存が求められる。

本研究ではこれら 4 つの要件を満足する実用的な位置情報システムを設計する。まず、(1) の要件に対しては、ビジネス向けの携帯電話に標準的に搭載されている無線 LAN インタフェース（以下、WLAN と記載）を利用し、RSSI（Received Signal Strength Indicator）による位置検出を行う。また、(2) の要件に対しては、RSSI を検出する受信専用端末（以下、アンカノードと記載）を空間的に密に配置できるような設計とし、位置検出精度の向上を実現する。また、ユーザの滞在・移動を検出するアルゴリズムを導入することで位置検出の安定化を行う。(3) に対しては、各アンカノードから得られる RSSI の相対比を利用して、ある確度を満足するエリアを推定するアルゴリズムを設計する。さらに (4) に対しては、位置検出対象となる携帯電話に ICMP Echo Request 信号へのリプライのみを行わせることで、位置検出における不要なパケットの送出をできる限り抑え、無線 LAN 上で提供されている VoIP（Voice over IP）などのサービスへ悪影響を及ぼさないようにシステムを設計している。

本論文の構成は以下のとおりである。まず 2 章で関連研究について整理し、本研究の位置付けを明確化する。次いで 3 章で提案する位置情報システムの設計について述べる。4 章では設計したシステムの実装と評価を行い、5 章でまとめとする。

2. 関連研究

本章では、従来のプレゼンスシステムについて整理し、プレゼンスシステムをサポートする位置情報システムにおいて、ある確度を満足するエリアを推定できる機能の重要性について述べる。次に、屋内における位置検出技術について整理したうえで、本研究で提案する位置情報システムとの差異を明確化する。

オフィスにおけるコミュニケーション・コラボレーションの効率向上を目的としたプレゼンスシステムには、ActivePhoneBook¹⁴⁾ やユビスタイル¹⁸⁾ がある。ActivePhoneBook はプレゼンス共有サービスを提供するシステムである。ユビスタイルはプレゼンス共有サービスに加えて、会議室予約者が会議室を利用していない場合に通知するアラートサービスといったサービスを提供している。これらプレゼンスシステムではユーザのプレゼンスを把握するためにユーザが存在するエリアを推定対象としている。

ActivePhoneBook では、WLAN 搭載の移動端末が接続するアクセスポイント（以下、AP と記載）の位置からプレゼンスを推定しているが、AP 単位での位置検出精度は数十 m 程度であり会議室や座席を識別することは困難である。ユビスタイルではアクティブ RFID を利用してユーザの位置を特定しているが、1 章で指摘したように、アクティブ RFID をユーザが携帯しなくてはならない点が問題となる。また、高精度が要求されるアラートサービスにおいて、エリア推定の確度が低く、誤ったメッセージを受信してしまう点が課題となっており、確度を考慮したエリア推定機能が求められている。

一方、屋内における位置検出システムには CCD カメラ⁶⁾、Bluetooth³⁾、超音波¹²⁾、赤外線¹⁵⁾、WLAN^{1);2);4);8);9);13)}、UWB¹⁶⁾ など、様々なデバイスを用いた方式が提案されている⁵⁾。しかしながら、WLAN 以外の位置検出方式では、位置検出に利用するデバイスをユーザが携帯する必要があり、ユーザの負担の観点からは好ましくない。

一方、内線電話の IP 化にあわせて携帯電話に WLAN 機能を具備させ、内線電話の機能を実現するモバイルセントレックスが注目されている。また、普及に向けた課題であった端末のユーザビリティ、導入コスト、および通信品質も改善されつつあり、WLAN 機能を搭載した携帯電話は今後ビジネスシーンにおいて普及していくと考えられる¹⁹⁾。そこで、本研究では WLAN を搭載した携帯電話と対象とした位置検出に着目する。

WLAN を用いた位置検出では、移動端末から複数の WLAN AP への信号の到達時間差から三辺測量により測位を行う TDOA 方式¹⁾ や、複数の WLAN AP から送信されたビーコン信号の RSSI を移動端末で取得し、統計モデルを作成・利用することにより測位を行う

方式^{2),4),13)}, さらに複数の WLAN AP や近傍の移動端末から送信された信号の RSSI を移動端末で取得し, 三辺測量により測位を行う方式⁹⁾ が提案されている. TDOA 方式では高精度な測位が可能であるが, 到達時間差を測定するための専用の機能を実装する必要がある. 一方, RSSI 方式は TDOA 方式と比較して精度が低下するものの, 市販の WLAN 機器には RSSI 検出機能が標準的に搭載されており, 特別なハードウェアを用意する必要がない. このためプレゼンスシステム用の位置情報システムへの適用が容易である.

しかしながら, RSSI 方式では位置検出結果の時間変動が問題となる. 一般に RSSI は人や什物の移動などによって大きく変動し, エリア推定結果が不安定になってしまう. この問題に対し, Ogawa らの方式¹³⁾ では, 各エリアの複数の位置で RSSI を複数回取得し, RSSI の時間変動を考慮した統計モデルを構築することで安定的なエリア推定を目指している. しかしこの方式では RSSI を複数回取得する間にユーザが別のエリアへ移動してしまった場合には対応できない. また統計モデル構築後の人や什物の移動などにより, 統計モデル構築時とは異なる伝搬環境となる場合にも対応できない.

このように, 従来研究では WLAN の RSSI を利用した位置検出において, 高精度かつ安定的にユーザの存在エリアを推定する手法は確立されていない. これに対し, 本研究では既存の WLAN システムを変更することなく, RSSI を検出するアンカノードを空間的に密に配置することで位置検出精度を高めるとともに, ユーザの滞在・移動判定を行うことで, 安定的なエリア推定を実現できる. また, アンカノードで取得された RSSI の相対比を利用することで, 統計モデルなどを構築することなく, ある確度を満たすエリア推定結果をサービスに提供できる.

3. 設 計

3.1 システム構成

図 1 に本研究で提案する位置情報システムの構成を示す. 本システムは, ユーザが WLAN 搭載の携帯電話を携行し, WLAN による通信が利用可能な環境において, アンカノードとエリア推定サーバを新たに導入することで, ユーザの携帯電話の位置を推定する. アンカノードは, 携帯電話から送信された信号の RSSI を取得し, 有線 LAN を介してエリア推定サーバにその RSSI を送信する端末である. エリア推定サーバは, 各アンカノードで取得した RSSI に基づいて, ユーザの滞在・移動の判定や, 存在エリアの推定を行うサーバである.

図 1 において, まずエリア推定サーバは携帯電話に対して ICMP Echo Request パケットを定期的に送信する. 携帯電話はこれに呼応して ICMP Echo Reply パケットを送信す

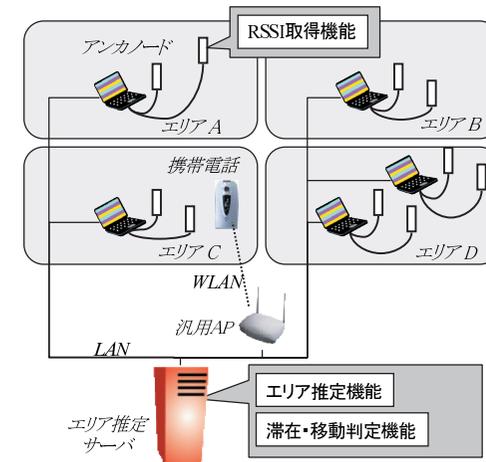


図 1 位置情報システムの構成

Fig. 1 Area estimation system architecture.

る. アンカノードはそのパケットを受信しており, 受信したパケットの RSSI と送信元携帯電話の MAC アドレスを取得する. その後, それらの情報をアンカノードの MAC アドレスとともにエリア推定サーバへ送信する. このとき, アンカノードの密度によりエリア推定の分解能が決まる. そこで本研究では, 空間的に密にアンカノードを設置した場合でも, 既存の無線 LAN システムに悪影響を与えないようなシステム設計を行っている (後述).

エリア推定サーバは, 複数のアンカノードで測定された RSSI に基づいて携帯電話が存在するエリアを推定する. エリア推定においては, ユーザが滞在している場合と移動している場合では, 推定結果に求められる精度, 安定性, およびトラッキング能力 (追従性) が異なる. ここでトラッキング能力とは, ユーザが移動している場合において, ユーザの実際の位置に対してエリア推定結果が時間的にどの程度追従できるかを示す指標である. ユーザが滞在中の場合にはエリアの推定精度と安定性が重要となる. 一方, ユーザが移動中の場合にはトラッキング能力が重要となる. そこで本システムでは, エリア推定サーバにおいて, 各アンカノードの RSSI の時間変動を監視し, 監視結果に基づいてユーザの滞在・移動を判定する. その後, 判定結果に基づいてエリア推定に用いる RSSI の履歴数 (後述) を変更することで, エリア推定における異なる要件に対応する.

以下では本システムに特徴的な空間的に密なアンカノードの配置手法, ユーザの滞在・移

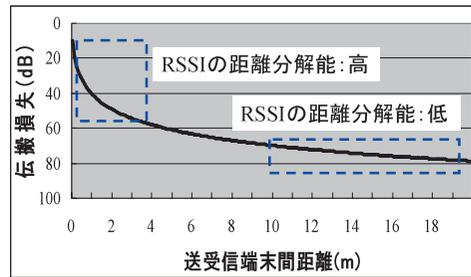


図 2 WLAN の伝搬損失特性

Fig. 2 Propagation loss characteristics of WLAN.

動判定方式, および RSSI の相対比を用いたエリア判定方式について述べる.

3.2 空間的に密なアンカノードの配置手法

3.1 節で述べたように, エリア推定の分解能を高めるためにはアンカノードを空間に多数配置する必要がある. その理由は送受信端末間距離と RSSI の関係によって説明される. ITU-R では WLAN の伝搬損失特性は図 2 に示すように定められており⁷⁾, 送受信端末間距離が長いと RSSI の距離分解能は低下する. すなわち, RSSI が 1 dBm 変化したときの送受信端末間距離の変化が大きくなり, 精度低下の原因となる. このため, アンカノードを空間的に密に配置することで送受信端末間距離を短くし, RSSI の距離分解能を向上させる必要がある.

空間的に密にアンカノードを配置するため, 我々はオフィス内に存在する多くのデスクワーク用の PC (以下, 業務用 PC と記載) に着目し, これらの PC をアンカノードとして利用する. このとき, RSSI の測定を携帯電話で行うべきか, アンカノードで行うべきかが重要となる. 前者を採用した研究として文献 8) があるが, 携帯電話は大量のアンカノードからの信号を受信する必要がある, それにともなって位置検出のための通信量が増大し, 既存の WLAN システムに影響を与えてしまう. また RSSI を取得してエリア推定サーバへ送信するアプリケーションを携帯電話上で動作させる必要があるため, 携帯電話の電力消費量が増大し, 携帯電話本来の使用に影響を与えてしまう.

そこで本研究では, 後者の方式を採用する. 具体的には, オフィス内に存在する業務用 PC に内蔵された WLAN アダプタ, もしくは業務用 PC に USB 接続された WLAN アダプタに対して, 任意の WLAN 端末間のパケットを受信可能な Monitor モードもしくは Promiscuous モードに設定する. そして携帯電話から送信された ICMP Echo Reply パケッ

トを受信して, RSSI と携帯電話を識別する MAC アドレスを取得する.

このようにすることで, エリア推定に利用する WLAN 上の通信は ICMP Echo Request/Reply パケットのみとなり, 通信量を軽減できる. 理論的には 11 Mbps の 802.11b ネットワーク上で携帯電話 1 台に 1 秒間隔で ICMP Echo Request, ICMP Echo Reply とその Ack を送信した場合, ネットワーク帯域占有率は 0.14% 程度である. 仮に, 同一アクセスポイント配下に 20 台の携帯電話が存在する場合, ネットワーク帯域占有率は 2.8% となるが, この程度の通信量の増加は十分に許容可能である. また, この方式では携帯電話はエリア推定のための特別なアプリケーションを動作させず, ICMP Echo 信号を送受信するだけでよい. ため, 携帯電話自体の電力消費量も軽減できる.

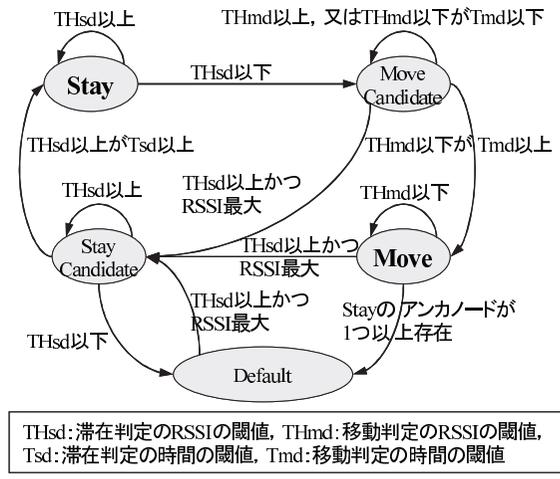
3.3 ユーザの滞在・移動判定方式

屋内環境では, 人や什器の移動などによって伝搬環境が変動し, それにともなって RSSI が時間変動する. その結果, 位置検出精度が一時的に低下し, エリア推定結果が不安定になるという問題が生じる.

本研究では, この課題を解決するために, ユーザの滞在・移動をシステム内で判定し, ユーザが滞在中の場合に複数のアンカノードからの RSSI を利用してエリア推定を行うことで, RSSI の時間変動を抑制する.

ユーザの滞在・移動を高精度に判定する方式として, 電波伝搬特性を用いる方式が提案されている¹⁷⁾. しかしながら, この手法は市販の WLAN デバイスからは取得できない物理パラメータ (マルチパスにおける各パスのチャネルゲインや遅延) を測定しており, 現在普及している WLAN システムにそのまま適用することは難しい. そこで本研究では, 標準の WLAN アダプタで取得可能な RSSI を用いて滞在・移動の判定を行う. 具体的には, 滞在中のユーザが移動した場合に, 携帯電話に最も近いアンカノード (以下, 最近傍アンカノードと記載) の RSSI が大きく低下する性質に着目する. ただしユーザが滞在中であっても, 体の向きの変化や伝搬環境の時間変動により最近傍アンカノードの RSSI が一時的に低下する場合がある. そこで本研究では, 最近傍アンカノードだけではなく, 携帯電話の近傍に存在する複数のアンカノードで取得した RSSI を用いてユーザの滞在・移動を判定する. 具体的には, ユーザの周辺である一定の時間内に RSSI が最大となったアンカノードを携帯電話の近傍に存在するアンカノードとして記録し, これら複数アンカノードから得られる RSSI に関して滞在・移動判定を行う. その後, 各判定結果を総合的に判断して, ユーザの滞在・移動を判定する. 具体的な手法は下記ようになる.

図 3 に各アンカノード単位での滞在・移動判定方式の状態遷移図を示す. 初期状態では各



THsd: 滞在判定のRSSIの閾値, THmd: 移動判定のRSSIの閾値,
Tsd: 滞在判定の時間の閾値, Tmd: 移動判定の時間の閾値

図3 アンカノードの滞在・移動判定方式の状態遷移図

Fig. 3 The state transition diagram of determining the anchor node's state of stay and move.

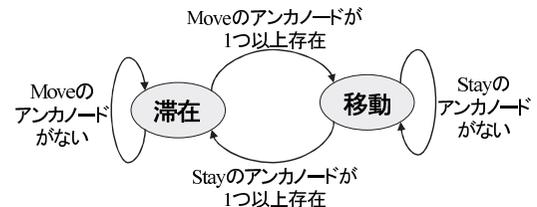


図4 ユーザの滞在・移動判定方式の状態遷移図

Fig. 4 The state transition diagram of determining the user's state of stay and move.

アンカノードは Default 状態にある．全アンカノードの中で，RSSI が最も強く，かつ RSSI が滞在判定の閾値 THsd を上回るアンカノードは Stay Candidate 状態へ遷移する．前述のように RSSI はユーザの向きにより変化するため Stay Candidate のノードは複数存在しうる．Stay Candidate 状態のアンカノードのうち，RSSI がある一定時間以上 THsd 以上となるアンカノードは Stay 状態へ遷移する．一方，Stay 状態のアンカノードのうち，取得した RSSI が THsd 以下となったアンカノードは Move Candidate へ遷移する．さらに，RSSI が移動判定の閾値をある一定時間以上下回った時点でそのアンカノードは Move 状態へと遷移する．あるユーザに関するアンカノードのうち，Stay 状態のアンカノードが 1 つ以上存在すれば，Move 状態のアンカノードは Default 状態へ遷移する．以上のようなアルゴリズムにより，アンカノード単位での滞在・移動判定が行われる．

アンカノード単位での滞在・移動判定が行われた後は，それら判定結果に基づいてユーザの滞在・移動判定が行われる．ユーザの滞在・移動判定の状態遷移図を図 4 に示す．ユーザの滞在・移動判定では，アンカノードの滞在・移動判定で Stay 状態となるアンカノードが 1 つ以上存在すればユーザが滞在中であると判定し，Move 状態となるアンカノードが 1 つ以上存在すればユーザが移動中であると判定する．それ以外の状態であればユーザが前の状態を継続していると判定する．

以上述べたアルゴリズムにより，最近傍アンカノードの RSSI が一時的に低下した場合でも，近傍の他のアンカノードの RSSI が低下しなければ滞在中と判定することができ，ユーザの滞在・移動をロバストに判定することができる．

さらに本研究では，ユーザの滞在・移動判定の結果に基づいて後述するエリア推定で利用する RSSI の履歴数を決定する．具体的には，ユーザが滞在中であれば，滞在中に測定した RSSI の履歴をエリア推定に利用することで，高精度かつ安定的にエリアを推定する．

オフィスにおけるプレゼンスには「会議中」や「デスクワーク中」などがある．これらのプレゼンスが表示される際には，ユーザは「会議室」や「自席」など特定のエリアに一定時間滞在していることが多い．したがって，ユーザが滞在中に安定的なエリア推定ができることは有用である．一方，ユーザが移動中であれば，ユーザのトラッキング能力を優先し，エリア推定に利用する履歴数を少なくする．ユーザが移動中の場合については，RSSI の時間変動を抑制できず，エリア推定結果が不安定となる問題が生じる．これについては次節で述べる RSSI の相対比に基づくエリア推定方式で対処できる．

3.4 RSSI の相対比を用いたエリア推定方式

ユーザが特定のエリアに入った際にメッセージを送信するリマインダサービスでは，エリア単位でメッセージ送信を自動で行うため，正しいエリアを確実に推定しなければならない．特にユーザがエリア間の境界付近に存在するような場合には，ユーザが存在するエリアと隣接するエリアのアンカノード間で RSSI に有意な差が出ないため，エリアの推定結果の確かさが低下する．その一方で，アプリケーション側のロジックは「ユーザが 95%以上の確率でいる場所」といったような推定結果を要求する．このとき，前述のような状況において，単一のエリアを出力するだけではアプリケーションが要求する情報を出力することはできない．このような場合には複数のエリアを束ねて 1 つのエリアとし，そのエリアを要求された精度に対応するエリアとして出力する必要がある．

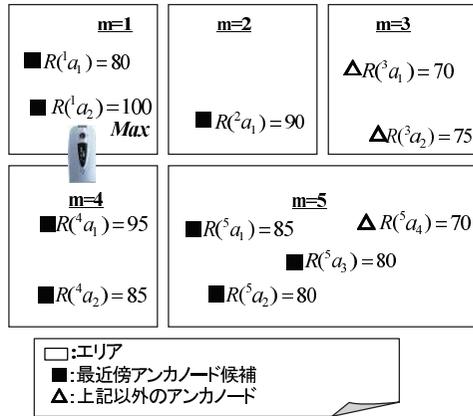


図 5 最近傍候補アンカノードの特定 ($R_c = 20$)
Fig. 5 Identification of neighbor anchor nodes ($R_c = 20$).

これに向けて、あるエリアでの RSSI が他のエリアよりも強いほどそのエリアに存在する可能性が高いことに着目し、本研究ではエリア間での RSSI の相対的な強さを評価基準として、アプリケーションが要求する確度を満たすエリアを出力する手法を提案する。

今、図 5 において、5 つのエリア $m = 1 \sim 5$ を考える。ユーザは $m = 1$ と $m = 4$ の境界付近に存在する。それぞれのエリアにはアンカノードが合計で 11 個配置されており、エリア m に存在する j 個目のアンカノードを ${}^m a_j$ 、その RSSI を $R({}^m a_j)$ とする。また、全アンカノードにおける RSSI の最大値を R_{\max} とする。

ユーザが存在するエリアは理想的には RSSI が最大となるアンカノードが最近傍であるが、前述のようにエリアの境界付近にユーザが存在する場合には、ユーザが存在するエリアを高確度で 1 つに絞ることは難しい。そこで本研究では複数のエリアにまたがって RSSI がある閾値 R_c 以上のアンカノードをユーザの最近傍となりうるノードの候補（最近傍アンカノード候補）とし、それらノード間の相対的な重みを計算することで、存在エリアを特定する。

本方式においては、最近傍アンカノード候補の集合は以下の式により定義される。

$$N = \{ {}^m a_j | R({}^m a_j) \geq R_{\max} - R_c \} \quad (1)$$

たとえば、図 5 は $R_c = 20$ の場合の例であり、エリア $m = 1$ のアンカノード ${}^1 a_2$ の値 (100 dBm) が R_{\max} となる。これより、RSSI が 80 dBm 以上のアンカノードが最近傍アンカノード候補となる (図 5 中の \blacksquare で表示されているアンカノード)。

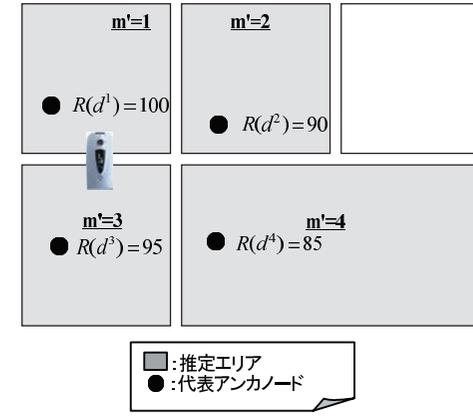


図 6 存在エリア候補と代表アンカノードの特定
Fig. 6 Identification of candidate area and its representative anchor nodes.

このようにして最近傍アンカノード候補を決定すると、ユーザが存在するエリアの候補は $m = 1, 2, 4, 5$ の 4 つのエリアに絞られる (存在エリア候補)。ここで問題となるのは、アプリケーションが要求する確度を満たすエリアがどのエリアになるかを判定する方法である。

本研究ではこれを以下のような方法で決定する。まず、最近傍アンカノード候補を有する複数のエリアのそれぞれにおいて、代表アンカノードを以下の式により定義する。

$$R(d^m) = \max({}^m a_1, \dots, {}^m a_i) \quad (2)$$

ここで ${}^m a_1, \dots, {}^m a_i$ はエリア m の最近傍アンカノード候補とする。

たとえば、図 5 における、 $m = 1, 2, 4, 5$ のエリアにおいて、 ${}^1 a_2, {}^2 a_1, {}^4 a_1$ 、および ${}^5 a_1$ が代表アンカノードとして特定される。

今、図 6 に示すように変数を再定義する。図 6 において、 $m' = 1 \sim 4$ のエリアは存在エリア候補であり、 $d^{m'}$ および $R(d^{m'})$ は存在エリア候補 m' における代表アンカノードとその RSSI である。この定義の下、以下の式によりそれぞれの代表アンカノードの相対的な重みを計算する。

$$P(m') = \frac{R(d^{m'})}{\sum_{k=1}^K R(d^k)} \quad (3)$$

ここで K は存在エリア候補の総数である。

このようにして $P(m')$ を求めた後、ある閾値 P_c を超える存在エリア候補（複数）をユーザの存在エリアとして出力する。閾値 R_c および P_c はアプリケーションが要求する精度に基づいて設定する。これは本来、各対象環境における伝搬環境に影響を受けるが、提案方式ではアンカノードの空間的に密な配置や、ユーザの滞在・移動判定に基づく RSSI の履歴数決定により、伝搬環境の変動を抑制している。さらに、相対比を用いたエリア推定により、伝搬環境の変動に起因する RSSI の変動によってエリア推定の精度が変動しないように設計している。そのため、ある環境であらかじめ測定しておいた閾値 R_c および P_c と精度との対応関係を他の環境でも利用することが可能である。この点に関する具体的な結果については、4 章で示す。

4. 実装と評価

設計した位置情報システムの性能を評価する目的で、システムのプロトタイプ実装と評価実験を行った。評価実験ではまず、提案システムの基本的な性能を評価するために仕器が存在しない理想的な環境において実験を行った。その後、実環境での提案システムの性能を明らかにするために実際のオフィスで実験を行った。これらに加え、携帯電話の消費電力についても評価を行った。

4.1 実装

実装においては Buffalo 製 WLI-U2-KAMG54 をアンカノードとして利用し、Monitor モードで動作できるようデバイスドライバを改良した。このアンカノードを市販の小型 PC に接続し、Java で実装された RSSI 取得機能を PC で実行した。エリア推定サーバは Core 2 Duo プロセッサ、メモリ 2GB の PC を利用し、滞在・移動判定機能、エリア推定機能を Java で実装した。携帯電話は N900iL¹⁰⁾ および N902iL¹¹⁾ を利用した。

4.2 理想的な環境での評価

この評価では仕器などが存在しないオフィス空間に実装したプロトタイプシステムを展開し、滞在・移動判定の精度、およびエリア推定における精度と分解能（エリア推定精度）に関する評価を実施した。

図 7 に評価環境の実験配置図を、図 8 に評価環境と実装したアンカノードを示す。実際のオフィス環境では、仕器の配置などによりアンカノード間の距離、ユーザとアンカノードの距離や位置関係は変化する。そこでエリア推定の評価を行ううえで、アンカノード間の距離 d_{a-a} 、携帯電話と最近傍アンカノード間の距離 d_{m-a} 、携帯電話と最近傍アンカノード

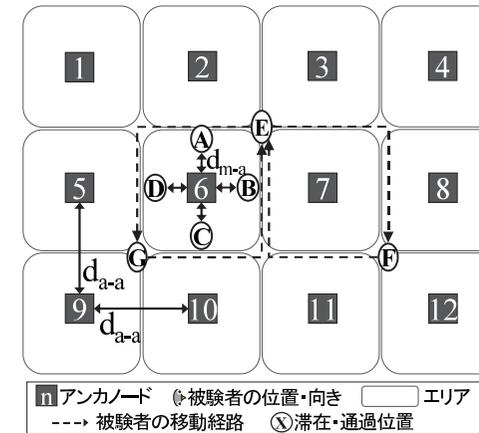


図 7 理想的な環境での実験配置図
Fig. 7 An experimental layout in the ideal environment.

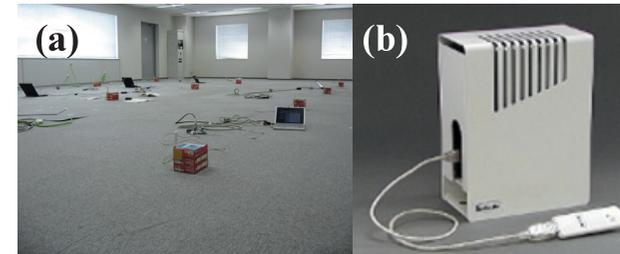


図 8 (a) 実験環境, (b) アンカノード
Fig. 8 (a) The picture of the ideal experimental environment, (b) The picture of anchor node.

間の位置関係（図 7 の A ~ D）を変化させた。被験者は N902iL を胸ポケットに携帯した状態で、図 7 の A で 2 分間滞在し、その後 E→F→E→G→E→B の経路に従って移動し、B で 2 分間滞在した。以降 C, D の順で移動・滞在を繰り返した。この条件下、1 秒間隔で滞在・移動判定とエリア推定を実施する。

滞在・移動判定方式の判定精度は F 値で評価を行っている。F 値は適合率と再現率の調和平均である。エリア推定における精度は推定結果に正解エリアが含まれていれば正解とし、推定数における正解数の割合で算出している。分解能は推定結果に含まれるエリア数の平均値とした。実験の諸元を表 1 に示す。

表 1 エリア推定性能評価実験諸元

Table 1 Specification of estimation performance evaluation.

(d_{a-a}, d_{m-a})	(2m, 0.5m), (2m, 1m), (3m, 0.5m), (3m, 1m), (3m, 1.5m), (4m, 0.5m), (4m, 1m), (4m, 1.5m), (4m, 2m)
ICMP Echo Request 送信周期	1 秒
移動速度	約 1m/秒
THmd, THsd	70dBm, 75dBm, 80dBm, 85dBm
Tmd, Tsd	1 秒, 2 秒, 3 秒, 4 秒, 5 秒, 6 秒, 7 秒, 8 秒, 9 秒, 10 秒
Rc	5dBm, 10dBm, 15dBm
Pc	0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100
移動時に利用す る履歴時間	2 秒
滞在時に利用す る履歴時間	20 秒

図 9 に滞在・移動判定の判定精度を示す．図 9 では各 (d_{a-a}, d_{m-a}) における F 値の平均値が上位 20 の結果を示している．評価結果より， $THmd = 80$ dBm， $THsd = 80$ dBm， $Tmd = 1$ 秒， $Tsd = 6$ 秒のときに各 (d_{a-a}, d_{m-a}) における F 値の平均値が 86% と最も高くなった．また， $THsd$ 以外はパラメータが多少変動しても，F 値は 80% 以上であった．各 (d_{a-a}, d_{m-a}) で F 値が大きく低下しなかった理由として，最近傍アンカノードとの距離 d_{m-a} については短い方が RSSI は高くなるが，最近傍アンカノードから離れたときの RSSI は (d_{a-a}, d_{m-a}) に依存せず同程度に低下するためであると考えられる．

次に，滞在・移動判定で F 値が最も高かったパラメータを利用して，エリア推定の評価を行った．評価結果を図 10 に示す．エリア推定の精度が最も高いのは $Rc = 15$ ， $Pc = 90$ の場合で精度は 100%，平均エリア数は 5.0 となった．また $Rc = 5$ ， $Pc = 70$ の場合，精度は 97%，平均エリア数は 1.6 であった．なお RSSI が最大のアンカノードに対応するエリアを推定結果とする場合，精度は 90%，平均エリア数は 1.0 であった．

Rc が大きい ($Rc = 15$) 場合には，最近傍候補アンカノードに正解エリアのアンカノード

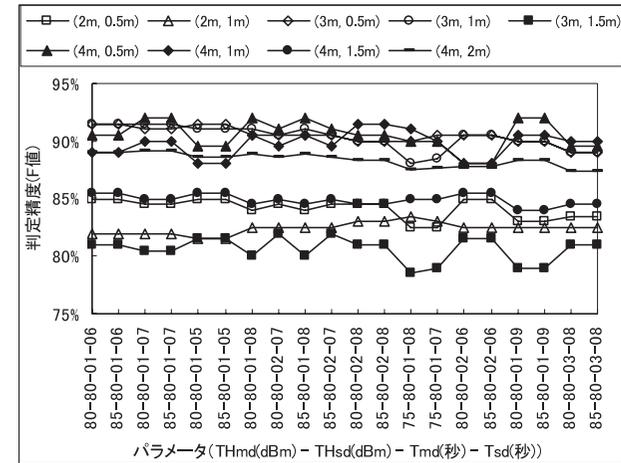


図 9 各 (d_{a-a}, d_{m-a}) における滞在・移動判定の実験結果

Fig. 9 Experimental result of classifying user situations of move or stay in each (d_{a-a}, d_{m-a}) .

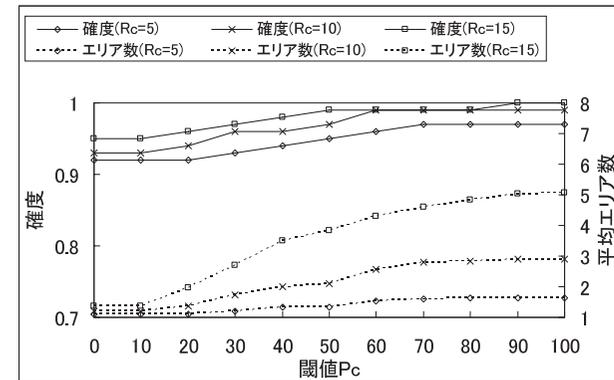


図 10 理想環境におけるエリア推定の実験結果

Fig. 10 Experimental result of area estimation in ideal environment.

を含むことができるため， Pc を上げることにより精度が上がるが，他の近傍エリアのアンカノードも多く含まれるため平均エリア数は多くなってしまふ．一方 Rc が小さい ($Rc = 5$) 場合には，一部で正解エリアを取りこぼすケースがあるものの，周辺エリアのアンカノードを排除することができるため，平均エリア数を少なくすることができる．つまり精度を高

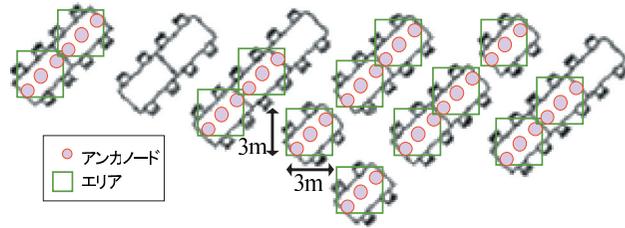


図 11 実オフィスでの実験配置図
Fig. 11 Experimental layout in actual office.



図 12 実オフィスでの実験環境
Fig. 12 An experimental environment in actual office.

くするためには R_c を大きくすればよく、分解能を高くするためには R_c を小さくすればよい。また、 P_c を上げることにより、精度および平均エリア数も上昇する。 $P_c = 70$ 以降については、 $R_c = 15$ の場合のみ精度が 1% 上昇しただけであるが、平均エリア数はすべて上昇している。つまり P_c を 70 程度に設定することにより、存在エリア候補のうち正解エリア以外のエリアのみを効果的に除外し、エリア数増による分解能低下を抑制できているといえる。

4.3 実オフィスでの評価

次に、実オフィス環境での評価を行った。実オフィス環境は理想環境と異なり、対象空間内にはパーティションや机などの什器が存在し、人や物の移動もあるため、伝搬環境が時間的に変動する。そのため RSSI の変動も大きく、信頼性が低下しやすい。

実験環境のレイアウトおよび写真をそれぞれ図 11、図 12 に示す。図 11 において被験者は N900iL 1 台を胸ポケットに携帯し、各エリアで対角線上に 2 座席ずつ、計 26 カ所について 2 分間着席した。1 つのエリアは 3 m 四方であり、着席時の最近傍アンカノードとの距離は約 1 m である。また各エリアには 3 つのアンカノードが存在する。

このような環境で 1 秒ごとに滞在移動判定を行い、滞在移動判定に基づいてエリア推定に用いる RSSI の履歴数を決定する。その後、エリア推定を実施し、その性能評価を行った。なお、滞在移動判定の際のパラメータは理想的な環境において最も評価の高かったパラメータ： $THmd = 80$ dBm, $THsd = 80$ dBm, $Tmd = 1$ 秒, $Tsd = 6$ 秒を採用した。ICMP Echo Request 送信周期, R_c , および P_c は前節の評価実験と同様である。

実験結果を図 13 に示す。理想環境で最も精度の高かった $R_c = 15$, $P_c = 70$ の場合で精度は 100%、平均エリア数は 5.1 であった。また $R_c = 5$, $P_c = 70$ の場合、精度は 95%、平均エリア数は 1.9 であった。なお $R_c = 0$ の場合、すなわち RSSI が最大のアンカノードに

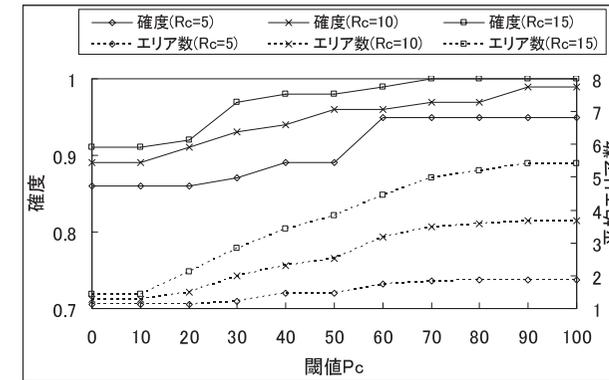


図 13 実オフィスでのエリア推定の実験結果
Fig. 13 Experimental result of area estimation in actual office.

対応づけられたエリアを推定結果とする場合、精度は 83%、平均エリア数は 1.0 であった。

Ogawa らの研究¹³⁾ と比較すると、本研究が提案する位置情報システムは 1 エリア単位のアンカノード数が 3 倍となるものの、事前に統計モデルを構築することなく、精度が 70% から 83% に向上している。

アンカノードを空間的に密に配置することにより、エリアの分解能を最も高くした場合で

表 2 N902iL の駆動時間
Table 2 Battery life of N902iL.

ICMP Echo Request 送信周期	駆動時間
1 秒	7 日 7 時間
5 秒	13 日 8 時間
10 秒	15 日 9 時間

も 83%の確度で特定することができ、ユーザがプレゼンスを確認するうえでは十分な確度であるといえる。またリマインダサービスのように、より高い確度が要求されるサービスに対しては、 $P_c = 70$ に設定したうえで、 R_c を要求される確度に応じて設定することで、確度を向上させることが可能である。したがって本研究が提案する位置情報システムを用いることで、実用的なプレゼンスシステムを提供可能であるといえる。

実オフィス環境での結果を理想環境での結果と比較すると、閾値 P_c の適切な値について、 $P_c = 70$ 以降は $R_c = 10$ の場合のみ確度が 2%上昇するのに対して、平均エリア数は増大しており、理想環境と同様の結果が得られていることが分かる。また、 $P_c = 70$ とした場合の各 R_c に対する確度およびエリア数について、理想環境における確度との差は 1~2%とほぼ同等であったが、平均エリア数は 0.3~0.7 増大し、分解能は低下した。

以上の結果から、3.4 節で述べたように、相対値を利用することで、確度については対象環境に依存せずに適切な P_c や R_c を設定可能なことが確認できる。一方、分解能については理想環境と比較して実オフィス環境の方が低下する。これは実オフィス環境においてはマルチパスその他の伝搬環境の影響で、最も RSSI の大きな代表アンカノードとそれ以外の代表アンカノードの RSSI の差が、理想環境に比べて小さくなり、式 (3) において存在エリア候補数が大きくなるためである。すなわち、本研究が提案する位置情報システムは、分解能の劣化を許容することで、環境に依存せずに確度を維持できるシステムといえる。

4.4 携帯電話の消費電力評価

最後に、提案方式を利用した場合の携帯電話の消費電力を評価した。具体的には、N902iL を充電後、ICMP Echo Request を送信し、電池残量が 0 になるまでの時間を計測した。ICMP Echo Request の送信間隔は、1 秒、5 秒、10 秒とした。なお WLAN はパワーセーブモードで動作させ、AP の Beacon 周期と DTIM については、実際のオフィスで設定されている値を参考に、それぞれ 100 ミリ秒と 10 とした。

表 2 に実験結果を示す。実験結果より ICMP Echo Request を 1 秒周期に送信しても携

帯電話は 7 日間駆動可能であることが分かる。これは携帯電話が通常数日おきに充電されることを考えると実用的な範囲であると考えられる。

5. おわりに

本論文では、プレゼンスシステムの実現に向けて、WLAN を用いた高精度かつ安定的な位置情報システムを提案した。提案システムでは、ユーザの負担を軽減するために測位対象の端末として WLAN 搭載の携帯電話を利用し、携帯電話から送信された信号の RSSI を取得するアンカノードを空間的に密に配置することで、RSSI の距離分解能を向上させた。また RSSI の時間変化に基づいてユーザが滞在中か移動中かを判定し、判定結果に基づいてエリア推定に利用する RSSI 履歴数を変更することで、高精度かつ安定的なエリア推定を可能にした。さらに、サービスが要求する確度を満たすエリアを特定するために、RSSI の相対比を用いたエリア推定方式を提案した。

今後は本論文で提案した位置情報システムを利用したプレゼンスサービスの開発を進め、アプリケーションの観点からも評価を進めていく予定である。

参 考 文 献

- 1) AirLocation. <http://www.hitachi.co.jp/wirelessinfo/airlocation/index.html>
- 2) Bahl, P. and Padmanabhan, V.: RADAR: An In-Building RF-Based User Location and Tracking System, *Proc. IEEE INFOCOM 2000*, pp.775-784 (2000).
- 3) Bandara, U., et al.: Design and Implementation of a Bluetooth Signal Strength Based Location Sensing System, *Proc. IEEE Radio and Wireless Conference 2004*, pp.319-322 (2004).
- 4) Ekahau. <http://www.ekahau.com/>
- 5) Hightower, J. and Borriello, G.: Location systems for ubiquitous computing, *IEEE Computer*, Vol.34, No.8, pp.57-66 (2001).
- 6) Ipina, D.L., Mendonsa, P.R. and Hopper, A.: TRIP: A Low-cost Vision-Based Location System for Ubiquitous Computing, *Personal and Ubiquitous Computing*, Vol.6, Issue 3, pp.206-219 (2002).
- 7) ITU-R P1238-4, Propagation data and prediction methods for the planning of indoor radio communication systems and radio local area networks in the frequency range 900 MHz to 100 GHz, ITU-R Recommendations, P series (2005).
- 8) Kitasuka, T., Hisazumi, K., Nakanishi, T. and Fukuda, A.: WiPS: Location and Motion Sensing Technique of IEEE 802.11 Devices, *Proc. 3rd Int'l Conf. on Information Technology and Applications*, Vol.2, pp.346-349 (2005).

- 9) Kitasuka, T., Nakanishi, T. and Fukuda, A.: Wireless LAN based Indoor Positioning System WiPS and Its Simulation, *Proc. IEEE Pacific Rim Conf. on Communications, Computers and Signal Processing*, pp.272-275 (2003).
- 10) N900iL.
http://www.nttdocomo.co.jp/product/related/archive/concept_model/n900il/
- 11) N902iL. <http://www.docomo.biz/html/product/cordless/n902il/index.html>
- 12) Nissanka, B.P., Anit, C. and Hari, B.: The Cricket Compass for Context-Aware Mobile Applications, *Proc. 7th ACM MOBICOM*, pp.1-14 (2001).
- 13) Ogawa, T., et al.: A New In-Door Location Detection Method Adopting Learning Algorithms, *Proc. IEEE Int'l Conf. on Pervasive Computing and Communications*, pp.525-530 (2003).
- 14) UNIVERGE ActivePhoneBook. <http://www.nec.co.jp/apex/activephonebook/>
- 15) Want, R., et al.: The active badge location system, *ACM Trans. Information Systems*, Vol.10, pp.91-102 (1992).
- 16) Yu, K. and Oppermann, I.: Performance of UWB Position Estimation Based on Time-of-Arrival Measurements, *Ultra Wideband Systems*, pp.400-404 (2004).
- 17) Zhang, J., Firooz, M.H., Patwari, N. and Kaser, S.K.: Advancing wireless link signatures for location distinction, *Proc. 14th ACM Int'l Conf. on MobiCom '08*, pp.26-37 (2008).
- 18) 高橋一成, 桑田喜隆: プレゼンスサービスを活用したオフィスのコラボレーション支援, *情報処理学会論文誌*, Vol.48, No.1, pp.2-15 (2007).
- 19) モバイルセントレックスの現実, *日経コミュニケーション*, 2006/12/01号, pp.50-64 (2006).

(平成 20 年 12 月 9 日受付)

(平成 21 年 5 月 13 日採録)



山田 直治 (学生会員)

平成 13 年京都大学工学部情報学科卒業。平成 15 年同大学大学院情報学研究科社会情報学専攻修士課程修了。平成 15 年 (株) NTT ドコモ入社。現在, 東京大学先端科学技術研究センター博士課程に在籍。行動推定技術開発, およびそれを用いたサービス開発に従事。電子情報通信学会会員。



磯田 佳徳 (正会員)

平成 3 年大阪大学基礎工学部制御工学科卒業。平成 5 年同大学大学院工学系研究科システム工学専攻博士前期課程修了。同年日本電信電話 (株) 入社。同社ヒューマンインタフェース研究所にて知能ロボットに関する研究に従事。平成 11 年より (株) NTT ドコモ勤務。現在, 同社サービス&ソリューション開発部にて行動推定技術を利用したサービス開発に従事。

日本ロボット学会会員。



南 正輝 (正会員)

平成 8 年芝浦工業大学工学部電子工学科卒業。平成 10 年同大学大学院工学研究科電気工学専攻修士課程修了。平成 13 年東京大学大学院工学系研究科電子情報工学専攻博士課程修了。工学博士。平成 18 年スイス・ローザンヌ連邦工科大学客員研究員。平成 15~19 年芝浦工業大学工学部講師。現在, 東京大学先端科学技術研究センター准教授。電子情報通信学会論文賞, 電子情報通信学会奨励賞各受賞。IEEE, 電子情報通信学会各会員。



森川 博之 (正会員)

昭和 62 年東京大学工学部電子工学科卒業。平成 4 年同大学大学院博士課程修了。現在, 同大学先端科学技術研究センター教授。工学博士。平成 9~10 年コロンビア大学客員研究員。平成 14~18 年情報通信研究機構モバイルネットワークグループリーダー兼務。ユビキタスネットワーク, 無線ネットワーク, モバイルコンピューティング, フォトニックインターネット等の研究に従事。電子情報通信学会論文賞 (2 回), 情報処理学会論文賞, 情報通信功績賞等受賞。電子情報通信学会フェロー。平成 18~19 年電子情報通信学会編集理事。平成 20 年~電子情報通信学会情報ネットワーク研究専門委員会委員長, 電子情報通信学会通信ソサイエティ英文論文誌編集長。IEEE, ACM, ISOC, 電子情報通信学会, 映像情報メディア学会各会員。