

参照用無線機を用いた電波環境変動に対して頑健な無線 LAN 位置検知方式 - e 空間実現のための人口ログ収集技術の研究 -

Development of Robust Wi-Fi Positioning System against Changing RF-field using Reference Terminals - Human-log Gathering System for Development of e-Space On-site Service -

小西 勇介†
Yusuke KONISHI

中尾 敏康†
Toshiyasu NAKAO

1. はじめに

近年のモバイルデバイス技術や移動体通信環境の急速な発達と普及により、移動体の位置情報の取得/活用に注目が集まると共に、多くの位置検知方式が提案され実用化が進んでいる^[1-8]。特に、携帯電話を始めとしたモバイル端末への GPS、無線 LAN もしくは携帯電話基地局を用いた位置検知機能の標準搭載が急速に進んでおり、位置情報に基づいた様々なサービスが広く普及している。しかしながら、これらのような無線通信システムを利用した位置検知機能では、環境内の人やモノの動き、基地局の配置変更、端末の持ち方やアンテナ指向性などの様々な原因に基づく無線通信状況の変動によって、位置検知性能が不安定になってしまうという問題がある。

このような問題に対して、環境に設置した参照用の無線機（以下、参照局）を用いて、移動体に取り付けた無線機（以下、移動局）の位置検知を高精度化する技術がこれまでも提案されている。Niらは、環境に設置した複数の基地局で得られる移動局および参照局に関する電波強度を比較することにより、移動局の位置座標検知を高精度化する技術を提案している^[9]。小川らは、あらかじめ学習させておいた各エリアの無線通信状況と、移動局で計測される無線通信状況とを比較することにより、移動局の存在エリア検知を高精度化する技術を提案している^[10]。しかしながら、これらの従来技術では、環境内の動的な障害物や移動体への無線機の取り付け方などによる、無線通信状況の変動が十分に考慮されておらず、参照局と移動局で計測される状況間の違いが大きくなる場合に、移動局の位置を正しく検知できないことがあった。

そこで我々は、このような無線通信状況の変動がある場合でも移動局の位置をロバストに正しく検知できる技術の開発に取り組んでいる。

2. 研究の狙い

従来、無線を用いた位置検知技術を実環境で運用するにあたっては、主に以下の二点が大きな課題となっていた。

- **無線通信状況の変動により性能が安定しない**
様々な利用条件（マルチパス、電波雑音、無線機の持ち方・設置方法、障害物など）の変化によって、無線通信状況が変動し、位置検知の性能が安定しない。
- **基地局の設置位置により性能が制限される**
例えば、セル ID ベースの位置検知システムでは、基地局の設置位置によって検出される位置（エリア）が自ずと

決定され、かつ、基地局の設置位置は通信インフラとしての要件などの観点から決まっており自由に変更できないことが一般的であるため、自由なエリア設計が困難である。

そこで我々は、従来技術におけるこれら二点の課題を鑑みて、特に無線通信システムを用いたエリア単位での位置検知（以下、エリア検知）技術に着目し、位置分解能は数 m 程度とするが、無線通信状況の変動に対して頑健に移動局の存在エリアを検知できるシステムの開発を目指している。

これまでに、環境にあらかじめ設置した参照用の無線機を活用したエリア検知方式の開発に取り組み、アクティブ RFID や無線 LAN を対象にしたプロトタイプシステムを構築して実環境でその性能を評価してきた^[11,12]。本稿では、参照局と共に、あらかじめ環境内の各地点で取得した無線通信状況も活用することにより、エリア検知をさらに高精度化する方式を提案する。また、提案方式を無線 LAN に適用して iPhone 用アプリケーション「pin@clip」向けに実装し、大型店舗内において利用者の売場への立寄りログを収集する実証実験を行ったので報告する。

3. 参照用無線機を用いたエリア検知方式

これまでに開発してきた方式^[11,12]では、参照局で計測された無線通信状況を各エリアの特徴量とし、移動局で計測された無線通信状況と比較することにより、移動局の存在エリアを検知する。実環境での評価実験を通じて、開発方式により、無線通信状況変動によるエリア検知精度の劣化を低減できることを確認してきた。しかしながら一方で、各エリアの特徴量を参照局のみを用いて取得するため、エリア検知精度をさらに向上させようとすると、多くの参照局が必要になってしまうという問題があった。

そこで本稿ではさらに、あらかじめ各エリアで取得した無線通信状況（以下、キャリブレーションデータとする）を利用することにより、参照局を増やさずにエリア検知精度を向上できる方式を提案する。

3.1. システム構成

本方式による位置検知システムは、環境にあらかじめ設置された「基地局」、設定したエリア毎に設置する「参照局」、および、位置検知対象に取り付ける「移動局」の三つの役割を持つ無線機と位置検知サーバで構成される。基地局と参照局の間、および、基地局と移動局の間では、どちらか一方が送信した無線信号を他方が受信した際の電波強度（以下、信号強度とする）を計測できるものとする。このとき、これら三つの無線機の役割が、無線信号を送信する機能と受信する機能のどちらで実現されるかは、使用する無線通信システムによって異なり、表 1 に示した二通りのシステム構成が考えられる。

† NEC サービスプラットフォーム研究所,
Service Platforms Research Labs., NEC Corp.

表1 システム構成

	基地局	移動局	参照局	無線システム例
構成1	受信機	送信機	送信機	アクティブRFIDなど
構成2	送信機	受信機	受信機	無線LAN, 携帯電話など

構成1と構成2は、それらを構成する無線機それぞれについて、送信と受信の機能を入れ替えた構成となっている。構成1と構成2のいずれでも、位置検知サーバは、基地局の識別情報、移動局もしくは参照局の識別情報、および、信号強度の組(以下、信号特徴量)を受け取ることとなる。

3.2. 処理の流れ

位置検知サーバは、移動局と参照局に関して得られた信号特徴量を元にしたパターンマッチングにより移動局の存在エリアを推定する。処理の流れを図1に示す。

本提案方式では、まず、あらかじめ定義した各エリアにおいて移動局を用いてキャリブレーションデータを取得する(以下、学習フェーズとする)。実際に移動局の存在エリアを検知する際(以下、運用フェーズとする)には、学習フェーズで取得したキャリブレーションデータと参照局に関して得られた無線通信状況から各エリアの特徴量(エリア特徴量)を生成し、生成したエリア特徴量と移動局に関して得られた無線通信状況との間の近接性に基づいて移動局の存在エリアを検知する。

以降では、特徴ベクトルの生成方法、および、学習フェーズと運用フェーズの処理内容について説明する。

・特徴ベクトルの生成

基地局と参照局間、および、基地局と移動局間に関して得られた信号特徴量を、それぞれ、参照局および移動局毎にまとめて特徴ベクトルを生成する(以下、それぞれ参照局特徴ベクトルおよび移動局特徴ベクトルとする)。ここで、環境内に設置された全 n 台の基地局を BS_1, BS_2, \dots, BS_n 、基地局 BS について得られた信号強度を $RSSI_{BS}$ とおくと、ある参照局もしくは移動局に関する特徴ベクトル x は、以下のように表される。

$$x = (RSSI_{BS_1}, RSSI_{BS_2}, \dots, RSSI_{BS_n})^T$$

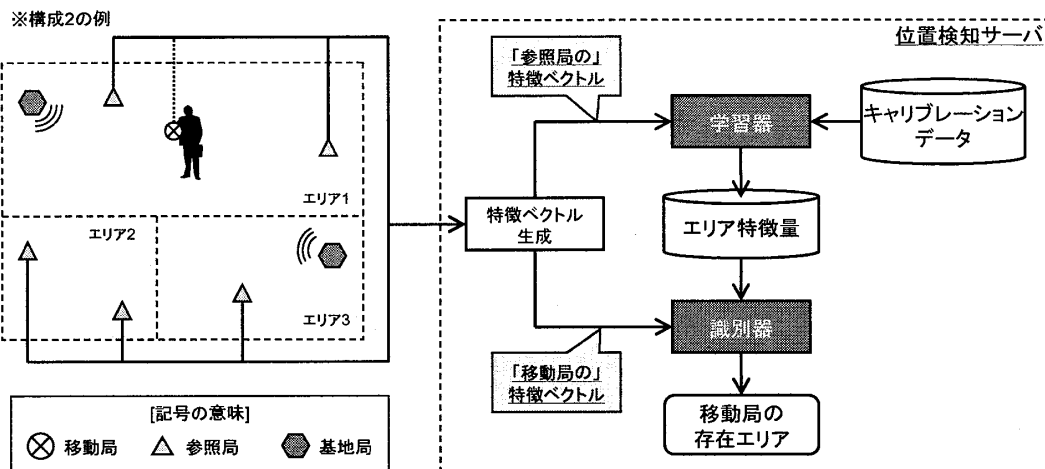


図1 処理の流れ

・学習フェーズ

あらかじめ定義した各エリアで移動局を用いて m 個のキャリブレーションデータ $C = \{c_1, c_2, \dots, c_m\}$ を取得する。キャリブレーションデータ c_i は、 c_i 取得時に移動局が存在していたエリア a_i と、 c_i 取得時の移動局特徴ベクトル x_i から c_i 取得時に a_i に設置された参照局に関して得られた参照局特徴ベクトル r_i を差し引いた特徴量 d_i (基地局毎の信号強度値差の配列)の組であるとし、以下の式で求められるものとする。

$$c_i = \{a_i, x_i - r_i\} = \{a_i, d_i\}$$

・運用フェーズ

あらかじめ取得しておいた m 個のキャリブレーションデータ C から m 個のエリア特徴量 $P = \{p_1, p_2, \dots, p_m\}$ を生成しエリア検知に利用する。ここで、 i 番目のエリア特徴量 p_i は、エリア検知時に a_i に設置された参照局に関して得られた参照局特徴ベクトル r'_i を用いて以下の式で求められる。

$$p_i = \{a_i, r'_i + d_i\} = \{a_i, r'_i + x_i - r_i\}$$

すなわち、エリア特徴量は、あらかじめ取得しておいたキャリブレーションデータと、エリア検知時の参照局特徴ベクトルの和として生成される。

エリア検知時にはまず、得られた移動局特徴ベクトルと m 個のエリア特徴量それぞれとの間の近接性に基づいて、移動局特徴ベクトルに最も近い方から k 個($k \leq m$)のエリア特徴量を抽出する。次に、抽出された k 個のエリア特徴量について、対応するエリア識別子毎の個数を集計し、最も個数の多い(すなわち、最も多く含まれる)エリア識別子 a_{out} をエリア検知結果として出力する。ただし、エリア識別子が対応付けられていないエリア特徴量の個数が最も多かった場合、もしくは、最も個数の多いエリア識別子が複数あった場合には、エリア検知結果を信頼できないと判断しエリア検知結果を出力しないこととする。

以上で説明した位置検知方式を採用し、参照局に関して得られた無線通信状況だけでなく、キャリブレーションデータも合わせて活用することにより、エリア内の無線通信状況をより詳細に反映したエリア特徴量を生成できる。ま

た、キャリブレーションデータをそのままエリア特徴量とするのではなく、参照局に関して得られた無線通信状況を用いてエリア特徴量を逐次更新することにより、エリア特徴量に無線通信状況の変動を反映させることができ、無線通信状況の変動による検知精度の劣化を低減することができる。

3.3. 実装

提案方式を無線 LAN に適用して iPhone 用アプリケーション「pin@clip」向け機能として実装した。

提案方式を無線 LAN へ適用するに当たっては、環境内に設置されている無線 LAN アクセスポイント、および、無線 LAN システムにおけるビーコンを受信する無線 LAN 端末として、各エリアに設置する無線 LAN 機能搭載センサ端末（以下、センサポスト）とユーザに所持させる iPhone を利用する。これらによるシステム構成は、表 1 に示した構成 2 に相当するものであり、「基地局」として無線 LAN アクセスポイントを、「参照局」としてセンサポストを、「移動局」として iPhone を、それぞれ利用することとなる。使用した機器の外観を図 2 に示す。

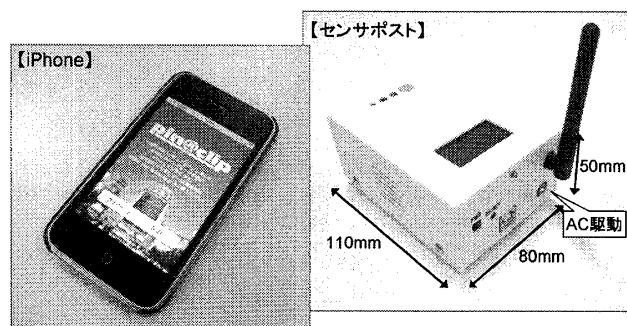


図2 使用した無線 LAN 機器

ここで、使用した iPhone およびセンサポストに搭載された無線 LAN 機能は、共に IEEE802.11b/g に対応したものである。これらの無線 LAN 端末で取得した計測データ（検出したアクセスポイントの MAC アドレスと、アクセスポイントからビーコンを受信した時の信号強度）は、iPhone からはパケット通信網を、センサポストからは無線 LAN 通信網を、それぞれ用いて WEB API 経由で位置検知サーバへ送信される。位置検知サーバは、受信した計測データに基づいて移動局の存在エリアを推定し、推定結果に対応するエリア識別子を、iPhone から WEB API への HTTP リクエストに対するレスポンスとして出力する。

4. 評価

「pin@clip」実証実験では、開発機能を用いて大型店舗内における利用者の売場への立寄りログを収集した。ここで、売場とは同一の商品カテゴリで構成されるエリアであるとし、店舗の 7 フloor 内に計 22 個のエリアを、それぞれ 3~5m サイズとなるよう設計した。本実証実験の中で、提案方式の性能を評価する実験を実施したので報告する。

まず、大型店舗内に設置したセンサポストで取得された無線 LAN 通信状況の計測結果例を図 3 に示す。これらは、大型店舗内のある売場に設置したセンサポストで計測された結果のうち、ある 4 つのアクセスポイントに関するビーコンの受信信号強度について、ある 1 ヶ月間における 1 日

平均値の変動、および、ある 1 日における 20 分毎平均値の変動を集計したものである。

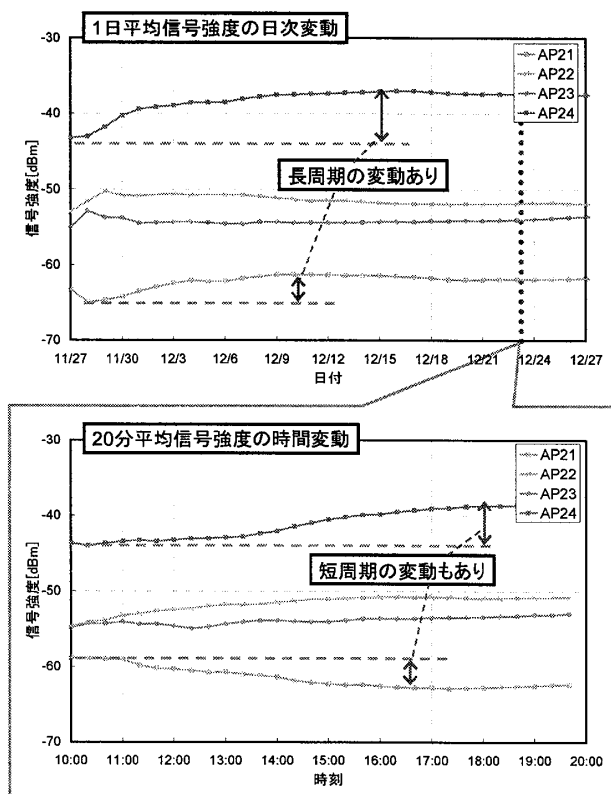


図3 無線 LAN 通信状況の変動

図 3 では、無線 LAN 端末で計測された受信信号強度が、数日から数十日の周期で 1 日毎の平均値が大きいきときには 10dBm 近く変動し、かつ、その 1 日の中でも、20 分毎の平均値が大きいきときには 5dBm 以上変動していることが分かる。このように、実環境における無線 LAN 通信状況には、1 日の中で数 dBm から 5dBm 程度、長期間にわたるとより大きな変動が発生する可能性がある。ここで、障害物が一切存在しない自由空間を仮定した場合、受信信号強度が 10dB 変動するという事は、無線送受信機間の距離が約 3 倍変動していることに等しい。無線通信システムを利用した位置検知技術においては、このような無線通信状況の変動が、性能劣化の大きな要因となっていることが分かる。

次に、以下に説明する学習フェーズおよび運用フェーズの条件に従って収集したデータに基づいて、提案方式のエリア検知性能を評価した。

・学習フェーズ

7 フloor 全体からできるだけ均等な密度となるよう選択した 235 地点において、iPhone を用いて 4 回ずつ無線 LAN 通信状況を取得し、キャリブレーションデータとした（計 940 個）。ただし、このうち、設定した 22 個のエリアに含まれる地点で取得されたキャリブレーションデータには対応するエリアの識別子を登録し、それ以外のキャリブレーションデータにはエリアの識別子を登録しないこととした。その結果、エリア識別子を有するキャリブレーションデータは計 212 個となり、他の 728 個についてはエリア識別子を持たないキャリブレーションデータとなった。

・運用フェーズ

学習フェーズとは別の日(1ヶ月後)に、7フロア全体からできるだけ均等な密度となるよう選択した134地点(学習フェーズの235地点とは独立に選択)において、iPhoneを用いて2回ずつ無線LAN通信状況を取得し、評価用のデータとした(計268個)。取得した全評価用データを用いて提案方式と従来方式のそれぞれでエリア検知を実行し、エリア検知の適合率(全エリア検知回数に対する正解した回数の割合)および再現率(エリアに存在していた検出回数に対する正解した回数の割合)を集計し比較した。ここで、従来方式としては、学習フェーズで取得したキャリブレーションデータをそのままエリア特徴量とする方式を採用した。

提案方式および従来方式の双方で、パラメータ k を{1, 3, 5, 7, 9}の範囲で変化させたときの適合率および再現率を集計した結果を図4に示す。

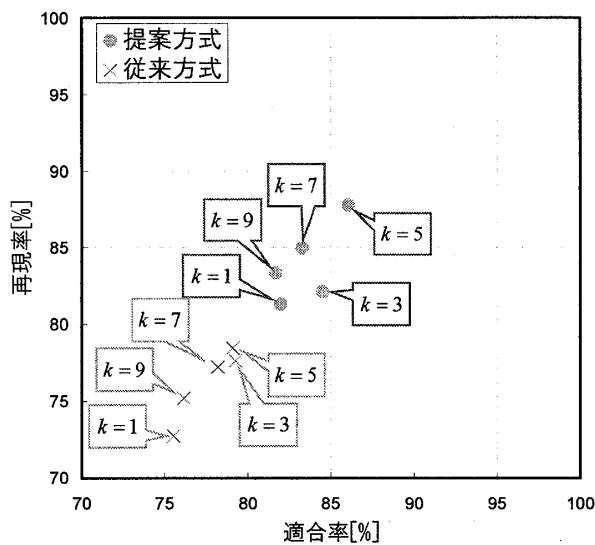


図4 エリア検知性能 (適合率と再現率)

提案方式では、 $k=5$ のときに、適合率 86.1%、再現率 87.8% (従来方式では、適合率 79.1%、再現率 78.5%) となった。また、 k の値によらず、提案方式により従来方式に比べて適合率および再現率の双方を改善できており、平均すると、適合率で 5.9%、再現率で 7.6%性能を改善できていた。キャリブレーションデータだけでなく参照局も活用してエリア特徴量を逐次更新する提案方式によって、電波環境変動による性能劣化を低減できたと考えられる。

他方、 k の値によってエリア検知性能(適合率および再現率)にばらつきが認められる。本評価では、22個のエリアに対して計212個、すなわち、各エリアについて平均で約10個のエリア特徴量を生成しエリア検知に用いたが、このエリア特徴量の個数と k の値の関係によって、エリア検知性能が影響を受けたと考えられる。エリア特徴量の個数に対して k の最適な値を決定する方法に関しては、今後の検討課題とする。

5. おわりに

本稿では、あらかじめ環境内の各地点で取得したキャリブレーションデータを、参照用無線機で得られる無線通信

状況に基づいて逐次更新することにより、位置検知性能を安定化する方式を提案した。さらに、提案方式を無線LANに適用してiPhone用アプリケーション「pin@clip」向けに実装し、大型店舗内において性能を評価した。評価の結果、提案方式によって、無線通信状況の変動による性能劣化を低減できていることを確認した。本評価実験よりも更に長期間にわたるシステム運用においては、無線通信状況の変動がより顕著となり、システム運用者側が感知できないアクセスポイントの撤去・移動も発生し得るため、提案方式による性能改善効果は更に高まると予想される。

一方、提案方式の性能改善のためには、キャリブレーション用に取得した無線通信状況から各エリアの特徴量とすべきものを適切に選択する方式、エリア検知に必要な各種パラメータのチューニング方法、無線LAN端末の持ち方や体の向きによる計測結果のばらつき対策などについて検討を進める必要がある。

謝辞

本研究は経済産業省「ITとサービスの融合による新市場創出促進事業(e空間実証事業)」の一環として行われた。また、実証実験は東急ハンズ渋谷店の協力の下に行われた。記して感謝する。

参考文献

- [1] Chen G and Kotz D., A Survey of Context-Aware Mobile Computing Research, Technical Report 381, Department of Computer Science, Dartmouth College, 2000
- [2] P. Bahl and V. N. Padmanabhan, RADAR: An In-Building RF-Based User Location and Tracking System, IEEE INFOCOM 2000, Vol. 2, pp.775-784, 2000
- [3] A. LaMarca, et al, Place Lab: Device Positioning Using Radio Beacons in the Wild, Pervasive 2005, LNCS 3468, pp.116-133, 2005
- [4] 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 2006, pp.95-104, 2006
- [5] 伊藤誠悟, 吉田廣志, 河口信夫, locky.jp:無線LANを用いた位置情報・測位ポータル, 情報処理学会研究報告, Vol. 2005, No. 90, pp. 25-31, 2005
- [6] AirLocation: <http://www.hitachi.co.jp/wirelessinfo/airlocation/>
- [7] AeroScout: <http://www.aeroscout.com/>
- [8] Ekahau: <http://www.ekahau.com/>
- [9] Lionel M. Ni, Yunhao Liu, Yiu Cho Lau and Abhishek P. Patil, LANDMARC: Indoor Location Sensing Using Active RFID, PerCom2003, pp.407-415, 2003
- [10] 小川智明, 吉野修一, 清水雅史, 屋内における無線タグを用いた学習型位置推定法, 情報処理学会研究報告, 2004-UBI-5, Vol.2004, No.66, pp.31-38, 2004
- [11] 小西勇介, 中尾敏康, 参照用無線機を用いたエリア検知方式, 情報処理学会研究報告, 2009-UBI-21, Vol.2009, No.17, pp.61-66, 2009
- [12] 小西勇介, 中尾敏康, ぷらっと Plat@自由が丘におけるタウンログ収集(2) 携帯電話内蔵無線LANを用いたエリア検知, FIT2009講演論文集, pp.277-280, 2009