

## 基準ノード不要のセンサ測位システム ZigLoc の設計

泉 幸作<sup>†</sup> 山本 貴宏<sup>†</sup> 石田 繁巳<sup>†</sup> 田頭 茂明<sup>††</sup> 福田 晃<sup>†</sup>

<sup>†</sup>九州大学大学院システム情報科学研究院 〒 819-0395 福岡市西区元岡 744 番地

<sup>††</sup>関西大学総合情報学部 〒 569-1095 大阪府高槻市霊仙寺町 2-1-1

あらまし 屋内では GPS (Global Positioning System) が利用できないため、屋内センサネットワークにおいて膨大な数のセンサノードの位置を取得することは大きな課題の 1 つとなっている。筆者らは WiFi AP を用いることで測位基準ノードを不要とするセンサ測位システム ZigLoc を開発している。筆者らはこれまでにセンサノード上で WiFi AP の RSS を測定する手法 [1], [2] 及びセンサノード上で WiFi AP の動作チャネルを推定する手法 [3] を開発した。本稿では、ZigLoc の設計を示し、WiFi モジュールで取得した WiFi AP の fingerprint を用いたセンサノード測位の測位誤差を評価した。

キーワード センサノード測位, WiFi AP 基準ノード, 異種無線信号検出, WiFi 動作チャネル, 位置指紋

## Design of ZigLoc: Sensor Localization System without Anchors

Kousaku IZUMI<sup>†</sup>, Takahiro YAMAMOTO<sup>†</sup>, Shigemi ISHIDA<sup>†</sup>, Shigeaki TAGASHIRA<sup>††</sup>, and

Akira FUKUDA<sup>†</sup>

<sup>†</sup> Faculty of Information Science and Electrical Engineering, Kyushu University

<sup>††</sup> Faculty of Informatics, Kansai University

**Abstract** Sensor localization is one of the big problems when building large scale indoor sensor networks because GPS (global positioning system) is unavailable in indoor environments. We are developing a sensor localization system using WiFi APs as anchors, which requires no anchor deployment. We have developed a cross-technology signal extraction scheme to measure WiFi-AP RSS (received signal strength) on sensor nodes [1], [2] and WiFi-AP channel estimator. In this paper, we present the design of ZigLoc and the evaluation of sensor localization error using WiFi AP fingerprint derived by WiFi module.

**Key words** sensor localization, WiFi AP anchors, cross-technology communication, WiFi operation channel, fingerprint

### 1. はじめに

センサネットワークは低コスト・低消費電力などの特徴を有し、IoT (Internet of Things) などの分野を中心に重要性が高まっている。センサネットワークにおいて、センサノードの位置はセンシング対象領域の認識、ネットワークの形成などに利用される重要な情報である。一般に、センサノードの位置は GPS (Global Positioning System) や手動による測位によって取得される。このため、GPS の利用できない屋内環境において大規模なセンサネットワークを構築する場合にはセンサノードの測位が大きな問題となる。

センサノードの測位問題の解決に向けてはセンサ測位システムを利用することが考えられる [4]~[6]。センサ測位システムに関しては、システム導入コストの削減 [7]~[12] や測位精度の

向上 [13]~[19] に関する研究開発が行われてきた。しかしながら、センサノードを日常的に持ち運ぶユーザの協力や、手動での測位が必要となる測位基準ノードを多数必要とするため大規模屋内センサネットワークへの適用は困難である。

筆者らは、測位基準ノードを新たに設置する必要がないセンサ測位システムとして WiFi AP (アクセスポイント) を測位基準ノードとして利用する測位システム ZigLoc の開発を進めている。屋内環境に設置されている WiFi AP にセンサノードで検出可能な信号を送出させ、センサノードにおいて AP 信号の RSS (受信信号強度) を測定する。測定された RSS は測位サーバに集約され、AP の位置情報を用いて既存の位置推定手法によりセンサが側位される。屋内環境にはすでに多数の AP が導入され、それぞれはネットワーク管理者によって管理されている。このため、新たな測位基準ノードを設置することなく

センサ測位システムを実現できる。

筆者らはこれまでにセンサノード上で WiFi AP の RSS を測定する手法 [1], [2] 及びセンサノード上で WiFi AP の動作チャネルを推定する手法 [3] を開発した。センサノードは ZigBee (IEEE 802.15.4) モジュールを具備しており, WiFi (IEEE 802.11) 信号を受信することはできない。このため, センサノード上で WiFi AP の信号を検出する異種無線信号検出技術を開発した。また, WiFi と ZigBee のチャネル帯域幅の違いを越え RSS を正確に測定するため, センサノード上で AP の動作チャネルを推定する WiChest を開発した。

しかしながら, 多辺測量方式でセンサノード測位を行う場合, 測位サーバに測位基準ノードとなる WiFi AP の設置位置を入力しておく必要がある。実環境では, 他人が設置した AP などの設置位置が不明の AP が多く存在するため, 環境内の WiFi AP の設置位置を全て管理することは困難である。

そこで, 筆者らは WiFi 測位システムのために収集された fingerprint データを利用するセンサ測位システムを提案する。WiFi 測位技術は普及が進んでおり, AP が設置されている環境であれば WiFi 測位システムのための fingerprint データが収集されつつある。WiFi 測位システムのための fingerprint データを用いることで, AP の設置位置などの情報を事前に必要とせずにセンサ測位を行うことができる。WiFi 測位システムの fingerprint を用いたセンサ測位システムの実現可能性を検証するために評価実験を行い, WiFi 測位システムと ZigLoc の測位精度を比較した。

本稿の構成は以下の通りである。2. で ZigLoc の設計を示し, 3. では fingerprint 方式について説明する。4. では市販のセンサノード MICAz と WiFi AP を用いた ZigLoc の実装について説明し, 5. において実証評価により ZigLoc の基本性能を検証する。6. では屋内センサ測位技術に関する関連研究を示す。最後に 7. でまとめとする。

## 2. ZigLoc

### 2.1 概要

ZigLoc は測位基準ノード不要のセンサノード測位システムである。すでに環境に設置されている WiFi AP を測位基準ノードとして用いることで, センサノードを置くだけでセンサの位置を推定できる。

図 1 に ZigLoc の概要を示す。本システムは, センサノード, 測位サーバ, 実環境中に設置されている複数台の WiFi AP によって構成される。各 WiFi AP はセンサノードが検出可能な信号を送信している。測位を開始する場合, センサノードは各 WiFi AP の信号を検出してその RSS (受信信号強度) を測定する。センサノードは検出した全ての AP の RSS 情報を測位サーバに送信し, 測位サーバはセンサノードから受信した RSS 情報を用いて多辺測量法などによりセンサノードの位置を計算する。

### 2.2 WiFi AP 信号の検出

センサノードは ZigBee (IEEE 802.15.4) モジュールを具備しており, WiFi (IEEE 802.11) 信号を受信することはできない。このため, WiFi AP が送信するビーコン信号の周期性を

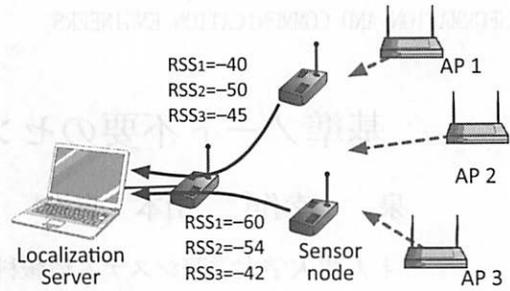


図 1 ZigLoc の概要

Fig. 1 Overview of ZigLoc

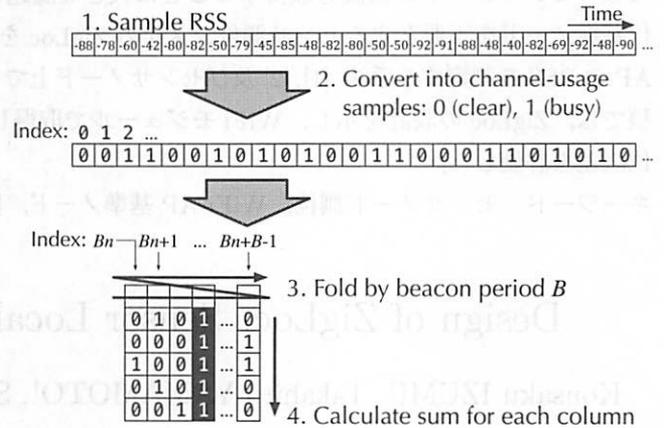


図 2 折り返しによる AP 信号の検出

Fig. 2 AP signal detection by folding

利用し, ZiFi [20] で報告された簡素な信号処理を応用してセンサノード上で AP 信号の検出を行う。

図 2 に, AP 信号の検出手順を示す。センサノード上で WiFi AP の信号を検出するため, センサノードは特定のチャネルで一定時間ごとに RSS をサンプリングする。全ての ZigBee モジュールは RSS を測定する機能を具備しており [21], また 1 つの WiFi チャネルは 4 つの ZigBee チャネルと重なっているため, センサノードを用いることで WiFi 信号を観測できる。

センサノードはサンプリングした RSS からチャネルが使用中であるかを判定し, チャネル使用有無サンプル (未使用: 0, 使用中: 1) を作成する (図 2 の 2)。

チャネル使用有無サンプルは検出したい AP のビーコン周期で折り返され, チャネル使用有無行列に変換される (図 2 の 3)。得られたチャネル使用有無行列の各列について和を算出する (図 2 の 4)。この和を折り返し和と呼ぶ。

AP の検出は, 折り返し和が十分に大きい列を見つけることで行われる。折り返し周期と一致する周期のビーコン信号はチャネル使用有無行列の 1 つの列に現れる。大きな折り返し和は折り返し周期と一致する周期のビーコン信号の存在を示していると言える。

### 2.3 測位に向けた事前情報収集問題

多辺測量方式でセンサノード測位を行う場合, 測位サーバに測位基準ノードとなる WiFi AP の設置位置を入力しておく必要がある。実環境では他人が設置した AP など設置位置が不明の AP が存在することや, ブロードバンドルータなどの小形

AP が移動される可能性を考慮すると環境内の全ての WiFi AP の設置位置を管理することは困難である。

WiFi 測位においては、測位基準ノードの位置情報を必要としない fingerprint 方式の測位手法が普及している。fingerprint 方式では、測位対象エリア内の各点において AP の RSS を示す「fingerprint」をあらかじめ収集し、測位端末で取得した RSS と fingerprint とを比較することで測位が行われる。fingerprint はスマートフォンなどを持ち運ぶユーザの協力によって収集される。

しかしながら、ZigLoc において fingerprint 方式を適用する場合には、測位対象エリア内の各点において AP の RSS をセンサノードで取得する必要がある。一般に、センサノードを日常的に持ち運ぶユーザがいることは想定できないため fingerprint の収集が大きな問題となる。

### 3. fingerprint 方式を利用したセンサ測位

センサノードを用いて測位対象エリアの各点で fingerprint を収集することなく fingerprint 方式の測位を実現するため、本節では WiFi 測位システムで収集した fingerprint を利用したセンサノード測位システムを示す。WiFi 測位システムは普及しつつあり、WiFi AP が設置されている環境であれば「スマートフォンによって測位対象エリアの各点で測定した WiFi AP 信号の RSS と測定座標を関連付けた fingerprint」(WiFi fingerprint と呼ぶ) が収集された環境が増加していると言える。WiFi fingerprint を用いることで、センサノードによって fingerprint を収集することなくセンサノード測位を行うことができる。

以降では、まず fingerprint 方式の WiFi 測位システムについて説明し、次いで WiFi fingerprint を利用したセンサノード測位システムについて説明する。

#### 3.1 fingerprint 方式の WiFi 測位

fingerprint 測位手法は学習フェイズ (Learning Phase) と測位フェイズ (Estimating Phase) の 2 段階に分けて測位を行う。

学習フェイズでは測位対象エリアを複数のブロックに分割し、それぞれのブロック内で観測できる全ての WiFi AP 信号の RSS (受信信号強度) とエリア位置情報を関連付けた fingerprint をデータベースに保存する。  $i$  と  $n$  をそれぞれ測位エリアブロックと WiFi AP の識別番号とする。ブロック  $i$  で取得した fingerprint  $R_i$  を次のように定義する。

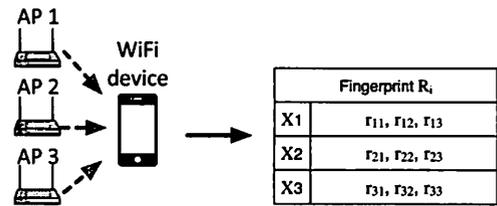
$$R_i = \{\bar{r}_{i1}, \bar{r}_{i2}, \dots, \bar{r}_{in}\} \quad (1)$$

ここで、 $\bar{r}_{ij}$  ( $j = 1, 2, \dots, n$ ) はブロック  $i$  で取得した AP  $j$  からの信号の RSS の平均値である。

測位フェイズでは、測位対象が収集した fingerprint と学習フェイズで作成した fingerprint  $R_i$  の距離を計算することで測位を行う。測位対象が取得した fingerprint  $x$  は式 (1) と同じように表すと  $x = \{\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_n\}$  となる。fingerprint  $x$  と学習フェイズで作成した fingerprint  $R_i$  間の距離は次のように計算される。

$$distance(R_i, x) = \sum_{j=1}^n |\bar{r}_{ij} - \bar{x}_j| \quad (2)$$

#### Learning Phase



#### Estimating Phase

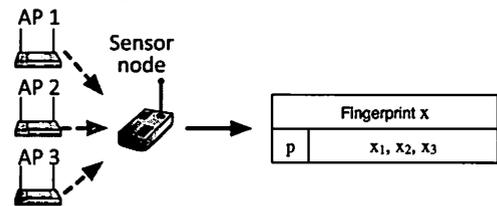


図 3 ZigLoc における fingerprint 方式の概要

Fig. 3 Overview of ZigLoc fingerprinting

位置推定の最終段階では  $k$ -最近傍法を用いる。 $k$ -最近傍法は、fingerprint  $x$  と最も距離が短い fingerprint を持つブロック  $i$  を  $k$  個選択する。選択された最近傍ブロックの集合を  $N_k$  とすると、測位対象の推定位置  $p$  はブロック  $i$  の座標  $X_i$  と  $x$ 、 $R_i$  を用いて次のように計算できる。

$$p = \frac{\sum_{i \in N_k} \frac{1}{distance(R_i, x)} \cdot X_i}{\sum_{i \in N_k} \frac{1}{distance(R_i, x)}} \quad (3)$$

$k$  の値は、測位対象や環境によって決定する。

#### 3.2 WiFi fingerprint を利用したセンサノード測位

ZigLoc では WiFi fingerprint を利用してセンサノード測位を行う。図 3 に ZigLoc における WiFi fingerprint を用いたセンサノード測位の概要を示す。

学習フェイズでは、既に WiFi モジュールで収集した fingerprint を  $R_i$  とする。測位フェイズでは、センサノードが測定した WiFi AP 信号の RSS を収集した fingerprint と  $R_i$  を比較し、測位を行う。センサノードが収集した fingerprint をここでは  $\hat{x}$  とおく。

同じ WiFi 信号の RSS を WiFi モジュールとセンサノードで測定すると、ZigBee と WiFi の周波数帯域幅の違いやアンテナ利得の差によってオフセットが生じることが分かっている [1]。このため、 $x$  と  $\hat{x}$  には RSS の差が生じる。この場合にも  $x$  と  $\hat{x}$  の関係性を発見すれば、センサノード 3.1 に示した手順でセンサノード測位が可能である。

図 4 は、同一の WiFi AP 信号を WiFi モジュールとセンサノードで取得した RSS の差のヒストグラムを示している。図より、オフセットが存在しているものの、オフセットはおおよそ一定であることが推定できる。したがって、オフセットを補正して fingerprint 測位を行うことができれば WiFi fingerprint を用いてセンサノードを測位することが可能となる。

## 4. 実 装

WiFi fingerprint を用いたセンサノード測位システムの実現可能性を検証する実験に向け、WiFi fingerprint を用いたセン

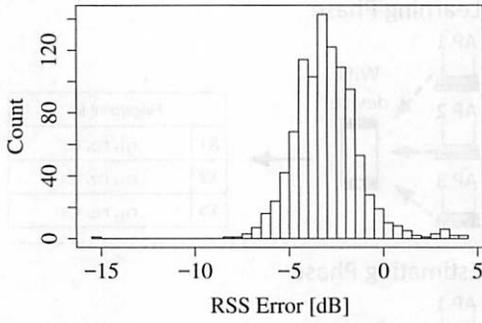


図4 RSSの誤差のヒストグラム  
Fig.4 Histogram of RSS error

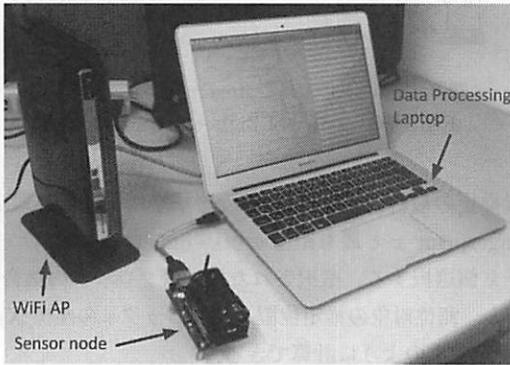


図5 実験機器  
Fig.5 Experiment equipments

サノード測位システムを実装した。図5に実験機器を示す。実験では、センサノード、WiFi AP、WiFi信号取得兼データ処理PCを用いた。WiFi APはNetgear社のWNDR4300を用い、AP用のOSであるOpenWrt動作させた。センサノードはIEEE 802.15.4モジュールCC2420を搭載しているCrossbow社のMICAzを用いた。WiFi信号の取得とデータ処理PCはMac OSX 10.10.5が動作するMacBook Airである。測位手法はPythonプログラミングとして実装し、データベースはMongoDBを用いた。

PCとセンサノードは同時にWiFi AP信号のRSS(受信信号強度)を受信し、センサノードはRSSをデータ処理PCに送信する。APにはそれぞれ異なるビーコン周期を設定されている。センサノードはRSSを一定時間毎にRSSをサンプリングし、データベースに送信する。センサノード上でサンプリングしたRSSは2.2に示した手法を適用し、各APのRSSを測定する。また、同様にPCは各APから送信された信号を受信しデータベースに送信する。センサノード及びPCで受信したRSSをもとにfingerprint測位を行う。

## 5. 評価

WiFi fingerprintを用いたセンサノード測位システムの実現可能性を検証するため、ZigLocの測位精度の評価実験を行った。測位精度は、既存の測位評価手法[22]と同様に測位結果の誤差が90%の確率で収まる距離である。

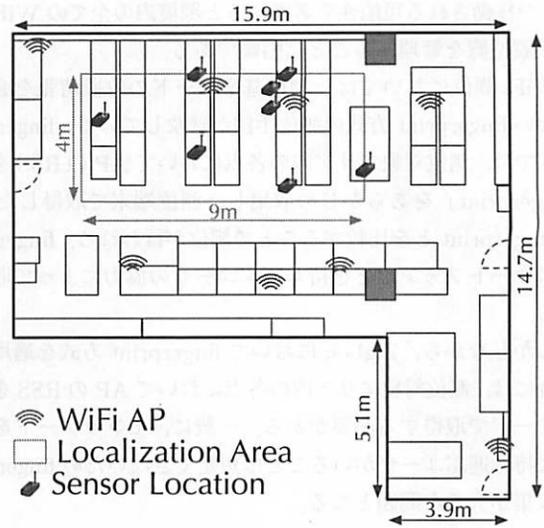


図6 実験環境  
Fig.6 Experiment setup

### 5.1 評価環境

4.に示した実装を用いて評価実験を行った。図6に実験環境を示す。測位対象エリアは $4 \times 9 \text{ m}^2$ の範囲であり、実験環境内に8台のAPを設置した。まず、学習フェイズではPCに搭載されたWiFiモジュールを用いて測位対象エリア内でAP信号のRSSを60秒間取得し、WiFi fingerprintを作成した。WiFi fingerprintの収集は1m間隔の計50ヶ所において行った。測位フェイズでは、測位対象エリア内の8ヶ所でRSSを60秒間取得した。60秒間のRSSデータを15分割し、分割したデータそれぞれを用いて測位計算を行った。また、 $k$ -最近傍法適用時の $k$ の値は、既存の測位実験[23]と同様に $k=3$ とした。

ZigLocの性能を相対的に評価するため、WiFiモジュールで取得したRSSを用いてfingerprint測位を行うWiFi測位と測位精度を比較した。

### 5.2 測位精度

図7に測位誤差、すなわち測位結果と真値とのユークリッド距離の累積分布関数を示す。

図より、以下のことが分かる。

- (1) ZigLocの測位精度は7.40 m, WiFi測位の測位精度は2.61 mである。ZigLocの測位精度は、オフィスなどの広い測位環境ならば部屋単位で測位ができる程度である。
- (2) 測位誤差1.5 m, 2.8 m, 4.5 mの累積確率に急な立ち上がりが見える。測位対象の位置からそれらの距離に測位結果が集中していることが分かる。

### 5.3 測位精度に関する考察

5.2に示したように、ZigLocの測位誤差はWiFi測位に比べて大きく低下している。測位精度の低下は、3.2で示したWiFiモジュールとセンサノードで測定したRSS間に存在するオフセットの影響によるものと推定できる。この推定は2つの根拠に基づいている。

1つ目の根拠は、ZigLocの測位結果の座標が片側に偏っている点である。図8にZigLocの全ての測位結果の座標を示す。図より、測位結果の座標は全て測位対象エリアの左半分が集まっ

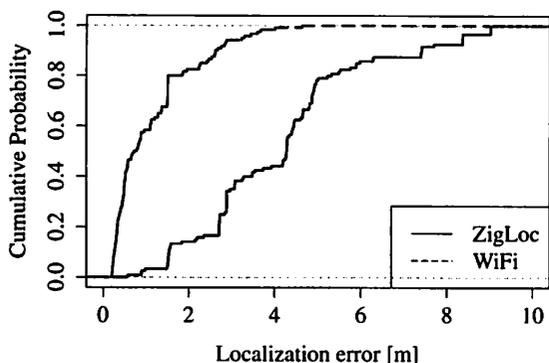


図 7 測位誤差の累積分布関数

Fig. 7 Empirical cumulative distribution function of localization error

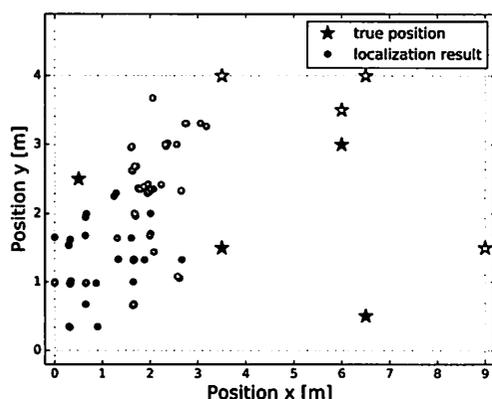


図 8 WiFi fingerprint を用いたセンサ測位結果  
Fig. 8 Result of ZigLoc

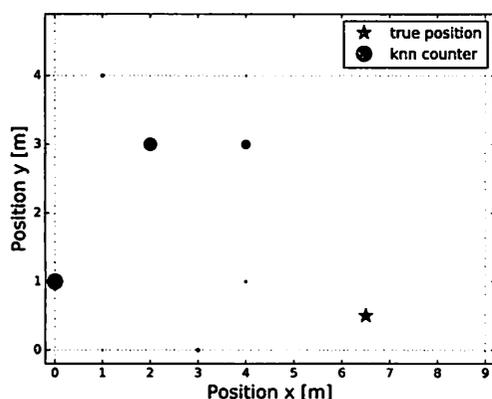


図 9 最近傍点の選択数の合計  
Fig. 9 Count of nearest neighbor points

ていることが分かる。センサノードで測定した RSS は WiFi モジュールで測定した RSS より小さくなるため、各 AP からの距離が実際よりも遠い地点を最近傍点として抽出しやすくなる。RSS のオフセットはほぼ一定の大きさであるため、RSS の差が距離に及ぼす影響が大きくなる遠方の AP ほどこのような傾向は強くなる。このため、図 6 右下の AP から遠く離れる方向、すなわち図で左の方向に測位結果が偏ったと考えられる。

2つ目の根拠は、fingerprint 測位における最近傍点が一定の座標に集中している点である。図 9 は、 $x = 6.5 \text{ m}$ ,  $y = 0.5 \text{ m}$  に設置したセンサノードで 15 回の ZigLoc 測位を行った際に  $k$ -最近傍法で選択された 3 つの最近傍点の選択回数を示している。図では、円の中心が選択された最近傍点を、円の大きさが選択回数を示している。図より、ほぼ全ての測位で同じ 3 つの座標が最近傍点として選択されていることが分かる。WiFi モジュールとセンサノードで測定した RSS 間のオフセットの影響により測位対象の真の座標から大きく外れた点が最近傍点として選択されているものの、選択結果に変動はなく、常にほぼ一定の測位誤差を生じたと考えられる。この推定は、5.2 で示した測位誤差が集中しているという事実とも一致する。

以上のことから、WiFi モジュールとセンサノードで測定した RSS 間に存在するオフセットの影響を除去できるような fingerprint 方式を開発することで測位精度の向上が期待できる。

## 6. 関連研究

fingerprint 測位において fingerprint の収集と位置推定端末で異なる規格の無線モジュールを用いる例は筆者らの調査の範囲では存在しない。ここでは fingerprint 測位方式のコスト削減や測位精度向上に関する研究、fingerprint を用いて ZigBee 機器を測位する研究について述べる。

### 6.1 fingerprint 測位のコスト削減に関する研究

測位コスト削減に関しては、クラウドソーシングを利用した fingerprint 測位方式がある。ユーザの協力によって収集したデータを用いて測位が行われ、測位基準ノードの設置は不要である [9]~[12]。ここでは、WILL (Wireless Indoor Localization) [11], Redpin をユーザ参加型に拡張した手法 [24] を紹介する。

WILL は、事前調査及び測位基準ノードの位置を必要としないパターンマッチング手法である。学習段階ではスマートフォンなどのモバイル端末からユーザの動きの加速度と fingerprint を取得する。この加速度からユーザの位置を推定し、fingerprint と関連付けることで仮想的な測位空間の見取り図を作成する。サービス段階ではユーザが取得した fingerprint と仮想的な測位空間のマッチした位置をユーザに返す。

Redpin はモバイル端末上で動作するパターンマッチング手法を用いたオープンソースの屋内測位システムである。Redpin においても事前調査が課題となることから、ユーザ参加型 Redpin では、複数のユーザ同士で情報を共有させることで、学習段階及び事前調査を必要とせず、かつ環境の変化に素早く追従することを可能としている。

これらの手法を用いることで、学習フェーズにおける fingerprint 収集を自動化し、事前調査にかかるコストを大幅に削減することができる。しかしながら、センサノード測位システムに適用するためにはユーザにセンサノードを持ち運んでもらう必要があり、ユーザの協力を得るのが困難である。

### 6.2 fingerprint 測位の精度向上に関する研究

測位精度の向上に関しては、ニューラルネットワークを用いて fingerprinting アルゴリズムを改善する手法 [13] がある。ニューラルネットワークを利用することで環境の変化などを示す理論誤差をなくし、測位誤差を大幅に小さくすることが出来

る。また、多辺測量法における誤差を減らすために幾何学的特性を利用してノードの位置を推定する手法[14]などが報告されている。これらの手法は本研究の最終ゴールである測位システムの実現に向けて有用である。

### 6.3 fingerprint を利用した ZigBee 機器測位

ZigBee モジュールを用いた新しい測位方式として、測位基準ノードを用いない新しい fingerprint 測位システムの ZiFind が存在する[25]。しかしながら、ZiFind は測位基準ノードの代わりに ZiFind mapper と呼ばれる WiFi 機器を WiFi AP の近くに配置する必要がある、本質的には測位基準ノードの設置と変わらない。

## 7. おわりに

本稿では、大規模センサネットワークにおけるセンサノードの位置設定コストの削減に向けて測位基準ノード不要のセンサ測位システム ZigLoc を提案した。そして、ZigLoc の実現可能性を検証するため実証評価を行い、ZigLoc の測位精度は 7.40 m、WiFi 測位システムは 2.61 m となることを確認した。また、測位精度低下の主な原因は WiFi モジュールとセンサノードで測定した RSS (受信信号強度) 間に存在するオフセットの影響であることを考察し、これを除去することで精度向上が期待できることを示した。

謝辞 本研究の一部は、科研費 (15H05708, 15K12021) の助成で行われた。

### 文 献

- [1] S. Ishida, K. Izumi, S. Tagashira, and A. Fukuda, "WiFi AP-RSS monitoring using sensor nodes toward anchor-free sensor localization," Proc. IEEE Vehicular Technology Conf. (VTC-Fall), pp.1-5, Sept. 2015.
- [2] K. Izumi, S. Ishida, S. Tagashira, and A. Fukuda, "Design of WiFi AP-RSS monitoring system using sensor nodes," Proc. Int. Symp. on Computing and Networking (CANDAR), pp.115-121, Dec. 2015.
- [3] S. Ishida, Y. Kunihiro, K. Izumi, S. Tagashira, and A. Fukuda, "Design of WiFi-AP operating channel estimation scheme for sensor node," Proc. Int. Conf. on Mobile Computing and Ubiquitous Networking (ICMU), pp.13-18, Oct. 2016.
- [4] J. Wang, R.K. Ghosh, and S.K. Das, "A survey on sensor localization," J. Control Theory Applications, vol.8, no.1, pp.2-11, Feb. 2010.
- [5] L. Cheng, C. Wu, Y. Zhang, H. Wu, M. Li, and C. Maple, "A survey of localization in wireless sensor network," Int. J. Distributed Sensor Networks, vol.2012, pp.1-12, Nov. 2012. Article ID 962523.
- [6] A. Lédeczi and M. Maróti, "Wireless sensor node localization," Philosophical Trans. Royal Society A, vol.2012, no.370, pp.85-99, Jan. 2012.
- [7] M. Minami, Y. Fukuju, K. Hirasawa, S. Yokoyama, M. Mizumachi, H. Morikawa, and T. Aoyama, "DOLPHIN: A practical approach for implementing a fully distributed indoor ultrasonic positioning system," LNCS, vol.3205, pp.437-365, Sept. 2004. Proc. ACM Conf. Ubiquitous Computing (UbiComp).
- [8] L. Huang, F. Wang, C. Ma, and W. Duan, "The analysis of anchor placement for self-localization algorithm in wireless sensor networks," Advances Wireless Sensor Networks, Communications in Computer and Info. Science, vol.334, pp.117-126, 2013.
- [9] H. Wang, S. Sen, A. Elgohary, M. Farid, M. Youssef, and R.R. Choudhury, "No need to war-drive: Unsupervised indoor localization," Proc. ACM MobiSys, pp.197-210, June 2012.
- [10] Z. Yang, C. Wu, and Y. Liu, "Locating in fingerprint space: Wireless indoor localization with little human intervention," Proc. ACM MobiCom, pp.269-280, Aug. 2012.
- [11] C. Wu, Z. Yang, Y. Liu, and W. Xi, "WILL: Wireless indoor localization without site survey," IEEE Trans. Parallel Distrib. Syst., vol.24, no.4, pp.839-848, April 2013.
- [12] Z. Jiang, J. Zhao, J. Han, Z. Wang, S. Tang, J. Zhao, and W. Xi, "Wi-Fi fingerprint based indoor localization without indoor space measurement," Proc. IEEE Int. Conf. on Mobile Ad-Hoc and Sensor Systems (MASS), pp.384-392, Oct. 2013.
- [13] A. Taok, N. Kandil, and S. Affes, "Neural networks for fingerprinting-based indoor localization using ultra-wideband," J. Communications, vol.4, no.4, pp.267-275, May 2009.
- [14] G.S. Kuruoglu, M. Erol, and S. Oktug, "Three dimensional localization in wireless sensor networks using the adapted multi-lateration technique considering range measurement errors," Proc. IEEE GLOBECOM Workshops, pp.1-5, Nov.-Dec. 2009.
- [15] A.W. Tsui, Y.-H. Chuang, and H.-H. Chu, "Unsupervised learning for solving RSS hardware variance problem in WiFi localization," Mobile Networks and Applications, vol.12, no.5, pp.677-691, Oct. 2009.
- [16] A. Kushki, K.N. Plataniotis, and A.N. Venetsanopoulos, "Intelligent dynamic radio tracking in indoor wireless local area networks," IEEE Trans. Mobile Comput., vol.9, no.1, pp.405-419, March 2010.
- [17] K. Kaemarungsi and P. Krishnamurthy, "Analysis of WLAN's received signal strength indication for indoor location fingerprinting," Pervasive and Mobile Computing, vol.8, no.2, pp.292-316, April 2012.
- [18] S. Sen, B. Radunović, R.R. Choudhury, and T. Minka, "You are facing the Mona Lisa: Spot localization using PHY layer information," Proc. ACM MobiSys, pp.183-196, June 2012.
- [19] N. Wirström, P. Misra, and T. Voigt, "Spray: A multimodal localization system for stationary sensor network deployment," Proc. Annual Conf. Wireless On-demand Network Systems Services (WONS), pp.25-32, April 2014.
- [20] R. Zhou, Y. Xiong, G. Xing, L. Sun, and J. Ma, "ZiFi: wireless LAN discovery via ZigBee interference signatures," Proc. ACM MobiCom, pp.49-60, Sept. 2010.
- [21] IEEE Standards Association, "IEEE Std 802.15.4-2011, IEEE standard for local and metropolitan area networks — part 15.4: Low-rate wireless personal area networks (LR-WPANs)," Sept. 2011. <http://standards.ieee.org/>.
- [22] M. Youssef and A. Agrawala, "The Horus WLAN location determination system," Proc. ACM MobiSys, pp.205-218, June 2005.
- [23] P. Bahl and V.N. Padmanabhan, "RADAR: An in-building RF-based user location and tracking system," Proc. IEEE Int. Conf. on Computer Communications (INFOCOM), pp.775-784, March 2000.
- [24] P. Bolliger, "Redpin - adaptive, zero-configuration indoor localization through user collaboration," Proc. ACM Int. Workshop on Mobile Entity Localization Tracking GPS-less Environments (MELT), pp.55-60, Sept. 2008.
- [25] Y. Gao, J. Niu, R. Zhou, and G. Xing, "ZiFind: Exploiting cross-technology interference signatures for energy-efficient indoor localization," Proc. IEEE Int. Conf. on Computer Communications (INFOCOM), pp.2940-2948, April 2013.