

# センサ測位システム ZigLoc の精度向上に向けた 差分フィンガープリント法の設計

山本 貴宏<sup>1,a)</sup> 泉 幸作<sup>1</sup> 石田 繁巳<sup>1</sup> 田頭 茂明<sup>2</sup> 福田 晃<sup>1</sup>

**概要:** 屋内では GPS (Global Positioning System) を利用できないため, 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 つになっている. 筆者らは, センサノードを置くだけで測位できるセンサ測位システム ZigLoc を開発している [1]. ZigLoc では ZigBee (IEEE 802.15.4) モジュールを搭載したセンサノードで WiFi (IEEE 802.11) アクセスポイントの信号強度 (RSS) を測定し, WiFi 測位システムのために収集されたフィンガープリント情報を用いてフィンガープリント法で測位を行う. しかしながら, センサノードと WiFi モジュールで取得した RSS の間にはチャネル帯域幅の違いなどの影響によりオフセットが生じるため, 測位精度が低下する. 本稿では測位精度の向上に向け, 文献 [2] の RSS 補正手法を応用して RSS オフセットの影響を軽減する差分フィンガープリント法を示す. 実証評価を行い, 差分フィンガープリント法により ZigLoc の測位精度を約 26% 向上できることを確認した.

## Design of Differential Fingerprinting for Accuracy Improvement in Sensor Localization System ZigLoc

Takahiro Yamamoto<sup>1,a)</sup> Kousaku Izumi<sup>1</sup> Shigemi Ishida<sup>1</sup> Shigeaki Tagashira<sup>2</sup> Akira Fukuda<sup>1</sup>

### 1. はじめに

センサネットワークは 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, センサネットワークの位置は 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 を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 [3-5]. 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 [6-11] や測位精度の向上 [12-18] 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 を開発している [1]. 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) を測定することで測位を行う. また, WiFi 測位システムのために収集された WiFi フィンガープリントを利用することで「センサノードを置いただけで測位」することを可能とする.

しかしながら, センサノードと WiFi モジュールで測定した RSS に差があるため, ZigLoc では高い測位精度を得ることが困難であるという問題が存在する. ZigBee と WiFi のチャネル帯域幅は異なるため, WiFi AP の信号 RSS をセンサノードで測定すると WiFi モジュールで測定した場合よりも小さくなる. したがって, ZigLoc ではセンサノードと WiFi AP との距離が実際よりも長いものとして測位

<sup>1</sup> 九州大学大学院システム情報科学研究院  
ISEE, Kyushu University, Fukuoka 819-0395, Japan

<sup>2</sup> 関西大学総合情報学部  
Faculty of Informatics, Kansai University, Osaka, 569-1095, Japan

a) yamamoto@f.ait.kyushu-u.ac.jp

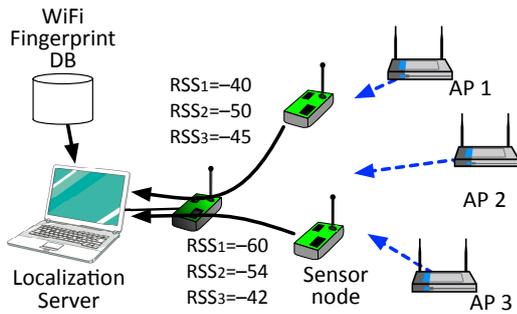


図 1 ZigLoc の概要  
Fig. 1 Overview of ZigLoc

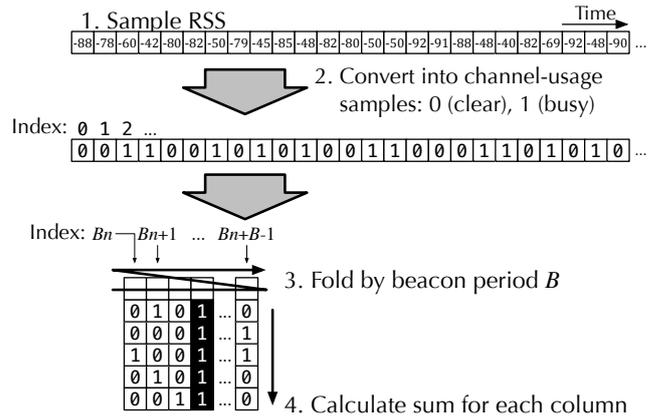


図 2 折り返しによる AP 信号の検出  
Fig. 2 AP signal detection by folding

が行われ測位精度が低下する。

そこで、本稿では測位精度の向上に向け、RSS オフセットの影響を軽減して測位を行う差分フィンガープリント法を提案する。通常のフィンガープリント法と同様に、差分フィンガープリント法はセンサノードで取得した各 WiFi AP の RSS と類似するフィンガープリント情報の探索を行う。この際、文献 [2] の RSS 補正手法を応用して各 WiFi AP の RSS の差が類似する WiFi フィンガープリントを探索することでオフセットによる影響を軽減する。九州大学研究室内で実証評価を行い、差分フィンガープリント法を用いることで測位精度を約 26% 向上できることを確認した。

本稿の構成は以下の通りである。2 で ZigLoc の概要を説明し、3 では差分フィンガープリント法を示す。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差分フィンガープリント法を用いた ZigLoc の性能を検証する。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 は測位基準ノード設置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 の信号をセンサノードで検出し、WiFi 測位システムのために収集された WiFi フィンガープリントを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。ZigLoc 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、その RSS 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 情報を用いてフィンガープリント法により測位を行う。

### 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利用し、ZiFi [19] 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ン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 [20]、1 つの WiFi チャンネルは 4 つの ZigBee チャン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 からチャンネルが使用中であるかを判定し、チャン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)。

チャン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、チャンネル使用有無行列に変換される (図 2 の 3)。得られたチャン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ン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 WiFi フィンガープリントを利用したセンサノード測位

ZigLoc では WiFi 測位システムのために収集された WiFi フィンガープリントを利用することで、測位システムの導入コストを削減する。WiFi 測位システムは多くの屋内環境へ導入が進められているため、多くの環境で「センサノードを置くだけで測位」することが可能となる。

フィンガープリント法を用いて測位を行う場合、測位を行う前に測位対象エリア内の各点において各 AP の RSS を示すフィンガープリントを収集しておく。測位を行う場

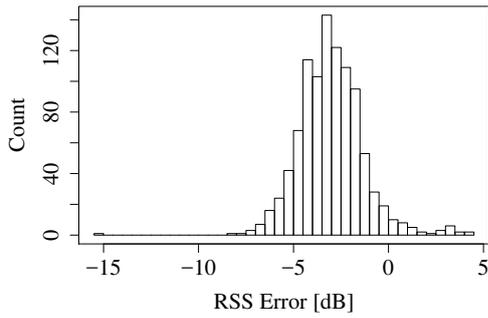


図 3 センサノードと WiFi モジュールで測定した RSS の差のヒストグラム [1]

Fig. 3 Histogram of RSS error

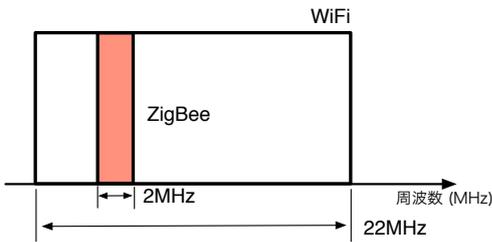


図 4 ZigBee と WiFi の帯域幅

Fig. 4 Bandwidth ZigBee and WiFi

合には測位端末で取得した各 AP の RSS とフィンガープリントとを比較し、最も類似度の高いフィンガープリントを収集した位置に端末があるとして位置推定が行われる。ZigLoc では測位を行う端末はセンサノードであるから、センサノードで取得した各 AP の RSS と WiFi 測位システムのフィンガープリントとを比較することで測位を行う。

## 2.4 RSS オフセットによる測位精度の低下

ZigLoc では WiFi モジュールで測定した RSS とセンサノードで測定した RSS とを比較することで測位を行うため、WiFi モジュールとセンサノードで測定した RSS が等しくなければ測位精度が低下するという問題が発生する。センサノードで使用している ZigBee と WiFi のチャンネル帯域幅は異なるため、WiFi モジュールとセンサノードで測定した RSS は異なるものとなる。

図 3 はセンサノードと WiFi モジュールで測定した RSS の差の分布を示している [1]。RSS の差の平均値は  $-3.15$  dB であり、センサノードで測定した RSS は WiFi モジュールで測定した場合よりも小さくなる事が分かる。

このような RSS の差は、ZigBee と WiFi のチャンネル帯域幅の差などに起因している。図 4 は ZigBee と WiFi のチャンネル帯域幅を示している。WiFi の帯域幅が  $22$  MHz であるのに対して ZigBee の帯域幅は  $2$  MHz である。このため、ZigBee モジュールで測定した RSS は WiFi モジュールで測定した場合よりも小さくなる。

ZigBee と WiFi のチャンネル帯域幅は一定であるから RSS オフセットはおおよそ一定であると考えられる。この場

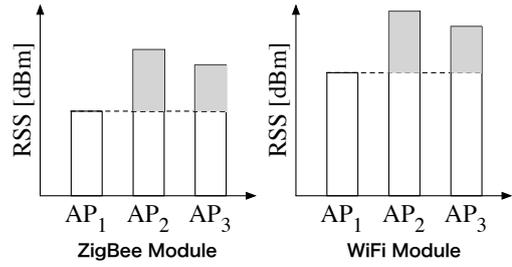


図 5 WiFi モジュールとセンサノード間に生じる RSS オフセット  
Fig. 5 RSS offset between WiFi and ZigBee modules

合、センサノードと WiFi モジュール間の RSS オフセットの補正を行う簡易的な手法としてセンサノードの測定した RSS 値に一定値を加えることが考えられる。しかし、センサノードはノードごとの性能のばらつきが大きい為、それぞれのセンサノードで測定した RSS を用いたキャリブレーションが必要となり、大きな手間を要する。

## 3. 差分フィンガープリント法

ZigLoc の精度向上に向け、センサノードと WiFi モジュール間の RSS オフセットによる影響を軽減して測位を行う差分フィンガープリント法を示す。差分フィンガープリント法の基本アイデアは、RSS の差のみに着目してフィンガープリント法を行うことである。図 5 はセンサノードと WiFi モジュールで測定した RSS のイメージを示している。図中の塗りつぶし部分は、WiFi AP<sub>1</sub> の RSS を基準としたときの AP<sub>2</sub>, AP<sub>3</sub> の RSS 差分を示している。センサノードと WiFi モジュールで測定した RSS 間のオフセットはおおよそ一定と推定できるため、同一の AP の RSS を基準としたときの RSS 差分はセンサノードと WiFi モジュールで測定した場合とで同じになると考えられる。このため、各 AP の RSS 間の差を比較することでオフセットによる影響を軽減して測位を行うことができる。

図 6 に差分フィンガープリント法の概要を示す。通常のフィンガープリント法と同様に、差分フィンガープリント法は学習フェイズ (Learning Phase) と測位フェイズ (Estimating Phase) の 2 段階に分けて測位を行う。以降では各フェイズについて詳述する。

### 3.1 学習フェイズ

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フィンガープリント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 の台数とする。ブロック  $i$  で取得したフィンガープリント  $R_i$  を次のように定義する。

$$R_i = \{\overline{r_{i1}}, \overline{r_{i2}}, \dots, \overline{r_{in}}\} \quad (1)$$

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

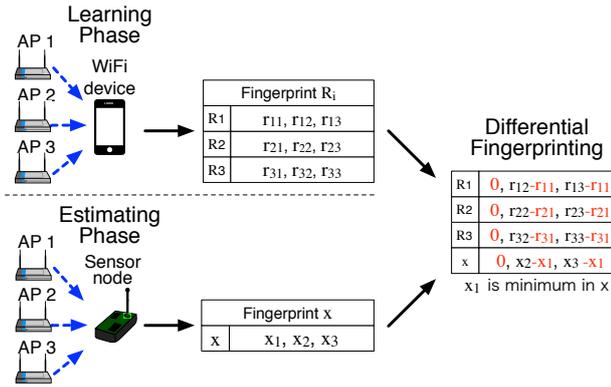


図 6 差分フィンガープリント法の概要

Fig. 6 Overview of differential fingerprinting

### 3.2 測位フェイズ

測位フェイズでは、測位対象のセンサノードが収集したフィンガープリントと学習フェイズで収集したフィンガープリント  $R_i$  との距離を計算し、最も距離が近いフィンガープリントを探索することで測位を行う。このとき、距離の計算において各 WiFi AP 間の RSS の差を用いる。

測位対象が取得したフィンガープリント  $x$  は式 (1) と同様に  $x = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$  と表せる。フィンガープリント  $x$  と学習フェイズで収集した各フィンガープリント  $R_i$  との距離は、センサノードの収集した RSS のうち最小の RSS を観測した WiFi AP の識別番号を  $m$  として

$$distance(R_i, x) = \sum_{j=1}^n |r_{ij} - r_{im} - x_j - x_m|$$

と計算する。

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、フィンガープリント  $x$  と最も距離が短いフィンガープリントを持つブロック  $i$  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。

$$p = \frac{\sum_{i \in N_k} \frac{1}{distance(R_i, x)} \cdot X_i}{\sum_{i \in N_k} \frac{1}{distance(R_i, x)}} \quad (2)$$

$k$  の値は、測位対象や環境によって決定する。

## 4. 実装

差分フィンガープリント法を用いた ZigLoc の測位精度検証実験に向け、差分フィンガープリント法を用いたセンサノード測位システムを実装した。図 7 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 プログラム

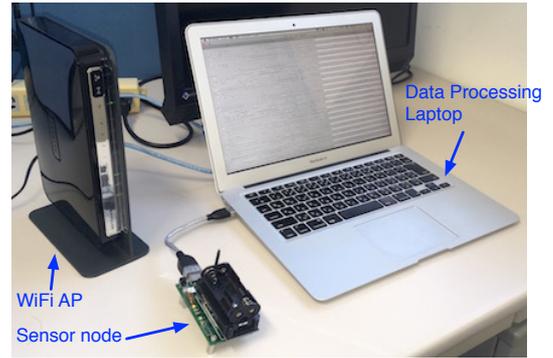


図 7 実験機器

Fig. 7 Experiment equipments

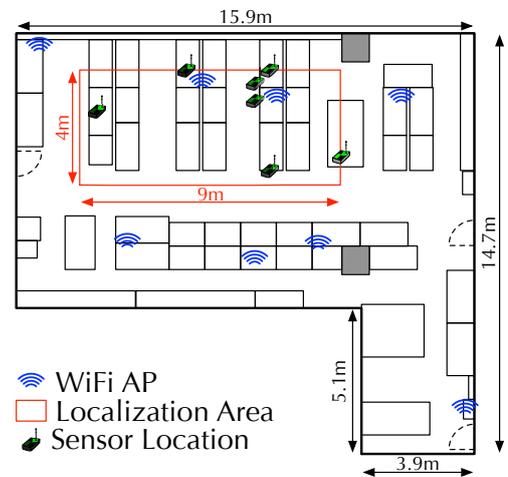


図 8 実験環境

Fig. 8 Experiment setup

として実装し、データベースは MongoDB を用いた。

センサノードは周期的に RSS をサンプリングし、収集した RSS サンプルをデータ処理 PC に送信する。データ処理 PC では 2.2 で示した手法を適用し、各 AP の RSS を測定してデータベースに送信する。WiFi AP に異なるピーコン周期を設定しておくことで AP を識別する。また、WiFi 信号取得 PC 上の WiFi モジュールを用いてセンサノードと同時に各 AP の RSS を測定し、データベースに送信する。WiFi 信号取得 PC で測定した RSS を用いてフィンガープリントデータベースを構築し、センサノードで測定した RSS を用いて差分フィンガープリント法によりセンサノードの測位を行う。

## 5. 評価

差分フィンガープリント法の有効性を検証するため、差分フィンガープリント法を用いた 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 [21] 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。

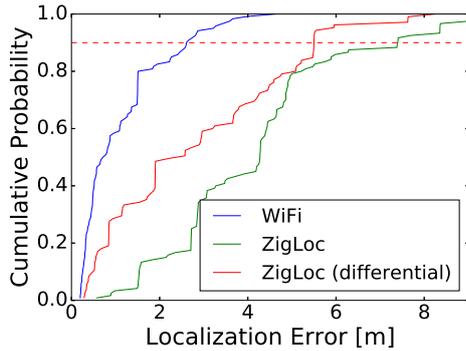


図 9 測位誤差の累積分布関数

Fig. 9 Empirical cumulative distribution function of localization error

### 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 8 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 フィンガープリントを作成した。WiFi フィンガープリントの収集は 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 7 ヶ所で RSS サンプルを 60 秒間取得した。60 秒間の RSS サンプルを 15 分割し、分割した RSS サンプルの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 [22] と同様に  $k = 3$  とした。

差分フィンガープリント法による ZigLoc の性能を相対的に評価するため、以下の 3 つの手法を比較した。

#### (1) WiFi 測位方式

本方式は、WiFi モジュールで測定した RSS を用いて測位を行う方式である。本方式は一般の WiFi 測位方式であり、他の方式との比較を行う上でのベースラインとなる。

#### (2) ZigLoc 方式

本方式は、文献 [1] で報告した ZigLoc 方式である。センサノードで測定した RSS を用いて通常のフィンガープリント法により測位を行う。

#### (3) 差分フィンガープリント ZigLoc 方式

本方式は 3 で示した提案方式である。センサノードで測定した RSS を用いて差分フィンガープリント法により測位を行う。

### 5.2 測位精度

図 9 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わかる。

(1) WiFi 測位方式, ZigLoc 方式, 差分フィンガープリント ZigLoc 方式の測位精度は、それぞれ 2.70m, 7.41m, 5.50m である。差分フィンガープリント方式によって

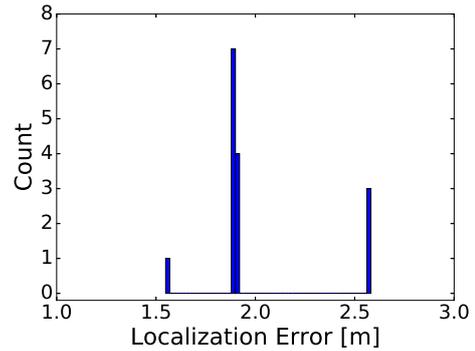


図 10 座標 (3.5,4.0) における差分フィンガープリント ZigLoc 方式の測位誤差のヒストグラム

Fig. 10 Histogram of RSS error at (3.5,4.0) in ZigLoc with differential fingerprinting

測位精度は  $(7.41 - 5.50) / 7.41 \times 100 \approx 26\%$  向上した。差分フィンガープリント ZigLoc 方式の測位誤差の累積分布は ZigLoc 方式よりも左に表れており、測位誤差を削減できたことが分かる。

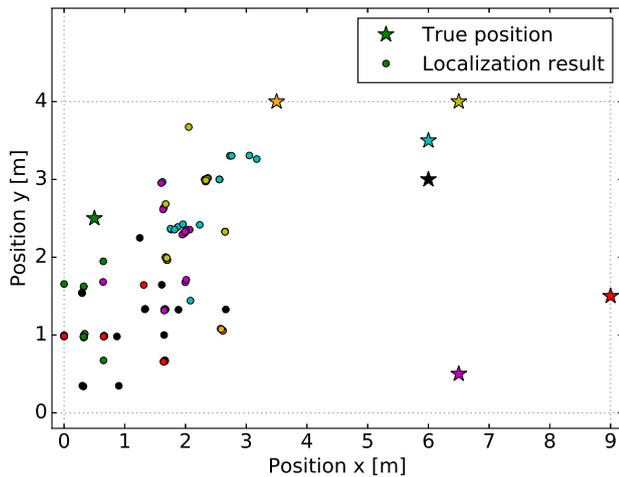
(2) 差分フィンガープリント ZigLoc 方式では測位誤差が 0.8m, 1.9m, 5.5m の累積確率に急な立ち上がりが見える。測位誤差がこれらの立ち上がり位置に集中していることが分かる。これは、特定の位置で測定した場合の測位誤差が 1 つの値に集中するためと考えられる。図 10 は、座標  $(x, y) = (6.0 \text{m}, 3.0 \text{m})$  における測位誤差の分布を示したものである。図 10 より、測位誤差は 1.9m に集中しており、測位結果の変動は少ないことがわかる。

以上の結果から、差分フィンガープリント法によって ZigLoc の測位誤差を削減できることが確認された。

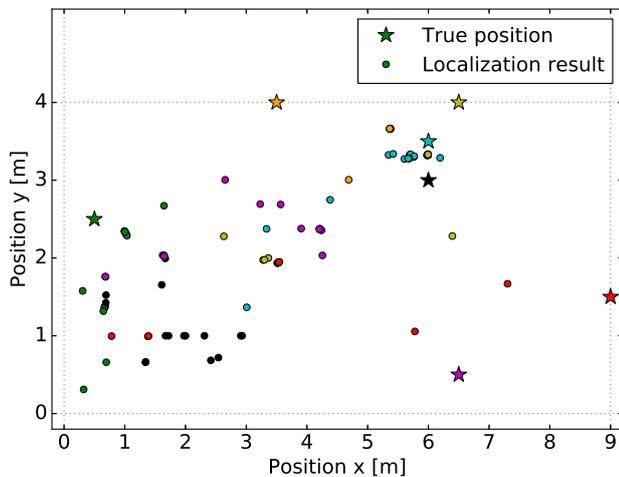
差分フィンガープリント法を用いてもベースラインとなる WiFi 測位方式の測位精度には及ばない結果となった。RSS オフセットの影響以外による精度低下が起こっているためと考えられる。

図 11 に ZigLoc 方式及び差分フィンガープリント ZigLoc 方式の全測位結果の座標を示す。図中の星印は測位対象位置の真値を、丸印は測位結果を示している。図より以下のことがわかる。

(1) ZigLoc 方式の測位結果は全て測位対象エリアの左半分には集まっているが、差分フィンガープリント ZigLoc 方式の測位結果は ZigLoc 方式と比較して図の右側に移動しているものが多い。ZigLoc 方式ではセンサノードで測定した RSS が WiFi モジュールで測定した場合よりも小さくなるため、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 ほどこの傾向は強くなる。このため、図 8 右下の AP から遠く離れる方向、すなわち図の左半分に測位結果が集まったと考えられる。一方、差分フィンガープリント



(a) 通常のフィンガープリント  
(a) ZigLoc without differential fingerprinting



(b) 差分フィンガープリント  
(b) ZigLoc with differential fingerprinting

図 11 ZigLoc 測位結果

Fig. 11 Localization results of ZigLoc

ZigLoc 方式では測位結果の多くが右へ移動している。差分フィンガープリント法を用いることで RSS オフセットによる影響を軽減できたと考えられる。

- (2) 図 11 中の A, B はそれぞれ座標  $(x, y) = (6.0\text{m}, 3.5\text{m})$ ,  $(6.0\text{m}, 3.0\text{m})$  である。A と B は 50cm しか離れていないにも関わらず測位結果には大きな差が生じている。A では差分フィンガープリント法によって測位結果が真値に近い位置に移動している。これは RSS オフセットによる測位誤差が軽減されたためと考えられる。しかしながら、B では ZigLoc 方式と差分フィンガープリント ZigLoc 方式とで測位結果の差があまりない。B での測位誤差は RSS オフセット以外の要因が大きく影響していると考えられる。

以上の結果から、センサノードと WiFi モジュール間の測位精度低下の大きな原因は RSS オフセット以外にも存在すると考えられる。

## 6. 関連研究

フィンガープリント測位においてフィンガープリント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。ここではフィンガープリント測位方式のコスト削減や測位精度向上に関する研究、フィンガープリントを用いて ZigBee 機器を測位する研究について述べる。

### 6.1 フィンガープリント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フィンガープリント測位方式がある。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 [8–11]。ここでは、WILL (Wireless Indoor Localization) [10], Redpin をユーザ参加型に拡張した手法 [23] 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フィンガープリントを取得する。この加速度からユーザの位置を推定し、フィンガープリント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フィンガープリント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、学習フェイズにおけるフィンガープリント収集を自動化し、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 フィンガープリント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フィンガープリントアルゴリズムを改善する手法 [12] 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 [13] 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 フィンガープリントを利用した 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フィンガープリント測位システムの ZiFind が存在する [24]。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、測位基準ノード不要のセンサ測位システム ZigLoc の測位精度向上手法を示し、実証評価を行った。ZigLoc では WiFi モジュールとセンサノードで測定した RSS の差が測位精度を低下させる原因となっていることを示し、これを解決するための差分フィンガープリント法を提案した。実証評価を通じて測位精度を評価し、差分フィンガープリント法を適用することで ZigLoc の測位精度を約 26% 向上できることを確認した。

**謝辞** 本研究の一部は、科研費 (15H05708, 16K16048) 及び東北大学電気通信研究所における共同プロジェクト研究の助成で行われた。

### 参考文献

- [1] 泉 幸作, 山本貴宏, 石田繁巳, 田頭茂明, 福田 晃: 基準ノード不要のセンサ測位システム ZigLoc の設計, 信学技報, モバイルネットワークとアプリケーション研究会 (MoNA2016-44), pp. 275–280 (2017).
- [2] 山田拓哉, 柴田直樹, 川井 明, 伊達 進, 下條真司: スマートフォンに適した位置推定高精度化のための RSSI 補正手法, 情報処理学会研究報告, 高度交通システムとスマートコミュニティ研究会 (ITS64-8), pp. 1–7 (2016).
- [3] Wang, J., Ghosh, R. K. and Das, S. K.: A survey on sensor localization, *J. Control Theory Applications*, Vol. 8, No. 1, pp. 2–11 (2010).
- [4] Cheng, L., Wu, C., Zhang, Y., Wu, H., Li, M. and Maple, C.: A Survey of Localization in Wireless Sensor Network, *Int. J. Distributed Sensor Networks*, Vol. 2012, pp. 1–12 (2012). Article ID 962523.
- [5] Lédeczi, A. and Maróti, M.: Wireless Sensor Node Localization, *Philosophical Trans. Royal Society A*, Vol. 2012, No. 370, pp. 85–99 (2012).
- [6] Minami, M., Fukuju, Y., Hirasawa, K., Yokoyama, S., Mizumachi, M., Morikawa, H. and Aoyama, T.: DOLPHIN: A Practical Approach for Implementing a Fully Distributed Indoor Ultrasonic Positioning System, *LNCS*, Vol. 3205, pp. 437–365 (2004). Proc. ACM Conf. Ubiquitous Computing (UbiComp).
- [7] Huang, L., Wang, F., Ma, C. and Duan, W.: 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).
- [8] Wang, H., Sen, S., Elgohary, A., Farid, M., Youssef, M. and Choudhury, R. R.: No Need to War-Drive: Unsupervised Indoor Localization, *Proc. ACM MobiSys*, pp. 197–210 (2012).
- [9] Yang, Z., Wu, C. and Liu, Y.: Locating in Fingerprint Space: Wireless Indoor Localization with Little Human Intervention, *Proc. ACM MobiCom*, pp. 269–280 (2012).
- [10] Wu, C., Yang, Z., Liu, Y. and Xi, W.: WILL: Wireless Indoor Localization without Site Survey, *IEEE Trans. Parallel Distrib. Syst.*, Vol. 24, No. 4, pp. 839–848 (2013).
- [11] Jiang, Z., Zhao, J., Han, J., Wang, Z., Tang, S., Zhao, J. and Xi, W.: 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 (2013).
- [12] Taok, A., Kandil, N. and Affes, S.: Neural Networks for Fingerprinting-Based Indoor Localization Using Ultra-Wideband, *J. Communications*, Vol. 4, No. 4, pp. 267–275 (2009).
- [13] Kuruoglu, G. S., Erol, M. and Oktug, S.: Three Dimensional Localization in Wireless Sensor Networks using the Adapted Multi-Lateration Technique Considering Range Measurement Errors, *Proc. IEEE GLOBECOM Workshops*, pp. 1–5 (2009).
- [14] Tsui, A. W., Chuang, Y.-H. and Chu, H.-H.: Unsupervised Learning for Solving RSS Hardware Variance Problem in WiFi Localization, *Mobile Networks and Applications*, Vol. 12, No. 5, pp. 677–691 (2009).
- [15] Kushki, A., Plataniotis, K. N. and Venetsanopoulos, A. N.: Intelligent Dynamic Radio Tracking in Indoor Wireless Local Area Networks, *IEEE Trans. Mobile Comput.*, Vol. 9, No. 1, pp. 405–419 (2010).
- [16] Kaemarungsi, K. and Krishnamurthy, P.: Analysis of WLAN's received signal strength indication for indoor location fingerprinting, *Pervasive and Mobile Computing*, Vol. 8, No. 2, pp. 292–316 (2012).
- [17] Sen, S., Radunović, B., Choudhury, R. R. and Minka, T.: You are Facing the Mona Lisa: Spot Localization using PHY Layer Information, *Proc. ACM MobiSys*, pp. 183–196 (2012).
- [18] Wirström, N., Misra, P. and Voigt, T.: Spray: A Multi-Modal Localization System for Stationary Sensor Network Deployment, *Proc. Annual Conf. Wireless On-demand Network Systems Services (WONS)*, pp. 25–32 (2014).
- [19] Zhou, R., Xiong, Y., Xing, G., Sun, L. and Ma, J.: Zifi: wireless LAN Discovery via ZigBee Interference Signatures, *Proc. ACM MobiCom*, pp. 49–60 (2010).
- [20] 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) (2011). <http://standards.ieee.org/>.
- [21] Youssef, M. and Agrawala, A.: The Horus WLAN Location Determination System, *Proc. ACM MobiSys*, pp. 205–218 (2005).
- [22] Bahl, P. and Padmanabhan, V. N.: RADAR: An In-Building RF-based User Location and Tracking System, *Proc. IEEE Int. Conf. on Computer Communications (INFOCOM)*, pp. 775–784 (2000).
- [23] Bolliger, P.: 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 (2008).
- [24] Gao, Y., Niu, J., Zhou, R. and Xing, G.: ZiFind: Exploiting Cross-Technology Interference Signatures for Energy-Efficient Indoor Localization, *Proc. IEEE Int. Conf. on Computer Communications (INFOCOM)*, pp. 2940–2948 (2013).