

# WiFi AP を用いたセンサノード測位に向けた RSS 観測手法

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

**概要：**筆者らは、測位基準ノードを新たに設置することなくセンサノードを測位する手法を確立するため、 WiFi アクセスポイント (AP) を測位基準ノードとして利用するセンサノード測位システムの実現を目指している。これに向けた第 1 歩として、本稿では、センサノード上で WiFi AP の RSS を観測する手法を示す。センサノードで WiFi 信号を直接受信することはできないため、ある制約条件を満たすビーコン周期を各 AP に設定し、ZiFi [1] で報告されたシンプルな信号処理手法を応用する。センサノード MICAz を用いて WiFi AP の RSS をリアルタイムに観測するシステムを実装し、実証評価を通じて WiFi AP を間違えることなく識別しながら RSS を測定できることを確認した。

## WiFi AP-RSS Measurement on Sensor Nodes for Sensor Localization System using WiFi APs as Anchors

Kousaku IZUMI<sup>1,a)</sup> Shigemi ISHIDA<sup>1</sup> Shigeaki TAGASHIRA<sup>2</sup> Akira FUKUDA<sup>1</sup>

### 1. はじめに

農業・漁業・林業などの第一次産業分野での高密度センシング・知的モニタリングや、建設・交通・環境・健康分野での構造物モニタリング・交通支援・エネルギー削減支援・人々の健康支援など、幅広い分野においてセンサネットワークの実用化が進められている [2]。このようなセンサネットワークにおいては、センサノードがどこに設置されているかという情報がネットワークの構築やルーティング、対象エリアの把握、位置情報サービスの提供、対象物の追跡のために必要となる [3]。例えば、室温の管理や建物への不正侵入検知では、どこの温度を制御するのか、どこに侵入者がいるのかを検知することが求められる。

一般に、センサノードの位置は手動による測定や GPS によって取得される。このため、GPS を用いることのできない屋内において数百から数千台のセンサノードを設置する大規模センサネットワークを構築する際にはセンサノード設置時のノードの測位が大きな課題となる。大規模な屋内センサネットワークの代表例として、ビルの機器や設備等の運転管理によってエネルギー消費量の削減を図るシステム BEMS (Building Energy Management System) や防

犯システム、入退室管理などが挙げられる。センサノード設置時のノードの測位はセンサネットワークの導入を妨げる一因となっている。

このような問題に対して、センサノードの測位技術を用いればセンサノードの位置測位を自動化できることから、これまでにも多くの屋内測位技術の研究が行われてきた [3-6]。大規模センサネットワークの場合には測位に必要となる測位基準ノードの設置が難点となるため、いかに少ない測位基準ノードで必要な測位精度を実現するかが重要となる。測位基準ノード数の削減に向けて、測位したセンサノードを新たな測位基準ノードとする Iterative Multi-lateration [7] や測位基準ノード配置の最適化 [8] が報告されているが、大規模センサネットワークでは測位誤差の蓄積により測位精度が大きく低下する。実際、長さ 43 m の廊下で 9 台のノードの測位を行った場合に最大で 7 m 程度の誤差が生じたことが報告されている [5]。

本研究のゴールは、測位基準ノードを新たに設置することなくセンサノードを測位する手法を確立することである。このゴールに向け、本研究では WiFi アクセスポイント (AP) を測位基準ノードとして利用するセンサノード測位システムを提案する。WiFi は広く普及しており、ビルなどの屋内にはすでに多くの WiFi AP が設置され、設置場所や使用チャネルが管理されている。そこで、センサ

<sup>1</sup> 九州大学大学院システム情報科学研究院

<sup>2</sup> 関西大学総合情報学部

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

ノードが検出可能な信号を WiFi AP に送信させ、センサノードでその信号の RSS (受信信号強度) を測定する。この RSS からセンサノードと WiFi AP の距離を算出し、多辺測量法によりセンサノードの位置を計算する。

WiFi AP を用いたセンサノード測位システムの実現に向けた第 1 歩として、本稿ではセンサノードで WiFi AP の信号 RSS を観測するシステムを示す。一般に、センサノードは IEEE 802.15.4 (ZigBee) モジュールを搭載しており、IEEE 802.11 規格の WiFi 信号を受信することはできない。そこで、ZiFi [1] で示されている信号処理手法を応用することで通信方式の違いを超えてセンサノード上で WiFi AP の信号を検出し、RSS を測定する。センサノードの測位に向けては複数台の AP 信号を区別しながら同時に検出することが必要となることから、WiFi AP の識別手法についても示す。

センサノードを用いた WiFi AP の RSS 観測システムをセンサノード MICAz を用いて実装し、WiFi AP を用いたセンサノード測位システムの実現性について検証した。また、実装した RSS 観測システムの実証評価を行い、検出率 90% 以上、誤検出率 10% 未満で WiFi AP を識別しながら RSS をリアルタイムに観測できることを確認した。

本稿の構成は、以下のとおりである。2 では筆者らが提案する WiFi AP を用いたセンサノード測位システムの概要を述べ、実現に向けた課題を示す。3 では WiFi AP が送信する信号の RSS を測定する手法について述べる。4 では実際にセンサノードを用いて WiFi AP の RSS をリアルタイムに観測するシステムを実装し、5 において実証評価を行う。6 ではセンサノードの測位に関する関連研究を述べ、最後に 7 でまとめとする。

## 2. WiFi AP を用いたセンサノード測位システム

図 1 に WiFi AP を用いたセンサノード測位システムの概要を示す。本システムは、センサノードと測位サーバ、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周期的に送信している。

測位を開始する場合、センサノードは 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。一般に、AP の設置位置はネットワーク管理者によって管理されているため、本システムでは測位サーバが全ての AP の位置情報を保持していることを想定している。

このようなアイデアの実現に向けては、以下の 2 つの課題がある。

### (1) WiFi AP の RSS 測定

一般に、センサノードは IEEE 802.15.4 (ZigBee) モ

ジュールを搭載しており、IEEE 802.11 規格の WiFi 信号を受信することはできない。WiFi AP が設置されている環境では多数の WiFi 機器が通信を行っていることが想定されているため、ZigBee モジュールを使用して多数の WiFi 信号の中から WiFi AP の信号のみを検出し、その RSS を測定する技術が必要となる。

### (2) 複数の AP の識別

測位計算においては AP の位置と AP・センサノード間の距離とを対応付けることが必要である。このため、複数台の AP が同時に送信している環境下で「どの AP が送信した信号か」を識別しながら検出することが必要である。

3 では、これらの課題を解決する RSS 観測システムの設計を示す。

## 3. WiFi AP の RSS 観測システム

### 3.1 概要

WiFi AP の RSS 観測システムの設計は、WiFi AP の RSS 測定、複数の WiFi AP の識別という 2 つのサブ設計に分けられる。WiFi AP の RSS 測定においては、センサノードで WiFi AP の信号を検出するため ZiFi [1] で報告された信号処理技術を用いる。ZiFi では AP が送信するビーコンフレームの周期性を利用して WiFi AP の信号を検出する。複数の WiFi AP の識別においては制約条件を満たすビーコン周期設定を各 AP に施すことで、センサノード上で AP の識別を可能とする。

以降では、2 つのサブ設計について詳細を説明する。

### 3.2 WiFi AP の RSS 測定

図 2 に WiFi 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 を取得する。図 3 に示すように 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で WiFi 信号を観測することが可能である。図 4 に、センサノード MICAz で取得した WiFi 信号の例を示す。MICAz のチャネルは 19 ch に設定した。IEEE 802.15.4 モジュールは 128  $\mu$ s ごとの RSS

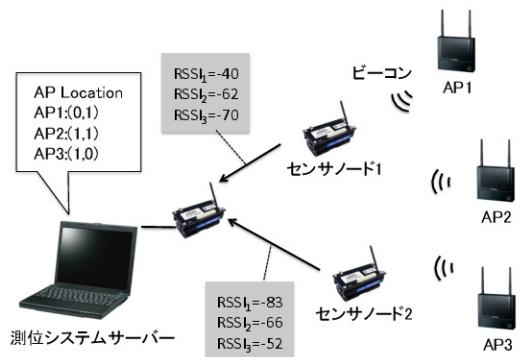


図 1 WiFi AP を用いたセンサノード測位システム

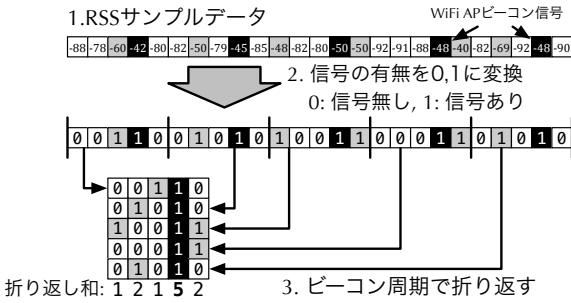


図 2 折り返し加算によるビーコン検出

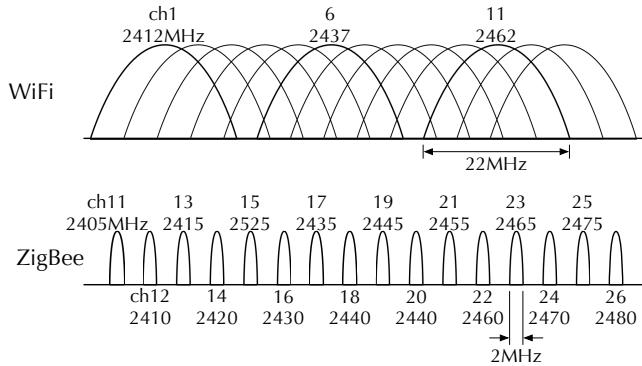


図 3 ZigBee と WiFi のチャネルの重なり

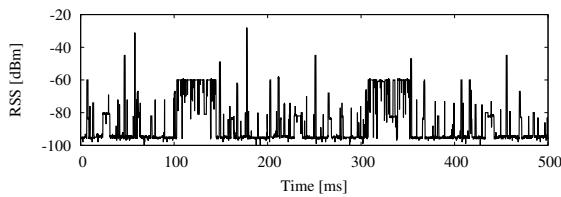


図 4 RSS サンプルデータ

の平均値を出力することが標準で既定されているため [9], 本システムでは WiFi 信号を逃さない範囲で最大周期となる  $128\mu\text{s}$  周期で RSS をサンプリングする (図 2 の 1)。

サンプリングした RSS に対して、以下の手順により AP の RSS を取得する。

- (1) サンプリングした RSS を用いて WiFi 信号の有無を判定し、チャネル使用有無サンプル (0: 信号なし, 1: 信号あり) に置き換える (図 2 の 2)。信号有無判定の閾値は、MICAz に搭載されている IEEE 802.15.4 モジュール CC2420 の CCA (Clear Channel Assessment) の閾値を参考に  $-77\text{ dBm}$  とした。
- (2) 検出対象となるビーコンの周期でチャネル使用有無サンプルを折り返して (図 2 の 3)，チャネル使用有無行列を得る。例えば、周期  $t$  のビーコンを検出する場合を考える。各チャネル使用有無サンプルの長さは  $128\mu\text{s}$  であるため、チャネル使用有無サンプルを  $t/(128 \times 10^{-6})$  ごとに折り返す。
- (3) チャネル使用有無行列の列ごとに総和を計算する。この総和を「折り返し和」と呼ぶ。
- (4) 検出対象のビーコンが存在する場合、ビーコンの周期

性によりチャネル使用有無行列のある列において常に WiFi 信号が存在することとなる。このため、大きな折り返し和はビーコン周期が折り返しの周期と一致するビーコン信号の存在を示していると言える (図 2)。本稿では折り返し回数に対する折り返し和の割合を重なり率と呼び、重なり率がある閾値を超えた列を AP のビーコンとして検出する。

### 3.3 複数の AP の識別

センサノードにおいて WiFi AP を間違うことなく識別するため、WiFi AP 毎に互いに倍数でないビーコン周期を設定する。これにより、前節で示した AP の検出手法に変更を加えることなく AP を識別することが可能となる。以下でそれを証明する。

**定理 1.**  $t_A, t_B$  は正の整数とする。周期  $t_B$  のビーコンを含む信号を周期  $t_A$  で折り返すとき、周期  $t_B$  の信号がチャネル使用有無行列の同じ列に現れるのはたかだか  $\text{lcm}(t_A, t_B)/t_A$  行に 1 回である。ここで  $\text{lcm}(t_A, t_B)$  は  $t_A$  と  $t_B$  の最小公倍数である。

**証明.** 背理法によって証明する。長さ  $\text{lcm}(t_A, t_B)$  の信号を周期  $t_A$  で折り返す場合を考える (図 5)。背理法により長さ  $\text{lcm}(t_A, t_B)$  の範囲で周期  $t_B$  のビーコンが 2 回以上同じ列に現れることが仮定されたため、

$$m \cdot t_B = n \cdot t_A < \text{lcm}(t_A, t_B). \quad (1)$$

となる正の整数  $m, n$  が存在する。しかし、この式は  $\text{lcm}(t_A, t_B)$  が  $t_A$  と  $t_B$  の最小公倍数であることと矛盾する。以上より定理が成り立つことが示された。  $\square$

ビーコン周期の設定として互いに倍数でない周期を選択した場合を考える。 $t_A$  が  $t_B$  の倍数でないとすると、 $\text{lcm}(t_A, t_B) > t_A$  となるから  $\text{lcm}(t_A, t_B)/t_A > 1$  である。したがって、定理 1 より周期  $t_B$  のビーコンがチャネル使用有無行列の同じ列に現れるのはたかだか 2 行に 1 回である。このため、重なり率が 50% を超える列を抽出することで周期の異なるビーコンを区別しながら検出ができる。

実際には、互いに倍数とならないビーコン周期のリストを作成し、これらを各 AP に設定する。このとき、WiFi AP のビーコン周期の設定値は 100 TU (TU: time unit =  $1024\mu\text{s}$ ) の倍数にならないようにする。これは、既製品

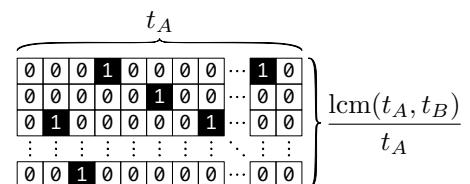


図 5 周期  $t_B$  のビーコンを含む長さ  $\text{lcm}(t_A, t_B)$  の信号の周期  $t_A$  での折り返し

の WiFi AP におけるビーコン周期の初期値が 100 TU であるためである。

実環境においては、 WiFi の CSMA/CA 方式の影響によるビーコンの送信遅延やビーコンフレーム長の違いなどがビーコン検出率に影響を与えることが予想される。そこで、誤検出率が高いビーコン周期の組合せを使用可能なビーコン周期のリストから削除する。具体的にはアルゴリズム 1 に示すアルゴリズムを用いて誤検出率が高くなるビーコン周期を除外していく。ここで、  $fp(A, B)$  は周期  $A$  のビーコン信号を周期  $B$  のビーコン信号として検出してしまう確率である。

## 4. 実装

WiFi AP を用いたセンサノード測位システムの実現性を検証するために、センサノードによる WiFi AP のリアルタイム RSS 観測システムを実装した。図 6 に実装したシステムを示す。センサノードは 3 台の WiFi AP の信号を同時に検出し、それぞれの AP の RSS を取得してシリ

### Algorithm 1 区別できないビーコン周期の組合せを削除

**Require:** a set of distinguishable beacon intervals  $L$ ,  $threshold$  for false positive detection.

**Ensure:**  $L \leftarrow$  group of beacon interval

```

1: while sizeof( $L$ ) > 1 do
2:   all  $in\_distinguish[ ] = 0$ 
3:   for  $b\_int$  in  $L$  do
4:     for  $fold\_bint$  in  $L \setminus \{b\_int\}$  do
5:       if  $fp(b\_int, fold\_bint) \geq threshold$ 
       or  $fp(fold\_bint, b\_int) \geq threshold$  then
6:          $in\_distinguish[b\_int] += 1$ 
7:       end if
8:     end for
9:   end for
10:  if all  $in\_distinguish[ ] == 0$  then
11:    return  $L$ 
12:  end if
13:   $unuse\_bint \leftarrow b\_int$  associated with  $\max(in\_distinguish)$ 
14:   $L \leftarrow L \setminus \{unuse\_bint\}$ 
15: end while
16: return  $L$ 

```

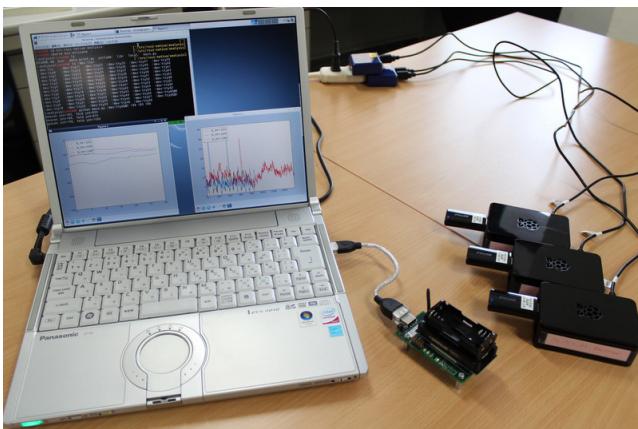


図 6 センサノードによる WiFi AP の RSS 観測システム

アル通信を介して PC に転送する。PC は取得した RSS 情報をリアルタイムに表示する。

AP としては、シングルボードコンピュータの Raspberry Pi を使用した。Raspberry Pi には AP 用の OS である OpenWrt をインストールし、 WiFi モジュールとして Buffalo 社製 WLI-UC-G301N を使用した。センサノードにはクロスボーラー株式会社の MICAz (MPR2600J) を使用した。MICAz は無線モジュールは IEEE 802.15.4 ZigBee 準拠の Texas Instruments 社製 CC2420 を搭載している。PC は Panasonic 社製の Let's Note CF-Y8 を用いた。なお、本実装は実現性の検証を目的としているため、3.2 で示した信号処理はセンサノード上ではなく PC 上で実行した。

## 5. 評価

### 5.1 評価環境

WiFi AP を用いたセンサノード測位システムの実現に向け、センサノードを用いて複数台の WiFi AP の RSS を観測できることを検証するため、検出率、誤検出率の評価実験を行った。あらかじめビーコン周期を設定した 1 台の WiFi AP をセンサノードから約 2.5 m 離して配置し、センサノードを用いてサンプリング周期  $128 \mu\text{s}$  で RSS を 1 分間に渡って取得した。WiFi AP とセンサノードのチャネルは固定とし、図 3 を参照して互いのチャネルが重なるように WiFi AP は 11 ch に、センサノードは 22 ch に設定した。

### 5.2 折り返し回数に対する重なり率

3.2 で示した手法で WiFi AP のビーコンを検出するためには何回の折り返しが必要となるかを確認するために、折り返し回数に対する重なり率を評価した。 WiFi AP のビーコン周期は 109 TU に設定した。

図 7 に折り返し回数に対する重なり率を示す。図 7 の縦軸は重なり率の平均 (エラーバーは重なり率の最大値と最小値)、横軸は折り返し回数を表している。図 7 より、以下の 3 つのが分かる。

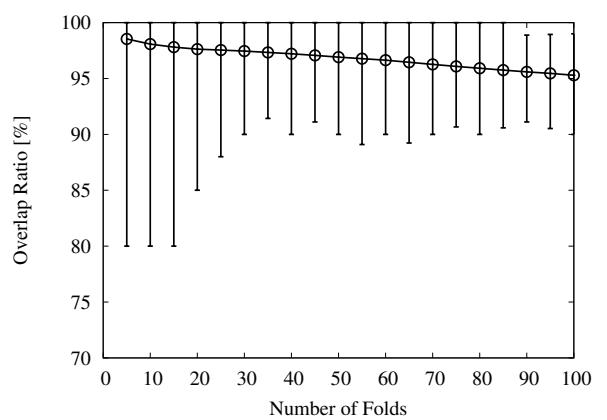


図 7 折り返し回数と重なり率

- (1) 折り返し回数が少ないほど重なり率のブレ幅が大きいが、折り返し回数が30回以上になるとブレ幅が±10%程度に収まって安定する。これは、折り返し回数が少ないほど折り返し和が1減少した場合の重なり率の減少が大きいためである。
- (2) 折り返し回数が少ないほど重なり率の平均値は大きい。これは、RSSサンプリング周期がセンサノードのクロック周波数誤差などによって設定値よりわずかにズれているためである。折り返し回数が多いほどサンプリング周期の誤差が蓄積し、ビーコン信号が寄与するチャネル使用有無サンプルがズれる。
- (3) 全ての折り返し回数において重なり率の平均値は100%に達していない。これは、CSMA/CA方式の影響によるビーコンの送信遅延やビーコンフレーム長の違いによってビーコンを検出できない場合があるためである。

以上の結果から、折り返し回数を30回以上とすることで重なり率が90%以上となることが示された。折り返し回数を増やすと重なり率が低下するため、以降の評価では30回の折り返しを行うこととする。折り返し回数30回における重なり率の最低値が90%を上回っていることから、APの検出に用いる閾値は80%とする。

### 5.3 ビーコン周期に対する検出率、誤検出率

3.3に示した手法によりセンサノードにおいてAPを識別しながら検出できることを検証するため、検出率及び誤検出率を評価した。検出率は周期 $t$ のビーコンを周期 $t$ のビーコンとして検出する確率であり、誤検出率は周期が $t$ でないビーコンを周期 $t$ のビーコンとして検出する確率である。理想環境と現実環境を想定した場合のビーコン周期リストをそれぞれ作成し、これらの周期リストをAPに設定した場合について評価を行った。現実環境を想定したビーコン周期リストの作成においては、誤検出率が10%未満となるように理想環境のビーコン周期リストの一部をアルゴリズム1を用いて削除した。誤検出率の評価では、周期が $t$ でない全てのビーコン周期に対してそれぞれ誤検出率を算出し、その最大値を評価した。使用するビーコン周期の範囲は実際のAPに設定可能な現実的な値を想定して15~500TUとした。

図8に、検出率(True Positive: TP率)と誤検出率(False Positive: FP率)の最大値とを示す。図(a)は理想環境を、図(b)は現実環境を想定したビーコン周期リストを用いた場合をそれぞれ示している。図8より、以下の3つことが分かる。

- (1) 図(a), (b)ともに、全てのビーコン周期において高いTP率となる。TP率の最小値は図(a)でビーコン周期349TUのときの89.5%である。3.2で示した手法を用いることでビーコン周期に関わらず高い確率でWiFi APを検出できると言える。

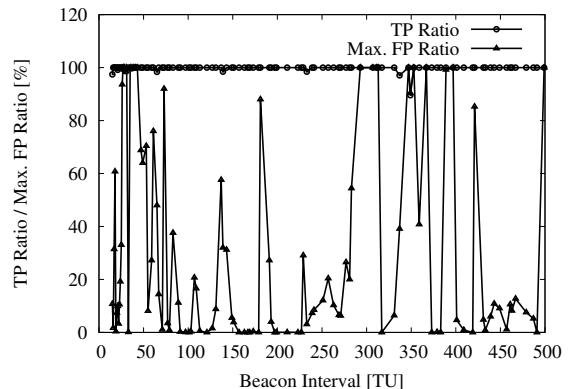
- (2) 図(a)では、FP率の最大値が非常に高いビーコン周期が多く存在する。理想環境を想定したビーコン周期リストを用いた場合には現実環境において誤検出が頻発すると言える。
- (3) 図(b)では、全てのビーコン周期において検出率90%以上かつ誤検出率10%未満を満たしている。3.3で示した手法を用いて現実環境で使用不能なビーコン周期を削除することで、高い検出率及び低い誤検出率を同時に達成できると言える。

以上の結果から、提案するRSS観測システムが検出率90%以上、誤検出率10%未満で複数APから送信されたビーコンを区別しながら検出できることが確認できた。

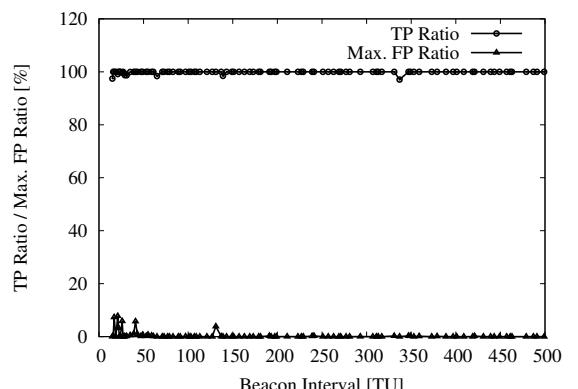
## 6. 関連研究

屋内測位に関する研究は、これまでに測位環境構築コストの削減や測位精度向上を中心に行われてきた。これらの研究の多くはWiFiを用いているが、ZigBeeにも適用可能である。

容易な測位環境構築に向けて、測位したセンサノードを新たな測位基準ノードとするIterative Multi-lateration [7]や、測位基準ノード配置の最適化により測位基準ノードの削減を図る研究 [8]などがこれまでに行われている。しかしながら、[7]では測位によって生じた誤差が蓄積してしまう



(a) 理想環境を想定したビーコン周期リストを用いた場合



(b) 現実環境を想定したビーコン周期リストを用いた場合

図8 ビーコン周期に対する検出率(TP率)及び誤検出率(FP率)の最大値

い、大規模センサネットワークには適していない。配置の最適化 [8] は理論的に測位基準ノードの数を減らすことが可能であるが、その配置で測位環境を構築するために新たな測位基準ノードの設置が必要となる。

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の学習を改善する手法 [10] や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 [11] などが報告されている。これらの手法は本研究においても測位精度向上の観点から有用である。

また、ユーザ端末で加速度と RSS を取得し、加速度センサから推定されるユーザ位置と RSS を融合させることでフィンガープリントの作成を半自動化する手法 [12] など、ユーザ協力型のフィンガープリント [13] が報告されている。センサノードの測位の場合にはユーザの位置を取得可能な特別なセンサノードをユーザに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。

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 [14]。しかしながら、ZiFind は測位基準ノードを用いない代わりに ZiFind mapper と呼ばれる WiFi 機器を複数台設置する必要がある。WiFi 機器と ZigBee 機器との間での通信を可能とする異種無線間通信も提案されているが [15–17]、特別なハードウェアの導入や WiFi AP フームウェアの変更が必須となる。

## 7. おわりに

本稿では、測位基準ノードを新たに設置することなくセンサノードを測位する手法を確立するため、WiFi AP を測位基準ノードとして利用するセンサノード測位システムを提案した。提案したシステムの実現に向けた第 1 歩としてセンサノード上で WiFi AP の RSS をリアルタイムに測定するシステムを示した。センサノードでは WiFi 信号を直接受信することはできないため、ある制約条件を満たすビーコン周期設定を各 AP に施し、既存の信号処理手法を応用することで、各 AP を区別しながらリアルタイムに WiFi 信号の RSS を測定する。このような RSS 観測システムを実装し、実証評価を通じてセンサノード上で WiFi AP を間違えることなく識別できることを確認した。

**謝辞** 本研究の一部は、科研費 (25870928) の助成で行われた。

## 参考文献

- [1] 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).
- [2] 大橋正良、大槻知明：ユビキタスセンサネットワーク、信学誌、Vol. 95, No. 9, pp. 772–778 (2012).
- [3] 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.
- [4] 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).
- [5] Wirstrom, 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).
- [6] Lédeczi, A. and Maróti, M.: Wireless Sensor Node Localization, *Philosophical Trans. Royal Society A*, Vol. 2012, No. 370, pp. 85–99 (2012).
- [7] Minami, M., Fukuju, Y., Hirasawa, K., Shigeaki, Y., 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)*.
- [8] 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).
- [9] 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/>
- [10] 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).
- [11] 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).
- [12] 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).
- [13] Bolliger, P.: Redpin – Adaptive, Zero-Configuration Indoor Localization through User Collaboration, *Proc. ACM Int. Workshop Mobile Entity Localization Tracking GPS-less Environments (MELT)*, pp. 55–60 (2008).
- [14] Gao, Y., Niu, J., Zhou, R. and Xing, G.: ZiFind: Exploiting Cross-Technology Interference Signatures for Energy-Efficient Indoor Localization, *Proc. IEEE Int. Conf. Computer Communications (INFOCOM)*, pp. 2940–2948 (2013).
- [15] Chebrolu, K. and Dhekne, A.: Esense: Energy Sensing-Based Cross-Technology Communication, *IEEE Trans. Mobile Comput.*, Vol. 12, No. 11, pp. 2303–2316 (2013).
- [16] Zhang, X. and Shin, K. G.: Gap Sense: Lightweight Coordination of Heterogeneous Wireless Devices, *Proc. IEEE Int. Conf. Computer Communications (INFOCOM)*, pp. 3094–3101 (2013).
- [17] Kondo, Y., Yomo, H., Tang, S., Iwai, M., Tanaka, T., Tsutsui, H. and Obama, S.: Wake-up Radio using IEEE 802.11 Frame Length Modulation for Radio-On-Demand Wireless LAN, *Proc. IEEE Int. Symp. Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, pp. 869–873 (2011).