

WiFi APを用いたセンサノード測位に向けた WiFi送信チャネル推定手法の設計

石田 繁巳^{1,a)} 泉 幸作¹ 國廣 陽介¹ 田頭 茂明² 福田 晃¹

概要：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 (アクセスポイント) 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。ZigBee (IEEE 802.15.4) モジュールを具備したセンサノードでは WiFi (IEEE 802.11) の信号を受信することはできないため、無線通信規格の違いを乗り越えてセンサノードで WiFi 信号を検出し、RSS (受信信号強度) を測定する手法をこれまでに開発した [1, 2]。

本稿では、WiFi AP 送信チャネル推定手法「WiChest」を示す。センサノードで取得した WiFi 信号の RSS は WiFi の送信チャネル、センサノードの ZigBee チャネルの両方の影響を受けるため、正確な RSS の測定に向けては WiFi の送信チャネルに応じてセンサノードのチャネルを切り替えることが必須となる。このため、マルチチャネル AP 検出、AP 信号分離、送信チャネル推定という 3 つの手法を組み合わせることで WiFi AP の送信チャネルをセンサノードで推定する。実証評価を通じて WiChest が精度 0.90 で送信チャネルを推定できることを確認した。

Design of WiFi Operating Channel Estimator using Sensor Nodes for Sensor Localization System using WiFi APs as Anchors

Shigemi Ishida^{1,a)} Kousaku Izumi¹ Yosuke Kunihiro¹ Shigeaki Tagashira² Akira Fukuda¹

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、M2M (Machine-to-Machine) 通信、IoT (Internet of Things)、CPS (Cyber Physical Systems) 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、ターゲット追跡、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。センサノードの位置は、一般にセンサネットワーク構築時に 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。

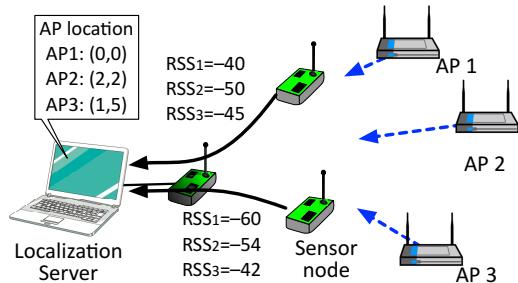


図 1 WiFi AP を測位基準ノードとして利用するセンサ測位システムの概要

屋内センサノードの測位を容易に行うため、これまでにセンサ測位システムの研究が進められてきた [3–5]。これらの研究では測位システムの導入コストの削減 [6–13] や測位精度の向上 [14–17] を実現している。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

¹ 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

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

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

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の開発を進めている。図 1 に、WiFi AP を測位基準ノードとして利用するセンサ測位システムの概要を示す。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多辺測量法などの距離ベースの位置推定手法によりセンサノードの位置が推定される。屋内環境にはすでに多数の WiFi AP が導入されており、その位置がネットワーク管理者によって管理されていることから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 を測定する手法を開発した [1, 2]。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。実証評価を行い、送信元 AP を誤認識率 10 %未満で識別しながら RSS を平均誤差 1.26 dB で測定できることを確認した。

しかしながら、WiFi の 1 つのチャネルは 4 つの ZigBee チャネルと重なっているため、測定した RSS は AP の送信チャネルと RSS を測定したセンサノードの ZigBee チャネルとによって変化する。多くの WiFi AP は通信エラーを削減するために自動的にチャネルを切り替えるため、正確な RSS 測定に向けてはセンサノード上で AP の送信チャネルを認識して適切な ZigBee チャネルに切り替えることが必須である。

このような観点から、本稿ではセンサノード上で WiFi AP の送信チャネルを推定する WiChest を示す。WiFi 信号がセンサノード上で 4 つの ZigBee チャネルのみで検出できることに着目し、WiFi AP の信号を複数の ZigBee チャネルで検出することによって AP の動作チャネルを推定する。センサノード MICAz を用いて WiChest を実装し、実証評価を通じて送信チャネル推定性能の評価を行った。

本稿の構成は以下の通りである。2 では屋内センサ測位技術及びセンサノードにおける WiFi 信号検出技術に関する関連研究を示す。3 で WiChest の設計を示し、4 においては市販のセンサノード MICAz と WiFi AP を用いた実証評価により WiChest の基本性能を検証する。最後に 5 でまとめとする。

2. 関連研究

センサネットワーク分野においてセンサノードのみを用いて WiFi AP の送信チャネルを推定するという試みは、筆者らの調査した範囲ではこれまでのところ行われていない。ここでは屋内センサ測位技術及びセンサノードによる WiFi 信号検出技術に関する関連研究について述べる。

2.1 屋内センサ測位技術

屋内測位技術に関しては、これまでに測位システムの導入コスト削減及び測位精度の向上に向けた研究が進められている。多くの研究は WiFi 機器を対象としているが、ZigBee モジュールを具備したセンサノードにも適用可能である。

Iterative multilateration は、測位したノードを新たな測位基準ノードとして利用する測位方式である [6]。ノードの測位が進むとともに測位基準ノードの数が増加するため、最初に設置する測位基準ノードの数を削減できる。測位基準ノードの配置を最適化することで必要となる測位基準ノード数をさらに削減する手法も報告されている [7]。これらの手法を用いると最初に設置する測位基準ノードの数を削減できるものの、新たな基準ノードの導入は避けられず、大規模センサネットワークにおいては最初に導入する基準ノードの配置コストが大きな問題となる。

クラウドソーシングを利用したフィンガープリンティングではユーザの協力によって収集した「フィンガープリント」と呼ばれるデータを用いて測位が行われるため、測位基準ノードの設置は不要である [8–13]。WiFi モジュールを搭載したスマートフォンが普及していることから、スマートフォンを持ち運ぶユーザの協力によってフィンガープリントの収集が行われることが一般的である。センサ測位システムに適用する場合にはユーザに ZigBee 機器を持ち運んでもらう必要があることから、ユーザの協力を得るのは困難である。

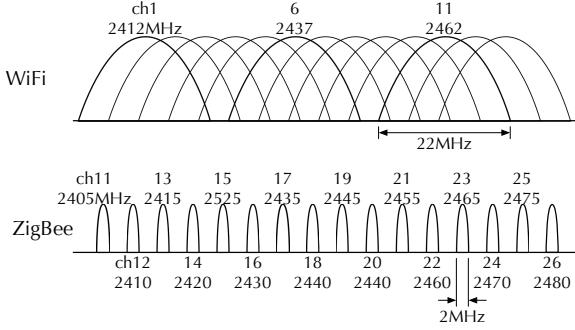
図 1 に示した WiFi AP を用いたセンサ測位システムでは、AP の RSS (受信信号強度) を取得した後は既存の位置推定手法の適用を想定している。このため、これまでに行われてきた測位精度向上に関する研究 [14–17] は本研究の最終ゴールであるセンサ測位システムの実現に向けても有用である。

ZigBee モジュールを用いた新しいセンサ測位方式として、測位基準ノードを用いないフィンガープリント測位システム ZiFind が提案されている [18]。しかしながら、ZiFind で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り、本質的には測位基準ノードの設置と変わらない手間が必要となる。

2.2 センサノードによる WiFi 信号検出技術

センサノードによる WiFi 信号検出技術は、その使用目的によって 2 つに分類できる。

1 つ目の分類は、異種無線間の干渉回避に向けた技術である。ZiFi は、センサノード上で WiFi AP の信号を検出する手法である [19]。WiFi AP が送信している周期的なビーコン信号を、その周期性を利用してシンプルな信号処理技術によってセンサノード上で検出する。ZiFi によってセンサノード上で AP を検出できるが、AP の送信チャネルを推定することはできない。TIIM では、機械学習した



この間は RSS サンプルを取得できない。その代わりとしてチャネル切り替えを示す信号を埋め込んでおく。ZigBee モジュールは $128\ \mu\text{s}$ 間の平均 RSS を出力することが標準で規定されているため、WiFi 信号を逃さない範囲でサンプリング周期が最大となるようにサンプリング周期は $128\ \mu\text{s}$ とする。

収集された RSS サンプルはチャネル使用有無サンプル(0: 未使用, 1: 使用中)に変換される(図 4b)。チャネルが使用されているかを判断する閾値は、WiFi 信号検出技術 Z-Fi と同様に IEEE 802.15.4 モジュール CC2420 [24] の CCA (Clear Channel Assessment) の閾値を参考として $-77\ \text{dBm}$ とした[19]。

チャネル使用有無サンプルは元の RSS サンプルが観測された ZigBee チャネル毎に分離し、WiFi AP のビーコン周期で折り返してチャネル使用有無行列を得る(図 4c)。ビーコン開始タイミングの情報を保持するため、チャネル使用有無行列は一部が欠けた行列となっている。最後に、チャネル使用有無行列の各列について和を求める(図 4d)。この和を折り返し和と呼ぶ。

WiFi AP は、チャネル使用有無行列で折り返し和が閾値を超える列を探することで検出できる。AP のビーコン周期がチャネル使用有無行列の折り返し周期と一致している場合、AP 信号はチャネル使用有無行列の特定の列に表れる。このため、大きい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。文献[2]を参照し、AP 検出における折り返し和の閾値は折り返し回数の 80% とする。

AP の RSS は、検出された AP 信号に対応する RSS サンプルを平均化することで算出される。まず、チャネル使用有無行列の作成と同様にして RSS サンプルを折り返し、RSS 行列を得る。そして、チャネル使用有無行列で AP が検出された列に対応する列を RSS 行列から抽出し、全 RSS サンプルを平均化することで AP の RSS が得られる。なお、RSS を平均化するだけでは誤差が大きくなるため、実際にはシンプルなフィルタを適用して一部の RSS サンプルから AP の RSS を算出する[1]。

現実環境では複数台の AP が存在するため AP 信号検出時にビーコン開始インデックスを記録し、AP 信号分離ブロックにおいて送信元 AP 每に AP 信号をグループ化する。ビーコン開始インデックスは、チャネル使用有無行列における AP 信号の立ち上がり部のインデックス番号である。同一 AP からの信号は ZigBee チャネルを切り替えながら観測してもチャネル使用有無行列の同じ列で観測されるため、同一のビーコン開始インデックスを持つ。

3.4 AP 信号分離ブロック

AP 信号分離ブロックでは、検出された AP 信号を (ZigBee チャネル) – (ビーコン開始インデックス) という特微量空間にマッピングし、クラスタリング手法を適用することで送信元 AP 每に分離する。図 5 に、(ZigBee チャネル

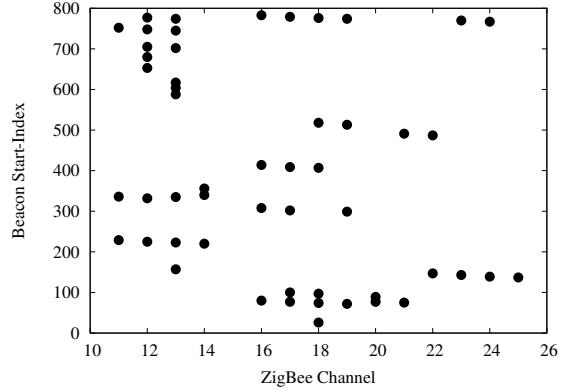


図 5 (ZigBee チャネル) – (ビーコン開始インデックス) 特微量空間上にマッピングされた AP 信号の例

ル) – (ビーコン開始インデックス) 特微量空間上にマッピングされた AP 信号の例を示す。図 5 は、周囲に 20 台の AP が存在する場所で RSS をサンプリングし、マルチチャネル AP 検出手法を適用して検出された AP 信号を (ZigBee チャネル) – (ビーコン開始インデックス) 空間にマッピングした結果を示している。同一 AP からの信号は 4 つの ZigBee チャネルにおいて同じビーコン開始インデックスを持つため、1 台の AP は 1 列に並んだ 4 つの点となって観測される。AP の信号はノイズや周辺の WiFi 機器などの影響により一部の ZigBee チャネルで検出されないことがあるため、一部の AP では 3 つ以下の点となっている。

実環境ではセンサノードの周囲に存在する AP の数は不定であるため、適用するクラスタリング手法はクラスタ数を与えないものが望ましい。WiChest では使用するクラスタリング手法を限定しないが、提案手法の基本性能を実証するための一例として本稿ではクラスタ数を与えないシンプルなクラスタリング手法の 1 つである平均シフト法を用いる。平均シフト法で必要となるクラスタリング半径は、以下の 2 点を考慮して決定する。

- 1 台の AP からの信号は連続した 4 つの ZigBee チャネルで観測される。このため、同一 AP からの信号間の距離は ZigBee チャネル軸で 3 以内となる。
- AP とセンサノードは同期されていないため、AP やセンサノード上の水晶発振器の周波数誤差によってビーコン開始インデックスに同期誤差が生じる。AP 及びセンサノードの水晶発振器の発振周波数偏差は約 $\pm 100\ \text{ppm}$ である。マルチチャネル AP 検出は AP 検出に約 3 秒間を必要とするため[2]、4 チャネルを観測する間の同期誤差は $\pm 1.2\ \text{ミリ秒}$ となる。これは約 ± 9.4 サンプル時間であるから、同一 AP からの信号間の距離はビーコン開始インデックス軸で 18.8 以内となる。

ZigBee チャネル軸とビーコン開始インデックス軸で必要となるクラスタリング半径が異なることから、ビーコン開始インデックス軸方向を倍率 γ (< 1) で縮小させ、クラス

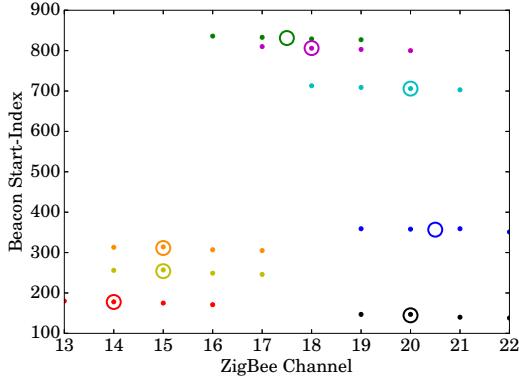


図 6 平均シフト法を用いた AP 信号分離の例（ビーコン開始インデックスの倍率 $\gamma = 0.2$ ）

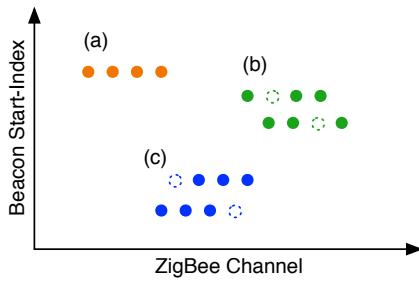


図 7 AP 信号が検出された ZigBee チャネルの全組み合わせ（3つ以上の ZigBee チャネルで AP が検出された場合）

ターリング半径は 3 で固定とする。ビーコン開始インデックスの倍率 γ の値は同期誤差の大きさによって変更する必要があると考えられるため、評価において決定する。

図 6 に、平均シフト法を用いた AP 信号分離の成功例を示す。ビーコン開始インデックスの倍率は $\gamma = 0.20$ である。図は、AP が 8 台存在する環境下でマルチチャネル AP 検出手法によって検出された AP 信号を分離した例である。各点は検出された AP 信号を示しており、円は平均シフト法におけるクラスタの中心、点と円の色はクラスタをそれぞれ表している。ビーコン開始インデックス 830 付近に 8 つの AP 信号が確認できることから近い値のビーコン開始インデックスを持つ AP が 2 台存在したと考えられるが、提案手法によって 2 台の AP に分離できていることが分かる。

3.5 チャネル推定ブロック

チャネル推定ブロックでは、AP 信号が検出された ZigBee チャネルの組み合わせを用いて AP の送信チャネルを推定する。1 台の AP からの信号は連続した 4 つの ZigBee チャネルで観測されるが、現実環境ではノイズや AP・センサノードの非同期動作の影響などによりいくつかの ZigBee チャネルで AP を検出できない場合がある。AP の送信チャネル推定を高い確率で行うため、3 つ以上の ZigBee チャネルで AP が検出された場合に送信チャネルを推定可能な手法を設計した。

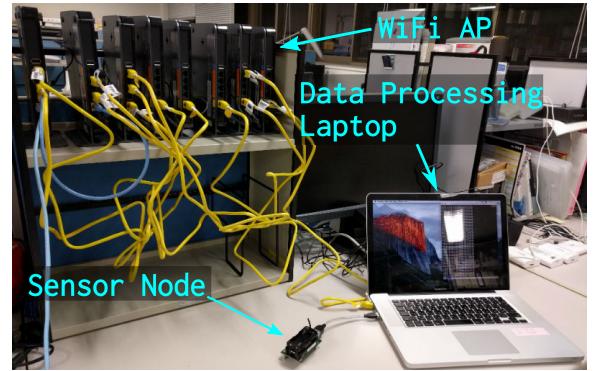


図 8 実験環境

図 7 は、1 台の AP 信号が 3 つ以上の ZigBee チャネルで検出された場合の検出チャネルの組み合わせを示したものである。多くの場合において AP 信号は (a) 連続した 4 つの ZigBee チャネルで検出されるが、(b) 2 番目または 3 番目のチャネルで検出されない場合、(c) 4 つのチャネルのうち最初または最後のチャネルで検出されない場合がある。

提案するチャネル推定手法では、AP 信号が検出された ZigBee チャネルの組み合わせが図 7 のいずれの場合に該当するかを確認する。図 7a の場合には図 2 を参照すれば容易に WiFi AP の送信チャネルを推定できる。図 7b, c の場合は、AP が検出されなかった ZigBee チャネルにおいて AP が仮想的に検出されたものとして AP 送信チャネルを推定する。AP が実際または仮想的に検出された ZigBee チャネルをそれぞれ c_s , $c_s + 1$, $c_s + 2$, $c_s + 3$ とすると、WiFi AP の送信チャネル \tilde{c}_w は以下で推定できる。

$$\tilde{c}_w = c_s - 10 \quad (1)$$

4. 評価

WiChest の性能を評価するため、センサノードと WiFi AP を用いた評価実験により AP 送信チャネル推定精度の評価を行った。

4.1 評価環境

図 8 に実験環境を示す。実験では、センサノード、WiFi AP、データ処理 PC を用いた。8 台の WiFi AP は机上に設置し、AP の信号をほぼ確実に検出できる距離として約 1 メートル離してセンサノードを設置した。センサノードは周期的に ZigBee チャネルを切り替ながら RSS (受信信号強度) をサンプリングし、収集した RSS サンプルをデータ処理 PC に転送する。データ処理 PC では受信した RSS サンプルに 3 で示したデータ処理を適用し、検出された各 AP の送信チャネルを推定する。

AP は Netgear 社の WNDR4300 を用い、AP 用の OS である OpenWrt を動作させた。センサノードは IEEE 802.15.4 モジュールの CC2420 を搭載している Crossbow 社の MICAZ を用いた。データ処理 PC は Mac OSX 10.11 が動作する MacBook Pro である。WiChest の送信チャネル推

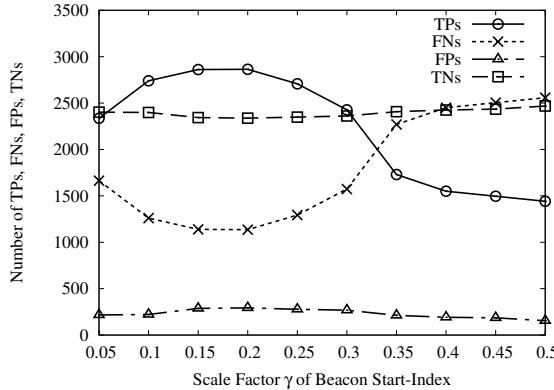


図 9 ビーコン開始インデックスの倍率 γ に対する True Positive (TP), False Negative (FN), False Positive (FP), True Negative (TN) の回数

定手法は Python プログラムとして実装した。

1 回の試行では、8 台の AP のチャネルを 1~11 の間で重複を許容してランダムに設定し、検出された AP の送信チャネルをそれぞれ推定した。センサノードでは ZigBee チャネルを 11~26 と切り替えながら各チャネルで RSS を約 4 秒間サンプリングした。各チャネルでのサンプリング時間は、センサノード MICAz に搭載されているメモリ容量から決定した。設置した 8 台の AP の他に実験環境には 20 台の AP が存在したため、8 台の AP のビーコン周期をデフォルトのビーコン周期 100 TU (time unit = 1,024 μ s) と異なる 109 TU に設定し、他の AP と区別した。3.4 で述べたビーコン開始インデックスの倍率 γ は、0.05~0.5 の範囲で変化させて評価を行った。試行回数は 500 回である。

4.2 AP 送信チャネル推定精度

AP 送信チャネルの推定精度の評価に向けて、まず各試行において AP に設定したチャネルと推定された送信チャネルとを比較し、True Positive (TP), False Negative (FN), False Positive (FP), True Negative (TN) の回数を評価した。TP, FN, FP, TN はそれぞれ AP の送信チャネルが正しく推定された場合、AP が存在する WiFi チャネルで AP を検出できなかった場合、AP が存在しない WiFi チャネルで AP を検出した場合、AP が存在しない WiFi チャネルで AP を検出しなかった場合である。

図 9 に、ビーコン開始インデックスの倍率 γ に対する True Positive (TP), False Negative (FN), False Positive (FP), True Negative (TN) の回数を示す。図 9 より以下の 3 つのが分かる。

- (1) ビーコン開始インデックスの倍率 $\gamma < 0.20$ においては、 γ が増加すると TP が増加している。TP は $\gamma = 0.20$ において最大となり、 $\gamma > 0.20$ では γ の増加とともに TP は減少する。ビーコン開始インデックスの倍率 γ は AP 信号分離においてビーコン開始インデックス軸で許容される最大の距離を定義するものである。 $\gamma = 0.20$ は、ビーコン開始インデックス軸におけるク

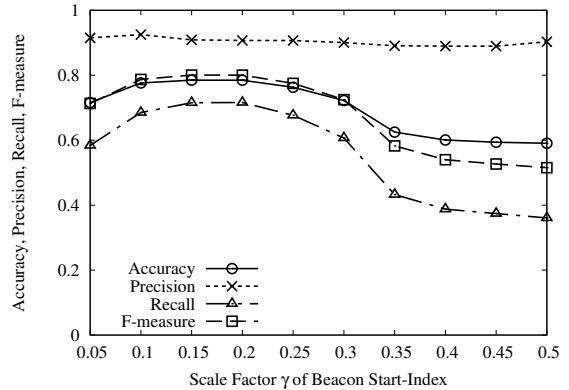


図 10 ビーコン開始インデックスの倍率 γ に対する正確度 (Accuracy), 精度 (Precision), 網羅率 (Recall), F 値 (F-measure)

ラスタリング半径 15 に相当することから、3.4 で算出したビーコン開始インデックスの同期誤差とほぼ一致していると言える。

- (2) TP と FN の回数は、ビーコン開始インデックスの倍率 γ 軸に平行な線分に対して対称である。評価実験では 8 台の AP を使って各 γ の値に対して 500 回の試行を行ったため、TP と FN の回数の合計は 4,000 で一定である。
- (3) FP と TN の回数はビーコン開始インデックス γ に対してほぼ一定である。FP と TN は主に AP 信号検出及びチャネル推定において発生し、 γ の変化による大きな影響は無かったと考えられる。

次に、TP, FN, FP, TN の回数を用いて以下で定義される正確度 (Accuracy), 精度 (Precision), 網羅率 (Recall), F 値 (F-measure) をそれぞれ算出した。

$$\text{Accuracy} = \frac{\text{TP} + \text{TN}}{\text{TP} + \text{FP} + \text{FN} + \text{TN}} \quad (2)$$

$$\text{Precision} = \frac{\text{TP}}{\text{TP} + \text{FP}} \quad (3)$$

$$\text{Recall} = \frac{\text{TP}}{\text{TP} + \text{FN}} \quad (4)$$

$$\text{F_measure} = \frac{2 \cdot \text{Precision} \cdot \text{Recall}}{\text{Precision} + \text{Recall}} \quad (5)$$

図 10 に、ビーコン開始インデックスの倍率 γ に対する正確度 (Accuracy), 精度 (Precision), 網羅率 (Recall), F 値 (F-measure) を示す。図 10 より以下の 3 つのが分かる。

- (1) 正確度、精度、F 値はビーコン開始インデックスの倍率 γ に対して同じような変化を示している。これらの変化の仕方は図 9 における TP 回数の変化の仕方とはほぼ同じである。 γ の変化に対して FP と TN の回数はほぼ一定であるから、正確度、精度、F 値の変化は TP と FN の影響が支配的であると言える。
- (2) 正確度、精度、F 値は $\gamma = 0.20$ のとき最大となり、その最大値はそれぞれ 0.78, 0.72, 0.80 である。 $\gamma = 0.20$ 付近では正確度、精度、F 値の変化が緩やかであることから、 γ が最適点から多少ずれていても最大値に近

い正確度、精度、F値を実現できることが分かる。

- (3) 精度はビーコン開始インデックスの倍率 γ に対してほぼ一定である。FPの回数はTPの回数に比べて少ないため、精度がほぼ変化しないものと考えられる。平均の精度は0.90である。

以上の結果から、WiChestによってF値0.80という高精度でAPの送信チャネルを推定できることが確認された。

5. おわりに

本稿では、WiFi APの送信チャネルをセンサノード上で推定するWiChestを示した。WiFi信号が4つのZigBeeチャネル上で観測されることを利用し、WiChestでは複数のZigBeeチャネルでWiFi信号を検出することでAPの送信チャネルを推定する。現実環境では複数台のAPが存在するため、APが検出されたZigBeeチャネルとAP信号が送出されているタイミングという2つの情報を用い、検出したAP信号をクラスタリング手法によって送信元AP毎に分離する。その上で、各APの信号が検出されたZigBeeチャネルの組み合わせからAPの送信チャネルを推定する。市販のセンサノード及びWiFi APを用いた実証評価を行い、WiChestを用いてF値0.80という高精度でAPの送信チャネルを推定できることを確認した。

謝辞 本研究の一部は、科研費(15H05708, 15K12021)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] Ishida, S., Izumi, K., Tagashira, S. and Fukuda, A.: WiFi AP-RSS Monitoring using Sensor Nodes toward Anchor-Free Sensor Localization, *Proc. IEEE Vehicular Technology Conf. (VTC-Fall)*, pp. 1–5 (2015).
- [2] Izumi, K., Ishida, S., Tagashira, S. and Fukuda, A.: Design of WiFi AP-RSS Monitoring System using Sensor Nodes, *Proc. Int. Symp. Computing and Networking (CANDAR)*, pp. 115–121 (2015).
- [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., Fukujii, 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).
- [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] Park, J.-G., Charrow, B., Curtis, D., Battat, J., Minkov, E., Hicks, J., Teller, S. and Ledlie, J.: Growing an Organic Indoor Location System, *Proc. ACM MobiSys*, pp. 271–284 (2010).
- [9] Rai, A., Chintalapudi, K. K., Padmanabhan, V. N. and Sen, R.: Zee: Zero-Effort Crowdsourcing for Indoor Localization, *Proc. ACM MobiCom*, pp. 293–304 (2012).
- [10] 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).
- [11] 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).
- [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] 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. Mobile Ad-Hoc and Sensor Systems (MASS)*, pp. 384–392 (2013).
- [14] 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).
- [15] 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).
- [16] 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).
- [17] 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).
- [18] 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).
- [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] Hithnawi, A., Shafagh, H. and Duquennoy, S.: TIIM: Technology-Independent Interference Mitigation for Low-power Wireless Networks, *Proc. IPSN*, pp. 1–12 (2015).
- [21] Chebrolu, K. and Dhekne, A.: Esense: Energy Sensing-Based Cross-Technology Communication, *IEEE Trans. Mobile Comput.*, Vol. 12, No. 11, pp. 2303–2316 (2013).
- [22] Kim, S. M. and He, T.: FreeBee: Cross-technology Communication via Free Side-channel, *Proc. ACM MobiCom*, pp. 317–330 (2015).
- [23] 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/>.
- [24] Texas Instruments: CC2420: Single-Chip 2.4 GHz IEEE 802.15.4 Compliant and ZigBee Ready RF Transceiver, datasheet. <http://www.ti.com/>.