

WiFi AP を用いたセンサ測位に向けた WiFi AP 動作チャネル推定手法

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

受付日 2016年5月24日, 採録日 2016年10月4日

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. IEEE 802.15.4 (ZigBee) 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. 本論文ではセンサノード上で WiFi AP の動作チャネルを推定する WiChest を示す. センサノードで測定した WiFi 信号の RSS は WiFi の動作チャネル, 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 の動作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, 動作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 の動作チャネルを推定する WiChest を開発した. 市販の WiFi AP とセンサノードを用いた実証評価を行い, WiChest によって F 値 0.80 で AP の動作チャネルを推定できることを確認した.

キーワード: WiFi AP 基準ノード, センサ測位, WiFi 動作チャネル, 異種無線信号検出

WiFi-AP Operating Channel Estimator for Sensor Localization System Using WiFi APs as Anchors

SHIGEMI ISHIDA^{1,a)} KOUSAKU IZUMI¹ YOSUKE KUNIHIRO¹ SHIGEAKI TAGASHIRA² AKIRA FUKUDA¹

Received: May 24, 2016, Accepted: October 4, 2016

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. Sensor nodes are equipped with IEEE 802.15.4 (ZigBee) modules, which cannot demodulate WiFi (IEEE 802.11) signals. We have developed a cross-technology signal extraction scheme to measure WiFi-AP RSS (received signal strength) on sensor nodes. In this paper, we present a WiFi-AP channel estimator named *WiChest*. The WiFi-AP RSS derived by a sensor node is affected by a WiFi-AP operating channel and ZigBee observation channel because a WiFi channel overlaps with four ZigBee channels. To accurately measure AP RSS, we need to specify a ZigBee channel depending on the WiFi-AP operating channel. We therefore developed WiChest, which consists of multi channel signal extraction scheme, AP signal separation scheme, and AP operating channel estimation scheme. We implemented WiChest using off-the-shelf WiFi APs and a sensor node. The experimental evaluations reveal that WiChest accurately estimates AP operating channels with an F-measure of 0.80.

Keywords: WiFi-AP anchors, sensor localization, WiFi operating channel, cross-technology signal detection

¹ 九州大学大学院システム情報科学研究所
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

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), 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。一般に、センサノードの位置は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。

屋内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], [4], [5]。センサ測位システムに関しては、これまでに測位システムの導入コストの削減 [6], [7], [8], [9], [10], [11], [12], [13], [14], [15] や測位精度の向上 [16], [17], [18], [19], [20], [21], [22] 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、その位置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

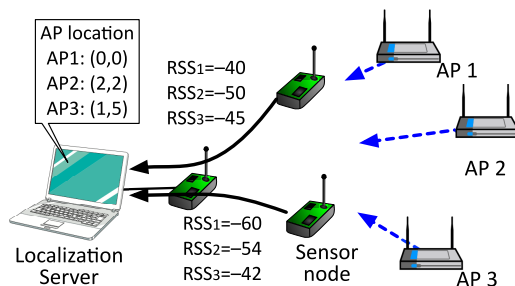


図 1 WiFi AP を測位基準ノードとして利用するセンサ測位システムの概要

Fig. 1 Overview of a sensor localization system using WiFi APs as anchors.

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 つのチャンネルは 4 つの ZigBee チャンネルと重なっており、同一の AP の信号を 4 つの ZigBee チャンネルで検出するとそれぞれ異なる RSS が観測される。RSS の誤差は測位精度に大きな影響を与えるため、WiFi AP の動作チャンネルに応じて適切な ZigBee チャンネルに切り替えたうえで RSS を測定する必要がある。多くの WiFi AP は通信エラーを削減するために自動的に動作チャンネルを切り替えるため、周囲に存在する AP の動作チャンネルをあらかじめセンサノードに記憶させておくことは難しい。RSS を正確に測定するためにはセンサノード上で AP の動作チャンネルを認識し、動作チャンネルに応じて適切な ZigBee チャン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、本論文ではセンサノード上で WiFi AP の動作チャンネルを推定する WiChest を示す。WiFi 信号がセンサノード上で 4 つの ZigBee チャンネルで検出されることに着目し、WiFi AP の信号を複数の ZigBee チャンネルで検出することによって WiFi AP の動作チャンネルを推定する。センサノード MICAz を用いて WiChest を実装し、実証評価を通じて動作チャンネル推定性能の評価を行った。

本論文の構成は以下のとおりである。2 章では屋内センサ測位技術とセンサノードにおける WiFi 信号検出技術とに関する関連研究を示す。3 章で WiChest の設計を示し、4 章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 章でまとめとする。

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 の動作チャン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。本章では、屋内センサ測位技術およ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およ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。

反復多辺測量法 (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], [9], [10], [11], [12], [13], [14], [15]. 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センサノード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の向上に関する研究 [16], [17], [18], [19], [20], [21], [22] 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 [23]. 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る, 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 [24]. 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 の動作チャンネルを推定することはできない. TIIM では, 機械学習した分類器によって ZigBee ネットワークに対する異種無線規格の干渉源を推定する [25]. そして, 干渉源からの干渉のパターンに応じて干渉回避策を切り替えることで高い耐干渉性能を実現している. TIIM では干渉のパターンのみに基づいて干渉回避策を選択するため, 干渉源が動作する周波数帯を特定する手法は提供されていない.

2 つ目の分類は, 異種無線間での通信実現に向けた技術である. Esense は, WiFi フレームの長さを用いた PWM (Pulse Width Modulation) 通信によって WiFi から ZigBee

への通信を実現している [26], [27]. Esense に従わない WiFi 機器の存在を考慮し, WiFi フレーム長の使用頻度を統計的アプローチにより取得し, 使用頻度の低いフレーム長のみを使用して通信を行う. FreeBee では AP から周期的に送信されるビーコン信号の送出タイミングをシフトさせることで PPM (Pulse Position Modulation) 通信を実現している [28]. これらの手法は送受信チャンネルについて考慮しておらず, チャンネル制御を行う MAC (Medium Access Control) プロトコルの存在を暗黙的に想定している.

3. 設計

3.1 アプローチ

WiChest の基本アプローチは, WiFi AP の信号を複数の ZigBee チャンネルで検出することである. 図 2 は WiFi と ZigBee のチャンネル配置を示している. 図 2 に示すように WiFi チャンネルはそれぞれ異なる 4 つの ZigBee チャンネルと重なっている. このため, WiFi AP の信号が検出された ZigBee チャンネルから AP の動作チャンネルを推定することができる. 実環境中には多数の AP が設置されているため, 検出した AP の信号を送信元 AP ごとにグループ化する手法を適用し, 各 AP の信号が検出された ZigBee チャンネルの組合せから AP の動作チャンネルを推定する.

3.2 設計概要

図 3 に, WiChest の概要を示す. WiChest は, マルチチャンネル AP 検出ブロック (Multi-Channel AP Detector), AP 信号分離ブロック (AP Signal Splitter), チャンネル推定ブロック (Channel Estimator) という 3 つのブロックから構成される. マルチチャンネル AP 検出ブロックではセンサノードを用いて ZigBee チャンネルを切り替えながら WiFi AP のビーコン信号を検出する. 検出された各 AP のビーコン信号について, 検出された ZigBee チャンネル, AP の RSS (受信信号強度), ビーコン信号の送出タイミングを表すビーコンインデックスという 3 つの情報を AP 情報として記録する. AP 信号分離ブロックは記録された AP 情報を解析し, AP 情報を送信元 AP ごとにグループ化する.

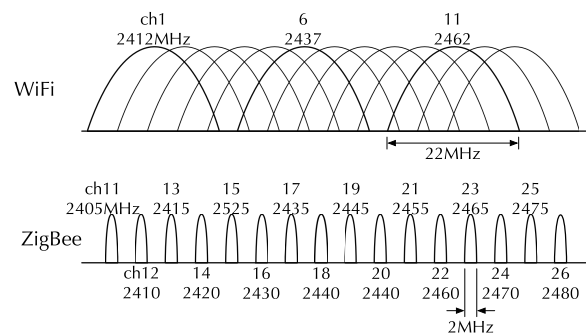


図 2 WiFi と ZigBee のチャンネル配置
Fig. 2 WiFi and ZigBee channels.

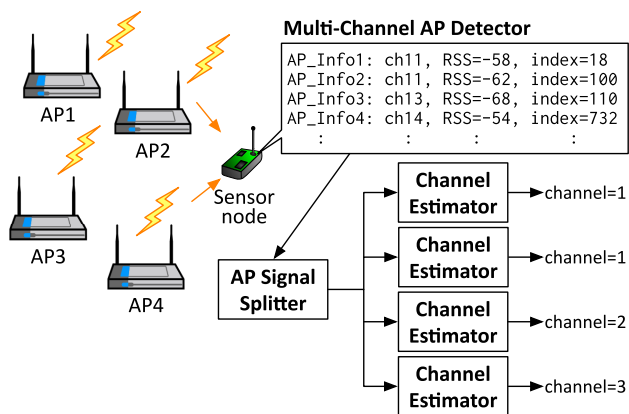


図 3 WiChest の概要
Fig. 3 Overview of WiChest.

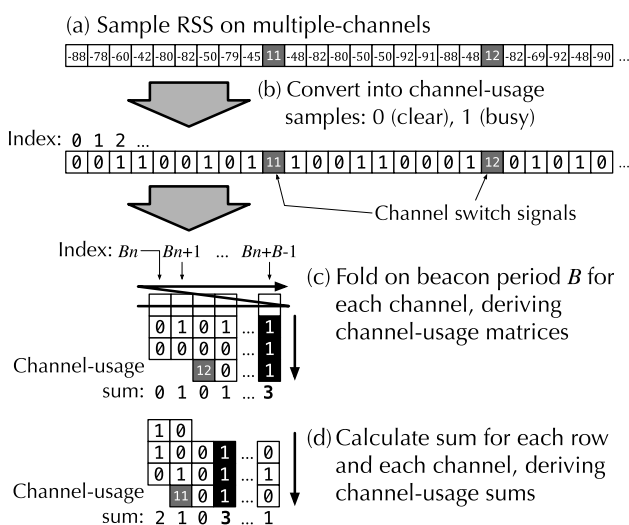


図 4 マルチチャンネル AP 検出の概要
Fig. 4 Overview of multi-channel AP signal detection.

グループ化された AP 情報を用い、チャンネル推定ブロックにおいて各 AP の動作チャンネルを推定する。

以下では各ブロックの動作について詳述する。

3.3 マルチチャンネル AP 検出ブロック

図 4 に、マルチチャンネル AP 検出の概要を示す。WiFi AP のビーコン信号を検出するため、センサノードは一定時間ごとに RSS をサンプリングする (図 4(a))。センサノードが具備する ZigBee モジュールには ZigBee (IEEE 802.15.4) 標準で規定されたエネルギー検出機能として RSS 測定機能が備えられている [29]。WiFi と ZigBee はいずれも 2.4 GHz ISM (Industry, Scientific and Medical) 帯を使用しているため、センサノードの RSS 測定機能で WiFi 信号を検出できる。

センサノードは一定時間ごとに ZigBee チャンネルを切り替えて RSS サンプルを収集する。ZigBee チャンネルの切替えには無線回路の再起動にともなう待機時間が必要となるため、この間は RSS サンプルを取得できない。その代わ

りとしてチャンネル切替えを示す信号を埋め込んでおく。センサノードに搭載されているメモリは限られているため、RSS サンプリング周期を可能な限り長くして RSS サンプルの記録に必要なメモリ容量を削減することが重要である。ZigBee モジュールは 128 μ 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 μ s とする。

収集された RSS サンプルはチャンネル使用サンプル (Channel-usage sample, 0 : 未使用, 1 : 使用中) に変換される (図 4 (b))。チャン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 Zifi と同様に IEEE 802.15.4 モジュール CC2420 [30] の CCA (Clear Channel Assessment) の閾値を参考として -77 dBm とする [24]。

チャンネル使用サンプルは元の RSS サンプルが観測された ZigBee チャンネルごとに分離し、WiFi AP のビーコン周期で折り返してチャンネル使用行列 (Channel-usage matrix) を得る (図 4(c))。ビーコン信号の送出タイミング情報を保持するため、チャンネル使用行列の列がズレないように折り返し、一部が欠けた行列としておく。最後に、チャンネル使用行列の各列について和を求める (図 4(d))。この和を折り返し和 (Channel-usage sum) と呼ぶ。

WiFi AP は、チャンネル使用行列で折り返し和が閾値を超える列を探すことで検出できる。AP のビーコン周期がチャンネル使用行列の折り返し周期と一致している場合、AP 信号はチャンネル使用行列の特定の列に現れる。このため、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いえる。文献 [2] を参考に、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。

ビーコン周期の異なる AP が混在している場合には、それぞれのビーコン周期でチャンネル使用行列を作成して AP を検出する。チャンネル使用サンプルを観測 ZigBee チャンネルごとに分離した後、検出したいビーコン周期のそれぞれで折り返し処理を行ってビーコン周期ごとにチャンネル使用行列を作成する。各チャンネル使用行列について折り返し和を計算すれば AP を検出できる。AP に設定されているビーコン周期が互いに倍数でない場合には周期の異なる AP を誤って検出することはない [2]。

AP の RSS は、検出された AP 信号に対応する RSS サンプルから算出できる。チャンネル使用行列上で検出された AP 信号の列に対応する元の RSS サンプルを特定し、これらを平均化することで AP の RSS が得られる。なお、全 RSS を平均化すると誤差が大きくなるため、実際にはシンプルなフィルタリング処理を適用して一部の RSS サンプルから AP の RSS を算出する [1]。

現実環境では 1 つの ZigBee チャンネルにおいて複数台の AP が検出されることが一般的であるため、AP 信号検出

時にビーコン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 ごとに AP 信号をグループ化する。ビーコンインデックスは、チャンネル使用行列における AP 信号の列番号である。AP のビーコン信号は周期的に送信されており、ZigBee チャンネルを切り替えながら観測してもチャンネル使用行列の同じ列で観測される。このため、同一 AP からのビーコン信号は同一のビーコンインデックスを持つ。

マルチチャンネル AP 検出では複数の ZigBee チャンネルで周期的に送信される信号を WiFi AP として検出するため、他の ZigBee ネットワークが複数チャンネルで周期的かつ同時に信号を送信している場合には AP として誤検出する可能性がある。このような場合には、ZigBee モジュールに具備されている CCA (Clear Channel Assessment) 機能を利用して ZigBee 信号を除外する。CCA 機能には信号強度に依存せず ZigBee フレームの有無のみを判定するモードが定義されている [29]。そこで、RSS サンプル収集とともに CCA サンプルを記録しておき、「RSS が閾値以上かつ CCA で ZigBee フレームが確認できない」場合にチャンネル使用サンプルを 1 とすることで ZigBee 信号を除外する。

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 チャンネル)–(ビーコンインデックス) という特徴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 ごとに分離する。WiChest では使用するクラスタリング手法を限定しないが、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。

図 5 に、(ZigBee チャンネル)–(ビーコンインデックス) 特徴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 が存在する環境でマルチチャンネル AP 検出手法によって検出された AP 信号を (ZigBee チャン

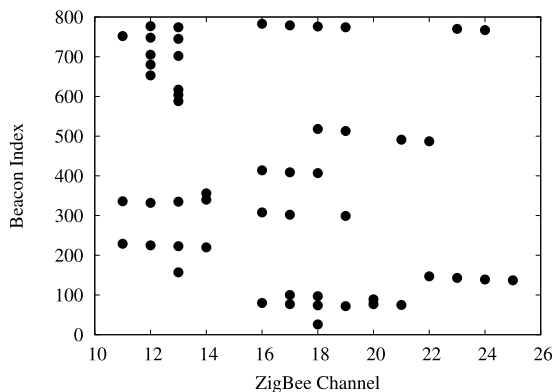


図 5 (ZigBee チャンネル)–(ビーコンインデックス) 特徴量空間上にマッピングされた AP 信号の例

Fig. 5 Example of AP signals mapped in (ZigBee channel)–(beacon index) feature space.

ネル)–(ビーコンインデックス) 空間にマッピングした結果を示している。同一 AP からの信号は連続した 4 つの ZigBee チャンネルにおいて観測され、同じビーコンインデックスを持つため、1 台の AP は横 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 チャン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。

提案手法の基本性能を実証するための一例として、本論文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 チャンネルで観測される。このため、同一 AP からの信号間の距離は ZigBee チャンネル軸で 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インデックスに同期誤差が生じる。AP およびセンサノードの水晶発振器の発振周波数偏差は約 ± 100 ppm である。マルチチャンネル AP 検出は AP 検出に 1 チャンネルあたり約 3 秒間を必要とするため [2], 4 チャンネルを観測する間の同期誤差は ± 1.2 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インデックス軸で 18.8 以内となる。

ZigBee チャンネル軸とビーコン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、ビーコンインデックス軸方向を倍率 $\gamma (< 1)$ で縮小させ、クラスタリング半径は 3 で固定とする。ビーコン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。ビーコンインデックスの倍率は $\gamma = 0.20$ である。

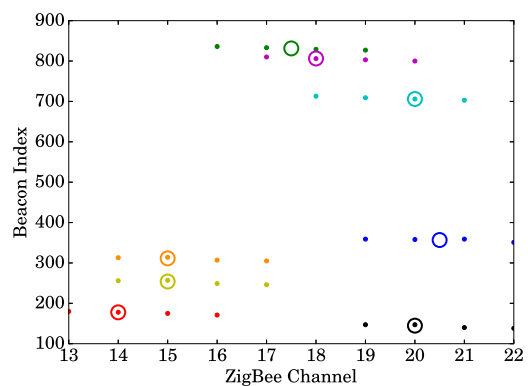


図 6 平均シフト法を用いた AP 信号分離の例 (ビーコンインデックスの倍率 $\gamma = 0.2$)

Fig. 6 Example of AP signal grouping using mean-shift clustering (scale factor $\gamma = 0.20$).

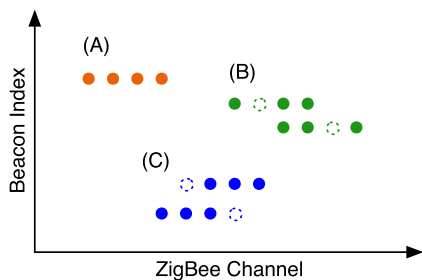


図 7 AP 信号が検出された ZigBee チャンネルの組合せ

Fig. 7 Possible combinations of ZigBee channels where AP signals are detected.

図は、AP が 8 台存在する環境下でマルチチャンネル 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 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表している。近い値のビーコンインデックスの AP 信号も、検出された ZigBee チャンネルが異なることから送信元 AP ごとに分離できていることが分かる。

3.5 チャンネル推定ブロック

チャンネル推定ブロックでは、AP 信号が検出された ZigBee チャンネルの組合せを用いて AP の動作チャンネルを推定する。1 台の AP からの信号は連続した 4 つの ZigBee チャンネルで観測されるが、現実環境では AP・センサノードの非同期動作やノイズの影響などによりいくつかの ZigBee チャンネルで AP を検出できない場合がある。AP の動作チャンネル推定を行う機会を増加させるため、3 つまたは 4 つの ZigBee チャンネルで AP が検出された場合に動作チャンネルを推定可能な手法を設計した。なお、3 つまたは 4 つの ZigBee チャンネルで AP が観測される確率が高いことは 4.2 節の AP 検出率の評価において検証する。

図 7 は、1 台の AP 信号が 3 つまたは 4 つの ZigBee チャンネルで検出された場合の検出チャンネルの組合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 チャンネルで検出されるが、(B) 4 つのチャンネルのうち 2 番目または 3 番目のチャンネルで検出されない場合、(C) 最初または最後のチャンネルで検出されない場合がある。

チャンネル推定ブロックでは、AP 信号が検出された ZigBee チャンネルの組合せが図 7 のいずれの場合に該当するかを確認し、AP の動作チャンネルを推定する。図 7(A) の場合には図 2 を参照すれば容易に WiFi AP の動作チャンネルを推定できる。図 7(B), (C) の場合は、AP が検出されなかった ZigBee チャンネルにおいて AP が仮想的に検出されたものとして AP 動作チャンネルを推定する。実際または仮想的に AP を検出した 4 つの ZigBee チャンネルをそれぞれ c_s , $c_s + 1$, $c_s + 2$, $c_s + 3$ とすると、WiFi AP の動作チャンネル \widetilde{c}_w は以下で推定できる。

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

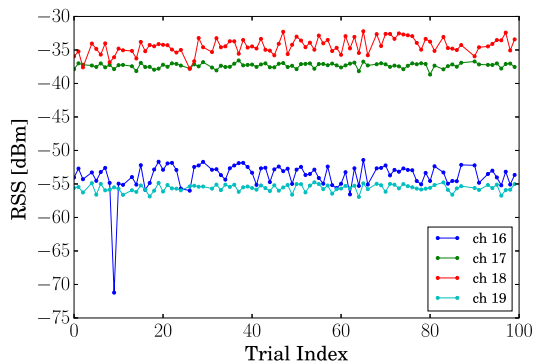


図 8 4 つの ZigBee チャンネルで観測した AP の RSS

Fig. 8 AP-RSS derived on four ZigBee channels.

図 7(C) のように連続した 3 つの ZigBee チャンネルで AP が検出された場合には、チャンネル推定ブロックでは AP の RSS (受信信号強度) を用いて未検出チャンネルを推定する。図 2 を参照すると、1 つの WiFi チャンネルと重なる 4 つの ZigBee チャンネルのうち最初と最後のチャンネルは WiFi チャンネルの両端と重なっている。WiFi の送信チャンネルマスクの影響を考慮すると、2 番目と 3 番目の ZigBee チャンネルで観測される RSS は最初と最後のチャンネルで観測される RSS よりも大きくなる。そこで、RSS が大きい 2 つのチャンネルが 2 番目と 3 番目のチャンネルであるとして未検出 ZigBee チャンネルを推定する。

図 8 は、チャンネル 6 で動作する AP の RSS を WiFi チャンネル 6 と重なる ZigBee チャンネル 16~19 で観測した例を示している。AP とセンサノード間の距離は約 12 メートルである。センサノード上でマルチチャンネル AP 検出によって AP 信号を検出し、4 秒間の平均 RSS を取得して試行ごとに描いた。試行回数は 100 回である。図 8 より、WiFi チャンネルの両端と重なっているチャンネル 16 と 19 で観測した RSS はチャンネル 17 と 18 で観測した RSS よりも 20 dB 程度小さいことが分かる。図 7(C) のように連続した 3 つの ZigBee チャンネルで AP が検出された場合にも RSS を用いれば未検出チャンネルを推定できるといえる。

4. 評価

WiChest の性能を評価するため、センサノードと WiFi AP を用いた評価実験を行った。まず AP 検出率を評価し、WiFi AP が 3 つまたは 4 つの ZigBee チャンネルで検出されることを検証した。次いで AP の動作チャンネル推定精度を評価した。

4.1 評価環境

図 9 に実験機器を示す。実験では、センサノード、WiFi AP、データ処理 PC を用いた。AP は Netgear 社の WNDR4300 を使い、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 CC2420 を搭載している Crossbow 社の MICAz を用いた。

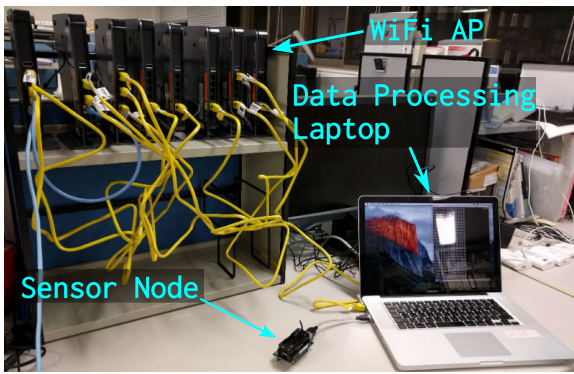


図 9 実験機器

Fig. 9 Experiment equipments.

データ処理 PC は Mac OSX 10.11 が動作する MacBook Pro である。WiChest の動作チャンネル推定手法は Python プログラムとして実装した。

センサノードでは ZigBee チャンネルを 11~26 と切り替えながら各チャンネルで 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 に転送して WiFi AP の動作チャンネルを推定するなどの評価を行った。各 ZigBee チャン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の制約から約 4 秒間とした。実験環境には実験に用いた AP 以外に 20 台の AP が存在したため、実験に使用した 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。

4.2 AP 検出率

マルチチャンネル AP 検出によって WiFi チャンネルと重なる 4 つの ZigBee チャンネルで AP を検出できることを検証するため、4 つの ZigBee チャンネルの AP 検出率を評価した。

チャンネルを 1~11 の間でランダムに設定した WiFi AP をセンサノードと約 12 メートル離して設置し、センサノード上でマルチチャンネル AP 検出手法によって AP 信号を検出した。設定した AP のチャンネルと重なる 4 つの ZigBee チャンネルをチャンネル番号が小さい順に第 1~第 4 チャンネルと名付け、第 1~第 4 チャンネルでの AP 検出率を評価した。試行回数は 500 回である。実環境に近い状況での AP 検出率を評価するため、AP とセンサノードは机やオフィスパーティション、金属製配電盤が間に存在する非見通し環境に設置した。

図 10 (a) に、WiFi チャンネルと重なる 4 つの ZigBee チャンネルの AP 検出率を示す。図 10 (a) より以下の 2 つのことが分かる。

- (1) 第 1~第 4 のすべてのチャンネルにおいて、AP の検出率は 89.6%以上である。WiFi チャンネルと重なる 4 つの ZigBee チャンネルでは高い確率で AP を検出できるといえる。第 1~第 4 チャンネルの検出率の平均値は

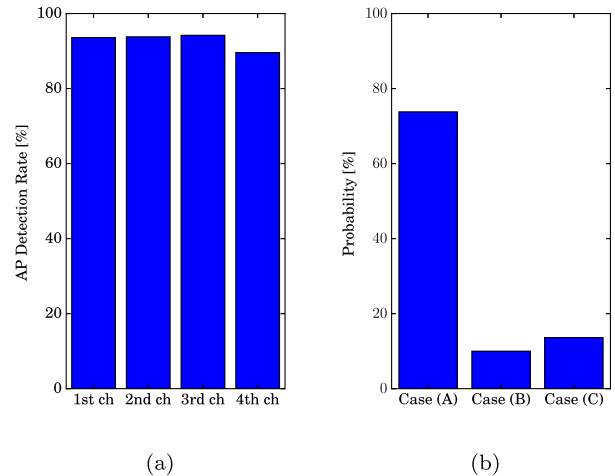


図 10 (a) WiFi チャンネルと重なる 4 つの ZigBee チャンネルにおける AP 検出率, (b) 図 7 に示した AP 検出 ZigBee チャンネル組合せの発生確率

Fig. 10 (a) AP detection rate on four ZigBee channels overlapping with WiFi channel, (b) probability of ZigBee channel combinations, presented in Fig. 7, where AP signals are detected.

92.8%である。

- (2) 第 1~第 4 チャンネルの検出率に大きな差は確認できない。検出率の最大値は第 3 チャンネルの 94.2%, 最小値は第 4 チャンネルの 89.6%である。図 8 に示したように各 ZigBee チャンネルで観測した RSS (受信信号強度) には最大で 20 dB 程度の差があるが、RSS の差が AP 検出率に及ぼす影響は小さいといえる。AP 検出は AP 信号の周期性のみに基づいており、AP 信号の受信強度がセンサノードで検出できる強さである限りは検出率に影響を与えないためと考えられる。

3.5 節で述べたように、WiChest では 3 つまたは 4 つの ZigBee チャンネルで AP を検出した場合に AP の動作チャンネルを推定する。AP が 3 つまたは 4 つの ZigBee チャンネルで検出されることを検証するため、図 7 に示した検出チャンネル組合せ (A)~(C) が発生する確率を評価した。

図 10 (b) に、AP を検出した ZigBee チャンネルの組合せの発生確率を示す。図 10 (b) の横軸 (A)~(C) は図 7 の (A)~(C) にそれぞれ対応している。図 10 (b) より以下の 2 つのことが分かる。

- (1) 4 つの ZigBee チャンネルで AP が検出される場合、すなわち図 7 (A) の発生確率は最も高く、その確率は 73.8%である。
- (2) 3 つまたは 4 つの ZigBee チャンネルで AP が検出される確率、すなわち図 7 の (A)~(C) の発生確率の合計は 97.4%である。WiChest では 3 つまたは 4 つの ZigBee チャンネルで AP を検出した場合に AP の動作チャンネルを推定できるため、ほとんどの場合に AP の動作チャンネル推定手法を適用できるといえる。

以上の結果から、1 台の AP 信号が 3 つ以上の ZigBee チャンネルで検出される確率は非常に高く、3.5 節で示したチャンネル推定手法を適用できることが確認された。

4.3 AP 動作チャンネル推定精度

WiChest によって AP の動作チャンネルを正しく推定できることを検証するため、AP 動作チャンネル推定精度を評価した。

8 台の WiFi AP を机上に設置し、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。1 回の試行では、8 台の AP のチャンネルを 1~11 の間で重複を許容してランダムに設定し、WiChest を用いて AP の検出、検出された各 AP の動作チャンネル推定を行った。AP 信号分離におけるビーコン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。

AP 送信チャンネルの推定精度の評価に向けて、まず AP に設定したチャンネルと推定された動作チャンネルとを各試行で比較し、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 の動作チャンネルが正しく推定された場合、AP が存在する WiFi チャンネルで AP を検出できなかった場合、AP が存在しない WiFi チャンネルで AP を検出した場合、AP が存在しない WiFi チャンネルで AP を検出できなかった場合である。

図 11 に、ビーコン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 11 より以下の 3 つのことが分かる。

- (1) ビーコン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

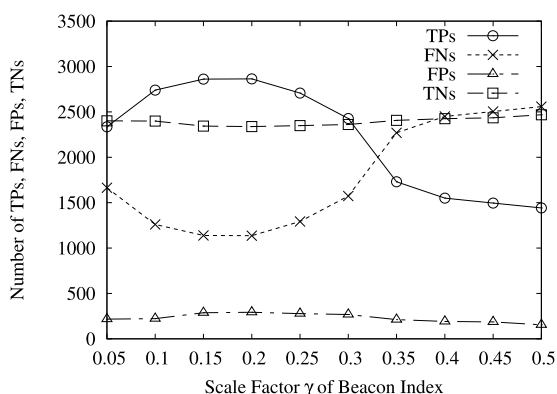


図 11 ビーコンインデックスの倍率 γ に対する True Positive (TP), False Negative (FN), False Positive (FP), True Negative (TN) の回数

Fig. 11 Numbers of true positives (TPs), false negatives (FNs), false positives (FPs), and true negatives (TNs) as a function of scale factor γ of beacon index.

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。ビーコンインデックスの倍率 γ は AP 信号分離においてビーコン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、ビーコンインデックス軸におけるクラスタリング半径 15 に相当することから、3.4 節で算出したビーコンインデックスの同期誤差とほぼ一致しているといえる。

- (2) TP と FN の回数は、ビーコン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 信号検出およびチャンネル推定において発生し、 γ の変化による影響がほぼな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 12 に、ビーコン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 12 より以下の 3 つのことが分かる。

- (1) 正確度、網羅率、F 値はビーコンインデックスの倍率 γ に対して同様の変化を示している。これらの変化の仕方は図 11 における TP 回数の変化の仕方ともほぼ

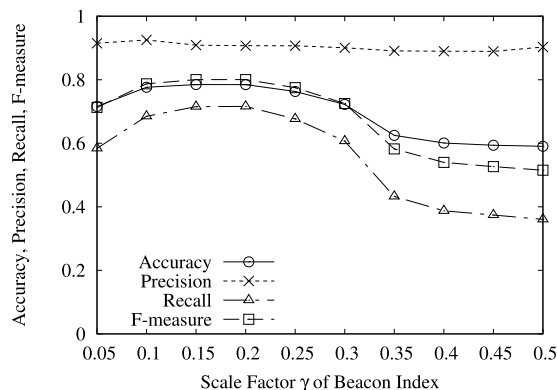


図 12 ビーコンインデックスの倍率 γ に対する正確度 (Accuracy), 精度 (Precision), 網羅率 (Recall), F 値 (F-measure)

Fig. 12 Accuracy, precision, recall, and F-measure as a function of scale factor γ of beacon index.

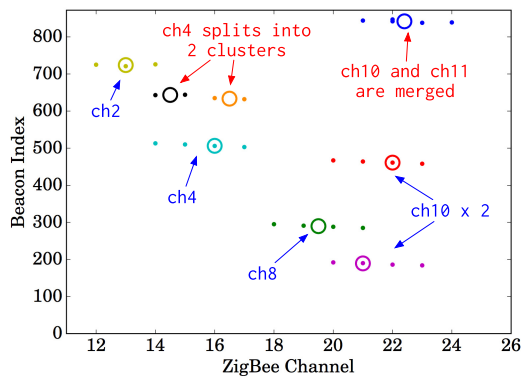


図 13 クラスタリング不良による AP 信号分離の失敗例

Fig. 13 Example failure of AP signal grouping due to failure of clustering.

同様である。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、網羅率、F 値の変化は TP と FN の影響が支配的であるといえる。

- (2) 正確度、網羅率、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、網羅率、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、網羅率、F 値を実現できることが分かる。
- (3) 精度はビーコンインデックスの倍率 γ に対してほぼ一定である。 TP の回数に比べて FP の回数が少ないため、精度がほぼ変化しなかったと考えられる。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 の動作チャンネルを推定できることが確認された。

4.4 AP 検出率とチャンネル推定精度に関する議論

4.2 節で示したように、AP を 1 台設置した場合に 3 つ以上の ZigBee チャンネルで検出される確率は 97.4% であり、4.3 節で示したチャンネル推定手法を適用できる。しかしながら、8 台の AP を設置して行ったチャンネル推定精度を示した図 12 では網羅率の最大値は 0.72 であり、28% の AP を検出できていない。

AP 台数の増加によって AP の検出率が低下する主な要因は 2 つあげられる。

1 つ目の要因は 3.4 節で示した AP 信号分離の失敗である。図 13 はクラスタリング不良による AP 信号分離の失敗例を示している。図に示した試行では、8 台の AP のうち 1 台を WiFi ch2, 2 台を ch4, 1 台を ch8, 3 台を ch10, 1 台を ch11 に設定している。ここで、ch4 の WiFi AP のうち 1 台は 4 つの信号が 1 つの AP としてクラスタリングされているが、もう 1 台は同期誤差が想定よりも大きいために 2 つのクラスタに分割されている。分割された各クラスタの AP 情報数は 2 であるため 3.5 節で示したチャンネル推定手法を適用できず、AP は未検出となる。

0	1	1	0	1	1	0	0	...	0
0	1	1	0	1	1	0	0	...	0
0	0	1	1	0	1	1	0	...	0
0	0	1	1	0	1	1	0	...	0
0	0	0	1	1	0	1	1	...	0
0	2	4	3	3	4	3	1	...	0

図 14 ほぼ同時に送信されたビーコン信号のチャンネル使用行列上での結合

Fig. 14 Beacon signals merged on channel-usage matrix.

2 つ目の要因は AP がほぼ同時にビーコン信号を送信した場合のビーコン信号の結合である。図 13 の ch10, ch11 の信号のように、隣接したチャンネルで複数台の AP がほぼ同時にビーコン信号を送出しているときに複数のビーコン信号が結合し、1 つのビーコン信号として検出される場合がある。4.1 節で述べたように、8 台の AP を用いた実験では 1 つの ZigBee チャンネルあたり約 4 秒間のサンプリングを行っている。水晶振動子の周波数偏差は約 ± 100 ppm であるから、1 チャンネルのサンプリングの間に最大で 0.4 ms (= 3.1 サンプル時間) のズレが生じる。ビーコン信号はチャンネル使用行列の折り返し和を用いて検出するため、このズレに比べて短い間隔で送信された 2 つのビーコン信号は図 14 に示すようにチャンネル使用行列の折り返し和が重なり合い、1 つのビーコン信号として検出される。ビーコン信号が結合すると AP 情報数が減少するため、AP 信号分離の性能劣化の一因ともなる。

このように複数台の AP がほぼ同時に送信する確率は無視できない。この確率を算出するためには、まずランダムに 1 つの WiFi チャンネルを選択したときにそのチャンネルで観測される AP の台数を表す確率変数を X とし、期待値 $E[X]$ を求める。そのうえで、 $E[X]$ 台の AP がランダムなタイミングでビーコン信号を送信しているときにほぼ同時にビーコン信号を送信する確率を求める。簡潔性のためこの確率の導出の詳細は付録 A.1 に記すが、4.1 節に示した評価環境においては 16.2~23.4% 程度の確率となるため、AP の未検出、チャンネル誤推定が増加したと考えられる。

5. おわりに

本論文では、WiFi AP の動作チャン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 チャンネル上で観測されることを利用し、WiChest では複数の ZigBee チャンネルで WiFi 信号を検出することで AP の動作チャンネルを推定する。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 チャンネルと AP 信号が送出されているタイミングという 2 つの情報を使い、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 ごとに分離する。そのうえで、各 AP の信号が検出された ZigBee チャンネルの組合せから AP の動作チャンネルを推定する。市販のセンサノードおよび 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の動作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, 16K16048)およ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., 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, *Proc. ACM Conf. Ubiquitous Computing (Ubicomp)*, LNCS, Vol.3205, pp.347–365 (2004).
- [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] 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).
- [9] Barry, A., Fisher, B. and Chang, M.L.: A Long-Duration Study of User-Trained 802.11 Localization, *Proc. ACM Int. Workshop Mobile Entity Localization Tracking GPS-less Environments (MELT)*, LNCS, Vol.5801, pp.197–212 (2009).
- [10] 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).
- [11] 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).
- [12] 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).
- [13] 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).
- [14] 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).
- [15] 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).
- [16] 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).
- [17] 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).
- [18] 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).
- [19] 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).
- [20] 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).
- [21] 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).
- [22] 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).
- [23] 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).
- [24] 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).
- [25] Hithnawi, A., Shafagh, H. and Duquenooy, S.: TIIM: Technology-Independent Interference Mitigation for Low-power Wireless Networks, *Proc. IPSN*, pp.1–12 (2015).
- [26] Chebrolu, K. and Dhekne, A.: Esense: Communication through Energy Sensing, *Proc. ACM MobiCom*, pp.85–96 (2009).
- [27] Chebrolu, K. and Dhekne, A.: Esense: Energy Sensing-Based Cross-Technology Communication, *IEEE Trans. Mobile Comput.*, Vol.12, No.11, pp.2303–2316 (2013).
- [28] Kim, S.M. and He, T.: FreeBee: Cross-technology Communication via Free Side-channel, *Proc. ACM MobiCom*, pp.317–330 (2015).
- [29] 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). available from <http://standards.ieee.org/>.
- [30] Texas Instruments: CC2420: Single-Chip 2.4 GHz IEEE 802.15.4 Compliant and ZigBee Ready RF Transceiver, datasheet, available from <http://www.ti.com/>.

付 録

A.1 複数台の AP のビーコン信号が結合してしまう確率の導出

ランダムに 1 つの WiFi チャンネルを選んだときにそのチャンネルで観測される AP の台数を表す確率変数を X とする. X の期待値 $E[X]$ を求めるため, 選択された WiFi チャンネルで場合分けをして $X = k$ (k は 0~8 の整数) とする確率を求める.

(1) 選択されたチャンネルが ch4~8 の場合

ある WiFi チャンネルで観測される AP は, そのチャンネルおよびそのチャンネルと重なっている前後の 3 チャンネルの計 7 チャンネルで動作する AP である (図 2). 8 台の AP のチャンネルを 1~11 の範囲でランダムに設定するとき, これら 7 チャンネルのいずれかで動作する AP が k 台となる確率 $P_1[X = k]$ は

$$P_1[X = k] = \binom{8}{k} \left(\frac{7}{11}\right)^k \left(\frac{4}{11}\right)^{8-k} \quad (A.1)$$

と求められる. ここで, $\binom{n}{k}$ は 2 項係数である.

(2) 選択されたチャンネルが ch3 または ch9 の場合

ch3 が選択された場合は ch1~ch6 の計 6 チャンネルで動作する AP を観測することができる. ch9 の場合も同様に計 6 チャンネルとなるため, これら 6 チャンネルのいずれかで動作する AP が k 台となる確率 $P_2[X = k]$ は以下のようになる.

$$P_2[X = k] = \binom{8}{k} \left(\frac{6}{11}\right)^k \left(\frac{5}{11}\right)^{8-k} \quad (A.2)$$

(3) 選択されたチャンネルが ch2 または ch10 の場合

同様に考えると計 5 チャンネルのいずれかで動作する AP を観測できるので,

$$P_3[X = k] = \binom{8}{k} \left(\frac{5}{11}\right)^k \left(\frac{6}{11}\right)^{8-k} \quad (A.3)$$

となる.

(4) 選択されたチャンネルが ch1 または ch11 の場合

これまでと同様にして以下のようになる.

$$P_4[X = k] = \binom{8}{k} \left(\frac{4}{11}\right)^k \left(\frac{7}{11}\right)^{8-k} \quad (A.4)$$

これらそれぞれの場合が発生する確率を考慮すると, 確率変数 X の期待値 $E[X]$ は以下のように求まる.

$$\begin{aligned} E[X] &= \sum_{k=0}^8 k \left\{ \frac{5}{11} P_1[X = k] + \frac{2}{11} P_2[X = k] \right. \\ &\quad \left. + \frac{2}{11} P_3[X = k] + \frac{2}{11} P_4[X = k] \right\} \\ &= 5.30 \end{aligned} \quad (A.5)$$

次に, n 台の AP がランダムなタイミングでビーコン信号を送信しているときにほぼ同時にビーコンを送信する AP の台数を表す確率変数を Y として, $Y \geq 2$ となる確率 $Q_n[Y \geq 2]$ を求める. $Q_n[Y \geq 2]$ は誕生日問題と同様の考え方で計算できる. 4.1 節で示したようにビーコン周期は 109 TU であるから, チャンネル使用行列の折り返しの周期は 872 サンプルとなる. 評価実験に用いた AP のビーコン長は $1,472 \mu\text{s}$ ($= 11.5$ サンプル時間) である. 各 AP の信号が 12 サンプル時間だとすると, チャンネル使用行列上では 872 サンプルの間に $12n$ 個の 1 が入る. 4.4 節で述べたように AP 信号を表す「1」が 3 サンプル以上離れて配置されれば AP は区別され, 同時の送信ではないと見なされる. これより, 同時に送信する AP が存在しない確率 $Q_n[Y < 2]$ は

$$\begin{aligned} Q_n[Y < 2] &= \frac{857}{872} \cdot \frac{842}{872} \cdots \frac{872 - 15(n-1)}{872} \\ &= \prod_{k=1}^n \frac{872 - 15(k-1)}{872} \end{aligned} \quad (A.6)$$

となる. したがって, 2 台以上の AP が同時に送信する確率 $Q_n[Y \geq 2]$ は

$$\begin{aligned} Q_n[Y \geq 2] &= 1 - Q_n[Y < 2] \\ &= 1 - \prod_{k=1}^n \frac{872 - 15(k-1)}{872} \end{aligned} \quad (A.7)$$

と求まる. 式 (A.7) は n が整数でないとき計算できないため, 式 (A.5) で求めた $E[X]$ の前後の整数 5, 6 を n に代入すると $Q_5[Y \geq 2] = 0.1619$, $Q_6[Y \geq 2] = 0.2340$ と求められる.



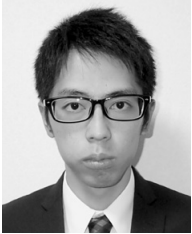
石田 繁巳 (正会員)

2006 年芝浦工業大学工学部卒業. 2008 年東京大学大学院新領域創成科学研究科修士課程修了. 2012 年同大学院工学系研究科博士課程修了. 博士 (工学). 2008 年 (株) アクティス入社. 2013 年米国ミネソタ大学客員研究員. 2013 年九州大学システム情報科学研究院助教. 無線通信, センサネットワークに関する研究に従事. 2016 年度山下記念研究賞. IEEE, 電子情報通信学会各会員.



泉 幸作

2015年九州大学工学部電気情報工学科卒業。現在、同大学大学院システム情報科学府修士課程在学中。センサネットワークに関する研究に従事。



國廣 陽介

2016年九州大学工学部電気情報工学科卒業。研究遂行当時、同大学在学中。センサネットワークに関する研究に従事。



田頭 茂明 (正会員)

1996年龍谷大学理工学部電子情報学科卒業。1998年奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科博士前期課程修了。2000年同大学情報科学研究科博士後期課程修了。博士(工学)。2000年広島大学工学部助手。2007年同大学大学院工学研究科助教。同年九州大学高等研究院特別准教授。2012年関西大学総合情報学部准教授。2014年同大学教授。モバイル・ユビキタスコンピューティングの研究に従事。2009年度山下記念研究賞。IEEE, 電子情報通信学会各会員。



福田 晃 (正会員)

1977年九州大学工学部情報工学科卒業。1979年同大学大学院工学研究科修士課程情報工学専攻修了。同年日本電信電話公社(現, NTT)武蔵野電気通信研究所入所。1983年九州大学助手。1989年同大学助教授。1994年奈良先端科学技術大学院大学教授。2001年九州大学大学院システム情報科学研究院教授, 2008年九州大学システムLSI研究センター長(兼任), 2015年九州大学主幹教授, 2016年九州大学スマートモビリティ研究開発センター長(兼任), 現在に至る。博士(工学)。組込みソフトウェア, ユビキタスコンピューティングに関する研究に従事。情報処理学会研究賞(1990年), Best Author賞(1993年)等を受賞。電子情報通信学会, ACM, IEEE Computer Society, 日本OR学会各会員, 「NPO法人九州組込みソフトウェアコンソーシアム(QUEST)」理事長等。本会フェロー。