

ZigBeeのチャネル間特性差を利用した 屋内測位手法の初期的評価

木元 亮太^{1,a)} 山本 貴宏¹ 石田 繁巳¹ 田頭 茂明² 福田 晃¹

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 [1-3]. 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 Wi-Fi (IEEE 802.11) アクセスポイントの信号強度 (RSS) を測定することで測位を行う. しかしながら, ZigLoc は帯域幅の狭い ZigBee センサノードで RSS を測定するために正確な RSS の測定が困難であり, 測位精度が低いという問題がある. 本稿では, Wi-Fi の広帯域信号を ZigBee の複数チャネルで検出して RSS を測定することで高い測位精度を実現する「MultiZigLoc」屋内センサ測位手法を提案する. MultiZigLoc では ZigBee チャネルが狭帯域であるために周波数選択性フェージングの影響を受けやすいことに着目し, 場所ごとに異なる周波数選択性フェージングの影響を場所を表す特徴量として利用することで測位精度を向上させる. 初期的評価として実環境中で測定した RSS を用いて測位精度を評価を行った結果, 複数チャネルの RSS を用いることで測位の正答率を 10 ポイント以上向上できることを確認した.

Initial Evaluation of Indoor ZigBee Localization using Channel-to-Channel Characteristics

Ryota Kimoto^{1,a)} Takahiro Yamamoto¹ Shigemi Ishida¹ Shigeaki Tagashira² Akira Fukuda¹

1. はじめに

無線センサネットワークは IoT (Internet of Things) や M2M (Machine-to-Machine) などの分野を中心に注目されている. 無線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環境の認識, 目標の追跡, 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 GPS (Global Positioning System) や手動での測位によって求められる. しかし屋内環境では GPS が利用できないため, 大規模なセンサネットワークを屋内に構築する際にはセンサノードの位置をどのように測位するかが大きな問題となる.

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 [4-6]. これらの研究では測位システムの導入コストの削減 [7-21] や測

位精度の向上 [22-27] 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, Wi-Fi (IEEE 802.11) の 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測位システム ZigLoc を開発している [1-3]. 屋内環境に既設の Wi-Fi AP から送信されたビーコン信号の RSS (Received Signal-Strength: 受信信号強度) を ZigBee (IEEE 802.15.4) センサノードで測定し, フィンガープリント法や多辺測量法などを用いてセンサノードの測位を行う.

しかしながら, ZigLoc は帯域幅の狭い ZigBee センサノードで RSS を測定するために正確な RSS の測定が困難であり, 測位精度が低いという問題がある. ZigBee のチャネルは Wi-Fi よりも狭く, 周波数選択性フェージングの影響を受けやすい. この結果, 同一の Wi-Fi 信号でも観測する ZigBee チャネルによって伝搬路特性が異なり, 異なる RSS 値が観測される.

そこで本稿では, Wi-Fi の広帯域信号を ZigBee の複数チャネルで検出して RSS を測定することで高い測位精度

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)} kimoto@f.ait.kyushu-u.ac.jp

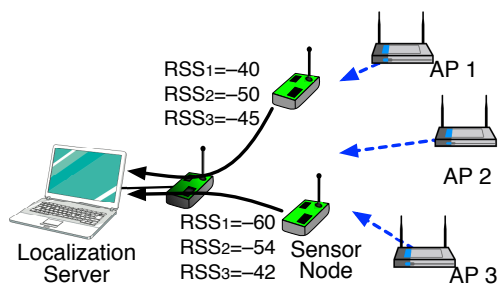


図 1 ZigLoc の概要

を実現する「MultiZigLoc」屋内センサ測位手法を提案する。ZigBee チャンネルが狭帯域であるために周波数選択性フェージングの影響を受けることに着目し、MultiZigLoc では周波数選択性フェージングの影響を場所を表す特徴量として利用するフィンガープリント測位を行う。周波数選択性フェージングの影響は場所ごとに異なるため、同一の Wi-Fi AP の RSS を複数の ZigBee チャンネルで測定すると各場所において異なる特徴を示す。そこで、複数の ZigBee チャンネルで測定した RSS をフィンガープリントとして測位を行うことで精度を向上する。

九州大学研究室内の 3 地点で RSS を測定し、交差検証を行うことで MultiZigLoc の初期的評価を行った。測定位置を 3 地点に分類して正答率を求めた結果、98% の高い精度で正しく推定することができた。

本稿の構成は以下の通りである。2. では ZigLoc の概要と問題点について述べる。3. で MultiZigLoc のシステムを示し、4. で MultiZigLoc の初期的評価について述べる。5. で関連研究を示し、6. でまとめとする。

2. センサ測位システム ZigLoc

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 Wi-Fi AP によって構成される。各 Wi-Fi 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 Wi-Fi AP の信号を検出してその 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 情報を用いて多辺測量法やフィンガープリント法により測位を行う。

ZigLoc は測位に利用する RSS の測定を ZigBee の 1 つのチャンネルで行っているが、Wi-Fi AP の RSS を ZigBee で測定した場合には測定チャンネルによって RSS 値が異なるために測位精度が低下する。Wi-Fi のチャンネル帯域幅 22 MHz に対して ZigBee のチャンネル帯域幅は 2 MHz と狭くなっており、周波数選択性フェージングの影響を受けやすい。このため、ZigBee ノードで Wi-Fi 信号の RSS を測定する場合には測定する ZigBee チャンネルによって異なる RSS の値が観測され、測位精度に大きな影響を及ぼす。

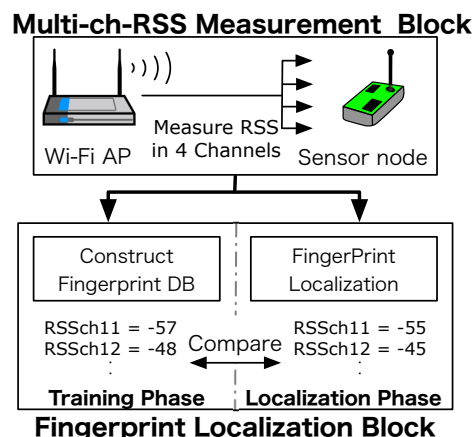


図 2 MultiZigLoc の概要

3. センサ測位システム MultiZigLoc

3.1 基本アイデア

MultiZigLoc の基本アイデアは、ZigBee の複数チャンネルで Wi-Fi 信号の RSS を測定し、チャンネル間の特性差を特徴量としてフィンガープリント測位を行うことである。2. で述べたように ZigBee のチャンネルは Wi-Fi よりも狭く、1 つの Wi-Fi のチャンネルは 4 つの ZigBee チャンネルと重なっている。4 つの ZigBee チャンネルは周波数の違いから信号の伝搬特性が異なるため、同じ Wi-Fi 信号の RSS を 4 つの ZigBee チャンネルで測定するとチャンネルによって異なる値が観測される。4 つの ZigBee チャンネルにおける RSS 値の差は測定場所によって異なる特徴を示すことから、複数チャンネルの RSS を特徴量としてフィンガープリント測位を行うことで測位精度を向上させる。

図 2 に MultiZigLoc の概要を示す。MultiZigLoc はマルチチャンネル RSS 測定ブロック (Multi-ch-RSS Measurement Block) 及びフィンガープリント測位ブロック (Fingerprint Localization Block) という 2 つのブロックで構成される。マルチチャンネル RSS 測定ブロックでは ZigBee チャンネルを切り替えながら RSS を測定し、フィンガープリント測位ブロックにおいてフィンガープリント法による測位を行う。次節以降では各ブロックについて詳細に説明する。

3.2 マルチチャンネル RSS 測定ブロック

マルチチャンネル RSS 測定ブロックでは、Wi-Fi AP から送信されるビーコン信号をその周期性を利用して ZigBee チャンネルを切り替えながら検出する。

図 3 に、マルチチャンネル RSS 測定ブロックにおける複数チャンネルでの RSS 測定手法を示す。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 3 の (a))。RSS のサンプリングには ZigBee 標準で定められている RSS 測定機能 [28] を用いる。Wi-Fi と ZigBee とは通信規格が異なるため通信の互換性はないが、同じ 2.4 GHz ISM (Industrial, Scientific and Medical) バンドを利用しているため Wi-Fi

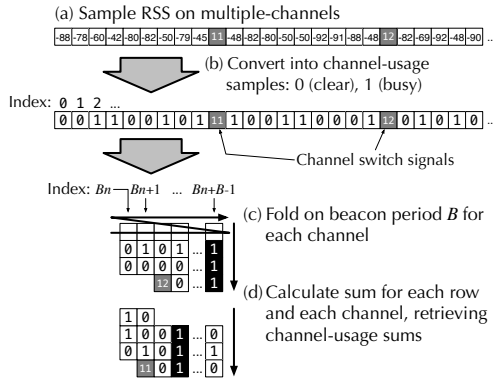


図 3 マルチチャネル RSS 測定ブロックにおける複数チャネルでの RSS 測定手法

信号を ZigBee で検出することができる。

センサノードは一定時間ごとに 4 つの ZigBee チャネルを切り替えて RSS をサンプリングする。ZigBee チャネルの切り替えには無線回路の再起動に伴う待機時間が必要となるため、この間は RSS を測定できない。この間は RSS サンプルの代わりにチャネルの切り替えを示す信号を挿入する。限られたセンサノード上のメモリを効率よく使用するため、RSS の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。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、Wi-Fi 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。

センサノードで測定した RSS サンプルの値を基にチャネルが使用中であるかを判定し、チャネル使用サンプル (未使用: 0, 使用中: 1) を作成する (図 3 の (b))。チャネルの使用を判定する RSS の閾値は、ZigBee モジュールの無線チップ CC2420 における CCA (Clear Channel Assessment) の閾値を参考に -77 dBm とした [29]。

チャネル使用サンプルは RSS の測定を行った ZigBee チャネルごとに分離し、検出する AP のビーコン周期で折り返してチャネル使用行列に変換する (図 3 の (c))。チャネル使用行列を作成する際はビーコン信号の送出タイミング情報を保持するために列がずれないように折り返し、一部が欠けた行列とする。最後に、得られたチャネル使用行列の各列について和を算出する (図 3 の (d))。この和を折り返し和と呼ぶ。

Wi-Fi AP のビーコン信号は、折り返し和が大きい列を見つけることで検出できる。チャネル使用行列の折り返し周期は検出対象となる Wi-Fi AP のビーコン周期と一致するため、ビーコン信号はチャ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の周期と同じ周期のビーコン信号の存在を示している。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、周期の異なる AP を誤って検出することはない [30]。

ビーコン信号の RSS は、検出されたビーコン信号に対応する RSS サンプル、すなわち折り返し和が大きい列の RSS サンプルを平均することで得られる。実際には全ての

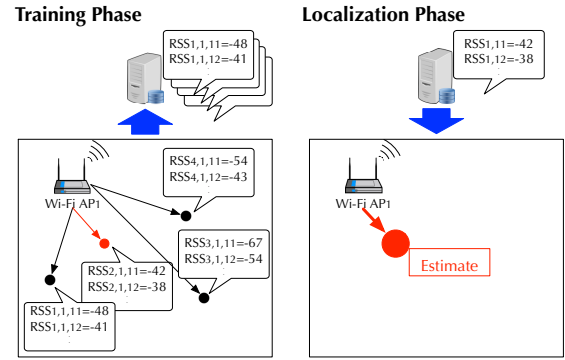


図 4 フィンガープリント法

RSS サンプルを平均化すると誤差が大きくなるため、簡単なフィルタリング処理を施してから RSS を算出する [31]。

3.3 フィンガープリント測位ブロック

図 4 にフィンガープリント測位ブロックにおける測位の概要を示す。フィンガープリント測位ブロックは学習フェイズと測位フェイズの 2 つのフェイズで構成される。

学習フェイズでは測位対象エリアの複数の場所で複数台の Wi-Fi AP の RSS を測定し、その場所を表す特徴量である「フィンガープリント」を作成してデータベースに保存する。データベースに保存するフィンガープリントの集合をデータベースフィンガープリントと呼ぶ。

i は測定を行った場所を識別する番号、 n は測定対象の Wi-Fi AP の台数、 c は測定を行った ZigBee チャネルの番号とする。場所 i でセンサノードが収集したデータベースフィンガープリント R_i を次のように定義する。

$$R_i = \{r_{i,1,1}, r_{i,1,2}, \dots, r_{i,2,1}, \dots, r_{i,n,c}\} \quad (1)$$

ここで、 $r_{i,j,c}$ ($j = 1, 2, \dots, n$) は場所 i で n 番目の AP からの信号を ZigBee チャネル c で測定した RSS の平均値である。

測位フェイズでは測位対象となる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作成したデータベースフィンガープリントの距離を計算することで測位を行う。測位対象となるセンサノードが収集したフィンガープリントをターゲットフィンガープリントと呼ぶ。ターゲットフィンガープリント $\bar{t}$ は式 1 と同様に表すと $\bar{t} = \{t_{1,1}, t_{1,2}, \dots, t_{2,1}, \dots, t_{n,c}\}$ となる。ターゲットフィンガープリント $\bar{t}$ とデータベースフィンガープリント R_i の間の距離は次のように計算される。

$$\begin{aligned} \text{distance}(R_i, \bar{t}) &= \sqrt{(R_i - \bar{t})^2} \\ &= \sqrt{\sum_{n,c} (r_{i,n,c} - t_{n,c})^2} \end{aligned} \quad (2)$$

センサノードの位置 $\hat{i}$ はターゲットフィンガープリントと最も近いデータベースフィンガープリントを探索することで推定される。 $\hat{i}$ は次の式で表される。

$$\hat{i} = \arg \min_i \text{distance}(R_i, \bar{t}) \quad (3)$$



図 5 使用機器

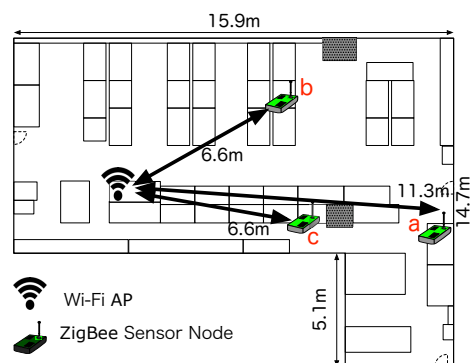


図 6 評価実験環境

4. MultiZigLoc の初期的評価

MultiZigLoc の有効性を検証するため、MultiZigLoc 測位システムの初期的実装を行って測位精度の評価実験を行った。

4.1 初期的実装

図 5 に初期的実装での使用機器を示す。MultiZigLoc 測位システムの初期的実装は、Wi-Fi AP、センサノード、ノート PC で構成される。Wi-Fi AP は Netgear 社の WNDR4300 を用い、AP 用の OS である OpenWrt 動作させた。センサノードにはクロスボー社製 MICAz を使用した。MICAz は IEEE 802.15.4 準拠の無線チップ CC2420 [29] を搭載している。ノート PC は Mac OSX 10.11.4 が動作する MacBook Pro である。センサノードはノート PC に接続し、RSS サンプルの取得と測位を行うプログラムはノート PC 上で動作する Python プログラムとして実装した。

4.2 評価環境

図 6 に評価実験環境を示す。実験環境には 1 台の Wi-Fi AP を設置し、図 6 に示す a, b, c の 3 地点において Wi-Fi AP からの信号の RSS をセンサノードを用いて 4 つの ZigBee チャンネルで測定した。実験環境周辺にはビーコン周期が 100 TU である複数台の Wi-Fi AP が存在したため、実験に用いた AP のビーコン周期を 109 TU に設定して他の AP と区別できるようにした。Wi-Fi AP は ch 11 に設定し、ZigBee センサノードでは Wi-Fi の ch 11 と重なる ch 21 から ch 24 で各チャンネル約 4 秒間 RSS サンプルを取得した。各チャンネルで取得した RSS サンプルに 3.2 で示したデータ処理を適用することで各 ZigBee チャンネルで AP の RSS を測定した。RSS 測定の試行回数は 1500 回である。4 つの ZigBee チャンネル全てで AP を検出できなかった試行については評価から除外した。

3. で示した MultiZigLoc は学習フェイズと測位フェイズで構成されるため、取得したデータを分割して学習と測位を行う 10 分割交差検証によって測位精度を評価した。1500 回の試行を 10 分割し、そのうちの 1 つをテストデータ、残り 9 つを学習データとしてテストデータを入れ替えながら測位を行った。テストデータからターゲットフィンガープリントを、学習データからはデータベースフィン

ガープリントを作成した。測位精度はセンサノードの位置をテストデータを用いて図 6 に示した a, b, c の 3 地点の中から推定し、実際にテストデータを測定した地点と比較して正答率を求めることで評価した。センサノードの場所は交差検証の全ての試行におけるターゲットフィンガープリントとデータベースフィンガープリントの距離を式 2 を用いて計算し、平均が最も小さい地点と推定した。

MultiZigLoc による測位精度を相対的に評価するため、MultiZigLoc 方式と ZigLoc 方式とで測位精度を比較した。MultiZigLoc 方式は 3. で示した提案方式であり、Wi-Fi AP が動作するチャンネルと重なる 4 つの ZigBee チャンネルで測定した RSS を特徴量として測位を行う方式である。ZigLoc は Wi-Fi AP の動作チャンネルの中心と重なる 1 つの ZigBee チャンネル（本評価では ch 22）で取得した RSS を特徴量として測位を行う方式である。

4.3 センサの測位精度

表 1 にセンサ測位の正答数と誤答数を示す。3 地点の RSS サンプルをそれぞれ 10 分割し、各場所から 1 つずつ計 3 つのテストデータを選び出してそれぞれの測定地点を推定する。この試行を 3 地点のテストデータ全ての組み合わせについて行ったため、推定の試行回数は $3 \times 10^3 = 3000$ 回である。表 1 より、MultiZigLoc 方式によって正答率を 10 ポイント以上向上できたことが分かる。Wi-Fi チャンネルと重なる 4 つの ZigBee チャンネルでそれぞれ測定した RSS を特徴量とすることで、測位精度を改善できると言える。

MultiZigLoc 方式における誤答を精査したところ、誤答は測定開始時付近の RSS サンプルをテストデータとした時に現れていた。この誤答の原因は主に周辺環境の変化によるものと考えられる。RSS の測定は夜間を中心に行い、周辺環境の変化によって起きる測定誤差が小さくなるようにしている。このため測定時間の大部分で測定環境は無人となっており、測定データの大部分は安定した推移をして

表 1 各手法による測定場所推定

	MultiZigLoc	ZigLoc
正答数	2940	2600
誤答数	60	400
正答率	98.0 %	86.7 %

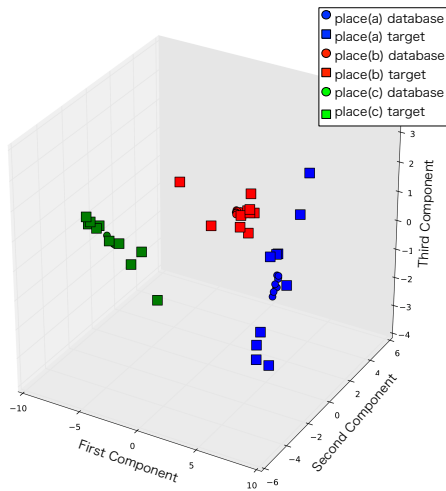


図 7 MultiZigLoc によるフィンガープリントの分布

いた。しかし測定開始時は測定環境で人が活動していたため、人や物の移動により Wi-Fi 信号の伝搬経路が変化し、RSS の測定値に大きなぶれが生じていた。RSS サンプルを 10 分割した際、測定開始時のデータが大部分を占める 1 分割目の RSS をテストデータとすると、ターゲットフィンガープリントはデータベースフィンガープリントとかけ離れるため測位の誤りが生じたと考えられる。

MultiZigLoc の手法を用いた実際の測位が測位精度向上に有効であるかを考察するため、作成したフィンガープリントについて分析する。図 7 は、MultiZigLoc 方式において各地点で作成されたフィンガープリントを例示したものである。AP が 1 台の場合においても MultiZigLoc のフィンガープリントは 4 つの ZigBee チャンネルで測定した RSS を要素とする 4 次元のベクトルであるため、図示するために主成分分析を用いて 3 次元に次元圧縮した結果を示している。各プロット点の色は測定地点を表しており、データベースフィンガープリント (database) は丸印、ターゲットフィンガープリント (target) は四角印でそれぞれ示されている。

図 7 より、データベースフィンガープリント間の距離に比べてターゲットフィンガープリントとデータベースフィンガープリントの距離が短いことが確認できる。ターゲットフィンガープリントはデータベースフィンガープリントに比べてばらつきが大きい、多くの場合においてデータベースフィンガープリント付近に分布していることが分かる。

表 2 に、各地点のターゲットフィンガープリントとデータベースフィンガープリントの間の平均距離を示す。同じ地点のフィンガープリント間の距離を示す灰色のセルの数値が、別の地点のフィンガープリント間の距離を示す同じ行の数値よりも小さいほど正確な測位を行うことができる。MultiZigLoc では同じ地点のフィンガープリント間の距離と比べて他の地点のフィンガープリント間の距離が大きく、フィンガープリントの分布が測位に適したものになることがわかる。ZigLoc では同じ地点のフィンガープリント間

表 2 フィンガープリント間の距離

		(a) MultiZigLoc		
		database		
		a	b	c
target	a	2.925	9.361	13.791
	b	9.287	2.474	8.148
	c	13.683	8.083	2.239
		(b) ZigLoc		
		database		
		a	b	c
target	a	2.093	2.653	7.226
	b	2.446	0.802	4.779
	c	7.226	4.779	0.415

の距離が MultiZigLoc よりも小さくなる。これは ZigLoc における測位の特徴量が 1 つのみであるため、特徴量が 4 つある MultiZigLoc よりも同じ地点のターゲットフィンガープリントとデータベースフィンガープリントが類似しやすいためであると考えられる。しかし、同じ地点のフィンガープリント間の距離と他の地点のフィンガープリント間の距離の差が MultiZigLoc と比べて小さいため、測位誤差は MultiZigLoc より大きくなることが予想される。

5. 関連研究

屋内環境でのセンサ測位において Wi-Fi の広帯域信号の RSS を ZigBee の複数のチャンネルで測定して測位を行う研究は、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。屋内測位に関してはこれまでに多数の研究が報告されているため、本節では屋内測位手法に関する研究と周波数の差を利用した測位精度向上手法に関する研究の 2 つに分けて無線通信を用いた屋内測位手法の関連研究を俯瞰する。

5.1 屋内測位手法

無線通信を利用した屋内測位手法は距離依存測位方式と距離非依存測位方式の 2 つに大別できる。

距離依存測位方式では、既知の位置に設置した測位基準との距離を推定することで測位を行う。測位対象のノードは測位基準と通信を行い、測位基準から受信した無線信号の RSS を測定することで測位基準からの距離を推定する。そして、複数の測位基準からの推定距離を用いて多辺測量法などにより測位対象ノードの位置を推定する。

距離依存測位方式に関しては設置時のコストを削減する技術を中心に研究が行われてきた。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として利用する測位方式である [7]。ノードの測位が進むとともに測位基準の数が増加するため、最初に設置する測位基準の数を削減できる。測位基準の配置を最適化することで必要となる測位基準の数をさらに削減する手法も報告されている [8]。MultiZigLoc においても、これらの手法を適用することで手動での測位が必要となる測位基準の数を削減できる。

TOA (Time of Arrival), TDOA (Time Difference of

Arrival), AOA (Angle of Arrival) は距離に直接依存する方式ではないが, センサノードと測位基準との物理的な位置関係に依存した方式であることから距離依存測位方式の一種として分類できる. しかしながら, TOA や TDOA, AOA を無線通信を用いて行うためには厳密な搬送波同期や等化処理, アレイアンテナを用いた到来波方向推定が必須であり, IEEE 802.15.4 を利用するセンサノードでは利用できない.

測位基準からの距離などの物理情報に依存しない測位方式は, 計算資源の限られた無線センサネットワークやアドホックネットワークにおける測位方式として研究が行われてきた. Centroid [15], DV-Hop [16,17], Amorphous [26], APIT [18,19] はネットワークの接続性に基づく測位方式である. これらの方式は測位計算負荷が小さいものの高い精度の実現が困難である.

フィンガープリント法は高い測位精度を実現可能なことから屋内測位において広く利用されている測位方式である [27]. フィンガープリント法は学習フェイズと測位フェイズの2つのフェイズで実現される. 学習フェイズでは測位対象エリア内の各所においてその場所を表す特徴量である「フィンガープリント」を収集する. フィンガープリントは, 環境中に複数台設置された測位基準の RSS のリストであり, 場所によって異なる値を示す. 測位フェイズでは, 観測される複数台の測位基準の RSS を測定してフィンガープリントを作成し, 学習フェイズで収集したフィンガープリントの中からもっとも類似するフィンガープリントを探索することで位置を推定する. 本稿で提案する MultiZigLoc はセンサノードを用いたフィンガープリント測位において測位精度を向上させる手法である.

フィンガープリント法において高い精度を実現するためには膨大なフィンガープリントデータの収集が必須となることから, センサ測位においてフィンガープリントデータの収集コストを削減する手法の研究も進められている. ZiFind は, 屋内環境にすでに設置されている Wi-Fi AP を測位基準として用いるフィンガープリント測位である [20]. ZiFind では測位基準の RSS を測定する代わりに Wi-Fi AP ビーコン信号の送出タイミングを特徴量として測位が行われる. ZiFind では測位基準を新たに設置しない代わりに ZiFind mapper と呼ばれる機器を環境中の各所に設置する必要がある.

ZIL は環境中に設置された Wi-Fi AP の RSS 及びビーコン送出タイミングを用いてフィンガープリント測位を行う測位手法である [21]. ZIL と同様に, 筆者らも設置済みの Wi-Fi AP の RSS を用いたフィンガープリント測位手法 ZigLoc を提案している [1, 32, 33]. 本稿で示した MultiZigLoc をこれらの手法と組み合わせることが可能であり, これらの手法の利点を活かしながら高い精度での測位が期待できる.

5.2 周波数の差を利用した測位精度向上手法

複数チャンネルを周波数の差を利用して測位精度を向上させる手法として, Wi-Fi の OFDM (Orthogonal Frequency

Divison Multiplexing) 方式を利用する研究が報告されている.

Wi-Fi の各サブキャリアの電波伝搬特性を CSI (Channel State Information) から抽出し, これを特徴量としてフィンガープリント法による測位を行う研究が報告されている [34]. また, Wi-Fi の複数のチャンネルをつなぎ合わせて仮想的な広帯域信号を生成することで高精度な測位を実現する研究も報告されている [35,36]. しかしながら, これらの方式は Wi-Fi の通信方式に依存しているため Wi-Fi を搭載していないセンサノードでは利用できない.

ZigBee の複数チャンネルを組み合わせる手法として, 複数のチャンネルで測定した RSS を平均化して利用することで測距精度を向上させる手法が報告されている [37]. 本稿で提案する MultiZigLoc はこの手法を応用したものであり, 複数のチャンネルで測定した RSS を平均化せずに利用して測位精度の向上を図るものである.

6. おわりに

本稿では, ZigBee の複数チャンネルで Wi-Fi 信号の RSS を測定することで高い測位精度を実現するセンサ測位システム MultiZigLoc を提案した. ZigBee はチャンネル帯域幅が狭く周波数選択性フェージングの影響を受けやすいことを利用し, MultiZigLoc では複数の ZigBee チャンネルで測定した RSS を場所を表す特徴量として利用してフィンガープリント測位を行う. 初期的評価として実環境中で測定した RSS を用いて測位精度を評価を行った結果, 複数チャンネルの RSS を用いることで測位の正答率を 10 ポイント以上向上できることを確認した.

謝辞 本稿で示した研究の一部は, 科研費 (JP15H05708, JP17H01741) 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] Ishida, S., Izumi, K., Yamamoto, T., Tagashira, S. and Fukuda, A.: Initial Evaluation of ZigLoc: Anchor-Free Sensor Localization System using WiFi Fingerprints, *Proc. ACM HotMobile, Poster*, p. 1 (2017).
- [3] Yamamoto, T., Ishida, S., Izumi, K., Tagashira, S. and Fukuda, F.: Accuracy Improvement in Sensor Localization System utilizing Heterogeneous Wireless Technologies, *Proc. Int. Conf. on Mobile Computing and Ubiquitous Networking (ICMU)*, pp. 26-31 (2017).
- [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] 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.
- [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., 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)*.
- [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] 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).
- [10] 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).
- [11] 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).
- [12] 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).
- [13] 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).
- [14] 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).
- [15] Bulusu, N., Heidemann, J. and Estrin, D.: GPS-Less Low-Cost Outdoor Localization for Very Small Devices, *IEEE Personal Commun. Mag.*, Vol. 7, No. 5, pp. 28–34 (2000).
- [16] Niculescu, D. and Nath, B.: Ad Hoc Positioning System (APS), *Proc. IEEE GLOBECOM*, pp. 2926–2931 (2001).
- [17] Niculescu, D. and Nath, B.: DV Based Positioning in Ad Hoc Networks, *Telecommunication Systems*, Vol. 22, No. 1–4, pp. 267–280 (2003).
- [18] He, T., Huang, C., Blum, B. M., Stankovic, J. A. and Abdelzaher, T.: Range-Free Localization Schemes for Large Scale Sensor Networks, *Proc. ACM MobiCom*, pp. 81–95 (2003).
- [19] He, T., Huang, C., Blum, B. M., Stankovic, J. A. and Abdelzaher, T. F.: Range-Free Localization and Its Impact on Large Scale Sensor Networks, *ACM Trans. on Embedded Computing Systems (TECS)*, Vol. 4, No. 4, pp. 877–906 (2005).
- [20] 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).
- [21] Niu, J., Wang, B., Shu, L., Duong, T. Q. and Chen, Y.: ZIL: An Energy-Efficient Indoor Localization System using ZigBee Radio to Detect WiFi Fingerprints, *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, Vol. 33, No. 7, pp. 1431–1442 (2015).
- [22] 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).
- [23] 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).
- [24] 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).
- [25] 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).
- [26] Nagpal, R., Shrobe, H. and Bachrach, J.: Organizing a Global Coordinate System from Local Information on an Ad Hoc Sensor Network, *LNCS*, Vol. 2634, pp. 333–348 (2003). *Proc. IPSN*.
- [27] 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).
- [28] 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/>.
- [29] Texas Instruments: CC2420: Single-Chip 2.4 GHz IEEE 802.15.4 Compliant and ZigBee Ready RF Transceiver, datasheet. <http://www.ti.com/>.
- [30] Izumi, K., Ishida, S., Tagashira, S. and Fukuda, A.: Design of WiFi AP-RSS Monitoring System using Sensor Nodes, *Proc. Int. Symp. on Computing and Networking (CANDAR)*, pp. 115–121 (2015).
- [31] 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).
- [32] 山本貴宏, 泉 幸作, 石田繁巳, 田頭茂明, 福田 晃: 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, 情報処理学会マルチメディア, 分散, 協調とモバイルシンポジウム (DICOMO), pp. 1607–1613 (2017).
- [33] 石田繁巳, 泉 幸作, 國廣陽介, 田頭茂明, 福田 晃: 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, 情報処理学会論文誌, Vol. 58, No. 1, pp. 225–236 (2017).
- [34] Wang, X., Gao, L., Mao, S. and Pandey, S.: CSI-based Fingerprinting for Indoor Localization: A Deep Learning Approach, *IEEE Trans. Veh. Technol.*, Vol. 66, No. 1, pp. 763–776 (2017).
- [35] Xie, Y., Li, Z. and Li, M.: Precise Power Delay Profiling with Commodity WiFi, *Proc. ACM MobiCom*, pp. 53–64 (2015).
- [36] Vasisht, D., Kumar, S. and Katabi, D.: Decimeter-Level Localization with a Single WiFi Access Point, *Proc. USENIX Symp. on Networked Systems Design and Implementation (NSDI)*, pp. 165–178 (2016).
- [37] Zanella, A. and Bardella, A.: RSS-Based Ranging by Multichannel RSS Averaging, *IEEE Wireless Commun. Lett.*, Vol. 3, No. 1, pp. 10–13 (2014).