

## 2段階チャンネル区別BLE測位手法の設計と評価

山本 貴宏<sup>1,a)</sup> 石田 繁巳<sup>1</sup> 木元 亮太<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) が利用できないため, BLE (Bluetooth Low Energy) を用いた屋内測位が研究されている. BLE 測位では周波数の大きく離れた3つのアドバタイジングチャンネルによって取得したRSS (Received Signal Strength) をチャンネルを区別せずに統合して用いるため測位精度が低いという課題が存在する. 筆者らはアドバタイジングチャンネルを区別するBLEチャンネル別測位を開発し, 測位精度の向上を行った. チャンネル区別により測位精度は向上したが, 依然として5mを超える大きな誤差が存在した. 本稿では, BLE 測位精度のさらなる向上に向けてチャンネルを区別しないチャンネル統合測位とチャンネル別測位を段階的に用いる2段階チャンネル別測位を設計し, 実環境にて評価を行った. 実証評価により, 提案手法による測位精度がチャンネル別測位と比較して約22.7%向上することを確認した.

**キーワード:** BLE, フィンガープリント測位, チャンネルダイバーシティ

## Design and Evaluation of BLE 2-step Separate Channel Fingerprinting

TAKAHIRO YAMAMOTO<sup>1,a)</sup> SHIGEMI ISHIDA<sup>1</sup> RYOTA KIMOTO<sup>1</sup> SHIGEAKI TAGASHIRA<sup>2</sup>  
AKIRA FUKUDA<sup>1</sup>

**Abstract:** Since GPS (Global Positioning System) is unavailable in indoor environment, Bluetooth Low Energy (BLE) based localization is studied. BLE localization utilizes RSS (Received Signal Strength) measured on three advertising channels whose frequency is separated by up to 78MHz without channel recognition, suffering from low localization. We have developed separate channel fingerprinting in our previous work to improve localization accuracy, which still suffers from large error. In this paper, we present 2-step separate channel fingerprinting that combines unified channel localization and separate channel localization. We conducted experimental evaluation and demonstrated that the 2-step separate channel fingerprinting successfully improved localization accuracy by approximately 22.7% compared to separate channel localization.

**Keywords:** BLE, fingerprinting, channel diversity.

### 1. はじめに

IoT (Internet of Things) 分野の発展やスマートフォンの普及に伴い, 位置情報を利用したサービスが増加している. 屋内ではGPS (Global Positioning System) が利用できないため, Wi-Fi や BLE (Bluetooth Low Energy), UWB (Ultra Wide Band) を用いた屋内測位技術の研究が

行われている. その中でもBLEはスマートフォンにも搭載され広く普及していること, 低消費電力であることから注目を集めている.

しかしながら, BLEは周波数の大きく離れたアドバタイジングチャンネルによってRSS (Received Signal Strength) を取得するため測位精度が低いという課題がある[1]. BLEが使用するアドバタイジングチャンネルは最大78MHz離れており, 各チャンネルで観測するRSSが大きく異なる. 一般的なBLEはチャンネルを区別せずにRSSを統合して用いるため測位精度の低下を招く.

BLEを用いた測位は多数報告されている[1]~[4]. これ

<sup>1</sup> 九州大学大学院システム情報科学府・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

<sup>a)</sup> yamamoto@f.ait.kyushu-u.ac.jp

らの研究では、アドバタイジングチャンネルによって信号を送信する BLE ビーコンを設置して測位を行う。測位対象は自身の位置を推定するためにビーコン信号を受信し、RSS を測定する。測位結果は、アドバタイジングチャンネルの伝播特性の違いによって収集する RSS が大きく異なり、不安定な値となるため約 5 m の大きな測位誤差となっている。

先行研究として我々は 3 つのアドバタイジングチャンネルを区別して RSS を取得するチャンネル別測位を提案し、測位精度の向上を実証した [5], [6]。チャンネル別測位はチャンネルを区別せずに RSS を用いるチャンネル統合測位と比較して、測位精度を約 28% 改善した。先行研究では測位精度は改善したが依然として大きな誤差が残っており、さらなる測位誤差の軽減が必要であった。

そこで本稿では、BLE 測位精度の向上に向けてチャンネル統合測位による疎推定とチャンネル別測位による精密推定を組み合わせる 2 段階チャンネル別測位を提案する。[6] にて、チャンネル統合測位はチャンネル別測位よりも測位誤差が小さい地点が存在するという測位傾向が見られたことから、チャンネル統合測位とチャンネル別測位の測位傾向を活用する。九州大学内廊下での実証評価により、チャンネル別測位と比較して測位精度が約 22.7% 向上することを確認した。

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に関する関連研究を示す。3 でチャンネル別測位の概要を説明し、4 では 2 段階チャンネル別測位を示す。5 において実証評価により 2 段階チャンネル別測位の性能を検証する。最後に 6 でまとめとする。

## 2. 関連研究

無線信号を使用した屋内測位手法についての研究は多数報告されている。フィンガープリント測位は、その高い精度と新たな機材を必要としない導入の容易さから注目されている測位手法である [7]。フィンガープリント測位は事前調査を行う学習フェイズと位置推定を行う測位フェイズの 2 つのフェイズで構成される。学習フェイズでは環境の各地点で RSS データを収集してフィンガープリントデータベースを構築し、測位フェイズでは測位対象の取得した RSS をフィンガープリントと比較して位置推定を行う。フィンガープリント測位の精度は、各地点で RSS データを収集する事前調査によって支えられている。

フィンガープリント測位の精度向上に関する研究が多数報告されている [8] ~ [13]。これらの研究は主に Wi-Fi を使用しているが、ZigBee, UWB (Ultra Wide Band), および Bluetooth を含む他の無線規格を用いた測位システムに適用可能である。

クラシック Bluetooth を利用したフィンガープリント測位が提案されているが、この研究では RSS を測定するために端末を発見するプロセスを必要とする [14], [15]。クラ

## Separate Channel Fingerprints

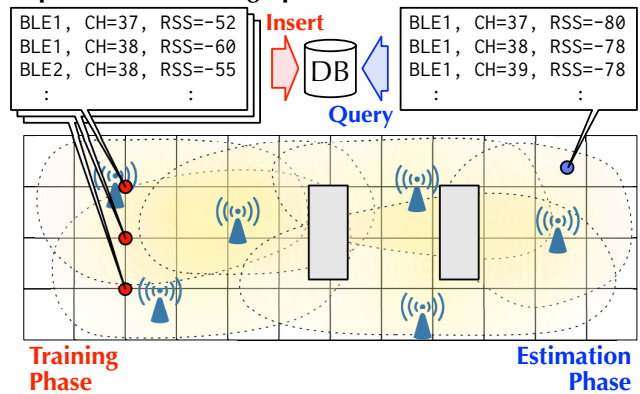


図 1 チャンネル別測位概要

シック Bluetooth において端末を発見するプロセスには 5.12 秒を必要とする [16]。実環境での利用を想定した時、この発見の遅さにより Bluetooth を用いた測位システムの実現は困難であった。

しかし、最近の Bluetooth 4.0, つまり BLE はデバイスの発見に使用するチャンネルを減らすことで発見の速度を向上させている [17]。BLE はデバイスの存在をブロードキャストするために 3 つのアドバタイジングチャンネルのみを利用している。発見時間が短いという特徴を利用した BLE フィンガープリント法が提案されている [1]。この研究では、3 つのアドバタイジングチャンネルにおける RSS の変動を実験的に実証し、RSS の変動は主に周波数選択性フェージングおよび送受信機の異なるチャンネル利得によって引き起こされるとしている。そのため、周波数選択性フェージングの影響を大きく受けたチャンネルを発見し、フィンガープリント測位の結果から取り除くことで、チャンネルの違いによる影響を小さくしている。

筆者らは、この研究を拡張し、BLE 測位精度を向上させるためにチャンネル固有の情報を利用するフィンガープリント方式を開発している。

## 3. アドバタイジングチャンネル別測位

チャンネル別測位はアドバタイジングチャンネルを区別して RSS を収集することで、測位精度の向上を行う測位システムである [6]。

図 1 にチャンネル別測位の概要を示す。チャンネル別測位は学習フェイズ (Training Phase) と測位フェイズ (Estimation Phase) から構成されるフィンガープリント測位を用いる。各フェイズで、環境中の BLE ビーコンからアドバタイジングチャンネルを区別しつつ RSS を収集して測位を行う。以下ではチャンネル別測位の手法とフィンガープリント測位についてそれぞれ説明する。

### 3.1 チャンネル別測位手法

BLE 測位ではデバイスの発見、ネットワークの構築に利

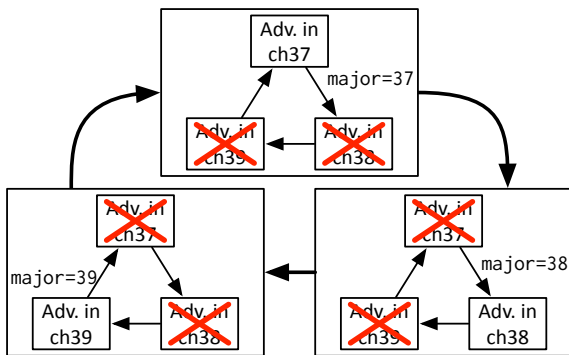


図 2 チャンネル区別

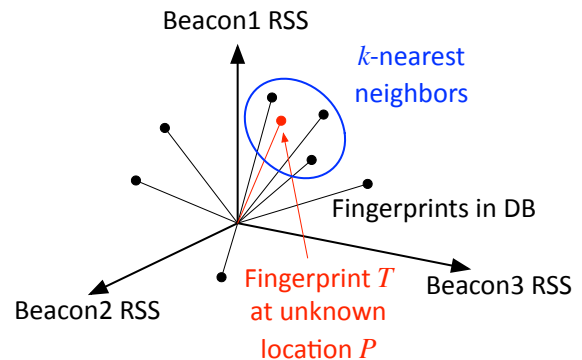


図 3 フィンガープリント測定

用するアドバタイジングチャンネルを用いて位置推定を行うが、アドバタイジングチャンネルは周波数が最大 78 MHz 離れており、チャンネルごとに伝搬特性が大きく異なる。一般的な BLE はチャンネルを区別する API を持たず、取得した RSS はチャンネル関係なく統合して処理されるため測位精度の低下を招くという課題がある。このため、各チャンネルを区別して収集し、チャンネルごとに伝播特性が異なることを特徴量として活用することで、測位精度の向上を行うチャンネル区別手法を開発した。位置情報を用いたサービスにおいては、利用者が様々な BLE 端末を利用することが想定される。そこで、チャンネル区別手法は BLE 送信機の開発によってチャンネル区別を実現する。

図 2 にチャンネル区別の手順を示す。チャンネル区別では送信機のチャンネルを周期的に変更し、パケット情報の一部を書き換えることで区別を行う。一般的な BLE では周波数ホッピングにより自動的にチャンネル切り替えが行われ、使用チャンネルを知ることができない。そこで、チャンネルを区別して RSS を取得するために送信機の周波数ホッピングを制限し、1 つのチャンネルのみで通信を行う。送信機は周期的にチャンネル情報を書き込んだパケットの送信を行い、一定回数送信した後に次のチャンネルに切り替える。受信機は通常どおり周波数ホッピングを行い、ビーコン信号を受け取った際にパケット内のデータを解析してどのチャンネルで取得したかを判断する。

### 3.2 フィンガープリント測位

チャンネル区別測位はフィンガープリント測位によって端末の位置推定を行う。図 3 に RSS を特徴量としたフィンガープリント測位の概要を示す。フィンガープリント測位では、学習フェイズにて測位対象エリア内の各点において各 BLE ビーコンからの RSS を示すフィンガープリントを収集しておく。測位フェイズにて、測位端末で取得した各ビーコンの RSS とフィンガープリントとを比較して測位を行う。位置推定には、類似度の高い  $k$  個のフィンガープリント座標から測位対象の座標を求める  $k$ -NN ( $k$ -Nearest Neighbor) を用いる。

チャンネル区別測位はアドバタイジングチャンネルを区別し

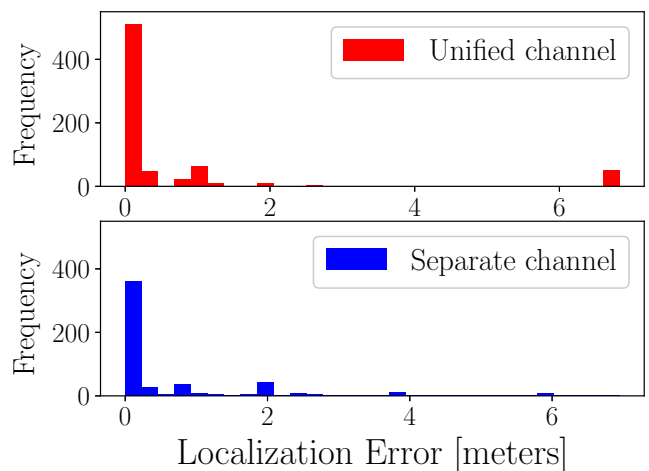


図 4 チャンネル区別測位誤差とチャンネル統合測位誤差のヒストグラム

て収集した RSS を特徴量として用いる。一般的な BLE 測位ではチャンネルを区別せずに RSS を取得するため特徴量は各ビーコンにつき 1 つだが、チャンネル区別によりチャンネル数分の RSS を特徴量として利用できる。測位対象の取得した RSS と各フィンガープリントの RSS を比較する際に、チャンネルを対応づけて比較することで測位精度の向上を図る。

図 4 にチャンネル区別測位 (Separate channel) とチャンネルを区別しないチャンネル統合測位 (Unified channel) によって得られた測位誤差をそれぞれ示す。チャンネル区別測位はチャンネル統合測位と比較して測位精度を向上させる一方で、依然として 5 m を超える大きな誤差が残るという課題が存在した。

## 4. 2 段階チャンネル区別測位

BLE 測位精度向上に向け、チャンネル統合測位とチャンネル区別測位を組み合わせた 2 段階チャンネル区別測位を示す。2 段階チャンネル区別測位のキーアイデアは、チャンネル統合測位とチャンネル区別測位のそれぞれの測位傾向を活用することである。図 4 において測位誤差が小さい領域ではチャンネル統合測位の方が累積割合が高い傾向がある。測位誤差

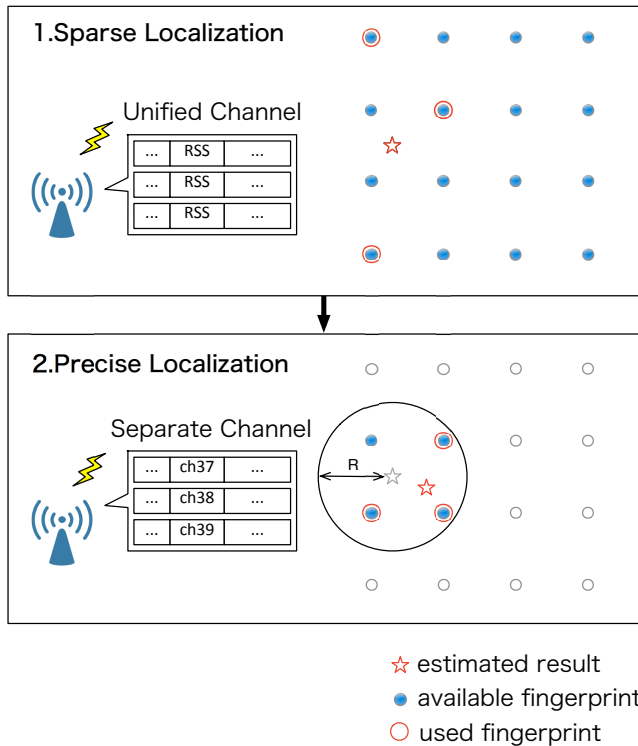


図 5 2 段階チャンネル区別測位概要

が小さくなる可能性が高いチャンネル統合測位で推定位置を絞り込んだ上で、全体の測位誤差が小さいチャンネル区別測位を行うことで測位精度の向上を測る。

図 5 に 2 段階チャンネル区別測位の概要を示す。2 段階チャンネル区別測位はチャンネル統合測位を行う疎推定 (Sparse Localization) とチャンネル区別測位を行う精密推定 (Precise Localization) の 2 段階で構成され、フィンガープリント測位を行う。2 段階チャンネル区別測位では、環境中のビーコン送信機からアダプタイジングチャンネル区別して RSS を収集する。まず、疎推定では測位エリア全体でチャンネル統合測位を行う。チャンネルを区別して収集した RSS のチャンネルを統合して位置を推定する。次に、疎推定で得られた座標から絞り込んだエリア内で精密推定を行う。精密推定ではチャンネルを区別して位置を推定する。

2 段階チャンネル区別測位は、通常のフィンガープリント測位と同様に学習フェイズと測位フェイズの 2 つのフェイズに分けて位置推定を行う。以降では各フェイズについて詳述する。

#### 4.1 学習フェイズ

学習フェイズでは測位エリア  $A$  を小さなサブエリア  $i$  ( $i \in A$ ) に分割し、各サブエリアで観測できるすべての BLE ビーコン信号の RSS を収集する。各サブエリアで取得した RSS データ  $S_i$  と位置情報を関連づけてフィンガープリントを作成する。 $S_i$  は  $n$  個のビーコン送信機からアダプタイジングチャンネルの ch37, ch38, ch39 を区別して取得した  $3n$  次元データであり、次のように表せる。

$$S_i = [s_{i1,37}, s_{i1,38}, s_{i1,39}, s_{i2,37}, \dots, s_{in,39}] \quad (1)$$

ここで  $s_{ij,c}$  はサブエリア  $i$  においてチャンネル  $c$  ( $c \in \{37, 38, 39\}$ ) で取得したビーコン  $j$  ( $j \in n$ ) の RSS である。 $s_{ij,c}$  はそれぞれのチャンネルで一定時間取得した RSS サンプルの中央値を用いる。

#### 4.2 測位フェイズ

測位フェイズでは測位対象地点で RSS データ  $T$  を取得する。 $T$  はフィンガープリント RSS データ  $S_i$  と同様に、次のように表せる。

$$T = [r_{1,37}, r_{1,38}, r_{1,39}, r_{2,37}, \dots, r_{n,39}] \quad (2)$$

ここで  $r_{j,c}$  は測位対象がチャンネル  $c$  ( $c \in \{37, 38, 39\}$ ) で取得したビーコン  $j$  ( $j \in n$ ) の RSS である。 $r_{j,c}$  はそれぞれのチャンネルで一定時間取得した RSS サンプルの中央値を用いる。この取得した  $T$  について疎推定と精密推定を行う。

##### 4.2.1 疎推定

疎推定ではチャンネルの区別をしないため、 $S_i$  と  $T$  の ch37, ch38, ch39 の 3 チャンネルを統合した  $n$  次元 RSS データ  $\hat{S}_i$  と  $\hat{T}$  でフィンガープリント測位を行う。 $\hat{S}_i$  と  $\hat{T}$  は (1), (2) と同様に次のように表せる。

$$\hat{S}_i = [\overline{s_{i1}}, \overline{s_{i2}}, \overline{s_{i3}}, \dots, \overline{s_{in}}] \quad (3)$$

$$\hat{T} = [\overline{r_1}, \overline{r_2}, \overline{r_3}, \dots, \overline{r_n}] \quad (4)$$

$\overline{s_{ij}}, \overline{r_j}$  ( $j \in n$ ) は  $s_{ij,c}, r_{j,c}$  ( $c \in \{37, 38, 39\}$ ) を求めるために使用した全 RSS サンプルの中央値である。

疎推定では学習フェイズで取得したエリア内全てのフィンガープリントと、測位対象地点で取得した  $T$  から算出する  $\hat{T}$  とを比較して座標を推定する。各フィンガープリントと測位対象の取得した RSS の類似性の計算ではユークリッド距離を用いて、RSS 距離  $\hat{D}(\hat{S}_i, \hat{T})$  を求める。この  $\hat{D}(\hat{S}_i, \hat{T})$  が小さいほどフィンガープリント地点と測位地点の RSS の類似性が高いと考え、実空間で近い位置にあると推定する。

$$\hat{D}(\hat{S}_i, \hat{T}) = \sqrt{\hat{w}_i \sum_{j=1}^n (\overline{s_{ij}} - \overline{r_j})^2} \quad (5)$$

ここで  $\hat{w}_i$  は欠損値を考慮した重みである。検出されなかった BLE ビーコンの RSS は欠損値となる。欠損値によりデータの次元が異なる場合、次元数の多いデータの距離が大きくなり誤差につながる可能性が高いため、距離計算に重み付けを行う。 $\hat{w}_i$  は同一ビーコンについて  $\hat{S}_i$  と  $\hat{T}$  の両方で RSS を検出した回数の逆数を用いた。また、 $\hat{S}_i$  と  $\hat{T}$  の両方で RSS を検出した回数が全次元数の半分未満の場合には、そのフィンガープリント地点と測位地点は大きく異なる位置であると考えた。このとき、 $\hat{D}(\hat{S}_i, \hat{T}) = \infty$  として、そのフィンガープリント地点は測位計算に使用しない。

疎推定座標  $\hat{P}$  は、最も距離が小さい近傍点を  $k$  個選択し、距離を重みとして重心座標を計算する  $k$ -NN を用いて推定する。近傍点として選択した  $k$  個の点の集合を  $N_k$ 、選択した点の座標を  $X_i$  とする。

$$\hat{P} = \frac{\sum_{i \in N_k} \frac{1}{D(\hat{S}_i, \hat{T})} X_i}{\sum_{i \in N_k} \frac{1}{D(\hat{S}_i, \hat{T})}} \quad (6)$$

選択する近傍点数  $k$  の値は、測位対象や環境によって決定する。

#### 4.2.2 精密推定

精密推定ではチャンネル別測位を行い、推定された座標を 2 段階チャンネル別測位の結果とする。このとき、図 5 中の黒円で示すように疎推定座標  $\hat{P}$  から半径  $R$  内にあるサブエリアの集合を  $A_R (C A)$  とし、フィンガープリント  $S'_i (i \in A_R)$  のみを用いて測位を行う。

チャンネルを区別した RSS データ  $T$  を用いて、絞り込んだエリア内でフィンガープリント測位を行う。RSS 距離  $D(S'_i, T)$  と精密推定座標  $P$  は式 (5), (6) と同様に計算する。  $w_i$  は  $\hat{w}_i$  と同様に  $S'_i$  と  $T$  の両方で欠損値でないデータ数の逆数である。

$$D(S'_i, T) = \sqrt{w_i \sum_{j=1}^n \sum_{c \in \{37, 38, 39\}} (s_{ij,c} - r_{j,c})^2} \quad (7)$$

$$P = \frac{\sum_{i \in N_k} \frac{1}{D(S'_i, T)} X_i}{\sum_{i \in N_k} \frac{1}{D(S'_i, T)}} \quad (8)$$

精密推定を行う際に、疎推定で求めた座標から半径  $R$  内にフィンガープリントが  $k$  個存在しない場合は測位不能となるため、使用する半径  $R$  の設定はフィンガープリントの間隔と環境により決定する。

## 5. 評価

2 段階チャンネル別測位の有効性を検証するため、評価実験を行った。[6] では全体の誤差の 90% 収まる値を測位精度としたが、90% 以降に大きな誤差が残ったことから測位精度はより厳しい 95% の誤差が収まる値を評価した。

### 5.1 実装

2 段階チャンネル別測位を用いた BLE 測位精度の検証実験に向けて、測位システムを実装した。実験では、BLE ビーコン、BLE ビーコン信号取得兼データ処理 PC を用いた。BLE ビーコンには Silicon Labs 社の BLED112 を用いた。BLE 信号の取得とデータ処理 PC は Mac OSX 10.11.6 が動作する MacBook Pro である。

BLE ビーコンの設定は BGScript プログラミング、信号の受信は JavaScript プログラミング、測位計算は Python プログラミングによってそれぞれ実装した。

### 5.2 評価環境

図 6 に評価環境を示す。評価は図 6(a) に示す九州大学

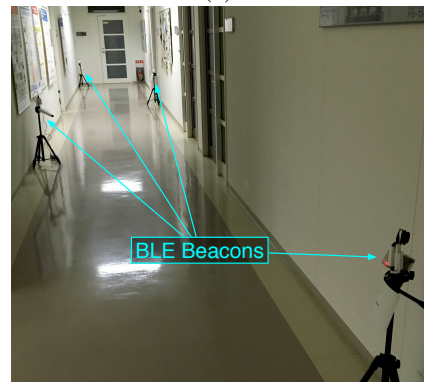
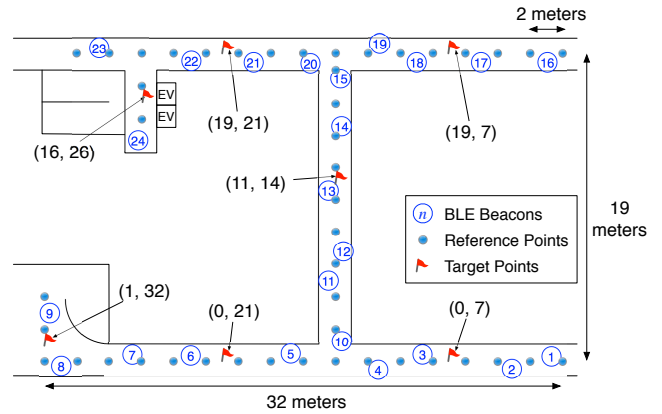


図 6 実験 (a) 評価環境 (b) BLE ビーコン設置の様子

伊都キャンパスウエスト 2 号館 7 階東側廊下の 19 m × 32 m のエリアで行った。図 6(b) に示すように、三脚を利用して約 1 m の高さにもモバイルバッテリーで動作する BLE ビーコンを  $n = 24$  台設置した。

各 BLE ビーコンの送信周期は 30~32.5 ms とし、5 回送信するごとにアダプタイジングチャンネルを切り替えた。ビーコン信号の取得は学習フェイズ、測位フェイズともに PC にて取得した。なお測位エリア内には 20 台の Wi-Fi AP が存在した。

学習フェイズではフィンガープリントを 2 m 間隔の計 46 地点、測位フェイズでは任意の 7 地点で RSS を取得した。各地点で 120 秒間 RSS を収集し、10 秒のウィンドウを 1 秒ずつずらしてかけ、111 データに分割した。各ウィンドウ内の RSS サンプルの中央値を使用して  $S'_i, T$  を求めて位置推定を行った。測位を行った廊下の幅が約 2 m と狭かったこと、フィンガープリント収集点の間隔を 2 m としたことから、 $k$ -NN で用いる近傍点個数  $k = 2$  個、精密推定で利用するエリアの半径  $R = 3$  m とした。

提案手法の評価を行うために以下の 3 つの手法の測位精度を比較した。

- (i) 2 段階チャンネル別測位 (2-step): 本方式は、4 で示した提案手法である。チャンネル別測位とチャンネル別測位を段階的に用いて位置推定を行う。

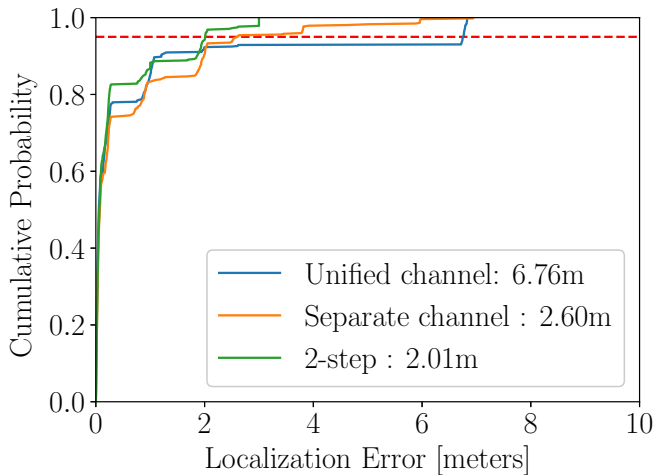


図 7 測位誤差の累積分布

- (ii) チャンネル区別測位 (Separate channel): 本方式は、[6]で報告したチャンネルを区別して RSS を収集し、フィンガープリント測位により座標を推定する手法である。チャンネルを区別して収集したフィンガープリント  $S_i$  と測位対象の取得した  $T$  を使用して測位を行う。
- (iii) チャンネル統合測位 (Unified channel): 本方式は、一般的な BLE で用いられるチャンネルを区別せずに RSS を収集し、フィンガープリント測位により座標を推定する手法である。本実験ではチャンネルを区別した RSS データ  $S_i$ ,  $T$  について、中央値を求めた  $\hat{S}_i$ ,  $\hat{T}$  を用いて測位を行う。

### 5.3 測位精度

図 7 に測位誤差の累積分布を示す。図中の水平の赤線は累積確率 95%地点を示す。図 7 より以下のことがわかる。

- a) チャンネル統合測位, チャンネル区別測位, 2段階チャンネル区別測位を用いた場合での測位精度はそれぞれ 6.76 m, 2.60 m, 2.01 m であり測位精度の向上が確認できた。2段階チャンネル区別測位による測位精度は (ii) のチャンネル区別測位と比較して約  $(2.60 - 2.01) / 2.60 \times 100 = 22.7\%$  向上した。
- b) 2段階チャンネル区別測位では特に測位誤差が全体の 90%を超えた範囲にて大幅な改善が見られた。チャンネル統合測位, チャンネル区別測位, 2段階チャンネル区別測位を用いた場合での誤差最大値はそれぞれ 6.83 m, 6.94 m, 3.00 m であった。

大きな測位誤差が改善された要因について、各地点での測位精度から考察を行う。表 1 にそれぞれの測位地点での測位精度と測位実施率を示す、測位実施率は測位施行回数に対する測位成功回数の割合である。表 1 中の “—” は一度も測位が行われなかった場合を表す。測位が失敗するのは、 $k$  個の近傍点が参照できない場合である。これは、測位対象と各フィンガープリントの RSS 距離がほぼすべて

$\infty$  (距離計算時にデータの欠損値が半数以上) で、使用しないフィンガープリントが多い場合である。また、精密推定の際に半径  $R$  のサブエリア内に存在するフィンガープリント  $S'_i (i \in A_R)$  が  $k$  個存在しない場合にも測位が失敗する。表 1 より以下のことがわかる

- a) チャンネル統合測位は  $(x, y) = (0, 7), (19, 7)$  地点にて特に誤差が小さく、位置によって誤差が小さいという測位傾向を活用でき、2段階チャンネル区別測位の測位精度向上を行ったことが確認できる。
  - b)  $(x, y) = (19, 7)$  地点にて、チャンネル区別測位の測位実施率 66.7%に対して、2段階チャンネル区別測位の測位実施率は 60.5%であり、測位実施率は 6.2 ポイント低下する。これは 2段階チャンネル区別測位の疎推定で推定されたエリア内で測位失敗したためである。精密推定で使用するエリアの半径  $R$  を大きくすることで測位実施率の向上が見込めるが、本研究では  $(x, y) = (19, 7)$  付近での測位を行わないことで測位精度の向上に繋がった。
  - c) チャンネル統合測位では測位実施率が高いが、全体での測位精度が低い傾向が存在する。チャンネル統合測位の測位計算ではチャンネルを統合して利用するため、多少の欠損値が存在する場合でも測位が行えた。欠損値が多い場合に測位を行うことで測位誤差が大きくなり、測位精度の低下を招くことがわかる。特にチャンネル区別測位, 2段階チャンネル区別測位において  $(x, y) = (1, 32), (16, 26)$  地点では欠損値が多かったため測位は一度も行われなかった。欠損値が多い場合に測位を行わないことで、大きな測位誤差が現れる可能性を削減できると考えられる。
  - d)  $(x, y) = (1, 32), (16, 26)$  地点は遮蔽により見通しの悪い地点だったため、欠損値が多かったと考えられる。図 8 は図 6 中、右下 1 番の送信機から、ビーコン信号を受信した回数を地点ごとに示す。120 秒間取得した RSS データを 1 秒ごとに分割して 120 個の RSS サンプルとした。3 つのアドタイジングチャンネルで収集するため計 360 サンプルが各地点で得られる。1 番のビーコン送信機から取得した RSS は、図 8 中央と上側の廊下で取得されていないことがわかる。同様に図 8 下側の廊下にある 2, 3, 6, 7, 8, 9 番ビーコン送信機からの信号は上側の廊下にて取得できていない傾向が見られた。逆に、図 8 下側の廊下では、上側の廊下のビーコンからの信号を取得できていなかった。
- 以上の結果から、遮蔽物が存在する環境で使用するビーコン送信機の決定、フィンガープリントの選択が重要になると考えられる。

### 6. おわりに

本稿では、屋内 BLE 測位精度向上に向けて 2段階チャンネル区別測位手法を示し、実証評価を行った。2段階チャ

表 1 各測位地点での測位精度と測位実施率

測位地点	チャンネル統合測位		チャンネル別測位		2段階チャンネル別測位	
	測位精度 [m]	測位実施率 [%]	測位精度 [m]	測位実施率 [%]	測位精度 [m]	測位実施率 [%]
(0, 7)	0.27	99.2	2.53	95.0	1.88	94.1
(0, 21)	0.08	98.3	0.11	94.2	0.10	94.9
(1, 32)	6.83	42.5	—	0	—	0
(11, 14)	1.23	97.5	2.02	92.5	2.02	94.9
(16, 26)	1.21	62.5	—	0	—	0
(19, 7)	0.06	99.2	5.96	66.7	3.00	60.5
(19, 21)	0.06	98.3	0.11	87.5	0.11	89.0
ALL	6.76	85.4	2.61	62.3	2.01	61.0

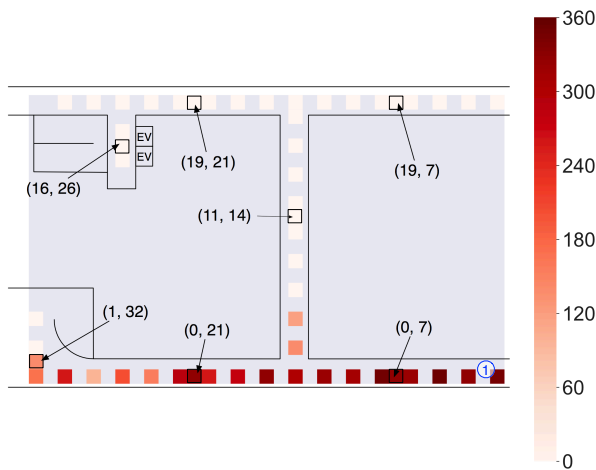


図 8 1 番送信機からのビーコン受信回数

ネル別測位手法ではチャンネルを区別しないチャンネル統合測位と、チャンネルを区別するチャンネル別測位とを組み合わせることによって、それぞれの手法の測位傾向を活用した。九州大学廊下での実証評価を通じて、2段階チャンネル別測位手法を適用することで、チャンネル別測位のみを適用した場合と比較して BLE 測位精度を約 22.7%向上でき、最大誤差を大きく削減できることを確認した。

謝辞 本論文の研究の一部は、科研費（JP15H05708，JP17K19983，JP17H01741，JP18K18041）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] R. Faragher *et al.*, “Location fingerprinting with Bluetooth low energy beacons,” *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 33, no. 11, pp.2418–2428, Nov. 2015.  
 [2] D. Contreras *et al.*, “Performance evaluation of Bluetooth Low Energy in indoor positioning systems,” *Trans. Emerging Telecommunications Technologies*, vol. 25, no. 8, pp.1–10, Aug. 2014.  
 [3] J. Zhu *et al.*, “RSSI based Bluetooth Low Energy indoor positioning,” in *Proc. IPIN*, Oct. 2014, pp.526–533.  
 [4] G. Ionescu *et al.*, “Improving distance estimation in ob-

ject localisation with Bluetooth Low Energy,” in *Proc. SENSORCOMM*, Nov. 2014, pp.1–5.  
 [5] S. Ishida *et al.*, “Design and initial evaluation of bluetooth low energy separate channel fingerprinting,” in *New Trends in E-Service and Smart Computing, Studies in Computational Intelligence*, T. Matsuo, T. Mine, and S. Hirokawa, Eds. Springer, Jan. 2018, vol. 742, pp.19–33.  
 [6] S. ishida *et al.*, “Evaluation of BLE Separate Channel Fingerprinting in Practical Environment,” in *Proc. IIAI-AAI*, July. 2018, pp.121–124.  
 [7] P. Bahl *et al.*, “RADAR: An in-building RF-based user location and tracking system,” in *Proc. IEEE INFOCOM*, Mar. 2000, pp.775–784.  
 [8] P. Prasithsangaree *et al.*, “On indoor position location with wireless LANs,” in *Proc. IEEE PIMRC*, Sep. 2002, pp.720–724.  
 [9] A. LaMarca *et al.*, “Place Lab: Device positioning using radio beacons in the wild,” in *LNCS*, vol. 3468, May 2005, pp.116–133, *proc. ACM PERSASIVE*.  
 [10] A. W. Tsui *et al.*, “Unsupervised learning for solving RSS hardware variance problem in WiFi localization,” *Mobile Networks and Applications*, vol. 12, no. 5, pp.677–691, Oct. 2009.  
 [11] A. Kushki *et al.*, “Intelligent dynamic radio tracking in indoor wireless local area networks,” *IEEE Trans. Mobile Comput.*, vol. 9, no. 1, pp.405–419, Mar. 2010.  
 [12] K. Kaemarungsi *et al.*, “Analysis of WLAN’s received signal strength indication for indoor location fingerprinting,” *Pervasive and Mobile Computing*, vol. 8, no. 2, pp.292–316, Apr. 2012.  
 [13] S. Sen *et al.*, “You are facing the Mona Lisa: Spot localization using PHY layer information,” in *Proc. ACM MobiSys*, Jun. 2012, pp.183–196.  
 [14] F. Subhan *et al.*, “Indoor positioning in Bluetooth networks using fingerprinting and lateration approach,” in *Proc. IEEE ICISA*, Apr. 2011, pp.1–9.  
 [15] L. Chen *et al.*, “Bayesian fusion for indoor positioning using Bluetooth fingerprints,” *Int. J. Wireless Personal Communications*, vol. 70, no. 4, pp.1735–1745, Jun. 2013.  
 [16] B. S. Peterson *et al.*, “Bluetooth inquiry time characterization and selection,” *IEEE Trans. Mobile Comput.*, vol. 5, no. 9, pp.1173–1187, Sep. 2006.  
 [17] Bluetooth Special Interest Group, “Core specification v4.0,” Jun. 2010, <http://www.bluetooth.com/>.  
 [18] M. Youssef *et al.*, “The Horus WLAN location determination system,” in *Proc. ACM MobiSys*, Jun. 2005, pp.205–218.