

# 近接ビーコンを利用した屋内位置測位手法の提案

工藤大希<sup>†1</sup> 堀川三好<sup>†2</sup> 古舘達也<sup>†2</sup> 岡本東<sup>†2</sup>

本稿は、自位置に最も近接する BLE (Bluetooth Low Energy) ビーコン (以後、近接ビーコン) の算出方法および近接ビーコンを利用した屋内位置測位手法を提案する。従来、受信信号強度を利用する屋内位置測位としては、三点測量方式、フィンガープリント方式および独自アルゴリズムの提案等、複数のビーコンの RSSI (Received Signal Strength Indicator) から自位置を算出する方法を中心に研究が進められている。一方で、BLE ビーコンを中心として、単体ビーコンの RSSI から近接ビーコンを判別し、自位置とする簡易な屋内位置測位の実務導入が進められている。近接ビーコンは、単純に RSSI の閾値を設定する方式や RSSI の大小で判別する方式がとられることが多い。しかしながら、利用端末の性能により閾値が異なり、また屋内環境では RSSI が不安定になるため、リアルタイムに適切な近接ビーコンの判別が行えない点が課題となっている。本稿では、BLE ビーコンから受信される RSSI に対して統計的検定を行うことで近接ビーコンを判別する方法を提案し、屋内位置測位システムに組み込み評価した結果について報告をする。

## The Proposal of Indoor Positioning System Using Nearest Beacon

DAIKI KUDOU<sup>†1</sup> MITSUYOSHI HORIKAWA<sup>†2</sup>  
TATSUYA FURUDATE<sup>†2</sup> AZUMA OKAMOTO<sup>†2</sup>

This paper proposes an indoor positioning system using BLE (Bluetooth Low Energy) beacons. There are many procedures to calculate the positioning by RSSI (Received Signal Strength Indication), these procedures are less accurate as the observed RSSI varies widely due to many reasons such as fading, obstacles and so on. The proposed procedure calculates the nearest beacon by statistical approach. The positioning is calculated by RSSI which is processed through filtering and statistical test. This paper reports an indoor positioning system using the nearest beacon and evaluates the system.

### 1. はじめに

GPS を利用した測位技術の確立によって、ナビゲーションシステムや位置情報連動型の情報配信システムなど、位置情報を利用するサービスは急速に普及している。また、衛星電波の届きにくい屋内環境では、GPS の利用が困難であるため、様々な屋内位置測位手法が提案されており、その一手法として RSSI (Received Signal Strength Indicator) を利用したフィンガープリント方式 [1] や独自の屋内位置測位手法 [2] が提案されている。しかしながら、導入負荷や測位精度の観点から多くの課題が残されているため、BLE (Bluetooth Low Energy) ビーコン (以後、ビーコン) を利用して自位置に最も近接するビーコン (以後、近接ビーコン) を判別する、簡易で大まかな屋内位置測位の実務導入が進んでいる。

本稿では、ビーコンから受信される RSSI に対して統計的検定を行う事で、リアルタイムに適切な近接ビーコンを判別する方法および近接ビーコンを利用した屋内位置測位手法を提案する。その特徴として、RSSI のフェージングや障害物などの影響で、判別される近接ビーコンが短期間で変化してしまう現象 (以後、ゆらぎ) を防止し、高精度な屋内位置測位を行える点があげられる。また、この手法を屋内位置測位システムに組み込み評価した結果について報

告する。

### 2. 受信信号強度を利用した屋内位置測位手法

#### 2.1 先行研究と課題

RSSI を利用する屋内位置測位は、Wi-Fi を用いたフィンガープリント方式とマップマッチングの併用 [3] や、PDR (Pedestrian Dead Reckoning) [4] と BLE ビーコンを用いた測位を併用するハイブリッド測位 [5] などが提案されている。また、ビーコンから受信する RSSI をもとに近接ビーコンの設置位置を自位置とすることで、大まかな位置を推定する屋内位置測位手法は、O2O (Online to Offline) 分野や物品管理などで検証実験や実務導入が進んでいる [6] [7]。

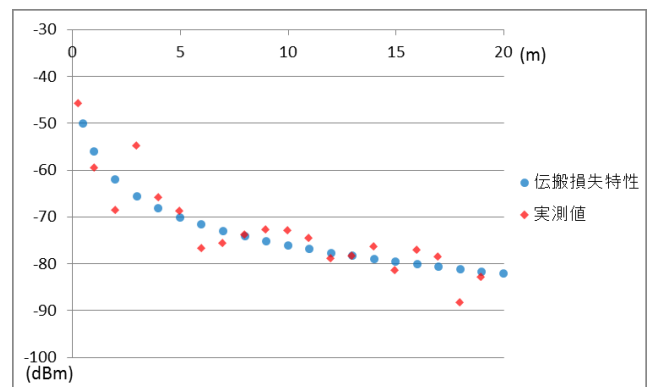


図 1 RSSI の伝搬損失特性と実測値の比較

Figure 1 A comparison of the propagation loss characteristics and measured value of RSSI

<sup>†1</sup> 岩手県立大学ソフトウェア情報学部  
Faculty of Software and Information Science, Iwate Prefectural University  
<sup>†2</sup> 岩手県立大学院ソフトウェア情報学研究科  
Graduate School of Software and Information Science, Iwate Prefectural University Graduate School

RSSIを利用する屋内位置測位の課題の一つに、受信するRSSIのばらつきがあげられる。RSSIはその伝搬損失特性により、送受信機間の距離をある程度推測することができる。しかしながら、屋内環境で受信されるRSSIは障害物やフェージングの影響で、ばらつきが大きくなる(図1)。そのため、RSSIを利用する屋内位置測位は、高精度な測位が困難となる。

## 2.2 RSSIを利用する屋内位置測位手法の分類

本稿では、RSSIを利用する屋内位置測位手法を、それぞれの手法に適した電波強度という観点から、強電波発信型および弱電波発信型に分類する[8]。強電波発信型は、複数のビーコンから受信したRSSIを利用して、相対性や距離関係に注目した処理を行う屋内位置測位手法である。弱電波発信型は、ビーコンごとのRSSIを用いて、大小関係や閾値との比較を行う屋内位置測位手法である。

### (1) 強電波発信型の屋内位置測位

強電波発信型の屋内位置測位は、複数のビーコンから受信するRSSIの相対性や距離関係に注目する事で、設置したビーコンの付近だけでなく、ビーコンの中間地点など、詳細な位置の測位が可能である。また、ビーコンの電波強度を強く設定する事が多いため、広範囲でRSSIの受信が可能となり、少ない数のビーコンで測位することができる。しかしながら、先述のように屋内環境では障害物などの影響でRSSIがばらつきやすく、高精度な測位が困難となる。そのため、強電波発信型の屋内位置測位は、RSSIのばらつきの影響を考慮したアルゴリズムの開発が必要となっている[9]。

### (2) 弱電波発信型の屋内位置測位

弱電波発信型の屋内位置測位は、ビーコンごとにRSSIを処理するため、RSSIのばらつきから受ける影響が小さい。また、強電波発信型の屋内位置測位のように複雑なアルゴリズムを必要としないため、システムの導入が容易である。しかしながら、詳細な位置の測位には、多くのビーコンを設置する必要があるため、複数のビーコンのRSSIに有意な差がない場所(図2)が多くなる。この場所は、RSSI

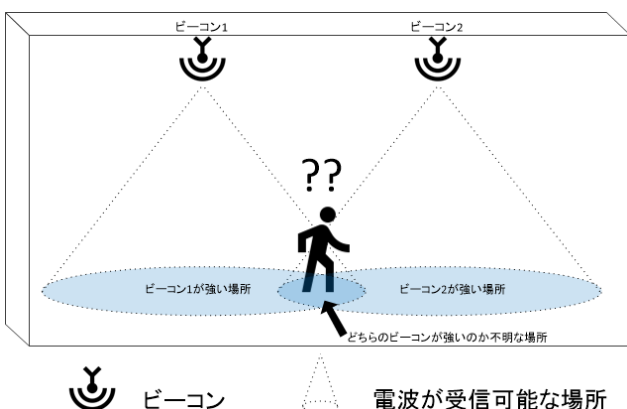


図2 ゆらぎが生じる場所

Figure 2 Environment in which the fluctuation occurs

のばらつきによってゆらぎが発生しやすく、測位精度が著しく低下してしまう。この課題に対し山田ら[10]は、複数のビーコンを束ねて1つのエリアとすることで、確度の高い屋内位置測位を実現している。しかしながら、この方法では設置したビーコンの数に対して、簡略な位置しか測位することができない課題がある。

## 3. 提案する屋内位置測位手法

### 3.1 提案手法の概要

本稿では、近接ビーコンを利用する屋内位置測位手法を提案する。提案手法は、一定期間に受信されたRSSIを用いて統計的検定を行うことで、近接ビーコンの判別を行い、リアルタイムな屋内位置測位を実現している。

### 3.2 近接ビーコン判別手法

提案する近接ビーコン判別手法は、一定期間に受信したRSSIの平均が最も強いビーコンおよび次点に強いビーコンを選択し、選択したビーコンのRSSIに対して平均値の検定を行う(図3)。平均値の検定は、幾つかのグループの「平均の差」が偶然的な誤差の範囲にあるかどうかを判断する統計的検定である。提案手法の場合、平均値の検定を行う事で、一定期間に受信したRSSIの平均が最も強いビーコンが、偶然的な誤差の範囲で最も強いと判別されていないかどうかを判断する事ができる。すなわち、RSSIが最も強いビーコンに有意差があると判断される場合に、近接

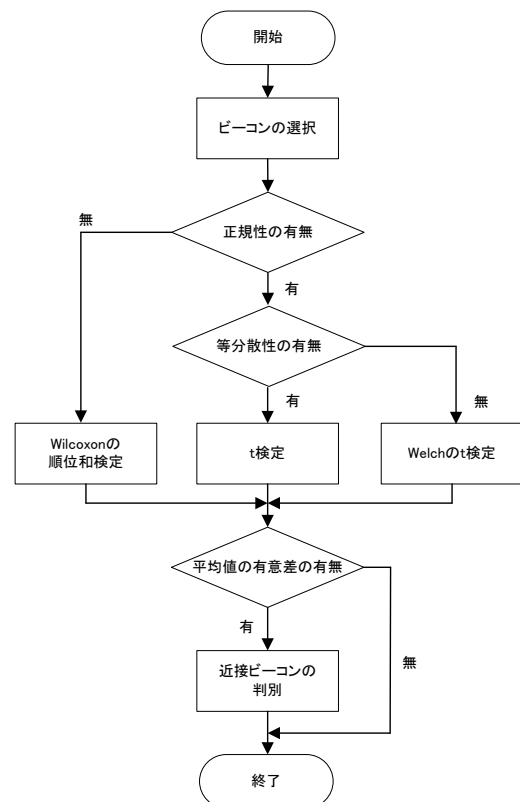


図3 近接ビーコン判別手法のフローチャート

Figure 3 Flow of the Nearest Beacon discrimination method

ビーコンと判別することで、RSSI のばらつきによるゆらぎを防止することができる。平均値の検定は、一般的に行われる「対応のない2群間の検定」を用い、以下の手順に従う。

#### (1) 正規性の検定

正規性の検定により、一定期間に受信された RSSI の正規性の有無を求める。検定は Shapiro-Wilk の W 検定を使用し、選択した2つのビーコンの RSSI に対して統計量を算出し、正規性を判断する。受信される RSSI の分布は、静止状態と移動状態で性質が異なり、移動状態では RSSI が常に変化するため正規性が出やすく、静止状態では RSSI が安定するため正規性が出にくくなる。正規性がある場合にはパラメトリック検定を、ない場合にはノンパラメトリック検定を行うが、一般的にノンパラメトリック検定よりもパラメトリック検定の方が検定結果の精度が良いとされている。

#### (2) 等分散性の検定

一定期間に受信された RSSI に正規性がある場合、ビーコン間の RSSI について、等分散性の有無を F 検定により求める。

#### (3) 平均値の検定

一定期間に受信された RSSI に正規性がない場合には、Wilcoxon の順位和検定を、正規性があり等分散性がある場合には t 検定を、正規性があり等分散性がない場合には Welch の t 検定を用いて、平均値の有意差を求める。各検定で使用する有意水準は、ゆらぎの防止率、リアルタイム性に影響を与える。

表 1 開発環境

Table 1 Environment of development

OS	Android4.3 以上 BLE 対応端末
ライブラリ	Blereceiver-v2.2.1.0
	Google-play-service-lib,Gson2.3
開発言語	Java7 系
開発環境	AndroidStudio1.3.2

表 2 BLE ビーコン「BLU250」の仕様

Table 2 Specifications of BLU250

項目	内容
対応 OS	Bluetooth Ver4.0 準拠
周波数	2402~2480MHz
拡散方式	周波数ホッピング
送信電力	4dBm
電源	DC3V コイン電池
消費電流	平均 30uA
外形寸法	40×40×12.5mm
質量	約 17g (電池含む)
電波送信間隔	100ms

### 3.3 屋内位置測位手法

提案する屋内位置測位は、一定間隔で近接ビーコンを判別する事で、リアルタイム性の高い屋内位置測位を実現する。しかし、近接ビーコンの判別を行う間隔（以後、判別間隔）が小さい場合、RSSI が十分に受信できず、近接ビーコンの判別で行う平均値の検定の精度が低くなる。すなわち、判別間隔はゆらぎの防止率、リアルタイム性に影響を与える。

## 4. 屋内位置測位システム

### 4.1 ソフトウェアの開発環境

提案する屋内位置測位手法は、屋内位置測位ライブラリとしてソフトウェア開発し、共同研究先企業への提供を行うことで、公共交通インフラ向けアプリへの導入を進めている。また、実証実験やデモンストレーション用にプロトタイプシステムを独自開発している。プロトタイプシステムは、Android 用歩行者ナビゲーションアプリとして開発を行った（表 1）。アプリは、屋内位置測位ライブラリを用いて近接ビーコンを判別し、近接ビーコンに紐づけられた座標を自位置とし、Google Map 上に表示する。

### 4.2 実験環境

屋内位置測位ライブラリにおける近接ビーコン判別手法およびフィルタリング手法について、岩手県立大学の構内で行った評価実験の結果を報告する。これらの実験では、表 2 に示す株式会社イーアールアイ製のビーコン「BLU250」を利用している。また、評価実験では Nexus9 (Android6 系) と XperiaZ3 TC (Android5 系) を測位端末として利用した。

表 3 検定の有意水準

Table 3 Significant level of test

検定の種類	有意水準
Shapiro-Wilk の W 検定	99.9%
F 検定	5%
t 検定	1% or 5%
Welch の t 検定	1% or 5%
Wilcoxon の順位和検定	1% or 5%

表 4 パラメータ設定

Table 4 Parameter setting

パラメータ設定	有意水準	判別間隔
設定 1	1%	300ms
設定 2	1%	500ms
設定 3	1%	1000ms
設定 4	5%	500ms

### 4.3 近接ビーコン判別手法の基本性能評価

近接ビーコン判別手法の基本性能として、判別間隔および有意水準を変化させた場合の、ゆらぎとリアルタイム性について評価を行う。判別間隔を評価するため、有意水準を1%に設定した状態で判別間隔を人間の歩行周期である500ms [11] を基準とし、300ms, 500ms, 1000ms と変化した3つの設定、有意水準を評価するため、判別間隔を500ms に設定した状態で有意水準を5%, 1%と変化した2つの設定について、それぞれの比較により評価する。評価実験で使用する各検定の有意水準を表3に、各パラメータ設定を表4に示す。

#### (1) ゆらぎの評価

直線通路に20m離してビーコンを2つ設置し、5m, 10m, 15m 地点において、静止状態で600秒間にゆらぎが発生した回数およびゆらぎを防止した回数を計測する。図4に各測位端末の、判別間隔ごとのゆらぎの回数およびゆらぎを防止した回数のグラフを示す。ビーコン間の中間地点である10m 地点でゆらぎが多く発生しているが、Nexus9 の500ms 設定では15m 地点でのみゆらぎが発生している。これは、2波モデルなどの影響により、RSSI が極端に強く、もしくは弱く受信される地点で計測をしてしまったためと考えられる。結果として、両端末に共通して300ms 設定ではゆらぎの発生回数が多く、500ms, 1000ms 設定ではゆらぎの発生回数が少ないことが分かる。また、300ms 設定と

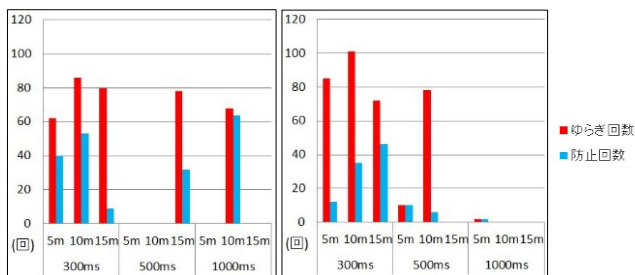


図4 判別間隔によるゆらぎの違い

(左 Nexus9 : 右 XperiaZ3 TC)

Figure 4 The difference of fluctuations by an interval of discrimination

(Left Nexus9 : Right XperiaZ3 TC)

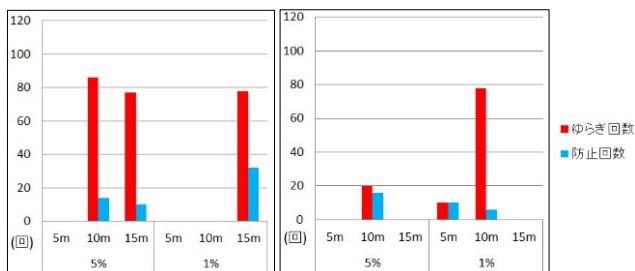


図5 有意水準によるゆらぎの違い

(左 Nexus9 : 右 XperiaZ3 TC)

Figure 5 The difference of fluctuations by a significant level

(Left Nexus9 : Right XperiaZ3 TC)

500ms 設定では4割程度のゆらぎを防止しているが、1000ms 設定では8割程度のゆらぎを防止している。図5は、有意水準ごとのゆらぎの回数およびゆらぎを防止した回数のグラフを示している。Nexus9 では5%設定よりも1%設定の方がゆらぎを防止しているが、XperiaZ3 TC では1%設定の10m 地点でゆらぎをほとんど防止できていない。これは、測位端末の差異というよりも、計測地点の微妙な差によるフェージングの影響が大きくなってしまったためであると考えられる。

#### (2) リアルタイム性についての評価

図6はリアルタイム性についての評価実験環境を示している。10m 間隔にビーコンを3つ設置し、左端のビーコン1から左に5m 移動した地点を開始地点、右端のビーコン3から右に5m 移動した地点を終了地点とし、秒速1.25m で計10 回歩行する。評価は、近接ビーコンが左端のビーコン1から中央のビーコン2に変化した位置をIN、中央のビーコン2から右端のビーコン3に変化した位置をOUTとして算出し、中央のビーコン2がリアルタイムに近接ビーコンと判別されるかどうかを検証する。

図7に各測位端末における、判別間隔ごとの各地点におけるIN とOUT の発生回数を度数分布のグラフで示す。300ms 設定では、ビーコン2の手前5m~3m 地点でビーコン2が近接ビーコンと判別されているが、500ms 設定では3m~1m 手前で、1000ms 設定ではビーコン2を1m~5m ほど

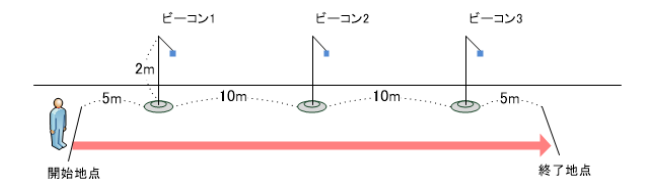


図6 リアルタイム性の実験環境

Figure 6 Experimental environment of real-time

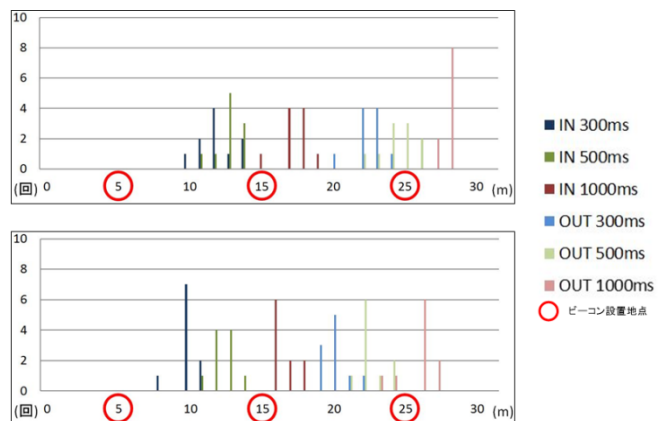


図7 判別間隔変更時の実験結果

(上 Nexus9 : 下 XperiaZ3 TC)

Figure 7 The experimental results of the time interval change of discrimination

(Top Nexus9 : Bottom XperiaZ3 TC)

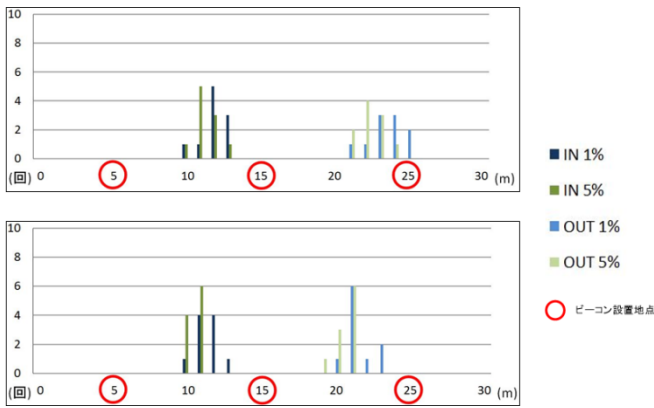


図 8 有意水準変更時の実験結果  
 (上 Nexus9 : 下 XperiaZ3 TC)

Figure 8 The experimental results at significance level change  
 (Top Nexus9 : Bottom XperiaZ3 TC)

ど通り過ぎてからビーコン 2 が近接ビーコンと判別された。図 8 に各測位端末の、有意水準ごとの各地点における IN と OUT の発生回数を度数分布のグラフで示す。1%設定と 5%設定で、IN と OUT の位置に大きな変化は見られなかったが、5%設定の方が早い地点でビーコンが切り替わっており、リアルタイム性が向上していることが分かる。

(3) 基本性能評価から得られた知見

近接ビーコン判別手法の基本性能評価として、ゆらぎとリアルタイム性に関する評価実験を行った。判別間隔を 1000ms に設定するとゆらぎの防止率が著しく向上したが、リアルタイム性は著しく低下した。300ms, 500ms 設定では、300ms 設定の方がリアルタイム性は高く、500ms 設定の方がゆらぎを防止しているが、大きな差は見られないため、判別間隔はその用途に必要とされるリアルタイム性に合わせて、300ms もしくは 500ms に設定する必要がある。また、有意水準については 1%設定と 5%設定の間で、ゆらぎとリアルタイム性に若干の違いは出るものの、判別間隔よりも影響は小さいため、ゆらぎの防止率が高い 1%設定が妥当である。

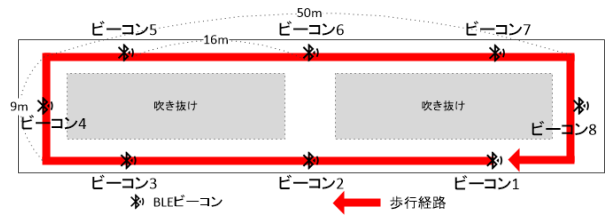


図 9 統合評価の実験環境

Figure 9 Experimental environment of integrated evaluation

表 5 正答率

Table 5 A percentage of correct answers

ビーコン番号	正答率 (%)
ビーコン 1	84
ビーコン 2	85
ビーコン 3	100
ビーコン 4	82
ビーコン 5	82
ビーコン 6	73
ビーコン 7	100
ビーコン 8	71

4.4 近接ビーコン判別手法の統合評価

統合評価では実際の歩行者ナビゲーションを想定し、岩手県立大学ソフトウェア情報学部 B 棟 3 階に、8 個のビーコンを設置し、矢印で示す歩行経路を秒速 1.25m で 10 回歩行する (図 9)。歩行者ナビゲーションを想定するため、リアルタイム性が必要となる事から、有意水準を 1%、判別間隔を 300ms に設定する。1 秒ごとに判別されている近接ビーコンを算出し、測位結果と実際の近接ビーコンの正答率を算出する。

実験結果を図 10 のグラフに示す。グラフは、XperiaZ TC で 1 秒ごとに判別されている近接ビーコンを、実際に歩行した経路上に色分けをした円で示している。円の大きさは 10 回計測したうち何回その地点で近接ビーコンと判別さ

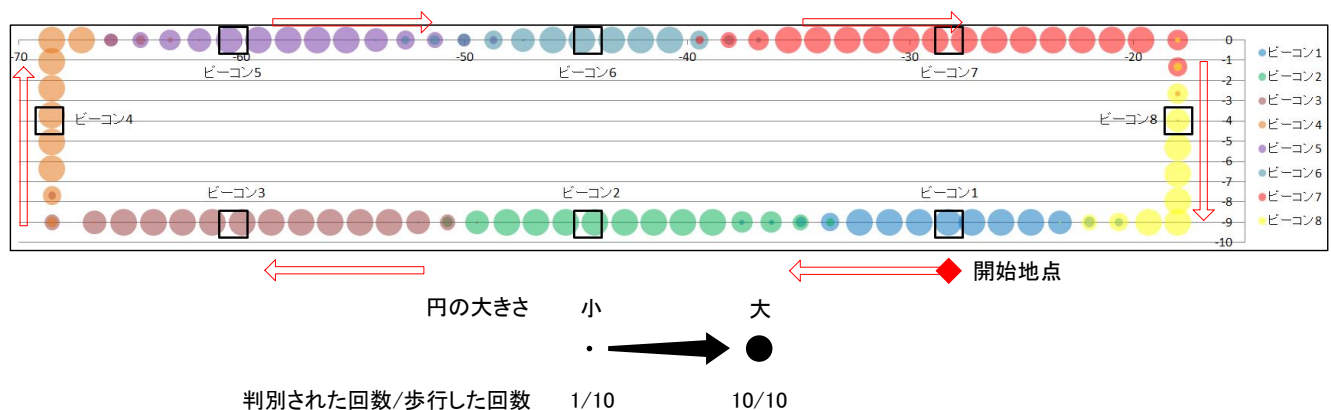


図 10 統合評価の実験結果

Figure 10 Experimental result of integrated evaluation

れたかを表しており、円が小さいほどその地点で判別された回数は少なくなる。グラフから、設置したビーコンの付近では正しく近接ビーコンが判別されており、複数のビーコンの中間付近では、判別される近接ビーコンが複数のビーコンで変化することが分かる。表5に、設置したビーコンごとの、近接ビーコン判別の正答率を示す。正答率は、本来近接ビーコンと判別される回数と、実際に近接ビーコンと判別された回数から算出した。表から、全てのビーコンにおいて7割以上の確率で正確な近接ビーコンの判別が行えている事が分かる。ビーコン8は正答率が最も低くなったが、実験環境ではちょうど曲がり角に障害物が存在しており、障害物の影響でビーコン8のRSSIが弱くなっていることが原因であると考えられる。

## 5. おわりに

本稿では、近接ビーコン判別手法を提案し、近接ビーコンを利用した屋内位置測位手法を構築した。提案手法では、近接ビーコンの判別に統計的検定を用いる事で、ゆらぎを防止した近接ビーコンの判別を可能とした。また、判別間隔や有意水準が、ゆらぎやリアルタイム性に与える影響について評価実験を基に考察を行った。

提案する屋内位置測位手法は、現在実務導入に向け各種パラメータの調整やカスタマイズを行っている。今後は、実務導入を想定したビーコンの配置方法および最適なパラメータ設定について、研究を進めていく予定である。

## 参考文献

- 1) 大野宇宙, 前川卓也: 電波強度変化を考慮した Wi-Fi 屋内位置推定モデルの低コストな構築手法, 研究報告ヒューマンインタラクション (HCI), 2013-HCI-155 (6), pp.1-7 (2013).
- 2) 佐藤智美, 小宮山哲, 下田雅彦, 劉渤江, 横田一生: Bluetooth の電波強度を用いた位置推定方式の検討, 技術報告 9, DEIM Forum (2011).
- 3) 株式会社 NTT ドコモ報道発表資料: 新たな屋内ナビゲーション技術を開発-スマートフォンの動きと地図情報を活用した屋内ナビゲーションを実現, [https://www.nttdocomo.co.jp/info/news\\_release/2015/02/19\\_00.html](https://www.nttdocomo.co.jp/info/news_release/2015/02/19_00.html), (2015/2 リリース).
- 4) 上坂大輔, 村松茂樹, 岩本健嗣, 横山浩之: 手に保持されたセンサを用いた歩行者向けデッドレコニング手法の提案, 情報処理学会誌, Vol.52, No.2, pp.558-570, (2011).
- 5) 石塚宏紀, 上坂大輔, 渡邊孝文, 黒川茂莉, 小野智弘: BLE シグナルと PDR によるハイブリッド屋内測位手法の基礎検討～Open Beacon Field Trial 参加における実験結果の共有～, 情報処理学会研究報告モバイルコンピューティングとユビキタス通信, 2014-MBL-71, pp.1-6 (2014).
- 6) 日本写真印刷株式会社 | ストアビーコン: O2O の切り札! iBeacon を使ったマーケティングソリューション「ストアビーコン」を提供, [http://www.nissha.com/products/information\\_com/solution/web/storebeacon.html](http://www.nissha.com/products/information_com/solution/web/storebeacon.html), (2015/10/29 参照).
- 7) JAR グループプレスリリース: IoT を活用した位置管理ソリューションの実証実験を羽田空港で開始, <http://press.jal.co.jp/ja/release/201510/003533.html>, (2015/10 リリース).
- 8) 堀川三好, 古舘達也, 工藤大希, 岡本東: BLE 位置測位および PDR を用いたハイブリッド型屋内位置測位手法の提案, 研究報告コンシューマ・デバイス&システム (CDS), 2015-CDS-14 (13),

pp1-7 (2015).

9) 古舘達也, 堀川三好, 菅原光政: 歩行者を対象とした屋内測位手法の提案, 情報処理学会第 77 回全国大会, 2W-02, pp. 3-313 - 3-314 (2015).

10) 山田直治, 磯田佳徳, 南正輝, 森川博之: プレゼンスシステム実現のための無線 LAN を用いた高精度な屋内エリア推定方式, 情報処理学会論文誌, Vol.50, No.8, pp.1845-1855, (2009).

11) Perry, J.: Gait Analysis: Normal and Pathological Function, SLACK Incorporated (1992).