

BLE 位置特定システムの位置特定性能評価

大村 恒介[†] 間邊 哲也[†]

[†] 埼玉大学 大学院理工学研究科 〒338-8570 埼玉県さいたま市桜区下大久保 255

E-mail: [†] {k_omura, manabe}@hslab.ees.saitama-u.ac.jp

あらまし 本稿では、スマートフォン位置特定サブシステムの性能や特徴の明確化のため、Bluetooth Low Energy (BLE)の位置特定性能の評価を行っている。疑似的に生成した Received Signal Strength (RSS)と実環境で取得した RSS を使用して、BLE を使用した位置特定システムの性能や特徴の評価を行い、確率論的手法と決定論的手法の位置特定アルゴリズムによって Non Line Of Sight (NLOS)の影響が位置特定性能への影響が異なることを示している。実験結果から特徴の異なる位置特定アルゴリズムの協調による位置特定性能改善手法の検討を行っている。以上のことから、位置特定アルゴリズムによる位置特定性能の性能や特徴の差を示す。

キーワード BLE 位置特定システム, Scene Analysis, Proximity

Positioning Performance Evaluation of BLE Positioning System

Kosuke OMURA[†] and Tetsuya MANABE[†]

[†] Graduate School of Science and Engineering, Saitama University 255 Shimo-Okubo, Sakura-ku, Saitama-shi,
Saitama, 338-8570 Japan

E-mail: [†] {k_omura, manabe}@hslab.ees.saitama-u.ac.jp

Abstract This paper evaluates smartphone positioning performance using Bluetooth Low Energy (BLE) to clarify the performance and features of smartphone positioning subsystems. Using the pseudo generated Received Signal Strength (RSS) and the RSS logged in the real environment, we evaluate performance and features of BLE positioning system. We use probabilistic and deterministic methods as positioning algorithms. Evaluation shows that the influence of Non Line Of Sight (NLOS) on the positioning performance differs depending on the positioning algorithm. In addition, from the experimental results, we investigate a method of improving positioning performance by cooperation of positioning algorithms with different characteristics. Based on the above, we show the difference in performance and characteristics of positioning performance by the positioning algorithm.

Keywords BLE Positioning System, Scene Analysis, Proximity

1. まえがき

スマートフォンの普及などによって位置に基づくサービス Location Based Services (LBS)が広まっている。LBS の質は位置特定性能によって大きく左右されるため、あらゆる場所での正確かつ高精度な位置特定が求められている。現在、スマートフォンにおいて Global Positioning System (GPS)と無線 LAN (WLAN)が主に位置特定に用いられている(例えば[1])。屋外では主に第一の位置特定社会基盤である GPS が用いられるが、オープンスカイでないと大きな誤差が発生することが知られている(例えば[3])。屋内では、主に第二の位置特定社会基盤である WLAN が用いられるが、スマートフォンが静止状態でも受信が安定せず位置特定性能が劣化する(例えば[4])。この問題に対応するためにデータ

ベース作成手法など位置特定の性能改善手法が様々提案されている(例えば[13]-[16])。

Bluetooth Low Energy (BLE)は GPS, WLAN に次ぐ第三の位置特定社会基盤になりつつあり、iBeacon など BLEを使用した位置特定システムが一部実運用され始めている(例えば[5])。BLE は出力が安定していると一般的に言われており(例えば[4])、BLE を位置特定に利用したシステムの利用や位置特定性能向上の手法の提案が多数行われている[6]-[9]。

あらゆる場所での正確かつ高精度な位置特定のためには位置特定サブシステム個々の性能の向上と、位置特定の用途によってスマートフォン位置特定サブシステムの使い分けや組み合わせが重要である(例えば[2])。そのためには種々の条件下における基本的な位置特定性能を評価することで各スマートフォン位置特

定サブシステムの性能や特徴を明確化し、スマートフォン位置特定サブシステムの体系化を行うことが必要になる。そこで、まだ十分に行われていない種々の条件下における BLE の基本的な位置特定性能の評価を行う。具体的には、疑似的に生成する Received Signal Strength (RSS) による基本位置特定性能評価、実環境で取得する RSS による基本位置特定性能評価そして、BLE を利用した位置特定アルゴリズムの違いによる性能比較を行う。

2. BLE とそれを使用した位置特定システム

BLE は Bluetooth の新しい低消費電力の規格である [10]。BLE にはデータ通信を行わない 3 つのアドバタイズチャンネルがあり、アドバタイズでは Universally Unique Identifier (UUID) などからなる基本情報のみを短時間で送信する。BLE を利用した位置特定では UUID などからなる識別情報と RSS が用いられる。

2.1. 位置特定アルゴリズム

BLE を利用した位置特定手法は大きく決定論的手法と確率論的手法に分けることができる [11]。

2.1.1. 決定論的手法

決定論的手法の代表的なものの 1 つとして Proximity がある。Proximity では端末がどの基地局から最も強い RSS を受けているかを監視することで端末の位置を決定する。図 1 において、端末が最も強い RSS を基地局 A から観測した場合、基地局 A がカバーする範囲を端末の位置とし、端末の位置として、基地局 A の位置を代表させる。

2.1.2. 確率論的手法

確率論的手法の代表的なものの 1 つとして Histogram を使用した手法がある。Histogram を使用した手法の 1 つである Scene Analysis (例えば [12]) では、位置特定を行う領域中の各地点における各基地局からの識別情報と RSS の組をデータベースとして保持する。このデータベースと位置特定時の測定結果を使用

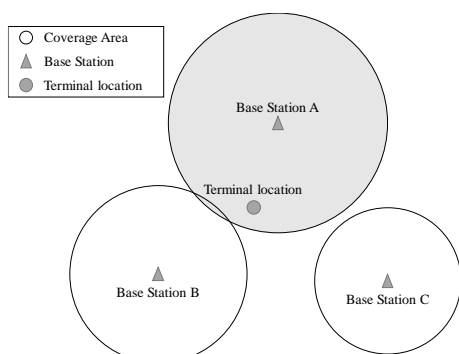


図 1 Proximity 概念図

して各地点での事後確率を求め、図 2 のように事後確率が最大の地点を端末の位置とする。一般的には確率論的手法は決定論的手法より位置特定性能が良いとされる (例えば [13][14])。

2.2. 関連研究

WLAN による位置特定は前述のように第二位置特定社会基盤になっている。WLAN を使用した位置特定システムは近隣の発信機の信号を使用して測量やパターン整合を行うといった点で BLE を使用した位置特定システムと同様である。

WLAN を使用した位置特定システムの研究として、WLAN アクセスポイントの選択を使用した位置特定性能の改善 (例えば [13])、WLAN アクセスポイントの設置法などによる位置特定性能の比較 [2][14]-[16]、空間フィルタリングなどを含むカーネルベースの位置特定アルゴリズムの提案 [17] などが行われている。

クラシック Bluetooth を使用した位置特定システムの研究として、WLAN との協調型位置特定 [18][19] が提案されている。

BLE 位置特定システムの研究として、BLE 発信機の出力の影響 [7]、BLE 発信機の設置数の影響 [8]、RSS へのフィルタリングの影響 [4][9]、BLE の発信機数と配置などによる位置特定性能への影響 [4] が示されている。そこで、スマートフォン位置特定サブシステムを体系化する上で必要な種々の条件下における BLE 位置特定システムの性能の評価をより詳細に行う。

2.3. 本稿の構成

本稿は次のように構成される。3. では疑似的に RSS を生成して位置特定システムの基本性能を示す。4. では、3. と同様の発信機の配置を実環境に構築し、実際に取得した RSS を使用して位置特定システムの基本性能を示す。5. では、3. と 4. で示された結果をもとに、決定論的手法と確率論的手法の協調型位置特定アルゴリズムの検討を示す。最後に 6. では本稿のまとめと今後の課題を示す。

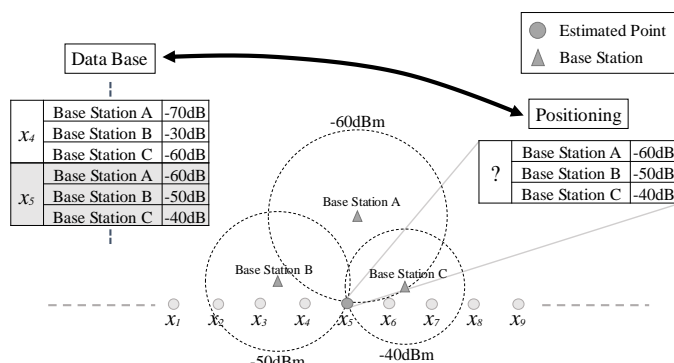


図 2 Scene Analysis 概念図

3. 疑似的に生成した RSS を使用した位置特定システムの性能評価

本節では疑似的に生成した RSS を使用して位置特定システムの性能を評価する。

3.1. 想定した環境

疑似的に RSS を生成するにあたって、図 3 のような屋内環境に 1.25m 間隔で高さ 3m の天井に発信機を設置し、0.1m おきにデータベース用と位置特定用の測定点を設置し、高さ 1.5m で測定を行う。

発信機の設置間隔による位置特定性能の環境も評価するため、位置特定に使用する発信機を選択する。本稿では代表として 2.5m 間隔の場合の結果を示す。

RSS データセットの生成は、データベース用と位置特定用に各地点で 1000 回行った。位置特定は 1 回の測定ごとに行う。

疑似的な RSS は、勧告 ITU-R P.1238-9 屋内伝搬モデル[20]を使用して以下に示す式(3.2)より発信機と測定点の間の距離から疑似的に生成した。

$$Loss = 20\log_{10} f + N\log_{10} d + L_f(n) + C \quad (3.1)$$

$$RSS = P_T - Loss \quad (3.2)$$

上式の各パラメータの説明を表 1 に示す。また、式(3.2)をグラフ化したものを図 4 に示す。

本稿では位置特定アルゴリズムは決定論的手法では Proximity, 確率論的手法では Histogram の 1 つである Scene Analysis を使用する。

位置特定性能の指標として使用する位置特定誤差の平均 \bar{e}_p と標準偏差 σ_p の計算では端点の影響を考慮して距離 10m から 20m の中央 10m での位置特定結果の

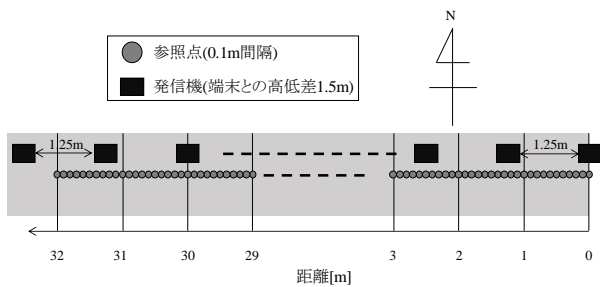


図 3 想定環境

表 1 勧告 ITU-R P.1238-9 屋内伝搬モデル変数

	パラメータ概要	数値
f	周波数[MHz]	2400
N	送受信点間距離に対する減衰係数	30
d	送受信点間距離[m] ($d > 1m$)	
L_f	床の透過損失	11
n	伝搬路内の床の数	0
C	定数 (-28dB)	-28
P_T	送信電力[dBm]	0

み使用する。

以上の環境を使用して、3.2.では ITU-R 伝搬損失の値を平均値とした正規分布を仮定しパラメータとして標準偏差 σ_{RSS} を与えた場合の位置特定性能の評価を行い、3.3.では NLOS(Non Line Of Sight)による減衰を考慮して、NLOS による減衰の大きさをパラメータとした場合の位置特定性能の評価を行う。

3.2. RSS 標準偏差を考慮した RSS を使用した位置特定性能評価

ITU-R 伝搬損失の値を平均値とした正規分布を仮定し、パラメータとして σ_{RSS} を与え、疑似的に RSS を生成し位置特定性能評価を行う。 σ_{RSS} を変化させ、 σ_{RSS} の大きさと位置特定性能の関係を評価する。 Proximity と Histogram を比較した結果を図 5 に示す。ここで、 \bar{e}_p はすべて 0 付近となったため、図 5 において σ_p のみ示した。 σ_{RSS} を大きくすると、 σ_p は Proximity と Histogram は同様に劣化した。全ての σ_{RSS} において確率論的手法(Histogram)の性能が良いことを確認した。

3.3. NLOS を考慮した RSS を使用した位置特定性能評価

文献[16]では実環境で NLOS を考慮したデータベースを作成することで位置特定性能が向上することが示されている。そこで 3.3.1.で疑似的に生成した RSS において NLOS を考慮したデータベースの効果を評価し、3.3.2.において、NLOS による減衰の大きさと Histogram と Proximity の位置特定性能の関係を評価する。

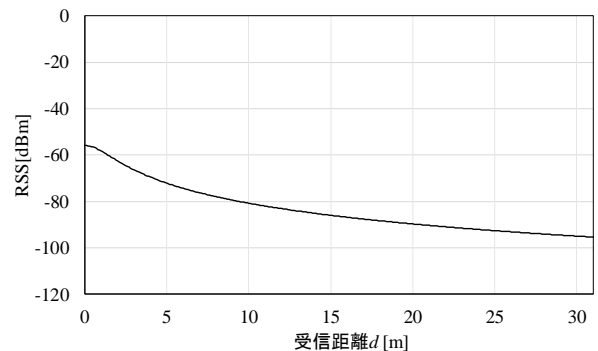


図 4 ITU-R RSS 距離特性

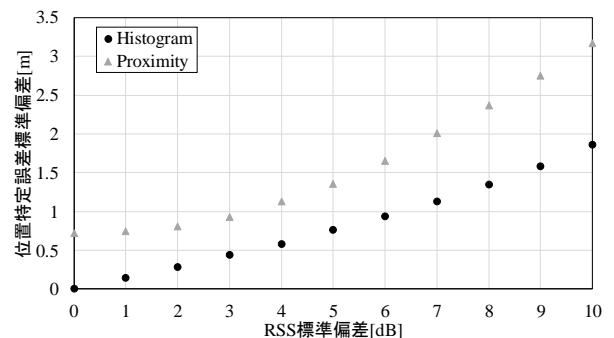


図 5 σ_{RSS} と位置特定誤差標準偏差の関係

3.3.1. データベース作成における NLOS の考慮の有無による位置特定性能の比較

NLOS を考慮したデータベースと未考慮のデータベースをそれぞれ作成し、NLOS を考慮した位置特定用データを使用して Histogram で評価を行う。NLOS を考慮したデータセットは NLOS 時と LOS 時を 500 データずつで構成し、NLOS 未考慮のデータセットは LOS 時のみの 1000 データで構成する。ここで、 σ_{RSS} は 3dB に固定した。使用したデータベースによる位置特定性能の差を図 6 に示す。ここで、棒グラフは \bar{e}_p を表し、エラーバーは σ_p を表す。また、DB-E は図 3 で東向きのみでデータを取得した NLOS 未考慮のデータベースを表し、DB-EW は東西それぞれの向きでデータを取得した NLOS を考慮したデータベースを表す。結果より NLOS を考慮したデータベースを作成することで位置特定性能が向上することが確認できた。

また、実環境で行われた文献[16]と同様の結果を示した。この結果より NLOS による減衰に対応するには、NLOS を考慮した測定を複合させたデータベースまたは、他の手法により事前にユーザの向きを取得し、向いている方向によってデータベースを切り替える方法が必要となることを示している。

3.3.2. NLOS による減衰の大きさの位置特定性能への影響

前節で NLOS を考慮したデータベースを作成することで位置特定性能が向上することを確認した。そこで

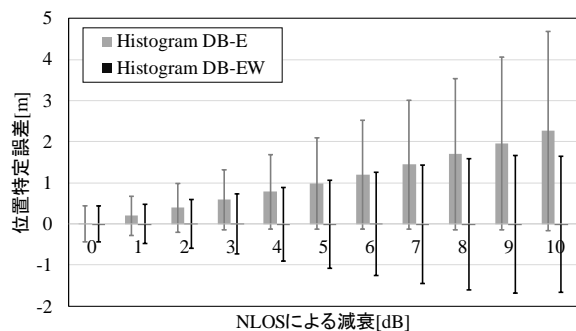


図 6 各データベースを用いた場合の NLOS の大きさと位置特定の関係

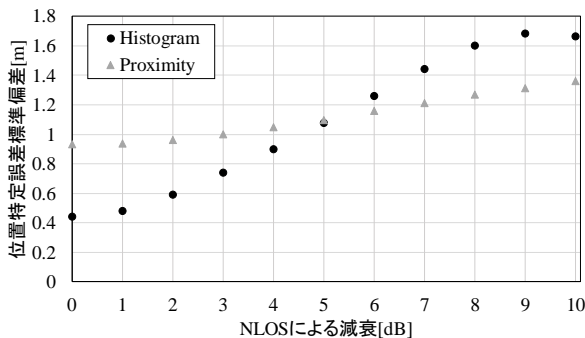


図 7 NLOS による減衰の大きさと位置特定誤差標準偏差の関係

本節では NLOS による減衰の大きさと位置特定性能の関係を評価する。データベース用と位置特定用にそれぞれ、NLOS 時と LOS 時それぞれ 500 回ずつ RSS のデータを生成し評価を行った。このとき、 σ_{RSS} は 3dB に固定した。このときの発信機設置間隔 2.5m の場合の Histogram と Proximity の位置特定結果を図 7 に示す。ここで、 \bar{e}_p はすべて 0 付近となったため σ_p のみ示す。

NLOS による減衰の大きさを大きくすると位置特定性能は Histogram と Proximity とともに劣化したが、Proximity の性能と Histogram の性能が途中で入れ替わり、NLOS による減衰が 5dB より小さい時は Histogram の性能が良いのに対して、NLOS による減衰が 5dB より大きいときは Proximity の性能が良い。この結果より NLOS による減衰は Proximity には影響は小さいが、Histogram には影響が大きく、NLOS の大きさによっては位置特定アルゴリズムを切り替える必要があることを示している。

4. 実環境で取得した RSS を使用した位置特定システムの性能評価

3.では疑似的に生成した RSS を使用して位置特定システムの評価を行った。本節では 3.と同様の環境を実環境に構築し、RSS を実際に取得し位置特定システムの評価を行う。

4.1. 実験概要

図 8 は本実験の発信機の配置を示しており、3.と同様である。埼玉大学工学部電気電子システム工学科棟 4 階の廊下を使用し、データベース用と位置特定用の測定点を 1m 間隔とした。BLE の発信機として Aplix MyBeacon 汎用型 MB004 シリーズを使用し、測定には表 2 の端末を使用した。位置特定には 3.と同様に Histogram と Proximity を用い、評価指標も同様に \bar{e}_p と σ_p を使用する。

測定は東西それぞれの向きで各点 1 分間の測定を 2 度行い、1 回目のデータセットを使用してデータベ

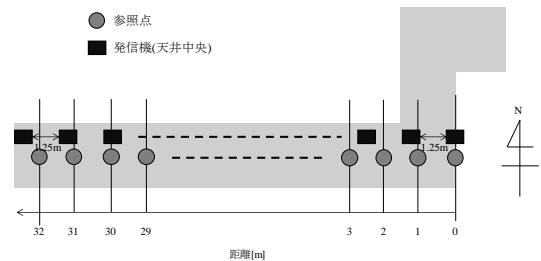


図 8 実験環境

表 2 実験使用端末

メーカー	モデル	数量
ASUS	ZenFone Selfie (ZD551KL-WH16)	2
LG	Nexus 5	2
Alcatel	One Touch Idol 3	2
Freteel	Prior 3S	2

スを作成し、2 回目のデータセットを使用して 1 秒間に取得したデータを使用した位置特定を各点で 60 回行った。

発信機設置間隔と位置特定性能の関係の評価のため位置特定に使用する発信機を選択した。このとき発信機は表 3 のように出来るだけ両端に設置し、等間隔になるよう選択した。

4.2. 実環境と疑似環境の結果の比較

本節では発信機設置間隔 5m の場合の、3. の疑似的に生成した RSS と実環境で取得した RSS による各測定点の位置特定誤差の比較を行う。ここで、疑似的に生成した RSS は σ_{RSS} を 3dB, NLOS による減衰の大きさを 6dB とした。

Histogram の結果を図 9, Proximity の結果を図 10 に示す。 \bar{e}_p と σ_p の傾向が疑似環境と実環境で一致していることが図から読み取れる。しかし、類似はしているが、完全に一致はしておらず他の位置特定性能を劣化させる要因があると考えられ、今後の課題とする。

4.3. 発信機設置間隔による位置特定性能の評価

本節では実環境において発信機設置間隔と位置特定性能の関係の評価する。Histogram と Proximity における位置特定結果を図 11 に示す。ここで、 \bar{e}_p は全て 0

表 3 各発信機設置間隔における発信機設置箇所

		発信機設置位置[m]																													
		0	1.25	2.5	3.75	5	6.25	7.5	8.75	10	11.25	12.5	13.75	15	16.25	17.5	18.75	20	21.25	22.5	23.75	25	26.25	27.5	28.75	30	31.25				
発信機設置間隔 [m]	1.25	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	2.5	○																													
	3.75	○																													
	5	○																													
	6.25	○																													
	7.5	○																													
	8.75	○																													
	10	○																													
15	○																														
30	○																														

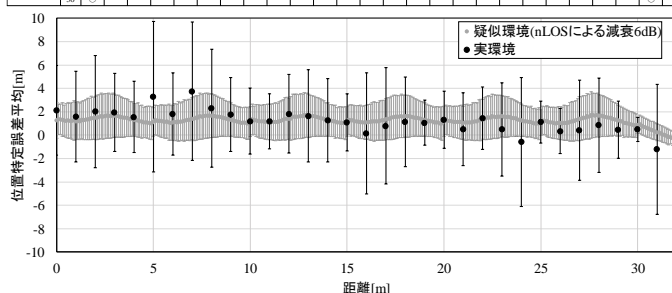


図 9 Histogram による疑似環境と実環境での各参照点での位置特定誤差の比較

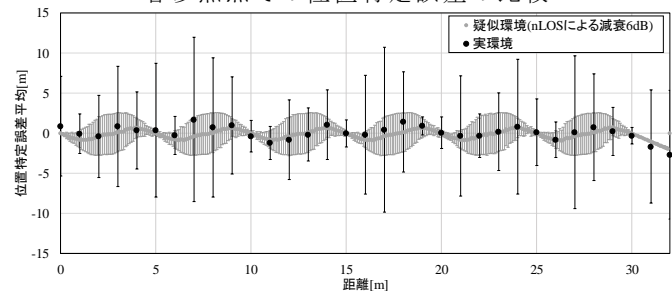


図 10 Proximity による疑似環境と実環境での各参照点での位置特定誤差の比較

付近となったため、 σ_p のみ示す。

発信機設置間隔が狭い場合 Proximity の σ_p が小さく、発信機設置間隔が広い場合は Histogram の σ_p が小さくなった。これは 3.3.2. の結果から説明でき、NLOS による減衰の影響で発信機設置間隔が狭い場合は Proximity の σ_p が小さくなると考えられる。一方で発信機設置間隔を広くすると、NLOS による減衰の影響を考慮しても Histogram の性能が良い。

5. Histogram と Proximity を組み合わせた位置特定性能改善手法の検討

これまで、疑似的に生成した RSS 及び実環境で取得した RSS による評価より Histogram と Proximity の比較を行った。これらの比較評価より発信機設置間隔によって位置特定性能が良いアルゴリズムが異なることがわかっている。よってアルゴリズムを組み合わせることで種々の発信機設置間隔に対応した位置特定性能向上が見込める。

Histogram と Proximity の協調アルゴリズムはまず、データベース用のデータを使用して Histogram 用データベースと協調アルゴリズム用データベースを作成する。協調アルゴリズム用データベースとして各地点での Proximity による各発信機の選択回数を正規化したものを格納する。位置特定時は最初に Proximity による位置特定を行い、協調アルゴリズム用データベースを参照し、Proximity による発信機を選択割合が一定以上の点のみを候補点として Histogram を使用して最終的な位置特定結果を出力する。

前述の協調アルゴリズムを使用して、4. の実環境で取得したデータを使用して位置特定性能の評価を行う。このときの Histogram 単独、Proximity 単独および協調アルゴリズムの発信機設置間隔と位置特定性能の関係を図 12 に示す。ここで、 \bar{e}_p は全て 0 付近になったため σ_p のみ示す。この結果より、協調アルゴリズムが発信機設置間隔によって Histogram と Proximity のそれぞれの利点が生かされる結果を示し、性能および特徴の異なるアルゴリズムを組み合わせることで協調させることによって、位置特定性能が向上することを確認した。

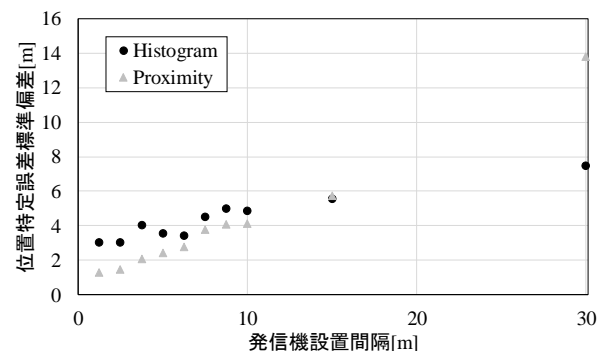


図 11 発信機設置間隔と位置特定誤差標準偏差の関係

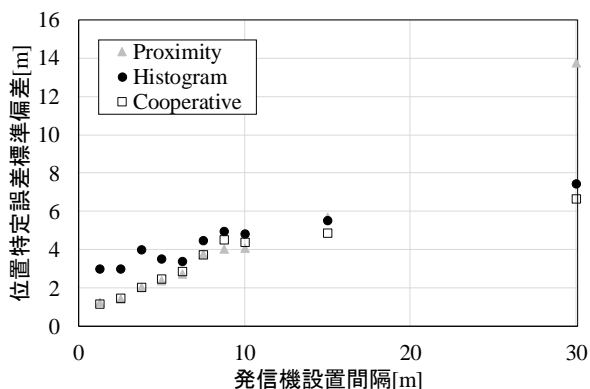


図 12 発信機設置間隔と位置特定誤差標準偏差の関係

6. むすび

本稿では、スマートフォン位置特定サブシステムの性能や特徴の明確化のため、BLE の基本位置特定性能の評価を行った。疑似的に生成した RSS と実環境で取得した RSS を使用して BLE を使用した位置特定システムの基本的な性能や特徴を評価した。

疑似的に生成した RSS を使用して NLOS による減衰が確率論的手法の Histogram と決定論的手法の Proximity に与える影響を評価し、NLOS による減衰は Proximity には影響が小さく、Histogram には影響が大きいことを示した。実環境でも同様の実験を行い、発信機設置間隔が狭い場合は Proximity の性能が良く、発信機設置間隔が広い場合は Histogram の性能が良いことを示した。これらから位置特定アルゴリズムによる基本的な位置特定性能の差を示した。

今後の課題として、実環境において位置特定性能劣化させる原因の更なる評価や 2 次元や 3 次元の環境への拡大が挙げられる。

文 献

- [1] 長谷川孝明, 間邊哲也, 細江克治, 水野一男, “位置特定社会基盤のシステム創成論的考察 : GPS/Wi-Fi/携帯電話基地局によるスマートフォン位置特定とアプリケーション,” 信学技報, ITS2013-76, pp.69-78, Mar 2014.
- [2] 間邊哲也, 長谷川孝明, 永長知孝, 相原弘一, “位置特定社会基盤のシステム創成学論的考察 ~ Wi-Fi によるスマートフォンの位置特定性能 ~,” 信学技報, ITS2014-7, pp.41-46, June 2014.
- [3] 児島伴幸, 戸川望, 柳澤政生, 大附辰夫, “歩行者の現在地認識に基づく道路標識とランドマークを用いた位置特定システムの改良とシミュレーション評価,” 信学技報, ITS2009-64, pp. 153-158, Feb 2010.
- [4] Ramsey Faragher, Robert Harle, “Location Fingerprinting With Bluetooth Low Energy Beacons,” IEEE Journal on selected areas in communication, VOL.33, NO.11, Nov. 2015.
- [5] 上原昭宏, “iBeacon ハンドブック,” 達人出版会, July 2014.
- [6] 伊藤篤, 平松裕子, 上田一貴, 羽多野裕之, 佐藤

美恵, “BLE ビーコンを利用した旅行案内アプリにおける気付きの評価,” 日本認知科学会第 33 回大会, OS10-2, pp.257-266, Sept. 2016.

- [7] 津野喬文, 岩井将行, “BLE タグの送信出力変更による屋内位置推定の精度調査,” 電子情報通信学会総合大会講演論文集, 2015 年_通信(2), 597, Feb. 2015.
- [8] 山口修平, 荒井大輔, 大岸智彦, “BLE タグを用いた屋内位置測位における設置タグ数の影響評価,” 信学技報, IN2014-146, pp.151-156, Mar. 2015.
- [9] 山口修平, 荒井大輔, 大岸智彦, “BLE タグを用いた屋内位置測位における周波数識別効果の評価,” 信学技報, ASN2015-69, pp.103-108, Nov. 2015.
- [10] Kevin Townsend, Carles Cufi, Akiba, Robert Davidson, “Bluetooth Low Energy をはじめよう,” オライリー・ジャパン, June 2016.
- [11] Mikkel Baun Kjærgaard, Jeffrey Hightower, Bernt Schiele, Thomas Strang, “A Taxonomy for Radio Location Fingerprinting,” Location and Context Awareness, Springer, Berlin Heidelberg, pp.139-156, Sept. 2007.
- [12] S. Ito, N. Kawaguchi, “Bayesian based location estimation system using wireless LAN,” Third IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops, pp.273-278, Mar. 2015.
- [13] 伊藤誠吾, 河口信夫, “アクセスポイントの選択を考慮したベイズ推定による無線 LAN ハイブリット位置推定手法とその応用,” 電学論 C, vol.126, no.10, pp.1212-1220, Jan. 2006.
- [14] Binghao Li, James Salter, Andrew G. Dempster, Chris Rizos, “Indoor Positioning Techniques Based on Wireless LAN,” IEEE International Conference on Wireless Broadband and Ultra Wideband Communications, Sydney, Australia, Mar. 2008.
- [15] 野田真吾, 間邊哲也, 長谷川孝明, 渡部晴夫, 木村寛治, 原田良一, 星悠太郎, “屋内外無線 LAN 位置特定における専用アクセスポイントの設置効果について,” 信学技報, ITS2012-59, pp.7-12, Mar. 2013.
- [16] 野田真吾, 間邊哲也, 長谷川孝明, “屋内廊下における無線 LAN による位置推定に関する一検討,” 信学技報, ITS2012-41, pp.239-244, Feb. 2013.
- [17] Azadeh Kushki, Konstantinos N. Plataniotis, Anastasios N. Venetsanopoulos, “Kernel-Based Positioning in Wireless Local Area Networks,” IEEE Transactions on Mobile Computing, Vol.6, Issue: 6, June 2007.
- [18] 田村侑介, 永長知孝, “Bluetooth を用いた無線 LAN ポジショニングシステムの性能改善に関する検討,” 信学技報, ITS2010-71, pp.23-28, Mar. 2011.
- [19] 東譽之, 永長知孝, “無線 LAN と Bluetooth を用いた屋内ポジショニングシステムの性能評価,” 信学技報, ITS2013-21, pp.25-30, Nov. 2013.
- [20] Recommendation ITU-R P.1238-9, “Propagation data and prediction methods for the planning of indoor radio communication systems and radio local area networks in the frequency range 900 MHz to 100 GHz,” Ver.06/2017, June 2017.