

BLE ビーコンの設置個数と配置方法が屋内測位精度に及ぼす影響について

山岸 茉梨夏

1. はじめに

近年、地図や天気予報をはじめとして、ポイント配布[1]やゲーム[2]といった位置情報を活用した多様なサービスが提供されるようになった。これらの多くは位置情報の取得にGPSを用いている。GPSの仕組みは4機以上の人工衛星から電波の送信時間と受信時間の差で位置を測位するというものである。しかし、GPSは受信機と人工衛星の間を遮られなければ機能するが、ビルの間、山間部、建物内などの環境下では精度が低下したり、GPSそのものが使えなくなることもある。この問題を解決するために2018年11月に準天頂衛星システムみちびき[3]が運用を開始した。対応した機種であればビルの間や山間部などのこれまでGPSがカバーできなかった場所でも高精度の測位を実現することができる。ただし、みちびきからの電波が直接届かなければならないという制約があるため建物内では位置を測位できないという問題が残る。

屋内測位は店内での顧客の動線を記録し分析することにも利用され、その結果が商品の陳列改善やユーザのニーズ把握などのマーケティングにも役立つため、注目が集まっている。このため、GPSよりも精度の高い屋内測位技術として、Wi-Fiのアクセスポイント、歩行者自律航法、BLEビーコンを用いる手法が研究されている[4][5][6]。これらの手法の中でBLEビーコンを用いるものは配置場所の制限が少なく、ランニングコストも低いいため、他の手法より導入、運用が容易である。しかし、位置測位精度とコストはトレードオフの関係にあり、そのバランスを考える必要がある。残念ながら、利用場面や環境に応じた適切な設置個数や配置方法は現時点では明らかになっていない。

そこで本研究ではBLEビーコンの設置個数と配置方法が精度に影響を与える要因と実環境に適した設置個数と配置方法を明らかにすることを旨とする。

2. 屋内測位技術の現状

2.1 屋内測位技術の概要

GPSが苦手とする屋内測位では、Wi-Fiのアクセスポイント、歩行者自律航法、BLEビーコンなどの手法が使われている[7]。

Wi-Fiのアクセスポイントを利用する手法は電波の到達時間や強度によって三点測位を行う。アクセスポイントはすでに数多く配置されており、比較的導入しやすい点がメリットとして挙げられる。しかし、アクセスポイントはネットワークサービス提供用の機器であるため、いずれかの機器1台の電波で屋内をカバーするように配置されている。結果として、屋内測位に必要な3台のアクセ

ポイントの電波を受信できないエリアが数多く存在することになる。この問題を解決するためにアクセスポイントを増設しようとするとならば新たな工事費用、電力の供給方法の問題などに直面することになる。

歩行者自律航法はスマートフォンに搭載された加速度センサ、ジャイロセンサ、磁気センサなどを用いてスタート地点から相対的に移動した距離を測位する手法である。センサを用いて測位するため電波環境に依存しないというメリットがあるが、スタート地点が正確である必要がある。さらにスマートフォンに搭載されているセンサは自動車やロボットに搭載されているものに比べて簡易的であり、精度が高くないということも欠点として挙げられる。そのため、この手法は他の手法と組み合わせて補正機能として使用されることが多い。

BLEビーコンを利用する手法はBluetooth low Energyという省電力のBluetooth通信方式を活用し、電波強度によって三点測位をしている。Bluetoothの電波は近距離通信のための規格であるため最大でも10m程度の間隔で配置しなければならないため、必要数が多くなる。しかし、BLEビーコンそのものは1つ1000~3000円ほどで安価である[7]。また、BLEビーコンはボタン電池で動作し、配置場所の制限がほぼないのも利点の一つである。そこで、屋内測位技術の中で導入の容易さとコストのバランスが他の手法より優れたBLEビーコンに本研究では着目する。

2.2 BLE ビーコンを用いた測位方法と課題

BLEビーコンを用いた測位は、各地点に配置されたBLEビーコンから発せられた電波強度が受信時にどのくらい減衰したかで推定する[7]。この方法は1つのBLEビーコンがカバーする範囲が広すぎると、推測された各ビーコンからの推定距離を半径とした円が交わる面積が広くなり誤差が大きくなる可能性がある。理論的には個数を増やせば円が交わる面積が小さくなり精度は向上するが、コストの制約という問題を解決する必要がある。さらに電波の減衰は壁、床などからの反射、障害物の有無、他の電波の干渉などの影響を受けることも考慮する必要がある。

しかし、配置場所ごとに適した設置個数、配置方法に着目した研究は筆者が知る限りいまだ存在しない。そこで本研究ではBLEビーコンの設置個数が屋内測位精度に与える影響と精度・コストの両方を考慮した設置個数、配置方法を明らかにすることを目的とする。

3. 精度に影響を与える要因の分析

本研究の測定はサンワサプライ株式会社のBLEビーコンMM-BLEBC1によって行った。Bluetoothの規格は

4.0である。受信機はLenovoのノートパソコンideapad310を使用し、受信データをcsv形式で記録するアプリケーションをC#にて自作した[8]。

3.1 測定手順

BLEビーコンと受信機間の距離測定の精度に影響を与える要因を明確にするために表 1にある条件を設定した。まず、測定場所の選定理由について述べる。先に説明したように電波は壁などに反射する性質を持っているため、BLEビーコンが壁の近くにある場合と、周囲が開けている場合で、位置測位精度に差が生じる可能性がある。このような反射の影響を明らかにするために、両側から壁が迫った狭い空間である廊下と、反射の影響が少ない体育館中央部での比較測定をする。

次に電波強度を比較項目に挙げた理由を述べる。電波には強い電波ほど遠くまで届くという性質がある。受信機までの実際の距離が長くなっても誤差が少なければ設置個数を抑えることができ、コストの削減につながる。そこで電波強度が誤差に及ぼす影響を明らかにするために、ビーコンの電波強度を初期設定の0dbmと最大の4dbmに設定した場合を比較する。受信機までの距離については4dbm設定時の通信距離が約10mという仕様であるため、これを基準に仕様よりも大きな距離として15m、仕様以下の距離として10m、5m、3m、1mの5段階の測定条件を用意した。

最後に設置個数を単独と複数にした理由を述べる。同じ周波数の電波は干渉し、電波強度が変動するという性質を持つ。そこで、他の電波が干渉しないように単独で配置した場合と、他のビーコンからの電波が干渉しやすいように近接して複数配置した場合を比較し、電波強度への影響を明らかにするために比較項目に加えた。なお、複数配置は3個のビーコンを密着させ、横に並べて配置するものとする。

表 1 測定条件

比較項目	設定および環境				
測定場所	廊下	体育館			
電波強度 (dbm)	0	4			
受信機までの距離 (m)	1	3	5	10	15
設置個数	単独	複数			

測定では表 1の各種条件の組み合わせによってBLEビーコンと受信機を配置し電波を100秒間受信する。1秒間に複数回の電波を受信した場合は平均した値を1秒間のデータとする。推定距離は受信した電波強度から以下の式によって算出する[7]。

$$\text{推定距離} = 10^{\frac{(1\text{m地点の電波強度}-\text{受信した電波の強度})}{20}}$$

3.2 受信機までの距離と誤差の関係

電波は距離の2乗に比例して減衰するという性質がある[9]。さらに、受信機までの実際の距離が長くなると電波のゆらぎが大きくなる傾向もある[10]。電波のゆらぎの増大は位置測位のばらつきに直結し、測位精度にも影響を及ぼすと考えられる。そこで、受信機までの実際の距離と、推定距離の誤差の関係性を明らかにするために、各種条件下で距離を変化させた場合の測位を実施した。測定で推定した平均誤差、平均推定距離、

推定距離の標準偏差をまとめたものを表 2に示す。

表 2 受信機までの実際の距離と平均誤差の関係

電波強度	測定場所	比較項目	受信機までの距離				
			15m	10m	5m	3m	1m
0dbm	廊下	平均誤差 (m)	-5.74	2.06	0.66	0.79	0.45
		平均推定距離 (m)	9.26	12.06	5.66	3.79	1.45
		標準偏差	2.51	3.66	2.18	1.07	0.30
	体育館	平均誤差 (m)	-10.68	-5.32	0.62	1.19	0.92
		平均推定距離 (m)	4.32	4.68	5.62	4.19	1.92
		標準偏差	1.95	2.53	2.61	2.03	0.82
4dbm	廊下	平均誤差 (m)	-4.91	4.92	1.47	2.19	1.57
		平均推定距離 (m)	10.09	14.92	6.47	5.19	2.57
		標準偏差	2.12	4.09	2.63	2.44	2.11
	体育館	平均誤差 (m)	-11.82	-0.60	-0.13	1.79	0.32
		平均推定距離 (m)	3.18	9.40	4.87	4.79	1.32
		標準偏差	2.61	4.49	2.92	2.68	0.75

平均誤差に注目すると大まかな傾向として実際の距離が長くなると平均誤差の絶対値も大きくなるのがわかる。また、15m離れた測定の平均推定距離はすべて実際の距離より近く推定されている。受信機まで10m以上離して配置することは接近度の推定や位置測位の精度を低くする原因となりうる事がわかった。

一方、実際の距離が長くなると標準偏差が大きくなるという傾向が、1mから10mにかけてのほぼすべての測定でみられる。この結果から冒頭の実際の距離が長くなると電波強度のゆらぎが大きくなる性質を確認できた。

よって、受信機までの実際の距離が長くなるほど誤差やばらつきが大きくなりやすくなる傾向があるといえる。

3.3 電波干渉の影響

表 2の平均誤差と標準偏差において結果が電波の持つ性質と異なる傾向を示すデータがいくつか存在した。その原因として電波干渉が考えられる。電波の干渉は大きく分けて2つある。他の機器からの電波の干渉と、自身の電波が床や壁などに反射して時間差で到達した干渉である[11]。この2つのタイプの干渉を明らかにするために、表3ではBLEビーコンを廊下と体育館に単機で配置し、壁の反射による電波干渉の影響を比較した結果を示す。また、表4ではビーコンを単機で配置した場合と密集して配置した場合の比較をし、他の機器からの電波干渉の影響について示した。

表 3 反射による電波干渉の平均誤差(m)への影響

電波強度	測定場所	受信機までの距離				
		15m	10m	5m	3m	1m
0dbm	廊下	-5.74	2.06	0.66	0.79	0.45
	体育館	-10.68	-5.32	0.62	1.19	0.92
4dbm	廊下	-4.91	4.92	1.47	2.19	1.57
	体育館	-11.82	-0.60	-0.13	1.79	0.32

表 4 他のビーコンによる電波干渉の平均誤差(m)への影響

電波強度	測定場所	配置個数	受信機までの距離				
			15m	10m	5m	3m	1m
0dbm	廊下	単独	-5.74	2.06	0.66	0.79	0.45
		複数	-5.24	-0.91	2.18	0.00	1.67
	体育館	単独	-10.68	-5.32	0.62	1.19	0.92
		複数	-11.25	-5.23	1.31	1.81	0.13
4dbm	廊下	単独	-4.91	4.92	1.47	2.19	1.57
		複数	-1.87	3.46	-0.05	-0.04	2.38
	体育館	単独	-11.82	-0.60	-0.13	1.79	0.32
		複数	-11.44	-2.14	0.23	2.66	1.64

表 3の0dbmでは廊下での平均誤差を体育館の平均誤差が絶対値で上回っている。これは電波が弱いため、反射の少ない体育館では誤差が大きくなったと考えられる。4dbmでは逆に廊下での誤差が大きくなった。電波が強くなったことで両側の壁に乱反射した電波が干渉して弱めあったり、極度に強めあったことで誤差が大きくなったと考える。

他の機器からの電波の影響を受けやすい密集してビーコンを配置した場合と、単機で配置して測定した場合の値を表 4上の各種条件で比較すると、特定の規則性を見出すことはできず、密集配置の場合の誤差が単独配置より必ず大きくなるという傾向も確認できなかった。このため、他の機器を近接配置することが、ただちに測定誤差に影響するとはいえない。

4. 実用性を考慮した配置方法

屋内測位の使用場所としては、乗り換え案内のための複雑な駅構内、店舗内での顧客動線記録のための100㎡程度のコンビニエンスストア、展示会における現在位置把握のための大規模会場などが考えられる。本研究ではこの3つのタイプの場所を、通路、中間的な広さの環境、広い環境と区分して、廊下や体育館などを用いて疑似的に測定する。

4.1 通路に適した配置方法

廊下のような細長く狭い環境に適した電波強度を考えるにあたり、測定精度の評価値としてワーストケースを考える。ここでは、平均絶対誤差に標準偏差1つ分の区間の幅を考え、実際の距離から最も乖離した誤差の値として用いる。この評価値の電波強度による変化をまとめた結果を表 5に示す。なお、この値が同距離において小さいデータを太字にしている。

表 5 電波強度の違いによる平均絶対誤差+標準偏差(m)の比較(廊下)

電波強度	受信機までの距離			
	10m	5m	3m	1m
0dbm	5.72	2.84	1.86	0.76
4dbm	9.01	4.10	4.63	3.68

表 5から、通路に配置する場合は0dbmに設定すると誤差、ばらつきが小さくなり、精度が高くなることがわかる。エリアへの接近度を見るためにビーコンを配置する場合は0dbmに設定し、各ビーコンがカバーする範囲が重ならないように10m間隔で配置するのがコスト的にも適切だと考えられる。しかし、実際に通路で位置を推定するには最低でも2つのBLEビーコンが必要である。このため複数のBLEビーコンを同時に動作させ、何mの間隔で配置するのが適切か、またそのときの電波強度についてもあらためて検討する必要がある。そこで追加測定を行うことにした。

この追加測定ではBLEビーコンを直線上に等間隔で3つ並べ、2つ目と3つ目のBLEビーコンの中間に受信機を配置した場合、この実際の位置と測定に基づく推定位置との誤差について分析する。この結果を表 6に

示す。

表 6 直線的に配置した場合の平均絶対誤差+標準偏差(m)の比較

電波強度	配置間隔			
	10m	5m	3m	1m
0dbm	4.19	3.75	1.35	0.44
4dbm	2.12	2.30	2.18	0.07

表 6では3mを除き4dbmが0dbmより精度が高いという結果となった。この測定の10m間隔配置を例に挙げると、受信機までの距離が1つ目のBLEビーコンが15m、2つ目、3つ目が5mとなっている。表 4の廊下で複数配置した測定の15mと5mの誤差平均を比較すると、4dbmの誤差が0dbmよりも小さいことがわかる。また、5m間隔で配置すると受信機までの距離が1つ目のBLEビーコンが7.5m、2つ目、3つ目が2.5mになる。先ほどと同じように表 4の値を比較すると5mで4dbmの平均誤差が小さくなり、3mではほぼ同じ結果となっている。よって、直線的な配置での測位は4dbm設定の複数設置で平均誤差が小さくなる距離を複合して処理されるため、表 5と異なる結果が出たと考えられる。

最も小さい値の設定が最適と考えると、通路では電波強度を4dbm設定し、1m間隔で直線的に配置するのが望ましいということになる。しかし、実際にはコストの問題を考慮する必要がある。例えば3m間隔にBLEビーコンを設置した場合は、単純に考えると10m間隔の約3倍のコストが発生することになるが、2つのケースの誤差はほとんど変わらない。このため、コストを優先する場合には4dbm設定の10m間隔で配置するのが適切であると考えることができる。

4.2 中間的な広さの環境に適した配置方法

次にコンビニエンスストアのような中間的な広さの環境にビーコンを配置する方法について検討する。BLEビーコンを四隅に配置することを想定し、体育館の隅の壁側を利用して100㎡と225㎡の正方形の環境を疑似的に再現して測定した。なお、受信機は各BLEビーコンから最も遠くなる正方形の中心に配置した。この位置から各ビーコンまでの推定距離と実際の距離との平均誤差を算出してまとめたものを表 7に示す。

表 7 体育館の角で四隅に配置した場合の平均誤差(m)比較

一辺の長さ	電波強度	平均誤差
10m	0dbm	1.14
	4dbm	4.25
15m	0dbm	-3.22
	4dbm	-1.35

表 7から15mの平均誤差がマイナスとなっていることが読み取れる。これは推定距離が実際の距離より短く推定されたデータが多いことを意味している。三点測位によって位置を推定する場合、各ビーコンまでの推定距離を半径とした円が重なる必要がある。推定距離が実際の距離より短いということはこの円が交わらず、三点測位が使えないということになる。よって、四隅への配

置は100㎡を超える環境の位置測位には向かないことがわかった。一方、一辺の長さが10m以下の中間的な広さの環境で四隅に配置する場合は0dbmに設定するのが適しているといえる。

4.3 広い環境に適した配置方法

展示会などの大規模会場のような開けた環境に適したビーコンの配置方法を明らかにするために平均絶対誤差+標準偏差の数値を表 8に示し比較する。

表 8 電波強度の違いによる平均絶対誤差+標準偏差 (m) の比較 (体育館)

電波強度	受信機までの距離			
	10m	5m	3m	1m
0dbm	7.85	3.23	3.22	1.74
4dbm	5.09	3.05	4.47	1.07

表 8では3mを除き4dbmに設定した場合の精度が高くなっている。エリアへの接近度を見る場合には4dbmに設定し10m間隔で配置すると比較的誤差が小さく推定できると考える。そこで、実際にメッシュでビーコンを配置することを考えて、体育館中央にビーコンを正方形の頂点となるように配置し、10m四方の場合と15m四方の場合で測定した。受信機は各ビーコンから最も遠くなる正方形の中心に配置した。測定結果から求めた平均誤差をまとめたものを表 9に示す。

表 9 体育館中央で四隅に配置した場合の平均誤差 (m) 比較

一辺の長さ	電波強度	平均誤差
10m	0dbm	-0.39
	4dbm	1.07
15m	0dbm	-2.22
	4dbm	-5.12

表 9から15m四方の平均誤差が10m四方の値を上回っていることが読み取れる。10m四方の結果では、0dbmに設定した場合の値が4dbmの場合よりも小さくなっている。しかし値がマイナスであることから三点測位が使えない可能性がある。よって広い環境では電波強度4dbmで一辺の長さが10mの正方形になるように配置するのが適しているといえる。

5. むすび

本研究ではBLEビーコンを用いた屋内測位をするにあたり、精度に影響を与える要因と環境ごとに適した配置方法を分析、考察した。その結果、廊下のような通路で現在位置の推定を行う場合は、電波強度を4dbmに設定し1m間隔の直線的な配置が最も精度が高く、コストを考慮し設置個数の削減を図るなら4dbmに設定し10m間隔に配置することが適切であると結論付けた。特定のエリアへの接近度を求める場合は0dbmに設定し10m間隔で配置するのが適切である。この結果はさらに店舗内などの陳列棚などで歩くスペースが通路程度の幅になっている環境にも応用できると考える。

また、コンビニエンスストアのような100㎡程度の環境

では、BLEビーコンを4dbmの電波強度で四隅に配置するのが現実的であるという結果が得られた。一方、大規模展示場などの100㎡より広い環境の場合は、電波強度4dbm設定でビーコンを10m間隔のメッシュで配置すれば、精度とコストのバランスがとれた位置測位が可能になる。

本研究の測定はBLEビーコンと受信機を床に配置して行った。しかし、床も電波を反射するため、電波発信後、受信機に直接届く前に反射し、誤差が大きくなるという問題がある。また、今回の測定では機器を二次元的に配置したがBLEビーコンを用いた手法で算出される推定距離は3次元的なものである。実際の利用場面で受信機が人の胸程度の位置にあると想定すると、BLEビーコンとの高低差が生まれることになる。そのため、BLEビーコンと受信機の高低差が精度に影響を与えることも考えられる。よって、BLEビーコンを配置する適切な高さを明らかにすることが今後の課題である。

参考文献

- [1] MUJI マイルサービス|無印良品, <https://www.muji.com/jp/passport/mile/>, (参照 2019-1-27).
- [2] 『Pokémon GO』の遊び方 | 『Pokémon GO』で遊ぼう! | 『Pokémon GO』公式サイト, <https://www.pokemongo.jp/howto/play/>, (参照 2019-1-27).
- [3] みちびきとは | みちびきについて | みちびき (準天頂衛星システム: QZSS) 公式サイト - 内閣府, http://qzss.go.jp/overview/services/sv01_what.html, (参照 2019-1-27).
- [4] 岡龍太, TranXuanDuc, 新井イスマイル, 西尾信彦, “位置特定インフラ専用無線 LAN アクセスポイントの試作と測位精度制御の検討評価”, 第 73 回全国大会講演論文集 2011(1), pp.275-276, 2011.
- [5] 石丸智也, 宮村紅葉, 富樫宏謙, 古川浩, “屋内環境における高精度な測位手法の検討”, 研究報告モバイルコンピューティングとパーベイスシステム(MBL) 2017-MBL-85, pp.1-5, 2017.
- [6] 美原義行, 佐藤大祐, 佐藤吉秀, 田中悠介, 宮本勝, 佐久間聡, “ビーコンを利用した混雑度可視化サービス”, 研究報告コンシューマ・デバイス&システム(CDS) 2017-CDS-19(7), pp.1-8, 2017.
- [7] 西尾信彦, 図解よくわかる屋内測位と位置情報, 日刊工業新聞社, 2018.
- [8] Windows10 デバイスで iBeacon の全データを取得する方法 | 蒼いねずみのお仕事, <http://sonic.blue/it/605>, (参照 2019-2-8).
- [9] 電波の伝わり方:減衰 | 基礎知識 | ROHM TECH WEB, https://micro.rohm.com/jp/techweb_iot/knowledge/iot01/s-iot01/01-s-iot01/1582, (参照 2019-2-5).
- [10] Beacon を使った近距離測位の特性 | Beacon ご利用ガイド | 株式会社アプリックス, <https://business.aplix.co.jp/beacon/refinfo/refinfo0102.html>, (参照 2019-2-7).
- [11] 電波の伝わり方:反射/透過、回折、干渉 | 基礎知識 | ROHM TECH WEB, https://micro.rohm.com/jp/techweb_iot/knowledge/iot01/s-iot01/01-s-iot01/1844, (参照 2019-2-5).