

研究指導 中澤 真 教授

Wi-Fi を用いた屋内測位に関する一考察

小笠原 涼

1. はじめに

近年、地図やゲームなどGPSによって取得した位置情報を活用した多様なサービスが提供されている[1]。しかしGPSは衛星から信号受信して位置情報を取得するため、信号が届かない建物内などでは利用できないといった問題がある。そのため、ショッピングモールや地下街などの屋内ではGPSを利用することができず、屋内測位に基づくナビゲーションや各種サービスを提供することは難しい。最近では屋内のモノや人の位置を把握するニーズが高まっているため[2][3]、屋内測位をできるようにすることは重要な課題である。

GPSの代わりとなる屋内測位技術として、Wi-Fiのアクセスポイント(以下AP)やBLEビーコンを用いる手法がある。Wi-FiとBLEビーコンによる屋内測位では三点測位を用いている。三点測位とは3地点のAPやBLEビーコンとスマホやタブレットなどの電子機器(以下デバイス)間で通信し、この電波強度によって各Wi-FiのAPやBLEビーコンとデバイス間の距離を算出して位置を特定する方法である。

まず、BLEビーコンの説明及び測位方法について述べる。BLEビーコンとは、省電力のBluetooth通信を用いたビーコンが発するID付きの電波を利用した屋内測位の装置である[4]。BLEビーコンは用途が限定されているため、既存設備として設置されていることは稀である。そのため、BLEビーコンを屋内測位に用いるには、新たにBLEビーコンを調達する必要がある、コストがかかるという欠点がある。

一方、Wi-Fiを利用した屋内測位では、ショッピングモールなどの施設にAPはあらかじめ設置されていることが多く、既存設備として屋内測位に利用できるため、新たに設置コストが抑えられるという利点がある。しかし、1つあたりのAPの通信距離が長いと、APが多い場所では、他のAPの影響を受けやすいという課題がある。

そこで本研究では、どのような要因がWi-Fiの屋内測位の精度に影響を及ぼしているのかを明らかにして、屋内測位の精度向上を目指す。

2. Wi-Fi の屋内測位の現状

Wi-Fiを利用した屋内測位では、APまでの距離が

遠くなるほどに電波強度が弱まることを利用して推定距離を算出する[5]。このため、電波が反射したり、遮られたりするなどして電波強度が小さくなると、APまでの距離が遠いと推定され、誤差が大きくなってしまふ。また、電波は子機となるデバイスとAPまでの実際の距離が長くなると、ゆらぎが大きくなるという性質があるため、APまでの距離が遠くなるほど誤差が大きくなると考えられる。このように、屋内測位の精度には様々な要因が影響を及ぼす可能性があるため、具体的な要因を明らかにすることは精度向上のために重要なテーマとなる。

電波強度に影響を与える要因を明らかにした研究として、水分を多く含む人体が屋内測位の結果に与える影響について明らかにしたものがある[6]。しかし、APまでの距離が変化することで屋内測位の精度がどの程度変化するのか、また、ほかのAPがあることで、屋内測位の精度にどのような影響を及ぼすのかということとは明らかになっていない。

そこで本研究では、Wi-Fiを用いた屋内測位において、APの距離と他のAPの及ぼす影響が電波強度にどのように関係しているのかを明らかにすることを目的とする。また、BLEビーコンを使った屋内測位での先行研究[7]が既にあるため、二つの手段の精度についても比較する。

3. 実験内容

3.1 測定手順

本研究では、電波強度の測定にNetSpot¹を用いる。測定場所は本短期大学の310教室と廊下とした。これは、大教室のような広いエリアと、廊下のような狭いエリアで電波干渉や伝わり方の違いを検証するためである。また、Wi-Fiには2.4GHz帯と5GHz帯の2つの周波数帯があるため、周波数帯の差異による影響も比較検証する。測定は一つの測定条件に対して2分間、5秒間隔でAPから発信される電波をノートパソコンで受信し、その電波強度をNetSpotで記録する。測定条件を整理したものを表 1に示す。なお、310教室については他のAPの影響を最も少ない環境として、金属製の扉を閉めて廊下などのAPの影響が少ない場合と、ドアを開放して電波が届く場合の二つのケースで測定する。

¹ <https://www.netspotapp.com/jp/>

表 1 比較項目と測定条件

比較項目	設定または環境			
測定場所	310教室(他のAPなしのみドア閉め)	310教室(ドア開け)	廊下	
他のAP	あり	なし		
APまでの距離(m)	1	3	5	10
周波数(GHz)	2.4	5		

測定手順を以下に示す. なお, 電波干渉を起こすための他のAPは, 測定対象のAPから5m離れた位置に設置する.

- それぞれの測定環境において, 測定対象とするAPを決め, そこに測定用ノートパソコンを近接させて電波強度を測定する. この時の測定値を0m基準の電波強度とする.
- 5秒ごとに計2分間測定し, その平均値を出す.
- 距離や環境などの条件を変えながら測定を繰り返す.
- 測定した電波強度を以下の計算式に基づいて, APまでの推定距離を算出する.

推定距離

$$=10^{\frac{((0\text{m 地点の電波強度}-\text{受信した電波の強度})/20)}$$

- 実際の距離と算出した推定距離の差から誤差を算出する.

この測定手順による結果を以下に示す.

表 2 310 教室(他の AP なし)

APからの距離	10m		5m		3m		1m	
周波数帯	2.4GHz	5GHz	2.4GHz	5GHz	2.4GHz	5GHz	2.4GHz	5GHz
5秒間隔の誤差(m)	1.09	0.00	2.18	-0.62	-0.16	0.76	-3.47	-1.51
	3.69	0.00	2.18	-0.01	0.49	0.49	-2.55	-1.51
	2.92	2.06	1.45	-0.62	-0.55	0.18	-2.55	-1.82
	3.69	1.09	2.49	-1.31	0.49	-0.16	-2.16	-1.51
	1.09	0.00	1.45	-0.62	-0.55	-0.55	-2.55	-1.82
	4.38	1.09	2.18	-0.62	-0.55	-0.98	-2.16	-1.51
	4.38	1.09	1.84	-0.62	-0.55	-1.47	-4.62	-1.51
	4.38	0.00	1.45	-0.62	0.18	-2.01	-4.01	-1.00
	0.00	1.09	2.76	-0.62	-0.55	-1.47	-4.62	-1.24
	2.06	1.09	1.45	-0.62	0.18	-2.01	-2.55	-1.51
	2.06	0.00	2.49	-0.62	-0.55	-0.98	-2.55	-1.51
	4.38	1.09	2.18	-0.62	0.49	-0.98	-2.55	-1.51
	1.09	0.00	1.45	-0.01	-0.55	-1.47	-2.55	-1.51
	1.09	2.06	1.84	-0.62	-0.55	-1.47	-3.47	-1.82
	4.38	1.09	2.18	-0.01	-0.55	-2.01	-3.47	-1.51
	2.06	0.00	2.49	-0.62	-0.16	-0.98	-4.62	-1.82
	4.38	1.09	1.02	0.53	-0.16	-0.98	-2.98	-2.16
	1.09	1.09	1.45	0.53	0.49	-0.16	-3.47	-2.55
	4.38	1.09	2.76	0.53	-0.55	-0.55	-3.47	-2.16
	4.38	1.09	1.45	-0.01	-0.55	-0.98	-3.47	-2.16
	4.38	1.09	1.45	0.53	-2.62	-0.55	-6.94	-1.51
	-1.22	1.09	2.18	0.53	-2.62	-0.55	-2.55	-1.82
	3.69	0.00	2.18	0.53	-2.62	-0.55	-3.47	-1.82
	4.38	1.09	1.45	-0.01	-0.55	-0.98	-3.47	-2.16
平均誤差(m)	2.84	0.81	1.92	-0.24	-0.53	-0.85	-3.34	-1.71

表 3 310 教室(他の AP あり)

APからの距離	10m		5m		3m		1m	
周波数帯	2.4GHz	5GHz	2.4GHz	5GHz	2.4GHz	5GHz	2.4GHz	5GHz
5秒間隔の誤差(m)	0.00	3.69	-0.01	0.53	-2.62	-0.55	-2.55	-1.24
	0.00	2.92	-0.62	-0.01	-4.94	-0.55	-1.51	-1.51
	-1.22	2.06	-0.62	0.53	-8.22	-0.55	-1.82	-1.51
	1.09	1.09	-0.62	0.53	-5.91	-0.55	-2.16	-1.82
	1.09	0.00	-3.91	-0.01	-8.22	-0.55	-2.16	-1.82
	1.09	-1.22	-2.08	-0.62	-5.91	-0.55	-2.98	-2.16
	1.09	-2.59	-6.22	-0.62	-8.22	-0.55	-1.82	-2.16
	0.00	-4.13	-2.08	-0.01	-8.22	-0.55	-2.16	-2.16
	-1.22	-4.13	-0.62	-0.62	-5.91	-0.16	-2.55	-2.55
	-2.59	-5.85	-6.22	-0.62	-5.91	-0.55	-2.55	-2.55
	-4.13	-7.78	-3.91	-0.62	-5.91	-0.55	-2.55	-1.82
	-4.13	-9.95	-3.91	-0.62	-7.00	-0.55	-2.55	-1.51
	-4.13	-2.59	-3.91	-0.01	-8.22	-0.55	-2.16	-1.82
	1.09	-4.13	-2.08	-0.62	-8.22	-0.55	-2.55	-2.16
	-7.78	-2.59	-6.22	-0.62	-5.91	-0.55	-1.51	-1.82
	-4.13	-4.13	-2.94	-0.01	-5.91	-0.55	-1.24	-2.16
	-2.59	-4.13	-5.00	-0.62	-8.22	-0.55	-1.24	-1.51
	-4.13	-4.13	-3.91	0.53	-5.91	-0.98	-1.24	-1.51
	-2.59	-4.13	-3.91	-0.01	-5.91	-0.16	-2.98	-1.82
	-2.59	-4.13	-0.62	-0.62	-5.91	-0.98	-2.55	-2.16
	-4.13	3.69	-2.08	-0.01	-8.22	-0.98	-4.01	-1.82
	-7.78	3.69	-2.08	-0.62	-4.94	-0.55	-1.82	-2.16
	-4.13	4.99	-0.62	-0.01	-9.59	-0.55	-2.55	-1.51
	-4.13	4.99	-2.08	-0.01	-7.00	-0.98	-2.55	-1.51
平均誤差(m)	-2.33	-1.60	-2.76	-0.20	-6.71	-0.59	-2.24	-1.87

表 4 廊下(他の AP なし)

APからの距離	10m		5m		3m		1m	
周波数帯	2.4GHz	5GHz	2.4GHz	5GHz	2.4GHz	5GHz	2.4GHz	5GHz
5秒間隔の誤差(m)	-9.95	-2.59	1.02	-2.08	0.18	-0.16	-1.51	-4.01
	-4.13	0.00	-0.62	-2.08	-0.16	-4.08	-1.51	-2.98
	-5.85	-4.13	-2.08	-2.08	1.22	-5.91	-1.82	-3.47
	-1.22	0.00	-2.08	-3.91	1.00	-1.47	-2.98	-3.47
	-1.22	-4.13	-2.94	-5.00	0.18	-2.01	-4.62	-2.55
	1.09	0.00	-0.62	-9.13	0.18	-5.91	-6.94	-6.08
	1.09	-4.13	-3.91	-3.91	0.18	-5.91	-4.62	-4.01
	3.69	-4.13	-2.08	-1.31	-1.47	-5.91	-3.47	-1.82
	3.69	0.00	-0.62	0.53	-0.16	-4.08	-3.47	-4.01
	1.09	-1.22	1.02	-1.31	-0.55	-5.91	-4.62	-4.01
	-2.59	0.00	1.84	0.53	-0.55	-4.08	-2.98	-2.55
	-2.59	-2.59	1.45	-0.01	0.18	-4.94	-1.82	-2.98
	1.09	-2.59	2.18	-0.62	0.18	-9.59	-1.82	-2.98
	1.09	-1.22	2.18	0.53	-0.98	-4.94	-1.82	-2.55
	2.92	-4.13	1.45	1.84	-0.55	-4.08	-2.98	-1.82
	2.92	-2.59	0.53	1.84	0.18	-7.00	-4.62	-4.01
	2.92	-2.59	0.53	1.45	0.18	-5.91	-2.55	-3.47
	0.00	-1.22	-0.62	-2.94	-0.98	-4.08	-1.51	-2.98
	-4.13	0.00	1.02	-0.62	-1.47	-8.22	-1.51	-2.98
	-7.78	-1.22	1.45	1.02	-0.98	-4.94	-1.82	-2.16
	-7.78	-15.12	-0.01	-0.01	0.18	-5.91	-1.82	-2.98
	-5.85	-15.12	-0.62	-1.31	-1.47	-2.62	-1.82	-3.47
	-5.85	-15.12	-2.94	0.53	-1.47	-0.98	-1.82	-2.55
	-4.13	-46.23	-3.91	-0.62	0.18	-2.62	-2.55	-2.16
平均誤差(m)	-1.73	-5.42	-0.35	-1.19	-0.28	-4.64	-2.79	-3.17

表 5 廊下(他の AP あり)

APからの距離	10m		5m		3m		1m	
周波数帯	2.4GHz	5GHz	2.4GHz	5GHz	2.4GHz	5GHz	2.4GHz	5GHz
5秒間隔の誤差 (m)	-12.39	-5.85	1.45	-3.91	-1.47	-2.62	-2.16	-1.00
	-5.85	-7.78	1.84	-3.91	-2.62	-7.00	-2.16	-1.00
	-7.78	-4.13	1.45	-0.62	-0.55	-8.22	-3.47	-1.24
	-4.13	-5.85	2.18	-5.00	-0.55	-7.00	-4.01	-0.78
	-7.78	-4.13	1.84	-5.00	-3.31	-5.91	-2.98	-1.00
	-15.12	-4.13	2.18	-3.91	-8.22	-8.22	-2.16	-0.78
	-18.18	-4.13	1.02	-3.91	-7.00	-7.00	-1.51	-1.00
	-25.48	-4.13	0.53	-6.22	-4.94	-8.22	-4.62	-0.78
	-25.48	-5.85	-0.62	-17.39	-5.91	-5.91	-2.98	-0.78
	-29.81	-4.13	0.53	-7.59	-8.22	-5.91	-3.47	-0.78
	-25.48	-4.13	0.53	-2.94	-4.94	-8.22	-4.62	-1.82
	-29.81	-5.85	0.53	-2.08	-4.08	-7.00	-6.08	-1.00
	-25.48	-4.13	0.53	-2.08	-7.00	-11.13	-4.62	-0.58
	-29.81	-4.13	1.45	0.53	-8.22	-12.85	-6.08	-1.24
	-34.67	-7.78	0.53	-2.94	-14.78	-8.22	-6.94	-1.82
	-21.62	-4.13	-0.01	-1.31	-9.59	-12.85	-4.01	-1.00
	-18.18	-5.85	-0.62	-1.31	-5.91	-19.39	-2.55	-1.24
	-25.48	-4.13	-3.91	-6.22	-7.00	-8.22	-2.55	-1.24
	-7.78	-1.22	-2.08	-2.08	-8.22	-5.91	-4.01	-1.51
	-9.95	-2.59	-0.62	-3.91	-4.08	-4.94	-2.16	-0.78
	-12.39	-2.59	0.53	-0.01	-5.91	-4.08	-1.82	-1.00
	-15.12	-2.59	1.45	-2.08	-4.08	-4.08	-1.82	-1.00
	-12.39	-2.59	-2.08	-1.31	-5.91	-4.94	-3.47	-1.24
	-5.85	-5.85	-0.01	-1.31	-7.00	-7.00	-4.62	-1.00
平均誤差(m)	-17.75	-4.48	0.36	-3.61	-5.81	-7.70	-3.54	-1.06

3.2 距離と誤差の関係

電波は子機となるデバイスとAPまでの実際の距離が長くなると、ゆらぎが大きくなるという性質がある。電波の減衰から距離を推定している屋内測位では、電波のゆらぎが大きいと推定距離が一定にならず精度にも影響を及ぼす可能性がある。そこで、この影響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比較分析をした。その結果を以下に示す。

表 6 310 教室における周波数帯と誤差の関係

比較項目	周波数帯	APからの距離			
		10m	5m	3m	1m
ドア閉	2.4GHz	2.84	1.92	-0.53	-3.34
他のAPなし	5GHz	0.81	-0.24	-0.85	-1.71
ドア閉	2.4GHz	-2.33	-2.76	-6.71	-2.24
他のAPあり	5GHz	-1.60	-0.20	-0.59	-1.87
絶対値平均(m)		1.89	1.28	2.17	2.29

表 7 廊下における周波数帯と誤差の関係

比較項目	周波数帯	APからの距離			
		10m	5m	3m	1m
ドア閉	2.4GHz	-1.73	-0.35	-0.28	-2.79
他のAPなし	5GHz	-5.42	-1.19	-4.64	-3.17
ドア閉	2.4GHz	-17.75	0.36	-5.81	-3.54
他のAPあり	5GHz	-4.48	-3.61	-7.70	-1.06
絶対値平均(m)		7.35	1.38	4.61	2.64

まず初めに表 6の310教室に着目する。APまでの実際の距離と推定距離の誤差の結果からは、実際の距離が長くなることで、必ずしも誤差が大きくなるという関係はみられなかった。また誤差の絶対値平均を算出した場合にも、同様に距離と誤差の間に比例関係はみられなかった。

次に表 7の廊下の結果では、5mでの測定を除けば全体の絶対値平均の誤差が、APまでの実際の距離が長いほど大きくなる傾向が見られた。

3.3 周波数帯の違いが及ぼす影響

次に周波数帯の違いが測位精度に及ぼす影響について述べる。

表 8 周波数帯ごとの結果(310 教室)

		周波数帯	
		2.4GHz	5GHz
ドア閉 他のAPなし	10m	2.84	0.81
	5m	1.92	-0.24
	3m	-0.53	-0.85
	1m	-3.34	-1.71
	絶対値平均(m)	2.16	0.90
ドア開 他のAPあり	10m	-2.33	-1.60
	5m	-2.76	-0.20
	3m	-6.71	-0.59
	1m	-2.24	-1.87
	絶対値平均(m)	3.51	1.06
全体の絶対値平均(m)		2.83	0.98

表 9 周波数帯ごとの結果(廊下)

		周波数帯	
		2.4GHz	5GHz
他のAPなし	10m	-1.73	-5.42
	5m	-0.35	-1.19
	3m	-0.28	-4.64
	1m	-2.79	-3.17
	絶対値平均(m)	1.29	3.60
他のAPあり	10m	-17.75	-4.48
	5m	0.36	-3.61
	3m	-5.81	-7.70
	1m	-3.54	-1.06
	絶対値平均(m)	6.87	4.21
全体の絶対値平均(m)		4.08	3.91

まず初めに表 8の310教室についてだが、全体の絶対値平均に着目すると、5GHz帯よりも2.4GHz帯の誤差が大きいという結果になった。電波干渉を起こす他のAPの有無ごとに算出した絶対値平均をみても、その傾向は同じであることがわかる。したがって310教室のように広い環境では、5GHz帯の周波数帯を用いることで誤差が小さくなると考えられる。

次に表 9の廊下について、全体の絶対値平均に着目すると、2.4GHz帯の誤差がわずかに大きくなった。しかし他のAPの有無で考えるとその傾向は少し変化する。他のAPありの場合は、2.4GHz帯の誤差が大きくなるという全体の絶対値平均と同じ傾向だが、他のAPなしの場合の絶対値平均は5GHz帯の誤差

が大きくなるという、逆の傾向がみられた。ただし、2.4GHz帯では他のAPの電波干渉を受けた場合に17mという非常に大きな誤差が発生していることを考えると、最悪のケースを避けるという意味ではトータルの5GHz帯を用いるのが適していると考えられる。したがって、狭い環境でも5GHz帯の周波数帯を屋内測位に用いるべきである。

3.4 BLE ビーコンとの比較

次にBLEビーコンと、平均誤差の精度を比較する。なお比較条件をできるだけ同じにするために、BLEビーコンとWi-Fiのどちらも、10mの場合とした。結果を表 10と表 11に示す。

BLEビーコンは環境に応じて電波強度の調節ができるため、狭い場所である廊下での誤差は2.06m、広い環境である体育館での誤差は-0.60mと考えることができる。これらの値とWi-Fiでの屋内測位を比較すると、廊下のような狭い環境で他のAPの電波干渉があると、Wi-Fi測位は精度が少し劣ってしまうことがわかる。一方、広い環境では、他のAPの電波干渉の有無にかかわらず、BLEビーコンの誤差が小さいという結果になった。しかしこの誤差の差はどちらもわずかなものである。したがって、設置コストのかかるBLEビーコンよりも、わずかに精度で劣るが設置コストのかからないWi-Fiを屋内測位に使うべきである。

表 10 BLE ビーコンの電波強度の平均誤差(m)[7]

電波強度	測定場所	10m
0dbm	廊下	2.06
	体育館	-5.32
4dbm	廊下	4.92
	体育館	-0.60

表 11 Wi-Fi の平均誤差(m)

	測定場所	10m
他のAPなし	廊下	-1.73
	310教室	0.81
他のAPあり	廊下	-4.48
	310教室	-1.60

4. まとめと今後の課題

本研究ではWi-Fiを用いた屋内測位をするにあたり、どのような要因が精度に影響を及ぼしているのかを、周波数帯や部屋の大きさの違い、また電波干渉を引き起こす他のAPによってどのように変化するかを実証実験から分析、考察した。その結果、周波数帯の違いによって測位精度に差があることが確認された。環境による違いはあるが、5GHz帯は2.4GHz

と比較して距離推定の誤差が小さくなる傾向が示され、屋内測位に使用するのに適していると推察される。

今回の実証実験では、広い環境と狭い環境での差異が測位精度に及ぼす影響については検証したが、その中間の大きさの部屋や、それ以上に大きい部屋での関係性はわかっていない。さらなる精度向上につなげるためにも、様々な環境および周囲の電磁波を発信するものを想定し、検証パターンを増やすことが今後の課題である。

参考文献

- [1] Pokémon GO, 『Pokémon GO』とは?, <https://www.pokemongo.jp/howto/play/#anc1>, (参照 2021-02-04).
- [2] 無印良品, MUJI マイルサービス, <https://www.muji.com/jp/passport/mile/>, (参照 2021-2-9).
- [3] 株式会社日立システムズ, Wi-Fiリアルタイム位置情報サービス, https://www.hitachi-systems.com/solution/s002/musen_lan/wi-fi_location/, (参照 2021-2-7)
- [4] 古館達也ほか, “Bluetooth Low Energy ビーコンを用いた屋内測位手法に関する研究”, 第 14 回情報科学技術フォーラム講演論文集, pp.311-312, 2015.
- [5] 中尾浩一, “屋内測位技術の動向について”, 応用技術株式会社, OGI Technical Reports vol.22, pp.47-52, 2014
- [6] 原田翔平ほか, “人体による電波減衰を考慮したWi-Fi 測位精度向上手法”, マルチメディア, 分散協調とモバイルシンポジウム 2018 論文集, pp.682-686, 2018.
- [7] 山岸茉莉夏, “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”, 会津大学短期大学部産業情報学科経営情報コース 2018 年度卒業研究論文要旨集, pp.61-64, 2018