

Wi-Fi RTT を用いた位置特定手法の屋内環境での性能評価

平山 裕介[†] 小嶋 直希[†] 鈴木 太智[†] 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: †{hirayama,kojima,taichi,manabe}@mnb.ees.saitama-u.ac.jp

あらまし 本稿では Wi-Fi RTT (Round Trip Time) の測距, 測位について実際の利用時を想定した性能評価を行っている. 実験の結果, 測距, 測位のいずれにおいても, 周波数帯, 帯域幅, 使用チャンネル, チャンネル使用量が性能に影響を与えることを示している. また, 測距性能評価では, アクセスポイントの高さの設置基準, 測位計算に利用するアクセスポイントの選択基準に関する知見を得ている. 測距性能評価を踏まえた測位性能評価では, チャンネル使用量と測位性能の関係を示し, チャンネル選択の重要性に関する知見を得ている.

キーワード Wi-Fi RTT, 位置特定性能評価, 距離測定, スマートフォン

Performance Evaluation of Indoor Positioning Method Using Wi-Fi RTT

Yusuke HIRAYAMA[†] Naoki KOJIMA[†] Taichi SUZUKI[†] and Tetsuya MANABE[†]

[†]Saitama University 255 Shimo-Okubo, Sakura-ku, Saitama, 338-8570 Japan

E-mail: †{hirayama,kojima,taichi,manabe}@mnb.ees.saitama-u.ac.jp

Abstract In this paper, we evaluate the ranging and positioning performance considering the actual usage environments about Wi-Fi RTT (Round Trip Time). As the results, we show that frequency band, band width, channel, and channel status influence the ranging and positioning performance. Also, we obtain the knowledge about the installation height criteria of access points and the selection criterion of access points. In addition, we show the relationships between channel status and positioning performance. Consequently, we obtain the knowledge about the importance of the channel selection on Wi-Fi RTT.

Keywords Wi-Fi RTT, Positioning Performance Evaluation, Distance Measurement, Smartphone

1. まえがき

近年, スマートフォンの普及などに伴って位置情報に基づくサービスの需要が高まっている. Location Based Services (LBS) の品質は位置情報精度によって大きく異なるため, より正確かつ高精度な位置情報が求められている. 人間が行動する 7 割は屋内であると言われ, 屋内空間における正確かつ高精度な位置特定が特に重要となっている.

スマートフォンを用いた屋内位置特定手法として Wi-Fi が広く用いられている. Wi-Fi はスマートフォンに通信機能として標準搭載されており, アクセスポイント (AP) の設置場所も増加している. AP を設置する目的は通信キャリアによる公衆回線の通信トラフィックの負荷の軽減や, 公共サービス, 店舗によるサービスがある. そのため, Wi-Fi を用いた位置特定 (例えば [1]) は屋内でも位置特定が可能となっている. 他に挙げられる手法としては三辺測量を用いた手法 (例えば [3]) などがある.

三辺測量による位置特定には AP-モバイル機器間の距離を使用する. モバイル機器における従来の測距手法としては Received Signal Strength Indicator (RSSI) ベ

ースの手法 (例えば [4]) があるが, 測距精度が低いという問題点がある. 他に時間ベースの手法 (例えば [5], [6]) や角度ベースの手法 (例えば [7]) が存在するが, 専用機器が必要という問題がある.

新たな測距手法として Wi-Fi Round Trip Time (Wi-Fi RTT) [8] が IEEE 802.11mc において 2016 年に標準化され, Android 9 で標準搭載された. これにより, 市販の機器を用いることで測距が可能となった. Wi-Fi RTT はデモンストレーションにおいて 1~2m の位置特定精度を有することが示されている [9] が, ユーザが実際に使用する際の環境・条件 (例えば屋内廊下) を想定した測距性能及び測位性能が明らかになっていない. Wi-Fi を用いた位置特定手法では劣化要因として人体遮蔽などの有無による Line of Sight (LoS) 及び Non Line of Sight (NLoS), 周波数帯, 帯域幅, 使用チャンネル, チャンネル使用量などが挙げられる. しかし, これらの要因が Wi-Fi RTT における測距性能, 測位性能にどの程度影響を与えるか明らかになっていない. そこで本稿ではそれらに着目して測距性能及び測位性能の評価を行った.

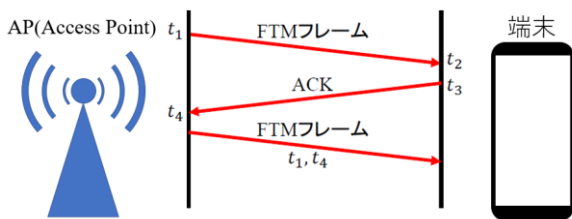


図1 Wi-Fi RTT のタイムチャート

2. Wi-Fi を用いた位置特定システムと Wi-Fi RTT

2.1 Wi-Fi を用いた位置特定システム

代表的な位置特定手法として Scene Analysis(例えば[1])・Proximity(例えば[2])・Lateration(例えば[3])が挙げられる。Scene Analysis は環境内の各地点で AP 毎に固有の Basic Service Set Identifier (BSSID)と信号観測時の RSSI を Database (DB)に登録し、測位を行う際に DB と情報を照らし合わせる。Proximity は設置位置が既知な AP を用いて端末の存在領域を特定する手法である。Lateration は位置が既知な AP からの距離を測定し、三辺測量によって位置特定を行う手法である。

2.2 Wi-Fi RTT を用いた距離測定

Wi-Fi RTT は IEEE 802.11mc において 2016 年に標準化された測距手法で、電波の往復時間と伝播速度を用いることで AP-端末間距離の測定を行う。Wi-Fi RTT のタイムチャートを図 1 に示す。

測距の手順としては、まず AP が端末に対して Fine Time Measurement (FTM)フレームの送信を行う。次に端末は FTM フレームを受信後、ACK を AP に対して送信する。続いて、AP が ACK を受信後、最初の FTM フレームの送信時間 t_1 と ACK の受信時間 t_4 を FTM フレームに乗せて端末に送信する。既に端末には最初の FTM フレームの受信時間 t_2 と ACK の送信時間 t_3 が記録されているため、これによって AP と端末それぞれの送信時間と受信時間が揃う。そして最後に AP と端末それぞれの送信時間と受信時間の差から往復時間を求め、伝播速度(例えば光速 c)を乗算することで式(1)から AP-端末間距離 d の測定を行う。

$$d = \frac{1}{2} \times ((t_4 - t_1) + (t_3 - t_2)) \times c \quad (1)$$

2.3 最小二乗法を用いた距離ベースの位置特定手法

端末座標を (x, y, z) 、AP 座標を (x_{AP}, y_{AP}, z_{AP}) としたとき、AP-端末間距離 r_{AP} との関係は式(2)となる。

$$(x - x_{AP})^2 + (y - y_{AP})^2 + (z - z_{AP})^2 = r_{AP}^2 \quad (2)$$

ここで、AP 座標を既知として、AP-端末間距離 r_{AP} が未知数以上、つまり、三つ以上取得できれば、それらを連立方程式として解くことにより、端末座標 (x, y, z) を求めることが可能となる。この連立二次方程式に対する解法として最小二乗法が広く用いられている。

3. 測距性能評価

3.1 概要

周波数帯、帯域幅、使用チャネル、チャネル使用量が測距性能に与える影響について調査を行った。

測距には Google 製 Pixel3 を 2 台使用し、評価対象の AP には Compulab 製 fitlet2 FTMR を 1 台使用した。FTM パケットによる干渉用の AP には Compulab 製 fitlet2 FTMR を 8 台使用した。Wi-Fi における通常のパケットによる干渉用の AP として Buffalo 製 WHR-300 を 3 台使用した。パケットの発生にはパソコン(PC)を計 8 台使用した。なお、FTMR は技適未取得機器のため、総務省の技適未取得機器を用いた実験等の特例制度の届出を行っている。チャネル使用量の確認には MetaGeek 社製の Wi-Spy USB スペクトラムアナライザとスペクトラム解析ソフトウェアの Chanalyzer を使用し、実験環境内において 5m 間隔で測定を行った。端末の高さは手に持って使用することを想定して 1.2m とし、三脚に固定した。測距用 AP の高さは 1.2m, 2.0m, 2.495m の三種類を使用し、高さによる違いを比較した後は 2.495m のみ評価対象とした。LoS 及び NLoS の影響を評価する際には文献[10]に倣って測定を行った。具体的には AP-端末間に人が立たずに測定を行う場合を LoS、AP-端末間に人が立って測定を行う場合を NLoS として実験を行った。測距評価における共通の実験諸元を表 1 に示した。また LoS, NLoS 及び設置高さが与える影響の評価を表 2 に従って行った。周波数帯、帯域幅、使用チャネルについては実施が可能な全組み合わせを表 3 に示した。最後に環境内で同一チャネルの使用量が増加することによる影響の調査を表 4 に従って行った。なお、本稿では、通信パケット干渉用 AP の電源を入れたのみの状態を「チャネル使用量少」、PC を用いてファイルのアップロードとダウンロードを繰り返すことで通信量を増加させた状態を「チャネル使用量多」と定義する。本実験では、実験環境内において 1 秒おきに 1 回の測定を計 65 回、2 端末で行った。評価指標には、測距結果取得割合と測距結果を用いる。測距結果取得割合は、測距結果が得られた回数を全測定回数(=130 回)で除算したものである。測距結果は、各測定地点において得られた測距の測定値の平均である。

表 1 測距性能評価の共通部分に関する実験諸元

実験場所	屋内廊下
AP-端末間最大水平距離	32.0m
測定間隔	2.0m
測定端末名 (台数)	Google 製 Pixel3 (2 台)
測距用 AP 機種名 (台数)	Compulab 製 fitlet2 FTMR (1 台)
端末高さ	1.20m
遮蔽の有無	LoS, NLoS
AP のアンテナ角度	45°
AP 本体角度	0°

表 2 設置高さ と LoS/NLoS に着目したときの測距性能評価における実験諸元

FTM パケット干渉用 AP 機種名 (台数)	Compulab 製 fitlet2 FTMR (8 台)
測距用 AP 高さ	1.20m, 2.00m, 2.495m
周波数帯, 帯域幅	5GHz 帯/40MHz 幅

表 3 周波数帯, 帯域幅, 使用チャネルを変更時の測距性能評価における実験諸元

FTM パケット干渉用 AP 機種名 (台数)	Compulab 製 fitlet2 FTMR (8 台)
測距用 AP 高さ	1.20m, 2.00m, 2.495m
周波数帯, 帯域幅, チャネル	5GHz 帯/40MHz 幅, 5GHz 帯/20MHz 幅, 2.4GHz 帯/20MHz 幅/13ch のみ, 2.4GHz 帯/20MHz 幅/5~13ch

表 4 チャネル使用量を増加させたときの測距性能評価における実験諸元

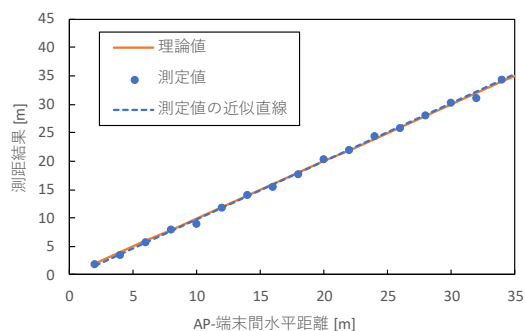
通信パケット干渉用 AP 機種名 (台数)	Buffalo 製 WHR-300 (3 台)
測距用 AP 高さ	2.495m
周波数帯	2.4GHz 帯/20MHz 幅/13ch のみ

3.2 結果

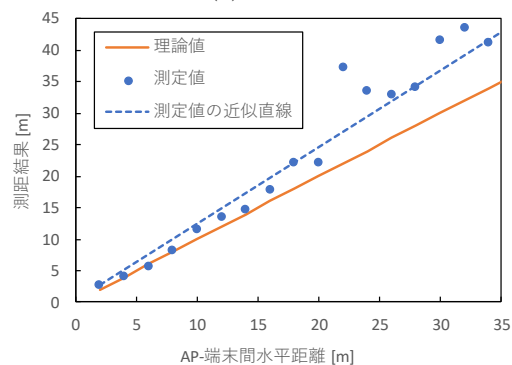
FTMR の基本設定である 5GHz 帯/40MHz 幅において、LoS と NLoS での測距性能を比較した。AP 設置高さ 1.2m での結果を図 2 に示す。LoS では正確な測距が行えているが、NLoS では測距結果が増加する傾向がみられた。マルチパスなどに依るものと考えられる。

次に、NLoS において AP 設置高さ別で測距性能を比較した。その結果、図 3 に示すように AP 設置高さが低くなると測距性能が悪くなった。これは AP 設置高さが低くなると、人体によって遮蔽される領域が広がるのが原因であると考えられる。つまり、一般的な屋内廊下において、AP 設置高さが設置基準の一つとして挙げられる。また、NLoS では AP-端末間水平距離が 15m を超えると、設置高さの低い AP において特に測距性能が悪くなる結果となった。このことから、Wi-Fi RTT による測距結果を用いた Lateration において、測位計算に利用する AP の選択基準の一つとして「測距結果 15m 以内」が挙げられる。

さらに、周波数帯, 帯域幅, 使用チャネル別で測距

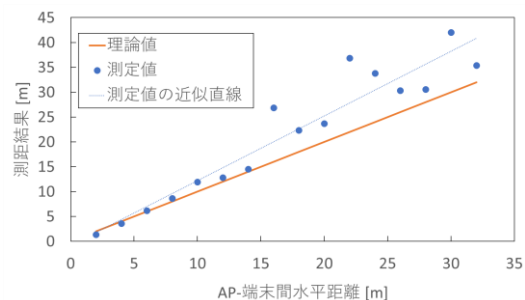


(a) LoS

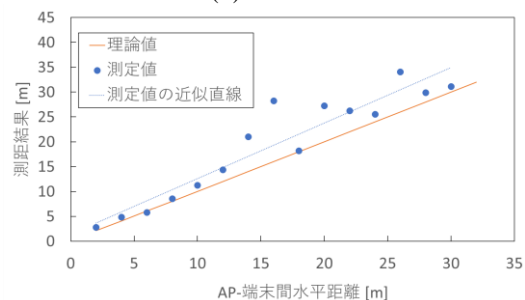


(b) NLoS

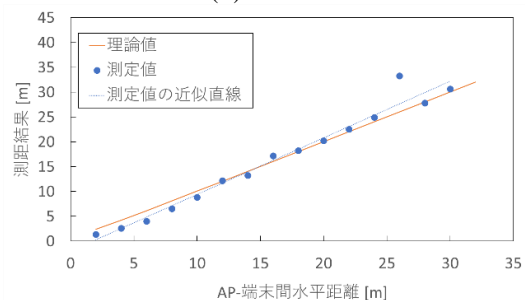
図 2 LoS/NLoS 別の測距結果(1.20m)



(a) 1.20m

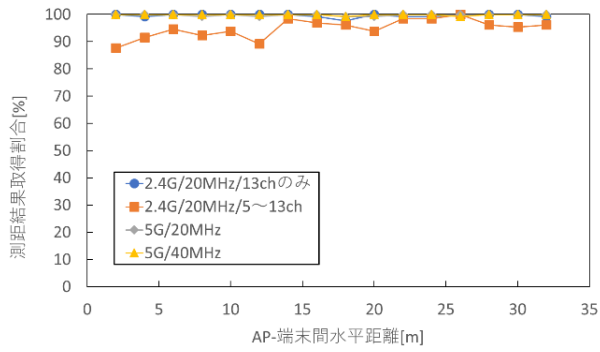


(b) 2.00m

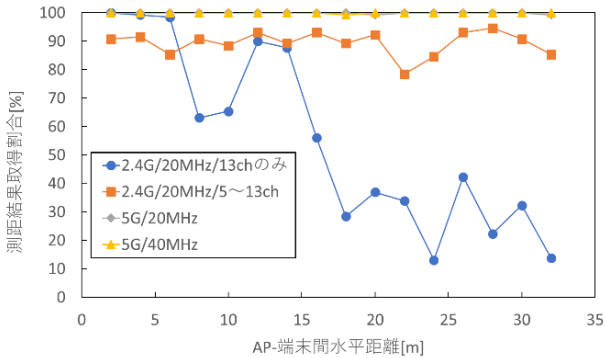


(c) 2.495m

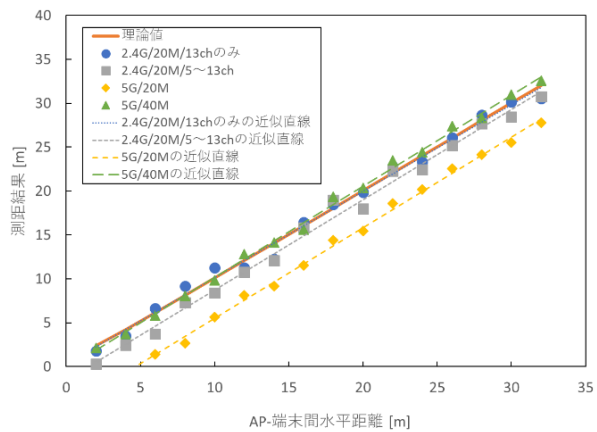
図 3 AP 設置高さ別の測距結果(NLoS)



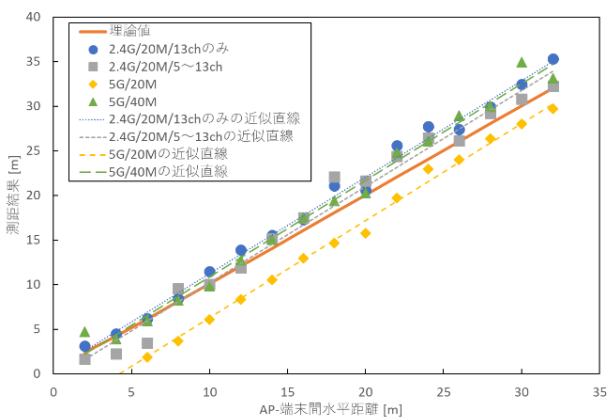
(a) 測距結果取得割合 (LoS)



(b) 測距結果取得割合 (NLoS)



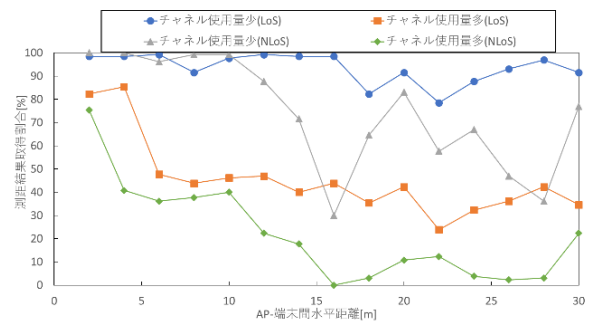
(c) 測距結果 (LoS)



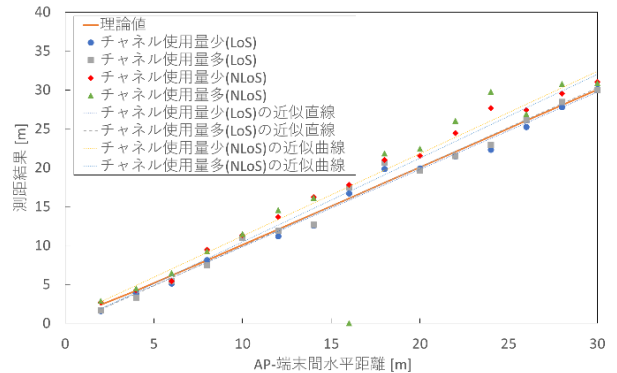
(d) 測距結果 (NLoS)

図4 周波数帯, 帯域幅, 使用チャンネル変更時の測距結果取得割合と測距結果

性能を比較した. ここでは AP 設置高さに依らず同様



(a) 測距結果取得割合



(b) 測距結果

図5 チャンネル使用量と測距性能の関係

の結果が得られたため, 代表して AP 設置高さ 2.495m の結果のみを示す. なお凡例は誌面の都合上, 5GHz 帯/40MHz 幅を「5G/40M」, 5GHz 帯/20MHz 幅を「5G/20M」, 2.4GHz 帯/20MHz 幅/13ch のみを「2.4G/20M/13ch のみ」, 2.4GHz 帯/20MHz/5~13ch を「2.4G/20M/5~13ch」と表記することとした. 実験結果を図4に示す. 図4(a)(b)の測距結果取得割合について, NLoS/2.4GHz/20MHz/13ch のみを除き, 概ね 80% 以上になった. 図4(c)(d)において5GHz帯に注目すると40MHz幅では正確な測距が行えたのに対し, 20MHz幅では測定地点に依らず平均4.01mのオフセットが発生した. これは, AP または端末内部のハードウェアに依る誤差, または, スマートフォンの OS または API に依るものと考えられる.

最後に, チャンネル使用量別で測距性能の比較を行った. 実験結果を図5に示す. 本実験環境内のチャンネル使用量を Chanalyzer で測定した結果, 「チャンネル使用量少」では平均 11.6%, 「チャンネル使用量多」では平均 78.9%であった. 図5より, チャンネル使用量の増加により測距結果取得割合が劣化することが分かった. これはパケットの衝突が原因だと考えられる.

4. 測位性能評価

4.1 概要

前節までの測距性能評価結果を踏まえ, 本節では, 周波数帯, 帯域幅, 使用チャンネル, チャンネル使用量が

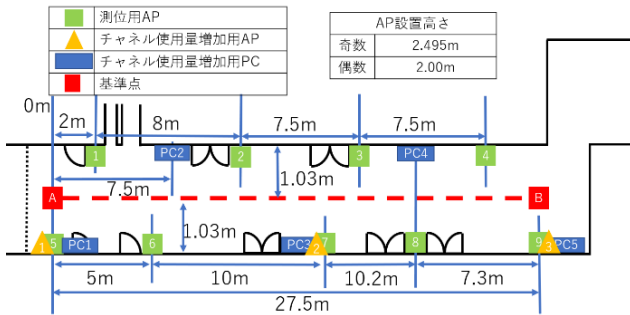


図 6 測位実験環境

表 5 測位性能評価の共通部分に関する実験諸元

実験場所	屋内廊下
歩行経路長	27.5m
測定端末名 (台数)	Google 製 Pixel3 (2 台)
測距用 AP 機種名 (台数)	Compulab 製 fitlet2 FTMR (9 台)
測距用 AP 高さ	2.00m, 2.495m
端末高さ	1.20m
AP のアンテナ角度	45°

表 6 周波数帯と帯域幅を変更時の測位性能評価における実験諸元

周波数帯, 帯域幅, チャンネル	5GHz 帯/40MHz 幅, 5GHz 帯/20MHz 幅, 2.4GHz 帯/20MHz 幅/13ch のみ, 2.4GHz 帯/20MHz 幅/5~13ch
------------------	--

表 7 チャンネル使用量を増加させたときの測位性能評価における実験諸元

通信パケット干渉用 AP 機種名 (台数)	Buffalo 製 WHR-300 (3 台)
周波数帯, 帯域幅, チャンネル	2.4GHz 帯/20MHz 幅/13ch のみ

測位性能に与える影響について調査を行った。

実験は屋内廊下で行った。実験環境を図 6 に示す。実験は、基準点 A-B 間(全長 27.5m)を約 1m/s で歩行し、基準点 A, B の通過時刻を記録した。測位性能評価時は、Wi-Fi RTT による測距結果が得られた時刻の端末位置の真値を、歩行経路長 27.5m と各基準点の通過時間から算出した。実験には使用した AP, 端末は 3 節と同様である。干渉用パケットを発生させる PC は計 10 台を使用した。実験環境内のチャンネル使用量の測定方法は 3 節と同様である。本測位実験における共通の実験諸元を表 5 に、周波数帯, 帯域幅, 使用チャンネルの組み合わせを表 6 に、チャンネル使用量増加時の実験諸元を表 7 にそれぞれ示す。測位時には端末を手を持って使用することを想定し、端末高さを 1.2m とした。測位計算には 2.3 節に示した最小二乗法を用いた。評価指標は測位結果取得割合と水平距離誤差である。測位結果取得割合は、計算により測位結果が得られた回数を歩行経路上での全測定回数で除算したものである。水平距離誤差は、計算により得られた測位結果と真値との水平方向の誤差距離で、本稿ではその平均、68 パーセント、95 パーセントを使用することとした。

4.2 結果

周波数帯, 帯域幅, 使用チャンネル変更時の測位性能の評価結果を図 7 に示す。5GHz 帯/20MHz 幅における測位結果取得割合は 0%であった。これは 3.2 節で述べたオフセット(平均 4.01m)によるもので、実験環境内のほぼ全ての AP-端末間距離が短いため、三元連立二次方程式の解が得られなかったためであると考えられる。このことを確認するために、5GHz 帯/20MHz 幅における全ての測距結果に 4.01m を加え、再度測位計算を行った。その結果、図 8 のように測位結果取得割合が 75.1%, 水平距離誤差の平均は 1.50m となった。20MHz 幅において、2.4GHz 帯と補正後の 5GHz 帯を比較すると、水平距離誤差は同程度であるが、測位結果取得割合が約 2 倍となった。

図 7 の 2.4GHz 帯/20MHz 幅における使用チャンネル別の測位結果取得割合に注目すると、「5~13ch」よりも「13ch のみ」の方が優れた結果となった。本実験において、13ch は最も混雑の少ないチャンネルだったが、5~13ch の中に混雑しているチャンネル(原因は Wi-Fi の通常用途に依るもの)があったためであると考えられる。そこで、「13ch のみ」においてチャンネル使用量を意図的に増加させた際の測位性能評価を行った。結果を図 9 に示す。3 節と同様に「チャンネル使用量少」「チャンネル使用量多」を定義した。本実験環境内のチャンネル使用量を Chanalyzer で測定した結果、「チャンネル使用量少」では平均 27.3%, 「チャンネル使用量多」では平均 83.3%であった。「チャンネル使用量多」は、「チャンネル使用量少」と比較して、測位結果取得割合が低く、水平距離誤差はいずれも大きくなった。ここで、測位実験中、各測定で測距結果の得られた AP 数の中央値に注目すると、「チャンネル使用量少」では 7 台見えていたのに対し、「チャンネル使用量多」では 5 台となっていた。つまり、測距結果の得られる AP 数が減少したことで、測位計算に用いる三元連立二次方程式で連立させる式の数が減り、測位結果が得られる回数の減少につながったと言える。また、水平距離誤差が大きくなった理由として、図 5 で示したように「チャンネル使用量多」では端末位置から離れた場所にある AP からの測距結果が NLoS の場合に大きく劣化することが挙げられる。

以上の結果から、Wi-Fi RTT による測距結果を用いた Lateration では、チャンネル選択が極めて重要であることが示唆された。現在広く利用されている Scene Analysis における測位性能劣化要因の一つとして、学習時のデータと評価時のデータの乖離が挙げられる [11]。この乖離は、チャンネルの使用状況によって発生するが、学習時、評価時ともにチャンネル使用量が多い状態であれば正確かつ高精度な位置特定が可能である。

一方、Wi-Fi RTT では、測距あるいは測位を行う時点でチャンネル使用量の少ないものを選択する必要がある。

5. むすび

本稿では Wi-Fi RTT の測距、測位について実際の利用時を想定した性能評価を行った。実験の結果、測距、測位のいずれにおいても、周波数帯、帯域幅、使用チャンネル、チャンネル使用量が性能に影響を与えることを示した。特に、測距性能においては、AP 高さの設置基準、測位計算に利用する AP 選択基準に関する知見を得ることができた。また、測距結果において一定のオフセットが発生する可能性があることも明らかとなった。これらの測距性能評価を踏まえた測位性能評価では、チャンネル使用量と測位性能の関係が明らかとなった。また、Wi-Fi RTT による測距結果を利用した Lateration では、チャンネル選択の重要性に関する知見を得ることができた。以上を通じて、Wi-Fi RTT を実環境で利用する際の指針作成に関する知見を得た。

今後の課題として、チャンネル使用量の割合毎の測距、測位性能評価を行うことや、異なる実験環境で評価を行うことが考えられる。

文 献

- [1] J. Yin, Q. Yang, L. Ni, "Adaptive Temporal Radio Maps for Indoor Location Estimation," Proc. 3rd IEEE Int'l Conf. Pervasive Comput. & Commun., Kauai, HI, USA, pp.85-94, Mar. 2005.
- [2] J. Lrumm, K. Hinckley, "The NearMe Wireless Proximity Server," Proc. 6th Int'l Conf. on Ubiquitous Comput., Nottingham, UK, pp.283-300, Sept. 2004.
- [3] P. Bahl, V.N. Padmanabhan, "RADAR An In-Building RF-based User Location and Tracking System," Proc. IEEE INFOCOM 2000, Tel Aviv, Israel, pp.775-784, Mar. 2000.
- [4] D.B. Green, A.S. Obaidat, "An accurate line of sight propagation performance model for ad-hoc 802.11 wireless LAN (WLAN) devices," Proc. IEEE Int'l Conf. on Communications, NY, USA, pp.3424-3428, May 2002.
- [5] J.Y. Lee, and R.A. Scholtz, "Ranging in a Dense Multipath Environment Using an UWB Radio Link," IEEE Journal on Selected Areas in Commun., vol.20, no.9, pp.1677-1683, Dec. 2002.
- [6] Y. Chan, and K.C. Ho, "A simple and efficient estimator for hyperbolic location," IEEE Transactions on Signal Processing, vol.42, no.8, pp.1905-1915, Aug. 1994.
- [7] A. Pages-Zamora, J. Vidal, D.H. Brooks, "Closed-form solution for positioning based on angle of arrival measurements," Proc. 13th IEEE Int'l Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Commun., Pavihao Altantico, Lisboa, Portugal, Sept. 2002.
- [8] IEEE Standard Association, "Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications," IEEE Standard for Information technology —Telecommunications and information exchange between systems Local and metropolitan area networks—Specific requirements, Dec. 2016.
- [9] Android Developers Blog, "Previewing Android P,"

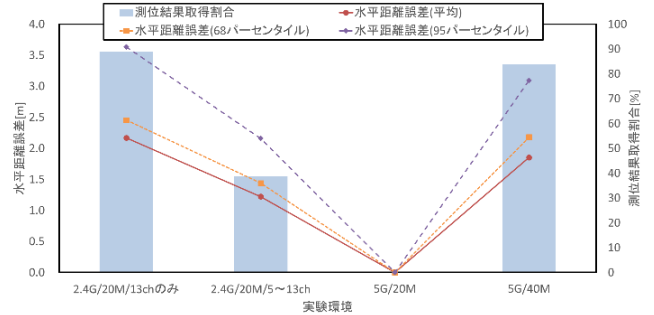


図 7 周波数帯、帯域幅、使用チャンネル変更時の測位性能の評価結果

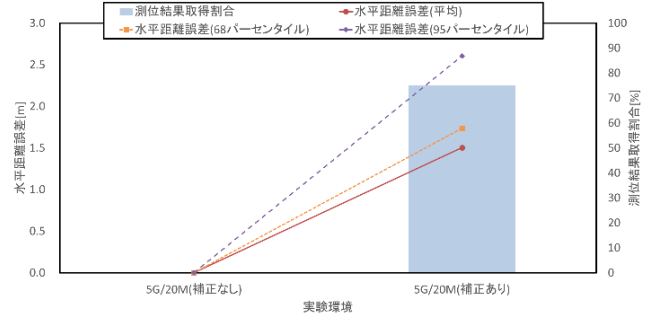


図 8 5GHz 帯/20MHz 幅における測距結果補正の有無による測位性能の比較結果

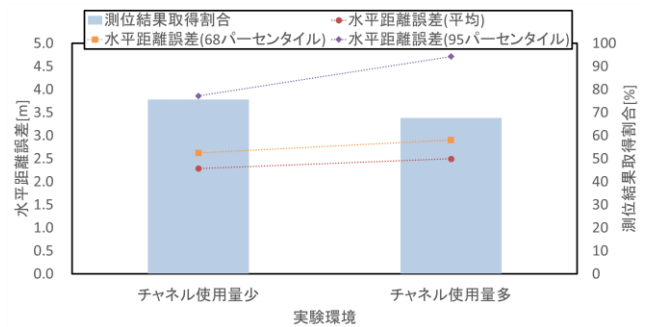


図 9 チャンネル使用量と測位性能の関係

<https://android-developers.googleblog.com/2018/03/previewing-android-p.html>, (2020年2月7日アクセス)

- [10] 野田慎吾, 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, pp239-244, Feb. 2013.
- [11] 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.