

FTM の Initiator と Responder の両機能を有するアクセスポイントの試作と測距性能評価

金川 竜大[†] 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: [†]{acdragon.16,manabe}@mnbc.ees.saitama-u.ac.jp

あらまし 本稿では、IEEE 802.11-2016 で規格化されたプロトコルである FTM (Fine Timing Measurement) の Initiator と Responder の両機能を有するアクセスポイントの構築を行い、測距性能を評価している。FTM の単機能起動時の測距性能評価では送受信のアンテナ角度を考慮した評価を実施し、この評価結果をもとに、FTM の両機能起動時の隣接通信路における測距性能を評価している。その結果、適切なチャネル選択を行うことで FTM の両機能を有するアクセスポイントでの測距が実用可能であることを示している。

キーワード Fine Timing Measurement, IEEE 802.11-2016, Initiator, Responder, 測距

Constructing and evaluating a prototype of an access point with both FTM functions of Initiator and Responder

Ryota KANAGAWA[†] and Tetsuya MANABE[†]

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

E-mail: [†]{acdragon.16,manabe}@mnbc.ees.saitama-u.ac.jp

Abstract In this paper, we construct an access point with FTM (Fine Timing Measurement), that is a protocol standardized by the IEEE 802.11-2016, both functions of Initiator and Responder and evaluate ranging performances. The ranging performance by operating FTM in a single-function mode is evaluated considering antenna angles and the ranging performance by operating FTM in a dual-function mode is evaluated based on the results of this evaluation in a communication path. As a result, we demonstrate that ranging with an access point with both functions of FTM is feasible by selecting the appropriate channel.

Key words Fine Timing Measurement, IEEE 802.11-2016, Initiator, Responder, Ranging

1. ま え が き

人の屋内活動が 90% を占めること [1], ならびにスマートフォンの普及などにより高品質な屋内の LBS (Location Based Services) の需要が高い。LBS は品質が測位性能に依存することから高精度な測位技術が不可欠である。測位社会基盤の一つである GNSS (Global Navigation Satellite System) において正確で高精度な測位を行うにはオープンスカイであることが必要とされる。そのため、屋内や地下、高層ビル群では電波が遮蔽、反射、干渉するため屋内測位性能が低く、測位不可能な場合もある [2]。したがって、高性能な LBS の提供には屋内において利用可能かつ高精度な屋内測位技術が必要である。

Wi-Fi アンテナを標準搭載した電子機器が普及し、多くの施設で無線 AP (Access Point) が設置されるようになったことで、屋内測位手法は Wi-Fi を用いた測位方法が主流である。Wi-Fi を用いた測位には、AP の正確な位置と Wi-Fi から得られる情

報を観測し、測位対象がどの AP の領域にいるか推定する手法である Proximity [3], AP の DB (Database) が持つ Wi-Fi 情報と観測データを照合し、測位を行う手法である Fingerprint [4], [5], 三辺測量を用いて測位する手法である Lateration [6] などの RSSI (Received Signal Strength Indicator) をベースとした手法が存在する。

RSSI ベースの手法は障害物やマルチパスの影響、測位誤差が距離に依存するといった問題がある。一方、伝搬時間ベースの測距による手法は、RSSI ベースによる手法ほど周囲の環境の影響を受けず、測位誤差は距離に依らないという利点がある [7]。Wi-Fi における伝搬時間ベースの測距手法は FTM (Fine Timing Measurement) という IEEE 802.11-2016 で規格化されたプロトコル [8] に基づいている。FTM を用いた測距手法は、Android 9 から Wi-Fi RTT (Round Trip Time) として標準搭載 [9] され、注目を集めている。この FTM を用いた測距手法は、Initiator と Responder という機能を有する機器間でフレー

ムをやり取りすることで測距を行う。既存の市販品では、スマートフォンのような端末側が Initiator 機能を持ち、AP 側が Responder 機能を持つように一つの機器に単機能を有するのみである。一方、規格に基づく機能ごとに機器を分ける必要はなく、一つの機器に両機能を有することが可能である。

一つの AP に FTM の両機能を有することを前提とした従来研究には、測距の効率化の提案 [10] や測位環境の簡易的な構築手法の提案 [11] をしているものがある。しかし、FTM の両機能を有する AP は現状、市販品には存在しない。そこで、本稿では、Initiator と Responder の両機能を有する Hybrid AP の構築と測距性能評価を行う。

2. FTM に関する従来研究

2.1 Fine Timing Measurement と基本測距手法

FTM は IEEE 802.11-2016 で規格化されたプロトコル [8] であり、FTM を用いた測距技術は Android 9 から Wi-Fi RTT として標準搭載された [9]。この FTM を用いた測距手法は、Initiator と Responder の機能を有する機器間で FTM フレームのやり取りにより測距する。この流れを表したのが図 1 である。まず、Initiator から FTM リクエストを送信する。次に、Responder が FTM フレームを送信するとともにタイムスタンプ ($t_{1,1}$) を記録し、Initiator がこの FTM フレームの受信するとともにタイムスタンプ ($t_{2,1}$) を記録する。その後、Initiator が ACK を送信するとともにタイムスタンプ ($t_{3,1}$) を記録し、Responder がこの ACK の受信するとともにタイムスタンプ ($t_{4,1}$) を記録する。これを n 回実施する。ただし、 i ($i \geq 2$) 回目の FTM フレーム送信時には Responder が記録したタイムスタンプ ($t_{1,i-1}$, $t_{4,i-1}$) を FTM フレームに載せて送信する。以上の流れから、Initiator がすべてのタイムスタンプ ($t_{1,i} \sim t_{4,i}$) を使用し、伝搬時間と伝搬速度 (c) から機器間の距離 (d) を式 (1) を用いて算出される。

$$d = \frac{1}{2} \cdot c \cdot \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \{ (t_{4,i} - t_{1,i}) - (t_{3,i} - t_{2,i}) \} \quad (1)$$

2.2 測距性能の向上

FTM を用いる測距手法に関する従来研究には、測距の性能評価と向上を示したものがある。具体的には、実環境における Wi-Fi RTT の評価 [7]、一般消費者が入手可能な実際の市

販デバイスを使用した屋内外における測距精度の評価 [12]、周波数帯・帯域幅・使用チャンネル・チャンネル使用量が測距測位性能に与える評価 [13]、時間測定の分解能を上げるため、ガウスノイズ、確率的共鳴、ビート周波数などの統計的手法の提案 [14]、クロック偏差、NLOS (Non Line of Sight)、マルチパスによって引き起こされる測距誤差を減少させる較正法、フィルター、モデル、アルゴリズムの提案 [15]、Wi-Fi RTT と RSSI を組み合わせた測距手法を提案 [16] がある。これらの研究においては AP が Initiator の役割を持つものがない。

一方、FTM プロトコルを使用する AP のフレームをスニーフすることで測距を行う複数端末の並列測距手法の提案 [10] では、一つの AP に Initiator と Responder の両機能を有することが前提となっている。しかし、市販品には存在しないためシミュレーションのみとなっている。

2.3 測位性能・測位環境の向上

FTM を用いる測位手法や測位環境に関する従来研究には、測位精度の向上を示したものがある。具体的には、2つの AP を利用した次元測位アルゴリズムを提案 [12]、ディープラーニングを用いて人体遮蔽によって影響を受けたデータから測位する手法を提案 [16]、NLOS 誤差を軽減するために、LOS (Line of Sight) / NLOS 識別モデルとそれに基づく測位手法を提案 [17]、ディープラーニングを用いて RTT の誤差を補正し、高精度な室内測位を実現する手法の提案 [18]、測位精度向上のためのアクセスポイント選択方法の提案 [19]、実環境における Wi-Fi RTT を用いた測位の評価と範囲補正モデルや RSSI 二次多項式曲線などの補正手法の提案 [20]、自律的に周囲の環境の特性を学習し、測距戦略を変更する教師なし学習を用いた測位性能の向上 [21]、UWB (Ultra-Wide Band) と Wi-Fi RTT を組み合わせた測位精度の向上 [22]、GNSS と Wi-Fi RTT、内蔵センサを用いた測位精度向上 [23] が挙げられる。これらの研究においても AP が Initiator の役割を持つものがない。

一方、AP 間で測位を行って Responder の位置を取得し、Responder の設置位置を Initiator に送ることで DB を構築することにより、屋内測位可能な環境の構築する手法の提案 [11] においても、一つの AP に Initiator と Responder の両機能を有することが前提となっているが、市販品には存在しないためシミュレーションのみとなっている。

2.2, 2.3 節を踏まえ、本稿では、FTM 両機能を有する Hybrid AP を Linux を用いて構築、設置条件と通信条件を考慮した測距性能評価を行う。

3. FTM Initiator/Responder Hybrid アクセスポイントの構築

3.1 構築

Hybrid AP の構築には表 1 の条件を満たすラップトップマシンで構築した。図 2 が構築した Hybrid AP である。

3.2 基本性能評価

構築した Hybrid AP で FTM 単機能起動時における測距性能評価を実施した。評価に使用した機器は、構築した Hybrid AP 2 台と Hybrid AP の設置台として高さ 880 mm の木製の棚を用

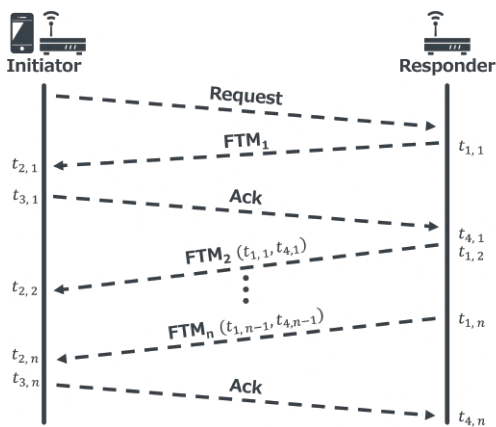


図 1. FTM プロトコルのシーケンス

表 1. Hybrid AP の構築に使用した各種のバージョン

項目	型番・バージョン
アンテナチップセット	インテル® Dual Band Wireless-AC 8260
OS	Ubuntu 16.04.1 LTS
カーネル	4.13.0-45-generic
iw	v3.7
hostapd	v2.6



図 2. 構築した Hybrid AP

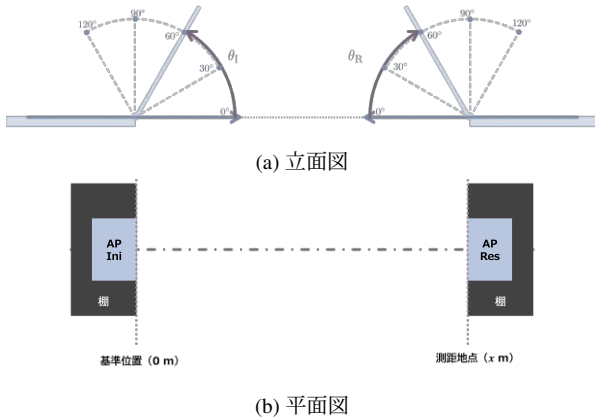


図 3. Hybrid AP の基本性能評価における配置図

いた。評価環境は、埼玉大学工学部電気電子物理工学科棟の屋上で、図 3(b) のように、柵の天板に Hybrid AP のアンテナ部分が向かい合うように設置し、その間に遮蔽物がない LOS 環境で行った。周波数を 2.4GHz 帯 40MHz 幅の 1ch に設定し、図 3(a) のように Initiator の角度を θ_I 、Responder の角度を θ_R として、 θ_I と θ_R をそれぞれ $30^\circ \sim 120^\circ$ の間で 30° ごとに変更する 16 通りとした。各アンテナ角度の組み合わせにおける測距地点は Responder の位置を 0m として 2～32m の間で 2m ごとで、実験環境の制約により 14, 16m 地点は除いた 14 点とした。各測距地点に Initiator を設置し 1 分間の測距を実施した。また、Hybrid AP のビーコンが届く距離が 60m であったため、測距結果の絶対値が 60m より大きい値を測距不能とした。

θ_R を固定し、 θ_I を変化させたときのそれぞれの測距結果を図 4 に示す。どの角度でも測距地点が 28m において共通して測距結果は外れ値が表れている。この外れ値は実験環境の影響と考え、以降の実験においても除くこととする。

$\theta_I = 30^\circ$ のとき、 θ_R の角度によらず 25～30m の範囲で測距結果が大きく乱れていた。ゆえに、 $\theta_I = 30^\circ$ を測距に扱うには好ましくないと考えられる。 $\theta_R = 60^\circ, 120^\circ$ のときに良い結

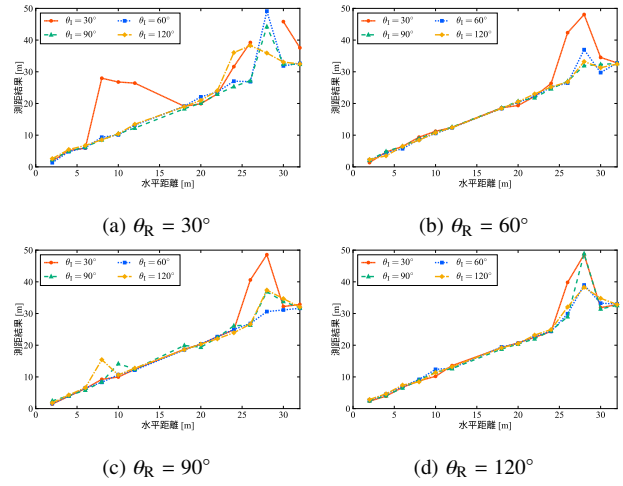


図 4. θ_R と θ_I に対する測距結果

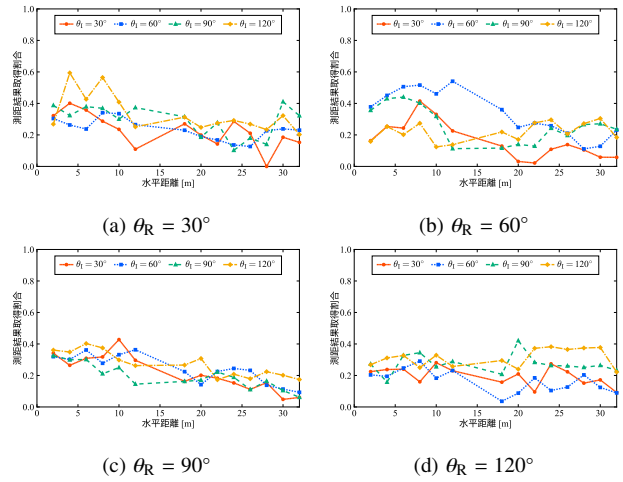


図 5. θ_R と θ_I に対する測距結果取得割合

表 2. θ_R と θ_I に対する測距結果の線形近似の傾き

θ_R	θ_I			
	30°	60°	90°	120°
30°	1.131	1.054	1.032	1.196
60°	1.184	1.008	1.020	1.029
90°	1.160	1.020	1.027	0.995
120°	1.137	1.043	1.024	1.082

表 3. θ_R と θ_I に対する測距結果を校正した値の RMSE

θ_R	θ_I			
	30°	60°	90°	120°
30°	9.102	2.006	1.713	4.220
60°	4.005	1.973	1.880	1.207
90°	2.951	2.067	3.092	4.080
120°	3.776	2.649	2.379	3.208

果が得られているように見えるため、それぞれの測距結果の線形近似により得られた傾きを比較した。表 2 が求めた傾きを示している。傾きが 1 に近い組み合わせは、1 に近い順に $(\theta_R, \theta_I) = (90^\circ, 120^\circ), (60^\circ, 60^\circ), (90^\circ, 60^\circ)$ であった。この線

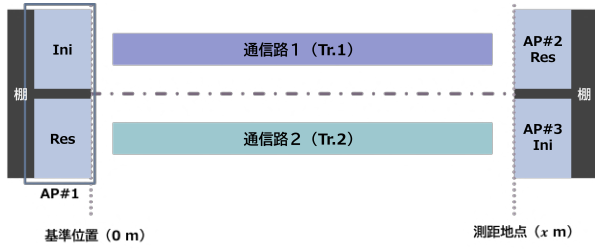


図 6. 測距性能評価実験における Hybrid AP の配置平面図

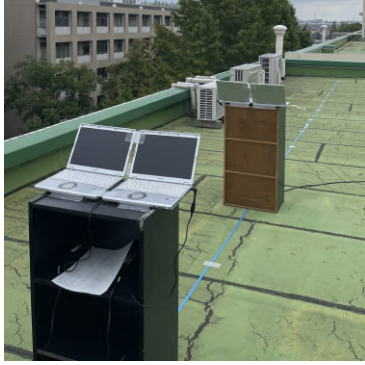


図 7. 測距性能評価実験の環境

形近似により得られる傾き α 、切片 β と、測距結果 d として式 (2) のように測距結果を校正した。

$$\frac{d - \beta}{\alpha} \quad (2)$$

この校正結果と測距地点の RMSE (Root Mean Squared Error) を (θ_R, θ_I) の組み合わせごとにまとめたものが表 3 である。RMSE が小さい組み合わせは、小さい順に $(\theta_R, \theta_I) = (60^\circ, 120^\circ), (30^\circ, 90^\circ), (60^\circ, 60^\circ)$ であった。

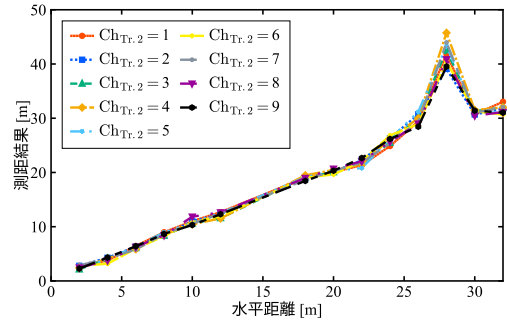
θ_R を固定し、 θ_I を変化させたときのそれぞれの測距結果取得割合を図 5 に示す。 $(\theta_R, \theta_I) = (60^\circ, 60^\circ)$ が多くの測距地点で高い値を得られている傾向にある。

以上より FTM 単機能起動時における測距性能評価から、 $(\theta_R, \theta_I) = (60^\circ, 60^\circ)$ の組み合わせが最も良いと考えられる。

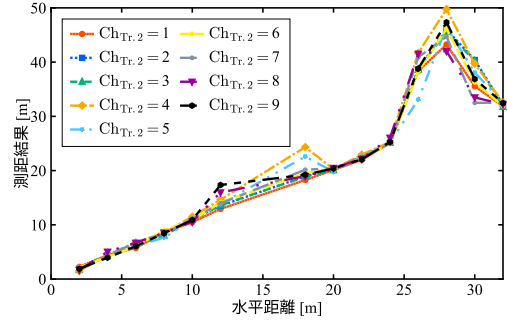
4. 測距性能評価

4.1 概要

構築した Hybrid AP で FTM 両機能起動時における測距性能評価を実施した。評価に使用した機器は Hybrid AP 4 台と Hybrid AP の設置台として高さ 880 mm の木製の棚を用いた。評価環境は、埼玉大学工学部電気電子物理工学科棟の屋上で図 6 のように、棚の天板に Hybrid AP のアンテナ部分が向かい合うように設置し、通信路が隣り合い、AP 間に遮蔽物がない LOS 環境で行った。アンテナの角度を 3.2 節の基本性能評価から、 $(\theta_R, \theta_I) = (60^\circ, 60^\circ)$ で固定し、周波数を通信路によらず、2.4 GHz 帯 40 MHz 幅で通信路 1 (Tr.1) のチャンネルを 1 ch に固定、通信路 2 (Tr.2) のチャンネルを 1 ～ 9 ch の間で 1 ch 毎に変更する 9 通りとした。各チャンネルにおける測距地点は Responder の位置を 0 m として 2 ～ 32 m の間で 2 m ごとで、実験環境の制約により 14, 16 m 地点は除いた 14 点とした。各測距地点に



(a) Tr.1



(b) Tr.2

図 8. Tr.2 のチャンネル変更時における各通信路の測距結果

表 4. Tr.2 のチャンネル変更時における測距結果の線形近似の傾き

$Ch_{Tr.2}$	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Tr.1	1.026	1.038	1.053	1.053	1.029	1.032	1.028	1.011	1.023
Tr.2	1.151	1.223	1.217	1.235	1.176	1.162	1.150	1.165	1.166

表 5. Tr.2 のチャンネル変更時における校正値の RMSE

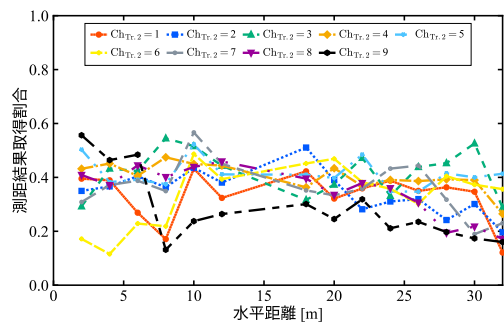
$Ch_{Tr.2}$	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Tr.1	2.908	3.164	2.845	2.831	3.274	3.058	2.333	2.950	2.588
Tr.2	5.062	5.456	5.631	5.186	4.244	4.829	5.422	5.134	4.549

Initiator を設置し 1 分間の測距を実施した。また、Hybrid AP のビーコンが届く距離が 60 m であったため、測距結果の絶対値が 60 m より大きい値を測距不能とした。

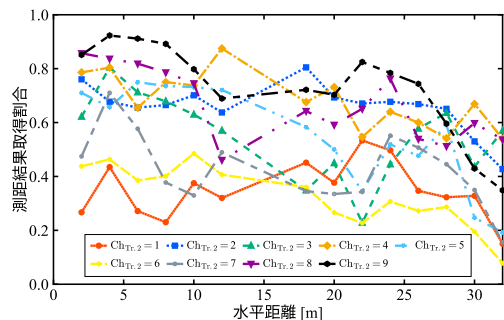
4.2 結果

Tr.2 のチャンネルのみを変更したときの各通信路における測距結果を図 8 に示す。Tr.1 においては Tr.2 のチャンネル変化による測距結果に対する影響は見られない。一方、Tr.2 においては、チャンネルに依らず測距地点が 25 m 以上のときに測距結果が大きく乱れている。これは、隣接する通信路の Tr.1 の影響が原因だと考えられる。また、Tr.2 においては、測距地点が 10 ～ 20 m の範囲でもチャンネルにより測距結果が乱れている地点が存在する。これはチャンネル変更の問題と考えられ検証が必要である。

表 4 に測距結果の線形近似による得られた傾きを示す。ただし、25 m より大きい測距地点で値が大きく乱れるため、測距地点が 25 m 以下で線形近似を行った。傾きを通信路で比較



(a) Tr.1



(b) Tr.2

図 9. Tr.2 のチャンネル変更時における測距結果取得割合

表 6. 測距に使用するチャンネルを変更時における較正值の RMSE

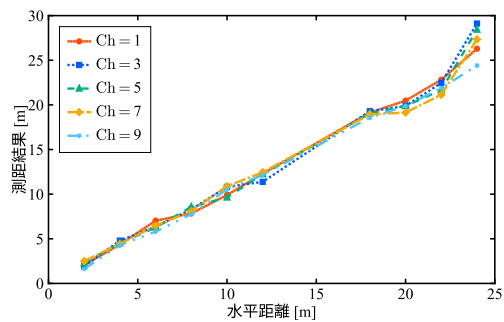
Ch	1	3	5	7	9
Tr.1	1.513	3.312	2.977	2.661	1.532
Tr.2	2.037	2.740	2.088	2.184	1.394

すると、通信路により大きく変わる。また、表 2 と比較すると、傾きが 1 からさらに遠ざかっていた。測距結果の線形近似により得られた係数と測距結果を用いて、式 (2) に通した較正結果と測距地点の RMSE が表 5 である。すべての Tr.2 の値が Tr.1 の値より大きくなっている。これらのことから、測距結果においては通信路の影響を相互に受けていると考えられる。

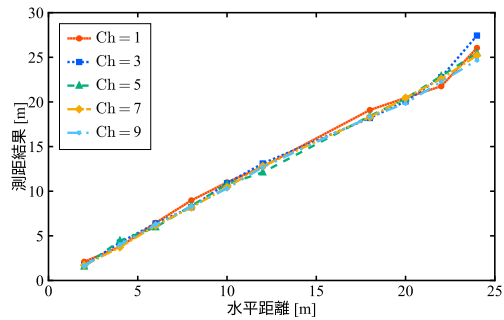
Tr.2 のチャンネルのみ変更したときの各通信路における測距結果取得割合を図 9 に示す。Tr.2 の方が全体を通して Tr.1 よりも割合が高くなっており、1, 9 ch においては変化が同じような傾向にある。また、チャンネルを変化させた Tr.2 において、全体を通じて取りうる割合がチャンネルによって異なっている。これらのことから、測距結果取得割合においては、隣接する通信路のチャンネルが同じであれば影響が小さいと考えられる。

4.3 追加実験

4.2 節の結果から、隣接する通信路のチャンネルを同じチャンネルのまま変化させたときにおける測距性能の変化を確認するために追加実験を実施した。4.2 節から測距地点を 25 m 以下に限定し、4.1 節と同じ方法で、チャンネルのみ両通信路ともに 1, 3, 5, 7, 9 ch に変更して実験を行った。ただし、4.2 節の実験を行った日と別日で行ったため、通信状況が異なる。また、Hybrid AP のビーコンが届く距離が 60 m であったため、測距結果の絶対値が 60 m より大きい値を測距不能とした。

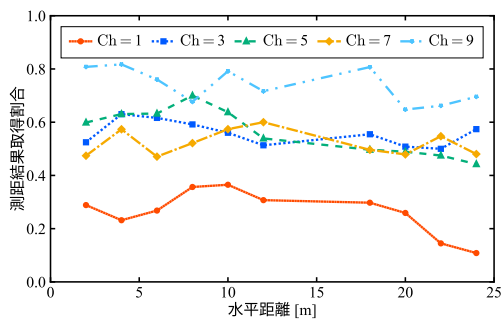


(a) Tr.1

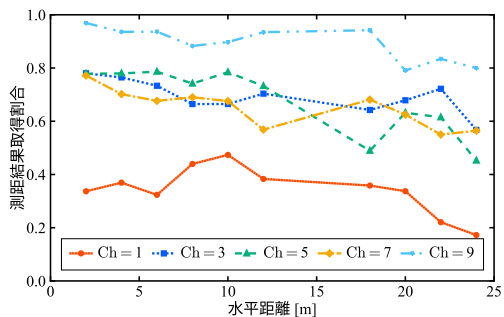


(b) Tr.2

図 10. 測距に使用するチャンネル変更時における測距結果



(a) Tr.1



(b) Tr.2

図 11. 測距に使用するチャンネル変更時における各通信路の測距結果取得割合

測距に使用するチャンネルを両通信路ともに変更したときの測距結果を図 10 に示す。両通信路とも 20 m からチャンネルによらず、値が非線形である。また、チャンネルによって変化の大きさが異なることから、チャンネル変更の影響が存在すると考えられる。測距結果の線形近似により得られた係数と測距結

果を用いて、式(2)に通した較正結果と測距地点のRMSEが表6である。9chのときのみ通信路に依らず同じような値であり、また両通信路を合わせてRMSEが最小となった。

測距に使用するチャンネルを両通信路ともに変更したときの測距結果取得割合を図11に示す。割合全体を通して1,9chでは、変化の傾向は同じであった。Tr.2の方が全体を通してTr.1よりも割合が高い傾向にある。これは隣接する通信との影響を受けていると考えられる。

以上のことから、Hybrid APにおいてFTMの両機能起動時における測距では、測距結果取得割合が隣接する通信路の影響を受けると考えられる。しかし、適切なチャンネル選択を行うことで実用可能と考えられる。

5. む す び

本稿では、Hybrid APの構築、FTMの両機能起動時における測距性能評価を実施し、Hybrid AP間での測距を実現した。Hybrid APをFTMの単機能起動時の測距においては適切なアンテナ角度を選択することで較正結果のRMSEが2m以内に収まること、FTMの両機能起動時において、隣接する通信路間の測距では適切なチャンネル選択を行うことで較正結果のRMSEが通信路に依らず1.5m程度になることから実用可能であることを示した。以上より、Hybrid APは多くのLBSを実現する要素技術としての利用可能性を示した。

今後の課題として、5GHz帯でFTMプロトコルが使用可能なAPの構築と測距性能評価や、FTMの両機能起動時の各通信路間の距離の変更、通信路の高さの変更、AP間の相対高さの変更などの様々なシナリオ下における測距性能評価の実施が挙げられる。

謝辞 この成果の一部は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の助成事業(JPNP20004)、令和6年度SU-GAPファンドプログラムの結果得られたものです。

文 献

- [1] 塩津弥佳, 吉澤晋, 池田耕一, 野崎淳夫, “生活時間調査による屋内滞在時間量と活動量: 室内空気汚染物質に対する曝露量評価に関する基礎的研究 その1,” 日本建築学会計画系論文集, vol.63, no.511, pp.45-52, Sept. 1998. DOI: 10.3130/aيجا.63.45_4
- [2] 児島 伴幸, 柳澤 政生, 大附 辰夫, 戸川 望, “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 (ITS 画像処理, 映像メディア, 視覚および一般),” 映像情報メディア学会技術報告, vol.34.6, pp.153-158, 2010. DOI: 10.11485/itetr.34.6.0_153
- [3] J. Krumm and K. Hinckley, “The NearMe Wireless Proximity Server,” UbiComp 2004: Ubiquitous Computing, Nottingham, UK, pp.283-300, Sept. 2004. DOI: 10.1007/978-3-540-30119-6_17
- [4] J. Yin, Q. Yang, and L. Ni, “Adaptive Temporal Radio Maps for Indoor Location Estimation,” Third IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications, Kauai, HI, USA, 2005 pp.85-94, March. 2005. DOI: 10.1109/PERCOM.2005.7
- [5] S. Ito and N. Kawaguchi, “Bayesian based location estimation system using wireless LAN,” Third IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications, Kauai, HI, USA, pp.273-278, March 2005. DOI: 10.1109/PERCOMW.2005.19
- [6] P. Bahl and V.N. Padmanabhan, “RADAR: an in-building RF-based user location and tracking system,” Proceedings IEEE INFOCOM 2000. Conference on Computer Communications. Nineteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (Cat. No.00CH37064), vol.2, pp.775-784, March. 2000. DOI: 10.1109/INFCOM.2000.832252
- [7] M. Ibrahim, H. Liu, M. Jawahar, V. Nguyen, M. Gruteser, R. Howard, B. Yu, and F. Bai, “Verification: Accuracy Evaluation of WiFi Fine Time Measurements on an Open Platform,” Proc. MobiCom 2018, New Delhi, India, pp.417-427, Oct. 2018. DOI: 10.1145/3241539.3241555
- [8] IEEE Standard Association, IEEE Std 802.11-2016, IEEE Standard for Information technology—Telecommunications and information exchange between systems Local and metropolitan area networks—Specific requirements - Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications, Dec. 2016. DOI: 10.1109/IEEESTD.2016.7786995
- [9] Android Open Source Project, “Wi-Fi RTT (IEEE 802.11mc),” <https://source.android.com/docs/core/connect/wifi-rtt>, accessed on Feb. 08, 2024
- [10] M. Fujii, “A Study on high accuracy positioning by extended FTM network,” 2022 IEEE 11th Global Conference on Consumer Electronics (GCCE), pp.34-35, Oct. 2022. DOI: 10.1109/GCCE56475.2022.10014056
- [11] T. Manabe and K. Saba, “Performance Evaluation of Wi-Fi RTT Lateralization without Pre-Constructing a Database,” IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences, vol.E106.A, no.5, pp.765-774, May 2023. DOI: 10.1587/transfun.2022WBP0001
- [12] M. Ogawa and H. Choi, “Measurement accuracy of Wi-Fi FTM on actual devices,” IEICE Communications Express, vol.9, no.12, pp.567-572, Dec. 2020. DOI: 10.1587/comex.2020COL0001
- [13] T. Manabe, K. Aihara, N. Kojima, Y. Hirayama, and T. Suzuki, “A Design Methodology of Wi-Fi RTT Ranging for Lateralization,” IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences, vol.E104-A, no.12, pp.1704-1713, Dec. 2021. DOI: 10.1587/transfun.2020EAP1129
- [14] A. Günther and C. Hoene, “Measuring Round Trip Times to Determine the Distance Between WLAN Nodes,” Proc. Networking 2005, Waterloo, Canada pp.768-779, May. 2005. DOI: 10.1007/11422778_62
- [15] Y. Yu, R. Chen, Z. Liu, G. Guo, F. Ye, and L. Chen, “Wi-Fi Fine Time Measurement: Data Analysis and Processing for Indoor Localisation,” The Journal of Navigation, vol.73, no.5, pp.1106-1128 Sept. 2020. DOI: 10.1017/S0373463320000193
- [16] M. Mohsen, H. Rizk, H. Yamaguchi, and M. Youssef, “LocFree: Wi-Fi RTT-based Device-Free Indoor Localization System,” GeoIndustry '23: Proceedings of the 2nd ACM SIGSPATIAL International Workshop on Spatial Big Data and AI for Industrial Applications, no.9, pp.32-40, New York, NY, USA, Nov. 2023. DOI: 10.1145/3615888.3627813
- [17] M. Si, Y. Wang, S. Xu, M. Sun, and H. Cao, “A Wi-Fi FTM-Based Indoor Positioning Method with LOS/NLOS Identification,” Applied Sciences, vol.10, no.3, p.956, Feb. 2020. DOI: 10.3390/app10030956
- [18] J.-H. Seong, S.-H. Lee, W.-Y. Kim, and D.-H. Seo, “High-Precision RTT-Based Indoor Positioning System Using RCDN and RPN,” Sensors, vol.21, num.11, p.3701, May. 2021. DOI: 10.3390/s21113701
- [19] 鶴沼 亘, 間邊 哲也, 相原 弘一, “Wi-Fi RTT Lateralization におけるアクセスポイント選択による測位性能向上,” 電子情報通信学会論文誌 A 基礎・境界, vol.J106-A, no.2, pp.40-56, Feb. 2023. DOI: 10.14923/transfunj.2022jap1005
- [20] M. Orfanos, H. Perakis, V. Gikas, G. Retscher, T. Mpimis, I. Spyropoulou, and V. Papathanasopoulou, “Testing and Evaluation of Wi-Fi RTT Ranging Technology for Personal Mobility Applications,” Sensors, vol.23, num.5, p.2829, Jan. 2023. DOI: 10.3390/s23052829
- [21] J. Choi, Y.-S. Choi, and S. Talwar, “Unsupervised Learning Techniques for Trilateration: From Theory to Android APP Implementation,” IEEE Access, vol.7, pp.134525-134538 Sept. 2019, DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2941657
- [22] C.S. Álvarez-Merino, H.Q. Luo-Chen, E.J. Khatib, and R. Barco, “Wi-Fi FTM, UWB and Cellular-Based Radio Fusion for Indoor Positioning,” Sensors, vol.21, no.21, Oct. 2021, DOI: 10.3390/s21217020
- [23] Y. Yue, R. Chen, L. Chen, W. Li, Y. Wu, and H. Zhou, “A Robust Seamless Localization Framework Based on Wi-Fi FTM / GNSS and Built-In Sensors,” IEEE Communications Letters, vol.25, no.7, pp.2226-2230, July 2021. DOI: 10.1109/LCOMM.2021.3071412