

FTM フレームスニーフによる同時測位に関する一検討

study on passive positioning system by using FTM frame sniffer

安倍 十哉, 藤井 雅弘*

Toya Abe, Masahiro Fujii

1 はじめに

測位技術は様々な分野で応用され、屋外での測位の多くは GPS (Global Positioning System) が有用である。しかし、GPS 衛星との見通しが確保できない屋内や高層ビルが多くある都市部などでは、測位の信頼性が低下することが知られている。これは、GPS による単独測位が、衛星から発信される信号が測位したい端末 (Rover) で受信されるまでの伝搬時間から距離を計測する TOA (Time of Arrival) 測位であることが起因している。一方で、屋内測位の技術として、IEEE は広く普及している無線 LAN を用いて測位を行う FTM (Fine Timing Measurement) プロトコルを IEEE802.11mc として規格した [1]。現在展開されている AP (Access Point) において、FTM プロトコルに対応している機器はまだ少ないが、FTM プロトコルをサポートした無線 LAN チップセットは近年、市場展開されつつあり、将来的に AP のほとんどが FTM プロトコルに対応することが期待される。この実現に向けて、実環境での FTM による測距精度の検証が、[2][3][4] で行われている。[2] の著者らは、マルチパスが少ない環境では位置推定誤差 1 m 程度の測位精度が得られることを報告している。また、[5] では測距と到来角を組み合わせたハイブリッド法も提案しており、実環境での検証もなされている。

FTM プロトコルによる測距は、測位端末である Rover が位置が既知の AP と直接コネクションを張る P2P (Peer to Peer) の形態で行われる。FTM による測位では原理的に 3 次元空間上では、Rover は 3 局の AP との距離を計測できれば、測位可能である。しかしながら、FTM プロトコルは通常の無線 LAN のアクセス制御に基づいて動作するため、1 回の FTM に通信チャンネルを 1 つ利用する必要があり、Rover 数が多数の場合、すべての Rover を測位するのに要する時間は、Rover 数の増加に比例して長くなる。このような測位形態は、Rover 数が少ない場合は許容できるが、屋内におけるナビゲーションや工場における動線分析など、多数の Rover が存在することを想定したサービスでは、タイムアウトする Rover が発生することが懸念されると共に、測位に通信帯域のリソースを多く使用するため好ましくない。そこでフレームスニーフによる TDOA (Time Difference of Arrival) 測位の形態をとる手法が研究されている。[7] では、TDOA 測位は TOA 測位と同等の性能で、より簡便なシステムが構築できることが報告されており、フレームスニーフを用いた実機での測位精度の検証が [6] でなされている。

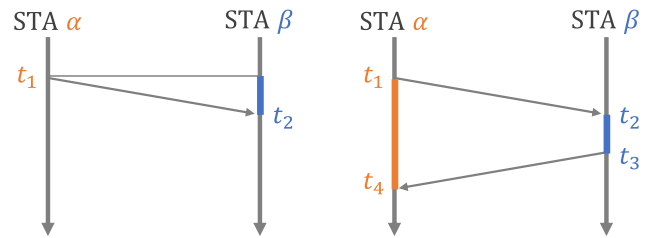


図 1 時刻同期を前提にした 1-way での測距

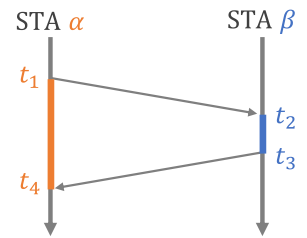


図 2 時刻非同期を前提にした 2-way での測距

[8][9] では複数の AP が協調して位置推定を行う手法が提案されているが、この手法ではバイアス誤差の推定を行う必要があるという問題点がある。それに対し、[10] では AP がネットワークを構築し測位を行うシステムが提案されているが、この手法は既存の FTM に簡易な拡張が加えられている。また、[11] の著者らは FTM と TDOA アルゴリズムを融合させ、Rover は他端末が行う FTM コネクションのフレームのスニーフを行うだけで計測距離差を求められる測距モデルを提案している。この測距モデルでは、Rover は常にパッシブであることから Rover 数に制限なく同時に測距を行うことが可能で、FTM に如何なる拡張も必要としないという利点がある。しかし [11] では具体的な測位システムについて深く検討されてない。そこで、本稿では [11] で提案された測距モデルを用いて、FTM フレームスニーフによる同時測位可能な測位システムを提案し、数値計算実験により、その有効性を示す。

2 時計のバイアス誤差

FTM プロトコルは ToF (Time of Flight) による測距をベースとした技術である。本節では ToF における時計のバイアス誤差について議論する。ToF は送信機から発信された信号が受信機に到達するまでの伝搬時間に光速を乗じることで、送受信機間の距離を計測する技術である。図 1 に示すように、時刻 t_1 に STA α がフレームを送信し、時刻 t_2 に STA β がフレームを受信するような一方方向 (1-way) の場合を考える。この場合、STA α - STA β 間の距離は ToF の原理から、 c を光速として $c(t_2 - t_1)$ で計測できる。ただし、これは STA α 、STA β の時計にズレがないことを前提とした場合である。実際には STA がフレームの送受信時に時刻を計測した際、その計測時刻には真の絶対時刻に対するバイアス誤差と、バイアス誤差を取り除いても残る計測誤差の 2 種類の誤差が含まれるため、STA α - STA β 間の時計のズレも求める必要がある。このような 1-way での測距による

*宇都宮大学 Utsunomiya University

測位手法の代表例が GPS による単独測位である。GPS 衛星間では高精度な時計同期が施されており、衛星から Rover へのフレーム伝送はスペクトル拡散技術に基づく CDMA (Code Division Multiple Access) により同一周波数帯での同時伝送を行っているため、衛星の時計間は同期している。しかしながら、Rover は市販されている GPS 受信機であり、Rover の時計と衛星の時計は同期が取れていないことが前提とされる。そのため、GPS による単独測位では Rover の位置である三次元座標に、Rover の時計のズレを足した 4 つが未知数となり、最低 4 つの衛星との距離を計測すれば、原理的に測位が可能となる。

FTM による測位では AP が GPS 衛星のように振る舞い、Rover との距離を計測するが、AP は GPS 衛星とは異なり AP 間で高精度な時計同期を行うことは困難である。そこで FTM では図 2 に示すように、STA α が送信したフレームを STA β が受信した後、STA β は STA α 宛にフレームの送信を行う双方向 (2-way) を採用している。今、STA α のバイアス誤差が v_α で、STA β のバイアス誤差が v_β の時、真の送受信時刻 t_1, t_2, t_3, t_4 に計測した計測時刻は、計測誤差を無視すると、 $\hat{t}_1 = t_1 + v_\alpha, \hat{t}_2 = t_2 + v_\beta, \hat{t}_3 = t_3 + v_\beta, \hat{t}_4 = t_4 + v_\alpha$ として与えられる。図 2 より、2-way 間のフレーム交換にかかった時間は $\hat{t}_4 - \hat{t}_1$ で表され、2 回のフレーム伝搬時間と STA β がフレームを受信してから送信するまでにかかった時間 $\hat{t}_3 - \hat{t}_2$ で構成されている。これから STA α - STA β 間の 2 回分の伝搬時間に関して

$$\begin{aligned} \hat{t}_4 - \hat{t}_1 - (\hat{t}_3 - \hat{t}_2) \\ &= (t_4 + v_\alpha) - (t_1 + v_\alpha) - (t_3 + v_\beta) + (t_2 + v_\beta) \\ &= (t_4 - t_1) - (t_3 - t_2) \end{aligned} \quad (1)$$

なる計算ができ、送受信機間のバイアス誤差をキャンセルすることができる。ただし、通常 STA の時計バイアス誤差はドリフトにより微小ながら時間変化するが、極短い 2-way の間での時間変化は無視できると仮定している点に注意する。また、2-way での 2 回分の距離が計上されるため、測距では $c/2$ を乗じる必要がある。本稿で議論する FTM プロトコルに基づく測距はすべてこの 2-way 方式である。

3 FTM プロトコル

3.1 時刻計測

本節では、FTM プロトコルに基づく測距について説明する。図 3 は第 l 番目の FTM コネクションの例を示しており、STA $k_1[l]$ と STA $k_2[l]$ による P2P 通信である。ここで、第 l 番目の FTM コネクションにおける第 m 番目のフレームを STA α が送信し、STA β が受信した際の、送受信時刻の真の絶対時刻を $t_\beta^\alpha[l; m]$ と表す。 $\alpha = \beta$ の時は送信時刻を、 $\alpha \neq \beta$ の時は受信時刻を意味する。このとき、計測される時刻は

$$\hat{t}_\beta^\alpha[l; m] = t_\beta^\alpha[l; m] + v_\beta[l; m] + n_\beta^\alpha[l; m] \quad (2)$$

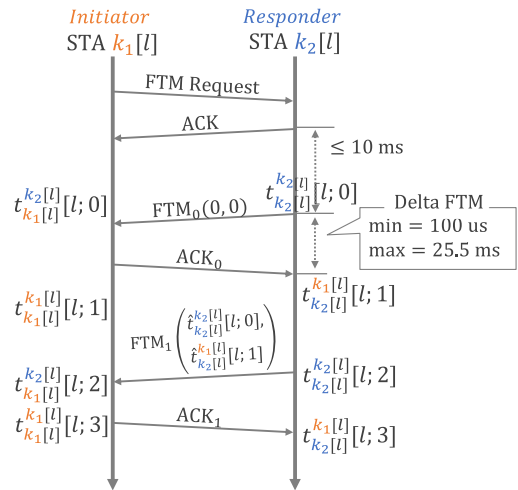


図 3 FTM のタイムライン

で与えられる。ここで、 $v_\beta[l; m]$ は第 2 節で説明した、STA β の時計の真の絶対時刻からのバイアス誤差であり、これは 1-way のフレーム伝送間では変化しないが、異なるフレーム伝送間では変化する可能性があるため、 $[l; m]$ に依存する。 $n_\beta^\alpha[l; m]$ は計測に伴うバイアス誤差を取り除いても残る誤差をまとめ、計測誤差としたものである。送信時刻の計測の際にも誤差をとまう可能性があるため、 α, β に依存する。受信時の計測誤差は、たとえ送受信機間で見通しがあったとしても、マルチパス伝搬による遅延波の影響を受けるため、一般にその分散は送信時の計測誤差のそれよりも大きくなる。それに加え、[2] では送受信機間の距離が遠くなればなるほど、測距精度が低下することが報告されていることから、本稿においても受信時における計測誤差の分散は送受信機間の距離 d に依存する。これらの計測誤差は $[l; m]$ に関して独立な確率変数の標本とすることで、本稿では

$$n_\beta^\alpha[l; m] \sim \begin{cases} \mathcal{N}(0, \sigma_{TX}^2), (\alpha = \beta) \\ \mathcal{N}(0, \sigma_{RX}^2(d)), (\alpha \neq \beta) \end{cases} \quad (3)$$

と想定する。ここで、 $\mathcal{N}(\mu, \sigma^2)$ は平均 μ 、分散 σ^2 のガウス分布を意味する。もし、計測誤差 $n_\beta^\alpha[l; m]$ にバイアス的な平均成分が存在したとしても、それはバイアス誤差 $v_\beta[l; m]$ に包含されるので、その一般性は失われず平均は 0 と考えることができる。また、STA の時計の分解能は有限であり、時刻を無限の分解能で計測できないので、量子化誤差の影響を必ず受けるが、本稿では、量子化誤差が平均 0 のガウス性を有すると想定しているため、計測誤差に内包している。

3.2 位置と距離

第 l 番目の FTM コネクションにおける STA α の 3 次元空間上での位置を $\underline{s}_\alpha[l] = [x_\alpha[l], y_\alpha[l], z_\alpha[l]]^T$ とする。 T は転置を意味し、アンダーラインを縦ベクトルとして表記する。ここでは、ある FTM コネクションの間 STA の位置は変化しないが、異なる FTM コネクション間では STA が移動する可能性があることを想定するの

で, $[l]$ に依存する. この時, STA α と STA β 間の距離は $d(\alpha, \beta) = \|s_\alpha - s_\beta\|$ と書くことができる. $\|\cdot\|$ はノルムを意味する. また, STA α から真の絶対時刻 $t_\alpha^\alpha[l; m]$ に送信されたフレームが, STA $\beta (\neq \alpha)$ で真の絶対時刻 $t_\beta^\alpha[l; m]$ に受信されたとき, この送受信時間差から

$$d(\alpha, \beta) = c \left(t_\beta^\alpha[l; m] - t_\alpha^\alpha[l; m] \right) \quad (4)$$

とも書くことができる. c は光速であり, ある FTM コネクションの間では, STA の位置は変化しないものと想定しているため, 距離は m に依存しないことに注意する. 2-way の場合では, STA α から真の絶対時刻 $t_\alpha^\alpha[l; m]$ に送信されたフレームが, STA $\beta (\neq \alpha)$ で真の絶対時刻 $t_\beta^\alpha[l; m]$ に受信された後, STA β が真の絶対時刻 $t_\beta^\beta[l; m+1]$ にフレームを送信し, それを STA α が真の絶対時刻 $t_\alpha^\beta[l; m+1]$ に受信したとき

$$d(\alpha, \beta) = \frac{c}{2} \left(t_\alpha^\beta[l; 2m+1] - t_\alpha^\alpha[l; 2m] - t_\beta^\beta[l; 2m+1] + t_\beta^\alpha[l; 2m] \right) \quad (5)$$

として書くことができる.

3.3 FTM プロトコルによる測距

図 3 の第 1 番目の FTM コネクションを例に通常の FTM プロトコルによる測距を説明する. FTM コネクションは P2P で通信するが, その際 2 つの STA はそれぞれ *Initiator*, *Rover* という役割に応じた振る舞いをし, 一般的には *Initiator* を測距したい *Rover* が, *Responder* をアンカー役となる位置が既知の AP が担う. 図 3 では STA $k_1[l]$ が *Initiator* を STA $k_2[l]$ が *Responder* の役割を担っている. FTM コネクションは初めに *Initiator* が *Responder* 宛に FTM Request フレームを送信することから始まる. FTM Request フレームを受信した *Responder* は *Initiator* 宛に ACK を返送する. この 2-way のハンドシェイクが FTM コネクションを開始する合図となる. FTM Request フレームに対し ACK を返送した *Responder* は, 返送してから 10 ms 以内に *Initiator* 宛に FTM フレーム (FTM₀) を送信する. FTM フレームには ToD (Time of Departure) と ToA (Time of Arrival) なるフィールドが用意されており, ここには 1 つ前の 2-way フレーム交換の送受信時刻が記載される. ただし, FTM₀ は初回のため ToD, ToA にはそれぞれ 0 を記載して送信する. FTM₀ を受信した *Initiator* は *Responder* 宛に ACK₀ を返送する. この FTM₀ と ACK₀ からなる 2-way フレーム交換が第 2 節で説明したように測距を行うための 1 セットとなる. しかし, この時点では *Initiator* は, *Responder* の送受信時刻 $\hat{t}_{k_2[l]}^{k_2[l]}[l; 0]$, $\hat{t}_{k_2[l]}^{k_1[l]}[l; 1]$ を知り得ないため, 距離を計算することができない. そのため, *Responder* は次の FTM フレーム (FTM₁) のフィールド内の ToD に $\hat{t}_{k_2[l]}^{k_2[l]}[l; 0]$ を ToA に $\hat{t}_{k_2[l]}^{k_1[l]}[l; 1]$ を記載して *Initiator* 宛に送信する. この FTM₁ を受信した *Initiator* はフレーム内の ToD, ToA を記録し ACK₁

を返送する. このように FTM コネクションでは測距のために 1 セット余分に 2-way フレーム交換をする必要がある.

次に, 第 2 節で簡単に説明した 2-way での測距について, $(\hat{t}_{k_2[l]}^{k_2[l]}[l; 0], \hat{t}_{k_2[l]}^{k_1[l]}[l; 1], \hat{t}_{k_1[l]}^{k_2[l]}[l; 0], \hat{t}_{k_1[l]}^{k_1[l]}[l; 1])$ を用いてより詳細に説明する. このとき 2-way フレーム交換から計算できる STA $k_1[l]$, STA $k_2[l]$ 間の推定距離は

$$\begin{aligned} \hat{d}(k_1[l], k_2[l]) &= \frac{c}{2} \left(\hat{t}_{k_2[l]}^{k_2[l]}[l; 1] - \hat{t}_{k_2[l]}^{k_2[l]}[l; 0] - \hat{t}_{k_1[l]}^{k_1[l]}[l; 1] + \hat{t}_{k_1[l]}^{k_2[l]}[l; 0] \right) \\ &= d(k_1[l], k_2[l]) + \zeta_{k_1[l], k_2[l]}[l; 0] \\ &+ \frac{c}{2} (\nu_{k_2[l]}[l; 1] - \nu_{k_2[l]}[l; 0] - \nu_{k_1[l]}[l; 1] + \nu_{k_1[l]}[l; 0]) \end{aligned} \quad (6)$$

として与えられる. ここで,

$$\begin{aligned} \zeta_{\alpha, \beta}[l; m] &= \frac{c}{2} \left(n_\beta^\beta[l; 2m+1] - n_\beta^\beta[l; 2m] \right. \\ &\quad \left. - n_\alpha^\alpha[l; 2m+1] + n_\alpha^\beta[l; 2m] \right) \end{aligned} \quad (7)$$

は計測誤差の線形結合による成分である. ここで, 式 (6) の右辺の第 3 項の括弧内に着目すると, 前半 2 つの $\nu_{k_2[l]}[l; 1] - \nu_{k_2[l]}[l; 0]$ は STA $k_2[l]$ のバイアス誤差の差で, 後半 2 つの $-\nu_{k_1[l]}[l; 1] + \nu_{k_1[l]}[l; 0]$ は STA $k_1[l]$ のバイアス誤差の差である. バイアス誤差は時計のドリフト作用により時間変化するが, 2-way フレーム交換の極短い時間でのバイアス誤差の変化量が無視できるほど小さいと想定するとき, 式 (6) の第 3 項のバイアス誤差の成分はキャンセルできる. その結果, STA $k_1[l]$ と STA $k_2[l]$ の間の推定距離は, 真の距離に計測誤差成分が加わったものとして得られる. このように, FTM プロトコルでは 2-way のフレーム伝送を行うことで, バイアス誤差の影響を相殺して, 各 STA の時計の同期をとらないで測距することができる.

ここまでの説明では 2-way フレーム交換は 2 回しか行われていないが, 通常 FTM プロトコルでは複数回 2-way フレーム交換を行う. フレーム交換数が $M (\geq 2)$ 回するとき, 推定距離は各 2-way フレーム交換での推定距離の和として

$$\begin{aligned} \hat{d}(k_1[l], k_2[l]) &= \frac{c}{M-1} \sum_{m=0}^{M-2} \left(\hat{t}_{k_2[l]}^{k_2[l]}[l; 1] - \hat{t}_{k_2[l]}^{k_2[l]}[l; 0] \right. \\ &\quad \left. - \hat{t}_{k_1[l]}^{k_1[l]}[l; 1] + \hat{t}_{k_1[l]}^{k_2[l]}[l; 0] \right) \\ &\approx d(k_1[l], k_2[l]) + \bar{\zeta}_{k_1[l], k_2[l]}[l] \end{aligned} \quad (8)$$

で得ることができる. ここで,

$$\bar{\zeta}_{k_1[l], k_2[l]}[l] = \frac{1}{M-1} \sum_{m=0}^{M-2} \zeta_{k_1[l], k_2[l]}[l; m] \quad (9)$$

は式 (7) の計測誤差成分を平滑化したものである. この計測誤差成分に注目すると, 計測誤差成分 $\bar{\zeta}_{k_1[l], k_2[l]}[l]$

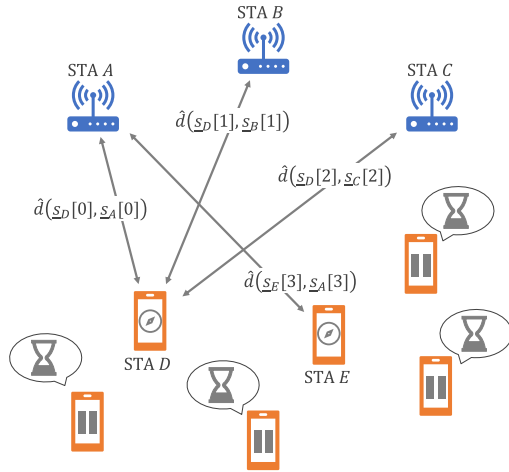


図 4 FTM による測距に基づく測位の課題

の分散の下界は

$$E \left\{ \left\| \bar{\zeta}_{k_1[l], k_2[l]}[l] \right\|^2 \right\} \geq \frac{c^2 (\sigma_{TX}^2 + \sigma_{RX}^2) (d)}{2(M-1)} \quad (10)$$

として与えられる。これは、1つの FTM コネクションで行われる 2-way フレーム交換の回数 M が増加するにつれ計測誤差の分散が小さくなることを示している。そのため、十分な M を確保すれば計測誤差の影響を小さくできるが、計測にかかる時間は増加するので、計測時間と測距精度はトレードオフの関係にある。

3.4 FTM による測距に基づく測位の課題

これまでの説明で、1回の FTM コネクションによって、式 (8) から Initiator は Responder との距離を推定することが可能であることを示した。本節では、FTM による測距に基づく測位システムについて議論する。2-way による ToF 測位では、Rover は 3 局の位置が既知の STA との距離が推定できれば、原理的に測位を行うことが可能である。通常、FTM プロトコルを用いた測位システムでは、Rover が Initiator として Responder には位置が既知の AP が用いられ、Rover は 3 局以上の AP と FTM コネクションを張ることで測位を行う。ここで、図 4 に通常の FTM による測距に基づく測位システムの例を示す。この例では、Rover である STA D は Initiator ($k_1[l] = D, (l = 0, 1, 2)$) として動作する。また、第 0 番目の FTM コネクションでは AP である STA A が Responder ($k_2[0] = A$)、第 1 番目の FTM コネクションでは AP である STA 1 が Responder ($k_2[1] = B$)、第 2 番目の FTM コネクションでは AP である STA 3 が Responder ($k_2[1] = C$) として動作する。STA D は 3 局の AP との測距を完了させるため、3 回の FTM コネクションが必要となる。その結果として、第 0 番目の FTM コネクションから $\hat{d}(D[0], A[0])$ 、第 1 番目の FTM コネクションから $\hat{d}(D[1], B[1])$ 、第 2 番目の FTM コネクションから $\hat{d}(D[2], C[2])$ の 3 局の AP との距離を推定できる。この時点で STA D は自身の位置を測位可能であるが、IEEE802.11 規格の無線 LAN では同時での多

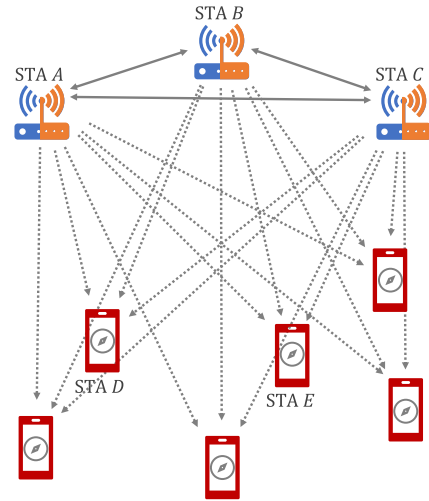


図 5 FTM による測距に基づく測位の課題

Initiator Responder Sniffer
STA I[l] STA R[l] STA S[l]

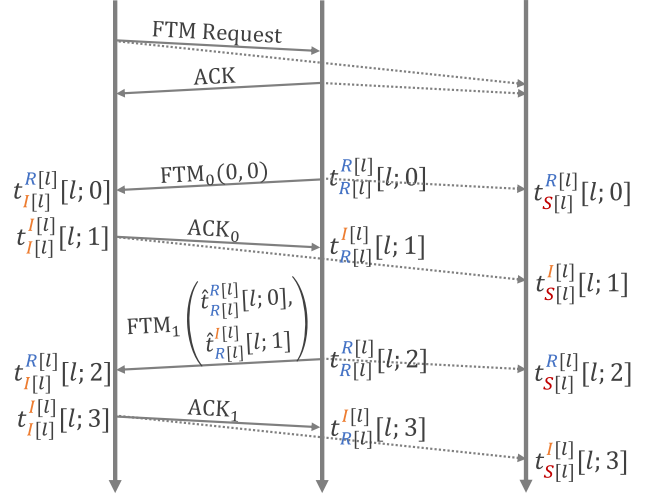


図 6 FTM フレームスニーフのタイムライン

元接続は不可能であるため、ここまでの STA D による 3 回の FTM コネクションのために回線が占有され、その他の Rover は測位ができない状態にある。そして次に Rover として STA E が Initiator, ($k_1[l] = E, (l = 3, 4, 5)$) として動作したとき、もちろん 3 回の FTM コネクションのために回線は占有される。このような測位システムでは、Rover 数の増加に伴い、必要な FTM コネクション数も線形で増加する。これは Rover 数の少ない状況での測位なら問題ないが、スタジアムや工場などの Rover が多数存在するような状況においては測位のサービスがタイムアウトしてしまう Rover が発生することが懸念される。

4 FTM フレームスニーフによる測位システム

本節では、Israel らが提案した測距モデル [11] を用いて、同時測位可能で Rover 数に制限のない測位システムを提案する。図 5 で提案測位システムを説明する。図 5 に示すように、位置が既知である 3 局の AP と、測位をしたい多数の Rover が存在するとする。まず、第 0 番目の FTM コネクションでは、STA A が Initiator として

STA B が *Responder* として AP 間で FTM コネクションを張る。この際、測位を行いたい端末である *Rover* は *Sniffer* として、*Initiator* と *Responder* が送信するフレームのスニーフを行う。続いて、第 1 番目の FTM コネクションでは、STA B が *Initiator* として STA C が *Responder* として FTM コネクションを張る。これも同じように *Rover* は *Sniffer* として、*Initiator* と *Responder* が送信するフレームのスニーフを行う。このように AP 間で順に *Initiator* と *Responder* を担いながら FTM コネクションを張るのを、*Rover* は *Sniffer* としてフレームスニーフすることで TDOA 測位を行うことができる。図 6 は第 l 番目の FTM コネクションにおいて、STA $I[l]$ が *Initiator*、STA $R[l]$ が *Responder*、STA $S[l]$ が *Sniffer* として動作した例を示している。*Sniffer* は *Initiator* と *Responder* の間の FTM コネクションに関する FTM Request フレーム、FTM フレーム、ACK フレームの全てのフレームの解析、受信時刻の計測が可能とする。図 6 に示すように、これまで説明した FTM コネクションと同様、STA $I[l]$ が *Initiator* として、STA $R[l]$ が *Responder* として動作しており、STA $S[l]$ はフレームの受信のみを行いパッシブである。

Initiator からの FTM Request と *Responder* からの ACK をトリガーとして、STA $S[l]$ はフレームスニーフを開始し、この FTM コネクションから STA $S[l]$ では

$$\hat{i}_{S[l]}^{R[l]}[l] = \left[\hat{i}_{S[l]}^{R[l]}[l, 0] \quad \hat{i}_{S[l]}^{R[l]}[l, 2] \quad \cdots \quad \hat{i}_{S[l]}^{R[l]}[l, 2M-4] \right]^T \in \mathbb{T}^{M-1} \quad (11)$$

$$\hat{i}_{S[l]}^{I[l]}[l] = \left[\hat{i}_{S[l]}^{I[l]}[l, 1] \quad \hat{i}_{S[l]}^{I[l]}[l, 3] \quad \cdots \quad \hat{i}_{S[l]}^{I[l]}[l, 2M-3] \right]^T \in \mathbb{T}^{M-1} \quad (12)$$

を計測値として得ることができる。ここで、 M はある FTM コネクションでの 2-way フレーム交換回数で、任意の FTM コネクションで定数であるとする。*Responder* $R[l]$ が最初に送信する FTM フレームを第 0 番目、*Initiator* $I[l]$ からの ACK フレームを第 1 番目とし、最後の FTM フレームを第 $2M-2$ 番目、最後の ACK フレームを第 $2M-1$ 番目として計数する。また、 $\mathbb{T} \subset \mathbb{R}$ (\mathbb{R} は実数集合) は FTM における時刻計測の分解能によって制限される実数集合の部分集合で、通常ピコ秒単位である。ここでは、関連するすべての STA は同じ分解能で時刻計測が可能であるとする。第 3.3 節で説明したように、*Responder* は自身の計測時刻情報を ToD と ToA フィールドに記載した FTM フレームを *Initiator* 宛に送信するが、*Sniffer* ではこれのスニーフ可能とし、

$$\hat{i}_{R[l]}^{R[l]}[l] = \left[\hat{i}_{R[l]}^{R[l]}[l, 0] \quad \hat{i}_{R[l]}^{R[l]}[l, 2] \quad \cdots \quad \hat{i}_{R[l]}^{R[l]}[l, 2M-4] \right]^T \in \mathbb{T}^{M-1} \quad (13)$$

$$\hat{i}_{R[l]}^{I[l]}[l] = \left[\hat{i}_{R[l]}^{I[l]}[l, 1] \quad \hat{i}_{R[l]}^{I[l]}[l, 3] \quad \cdots \quad \hat{i}_{R[l]}^{I[l]}[l, 2M-3] \right]^T \in \mathbb{T}^{M-1} \quad (14)$$

もまた、得ることができる。

4.1 測距モデル

今、*Responder* からの FTM フレームである第 $2m$ 番目のフレームと、*Initiator* からの ACK フレームである第 $2m+1$ 番目のフレームに着目して議論を進める。STA $I[l]$ 、STA $S[l]$ 間距離 $d(I[l], S[l])$ と、STA $R[l]$ 、STA $S[l]$ 間距離 $d(R[l], S[l])$ の差は

$$\begin{aligned} & d(I[l], S[l]) - d(R[l], S[l]) \\ &= c \left(t_{S[l]}^{I[l]}[l; 2m+1] - t_{I[l]}^{I[l]}[l; 2m+1] \right. \\ & \quad \left. - t_{S[l]}^{R[l]}[l; 2m] + t_{R[l]}^{R[l]}[l; 2m] \right) \end{aligned} \quad (15)$$

と書ける。また、STA $I[l]$ と STA $R[l]$ 間の距離 $d(I[l], R[l])$ は

$$\begin{aligned} d(I[l], R[l]) &= c \left(t_{R[l]}^{I[l]}[l; 2m+1] - t_{I[l]}^{I[l]}[l; 2m+1] \right) \\ &= c \left(t_{R[l]}^{I[l]}[l; 2m+1] - t_{I[l]}^{I[l]}[l; 2m+1] \right. \\ & \quad \left. + t_{R[l]}^{R[l]}[l; 2m] - t_{R[l]}^{R[l]}[l; 2m] \right) \end{aligned} \quad (16)$$

と書くことができるので、

$$\begin{aligned} & -t_{I[l]}^{I[l]}[l; 2m+1] + t_{R[l]}^{R[l]}[l; 2m] \\ &= \frac{d(I[l], R[l])}{c} - t_{R[l]}^{I[l]}[l; 2m+1] + t_{R[l]}^{R[l]}[l; 2m] \end{aligned} \quad (17)$$

なる関係が成立する。式 (17) を式 (15) に代入すると、

$$\begin{aligned} & d(I[l], S[l]) - d(R[l], S[l]) \\ &= d(I[l], R[l]) + c \{ \\ & \quad + \left(\hat{i}_{S[l]}^{I[l]}[l; 2m+1] - v_{S[l]}[l; 2m+1] - n_{S[l]}^{I[l]}[k; 2m+1] \right) \\ & \quad - \left(\hat{i}_{S[l]}^{R[l]}[l; 2m] - v_{S[l]}[l; 2m] - n_{S[l]}^{R[l]}[k; 2m] \right) \\ & \quad - \left(\hat{i}_{R[l]}^{I[l]}[l; 2m+1] - v_{R[l]}[l; 2m+1] - n_{R[l]}^{I[l]}[k; 2m+1] \right) \\ & \quad \left. + \left(\hat{i}_{R[l]}^{R[l]}[l; 2m] - v_{R[l]}[l; 2m] - n_{R[l]}^{R[l]}[k; 2m] \right) \right\} \end{aligned} \quad (18)$$

となる。第 3.3 節の FTM プロトコルによる測距の際に仮定した 2-way でのバイアス誤差の変化が無視できるほど小さい ($v_{\alpha}[l; 2m] \approx v_{\alpha}[l; 2m+1]$) が満足されるとき、STA のバイアス誤差は全て相殺され、

$$\begin{aligned} & d(I[l], S[l]) - d(R[l], S[l]) \\ & \sim d(I[l], R[l]) + c \left(\hat{i}_{S[l]}^{I[l]}[l; 2m+1] \right. \\ & \quad - \hat{i}_{S[l]}^{R[l]}[l; 2m] - \hat{i}_{R[l]}^{I[l]}[l; 2m+1] + \hat{i}_{R[l]}^{R[l]}[l; 2m] \left. \right) \\ & \quad + c \left(-n_{S[l]}^{I[l]}[l; 2m+1] \right. \\ & \quad \left. + n_{S[l]}^{R[l]}[l; 2m] + n_{R[l]}^{I[l]}[l; 2m+1] - n_{R[l]}^{R[l]}[l; 2m] \right) \end{aligned} \quad (19)$$

と近似できる。式 (19) の両辺を 1 回の FTM コネクション内で積分することで、

$$\xi[l] = d(I[l], S[l]) - d(R[l], S[l]) - d(I[l], R[l]) + \eta[l] \quad (20)$$

と書くことができる。ここで,

$$\xi[l] = \frac{c}{M-1} \sum_{m=0}^{M-2} \left(\hat{i}_{S[l]}^{I[l]}[l; 2m+1] - \hat{i}_{S[l]}^{R[l]}[l; 2m] - \hat{i}_{R[l]}^{I[l]}[l; 2m+1] + \hat{i}_{R[l]}^{R[l]}[l; 2m] \right) \quad (21)$$

$$\eta[l] = \frac{c}{M-1} \sum_{m=0}^{M-2} \left(n_{S[l]}^{I[l]}[l; 2m+1] - n_{S[l]}^{R[l]}[l; 2m] - n_{R[l]}^{I[l]}[l; 2m+1] + n_{R[l]}^{R[l]}[l; 2m] \right) \quad (22)$$

とした。 $\eta[l]$ の統計的性質は $n_{\beta}^{\alpha}[l; m]$ のそれを引き継ぐので、その期待値は 0 となり、第 3.3 節と同様に、FTM コネクション内の 2-way のフレーム交換数 M が大きくなると、分散の下限も小さくなり、計測誤差は平滑化される。

4.2 測位方式

ここでは、 $k = 0, \dots, K$ の番号を持つ $K+1$ 局の位置が未知の *Sniffer* と、位置が既知の AP が 3 局以上存在するとする。FTM コネクションごとに AP の内いずれか 2 局が *Initiator* と *Responder* を担う。*Sniffer* は代表して K の番号持つものについて議論するが、同時測位可能な *Sniffer* 数に制限はない。ここでは、 L 回の FTM コネクションの間で、*Sniffer* の位置の変化は無視できるほど小さいものと仮定し $[l]$ に依存しない形で記述する。

$$f[l](\underline{s}_K) \triangleq d(I[l], K) - d(R[l], K) = \left\| \underline{s}_{I[l]} - \underline{s}_K \right\| - \left\| \underline{s}_{R[l]} - \underline{s}_K \right\| \quad (23)$$

とするとき、 $\underline{s}_K = [x_K, y_K, z_K]^T$ の推定値を $\hat{\underline{s}}_K^{(i)} = [\hat{x}_K^{(i)}, \hat{y}_K^{(i)}, \hat{z}_K^{(i)}]^T$ として、 $f[l]$ の $\hat{\underline{s}}_K^{(i)}$ まわりでのテイラー展開を 1 次項までで近似すると、

$$f[l](\underline{s}_K) \sim f[l](\hat{\underline{s}}_K^{(i)}) + \left(\underline{a}^{(i)}[l] \right)^T \Delta \underline{s}_K^{(i)} \quad (24)$$

と書ける。ここで、

$$\underline{a}^{(i)}[l] = \left[\frac{\partial f[l]}{\partial x_K} \quad \frac{\partial f[l]}{\partial y_K} \quad \frac{\partial f[l]}{\partial z_K} \right]^T \Bigg|_{\underline{s}_K = \hat{\underline{s}}_K^{(i)}} = -\frac{\underline{s}_{I[l]} - \hat{\underline{s}}_K^{(i)}}{d(I[l], \hat{\underline{s}}_K^{(i)})} + \frac{\underline{s}_{R[l]} - \hat{\underline{s}}_K^{(i)}}{d(R[l], \hat{\underline{s}}_K^{(i)})} \quad (25)$$

$$\Delta \underline{s}_K^{(i)} = \underline{s}_K - \hat{\underline{s}}_K^{(i)} \quad (26)$$

とした。式 (20) において、 *Responder* と *Initiator* 間の距離である第 3 項の $d(I[l], R[l])$ は既知であるので、

$$\underline{g}^{(i)} = \begin{bmatrix} g^{(i)}[0] \\ g^{(i)}[1] \\ \vdots \\ g^{(i)}[L-1] \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^L \quad (27)$$

$$g^{(i)}[l] = \xi[l] + d(I[l], R[l]) - f[l](\hat{\underline{s}}_K^{(i)}) \quad (28)$$

$$\mathbf{A}^{(i)} = \begin{bmatrix} (\underline{a}^{(i)}[0])^T \\ (\underline{a}^{(i)}[1])^T \\ \vdots \\ (\underline{a}^{(i)}[L-1])^T \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{L \times 3} \quad (29)$$

$$\underline{\eta} = [\underline{\eta}[0] \quad \underline{\eta}[1] \quad \dots \quad \underline{\eta}[L-1]] \in \mathbb{R}^L \quad (30)$$

$$(31)$$

と置くと、

$$\underline{g}^{(i)} = \mathbf{A}^{(i)} \Delta \underline{s}_K^{(i)} + \underline{\eta} \quad (32)$$

と書くことができる。今、 $\underline{\eta}$ が平均 0、共分散行列がスカラー行列となる複素ガウス確率変数ベクトルの標本であるとすると、最尤規範に基づき、

$$J(\Delta \underline{s}_K^{(i)}) = \left\| \underline{g}^{(i)} - \mathbf{A}^{(i)} \Delta \underline{s}_K^{(i)} \right\|^2 \quad (33)$$

を最小とする $\Delta \underline{s}_K^{(i)}$ を推定することを考える。 J は

$$J(\Delta \underline{s}_K^{(i)}) = (\Delta \underline{s}_K^{(i)} - \Delta \hat{\underline{s}}_K^{(i)})^T \left(\mathbf{A}^{(i)} \right)^T \mathbf{A}^{(i)} (\Delta \underline{s}_K^{(i)} - \Delta \hat{\underline{s}}_K^{(i)}) + 2 (\Delta \underline{s}_K^{(i)})^T \left\{ \left(\mathbf{A}^{(i)} \right)^T \mathbf{A}^{(i)} \Delta \hat{\underline{s}}_K^{(i)} - \left(\mathbf{A}^{(i)} \right)^T \underline{g}^{(i)} \right\} - \left\| \mathbf{A}^{(i)} \Delta \hat{\underline{s}}_K^{(i)} \right\|^2 + \left\| \underline{g}^{(i)} \right\|^2 \quad (34)$$

のように平方完成できるので、 J を最小にする $\Delta \underline{s}_K^{(i)}$ の推定値は

$$\left(\mathbf{A}^{(i)} \right)^T \mathbf{A}^{(i)} \Delta \hat{\underline{s}}_K^{(i)} = \left(\mathbf{A}^{(i)} \right)^T \underline{g}^{(i)} \quad (35)$$

なる正規方程式の解として与えられる。

以下にアルゴリズムをまとめる。

Step 0 $i = 0$ とし、 $\hat{\underline{s}}_K^{(i)}$ を定める。

Step 1 $\mathbf{A}^{(i)}$ と $\underline{g}^{(i)}$ を計算し、正規方程式を解き $\Delta \underline{s}_K^{(i)}$ を求める。

Step 2 $\hat{\underline{s}}_K^{(i+1)} = \hat{\underline{s}}_K^{(i)} + \Delta \underline{s}_K^{(i)}$ により推定値の更新

Step 3 終了条件を満たせば終了し、そうでなければ $i := i + 1$ として Step 1 へ。

5 数値計算実験

本節では、提案測位システムの有効性を評価するために、数値計算実験により位置推定誤差の検証を行う。

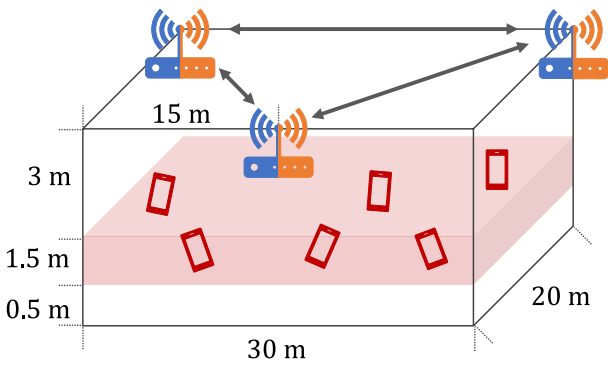


図 7 測位空間

図 7 は測位空間を示している. 30 m×20 m×5 m の空間に, 3 局の AP が天井に設置され, AP らは *Initiator* と *Responder* の役割を巡回して担っている. 本検討では, 第 l 番目の FTM コネクションで *Responder* を担った AP は, 第 $l+1$ 番目で *Initiator* として第 l 番目で接続しなかった AP に対し FTM Request フレームを送信し, $L=3$ (すべての AP 間で *Initiator* と *Responder* が一巡) とする. 位置が未知の *Sniffer* は床から 0.5 m から 2 m の高さの測位空間に存在し, その値は各座標一様分布で与えられる. ただし, 電波伝搬において, 壁や天井, 床, 他の *Sniffer* などの障害物への反射等の影響はないものと想定し, FTM コネクション内での 2-way 間でのバイアス誤差のドリフト作用による時間変化は理想的に 0 とする. 本検討では式 (3) で示した計測誤差のみを考慮する. 送信時における計測誤差は, 受信時のそれと異なり電波の伝搬環境に依存しないことからガウシアンモデルで表せ, 平均 0, 標準偏差 10^{-9} s としている. 受信時の計測誤差について, [11] で誤差モデルが提案されている.

$$\sigma_{RX}(d) = \begin{cases} \sigma_0 (\log^{-1}(1.1) - 0.4427), & (d \leq 1.1 \text{ m}) \\ \sigma_0 (\log^{-1}(d) - 0.4427), & (1.1 \text{ m} < d \leq 2 \text{ m}) \\ \sigma_0 (1 + \log(d - 1)), & (d > 2 \text{ m}) \end{cases} \quad (36)$$

これは, 受信時の計測誤差の分散が距離 d に依存していることを表している. ただし, 本実験では STA 間の最短距離は 3 m であるため, 式 (3) 中の $d > 2$ m の場合のみの値を取ることに注意する.

通常, 多くの測位サービスでは, 高さ方向を除く 2 次元の位置を特定できれば良い. 特に対象が *Rover* で屋内測位であることを考えると, *Rover* の高さ方向の可動域は少ない (本実験でも 0.5 m から 2 m としている). しかし, 高さ方向まで推定しようとした場合, 3 局の AP では推定結果が $\hat{s}_K^{(0)}$ に大きく依存してしまい, 推定精度が不安定になる. そのため, 本検討では推定空間を 2 次元とし高さ方向は 1 m で固定している. これにより, 3 局の AP で安定した測位が可能となる.

次にアルゴリズムの終了条件について説明する. 本検討では終了条件に 2 つの条件を用いる. 1 つ目は $\|\Delta s_K^{(i-1)}\| - \|\Delta s_K^{(i)}\| \leq \|\Delta s_K^{(i)}\|$ で表され, これは更新量

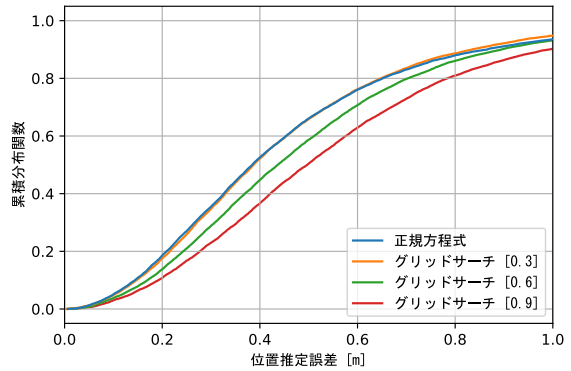


図 8 $M=64$ の時の位置推定誤差の累積分布関数
表 1 $M=64$ の時の位置推定誤差

	90P [m]	平均 [m]	標準偏差 [m]
グリッド (0.9)	0.99	0.55	0.34
グリッド (0.6)	0.90	0.50	0.31
グリッド (0.3)	0.83	0.45	0.30
正規方程式	0.87	0.46	0.34

が少なくなった判定を行っており, 真の場合, 終了条件が成立する. 2 つ目は $\|\underline{g}^{(i)}\| \geq \|\underline{g}^{(i-1)}\|$ で表され, ここでの $\underline{g}^{(i)}$ は式 (23), (27), (28) から計算できる. これが真の場合, 終了条件を満たし, これは推定位置の目的関数が増加した判定を行っている. この 2 つの終了条件はそれぞれ独立しており, 両方の条件が一度でも成立すれば終了し, すべての i の中で最も $\underline{g}^{(i)}$ が小さい $\hat{s}_K^{(i)}$ を推定位置として出力する.

図 8 に $M=64$ とした場合の位置推定誤差の累積分布関数を, 表 1 に位置推定誤差の 90 パーセンタイル, 平均, 標準偏差を示す. 提案手法を”正規方程式”とし, 比較対象にグリッドサーチ (グリッド幅 [m]=0.3, 0.6, 0.9) の結果も載せている. グリッドサーチは, グリッド幅を細かくすることで, 大きな計算量をとるが, グリッド幅の分解能で最適な推定が可能であるため, 比較対象とする. 提案手法はグリッド幅 0.3 m のグリッドサーチと同等の推定精度を示していることが図 8, 表 1 から確認できる. 標準偏差がグリッドサーチに比べ大きい理由としては, グリッドサーチでは測位空間のみで探索するが, 正規方程式による探索では測位空間という区切りがないため, 計測誤差により $\|\underline{g}^{(i)}\|$ が最小となる位置が測位空間外になる場合があるからである.

図 9 に FTM フレームの交換回数 M を変化させた時の位置推定誤差の累積分布関数を, 表 2 に位置推定誤差

表 2 M ごとの正規方程式の位置推定誤差

M	90P [m]	平均 [m]	標準偏差 [m]
8	2.54	1.38	1.27
16	1.77	0.96	0.73
32	1.21	0.66	0.49
64	0.87	0.46	0.34

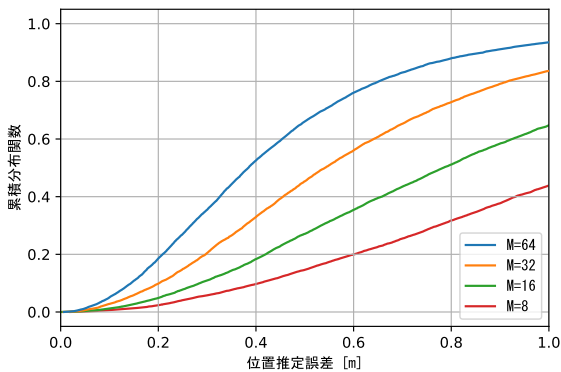


図9 M ごとの正規方程式の位置推定誤差の累積分布関数

差の90パーセンタイル、平均、標準偏差を示す。結果より M の増加に伴い推定精度の向上が大きく期待できるが、測位時間の増加のデメリットもある。ただし、 M による推定精度は計測誤差モデルに大きく影響を受けるため、この結果から最適な M を判断することはできないことに注意する。実際には、実環境におけるマルチパス環境や、STA の性能・配置からその環境に最適な M を設定することが推奨される。また、TDOA 測位の特徴として、Rover の位置が AP に近いほど計測誤差の影響を強く受けることが確認できた。このことから、 $|g[I] + d(I[I], R[I])|$ の値が $d(I[I], R[I])$ に漸近するほど、その接続の重みを下げるモデルにすることで更なる推定精度向上が期待できる。

6 おわりに

本稿では、[11]で提案された測距モデルを用いて、測位可能な端末数に制限のない測位システムを提案し、その性能を評価した。既存のFTMプロトコルによるRoverが直接APと通信するP2Pの形態では、Rover数が大きいと測位の順番待ちが発生してしまう問題があった。そこで、本稿では、AP間でFTM接続を張るネットワークを構成し、Roverはその接続のスニーフのみを行うことで測位可能な手法を提案した。本システムでは、Roverは常にパッシブで測位可能であるため、Rover数の制限は完全に撤廃され、秘匿性も確保できる。数値計算実験によって評価した結果、90パーセンタイル1m以下の推定精度で推定可能であることを示した。今後の課題として、実機実験による推定精度の評価を予定している。

謝辞

本研究はJSPS科研費JP22K12006の助成を受けたものです。

参考文献

[1] "IEEE Standard for Information Technology-Telecommunications and Information Exchange between Systems - Local and Metropolitan Area Networks-Specific Requirements - Part 11: Wire-

less LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications," in IEEE Std 802.11-2020 (Revision of IEEE Std 802.11-2016), vol., no., pp.1-4379, 26 Feb. 2021, doi: 10.1109/IEEESTD.2021.9363693.

- [2] 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," the 24th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking, pp. 417-427, 2018.
- [3] B. Horn, "Doubling the accuracy of indoor location: Frequency diversity," Sensors, vol. 20, no. 5, p. 1489, 2020.
- [4] 平山裕介, 小嶋直希, 鈴木太智, 間邊哲也, "Wi-fi rttを用いた位置特定手法の屋内環境での性能評価," 信学技報, vol. 119, no. 472, pp. 25-30, mar 2020.
- [5] Y. Takahashi, N. Honma, J. Sato, T. Murakami and K. Murata, "Accuracy Comparison of Wireless Indoor Positioning Using Single Anchor: TOF only Versus TOF-DOA Hybrid Method," 2019 IEEE Asia-Pacific Microwave Conference (APMC), Singapore, 2019, pp. 1679-1681, doi: 10.1109/APMC46564.2019.9038530.
- [6] S. Li, M. Hedley, K. Bengston, D. Humphrey, M. Johnson and W. Ni, "Passive Localization of Standard WiFi Devices," in IEEE Systems Journal, vol. 13, no. 4, pp. 3929-3932, Dec. 2019, doi: 10.1109/JSYST.2019.2903278.
- [7] 小菅義夫 and 古賀禎 and 宮崎裕己, "TOA 測位とTDOA 測位の関連", 電子情報通信学会, vol.114, no. 397, pp. 79-84, jan 2015.
- [8] L. Banin, O. Bar-Shalom, N. Dvorecki, and Y. Amizur, "Scalable wi-fi client self-positioning using cooperative ftm-sensors," IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 68, no. 10, pp. 3686- 3698, 2019.
- [9] L. Banin, O. Bar-Shalom, N. Dvorecki, and Y. Amizur, "High-accuracy indoor geolocation using collaborative time of arrival (ctoa)- whitepaper," IEEE, vol. 802, p. 17, 2017.
- [10] 藤井雅弘, "FTM ネットワークの拡張による高精度位置推定に関する一検討," 信学技報, vol.120, no. 290, pp. 79-84, dec 2020.
- [11] I. Martin-Escalona and E. Zola, "Passive Round-Trip-Time Positioning in Dense IEEE 802.11 Networks," Electronics, vol. 9, no. 8, p. 1193, Jul. 2020.