

FTM プロトコルの拡張による同時測位可能端末数に制限のない測位システムに関する一検討

A study on positioning system for unlimited number of terminals based on extended FTM protocol

藤井 雅弘*
Masahiro Fujii

1 はじめに

近年、到来時間 (ToF (Time of Flight)) に基づく測距をサポートする無線 LAN チップセットが市場展開されつつある。これは、IEEE802.11mc 規格上での FTM (Fine Timing Measurement) 技術に基づいている。FTM による測距原理は、送受信機間のフレーム伝送に基づいており、その伝搬時間差から送受信機間の距離を計測可能である。FTM による測距性能の実環境での検証が [1] や [2] などで行われている。また、1 次元的な空間での測距に基づく測位実験が [3] や [4] で報告されている。測距は ToF に基づく手法以外にも RSSI (Received Signal Strength Indicator) に基づく手法が知られているが、測位に関して FTM と RSSI に基づくものとの比較も報告されている [5]。また、FTM と到来角度の情報に基づく位置推定に関する実装評価に関する検討 [6] や、機械学習のアプローチと最尤推定の比較に関する検討 [7] が行われている。

これまでの関連研究では、位置が未知の無線 LAN 端末の移動体 (本稿では *Rover* と呼ぶ) の位置を推定するために、位置が既知の無線 LAN の AP (Access Point) と *Rover* が FTM プロトコルに基づいてフレーム伝送を行い測距を行っている。3 次元空間上での測位は、3 局以上の AP と *Rover* 間のそれぞれの距離が計測できれば、原理的に可能である。しかし、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 つの通信チャンネルを利用できるのは、1 つの *Rover* と AP のペアの間の接続に限られる。したがって、ある *Rover* が 3 局以上の AP 間で測距を行うためには、3 回以上 FTM コネクションを張る必要が生じる。したがって、*Rover* 数に比例して、測位に要する時間は長くなる。このような測位は、*Rover* 数が少ない場合は許容できるかもしれないが、*Rover* 数が数十、数百となると、測位に基づくサービスがタイムアウトする *Rover* が発生することが懸念される。Banin らは、複数の AP が協調して FTM プロトコルを運用することで、測位可能な *Rover* 数に制限のない手法を提案した [8][9]。しかしながら、これらの手法では、*Rover* の位置と同時に、端末の時計の持つバイアス誤差も推定する必要がある。そこで、本稿では、従来の FTM プロトコルに互換性のある拡張を導入し、FTM プロトコルによる測距アルゴリズムに内在しているバイアス誤差の相殺の特徴を利用して、平易な

*宇都宮大学 Utsunomiya University

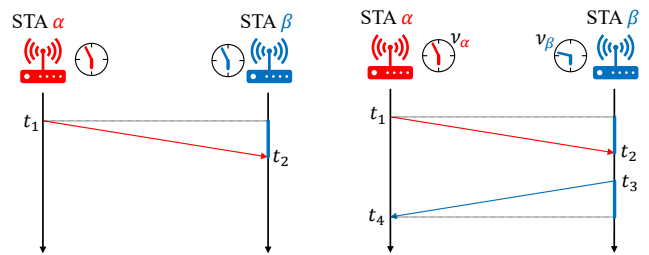


図 1 時刻同期を前提にした 1-way での測距

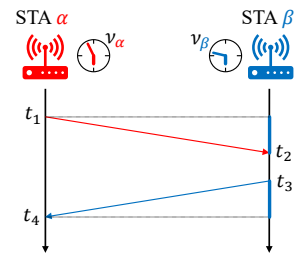


図 2 時刻非同期を前提にした 2-way での測距

計算によってバイアス誤差の推定の必要のない測距方式を提案する [10]。この提案測距手法に基づき、同時測位 *Rover* 数に制限のない測位手法を提案し、数値計算実験により、その有効性を示す。

2 測距、測位と時計のバイアス誤差

本節では、ToF に基づく測距と測位における時計のバイアス誤差の影響について議論する。ToF は送受信機間の信号の伝搬時間差に光速を乗じて送受信機間の距離を計測する技術である。図 1 の場合、STA α から送信された信号が STA β に到達するまでの一方向 (1-way) のフレーム伝送が行われる。STA α でのフレーム送信時刻 t_1 の情報を STA β で得ることができれば、STA β でのフレーム受信時刻 t_2 との差分 $t_2 - t_1$ に光速 c を乗じることで、STA α と STA β の間の距離を計測可能である。しかしながら、この方法は、送受信機双方の時計に誤差がないことが条件となる。時刻の計測には、時計そのものの絶対時刻からの誤差であるバイアス誤差と、時刻を計測する際に発生する計測誤差の 2 種類が存在する。送受信機間の時計の完全同期は不可能であるので、STA 毎に異なるバイアス誤差の発生は避けられない。例えば、送受信機間の時計の同期誤差に起因する測距誤差を 1 m 以下としたい場合、許容できる同期誤差は 3 ns 程度であり、安価な無線 LAN チップでこの同期誤差を達成できる精度を持った時計を具備することは困難である。

そこで、送受信機間のバイアス誤差を許容し、原理的にバイアス誤差を相殺して測距を行う方法が図 2 の例である。この場合、図のように双方向 (2-way) のフレーム伝送が必要である。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 の場合を考える。この時、2-way での双方の真の送受信時刻 t_1, t_2, t_3, t_4 の計測

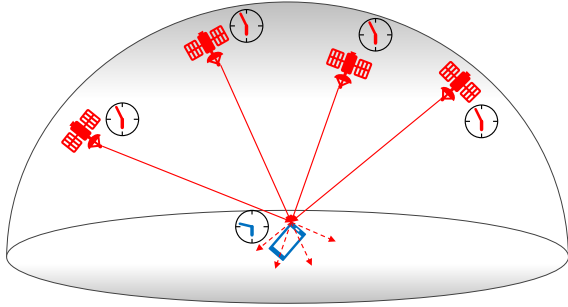


図 3 GPS における時計同期と測位は、計測誤差を無視する時、

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

として与えられる。先ほどと同様に、最初のフレームの送受信時刻の差は

$$\hat{t}_2 - \hat{t}_1 = (t_2 + v_\beta) - (t_1 + v_\alpha) = t_2 - t_1 + v_\beta - v_\alpha \quad (2)$$

となり、 $v_\beta - v_\alpha$ のバイアス誤差の差が測距誤差を引き起こす。そこで、

$$\begin{aligned} \hat{t}_2 - \hat{t}_1 + \hat{t}_4 - \hat{t}_3 \\ &= (t_2 + v_\beta) - (t_1 + v_\alpha) + (t_4 + v_\alpha) - (t_3 + v_\beta) \\ &= (t_2 - t_1) + (t_4 - t_3) \end{aligned} \quad (3)$$

なる計算を行うことで、送受信機間のバイアス誤差を相殺することができる。ただし、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。第 3 節で説明する FTM プロトコルに基づく測距はこの 2-way 方式である。

次に、測位と時計同期に関して、図 3 に示す GPS (Global Positioning System) における単独測位の例について説明する。GPS の衛星間では高精度な時計同期が施されており、フレーム伝送の形態は図 1 に示す衛星から Rover への 1-way 方式である。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。しかしながら、Rover は安価な GPS 受信機であるので、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。この Rover のバイアス誤差は図の破線で示す測距誤差として測位に多大な影響を与える。Rover の 3 次元空間上の位置を推定するためには最低 3 つの衛星間との距離が計測できれば良いが、この Rover のバイアス誤差も未知数として推定する必要があるために、必要な観測数が 1 増加し、GPS での測位では 4 つ以上の衛星からの信号の観測が必要とされる。もし、衛星間の時計同期も想定できないとすると、衛星のバイアス誤差も推定する必要が生じ、1-way での測距に基づく測位は不可能となる。このように、ToF での測距に基づく測位システムでは、STA の時計のバイアス誤差の考慮が本質的に重要である。

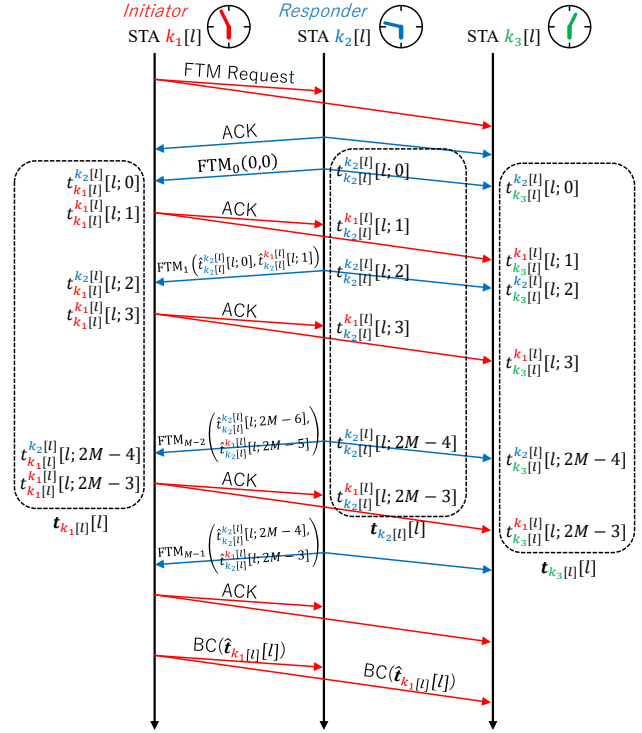


図 4 FTM とその拡張のタイムライン

3 FTM による測距

3.1 時刻の計測

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 4 は第 l 番目の FTM コネクションの例を示す。第 l 番目の FTM コネクションにおいて、STA $k_1[l]$ が Initiator を STA $k_2[l]$ が Responder の役割を担っているとする。図中の $t_\beta^\alpha[l; m]$ は第 l 番目の FTM コネクションにおいて、STA α が送信し、STA β が受信した第 m 番目のフレームの送信または受信の真の絶対時刻を意味する。 $\alpha = \beta$ の時は送信時刻を、 $\alpha \neq \beta$ の時は受信時刻を意味する。例えば、図 4 の上部の FTM₀ に関して、 $t_{k_2}^{k_2}[l; 0]$ は第 l 番目の FTM コネクションにおいて、STA $k_2[l]$ が第 0 番目のフレームを送信した真の絶対時刻を示し、 $t_{k_1}^{k_1}[l; 0]$ はそのフレームを STA $k_1[l]$ が受信した時の真の絶対時刻を表す。

本検討では、真の絶対時刻 $t_\beta^\alpha[l; m]$ は

$$\hat{t}_\beta^\alpha[l; m] = Q_{T_{res}} \left(t_\beta^\alpha[l; m] + v_\beta[l; m] + \tilde{n}_\beta^\alpha[l; m] \right) \quad (4)$$

として計測されると想定する。ここで、 $v_\beta[l; m]$ は時刻を計測する STA β の時計の指し示す時刻と真の絶対時刻との差であり、第 2 節で説明したバイアス誤差である。また、バイアス誤差は時計の駆動原理に基づくドリフト作用により時間とともに変化する。したがって、フレーム毎の計測によって変化する可能性があるため $[l; m]$ に依存する。

また、 $\tilde{n}_\beta^\alpha[l; m]$ は、 $\alpha = \beta$ の時は STA $\alpha(=\beta)$ がフレーム送信した際に、自身の時計で計測した時の計測誤差である。 $\alpha \neq \beta$ の時は STA α が送信したフレームを STA β が受信した際の計測誤差である。受信時の計測誤差は、

たとえ送受信機間が見通しであったとしても、マルチパス伝搬による遅延波により直接波のフレームプリアンプルの同期捕捉時刻の計測揺らぎ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。また、これらの計測誤差は $[l; m]$ に関して独立に変動する確率変数の標本として取り扱うことができ、本稿では

$$\tilde{n}_\beta^\alpha[l; m] \sim \begin{cases} \mathcal{N}(0, \sigma_{\text{TX}}^2), (\alpha = \beta) \\ \mathcal{N}(0, \sigma_{\text{RX}}^2), (\alpha \neq \beta) \end{cases} \quad (5)$$

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、計測雑音 $\tilde{n}_\beta^\alpha[l; m]$ にバイアス的な平均成分が存在する場合であっても、これはバイアス誤差 $v_\beta[l; m]$ に包含されていると考えても、その一般性は失われないので、平均は 0 と考えることができる。

次に、量子化関数 $Q_{T_{res}}$ について説明する。STA の持つ時計の分解能は有限であり、第 3.3 節で説明する FTM プロトコルでは、計測時刻を情報としてフレームのフィールドに記載して伝送するため、そのフィールドのビット数で表現できる時間分解能の制約を受ける。FTM フレームのフィールドではピコ秒単位で記述されるが、現実的な時計の計測精度はナノ秒かサブナノ秒程度である。つまり、時刻は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。本稿では、この量子化の関数を $Q_{T_{res}}$ で表す。 T_{res} は時計分解能を表し、例えば、計測の単位がナノ秒であれば、 $T_{res} = 1000$ ps となる。量子化誤差が平均 0 のガウス性を有すると想定すると、量子化に起因する誤差を計測誤差 $\tilde{n}_\beta^\alpha[l; m]$ と合わせて、式 (4) は

$$\hat{i}_\beta^\alpha[l; m] = t_\beta^\alpha[l; m] + v_\beta[l; m] + n_\beta^\alpha[l; m] \quad (6)$$

と書き直すことができる。ここで、 $n_\beta^\alpha[l; m]$ は計測誤差 $\tilde{n}_\beta^\alpha[l; m]$ と量子化関数 $Q_{T_{res}}$ に起因する量子化誤差を合成したもので、以降、 $n_\beta^\alpha[l; m]$ を改めて計測誤差と呼ぶ。 $n_\beta^\alpha[l; m]$ の平均はやはり 0 であるが、その分散は $\tilde{n}_\beta^\alpha[l; m]$ のそれより大きくなる。もし、 $\tilde{n}_\beta^\alpha[l; m] = 0$ であっても、計測の分解能に起因する量子化誤差の影響は避けられない。

3.2 位置と距離

本稿では、全ての STA はある 1 つの FTM コネクションの間ではその位置が変化しないが、異なる FTM コネクションではその位置が変化すると想定する。今、第 l 番目の FTM コネクションの間での STA α の 3 次元空間での位置を $s_\alpha[l] = [s_{\alpha,x}[l] \ s_{\alpha,y}[l] \ s_{\alpha,z}[l]]^T$ と表すこととする。 T は転置を意味し、ボールド体を縦ベクトルとして表記する。この時、STA α と STA β 間の距離は

$$d_\beta^\alpha[l] = \|s_\alpha[l] - s_\beta[l]\| \quad (7)$$

と書くことができる。ここで、 $\|\cdot\|$ はノルムを意味する。当然、 $d_\beta^\beta[l] = d_\alpha^\alpha[l]$ 、 $d_\alpha^\alpha[l] = 0$ を満たす。また、STA α

から時刻 $t_\alpha^\alpha[l; m]$ に送信されたフレームが STA $\beta (\neq \alpha)$ で時刻 $t_\beta^\alpha[l; m]$ に受信されたとき、この送受信時間差は送受信機間距離 $d_\beta^\alpha[l]$ と光速 c を用いて

$$d_\beta^\alpha[l] = c \times (t_\beta^\alpha[l; m] - t_\alpha^\alpha[l; m]) \quad (8)$$

のように書ける。

ここで、 $\beta \neq \gamma$ の条件の下、第 l 番目の FTM コネクションにおける第 m 番目のフレームが STA α から送信され、STA β で受信したときの計測時刻 $\hat{i}_\beta^\alpha[l; m]$ と、同じフレームを STA γ で受信したときの計測時刻 $\hat{i}_\gamma^\alpha[l; m]$ の差を光速の半分で正規化し

$$\begin{aligned} r_{\beta,\gamma}^\alpha[l; m] &= \frac{c}{2} (\hat{i}_\beta^\alpha[l; m] - \hat{i}_\gamma^\alpha[l; m]) \\ &= \frac{1}{2} \left\{ d_\beta^\alpha[l] - d_\gamma^\alpha[l] + c (v_\beta[l; m] - v_\gamma[l; m]) \right. \\ &\quad \left. + c (n_\beta^\alpha[l; m] - n_\gamma^\alpha[l; m]) \right\} \end{aligned} \quad (9)$$

を定義しておく。ここで、第 1 式から第 2 式への変形は式 (8) を用いた。

3.3 測距のための FTM プロトコル

図 4 に示す第 l 番目の FTM コネクションの例を用いて、既存の FTM プロトコルによる測距について説明する。まず、*Initiator* である STA $k_1[l]$ が、*Responder* である STA $k_2[l]$ に向けて FTM Request フレームを送信する。これを受け取った *Responder* は *Initiator* に対して ACK を返送する。この 2-way のハンドシェイクが FTM プロトコルによる測距のトリガーとなる。以降のプロセスにおいて、*Initiator* と *Responder* は FTM フレームや ACK フレームの送受信時刻の計測を全て記録しておく。引き続き、*Responder* が *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) のフィールドが存在し、フレームの送信時刻と受信時刻を記載できる。ただし、FTM₀ では記載する ToD と ToA の情報がないため、それぞれ 0 として送信する。FTM₀ を受信した *Initiator* は、*Responder* 宛に ACK を返送する。続いて、*Responder* は FTM₁ の ToD フィールドに FTM₀ の送信時刻の計測 $\hat{i}_{k_2[l]}^{k_2[l]}[l; 0]$ を、ToA フィールドに直前の ACK の受信時刻の計測 $\hat{i}_{k_2[l]}^{k_1[l]}[l; 1]$ を書き込み、*Initiator* 宛に送信する。これを受信した時点で、*Initiator* では、FTM₁ のフィールド内の $(\hat{i}_{k_2[l]}^{k_2[l]}[l; 0], \hat{i}_{k_2[l]}^{k_1[l]}[l; 1])$ と、自身で計測した $(\hat{i}_{k_1[l]}^{k_2[l]}[l; 0], \hat{i}_{k_1[l]}^{k_1[l]}[l; 1])$ を利用できる。

次に、式 (3) で簡易的に説明した 2-way での測距について詳細に説明する。この 4 つの計測時間情報から、式 (9) を用いて第 0 番目のフレーム (FTM₀) に関する $r_{k_1[l],k_2[l]}^{k_2[l]}[l; 0]$ と、第 1 番目のフレーム (ACK) に関する $r_{k_2[l],k_1[l]}^{k_1[l]}[l; 1]$ をそれぞれ計算することができ、その

和は

$$\begin{aligned}
 & r_{k_1[l],k_2[l]}^{k_2[l]}[l;0] + r_{k_2[l],k_1[l]}^{k_1[l]}[l;1] \\
 &= d_{k_2[l]}^{k_1[l]}[l] + \zeta_{k_1[l],k_2[l]}[l;0] \\
 &+ \frac{c}{2} (\nu_{k_1[l]}[l;0] - \nu_{k_1[l]}[l;1] - \nu_{k_2[l]}[l;0] + \nu_{k_2[l]}[l;1])
 \end{aligned} \quad (10)$$

として与えられる。ここで、

$$\begin{aligned}
 \zeta_{\alpha,\beta}[l;m] &= \frac{c}{2} \left(n_{\alpha}^{\beta}[l;2m] - n_{\beta}^{\alpha}[l;2m] \right. \\
 &\quad \left. + n_{\beta}^{\alpha}[l;2m+1] - n_{\alpha}^{\beta}[l;2m+1] \right)
 \end{aligned} \quad (11)$$

は計測誤差の線形結合による成分である。ここで、式(10)の右辺の第3項の括弧内に着目すると、前半の $\nu_{k_1[l]}[l;0] - \nu_{k_1[l]}[l;1]$ はSTA $k_1[l]$ のバイアス誤差の差であり、後半の $-\nu_{k_2[l]}[l;0] + \nu_{k_2[l]}[l;1]$ はSTA $k_2[l]$ 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とともに変化するが、その変動の時定数がFTM₀とそのACKの2-wayのフレーム伝送の間より十分長く、その変化が無視できるほど小さい想定できる時、式(10)の第3項を構成するそれぞれのSTAのバイアス誤差は相殺される。その結果、式(10)はInitiatorであるSTA $k_1[l]$ とResponderであるSTA $k_2[l]$ の間の距離 $d_{k_2[l]}^{k_1[l]}[l]$ と計測誤差成分 $\zeta_{k_1[l],k_2[l]}[l;0]$ の和となる。このようにFTMプロトコルでは、この2-wayのフレーム伝送により送受信機双方のバイアス誤差を相殺して、送受信機間の距離を推定することができる。

通常、FTMプロトコルでは複数回のFTMフレームとそのACKの2-wayのフレーム伝送に関する時刻計測を継続する。以降、同様に、Responderは直前のFTMフレームの送信時刻の計測とACKフレームの受信時刻の計測をFTMフレームのToDとToAフィールドに記載してInitiator宛に送信し、Initiatorはそれに対するACKフレームを返送する2-wayのフレーム伝送を規定の $M(\geq 2)$ 回行う。前述の2-wayのフレーム伝送間でのバイアス誤差の変化が無視できるほど小さいと仮定できると $d_{k_2[l]}^{k_1[l]}[l]$ の推定値として

$$\begin{aligned}
 & \hat{d}_{k_2[l]}^{k_1[l]}[l] \\
 &= \frac{1}{M-1} \sum_{m=0}^{M-2} \left(r_{k_1[l],k_2[l]}^{k_2[l]}[l;2m] + r_{k_2[l],k_1[l]}^{k_1[l]}[l;2m+1] \right) \\
 &\approx d_{k_2[l]}^{k_1[l]}[l] + \bar{\zeta}_{k_1[l],k_2[l]}[l]
 \end{aligned} \quad (12)$$

を得ることができる。ここで、

$$\bar{\zeta}_{k_1[l],k_2[l]}[l] = \frac{1}{M-1} \sum_{m=0}^{M-2} \zeta_{k_1[l],k_2[l]}[l;m] \quad (13)$$

は式(11)の計測誤差成分を平滑化したものである。また、バイアス誤差の時間変化の微小条件($\nu_{\alpha}[l;2m] \approx \nu_{\alpha}[l;2m+1]$)は、2-wayのフレーム伝送間でのみ満

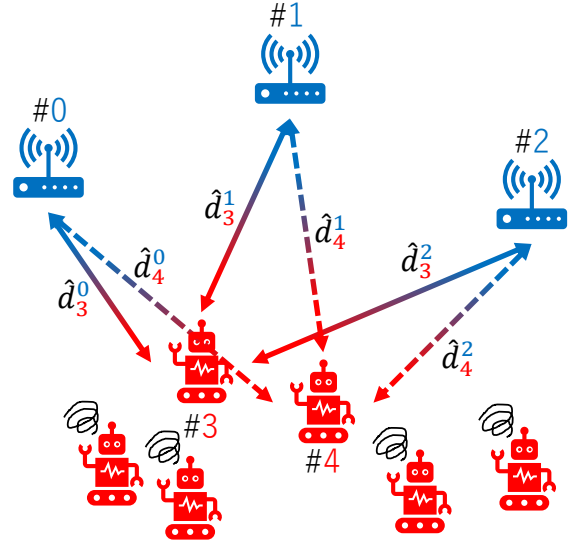


図5 FTMによる測距に基づく測位の課題

たされればよく、FTMコネクション全体の時間区間で満たされる必要はないことに注意する。計測誤差成分 $\bar{\zeta}_{k_1[l],k_2[l]}[l]$ の分散の下界は

$$E \left\{ \left\| \bar{\zeta}_{k_1[l],k_2[l]}[l] \right\|^2 \right\} \geq \frac{c^2(\sigma_{TX}^2 + \sigma_{RX}^2)}{2(M-1)} \quad (14)$$

として与えられる。これは、FTMコネクション内の2-wayのフレーム伝送の回数 M を増加させれば、計測誤差の分散は小さくなることを意味している。ただし、 M の増加は計測にかかる時間の増加を引き起こすので、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

これまで見たように、1回のFTMコネクション内での $M(\geq 2)$ 回の2-wayのフレーム交換により、式(12)を用いてInitiatorとResponderの距離を推定することが可能である。次に測距に基づく測位について議論する。3局以上の位置が既知のSTAとRoverの間の距離がわかれば、原理的に3次元空間での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では、RoverがInitiatorとなり、位置が既知のAPがResponderとして運用される。図5にFTM測距に基づく測位例を示す。この例では、RoverであるSTA 3がInitiator ($k_1[l] = 3, (l = 0, 1, 2)$)として動作する例である。第0番目のFTMコネクションではAPであるSTA 0がResponder ($k_2[0] = 0$)、第1番目のFTMコネクションではAPであるSTA 1がResponder ($k_2[1] = 1$)、第2番目のFTMコネクションではAPであるSTA 3がResponder ($k_2[1] = 2$)として動作し、RoverはそれぞれのAPと測距を行う。したがって、STA 3が3局のAPと測距を完了するために、3回のFTMコネクションが必要になる(図中の実線矢印)。IEEE802.11規格の無線LANの変復調方式では同時での多元接続は不可能であるため、1つのRoverの測距のために最低3回のFTMコネクションのために回線が占有される。次に、RoverとしてSTA 4

が *Initiator*, ($k_1[l] = 4, (l = 3, 4, 5)$) として動作するとき, STA 0, STA 1 と STA 2 が *Responder* としてやはり 3 回の FTM コネクションのために回線を占有することになる (図中の破線矢印). したがって, 測位を要求する *Rover* 数が増加すると, 要する FTM コネクション数も線形ではあるが増加する. 駅やスタジアム, または多数のロボットが稼働している配送施設などで *Rover* 数が数十, 数百と増えていくと, 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 フレームスニファアとブロードキャスト拡張による測位

本節では, 既存の FTM プロトコルに拡張を加えることで, 同時測位可能な *Rover* 数に制限のない測位アルゴリズムについて提案する. 図 4 に示すように, これまでと同様, 第 l 番目の FTM コネクションにおいて, STA $k_1[l]$ が *Initiator* として, STA $k_2[l]$ が *Responder* として動作している. 加えて, 図の最右の第 3 者として FTM プロトコルに対応した STA $k_3[l]$ の存在を新たに導入する. この STA $k_3[l]$ は FTM Request フレーム, FTM フレーム, ACK フレームの全てを受信・解析することが可能で, それらのフレームの自身の受信時刻を *Initiator* や *Responder* と同一の時間分解能で計測可能であるとする. STA $k_3[l]$ は特別な機能を持たず, *Initiator* や *Responder* である STA $k_1[l]$ や STA $k_2[l]$ と同等の性能を持つ通常の STA である. ただし, 図 4 に示すように, STA $k_3[l]$ はフレームの受信のみを行い, 送信は行わない.

Initiator からの FTM Request と *Responder* からの ACK をトリガーとして, STA $k_3[l]$ はフレーム受信時刻の計測を開始し, この FTM コネクションの間で

$$\hat{\mathbf{i}}_{k_3[l]}[l] = \left[\hat{i}_{k_3[l]}^{k_2[l]}[l; 0], \hat{i}_{k_3[l]}^{k_1[l]}[l; 1], \dots, \hat{i}_{k_3[l]}^{k_2[l]}[l; 2M-4], \hat{i}_{k_3[l]}^{k_1[l]}[l; 2M-3] \right]^T \quad (15)$$

を計測可能である. 第 3.3 節で説明したように, *Responder* である STA $k_2[l]$ 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, このフレームは STA $k_3[l]$ においても傍受することができる (フレームスニファア). したがって, STA $k_3[l]$ もまた STA $k_1[l]$ と同じく

$$\hat{\mathbf{i}}_{k_2[l]}[l] = \left[\hat{i}_{k_2[l]}^{k_2[l]}[l; 0], \hat{i}_{k_2[l]}^{k_1[l]}[l; 1], \dots, \hat{i}_{k_2[l]}^{k_2[l]}[l; 2M-4], \hat{i}_{k_2[l]}^{k_1[l]}[l; 2M-3] \right]^T \quad (16)$$

を得ることができる. STA $k_3[l]$ における $\hat{\mathbf{i}}_{k_2[l]}[l]$ と $\hat{\mathbf{i}}_{k_3[l]}[l]$ は, 通常の FTM プロトコルの範疇で収集可能である.

本提案方式では, *Initiator* である STA $k_1[l]$ が記録している

$$\hat{\mathbf{i}}_{k_1[l]}[l] = \left[\hat{i}_{k_1[l]}^{k_2[l]}[l; 0], \hat{i}_{k_1[l]}^{k_1[l]}[l; 1], \dots, \hat{i}_{k_1[l]}^{k_2[l]}[l; 2M-4], \hat{i}_{k_1[l]}^{k_1[l]}[l; 2M-3] \right]^T \quad (17)$$

を図 4 の最下部に示すように, 通常の FTM コネクション終了後にブロードキャストする拡張を導入する. この拡張は, *Responder* が FTM フレームを送信する際に ToD と ToA フィールドに記載する内容を, 1 つのブロードキャストフレームで送信する必要があるが, この送信ビット数は, 時刻表現のためのビット数の高々 $2(M-3)$ 倍程度であり, *Responder* が送信する FTM フレームの全長よりも短い. STA $k_3[l]$ もこのブロードキャストフレームを受信できるので, STA $k_3[l]$ では図 4 に示す時刻の計測の全て $\{\hat{\mathbf{i}}_{k_1[l]}[l], \hat{\mathbf{i}}_{k_2[l]}[l], \hat{\mathbf{i}}_{k_3[l]}[l]\}$ を利用可能となる.

この計測時刻情報が集約された時に,

$$\begin{aligned} u[l; m] &= r_{k_3[l], k_1[l]}^{k_2[l]}[l; 2m] + r_{k_3[l], k_2[l]}^{k_2[l]}[l; 2m] \\ &\quad - r_{k_3[l], k_1[l]}^{k_1[l]}[l; 2m+1] - r_{k_3[l], k_2[l]}^{k_1[l]}[l; 2m+1] \\ &= d_{k_3[l]}^{k_2[l]}[l] - d_{k_3[l]}^{k_1[l]}[l] + \eta[l; m] \\ &\quad + \frac{c}{2} \{v_{k_1[l]}[l; 2m+1] - v_{k_1[l]}[l; 2m] \\ &\quad + v_{k_2[l]}[l; 2m+1] - v_{k_2[l]}[l; 2m] \\ &\quad + 2(v_{k_3[l]}[l; 2m] - v_{k_3[l]}[l; 2m+1])\} \quad (18) \end{aligned}$$

なる計算手法を提案する. ここで,

$$\begin{aligned} \eta[l; m] &= \frac{c}{2} \{2n_{k_3[l]}^{k_2[l]}[l; 2m] - n_{k_1[l]}^{k_2[l]}[l; 2m] - n_{k_2[l]}^{k_2[l]}[l; 2m] \\ &\quad - 2n_{k_3[l]}^{k_1[l]}[l; 2m+1] + n_{k_1[l]}^{k_1[l]}[l; 2m+1] + n_{k_2[l]}^{k_1[l]}[l; 2m+1]\} \quad (19) \end{aligned}$$

は, 式 (11) と同様の計測誤差項を集約したものである. 式 (18) の第 2 式の第 4 項の括弧内に着目すると, 3 局の STA における 2-way のバイアス誤差の差の形式になっている. したがって, 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時間変化の微小条件 ($v_\alpha[l; 2m] \approx v_\alpha[l; 2m+1]$) が満足される時, 3 局の STA のバイアス誤差は全て相殺され, 式 (18) は

$$u[l; m] \approx d_{k_3[l]}^{k_2[l]}[l] - d_{k_3[l]}^{k_1[l]}[l] + \eta[l; m] \quad (20)$$

と近似できる. 計測誤差成分 $\eta[l; m]$ の統計的性質は $n_\beta^\alpha[l; m]$ のそれを引き継いでいるので, 平滑化により計測誤差の分散の軽減を目的として,

$$\begin{aligned} \Delta d_{k_3[l]}^{\hat{\mathbf{i}}_{k_1[l]}, k_2[l]}[l] &= \frac{1}{M-1} \sum_{m=0}^{M-2} u[l; m] \\ &\approx d_{k_3[l]}^{k_2[l]}[l] - d_{k_3[l]}^{k_1[l]}[l] + \bar{\eta}[l] \quad (21) \end{aligned}$$

なる処理を行う. ここで,

$$\bar{\eta}[l] = \frac{1}{M-1} \sum_{m=0}^{M-2} \eta[l; m] \quad (22)$$

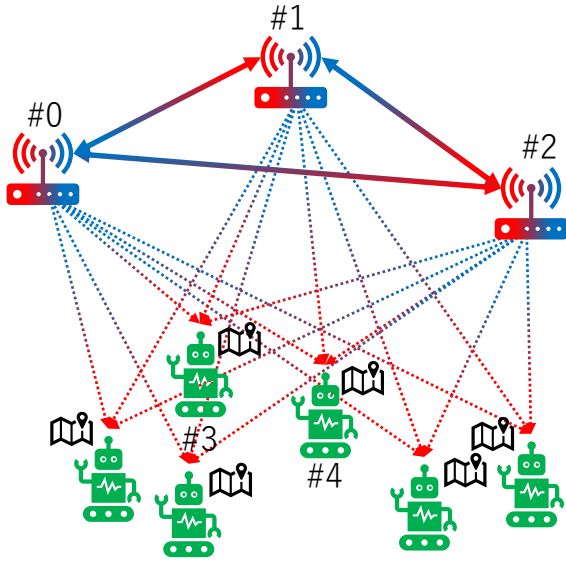


図 6 提案測位方式

とした。 $\bar{\eta}[l]$ 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、分散の下限は

$$E \{ \|\bar{\eta}[l]\|^2 \} \geq \frac{c^2 (\sigma_{TX}^2 + 5\sigma_{RX}^2)}{2(M-1)} \quad (23)$$

与えられる。やはり、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、計測雑音の平滑効果が期待できる。ただし、式 (14) で与えられる通常の FTM プロトコルに基づく測距の際の計測誤差の分散の下限と比較すると、3 局分の STA の計測誤差を合成しているため、分散の下限は大きくなる。

STA $k_3[l]$ で集約された 3 局の STA での計測時刻情報 $\{\hat{t}_{k_1[l]}[l], \hat{t}_{k_2[l]}[l], \hat{t}_{k_3[l]}[l]\}$ を用いて、式 (18) に基づく計算を行うことで、3 局全てのバイアス誤差を全て相殺した距離に関する計測が得られる。ただし、通常の FTM プロトコルに従って計測された式 (12) に基づく *Initiator* と *Responder* 間の距離の推定値と異なり、式 (21) では、STA $k_2[l]$ と STA $k_3[l]$ 間の距離 $d_{k_3[l]}^{k_2[l]}[l]$ と STA $k_1[l]$ と STA $k_3[l]$ 間の距離 $d_{k_3[l]}^{k_1[l]}[l]$ の差分として計測されることに注意する。

4.1 提案測位手法

本節では、式 (21) により得られる 3 局の STA 間のバイアス誤差に対して配慮不要の距離の差分を用いた測位について提案する。通常の FTM プロトコルでは 1 つの *Rover* の測位のために、最低 3 回の FTM コネクションの時間が必要となり、*Rover* 数が増加するとタイムアウトの恐れが発生することを第 3.4 節で説明した。これは、測位を行う *Rover* がフレーム送信を行う *Initiator* として動作することに起因している。そこで、本稿では、図 6 に示すように、*Initiator* と *Responder* の両方を位置が既知の AP が担い、*Rover* を本節で説明した図 4 の STA $k_3[l]$ として動作させて測位を行う手法を提案する。

これにより、*Rover* はフレームの受信だけを行い、送信は一切行わない。一方で、AP は位置が既知であるため、AP 間で FTM コネクションを張って測距を行うことは一見無意味であるが、*Rover* である STA $k_3[l]$ への計測時刻情報の提供を通じて、式 (21) による距離の差分の計測を行うことを目的としている。

図 6 を用いて、提案測位手法の例を説明する。図に示すように 3 次元空間上での測位に最低限必要な 3 局の AP が存在し、その周辺には多数の *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 0 が *Initiator*、STA 1 が *Responder* として FTM プロトコルに従いフレーム伝送と、FTM コネクション終了直前に提案システムで拡張したブロードキャストを行う。この時、測位を行う全ての *Rover* は、同時に提案手法の *Initiator* と *Responder* のフレームスニファート、*Initiator* からのブロードキャスト受信を行う。*Rover* の 1 つとして STA 3 に着目すると、 $\{\hat{t}_0[0], \hat{t}_1[0], \hat{t}_3[0]\}$ を収集でき、式 (21) により、自身と位置が既知の AP である STA 0 との距離と自身と STA 1 との距離の差分の計測 $\Delta d_3^{0,1}[0]$ を得る。これは、フレームスニファートとブロードキャスト受信が可能な全ての *Rover* で同時に行うことができる。引き続き第 1 番目の FTM コネクションでは STA 1 が *Initiator*、STA 2 が *Responder* として、FTM プロトコルと提案拡張に基づきフレーム伝送を行う。個々の *Rover* は同じく自身と STA 1 との距離と自身と STA 2 との距離の差分を計測する。次の第 2 番目の FTM コネクションでは STA 2 が *Initiator*、STA 0 が *Responder* として、FTM プロトコルと提案拡張に基づきフレーム伝送を行い、*Rover* は距離差分を計測する。ここまでの 3 回の FTM コネクションでの AP 間のフレーム伝送に関する計測から、*Rover* の 1 つである STA 3 では $\{\Delta d_3^{0,1}[0], \Delta d_3^{1,2}[1], \Delta d_3^{2,0}[2]\}$ の 3 つの計測を得ることができる。これを用いて、未知数である自由度 3 の 3 次元空間上での位置を推定することができる。*Rover* はフレームの受信のみしか行っていないので、全ての *Rover* でこの推定を同時に行うことができる。また、AP は電源に接続して運用できるが、バッテリーの制約のある *Rover* が測位のためにフレームを送信しない事は消費電力の観点からも優位である。

このように、提案測位手法では、既存の FTM プロトコルにおける *Initiator* と *Responder* を AP が担い、各々の計測時刻情報をブロードキャストし、図 4 の第 3 者としての STA $k_3[l]$ を *Rover* が担うことで、*Rover* では関係する全てのバイアス誤差を相殺した計測が得られ、その計測に基づいて測位が可能である。これは全ての *Rover* において同等であるため、第 3.4 節で説明した既存の FTM プロトコルによる測距に基づく同時測位可能な *Rover* 数が 1 となる制約は撤廃され、全ての *Rover* が同時に測距・測位を行える。これは第 2 節で説明した GPS による測位に類似している。GPS でもフレームを送信しているのは衛星のみで、*Rover* は受信のみを行う。GPS では高々数十の衛星で地球表面に存在する無数の *Rover* の同時測位を可能とするが、本提案測位手法でも、

最低 3 局の AP の通信範囲内で測位可能な Rover 数に制限はない。一方で、GPS では衛星は CDMA でフレーム送信を行っているが、本提案手法は無線 LAN のアクセス制御に従う必要があるため、時分割での AP のフレーム伝送を行う必要がある。また、本提案測位手法は GPS の地上での基準局を用いる相対測位と類似しているが、GPS の相対測位と異なり、特別な基準局を設置する必要はなく、Initiator と Responder がそれぞれ衛星と基準局の役割を時分割で担っているととらえることができる。

今、 K 局の位置が既知の AP で提案する FTM ネットワークが構築されているとして議論を進める。この K 局の AP はあらかじめ定められたペアの順番で巡回して FTM コネクションを張る。図 4 の Initiator である STA $k_1[l]$ と Responder である STA $k_2[l]$ はこのペアの順番で定められる。 $k_1[l]$ と $k_2[l]$ は集合 $\{0, \dots, K-1\}$ の要素のいずれかである。 K 局の AP による FTM ネットワークは GPS 衛星と同様に定常的に動作しており、測位が必要な Rover がそのエリアに入ったとき、Rover の自由なタイミングで測位を開始できる。Rover は無数に存在できるが、ここでは、Rover として第 K 番目の STA に着目して説明する。この Rover が、第 0 番目の FTM コネクションから計測を開始し、第 $L-1$ 番目 ($L \geq 1$) の FTM コネクションまでの計測を利用するとする時、 $k_3[l] = K, (l = 0, \dots, L-1)$ と書ける。各 FTM コネクションでの計測終了後に式 (21) を算出できるので、 $\Delta d_K^{k_1[l], k_2[l]}[l], (l = 0, \dots, L-1)$ が計測可能である。AP は固定して設置されるため、FTM コネクション毎にその位置は変化しない。また、Rover も $l = 0, \dots, L-1$ の FTM コネクションの間でその位置の変化が無視できるほど小さいとすると、STA の位置 $s_\alpha[l]$ は l に依存しなくなる。この時、Rover において、 $\Delta d_K^{k_1[l], k_2[l]}[l], (l = 0, \dots, L-1)$ が与えられたとき、式 (21) の $\hat{\eta}[l]$ の平均 0 のガウス性の仮定より、最尤規範を適用すると、最小化の目的関数を

$$\lambda(s) = \frac{1}{2} \sum_{l=0}^{L-1} \left(\Delta d_K^{k_1[l], k_2[l]} - \|s - s_{k_2[l]}\| + \|s - s_{k_1[l]}\| \right)^2 \quad (24)$$

とするとき、Rover の位置 s_K の最尤推定は

$$\hat{s}_K = \arg \min_{s \in \mathbb{R}^3} \lambda(s) \quad (25)$$

と与えられる。ここで、 \mathbb{R} は実数の集合である。式 (12) の距離の計測を用いた測位と比較して、提案手法での式 (21) は距離差の計測を用いた測位となるが、本質的に未知数が 3 の最適化問題に帰着する。いずれの場合でも、目的関数 $\lambda(s)$ が s に対して非線形の形式であるので、この最小化問題の解を閉じた形で得ることは不可能である。これは GPS での測位と同一であるので、本研究では、GPS 測位でも用いられる目的関数 $\lambda(s)$ のテーラー展開を 2 次項まで近似し準ニュートン法によって逐次的に解を得る手法を採用する [11]。

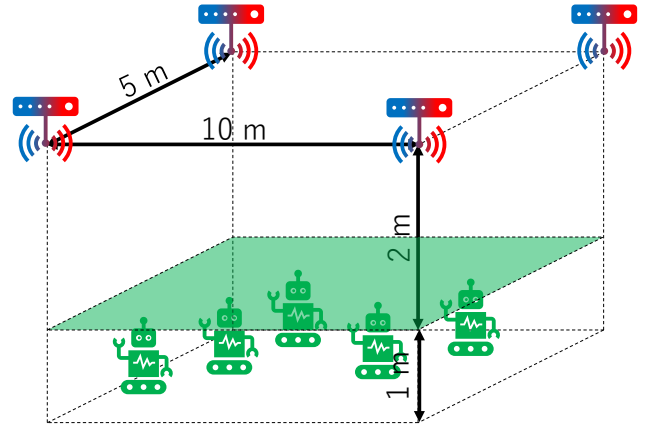


図 7 測位環境

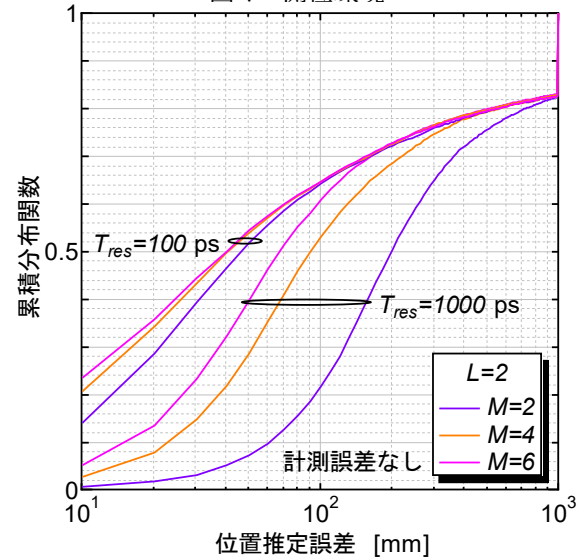


図 8 $L = 2$ の時の位置推定誤差の累積分布関数

5 数値計算例

本節では、提案測位手法の有効性を評価するために、位置推定誤差の検証を行う。図 7 に示すように、 $10 \text{ m} \times 5 \text{ m} \times 3 \text{ m}$ の空間において、部屋の天井に設置された 4 局の AP が Initiator と Responder の役割を巡回して担っている。Rover は床から 1 m の高さで無数に存在する。ただし、伝搬において壁や天井、床での反射や障害物の影響はない環境を想定する。また、FTM コネクション内での 2-way 間でのバイアス誤差の変化は無視できるほど小さいとする。本検討では、式 (4) で示された量子化関数 $Q_{T_{res}}$ に基づく量子化誤差に起因する計測誤差のみを考慮する。

図 8 に $L = 2$ の時の位置推定誤差に対する累積分布を示す。これは、2 回の FTM コネクションでの計測のみを用いるため、計測に含まれる AP は 3 局分のみであるので、3 次元空間での測位としての最小の計測の場合となる。FTM コネクション内での 2-way のフレーム伝送の回数である M を 2, 4, 6 と増加させると、計測誤差の平滑化が見込めるため、特性は改善される。また、計測の時間分解能 T_{res} を 1000 ps から 100 ps に細かくできれば、量子化誤差の影響は小さくなり、やはり、測位精度が改善される。しかしながら、 $L = 2$ の最小限の観測

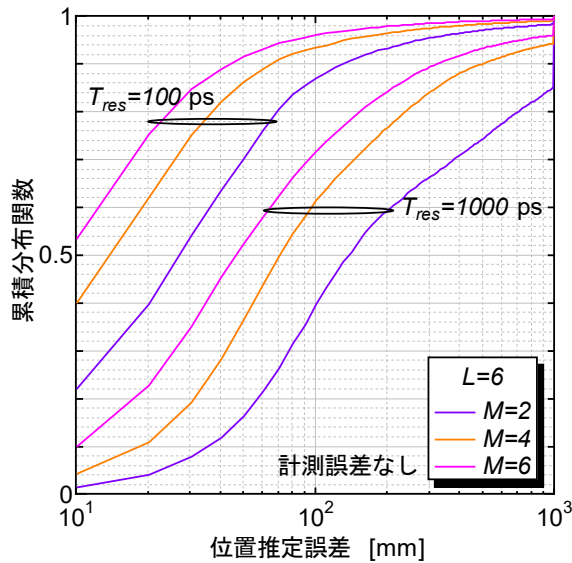


図 9 $L = 6$ の時の位置推定誤差の累積分布関数

数の条件では、1 m の位置推定誤差を達成できる場所率はおよそ 80 % で飽和してしまい、 $L = 2$ の計測だけでは不十分であると考えられる。

次に、図 9 に $L = 6$ とした場合の位置推定誤差の累積分布を示す。 $L = 6$ の場合、全ての AP 間で *Initiator* と *Responder* が一巡し、更に半周分の計測が利用可能である。 $L = 2$ の場合と比べると、最低でも 3 倍に計測時間が延長されるが、位置推定度は大幅に改善されている。例えば、100 ps の時間分解能で、 $M = 6$ とすれば、99 % 以上の場所率で 1 m 以下の精度で測位が可能である。測位に利用する FTM コネクション数 L と FTM コネクション内での 2-way のフレーム伝送回数 M を増加させれば、測位精度は改善されるが、計測に要する時間とのトレードオフの関係にある。時間分解能 T_{res} の向上も計測誤差の低減による測位精度の向上が期待できるが、デバイスコストの増加のデメリットがある。

6 おわりに

本稿では、従来の FTM プロトコルに互換性のある簡易な拡張を加えることで、同時測位可能な *Rover* 数に制限のない新しい測位手法を提案し、その性能を評価した。*Rover* が FTM プロトコルに基づき複数の AP 間で測距を行い測位を行う従来の手法では、*Rover* 数が大きい時、測位の順番待ちが発生してしまう問題があった。そこで、本研究では、AP 間で FTM プロトコルを運用し、*Rover* はそれを観察しているだけで測位可能な手法を提案した。提案手法では *Rover* は送信を行わないため、同時測位可能な *Rover* 数の制約は完全に撤廃できる。数値計算実験によって評価した結果、場所率 99 % で誤差 1 m 以下の測位が現実的な測位時間で達成可能であることを示した。

今後の課題として、FTM プロトコルと提案拡張を搭載した実機でのネットワークテストベッドを構築し、実環境での評価を行う予定である。

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] B. Horn, “Doubling the accuracy of indoor location: Frequency diversity,” *Sensors*, vol. 20, no. 5, p. 1489, 2020.
- [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] M. Ogawa and H. Choi, “Measurement accuracy of wi-fi ftm on actual devices,” *IEICE Communications Express*, vol. 1, pp. 1–6, 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] M. Bullmann, T. Fetzter, F. Ebner, M. Ebner, F. Deinzer, and M. Grzegorzec, “Comparison of 2.4 ghz wifi ftm-and rssi-based indoor positioning methods in realistic scenarios,” *Sensors*, vol. 20, no. 16, p. 4515, 2020.
- [6] M. Rea, T. E. Abrudan, D. Giustiniano, H. Claussen, V-M. Kolmonen, “Smartphone positioning with radio measurements from a single wifi access point,” the 2019 International Conference on emerging Networking EXperiments and Technologies, pp. 200–206, dec 2019.
- [7] N. Dvorecki, O. Bar-Shalom, L. Banin, Y. Amizur, “A Machine Learning Approach for Wi-Fi RTTRanging,” the 2019 International Technical Meeting of The Institute of Navigation, pp. 435–444, jan 2019.
- [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, “Highaccuracy 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] J. Nocedal and S. J. Wright, *Numerical Optimization*, second edition, Springer, New York, NY, USA, 2006.