

分散アンテナを用いたアクセスポイントによる無線 LAN 端末位置推定方式

Wireless LAN Station Position Estimation Method by Access Point using Distributed Antenna System

細田 真道¹⁾坂本 寛²⁾村上 友規²⁾花籠 靖¹⁾

Masamichi Hosoda

Hiroshi Sakamoto

Tomoki Murakami

Yasushi Hanakago

梅内 誠²⁾毛利 忠¹⁾小川 智明²⁾宮本 勝¹⁾

Makoto Umeuchi

Tadashi Mouri

Tomoaki Ogawa

Masaru Miyamoto

1 はじめに

大規模イベント等では多数の人が集まるため混雑し、スムーズに目的地まで移動できないことや、時には危険な状態が発生して事故につながることもある。そのため多数の人の流れ（以下、人流）をいかに把握し、いかに誘導して混雑緩和を図るかということが大きな課題となっており、その対策として混雑度予測システムが試験的導入される [1] などの対応が進められている。

人流を計測するための方法はいくつかあるが、そのうちの一つとして、歩行者が持つスマートフォンやタブレットなどの端末の位置を計測・推定（以下、測位）する方法が考えられる。測位可能な端末を持っていない歩行者や複数の測位可能端末を持っている歩行者がいる可能性もあるが、全体として十分な割合で測位可能端末を持つ歩行者がいれば、人流全体を母集団とし、そこから取り出した標本として端末の測位を行っているという考え方ができる。この際、プライバシーへの配慮が必要であるが、個々の端末を識別してある程度の時間だけ連続して測位することができれば、標本となる各歩行者の動線の一部を追跡することができ、それらを元にして母集団となる全体の人流を推定することができる。

本稿では、イベント運営者や施設管理者が人流を把握することを目的として、来場者が所持する端末の測位する方法を検討する。まず、従来の端末測位方式および本稿の目的で使用する場合の技術的課題について述べる。次に、その課題を解消するため、広く普及している無線 LAN (Wi-Fi) 機能を持った端末にアプリケーションなどをインストールする必要が無く、分散アンテナを用いた無線 LAN アクセスポイント（以下、AP）に帰属 (Association) するだけで、AP 側から測位し、歩行者動線を取得することができる新しい方式を提案する (図 1)。そして提案方式の有効性を確かめるため、1 次元 (直線) 測位を行う系を構築して実験を行い測位結果および評価を示す。最後に、フィールド実証としてこの系を来場者が多数集まる展示会で動作させ、実フィールドでの有効性を確かめる。

2 従来方式

通常の歩行者が持ち歩いているスマートフォンやタブレットなどの端末で従来から用いられている測位方式と、本稿の目的に利用する場合の技術的課題を述べる。

- 1) 日本電信電話株式会社 NTT サービスエボリューション研究所, NTT Service Evolution Laboratories, NTT Corporation.
- 2) 日本電信電話株式会社 NTT アクセスサービスシステム研究所, NTT Access Network Service Systems Laboratories, NTT Corporation.

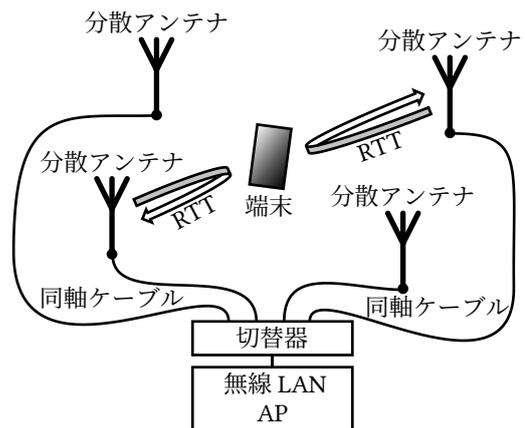


図 1 提案方式の構成

2.1 端末側からの測位

測位を行う場合は、端末が自身の測位を行う方式が広く用いられている。

2.1.1 人工衛星

GPS に代表される人工衛星による測位機能が搭載されている端末が広く普及している。この方法は端末が複数の人工衛星から送信される電波を受信し、それらの到着時刻 (Time of Arrival, 以下 ToA) から伝搬時間・距離を求め測位するものである [2]。GPS の測位精度は一定の条件下、全世界平均で水平方向 9 m 以下、垂直方向 15 m 以下などと規定 [3] されており、精度約 10 m と言われることがある。しかし、屋内や地下などのように衛星が遮蔽されていると測位不能になる上、屋外でもビルや谷間など遮蔽物が多くて衛星からの直接波を得にくい場所では誤差が数十 m あるいは 100 m を超えてしまうことがある。精度を向上させるため準天頂衛星を用いる方法もあるが、やはり遮蔽されていたり遮蔽物が多い環境での使用は依然として困難である。

2.1.2 屋内測位

屋内や、屋外でも遮蔽物が多く衛星が使いにくい場所でも使用することができる測位方式として、IMES (精度 3 m~10 m) [4] や FTM (精度数 m 程度) [5][6] などがあるが、実装されている端末が少ないため人流計測には使いにくい。一方、ほとんどの端末は Bluetooth や無線 LAN を搭載しているため、これらの標準的な機能を用いることで、より多くの端末で測位できる。

Bluetooth・無線 LAN とも、位置が既知の複数の送信機から送信される電波を端末で受信し、それらの受信電波強度 (Received Signal Strength Indicator, 以下 RSSI) を用いて測位する方法がある。Bluetooth では、BLE (Bluetooth Low Energy) ピーコンを用い、定期的に

送信されるビーコンを端末で受信し、その RSSI から測位する方法がある [7]。無線 LAN では、周囲に存在している AP が送信しているビーコンやプローブ応答 (Probe Response) フレームを受信し、その RSSI から測位する方法がある (精度 30 m~50 m) [8]。

2.1.3 端末側測位の課題

これらの方式は端末が自身の測位をするものである。そのため、イベント運営者や施設管理者が来場者の人流を計測するには、端末が自身の測位をして結果をサーバなどへ通知する仕組みを持つ必要があり、一般的にはこの機能を持つアプリケーションをインストールしなければならない。アプリケーションは端末の機種や OS ごとに用意する必要がある上、端末にインストールしていただく手間がかかるため、インストール率を上げることが困難であり、その結果測位可能な端末が少なくなってしまうという課題がある。

2.2 インフラ側からの測位

端末のアプリケーションを不要とするため端末側で測位する方法ではなく、イベント運営者や施設管理者が用意するインフラ側から測位する方法が考えられる。

2.2.1 1 台の受信機・アンテナで受信する方法

端末から送信される無線 LAN のフレームを受信して測位するものがある [9][10]。これらは基本的に端末が周囲の AP を検索するために送信するプローブ要求 (Probe Request) フレームを複数の場所で受信し、フレームに含まれる送信元 MAC アドレスを追跡することによって実現している。この方法の場合、端末はフレームを受信した受信機の場所の周辺にあるということは把握できるが、より詳細な位置を知ることが難しく、精度は受信機の設置密度の影響を受ける。しかし、詳細な位置を知るため設置密度を上げると受信エリアが大きく重なるようになるため、同じフレームが複数の受信機で同時に受信されるようになり、端末がどの受信機の周辺にあるのか分からなくなる。狭い部屋など遮蔽されている場所では受信エリアが比較的小さいため、設置密度を上げ精度を良くすることもできるが、見通しのある場所では 100 m 以上飛ぶこともあり、吹抜け・廊下・広い部屋やホールのような場所では精度が 100 m を超えてしまうことも考えられる。

2.2.2 複数の受信機・アンテナで同時受信する方法

設置密度を上げて 1 つのフレームが常に複数の受信機で同時に受信できるようにし、受信機が連携してそれらの RSSI を用いて測位する方法が考えられる。しかし、測位の向きが逆となる端末側から無線 LAN の RSSI を用いて測位した例 [8] では精度が 30 m~50 m となっており、同様の無線 LAN の RSSI を用いる方法でインフラ側から測位したとしても、同程度の精度が上限となるのではないかと考えられる。

一方、RSSI ではなく複数の受信機におけるフレームの到着時間差 (Time Difference of Arrival, 以下 TDoA) [11] を用いて測位する方法も考えられる。この方法は光速で進むフレームの到着時間差を計測しなければならないため各受信機を高精度で時刻同期させておく必要がある、技術的に困難である。時刻同期を不要とするため、1 台の受信機を使い分散アンテナによって複数の場所で受信し測位した例もある [12]。これは精度数 cm 程度を実現しているが、フレームの波形をオシロスコープで目

視して TDoA を求める方法を採用しており、フレームをデコードしているわけではないため、MAC アドレスが分からず複数端末を識別できないと思われる。

2.2.3 インフラ側測位の課題

これらの受信機を用いた方式は、いずれも端末が送信する無線 LAN フレームを受信して測位する受動的な測位方法である。そのため端末が無線 LAN フレームを送信したタイミングでのみ測位可能であり、任意のタイミングでの測位が難しいという課題がある。また、これらの方式でよく使われるプローブ要求フレームは、周囲の AP を検索するために端末がブロードキャストするものであり、その送信タイミングや頻度は端末の機種や状態に依存してしまう。通常、受信機は 1 つのチャンネルで待ち受けているのに対して、端末は AP を探すという目的から全チャンネルをスキャンするよう順に送信していく動作となるため、受信できる数はどうしても少なくなってしまう。ここで間隔が 10 秒あいてしまうと、歩行速度でも 10 m 以上移動できてしまうため、歩行者の動線を取得することには向かないという課題がある。さらに、近年はプライバシーへの配慮のため、MAC アドレスをランダム化して短時間で変更する動きがある [13]。これが実装された端末は追跡を行うことができず、動線が得られないという課題が発生してしまう。

プローブ要求フレームに比べると、端末が AP を介して通信するためのデータフレームが多数送信されている可能性があるが、その利用は更に困難である。こうしたフレームはブロードキャストではなく、MIMO のような空間多重技術が利用されることが多いため、端末の帰属先 AP 以外で受信することが技術的に難しい。その上、通信の相手先が測位を行っている者と異なる場合には「通信の秘密」に触れることにもなるため、制度上も個別具体的な同意などがなければ利用することができない。通信の相手先が測位者であることを確認する、あるいは送信元が個別具体的な同意をした者であることを確認するためには IP レイヤの情報 (宛先 IP アドレス、送信元 IP アドレス) が必要になる場合があるが、これらは通常、無線 LAN レイヤで暗号化されているため帰属先 AP 以外では取得できない。

3 提案方式

課題を解消することのできる新しい方式を提案する。

3.1 構成

提案方式の構成は既に図 1 で示した。測位用受信機は用意せず、インターネットなど通信サービス提供用の AP に測位機能を付加し、測位対象の端末は AP に帰属しているものとする。分散スマートアンテナシステム [14] の技術を一部応用し、フレーム単位で送受信アンテナを切り替えることができる D-SAS 装置 (以下、切替器) を接続した AP を用いる。それぞれの分散アンテナを異なる場所へ設置し同軸ケーブルで切替器と接続し、AP-端末間の RTT (Round-Trip Time) を計測し測位する (以下、RTT 測位)。これはフレームの到着時刻を使うため ToA 測位の種類である。同時に AP は端末が送信したフレームの RSSI を得ることができるため、これを用いた RSSI 測位や、RTT 測位と RSSI 測位の併用ができる。以下、すべての分散アンテナの特性、同軸ケーブルの長さや特性などが同一であることを前提とした説明をする。

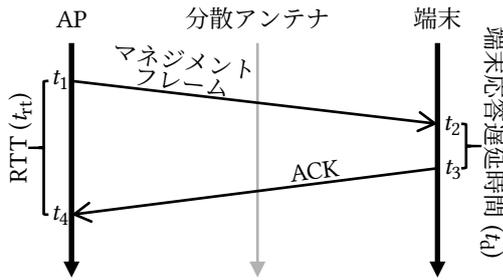


図 2 RTT 計測シーケンス (1 回分)

3.2 計測

図 2 に 1 回分の RTT 計測シーケンスを示す。インフラ側である AP がトリガとなって 1 つの分散アンテナを指定し、測定対象端末の MAC アドレス宛にマネジメントフレームを送信する (時刻 t_1)。端末はマネジメントフレームを受信する (時刻 t_2) と ACK を送信する (時刻 t_3)。そして AP が ACK を受信する (時刻 t_4)。この時の RTT を t_{rt} とすると、AP は t_1 と t_4 を知っているので $t_{rt} = t_4 - t_1$ によって求めることができる。

端末の動作として必要なものは、AP から自分宛てのマネジメントフレームが届いたら ACK を返す、というのだけである。これは IEEE 802.11 の基本的な動作として規定されているものであり、無線 LAN の機能を持っている端末であれば、機種や OS に関わらず、すべての端末がこの動作を行う。そのため、AP に帰属してさえいれば、どんな端末であっても、端末がどんな状態であっても、アプリケーション不要で測位が可能となる。また、AP はフレームを送信できるタイミングであれば、つまりチャンネルが空いているタイミングであれば、いつでも任意のタイミングで計測開始でき、連続して計測することも可能であり、能動的な測位が可能となっている。加えて、少なくとも帰属中は端末の MAC アドレスは変わらないため、その間は歩行者動線の取得が可能となる。さらに、測位に関する個別具体的な同意が得られた端末のみ帰属できるような認証を行うことや、同意が得られた MAC アドレスのみ測位することなどが簡単に実現できる。

3.3 統計処理

t_{rt} には、端末がマネジメントフレームを受信してから ACK を返すまでの時間 (以下、端末応答遅延時間、 $t_d = t_3 - t_2$) を含んでいる。 t_d は端末の実装によって大きく異なる数値となる上、端末の状態は常に変化しているため t_d も影響を受け常に揺らいでしまう。そこで、

能動的な計測が可能である利点を活かして RTT の計測回数を増やし、統計的に揺らぎを取り除く方法を採用。また、RTT と同時に得られる RSSI は従来方式と異なり計測回数を増やしているため統計処理をすることができ、フェージングなど短時間で電波強度が変化してしまう影響を取り除き、精度を高くすることができる。

端末は移動していくため短時間で分散アンテナを切り替えていく必要がある。そこで、AP は 1 つの分散アンテナで十分短い時間に計測可能な回数だけ RTT および RSSI を計測し、次の分散アンテナに切り替える、という動作を繰り返す。こうして得られた多数の RTT / RSSI に対して、分散アンテナごとに外れ値を除いた移動平均を取る。具体的には、過去数秒から十数秒間に得られた RTT / RSSI をトリム平均し、その分散アンテナで得られた RTT / RSSI として位置推定計算を行う。

3.4 1 次元位置推定計算

まず 1 次元測位のための位置推定計算を考える。分散アンテナを 2 本用いて、端末は両アンテナ間の直線上のみを移動するものとする。長い廊下や直線状のトンネルなどにおける測位を想定したものである。

3.4.1 RTT

AP-分散アンテナ間の片道時間を A [s]、平均端末応答遅延時間を t_d [s]、両アンテナ間の距離を D [m]、分散アンテナ 1 の座標を $D/2$ [m]、分散アンテナ 2 の座標を $-D/2$ [m]、端末の座標を x_s [m]、光速を c [m/s] とする。AP からそれぞれの分散アンテナを使って端末まで RTT を計測した場合に、経路する経路と時間を図 3 に示す。分散アンテナ 1 および 2 で計測される RTT をそれぞれ t_{rt1} [m]、 t_{rt2} [m] とすると以下ようになる。

$$t_{rt1} = A + \frac{(D/2) - x_s}{c} + t_d + \frac{(D/2) - x_s}{c} + A$$

$$= 2A + t_d + \frac{D - 2x_s}{c}$$

$$t_{rt2} = A + \frac{(D/2) + x_s}{c} + t_d + \frac{(D/2) + x_s}{c} + A$$

$$= 2A + t_d + \frac{D + 2x_s}{c}$$

このうち t_d は統計処理によって同じ端末であればほぼ同じ数値となるが、機種などが異なると大きく異なった数値となってしまふ。そこで、同一端末について計測した両 RTT の差分を取って打ち消す。

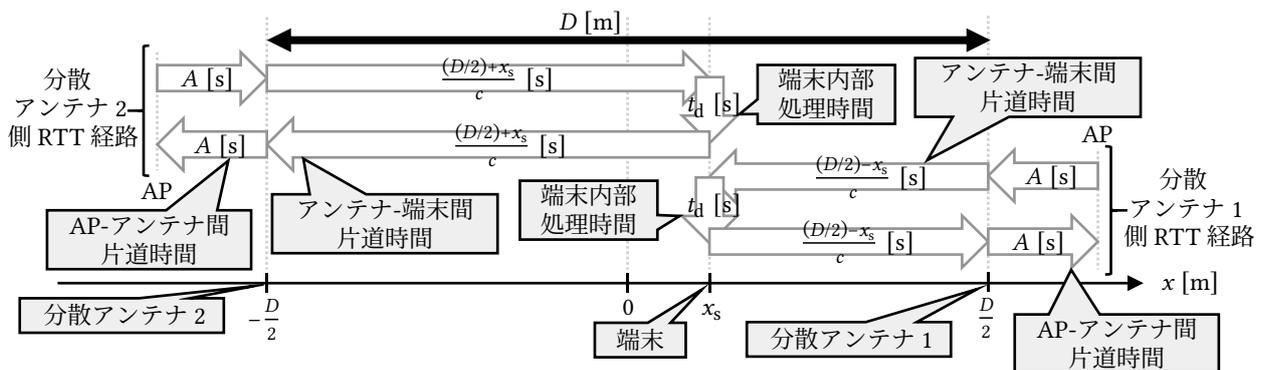


図 3 1 次元位置推定計算における RTT 経路と時間

$$t_{rt2} - t_{rt1} = \frac{D + 2x_s}{c} - \frac{D - 2x_s}{c} = \frac{4x_s}{c}$$

これを x_s について解く。

$$x_s = \frac{c(t_{rt2} - t_{rt1})}{4}$$

以上より、2つの RTT から端末の 1 次元座標を得ることができる。 t_d を打ち消しているため、端末ごとのキャリブレーションなどが不要で測位可能となっている。

3.4.2 RSSI

AP 直近で計測した RSSI を B [dBm]、両アンテナ間の距離を D [m]、分散アンテナ 1 と端末間の距離および分散アンテナ 2 と端末間の距離をそれぞれ d_1 [m]、 d_2 [m] (つまり $D = d_1 + d_2$)、距離比を $R = d_1/d_2$ 、波長を λ [m]、伝搬損失係数を α とおく。分散アンテナ 1 および 2 で計測される RSSI をそれぞれ $RSSI_1$ [dBm]、 $RSSI_2$ [dBm] とすると、以下のようになる。

$$RSSI_1 = B - 10\alpha \log_{10} \frac{4\pi d_1}{\lambda},$$

$$RSSI_2 = B - 10\alpha \log_{10} \frac{4\pi d_2}{\lambda}$$

このうち B は端末の機種ごとに大きく異なった数値となってしまふ。そこで、同一端末について計測した両 RSSI の差分を取って打ち消す。

$$\begin{aligned} RSSI_2 - RSSI_1 &= \left(10\alpha \log_{10} \frac{4\pi d_1}{\lambda}\right) - \left(10\alpha \log_{10} \frac{4\pi d_2}{\lambda}\right) \\ &= 10\alpha \log_{10} \frac{d_1}{d_2} \end{aligned}$$

これを $R = d_1/d_2$ について解く。

$$R = \frac{d_1}{d_2} = 10^{(RSSI_2 - RSSI_1)/(10\alpha)}$$

ここで、 $D = d_1 + d_2$ および $R = d_1/d_2$ より、 $d_2 = D/(R+1)$ なので、RTT による座標計算と同様に両アンテナ間中央を原点として、分散アンテナ 1 の座標を $D/2$ [m]、分散アンテナ 2 の座標を $-D/2$ [m]、端末の座標を x_s [m] とすると、以下のようになる。

$$\begin{aligned} x_s &= d_2 - \frac{D}{2} = \frac{D}{R+1} - \frac{D}{2} \\ &= \frac{D}{10^{(RSSI_2 - RSSI_1)/(10\alpha)} + 1} - \frac{D}{2} \end{aligned}$$

以上より 2つの RSSI およびアンテナ間距離 D 、伝搬損失係数 α から端末の 1 次元座標を得ることができる。 B や λ を打ち消しているため、端末ごとのキャリブレーション不要で周波数にも依存せずに測位可能となっている。ただし、 D および α が必要となるので、あらかじめ計測するなどの方法により用意しておく必要がある。

3.5 2次元および3次元位置推定計算

長い廊下や直線状のトンネルなどでは 1 次元 (直線) 測位で十分であるが、通常の部屋などであれば 2 次元 (平面)、吹抜けやスタジアムなどであれば 3 次元 (空

間) での測位が必要となる。そこで 2 次元および 3 次元での位置推定計算を考える。

3.5.1 分散アンテナ数

直線測位の未知数は座標 x_s と、打ち消したい値 t_d または B 、の計 2 つなので、2 か所で計測する必要がある、分散アンテナも 2 本必要となる。平面測位では未知数として座標 y_s が 1 つ増えるため、分散アンテナも 3 本必要となる。空間測位ではさらに座標 z_s が 1 つ増えるため、分散アンテナも 4 本必要となる。つまり、次元数よりも 1 本多い分散アンテナが必要である。

3.5.2 RTT

RTT 測位は GPS と同様の ToA 測位であるため、GPS での計算 [2] を応用することにより平面・空間測位が可能と考えられる。

軌跡を用いる方法も考えられる。2 本の分散アンテナで平面測位することを考える。RTT と距離は線形の関係があるので、両 RTT の差分と、両アンテナから端末までの距離の差分も線形の関係である。つまり計測によって RTT 差分が決まれば距離差分も決まるので、端末は「距離差分が一定である点の軌跡」上のどこかにあるということになる。この軌跡は両アンテナの座標を焦点とする双曲線 (のうちの片方) となる。ここで分散アンテナを増やし 3 本以上にしてそれぞれ RTT を計測すると、各 2 アンテナの組合せ間それぞれで双曲線を描くことができ、これらの交点が端末の座標となる。

2 本の分散アンテナで空間測位をする場合も、端末は「距離差分が一定である点の軌跡」上のどこかにある。これは平面の場合の双曲線を、両アンテナを通る直線を軸として回転させた回転体となり、二葉回転双曲面 (の片方) である。分散アンテナを 4 本以上にしてそれぞれの RTT を計測すると、各 2 アンテナの組合せ間それぞれで双曲面を描くことができ、これらがすべて交わる点が端末の座標となる。

3.5.3 RSSI

RSSI 測位は ToA 測位ではないため、GPS の方法を採用することはできない。そこで、軌跡を用いた方法を考える。2 本の分散アンテナだけで RSSI を計測すると、両アンテナから端末までの距離の比が得られる。つまり端末は「距離比が一定である点の軌跡」上のどこかにあるということになる。この軌跡は平面上では円となり、アポロニウスの円と呼ばれる軌跡である。分散アンテナを増やし 3 本以上にしてそれぞれ RSSI を計測すると、各 2 アンテナの組合せ間それぞれで円を描くことができ、これらの交点が端末の座標となる。

空間での軌跡は、アポロニウスの円を、両アンテナを通る直線を軸として回転させた回転体となり、球の表面となる。分散アンテナを 4 本以上にしてそれぞれの RSSI を計測すると、各 2 アンテナの組合せ間それぞれで球の表面を描くことができ、これらがすべて交わる点が端末の座標となる。

3.5.4 多アンテナ

必要数よりも多い分散アンテナを使う方法も考えられる。この場合、未知数よりも計測値の方が多い、いわば優決定系となるため、解となる座標が一意に定まらない、あるいはすべての軌跡が 1 点で交わらない、ことが発生し得る。この場合は最小二乗法などを用いることによって座標を得ることが可能となる。さらに RTT /

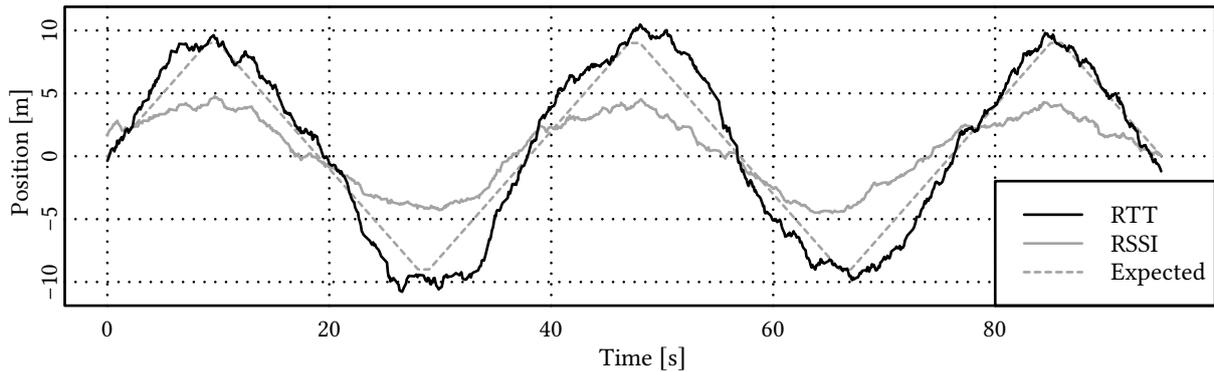


図4 RTT 測位および RSSI 測位による結果と端末の実際の位置

RSSI 統計処理の際の計測回数や標準偏差などによって計測値の信頼性を定義し、重みづけして最小二乗法を用いると精度を向上できる可能性が高くなる。ただし、RTT / RSSI の単位時間当たりの計測可能回数は限られるため、むやみに分散アンテナ数を増やすと、一つの分散アンテナあたりの計測数が減ってしまい、かえって精度が悪化する可能性もある。

4 実験

提案方式で1次元座標の測位を行うことができる系を構築して測位し、評価する実験を行った。

4.1 設置および設定

1次元(直線)座標を2つの分散アンテナで測位する。分散アンテナとして同一型番となるパッチアンテナを2つ用意し、屋内の実験室内で距離 D を 20 m として挟み込む形で設置した。以下、座標系としては両アンテナ間中央を原点、分散アンテナ1の座標を 10 m、分散アンテナ2の座標を -10 m とする。両アンテナから切替器までは、どちらも 12 m で同一の型番の同軸ケーブルで接続した。周波数帯としては 5 GHz 帯 W52 の 36 チャンルを用いた。端末にはノート PC を用意し AP に帰属させた。このノート PC は通常に市販されているものを単に帰属させただけであり、特別な設定や特別なアプリケーションなどは用いていない。

4.2 測位条件

分散アンテナ1から RTT および RSSI を 10 回計測、分散アンテナ2から同様に 10 回計測、ということを交互に繰り返し実行したところ、両アンテナ合計で秒間 100 回程度の計測が可能であった。

RTT および RSSI の移動平均を求める際の移動平均区間は 5 秒とした。この移動平均の影響により測位結果は常に 2.5 秒ほど遅れることになるが、この遅れを補正し取り除いて評価する。

RSSI 測位における伝搬損失係数 α は自由空間と同じ 2 として計算した。歩行者の通常移動を模して座標 9 m と座標 -9 m 間の 18 m 区間を秒速 1 m (時速 3.6 km) で往復する端末の測位をした。方向転換の際には 1 秒停止し、それ以外は常に秒速 1 m で移動した。

4.3 結果

RTT 測位および RSSI 測位の結果と端末の実際の位置(Expected)を図4に示す。測位誤差(差分の絶対値)の累積分布関数(CDF)を図5に示す。平均誤差(MAE)および 50%, 90% 誤差を表1に示す。RTT は平均および 50% 誤差が 1 m 強、90% 誤差が 2 m 台となった。RSSI は

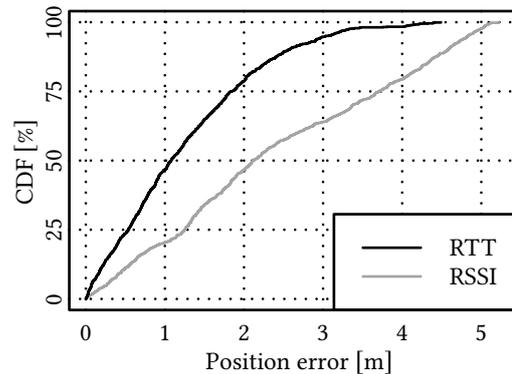


図5 測位誤差(差分の絶対値)の累積分布関数(CDF)

RTT より誤差が大きく、平均および 50% 誤差が 2 m 台、90% 誤差が 4 m 台となった。本実験は 1 次元測位であるが、通常無線 LAN 端末を用いた従来型測位 [8] (精度 30 m ~ 50 m) と比べ、同様の通常端末を用い、アプリケーション不要、高精度測位可能で歩行者動線を取得できる上、高精度測位(精度 1 m ~ 5 m)を実現できた。

5 フィールド実証

実験で構築した系を 2018 年 2 月に開催した展示会、NTT R&D フォーラム 2018 にて動態展示 [15] し、実際に測位しているところを多数の来場者にご覧いただくとともに、実フィールドでの有効性を確かめた。

5.1 環境

基本的な条件は実験と同様である。分散アンテナは NTT 武蔵野研究開発センタ本館の屋内で、1F と 2F をつなぐ階段がある吹抜けに面した 2F 廊下に、20 m 間隔でそれぞれ高さ 1 m ないし 2 m に設置した。分散アンテナの周囲約 1 m は来場者が近づけないようにしたが、両アンテナ間は自由に横切ったり滞留したりできた。展示員が測位対象のノート PC を入れたカバンと目印の旗を持ち両アンテナ間を徒歩で往復し、近くの展示ブースに設置したディスプレイで、周辺平面図上に測位結果をリアルタイム表示した(図6)。提案方式で測位した座標は、展示員が静止していても細かく振動することが

表1 測位結果の平均誤差および 50%, 90% 誤差

	RTT	RSSI
平均誤差(MAE)	1.26 m	2.39 m
50% 誤差	1.08 m	2.12 m
90% 誤差	2.55 m	4.58 m

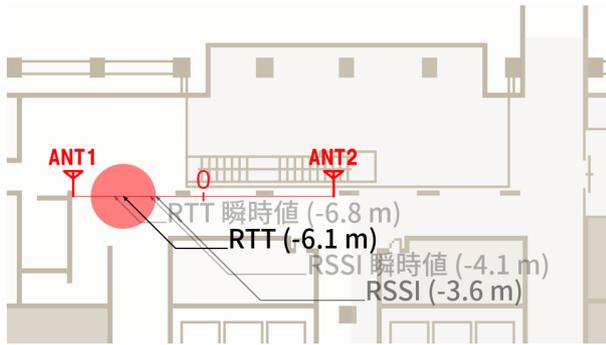


図6 測位結果表示イメージ

あったため、安定化した座標を RTT / RSSI として表示した。安定化は座標に「あそび」となるスレッシュホールドを設け、測位座標がこれを超えて移動した場合のみ表示座標を移動させた。安定化前の測位座標も画面上で「瞬時値」として表示した。

5.2 結果

移動平均および座標安定化の影響により、測位結果をリアルタイム表示していても、展示員の動きから常に数秒遅れて表示された。また、展示中に両アンテナ間を目視で見通せなくなるほど来場者があふれ混雑することもあったが、RTT 測位は大きな影響を受けず誤差数 m 以内を維持することができた。数秒の遅れおよび誤差数 m という精度で動線が得られることについて、多くの来場者から従来の屋内測位方式より優れているとの高い評価を得ることができた。一方 RSSI 測位は来場者が横切る・滞留するなどの影響を大きく受け、混雑時と閑散時で測位結果が大きく異なった。これは、RTT は来場者が横切っても伝搬経路が大きく変わらず、測位にも大きな影響がなかったのに対して、RSSI は来場者によって電波の減衰などが発生し、空間の伝搬損失係数が大きく変わり、測位に大きな影響があったものと考えられる。

6 おわりに

本稿では、イベント運営者や施設管理者が人流を把握することを目的として、来場者が所持する端末の測位をする方法を検討した。従来の端末測位方式の課題を解消するため、無線 LAN の機能を持った端末にアプリケーションなどをインストールする必要が無く、分散アンテナを用いた無線 LAN AP に帰属するだけで、AP 側から測位し、歩行者動線を取得することができる新しい方式を提案した。そして提案方式の有効性を確かめるため、1次元(直線)測位を行う系を構築して実験を行い測位結果および評価を示した。提案方式による RTT 測位と RSSI 測位はそれぞれ、平均および 50% 誤差が 1 m 強および 2 m 台、90% 誤差が 2 m 台および 4 m 台であった。これによって 1次元測位ではあるが、通常の無線 LAN を用いた従来型測位 [8] (精度 30 m~50 m) と比べ、同様の通常端末を用い、アプリケーション不要、歩行者動線取得、高精度測位 (精度 1 m~5 m) を実現した。最後に、フィールド実証としてこの系を展示会で動作させ、実フィールドでの有効性を確かめた。展示会には多数の来場者が訪れたが、提案方式のうち RTT 測位は来場者で混雑しても大きな影響はなく、高い評価が得られた。一方 RSSI 測位の場合は混雑によって影響を

受けることがわかった。今後は、RTT 測位と RSSI 測位を融合してさらに精度を向上させる方法を検討したり、分散アンテナ数を増やして 2次元、3次元での測位を可能とする系を実装・構築し、評価や応用先の拡大を図りたい。

参考文献

- [1] 日本経済新聞, “スマホ電波で混雑予測 警視庁、隅田川花火の警備で最新手法”, 2017年7月29日, https://www.nikkei.com/article/DGXLASDG28H5F_Z20C17A7CR0000/.
- [2] 福島荘之介, “理解するための GPS 測位計算プログラム入門”, https://www.enri.go.jp/~fks442/K_MUSEN/, 参照 2018年5月14日.
- [3] U. S. Department of Defence, “Global Positioning System Standard Positioning Service Performance Standard, 4th Edition”, Table 3.8-3. SPS Position / Time Accuracy Standards, pp. 34, Sep. 2008, <https://www.gps.gov/technical/ps/2008-SPS-performance-standard.pdf>.
- [4] 村田正秋, 瀬川爾朗, 鳥本秀幸, “IMES の技術動向: シームレス三次元測位・航法の新技術”, 電子情報通信学会誌, Vol. 95 No. 2, pp. 119-124, 2012年2月.
- [5] IEEE Std 802.11-2016, 11.24.6 Fine timing measurement (FTM) procedure, pp. 1789-1800, Dec. 2016.
- [6] Leor Banin, Uri Schatzberg, Yuval Amizur, “WiFi FTM and Map Information Fusion for Accurate Positioning”, International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN), Oct. 2016.
- [7] 山口修平, 荒井大輔, 大岸智彦, “BLE タグを用いた屋内位置測位における周波数識別効果の評価”, 電子情報通信学会技術報告, Vol. 115 No. 290, ASN2015-69, pp. 103-108, 2015年11月.
- [8] 伊藤誠悟, 吉田廣志, 河口信夫. “無線 LAN を用いた広域位置情報システム構築に関する検討”, 情報処理学会論文誌, Vol. 47 No. 12, pp. 3124-3136, 2006年12月, <http://id.nii.ac.jp/1001/00010120/>.
- [9] 佐藤翼, 木村卓哉, 袴田和則, “歩行者移動時間推定システムの実用化に向けた実地検証”, 情報処理学会第78回全国大会講演論文集, 1D-05, 2016年3月, <http://id.nii.ac.jp/1001/00162813/>.
- [10] 細田真道, 今井良太, 花籠靖, 毛利忠, 宮本勝, “個人追跡を困難にした無線 LAN による人流計測方式”, 電子情報通信学会総合大会講演論文集, B-15-2, 2018年3月.
- [11] 小菅義夫, 古賀禎, 宮崎裕己, 秋田学, 稲葉敬之, “TOA 測位と TDOA 測位の関連”, 電子情報通信学会技術報告, Vol. 114 No. 397, SANE2014-119, pp. 79-84, 2015年1月.
- [12] C. Loyez, M. Bocquet, C. Lethien, N. Rolland, “A Distributed Antenna System for Indoor Accurate WiFi Localization”, IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, Vol. 14, pp. 1184-1187, Jan. 2015, <https://doi.org/10.1109/LAWP.2015.2396901>.
- [13] C. J. Bernardos, J. C. Zúñiga, P. O'Hanlon, “Wi-Fi internet connectivity and privacy: Hiding your tracks on the wireless Internet”, IEEE Conference on Standards for Communications and Networking (CSCN), pp. 193-198, Oct. 2015, <https://doi.org/10.1109/CSCN.2015.7390443>.
- [14] 村上友規, 石原浩一, アベセカラヒランタ, 秋元守, 鷹取泰司, “無線 LAN に適した分散スマートアンテナシステムの提案”, 電子情報通信学会技術報告, Vol. 117 No. 284, RCS2017-223, pp. 105-110, 2017年11月.
- [15] “無線 LAN 信号の到達時間からスマホの現在地がわかります”, NTT R&D フォーラム 2018, 展示, メディア&UI, 202X を彩る UI 技術, F03, 2018年2月, https://labevent.ecl.ntt.co.jp/forum2018/elements/pdf_jpn/F03_j.pdf.