

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

細田 真道^{1,a)} 坂本 寛² 村上 友規² 花籠 靖¹
梅内 誠² 毛利 忠¹ 塩原 寿子¹ 小川 智明² 宮本 勝¹

受付日 2019年3月15日, 採録日 2019年10月3日

概要: 生き活きとしたスマートシティを実現するためには, MaaS, イベント, 施設などの運営者が多数の人の流れ (以下, 人流) を把握することで, より最適な移動手段選択, 混雑緩和, 事故防止につなげることが重要である. 本論文はこうした運営者が人流を把握することを目的とし利用者などの端末を測位する方法を提案, 評価し有効性を示す. まず, 従来測位方式および技術的課題を述べる. 広く普及している人工衛星による測位方式は屋内測位が困難である. また, 屋内測位できる方式であっても, 端末が自身の測位をして結果をサーバなどに通知する必要がある, アプリケーションのインストールを要する. そこで, これらの課題を解決する新方式を提案する. 提案方式は, 通常の無線LAN端末が対象, 端末にアプリケーション不要, 端末が分散アンテナを用いたアクセスポイントに帰属するとアクセスポイントが端末を測位可能, 歩行者動線取得可能という特徴を持つ. 提案方式の1次元測位実験の結果, 通常の無線LAN端末で, アプリケーション不要, 歩行者動線取得, 高精度測位 (精度1m~5m) を実現した. 最後に, フィールド実証としてこの提案システム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明らかにした. 展示会では来場者で混雑しても, 提案方式のうちRTT (Round Trip Time) 測位には大きな影響がなく, 来場者から高い評価を得た.

キーワード: 位置推定, 測位, 無線LAN, 分散アンテナ, RTT

Wireless LAN Terminal Position Estimation Method by Access Point Using Distributed Antenna System

MASAMICHI HOSODA^{1,a)} HIROSHI SAKAMOTO² TOMOKI MURAKAMI² YASUSHI HANAKAGO¹
MAKOTO UMEUCHI² TADASHI MOURI¹ HISAKO SHIOHARA¹ TOMOAKI OGAWA² MASARU MIYAMOTO¹

Received: March 15, 2019, Accepted: October 3, 2019

Abstract: In order to realize Smart City, it is important for MaaS, event, and facility operators etc. to grasp massive people flow, making it possible to choose better transportation plans, alleviate congestion, and prevent accidents. In this paper, we propose the method of positioning user's terminal for grasping the people flow. As a conventional method, the satellite positioning is widely used but it is not suitable for indoor positioning. Even if systems can be used for indoor positioning, the installation of the dedicated application on the terminal is required because it is necessary for the terminal to perform its own positioning and notify the result to the server. The proposed method is just by connecting the terminal with the access point that uses distributed antenna system. The access point can measure the terminal's position and acquire people flowline. As a result of 1-D experiment, people flowline could be acquired with high accuracy (1–5 m) by using ordinary wireless LAN terminal without the installation of the dedicated application. Finally, we demonstrated the proposed system at the exhibition where many visitors gathered, and one of the proposed methods round trip time (RTT) positioning was robust even in congestion.

Keywords: position estimation, positioning, wireless LAN, distributed antenna system, RTT

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,
Yokosuka, Kanagawa 239-0847, Japan

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, Yokosuka, Kanagawa 239-0847, Japan

1. はじめに

生き活きとしたスマートシティを実現するための課題の

^{a)} masamichi.hosoda.bn@hco.ntt.co.jp

1つとして、都市空間で人々が安心・安全・快適で効率的に移動するにはどうすればよいかというものがある。都市空間における人々の移動に関しては MaaS (Mobility as a Service) という考え方が注目されてきている。これは移動手段を従来のようなモノとしてではなく、サービスとして提供するものである [1]。これにより利用者は電車、バス、タクシーなどといった個々の具体的な移動手段にとらわれることなく、目的地まで最適な移動手段ルートを選択し利用することができるようになる。このようなサービスを提供するには、利用者がどのように移動してきているかを把握することはもちろん、周囲の人々がどのように移動しているのかについても把握し、利用者にとって最適な移動手段は何であるかを判断していく必要がある。

一方で、都市空間においては人々の移動を妨げる混雑という現象も存在する。いくつものスタジアムなどで同時並行的に開催される大規模なスポーツイベントや、集客力が高く短時間に多くの人が集まるようなイベントなど、多数の人が集まる場合には混雑によってスムーズに目的地まで移動できないことや、ときには危険な状態が発生して事故につながるという課題がある。こうした課題への対策として、混雑度予測システムが試験的導入される [2] などの対応が進められている。このように多数の人の流れ (以下、人流) を把握することで、誘導を行ったり、交通規制を変更したりといった対策を検討し、混雑の緩和や事故の防止といった様々な課題解決につなげることができる。

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1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。

本論文では、MaaS、イベント、施設などの運営者が人流を把握することを目的として、利用者などが所持する端末の測位をする方法 [3] を提案、評価し有効性を示す。まず、従来の端末測位方式および本論文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、その課題を解決する新しい方式を提案する。提案方式は、広く普及している通常の無線 LAN (Wi-Fi^{*1}) 端末が対象、端末にアプリケーションなどのインストール不要、端末が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

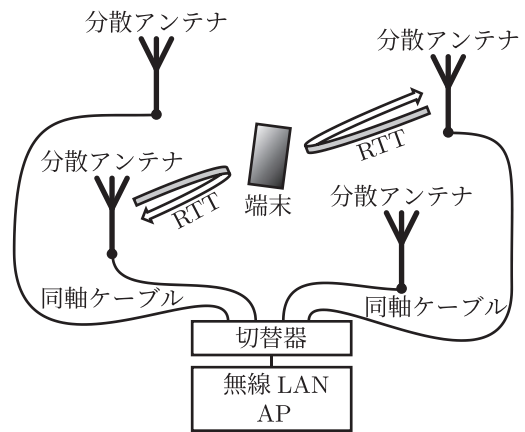


図 1 提案方式の構成

Fig. 1 The configuration of proposed method.

(Association) すると AP が端末を測位可能、歩行者動線を取得可能という特徴を持つ。図 1 に提案方式の構成を示す。AP は切替器を通じて位置が既知である分散アンテナに接続され、AP-端末間の RTT (Round Trip Time) を計測して測位する。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内容を示す。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明らかにする。

本論文の提案方式には、従来方式・既存研究と比較して以下の 3 点の貢献があげられる。

1 点目は、通常の無線 LAN 端末であればどのようなものでも測位可能というものである。従来方式は、端末側に IEEE 802.11 で規定された以外の動作を要する。たとえば、端末が主導して測位動作を行う必要がある、端末側に AP 側の測位動作と連携して動作する機構を持つ必要がある、端末側の無線 LAN チップセットから通常では得ることができない情報を収集する必要がある、などである。このため、特定の機種のみでしか測位できない、端末に測位用のアプリケーションをインストールする必要がある、などの制約が生じる。一方、提案方式の場合、端末に必要な動作は IEEE 802.11 で規定されている「AP からのマネジメントフレームを受信したら ACK を送信する」だけであり、その他はいっさい必要がない。よって、測位や関連の制御を行うアプリケーションも不要であり、端末の機種や OS を選ばず、広く普及している端末をそのままで測位することができる。

2 点目は、端末側からではなくインフラ側 (AP および AP を管理する装置) から測位することができるため、インフラ側で自由に測位対象や頻度を設定でき、必要に応じて歩行者の動線を取得することもできるというものである。従来方式は、端末側から測位するものか、端末側とインフラ側が連携して測位するものが多い。端末と連携せずにインフラ側だけで測位できる方式もあるが、端末がインフラ

*1 Wi-Fi は Wi-Fi Alliance の商標または登録商標。

側とは関係なく送出するフレームのタイミングに依存するなど、インフラ側で測位対象や頻度を設定することができず、歩行者の動線を取得することが難しい。一方、提案方式の場合、AP から端末の MAC アドレスを指定してマネジメントフレームを送信し、端末から返ってくる ACK を受信するという動作で測位するため、インフラ側で測位対象を指定したり、任意のタイミングで測位したりすることができる。また、高頻度で測位することで歩行者の動線を取得することができる。

3 点目は、設置後に学習やキャリブレーションの手間をかける必要がなく、そのまますぐに使い始めることができるというものである。従来方式は、設置後に学習やキャリブレーションを要し、すぐに使い始めることができないだけでなく、環境や端末が変わると再度学習やキャリブレーションをする必要があるか、あるいはこうした制約がないかわり、端末に特定の機能を要する。一方、提案方式は環境や端末の状態を学習する必要があるアルゴリズムではない。また、通常であればキャリブレーションによって事前に明らかにしておく必要がある、環境や端末に依存する固有の定数値を、測位時の計算でキャンセルする方法をとっており、かつ 1 点目の貢献点で述べたとおり端末に特定の機能を要しない。

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を人流計測に応用する場合の課題について、端末側からの測位とインフラ側からの測位に分けて述べる。そして、測位に用いられる個別の技術について述べる。

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

GNSS (Global Navigation Satellite System, GPS などの衛星測位システム) 機能を搭載した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 [4]。GPS の測位精度は一定の条件下、全世界平均で水平方向 9m 以下、垂直方向 15m 以下などと規定 [5] されており、精度約 10m といわれることがある。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うえ、屋外でもビルの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 100m 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、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使用することができる測位方式として、IMES (Indoor Messaging System, 精度 3m~10m) [6] や FTM (Fine Timing Measurement, 精度数 m 程度) [7], [8] 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) ビーコンを用い、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 [9]。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 30m~50m) [10]。

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、運営者が利用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る。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うえ、端末にインストールする手間がかかるため、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。また、Bluetooth や無線 LAN を用いる場合は、ビーコンなどが送信され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。端末がスリープ状態の場合や、他のチャンネルで送受信している場合にはビーコンの受信ができず、測位できる間隔が大きく空いてしまい、動線の取得に向かない。

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、運営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 受信機・アンテナで測位する方法

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 [11], [12]。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、設置密度を上げることで精度が良くなる可能性もあるが、見通しのある場所では100m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誤差が100mを超えてしまうことも考えられる。

2.2.2 複数の受信機・アンテナで連携する方法

設置密度を上げて1つのフレームがつね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[10]では精度が30m~50m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) [13]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り、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[14]。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を求める方法をとっており、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10m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[15]。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、その利用はさらに困難である。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。そのうえ、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。

2.3 測位に用いられる技術

測位に用いられる個別の技術としては、ToA方式、RSSI方式のほか、無線LANのCSIチャネル状態情報(Channel State Information, チャネル状態情報)を使った方式がある。

2.3.1 ToA

ToA方式[16]は、片道の伝搬時間を使う方法(one-way ranging) [4]と往復の伝搬時間を使う方法(two-way ranging) [7], [8]に分類できる。片道の場合は完璧な時刻同期が必要だが往復の場合は必要ない[16]。しかし、往復の場合はRTTを計測することになり、これには往路の信号を受信してから復路の信号を送信するまでの遅延時間が含まれるため、これを考慮する必要がある。FTM [7], [8]はこの遅延時間を計測して相手方に伝える仕組みを持っており、RTTから遅延時間を差し引いてキャンセルすることができる。しかし、広く普及しているAPや端末にはそのような仕組みがなく、遅延時間を取得することはできない。遅延時間を得るため、RTTと距離の関係を計測し線形回帰で定数値を決定する方法[17]がある。APや端末がすべて同一機種、同一設定であるならば、平均的な遅延時間はおおむね同じと考えることができ、この方法で求めた定数値を固定で使うこともできるが、多様な端末に対応することを考えると固定の定数値では困難である。あらかじめAPや端末ごとに計測し、この方法でキャリブレーションした定数値を使う方法も考えられるが、端末ごとにキャリブレーションなどが必要となり、手間がかかる。

2.3.2 RSSI

BLEを用いたもの[9], [18]や無線LANを用いたもの[10], [19], [20]がある。これらは、Scene Analysis (Fingerprint)法[9]とTriangulation法[10], [18], [19]に分類でき、双方を併用するもの[20]もある。

Scene Analysis (Fingerprint) は、設置後に端末を使って座標既知の各地点で AP などの RSSI を計測した Fingerprint を学習させておき、測位時には端末が計測した RSSI と学習した Fingerprint を比較などすることで位置推定する。この方法は設置後に座標既知の複数地点で計測して学習させる必要があり、すぐに使い始めることはできないうえ、周囲の環境が変わったり特性の異なる端末に変更したりした場合には RSSI が変化してしまうため、再度学習をやりなおす必要があり、手間がかかる。

Triangulation は、距離によって電波が減衰するモデルとしてフリスの伝達公式 [21] に基づいたものが使われる。このモデルには環境や端末に依存する固有の定数値が必要となるが、経験則に基づいた固定値を使う方法 [10] や、あらかじめ計測してキャリブレーションした値を使う方法 [18], [19] が使われている。つまり、特性の異なる端末には異なる定数値が必要となり、端末ごとのキャリブレーションなどが必要となり、手間がかかる。

カメラを併用する方法 [18], 歩数計を併用する方法 [19] もあるが、追加の機器を要する、使用できる端末が少なくなるという課題がある。RTT を併用する方法 [22] もあるが、定数値については事前に明らかにしておく必要がある。

2.3.3 CSI

CSI を無線 LAN チップセットから取得して測位する方法 [23], [24], [25] もある。OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 変調では、フレームに乗せるデータは複数のサブキャリアに分割される。MAC 層から得られる RSSI はフレーム全体で 1 つにまとめられた計測値であるのに対し、PHY 層から得られる CSI は各サブキャリア個別の計測値であり、より詳細な状況を取得できる。

これを利用する方法としては、CSI の Fingerprint を学習して測位する方法 [23], [24] があり、RSSI の Fingerprint を学習する方法よりも精度を向上させることができる。しかし、学習が必要であるため、すぐに使い始めることはできず、周囲の環境が変わったり特性の異なる端末に変更したりした場合には再度の学習が必要となり、手間を要する。また、CSI を取得できる無線 LAN チップセットは限られるため、様々な端末で測位することは難しい。

また、CSI から電波の飛行時間 (Time of Flight, 以下 ToF) を計算して測位する方法 [25] があり、学習不要で精度の高い測位が可能である。しかし、1 つのチャンネルの帯域幅では ToF の分解能が不十分なため、2.4 GHz 帯から 5 GHz 帯にまたがって多数のチャンネルで計測を行って分解能を上げている。チャンネルを切り替えながら計測を行うためには、端末側に AP 側と連携してチャンネルを切り替えて計測する機構が必要となり、このためのアプリケーションをインストールする必要がある。また、チャンネル切替えにはある程度の時間を要し、この間には通信不能期間が生じるため、測位対象端末や同じ AP に所属している他の端末

の通信品質の低下につながる。さらに、チャンネルを切り替えて計測している間に端末が移動すると、精度の低下につながる。また、AP と端末間で周波数オフセットがあると精度の低下につながるが、一般に流通している端末には、ばらつきがあるため、これを抑えることは困難である。

3. 提案方式

3.1 構成

提案方式の構成はすでに図 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 に属しているものとする。分散スマートアンテナシステム (D-SAS) [26], [27] 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。

本論文で使用した AP は D-SAS 用に試作したものであり、MIMO のため 4 本のアンテナ端子と、切替器を制御するための制御信号出力を持っている。D-SAS では AP のアンテナ端子は 4 本とも切替器に接続し、制御信号出力も切替器に接続する。切替器は AP と接続された 4 本の端子それぞれについて、減衰量を制御できるアッテネータと、4 系統の分散アンテナへ切り替えることができるスイッチを内蔵している。これにより、アンテナ 4 本で 1 グループとなる分散アンテナを 4 系統、つまり合計 16 本のアンテナを接続することができる。AP はフレーム送受信の際に制御信号で切替器を制御し、各アンテナ端子の減衰量と、どの系統の分散アンテナに接続するかを、フレーム単位で切り替えることができ、これらを状況に応じて制御することで干渉の低減、スループット向上を図っている。本論文ではこうしたスループット向上の制御は行わず、フレーム単位でアンテナを切り替える機能を測位のためにアンテナを切り替える機能として転用し、減衰量はつねに 0 dB として減衰させない。なお、本 AP は 4 本のアンテナ端子を持っているが RTT 計測に使用できる端子は 1 本だけである。そのため、本論文ではこの端子のみ切替器を介して各分散アンテナに接続して切替できるようにし、残る 3 本にはダミーロードを接続し、同時には 1 本のアンテナのみ機能する構成とした。よって同時に複数のアンテナを要する MIMO は機能しない。

そのうえで、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 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 測位の一種である。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。

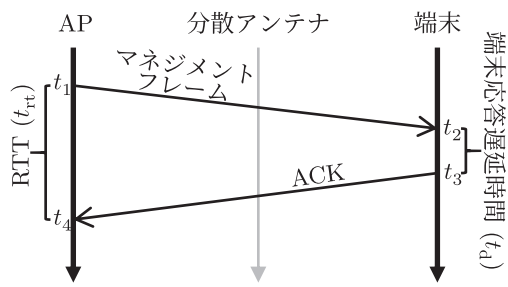


図 2 RTT 計測シーケンス (1 回分)

Fig. 2 RTT measurement sequence (one time).

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、測位対象端末の MAC アドレス宛に管理フレームを送信する (時刻 t_1)。端末は管理フレームを受信する (時刻 t_2) と応答確認信号 (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)。このときの RTT を t_{rt} とすると、AP は t_1 と t_4 を知っているため $t_{rt} = t_4 - t_1$ によって求めることができる。この際、 t_1 , t_4 の時刻計測は AP に実装したチップセットおよびファームウェアによって行われ、1 回の RTT 計測で 1 つの t_{rt} が得られる。AP は 1 つの筐体であり分散配置していないため、時刻同期などの必要がなく、自身の時計だけで t_{rt} を計測することができる。なお、RTT には管理フレームの送信に要する時間、ACK の送信に要する時間も含まれる。この時間が変動すると位置推定計算に影響を及ぼすため、管理フレームのフレーム長やビットレートを固定とする。これにより ACK も固定となり、両フレームの送信時間をつねに一定に保つことができる。さらに、測位によってチャンネルが占有される時間を短くするため、管理フレームのフレーム長は可能な限り短いものとする。

端末に必要な動作は、AP から自分宛ての管理フレームが届いたら ACK を返す、というものだけである。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 端末であれば、機種や OS にかかわらず、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。

前述のとおり、AP は RTT 計測できるアンテナ端子が 1 本のみであるため、1 つの ACK を同時に複数の分散アンテナで受信し、それぞれの時刻を計測することはできない。そこで、RTT 計測は分散アンテナごとに行う。AP は 1 つの分散アンテナを指定して、管理フレームの送信と ACK 受信を実施する。この間は他の分散アンテナは機能していない状態である。そして次の分散アンテナに切り替えて、同様に管理フレームの送信と ACK 受信を実施する。これを繰り返すことで各分散アンテナでの RTT 計測を順次実施していく。分散アンテナの切替えはフレーム単位で行うことができるため、チャンネルの切替えや、帰属する AP を切り替えるよりも高速である。

3.3 統計処理

t_{rt} には、端末が管理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うえ、端末の状態はつねに変化しているため t_d も影響を受けつねに揺らいでしまう。揺らぎがあると位置推定計算に影響を及ぼし、誤差の原因になってしまうため、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とる。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ので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とる。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、これを各分散アンテナで得られた RTT/RSSI と見な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、経由する経路と時間を図 3 に示す。これに、マネジ

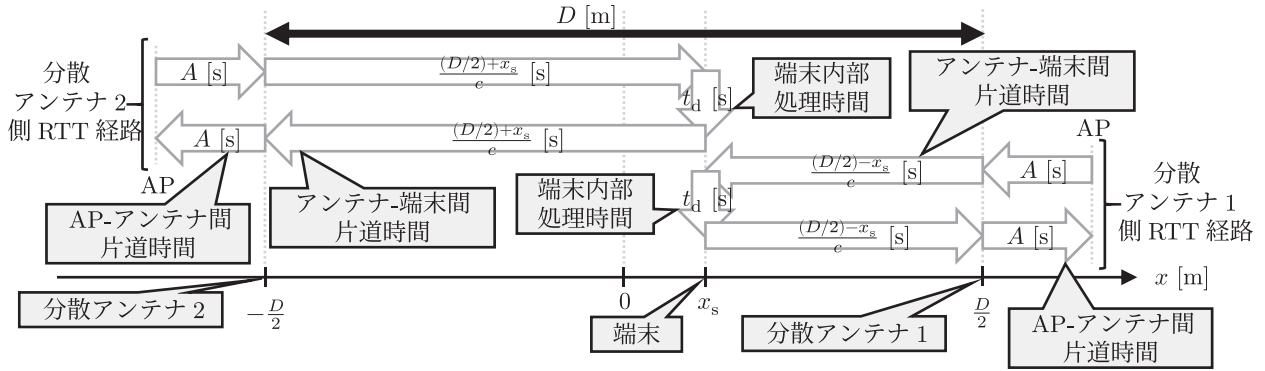


図 3 1次元位置推定計算における RTT 経路と時間

Fig. 3 RTT route and time in 1-D position estimation calculation.

メントフレーム送信時間 t_{txm} [s], ACK フレーム送信時間 t_{txa} [s] を加え, 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} [s], t_{rt2} [s] とすると以下ようになる.

$$\begin{aligned}
 t_{rt1} &= t_{txm} + A + \frac{(D/2) - x_s}{c} + t_d \\
 &\quad + t_{txa} + \frac{(D/2) - x_s}{c} + A \\
 &= 2A + t_d + t_{txm} + t_{txa} + \frac{D - 2x_s}{c}, \quad (1)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 t_{rt2} &= t_{txm} + A + \frac{(D/2) + x_s}{c} + t_d \\
 &\quad + t_{txa} + \frac{(D/2) + x_s}{c} + A \\
 &= 2A + t_d + t_{txm} + t_{txa} + \frac{D + 2x_s}{c} \quad (2)
 \end{aligned}$$

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う. 従来方式では, これを別途計測するか, キャリブレーションなどによって事前に決定して差し引く必要があるが, 提案方式では同一端末について計測した両 RTT の差分をとって打ち消すことでキャリブレーションなどを不要とする. これにより t_{txm} , t_{txa} も打ち消すことができる.

$$t_{rt2} - t_{rt1} = \frac{D + 2x_s}{c} - \frac{D - 2x_s}{c} = \frac{4x_s}{c} \quad (3)$$

これを x_s について解く.

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

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

フリスの伝達公式を用いると波長 λ [m] の電波が自由空間で距離 d [m] 進むときの自由空間伝搬損失は $((4\pi d)/\lambda)^2$ であり, 電波は距離の 2 乗に比例して減衰する [21]. また, 自由空間以外では障害物などの条件により 2 乗以外の指数に比例して減衰することが知られている [28]. そ

こでこれを一般化するため伝搬損失係数 α をおき, 自由空間では $\alpha = 2$ と考える. この伝搬損失を dB 表記にすると $10\alpha \log_{10}((4\pi d)/\lambda)$ [dB] となる. さらに, 分散アンテナ直近で計測した 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 $R = d_1/d_2$ 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, 以下ようになる.

$$RSSI_1 = B - 10\alpha \log_{10} \frac{4\pi d_1}{\lambda}, \quad (5)$$

$$RSSI_2 = B - 10\alpha \log_{10} \frac{4\pi d_2}{\lambda} \quad (6)$$

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う. 従来方式ではキャリブレーションなどによって事前に決定しておく必要があるが, 提案方式では同一端末について計測した両 RSSI の差分をとって打ち消すことでキャリブレーションを不要とする.

$$\begin{aligned}
 &RSSI_2 - RSSI_1 \\
 &= \left(10\alpha \log_{10} \frac{4\pi d_1}{\lambda}\right) - \left(10\alpha \log_{10} \frac{4\pi d_2}{\lambda}\right) \\
 &= 10\alpha \log_{10} \frac{d_1}{d_2} \quad (7)
 \end{aligned}$$

これを $R = d_1/d_2$ について解く.

$$R = \frac{d_1}{d_2} = 10^{(RSSI_2 - RSSI_1)/(10\alpha)} \quad (8)$$

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.

$$\begin{aligned}
 x_s &= d_2 - \frac{D}{2} = \frac{D}{R+1} - \frac{D}{2} \\
 &= \frac{D}{10^{(RSSI_2 - RSSI_1)/(10\alpha)} + 1} - \frac{D}{2} \quad (9)
 \end{aligned}$$

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は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カ所で計測する必要があり、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[4]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。 t_d, t_{txm}, t_{txa} の影響を除けばRTTと距離は線形の関係があるので、これらを打ち消した両RTTの差分と、両アンテナから端末までの距離の差分は線形の関係である。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。この軌跡は平面上では双曲線であり[29]、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について距離差分を得ることができる。分散アンテナの座標は既知なので、得られた距離差分それぞれについて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の方法をとる

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平面測位するためRSSIを計測すると、式(8)より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[30]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について距離比を得ることができる。分散アンテナの座標は既知なので、得られた距離比それぞれについてアポロニウスの円を描くことができ[31]、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、端末は式(8)より「距離比が一定である点の軌跡」上のどこかにある。これ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、座標が一意に定まらないことが発生しうる。この場合GPSでは最小二乗法を用いる方法[4]が用いられており、これを応用することで座標を得ることが可能となる。さらにGPSでは精度が異なる計測値を扱う場合、その精度に応じた重みを導入した、重み付き最小二乗法を用いることで測位精度を高めている[4]。提案方式でも同様にRTT/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、重み付けして最小二乗法を用いることで精度の向上を図ることができる。ただし、RTT/RSSIの単位時間あたりの計測可能回数は限られ、これを各分散アンテナに切り替えることで振り分けて計測する構成であるため、むやみに分散アンテナ数を増やすと、1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。

3.6 考察

3.6.1 分散アンテナの切替え

RTT/RSSI計測は複数の分散アンテナで同時に実施できず、切り替えて順次実施していくため、この間に端末が移動すると誤差の原因となる。本論文では歩行者が持つ端末を対象としているため、歩行速度で移動している際に誤差が課題にならない程度の短時間で分散アンテナを切り替えていく必要がある。

仮に分散アンテナではなく、APそのものを分散配置した場合は、計測のたびに端末が帰属するAPを切り替える、オーバーヘッドの大きい動作をする必要がある。つまり、APごとに帰属、計測、切断を繰り返して切り替えていく必要

があり、これには時間を要するため移動中端末の測位誤差の原因となるだけでなく、切断中の期間は通信を行うことができず通信品質の低下にもつながってしまう。IEEE 802.11ai [32] によりこの期間を短縮することも可能であるが、実装されている端末はほとんどない。一方、提案方式は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、分散アンテナの切替えに要する時間がほとんどなくオーバーヘッドが小さいため、こうした課題が発生しにくい。

3.6.2 測位のオーバーヘッド

AP と端末間では通信も行われるが、測位のオーバーヘッドによって通信できない期間が発生する。マネジメントフレームのフレーム長は可能な限り短くしており、ACK のフレーム長は元々短いため、測位関連フレームの送受信によるオーバーヘッドは小さいと考えている。また、分散アンテナ切替えのオーバーヘッドについては、前述のとおりほとんどないと考えている。

測位対象端末が増えた場合はオーバーヘッド増加の影響が懸念されるが、提案方式は AP 側のトリガで測位するため、オーバーヘッドが一定以下になるように AP 側で RTT/RSSI 計測頻度や測位間隔を制御することが可能である。端末側から測位したい場合でも、分散アンテナを切り替えることができるのは AP だけであり、端末からの測位要求を受けて AP が測位し結果を端末に返す形となるため、AP 側での制御が可能である。ただし、こうした制御によって、統計処理の移動平均区間内における RTT/RSSI 計測回数が減り、 t_d の揺らぎを取り除ききれず、誤差につながる可能性がある。

3.6.3 MIMO

本論文では、分散アンテナ 1, 2 ともに 1 本のアンテナのみ接続し MIMO が機能しない構成としたが、それぞれ 4 本ずつのアンテナを接続することで MIMO が機能する構成にすることもできる。この場合、AP で RTT 計測できるアンテナ端子は 1 本のみであり、RTT 計測では MIMO の影響を受けず、それ以外の通信時には MIMO を使うことができるようになる。測位時の MIMO の影響を最小限に抑えるため、測位のためのマネジメントフレーム送信時と ACK 受信時は、RTT 計測できる端子 1 本の減衰量を 0 dB、他 3 本の減衰量を最大とし、それ以外の通信時は全 4 本の減衰量を 0 dB となるよう切替器を制御することもできる。また、通常の通信時には D-SAS 本来の制御を行うことで、通常の MIMO よりスループットを上げることも可能である。

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システムを構築して測位し、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平面アンテナを 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 チャンネルを用いた。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。つまり、両アンテナそれぞれ 10 回の計測結果が揃うまでに約 0.2 秒を要する。歩行者が秒速 1 m（時速 3.6 km）で移動すると考えると、この間に約 0.2 m（20 cm）移動していることになり、これが原因の誤差発生が考えられる。

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つねに 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、それ以外はつねに秒速 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 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、通常の無線 LAN 端末を用いた従来型測位 [10]（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、高頻度測位可能で歩行者動線を取得できるうえ、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

実験で構築したシステムを 2018 年 2 月に開催した展示会、NTT R&D フォーラム 2018 で動態展示 [33] 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。

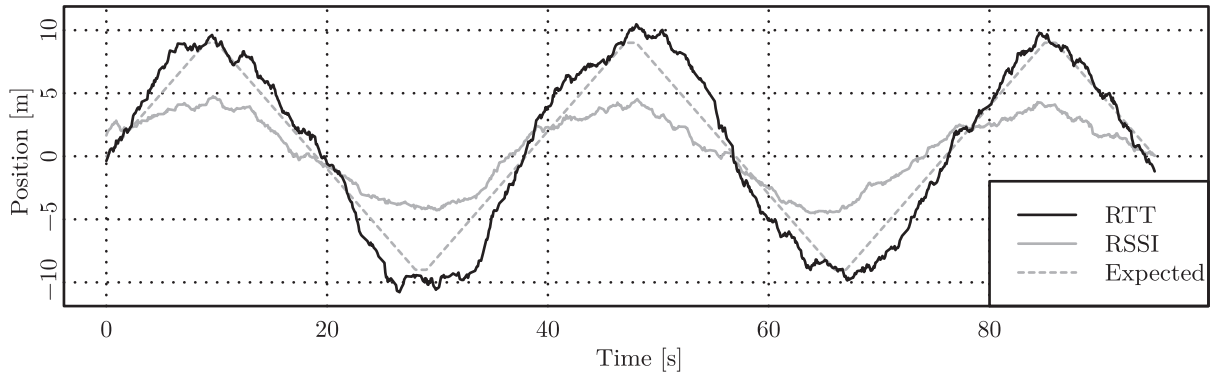


図 4 RTT 測位および RSSI 測位による結果と端末の実際の位置
 Fig. 4 Results of RTT/RSSI positioning and the expected position of the terminal.

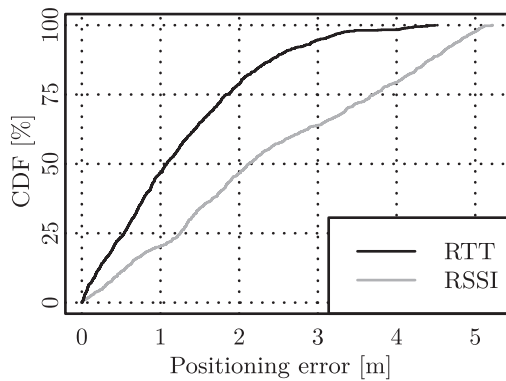


図 5 測位誤差 (差分の絶対値) の累積分布関数 (CDF)
 Fig. 5 The CDF of positioning error.

表 1 測位結果の平均誤差および 50%, 90% 誤差
 Table 1 MAE, 50%, and 90% error of positioning.

	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

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、20m 間隔でそれぞれ高さ 1m ないし 2m に設置した。分散アンテナの周囲約 1m 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。

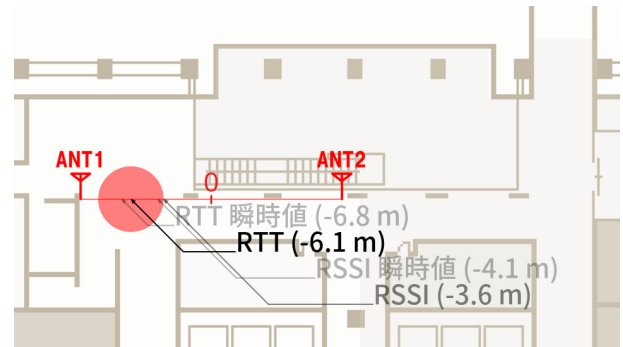


図 6 測位結果表示イメージ
 Fig. 6 The display image of positioning results.

5.2 結果

実験と同様、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、展示員の動きからつね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なかった。誤差は周囲の人数など状況によって変化したが、おおむね 2~3m 以内を維持することができた。数秒の遅れおよび誤差 2~3m 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、混雑時と閑散時に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

本論文では、運営者などが人流を把握することを目的として、利用者などが所持する端末の測位する方法を提案、評価し有効性を示した。従来広く普及している人工衛星による測位方式は屋内測位が困難である。また、屋内測

位できる方式であっても、端末が自身の測位をして結果をサーバなどに通知する仕組みを持つ必要があり、アプリケーションなどのインストールが必要となる。そこで、こうした課題を解決する新しい方式を提案した。提案方式は、通常の無線 LAN 端末が対象、端末にアプリケーションなどのインストール不要、端末が分散アンテナを用いた無線 LAN AP に帰属すると AP が端末の測位可能、歩行者動線を取得可能という特徴を持つ。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 1m 強および 2m 台、90% 誤差が 2m 台および 4m 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 [10]（精度 30m~50m）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 1m~5m）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明らかにした。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、測位精度が保たれたことから、来場者からも高い評価を得た。一方 RSSI 測位の場合は混雑によって影響を受けることが分かった。なお、本論文では 1 台の端末のみで評価を行ったため、測位対象端末が増えた場合のオーバーヘッド増加や、それを考慮した RTT/RSSI 計測頻度や測位間隔の制御、オーバーヘッドと精度のトレードオフ検討は今後の課題である。今後は、端末数増加によるオーバーヘッド関連のほか、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の検討、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、評価や応用先の拡大などを図りたい。

参考文献

- [1] 牧村和彦：MaaS とスマートシティ，都市計画，No.335, pp.42-45 (2018).
- [2] 日本経済新聞社：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，2017-07-29 (オンライン)，入手先 (<https://www.nikkei.com/article/DGXLASDG28H5F-Z20C17A7CR0000/>) (参照 2019-03-15).
- [3] 細田真道，坂本 寛，村上友規，花籠 靖，梅内 誠，毛利 忠，小川智明，宮本 勝：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，FIT2018 (第 17 回情報科学技術フォーラム)，No.CM-007, pp.59-64 (2018).
- [4] 福島荘之介：理解するための GPS 測位計算プログラム入門，(オンライン)，入手先 (<https://www.enri.go.jp/~fks442/K.MUSEN/>) (参照 2019-03-15).
- [5] U.S. Department of Defence: Table 3.8-3. SPS Positioning/Time Accuracy Standards, *Global Positioning System Standard Positioning Service Performance Standard*, 4th edition, p.34 (online), available from (<https://www.gps.gov/technical/ps/2008-SPS-performance-standard.pdf>) (2008).
- [6] 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・航法の新技术，電子情報通信学会誌，Vol.95, No.2, pp.119-124 (2012).
- [7] LAN/MAN Standards Committee of the IEEE Computer Society: 11.24.6 Fine timing measurement (FTM) procedure, IEEE Std. 802.11-2016, pp.1789-1800 (2016).
- [8] Banin, L., Schatzberg, U. and Amizur, Y.: WiFi FTM and Map Information Fusion for Accurate Positioning, *International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN)* (2016).
- [9] 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研究報告，Vol.115, No.290, ASN2015-69, pp.103-108 (2015).
- [10] 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).
- [11] 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，Vol.2016, No.1, 1D-05, pp.55-56 (2016).
- [12] 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，No.B-15-2, p.430 (2018).
- [13] 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研究報告，Vol.114, No.397, SANE2014-119, pp.79-84 (2015).
- [14] Loyez, C., Bocquet, M., Lethien, C. and Rolland, N.: A Distributed Antenna System for Indoor Accurate WiFi Localization, *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, Vol.14, pp.1184-1187 (online), DOI: 10.1109/LAWP.2015.2396901 (2015).
- [15] Bernardos, C.J., Zúñiga, J.C. and O'Hanlon, P.: 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 (online), DOI: 10.1109/CSCN.2015.7390443 (2015).
- [16] Güvenç, I. and Chong, C.-C.: A Survey on TOA Based Wireless Localization and NLOS Mitigation Techniques, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, Vol.11, No.3, pp.107-124 (online), DOI: 10.1109/SURV.2009.090308 (2009).
- [17] Bahillo, A., Prieto, J., Mazuelas, S., Lorenzo, R.M., Blas, J. and Fernández, P.: IEEE 802.11 Distance Estimation Based on RTS/CTS Two-Frame Exchange Mechanism, *VTC Spring 2009—IEEE 69th Vehicular Technology Conference*, pp.1-5 (online), DOI: 10.1109/VETECS.2009.5073583 (2009).
- [18] 星 尚志，石塚宏紀，小林亜令，南川敦宣：動的遮蔽物を考慮した BLE による屋内位置推定手法の提案，情報処理学会論文誌，Vol.60, No.1, pp.48-57 (2019).
- [19] Duc, T.X., 宮崎和哉，西尾信彦：無線 LAN 位置マーカ方式測位への状況適用型測位手法，マルチメディア，分散，協調とモバイル (DICOMO2012) シンポジウム，pp.1017-1026 (2012).
- [20] 鬼倉隆志，高柳健司，望月祐洋，村尾和哉，西尾信彦：無線 LAN の端末側測位と基地局側測位を用いた測位精度改善手法，情報処理学会研究報告，Vol.2015-UBI-46, No.3, pp.1-8 (2015).
- [21] 唐沢好男：フリスの伝達公式への温故知新，電子情報通信学会技術研究報告，Vol.115, No.390, AP2015-173, pp.33-36 (2016).
- [22] Bahillo, A., Mazuelas, S., Lorenzo, R.M., Fernández, P., Prieto, J., Durán, R.J. and Abril, E.J.: Hybrid RSS-RTT Localization Scheme for Indoor Wireless Networks,

EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, (online), DOI: 10.1155/2010/126082 (2010).

- [23] Sen, S., Choudhury, R.R., Radunovic, B. and Minka, T.: Precise Indoor Localization Using PHY Layer Information, *Proc. 10th ACM Workshop on Hot Topics in Networks*, pp.18:1-18:6 (online), DOI: 10.1145/2070562.2070580 (2011).
- [24] Wu, K., Xiao, J., Yi, Y., Chen, D., Luo, X. and Ni, L.M.: CSI-Based Indoor Localization, *IEEE Trans. Parallel and Distributed Systems*, Vol.24, No.7, pp.1300-1309 (online), DOI: 10.1109/TPDS.2012.214 (2013).
- [25] Vasisht, D., Kumar, S. and Katabi, D.: Decimeter-level Localization with a Single WiFi Access Point, *Proc. 13th USENIX Symposium on Networked Systems Design and Implementation (NSDI '16)*, pp.165-178 (2016).
- [26] 村上友規, 石原浩一, アベセカラ ヒラタ, 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研究報告, Vol.117, No.284, RCS2017-223, pp.105-110 (2017).
- [27] Ishihara, K., Murakami, T., Abeysekera, H., Akimoto, M. and Takatori, Y.: Distributed smart antenna system for high-density WLAN system, *Electronics Letters*, Vol.54, No.6, pp.336-338 (online), DOI: 10.1049/el.2017.4081 (2018).
- [28] 平栗健史: 電波とは, 電気設備学会誌, Vol.31, No.11, pp.837-841 (オンライン), DOI: 10.14936/ieiej.31.837 (2011).
- [29] 村上仙瑞: 軌跡の方程式の求め方の研究, 数研通信, Vol.74, pp.11-15, 数研出版 (オンライン), 入手先 (<https://www.chart.co.jp/subject/sugaku/suken-tsushin/74/74-3.pdf>) (2012).
- [30] 酒井俊治, 賀来謙二郎, 畦森宣信, 西川 充: アポロニウスの円—“中心と半径”か“直径の両端”かの考察を通して, 全国数学教育学会誌 数学教育学研究, Vol.6, pp.203-213 (オンライン), DOI: 10.24529/jasme.6.0.203 (2000).
- [31] 酒井俊治, 賀来謙二郎, 畦森宣信, 西川 充: アポロニウスの円 (II)—平面幾何的に“中心と半径”を直接捉える, 全国数学教育学会誌 数学教育学研究, Vol.8, pp.257-269 (オンライン), DOI: 10.24529/jasme.8.0.257 (2002).
- [32] LAN/MAN Standards Committee of the IEEE Computer Society: IEEE Std. 802.11ai-2016 (2016).
- [33] 日本電信電話株式会社: 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 (オンライン), 入手先 (https://labevent.ecl.ntt.co.jp/forum2018/info/exhibit1_ui202X.html) (参照 2019-03-15).



細田 真道

1974 年生。1997 年千葉工業大学工学部電子工学科卒業。1999 年同大学大学院修士課程修了。同年日本電信電話株式会社入社。ビッグデータ, 人流関連システム, データサイエンス, デジタルトランスフォーメーション等の研究開発に従事。2015 年第 10 回日本 OSS 奨励賞受賞, 2019 年 FIT2018 FIT 論文賞受賞。博士 (工学)。電子情報通信学会, 画像電子学会, 日本バーチャルリアリティ学会, ACM 各会員。



坂本 寛

1973 年生。1995 年早稲田大学理工学部電気工学科卒業。1997 年同大学大学院修士課程修了。同年日本電信電話株式会社入社。無線 LAN の利便性・付加価値向上の研究開発に従事。



村上 友規

1983 年生。2006 年早稲田大学理工学部電気情報生命工学科卒業。2008 年同大学大学院修士課程修了。同年日本電子電話株式会社入社。2015 年早稲田大学大学院基幹理工学研究科情報通信専攻博士課程修了。博士 (工学)。

以来, 無線信号処理技術の研究開発に従事。電子情報通信学会, IEEE 各会員。



花籠 靖

1990 年北海道大学大学院理学研究科修士課程修了。同年日本電信電話株式会社入社。データ活用サービス技術の研究開発に従事。



梅内 誠

1992 年早稲田大学理工学部応用物理学卒業。1994 年同大学大学院修士課程修了。同年日本電信電話株式会社入社。NTT アクセスサービスシステム研究所で無線 LAN の利便性・付加価値向上の研究開発に従事。現在,

NTT ブロードバンドプラットフォーム株式会社に勤務。電子情報通信学会会員。



毛利 忠

1963 年生。1987 年長崎大学工学部電子工学科卒業。1989 年同大学大学院工学研究科修士課程修了。同年日本電信電話株式会社入社。センサ搭載溶接ロボットシステム, ホーム ICT, ビッグデータおよび人流関連システム等の

研究開発に従事。



塩原 寿子 (正会員)

1990年大阪大学理学部物理学科卒業。1992年同大学大学院博士前期課程修了。同年日本電信電話株式会社入社。以来、データ可視化やデータマイニング等の研究開発に従事。現在、NTTアドバンステクノロジー社。



小川 智明

1973年生。1996年慶應義塾大学環境情報学部卒業。1998年同大学大学院政策・メディア研究科修士課程修了。同年日本電信電話株式会社入社。無線アクセスを用いた付加価値化技術の開発に従事。電子情報通信学会会員。



宮本 勝

1995年早稲田大学理工学部経営システム工学科卒業。1997年同大学大学院理工学研究科経営システム工学科修了。同年日本電信電話株式会社入社。以来、NTTヒューマンインタフェース研究所、NTT研究企画部門、NTTサービスエボリューション研究所で、ユーザエクスペリエンス、データサイエンスに関する研究開発およびプロデュース活動に従事。