

推薦論文

# 分散アンテナ型アクセスポイントによる 無線LAN端末2次元位置推定

細田 真道<sup>1,2,a)</sup> 坂本 寛<sup>3</sup> 村上 友規<sup>3</sup> 毛利 忠<sup>2</sup> 中山 彰<sup>4</sup> 小川 智明<sup>3</sup> 宮本 勝<sup>1,2</sup>

受付日 2020年6月26日, 採録日 2020年12月1日

**概要:** 本論文では MaaS, イベント, 施設等の運営者が人流把握を目的として来場者所持端末を測位する方法を提案する. 我々はこの目的のため, 広く普及している無線 LAN 端末を対象とし, 端末にアプリケーション等のインストール不要, 端末は分散アンテナを用いたアクセスポイントに帰属するだけでアクセスポイント側から 1 次元測位できる方法を以前提案した. 本論文ではこれを 2 次元に拡張するとともに, より多くのアンテナや複数種の計測値を統合して位置推定計算する方法を提案し, 有効性を確かめるための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.

**キーワード:** 位置推定, 測位, 無線 LAN, 分散アンテナ, RTT

## 2D Position Estimation for Wireless LAN Terminals by the Access Point using Distributed Antenna System

MASAMICHI HOSODA<sup>1,2,a)</sup> HIROSHI SAKAMOTO<sup>3</sup> TOMOKI MURAKAMI<sup>3</sup> TADASHI MOURI<sup>2</sup>  
AKIRA NAKAYAMA<sup>4</sup> TOMOAKI OGAWA<sup>3</sup> MASARU MIYAMOTO<sup>1,2</sup>

Received: June 26, 2020, Accepted: December 1, 2020

**Abstract:** In this paper, we propose a 2D positioning method for operators of MaaS, events, and facilities, etc. to grasp massive people flow by the positioning the terminals owned by the visitors. We have previously proposed a 1D positioning method for positioning widely used wireless LAN terminals without any application installed to the terminals. It is just by connecting the terminal with the access point that uses a distributed antenna system. In this paper, we extend it to 2D positioning and propose a method of calculating position estimation by integrating more antennas and multiple measurements. We conducted experiments to confirm the effectiveness of the proposed method and show the results and evaluation. Finally, we demonstrated the proposed method at an exhibition where many visitors gathered.

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

<sup>1</sup> 日本電信電話株式会社 NTT スマートデータサイエンスセンター  
NTT Smart Data Science Center, NTT Corporation,  
Minato, Tokyo 108-0023, Japan

<sup>2</sup> 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

<sup>3</sup> 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

<sup>4</sup> 日本電信電話株式会社研究企画部門  
Research and Development Planning Department, NTT Cor-  
poration, Chiyoda, Tokyo 100-8116, Japan

a) masamichi.hosoda.bn@hco.ntt.co.jp

### 1. はじめに

近年 MaaS (Mobility as a Service) という考え方が注目されている. これは移動手段を従来のようにモノとしてでなくサービスとして提供するもの [1] であり, 利用者は個々の具体的な移動手段にとらわれず, 目的地まで最適な移動手段やルートを選択し利用できる. このようなサービス提

本論文の内容は 2019 年 9 月の FIT2019 第 18 回情報科学技術フォーラムで報告され, 同プログラム委員長により情報処理学会論文誌ジャーナルへの掲載が推薦された論文である.

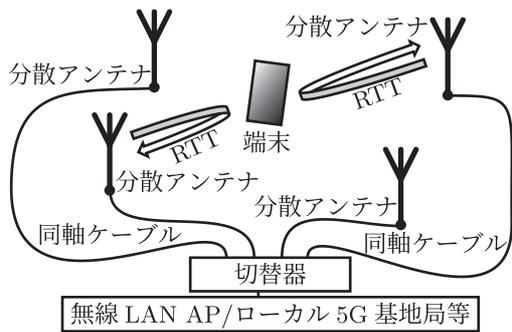


図 1 提案方式の構成

Fig. 1 The configuration of the proposed method.

供には利用者本人だけでなく周囲の人々の移動も把握し、最適な移動手段を判断する必要がある。

また、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、危険な状態が発生して雑踏事故・群集事故につながる可能性がある。こうした課題の対策として混雑度予測システムの試験的導入 [2] 等が進められている。多数の人の流れ（以下、人流）を把握することで、誘導・交通規制変更等の対策が可能となり、混雑緩和や事故防止につなげることができる。さらに現在では、感染症の拡大を防ぐために、密閉・密集・密接の「3つの密」を避けるよう要請 [3] されており、「新しい生活様式」[4] として「人との間隔は、できるだけ2m（最低1m）空ける」ことや、公共交通機関の利用について「混んでいる時間帯は避けて」等が提言されている。人流把握できれば人と人の間の距離を空けて密度を下げる誘導や、混雑した公共交通機関を避けた移動手段やルートを選択する等により、「3つの密」を避け、感染拡大防止につなげることができる。

本論文では MaaS やイベント、施設等の運営者が人流把握を目的として来場者を測位する方法を提案する。我々はこの目的のため、広く普及し多くの人が所持する端末を対象とし、端末にアプリケーション等インストール不要、端末は分散アンテナ型アクセスポイント/基地局（以下、AP）に帰属（接続）するだけで AP 側から 1 次元測位できる方法を提案 [5], [6] した。本論文ではこれを 2 次元に拡張、より多くのアンテナや複数種の計測値を統合して位置推定計算する方法を提案（図 1）[7] し、有効性を確かめるための実験を行い、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

### 2.1 衛星測位

GNSS（Global Navigation Satellite System, 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。これは衛星から端末への電波の到着時刻（Time of Arrival, 以

下 ToA）で測位 [8] するものである。一例として GPS の測位精度は全世界平均で水平方向 9m 以下、垂直方向 15m 以下等と規定 [9] されているが、屋内やビルの谷間等、衛星からの遮蔽が多い場所では測位困難である。

### 2.2 屋内測位

屋内外問わず利用できる測位方式には IMES（Indoor Messaging System, 精度 3m~10m）[10] や FTM（Fine Timing Measurement, 精度数 m 程度）[11], [12] 等があるが、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、多くの端末が搭載する Bluetooth や無線 LAN を使って、チャネル状態情報（Channel State information, 以下 CSI）や受信電波強度（Received Signal Strength Indicator, 以下 RSSI）を計測し位置推定する方式がある。CSI を用いた方式 [13], [14], [15] は、CSI を取得できるチップセットに限られており、多様な端末での計測ができないため人流計測には使いにくい。一方、RSSI を用いた方式 [16], [17], [18], [19], [20] は多くの端末で計測が可能な方式で、以下に詳細を述べる。

#### 2.2.1 RSSI 計測

##### 2.2.1.1 Bluetooth

環境に BLE（Bluetooth Low Energy）ビーコンを複数設置し、それらが定期的に送信するビーコンを端末で受信し計測する [16], [17]。

##### 2.2.1.2 無線 LAN

周囲の通信用 AP が送信するビーコンやプローブ応答フレーム等を端末で受信し RSSI を計測する [18]。無線 LAN ビーコン送信専用 AP を用いる方式 [19] や、逆方向（端末が送信し AP が受信）の RSSI を併用する双方向の方式 [20] もある。

#### 2.2.2 RSSI 位置推定

計測した RSSI から位置推定する方法は、Scene Analysis（Fingerprint）法 [16] と Triangulation 法 [17], [18], [19] に分類でき、双方を併用するもの [20] もある。

##### 2.2.2.1 Scene Analysis (Fingerprint)

あらかじめ測位範囲内の各地点において、受信可能な複数のビーコン/AP の RSSI を計測した Fingerprint を学習しておく。測位時には端末が計測した複数のビーコン/AP の RSSI と、学習した Fingerprint とを比較等することで位置推定する方法である。より細かく多数の地点で Fingerprint を学習することで精度向上できるが、それには大きな手間がかかる。また、学習時と測位時で周囲の環境条件や端末が変わると RSSI も変わってしまい、精度低下につながる。

##### 2.2.2.2 Triangulation

まず、距離によって電波が減衰するフリスの伝達公式 [21] に基づいたモデルを用い RSSI からビーコン/AP と端末間の距離を求める。モデルはいずれの文献でも類似しており、たとえば文献 [18] では、以下のとおりである。

$$\alpha_i = \alpha_0 - 10 \cdot n \cdot \log_{10}(r_i/r_0) \quad (1)$$

このうち  $\alpha_0$  と  $n$  を定数として事前に決定してから計算している。 $\alpha_0$  は送信電力やアンテナ利得、周波数の影響を受け、端末やビーコン/AP の組合せやチャンネルによって変化する。 $n$  は距離による減衰量を表す指数で、環境（空間）によって変化する。しかし、経験則に基づいた固定値を使う方法 [18] や、あらかじめ計測した値を使う方法 [17], [19] が多く使われており、別の端末を使う等して条件が変わると精度低下につながる。

次に、距離から位置推定を行うが、距離には誤差が含まれており、そのままでは位置を求めることができない。そのため、加重平均による方法 [18]（精度 30m~50m）等が用いられる。加重平均は距離で重みを付けてビーコン/AP の座標を平均するため、距離やビーコン/AP の座標に偏りがあると精度低下につながる。カメラを併用する方法 [17]（精度数 m）は追加の機器を要するため、コスト面等の課題が発生する。歩数計を併用する方法 [19]（精度数 m）は歩数計を搭載しない端末では利用できない。Fingerprint を併用する方法 [20]（精度数 m）では学習が必要となり手間を要する。

### 2.2.3 人流把握に適応する際の課題

ここまで述べた方式は双方向も含め、いずれも端末が計測動作する必要がある。端末にアプリケーション等のインストールを要する。つまり人流把握するには数多くの人々がアプリケーションをインストールする必要があることになり難しい。また、人流把握のためには複雑な交錯が発生する場合等で測位頻度を高くし動線追跡する必要がある。しかし、これらの方式の測位間隔はビーコン等の送信間隔に依存しており変更が難しい。BLE ビーコンは高頻度にするともバッテリー交換頻度も高くなってしまいう課題がある。また、無線 LAN では各 AP が異なるチャンネルで動作しており、チャンネルを順次切り替えながら計測を行うスキャン動作 [22] が必要となる。スキャンは時間を要する上、通信中はスキャンを中断するため、高頻度測位が難しいという課題がある。

## 2.3 本研究の位置づけ

人流把握に適応する際の課題を解決するには、以下 3 点の要件を満たした測位方式が必要となる。

- (1) 広く普及している通常端末の測位が可能
- (2) 端末へアプリケーション等のインストール不要
- (3) 高測位頻度による動線追跡が可能

要件 (1) と要件 (2) は、人流把握では数多くの端末で測位をする必要があることから生じる。要件 (3) は、複雑な交錯が発生していても人流把握するために必要である。

要件 (1) については、GNSS、BLE、無線 LAN いずれも広く普及しており計測方法としては満たしているといえ

る。しかし、GNSS を屋内の人流把握に用いるのは困難である。BLE や無線 LAN ならば屋内でも利用できるが、それらの従来方式で用いられる RSSI 位置推定は端末によってアンテナ利得等の違いがあるため、端末ごとに学習したり、端末ごとに計測して指数を変えたりしないと原理的に精度低下につながる。これは端末バリエーションの多さを考えると現実的ではない。要件 (2) については、GNSS 対応端末では測位アプリケーションがプレインストールされていて、緊急通報 (110 番, 118 番, 119 番) 時に GNSS 測位結果を警察・海上保安庁・消防へ通知する機能を持っていることがある。しかし、これは緊急通報時のみ機能するものであり、施設等の運営者が人流把握を目的として使用することはできない。また、そうした目的に使用できる標準的な規格もアプリケーションもない。さらに、BLE や無線 LAN では、測位アプリケーションがインストールされていることが少なく、施設等の運営者が人流把握に利用できる標準的な規格もアプリケーションもない。要件 (3) については、GNSS であれば動線追跡できる頻度で測位可能であるが、BLE や無線 LAN の従来方式では困難である。

本研究では、これら 3 つの要件を満たした測位方式を検討し提案する。

## 3. 提案方式

### 3.1 共通部

1 次元測位 [5], [6] と共通の部分について概要を述べる。

#### 3.1.1 構成

構成は図 1 に示した。測位専用の機器は用意せず、インターネット等、通信サービス提供用の AP に測位機能を付加し、測位対象端末は AP に帰属しているものとする。AP には分散スマートアンテナシステム (D-SAS) [23], [24] 技術の一部応用し、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) を接続する。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) を計測して位置推定計算 (以下、RTT 測位) する。これはフレームの到着時刻を使うため ToA 測位 [25] 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、これを用いた位置推定計算 (以下、RSSI 測位) や、RTT 測位と RSSI 測位の併用 (それぞれで端末座標を求める) ができる。

#### 3.1.2 計測

RTT 計測シーケンスを述べる。AP が 1 つの分散アンテナを指定し、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  $t_4 - t_1$  によって求める。

端末はマネジメントフレームが届いたら ACK を返すだ

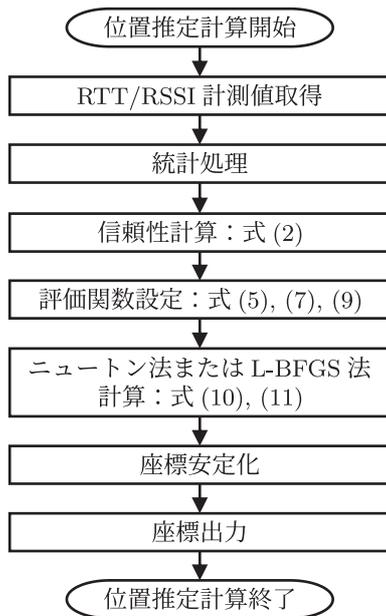


図 2 2次元位置推定計算フロー

Fig. 2 The flow of 2D position estimation calculation.

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おり、すべての無線 LAN 端末がこの動作を行う。そのため AP に帰属していればどんな端末でも測位できる。また、AP はフレームを送信でき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ができるため必要に応じて高頻度の計測を行うことができる。

RTT を計測するため BLE ビーコンのような一方通行の機器を用いることはできない。しかし、基地局が送信する何らかのフレームに対して端末が ACK を返すものであればよいので、無線 LAN だけでなく、今後普及が見込まれるローカル 5G 等でも測位可能と考えている。

### 3.1.3 統計処理

RTT は端末の状態等の影響を受けて揺らぎ、RSSI もフェージング等の影響を受けて揺らぐため、計測回数を増やし統計的に揺らぎを除く。AP は 1 つの分散アンテナで端末移動できないような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 に対し分散アンテナごとに、一定時間をスライドしながら外れ値を除いた移動平均をとる。この際、RSSI は事前に  $P = 10^{(RSSI/10)}$  で mW 表記にする。

## 3.2 2次元測位

2次元測位する方法を提案する。計算のフローを図 2 に示す。図中の統計処理までは共通部としてすでに説明した。ここでは信頼性から先を説明する。

### 3.2.1 信頼性

1次元測位 [5], [6] を単純に拡張して 2次元測位するには分散アンテナが 3 本あれば位置推定計算できる。しかし、

精度の向上を図るにはより多くの分散アンテナを用いたり、RTT 測位と RSSI 測位を併用したりするだけでなく、RTT 計測値と RSSI 計測値の双方を使った位置推定計算（以下、統合測位）が有効だと考えられる。このように未知数よりも計測値が多い場合は、いわば優決定系になるため座標が一意に定まらないことが発生する。そこで、各計測値を同等に扱うのではなく、信頼性の高い計測値を重視するよう重みづけした位置推定計算をする。そのために、統計処理した RTT 計測値および RSSI 計測値に対して信頼性を計算する。

信頼性は一定期間内の計測回数が多ければ高く、変動が多ければ低くなるようにする。また、RTT 計測値と RSSI 計測値の特性の違いや、各分散アンテナ設置場所の条件の違いによって補正できるようにする。具体的には、まず移動平均区間内の外れ値を除いた計測回数を  $s$  とする。たとえばある 1 つの分散アンテナの外れ値を除いた計測回数が秒間 20 回で、移動平均区間が 5 秒であれば、 $s = 20 \cdot 5 = 100$  となる。次に、この  $s$  回の計測の標準偏差を  $\sigma$  とする。そして、計測回数の補正率  $a_{\text{size}}$  と補正オフセット  $b_{\text{size}}$  を設定、標準偏差の補正率  $a_{\text{sigma}}$  と補正オフセット  $b_{\text{sigma}}$  を設定し、信頼性  $w$  を以下のように計算する。

$$w = \frac{a_{\text{size}} \cdot s + b_{\text{size}}}{a_{\text{sigma}} \cdot \sigma + b_{\text{sigma}}} \quad (2)$$

### 3.2.2 計算の前提

座標の単位は m とする。分散アンテナ  $n$  本の座標を  $(x_i, y_i)$ ,  $(i = 1, 2, \dots, n)$  とする（既知）。統計処理した RTT を  $t_{\text{rti}}$  [s] とし、その信頼性を式 (2) で計算し  $w_{\text{ti}}$  とする（既知）。統計処理した RSSI を  $RSSI_i$  [dBm] とし、その信頼性を式 (2) で計算し  $w_{\text{ri}}$  とする（既知）。端末座標を  $(x_s, y_s)$  とする（未知）。ここで、分散アンテナ  $i$  と任意の地点  $(x, y)$  との距離を  $d_i(x, y)$  とすると以下のようになる。

$$d_i(x, y) = \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2} \quad (3)$$

また、分散アンテナ  $i$  と端末との間の真の距離を  $l_i$  [m] とする。つまり  $l_i = d_i(x_s, y_s)$  である。

### 3.2.3 RTT 評価関数

光速を  $c$  [m/s] とする。 $t_{\text{rti}}$  は往復の時間だが、片道の距離相当を疑似距離  $l_{\text{pi}}$  [m] として以下のように置く。

$$l_{\text{pi}} = \frac{ct_{\text{rti}}}{2} \quad (4)$$

$l_{\text{pi}}$  と  $l_i$  の差分を  $l_d$  [m] とし  $l_i = l_{\text{pi}} - l_d$  とする。 $l_{\text{pi}}$  は計測値から計算できるため既知、 $l_d$  は未知である。以上より RTT 測位の未知数は  $x_s, y_s, l_d$  であり、これらを探索して位置推定する。探索中の推定値をそれぞれ  $x, y, l$  とすると、推定座標と分散アンテナ  $i$  間の距離は  $d_i(x, y)$  となり、真の距離の推定値は  $l_{\text{pi}} - l$  となり、すべての推定値が正しければ両者は一致する。そこで両者の差分を使い RTT 評価関数を以下のように定義する。

$$f_{ti}(x, y, l) = d_i(x, y) - (l_{pi} - l) \quad (5)$$

重みを使う際には  $w_{ti}$  を用いる。使用する定数は  $c$  のみで、どんな環境でも同一である。端末ごとに変化する値  $l_d$  を未知数としたため、端末にも依存しない。よって RTT 測位は従来方式と異なり、事前の計測や調整が不要、設置するだけで精度の良い不特定端末の測位が望める。

### 3.2.4 RSSI 評価関数

電波が距離によって減衰するモデルとして 1 次元測位 [5], [6] と同様のフリリスの伝達公式 [21] に基づいたモデルをとる。本論文では、空間の伝搬損失係数を  $\alpha$ 、波長を  $\lambda$  [m]、端末を分散アンテナ直近に近づけ計測した RSSI を  $B$  [dBm] とし  $RSSI_i$  が以下になるモデルとする。

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

$RSSI_i$ ,  $B$  を mW 表記にしたものを  $P_{RSSI_i}$ ,  $P_B$  とし、

$$r_B = \frac{\lambda}{4\pi} P_B^{(1/\alpha)}, R_i = P_{RSSI_i}^{-(1/\alpha)}$$

と置き式 (6) を  $l_i$  について解くと  $l_i = r_B R_i$  となる。 $R_i$  は計測値から計算できるため既知、 $r_B$  は未知である。以上より RSSI 測位の未知数は  $x_s, y_s, r_B$  であり、これらを探索して位置推定する。探索中の推定値をそれぞれ  $x, y, r$  とすると、推定座標と分散アンテナ  $i$  間の距離は  $d_i(x, y)$  となり、真の距離の推定値は  $r R_i$  となり、すべての推定値が正しければ両者は一致する。そこで両者の差分を使い RSSI 評価関数を以下のように定義する。

$$f_{ri}(x, y, r) = d_i(x, y) - r R_i \quad (7)$$

重みを使う際には  $w_{ri}$  を用いる。使用する定数は  $\alpha$  のみである。これは環境（空間）ごとに異なり、何らかの方法で決定する必要があるが、端末によって変化する値  $r_B$  は未知数なので、端末には依存しない。よって RSSI 測位は従来方式と異なり、設置場所ごとに  $\alpha$  を決定するだけで、精度の良い不特定端末の測位が望める。

### 3.2.5 範囲評価関数

推定値が端末の移動可能範囲を外れた場合、評価値にペナルティを与えるための範囲評価関数を定義する。推定値が範囲内であれば 0、範囲から外れた場合は外れ度合いに応じて値が大きくなるようにする。このため、 $x$  の範囲  $x_{\min} < x < x_{\max}$  に対して、

$$f_{Lx}(x) = \begin{cases} x_{\min} - x & (x < x_{\min}) \\ 0 & (x_{\min} < x < x_{\max}) \\ x - x_{\max} & (x > x_{\max}) \end{cases} \quad (8)$$

という  $f_{Lx}$  を定義し、同様に  $f_{Ly}, f_{Ll}, f_{Lr}$  も定義し、範囲評価関数を以下のように定義する。

$$f_L(x, y, l, r) = f_{Lx}(x) + f_{Ly}(y) + f_{Ll}(l) + f_{Lr}(r) \quad (9)$$

重みを使う際には、範囲内に収める力の強弱を重み  $w_L$  とし、他の重みとの相対的な大小関係で設定する。

### 3.2.6 位置推定

各評価関数を組み合わせた連立方程式を解くことで位置推定できる。分散アンテナ 4 本で統合測位をする場合は以下のようなになる。

$$\begin{cases} f_{t1}(x, y, l) = 0 \\ \vdots \\ f_{t4}(x, y, l) = 0 \\ f_{r1}(x, y, r) = 0 \\ \vdots \\ f_{r4}(x, y, r) = 0 \\ f_L(x, y, l, r) = 0 \end{cases} \quad (10)$$

これを解析的に解くことは困難であるが、重み付き最小二乗法を用いたニュートン法で解を得ることができる。

また、各評価関数を誤差評価関数にまとめ、これが最小になる推定値を L-BFGS 法等で探索し位置推定することもできる。誤差評価関数は以下のように定義できる。

$$f_{\text{error}}(x, y, l, r) = \sum_{k=1}^n (w_{tk} f_{tk}(x, y, l))^2 + \sum_{k=1}^n (w_{rk} f_{rk}(x, y, r))^2 + (w_L f_L(x, y, l, r))^2 \quad (11)$$

いずれも、RSSI 計測値を無視した RTT 測位を行いたければ  $f_{ri}$  の項を外し、RTT 計測値を無視した RSSI 測位を行いたければ  $f_{ti}$  の項を外して計算すればよい。提案方式は、Fingerprint を用いないため事前学習不要、加重平均を用いないため精度の良い測位を望める。追加の機器等も不要で、多種多様な端末の測位ができる。

### 3.3 座標安定化

位置推定結果には外れ値が出ることがある。そこで、連続する 2 つの推定結果の間で移動速度が閾値を超えた場合は、後の推定結果を出力しないフィルタを掛ける。これにより外れ値を除いて安定した座標を出力できる。

## 4. 実験

提案方式で 2 次元測位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 次元測位 [5], [6] のシステムを拡張して分散アンテナを 2 本から 4 本に増やし、すべて同一型番の平面アンテナを同一型番で 12 m の同軸ケーブルで接続した。各分散アンテナは屋内の実験室内で 1 辺 10 m の正方形の頂点の位置になるよう配置し、向きは正方形中心方向とした。配置と座標系を図 3 に示す。周波数帯は 5 GHz 帯 W52 の 36 チャネルを用い、端末はノート 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等はない。

### 4.2 測位条件

予備実験として、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、という形で分散アンテナ 1, 2, 3, 4, 1, … の順番で繰り返し計測したところ、1 アンテナあたり秒間 25 回程度、4 アンテナ合計で秒間 100 回程度の計測が可能であった。統計処理で用いる移動平均区間は RTT, RSSI ともに 5 秒とした。移動平均の影響により測位結果はつねに約 2.5 秒遅れるが、この遅れを取り除く補正をして評価する。RSSI 測位における伝搬損失係数  $\alpha$  は自由空間と同じ 2 とした。

範囲評価関数の設定範囲は正方形の辺付近を除くため、 $x, y$  ともに  $-4.5\text{m}$  から  $4.5\text{m}$  とし、 $l, r$  には範囲の制約を設けなかった。RTT の重み  $w_{ti}$  は式 (2) の定数を  $a_{\text{size}} = 1$ ,

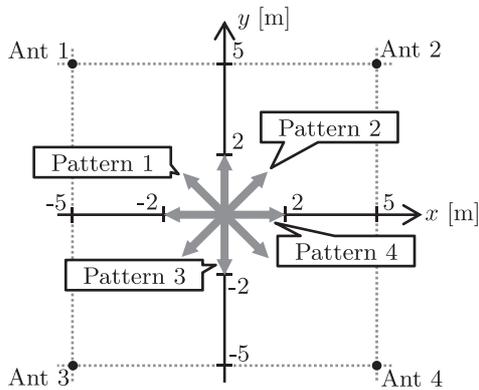


図 3 配置と座標系

Fig. 3 Placement and coordinate system.

$b_{\text{size}} = 0, a_{\text{sigma}} = 1, b_{\text{sigma}} = 0$  として計測回数・標準偏差とも補正しない設定とした。予備実験では外れ値を除去した計測回数が  $s = 100$  前後、標準偏差が  $\sigma = 60$  前後だったため、 $w_{ti}$  は 1~2 程度の値を見込む。RSSI の重み  $w_{ri}$  は、予備実験で RTT と同等の計測回数  $s = 100$  前後が得られたため、式 (2) の定数を  $a_{\text{size}} = 1, b_{\text{size}} = 0$  として計測回数を RTT と同じく補正しない設定とした。一方、標準偏差は変動が少なくきわめて小さかったため  $a_{\text{sigma}} = 0$  として、重みが標準偏差の影響を受けないように設定した。また、1次元測位 [5], [6] の結果から RTT 測位の方が RSSI 測位より精度が高いと考えられるため、 $b_{\text{sigma}} = 100$  に設定して  $w_{ti} > w_{ri}$  となるようにした。予備実験とこれらの設定により  $w_{ri}$  は 1 前後の値を見込む。範囲評価関数の重み  $w_L$  は 3 に設定し  $w_L > w_{ti}$  となるようにした。座標安定化の閾値は秒速 10m とした。

歩行者の通常移動を模し 4 種類の移動パターンを用意し評価した。図 3 に各パターンを示している。いずれも正方形中央の 4m 直線を秒速 1m で往復し、パターンによって直線の方法が異なる。移動はいずれも中心からスタートし、2m 進む、2 秒停止、4m 戻る、2 秒停止、2m 進む、という順番で中心に戻ってくるものである。

### 4.3 結果

統合測位 (RTT+RSSI), RTT 測位 (RTT only), RSSI 測位 (RSSI only) の結果と端末の実際の位置 (Expected) を図 4, 図 5 に示す。4 パターン合算した測位誤差 (距離) の累積分布関数 (CDF) を図 6 に示す。平均誤差および 50%, 90% 誤差と平均測位頻度を表 1 に示す。統合測位 (RTT+RSSI) が最も良い精度となり、平均および 50% 誤差が 1m 強、90% 誤差が 2m 強であった。測位頻度も秒間

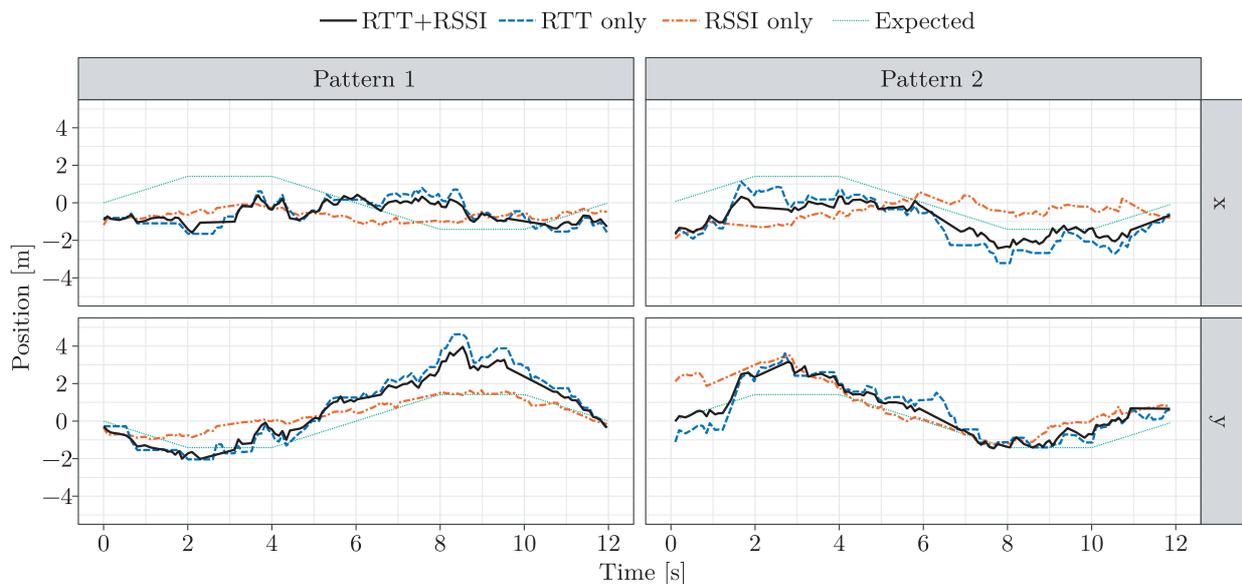


図 4 2次元測位結果と端末の実際の位置 (パターン 1, 2)

Fig. 4 2D positioning results and the expected position of the terminal (Pattern 1, 2).

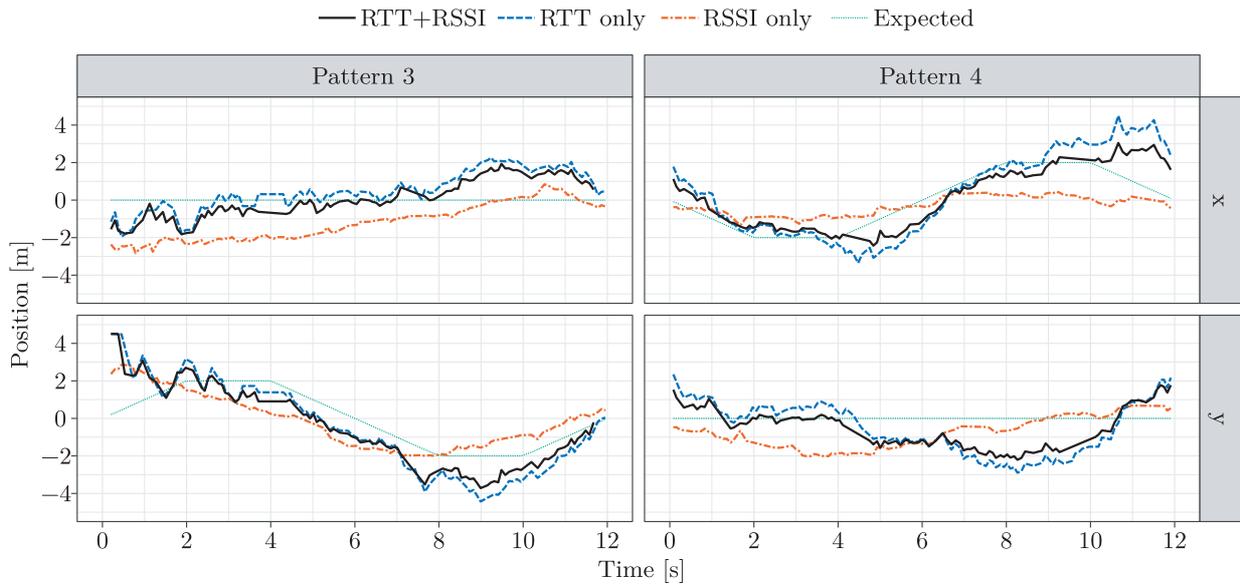


図 5 2次元測位結果と端末の実際の位置 (パターン 3, 4)

Fig. 5 2D positioning results and the expected position of the terminal (Pattern 3, 4).

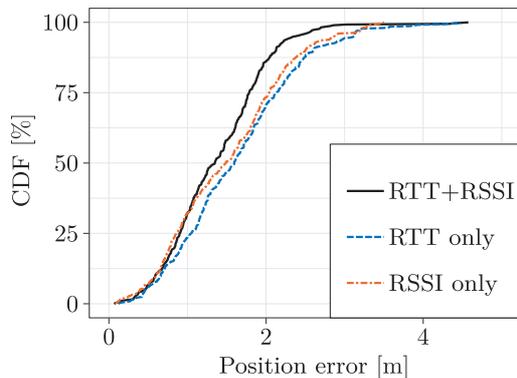


図 6 2次元測位誤差の累積分布関数 (CDF)

Fig. 6 The CDF of 2D positioning error.

表 1 2次元測位の平均誤差および50%, 90%誤差と平均測位頻度  
Table 1 Average error, 50% error, 90% error, and average positioning frequency of 2D positioning.

	RTT+RSSI	RTT only	RSSI only
平均誤差	1.37 m	1.63 m	1.50 m
50%誤差	1.35 m	1.60 m	1.49 m
90%誤差	2.13 m	2.61 m	2.50 m
平均測位頻度	8.10 回/s	9.23 回/s	8.48 回/s

8回を超えており、十分に動線追跡できる。RTT測位とRSSI測位ではRSSI測位の方がわずかに精度が良かった。ただし、RSSI測位はRTT測位より位置推定で大きな外れ値を出す頻度が高く、座標安定化フィルタの効果により測位頻度は低くなった。

比較のため1次元測位 [5], [6] の平均誤差および50%, 90%誤差を表 2 に示す。本論文の2次元測位は3種とも平均および50%誤差で1次元RTT測位と1次元RSSI測位の間の精度となっている。一方、90%誤差については精度

表 2 1次元測位 [5], [6] の平均誤差および50%, 90%誤差  
Table 2 MAE, 50%, and 90% error of 1D positioning.

	1次元 RTT	1次元 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

が同等もしくは良くなった。通常、2次元測位では1次元よりも精度が悪くなると考えられる。しかし、比較対象の1次元測位は分散アンテナ数が必要数と同じ2本だったのに対し、本論文の2次元測位は必要数3本よりも1本多くなっていること、統合測位はRTT計測値とRSSI計測値を組み合わせていること、各計測値の信頼性を重みとして位置推定計算していること、等によって精度の向上を図ることができたと考えられる。また、通常の無線LAN端末を用いた従来型測位 [18] (精度30m~50m) と比較して、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1m~3m) を実現できた。

#### 4.4 考察

##### 4.4.1 分散アンテナと端末の位置関係

GNSSにおける誤差は、距離計測の誤差とDOP (Dilution of Precision) と呼ばれる測位精度指標値の積で概算でき [26], 提案方式もこれと同様の考え方ができる。

まず、距離計測の誤差について考える。RSSIを用いた方式は式 (6) で示すように対数を用いている。距離と計測値が対数の関係にあるため、分散アンテナに近い場所を移動したときはRSSIの変化が大きく、遠い場所を移動したときはRSSIの変化が小さくなる。RSSI計測は、計測値

が  $-70$  [dBm] や  $-30$  [dBm] のように異なっても、分解能はどちらもたとえば  $1$  [dB] のように一定であることが多いため、近距離ならば小さい動きでも RSSI 計測値が変化して高精度に距離測定できるのに対して、遠距離では大きく動かなければ RSSI 計測値が変化しないため精度が低くなる。一方、RTT を用いた方式は式 (4) で示すように、距離と計測値は線形の関係である。つまり近距離でも遠距離でも誤差は変わらない。このことから、RSSI を用いている従来方式は、近距離では有利だが遠距離では不利になることが分かる。提案方式は、近距離においては RTT+RSSI のように併用して計測値を増やすことで誤差を小さくし、遠距離では RTT のみに切り替えて誤差の低下を防ぐことができる。そのため、従来方式と比較して、近距離だけでなく、特に遠距離、つまり比較的広い空間でも有利であるといえる。

次に GNSS における測位精度指標値である DOP について考える。DOP は衛星と端末の幾何学的な位置関係のみから計算 [26] され、端末から見て衛星が偏った方向に偏在していると値が大きく（誤差大）、衛星が広く散らばっていると値が小さく（誤差小）なる。これは、以下のように説明される [27]。2 衛星のみで測位すると、端末は 2 衛星の位置を焦点とする回転双曲面上のどこかにあることが分かる。そして他の複数の 2 衛星の組合せでも同様に回転双曲面を求め、それらの交点から端末の位置を決定できる。しかし、距離計測誤差があるため 1 つの回転双曲面は一意に決まらず、いわば「誤差による厚み」があり、その中のどこかに端末があることになる。厚みがある曲面どうしが交わる、いわば「交点」を考えると、たとえ厚みが同じであっても交わる角度が浅ければ交点の体積が大きくなり、角度が深ければ交点の体積が小さくなる。端末はこの体積中のどこかにあるため、体積が測位誤差に相当する。つまり、同じ距離計測誤差であっても、幾何学的な位置関係で決まる交点の角度が浅ければ DOP が大きく誤差大、深ければ DOP が小さく誤差小となる。

衛星を分散アンテナに置き換えることで、提案方式でも同様の考え方ができる。提案方式では分散アンテナ 2 本のみで測位すると、RTT では双曲線、RSSI では円のどこかに端末があることが分かる [6]。そしてこれらの交点における交わる角度が浅ければ誤差大、深ければ誤差小となる。つまり、端末から見て分散アンテナが偏っていれば角度が浅くなるため誤差大、分散アンテナが散らばっていれば角度が深くなるため誤差小となる。図 3 の場合、端末が原点である中央にあるときは、端末から見て分散アンテナが等角度間隔に散らばるため誤差が小さくなる。逆に、端末が分散アンテナで囲まれた領域の外にあるときは、端末から見ると偏るため誤差が大きくなる。この幾何学的な指標は、分散アンテナの間隔をより大きく、より広くなるように配置することで、指標の良い場所を広くすることができ

有利である。逆に間隔を短く、より狭くなるように配置すると、指標の良い場所が狭くなるため不利となる。

#### 4.4.2 空間環境

測位はその対象となる空間の環境による影響を受ける。端末と分散アンテナ間に何らかの遮蔽物があると、それによって電波の減衰が発生して RSSI 計測値が小さくなったり、反射波の影響が大きくなることで RTT 計測値が大きくなったりして、真の距離よりも長く見えることになる。すると、端末の推定位置は真の位置よりも他の分散アンテナの方向にずれ、誤差の原因となる。

遮蔽物として植木のような物体が置いてある場合や、人が横切るといった場合は、減衰により RSSI 計測値が小さくなり RSSI 測位に大きな影響が表れる。しかし、直接波の減衰があっても反射波が優勢になるほどではなく、RTT 計測値・RTT 測位にはほとんど影響がなかった。よって植木等がある空間環境や、人が多数訪れるような場所では RTT 測位が有利といえる。一方で金属製の扉等、電波が反射する物体が近くにある場合は、反射波の影響が大きくなるエリアが発生することがある。また、金属扉の開閉等によって反射波の影響が変化することもある。こうした反射波が影響するエリアでは RTT 測位であっても誤差が大きくなる。これを防ぐには、分散アンテナの設置位置を工夫したり、指向性を絞ったりして、反射波の影響をなるべく小さくする方法が考えられる。

#### 4.4.3 端末依存性

提案方式は、端末依存性を持たないように設計した測位方式である。端末以外の条件が同一であれば、RTT/RSSI 計測値そのものは端末によって違っても、測位結果は同一になるように考慮している。

RSSI の場合、端末によって送信電力とアンテナ利得が異なるため、分散アンテナで受信する ACK フレームの RSSI が異なる。従来方式はこの違いを考慮しておらず、端末によって精度が異なる。しかし、これはランダムに異なるわけではなく、その差分は複数の分散アンテナで同じである。提案方式では、この RSSI の違いを式 (6) のモデルで  $B$  が変わることで示し、式 (7) の RSSI 評価関数では  $B$  に由来する端末依存の変数  $r$  を未知数として評価対象にすることで、端末に依存しない測位を実現している。

RTT の場合、端末によって RTT、つまり  $t_{rti}$  が異なる可能性がある。このうち、電波が空間を伝搬している時間は端末の位置が同じであれば変わらないので、提案方式において端末依存性があるのは、端末がマネジメントフレームを受信してから ACK フレームを送信するまでの時間である。この時間を端末応答遅延時間 ( $t_d$ ) とする。無線 LAN は CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance) という制御方式が用いられており、フレームを送信するには、他端末がチャネル使用時は送信できず、決められた時間だけチャネルが空いたことを確認

後に送信できる。通常のフレームを送信する場合は、DIFSと呼ばれる一定の時間と、ランダムに決定されるバックオフ時間の合計時間、チャンネルが空いたことを確認する必要がある。たとえチャンネルが空いても、待ち時間中に他の端末が送信を始めたら、再度チャンネルが空いてからもう1度最初から待ち時間を計る必要がある。一方、ACK フレームは、自端末宛てフレームを受信してから SIFS と呼ばれる一定の時間を待つだけで送信できる。SIFS は DIFS より短く、バックオフ時間も必要ないため、ACK フレームは他のフレームより最優先で送信できる。また、多くの無線 LAN チップはこの動作をチップ内だけで行っており、CPU 等、無線 LAN チップ外の処理負荷の影響を受けず、優先して送信処理される。これらにより、 $t_d$  が大きく変動することはないと考えられる。また、提案方式は移動平均を用いているため、短時間の揺らぎであれば取り除くことができる。

もちろん、無線 LAN チップ固有の性能差等で、移動平均値が端末によって異なることが想定される。しかし、その差分は複数の分散アンテナで同じであり、提案方式は式(5)の RTT 評価関数における端末依存の未知数  $l$  として評価対象とし、端末に依存しない測位を実現している。

## 5. フィールド実証

実験で構築したシステムを2018年10月に開催した展示会、つくばフォーラム2018[28]「NTT 展示/スマートな保守運用」にて「アプリ不要！無線 LAN だけでスマホの現在地がわかります。—電波到達時間 (ToA) による屋内測位技術—」として動態展示し、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

実験では1辺10mの正方形としたところを、展示スペースの都合で1辺8mの正方形に変更した。4つの分散アンテナのうち1つ (ANT3) は、本展示ブース横に高さ1m程度で設置した。その対角線反対側の分散アンテナ (ANT2) は他展示ブースどうしの隙間となる展示エリア角に高さ1m程度で設置した。残る2本の分散アンテナ (ANT1, 4) は他展示ブースの背後に設置しなければならなかったため、展示ブースよりも高くなるよう高さ3m程度で設置した。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、各アンテナ間は両側に展示ブースが並ぶ展示エリアの通路であり、自由に横切ったり滞留したりできた。実験とは異なり、多数の来場者が横切る状態での測位となり、来場者が横切るたびに RSSI 計測値が大きく変動し、RSSI 測位や統合測位は影響を受けて誤差が大きくなることが想定されたため、RTT 測位を測位結果として用いることとした。また、RTT 測位は展示員が静止していても細かく振動

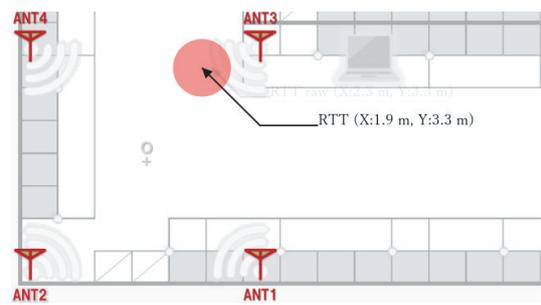


図 7 測位結果表示イメージ

Fig. 7 The display image of positioning results.

する傾向があるため、座標安定化として「あそび」となるスレッシュドを設け、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るようにした。展示員は測位対象のノート PC を入れたカバンと目印の旗を持ち徒歩で移動し、本展示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 7)。

### 5.2 結果

実験同様、移動平均等の影響で、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、展示中に各アンテナ間を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、大きな影響を受けず誤差数 m 以内を維持できた。アプリケーション不要で誤差数 m という精度で動線が得られることについて、多くの来場者から有望な屋内測位方式であるとの高い評価を得た。

### 5.3 考察

#### 5.3.1 分散アンテナ高の違いによる影響

本実証では、展示スペースの都合で同一平面上になければならない分散アンテナの一部を、平面から外れた位置に設置した。このように本来の位置に設置できないケースは多々発生すると思われるため、測位精度への影響を考察する。今回は図 7 の ANT1, ANT4 が高さ 3m, ANT2, ANT3 が高さ 1m であった。展示員が持つ端末は ANT2, ANT3 と同じ高さ 1m 程度を移動した。そこで、この高さ 1m の平面を端末移動平面と呼ぶことにする。すると端末移動平面上にないのは ANT1, ANT4 であり、端末移動平面からの高さはどちらも 2m である。以下、ANT1 と ANT4 からそれぞれ垂直に端末移動平面上へ投影した点どうしを結ぶ、対角線上にある端末を測位することを考える。

端末が ANT1 と ANT4 の中央にあるときの配置を図 8 に示す。ANT1, ANT4 から 2m 垂直に下がった所に、図では水平実線で示す端末移動平面がある。その中央に端末の真の位置があり、ANT1, ANT4 からの水平距離はどちらも約 5.66m, 実際の距離はグレーの斜線で示す 6m となる。このとき、ANT1-ANT4 間で測位すると、端末は端末

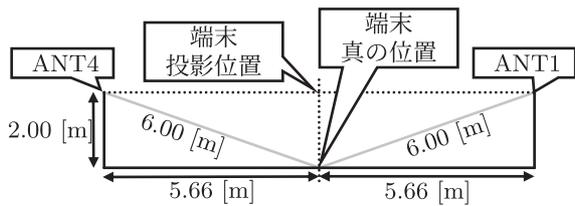


図 8 アンテナ高が異なる場合 (誤差無)

Fig. 8 Different antenna heights (no error).

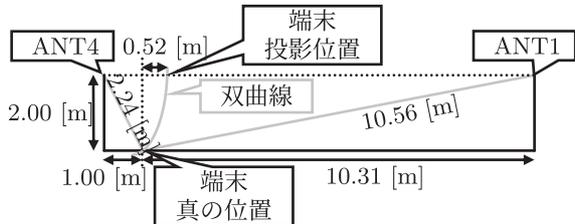


図 9 アンテナ高が異なる場合 (誤差大)

Fig. 9 Different antenna heights (large error).

移動平面よりも 2m 上にある水平点線上に投影され、その座標が出力されることとなる。これは必ずしも垂直に投影されるわけではなく、RTT 測位では ANT1, ANT4 を焦点とする双曲線に沿って投影される [6]。ただし、端末が中央にあるときは ANT1, ANT4 からの距離がともに 6m で等距離なので、垂直に投影した場合と同じ結果となる。つまり、本実証の環境で、ANT1, ANT4 が端末移動平面上にないことによる誤差は、端末が中央にあると発生しない。

逆に中央から外れてどちらかの分散アンテナに近づくと誤差が大きくなる。そこで、分散アンテナに最も近づいた場合の最大の誤差を求める。先に述べたとおり、分散アンテナの周囲 1m には近づくことができないようにしていたため、分散アンテナから 1m が最短距離となる。端末が ANT4 から 1m 離れた場所にあるときの配置を図 9 に示す。反対側となる ANT1 からの水平距離は約 10.31m となる。ANT4 からの実際の距離は約 2.24m、ANT1 からの実際の距離は約 10.56m である。双方からの距離に差があるため垂直には投影されず、ANT1, ANT4 を焦点とする双曲線に沿って投影される。これを計算すると端末投影位置は約 0.52m ずれることが分かる。つまり、本実証の環境で、ANT1, ANT4 が端末移動平面上にないことによる誤差は、最大で約 0.52m となる。

本実証では最大 0.52m の誤差であれば動態展示には問題ないと判断し、高さ 3m (端末移動平面からの高さ 2m) の設置を許容した。今回は 1 辺 8m の正方形でアンテナ高の差分が 2m であったが、誤差の要件が厳しい場合は、分散アンテナ間の距離を長くする、高さ差分を小さくすることで誤差を小さくすることができるため、こうした計算によって分散アンテナの設置場所を決める必要がある。また、本実証では展示スペースの都合で設置高をずらしたが、環境によっては反射波の影響を防止するために設置高をず

らすケースも考えられる。その場合は反射波の影響と、設置高の違いによる誤差との、トレードオフの関係で設置位置を決定する必要がある。

### 5.3.2 人の混雑と分散アンテナ高による影響

本実証では先に述べたように来場者があふれ混雑したが、測位に大きな影響を受けることはなかった。これは ANT1, ANT4 の設置高が高いことによる可能性がある。端末、ANT2, ANT3 の高さはすべて 1m であり、これらの中で来場者が横切ると、必ず遮蔽されるため影響を受ける。しかし、ANT1, ANT4 は設置高 3m であるため、端末との距離や来場者の身長によって遮蔽されるか否かが変わる。図 8 のように端末が中央にあった場合、身長 2m の来場者であれば端末から ANT1 または ANT4 までの水平距離の半分、約 2.83m より端末に近い位置にいると遮蔽され影響が出る。身長 1.5m の来場者であれば、さらにその半分である約 1.41m より近いと影響が出る。図 8 のように端末が ANT1 から遠い位置の場合、身長 2m であれば水平距離約 10.31m の半分となる約 5.16m、身長 1.5m であればさらに半分の約 2.58m より近いと影響が出る。

展示中の混雑した時間帯では、展示員から 1m 以内を多数の来場者が横切ることになり、設置高が高くても来場者による遮蔽は相当数発生していたが、測位に大きな影響を与えることはなく、この程度の遮蔽であれば問題ないといえる。しかし、ANT2, ANT3 に対する遮蔽に比べれば影響は小さかったものと思われる。多数の人で混雑するような場所では、設置高による誤差発生を許容し、分散アンテナを高い位置に設置した方がよい場合も考える。

### 5.3.3 無線区間の混雑による影響

提案方式は通常の無線 LAN を用いており、無線区間のチャンネルを占有できない。来場者で混雑するような場所では、他端末の通信によってチャンネルも混雑し測位に影響する可能性がある。チャンネルが混雑しても、先に述べたとおり端末からの ACK フレームは最優先で送信できるため、1 回の RTT 計測値そのものは影響を受けない。しかし、AP から送信するマネジメントフレームは優先されないため、チャンネルが混雑していると必要なタイミングで送信できなかったり、移動平均区間で揺らぎを吸収するために必要な回数が計測できなかったりして誤差が増える可能性がある。こうした場合は、分散アンテナの設置密度を高くし、チャンネルの混雑を減らす方法 [23], [24] が有効であると考えられる。なお、提案方式の計測用フレームは、マネジメントフレームも ACK フレームも短いため、計測そのものでチャンネルの混雑が増すことはほぼないと考えられる。

## 6. おわりに

本論文では MaaS やイベント、施設等の運営者が人流把握を目的として来場者を測位する方法を提案した。これは、広く普及し多くの人々が所持する無線 LAN 端末を対象

とし、端末にアプリケーション等インストール不要で、端末は AP に帰属するだけで AP 側から 2 次元測位できるという特徴を持つ。また、端末の機種に依存することなく、多くのアンテナを使い、RTT 計測値と RSSI 計測値を統合して位置推定計算することによって、精度良く測位することができる。この提案方式の有効性を確かめるための実験を行い測位結果および評価を示した。その結果、平均および 50% 誤差が 1m 強、90% 誤差が 2m 強、測位頻度が秒間 8 回を超えており、十分に人流把握のための動線追跡ができるものとなった。これにより、通常の無線 LAN 端末を用いた従来型測位 [18] (精度 30m~50m) と比較して、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~3m) を実現した。最後に、フィールド実証として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た。展示会には多数の来場者が訪れたが、RTT 測位は来場者で混雑しても大きな影響はなく、アプリケーション不要で誤差数 m という精度で動線が得られることについて、多くの来場者から有望な屋内測位方式であるとの高い評価を得ることができた。今後は、本論文では既知とした伝搬損失係数  $\alpha$  を統合測位の未知数として自動的に求め、事前の調整等をいっさい不要とする方法、複数の送受信レートやチャネルを使ってフレームを送受信し、1本のアンテナでより多種の計測値を得ることで、周囲の反射等による影響を低減するとともに、実質的なアンテナ数を増やしたかのような大統合測位で精度の向上を図る方法、非分散アンテナ型 AP を複数台用い、非帰属 AP から帰属 AP を模した計測フレームを送受信することで、分散アンテナを用いずに測位する方法等を検討したい。また、提案方式は容易に 3 次元測位方式へ拡張できると考えており、これを実装・構築し、評価や応用先の拡大を図ることや、今後普及が見込まれるローカル 5G 等にも応用する等したい。

## 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/](https://www.nikkei.com/article/DGXLASDG28H5F_Z20C17A7CR0000/)) (参照 2020-06-01).
- [3] 新型コロナウイルス感染症対策専門家会議：新型コロナウイルス感染症対策の見解，2020-03-09 (オンライン)，入手先 (<https://www.mhlw.go.jp/content/10900000/000606000.pdf>) (参照 2020-06-01).
- [4] 新型コロナウイルス感染症対策専門家会議：新型コロナウイルス感染症対策の状況分析・提言，2020-05-04 (オンライン)，入手先 (<https://www.mhlw.go.jp/content/10900000/000629000.pdf>) (参照 2020-06-01).
- [5] 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). FIT 論文賞.
- [6] 細田真道，坂本 寛，村上友規，花籠 靖，梅内 誠，毛利忠，塩原寿子，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，情報処理学会論文誌ジャーナル，Vol.61, No.1, pp.3–15 (2020).
- [7] 細田真道，坂本 寛，村上友規，毛利 忠，小川智明，宮本勝：分散アンテナ型アクセスポイントによる無線 LAN 端末 2 次元位置推定，FIT2019 (第 18 回情報科学技術フォーラム)，No.CM-007, pp.53–58 (2019).
- [8] 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/](https://www.enri.go.jp/~fks442/K_MUSEN/)) (参照 2020-06-01).
- [9] U.S. Department of Defence: Table 3.8–3 SPS Position/Time Accuracy Standards, *Global Positioning System Standard Positioning Service Performance Standard*, 4th edition, p.34 (2008) (online), available from (<https://www.gps.gov/technical/ps/2008-SPS-performance-standard.pdf>).
- [10] 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).
- [11] 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).
- [12] 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).
- [13] 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).
- [14] 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).
- [15] 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).
- [16] 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).
- [17] 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).
- [18] 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).
- [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] 小西勇介，中尾敏康：WiFi 測位のためのアクセスポイントスキャン高速化方式，Vol.2011-MBL-057, No.3, pp.1–8 (2011).

- (2011).
- [23] 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研究報告, Vol.117, No.284, RCS2017-223, pp.105–110 (2017).
- [24] 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).
- [25] Güvenc, 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).
- [26] 坂井文泰: GPS/GNSS の基礎知識, GPS/GNSS シンポジウム 2007, No.2007, pp.229–256 (2007).
- [27] 安田明生: GPS の現状と展望, 電子情報通信学会誌, Vol.82, No.12, pp.1207–1215 (1999).
- [28] 野村智之, 古敷谷優介, 田所将志, 佐々木元晴, 猪狩亜紀子: 「つくばフォーラム 2018」開催報告, NTT 技術ジャーナル, Vol.31, No.2, pp.48–53 (2019) (オンライン), 入手先 ([https://www.ntt.co.jp/journal/1902/JN2019024\\_8.h.html](https://www.ntt.co.jp/journal/1902/JN2019024_8.h.html)).

#### 推薦文

本論文では, アクセスポイントと端末間での RTT と RSSI を併用し, 信頼性を考慮した統合推定手法によって, 端末位置を推定する新しい手法を提案している. フィールドテストも含めた実験により一定の有効性を確認しており, 新規性・実用性の高い研究として推薦する.

(FIT2019 第 18 回情報科学技術フォーラムプログラム  
委員長 柏野 邦夫)



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.



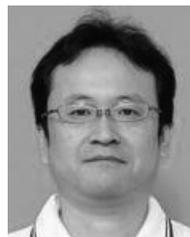
坂本 寛

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. 同年日本電信電話株式会社入社. 2015 年同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.



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.



中山 彰 (正会員)

1999 年奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科博士前期課程修了. 同年日本電信電話株式会社入社. ロボット, CSCW, 情報推薦, 人流に関する研究開発に従事. 2007 年奈良先端科学技術大学院大学博士後期課程修了. 博士 (工学). 日本音響学会, 日本ロボット学会, ACM, 各会員.



### 小川 智明

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にて、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。