

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

鬼倉 隆志¹ 高柳 健司¹ 望月 祐洋² 村尾 和哉¹ 西尾 信彦¹

概要: 近年、屋内測位の研究が盛んに行われている中で、測位のためのインフラの導入コストを抑えることができる手法として無線 LAN を用いた測位が注目されている。無線 LAN 測位は、端末側測位と基地局側測位に大別され、端末側測位で広く普及している Scene Analysis は、測位時の電波環境や観測状況に依存するため、測位精度が不安定になる問題がある。一方、基地局側測位で一般に利用される Triangulation は、受信電波強度から算出する距離の誤差や基地局の配置、密度に測位精度が依存しているため、測位精度に限界がある。本研究では、Scene Analysis による端末側測位と Triangulation による基地局側測位を並行して行い、測位結果を組み合わせることで測位精度を改善する手法を提案する。提案手法は FingerPrint 手法に比べて平均測位誤差を約 30%削減した。加えて、既存手法に比べ測位誤差の標準偏差が小さく、ばらつきの少ない測位が可能であることを示し、高精度かつ安定した無線 LAN 測位を実現した。

1. はじめに

近年、位置情報を利用したナビゲーション^{*1}や、位置情報にもとづいた情報提示^{*2}などのサービスが普及している。ユーザの位置情報を取得するには GPS の利用が一般的であるが、人々が多くの時間を過ごす建物内や地下といった屋内では、衛星からの電波が遮蔽物の影響を受けて減衰するため GPS を利用した位置情報取得が困難である。屋内でも位置情報を利用したサービスの提供を可能にするため、無線 LAN [1], [2], [3], [4], [5], ステレオカメラ [6], IMES[7] を用いた屋内測位の研究が盛んに行われている。

特に、無線 LAN を用いる手法は、家庭や公共施設など一般に普及してきた無線 LAN 基地局（以下、基地局と呼ぶ）と情報端末に搭載されている無線 LAN 通信モジュールを利用するため、測位のためのインフラの導入コストを抑えることができ、有効な屋内測位手法の 1 つとして注目されている。無線 LAN 測位は、端末側で基地局が常時発信するビーコンを利用する端末側測位 [1], [2], [3], [4], 基地局側で端末が送信するフレームを利用する基地局側測位 [5] に大別することができる。端末側測位は端末で観測した基

地局情報と、事前に作成した測位空間の電波環境マップとのパターンマッチングにより測位を行う Scene Analysis が普及している。一方、基地局側測位では、位置既知な基地局と端末間の距離を受信電波強度（以下、RSSI^{*3}と呼ぶ）をもとに推定して測位に利用する Triangulation が一般的に行われている。

しかし、端末側測位の Scene Analysis は周辺の電波環境の変化や、基地局の移動・消滅などの要因により、電波環境マップが劣化し推定精度が大幅に低下する。加えて、パターンマッチングにおいて類似度の近い候補地点が複数存在する場合や、パケットロスなどの影響を考慮できず精度の低い結果を利用し、測位精度が安定しない。基地局側測位の Triangulation では、RSSI から推定する距離には誤差が含まれ、さらに基地局の配置密度や設置位置に測位精度が依存するため測位精度には限界があると考えられる。

本研究では、高精度かつ測位結果にばらつきの少ない安定した無線 LAN 測位を実現する。基地局側測位に Triangulation、端末側では Scene Analysis の 1 つである FingerPrint 手法 [1] を用いた測位を並行して行う。基地局側測位では、端末が存在する可能性が高いと考えられる領域を算出する。端末側測位では、Fingerprint 手法を利用した測位を行うが、従来手法のように測位結果を一意に決めるのではなく、複数地点を測位の候補地点とする。測位の候補地点のうち、基地局側測位で算出した、端末が存在する可能性が高いと考えられる領域に含まれる地点の 1 つを測位結果

¹ 立命館大学 情報理工学部
College of Information Science and Engineering, Ritsumeikan University

² 立命館大学 総合科学技術研究機構
Research Organization of Science and Technology, Ritsumeikan University

*1 Google Maps, <http://www.google.co.jp/maps/>

*2 Google Now, <http://www.google.com/intl/ja/landing/now/>

*3 Received Signal Strength Indication

とすることで、測位結果を一意に決定する。

以降、2節で無線 LAN を用いた測位の関連研究とその問題について述べ、3節で提案手法について述べる。4節で提案手法実現のための設計と実装について述べ、5節で提案手法の評価と考察を述べ、6節でまとめと今後の展望について述べる。

2. 関連研究

本節では、無線 LAN 測位手法の関連研究とその問題点について述べる。

2.1 Triangulation

Triangulation は、端末と基地局間の距離と RSSI の減衰関係から距離を推定する近似式を作成し、RSSI から推定した距離と基地局との相対的な位置関係をもとに測位する。位置が既知である基地局を利用する事が前提にあるため、基地局の位置を把握する施設管理者や携帯キャリアなどが、利用者の端末が発信するフレームを基地局側で受信し測位する基地局側測位に適している。Duc ら [2] は、RSSI から推定する距離 $dist$ (以下、推定距離と呼ぶ) を近似する式を

$$dist(rssi) = 10^{\frac{A+RSSI}{B}} \quad (1)$$

としている。式 1 は、事前に計測しておいた距離による電波減衰率から算出されている。式 1 の A, B は環境依存のパラメータであり、端末と基地局間の距離と RSSI の減衰関係を環境ごとに採取し、最小二乗法により求める。基地局は端末が発信するフレームの RSSI から式 1 を利用して端末までの推定距離 $dist$ を算出する。受信した端末のフレーム数を n 個、基地局 i の位置を $(x_i, y_i) (i = 1, 2, \dots, n)$ 、測位結果を (X, Y) とする。測位結果の座標から基地局 i までの実距離 $DIST_i$ は、2点間の距離の公式より式 2 で表される。

$$DIST_i = \sqrt{(X - x_i)^2 + (Y - y_i)^2} \quad (2)$$

推定距離 $dist_i$ と実距離 $DIST_i$ との間には誤差が生じるため、最小二乗法を用いて連立方程式の解を近似することによって測位結果 (X, Y) を求める。Triangulation は、基地局の配置が偏っている場合でも推定精度が低下しない利点がある。しかし、Triangulation では、3箇所以上の基地局で端末からのフレームが観測されない場合は測位できない問題がある。加えて、端末と基地局間における実距離で観測される RSSI には揺らぎが生じるため、式 1 で近似した曲線を利用した推定距離 $dist$ には誤差が含まれる。

2.2 加重平均手法

暦本ら [3] は加重平均手法を提案している。加重平均手法は、基地局の座標に対し 2段階の重み付き平均処理を行

い測位結果を算出するため、推定距離が正確でない場合でも大幅な精度の低下を防ぐことができる。しかし、加重平均手法は基地局の絶対位置に重みを付けて平均を取るため、基地局の配置密度が高い地点に測位結果が収束してしまう。加えて、1点の基地局のみで端末のフレームが観測された場合は、その基地局の位置が測位結果となるため測位精度が大幅に悪化する問題がある。

2.3 Scene Analysis

Scene Analysis は、事前学習フェーズと、位置測位フェーズの 2つの段階を経て測位を行う。事前学習フェーズでは、測位空間の複数地点における緯度経度情報と、各地点で観測される基地局からの電波情報を結び付けた電波環境マップを作成する。位置推定フェーズでは、前段階で作成した電波環境マップと、端末が実際に観測した電波情報とのパターンマッチングにより測位を行う。Scene Analysis は、測位空間の各地点における反射波や散乱波の影響を考慮した電波環境マップが作成でき、かつ観測地点の間隔を狭くすれば Triangulation に比べ高精度な位置推定が可能である。基地局の位置が未知な場合においても、比較的高精度な測位が可能であるため、基地局が発信するビーコンを端末が利用する端末側測位で利用されている。Bahl ら [1] は、計測地点の座標および基地局が発信するビーコンを事前に収集し、座標に紐づいた Wi-Fi 情報群 (Fingerprint) を作成し、測位時に観測した電波観測情報と Fingerprint のユークリッド距離を計算してユークリッド距離が一番近い Fingerprint 地点の座標を測位結果としている。事前学習フェーズでは、測位対象空間の N 箇所の観測地点における座標を $(x_n, y_n) (n = 1, 2, \dots, N)$ 、各地点で観測された基地局 $AP_i (i = 1, 2, \dots, I)$ と RSSI (α_i) を結び付けた電波観測情報 O を

$$O = \{o_1, o_2, \dots, o_i\} \quad (3)$$

$$o_i = \{AP_i, \alpha_i\}$$

とすると、電波環境マップの Fingerprint は

$$FP_n = \{x_n, y_n, O\} (n = 1, 2, \dots, N) \quad (4)$$

で表される。位置推定フェーズで端末が観測した電波情報を O' とすると、式 5 のユークリッド距離を利用し、事前学習フェーズで作成した $FP_1 \sim FP_N$ と O' に共通して観測された基地局からの RSSI の類似度 $Score$ を算出し、Fingerprint 地点に $Score$ を付与した FP'_n を算出する。

$$Score_n = \sqrt{\sum_{n=1}^N (\alpha_i - \alpha'_i)^2} \quad (5)$$

$$FP'_n = \{x_n, y_n, O, Score_n\} (n = 1, 2, \dots, N) \quad (6)$$

図 1 の Fingerprint 手法において、 $FP'_1 \sim FP'_N$ から $Score$

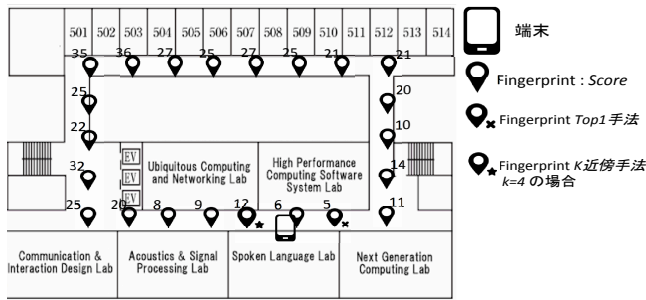


図 1 Fingerprint 手法

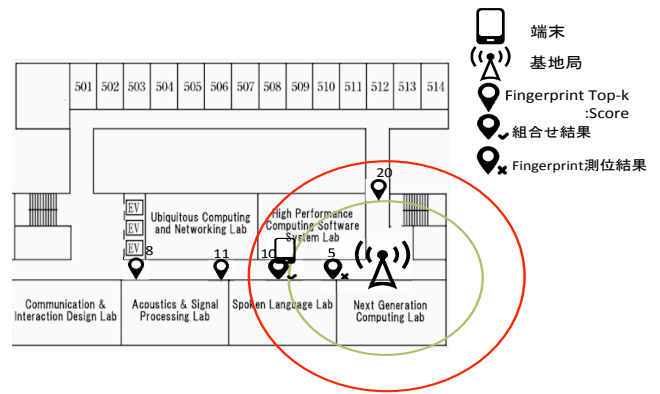


図 2 提案手法

が最小になる Fingerprint 地点の座標を測位結果とする（以下、Fingerprint Top-1 手法と呼ぶ）。あるいは、 k 近傍法を用い $Score$ の小さい k 個の Fingerprint 地点の座標の重心を測位結果とする（以下、Fingerprint k 近傍法と呼ぶ）。しかし、Fingerprint 手法は周辺の環境の変化や、基地局の移動・消滅などの要因により、電波環境マップが劣化し測位精度が大幅に下がってしまう。加えて、測位空間の電波環境において基地局数が少ない場合や、観測した電波状況の特徴に差が見られない場合に測位精度が安定しない問題がある。

3. 提案手法

2 節で述べた、基地局側測位の Triangulation における測位精度の限界や端末側測位の Scene Analysis における測位結果が悪化し測位精度が安定しないという問題を解決するために、無線 LAN 測位を端末側と基地局側から並行して行い、その測位結果を組み合わせ、測位精度を改善する手法を提案する。提案手法の概要を図 2 に示す。基地局側測位では、従来手法で算出する推定距離 $dist$ の誤差を考慮し端末が存在する可能性が高いと考えられる領域（以下、Accurate Area と呼ぶ）を算出する。本研究の基地局側測位により、1 点の基地局のみで端末のフレームが観測された場合においても端末が存在する可能性が高いと考えられる領域を限定することが可能になる。端末側測位では、2.3 節で述べた比較的精度の高い測位が可能な Scene Analysis の 1 つである Fingerprint 手法を利用する。Fingerprint 手法は測位精度が安定しないため、複数の Fingerprint 地点を測位の候補地点とする。測位の候補地点のうち、基地局側測位で算出した Accurate Area 内に含まれる地点の 1 つを測位結果とすることで、測位空間の電波環境に大きく依存する Fingerprint 手法の測位結果を改善し、高精度かつ測位結果にばらつきの少ない測位を実現する。さらに、端末側と基地局側で観測された電波状況を利用し、測位結果の精度の推定手法を提案する。

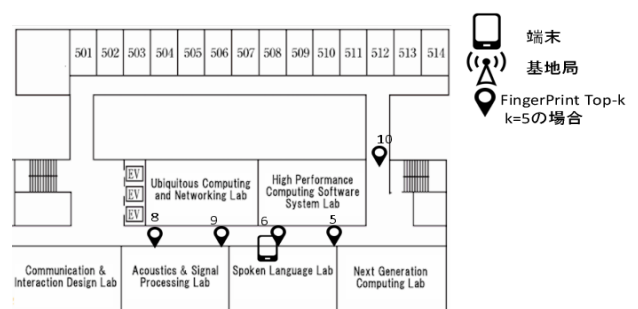


図 3 Top-k 手法の概念

3.1 端末側測位

端末側測位では 2.3 節で述べた Bahl らの Fingerprint 手法を用いる。端末で観測した基地局情報 O' (式 3) と事前で作成した Fingerprint 地点 FP (式 4) に共通する基地局からの RSSI とのユークリッド距離 (式 5) により、測位地点 N 箇所の Fingerprint 地点に対して $Score_1 \sim Score_N$ を算出し FP' (式 6) を作成する。従来手法のように、Fingerprint 手法は測位空間の電波環境に大きく依存し測位結果が安定しない問題点がある。そのため、Fingerprint 手法のみで測位結果を一意に特定せず、図 3 に示すように $Score$ の低い k 個 ($k = 1, 2, \dots, N$) の Fingerprint 地点を測位の候補地点にとどめ（以下、Top- k 手法と呼ぶ）、3.2 節に述べる基地局側の測位結果を利用して測位結果を一意に特定する。適切な k の値については、予備実験の評価結果から $k=5$ とした。

3.2 基地局側測位

推定距離を算出するため式 1 の近似式の環境依存のパラメータ A , B を求める必要がある。事前に図 4 に示す実距離と RSSI を観測した。従来手法では、事前に観測した実距離と RSSI 値の情報をすべて利用し、近似曲線を決定する。しかし、式 1 の近似曲線により常に正しい距離を推定でき

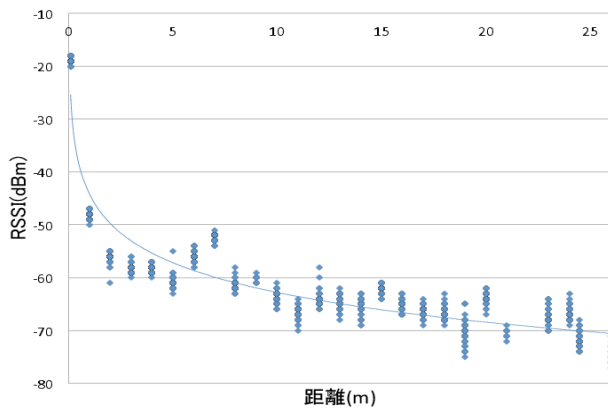


図 4 距離と RSSI の減衰関係

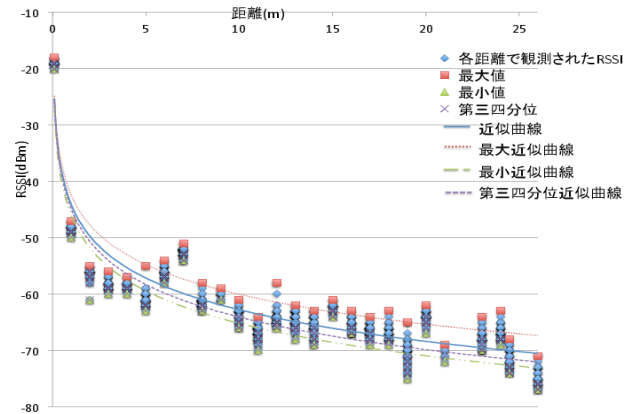


図 6 Accurate Area の算出方法

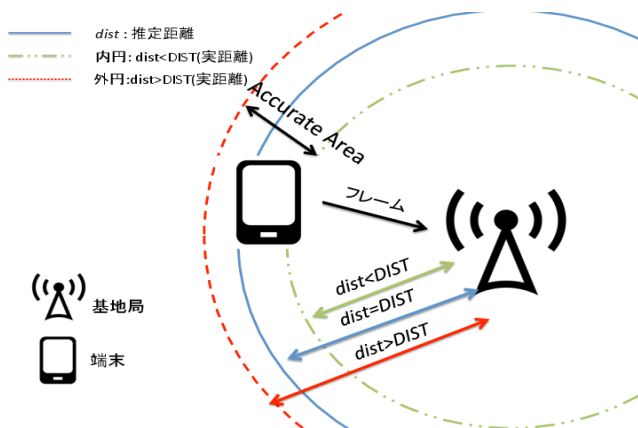


図 5 Accurate Area の概念

るわけではない。実際には、近似曲線で算出される推定距離 $dist$ には実距離 $DIST$ より長い場合 ($dist > DIST$) と短い場合 ($dist < DIST$) の誤差が含まれる。そのため、図 5 で示す従来の近似曲線で算出した推定距離 $dist$ と、実距離より短い誤差を含んだ近似曲線 (以下、内円と呼ぶ)、実距離より長い誤差を含んだ近似曲線 (以下、外円と呼ぶ) を利用し推定距離 $dist$ の誤差を表現する。内円と外円で囲まれた領域に端末が存在する可能性が高いと考えられるため、この領域を Accurate Area と定義する。

3.2.1 Accurate Area 算出方法

内円と外円により従来の近似曲線の誤差を表現するために図 4 で観測した実距離と RSSI の減衰関係を利用する。無線電波特性を考慮すると、一定の観測期間を設ければ外的要因に影響を受けずに最短経路で観測されるフレームが存在すると考えられるため、ある距離における RSSI の上限は一定の値に収束する傾向がある。そのため測位時に観測された RSSI を、図 6 に示すように実距離における最大 RSSI 値のみで作成した近似曲線 (以下、最大近似曲線と呼ぶ) を利用し推定距離を算出することで、取得した RSSI における上限の距離を表現できると考える。一方、ある距離における RSSI の下限に関しては、反射波や散乱波や天候などの要因により電波が弱まり RSSI 下限値の分散

が大きくなる傾向にある。そのため、推定距離の下限の誤差を表現する近似曲線を作成するため、実距離における最小値のみを利用した最小近似曲線に加え、RSSI 値の下位 25% を利用した第三四分位近似曲線を作成し、実距離に対し推定距離が短い場合の誤差を表現する。Accurate Area を定義する適切な内円と外円の組合せについては、予備実験の評価結果から Accurate Area 幅を短くし領域に含まれる Fingerprint を少なく制限可能な内円を第三四分位近似曲線、外円を最大近似曲線としその間の領域を Accurate Area として定義した。

3.3 端末側測位と基地局側測位結果の統合手法

3.3.1 統合手順

端末側測位結果と基地局側測位結果の統合は以下の 3 つのステップで行う。

- (1) 端末側測位 Top-k 手法により $Score$ の低い k 個の Fingerprint を選出 (図 3)
- (2) 基地局側測位により、端末が存在する可能性の高い Accurate Area を算出 (図 5)
- (3) ステップ 1 で選出した上位 k 個の Fingerprint のうち、ステップ 2 で算出した Accurate Area 内に含まれる Fingerprint 地点が測位結果 (図 2)

Fingerprint 手法が測位空間の電波環境に大きく依存し測位精度が安定しない問題に対して、基地局側測位で算出した Accurate Area と組み合わせ、測位精度の改善と測位結果にばらつきの少ない安定した測位を実現する。さらに、Triangulation 測位では基地局の配置密度に測位精度が大きく左右されるが、Accurate Area の算出にとどめることで、基地局の密度の高低や配置に関わらず端末が存在すると思われる位置を限定することが可能になる。

ここで、3 つのステップの留意事項として以下の 3 つを挙げる。

- 複数の基地局で算出された Accurate Area に共通して含まれる Fingerprint 地点を最優先し測位結果とする (図 7)

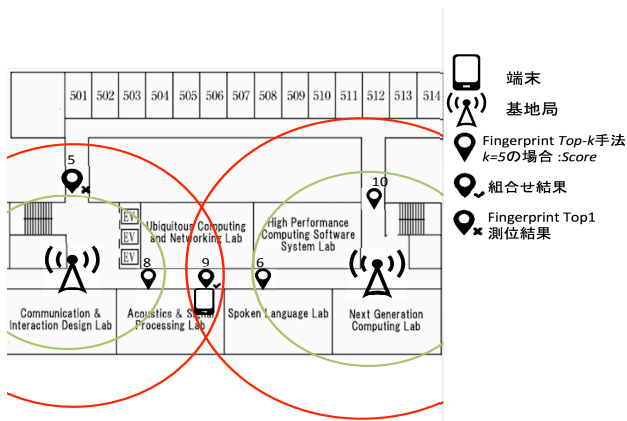


図 7 複数基地局で Accurate Area が重なった場合

- Accurate Area 内に複数の Top-k の Fingerprint が入る場合は、Score の低い Fingerprint 地点を優先し測位結果とする
- Accurate Area 内に Top-k までの Fingerprint が 1 つも含まれない場合は、測位結果を破棄する

3.3.2 測位精度の推定

Accurate Area 算出にあたっては、3.2.1 節で述べた通り、端末と基地局間の実距離と RSSI の減衰関係から、RSSI 値に対する推定距離の上限と下限の距離を表現した。しかし、実際に測位を行うため周囲の電波状況を観測する期間（以下、測位期間と呼ぶ）に観測されたフレームが、推定距離の下限を表す内円と上限を表す外円より外れた RSSI 値である場合、Accurate Area に誤りが生じ、かえって測位精度が悪化してしまうことが考えられる。そこで、提案手法の測位精度を推定するため、端末側で観測する基地局の発信するビーコンと基地局側で観測する端末のフレームそれぞれの観測状況を利用する手法を提案する。同じ測位期間内に観測された端末側と基地局側で観測される電波観測状況は類似すると考えられる。電波観測状況が異なる場合は、端末と基地局の取得 RSSI 値が外的要因もしくはそれぞれの端末の電波受信の利得に影響を受け、本来取得されるべきでない RSSI 値が観測された可能性がある。電波観測状況の類似性を考慮することにより、測位結果の精度を推定する。端末と基地局の双方で観測された電波状況の比較の概念を図 8 に示す。端末が発信するフレームを基地局が観測する RSSI 値と、基地局が発信するビーコンを端末が観測する RSSI 値は、端末と基地局の無線 LAN モジュールの利得などの性能差により異なる値を示す。そのため、RSSI 値を直接比べ電波観測状況と比較することは困難である。双方で取得された RSSI 値を比較するため、式 1 を利用し基地局が観測する端末のフレーム RSSI から算出する推定距離 $distTerminal$ と、端末が観測する基地局が発信するビーコンの RSSI から算出する推定距離 $distAP$ を事前に作成する。それぞれの推定距離の近似式から RSSI を距離に換算し比較する。式 7 に示す、RSSI を換算した 2

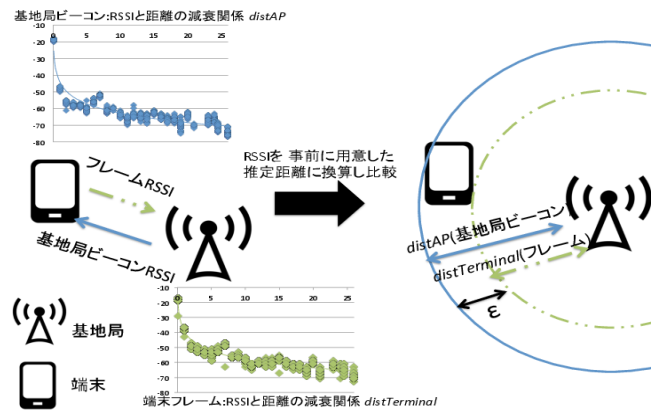


図 8 測位結果の精度推定の概念

つの推定距離の差の絶対値を ϵ と定義する。

$$\epsilon = |distTerminal - distAP| \quad (7)$$

ϵ の値が小さい場合、端末側と基地局側での観測電波状況が類似すると考えられるため、正解地点を含む Accurate Area が算出されると期待でき、測位精度が高いとみなす。一方、 ϵ の値が大きい場合、端末側と基地局側の観測電波状況が異なると考えられるため、正解地点を含まない Accurate Area を算出され測位精度が低いとみなす。

4. 設計と実装

4.1 端末側

測位に利用する端末には Samsung 社製 Nexus S 端末を利用した。端末側で基地局情報を収集するため、1 秒間隔で基地局情報を収集する機構を実装した。端末から基地局側に発信するフレームには、端末が基地局を探索するために発信する Probe Request を利用する。端末は基地局を介した無線 LAN 通信をするため一定の周期で Probe Request をブロードキャストする。Probe Request を受け取った基地局は、暗号化方式、対応通信規格、通信チャネルなど端末との通信に必要な情報を端末に返答することにより、無線 LAN 通信を実現する。こうした無線通信の仕組みが標準化されているため、無線 LAN 機能をもつ情報端末は必ず Probe Request を発信する。このことから、本研究では Probe Request を利用する。しかし、Probe Request は端末毎に送信間隔が異なるため、端末には Probe Request を毎秒 2~3 フレーム程度送信するアプリケーションを導入する。

4.2 基地局側

基地局側測位を実現するため端末が発信する Probe Request を収集するパケットセンサを用意した。パケットセンサの構築は、比較的安価で機能追加などが容易かつバッテリー駆動可能で持ち運び可能である Raspberry Pi に無線 LAN モジュールを搭載したものを利用した。パケット

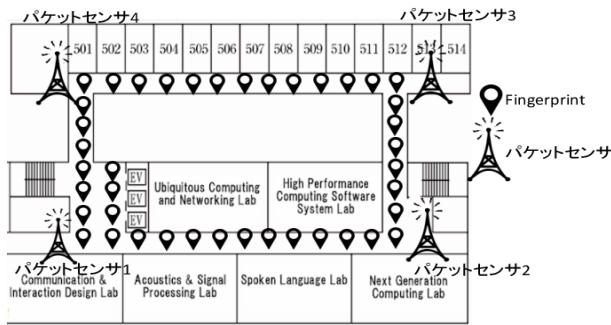


図 9 実験環境

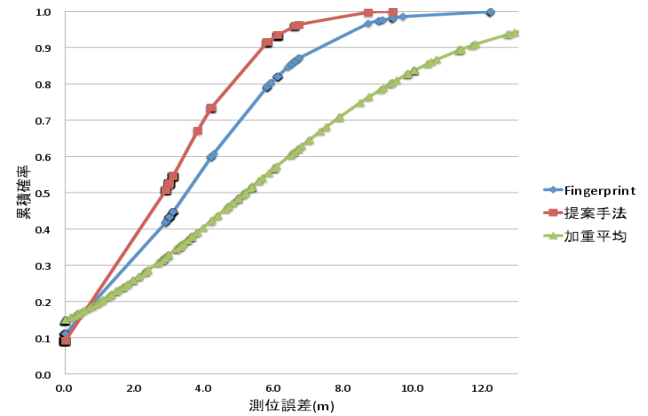


図 10 各手法の累積測位誤差

センサは、端末が発信する Probe Request を収集する機能をもつ。さらに、アクセスポイントとしての機能を有し、基地局が発信するビーコンは 100 msec である。そのため、基地局側測位として利用する Probe Request の観測と並行して、端末側で位置が既知である基地局として基地局が発信するビーコンを利用した測位が可能である。なお、端末と基地局は NTP を利用し同一の時刻同期サーバに問い合わせを行い時刻同期を行う。これにより、端末側と基地局側で観測された情報の時刻の同一性を確保する。

5. 評価実験

5.1 評価環境

評価実験は図 9 に示す立命館大学琵琶湖草津キャンパスクリエーションコア 5F で実施した。通路の約 3 m 毎に計 41 地点の Fingerprint を作成し、測位空間の四隅にパケットセンサを設置した。図 9 の Fingerprint 地点を測位地点とし、静止した状態で測位を各地点 5 回ずつ計 205 回行った。加えて、移動時の測位結果の比較を行うために、図 9 の左下のパケットセンサ 1 から 2 → 3 → 4 → 1 の経路で速度を一定に保ち 1 周の歩行を行った。

5.2 各手法との測位精度評価

既存の測位手法である加重平均手法、Fingerprint 手法と提案手法の測位精度の評価を行った。図 10 に各測位手法の測位精度を比較するグラフを示す。横軸は実際に測位した地点と各手法の測位誤差、縦軸は測位の全試行回数に対する割合を示す。各手法について測位誤差が 3 m 以内に収まる割合で比較すると、加重平均手法は約 33%、Fingerprint Top-1 手法では約 45%、提案手法では約 55% と最も高い。3 m 以降の測位誤差の分布から見ても提案手法は、加重平均、Fingerprint 手法よりも高い精度で測位が可能であることを示している。したがって、提案手法は既存手法に比べ高い精度で測位が可能であるといえる。しかし、測位誤差が 0.2 m 未満の地点で比較すると、加重平均が最も高く約 15%、Fingerprint Top-1 手法が約 11%、提案

表 1 各測位手法の平均測位誤差と標準偏差

測位手法	平均測位誤差 (m)	標準偏差 (m)
加重平均	5.17	4.95
Fingerprint Top1	3.73	2.85
提案手法	2.85	2.14

手法が最も低く 9% を示している。加重平均手法が最も高い値を示した理由は、2.2 節で述べた通り、加重平均手法は基地局の位置を推定距離により重み付け処理するため、パケットセンサを設置した実験環境の 4 地点では必ず測位誤差 0 m に近い値を示すためである。次に、測位精度 0.2 m 未満の地点において Fingerprint 手法よりも提案手法の精度が劣った理由は、Top1 が正解の地点を示しているのにも関わらず、正解を地点を含まない Accurate Area が算出され、測位誤差を含んだ別の Fingerprint 地点を選択したためである。

5.3 地点別の平均測位誤差と標準偏差の評価

本節では、各測位地点における平均測位誤差と標準偏差について評価し、各手法の測位精度と測位結果のばらつきについて評価する。表 1 に各手法の平均測位誤差と標準偏差を示す。測位回数全体に対する平均測位誤差において、提案手法は既存の加重平均手法、Fingerprint 手法に比べ高い精度での測位を実現した。次に、測位誤差の標準偏差を比較する。提案手法の測位誤差の標準偏差は、加重平均手法、Fingerprint 手法に比べて低いことから提案手法は既存手法に比べ、ばらつきの少ない安定した測位が可能である。平均測位誤差と標準偏差を利用した評価により、提案手法は既存手法に比べ高い精度で、かつ測位結果にばらつきの少ない安定した測位を実現したといえる。図 11 に示す Fingerprint 手法の地点別の平均測位誤差では、平均測位誤差が 9 m 以上の測位地点が存在するのに対し、図 12 の提案手法により平均測位誤差 9 m 以上の地点を 3 m 未満の平均測位誤差に改善または、Accurate Area 内に Top-k までの Fingerprint が含まれないとして測位結果を利用していない。平均測位誤差 3 m 未満の地点を比較すると、

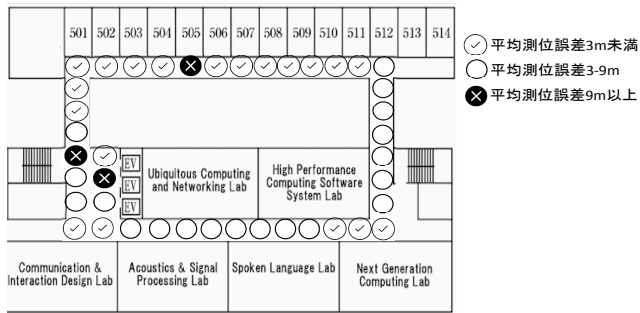


図 11 Fingerprint:地点別平均測位誤差の分布

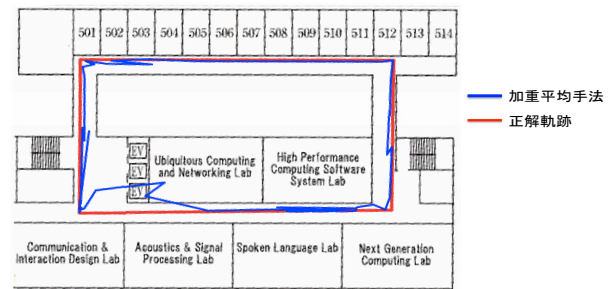


図 13 加重平均手法の移動軌跡

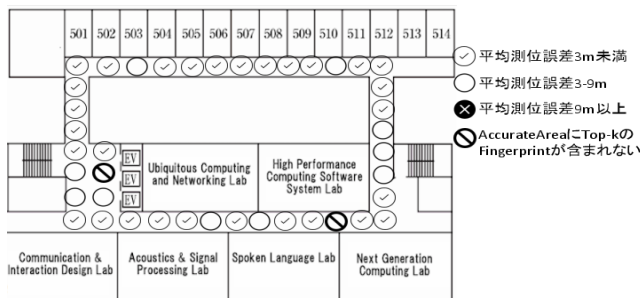


図 12 提案手法:地点別平均測位誤差の分布

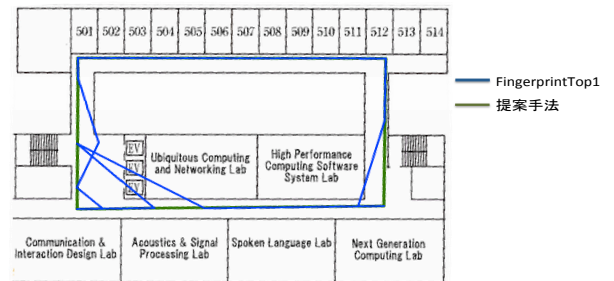


図 14 FingerprintTop-1 手法と提案手法の移動軌跡

Fingerprint 地点で平均測位誤差 3-9 m の地点の多くを提案手法により平均測位誤差 3 m 未満に改善することができた。

5.4 移動軌跡の比較

本節では、加重平均手法、FingerprintTop1 手法、提案手法の移動時の測位結果を移動軌跡により比較する。移動軌跡とは、開始時刻を起点とし終了時刻までの、測位結果を算出した地点を順に結んだ線のことを示す。評価実験では、図 9 の左下のポケットセンサ 1 から 2 → 3 → 4 → 1 の経路で歩行した。図 13 に加重平均手法の移動軌跡と正解移動軌跡を示す。加重平均手法の場合、ポケットセンサ付近では、そのポケットセンサの位置に測位結果が収束するため正解に近い軌跡を描画できたと考える。しかし、実験環境左下のエレベータ (EV) 付近では、ポケットセンサ 1, 2, 4 の 3 箇所で Probe Request が観測され測位結果が中央に寄る測位結果となった。このように、加重平均手法は基地局の配置に大きく依存する結果となった。次に、図 14 に FingerprintTop1 手法と提案手法の移動軌跡を示す。提案手法の移動軌跡は実際の移動軌跡と一致する結果となった。一方、Fingerprint 手法ではポケットセンサ 1 付近の EV 前の広場で大きな測位誤差が生じている。これは、EV 前の比較的広い場所で作成した Fingerprint は、隣接する Fingerprint と観測される電波特徴量が類似しているため誤りが生じたものと考えられる。提案手法では

Accurate Area により、適切な Fingerprint を選択出来たため、EV 前付近で生じた測位誤差を抑えることができた。さらに、Fingerprint 手法は Acoustics&SignalProcessingLab 前で大幅な誤差が生じている。これは、観測期間内に測位地点を特徴付ける基地局からのビーコンが収集されなかったことに起因する。提案手法はこの大幅な誤差を抑制した。これは、ポケットセンサ 1, 2 で算出された Accurate Area により末端が存在する領域を適切に制限し、Top1 以外の測位誤差の少ない Fingerprint 地点を利用できたからである。以上の移動軌跡の比較と考察から、提案手法は末端が移動する場合においても一定の有用性を示したといえる。

5.5 測位精度推定の評価

3.3.2 節で述べた測位精度の推定結果について評価する。図 15 に ϵ の値を変化させたときの平均測位誤差と測位回数のグラフを示す。横軸に ϵ 、縦軸に ϵ に対する累積平均測位誤差と、測位回数を示す。 ϵ の値が 1 の場合は測位回数が 85 回、測位誤差の平均が 2.2 m であり、測位回数が 85 回までは誤差平均 2.2 m で測位が可能であることを示している。 ϵ の値が大きくなるにつれ、測位回数が増える一方、平均測位誤差が悪化しており、 ϵ により測位精度の推定が実現できたといえる。測位精度の推定に ϵ を導入する

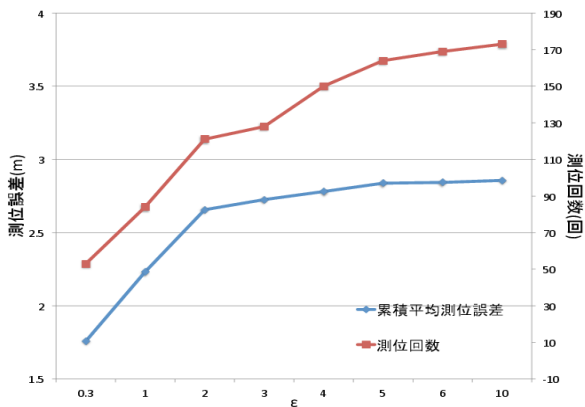


図 15 ϵ に対する累積平均測位誤差と測位回数

ことにより、測位利用者は自身の要求する測位精度を ϵ を指標に調整できる。

6. まとめ

本研究では、端末側測位と基地局側測位を並行して行うことにより測位精度の改善と、測位結果の精度を推定する手法を提案した。評価実験の結果から提案手法は Fingerprint 手法に比べて平均測位誤差において約 30% の改善を達成した。加えて、地点別の平均測位誤差と測位誤差の標準偏差を指標に測位精度のばらつきについても評価を行った。地点別の平均測位誤差については、Fingerprint 手法での 9 m 以上の誤差を含む地点を 3 m 未満の誤差に改善し、3~6 m の平均測位誤差の地点に対しても提案手法により 3 m 未満の測位誤差に改善した。既存手法の加重平均手法と Fingerprint 手法と比べ提案手法の標準偏差は低い値を示したことから、提案手法は高精度かつ安定した測位を実現した。測位精度の推定では、同じ測位期間内に観測された端末側と基地局側は類似するという仮定のもと、端末側と基地局側の電波観測状況を比較することにより測位精度の推定を行った。電波観測状況の比較は、端末と基地局の無線 LAN モジュールの利得などの性能差を考慮し RSSI を直接比較するのではなく、RSSI を事前に作成したそれぞれの推定距離に換算し比較を行った。比較結果の ϵ の値が小さい場合、正解地点を含む Accurate Area が算出され測位精度が高いと考えられ、一方、 ϵ の値が大きい場合、正解地点を含まない Accurate Area を算出し測位精度が低いと考えられる。評価では、 ϵ が大きくなるにつれ累積測位誤差の平均が悪化し、 ϵ が小さいほど累積平均測位誤差がよくなる結果が得られ、測位精度の推定を実現した。今後の課題として、Accurate Area に誤りがある場合に Fingerprint Top1 を利用した測位に比べ測位精度低下する問題がある。この問題を解決するために端末側と基地局側で観測した電波状況を比較する事による測位精度の推定を行ったが、端末側と基地局側の双方で Accurate Area に誤りが生じるような RSSI が観測される場合に対

応できない。そのため、Fingerprint で算出した Score 値を考慮し、Top1 を利用するか、基地局側測位で Accurate Area を信頼し測位に利用するかを選択する事が考えられる。加えて、河口ら [4] が行なった時系列フィルタリングを取り入れた Particle Filter 手法のように、前回の測位結果を考慮し測位結果の連続性を表現する事で、Top-k までの Fingerprint の信頼度を算出することで、大幅な測位誤差に対応する事が考えられる。一方、現状の基地局側測位における Accurate Area 算出手法のアルゴリズムは端末の移動特性を考慮していない問題がある。この問題を解決するために、複数のパケットセンサの位置関係と RSSI の減衰関係から、端末の進行方向を考慮した Accurate Area の算出手法により対応する事が考えられる。

参考文献

- [1] P. Bahl and V.N. Padmanabhan. Radar: an in-building rf-based user location and tracking system. In INFOCOM 2000. Nineteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Proceedings. IEEE, Vol. 2, pp. 775-784 (2000).
- [2] T. Duc, 宮崎 和哉, 西尾 信彦. 無線 LAN 位置マーカー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, Vol. 2012, pp. 1017-1026 (2012).
- [3] 暦本 純一, 塩野崎 敦, 末吉 隆彦. Placeengine—実世界集合知に基づく wifi 位置情報基盤. インターネットコンファレンス論文集, Vol. 2006, pp. 95-104 (2006).
- [4] 藤田 迪, 梶 克彦, 河口 信夫. Gaussian mixture model を用いた無線 lan 位置推定手法. 情報処理学会論文誌, Vol. 52, No. 3, pp. 1069-1081 (2011).
- [5] G. Sun, J. Chen, W. Guo, and K.J.R. Liu. Signal processing techniques in network-aided positioning: a survey of state-of-the-art positioning designs. Signal Processing Magazine, IEEE, Vol. 22, No. 4, pp. 12-23 (2005).
- [6] 畑田 晃希, 河治 寿都, 山崎 俊彦, 相澤 清晴. 全方位カメラによる位置参照画像群を用いた屋内位置推定: デジタルミュージアムでの鑑賞者の行動記録に向けて (デジタルミュージアム, デジタルミュージアムとエンタテインメントメディア). 電子情報通信学会技術研究報告. MVE, マルチメディア・仮想環境基礎, Vol. 109, No. 466, pp. 57-61 (2010).
- [7] 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).