

オンデマンド屋内位置情報サービスに向けた分散測位型アドホック測位ネットワーク*

石田 繁巳^{†a)} 田頭 茂明^{††} 荒川 豊^{†††} 福田 晃[†]

Ad-Hoc Wireless Positioning Network with Distributed Localization Scheme for On-Demand Indoor Location-Based Service*

Shigemi ISHIDA^{†a)}, Shigeaki TAGASHIRA^{††}, Yutaka ARAKAWA^{†††},
and Akira FUKUDA[†]

あらまし 本論文では、「オンデマンド」な屋内位置情報サービスの実現に向けた分散測位型 AWPN (アドホック測位ネットワーク) を示す。位置情報サービスのオンデマンド性にはサービス提供者視点・ユーザ視点の二つの視点があり、両方を同時に実現することが重要である。これに向け、分散測位型 AWPN では筆者らの先行研究である AWPN を利用し、Web サービスとして位置情報サービスを実装する。AWPN は Wi-Fi AP (アクセスポイント) によるメッシュネットワークを用いた測位システムであり、ネットワーク規模の増加とともに通信の輻輳が問題となることから、各 AP 上で測位計算を行い測位のための通信を分散させる。九州大学キャンパス内で実証評価を行い、分散測位型 AWPN を用いて 220 ミリ秒以内に Wi-Fi 端末を測位できることを確認した。また、シミュレーションによって通信量を評価し、1 台の測位サーバを AWPN に接続して測位を行う場合に比べて約 24%通信量を削減できることを確認した。

キーワード オンデマンド, 位置情報サービス, アドホック測位ネットワーク, Wi-Fi メッシュネットワーク

1. ま え が き

GPS (Global Positioning System) モジュールを搭載するスマートフォンなどの普及とともに位置情報サービスの重要性が高まっている。これまで位置情報サービスは屋外での利用を想定して開発が進められてきたが、位置情報サービスを屋内へと拡大するため超音波、赤外線、Wi-Fi 信号などを用いる様々な屋内測位技術の研究が行われている。中でも、Wi-Fi 信号を用いる手法は市販の Wi-Fi 機器をそのまま用いることができるために低コストな手法として注目されている。

本研究のゴールは、Wi-Fi 測位技術を用いて「オンデマンド」な屋内位置情報サービスを実現することである。オンデマンド性には二つの視点がある。

- (1) サービス提供者視点: サービス提供者は、いつでもどこでも必要なときに測位システムを短時間で構築して位置情報サービスを提供できる。
- (2) ユーザ視点: ユーザはアプリケーションなどのインストールを必要とせず、いつでも必要なときに即座に位置情報サービスを利用できる。

このようなオンデマンド性は「ワンタイム」シナリオで特に重要となる。例えば展示会場におけるナビゲーションシステムでは、展示会がただか 3 日間程度の開催であること、ユーザは来場時にのみナビゲーションシステムを利用することから、オンデマンド性が求められる。

サービス提供者視点のオンデマンド性は、測位システムの導入コストを削減する既存技術を利用すれば実現できる [3]~[12]。筆者らも測位システムの導入コスト削減に向けて AWPN (Ad-hoc Wireless Positioning Network: アドホック測位ネットワーク) [13] をこ

[†] 九州大学大学院システム情報科学研究院, 福岡市
ISEE, Kyushu University, Fukuoka-shi, 819-0395 Japan

^{††} 関西大学総合情報学部, 高槻市
Faculty of Informatics, Kansai University, Takatsuki-shi,
569-1095 Japan

^{†††} 奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科, 生駒市
Graduate School of Information Science, Nara Institute of
Science and Technology, Ikoma-shi, 630-0192 Japan

a) E-mail: ishida@f.ait.kyushu-u.ac.jp

* 本論文の一部の内容は国際会議 IEEE UIC 2014 [1] 及び IEEE ICSS 2015 [2] で報告されたものである。

DOI:10.14923/transcomj.2017MOP0006

れまでに開発した。AWPN は Wi-Fi AP (アクセスポイント) で構成されるメッシュネットワークであり、Wi-Fi 端末の測位機能を有する。Wi-Fi AP を設置して測位サーバを接続することで測位システムの導入が完了する。このとき、3 台以上の AP の位置を手動で測定しておくことで文献 [14], [15] などの逐次的な測位技術を用いて他の AP を測位し、測位システムにおける測位に必要な AP の位置情報を得る。

ユーザ視点のオンデマンド性についても、JavaScript で Wi-Fi 端末の位置情報を取得する Geolocation API を用いれば実現できる。多くの Wi-Fi 端末には Web ブラウザが標準でインストールされているため、JavaScript プログラムで Geolocation を利用して取得した位置情報に基づいて Web コンテンツを更新すれば、Web ページにアクセスするだけで利用可能な位置情報サービスを実現できる。

しかしながら、これらの技術ではサービス提供者視点・ユーザ視点のオンデマンド性を同時に実現することが困難である。サービス提供者視点のオンデマンド性を実現する Wi-Fi 測位技術は、Wi-Fi AP の信号を検出するため、あるいは位置情報サービスを提供するためにユーザアプリケーションを必要とし、ユーザ視点のオンデマンド性が損なわれる。また、Geolocation API を屋内で利用する場合には Wi-Fi AP 信号強度と位置との対応を事前調査する必要がある、サービス提供者視点のオンデマンド性が損なわれる。

サービス提供者視点・ユーザ視点のオンデマンド性を同時に実現するため、本論文では分散測位型 AWPN を提案する。AWPN を用いることでサービス提供者視点のオンデマンド性を実現し、AWPN の測位結果を利用した Web サービスとして位置情報サービスを実装することでユーザ視点のオンデマンド性を同時に実現する。AWPN はネットワーク規模の増加とともに通信の輻輳が問題となることから、各 AP で測位計算を行うことで通信を分散させる。

分散測位型 AWPN を用いた位置情報 Web サービスを実装して九州大学キャンパス内で実証評価を行い、実環境で 220 ミリ秒以内に Wi-Fi 端末を測位できることを確認した。また、数学的な解析及びシミュレーション評価によって通信量を評価し、測位サーバ 1 台を用いる集中測位型 AWPN に比べて約 24%通信量を削減できることを確認した。

本論文の構成は以下のとおりである。2. では Wi-Fi 測位技術に関する関連研究について概観する。3. で

は分散測位型 AWPN の設計を示し、4. においてネットワーク通信量を解析する。5., 6. でそれぞれ実証評価、シミュレーション評価を示し、最後に 7. でまとめとする。

2. 関連研究

筆者らの調査の範囲では、サービス提供者視点・ユーザ視点の両方のオンデマンド性を実現するために測位システムの構築コスト及びユーザ端末への導入コストを同時に考慮に入れた Wi-Fi 測位に関する研究はこれまでに報告されていない。Wi-Fi 測位に関する研究は膨大に存在するため、ここでは特別なハードウェアを必要としない Wi-Fi 測位技術について俯瞰する。

フィンガープリント方式 [16]~[24] は、その測位精度の高さから広く利用されている Wi-Fi 測位技術である。測位対象領域内でフィンガープリントと呼ばれるデータを事前に収集しておき、測位対象の端末で取得したフィンガープリントと事前収集したフィンガープリントを比較することで測位を行う。フィンガープリント方式では事前のフィンガープリント収集が必須であり、サービス提供者視点でのオンデマンド性が損なわれる。フィンガープリント方式における事前データ収集のコストを削減するため、ユーザの力を借りて RSS 情報を収集するクラウドソーシング [3]~[6] も報告されているが、事前収集をなくすことはできない。

LiFS [25], Zee [8], UnLoc [9], WILL [26] はクラウドソーシングを拡張し、ユーザに意識させることなく協力を得ることで事前のフィンガープリント収集を行う手法を示している。これらの手法ではスマートフォンなどで取得した RSS 情報と加速度センサやジャイロスコープで取得したデータに基づくユーザ位置とを融合させることでフィンガープリントを自動的に収集する。EZ [11] ではフィンガープリント収集の代わりに無線伝搬モデルを構築する。このような手法ではユーザアプリケーションの導入が必須であり、ユーザ視点でのオンデマンド性が損なわれる。

フィンガープリント方式に対し、モデルベース方式は電波伝搬モデルに基づく測位方式であり、事前の情報収集が不要となる。例えば LEASE [12] は Wi-Fi AP のような基準ノードの数を削減するためにノンパラメトリックな電波伝搬モデルを提案している。これらの技術は分散測位型 AWPN においても導入コストの更なる削減を可能とし、サービス提供者視点のオンデマンド性の強化に有用である。

モデルベース方式では測位精度の向上が大きな課題となっている。例えば、Palantir [27] では精度向上に向けた課題を明らかにするとともにその解決策の一つを示しているが、フィンガープリント方式と同等の測位精度を実現するには至っていない。Wi-Fi 測位だけでなく RFID [28] や UWB [29], ZigBee [30] を用いた測位システムにおいても測位精度の向上に向けた研究が行われている。このような技術は提案する分散測位型 AWPN においても有効である。

3. 分散測位型 AWPN

3.1 アプローチ

分散測位型 AWPN (アドホック測位ネットワーク) の基本アプローチは、AWPN を用いて位置情報サービスを Web サービスとして実現することである。図 1 に分散測位型 AWPN の概要を示す。AWPN は Wi-Fi AP で構成するメッシュネットワークである。測位対象領域に Wi-Fi AP を設置すると AP 間でメッシュネットワークが自動的に構築され、測位システムの導入が完了する。位置情報サービスは AWPN の測位結果を利用する Web ページとして実現されており、ユーザは Wi-Fi 端末にあらかじめインストールされている Web ブラウザを用いることで直ちに位置情報サービスを利用できる。

AWPN では Wi-Fi 端末が発した信号の RSS を各 AP が測定し、RSS 情報を測位サーバに集約させて測位が行われる。測位サーバには全ての AP から RSS

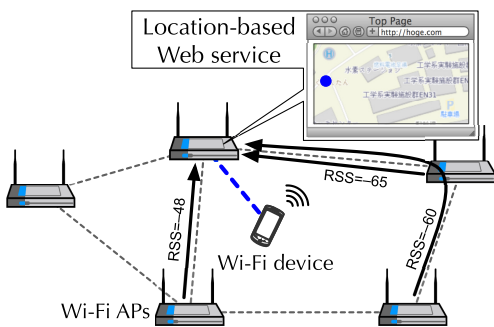


図 1 分散測位型 AWPN の概要。Wi-Fi AP 間の点線は AP が構成するメッシュネットワークのリンクを示しており、Wi-Fi 端末・AP 間の青い点線は Wi-Fi 端末と AP の接続を示している。

Fig. 1 Overview of AWPN with distributed localization scheme. Dotted lines between Wi-Fi APs indicate links on a AP mesh network and a blue dotted line between a Wi-Fi device and AP indicates device association.

情報が送信されるため、ネットワーク規模や測位対象端末の増加とともに通信が輻輳し、収容可能な測位端末数の制限や測位遅延の増加という問題が発生する。

そこで、Wi-Fi 端末の接続先 AP 上で測位計算を行い、測位通信をメッシュネットワーク上で分散させる。Wi-Fi 端末の信号は端末に物理的に近接した AP で検出されることから、ある Wi-Fi 端末に関する RSS 情報は端末に物理的に近接した AP 間で交換されることとなる。このため、測位対象端末の物理的な分散によってメッシュネットワーク上での通信の集中を防ぐことができる。

3.2 設計

図 2 に分散測位型 AWPN の設計概要を示す。分散測位型 AWPN は各 AP 上で動作する Web サーバ、RSS 受信サーバ (RSS reception server), RSS 検出サーバ (RSS detection server) の三つのサーバで構成され、これらのサーバの自律的な動作によって測位を行う。

図 3 に分散測位型 AWPN の動作シーケンスを示す。

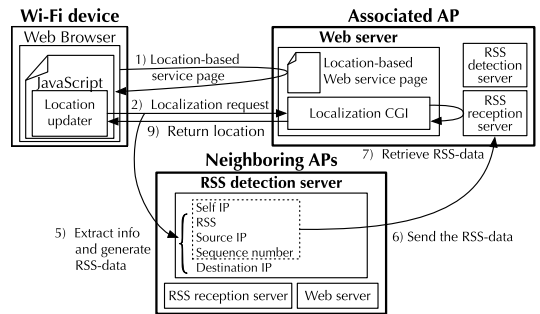


図 2 分散測位型 AWPN の設計概要

Fig. 2 Design overview of AWPN with distributed localization scheme.

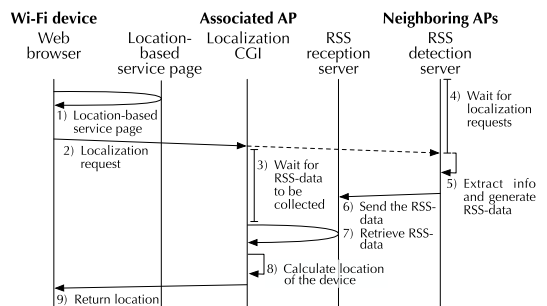


図 3 分散測位型 AWPN の動作シーケンス

Fig. 3 Sequence diagram of operation of AWPN with distributed localization scheme.

位置情報サービスを利用する場合、Wi-Fi 端末を 1 台の Wi-Fi AP に接続して

- 1) 接続先 AP の Web サーバ上にある位置情報サービスページに Web ブラウザでアクセスする。
- 2) 位置情報サービスページ上の JavaScript プログラムは測位 CGI に対して周期的に測位要求信号を送信する。
- 3) 測位 CGI は測位に必要となる RSS 情報が収集されるまで一定時間待機する。
- 4) 測位要求信号は IP パケットであるため Wi-Fi データフレームとして送信されている。各 AP で動作している RSS 検出サーバはモニターモードに設定した Wi-Fi インタフェースを用いて周辺の Wi-Fi 端末が送信する全ての Wi-Fi データフレームを受信し、受信した Wi-Fi データフレームを解析することで測位要求信号を検出する。
- 5) 測位要求信号を検出するとその Wi-Fi フレームから IP アドレスなどの情報を抽出するとともに測位要求信号の RSS を測定し、これらをまとめた RSS 情報を生成する。
- 6) RSS 検出サーバは抽出した IP アドレス情報に基づいて RSS 情報を Wi-Fi 端末が接続している AP 上の RSS 受信サーバに送信する。
- 7) 待機が終わった測位 CGI は RSS 受信サーバから収集された RSS 情報を取得して
- 8) 測位計算を行い、
- 9) 測位結果を返却する。位置情報サービスページ上 JavaScript プログラムは返却された位置に応じて Web コンテンツを更新する。

以下では三つのサーバの自律動作について述べる。

3.3 Web サーバ

Web サーバは位置情報サービスページと測位 CGI を提供する。位置情報サービスページには JavaScript で書かれた位置更新プログラム (Location updater) が配置されており、測位 CGI に対して Ajax 通信によって測位要求信号を送信する。測位要求信号を受信した測位 CGI は、測位要求信号の IP ヘッダから送信元 Wi-Fi 端末の IP アドレスを取得する。測位 CGI は周囲の AP から RSS 情報が収集されるまで一定時間待機し、測位要求信号から取得した IP アドレスをキーとして RSS 受信サーバから Wi-Fi 端末に関する RSS 情報を取得する。取得した RSS 情報を用い、測位 CGI は Wi-Fi 端末の位置を推定して推定結果を Ajax 通信で返却する。位置更新プログラムは返却された推

定結果に基づいて Web コンテンツを更新する。

自律的な動作に向けては測位 CGI における RSS 情報の取得待ち時間を決定する必要がある。測位遅延を考慮すると RSS 情報の取得待ち時間は可能な限り小さいことが望ましい。RSS 情報の取得待ち時間は 5.4 において実験的に決定する。

3.4 RSS 検出サーバと RSS 受信サーバ

Wi-Fi AP 上の RSS 検出サーバはユーザ端末から送信される測位要求信号を待機する。測位要求信号を検出すると RSS 検出サーバは以下の情報を記録する。

- RSS: RSS 検出サーバが動作する AP の Wi-Fi モジュールから取得する。
- 送信元 IP アドレス: 測位要求信号の IP ヘッダから取得する。
- シーケンス番号: 測位要求信号が TCP によって再送された場合にも測位要求信号を区別できるようにするため、IEEE 802.11 MAC ヘッダの **Frame Control** フィールドに含まれる **Sequence Control** フィールドの値を取得する。
- 宛先 IP アドレス: 測位要求信号の IP ヘッダから取得する。

RSS 検出サーバは測位要求信号を検出すると直ちにこれらの情報をまとめて RSS 情報を生成し、宛先 IP アドレスの RSS 受信サーバに送信する。宛先 IP アドレスは測位要求信号の送信先 IP アドレスであるから、一つの測位要求信号に対して生成された RSS 情報は端末接続先 AP の RSS 受信サーバに集約される。

RSS 受信サーバは RSS 情報を格納するデータベースである。RSS 受信サーバは RSS 検出サーバから送信されてきた RSS 情報を期限付きで保管する。測位 CGI が IP アドレスをキーとして RSS 情報を要求してきた場合、RSS 情報内の IP アドレスがキーの IP アドレスと一致するもののうち最新の RSS 情報を検索して返却する。

3.5 設計上の制約

本章で示した設計には四つの大きな制約がある。

- (1) 暗号化を用いることができない

Wi-Fi AP は Wi-Fi 端末が送信した測位要求信号を検出し、IP アドレスなどの情報を抽出する。このため、AP・端末間で暗号化通信を用いることができない。測位計算を行う CGI プログラムにおいて IP アドレスではなく MAC アドレスを用いて計算処理を行うように改変すれば、暗号化通信も利用可能となるが MAC アドレスから IP アドレ

スを問い合わせる時間を要するため測位計算遅延とのトレードオフとなる。また、暗号化が施された通信が測位要求信号であるかを解析できないために受信した全ての Wi-Fi データフレームに関する RSS 情報の生成・送信が必要となるため、メッシュネットワークの通信帯域を浪費する。

(2) ローミングで位置情報サービスが初期化される

現在の設計では Wi-Fi 端末が移動して接続先 AP が変更された場合、すなわちローミングした場合には Wi-Fi 端末が Web ページをリロードする必要がある。ローミング時に位置情報サービスで提供している Web コンテンツを維持するためには AP 間で情報を共有する仕組みが必要となる。

(3) 全 AP で同一チャンネルを使用する必要がある

AP は他の AP に接続された Wi-Fi 端末が送出した測位要求信号を検出するため、全ての AP で同一のチャンネルを使用する必要がある。測位要求信号の検出に際して AP が高速にチャンネルを切り替えることで各 AP が異なるチャンネルを使用することもできるが、この場合には測位要求信号を検出できない可能性を考慮して測位を行う必要が生じる。

(4) 計算資源の限られた AP で測位計算を行う必要がある

測位 CGI プログラムは AP 上で動作して測位計算を行う。AP は一般に小型のコンピュータであり、多量のメモリ、高速な CPU は期待できないため測位計算に複雑なアルゴリズムを採用することは困難である。複雑な計算を行う場合には計算の一部をユーザ端末に委ねることもできるが、このような処理はユーザ端末の電力消費を増加させる。

以上のような制約があるものの、提案する分散測位型 AWPN はイベント会場などにおける位置案内サービスなどのシンプルな位置情報サービスにおいて有効であると考えられる。

4. 通信量の解析

本章では分散測位型 AWPN のネットワーク通信量を解析する。ネットワーク通信量 T は、単位時間当たりに全 AP が送信したデータ量の総和と定義する：

$$T = \sum_i T_{i(tx)} \quad (1)$$

ここで、 $T_{i(tx)}$ は AP i の通信量、すなわち AP i が単

位時間当たりに送信したデータ量である。このデータ量には他の AP からの転送データの送信も含む。

単純な例として、図 4 に示すライントポロジーネットワークにおいて RSS 情報を転送する場合を考える。単位時間当たりに各 Wi-Fi AP が生成する Wi-Fi 端末 1 台に関する RSS 情報の大きさを X とする。図 4(a) の場合には 1 台の Wi-Fi AP がデータ量 X の RSS 情報を送信しているため、ネットワーク通信量は $T = X$ と計算できる。同様に、図 4(b) の場合には $T = 2X$ となる。一般に h ホップのネットワークにおいてサイズ X の RSS 情報を転送する場合、ネットワーク通信量は $T = hX$ となる。

4.1 前提条件

分散測位型 AWPN では、複数台の Wi-Fi AP が 1 台の Wi-Fi 端末の信号を検出するため、1 台の Wi-Fi 端末に関して複数の RSS 情報が転送される。ネットワーク通信量の解析を簡単にするため、本論文では以下の四つの前提条件を課す。

- 全ての AP で一つのメッシュネットワークを構成している。
- 各 Wi-Fi AP には同数の Wi-Fi 端末が接続されている。その台数を N_d とする。
- 1 台の Wi-Fi 端末が送信した測位要求信号は、その端末が接続している AP からメッシュネットワーク上で 1 ホップ以内の AP によって受信され、RSS 情報が生成される。
- 1 台の Wi-Fi AP は単位時間当たり Wi-Fi 端末 1 台につきサイズ X の RSS 情報を生成する。

以降の節では、上記の前提条件下で分散測位型 AWPN のネットワーク通信量が 1 台の測位サーバを AWPN に接続した集中測位型 AWPN と比べて小さくなることを証明する。上記の前提条件は現実環境で常に成り立つとは考えづらい。例えば、各 AP に接続されている端末数は時間とともに変化し、Wi-Fi 端

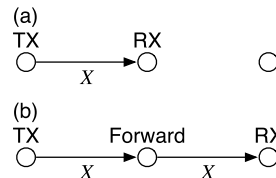


図 4 ライントポロジーネットワークにおける通信量：(a) 転送なしの場合、(b) 転送する場合

Fig.4 Network traffic in line-topology networks (a) without and (b) with forwarding.

末の信号は接続先 AP から 1 ホップ以上離れた AP で検出される場合がある。より現実的な環境を想定し、6. においてはシミュレーションによってネットワーク通信量を評価する。

4.2 通信量のモデル化

通信量をモデル化するため、Wi-Fi AP が構成するメッシュネットワークをグラフ $G = (V, E)$ で表す。頂点集合 V は AP を、エッジ集合 E はメッシュネットワークにおける AP 間のリンクを表す。前節で示した前提条件下ではグラフ G は単純連結グラフとなる。

まず、分散測位型 AWPN のネットワーク通信量を求める。

補題 1. 分散測位型 AWPN の通信量 T_d は $2N_d X |E|$ である。

証明. 1 台の Wi-Fi 端末が Wi-Fi AP $v \in V$ に接続されている場合を考える。RSS 情報は v 及び v に隣接する頂点の AP で生成される。ネットワーク通信量 T_d は 1 台の AP に接続されている N_d 台の端末に関する RSS 情報の転送量を全 AP に渡って加算することで計算できる。 $N(v)$ を v に隣接する頂点の集合とすると、

$$T_d = N_d X \sum_{v \in V} \left\{ D(v, v) + \sum_{n \in N(v)} D(n, v) \right\}. \quad (2)$$

ここで、 $D(x, y)$ は頂点 x と y の距離である。同じ頂点の間の距離は 0 であるから、 $D(v, v) = 0$ である。また、頂点 $n \in N(v)$ は v に隣接しているため、 $D(n, v) = 1$ である。これより、ネットワーク通信量は以下となる。

$$T_d = N_d X \sum_{v \in V} |N(v)| = N_d X \sum_{v \in V} d(v). \quad (3)$$

ここで、 $d(v)$ は頂点 v の次数、すなわち頂点 v に端点をもつエッジの数である。グラフ理論より、単純連結グラフにおける頂点の次数の総和はグラフ内のエッジの数の 2 倍に等しいことから [31]、

$$\sum_{v \in V} d(v) = 2|E| \quad (4)$$

であるため、以下が得られる。

$$T_d = 2N_d X |E|. \quad (5)$$

□

次に、1 台の測位サーバを用いて Wi-Fi 端末の位置推定を行う集中測位型 AWPN の通信量を算出する。集中測位型 AWPN はコア AP と呼ばれる AP に接続された測位サーバに全ての RSS 情報を転送して測位を行う。

補題 2. 頂点 $z \in V$ を集中測位型 AWPN のコア AP とする。集中測位型 AWPN のネットワーク通信量 T_c は $N_d X \{|V| - 1 + 2|E| - d(z)\}$ 以上である。

証明. 1 台の Wi-Fi 端末が Wi-Fi AP $v \in V$ に接続されている場合を考える。分散測位型 AWPN の場合と同様に RSS 情報は v 及び $N(v)$ の AP で生成される。全ての RSS 情報はコア AP z に転送される。したがって、ネットワーク通信量は

$$T_c = N_d X \sum_{v \in V} \left\{ D(v, z) + \sum_{n \in N(v)} D(n, z) \right\} \quad (6)$$

となる。 $v = z$ のとき、 $D(v, z) = 0$ 、 $D(n, z) = 1$ となるのは明らかである。そこで、式 (6) の最初の和を $v = z$ の場合だけ分離すると

$$T_c = N_d X d(z) + N_d X \sum_{v \in V - z} \left\{ D(v, z) + \sum_{n \in N(v)} D(n, z) \right\} \quad (7)$$

となる^(注1)。

式 (7) の下限を計算するため、式 (7) 中の二つの距離 $D(v, z)$ 及び $D(n, z)$ について以下の二つの場合を考える。

(1) $n = z$ のとき

$D(v, z) = 1$ 、 $D(n, z) = 0$ である。

(2) $n \neq z$ のとき

$D(v, z) \geq 1$ 、 $D(n, z) \geq 1$ である。

(1) の場合、すなわち $n = z$ となるのは $v \in N(z)$ の場合に 1 回ずつである。したがって、 $n = z$ となるのは式 (7) の全ての和の中で $|N(z)| = d(z)$ 回である。ネットワーク通信量の下限値は、 $D(v, z) = 1$ 、 $D(n, z) = 1$ を式 (7) に代入し、 $n = z$ の場合に $D(n, z) = 0$ となる分を減ずることで算出できる。

$$T_c \geq N_d X \left\{ d(z) + |V| - 1 + \sum_{v \in V - z} d(v) - d(z) \right\} \quad (8)$$

(注1)：記述を簡略化するため、 $V \setminus \{z\}$ を $V - z$ と表記した。

式 (8) の右辺は式 (4) を用いて

$$\begin{aligned}
 & N_d X \left\{ d(z) + |V| - 1 + \sum_{v \in V-z} d(v) - d(z) \right\} \\
 &= N_d X \left\{ |V| - 1 + \sum_{v \in V-z} d(v) \right\} \\
 &= N_d X \left\{ |V| - 1 + \sum_{v \in V} d(v) - d(z) \right\} \\
 &= N_d X \{ |V| - 1 + 2|E| - d(z) \} \quad (9)
 \end{aligned}$$

と変形できるため、以下が得られる。

$$T_c \geq N_d X \{ |V| - 1 + 2|E| - d(z) \}. \quad (10)$$

□

最後に、分散測位型 AWPN と集中測位型 AWPN のネットワーク通信量を比較する。

定理 1. 分散測位型 AWPN のネットワーク通信量 T_d は集中測位型 AWPN のネットワーク通信量 T_c 以下である。

証明. 補題 1 及び補題 2 を用いれば T_c の下限値と T_d とを比較できる。式 (10) から式 (5) を減ずると、

$$T_c - T_d \geq N_d X \{ |V| - 1 - d(z) \} \quad (11)$$

となる。グラフ G は単純連結グラフであり、頂点 z におけるエッジ数 $d(z)$ の最大値は z を除く頂点の数、すなわち $|V| - 1$ である。これより $|V| - 1 - d(z) \geq 0$ となり、定義より $N_d \geq 0$, $X \geq 0$ は自明であるから題意が成り立つ。 □

5. 実証評価

5.1 実装

分散測位型 AWPN を用いた位置情報 Web サービスの実現性と基本性能を評価するため、市販の Wi-Fi AP を用いてシンプルな Web サービスを実装した。Wi-Fi AP は PicoCELA 社の PCWL (PCWL-0100) [32] を用いた。表 1 に PCWL の主要諸元を示す。PCWL は中継機能を有する Wi-Fi AP であり、AP 間のメッシュネットワークを構成できる。PCWL はメッシュ無線 IF (インタフェース)、アクセス無線 IF の 2 種類の無線 IF を有する。二つのメッシュ無線 IF を用いて AP 間のメッシュネットワークを構築し、アクセス

表 1 PCWL-0100 [32] Wi-Fi AP の主要諸元
Table 1 Main specifications of PCWL-0100.

Range in line-of-sight	Approximately 150 m (varies with propagation environment)
TX power of mesh wireless	16 dBm
TX power of access wireless	16 dBm
Number of IFs	2 mesh wireless IFs 1 access wireless IF
Mesh wireless standard	Proprietary, in 5.15 ~ 5.35 GHz
Access wireless standard	IEEE 802.11b/g
Physical dimensions	W 142 mm × H 118 mm × D 39 mm
Weight	450 g

無線 IF を用いて Wi-Fi 端末との通信を行う。表 1 に示すとおりメッシュ無線 IF, アクセス無線 IF は干渉しないようにそれぞれ 5GHz 帯, 2.4GHz 帯を用いている。PCWL 内で動作する組み込み Linux 上で Web サーバ, RSS 検出サーバ, RSS 受信サーバをそれぞれ動作させた。

AP 上の計算資源は限られているため、Web サーバは軽量の `thttpd` [33] を用いた。測位 CGI プログラムは C 言語で実装した。測位 CGI プログラムは ITU-R 勧告 [34] に基づく電波減衰モデルを用いて多辺測量法により Wi-Fi 端末の位置推定を推定し、JSON データとして推定結果を返却する。

四つ以上の RSS 情報が収集されなかった場合、ITU-R 勧告の電波減衰モデルと大きく乖離した RSS が観測された場合には測位計算が失敗することがある。この場合には測位結果として「失敗」を返却した。本論文で実装した多辺測量法は 2 次元空間で位置推定を行うが、ITU-R 勧告の電波減衰モデルにおける電波減衰係数も変数として扱う。このため、測位計算は三つの変数を含む連立 2 次方程式を解くこととなり、四つ以上の RSS 情報が必要となる。また、実際の屋内環境ではマルチパスの影響などによってモデル式と一致しない RSS が観測される場合がある。測位計算には計算結果が収束するまで反復計算を行う最急降下法を用いているため、RSS がモデル式と大きく乖離している場合には反復計算が発散し失敗する場合がある。

RSS 検出サーバと RSS 受信サーバは C 言語で実装した。RSS 検出サーバはモニターモードに設定した Wi-Fi インタフェースを用いて全ての Wi-Fi フレームを取得し、Wi-Fi フレーム及びフレームに付加されている RadioTap ヘッダを解析して RSS, 送信元 IP ア

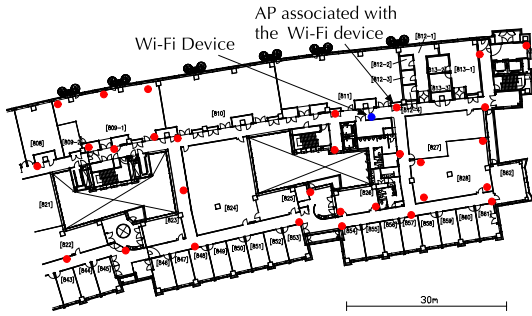


図 5 評価環境. 青い丸印は測位対象となる Wi-Fi 端末の位置を, 赤い丸印は 30 台の Wi-Fi AP の位置をそれぞれ示している.

Fig. 5 Experiment setup. Blue and red circles indicate locations of a Wi-Fi device and Wi-Fi APs installed in the environment, respectively.



図 6 壁及び天井に設置された PCWL
Fig. 6 PCWLs installed on the ceiling and wall.

ドレス, シーケンス番号, 宛先 IP アドレスを抽出して RSS 情報を生成する. RSS 情報は TCP/IP 通信によって Wi-Fi 端末の接続先 AP の RSS 受信サーバに送信される.

5.2 評価環境

評価実験は九州大学伊都キャンパス 2 号館内で行った. 図 5 に評価環境を示す. 図に示すように, 30 台の PCWL Wi-Fi AP を設置し, その 1 台に Wi-Fi 端末を接続して評価を行った. Wi-Fi AP は図 6 に示すように壁や天井に設置し, 分散測位型 AWPN を用いた位置情報サービスの例としてユーザ端末位置を示す屋内地図 Web サービスを実装した. 図 7 は実装した屋内地図 Web サービスを示している. 青い丸印はユーザ端末位置を, ピンクの丸印は AP の位置をそれぞれ



図 7 位置情報サービスの例
Fig. 7 Example location service.

表している. 測位計算結果が「失敗」である場合には前回の測位結果からユーザ端末位置を更新しないものとした.

Wi-Fi のアクセス無線 IF はチャンネル 6 に設定した. 周辺にはチャンネル 6 と重なるチャンネル 2 ~ 10 で動作する使用中の Wi-Fi AP が 37 台存在した. PCWL の制約によりメッシュ無線 IF のチャンネルを設定することはできないが, メッシュ無線 IF が使用する 5.15 ~ 5.35 GHz と重なるチャンネル 36 ~ 64 で動作する使用中の Wi-Fi AP は 32 台存在した.

Wi-Fi 端末として静止状態にある 1 台の Macbook Air を Wi-Fi AP の一つに接続し, Google Chrome Web ブラウザを用いて屋内地図 Web サービスのページにアクセスした. この状態で各 Wi-Fi AP において RSS 情報に関する通信と測位計算のログを 20 分間収集した. 屋内地図 Web サービスページの JavaScript プログラムは 10 秒ごとに測位要求信号を送信する. 20 分間で 125 回の測位計算が記録された.

5.3 RSS 情報送信回数

分散測位型 AWPN では, ユーザのもつ Wi-Fi 端末に物理的に近い Wi-Fi AP が測位要求信号を検出することで通信が分散される. ユーザのもつ Wi-Fi 端末から物理的に離れた AP における測位要求信号の検出が低頻度であることを検証するため, AP が RSS 情報を送信した回数を評価した. 各 AP は測位要求信号を検出すると RSS 情報を送信するため, RSS 情報の送信回数と測位要求信号の検出回数は等しい.

図 8 に各 AP の RSS 情報送信回数を示す. 図中の丸印は AP の設置位置を示している. 黒い丸印は RSS

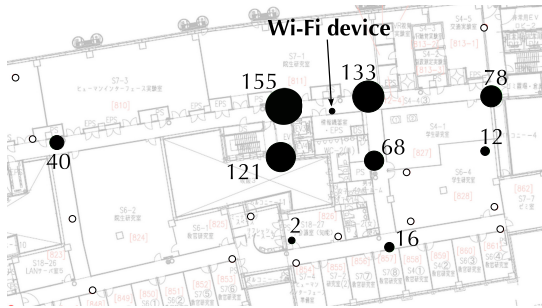


図 8 各 AP における RSS 情報の送信回数. 丸印は AP の位置を示している. 黒い丸印の大きさは RSS 情報の送信回数に対応しており, 横に記された数字は送信回数を表している. 白い丸印は RSS 情報を 1 度も送信しなかった AP である. 図示されていない範囲の AP は RSS 情報を 1 度も送信しなかった.

Fig. 8 Number of RSS-data transmissions on each Wi-Fi AP. Diameter of solid circles indicates the number of transmissions; hollow circles imply no transmission. The number beside the solid circles is the actual number of transmissions. APs not shown in the figure transmit no RSS-data.

情報を 1 回以上送信した AP であり, 白い丸印は RSS 情報を 1 度も送信しなかった AP である. 黒い丸印の大きさは RSS 情報の送信回数の概要を表しており, 丸印の横の数字は RSS 情報の送信回数である. なお, 図示されていない範囲の AP は RSS 情報を 1 度も送信しなかった. 図 8 より以下の三つのことが分かる.

- (1) ユーザの Wi-Fi 端末に物理的に近い AP は, Wi-Fi 端末から遠い AP に比べて RSS 情報の受信回数が多い. Wi-Fi 端末に近い AP ほど強い Wi-Fi 端末信号を受信し, 測位要求信号の検出確率が高くなるためと考えられる.
- (2) 幾つかの AP において, RSS 情報の送信回数は測位計算回数の 125 よりも大きい. これは, TCP や IEEE 802.11 の MAC 層による測位要求信号の再送による影響と考えられる.
- (3) Wi-Fi 端末から物理的に離れた AP が RSS 情報を送信している場合がある. RSS 情報を送信した AP の中で Wi-Fi 端末からもっとも離れている AP は RSS 情報を 40 回送信した AP であり, Wi-Fi 端末とは約 30m 離れている. この AP は Wi-Fi 端末と見通し距離にあることから測位要求信号を検出したものと考えられる.

以上の結果から, 測位要求信号はユーザのもつ Wi-Fi 端末に物理的に近い Wi-Fi AP において多く検出されることを確認できた.

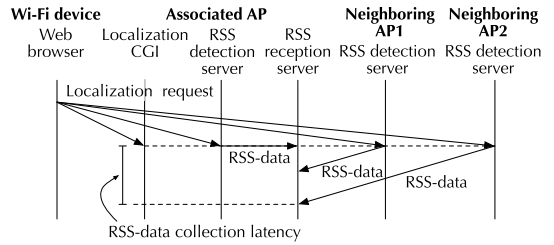


図 9 RSS 情報収集遅延

Fig. 9 RSS-data collection latency.

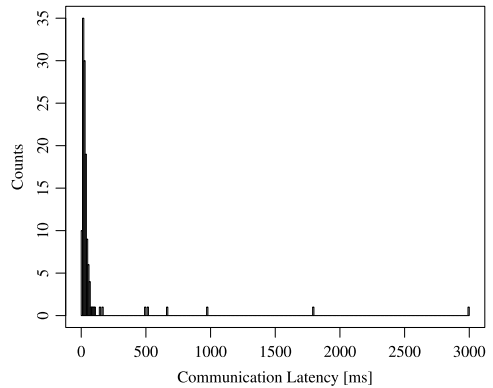


図 10 RSS 情報収集遅延のヒストグラム

Fig. 10 Histogram of communication latency for RSS-data collection.

5.4 RSS 情報収集遅延

3.3 で述べたように, 測位 CGI プログラムは測位対象の Wi-Fi 端末が送信した測位要求信号に関する RSS 情報が収集されるまで待機する必要がある. 待機時間の決定に向けて, RSS 情報収集遅延を評価した. 図 9 に示すように, RSS 情報収集遅延 (RSS-data collection latency) は測位 CGI プログラムが測位要求信号を受信してから RSS 受信サーバがその測位要求信号に関する全ての RSS 情報を受信するまでの時間である. 測位 CGI プログラムが動作する AP 上の RSS 検出サーバからの RSS 情報は他の AP 上の RSS 検出サーバからの RSS 情報よりも十分に小さい通信遅延で RSS 受信サーバで受信されると考えられる. このため, Wi-Fi 端末接続先 AP 上において測位 CGI プログラムと RSS 検出サーバは同時に測位要求信号を受信・検出するものとみなして評価を行った.

図 10 に RSS 情報収集遅延のヒストグラムを示す. 図 10 より以下の二つのことが分かる.

- (1) 95%以上の場合において RSS 情報は 200 ミリ秒以内に収集が完了した. 測位対象 Wi-Fi 端末の

接続先 AP に物理的にもネットワーク上でも近い AP のみが RSS 情報を送信しているため、メッシュネットワーク上の転送ホップ数が少ないことにより短い時間で全ての RSS 情報を収集できたと考えられる。なお、RSS 情報収集遅延の平均値と最大値はそれぞれ 88.8 ミリ秒、2,999.7 ミリ秒であった。RSS 情報収集遅延の最小値はゼロであり、RSS 情報を一つだけ受信した場合である。

- (2) 幾つかの RSS 情報収集遅延は 500 ミリ秒を超えている。PCWL が構築するメッシュネットワークはオンデマンドに構築されるため、最初の転送においてネットワークを構築した際に大きな遅延となったと考えられる。

以上の結果と提供する位置情報サービスの特性とを勘案して測位 CGI プログラムにおける RSS 情報収集待機時間を決定する。例えば、本論文で用いている屋内地図 Web サービスの例では測位に失敗して測位結果が得られない場合があっても良いが、ユーザ位置は人間の反応速度に比べて短い時間で表示されることが望ましい。このため、RSS 情報待機時間を 200 ミリ秒とした。以降の評価でもこの値を用いた。

本評価は RSS 情報収集遅延の評価の一例を示している。RSS 情報収集遅延は AP によって構成されるメッシュネットワークのトポロジーや RSS 情報以外の通信の影響を受ける。このため、実際に測位システムを構築する際には AP を設置した後に実環境で RSS 情報収集遅延を評価し、位置情報サービスの特性を勘案して RSS 情報待機時間を決定する。

5.5 測位応答時間

ユーザから見た分散測位型 AWPN の応答速度を評価するため、測位応答時間を評価した。測位応答時間は測位 CGI プログラムにおける RSS 情報待機時間と測位計算時間の和である。5.4 において測位 CGI プログラムの RSS 情報待機時間を決定したため、ここでは測位計算時間を評価する。

図 11 に測位計算時間のヒストグラムを示す。塗りつぶし部分は測位計算に成功した場合の測位計算時間を示している。図 11 より以下の三つのことが分かる。

- (1) 測位計算に失敗した場合の測位計算時間は、測位計算に成功した場合に比べて短い傾向にある。測位計算の失敗の多くは RSS 情報数の不足によるものであり、測位計算の早い段階で計算失敗が確定したために測位失敗時の測位計算時間が短くなったと考えられる。

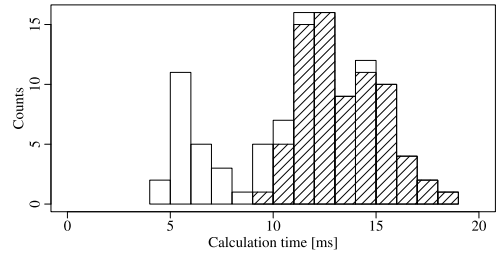


図 11 測位計算時間のヒストグラム。塗りつぶし部分は測位計算に成功した場合の測位計算時間を示している。

Fig. 11 Histogram of localization calculation latency. Shadow bar describes the calculation latency for successful localizations.

- (2) 一部の測位失敗において 10 ミリ秒を超える測位計算時間を要した。このような測位失敗はマルチパスなどによる RSS 測定誤差の影響によって測位計算が発散した場合であり、多くの計算時間を要したと考えられる。
- (3) 全ての測位計算は 20 ミリ秒以内に完了した。この時間は RSS 情報収集待機時間の 200 ミリ秒の 1/10 である。

以上の結果から、測位応答時間は最大で 220 ミリ秒と計算できる。

6. シミュレーション評価

前章で示した実験の評価では、PCWL の制約によりメッシュネットワーク上の転送通信量を評価することができなかった。分散測位型 AWPN によってネットワーク通信量を削減できることを検証するため、ns-3 を用いてシミュレーション評価を行った。ユーザのもつ Wi-Fi 端末は測位対象領域に一様ランダムに初期配置され、測位対象領域内を移動しながら端末にもっとも近い Wi-Fi AP に接続するものとした。

6.1 シミュレーション環境

分散測位型 AWPN は Wi-Fi AP 間のメッシュネットワークと Wi-Fi AP・ユーザ端末間のアクセスネットワークの 2 種類のネットワークを用いる。メッシュネットワークとして 5GHz 帯の一つのチャンネルを用いる IEEE 802.11s ネットワークを、アクセスネットワークとして IEEE 802.11b ネットワークを用いた。

3.5 で述べたように、他の Wi-Fi AP に接続されているユーザ端末が送信した測位要求信号を検出するため全ての AP は 2.4 GHz 帯の同一チャンネルを使用するように設定した。

メッシュネットワーク、アクセスネットワークともに電波伝搬モデルはITU-R 勧告の Log-distance 電波減衰モデルを用いた [34]。ITU-R 勧告における減衰係数 (Power loss coefficient) は、5 GHz 帯のメッシュネットワークは 30、2.4 GHz 帯のアクセスネットワークは人間が密集してやや減衰が大きくなったことを想定して 40 とした。その他のパラメータは ns-3 のデフォルト値であり、送受信アンテナ利得はそれぞれ 1.0 dB、送信パワーは Wi-Fi 端末・AP とともに 16.0 dBm、受信感度は -96.0 dBm である。これらのパラメータを伝搬モデルにあてはめると、メッシュネットワークのカバレッジは約 180 m、アクセスネットワークは約 50 m となる。

地下街のような環境を想定し、Wi-Fi AP は図 12 に示すように 50 m 間隔で 2 列の Wi-Fi AP を並べた配置とした。AP は右方向に 2 台ずつ追加し、廊下状グリッド形状を維持するようにして台数を 4 台から 14 台と変化させた。Wi-Fi 端末は AP で囲まれた領域の中に一様ランダムに配置し、ランダムウェイポイントモデルで動作するものとした。

Wi-Fi 端末の台数を 20 台から 140 台と変化させ、各 Wi-Fi 端末の台数について試行回数 1,000 回のシミュレーションを行った。各 Wi-Fi 端末は測位要求信号を 1 秒ごとにアクセスネットワークを通じて接続先 AP に送信する。この測位要求信号を検出した全てのアクセスポイントは RSS 情報を生成し、メッシュネットワークを通じて端末の接続先 AP に送信する。ACK 通信や再送による影響を除外するため、RSS 情報の送信には UDP/IP を利用した。RSS 情報の大きさは実証評価と同じ 11 バイトである。各試行は 30 秒の通信をシミュレーションした。

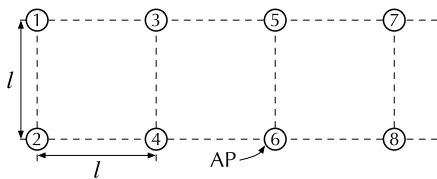


図 12 Wi-Fi AP の配置。点線はメッシュネットワークのリンクを示している。 $l = 50$ [m] である。集中測位型 AWPN ではメッシュネットワークをグラフに見立てた場合に中心となる頂点の AP をコア AP とした。

Fig. 12 Arrangement of Wi-Fi APs. Dotted lines indicate mesh network links. $l = 50$ [m]. In a centralized AWPN, a core AP is the center of the network graph.

表 2 にシミュレーション諸元をまとめた。このような条件下で分散測位型 AWPN (Distributed AWPN) と集中測位型 AWPN (Centralized AWPN) のそれぞれについてシミュレーションを行い、各 Wi-Fi AP における通信データ量を収集して比較した。なお、集中測位型 AWPN におけるコア AP はメッシュネットワークの中心、すなわち他の AP からのホップ数の総和がもっとも小さくなる AP とした。

ネットワーク通信量は、各 AP における送信データ量及び転送データ量の和を全 AP にわたって合計することで算出した。4. において「単位時間当たり全 AP が送信したデータ量の総和」をネットワーク通信量と定義したため、送信・転送データ量の合計をシミュレーション時間で除することでネットワーク通信量を求めた。ネットワーク通信量は各試行で算出した上で平均した。

6.2 Wi-Fi 端末数に対するネットワーク通信量

まず、ネットワークの規模を固定させて Wi-Fi 端末数を変化させた場合のネットワーク通信量を評価した。図 13 に Wi-Fi 端末数 N に対するネットワーク通信量を示す。図は一例として Wi-Fi AP 数 $N_a = 10$ の場合を示している。図より以下の二つのことが分かる。

- (1) 分散測位型 AWPN、集中測位型 AWPN とともにネットワーク通信量は Wi-Fi 端末数にほぼ比例して増加する。
- (2) 分散測位型 AWPN のネットワーク通信量は集中測位型 AWPN よりも小さい。分散測位によ

表 2 シミュレーション諸元
Table 2 Simulation environment.

Mesh wireless standard	IEEE 802.11s (5-GHz band)
Access wireless standard	IEEE 802.11b (2.4-GHz band)
Radio propagation model	Log-distance model [34]
Power loss coefficient	
Mesh wireless	30
Access wireless	40
TX power	16.0 dBm
Antenna gain	
TX	1.0 dB
RX	1.0 dB
Receiver sensitivity	-96.0 dBm
Wi-Fi devices	
Number of devices	20 ~ 140
Initial position	Uniform random
Mobility model	Random waypoint
Localization interval	1 s
RSSI-data size	11 bytes
Simulation time-length	30 s
Number of trials	1000

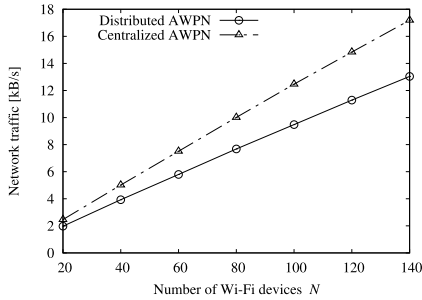


図 13 Wi-Fi 端末数 N に対するネットワーク通信量 (Wi-Fi AP 数 $N_a = 10$)

Fig. 13 Network traffic as a function of the number of Wi-Fi devices N (the number of Wi-Fi APs $N_a = 10$).

てネットワーク通信量は Wi-Fi 端末数 $N = 20$ のとき 20.0%, $N = 140$ のとき 24.1%削減された。分散測位型 AWPN においては RSS 情報の転送が Wi-Fi 端末に物理的に近接する AP 間のみで行われるために転送データ量が集中測位型 AWPN よりも小さくなり、ネットワーク通信量が削減されたと考えられる。

Wi-Fi AP の数 N_a を 4 台から 14 台まで変化させた場合にも同様の結果が得られた。以上の結果から、分散測位型 AWPN の通信量は集中測位型 AWPN に比べて小さいことが確認された。

6.3 Wi-Fi AP 数に対するネットワーク通信量

ネットワーク規模が小さい場合には分散測位型 AWPN と集中測位型 AWPN とで RSS 情報の転送に要するホップ数に大きな差が生じないため、ネットワーク通信量の差が小さくなると考えられる。小規模なネットワークにおいても分散測位型 AWPN のネットワーク通信量が集中測位型 AWPN よりも小さくなることを検証するため、Wi-Fi AP 数を変化させた場合のネットワーク通信量を評価した。

図 14 に Wi-Fi AP 数 N_a に対するネットワーク通信量を示す。図は一例として Wi-Fi 端末数 $N = 40$ の場合を示している。4. の解析で得た分散測位型 AWPN のネットワーク通信量、集中測位型 AWPN のネットワーク通信量の下限值もあわせて示している。図より以下の三つのことが分かる。

- (1) 分散測位型 AWPN のネットワーク通信量は集中測位型 AWPN よりも小さい。分散測位することでネットワーク通信量を Wi-Fi AP 数 $N_a = 4$ のとき 17.5%, $N_a = 14$ のとき 35.0%削減でき

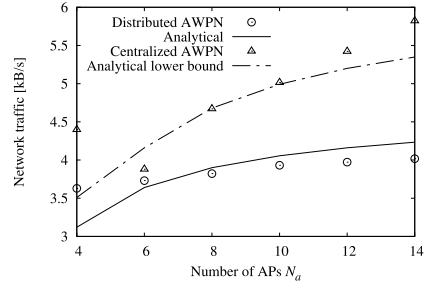


図 14 Wi-Fi AP 数 N_a に対するネットワーク通信量 (Wi-Fi 端末数 $N = 40$) 及び解析結果。集中測位型 AWPN の解析結果は下限値を示している。

Fig. 14 Network traffic as a function of the number of Wi-Fi APs N_a (the number of Wi-Fi devices $N = 40$) and analysis results. Analytical lower bound is shown for centralized AWPN.

た。もっとも差が小さい $N_a = 6$ においても分散測位型 AWPN のネットワーク通信量は集中測位型 AWPN よりも 3.9%小さかった。

- (2) 集中測位型、分散測位型 AWPN ともに $N_a = 4$ のときは解析結果に比べてネットワーク通信量が大きい。 $N_a = 4$ においては多数の Wi-Fi 端末が狭い測位対象領域内ではほぼ同時に測位要求信号を送信するために多くの衝突が発生し、IEEE 802.11 MAC 層における再送が多数発生していた。再送された測位要求信号のそれぞれに対して RSS 情報が生成されるため、ネットワーク通信量の増加を招いたと考えられる。
- (3) $N_a = 4$ の場合を除外すると、分散測位型 AWPN のネットワーク通信量は解析結果と $\pm 10\%$ 程度の差がある。これは、測位要求信号を検出する AP 数が Wi-Fi 端末接続先 AP から 1 ホップ以内にある AP 数と異なることに起因していると考えられる。例えば、図 12 に示す AP 配置において AP 1~4 に囲まれた領域の中で AP 4 のすぐ隣に Wi-Fi 端末が存在し、AP 4 に接続している場合を考える。アクセスネットワークのカバレッジは約 50m であるから、Wi-Fi 端末の測位要求信号は AP 2~4 の 3 台で検出される。一方、解析では Wi-Fi 端末の接続先から 1 ホップ以内にある 4 台の AP が測位要求信号を検出することを前提としたため、解析よりも少ない RSS 情報が生成・転送されネットワーク通信量が小さくなる。Wi-Fi 端末の位置、接続先によっては解析よりも多くの AP

が測位要求信号を検出する場合もある。AP 数の増加とともに「少ない台数の AP で測位要求信号を検出する場合」の影響が大きくなるため、AP 数の増加とともに解析結果よりも緩やかにネットワーク通信量が増加していると考えられる。

- (4) 集中測位型 AWPN のネットワーク通信量は、解析結果がネットワーク通信量の下限値を示していることを考慮すると $N_a = 4, 6$ を除外すればおおむね解析結果と一致していると言える。 $N_a = 6$ の場合に解析結果よりも小さいネットワーク通信量となったのは、メッシュネットワークのカバレッジが約 180m と AP 間距離に比べて長いためと考えられる。IEEE 802.11s では自動的にメッシュネットワークが構築される。このため、図 12 に示したリンク以外にもリンクが形成されて RSS 情報転送時の通信ホップ数が小さくなり、ネットワーク通信量が解析結果よりも小さくなったと考えられる。 $N_a = 6$ の場合に限らず全ての N_a でこの影響があると考えられるが、解析結果の下限値とシミュレーション結果の差が小さい $N_a = 6$ の場合だけ下限値を下回るネットワーク通信量となったと考えられる。

Wi-Fi 端末数を 20 台から 140 台と変化させた場合にも同様の結果が得られた。以上の結果から、ネットワーク規模が小さい場合にも分散測位型 AWPN の通信量は集中測位型 AWPN に比べて小さいことが確認された。

6.4 AP 通信量

AWPN では AP 間の通信帯域幅に制限があるため、ネットワーク全体の通信量を削減しても特定の AP への通信集中がある場合には測位応答時間が低下するなどの問題が生じる。分散測位型 AWPN によって特定の Wi-Fi AP への通信集中を防げることを検証するため、最大 AP 通信量を評価した。AP 通信量は各 AP が単位時間あたりに転送を含んで送信したデータ量である。

図 15 に Wi-Fi AP 数 N_a に対する最大 AP 通信量を示す。図は一例として Wi-Fi 端末数 $N = 40$ の場合を示している。図より以下の二つのことが分かる。

- (1) 分散測位型 AWPN、集中測位型 AWPN ともに最大 AP 通信量は AP 数の増加とともに減少している。AP で囲まれた領域内に一定の台数の Wi-Fi 端末を一様に配置していることから、AP 数の増加とともに 1 台の AP に接続される Wi-Fi 端末数が

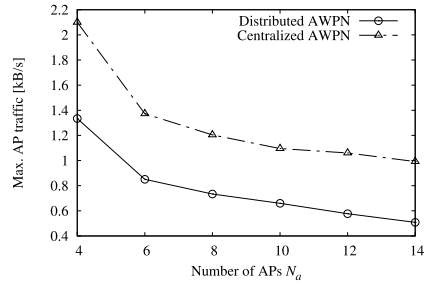


図 15 Wi-Fi AP 数 N_a に対する最大 AP 通信量 (Wi-Fi 端末数 $N = 40$)

Fig. 15 Maximum AP traffic as a function of the number of Wi-Fi APs N_a (the number of Wi-Fi devices $N = 40$).

減少するためと考えられる。

- (2) 分散測位型 AWPN の最大 AP 通信量は集中測位型 AWPN のおよそ半分である。分散測位型 AWPN では 1 台の Wi-Fi 端末に関する RSS 情報はその端末に近接する AP 間でやりとりされるため、Wi-Fi 端末の物理的な分散がメッシュネットワーク上での通信の分散につながったと考えられる。

Wi-Fi 端末数を 20 台から 140 台と変化させた場合にも同様の結果が得られた。以上の結果から、分散測位型 AWPN によって通信を分散できることが確認された。

7. む す び

本論文では「オンデマンド」な屋内位置情報サービスの実現に向けた分散測位型 AWPN (アドホック測位ネットワーク) を示した。AWPN は AP 間で構築されるメッシュネットワークであり、Wi-Fi 端末の測位を行う機能を有している。AWPN を用いて位置情報サービスを Web サービスとして実装することで「AP を設置するだけで位置情報サービスの導入完了」「ユーザは Wi-Fi 端末を用いて直ちに位置情報サービスを利用可能」という二つのオンデマンド性を実現する。AWPN ではネットワーク規模の増加とともに通信の輻輳が問題となるため、各 AP で測位計算を分散させる。分散測位型 AWPN を用いて位置情報サービスを実装して九州大学伊都キャンパス内で実証評価を行い、220 ミリ秒以下の測位遅延で Wi-Fi 端末を測位できることを確認した。また、数学的な解析及びシミュレーション評価によって通信量を評価し、1 台の測位サーバを用いる集中測位型 AWPN と比べてネットワーク

通信量を約 24%削減できることを確認した。

謝辞 本研究の一部は、科研費 (JP15H05708, JP16K16048, JP17H01741) 及び東北大学電気通信研究所における共同プロジェクト研究の助成で行われた。

文 献

- [1] S. Ishida, K. Tomishige, A. Izumi, S. Tagashira, Y. Arakawa, and A. Fukuda, "Implementation of on-demand indoor location-based service using ad-hoc wireless positioning network," Proc. IEEE Int. Conf. Ubiquitous Intelligence and Computing (UIC), pp.34–41, Dec. 2014.
- [2] S. Ishida, S. Tagashira, Y. Arakawa, and A. Fukuda, "On-demand indoor location-based service using ad-hoc wireless positioning network," Proc. IEEE Int. Conf. Embedded Software and Systems (ICESSE), pp.1005–1013, Aug. 2015.
- [3] P. Bolliger, "Redpin – adaptive, zero-configuration indoor localization through user collaboration," Proc. ACM Int. Workshop on Mobile Entity Localization Tracking GPS-less Environments (MELT), pp.55–60, Sept. 2008.
- [4] A. Barry, B. Fisher, and M.L. Chang, "A long-duration study of user-trained 802.11 localization," LNCS, vol.5801, pp.197–212, Sept.–Oct. 2009.
- [5] J.-G. Park, B. Charrow, D. Curtis, J. Battat, E. Minkov, J. Hicks, S. Teller, and J. Ledlie, "Growing an organic indoor location system," Proc. ACM MobiSys, pp.271–284, June 2010.
- [6] Z. Jiang, J. Zhao, J. Han, Z. Wang, S. Tang, J. Zhao, and W. Xi, "Wi-Fi fingerprint based indoor localization without indoor space measurement," Proc. IEEE Int. Conf. Mobile Ad-Hoc and Sensor Systems (MASS), pp.384–392, Oct. 2013.
- [7] Z. Yang, C. Wu, and Y. Liu, "Locating in fingerprint space: Wireless indoor localization with little human intervention," Proc. ACM MobiCom, pp.269–280, Aug. 2012.
- [8] A. Rai, K.K. Chintalapudi, V.N. Padmanabhan, and R. Sen, "Zee: Zero-effort crowdsourcing for indoor localization," Proc. ACM MobiCom, pp.293–304, Aug. 2012.
- [9] H. Wang, S. Sen, A. Elgohary, M. Farid, M. Youssef, and R.R. Choudhury, "No need to war-drive: Unsupervised indoor localization," Proc. ACM MobiSys, pp.197–210, June 2012.
- [10] C. Wu, Z. Yang, Y. Liu, and W. Xi, "WILL: Wireless indoor localization without site survey," IEEE Trans. Parallel Distrib. Syst., vol.24, no.4, pp.839–848, April 2013.
- [11] K. Chintalapudi, A.P. Iyer, and V.N. Padmanabhan, "Indoor localization without the pain," Proc. ACM MobiCom, pp.173–184, Sept. 2010.
- [12] P. Krishnan, A.S. Krishnakumar, W.-H. Ju, C. Mallows, and S. Ganu, "A system for LEASE: Location estimation assisted by stationary emitters for indoor RF wireless networks," Proc. IEEE Int. Conf. Computer Communications (INFOCOM), pp.1001–1011, March 2004.
- [13] N. Miwa, S. Tagashira, H. Matsuda, T. Tsutsui, Y. Arakawa, and A. Fukuda, "A multilateration-based localization scheme for adhoc wireless positioning networks used in information-oriented construction," Proc. IEEE Int. Conf. Advanced Info. Networking Applications (AINA), pp.690–695, March 2013.
- [14] M. Minami, Y. Fukuju, K. Hirasawa, S. Yokoyama, M. Mizumachi, H. Morikawa, and T. Aoyama, "DOLPHIN: A practical approach for implementing a fully distributed indoor ultrasonic positioning system," LNCS, vol.3205, pp.437–365, Sept. 2004.
- [15] L. Huang, F. Wang, C. Ma, and W. Duan, "The analysis of anchor placement for self-localization algorithm in wireless sensor networks," Advances Wireless Sensor Networks, Communications in Computer and Info. Science, vol.334, pp.117–126, 2013.
- [16] P. Bahl and V.N. Padmanabhan, "RADAR: An in-building RF-based user location and tracking system," Proc. IEEE Int. Conf. Computer Communications (INFOCOM), pp.775–784, March 2000.
- [17] A. LaMarca, Y. Chawathe, S. Consolvo, J. Hightower, I. Smith, J. Scott, T. Sohn, J. Howard, J. Hughes, F. Potter, J. Tabert, P. Powledge, G. Borriello, and B. Schili, "Place Lab: Device positioning using radio beacons in the wild," LNCS, vol.3468, pp.116–133, May 2005.
- [18] A.W. Tsui, Y.-H. Chuang, and H.-H. Chu, "Unsupervised learning for solving RSS hardware variance problem in WiFi localization," Mobile Networks and Applications, vol.12, no.5, pp.677–691, Oct. 2009.
- [19] A. Kushki, K.N. Plataniotis, and A.N. Venetsanopoulos, "Intelligent dynamic radio tracking in indoor wireless local area networks," IEEE Trans. Mobile Comput., vol.9, no.1, pp.405–419, March 2010.
- [20] K. Kaemarungsi and P. Krishnamurthy, "Analysis of WLAN's received signal strength indication for indoor location fingerprinting," Pervasive and Mobile Computing, vol.8, no.2, pp.292–316, April 2012.
- [21] S. Sen, B. Radunović, R.R. Choudhury, and T. Minka, "You are facing the Mona Lisa: Spot localization using PHY layer information," Proc. ACM MobiSys, pp.183–196, June 2012.
- [22] M. Azizyan, I. Constandache, and R.R. Choudhury, "SurroundSense: Mobile phone localization via ambient fingerprinting," Proc. ACM MobiCom, pp.261–272, Sept. 2009.
- [23] R. Nandakumar, K.K. Chintalapudi, and V.N. Padmanabhan, "Centaur: Locating devices in an office environment," Proc. ACM MobiCom, pp.281–

292, Aug. 2012.

- [24] H. Liu, Y. Gan, J. Yang, S. Sidhom, Y. Wang, Y. Chen, and F. Ye, "Push the limit of WiFi based localization for smartphones," Proc. ACM MobiCom, pp.305–316, Aug. 2012.
- [25] R.-Q. Zhang, Y. Lifshitz, and S.-T. Lee, "Oxide-assisted growth of semiconducting nanowires," Advanced Materials, vol.15, no.7-8, pp.635–640, April 2003.
- [26] C. Wu, Z. Yang, Y. Liu, and W. Xi, "WILL: Wireless indoor localization without site survey," Proc. IEEE Int. Conf. Computer Communications (INFOCOM), pp.64–72, March 2012.
- [27] S. Ganu, A.S. Krishnakumar, and P. Krishnan, "Infrastructure-based location estimation in WLAN networks," Proc. IEEE Int. Wireless Communications and Networking Conf. (WCNC), vol.1, pp.465–470, March 2004.
- [28] L.M. Ni, Y. Liu, Y.C. Lau, and A.P. Patil, "LANDMARC: Indoor location sensing using active RFID," IEEE PerCom, pp.407–415, March 2003.
- [29] H. Wymeersch, J. Lien, and M.Z. Win, "Cooperative localization in wireless networks," Proc. IEEE, vol.97, no.2, pp.427–450, Feb. 2009.
- [30] G. Blumrosen, B. Hod, T. Anker, and D. Dolev, "Enhancing RSSI-based tracking accuracy in wireless sensor networks," ACM Trans. Sensor Networks (TOSN), vol.9, no.3, pp.29:1–29:28, May 2013.
- [31] R. Diestel, Graph theory, chapter 1.2, 3rd ed., Springer, 2005.
- [32] PicoCELA, "PCWL-0100 カタログ," available online. <http://www.picocela.com/12477.html>
- [33] ACME Laboratories, "Tiny/turbo/throttling HTTP server," available online. <http://acme.com/software/thttpd/>
- [34] ITU-R, "Propagation data and prediction methods for the planning of indoor radiocommunication systems and radio local area networks in the frequency range 900 MHz to 100 GHz," Recommendation ITU-R P.1238-7, 2012.

(平成 29 年 8 月 7 日受付, 12 月 15 日再受付,
30 年 1 月 30 日早期公開)



石田 繁巳 (正員)

2006 年芝浦工業大学工学部卒業。2008 年東京大学大学院新領域創成科学研究科修士課程修了。2012 年同大学院工学系研究科博士課程修了。博士 (工学)。2008 年 (株) アクティス入社。2013 年米国ミネソタ大学客員研究員。2013 年九州大学システム情報科学研究所助教。無線通信, センサネットワークに関する研究に従事。2016 年度山下記念研究賞。IEEE, 情報処理学会各会員。



田頭 茂明 (正員)

1996 年龍谷大学理工学部電子情報学科学卒業。1998 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。2000 年同大学情報科学研究科博士後期課程修了。博士 (工学)。2000 年広島大学工学部助手。2007 年同大学大学院工学研究科助教。同年九州大学高等研究院特別准教授。2012 年関西大学総合情報学部准教授。2014 年同大学教授。モバイル・ユビキタスコンピューティングの研究に従事。2009 年度山下記念研究賞。IEEE, 情報処理学会各会員。



荒川 豊 (正員)

2001 年慶應義塾大学理工学部卒業。2006 年同大学院博士課程修了。博士 (工学)。同大学大学院特別研究助教, 九州大学大学院システム情報科学研究科助教, 仏トゥールーズ大学及び独人工知能研究所客員研究員を経て, 2013 年より奈良先端科学技術大学院大学准教授, 現在に至る。2016 年より情報処理学会関西支部「行動変容と社会システム研究会」主査及び JST さきがけ研究員, 一般社団法人ブロードバンド推進協議会理事等を兼務。センサと AI を駆使した行動認識及び行動変容に関する研究に従事。IEEE, ACM, 及び IPSJ, 各会員。



福田 晃 (正員)

1977 年九州大学工学部情報工科学卒業。1979 年同大学院工学研究科修士課程情報工学専攻修了。同年日本電信電話公社 (現 NTT) 武蔵野電気通信研究所入所。1983 年九州大学助手。1989 年同大学助教授。1994 年奈良先端科学技術大学院大学教授。2001 年九州大学大学院システム情報科学研究所教授, 2008 年九州大学システム LSI 研究センター長 (兼任), 2015 年九州大学主幹教授, 2016 年九州大学スマートモビリティ研究開発センター長 (兼任), 現在に至る。博士 (工学)。組込みソフトウェア, ユビキタスコンピューティングに関する研究に従事。情報処理学会研究賞 (1990 年), Best Author 賞 (1993 年) などを受賞。情報処理学会フェロー, ACM, IEEE Computer Society, 日本 OR 学会各会員, [NPO 法人 九州組込みソフトウェアコンソーシアム (QUEST)] 理事長など。