

Wi-Fiパケットセンサを利用した 匿名人流解析システムの構築

望月 祐洋^{1,a)} 上善 恒雄^{2,b)} 西田 純二^{3,c)} 中野 秀男^{4,d)} 西尾 信彦^{5,e)}

概要: スマートフォン等の Wi-Fi 対応機器が常時発信している Probe Request を受信する Wi-Fi パケットセンサを多地点に配置してデータを収集し、匿名化処理を施してクラウドサーバ上に蓄積することでリアルタイムに人の滞留・流動を分析し、人流の時空間分布を把握するための汎用システム構築の現状について報告する。

1. はじめに

近年、Wi-Fi 通信機能を持つ機器が急速に普及している。例えばスマートフォンなどの多くは、スタンバイ時にも Wi-Fi ルータとの接続を行うために管理パケット (Probe Request) を送出している。機種によっても異なるが、多くの場合 60 秒前後の間隔で常時 Probe Request を発信するよう設定されている。Probe Request に含まれる MAC アドレスを収集し、それをキーとして分析することで、利用者の個人情報を特定することなしに人の流動・分布状況を把握することが可能となる。

平成 23 年 3 月 11 日に始まる東日本大震災以降、災害からの安全性向上のために、特に人が集中する都市部等における人の分布・流動状況をリアルタイムに把握するシステムの重要性が高まりつつある [1]。本研究は、MAC アドレスを収集し分析用サーバにそのデータをアップロードする機能を有するセンサを都市内の多数の箇所に配置することで、地域における人の流動・分布をリアルタイムに把握し、防災計画、災害対応に生かすためのシステムを構築することを目的とする。なお、匿名性を確保するため MAC アド

レスはそれをキーとするハッシュ関数による変換を行う。本論文ではハッシュ関数により変換を行った MAC アドレスを、匿名 (Anonymous) MAC アドレス、略して AMAC アドレスと呼ぶ。また、この Wi-Fi パケットセンサを本研究では「AMAC アドレス Probe センサ (AMP センサ)」と呼ぶ。

AMAC アドレスについて、スマートフォン保有者の個人情報情報を特定できない匿名性のある識別情報として収集・分析を行うが、障害者など安全のために自分の所在地を明示的に外部に示しておきたい利用者は、AMAC アドレスに個人属性の識別情報、例えば視覚障害者であることを示す識別子などを付与して登録しておくことで、災害時には収集された AMAC アドレスから障害者の概略の分布状況をリアルタイムに把握できる。我々が平成 24 年 3 月に実施した事前調査の結果では、大阪市北区の地下鉄駅における流動人数に対して同時に取得できた一意な MAC アドレス数は、全流動者の 70% 近くであった。都会のビジネス街では既に全利用者の 70% 近くが MAC アドレスを持つ Wi-Fi 関係機器を保有していることとなる。

さらに、複数箇所に設置した AMP センサから収集される AMAC アドレスを用いれば、地点間の交通流動パターンの把握や移動速度も取得できる。歩行移動だけではなく、公共交通による移動や自動車による流動把握も可能となる。災害時における人の分布・流動情報の重要性は論を俟たないが、これらの情報は平常時でも都市計画、交通計画などの公共計画の策定に大きな価値を持つ。さらに流通業や広告業などの民間事業においても価値ある情報となり、データ利用の範囲は大きく広がると考えられる。情報価値の大きさは経済的にも自立できる事業モデルの成立を示唆する。このような AMP センサネットワークによる都

¹ 立命館大学総合科学技術研究機構
〒 525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1
² 大阪電気通信大学総合情報学部
〒 575-0063 大阪府四條畷市清滝 1130-70
³ 株式会社社会システム総合研究所
〒 650-0011 兵庫県神戸市中央区下山手通 5 丁目 7-15
⁴ 帝塚山学院大学人間科学部
〒 590-0113 大阪府堺市南区晴美台 4-2-2
⁵ 立命館大学情報理工学部
〒 525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1
a) moma@ubi.cs.ritsumei.ac.jp
b) jozen@dg.osakac.ac.jp
c) nishida@jriss.jp
d) nakano@tezuka-gu.ac.jp
e) nishio@cs.ritsumei.ac.jp

市活動の把握は、インフラ投資コストが小さく、我が国だけでなく発展途上国への応用も期待できる。タイ・バンコク、インドネシア・ジャカルタ他、交通渋滞が都市問題となっている地域は多く、防災機能の向上のみならず交通の制御のための情報が必要な都市は ASEAN 中心に数多く存在する。

本論文では、2章で関連研究について紹介し、3章でシステム要件について述べた後、4章でシステム構成について説明する。さらに、5章で予備実証実験でのプライバシー保護対策について報告した後、6章でまとめとする。

2. 関連研究

2.1 Probe Request を用いたトラッキング手法

Musa ら [2] はスマートフォン自体に手を加えずにトラッキングを実現するために、Wi-Fi モニタによって Probe Request を収集する手法を採り、移動経路の推定に Viterbi アルゴリズムを適用している。また、受動 Wi-Fi トラッキングでの検出端末数および各端末から受信するパケット数を増加させて推定精度を高めるために、(1) 人気の高いフリー Wi-Fi ホットスポットのエミュレーション、(2) 端末が送出する Directed Probe Request の宛先 SSID を持つアクセスポイントのエミュレーション、(3) 検出されたスマートフォンに対して Wi-Fi モニタから定期的に RTS を送信して CTS による応答をさせることで、各スマートフォンからの受信パケット数を増加させるといった Wi-Fi モニタ側でのパケットの受信機会を増やすための細かな技巧を凝らしている。

中野ら [3] は、Probe Request を利用した屋内混雑度の推定手法を提案している。提案手法は、位置推定、端末選択、入退室時間補完、特徴量計算のステップから成り、混雑度の推定精度を向上させるために、観測場所の種類を観測場所自体の地理的移動の有無、その場所への入退出制約の有無によって分類した上でそれぞれの種類に応じて適用アルゴリズムを使い分けている。

Probe Request を利用したトラッキング手法は諸外国では商用化もされており、例えば Libelium 社のマルチプロトコルルータ製品 Meshlium Xtreme[4] では、Wi-Fi または Bluetooth のインタフェースを備える機器の検知機能を提供し、MAC アドレス、RSSI、およびベンダの情報収集が可能である。

このように MAC アドレスを収集することを目的に開発されたハードウェアは既に存在するものの、これを地域社会のインフラとして普及させ、幅広く公共性の高い目的で利用するための仕組みを含めた研究開発は行われていない。本研究開発の特徴は、個別のハードウェアとしての AMP センサの開発にあるのではなく、その機能をオープンソース化することで MAC アドレス収集機能の普及を促進するとともに、既に普及している ICT インフラを活用して短期

間で効率的に AMP センサネットワークの構築をめざすことにある。

2.2 人流解析手法

馬場ら [5] は、ステレオカメラと画像処理による人流計測システムの構築を行った。通常の監視カメラが設置される位置にステレオカメラを設置し、オクルージョン問題に対処した人間抽出処理と人間追跡処理を含む人流計測アルゴリズムに基づく画像処理によってさまざまな方向の通過人数および歩行動線の獲得を可能にしている。

大西ら [6] も、ステレオカメラを用いた画像処理によって人間の動線を抽出するとともに、年単位の長期間に渡る動線の人数変化を混合正規分布でモデル化することで効率良く保存・表現する手法を提案し、実証実験を通じて二つの異なる期間の人流データを容易に比較できるとともに、閲覧性の高い可視化ができることを報告している。

中村ら [7] は、床上に設置した複数のレーザレンジスキャナの同期計測、および歩行者の足首付近のレンジデータの変化パターンを認識するアルゴリズムを適用することでオクルージョンを低減させた歩行者トラッキングを実現している。通勤ラッシュ時の駅構内コンコースでの実証実験の結果、20m×30m の範囲で最大 149 人の同時トラッキングおよび 81% のトラッキング精度を実現し、広範囲での高密度の群衆計測への有効性に言及している。

和田ら [8] はレーザレンジスキャナのオクルージョン問題に対処するために、個々の歩行者の位置データを完全に捉えるのではなく、計測領域を一定サイズの単位セルに分割し、各セルの人口密度の変化を計測することで歩行者の移動経路を推定、移動経路を通る歩行者数と移動方向から、フローを算出する人流モデル化手法を提案している。

本研究で構築する人流解析システムでは、図 1、図 2 それぞれに示すとおり、粒子としての人流解析および流体としての人流解析の二つの側面を対象にする。前者の側面では個人の移動に着目してパーソントリップデータを抽出し、OD (Origin-Destination) 表を作成することで人の流動を把握する。粒子としての人流解析は、主として施設内の見守り対象者の現在位置の把握を目的とする。後者の側面では設置した AMP センサをノードとしてノード間をエッジで結び完全グラフを作成し、ある時間における人数や人の滞留度をノード毎に算出するとともに、各エッジでの人の流量を算出する。その際、流量 0 のエッジについては人が通行しない経路と認識する。

カメラと画像認識による手法に比べてパーソントリップを取りやすく、データの長期収集、見守り対象者の識別もしやすい。また、カメラ撮影するよりもプライバシー面での利用者の心理的抵抗は少ないと考えられる。レーザレンジスキャナを用いる手法に比べると、センサ 1 台あたりの設置コストが低く、多地点への設置およびシステムを広く一

般に普及させる目的に適している。さらに、実用面からは既設のカメラやレーザレンジスキャナと多数の AMP センサを併用することで相互の役割を補完しつつ精度向上を図れると考えられる。

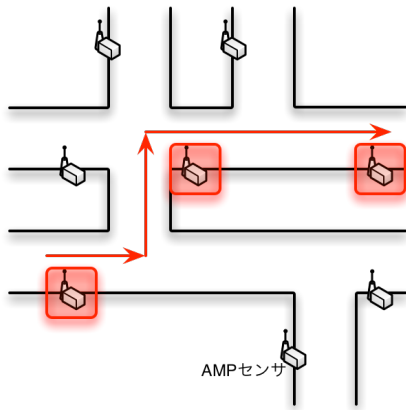


図 1 粒子としての人流解析
Fig. 1 Pedestrian flow analysis as particles

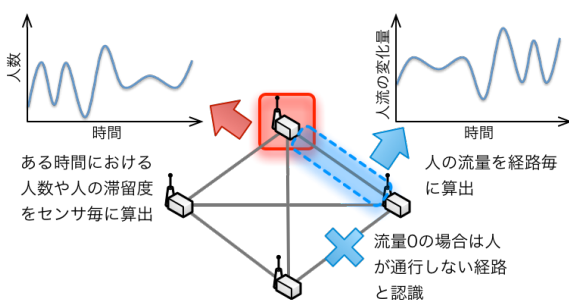


図 2 流体としての人流解析
Fig. 2 Pedestrian flow analysis as fluid

3. システム要件

多地点に設置される AMP センサからのデータをクラウドストレージサーバに蓄積し、そのセンサデータを分析することで、(1) 人流についてはその分布および流動の時間変化の実数を推定し、(2) 見守り対象者については正確な現在地把握を可能にし、(3) それぞれの分析結果を視覚化する必要がある。以下それぞれについて説明する。

3.1 分布および流動解析と実数推定機能

AMP センサ設置箇所近辺に滞留する人員の実数と任意の設置箇所間での単位時間あたりの人流の実流量を推定する必要がある。具体的な目標は NTT ドコモのモバイル空間統計やゼンリンデータコム の混雑統計の誤差が震災ビッグデータでの事例を検証した結果では 2 割程度と言われており、本研究では、それよりさらに粒度が細かいため同程

度の誤差範囲を目指す。具体的な推定手法としては、実証実験サイトの特定箇所でのカメラによる人員の実数把握、および Probe Request を発している端末の属性種別を推定することで、実数を推定するための係数を推測する。

3.2 見守り対象者のためのハイブリッド測位機能

施設内の見守り対象者の現在位置を把握するために、複数の AMP センサ側で見守り対象者の端末が発する Probe Request の受信状況に基づいて測位する手法に加え、端末が無線 LAN 基地局からのビーコン電波強度を測位に利用する既存の屋内測位手法とを併用するハイブリッド方式での測位を実施することで精度向上を図る。特に、無線 LAN 基地局測位手法が不得手とする吹き抜けエリアなどに関して精度向上をめざす。通常の無線 LAN 基地局測位が実現している 5~10m 程度の平均測位誤差をめざし、吹き抜けエリアでも同程度の誤差に収めることをめざす。

3.3 人流解析結果の視覚化機能

AMP センサ設置箇所近辺の滞留状況といった単純な分析結果表示のみならず、より複雑な分布・流動解析結果を把握するには解析結果の適切な視覚化機能が必要である。例えば、AMP センサの設置箇所間でのリンクは完全グラフとなるため結果把握には視覚化の工夫が有効であり、特定の箇所を出発点として指定してからの行き先の分布表示や、その時間パラメータの変動など単純には対応できない解析のバリエーションが想定される。そこで、個々の箇所での滞留や箇所間での流動の時間変化の他、指定した経路に合致する流動状況を出力できる簡易な問合せ処理系およびその出力結果の視覚化ツールが必要である。

4. システム構成

AMP センサを利用した匿名人流解析システムのシステム構成を図 3 に示す。以下で基本構成要素である AMP センサ、クラウドストレージサーバ、スマートフォンについて順次説明する。

4.1 AMP センサ

AMP センサは小型で量産時には 1 万円を切る価格を目処に、電源に差すだけで手軽に利用できる仕様を目標としている。また、性能目標として (1) 単体で設置し電波障害がない状況にて分速 120m で移動する Wi-Fi 機器の最長発信間隔 60 秒の管理パケットを受信できること、(2) 毎分 350 機の異なった Wi-Fi 機器の通過を認識できることを掲げている。現時点では、Raspberry PI をベースにプロトタイプ (図 4 参照) の開発を進めている [9]。現状のハードウェアの仕様は Raspberry PI Model B で、CPU は ARM1176JZF-S 700MHz を搭載し、ストレージは SDRAM 512MB、有線での通信には本体の 10/100BaseT イーサネッ

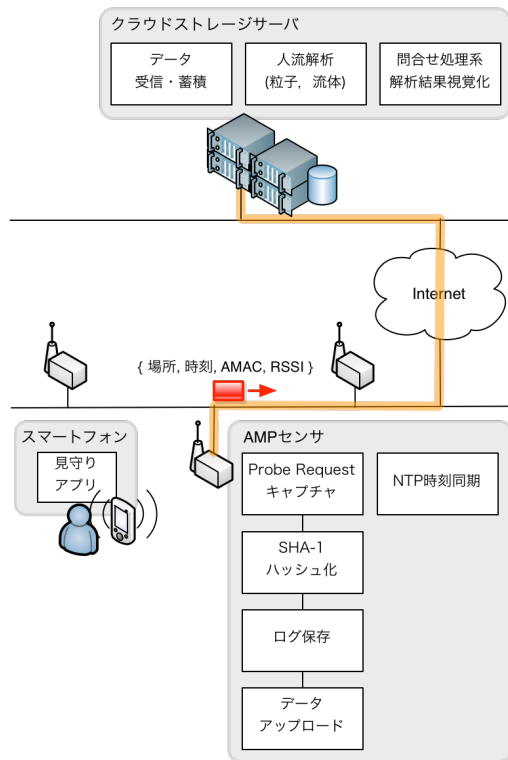


図 3 システム全体構成

Fig. 3 Overall System Layout

トソケットを、無線通信には USB 2.0 コネクタに USB 無線 LAN アダプタ (Logitech LAN-W150NU2AW) を挿して使用している。消費電力は 3.5W, OS は Linux ベースの Raspbian 3.6.1+ である。

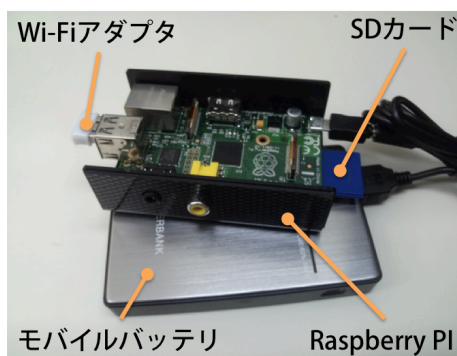


図 4 AMP センサ試作品

Fig. 4 A prototype of AMP sensor

AMP センサのベースとなる Raspberry PI は市販価格で 6,000 円程度であり、無線通信用 USB アダプタを含めて一式 8,000 円程度で構築できるため、1 万円を切る価格という目標は実現できている。また、性能目標 (1), (2) についても事前研究調査によって大阪地下街に設置した AMP センサで平日昼間に 1 分間に 350 件程度の Probe Request

を取得 (1 分間の通行者数約 500 人) できることを確認している。

さらに、受信した Probe Request に含まれる MAC アドレスを匿名化、暗号化し個人特定やトレーサビリティを困難化する処理や、蓄積されたデータを暗号化されたまま解析できるなど、堅固でかつ使いやすいセキュリティシステムの構築が目標である。現状、AMP センサで Probe Request を取得した際、MAC アドレスを SHA-1 方式でハッシュ化し、得られたハッシュ値、受信強度、取得時間の三つ組の情報を 1 行のデータとして AMP センサ内にテキスト化して保存、Probe Request 取得開始から一定時間経過後に、当該テキストを同一 LAN 内のパスワードで保護されたデータベースにアップロードし、その後 Probe Request の取得を再開するという処理を行っている。各 AMP センサは NTP で時刻同期している。パケットキャプチャには libpcap, MAC アドレスの SHA-1 ハッシュ化には OpenSSL ライブラリを使用し、プログラミング言語には C, C++ を使用している。今後、SSL 通信によるテキストデータアップロード時の通信対象ホストの認証と通信路の暗号化、さらにストレージ内データの暗号化の対応を行う予定である。

4.2 クラウドストレージサーバ

我々はライフログセンシングのための分散ストレージシステム L2base[10] の構築の経験から、近年低価格が進むクラウドサーバ上に、データ量の増加に対応してスケールアウトが可能で、データ処理の高速化を実現できる分散型データベース処理エンジンを搭載する構成で AMP センサから送出される大量のデータを蓄積し、分析できるクラウドストレージサーバシステムの構築を目標としている。現時点では、分散型データベース処理エンジン搭載の前段階としてベースラインとなるクラウドサーバの構築をめざし、立命館大学内にオープンソースの仮想クラウドサーバ構築環境である CloudStack を活用したセンサデータ格納用ストレージサーバシステムのテストベッドを稼働している。現状では AMP センサから HTTP 経由でアップロードされるデータを MySQL に格納することで内部での実験を進めている。また、HBase をベースとする時系列データベースである OpenTSDB, KairosDB などの動作検証とスキーマの検討を進めている。HBase をベースとするスケラブルなストレージシステム自体は既に構築を終えているので、今年度中に格納先としての接続切り替えの対応をし、データ量の増加に応じてスケールアウト可能な構成とするとともにデータ処理の高速化を実現することで目標を達成する。

4.3 スマートフォン用アプリ

我々の開発している匿名人流解析システムでは、Wi-Fi

通信機能を持つスマートフォンが定期的に出送する Probe Request を多地点に設置される AMP センサによって観測する手法を採るため、基本的にはスマートフォン側のハードウェアおよびソフトウェアに手を加える必要はない。

しかし、位置情報の特定を希望するユーザーの情報を AMAC アドレスに対応づけるとともに、ハイブリッド測位手法によって見守り対象者の追跡精度をより高めるため、利用者のスマートフォン側に見守りアプリを動的にインストールし、見守り期間終了後にアンインストールできるようにする。これによって、施設管理者が見守り対象者の施設内の現在位置を把握しやすくなる、また親子が迷子対策のために双方のスマートフォンにインストールすることで現在位置を確認できるなど、現実的な見守りという目標を実現できる。

現状では iOS での Wi-Fi 測位機能の利用は一般の開発者にとって制約が大きいいため、Android スマートフォンを主な対象としている。

4.4 基本性能評価実験

システム構築のための基礎データ収集のため基本性能評価実験を実施した。まず、利用端末の形状と OS の違い (スマートフォン/タブレット, Android/iOS), 端末の状態の相違 (アクセスポイント設定の有無, ホーム画面/アクセスポイントスキャン画面, スリープ時/通信時) の下での Probe Request の送信間隔の調査を行った。この内、アクセスポイント設定無し, スリープ時の結果を表 1 に示す。Probe Request を収集する立場からは悪条件であるが、Android スマートフォンでは Galaxy Nexus では 30 秒 × 4 回, 60 秒 × 4 回, 120 秒 × 4 回, 240 秒 × 4 回を 1 サイクルとして周期的に出送, また Nexus 4 では約 15 秒毎に出送する等機種毎の挙動変化が大きいことを確認した。さらに iOS では iPhone4S, iPad 1G とともに約 480 秒間隔で出送していることを確認した。

また、AMP センサ設置の目安として分解能を知るために屋内・屋外の両環境で利用端末と AMP センサ間の距離を変化させつつ、AMP センサでの Probe Request 受信時の信号強度 (RSSI) の距離減衰を調査した。図 5 に実験実施場所を示す。屋外の測定についてはキャンパスプロムナード、屋内の測定についてはカラーニングハウス I の 2 階で行った。AMP センサ 4 台を 0m, 40m, 60m, 80m の地点に予め配置し、0m 地点から 40m 地点まで携帯端末を 3m 間隔で移動させながら、各移動地点で 1 分間 Probe Request を収集した。

図 6 に Android 端末 (Galaxy Nexus と Xperia Tablet S) の屋外での測定結果、図 7 に屋内での測定結果を示す。また同様に図 8 に iOS 端末 (iPhone4S と iPad mini) の屋外での測定結果、図 9 に屋内での測定結果を示す。屋内・屋外ともに端末と AMP センサの間隔が十数メートルまで

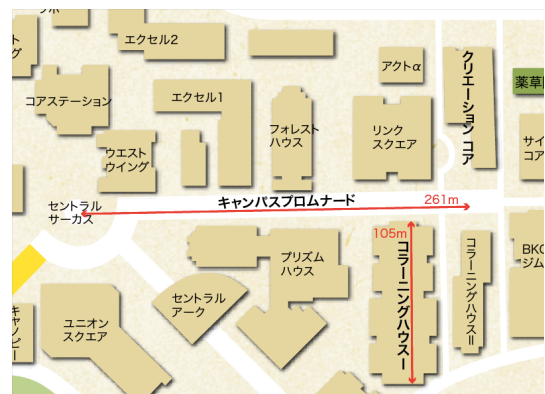


図 5 実験実施場所

Fig. 5 Experimental measurement locations

は比較的急に減衰しており、信号強度に一定の閾値を設定することで端末が特定のセンサの近傍だと推定できることを確認した。

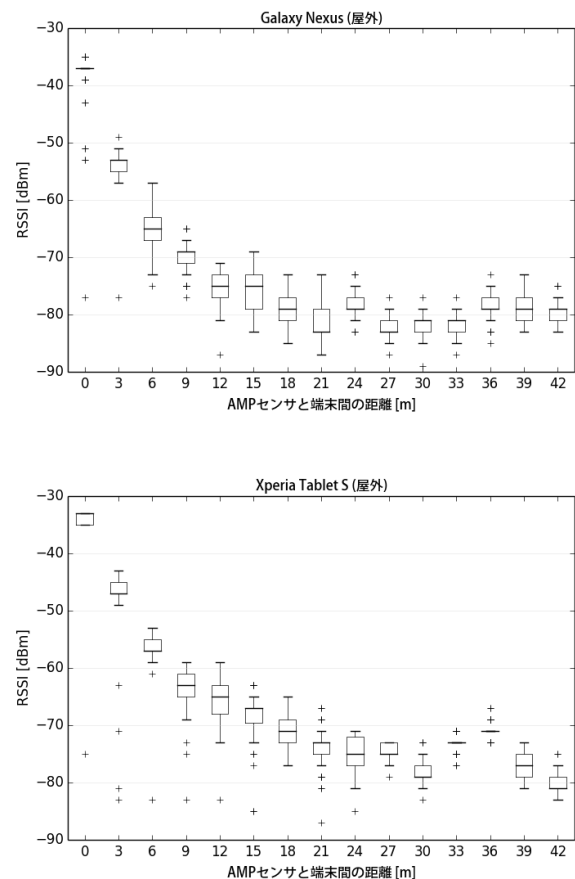


図 6 Probe Request の RSSI 距離減衰 (Android 端末, 屋外)
Fig. 6 RSSI attenuation by distance (Android, Outside a building)

さらに AMP センサと端末保持者間の距離が 5m の位置で保持者の向き (正面・側面・背面), 保持者が正面を向いている際の保持位置 (かばん・上着ポケット・ズボンポケット

表 1 Probe Request の送信間隔
 Table 1 The transmission intervals of Probe Request

OS	機種名	最大送信間隔 (秒)	備考
Android	Galaxy Nexus	247.7	(30 秒 × 4 回, 60 秒 × 4 回, 120 秒 × 4 回, 240 秒 × 4 回) を 1 サイクルとして繰り返す 約 15 秒毎に送信 観測データなし 観測データなし
	Nexus 4	14.8	
	Xperia Tablet S	—	
	Eee Pad TF201	—	
iOS	iPhone4S	481.2	約 480 秒間隔で送信
	iPad 1G	483.1	約 480 秒間隔で送信

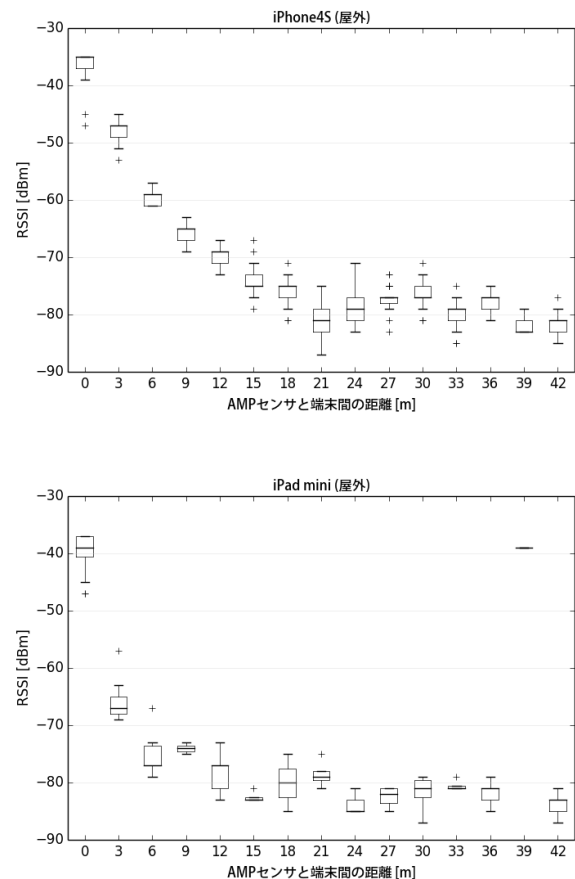
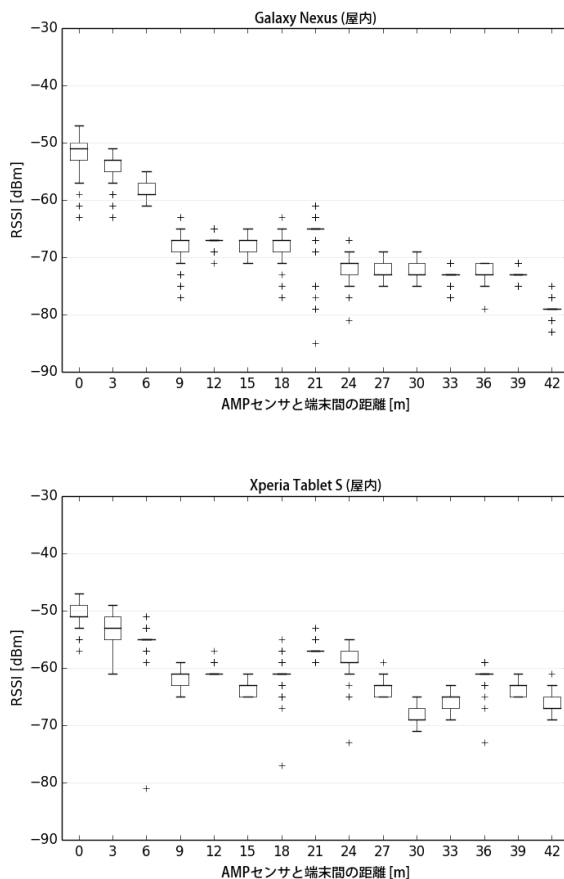


図 7 Probe Request の RSSI 距離減衰 (Android 端末, 屋内)
 Fig. 7 RSSI attenuation by distance (Android, Inside a building)

図 8 Probe Request の RSSI 距離減衰 (iOS 端末, 屋外)
 Fig. 8 RSSI attenuation by distance (iOS, Outside a building)

ト), および AMP センサ前の障害物 (成人男性 4 人の縦列・横列) 等の条件を変更した上で, 信号強度への影響を調査した. 本測定は屋外についてはキャンパスプロムナード, 屋内についてクリエーションコア 1 階で実施した.

図 10 の iPhone4S の事例で顕著に見られるとおり, 背面, 障害物 (縦列), 障害物 (横列) のように AMP センサと端末間に障害物がある場合に影響が強い (10dBm 程度) ことを確認した.

これらの携帯端末の保持位置や障害物の有無が電波強度に与える影響や, 機種間での Probe Request 送出状況の違いなどは, 来年度における実数推定手法でカバーする予定

である. 今後, 今年度中に Raspberry PI ベースのシステムに加え, 処理能力にやや余裕のある Intel NUC プラットフォームベースのプロトタイプを開発して端末内処理のバリエーションを検証するとともに, グランフロント大阪等での複数回の実証実験を通じて一般来場者からの実データを収集する予定である.

5. 予備実証実験

平成 26 年 1 月 29 日, 30 日の二日間, グランフロント大阪のナレッジキャピタル内の The Lab. アクティブラボにおいて AMP センサを用いた予備実証実験を実施した. AMP センサが入った紙箱 (図 12) 計 6 個を 3F フロアに

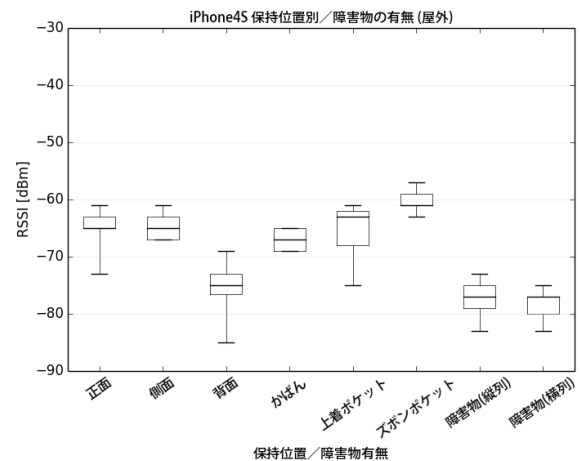
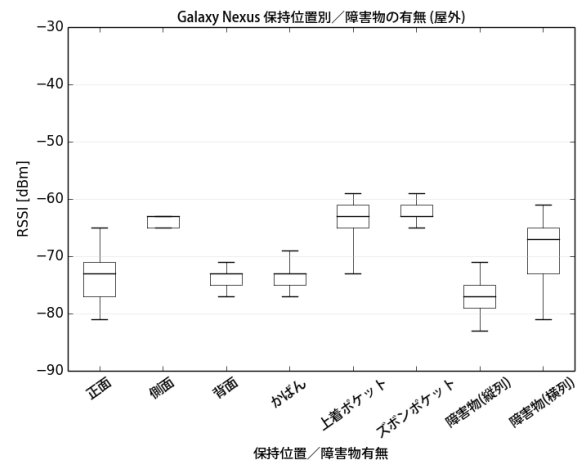
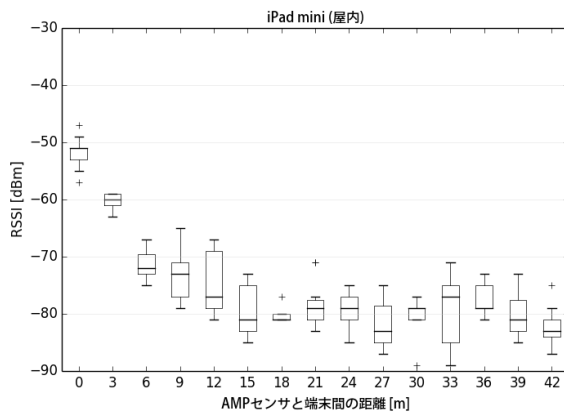
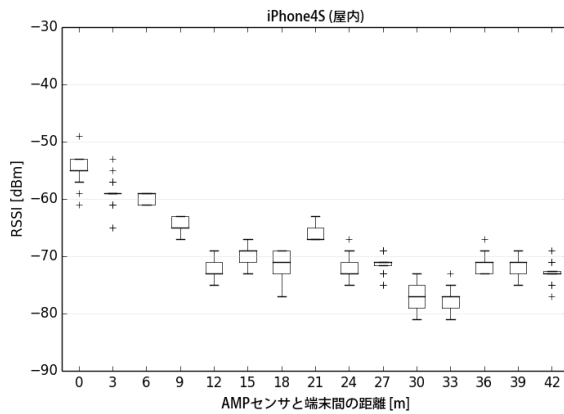


図 9 Probe Request の RSSI 距離減衰 (iOS 端末, 屋内)
 Fig. 9 RSSI attenuation by distance (iOS, Inside a building)

図 10 携帯端末の保持位置および障害物の有無の影響 (屋外)
 Fig. 10 Influence by holding positions and the existence of obstacles (Outside a building)

3 個, アクティブスタジオを含む 2F フロアに 3 個設置し, 一般来場者の Probe Request の収集を行った. 現在データ解析中のため実験結果の報告は今後とするが, 以下では一般来場者を対象にした予備実証実験において我々が行ったプライバシー保護対策について述べる.

今回の実験会場であるアクティブラボ 2F, 3F の入口, および AMP センサが入った紙箱の脇に以下の内容を含む告知パネルを掲示することで実験中である旨周知した.

- (1) 調査の目的と概要
- (2) 計測するデータとその取り扱い
- (3) 計測を避けたい場合の方法
- (4) 問合せ先 (手持ち機器のデータ消去を希望する場合等)

(1) については調査の実施主体, スマートフォン等が発する Wi-Fi パケットに含まれる情報を用いて, 地区内の流動・滞留を把握し, 防災計画・都市計画・商業活性化・交通計画など多方面で活用可能なアノニマス (匿名性) 人流解析を行うことを目的に実施すること, 調査期間について記載した. (2) については計測データがスマートフォン等の Wi-Fi パケットに含まれる識別子を擬似乱数により置き換え (ハッシュ関数処理) を行ったものであり, 通信内容を傍受するものではないこと, 名前やメールアドレス等の個

人情報は含まれておらず個人の特定はできないこと, さらに, 取得したデータを本調査の目的である流動・滞留解析以外には使用せず, また取得データを第三者に提供することはないこと, 取得したデータは数学的・統計的に処理し個人の行動追跡が行われることはないことを明記した. (3) については計測を避けたい場合に, スマートフォンの Wi-Fi 機能をオフにすることで計測の対象から外れること, (4) については計測データの消去を希望する場合に, 問合せ先に連絡して自身の機器の MAC アドレスを知らせることで該当データを消去する旨を記載した.

6. まとめ

本論文では, スマートフォン等が常時発信している Probe Request に含まれる MAC アドレスを匿名性を確保するためにハッシュ関数によって変換した AMAC アドレスを収集し, 分析用クラウドストレージサーバにそのデータをアップロードする機能を有する AMP センサを都市内の多数の箇所に設置することで, 地域における人の流動・分布をリアルタイムに把握し, 防災計画, 災害対応に生かすための匿名人流解析システム構築の現状について, システム

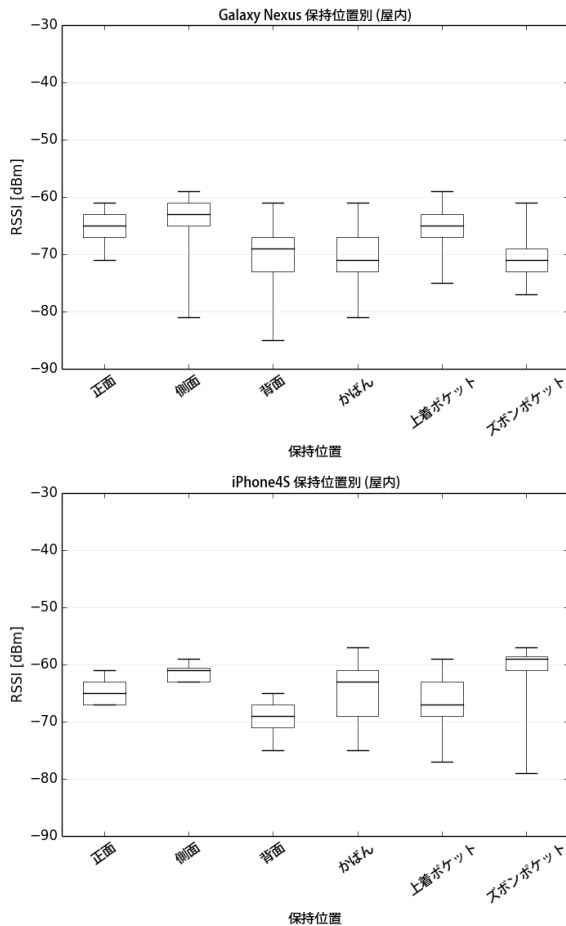


図 11 携帯端末の保持位置および障害物の有無の影響 (屋内)

Fig. 11 Influence by holding positions and the existence of obstacles (Inside a building)

構成, 基本性能評価実験の結果を中心に報告した. 今後は平成 26 年度に予定されている大規模な実証実験に向けて, 構築中のシステムに対してシステム要件に記述した機能の実装作業を進める予定である.

謝辞 本研究の一部は総務省の「戦略的情報通信研究開発推進制度 (SCOPE)」(受付番号 132307011) の支援を受けて実施された.

参考文献

[1] Horanont, T., Witayangkurn, A., Sekimoto, Y. and Shibasaki, R.: Large-Scale Auto-GPS Analysis for Discerning Behavior Change during Crisis, *IEEE Intelligent Systems*, Vol. 28, No. 4, pp. 26–34 (online), DOI: <http://doi.ieeecomputersociety.org/10.1109/MIS.2013.3> (2013).

[2] Musa, A. B. M. and Eriksson, J.: Tracking Unmodified Smartphones Using Wi-fi Monitors, *Proceedings of the 10th ACM Conference on Embedded Network Sensor Systems, SenSys '12*, New York, NY, USA, ACM, pp. 281–294 (online), DOI: 10.1145/2426656.2426685 (2012).

[3] 中野隆介, 沼尾雅之: 無線 LAN アクセスポイントへの検索要求を用いた屋内混雑度推定手法, *日本データベース学会論文誌*, Vol. 12, No. 1, pp. 121–126 (2013).

[4] Libelium: Meshlium Xtreme Datasheet (Docu-



図 12 AMP センサを収納した紙箱

Fig. 12 AMP sensor in a paper box

ment Version:v4.2 - 11/2003), Libelium Comunicaciones Distribuidas S.L. (online), available from (http://www.libelium.com/downloads/documentation/meshlium_datasheet.pdf) (accessed 2014-01-26).

[5] 馬場賢二, 榎原孝明, 湯浅裕一郎: 画像処理による人流計測システム, *東芝レビュー*, Vol. 61, No. 12, pp. 35–38 (オンライン), 入手先 (<http://ci.nii.ac.jp/naid/40015220459/>) (2006).

[6] 大西正輝, 依田育士: 大型複合施設における長期間にわたる人流比較と可視化手法, *電子情報通信学会論文誌. D, 情報・システム*, Vol. 93, No. 4, pp. 486–493 (オンライン), 入手先 (<http://ci.nii.ac.jp/naid/110007593182/>) (2010).

[7] 中村克行, 趙 卉菁, 柴崎亮介, 坂本圭司, 大鋸朋生, 鈴木尚毅: 複数のレーザレンジスキャナを用いた歩行者トラッキングとその信頼性評価, *電子情報通信学会論文誌. D-II, 情報・システム, II-パターン処理*, Vol. 88, No. 7, pp. 1143–1152 (オンライン), 入手先 (<http://ci.nii.ac.jp/naid/10016795882/>) (2005).

[8] 和田悠佑, 中村嘉隆, 東野輝夫: 障害物の存在する空間におけるレンジスキャナを用いた人流モデル化手法の提案, *マルチメディア, 分散協調とモバイルシンポジウム 2011 論文集*, Vol. 2011, pp. 1183–1192 (2011).

[9] 三神山駿, 森本哲郎, 白濱勝太, 上善恒雄: Probe Request を利用した人流解析システム, 第 12 回情報科学技術フォーラム (FIT2013) 講演論文集, M-010 (2013).

[10] 名生貴昭, 安田充志, 安積卓也, 西尾信彦: ライフログセンシングのための分散ストレージシステム, *情報処理学会研究報告. UBI, [ユビキタスコンピューティングシステム]*, Vol. 2013, No. 19, pp. 1–8 (オンライン), 入手先 (<http://ci.nii.ac.jp/naid/110009579735/>) (2013).