

人と自動車の統合分析のための Wi-Fi・BLEハイブリッドセンサの構築

白浜 勝太^{1,a)} 渕 崇洋^{2,b)} 望月 祐洋^{3,c)} 上善 恒雄^{1,d)}

概要：我々は、スマートフォンやタブレット等の Wi-Fi 端末が発信している Probe Request を受信し、匿名化された識別子を追跡する Wi-Fi パケットセンサを開発し、人の流動を捉える研究を行ってきた。他方、BLE (Bluetooth Low Energy) にはパブリックな Advertising チャンネルに自己の存在を他の端末に通知する Advertising message というしくみがあり、この情報のペイロードから識別子を抽出できる。本研究では、交通渋滞や自動車の事故リスクに関する分析に寄与するため、自動車の滞留・誘導の分析に有利な BLE を追跡対象として追加し、Wi-Fi の Probe Request に加えて BLE の Advertising Message を受信し分析する機能を兼備するハイブリッドなパケットセンサを開発した。本論文では人と自動車の流れを統合的に捉える研究の現状を報告する。

キーワード：Wi-Fi, BLE, MAC アドレス

Wi-Fi and BLE hybrid sensor for the synthetic analysis of people and cars

Abstract: We have developed a Wi-Fi packet sensor that receives Probe Requests sent from Wi-Fi terminals such as smartphones and tablets, and tracks anonymized identifiers. On the other hand, BLE (Bluetooth Low Energy) has a mechanism called an Advertising message that informs other terminals of its existence in a hyper-active Advertising channel, and an identifier can be extracted from the payload of this information. In order to contribute to the analysis of traffic congestion and the risk of car accidents, BLE, which is advantageous for analysis of car stagnation and guidance, is added as a tracking target, and receives and analyzes the BLE Advertising Message in addition to the Wi-Fi Probe Request. This paper reports the current status of research that integrates the flow of people and vehicles.

Keywords: Wi-Fi, BLE, MAC address

1. はじめに

JEITA 統計資料 [1] によると、カーナビゲーションシス

テム (カーナビ) は、2019 年に約 600 万台出荷している。前年に比べると 1.7% 下がってはいるが、カーナビのマイボイスコムアンケート調査『カーナビの利用 (第 6 回)』(2012 年 12 月実施) によると、自動車所有者におけるカーナビ搭載率は 68% とあり、電通総研「情報メディア白書 2013」では、東京 30km 圏では約 8 割がカーナビを保有というデータがある [2]。以上のことから、自動車所有者におけるカーナビゲーションシステム搭載率は上がっていると推測する。多くのカーナビには Bluetooth が搭載されており、Bluetooth をスキャンもしくは、自己の存在を通知する Advertising Packet から Public Address もしくは、Random Address を取得できる。

我々は、Wi-Fi 通信機器が Wi-Fi ルータとの接続を行う

¹ 大阪電気通信大学大学院
Osaka Electro-Communication University, Shijonawate, Osaka 575-0063, Japan
² 大阪電気通信大学
Osaka Electro-Communication University, Shijonawate, Osaka 575-0063, Japan
³ 株式会社ナレッジネットワーク研究所
Knowledge-arch Network Co.ltd, Osaka, Osaka 550-0002, Japan
^{a)} dt16a001@oecu.jp
^{b)} hw16a167@oecu.jp
^{c)} moma@karn.asia
^{d)} jozen@osakac.ac.jp



図 1 AMP センサ

Fig. 1 AMP sensor

ために送出しているパケット (Probe Request) から MAC アドレスを抽出・匿名化し収集することで、人の流動・分布状況を把握する事ができるセンサを開発している。

本論文では、Wi-Fi・Bluetooth・BLE のデータから、MAC アドレスや固有識別子を取得するハイブリッドセンサの開発に関して報告する。

2. AMP センサ

我々は、公共交通の計画や防災、渋滞情報、迂回路の提案、道路計画などに使われることを目的に、スマートフォンやタブレット等が常時発信している Probe Request の中にある MAC アドレスを抽出・匿名化し収集することで、人々の流動・滞留などの情報を把握することができるセンサを開発している [4][5]。本論文では、このデータのことを、匿名 (Anonymous) MAC アドレス、略して AMAC アドレスと呼び、Wi-Fi パケットセンサを「AMAC アドレス Probe センサ (AMP センサ)」(図 1, 2) と呼ぶ。

AMP センサを用いた流動解析では、AMAC アドレスはスマートフォンやタブレット保有者を特定できない匿名性のある識別情報として収集・分析されるが、観測対象になりたくない場合には Wi-Fi 機能をオフにするか、観測に先立ち告知される観測実施者の連絡先に MAC アドレスを伝えることで AMAC アドレスを削除するなどの個人情報のオプトアウトに対応している。

図 3 に AMP センサを用いたパケットセンシングシステムの全体像を示す。AMP センサが観測対象エリアの多地点に設置され、機器が定期的に出送するパケットデータを収集する。複数台の AMP センサは NTP (Network Time Protocol) によって起動時に適切に時刻同期される。収集されたパケットデータは MAC アドレスを AMAC アドレ

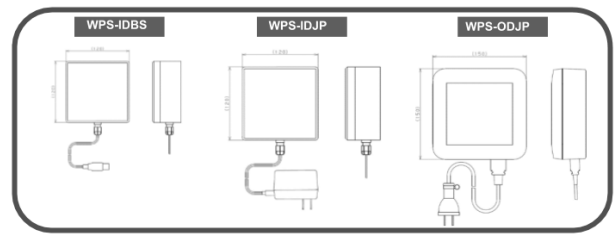


図 2 設置箇所に応じた AMP センサの形態

Fig. 2 Form of AMP sensor according to location

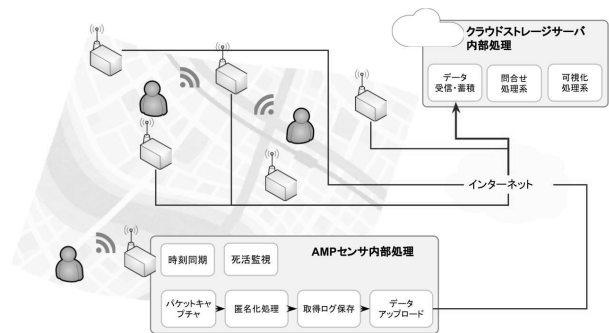


図 3 AMP センサのシステム構成図

Fig. 3 AMP sensor system block diagrams

スに変換する匿名化処理が施された後に取得ログとして一旦テキストファイルに保存される。取得ログのデータフィールドにはタイムスタンプ、AMP センサ ID、製品ベンダ番号、順序番号、電波強度が含まれる。取得ログのデータは、データアップロード処理によって定期的にインターネット上のクラウドストレージサーバに送信・蓄積される。さらに、クラウドストレージサーバに蓄積されたビッグデータに対してさまざまな問合せ処理、可視化処理が行われる。例えば収集した AMAC アドレスを元に時系列解析することで、地点間の交通流動パターンの把握や移動速度を取得でき、その値から人々の流動・滞留のデータを得られる。また、移動速度から人々だけではなく自動車による流動把握も可能である。

3. 関連研究

3.1 Bluetooth MAC アドレス取得手法

Bluetooth の初期バージョンでは、デバイスが永続的に Bluetooth の MAC アドレスを平文で定期的にブロードキャストしており、Bluetooth3.0 + High Speed (HS) まで、Bluetooth をスキャンするプログラムを動かすことで、周辺 Bluetooth 機器の MAC アドレスを取得することができる。北澤ら [6] は、Bluetooth 通信を用いた旅行時間計測に関する基礎的分析を行っており、2 地点間で Bluetooth 機器の MAC アドレスを取得する Android 端末を設置し、MAC アドレスマッチングを行っている。プライバシーに関しては、MAC アドレスは機器に対しての固有識別子であり、データの取り扱いに細心の注意が必要であるが、こ

のデータだけを用いて個人を特定するのは困難であると述べている。Bluetooth の MAC アドレス検知から移動体のデータを取得し応用する文献は多く見られる [7][8][9]。このことから、Bluetooth3.0 以前の機能が搭載されているカーナビから MAC アドレスを取得することが可能である。我々は、Bluetooth の MAC アドレスだけではなく、Wi-Fi の Probe Request から取得できる MAC アドレス、BLE の Advertising Packet から取得できる固有識別子を取得する。

3.2 BLE 固有識別子取得手法

2009 年 12 月に Bluetooth 4.0 に Bluetooth Low Energy (BLE) として統合された。Bluetooth 4.0 からは、セキュリティ面が強化されており、デバイスメーカーは永続的なアドレスの代わりに、無線通信で一時的な Random Address を使用する。この匿名化機能は、メーカー毎にある程度の柔軟性が与えられており、異なっている部分がある。Becker ら [3] は、BLE の匿名化された MAC アドレスをアドレスキャリーオーバーアルゴリズムによって、追跡可能な固有識別子の取得が可能であると述べている。これにより、スマートウォッチや他のウェアラブルデバイスだけではなく、BLE が搭載されているカーナビから MAC アドレスを取得することが可能である。

3.2.1 アドレスキャリーオーバーアルゴリズム

BLE デバイスは、他のデバイスにその存在を知らせるために、暗号化されていない Public channel で Advertising Packet をブロードキャストする。BLE ではと Public Address と Random Address の 2 種類のアドレスが存在しており、Advertising Packet から Public Address や Random Address を取得することができる。Public Address とは、そのまま MAC アドレスと同じく、固有識別子になるものである。Random Address とは、BLE で拡張された機能で、通信時にデバイス固有の物理アドレスを使用せず、動的に生成された乱数アドレスを使用したものである。

Advertising Packet に Public Address が含まれている場合は、AMP センサが行っている処理をそのまま使えばよいが、Random Address の場合は、同じ端末から出ていることを求めるには、Advertising Packet に含まれている値から別の固有識別子を求める必要がある。これを求める方法がアドレスキャリーオーバーアルゴリズムである。

BLE は Advertising channel で、ブロードキャストされる Advertising イベントを作成し、このイベントには、様々なプロトコルデータユニット (PDU) が含まれる。

BLUETOOTH SPECIFICATION Version 4.2[10] によると、PDU タイプは以下のような Advertising イベントがある。

- ADV_IND: 接続可能な不特定のデバイスへの Advertising イベント
- ADV_DIRECT_IND: 接続可能な特定のデバイスへの

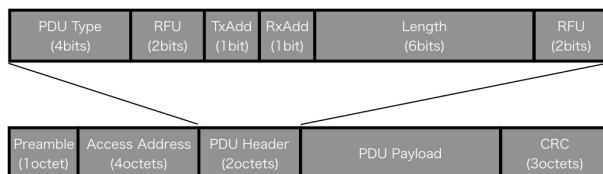


図 4 BLE Advertising Packet のフォーマット

Fig. 4 The BLE advertising packet format

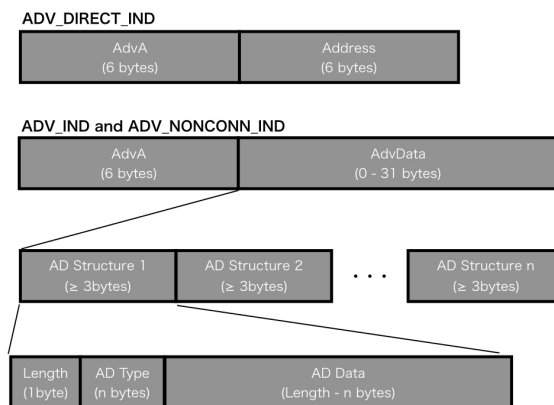


図 5 PDU payload のフォーマット

Fig. 5 PDU payload format

Advertising イベント

- ADV_CONCONN_IND: 接続不可能な不特定デバイスへの Advertising イベント
- ADV_SCAN_IND: スキャン可能な不特定デバイスへの Advertising イベント

この中の、ADV_DIRECT_IND と ADV_IND の Advertising イベントから、固有識別子を取得することができる。Advertising Packet は、図 4 に示す構造に従い、Preamble, Access Address (AA), Protocol Data Unit (PDU)、および CRC フィールドで構成される。Advertising Address (AdvA) は、Advertising パケットを送信する端末の MAC アドレスである。このアドレスは、PDU ヘッダーの TxAdd フラグに応じて、Public Address または、Random Address だと把握することができる。Public Address (TxAdd = 0) は、IEEE 登録機関から取得した IEEE が割り当てた標準の 48 ビット MAC アドレスである。再下位の 24 ビットはメーカーが割り当て、最上位の 24 ビットは IEEE が割り当てた会社 ID を表す。

固有識別子は、Bluetooth プロトコル仕様に従って PDU Payload を分解し、適切なメタデータ要素から固有識別子を取得することができる。アドレスキャリーオーバーアルゴリズムは、それぞれ別々のタイミングで変化する Random Address と固有識別子を継続的に監視することでユニークな ID として認識するオンラインアルゴリズムである。

判定方法は Bluetooth デバイスによって異なるが、BLE



図 6 payload 値と address 値の更新タイミングの例

Fig. 6 payload and address reload timing

表 1 ハイブリッド AMP センサのスペック

Table 1 Hybrid AMP sensor spec.

端末名	Raspberry Pi3 Model B+
CPU	Broadcom BCM2837B0, Cortex-A53 SoC
CPU クロック	1.4GHz
メモリ	1GB
Bluetooth	Bluetooth 4.2 BLE
無線 LAN	IEEE802.11b/g/b/ac
OS	Raspbian Buster

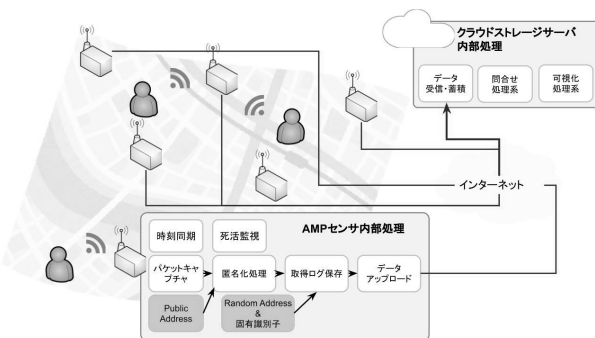


図 7 Bluetooth と BLE を付与した AMP センサ

Fig. 7 Hybrid AMP sensor with Bluetooth and BLE capturing functionality

の Advertising Packet を取得するデバイスが、このアルゴリズムにより、Advertising Address が、Random Address であっても、Payload データのユニークな ID 値を確認することで、BLE デバイスを同一のものだと把握することができる。

図 6 のように、Payload データのユニークな ID と Advertising Address の更新タイミングが違えば、セットで固有識別子として扱うことができる。

4. Wi-Fi と Bluetooth のハイブリットセンサ

4.1 ハードウェア仕様

ハイブリッド AMP センサを構築するにあたって、前提条件として、Probe Request を取得でき、Bluetooth のスキャン、BLE の Advertising Packet の取得ができる必要がある。そこで、今回は安価に構築できる端末として、表 1 のような端末を用いた。

4.2 クラウドストレージサーバ拡張

クラウドストレージサーバ側で、前述したアドレスキャリーオーバーアルゴリズムを利用し、BLE を追跡可能にする機能拡張を行った。AMP センサ側で観測対象とする

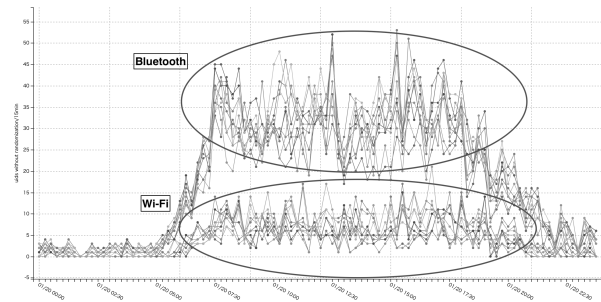


図 8 固有識別子数

Fig. 8 Number of unique id

無線通信技術の種類を増やしたが、アップロード時のデータフォーマットやサーバ側のデータベースのスキーマについては基本的に Wi-Fi パケットセンシングに利用していたしくみとの互換性を維持している。しかしながらデータベースに格納するデータについて個人情報保護の観点から対応に相違点が発生している。オプトアウト処理の際に Wi-Fi・Bluetooth から取得したデータについては AMAC アドレスをキーに削除可能であるが、BLE から取得した固有 ID については削除が困難である。しかし、BLE デバイスの Random Address と Payload のユニークな ID は更新され続けるので、個人を特定することは実質的には難しい。

4.3 解析手法

我々は、収集・蓄積したデータは様々な方法で、可視化を行っている。

開発したハイブリッドセンサを、自動車専用道路上に数カ所設置し、取得したデータを可視化したものが、図 8 である。この場所は、付近に歩道はなく、車両データが取りやすい場所である。図 8 での横軸は時間、縦軸は 15 分毎に取得した固有識別数を表しており、上の丸で囲っている部分が Bluetooth のセンサから取得したデータであり、下の丸で囲っている部分が Wi-Fi のセンサから取得したデータである。Bluetooth で取得したデータが多く、自動車の流動・滞留のデータを見るのであれば、Bluetooth のデータを活用したほうが優位性は高い。

その他の可視化例としては、移動体の地点間の流動量を帯の太さで表現する弦グラフ (図 10)、サンキー図をベースに POI (Point of Interest) を起点とした前後 2 段階の流動量を表現した前後地点間流動図 (図 11)、AMP センサで取得したデータから算出した移動体の速度 (最高値、最頻値、平均値) をグラフ化した表現 (図 12) などがある。

5. 課題

文献 [3] は、元々セキュリティの注意喚起を行っている論文であり、デバイスメーカー側がアドレスキャリーオーバーアルゴリズムによる BLE 追跡は修正される可能性がある。



図 9 地点間の 3 次元表現

Fig. 9 3D representation for the flow between sensors

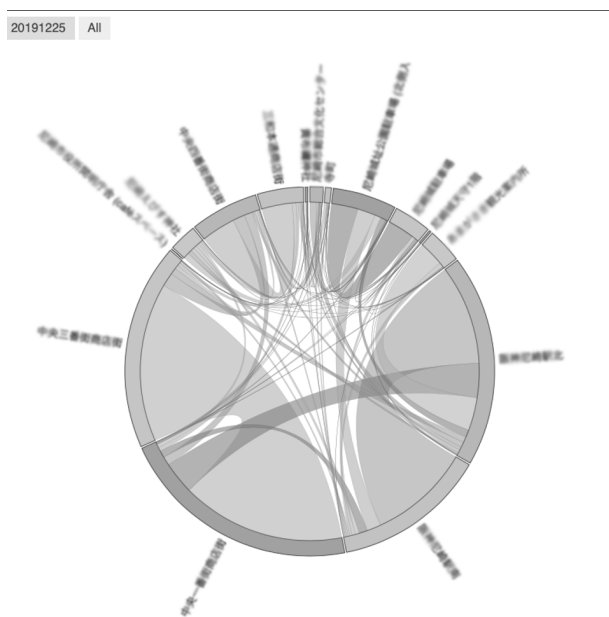


図 10 地点間移動の弦フラグ表現

Fig. 10 Chord diagram representation for the flow between sensors

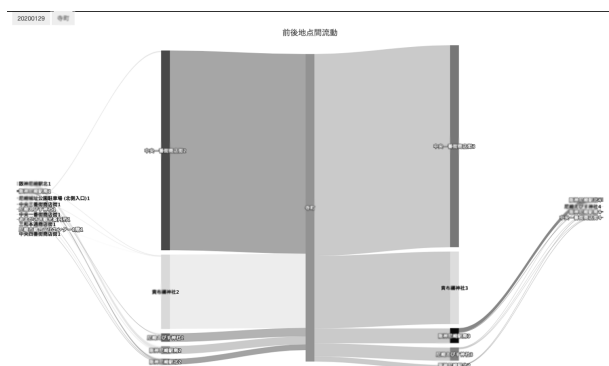


図 11 前後地点間流動

Fig. 11 Flow between sensors up to two points forward and backward

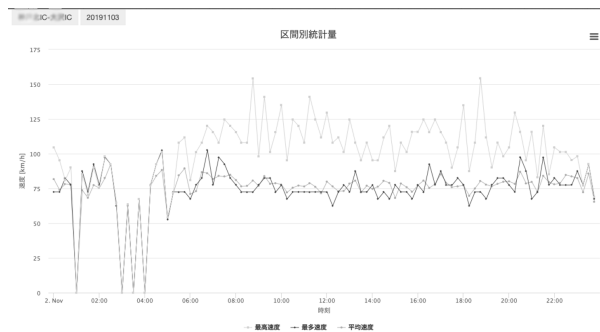


図 12 地点間の速度

Fig. 12 Line chart representation for the velocity over time

自動車と人の統合分析を行うために、Wi-Fi から取得した AMAC アドレスと BLE から取得した固有識別子をどのように紐付けるかが課題になる。例えば、同一 Hybrid AMP センサが AMAC アドレスと固有識別子を時間的に連続して取得した際に、両者を紐付けて流動・滞留のデータとして扱うアプローチが考えられる。その場合、どの程度連続して取得できたら紐付けられるのか検証する必要がある。

可視化表現については、移動体が人もしくは、自動車なのかを視覚的に判別できるのが望ましい。現時点での可視化表現の場合、速度でしか自動車か人なのかは、判別することができない。更に、渋滞時のデータでは判別することも難しくなる。移動体の属性を考慮した可視化表現についても検討する必要がある。

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 アドレスを収集する AMP センサを元に、Bluetooth をスキャンしたデータと BLE の Advertising Packet に含まれているアドレスからランダムアドレス、パブリックアドレスの値を収集する部分を追加し、Wi-Fi からのデータと Bluetooth からのデータから固有 ID を収集するハイブリッドセンサを開発した。今後は車と人の両方を流動・滞留のデータの連携、有用性を確認する予定である。

参考文献

- [1] JEITA 統計資料：2019 年民生用電子機器国内出荷統計，入手先 (https://www.jeita.or.jp/japanese/stat/shipment/2019/index2.htm), (2020.01.27).
- [2] 総務省：第 1 部 特集 ICT がもたらす世界規模でのパラダイムシフト，入手先 (https://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/h26/html/nc141320.html), (2020.01.27).
- [3] Johannes K Becker, David Li, and David Starobinski: *Tracking Anonymized Bluetooth Devices*, Sciencdo Proceedings on Privacy Enhancing Technologies ; 2019 (3) :50-65.

- [4] 森本哲郎, 白浜勝太, 上善恒雄: Wi-Fi パケットセンサを用いた人流・交通流解析の手法, 情報科学技術フォーラム公演論文集 (2015).
- [5] 望月祐洋, 上善恒雄, 西田純二, 中野秀男, 西尾信彦: 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, UBI (2014).
- [6] 北澤俊彦, 塩見康博, 田名部淳, 菅芳樹, 萩原武司: Bluetooth 通信を用いた旅行時間計測に関する基礎的分析, 土木学会論文集 (土木計画学), Vol.70, No.5(土木計画学研究・論文集第 31 巻), I.501-I.508, 2014.
- [7] 西内裕晶, 塩見康博, 倉内慎也, 吉井稔雄, 菅芳樹: 移動体データ取得のための Bluetooth MAC アドレス検知の指向性に関する基礎分析, 土木学会論文集 F3(土木情報学), Vol.71, No.2, I.40-I.46, 2015.
- [8] 坪田隆弘, 吉井稔雄, 白柳洋俊, 藤井浩史: Bluetooth 検知技術を活用した交通量推定, 土木学会論文集 D3(土木計画学), Vol.74, No.5 (土木計画学研究・論文集第 35 巻), I.1283-I.1289, 2018.
- [9] 浦野健太, 廣井慧, 梶克彦, 河口信夫: 配置型 BLE タグとタンデムスキャナを用いた屋内位置推定手法, 情報処理学会論文誌 (2019).
- [10] Bluetooth: BLUETOOTH SPECIFICATION Version 4.2(online), 入手先 (<https://www.bluetooth.com/ja-jp/>), (2020.01.27).