

Wi-Fi パケットセンサを用いた人流・交通流解析の手法

Method of pedestrian and traffic flow analysis using Wi-Fi packet sensor

森本 哲郎† 白浜 勝太† 上善 恒雄†

Tetsuro Morimoto Shota Shirahama Tsuneo Jozen

1 はじめに

災害時、変動する人の動き捉え、適切に誘導を行い、1人でも多くの命を救うための情報技術は、社会の重要な基盤であり、現代の ICT 社会が直面した東日本大震災で、我々は防災に対する重要性を再認識した。ゼンリンデータコムの GPS データを用いた混雑統計[1]や Twitter の位置情報付きツイート[2]から人々の行動が解析され、災害時の人々の動きを知る手がかりとなった。

災害時のみならず、人流・交通流を把握することは、マーケティング・防災計画・都市計画において重要な要素である。現在、人流計測に用いられるデバイスには、固定カメラや GPS 搭載のスマートフォン、高速道路に設置された ETC 等がある。しかし、人流計測において、建物内のフロアといった小さな領域から都市空間の様な大きな領域全体をカバーすることは容易ではない。さらに、公共空間で人流を計測する場合、パーソナルデータの取り扱いが問題となったケースも報告されており、収集したデータの匿名化が重要である。

我々は、Wi-Fi 搭載機器が発信する管理パケットをセンシングし、蓄積・解析することによって人々の移動を推定する手法を用いて、人流・交通流計測の研究を行ってきた。本論文では、Wi-Fi の管理パケットを取得するセンサデバイスを用いて実施した人流・交通流計測での解析と可視化手法について報告する。

2 Wi-Fi パケットセンサ

Wi-Fi 通信の標準規格 IEEE802.11[3]で定義された Probe Request フレームは、アクセスポイントをアクティブスキャンするためのフレームである。IEEE802.11 の管理フレームには送信元の MAC アドレスが含まれており、Monitor mode インターフェイスを実装する Wi-Fi アンテナでは、管理フレームを受信することができる。Wi-Fi 機能搭載のスマートフォン等はアクセスポイントとの接続に関わらず Probe Request を送信しているが、スマートフォン等が送信する Probe Request の送信間隔は、製品によって異なり、また、一回に送信する Probe Request の個数は登録した SSID の個数によってことなる。また、パケットの受信強度は、Wi-Fi アンテナに依存する。

我々は、Probe Request を受信し、受信したパケットに含まれる MAC アドレスを一方方向ハッシュ関数を用いて匿名化処理を施し、プライバシーに配慮しながら人流をセン

シングするセンサデバイスを開発した。このセンサデバイスを AMP センサ (Anonymous MAC address Probe センサ) と呼ぶ。AMP センサは、コモディティハードウェアで構築できるため、兼価な小型 PC、SIM カード、SIM フリーのモバイルルーターを用いて低コストに AMP センサを作成することができる。この仕様であれば Probe Request の受信と同時に、インターネット通信で取得データの送信ができ、簡単に人や車の移動をセンシング出来るようになる。屋外設置対応のぶらっとホーム社の OpenBlocksA7 ベースとした AMP センサの構成を図 1 に示す。

プログラマブルに Wi-Fi パケットを受信するには、libpcap や libtins 等のパケットスニフライブラリを用いてパケットを受信する。受信したパケットに含まれる MAC アドレスは、プログラム内で即座にハッシュ関数 SHA-1 を用いてハッシュ化する。AMP センサが Probe Request を受信し、MAC アドレスを匿名化した後、保存するデータは表 1 の通りである。AMP センサから集約したデータを、時系列解析することによって、人々の移動を得ることができる。

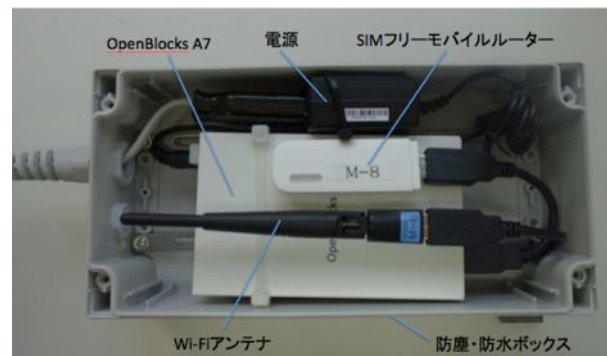


図 1 OpenBlocksA7 ベースの AMP センサの構成

表 1 AMP センサのログデータフィールド

フィールド	備考
ts:タイムスタンプ	Probe Request の取得時間
id:AMP センサ ID	AMP センサ ID
AMAC:Anonymous MAC address	ハッシュした MAC アドレス
seq: シーケンス番号	パケットの通し番号
OUI	製品ベンダ番号
RSSI	電波強度
SSID	アクセスポイントの識別子

† 大阪電気通信大学大学院, OECU

3 プライバシ保護と匿名化

MAC アドレスは、機器に固有の ID であり個人の特に直接、結びつくものではないが、MAC アドレスを含むデータを解析し、移動パターンを発見することで、SNS 上の特定人物を推定することが不可能ではないため、MAC アドレスの取り扱いが適切でない場合は、プライバシー侵害に当たる恐れがある。

AMP センサでは、スマートフォン等に含まれるアカウント情報やスケジュール等のパーソナルデータは一切、取得することはない。また、Probe Request フレームのヘッダ一部しか参照しないため、ペイロードに含まれるデータを記録することもない。AMP センサでは、受信したパケットに含まれる MAC アドレスを即座に、Salt 付き SHA-1 を用いてハッシュ化しており、MAC アドレスをそのまま保存することはない。また、取得したデータは、SSL/TLS 通信によってサーバに送信する。

後述する商業施設での人流計測実験では、事前にウェブ上で実験内容を公開し、問い合わせ窓口を用意し、特定の MAC アドレスを含むデータの削除が行える仕組みを用意し、個人情報保護に留意した。

4 関連研究

Musa ら[4]は、Probe Request を用いたトラッキング手法で、ビタビ・アルゴリズムを用いた移動経路推定を提案している。また、認知度の高い公衆無線 LAN の SSID や、Probe Request に含まれる SSID、RTS(Request to Send) インジェクションを用いて、パケット取得数を高め移動経路推定の精度の向上を試みている。

我々は、商業施設や高速道路等の実空間において、公共空間において、ある程度の連続した期間の計測を行い、防災や道路・交通制御に役立てるための研究を行っている。

入間川ら[5]は、可搬型の Probe Request ログを被験者に日常的に携帯させ Probe Request を集取する実験を行った。収集したデータとデジタルカメラで撮影された日付をもとに社会的関係性の分類を行った。しかし、これらの研究では収集した MAC アドレスは匿名化されておらず、あえてプライバシーに関わるデータに踏み込んでいる。

我々の研究は、公共での利用のみを目的としているため、プライバシーに配慮し匿名化したデータを用いて人流・交通流を解析している。

田名部ら[6]は、国内の高速道路を対象として Bluetooth を用いた交通流計測を行った。データ解析には、2 点間での MAC アドレスのマッチング処理と、マッチングした結果のクレンジング処理から成る。クレンジング処理では、並走する一般道を走行する車両のデータを除去するもので、所要時間を一定の閾値で除去している。

国内の Bluetooth 規格では通信距離は数メートルから十数メートル程度であり、Wi-Fi を用いた場合より取得件数が少なくなる。このため我々は自動車交通を計測対象とする場合には Wi-Fi を用いた方が適していると考えている。

我々は、今日までに、Probe Request の基本特性および AMP センサの基本性能評価[7][8]、グランフロント大阪ナ

レッジキャピタル内の The Lab、大阪電気通信大学四條畷キャンパスでの基礎実験[9][10]、一般道・高速道路での事前実験[11]を行い AMP センサを用いた人流・交通流解析を行ってきた。本研究では、様々な実空間において長期間の人流・交通流を計測する手法と、蓄積したデータの解析と可視化手法を確立することを目的としている。

5 人流計測の実証実験

商業施設内の流動・滞留を把握し、防災計画・都市計画・商業活性化・交通計画などの多方面で活用可能な匿名人流解析を目的とし、2014 年 11 月 10 日から 2015 年 1 月 13 日まで、商業施設のグランフロント大阪において、AMP センサを 20 台設置し、人流計測を実施した。なお、実験を行うにあたっては、施設管理者の許可を受けた上で実験を開始した。グランフロント大阪の南館・北館の地下 1F から 6F の各所に設置されているデジタルサイネージ筐体内部に、AMP センサを配置し、計測を行った。設置箇所は、グランフロント大阪のフロアマップ[12]上で、図 2 に示す通りである。

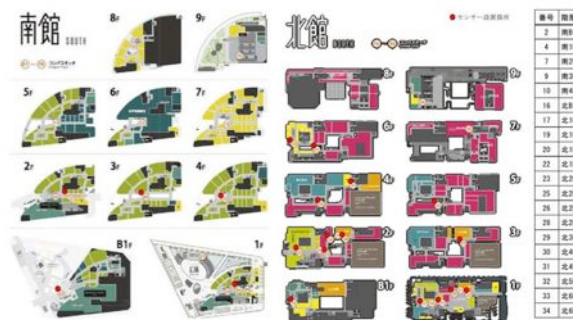


図 2 フロアマップと設置場所

5.1 実験内容の告知

事前に、実験内容について以下の 6 項目をウェブ上で告知した[13]。

(1) 実験の内容

スマートフォン等から 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としている。

(2) 実施する場所と期間

グランフロント大阪・北館および南館で、2014 年 11 月 10 日（月）から 2015 年 1 月 13 日（火）まで計測を実施する。

(3) 実験方法と取得するデータ、及びその取扱い

北館・南館のデジタルサイネージに設置した AMP センサを通して、スマートフォンが定期的に出す管理パケット（Probe Request フレーム）を収集する。管理パケットに含まれる端末識別情報を、端末が特定できない識別情報に変換（MAC アドレスを不可逆関数でハッシュ化）

し記録する。通信内容を傍受するものではない。

(4) 個人情報取得しないこと

管理パケットには、名前やメールアドレスなどの個人情報は一切含まれておらず、記録されたデータでは端末や個人を特定することはできない。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。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。

(5) 観測を望まれない場合

Wi-Fi パケットを自動的に観測するが、観測されることを望まれない方は、スマートフォンの Wi-Fi 機能をオフにすることで観測されなくなる。

(6) 問い合わせ先

以上の内容を公開し、さらに、不必要にデータを取得した際には、個別にデータを削除する体制をとった。しかし、この実験期間中に個人情報に関する問い合わせは寄せられなかった。

5.2 人流解析の手法

AMP センサから集約されるデータは、基本的に、AMP センサ ID, AMAC アドレス, タイムスタンプ, RSSI, シーケンス番号を一組とするデータ列であり、解析では AMAC アドレス別に AMP センサ間の移動を抽出するマッチング処理を行うことが必要である。AMAC アドレスのマッチング処理により抽出した移動履歴をもとに、2 地点の移動量, 平均速度, 平均所要時間等を算定することが可能になる。

基本的な移動の抽出は、次の条件で定義される。AMP センサによって記録された 2 つの記録 P_i, P_j について、全ての記録の集合を \mathbf{R} とすると、

- (1) $(P_i, \text{AMAC}) = (P_j, \text{AMAC})$
- (2) $(P_i, \text{id}) \neq (P_j, \text{id})$
- (3) $(P_i, \text{ts}) < (P_j, \text{ts})$ かつ $(P_j, \text{ts} - P_i, \text{ts})$ が最小となる $P_j \in \mathbf{R}$ が P_i の次の移動先と判定する。

ただし、複数の AMP センサで同一の Probe Request (同一の seq を持つ記録) が記録されている場合がある。この問題に対し、次の条件を満たすことで移動を補正する。

- (4) (3)において、 $|P_j, \text{ts} - P_i, \text{ts}|$ が極端に小さいものは一定の閾値を用いて排除し、移動したとみなさない。
- (5) P_i の候補が複数の場合は RSSI の値が大きい記録を優先する。

5.3 人流の可視化

抽出した人流データを可視化することは、来訪者の移動経路や店舗別の来訪頻度等を把握することができる有用な方法である。商業施設では、施設管理やマーケティング等の多方面で活用することができる。

我々は、イラストマップ上で人の移動を再現するウェブベースの可視化システムを構築した。ウェブブラウザ側では、描画処理に特化した Processing.js を使用しており、サーバ側では、Node.js を使用している。また、通

信には WebSocket の汎用ライブラリである Socket.IO を使用したシステム構成である。図 3 は、解析した移動履歴をフロアマップ上で再現したもので、人の移動と分布を時間変化で可視化したものである。フロアマップ上に人を三角形のアイコンで表示し、AMP センサ間の移動を表している。同時に、フロアを格子状に分割したエリア内に何人の人がいるかを、格子の色で分類するヒートマップを表示している。分割したエリア内の人数が、2 人以下は透明で、3 人以上は黄色、5 人以上は橙色、7 人以上は赤色でエリアを色分けする。人の移動と分布を可視化することによって、施設の利用状況を把握することが出来る。さらに、WebSocket を用いて、サーバサイドのウェブアプリケーションから、複数のウェブブラウザに解析後のデータを配信することによって、他フロアと同期した人流を同時に閲覧することができる。図 4 は、4 台のタブレットを連動させ、複数のフロア上での人の移動を効率的に閲覧しやすくした可視化手法である。

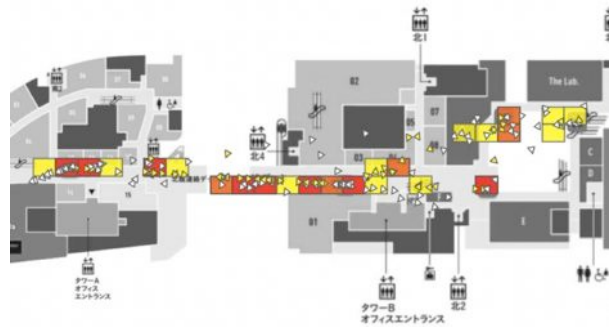


図 3 人流の可視化



図 4 複数のタブレットを用いた表示

また、AMP センサ間の人の移動量を把握することも施設管理上、重要な要素である。商業施設の様には、人が自由に移動することができ、経路間に制約がなく、観測点が 3 つ以上ある場合、各観測点を頂点とするグラフと考えると、サイクルと弦で構成される弦グラフを描くことができる。ウェブブラウザ用の可視化ライブラリである D3.js

の弦グラフ描画機能を用いて、観測点間の移動量を集計した結果を図化した。図 5 は、AMP センサ ID を、サイクルを構成する頂点として、各 AMP センサ間の移動量を重みとする弦で表している。例えば、A 地点から B 地点への移動量と、B 地点から A 地点への移動量は、頂点 A から頂点 B の弦と、頂点 B から頂点 A の弦で表すことができる。D3.js では、弦の重みを表す移動量は、弦の幅で表現される。今回、頂点 A 側での弦の幅は地点 B から地点 A への移動量で表示し、頂点 B 側での弦の幅は地点 A から地点 B の移動量を表示した。つまり、図 5 は他の AMP センサからの移動量を表すグラフである。

弦グラフを用いることで視覚的に移動量を捉えることはできるが、表での集計と同じように地理的關係を視覚的に捉えることは難しい。そこで、D3.js の弦グラフの絞り込み機能と連動して、AMP センサ間に線を描画する機能を追加した。弦グラフのサイクル上にマウスを移動させた時に、図 6 に示す通り AMP センサ間を線で結び、その線の幅を移動量に比例して増減させることで、フロアマップ上での關係を補足するものである。

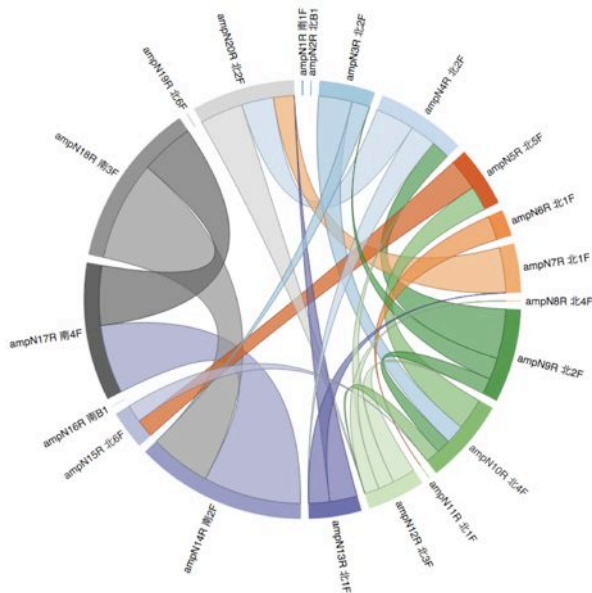


図 5 AMP センサ間の移動量を表す弦グラフ

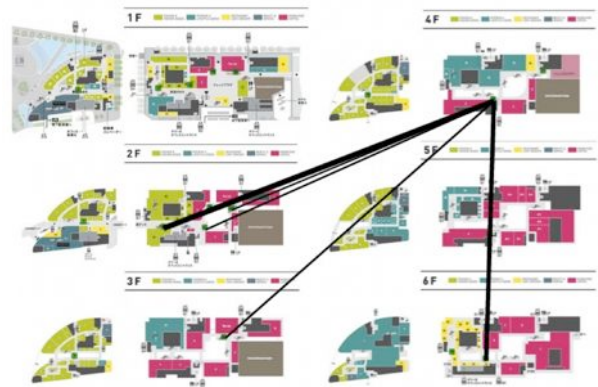


図 6 弦グラフの地理的關係をフロアマップ上で表示

6 交通流解析の手法

高速道路では、道路管理者が交通情報を管理・提供するために車両感知器や定点カメラ、ETC 等のデータをもとに、通過台数や通過速度を算出している。しかしながら、特定の車両をトレースすることは難しく、ETC 車載器に割り振られる一意の識別子を用いても、どのインターチェンジで流入出が起きたか把握することはできるが、分岐や経路等があった場合を区別することは困難である。この問題に対し、AMP センサでは、インターチェンジや分岐点、サービスエリア、パーキングエリアに設置することによって、車両をトレースする精度が向上し、移動にかかった所要時間、平均速度、サービスエリア内での滞在時間、滞在者数の推定を行うことが可能である。

高速道路管理者の協力のもと、高速道路の 10 箇所(表 2, 図 7)に AMP センサを設置し、2015 年 1 月に 10 日間程度、AMP センサを用いた計測を実施した。道路管理者の運営方針や AMP センサの設置条件等の影響で各設置箇所において、データの取得率が一定ではなかった。このため、取得率の高い区間を選定し解析処理を行った。解析手法は、人流解析と同様の手法を用いた。プライバシー対策については、5 章と同様に道路管理者により告知を行った。

W8-W7 区間の速度分布を図 8 に示す。実験期間中に W8-W7 区間で渋滞は発生することはなかったが、解析後の速度分布では時速 20km/h 以下の外れ値が発生する結果となっている。外れ値が発生する原因は、2 地点の間にあるインターチェンジから流出し再び流入するケースと、高速道路と隣接する一般道を走行する車両からのパケットを取得するケースがある。

表 2 AMP センサの設置箇所

ID	道路名称	地点名称
W1	名阪国道	福住 IC
W2	名阪国道	天理東 IC
W3	名阪国道	天理 IC
W4	西名阪自動車道	天理 TB
W5	西名阪自動車道	天理 TB
W6	西名阪自動車道	柏原 TB
W7	南阪奈道路	太子 TB
W8	南阪奈道路	たじはや TB
W9	第二阪奈	小瀬 TB
W10	阪神高速・東大阪線	長田 TB



図 7 AMP センサの設置箇所

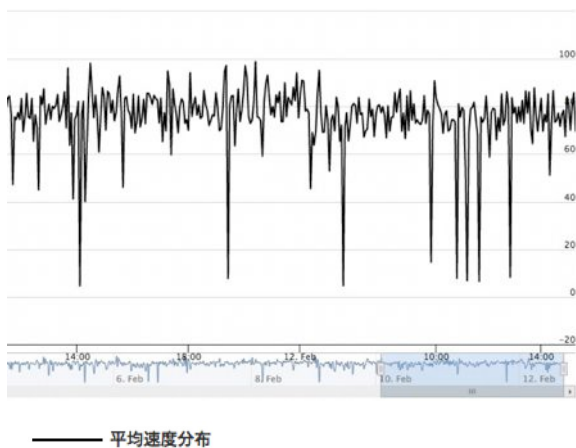


図 8 W8-W7 区間の平均速度分布

6.1 外れ値検定

一般的に、外れ値検定には、スミルノフ・グラブス検定やトンプソン検定等が有効であるとされている。

まず最も単純な手法として、一定の閾値による外れ値の排除を行った。外れ値の値が正常なデータ列の平均速度と時速 60km/h 以上と大きく差があるため、時速 20km/h を閾値として排除した(図 9)。この結果から、一見外れ値を排除することが出来ているが、時速 20km/h 以上の外れ値は排除出来ない点と、とある単位時間あたりの正常値の平均速度が時速 20km/h 以下の状況下であれば閾値が不要になる点が残る。

次に、標準偏差モデルを用いた IQR(interquartile range)フィルタを適応することによって、標準偏差以外の値を除去する方法を試みた。IQR フィルタを適応した結果を図 10 に示す。この結果から、低速と高速の速度帯域で大きく外れた値を排除できているが、時速 100km/h 前後の速度帯域は実際に走行しているデータである可能性が高いと考えられるため、IQR アルゴリズムの上限の閾値を評価しないフィルタを適応した。この改良 IQR フィルタを適応することによって、単位時間あたりの区間平均速度の精度が向上する結果が得られた(図 11)。なお、明白なことではあるが、外れ値検定にはサンプル数が関係しており、夜間等、サンプル数が極端に少ない場合は、外れ値を検出することはできない結果となった。

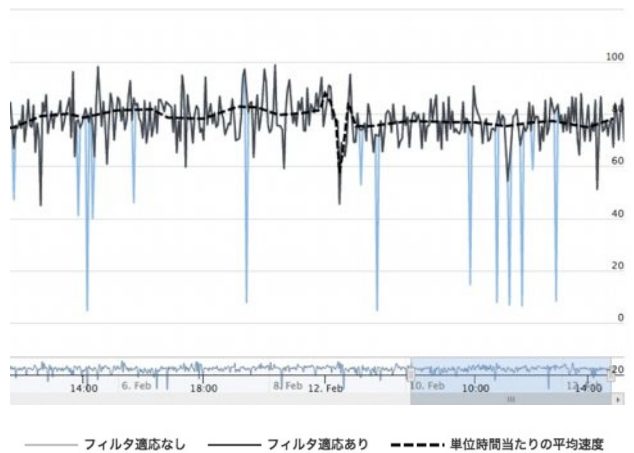


図 9 一定の閾値を用いて外れ値を除去した速度分布

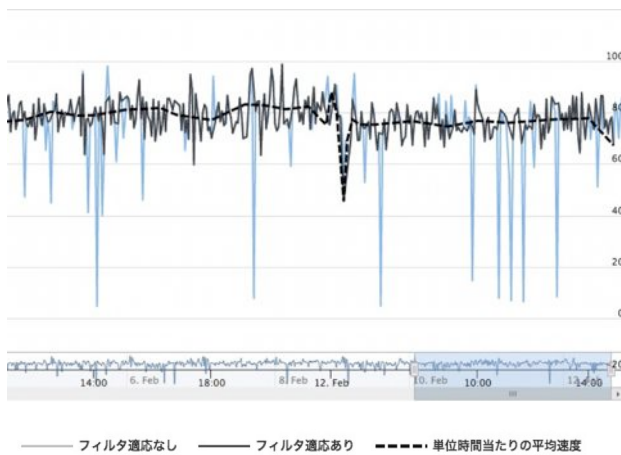


図 10 IQR(interquartile range)フィルタを適応した速度分布

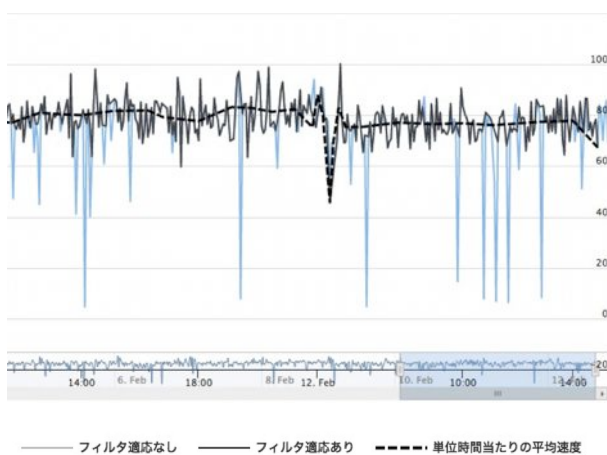


図 11 改良 IQR フィルタを適応した速度分布

6.2 交通の可視化

車両の移動を地図上で再現する場合、抽出したデータは 2 点間で平均化されているため、GPS ロガーやドライブレコーダーで記録した場合と走行位置・走行速度に差が生じるが、車両の流動を捉えることは交通計画上、重要な要素となる。改良した IQR フィルタを用いて抽出した移動データを可視化するツールを Google マップを用いて作成した。Google Maps JavaScript API(バージョン 3)のポリラインはアイコンを付帯させる機能があり、車両をアイコンとして描画することができる。ポリライン上の移動処理には、2 点間の距離 d 、所要時間 t 、描画更新間隔 f から描画更新間隔あたりの移動量 $m(=d/t*f)$ をポリラインのオフセットとすることでアイコンを移動させることができる。アイコンの色を、時速 60km/h 以下を黒、60km/h~100km/h を青、100km/h 以上を赤で色分けし、速度変化を分類した(図 12)。

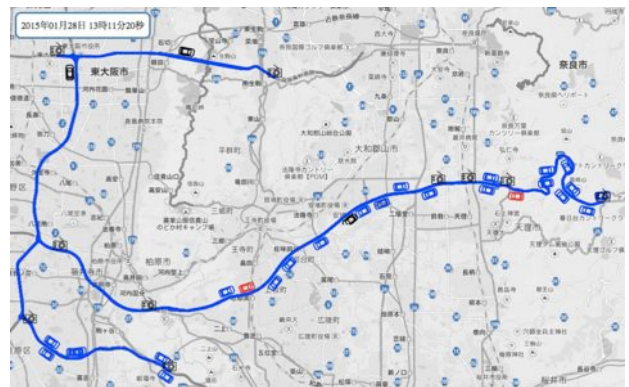


図 12 デジタル地図上での車両の移動の可視化

7 考察

AMP センサの設置条件・道路の構造により、外れ値が発生することが分かった。この外れ値に対して、上限を評価しない IQR フィルタを用いて、区間平均速度の算定において、有効であることを示した。また、外れ値と RSSI の関係を調査したが、この 2 つの要素に関連性は発見できなかった。

設置箇所の条件、管理パケットの受信ゲインの改善を行い再度、同様の計測実験を行い、評価の比較を行う予定である。さらに、AMP センサを用いた人流・交通解析の精度向上のために、今後、様々なフィールドで実験を行っていく必要がある。

8 まとめ

スマートフォン等の Wi-Fi 通信機器は、常時、アクセスポイントをスキャンするための管理パケット、Probe Request を発信している。この Probe Request に含まれる固有 ID、MAC アドレスと一方向ハッシュ関数を用いて匿名化した後、解析処理を行うことで、匿名な人流解析が可能である。本論文では、この手法を用いて、商業施設と高速道路で実施した計測について解析と可視化を中心に報告した。商業施設においては、基本的な解析方法を述べ、高速道路においては外れ値のフィルタリングについて述べた。また、解析後のデータを分析するための可視化ツールを開発し、人流・交通流を捉えるための可視化手法を報告した。

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ました。実験にご協力いただいたグランフロント大阪 TMO の皆様、西日本高速道路株式会社の松下剛氏に感謝いたします。

参考文献

センサー研究開発チーム/709201085828098, 2015
年 4 月現在

- [1] Ryugo S. Hayano, Ryutaro Adachi, Estimation of the total population moving into and out of the 20 km evacuation zone during the Fukushima NPP accident as calculated using "Auto-GPS" mobile phone data, Proc. Jpn. Acad., Ser. B 89 (2013) 196.
- [2] 岸浩稔 中西航, 位置情報付き tweet による被害状況の逐次把握可能性の検討, 生産研究, Vol. 65, No. 4, pp.179-182, 2013.
- [3] Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications, IEEE 802.11TM-2012
- [4] A. B. M. Musa, Jakob Eriksson, Tracking Unmodified Smartphones Using Wi-Fi Monitors, SenSys2012 Proceedings of the 10th ACM Conference on Embedded Network Sensor Systems, 2012.
- [5] 入間川穂高 河野恭之, 無線 LAN 探索時における検出履歴と写真撮影履歴を用いた社会的関係性の分類, 情報処理学会研究報告. HCI, ヒューマンコンピュータインタラクション研究会報告 2015-HCI-162(15), 1-7, 2015-03-06
- [6] 田名部淳 割田博 松下剛 萩原武司, 高速道路における Bluetooth を用いた交通流計測の取り組み, 第 49 回土木計画学研究発表会(春大会) CD-ROM, 2014/6/8
- [7] 三神山駿 森本哲郎 白濱将太 上善恒雄, ProbeRequet を利用した人流解析システム, 第 12 回情報科学フォーラム(FIT2013)講演論文集, M-010, 2013.
- [8] 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, 情報処理学会研究報告. MBL, モバイルコンピューティングとユビキタス通信研究会研究報告 2014-MBL-70(45), 1-8, 2014-03-07
- [9] 望月祐洋 鬼倉隆志 福崎雄生 西尾信彦, Wi-Fi パケット人流解析システムの実環境への適用, マルチメディア、分散協調とモバイルシンポジウム 2014 論文集, 1249 - 1257, 2014-07-02
- [10] 上善恒雄・三神山駿・辻本悠佑・望月祐洋・西尾信彦・西田純二, 交通流動センシングのための Wi-Fi パケットセンサの開発と性能実験, 土木学会第 49 回土木計画学研究発表会春大会, No. 49(CDROM), 2014 年 6 月
- [11] 西田純二・足立智之・牧村和彦・森本哲郎・上善恒雄, Wi-Fi パケットセンサーによる交通流動解析, 土木学会第 49 回土木計画学研究発表会春大会, No. 49(CDROM), 2014 年 6 月
- [12] グランフロント大阪フロアマップ, <http://www.gfo-sc.jp/floorguide/>, 2015 年 4 月現在
- [13] Wi-fi パケットセンサー研究開発チーム, 「うめきた」における Wi-Fi パケット・アノニマス人流解析システムの研究開発の実証実験, [https://www.facebook.com/pages/Wi-fi パケット](https://www.facebook.com/pages/Wi-fi%20パケット)