

平成 28 年 6 月 6 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25289162

研究課題名(和文) すれちがい通信を利用したリアルタイムな人々の流れ推定技術の開発と実証的検証

研究課題名(英文) A development of Real-time estimation of People Flow using opportunistic communication

研究代表者

薄井 智貴 (USUI, TOMOTAKA)

名古屋大学・経済学研究科(研究院)・准教授

研究者番号：20549448

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、BLE通信を用いた新しい行動調査手法を提案することを目的としており、BLEセンサと計測アプリの開発、および学内での小規模実験と観光地での300人規模の実証実験を実施した。GPS調査における回遊行動との代替性把握のため、GPSとBLEデータを用いて、カーネル密度法と時空間パスによる回遊行動分析および調査コストについて比較分析を行った。分析の結果、両調査とも同様の回遊行動の特徴を捉えることができ、代替可能性を示唆することができた。さらに、実験規模が同一であれば、被験者数が多いほど、BLE調査の方が低コストで調査を実施できる可能性が伺えた。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this research is to propose the new behavior analysis technique using the BLE communication. We developed a BLE sensor and measurement application of BLE and put a demonstration experiment of 10 persons on our campus and 300 persons in the tourist spot. For the substitutability grasp with sightseeing migration behavior in a GPS investigation, we did a comparative analysis about migration behavior by a kernel density distribution, a space-time pass and the investigation cost using the data of GPS and BLE. The results of analysis, we found that both investigations caught the similar characteristics of the migration behavior, and we could suggest that substitutability of BLE. Further, we could suggest the possibility that in the same scale of experiment, the more participant is, the lower in cost we can put a demonstration experiment.

研究分野：ITS, 地理空間情報

キーワード：Bluetooth Low Energy センサ すれちがい通信 回遊行動 GPS

1. 研究開始当初の背景

移動体を対象とした位置や流動に関する調査は、広域的には固定センサやアンケート等から、人や車の一日の移動を静的に集計した交通センサやパーソントリップ調査があり、狭域的には定点カメラやレーザー、人手による交通量調査などにより、部分的な断面通過交通量の調査を行うものがある。また、近年の ICT 技術の活用によりスマートフォン等の GPS (Global Positioning System) により個人の交通行動を詳細に記録するプローブ調査も行われている。これらの調査は、観測場所が流動的なイベント調査や、随時観測を必要とする観光地、街区レベルの流動調査には、コスト面や消費電力面、人的労力面などにおいて適応が難しく、また、人々の流れや混雑状況、屋内外シームレスな流動を把握することも困難である。

もし、狭域的な人々の個々の位置や流動が、常時かつリアルタイムに把握できれば、これまで実現が困難であった、観光地や街区、イベント会場などにおいて、混雑情報を加味した安全対策や経路案内、旅行時間の推定、観光の回遊行動や入り込み客数の把握も可能になり、それらデータを用いて情報提供効果や政策評価も期待できるであろう。ただし、実現にあたっては、位置情報把握のための新しい調査手法および機器の開発、調査機器や通信費の低コスト化、長期継続観測のための低消費電力化、調査主体の労力軽減が課題となる。また、取得した位置データの統計的処理や集計手法、データ蓄積技術、シームレスな屋内外の位置推定など、ICT を用いた様々な技術課題にも取り組む必要がある。

2. 研究の目的

本研究は、スマートフォン内蔵 GPS と近距離無線通信 Bluetooth Low Energy (BLE) を組み合わせた双方向通信技術（ここでは「すれちがい通信」と呼ぶ）を活用することで、街区や観光地、イベント会場での人々の流動や追跡調査、屋内外でのシームレスな行動調査を容易に行う技術を開発するものである。近年、観光地等の狭域での人々の行動把握の研究は、GPS を活用した位置測位による行動計測が行われているが、コスト面や消費電力面、労力面において長期観測や多数被験者の調査が難しく、特に大規模な行動調査やパネル調査等に、多くの課題があった。そこで本研究では、小型で安価な BLE 発信器を観光客に配布し、その電波を局所に配置したレシーバーにより観測することで、回遊行動を把握する方法を提案し、観光地において実証的に検証した。

3. 研究の方法

本研究は、まず、被験者の行動を観測する

ための超小型キーホルダー型 BLE 発信器を開発し、同時に、その発信器の電波を観測するためのアプリケーションを開発した。次に、それらの機器間の距離を推定するための距離推定モデルを構築した。開発した機器とアプリケーションを用いて、実観光地による 300 人規模の実証実験を実施し、観光地での回遊行動の実態を調査するとともに、GPS と BLE の取得データによる回遊行動調査代替性に関して分析を行った。本成果報告書においては、主要成果である下記の 2 点について詳しく述べる。

Bluetooth による「すれちがい通信」実現のための通信機器とアプリの開発

観光地における BLE を用いた回遊行動把握実証実験と GPS 代替可能性の検証

4. 研究成果

(1) Bluetooth による「すれちがい通信」実現のための通信機器とアプリの開発

まず、被験者の動きを観測するための発信器として、携帯性向上のための小型化、継続稼働のための超省エネ化を重視した、五百円玉サイズの超小型 BLE 発信器を開発した(図-1)。開発した発信器は、省電力 Bluetooth4.0LE の Class2 規格のもので、1Hz で Bluetooth 信号を継続して送信し続けるという、既製品にはない特徴を持っている。基盤の裏側には 3V コイン電池 1 個 (CR-2032) を搭載し、数ヶ月～1 年間信号を送り続けることが可能である。

次に、小型発信器から送信する RSSI 値を計測し、得られた値から発信器と受信機間の距離を推定するための Android アプリケーションを開発した。これにより、受信機から発信器を持つ被験者までの距離が把握できる。本アプリケーションは、Samsung 社製 GalaxyS4 用アプリケーションで、Samsung API を用いて Bluetooth4.0LE 通信を受信する。特にペアリングは行わず発信された Mac アドレスと RSSI を受信し、スマートフォン内部の SD カード領域に時刻と RSSI 値、Mac アドレスをローカル端末に記録するものである。

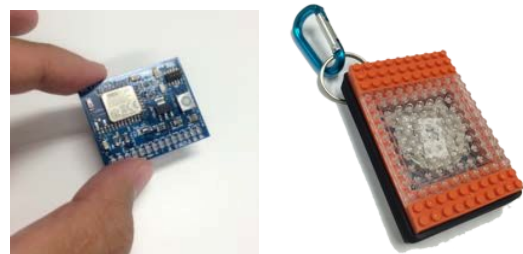


図-1 開発した小型 Bluetooth4.0LE の基板(左)と、キーホルダー型の発信機(右) 技術基準適合証明取得済み

開発した発信器と電波受信アプリケーションを用いて、端末間距離計測の可能性と推定誤差レベルを確認するための、室内計測実験を実施した。

まず、固定された小型発信器から発信する電波を、RSSI 値としてスマートフォンで取得可能かどうか検証を行うとともに、周辺電波の影響につ

いて検証を行う。実験は、様々な電波干渉や反射が想定される 10m 四方の一般的な大学内の教室を利用した室内実験と、完全な無電波環境を実現した電波暗室の2カ所において実施した。電波暗室は、部屋の広さが約 24m²で、暗室外からの電磁波を遮断し、暗室内での電磁波の反射を防ぐことが可能な部屋である。

まず、教室による室内計測実験は、部屋の中心に BLE を設置し、受信機であるスマートフォンを少しずつ遠ざけながら電波と実距離を計測した。また、電波暗室での計測実験の方法を図-2 に示す。写真のように、開発した小型発信機を部屋奥の壁手前の高さ 110cm 付近に固定し、計測アプリケーションを搭載したスマートフォンの距離を少しずつ後方へ遠ざけながら RSSI 値の計測を行った。計測距離は、端末間距離 1m までは 10cm 間隔で、1m 以上は 50cm 間隔で 100~200 点ずつ行い、2 時間かけて 2,400 点の RSSI 値を取得した。

さらに、周辺の電波干渉による RSSI 値の変化を調べるため、発信機および受信機周辺に合計 16 台の電波発生源 (Bluetooth や Wi-Fi 機器) を設置し、同様の実験を行った。ただし、データ取得間隔は 50cm に固定し、観測点は 5,314 点とした。

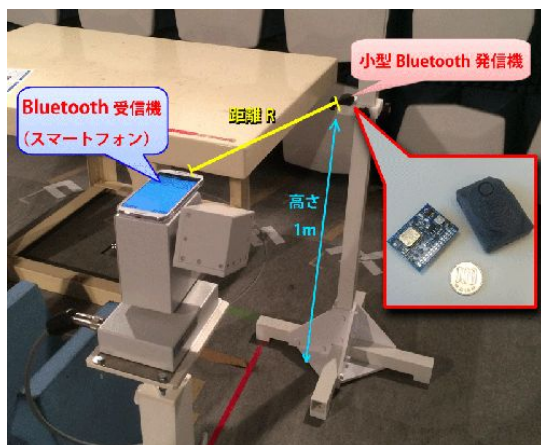


図-2 電波暗室内での距離計測実験

室内計測結果および電波暗室における計測結果を図-3、図-4 に示す。まず、図-3 は、電波暗室における測定結果と一般の教室等における測定結果を比較したものである。図を見ると、双方とも同じ距離でも分散が大きく同じ距離でも RSSI 値に幅があるため、この値だけで距離を推定することは困難なことが伺える。ただし、値は距離に比例して減衰している傾向が伺える。これは、Wi-Fi や他の通信電波と同様の電波特性であり、確率モデルを用いることである程度の距離推定の可能性を示唆している。また、電波暗室で取得した RSSI 値に比べ、教室内で測定した値はやや低い値を示しており、実空間においては何らかの電波干渉や反射の影響があるものと推測できる。

次に、電波干渉や反射の影響を調べるため、

同じ電波暗室において電波を故意に発信し、電波干渉の影響を確認した。図-4 は機器周辺に電波を発信した場合とそうでない場合の RSSI 値の比較である。双方とも同様のばらつきがあり、値に大差は見られないことがわかる。つまり、電波発生源が周辺に多数存在している場合でも、RSSI 値に大きな変化は見られず、電波干渉は起こらないことが見てとれる。以上のことから、機器自身が発生させる電波のマルチパスによる電波反射の影響で数値が乱れる可能性があることが分かった。

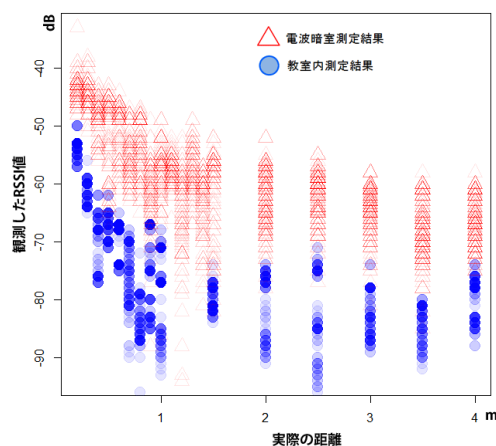


図-3 電波暗室と教室内でのRSSI値計測結果の比較

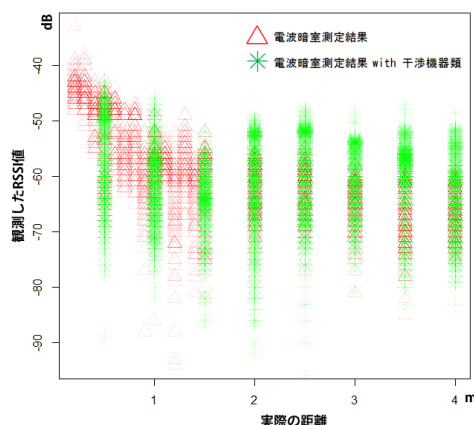


図-4 電波暗室でのRSSI値計測結果と周辺干渉機器を設置したときの計測結果比較

以上の結果を踏まえ、本研究では、教室内測定結果を用いて、RSSI 値から距離を推定するための伝搬路距離推定モデルの構築を行った。推定する統計モデルは、計測結果分布系が指数分布に近似されていることから、図-5 のような 5 つの線形・非線形回帰モデルを推定し、それぞれ RMSE (平均二乗誤差) と AIC (赤池情報量) を求めた。結果を表-1 に示す。推定結果より、最も AIC が低く、RMSE が小さいワイブル分布モデルを適用し、スマートフォンアプリに実装することとした。ワイブル分布は、装置故障など生存時間モデルや市場データの解析に多く使われる確率分布である (式 1)。

$$F(t) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^m\right] \quad \dots \text{式1}$$

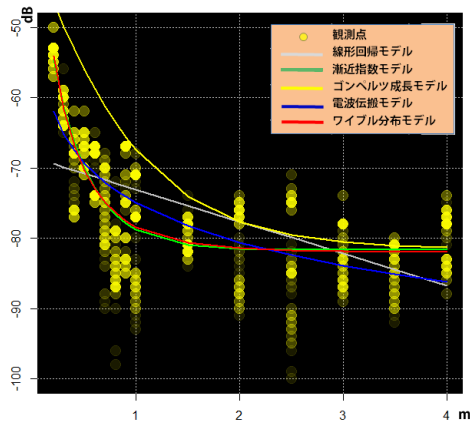


図-5 RSSIと距離の関係を示した散布図と推定回帰曲線

表-1 推定結果と観測値の誤差量とモデル評価の比較

線形 / 非線形回帰モデル	RMSE	AIC
線形モデル	10.86	11,637
漸近指数モデル	5.24	10,360
ゴンベルツ成長モデル	5.34	10,924
電波伝搬モデル	6.83	10,366
ワイブル分布モデル	5.12	10,357

前述の結果を踏まえ、距離推定モデル式を用いて端末間距離を可視化するプログラムを開発し、スマートフォンアプリケーションにて実装した。アプリケーションは、端末間距離に応じて3段階に画面が変化するもので(図-6)これにより、スマートフォンが小型端末を検出していない状態、つまり端末間距離が大きい場合は、画面上は通常と変化なく、端末を発見し距離が1m以上ある場合は画面が黄色に変化し、そして、端末間の距離が1m以内に近づけばスマートフォン画面が赤色になる(表-2)。この距離推定モデルにより、例えば、端末の距離に応じた情報提供や、周辺端末数のカウント、そのおおよその距離が把握可能になる。

表-2 距離に応じたスマホ画面の変化

条件	画面の変化
端末未検出	通常(白色)
端末検出, 距離: 1m以上	注意(黄色) 図-8
端末検出, 距離: 1m未満	警告(赤色)

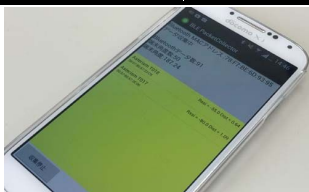


図-6 距離を色で表すアプリ実行画面(画面黄色: 1m以上の距離)

(2) 観光地におけるBLEを用いた回遊行動把握実証実験とGPS代替可能性の検証

BLEはGPSと比較して位置・経路推定精度に関しては劣るものの、低コスト、省電力といったメリットを持つ。また、GPSは複数の衛星からの電波を受信し衛星との距離を割り出すことによって位置を推定しているため、衛星電波の受信可能な屋外でのみ利用者の詳細な経路が把握できるが、その反面、衛星電波が届きにくい屋内、地下、高層ビル街などでは位置推定精度が低く、観測できない場合もある。一方、BLEは、センサと受信機の双方向通信による電波のやりとりをおこなうため、屋内などのGPSが使用できないような場所においても、受信機を設置すれば、位置情報の取得が可能になる。ただし、BLEは単独測位による情報収集・発信や位置情報取得が不可能なため、必ず電波受信機が必要になるといった問題がある。

これらを踏まえ、本研究では、交通行動把握のためのBLE活用の可能性を検証するため、小型BLEセンサと、2種類のBLE受信機(スマートフォン, 固定型BLE受信機)を用いて、小型BLEセンサを持つ観光者の位置を特定するための、300人規模の回遊行動実証実験を実施した。実験は、京都府京丹後にある観光地『食のみやこ・丹後王国』に訪れた観光客から被験者を募り、一緒に行動するグループ毎にGPS端末とBLE端末の二つをセットで持ってもらい、園内を自由に散策してもらった。2日間の実験で合計277グループに協力を頂き、GPSとBLEによる園内の行動データを取得した。この得られた2種類の行動データを比較分析し、BLEの交通行動調査利用可能性について検討した。

実験地である『食のみやこ・丹後王国』は、34haの広大な敷地を有する西日本最大級の「道の駅」であり、園内には様々な飲食店やアトラクション、宿泊施設などが存在し多くの観光客でにぎわう観光地である。実験は2015年8月22日(土)、23日(日)の2日間にかけて行った。まず、園内1カ所の出入口付近にある受付で、被験者を募り、個人属性アンケート(性別、年代、来訪人数、来訪回数、居住地、来訪目的)に回答してもらう。その後、被験者にはキーホルダー型小型BLE発信機とGPSロガーを貸出し、それらを持って、園内を自由に散策してもらった。園内には、図-7に示す12カ所に固定BLE受信機を設置し、それぞれBLEセンサの電波を受信すると、受信位置(緯度、経度)、受信時刻、筐体識別番号、電波強度(RSSI)をサーバに送信し蓄積する。そして被験者は、帰り際に、受付でBLEセンサとGPSロガーを返却し、実験終了となる。得られたデータを分析するにあたり、まず、個人属性アンケートから得られた結果を記す。被験者の居住地は「丹後王国」近隣の京都府、大阪府、兵庫県の3県で全体の86.5%を占めており、近県からの来訪者が多いことが分かる。次に、図-8にグループの人数別の回遊時間を示す。全体ではグループごとに回遊時間に大きなばらつきがあり、グループの人数と回遊時間には正の相関があることがわかる。



図-7 園の見取り図と BLE 受信機設置箇所

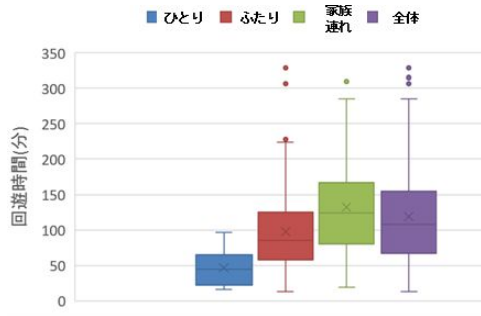


図-8 グループの人数別の回遊時間

これらを踏まえ、実証実験により得られた GPS と BLE の両データを用いて回遊行動把握のための同一手法による比較分析を行い、代替可能性について検証する。

カーネル密度分布による滞在場所の抽出

まず、滞在場所を抽出するため、取得した GPS 及び BLE の観測データについてカーネル密度を求め可視化した。図-9 はあるグループの GPS データと BLE データのカーネル密度分布図の比較である。このグループは 11 時 2 分から 13 時 52 分までのおよそ 4 時間滞在していたが、GPS データの分布図より、園内を広く探索していたことが把握できる。一方、BLE データは受信機が固定であるため長期滞在していた中心部のフードコートに分布の中心が表れており、おおよその行動範囲は把握できるものの、滞在箇所の特定が難しいことが分かる。

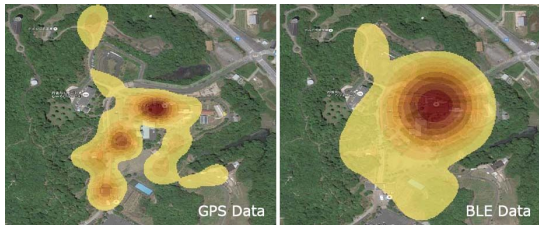


図-9 GPS と BLE データのカーネル密度分布比較

3次元時空間パスによる活動状況の把握

次に、両データには、緯度と経度と時間情報が記録されており、2次元による位置情報

に、Z 軸として時間軸を加えることで、回遊行動を 3次元にて可視化することが可能である。この可視化手法は地理情報学において時空間パスと呼ばれており、どの時間帯にどこに居たのか、滞在時間帯と場所の両方を同時に把握することができる。そこで、同一被験者の GPS と BLE データによる時空間パス図の比較を行った(図-10)。さらに、BLE データによる滞在場所と滞在時間の関係を図-11 に示す。GPS データは、詳細な歩行ルートが得られる一方で、周辺環境の影響により位置にばらつきが見られ、特に屋内のフードコート滞在時(図内①②)については位置情報が乱れていることが伺える。他方、BLE データに関しては、受信機が固定されていることもあり、位置情報のばらつきはみられず、訪問順に関する GPS 同様のパスを描いており、GPS 同様の観測データが取得されていることが分かる。ただし、受信機の設置場所によっては、観測できない箇所も出てくるため、受信機の設置箇所の選定には注意が必要である。

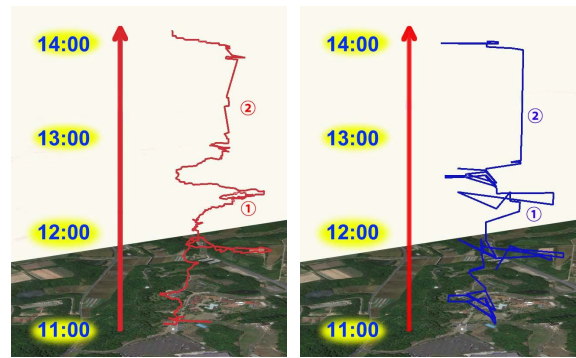


図-10 時空間パスによる位置と時間の把握 (左: GPSデータ, 右: BLEデータ)

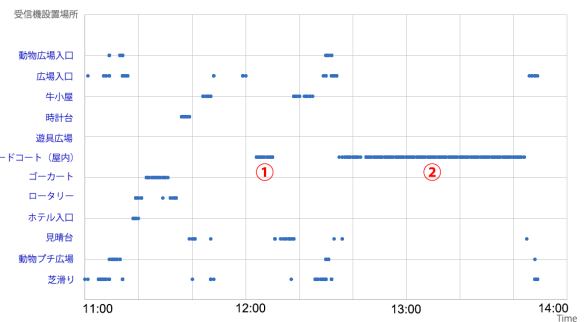


図-11 BLEデータによる滞在場所と滞在時間の関係

GPS と BLE の調査コストの比較

最後に両実験を実施するためのコストについて述べる(表-3)。GPS 調査にあたっては、通常、観測機器にオフライン型の GPS ロガーを用いる調査とオンライン型の Smart Phone などを用いる調査があり、計測場所や周辺環境、調査主体の労力などを考慮し決定される。どちらも機器の貸し出しやデータ抽出、アプリインストール、電源確保、通信費など、被験者にも一定の協力負荷がかかり、実験規模に比例してコストも肥大する。一方、BLE 調査の場合、観測機器は小型で低価格、低消費電力のため、長期観測やパネル調査に適しており、

被験者への負担が少ない。また、観測対象箇所毎に受信機を設置する必要があるが、広域かつ大人数での調査を実施する場合は、BLE 調査の方が費用も減少する(図-12)よって、調査対象箇所と調査人数、調査期間を考慮し、使い分ける必要がある。

表-3 調査手法とコスト

手法	調査コスト
GPS 調査	行動観測機器 ・ ¥10,000/台 (ロガー) ・ ¥70,000/台 (Smart Phone)
	行動観測機器 ・ ¥5,000/台 (キーホルダ型センサ) BLE 受信機 (バッテリー搭載通信機) ・ ¥50,000/台 (ソーラーパネル付)

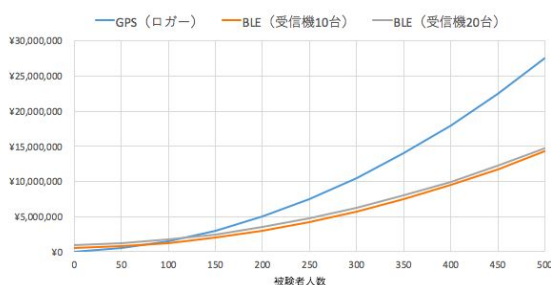


図-12 被験者数と調査コスト

(3) 研究成果のまとめ

本研究では、BLE 通信を用いた新しい行動調査手法を提案することを目的として、調査機器と観測アプリケーションの開発、実観光地における大規模実証実験を実施し、前述の通りの結果を得た。今後、実証実験により得られた観光客 277 名の行動データおよびアンケート調査データをさらに分析し、GPS と BLE データによる経路推定比較、回遊パターンの推定、滞在時間と滞在箇所の関係性、調査パッケージとしての費用対効果分析等を行い、より詳細に代替性を検証していく予定である。なお、開発した BLE 小型センサは、現在、こどもの見守りセンサとして、他の実証実験においても継続活用している。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表](計 7 件)

薄井智貴, 金杉洋: BLE センサによる行動経路の推定と行動パターンの抽出, 電子情報通信学会ヒューマンプロブ研究会, Vol.15, pp.5-8, 2016, 兵庫.

中村典雅, 薄井智貴, 山本俊行, 森川高行: BLE を活用した観光回遊行動把握の可能性に関する研究, 土木計画学研究・講演集, Vol.53 (CD-ROM), 2016, 札幌.

菅野卓也, 金杉洋, 関本義秀, 柴崎亮介: 携帯電話の基地局通信履歴を活用した

人々の通勤における鉄道路線の推定, 地理情報システム学会講演論文集 CD-ROM, Vol.24, 2015, 東京.

薄井智貴, 佐藤仁美, 森川高行: BLE センサを活用した人々の行動経路推定に関する検討 ~ 大学内を舞台とした『逃走中』ゲームを通して ~, 電子情報通信学会 HCG シンポジウム 2014, 講演論文集(CD-ROM), 2014, 下関.

薄井智貴, 金杉洋, 熊谷潤, 山本俊行, 森川高行: Bluetooth 通信を活用した移動体間距離推定に関する研究, 土木計画学研究・講演集, Vol.49 (CD-ROM), 2014, 仙台.

金杉洋, 櫻山武浩, 関本義秀, 柴崎亮介, 大規模な人々の流動データセット整備へ向けた基盤技術の検討, 地理情報システム学会講演論文集 CD-ROM, Vol.23, 2014, 愛知.

薄井智貴, 森川高行: 統計モデルを用いた Bluetooth4.0 通信間の距離推定手法に関する検討, 電子情報通信学会 HCG シンポジウム 2013, 講演論文集(CD-ROM), 2013, 松山.

[産業財産権]

出願状況 (計 0 件)

なし

取得状況 (計 0 件)

なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

薄井 智貴 (USUI, Tomotaka)

名古屋大学大学院・経済学研究科・特任准教授
研究者番号: 2 0 5 4 9 4 4 8

(2) 研究分担者

倉田 陽平 (KURATA, Youhei)

首都大学東京・都市環境科学研究科・准教授
研究者番号: 5 0 5 8 5 5 2 8

熊谷 潤 (KUMAGAI, Jun)

東京大学・空間情報科学研究センター・客員研究員

研究者番号: 9 0 5 4 8 7 0 2

佐藤 仁美 (SATO, Hitomi)

名古屋大学・未来社会創造機構・特任講師
研究者番号: 0 0 5 0 9 1 9 3

(3) 連携研究者

森川 高行 (MORIKAWA, Takayuki)

名古屋大学・未来社会創造機構・教授
研究者番号: 3 0 1 6 6 3 9 2

金杉 洋 (KANASUGI, Hiroshi)

東京大学・地球観測データ統融合連携研究機構・特任研究員

研究者番号: 0 0 5 2 6 9 0 7