

平成 30 年 5 月 7 日現在

機関番号：32621

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2017

課題番号：26730052

研究課題名(和文)ワイヤレスネットワークを活用した局所的な移動推定に関する研究

研究課題名(英文)Research on people movement estimation in narrow areas using wireless networks

研究代表者

小川 将克(Ogawa, Masakatsu)

上智大学・理工学部・准教授

研究者番号：90624411

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：移動通信システムは、移動通信端末を管理する位置登録エリアが大きいため、店舗などにおける局所的な人々の移動推定に適していない。無線LANやBluetoothなどを利用した局所的なエリアに着目し、人々の移動推定手法を提案した。人が移動したときに生じる受信強度の変動特性を利用して、列車の混雑度、部屋の入退室、待ち時間の待ち時間について高精度で推定できることを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：The location registration area managing the location of mobile terminal in the mobile communication system is wider area than the cover area of wireless LAN or Bluetooth. The mobile communication system is not applicable to estimate people movement in the narrow area such as supermarket or passenger train car. In this research, the people movement estimation methods in the narrow areas using wireless LAN or Bluetooth are proposed. Using the characteristics in received signal level variation when people move, the proposed methods achieve higher accuracy in estimating the congestion degree in passenger train car, the entering or leaving room, and the waiting time in the waiting line.

研究分野：通信・ネットワーク工学

キーワード：移動推定 混雑度推定 待ち時間 無線LAN Bluetooth

1. 研究開始当初の背景

スマートフォンの急速な普及や、移動通信網から無線 LAN へのトラフィックオフロードのために公衆無線 LAN スポットの急激な整備により、無線通信機能を備えた情報通信機器を持ち歩く環境へと移り変わる時期であった。このような状況であったために、スマートフォンを活用した新たなサービスの創出が求められており、その一例として、無線 LAN を活用した位置推定などの研究が盛んに行われていた。

移動通信網では、移動通信端末の位置登録情報を利用して、例えばイベント会場に人々が集まっていることなどについて、位置登録情報からユーザ行動を分析する取り組みがある。しかし、移動通信網の位置登録エリアよりも小さな局所的なエリアでユーザ行動を分析する仕組みが確立していなかった。

2. 研究の目的

本研究の目的は、人や人々の局所的な移動を推定することである。移動通信網の位置登録エリアよりも小さいカバーエリアの無線 LAN や Bluetooth などを対象システムとする。無線 LAN や Bluetooth を利用した従来研究として位置推定がある。本研究では、位置測位の精度を向上させることなく、人や人々の局所的な移動推定を行うことである。取り扱う移動推定は、人々の位置や移動、人々の移動に関わる混雑度である。

本研究で取り組んだテーマは、下記に示すように多岐に渡る。

- (1) スマートフォンの無線 LAN 機能、または受信強度を利用した混雑度推定
- (2) 無線 LAN アクセスポイントにおけるスマートフォンの接続情報を利用した移動追跡
- (3) 周波数の違いを利用した受信強度による混雑度推定
- (4) 非可聴音を利用した位置推定
- (5) スマートフォンからの BLE パケットの受信強度を利用した BLE 受信機による通過判定や、ユーザ行動情報を利用した待ち行列と待ち時間推定
- (6) スマートフォンからの無線 LAN フレームの受信強度特性を利用した機械学習による入退室推定
- (7) ユーザ行動を利用した BLE 送信制御

3. 研究の方法

- (1) スマートフォンの無線 LAN 機能、または受信強度を利用した混雑度推定

IEEE802.11 無線 LAN において、無線 LAN 端末は、無線 LAN アクセスポイントを検索するために、プローブリクエストフレームを送信する。このプローブリクエストフレームには、無線 LAN 端末ごとに割当てられた MAC アドレスが含まれる。閉空間における人数は、プローブリクエストを収集することで MAC アドレスの計測数により人数を推定

することができる。まず、プローブリクエストフレームの送信間隔を計測する。Apple iPhone に搭載された iOS において、スマートフォンがスリープ状態において、およそ 45% の送信間隔は 900 秒 (15 分) 未満であった。スリープ状態でも、人々がある程度の時間、閉空間に滞在すれば、人数の推定が可能と予測される。一方、電波が密集している人々を通過するとき、人体遮蔽によって電波が減衰する特性がある。(雑誌論文[5], 学会発表[14])

- (a) プローブリクエストフレームの収集により、地下鉄駅での人々の流れを推定する。電車の到着前と出発後で検出された MAC アドレスの計測数の増減率 (電車出発後の計測数/電車到着前の計測数) により、プラットホームに存在する人々の流れを推定する。増減率が小さいほど、電車到着前に比べ発車後のプラットホームに存在する人数が少ないことになり、乗車したことになる。(学会発表[13])
- (b) 地下鉄列車内の混雑度を推定する。混雑度の計測は、2.4GHz のプローブリクエストフレームの収集による MAC アドレスの計測数による方法と、車両内にアクセスポイント (AP) と、その対角線上にアクセスポイントからの 5GHz のビーコンフレームの受信強度を計測する計測器を設置し、受信強度による方法の 2 つを比較する。MAC アドレスと受信強度は、駅間で計測する。(雑誌論文[5], 学会発表[14])

- (2) 無線 LAN アクセスポイントにおけるスマートフォンの接続情報を利用した移動追跡

2 つの無線 LAN アクセスポイントがあり、端末がこれらの無線 LAN アクセスポイントのエリアを跨って移動したときに、接続中の無線 LAN アクセスポイントにより端末の追跡ができる。しかし、端末が無線 LAN アクセスポイントを切り替えるときに切断要求を送信しないことがあり、無線 LAN アクセスポイントは切断されたことを判断できないことがある。無線 LAN アクセスポイントの端末接続情報には、無通信時間を示す inactive time がある。サーバーは、2 つの無線 LAN アクセスポイントから送信される端末接続情報 (MAC アドレス, inactive time) と送信元の無線 LAN アクセスポイントの ID を管理する。MAC アドレスが重複している場合は、inactive time が小さい無線 LAN アクセスポイントからの情報のみを有効とすることで、端末の追跡を可能とする。(学会発表[9])

- (3) 周波数の違いを利用した受信強度による混雑度推定

テーマ(1)の列車内の混雑度推定では、5GHz の周波数を利用して受信強度を計測した。目視による混雑度と受信強度の相関が高い周波数について、920MHz, 2.4GHz, 5GHz の周波数を用いて調査する。(学会発表[10])

- (4) 非可聴音を利用した位置推定
電波と異なり、非可聴音は到達距離が短いため、詳細な位置を推定できると想定される。そのため、非可聴音通信の通信方式を提案する。誤り訂正とフレーム同期を用いることで送信成功率が向上し、有効性が確認された。この非可聴音通信を利用して、最も近い送信機を推定する。(雑誌論文[2], 学会発表[8][11])
- (5) スマートフォンからの BLE パケットの受信強度を利用した BLE 受信機による通過判定や、ユーザ行動情報を利用した待ち行列と待ち時間推定
送信機が受信機の間近を通過するとき、最も受信強度が高くなる性質を利用して、受信機をゲートと見なすことで、通過時間を計測できる。
(a) 2つの受信機を設置することで、2つの受信機の通過時刻差を利用することで、待ち時間推定をする。ユーザが受信機に向かう方向にスチール製のバリア壁を取り付ける。受信機の手前では、バリア壁によって直接波の影響を軽減し、受信機を通過した後は、人体損失により直接波の影響を軽減させることで、受信機の間近のときのみ受信強度を高めさせることにより、受信機の間近で、最も受信強度が高まることが確認された。(雑誌論文[3][4], 学会発表[7][12])
(b) 待ち行列から去るときの検出に受信機 1 台を利用して、待ち行列の並び始めはユーザ間の移動と静止が連動する群集行動特性から判定して待ち時間推定する。ユーザの動きは、スマートフォンの加速度センサから得られる加速度値を利用した機械学習により、ユーザ行動状態(移動と静止)を識別する。待ち行列から去る OUT 判定は、受信強度の急激な低下により判定する。CROWD 判定はユーザ間の移動と停止の連動であり、待ち行列の先頭ユーザが待ち行列から去ると、その次に並んでいるユーザが前進し、それに伴ってその次のユーザが前進する特性を利用した判定である。待ち行列に並び始めは、初回の CROWD 判定の直前の移動から静止したときである。IN, CROWD, OUT 判定の順番であれば、待ち行列に並んでいると判定し、IN 判定時刻と OUT 判定時刻の差から待ち時間を推定する。(学会発表[2][3])
- (6) スマートフォンからの無線 LAN フレームの受信強度特性を利用した機械学習による入退室推定
入室、退室、滞在という3つの状態をスマートフォンからの受信強度を用いて推定する。部屋内に、受信機を設置し、ドアに取り付けられたドアセンサのセンシング情報に

よりドアの開閉を検出する。ドアが開いたことをトリガーとして、ユーザのスマートフォンからの受信強度を受信機で取得する。この受信強度は、退室時は徐々に小さくなり、入室時は徐々に大きくなる特徴がある。2つの受信機の受信強度を利用した特徴量を設定することで、入退室を識別する。(学会発表[1][4][6])

- (7) ユーザ行動を利用した BLE 送信制御
ユーザの BLE 送信機からのアドバタイジングパケットを受信する BLE 受信機において、最も受信強度の高い BLE 受信機付近にユーザが存在するとした追跡システムを想定する。送信時の消費電力が非常に高い。そのため、アドバタイジングパケットの送信間隔をなるべく長くするべきである。ユーザが走行中であれば、BLE 受信機でアドバタイジングパケットを受信できない恐れがあるために送信間隔を短くし、静止中であれば、送信間隔を長くしてもよい。そのため、ユーザ行動を加速度センサから得られる加速度値を利用した機械学習により、走行、歩行、静止のユーザ行動を推定し、ユーザ行動に応じて送信頻度を変更することで、消費電力を削減させる。(雑誌論文[1], 学会発表[5])

4. 研究成果

- (1) スマートフォンの無線 LAN 機能、または受信強度を利用した混雑度推定
(a) プローブリクエストフレームの収集による地下鉄駅の人々の流れの評価結果を表 4.1 に示す。この表は、東京メトロ南北線四ッ谷駅プラットフォームにおいて、目黒方面または赤羽岩淵方面への電車に乗る人の割合である。朝と夜は目黒方面への利用者が多く、昼は両方面に対して利用者がほぼ同じである。これは目視による人の流れとおおよそ一致することが確認された。(学会発表[13])
(b) 目視による列車内の混雑度の指標を表 4.2 に示す。プローブリクエストフレームの収集による MAC アドレスの計測数 (Number of WLAN STAs) とビーコンフレームの平均受信強度 (RSSI value of beacon frames) の散布図を図 4.1 に示す。目視による混雑度が Level 5 (混雑状態) のとき、MAC アドレス計測数が多く、受信強度が低い。受信強度の分布に比べ、MAC アドレス計測数の分布は、Level 2~4 の混雑度とのオーバーラップしている割合が大きい。そのため、列車内においては、受信強度を用いる方法の方が有効であると考えられる。(雑誌論文[5])
- (2) 無線 LAN アクセスポイントにおけるスマートフォンの接続情報を利用した移動追跡

表 4.1 人の流れの増減率

	朝	昼	夜
赤羽岩淵方面	94.0%	96.6%	79.5%
目黒方面	62.6%	92.3%	65.2%

表 4.2 目視による混雑度の指標

Level	Congestion degree
Level 1	Vacant more than half seats
Level 2	Vacant less than half seats
Level 3	No vacant seats
Level 4	Filled with standing passengers in front of seat
Level 5	Filled with standing passengers in front of door

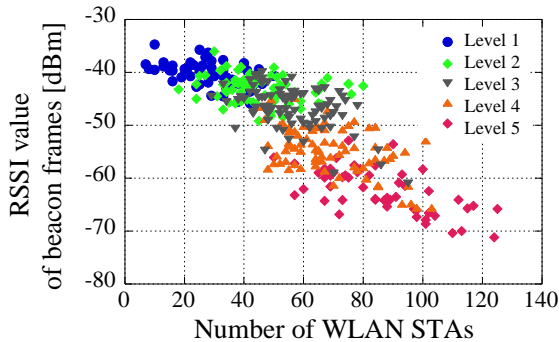


図 4.1 列車内の混雑度の計測結果

2 つの AP とそれらに接続されたサーバーにおいて、接続中の端末を追跡する機能を実装し、端末を追跡できることが確認された。(学会発表[13])

- (3) 周波数の違いを利用した受信強度による混雑度推定

食堂において送受信機を設置した。目視による人物混雑度評価と受信強度の変動を評価した。フィールド実験の結果、2.4GHz 帯の受信強度が目視混雑度と相関が最も高いことが確認された。(学会発表[10])

- (4) 非可聴音を利用した位置推定

図 4.2 に示すように、Transmitter A, B, C が固有の位置 ID を送信する。ここで、受信機から最も近い送信機が正しい位置推定結果とする。ここで、受信機が異なる位置 ID を短期間に複数受信した場合、その中で最も受信強度が大きい位置 ID を位置推定結果とする。図 4.3 に位置推定された個数を示す。ここで、推定された個数の最大値を 10 とする。0, 5, 10m 地点において、送信機の前となるため、高い推定精度であるが、それぞれの送信機の間地点では、推定精度が下がることが確認された。(雑誌論文[2], 学会発表[8])

- (5) スマートフォンからの BLE パケットの受信強度を利用した BLE 受信機による通過判定や、ユーザ行動情報を利用した待ち行列と待ち時間推定

- (a) 2 つの受信機を利用した待ち時間推定の

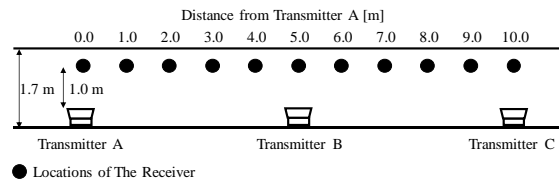


図 4.2 送受信機の位置関係

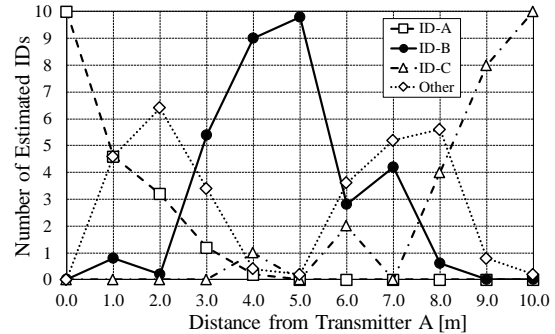


図 4.3 推定結果

実験では、図 4.4 に示すように、ユーザは 1m 間隔で待ち行列に並んでおり、1 分間隔で待ち行列から去るモデルとする。図 4.5 に、実験開始時に 0m 地点にいたユーザに着目し、受信機 A, B での受信強度 (RSSI) の変動を示す。およそ 120 秒 (2 分) から 180 秒 (3 分) に渡り受信機 A における受信強度が高まっている。これは、ユーザが受信機 A の間近に存在するためである。次に、およそ 420 秒 (7 分) から 480 秒 (8 分) に渡り受信機 B における受信強度が高まっている。これは、ユーザが受信機 B の間近に存在するためである。受信機 A において受信強度が高まる時刻 (120 秒) と受信機 B において受信強度が下がる時刻 (480 秒) の差の 360 秒 (6 分) が待ち時間である。1 分ごとに前進するため、受信機 A と B の間の待ち時間は 6 分である。(雑誌論文[4])

さらに、待ち時間をリアルタイムで WEB 表示させるためのシステム構築も行い、本手法の有効性を示した。(雑誌論文[3], 学会発表[7])

(b) ユーザの移動と静止のユーザ行動情報を利用した待ち時間推定において、各ユーザの判定時刻を図 4.6 に示す。User 1~12 は待ち行列に並ぶユーザであり、User 13~15 は待ち行列に並ばずに、静止と移動を繰り返すユーザである。図 4.6 に示す通り、User 13 のみ誤って待ち行列に並んでいると判定されたが、User 1~12 は IN, CROWD, OUT 判定の順番であり待ち行列に並んでいると判定された。また、User 13, 14 は、IN, CROWD, OUT 判定のいずれも判定されておらず、待ち行列に並んでいないと判定された。従って、待ち行列推定の精度は 93.3% であり、目視との待ち時間の差の平均値は 1.6 秒であった。(学会発表[2])

- (6) スマートフォンからの無線 LAN フレームの受信強度特性を利用した機械学習

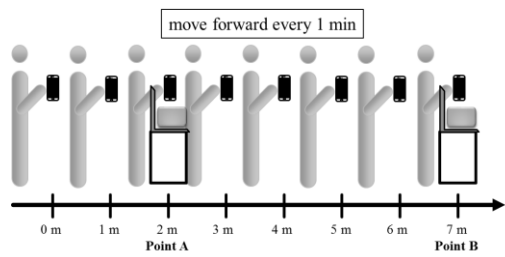


図 4.4 送受信機の位置関係

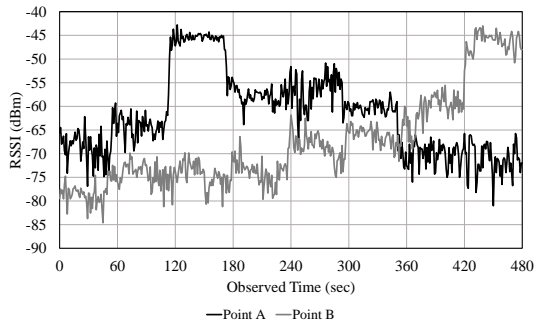


図 4.5 受信強度の変動

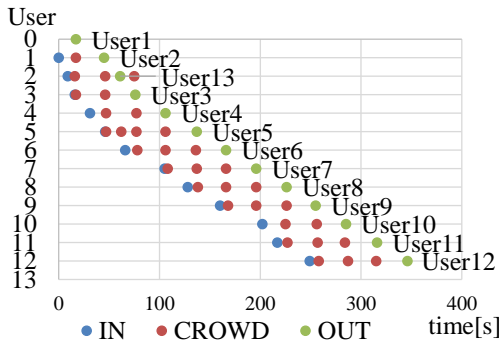


図 4.6 各ユーザの判定時刻

による入退室推定

部屋のドアの近傍と内部の2箇所に受信機を設置して、入退室の動きに対して、8機種スマートフォンから受信強度を計測した。Leave One Out 交差検証による推定精度は、受信機1台の場合と比べて、受信機が2台の場合は推定精度が向上した。また、機種依存性を確認するために、学習データからある機種のデータを取り除き、テストデータとして、その機種のデータを利用した場合においても、およそ89%の推定精度が得られた。(学会発表[1])

(7) ユーザ行動を利用した BLE 送信制御

アドバタイジング間隔を変更することで消費電力が削減できるため、ユーザ行動に応じて送信間隔を変更させるシステムを実機で構築した。検証結果を図4.7に示す。図4.7より、ユーザ行動に応じてアドバタイジング間隔が変更されていることが確認された。(雑誌論文[1])

以上述べたように、多岐にわたるテーマに取り組んだ結果、局所的な移動推定にあたっては、環境に依存するもの、受信エリアが限

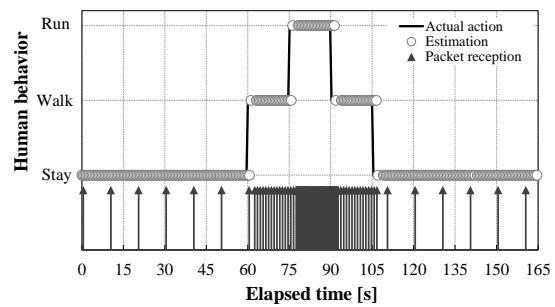


図 4.7 ユーザ行動と送信間隔

定されるものが有効であると考えられる。環境に依存するものとしては、例えば、テーマ(1)の列車などの閉空間が続く環境や、テーマ(6)のような学習データを必要とする環境である。受信エリアが限定されるものとしては、テーマ(4)のような非可聴音を利用する場合や、テーマ(5)のように特定地点で受信強度が高い場所を利用する場合である。このような場合の消費電力の削減方法がテーマ(7)に対応する。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計5件)

- [1] 小川 将克, 張 恭模, "加速度センサによる人の行動推定を利用した BLE アドバタイジング間隔の動的制御," 電子情報通信学会論文誌 B, 査読有, Vol.J100-B, No.12, pp.1039-1042, 2017年.
DOI: 10.14923/transcomj.2017ASL0002
- [2] Hiroaki Tsugawa, Masakatsu Ogawa, "Proposal of Ultrasonic Communication Method and Its Application to Position Estimation System," Journal of Signal Processing, 査読有, Vol.21, No.4, pp.133-136, 2017.
DOI: 10.2299/jsp.21.133
- [3] Yujin Miyagawa, Masakatsu Ogawa, "Immediate Cooperative Line Wait Time Estimation System Using BLE on Smartphone," Journal of Signal Processing, 査読有, Vol.21, No.4, pp.129-132, 2017.
DOI: 10.2299/jsp.21.129
- [4] Yujin Miyagawa, Masakatsu Ogawa, "Cooperative Line Wait-Time Estimation using BLE on Smartphone," Journal of Signal Processing, 査読有, Vol.20, No.6, pp.267-274, 2016.
DOI: 10.2299/jsp.20.267
- [5] Takayuki Yamakawa, Masakatsu Ogawa, Yujin Miyagawa, "Congestion Degree Estimation Method for Railway Using Wireless LAN Control Frames," Journal of Signal Processing, 査読有, Vol.19, No.4, pp.127-130, 2015.
DOI: 10.2299/jsp.19.127

[学会発表] (計14件)

- [1] Tomohiro Yoshida, Masakatsu Ogawa,

- "Room Access Management Method Using RSSI from Smartphone by Machine Learning Estimation," Proc. of 2018 RISP International Workshop on Nonlinear Circuits, Communications and Signal Processing (NCSP'18), 査読有, 2018.
- [2] Tomoya Hayakawa, Masakatsu Ogawa, "Cooperative Waiting Line and Waiting Time Estimation Method Using Crowd Behavior Characteristics in Waiting Line," Proc. of 2018 RISP International Workshop on Nonlinear Circuits, Communications and Signal Processing (NCSP'18), 査読有, 2018.
- [3] 早川 知也, 小川 将克, "待ち行列における群衆行動特性を用いたユーザ協調型待ち時間推定手法," 電子情報通信学会技術研究報告, MoNA2017-16, pp.7-11, 2017年.
- [4] 吉田 知弘, 小川 将克, "スマートフォンからのRSSIを用いた機械学習による入退室情報推定," 電子情報通信学会技術研究報告, MoNA2017-15, pp.1-5, 2017年.
- [5] 張 恭模, 小川 将克, "加速度センサによる行動分類を利用したBLEアダプタイジング間隔制御," 電子情報通信学会2017年総合大会, B-15-4, 2017年.
- [6] Tomohiro Yoshida, Masakatsu Ogawa, "Room Access Management System Using RSSI on Smartphone by Machine Learning," Proc. of 2017 RISP International Workshop on Nonlinear Circuits, Communications and Signal Processing (NCSP'17), 査読有, 2017.
- [7] Yujin Miyagawa, Masakatsu Ogawa, "Immediate Cooperative Line Wait Time Estimation System Using BLE on Smartphone," Proc. of 2017 RISP International Workshop on Nonlinear Circuits, Communications and Signal Processing (NCSP'17), 査読有, 2017.
- [8] Hiroaki Tsugawa, Masakatsu Ogawa, "Proposal of ultrasonic communication method and its application to position estimation system," Proc. of 2017 RISP International Workshop on Nonlinear Circuits, Communications and Signal Processing (NCSP'17), 査読有, 2017.
- [9] 荻 直樹, 小川 将克, "無線LANネットワークにおける端末接続情報に基づく端末追跡定," 電子情報通信学会2016年総合大会, B-15-2, 2016年.
- [10] 吉田 知弘, 小川 将克, "RSSIを用いた周波数帯ごとの人物混雑度推定," 電子情報通信学会2016年総合大会, B-15-3, 2016年.
- [11] 津川 宏明, 小川 将克, "非可聴音通信の実装," 電子情報通信学会2016年総合大会, B-15-10, 2016年.
- [12] Yujin Miyagawa, Masakatsu Ogawa, "Line Wait-Time Estimation Method among Cooperated User's Smartphones Using BLE," Proc. of 2016 RISP International Workshop on Nonlinear Circuits, Communications and Signal Processing (NCSP'16), 査読有, 2016.
- [13] 宮川 雄仁, 小川 将克, 山川 貴之, "無線LANを活用した鉄道プラットフォームにおける人の流れの推定手法の検討," 電子情報通信学会2015年総合大会, B-15-15, 2015年.
- [14] Takayuki Yamakawa, Masakatsu Ogawa, Yujin Miyagawa, "Congestion Degree Estimation for Railway Using Wireless LAN Control Frames," Proc. of 2015 RISP International Workshop on Nonlinear Circuits, Communications and Signal Processing (NCSP'15), 査読有, 2015.

6. 研究組織

(1)研究代表者

小川 将克 (OGAWA, Masakatsu)

上智大学・理工学部・准教授

研究者番号：90624411