

令和 5 年 6 月 21 日現在

機関番号：34309

研究種目：挑戦的研究（開拓）

研究期間：2018～2022

課題番号：18H05393・20K20398

研究課題名（和文）アンビエントバックスキャッター通信を用いたバッテリーレスセンシングシステムの開発

研究課題名（英文）Development of battery-less sensing systems using ambient backscatter communication

研究代表者

東野 輝夫（Higashino, Teruo）

京都橘大学・工学部・教授

研究者番号：80173144

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 19,700,000円

研究成果の概要（和文）：近年TVやWiFiなど環境に存在する電波にゆらぎを与え、消費電力が従来の1/10,000程度（数十 μ W）に低減可能なアンビエントバックスキャッター通信と呼ばれる無線通信技術が開発されつつある。本研究では、多数のバックスキャッタータグを並列的に配置して、バックスキャッタータグ毎に異なる周波数シフトを実現し、複数のバックスキャッタータグを用いて同時にセンシングを行えるような仕組みを開発し、小型の太陽光電池などで電池供給なしでセンシングが可能な仕組みを構築した。また、Wi-Fi電波の乱れなどのチャネル状態情報（CSI）を併用した行動認識技術の創出などを行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

一般にIoTデバイスでは、センシング、プロセス、通信の3つの処理に電力を消費し、センシングは数十 μ Wレベルで実装出来るものが多いが、WiFiやBLEなどの無線通信は十数ミリWから百ミリW程度の電力を要し、IoTデバイスのインターネット接続のキーとなる技術は超低消費電力の通信方式の普及にある。アンビエントバックスキャッター通信は、TVやWiFiなど環境に存在する無線波にゆらぎを与え、そのゆらぎ成分を取り出す方式で、消費電力を従来の1/10,000程度（数十 μ W）に低減可能である。本研究では、ゆらぎ成分の効率的な捕捉方式や、複数のセンサーから同時発信される信号波の分離手法などを考案した。

研究成果の概要（英文）：In recent years, a wireless communication technology called ambient backscatter communication has been developed that can reduce power consumption to about 1/10,000th (tens of Micro Watt) of the conventional level by fluctuating radio waves present in the environment, such as TV and WiFi. In this research, we have developed a mechanism that enables simultaneous sensing using multiple backscatter tags by realizing different frequency shifts for each backscatter tag, and constructed a mechanism that enables sensing without battery supply using small solar cells. In addition, we have created behaviour recognition technology that combines channel state information (CSI), such as Wi-Fi radio wave interference, and other information.

研究分野：情報ネットワーク

キーワード：バックスキャッター通信 IoTデバイス センシング 行動認識 超低消費電力 WiFi CSI

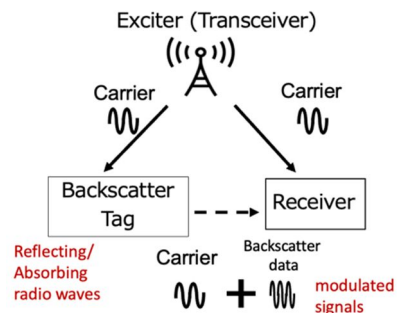
様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

第5期科学技術基本計画で「超スマート社会」の実現が謳われるなど、近年 IoT や無線通信、AI・ビッグデータを活用して都市のスマート化を目指した様々な研究開発が進められている。このような状況で、様々な分野で IoT デバイスが爆発的に普及していくには、メンテナンスフリーな IoT デバイスが普及していくことが必須である。電源や電池からの電力供給を前提とした IoT デバイスは、電源供給設備の設置や電池交換のためのコストが高く、IoT デバイスの普及の大きな障害になっている。IoT デバイスの電力消費のボトルネックは、その通信に要する消費電力の大きさ(数ミリから数百ミリ W)であり、多くのセンシングデバイス(数十マイクロ W)の一万倍程度の電力を要している。本提案研究で対象とするアンビエントバックスキャッター通信[1]は、既存の TV や WiFi など環境に存在する無線波に IoT デバイス側でゆらぎ成分を与え、受信側でそのゆらぎ成分を取り出すことでセンシングデータの転送を行う方式であり、IoT デバイス側の消費電力を従来の無線通信の一万分の1程度(数十 μ W)に低減可能な超低消費電力の通信方式として注目されているが、実世界での普及を推進するには、IoT デバイス側で与えるゆらぎ成分の効率的な捕捉方式の考案や、複数の IoT デバイスから発信されるバックスキャッター通信の信号波の分離など、解決すべき技術課題が数多く存在していた。

2. 研究の目的

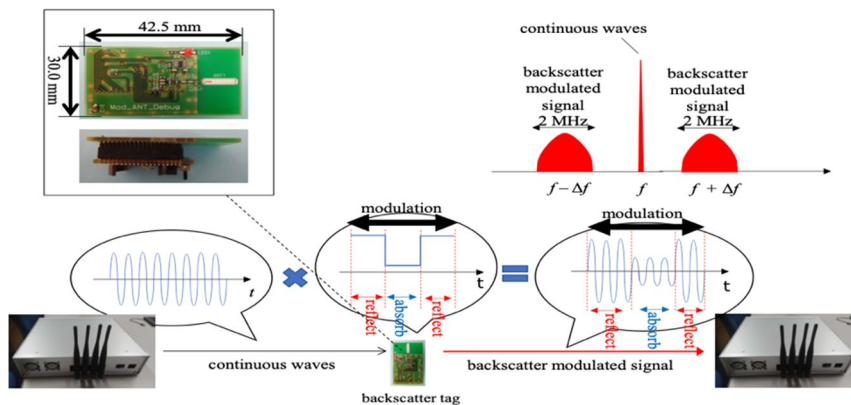
アンビエントバックスキャッター通信は、右図のように送信側で一切の電波を作り出すことなく、IoT デバイス(バックスキャッタータグ)側のアンテナの抵抗値をスイッチにより切り替えることで、環境に存在する TV や WiFi などの電波を反射または吸収させ、受信側で得られる信号強度を強めたり弱めたりできることを利用して 0/1 のビットを送る無線通信方式である。本研究では、下記の(a)~(d)の研究を行うことで、アンビエントバックスキャッター通信を用いた超低消費電力の IoT デバイス(バックスキャッタータグ)を開発し、それらを用いた新しいセンシング技術の創出を行うことを研究目的とする。



- (a) アンビエントバックスキャッター通信の性能向上と超低消費電力の IoT デバイス(バックスキャッタータグ)の開発
- (b) 複数の IoT デバイス(バックスキャッタータグ)を協調させたセンシング機構の考案
- (c) 対象領域での安定したアンビエントバックスキャッター通信の実現
- (d) Wi-Fi 電波の乱れを併用した行動認識技術の創出

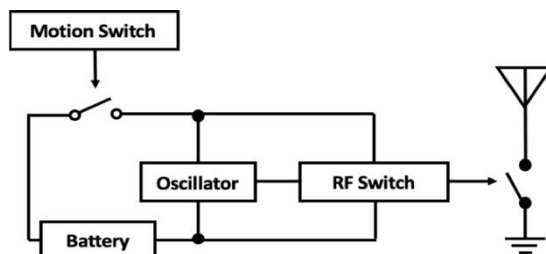
3. 研究の方法

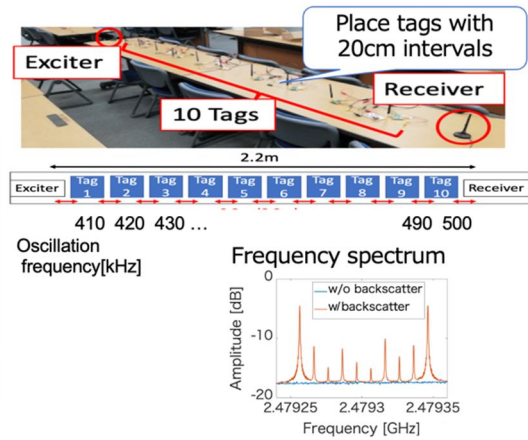
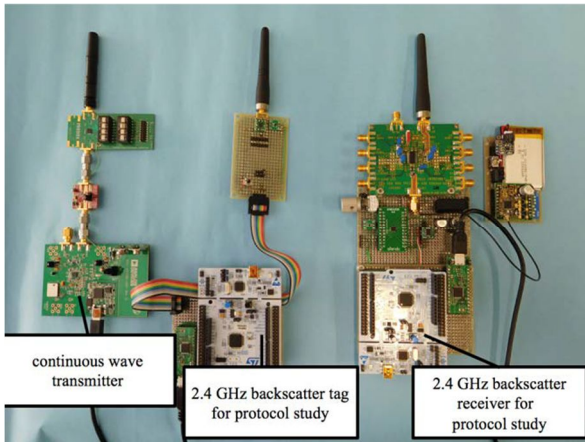
本研究では、まず右図左上の回路のようなバックスキャッタータグを開発した。このバックスキャッタータグでは、2つのバックスキャッター信号が周波数シフトとして生成される。2つの信号の周波数は $f - f$ と $f + f$ で表される (f : 搬送波の周波数、 f : 周波数シフト幅)。



提案方式では、コンテキストの状態は周波数シフト (FS) の時間変化、あるいは FS の有無として表現される。マイコンや A/D コンバータのような消費電力の大きい部品を必要とせず、バックスキャッタータグの消費電力は 33~48 μ W 程度であり、小型のボタン電池 (CR2032、225mAh) 1個で 586~852 日の動作時間を得ることが出来た。また、異なる周波数シフト幅 (f_1, f_2, \dots) を設定することで、複数のバックスキャッタータグを同時に動作させ、それらを識別することができるようになった。

物理的なスイッチの ON/OFF をバックスキャッタータグで実現しようとする場合、バックスキャッタータグの周波数シフト (FS) の ON/OFF は、右下図のような回路を構成することで実現している。発振器 (Oscillator) や RF スwitch の値を調整することで様々な周波数シフト幅 (f_1, f_2 など) を実現している。

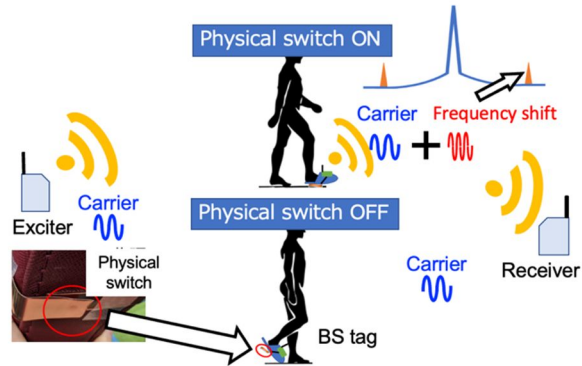




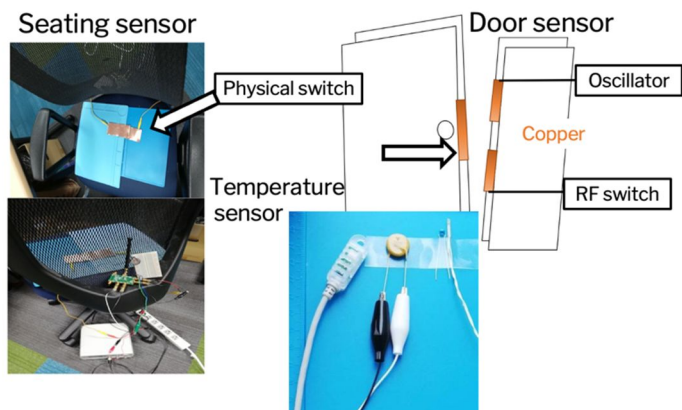
4. 研究成果

(1) 本研究では、上記 3. で述べたような周波数シフトを実現するバックscatterタグ(左上図)を開発した。このタグでは、発振器 (Oscillator) や RF スイッチの値を調整することで様々な周波数シフト幅 (f_1 , f_2 など) を実現している。右上図は、10 個のバックscatterタグに異なる周波数シフト幅 (f_1, \dots, f_{10}) をを設定し、10 個のバックscatterタグの周波数スペクトルを表示したものであり、すべての周波数シフトを検出することが出来ている。ただし、無線局のフェージングのため、ピークの高さはタグごとに若干異なる結果となっている。

(2) 右図のスリッパのように、物理的なスイッチの ON/OFF は、3. で述べたような Motion Switch を用いて実現し、スイッチの ON 状態の時に放出される周波数シフトの信号をキャッチすることにより、スイッチの ON 状態を判定している。この ON 状態の回数などを判断したり、時間インターバルを計算したりすることにより、歩く速度や歩数など、対象者の行動把握が可能になる。一般に WiFi などの搬送波の無線信号は一定の幅の周波数で送信されているので、周波数シフト幅が小さいと搬送波と重なるので、周波数シフト信号と搬送波を区別する仕組みや、搬送波の送信周波数幅を制限することで、より周波数シフト信号を高精度且つ遠距離で検出出来ることがわかった。ソフトウェア無線機などでの実験により、搬送波の周波数幅を制限することで、周波数シフト信号の検出がより高精度に行えることなどを確認している。



(3) 人やモノの行動認識を行えるようにするための様々なバックscatterタグを開発した。例えば、右図の左側の seating sensor は椅子の腰掛け部分にバックscatterタグをセットすることで、人が椅子に座ったかどうかをセンシングすることが出来る。また、右図の中央に表示した temperature sensor は、一定の温度になるとスイッチが ON 状態になるようなバックscatterタグを開発したものである。これにより、室温が一定温度以上になると警告を発するようなセンサーを超低消費電力で実現することが可能になった。さらに、右図の右側の door sensor は、ドアの開閉を検知するバックscatterタグであり、超低消費電力でドアの開閉などを検知することができる。



(4) 小型の太陽光発電センサーとキャパシタを併用することで、多くの場合に、上記のバックscatterタグの ON/OFF を制御する電池を不要にすることが出来ることを確認した。一方で上記 3. でも述べた通り、小型のボタン電池 (CR2032, 225mAh) 1 個で 586 ~ 852 日の動作時間を得ることが出来ているので、実質的には小型のボタン電池 1 個で数年間利用可能な様々な人やモノの行動把握センサーを開発出来ることがわかった。

(5) これらの研究と並行して、Wi-Fi 電波の乱れ (CSI 情報) を併用した行動認識技術の創出を

行い、CSI 情報を併用することで、より高精度に人やモノの行動把握ができるようになること、なども確認している。

5 . おわりに

本研究においては、バックscatterタグを開発したり、ソフトウェア無線機を用いて様々な実験を行ったりする必要があった。一方で、所望のソフトウェア無線機が長期間手に入らなかったり、様々な電子部品の調達が思うように進まなかったりしたこともあり、実験やタグの開発に予定以上の時間を要してしまった。ソフトウェア無線機や電子部品の早期調達に様々なアドバイスをいただいた関係各位に深謝申し上げます。

<引用文献>

- [1] N.V. Huynh, D. T. Hoang, X. Lu, D. Niyato, P. Wang and D. I. Kim: “Ambient Backscatter Communications: A Contemporary Survey”, IEEE Communications Surveys & Tutorials, Vol.20, No. 4, pp.2889-2920, 2018.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Yoshihiro Nakagawa, Toru Maeda, Akira Uchiyama, Teruo Higashino	4. 巻 30
2. 論文標題 BAAS: Backscatter as a Sensor for Ultra-Low-Power Context Recognition	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Information Processing	6. 最初と最後の頁 130-139
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2197/ipsjip.30.130	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Hiroki Yoshikawa, Akira Uchiyama, Teruo Higashino	4. 巻 9
2. 論文標題 TSVNet: Combining Time-Series and Opportunistic Sensing by Transfer Learning for Dynamic Thermal Sensation Estimation	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Access	6. 最初と最後の頁 102835-102846
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/ACCESS.2021.3097882	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Ousmane Zeba, Kentaro Hayashi, Kazuhiro Kizaki, Shunsuke Saruwatari, Takashi Watanabe	4. 巻 Vol.2
2. 論文標題 QuadScatter: Computational Efficiency in Simultaneous Transmissions for Large-Scale IoT Backscatter Networks	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Open Journal of the Computer Society	6. 最初と最後の頁 334-345
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/OJCS.2021.3104986	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Khaled El-Fakih, Teruhiro Mizumoto, Keiichi Yasumoto, Teruo Higashino	4. 巻 Vol.118
2. 論文標題 Energy aware simulation and testing of smart-spaces	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Information & Software Technology	6. 最初と最後の頁 Article# 106201
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.infsof.2019.106201	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計32件（うち招待講演 4件 / うち国際学会 17件）

1. 発表者名 Teruo Higashino, Akira Uchiyama, Hirozumi Yamaguchi, Shunsuke Saruwatari, Takashi Watanabe, Toshimitsu Masuzawa
2. 発表標題 A New Problem Setting for Mobile Robots Based on Backscatter-Based Communication and Sensing
3. 学会等名 23rd International Symposium on Stabilization, Safety, and Security of Distributed Systems (SSS 2021) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yohei Konishi, Shinsuke Ibi, Kazuhiro Kizaki, Takuya Fujihashi, Shunsuke Saruwatari, Takashi Watanabe
2. 発表標題 Harmonics-Controlled Frequency Division Multiple Access without Harmonics and Sidebands Interference in Backscatter Communications
3. 学会等名 IEEE International Conference on Communications (ICC 2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Teruo Higashino
2. 発表標題 Society 5.0: Its Aim and Construction of Future Super Smart Society - How can we create sustainable IoT device networks? -
3. 学会等名 Global IEEE 5G-IoT Summit Dubai (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Teruo Higashino
2. 発表標題 Society 5.0: Its Aim and Construction of Future Smart City
3. 学会等名 10th IEEE International Conference on Cloud Computing in Emerging Markets (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1 . 発表者名 Teruo Higashino
2 . 発表標題 Society 5.0 - Research aimed at disease prediction, prevention, and early detection from daily activity data -
3 . 学会等名 IEEE 5G & Blockchain Summit (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2021年

1 . 発表者名 Srikant Manas Kala, Vanlin Sathya, Winston KG Seah, Hirozumi Yamaguchi, Teruo Higashino
2 . 発表標題 Evaluation of Theoretical Interference Estimation Metrics for Dense Wi-Fi Networks
3 . 学会等名 2021 International Conference on COMmunication Systems & NETworks (COMSNETS 2021) (国際学会)
4 . 発表年 2021年

1 . 発表者名 Viktor Erdelyi, Hamada Rizk, Hirozumi Yamaguchi and Teruo Higashino
2 . 発表標題 Learn to See: A Microwave-based Object Recognition System Using Learning Techniques
3 . 学会等名 MFSens 2021 (First International Workshop on Maintenance-Free Context Sensing) (国際学会)
4 . 発表年 2021年

1 . 発表者名 Yoshihiro Nakagawa, Toru Maeda, Akira Uchiyama, Teruo Higashino
2 . 発表標題 Design and Evaluation of a Frequency Shift Backscatter Tag for Context Recognition
3 . 学会等名 2021 International Conference on Distributed Computing and Networking (国際学会)
4 . 発表年 2021年

1. 発表者名 Motoki Ougida, Hirozumi Yamaguchi, Teruo Higashino
2. 発表標題 Trajectory-Assisted Robust RFID-tagged Object Tracking and Recognition in Room Environment
3. 学会等名 23rd International ACM Conference on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems (MSWiM '20) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Hamada Rizk, Hirozumi Yamaguchi, Moustafa Youssef, Teruo Higashino
2. 発表標題 Gain Without Pain: Enabling Fingerprinting-based Indoor Localization using Tracking Scanners
3. 学会等名 28th International Conference on Advances in Geographic Information Systems (SIGSPATIAL 2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 中川 善博 , 前田 透 , 内山 彰 , 東野 輝夫
2. 発表標題 状況認識のための周波数シフト型Backscatter タグの設計と評価
3. 学会等名 情報処理学会第28回マルチメディア通信と分散処理ワークショップ論文集
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 森田 幸歩, 前田 透, 中川 善博 , 内山 彰, 東野 輝夫
2. 発表標題 Wi-Fi電波を用いたイメージングによる対象識別法の検討
3. 学会等名 情報処理学会マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICOM2020) シンポジウム論文集
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Ousmane Zeba, Shunsuke Saruwatari, Takashi Watanabe
2. 発表標題 QuadScatter for Simultaneous Transmissions in a Large-Scale Backscatter Network
3. 学会等名 2020 IEEE International Conference on Communications (IEEE ICC'20) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yohei Konishi, Takayuki Ueda, Kazuhiro Kizaki, Takuya Fujihashi, Shunsuke Saruwatari, Takashi Watanabe
2. 発表標題 Experimental Evaluation on IEEE 802.15.4 Compatible Backscatter
3. 学会等名 2020 IEEE Global Communications Conference (IEEE GLOBECOM '20) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小西 陽平, 木崎 一廣, 藤橋 卓也, 猿渡 俊介, 渡辺 尚
2. 発表標題 IEEE 802.15.4互換Backscatterの通信理論に関する基礎的検討
3. 学会等名 電子情報通信学会ソサイエティ大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Masahide Mizutani, Akira Uchiyama, Tomoki Murakami, Hirantha Abeysekera and Teruo Higashino
2. 発表標題 Towards People Counting Using Wi-Fi CSI of Mobile Devices
3. 学会等名 2020 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops (PerCom Workshops) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Teruo Higashino, Akira Uchiyama, Shunsuke Saruwatari, Hirozumi Yamaguchi, Takashi Watanabe
2. 発表標題 Context Recognition of Humans and Objects by Distributed Zero-Energy IoT Devices
3. 学会等名 39th IEEE International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 前田 透, 内山 彰, 東野 輝夫
2. 発表標題 行動認識のための Wi-Fi Backscatter センサの設計と評価
3. 学会等名 電子情報通信学会センサネットワークとモバイルインテリジェンス (SeMI) 研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 水谷 優秀, 内山 彰, 東野 輝夫, 村上 友規, アベセカラ ヒランタ
2. 発表標題 モバイル端末のWi-Fiチャンネル状態情報による人数推定手法の提案
3. 学会等名 電子情報通信学会センサネットワークとモバイルインテリジェンス (SeMI) 研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 中川 善博, 前田 透, 内山 彰, 東野 輝夫
2. 発表標題 Wi-Fi電波による行動認識に向けたバッテリーフリータグの基礎検討
3. 学会等名 情報処理学会モバイルコンピューティングとパーベイシブシステム (MBL) 研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 前田 透, 内山 彰, 東野 輝夫
2. 発表標題 バッテリーレス行動認識のための Wi-Fi Backscatter センサの基本性能評価
3. 学会等名 情報処理学会第27回マルチメディア通信と分散処理ワークショップ論文集
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 水谷 優秀, 内山 彰, 東野 輝夫, 村上 友規, アベセカラ ヒランタ
2. 発表標題 モバイル端末のWi-Fiチャンネル状態情報による混雑推定法の提案
3. 学会等名 情報処理学会マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICOM2019) シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小西 陽平, 木崎 一廣, 藤橋 卓也, 猿渡 俊介, 渡辺 尚
2. 発表標題 スペクトル拡散技術を用いた IEEE 802.15.4 互換 Backscatter に関する基礎的評価
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 上田 貴之, 木崎 一廣, 藤橋 卓也, 猿渡 俊介, 渡辺 尚
2. 発表標題 周波数ホッピングを用いた IEEE 802.15.4 互換 Backscatter に関する基礎的検討
3. 学会等名 第82回情報処理学会全国大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Naoya Matsumoto, Jiei Kawasaki, Makoto Suzuki, Shunsuke Saruwatari, Takashi Watanabe
2. 発表標題 Crowdedness Estimation Using RSSI on Already-deployed Wireless Sensor Networks
3. 学会等名 IEEE Vehicular Technology Conference (IEEE VTC'19-Spring) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takeru Fukushima, Tomoki Murakami, Hirantha Abeysekera, Shunsuke Saruwatari, Takashi Watanabe
2. 発表標題 Evaluating Indoor Localization Performance on an IEEE 802.11ac Explicit-feedback-based CSI Learning System
3. 学会等名 IEEE Vehicular Technology Conference (IEEE VTC'19-Spring) (国際学会)
4. 発表年 2018年～2019年

1. 発表者名 Teruo Higashino, Akira Uchiyama, Shunsuke Saruwatari, Hirozumi Yamaguchi, Takashi Watanabe
2. 発表標題 Context Recognition of Humans and Objects by Distributed Zero-Energy IoT Devices
3. 学会等名 The 39th IEEE International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 福島 健, 村上 友規, アベセカラ ヒランタ, 猿渡 俊介, 渡辺 尚
2. 発表標題 CSIを用いたデバイスフリーユーザの位置推定に関する実験的考察
3. 学会等名 情報処理学会モバイルコンピューティングとパーベシブシステム(MBL)研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小野 悟, 猿渡 俊介, 渡辺 尚
2. 発表標題 ワイヤレスセンシングを用いた獣流推定システムの検討
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 前田 透, 内山 彰, 東野 輝夫
2. 発表標題 環境発電型センサを用いた機械学習による移動状況推定手法の性能評価
3. 学会等名 情報処理学会マルチメディア、分散、協調とモバイル(DICOMO2018)シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 水谷 優秀, 内山 彰, 東野 輝夫, 村上 友規, アベセカラ ヒランタ
2. 発表標題 モバイル端末のWi-Fiチャンネル状態情報を用いた混雑状況推定の検討
3. 学会等名 情報処理学会研究報告, Vol.2018-ITS-75
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 水谷 優秀, 内山 彰, 東野 輝夫, 村上 友規, アベセカラ ヒランタ
2. 発表標題 モバイル端末のWi-Fiチャンネル状態情報を用いた人数推定の基礎検討
3. 学会等名 情報処理学会第81回全国大会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担者	猿渡 俊介 (Saruwatari Shunsuke) (50507811)	大阪大学・大学院情報科学研究科・准教授 (14401)	
研究 分担者	内山 彰 (Uchiyama Akira) (70555234)	大阪大学・大学院情報科学研究科・准教授 (14401)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------