

令和 6 年 6 月 14 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H03428

研究課題名（和文）Wi-Fiチャンネル状態情報に基づくコンテキスト認識のための転移学習技術

研究課題名（英文）Transfer learning for context recognition based on Wi-Fi channel state information

研究代表者

前川 卓也（Maekawa, Takuya）

大阪大学・大学院情報科学研究科・准教授

研究者番号：50447025

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では環境に依存しないWi-Fi電波情報を用いたコンテキスト認識基盤を研究した。具体的には、モバイル・ユビキタス環境において重要なコンテキストである以下を含むような認識・推定手法を研究した。(1) Wi-Fi電波の到来角（AoA；Angle of Arrival）情報：Wi-Fiアクセスポイントからの電波を受信する端末を想定したときの、受信電波の到来角を推定。(2) Wi-Fi端末間の距離情報：Wi-Fi機能をもつスマートフォンなどの端末間の物理的距離を、周辺のWi-Fiアクセスポイントからの受信電波情報を用いて推定。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、Wi-Fiセンシング研究において環境依存性の低い技術に注力を置いて研究開発を行った。環境に依存しないWi-Fi受信情報の成分を極力利用して、上述するような様々な屋内コンテキストを推定する手法を開発し、今後の様々なコンテキスト依存応用に繋がる基盤的な技術を築いた。本研究を通じて、IEEE Sensors JournalやElsevier Pervasive and Mobile Computingに論文が採録されるなどの顕著な成果が得られた。

研究成果の概要（英文）：In this research, we studied environment-independent context recognition using Wi-Fi radio wave information. Specifically, we studied recognition and estimation methods for the following contexts that are important in mobile and ubiquitous computing. (1) Angle of Arrival (AoA) information of Wi-Fi radio waves: Estimating the angle of arrival of received radio waves by using Wi-Fi propagation information. (2) Physical distance between Wi-Fi receivers: Estimating the physical distance between Wi-Fi devices, such as smartphones using information on received radio waves from nearby Wi-Fi access points.

研究分野：ユビキタスコンピューティング

キーワード：Wi-Fiセンシング

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

超高齢化社会の到来や労働人口の減少等により、センサ・AI 技術に基づく遠隔モニタリングの重要性が高まっている。さらに、高齢者の重篤化可能性が高い新型コロナウイルス(COVID-19)との共存のため、「Keep physical distance, but stay connected」を実現するセンサ・AI によるコンテキスト(状況)認識技術がポストコロナ時代に望まれている。また、行動認識や屋内位置推定といったコンテキスト認識技術は、遠隔モニタリングだけでなく、ホームオートメーションやライフログといった実世界指向アプリケーションの基盤技術である。

しかし、既存のセンサを用いた認識技術の多くには次のような問題が存在する。(1) 装着コスト：ウェアラブルセンサを用いた認識技術は、常時装着を前提としているため、その装着コストが大きい。特に高齢者にセンサの常時装着を強いることは難しい。(2) プライバシ：カメラを用いた認識技術は、観測対象者の生活を撮影することを前提とするため、導入に関わるプライバシーの問題が大きい。

上記のような問題を克服する技術として、Wi-Fi などの電波を用いたセンシング技術への注目が高まっている。人体の大部分は水から構成されており、人間の動きにより環境内の Wi-Fi 等の電波の伝搬は影響を受ける。その電波伝搬を反映する情報は、チャンネル状態情報(CSI)などとして小型無線受信機等を用いて観測できる。Wi-Fi を用いたコンテキスト認識には次のような利点が存在する：(1) Wi-Fi は多くの家庭に普及しており導入コストが低い、(2) 身体装着器具を必要としない、(3) カメラを用いた手法と異なり暗環境でも動作する。

多くの教師あり学習を用いた Wi-Fi による研究では、行動認識、転倒検知、ドア・窓等の屋内オブジェクト利用検知などを実現している。しかし、電波の伝搬は環境によって大きく異なるため、特定の環境で収集された学習データで学習された認識モデルは、異なる環境で用いることができない。学習データの収集は多大なコストを必要とし、Wi-Fi を用いた認識システムの導入を妨げる要因となっている。

2. 研究の目的

上述のような課題を解決するため、本研究では環境に依存しない Wi-Fi 電波情報を用いたコンテキスト認識基盤を研究する。具体的には、モバイル・ユビキタス環境において重要なコンテキストである以下の認識手法を研究した。

- Wi-Fi 電波の到来角(AoA; Angle of Arrival)情報：Wi-Fi アクセスポイントからの電波を受信する端末を想定したときの、受信電波の到来角を推定する。
- Wi-Fi 端末間の距離情報：Wi-Fi 機能をもつスマートフォンなどの端末間の物理的距離を、周辺の Wi-Fi アクセスポイントからの受信電波情報を用いて推定する。
- 深度画像：Wi-Fi アクセスポイントのアンテナの正面のシーンの深度画像を Wi-Fi 電波情報を用いて生成する。
- 屋内位置のセマンティックラベル推定：Wi-Fi 電波と加速度データなどのウェアラブルデータを組み合わせて、環境非依存に場所のセマンティックラベル(例：キッチン、寝室など)を推定する。
- 画像情報と Wi-Fi 情報を組み合わせた屋内位置推定：ショッピングモールなどで得られた屋内画像と Wi-Fi 電波情報を用いて、ユーザが居る店舗のラベルを教師なしで推定する Wi-Fi フィンガープリントデータベース構築手法を提案した。

以上の研究を通じて、IEEE Sensors Journal や Elsevier Pervasive and Mobile Computing、情報処理学会論文誌(2024年5月の段階で条件付き採録)に論文が採録されるなどの顕著な成果が得られた。また、本研究で得られたアイデアを加速度データを用いた行動認識に適用した成果が当該分野の最難関国際会議の一つである PerCom2022 に採録されるなど、その派生的な研究の成果も顕著であった。

本報告書では最初の成果を中心に報告する。

3. 研究の方法

本研究では、Wi-Fi 信号送信機から受信機までの直接伝搬経路の AoA 推定に注目する。AoA は、三角測量を使った信号受信機の位置推定のための基盤的情報であり、AoA 推定は CSI データ処理の基本タスクの一つである。また本研究では、AoA 推定の際に、市販の機器を用いて CSI データを収集することにも挑戦する。Raspberry Pi やスティック PC のような小型コンピュータおよび、それらにインストールされたパケットスニффングソフトウェアを使用してビームフォーミングに使用される圧縮 CSI を本研究では取得、利用する。このアプローチにより、対象環境において Wi-Fi AP と通信するあらゆる無線端末(スマートフォンなど)に関する AoA 情

報を、特別なデバイスドライバや専用ソフトウェアをインストールすることなく簡単に取得することができる。

アンテナレイで受信された信号の AoA は、受信信号の位相から推定することができる。異なるアンテナ間の CSI の位相差から AoA を推定する方法として、MUSIC アルゴリズムが広く用いられている。これまでの研究において、AoA を推定するためには、すべてのサブキャリアの CSI 位相情報が使用されてきた。しかし、サブキャリアの波長はそれぞれ異なるため、環境ノイズがサブキャリアの CSI に与える影響は、サブキャリアに応じて異なる。また、サブキャリアによっては、個々のアンテナに関する圧縮 CSI 情報が欠落している場合がある。図 1 は、1 つのサブキャリアのみを用いて MUSIC アルゴリズムによって AoA 推定を行った結果の例を示している。サブキャリアによっては AoA 推定の誤差が非常に大きいことが分かる。そのため、近年の研究では、様々なサブキャリア選択手法が提案されている。しかし、これらの研究の多くは、各サブキャリアの品質を特定の特徴量によって評価し、閾値に基づいて最適なサブキャリアを選択するといった特徴エンジニアリングに依存している。

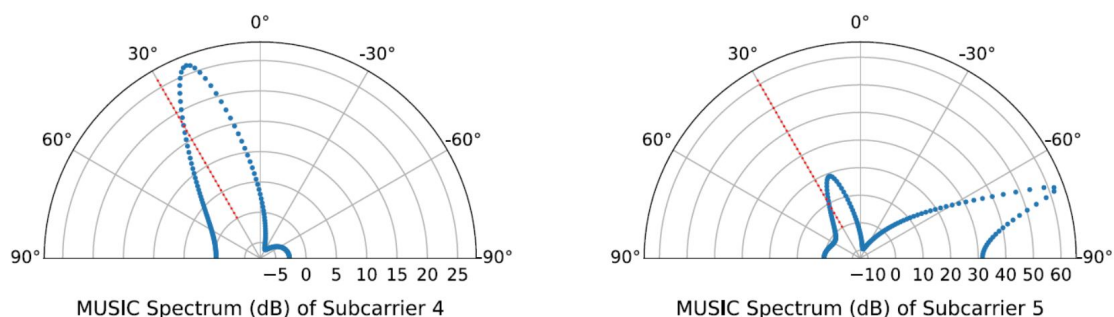


図 1：単一のサブキャリアのみを用いて MUSIC アルゴリズムを用いて AoA 推定を行った結果の AoA スペクトラム。赤色の線が正解の角度を示す。

そこで本研究では、AoA 推定のための深層学習を用いたデータ駆動型アプローチを提案する。AoA-Net と名付けた提案ニューラルネットワークは、CSI データを入力としてサブキャリア選択を自動的に行い、選択されたサブキャリアの CSI のみを使用して AoA を推定する End-to-end な構成を備える。ネットワークは、選択されたサブキャリアを使用した AoA 推定の誤差が最小となるようにサブキャリアを選択するように学習される。学習効率を向上させるため、AoA-Net は、あるサブキャリアのみを用いて AoA を推定する際に、各サブキャリアの AoA 推定誤差を同時に予測する、すなわちマルチタスク学習を行う。すなわち、サブキャリアごとの AoA 推定性能を予測するタスクを解くことで、メインタスクである最適なサブキャリアを選択して AoA を推定するタスクの性能を向上させる。本研究は、End-to-end の深層学習によりサブキャリア選択を行って AoA 推定する世界初の研究である。

ある環境に Wi-Fi アクセスポイント (AP) と IEEE 802.11ac 無線通信デバイスを搭載したモバイルデバイスが設置されていると想定する。CSI ツールのような CSI キャプチャのための特別なソフトウェアは、AP やモバイルデバイスにはインストールされていないとする。さらに、環境には小型コンピュータ (Stick PC など) が設置されているものとする。パケットスニフリングソフトウェア (例えば Wireshark など) が小型コンピュータにインストールされており、このソフトウェアを使用してデバイスから AP への圧縮 CSI フィードバックをキャプチャする。圧縮 CSI データを使用して、モバイルデバイスから AP への直接伝搬信号の AoA を推定する。なお、圧縮 CSI データはモバイル機器から AP に送信されるパケットごとに得られる。

提案手法の出力は、モバイルデバイスから AP への直接伝播経路の AoA である。本手法は教師あり学習に依存しているため、訓練フェーズとテストフェーズから構成される。訓練フェーズでは、訓練環境から収集したラベル付き訓練データを用いてニューラルネットワークを訓練する。訓練環境では、AP とモバイルデバイス間の距離と角度を変化させて CSI データを収集する。テストフェーズでは、テストデータを用いて学習済みモデルを評価する。

提案するニューラルネットワーク (AoA-Net) のアーキテクチャを図 2 に示す。ネットワークへの入力、前処理された CSI 位相情報と、図中の特徴抽出モジュールでサブキャリアごとに計算された特徴値からなる行列である。これらはサブキャリア選択ブロックへの入力として使用される。特徴抽出モジュールは、統計的特徴とスペクトル特徴の 2 種類を抽出する。ネットワークの主な出力は、送信機から受信機までの直接伝搬経路の AoA である。ネットワーク内での正

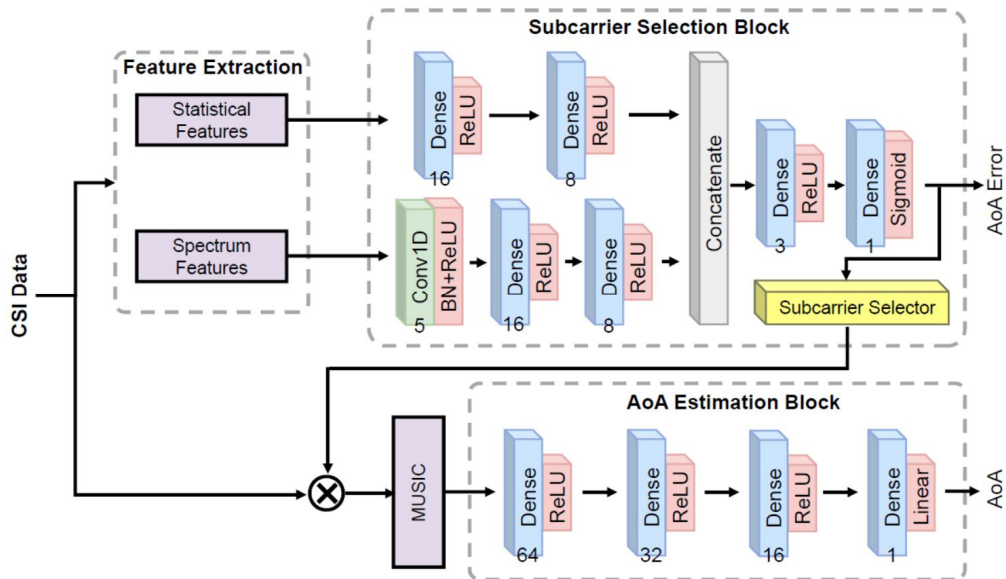


図 2：提案する AoA-Net の構成

確なサブキャリア選択を実現するため、ネットワークは、サブキャリアごとの AoA 推定誤差を出力するようにも設計されている。ネットワーク内にて、このサブタスクも同時に解くことで、サブタスクから得られた知識をメインタスク、すなわち特定のサブキャリアを選択して AoA を推定するタスクを促進することができる。

図 2 のサブキャリア選択ブロックは、各サブキャリアの有用性を計算し、各サブキャリアの AoA 誤差を推定する。推定された有用性に応じてサブキャリアが選択され、選択されたサブキャリアの CSI 位相情報が処理され、AoA 推定ブロックで AoA が計算される。

4 . 研究成果

5 つの実環境から CSI データを収集した。各環境では、802.11ac の Wi-Fi ネットワークにおいて、Wi-Fi AP (Panasonic EA-7HW06AP1ES) と、それに接続された Wi-Fi アダプタ (Arbalest AC1200) を搭載した Raspberry Pi (Raspberry Pi 3 Model B+) を設置した。送信 (Raspberry Pi) アンテナ数は 2 本、受信 (AP) アンテナ数は 3 本である。受信機の隣接アンテナ間の距離は 2.5cm である。パケットスニффング用に Wireshark をインストールした Stick PC (Intel

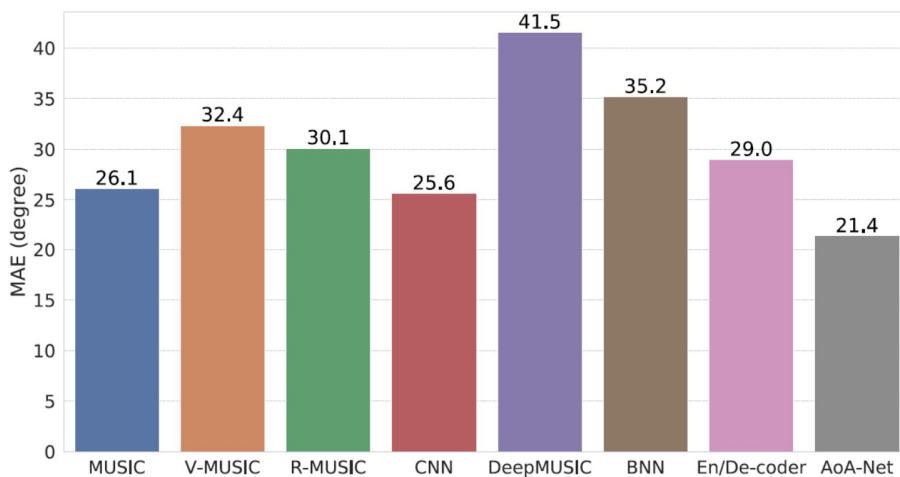


図 3：評価結果。V-MUSIC は分散に関する特徴量を用いてサブキャリア選択を行う。R-MUSIC は相関に関する特徴量を用いてサブキャリア選択を行う。CNN は畳み込みニューラルネットワークを用いて AoA の推定を行う。DeepMUSIC は CSI の相関行列を入力とし深層学習により AoA の推定を行う。BNN は CSI の相関行列を入力とし Bayesian neural network により AoA の推定を行う。En/De-coder はエンコーダ・デコーダ構造のニューラルネットワークにより AoA の推定を行う。

Compute Stick STK2m364CC) を用いて、送受信リンク間の圧縮 CSI データをキャプチャした。各パケットについて、5,200MHz チャンネル (チャンネル中心周波数 5,200MHz、サブキャリア数 52) のサブキャリアの圧縮 CSI を抽出した。

各環境において、Raspberry Pi と AP の距離を 0.5m から 3m まで 0.5m 間隔で変化させ、LOS (Line of sight) 条件下で CSI データを収集した。さらに、各距離について角度 (直進伝搬経路の AoA) を -60 度から +60 度まで 10 度間隔で変化させて CSI データを収集した。各位置で 130 回の CSI の測定を行った。図 3 に、提案手法および既存手法の絶対角度誤差を示す。

結果に示すように、AoA-Net は平均角度誤差 21.4 度を達成しており、オリジナルの MUSIC アルゴリズムを大幅に上回った。V-MUSIC と R-MUSIC は設計された特徴を用いてサブキャリア選択を行うが、これらの手法の AoA 誤差は大きかった。これらの特徴量は本来、人の動きの影響を大きく受けるサブキャリアを見つけるために提案されたものである。この結果より、安定したサブキャリアを見つけるためには、これらの特徴が有用でなかったことを示している。DeepMUSIC と BNN の性能は、深層学習手法の中で最も低かった。これらの手法は、シミュレーションにより得られた CSI データを使用した場合、高い精度を達成していた。しかし、アンテナ数が限られた実環境では、これらの手法は機能しなかった。この結果は、これらの手法の入力として用いられる CSI の相関行列がノイズレベルの高い環境には適していないことを示唆している。

一方、CSI の位相と振幅を入力とする CNN と En/De-coder は、他の手法よりも低い AoA 誤差を達成した。同様に CSI の位相と振幅を入力とする AoA-Net は、CNN と En/De-coder を上回り、サブキャリア選択の有効性が確認された。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Kumrai Teerawat, Korpela Joseph, Zhang Yizhe, Ohara Kazuya, Murakami Tomoki, Abeysekera Hirantha, Maekawa Takuya	4. 巻 89
2. 論文標題 Automated construction of Wi-Fi-based indoor logical location predictor using crowd-sourced photos with Wi-Fi signals	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Pervasive and Mobile Computing	6. 最初と最後の頁 101742 ~ 101742
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.pmcj.2022.101742	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 Dissanayake Thilina, Maekawa Takuya, Hara Takahiro, Miyanishi Taiki, Kawanabe Motoaki	4. 巻 22
2. 論文標題 IndoLabel: Predicting Indoor Location Class by Discovering Location-Specific Sensor Data Motifs	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Sensors Journal	6. 最初と最後の頁 5372 ~ 5385
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/JSEN.2021.3102916	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 -

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 0件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Yuqiao Wang, Takuya Maekawa, Kazuya Ohara, Yasue Kishino, Tomoki Murakami, and Hirantha Abeysekera
2. 発表標題 Preliminary Investigation of Estimating Distance between Devices via Wi-Fi Round Trip Time Using Positional Embedding of Access Points
3. 学会等名 情報処理学会 第77回コピキタスコンピューティングシステム研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yuqiao Wang, Takuya Maekawa
2. 発表標題 Preliminary Investigation of Distance Estimation between Devices via Wi-Fi Round Trip Time
3. 学会等名 情報処理学会 第76回コピキタスコンピューティングシステム研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Jaime Morales, Naoya Yoshimura, Qingxin Xia, Atsushi Wada, Yasuo Namioka, Takuya Maekawa
2. 発表標題 Acceleration-based Human Activity Recognition of Packaging Tasks Using Motif-guided Attention Networks
3. 学会等名 IEEE Int'l Conf. on Pervasive Computing and Communications (PerCom 2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yuka Tanno, Takuya Maekawa, Takahiro Hara
2. 発表標題 Wi-Fi CSI-Based Activity Recognition with Adaptive Sampling Rate Selection, Proc. of 18th EAI International Conference on Mobile and Ubiquitous Systems
3. 学会等名 Computing, Networking and Services (MobiQuitous 2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 村上 健太, Kumrai Teerawat, 前川 卓也, 原 隆浩, 尾原 和也, 岸野 泰恵, 村上 友規, アベセカラ ヒランタ
2. 発表標題 Wi-Fi CSIの時系列情報を用いた少量学習データによる屋内位置推定手法
3. 学会等名 情報処理学会 第73回ユビキタスコンピューティングシステム研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 丹野 友華, 前川 卓也, 原 隆浩, 尾原 和也, 岸野 泰恵, 村上 友規, アベセカラ ヒランタ
2. 発表標題 Wi-Fi CSIを用いた行動認識のための強化学習を用いた環境非依存なサンプリングレート選択
3. 学会等名 情報処理学会 第73回ユビキタスコンピューティングシステム研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Cao Guanyu, Maekawa Takuya, Ohara Kazuya, Kishino Yasue
2. 発表標題 Preliminary Investigation of Estimating Depth Images of Moving Objects from Wi-Fi Channel State Information
3. 学会等名 情報処理学会 第79回コピキタスコンピューティングシステム研究会
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 距離推定装置、距離推定方法及びプログラム	発明者 前川卓也、尾原和也、岸野泰恵	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、2023-024546	出願年 2023年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔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

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