

令和 2 年 7 月 10 日現在

機関番号：32714

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2019

課題番号：16K16042

研究課題名（和文）無線オープンイノベーションのための信号処理クラウドプラットフォーム

研究課題名（英文）Signal Processing Cloud Platform for Wireless Open Innovation

研究代表者

川喜田 佑介（Kawakita, Yuusuke）

神奈川工科大学・情報学部・准教授

研究者番号：30468540

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,000,000円

研究成果の概要（和文）：ブラインドスペクトラムセンシングと無線規格判別を行うことで、不特定多数の無線信号を含む広帯域を対象とした探索的なデータ解析をクラウドプラットフォーム上で実行できる情報基盤の実現を目指した。センシングプロセス全体の圧縮性能を評価することで良好な圧縮性能を持つ手法の組み合わせを得た。たまた、無線規格判別についての特徴量の正規化手法、オンライン学習アルゴリズムの識別性能、無線信号源を判別、階層的クラスタリングの結果を評価する手法、ノイズ耐性のある離散フーリエ変換を用いた距離関数についての知見が得られた。さらに、ユーザインタフェース分離と動的構成変更が可能であることを実証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

携帯電話などの無線局の急速な増加や無線通信の高速化に伴い、周波数の需要が増大しており、周波数を効率的に利用する技術、周波数の共同利用を促進する技術又は高い周波数への移行を促進する技術が求められている。本研究により、ブラインドスペクトラムセンシングと無線規格判別を行うことで、不特定多数の無線信号を含む広帯域を対象とした探索的なデータ解析をクラウドプラットフォーム上で実行できる情報基盤の可能性が示されたことにより、無線信号処理の研究やソフトウェア無線機の開発においても、革新的な研究成果、製品開発、サービス開発につながるプラットフォームの創造を目指すオープンイノベーションが期待される。

研究成果の概要（英文）：By blind spectrum sensing and classification of wireless standards, the applicant aimed to realize an information infrastructure for exploratory data analysis. The compression performance of the entire sensing process was evaluated and a combination of methods with good compression performance was obtained. In addition, a feature normalization method for wireless standard discrimination, discrimination performance of online learning algorithms, and methods to discriminate radio signal sources, evaluate the results of hierarchical clustering, noise tolerant discrete an insight into the distance function using the Fourier transform has been obtained. Furthermore, the applicant has shown that user interface isolation and dynamic configuration changes in software wireless applications are possible.

研究分野：情報通信

キーワード：ユビキタスコンピューティング

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

近年、携帯電話などの無線局の急速な増加や無線通信の高速化に伴い、周波数の需要が増大しており、周波数を効率的に利用する技術、周波数の共同利用を促進する技術又は高い周波数への移行を促進する技術が求められている。周波数資源は有限でありレギュレーションを守りながら電波利用すべきであるのは当然だが、ソフトウェア無線技術のように誰もが自由に無線器を開発できる環境も整いつつある。無線信号処理の研究やソフトウェア無線機の開発においても、革新的な研究成果、製品開発、サービス開発につながるプラットフォームの創造を目指すオープンイノベーションが期待される。このプラットフォームでは、不特定多数の無線規格、ユーザ、サンプリング装置を扱えることが求められる。以降に、研究開始当初時点で本研究と目的および手法が類似した3つの研究動向及び位置づけについて述べる。

・動的周波数アクセスにおける電波資源の利用状況調査技術

動的周波数アクセスは、ある周波数帯のライセンスユーザが周波数を利用しない時間・場所において、セカンダリユーザがそれを利用しようとするものである。動的周波数アクセスにおける電波資源の利用状況調査には、一般的にスペクトラムセンシングと呼ばれる技術が使用される。通常これらのスペクトラムセンシングではセカンダリユーザが使用しようとする周波数帯の利用の有無のみ判別できればよいため、特定の周波数の割り当て情報を基にスペクトラムセンシング高速化・効率化が図れるが、本研究では不特定多数の無線規格を対象としたためこれらの情報を使用しないブラインドスペクトラムセンシングが必須であった。

・ユニバーサル受信器における無線規格判別技術

複数の無線規格の信号を単一の受信機で受信しようとするユニバーサル受信器において、機械学習を用いて無線規格を自動的に判別する無線規格判別技術(申請者の既存技術)が有用と思われた。ユニバーサル受信器では特定の無線規格を対象とするのが一般的であり、単一の多値判別器で実現できる。本研究では、不特定多数の無線規格を対象とするためこの形態を採用できず、無線規格毎に2値判別器を使用する必要があり、機械学習における学習コスト・誤判別率の低減が課題であった。

・データサイエンスにおける探索的データ解析技術とクラウドプラットフォーム

スペクトラムセンシングと無線規格判別の研究をするためには、目的の結果を得るための解析手法の選択や解析時のパラメータの決定、対象データの絞り込みのために、データに対する洞察が得られていることが望ましい。データサイエンスの分野では、解析対象とするデータに対する洞察を得る手法として探索的データ解析(Exploratory Data Analysis: EDA)がある。EDAは解析初期の段階においてデータを俯瞰的にさまざまな角度から観察してその洞察を得るために有効な手法であるが、既存の信号処理統合環境は単一の計算機上で動作するため、不特定多数のサンプリング装置およびユーザを扱えないという課題があった。

2. 研究の目的

本研究では、ブラインドスペクトラムセンシングと無線規格判別を行うことで、不特定多数の無線信号を含む広帯域を対象とした探索的なデータ解析をクラウドプラットフォーム上で実行できる情報基盤を実現することを目指した。この基盤の主な利用者は無線信号処理の研究者・ソフトウェア無線機の開発者を想定し、利用者を巻き込んだ無線オープンイノベーションを目指す。具体的な目的として以下の3つを挙げた。

(目的1) 多量のデータから無線信号の含まれる区間の切り出し、利用者に提示する

(目的2) 探索的データ解析のヒントとなるように、提示した区間の無線規格を提示する

(目的3) 不特定多数のサンプリング装置およびユーザを扱えるようにする

目的1については、申請者の既存技術であるスペクトラムセンシングの解像度を变化させる多段階実行するマルチステージ化は、スケールアウトが可能な処理であるか、クラウドプラットフォームの計算機資源を十分に使用してセンシングを高速化できるか、検出率の向上や誤判定率の低減ができるかを明らかにすることとした。目的2については、無線規格に依存しない特徴量であるスペクトログラム特徴量で無線規格の判別が可能か、検出率の向上や誤検知率の低減ができるか、複雑な状態を持つ無線プロトコルの信号についても判別できるかを明らかにすることとした。目的3については、信号処理統合環境のユーザインタフェースおよびデータ管理機能の分離のため、動的な構成変更・データソースの広域展開についての課題を明らかにすることとした。

3. 研究の方法

研究の目的を達成するため、先に挙げた3つ目的に対応する以下の研究課題に取り組んだ。

(課題1) スペクトラムセンシングをクラウドプラットフォーム上で実行するためスケールアウト可能とすること

(課題2) 無線規格に依存しない特徴量による無線規格判別を可能とすること

(課題3) クラウドプラットフォーム上で無線信号処理を実行するため、信号処理統合環境のユーザインタフェースおよびデータ管理機構を処理主体から分離し動的構成変更可能にすること

以下にそれぞれの課題ごとについての取り組みについて詳述する。

(課題1) センシングのスケールアウトについて、センシング処理をマルチステージとすることで、1ステージ目では低周波数分解能で広帯域をセンシングし、2ステージ目以降では信号を検出した周波数付近の狭帯域に対して高周波数分解能で再度センシングすることで精度よく信号を検出する手法を提案し、2ステージセンシングのデータ圧縮に関する解析を行った。

(課題2) スペクトログラム特徴量による無線規格判別について、スペクトログラム(時間、周波数、信号成分の強さの3次元グラフ)を利用した特徴量を用いて、逐次学習アルゴリズムであるRBF Neural Networkによって信号を判別する手法について、特徴量に関する前処理が結果に影響を及ぼすことを実験的手法により検討した。本課題についてはさらに研究を進め、SCW オンライン学習アルゴリズムを用いて作成した提案手法の無線規格分類器について、ROC曲線と識別精度を評価し、提案手法は従来手法の識別精度に比べて識別性能が向上したと、オンライン学習アルゴリズムはバッチ学習と同等の識別性能を持つことから、新しい無線規格への適応が容易であるという特性を有していることを示した。

無線信号源を判別するため、測距・測位不要の信号源近接度推定手法を提案した。提案手法では、受信電力強度(RSSI)の時系列データを特徴量とし、それぞれの系列間の類似度を距離関数で表し、階層的クラスタリングすることで近接度を定量的に示すコーフェン行列を得る。コーフェン行列から任意の信号源同士の近接度を定量的に表すことができる。また、これまで、近接関係の観点で階層的クラスタリングの結果を評価する手法は存在しなかった。そこで、距離関数とクラスタリングアルゴリズムの組み合わせによるクラスタリング結果を評価する基準として、最近傍候補数を提案した。さらに、伝搬環境の影響を受けやすいRSSI時系列データが発信源の近接関係を推定する問題に対し、離散フーリエ変換を用いた距離関数の適用し、その効果を定量的に評価した。

(課題3) ユーザインタフェース分離と動的構成変更について、代表的なオープンソース無線開発環境であるGNU RadioおよびGNU Radio Companionの改修を行い、フローグラフを任意に分割しユーザインタフェースを信号処理主体から分離可能であるか実証した。また、ソフトウェア無線アプリケーションのタスク並列分散コンピューティングについて検討し、実装の互換性とシステム応答時間を評価した。

4. 研究成果

ブラインドスペクトラムセンシングと無線規格判別を行うことで、不特定多数の無線信号を含む広帯域を対象とした探索的なデータ解析をクラウドプラットフォーム上で実行できる情報基盤の実現を目指した。具体的には、スペクトラムセンシングをクラウドプラットフォーム上で実行するためスケールアウト可能とすること、無線規格に依存しない特徴量による無線規格判別を可能とすること、クラウドプラットフォーム上で無線信号処理を実行するため、信号処理統合環境のユーザインタフェースおよびデータ管理機構を処理主体から分離し動的構成変更可能にすることを課題として取り組んだ。以下に、課題ごと成果を詳述する。

(課題1)

センシングのスケールアウトについては、3つの圧縮アーキテクチャとの2つの再構成アルゴリズムについて、2段階のセンシングプロセス全体の圧縮性能を評価した。その結果、良好な圧縮性能を持つ手法の組み合わせが得られた。本成果について、IEEE CSPA2018において発表した。具体的には、2.4GHz帯のIEEE 802.15.4を想定したシミュレーション実験を行い、信号のチャンネル配置を変更することは圧縮性能への影響が小さく、スパース度の程度に関わらずRFとOMPの組み合わせが評価された組み合わせの中で最も圧縮されることを示した。また、周波数利用環境で信号源数が8以下の場合、ナイキストベースの広帯域センシングを用いた2段階センシングでは、サンプル数が30.6%~84.6%に減少した。

(課題2)

スペクトログラム特徴量による無線規格判別についての成果についてAPCC2017に採録され、発表した。無線信号のスペクトログラム特徴量を用いる無線規格判別についての特徴量の正規化手法、オンライン学習アルゴリズムの識別性能について検討した成果については、SICE Journal of Control, Measurement, and System Integrationに採録された。本論文では、多様化する無線通信規格に容易に適応できる無線通信規格識別システムの実装について論じた。はじめに、オンライン学習のための無線特徴正規化手法を用いて、特徴量が類似した無線通信規格の識別精度を向上させた。さらに、提案手法を同一サブギガヘルツ周波数帯に複数の無線通信規格が存在する状況に適用して評価を行った。シミュレーション実験により、SCW オンライン学習アルゴリズムを用いて無線通信規格分類器を生成する際のROC曲線と2クラスと3クラスの無線通信規格識別の平均精度で評価した。2クラス無線通信規格の識別精度についての結果では、同一周波数帯に存在する複数の無線通信規格の識別精度を提案手法が既存手法と比較して40%近く向上させることが示された。3クラス無線通信規格の識別精度についての結果では、同一周波数帯に存在する複数の無線通信規格の識別精度を向上させるためには、ソートと分割の組み合わせが重要であることが示された。さらに、再学習無線通信規格識別の結果から、提案手法は既存手法と比較して同一周波数帯域内の複数の無線通信規格の識別精度を49%近く向上させることがわかった。

測距・測位不要な無線信号源の近接関係推定について、階層的クラスタリング結果を評価する

手法の成果については、Hindawi Mobile Information Systems に採録された。階層的クラスタリングによる群推定では適した精度評価手法が無かったため、新たにこれを評価する指標として、最近傍候補数を提案した。最近傍候補数によって、階層型クラスタリングを用いるシステムに適した要素技術を定量的に評価することが可能となった。

測距・測位不要な無線信号源の近接関係推定について、ノイズ耐性のある離散フーリエ変換を用いた距離関数の成果は、信学論(通信)に採録された。時系列データ分析で一般的に使われている距離関数にはノイズに弱いという欠点があるものがあった。本論文は、電波伝搬環境の影響を受けやすい RSSI 時系列データから発信源の近接関係を推定する問題に対し、ノイズ耐性の期待できる離散フーリエ変換を用いた距離関数の適用効果を定量的に評価した。離散フーリエ変換を用いた距離関数はユークリッド距離と比べ最大約 7dB、DTW と比べ最大 3dB のノイズへの耐性を示した。また同じ RSSI 変動の大きさで比較すると、ユークリッド距離と比べ平均約 20%、DTW と比べ平均約 12%の精度改善効果があった。

信号源のクラスタリングについて派生する研究として、レンジベース位置推定のための階層クラスタリングに基づくリファレンスノード選択について成果が、IEEE WF-IoT2018 に採録され、発表した。本稿では、位置推定精度の劣化を抑えつつ使用するリファレンスノードの数を絞り込むことができる手法の提案を提案している。

(課題3)ユーザインタフェース分離と動的構成変更、ソフトウェア無線アプリケーションのタスク並列分散コンピューティングについての成果については、APCC2016 採録され発表するとともに、IPSJ Journal of Information Processing に採録された。本論文では、ソフトウェア無線環境のクラウド基盤化を実現するための GNU Radio Companion (GRC) を基に、ユーザインタフェース分離と動的構成変更が可能ないようにシステムを実装し、評価した。また、既存のブロックでは、ソフトウェア資産の互換性が概ね維持されていることが確認した。これにより、ユーザの裁量でソフトウェア無線機をクライアントとクラウド間に配置できる。タスク並列分散コンピューティングの導入により、レイテンシを改善する可能性があり、実行時の CPU 使用率と IPC 値の関係からソフトウェア無線アプリケーションの性能向上に効果があることが示された。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 4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 ASAKURA Kenta, ICHIKAWA Haruhisa, KAWAKITA Yuusuke	4. 巻 12
2. 論文標題 Normalization of Radio Feature for Online Learning for Identification in Cognitive Radio	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration	6. 最初と最後の頁 134 ~ 141
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.9746/jcmsi.12.134	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 -
1. 著者名 Suzuki Hirotaka, Ichikawa Haruhisa, Mitsugi Jin, Kawakita Yuusuke	4. 巻 27
2. 論文標題 GNU Radio-based Cloud Development Environment for Software-defined Radio Users	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Information Processing	6. 最初と最後の頁 287 ~ 296
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.2197/ipsjjip.27.287	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 富士悟, 朝倉健太, 市川晴久, 川喜田佑介	4. 巻 118
2. 論文標題 無線特徴量の正規化手法へのニューラルネットワークの適用	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 電子情報通信学会技術研究報告 (ASN)	6. 最初と最後の頁 245-249
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
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 -
1. 著者名 丹保 征哉, 川喜田佑介, 市川晴久	4. 巻 J100-B
2. 論文標題 RSSI系列類似性比較による発信源の近接関係推定における離散フーリエ変換を用いた距離関数の適用効果	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 電子情報通信学会論文誌 (通信)	6. 最初と最後の頁 569-571
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.14923/transcomj.2016JBL4018	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 -

1. 著者名 Masaya Tanbo, Ryoma Nojiri, Yuusuke Kawakita and Haruhisa Ichikawa	4. 巻 2017/ Article ID 3637814
2. 論文標題 Active RFID Attached Object Clustering Method with New Evaluation Criterion for Finding Lost Objects	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Hindawi Mobile Information Systems	6. 最初と最後の頁 1-12
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1155/2017/3637814	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6件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 4件)

1. 発表者名 Hiroki Kobayashi, Haruhisa Ichikawa, Yuusuke Kawakita
2. 発表標題 Analysis on Data Compression of Two-stage Sensing for Cognitive Radio
3. 学会等名 IEEE 14th International Colloquium on Signal Processing & Its Applications (CSPA) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hayato Nomura, Haruhisa Ichikawa, Yuusuke Kawakita
2. 発表標題 Reference Node Selection for Range-based Localization Using Hierarchical Clustering
3. 学会等名 IEEE WF-IoT 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kenta Asakura, Haruhisa Ichikawa, Yuusuke Kawakita
2. 発表標題 Normalization Method for Online Learning on Radio Access Technology Identification in Cognitive Radio
3. 学会等名 APCC 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Hiroataka Suzuki, Yuusuke Kawakita, Haruhisa Ichikawa
2. 発表標題 Remote Implementation of GNU Radio-based SDR Development Environment
3. 学会等名 Proc. APCC 2016 (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 川喜田佑介, 市川晴久
2. 発表標題 招待講演 生活環境に埋め込まれる無線センサ端末を利用する環境センシングのための IoT インフラストラクチャ
3. 学会等名 信学技報 (招待講演)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 朝倉健太, 市川晴久, 川喜田佑介
2. 発表標題 無線アクセス技術識別における半教師あり学習の適用
3. 学会等名 SICE SSS IoTワークショップ
4. 発表年 2018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
---------------------------	-----------------------	----