

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 15 日現在

機関番号：12612

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2013～2016

課題番号：25240010

研究課題名(和文) 自立給電型ワイヤレスセンサLSIを用いた実世界情報収集システムの研究

研究課題名(英文) Research on real world sensing system by energy harvesting wireless sensor LSIs

研究代表者

市川 晴久 (Haruhisa, Ichikawa)

電気通信大学・大学院情報理工学研究科・教授

研究者番号：80463959

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 36,300,000円

研究成果の概要(和文)：半導体技術、ネットワークおよびコンピューティングの指数関数的性能向上を活用し、大量の自立給電型ワイヤレスセンサLSI(RFセンサ)を用いる実世界情報センシング技術の研究開発を行った。電波情報をインターネット経由でクラウドに集め、自立給電化のために脆弱化するRFセンサの無線通信性能をクラウド側の信号処理によって補償して活用するインフラを目指し、アーキテクチャと要素技術を研究した。さらに、これらのインフラ技術の有望な応用として、パッシブRFIDを分散センサとして機能拡張して用いる技術、及びアクティブRFIDを添付したモノを探すためにクラスタリングする技術について成果を得た。

研究成果の概要(英文)：Infrastructure technologies have been researched for sensing real worlds embedded with a massive amount of energy harvesting wireless sensor LSIs (RF sensors) assuming the exponential performance evolution of devices, networks and computing. A main focus of the research is on compensating RF sensors for their poor radio communication signals caused by extremely lowered energy consumption with processing radio space information transferred to the cloud via the Internet. In addition, research results on promising application of the infrastructure have been produced in two areas: enhancement of passive RFIDs to cooperate as distributed sensors, and active RFID attached objects clustering method for finding lost objects.

研究分野：情報ネットワーク

キーワード：ユビキタスネットワーク ワイヤレスセンサ 自立給電 IoT 機械学習

1. 研究開始当初の背景

(1) 微細加工技術に代表される半導体技術の指数関数的性能向上の成果を生かすために、モノの管理、農作物の生育管理など、ICT 機器などとは全く異なる用途に半導体技術をワイヤレスセンサ LSI として大量に使用することが期待されている。ワイヤレスセンサネットワークは、レイヤ 2, 3 の無線プロトコルを中心に研究されている。省電力は研究の主要課題の一つであり、アクティブな時間を最小化するために MAC プロトコルや、アドホックネットワークのための省電力経路管理プロトコルなどが多く研究されている。しかし、このような技術では、安定した周波数源の使用を前提としており、自律給電するには大きすぎる電力を消費している。生活環境にあまねく存在する振動エネルギーで自立給電動作するには、無線通信の消費電力を従来の 1/1000 近くに削減することが求められる。このような消費電力削減を達成した研究例では、回路の極限的な簡素化のために無線周波数源が大きく揺らぐ課題が明確になった。

(2) ワイヤレスセンサネットワークの無線通信技術は、電力源の制約と応用に適合すべく革新されていくと想定される。研究申請者は、広帯域に電波情報をデジタルサンプリング、転送し、クラウド上のソフトウェア無線機でセンサ情報を受信するシステム ADUN を提案した。インターネットの高速大容量化とクラウドの性能向上が続いており、ADUN のように、広帯域電波情報をクラウドに集め、ソフトウェア処理することが可能になる時期が近付いている。

2. 研究の目的

本研究の目的は、自律給電型ワイヤレスセンサの脆弱な無線通信性能をネットワーク側で補償し、大量のワイヤレスセンサ LSI (以下、RF センサと呼ぶ) を用いた実世界情報センシングを実現する技術の開発である。RF センサ無線周波数の不安定性も、適切にばらつけば通信衝突回避に有効となるように、大量の RF センサをネットワーク側で選択的に活用するメカニズムを用意することにより、RF センサの低い通信性能を補償できる可能性がある。このような補償メカニズムをソフトウェアで実装し柔軟に更新できるようになれば、RF センサの技術革新とネットワークプラットフォームの技術革新とが相補的に進展することが期待できる。

3. 研究の方法

大量の RF センサを実世界情報センシングに用いるには、RF センサを評価、スクリーニングして、選択的に活用する基盤が求められる。このような基盤に関わる技術課題の設定においては、それらの課題解決によって実現可能になる応用の想定が重要である。下記の研究項目を設定して研究を推進した。

(1) 自律給電型 RF センサ LSI を用いる実世界情報センシングシステムの開発、及び RF 集団による統合的センシング機能の実現

全研究項目の成果を統合し、半導体技術による量産効果を高度な実世界情報センシングに結び付ける方式を検討し、最終的な実証実験を実施する。そのための基盤システム機能を目指し、多数の RF センサの通信性能のばらつきを評価する手法を検討する。これに基づきセンシングすべき実世界情報に適合する RF センサをスクリーニング抽出し統合的に使用してセンシングする方式を検討する。

(2) RF センサ通信・評価・スクリーニング技術

近傍に存在する RF センサの数を制限することにより通信衝突を避け通信性能を上げ、一方、数を増やしてセンシング性能を高めることが期待できる。このような、アクティブな RF センサの数を制御するための RF センサ起動、停止を可能にする RF センサ用無線通信技術を検討する。また、RF センサの通信性能評価や位置推定、スクリーニング処理は、RF センサからの電波情報をソフトウェア処理して実現する。このための高速処理アルゴリズムと分散処理技術を検討する。

(3) 実世界情報センシング技術

実用的に有望な実世界情報センシング問題について、センサ集団の情報をセンシングするための、RF センサ配置法、RF センサを用いて目的センシング情報を得る手法を検討する。

4. 研究成果

(1) 電波空間情報のスケーラブルな広域配信アーキテクチャ

RF センサの低性能を補償するネットワークプラットフォームを構築するため、電波情報をデジタルサンプリングしてクラウド上のソフトウェア無線受信機 (SDR) に配信するアーキテクチャを開発した。SDR がクライアント、電波情報サンプラーがサーバとなるアーキテクチャである。

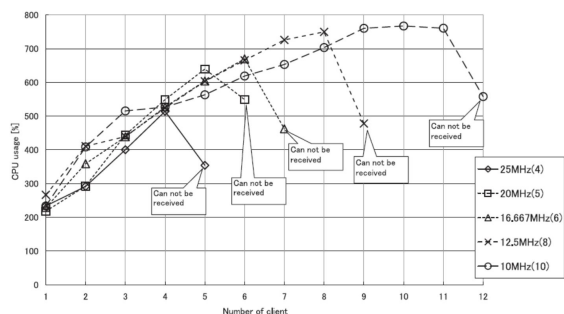


図 1 クライアント数と総 CPU 使用率の関係

同じ物理空間に異なる無線方式の RF センサが多数存在し、それらの RF センサを使う実世界情報センシングアプリケーションが多数登場すると想定し、電波情報配信ストリー

ムサーバの性能律速要因を実験、分析した。その結果、配信処理の中でクライアント対応のバンドパスフィルタ処理が主要負荷となること、CPU コア数が配信可能なクライアント数の上限を規定することを明らかにした。

### (2) 広帯域信号の中心周波数検出

広帯域に広がる信号の中心周波数を高速・高精度で検出する手法を提案し、解析的に評価した。送信信号の不安定性により送信周波数が変動してしまう場合や送信信号に関する知識が受信側がない場合は、信号を発見するためスペクトルセンシング技術が適用される。広い周波数帯を狭帯域に分割し掃引することで信号検出を効率化する手法も存在するが、分割した狭帯域に収容できない広帯域信号に対しては一つの信号から複数の位置でピークを検出してしまい中心周波数の推定精度が低下する。この問題に対処するため、動的に周波数スパンを信号のサイズに合わせ、単一の広帯域信号から単一のピークを検出する手法を提案し、解析的な評価により広帯域信号に対して、先行研究よりも高速・高精度に中心周波数を推定できることを確認した。

### (3) RF センサへの通信チャンネル割り当て

省電力化のために低性能な RF センサでは、通信チャンネルアクセス衝突を RF センサに検出、対処させるのは適切でない。RF センサにメモリ機能付きパッシブ RFID を内蔵させ、ネットワーク側から通信チャンネルを割り当てる 2 方式を検討した。

通信に周波数拡散方式を用いることを前提に、周波数拡散コードをすべての RF センサに割り当て、書き込む方法に対して、RF センサに既に割り当てられているコードを読み出し、重複するコードが割り当てられている RF センサのみに再割り当てする方法を比較した。RFID へのデータ書き込み時間が読み出し時間に比べて長いことが多く、その場合、重複する既存割り当てコードのみを再割り当てする方法が効率的であることを定量評価した。

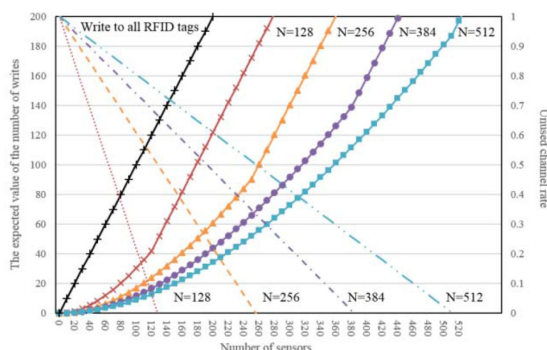


図 2 RF センサ数と法に対する書き込み回数の期待値とチャンネル未割当率

通信チャンネルを番号管理し、RF センサが RFID の ID 値を総チャンネル数で剰余演算して自身の通信チャンネル番号をローカルに決定する方法を提案、評価した。この方法では、チャンネルの重複割り当てを生ずる可能性があるため、ネットワーク側がチャンネル書き込みに先立ち全 RF センサの ID を読み出し、重複を判定して書き込む。チャンネル数に対して RF センサ数が少ないとチャンネル重複確率が下がる一方、チャンネル使用効率が低下する。これらのトレードオフ関係を定量評価した。

### (4) RF センサの無線規格分類

動作帯域を共有する多種類の RF センサが開発、設置される状況を想定し、RF センサ信号を検出し、該当する SDR を起動して信号受信する方式を実現するため、RF センサ信号の無線規格を分類、識別する技術を検討した。無線帯域の共有を目指すコグニティブ無線技術の開発においては、セカンダリユーザがプライマリユーザの帯域使用を妨げないように、プライマリユーザ信号の有無を検出する技術が検討されている。しかし、本研究では、信号の有無に加えて、その無線規格を識別することが要求される。識別すべき無線規格の電波情報の特徴量として、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、教師あり学習を行って無線規格を識別する技術を提案した。単一信号のみが存在する場合の提案特徴量の信号検出性能は従来の特徴量(中心周波数、帯域等)と同程度である一方、従来手法では判別できなかった重畳する信号を判別できることを実験により明らかにした。

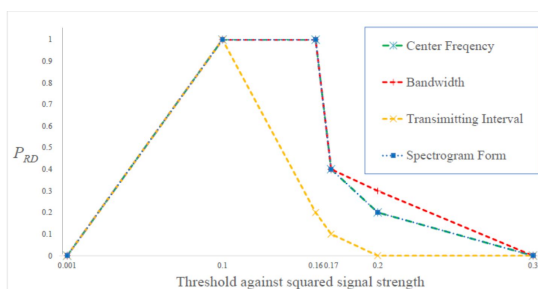


図 3 提案特徴量と従来特徴量の信号判別性能比較(単一信号のみが存在する場合)

### (5) RF センサの方向検知

省電力・小形 RF センサの位置を簡単に検知できることは、物品管理、環境モニタリングなど様々なアプリケーションで便利である。屋内で正確に位置測定するためにはアレイアンテナを用いる手法が有効であるが、その際必要となるコヒーレント受信器は一般的にコストが高くなる。本研究では、近年大幅な低価格化が進んだソフトウェア無線装置(SDR 装置)を複数用いて、簡易的にアレイアンテナを構成し、RF タグの方向検知を実

現することを狙った。この場合の問題は、各 SDR 装置間の位相バイアス補正である。この問題に対して、アンテナと SDR 装置間に RF スイッチを入れて切り替えるモノパルススイッチ方式を考案し、その有効性を実験によって明らかにした。

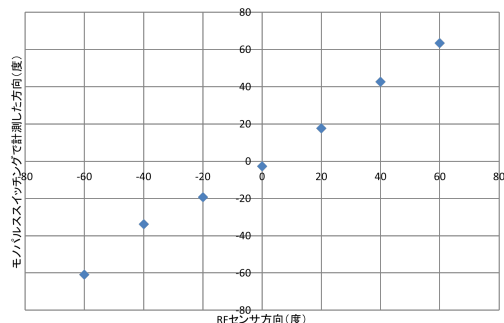


図 4 RF センサの実際の方向と計測結果

#### (6) アクティブ RFID の近接関係推定

無線タグ応用において位置推定への関心は高く、多くの位置推定手法が提案されてきたが、物理的な位置を測定しようとする既存手法は、装置や事前調整などの測定コストが高いという問題点がある。本研究では、モノ探しや混雑度推定などの応用を念頭に、RF センサの物理的位置を推定する代わりに、測定コストが低い受信信号強度 (RSSI) を用いて論理情報である近接関係を推定する問題に取り組む、次の 4 つの成果を得た。

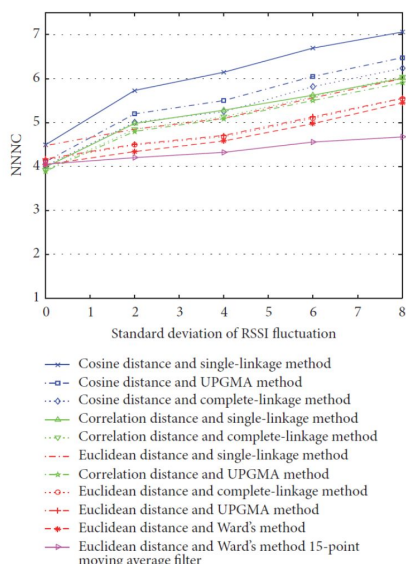


図 5 RSSI 系列間距離関数及びクラスタリング法の組み合わせに対する最近傍候補数

移動に伴う RSSI 変化の類似性から実空間上で近接する RF センサを群として推定する群推定手法を提案、群推定手法の推定精度評価パラメータとしての最近傍候補数を提案、特定の RF センサの周りにおける RF センサを物理的な近さで順位推定する近接度推定手法を提案、RSSI 変化の類似性を評価する距離関数に離散フーリエ変換を適用し、電

波伝搬環境の影響除去に有効であることをシミュレーション実験評価。

#### (7) マルチサブキャリア多元接続

LSI センサに適した多元接続方式としてパッシブ RFID の仕組みを応用したマルチサブキャリア多元接続方式を考案した。この方式では、電波のサブキャリア後方散乱 (backscatter) を異なる周波数に配置することで擬似的な FDMA を実現し、複数の RF センサからの同時ストリーミングを実現する。サブキャリアを周波数軸に複数配置することで発生する高調波の干渉は受信器のソフトウェア無線処理によって除去する。この場合、バックスキッタの高調波を正確に計算する必要があるが、それを Hilbert 変換による解析空間での処理によって正確に実施する方法を考案し、シミュレーションおよび実験によってその有効性を示した。

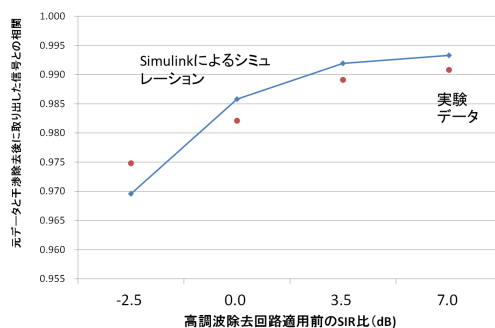


図 6 マルチサブキャリア多元接続方式の干渉除去性能

#### 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)

[雑誌論文](計 6 件)(全て査読有)

丹保証也, 川喜田佑介, 市川晴久, "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," 電子情報学会論文誌 (通信), 2017.

Masaya Tanbo, Ryoma Nojiri, Yuusuke Kawakita and Haruhisa Ichikawa, "Active RFID Attached Object Clustering Method with New Evaluation Criterion for Finding Lost Objects," Hindawi Mobile Information Systems, Volume 2017, Article ID 3637814, 12 pages.

Ken Takahashi, Kenji Inoue, Yuusuke Kawakita, Jin Mitsugi, Haruhisa Ichikawa, "A Method to Assign Spread Codes Based on Passive RFID Communication for Energy Harvesting Wireless Sensors Using Spread Spectrum Transmission," EAI

Endorsed Transactions on Ambient Systems, vol. 2, issue 6, pp.e5:1-4, August 2015.

藤原寛, 佐藤学, 川喜田佑介, 市川晴久, "ブラインドスペクトルセンシングのための広帯域信号の中心周波数検出手法," 電子情報通信学会論文誌(通信), vol. J98-B, no. 7, pp. 717-726, July 2015.

Yuusuke Kawakita, Haruhisa Ichikawa "A resource Analysis of Radio Space Distribution for the Wide-area Virtualization of Wireless Transceivers," IEICE Trans. Commun., vol. E97-B, no. 09, pp. 1800-1807, September 2014.

[学会発表](計 47件)

Masato Miyazawa, Jin Mitsugi, Yuusuke Kawakita, Haruhisa Ichikawa, "Monopulse Switching to Cancel Phase Offset in Array Antenna Comprising Multiple COTS SDRs," Proc. IEEE RFID-TA 2016, pp. 75-80, Sep. 2016, Shunde (China).

Matsuda Tomoaki, Wakisaka Yuuki, Yuusuke Kawakita, Jin Mitsugi, Haruhisa Ichikawa, "Improvement in Multiple Access Channel Allocation for Sensor Node Configuration Based on RFID Communication," Proc. IEEE RFID-TA 2015, pp. 76-80, September 2015, Tokyo (Japan).

Yuki Igarashi, Yuki Sato, Yuusuke Kawakita, Jin Mitsugi, and Haruhisa Ichikawa, "A Feasibility Study on Simultaneous Data Collection from Multiple Sensor RF Tags with Multiple Subcarriers," Proc. IEEE RFID 2014, pp. 177-182 April 2014, San Diego (USA).

Manabu Sato, Yuki Mizutani, Yuusuke Kawakita and Haruhisa Ichikawa, "Feature Quantity for Universal Receivers to Identify Protocols of Radio Services and Devices," Proc. IEEE PICom2013, pp. 434-438, December 2013, Chengdu (China).

出願状況(計 2件)

名称: 測角装置  
発明者: 三次仁、宮澤真琴、市川晴久、川喜田佑介、江川潔  
権利者: 同上  
種類: 特許願  
番号: 2016-180212  
出願年月日: 2016年9月15日  
国内外の別: 国内

6. 研究組織

(1) 研究代表者

市川 晴久 (ICHIKAWA, Haruhisa)  
電気通信大学・大学院情報理工学研究科・教授

研究者番号: 80463959

(2) 研究分担者

川喜田 佑介 (KAWAKITA, Yusuke)  
電気通信大学・大学院情報理工学研究科・助教

研究者番号: 30468540

三次 仁 (MITSUGI, Jin)

慶應義塾大学・環境情報学部・教授

研究者番号: 40383921

寺田 直美 (TERADA, Naomi)

総合研究大学院大学・学内共同利用施設等・助教

研究者番号: 20452526

(平成26年度まで)