

令和元年6月11日現在

機関番号：24506

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2018

課題番号：15K18077

研究課題名（和文）超広帯域レーダによる人体の歩行形態認識と異常検出技術

研究課題名（英文）Human imaging and anomaly detection using ultra-wideband radar

研究代表者

阪本 卓也（Sakamoto, Takuya）

兵庫県立大学・工学研究科・准教授

研究者番号：30432412

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究ではレーダによる人体モニタリング技術の開発を行った。まず、人体からの反射波を時間・距離・角度・速度の多次元空間で解析する手法を開発し、人体の運動を高精度に測定することに成功した。次に、可逆変換とキルヒホッフ積分を併用することで高速・高分解能イメージングを実現した。最後に、畳み込みニューラルネットワークを用いてレーダデータから対象者の運動種別の識別を行う手法を開発した。異常行動を含む運動種別の識別精度は約90%を達成した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

高齢社会で重要となる在宅医療を安全に実施するには運動人体の異常を自動検出する技術が欠かせない。従来、超広帯域レーダによるイメージングには多数のアンテナが必要であった。本研究では対象を人体に特化させ、人体の形状・運動を高精度・高分解能かつ高速に測定する手法を開発し、少数のアンテナのみを用いたモニタリングを実現する技術を開発した。機械学習により高齢者や患者の異常の検知を実現することは安全な在宅医療を実現する上で不可欠であり、開発技術の社会的意義は大きい。

研究成果の概要（英文）：This project developed a technique for the measurement of human postures and activities using a radar system. First, we developed a technique for analyzing radar echoes in the high-dimensional time-range-angle-velocity domain. Next, we realized a high-resolution imaging by combining a reversible transform and Kirchhoff migration. Finally, we applied a machine learning algorithm to radar data for classifying human activities. The developed system achieved an accuracy of approximately 90% in classifying human activities using radar signals.

研究分野：計測工学

キーワード：レーダ 人体 モニタリング イメージング ドップラ 信号処理

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

(1) 近年、在宅介護や在宅医療の重要性はますます高まっている。そのためにも高齢者や患者の行動状況・健康状態を自動的にモニタリングする技術が不可欠である。超広帯域レーダイメージング技術ではカメラと異なりプライバシーの問題を回避することができ、人体の運動認識への応用が期待される。しかし、レーダによる人体の形状や運動の計測および対象者の異常を検知する技術は確立されていなかった。

(2) 超広帯域レーダによる人体イメージングの例としては既に空港の保安検査場で使用されるボディスキャナが挙げられるが、静止人体のみを対象とするため歩行中には使えず、しかもアンテナの機械的走査または大規模アレイが必要で高コストであるためヘルスケア等の応用には適さなかった。対象者の異常を高精度に検出するため、少数アンテナのみを用いた簡易なレーダにより対象者の運動と姿勢を高精度・高分解能で測定する技術が求められていた。

2. 研究の目的

本研究の目的は、少数のアンテナを用いた超広帯域レーダにより対象者の異常を検出する技術を開発することである。人体の運動及び形状の測定を行い、これらの情報を機械学習で処理することで異常を自動検出する。運動推定では、先行技術と比べて少ない素子数で高精度を実現する。形状推定では、先行技術よりも高い分解能を実現する。異常検出では、運動と形状の情報を統合し、機械学習により高精度な異常検出を実現する。

3. 研究の方法

(1) 本研究では少数アンテナのみを用い、人体の姿勢・運動を高精度に推定するための信号処理法を開発する。そのため、異なる周波数帯の超広帯域レーダおよび測定システムを整備し、被験者の参加する測定により反射波の性質を詳細に調べる。本研究で使用するレーダは、中心周波数4.2GHz・帯域幅2.2GHzのマイクロ波レーダ、中心周波数26.4GHz・帯域幅730MHzの準ミリ波レーダ、中心周波数60.5GHz・帯域幅1.25GHzのミリ波レーダ、および中心周波数79GHz・帯域幅2.0GHzのミリ波レーダの4種類であり、いずれも2値位相変調による連続波レーダである。

(2) これら複数のシステムで測定されたデータを詳細に解析し、信号処理手法の開発を進め、研究目的を達成する。開発する信号処理法では、キルヒホッフマイグレーションによる高分解能化、F-Kマイグレーションによる高速化、時間・距離・角度・速度空間における人体運動解析、アダプティブアレイと周波数分離干渉計法の統合による高分解能化、多モード共振器による多チャンネル同時測定、レーダ画像解析手法による時間分解能改善、畳み込みニューラルネットワークによる機械学習といった手法を導入し、研究目的を達成するシステムを実現する。

4. 研究成果

(1) まず、レーダによる人体形状推定の分解能を改善するため、拡張キルヒホッフマイグレーション法を用いた高速レーダ画像化手法の開発を行った。拡張キルヒホッフマイグレーションは反射点と送受信アンテナの間の距離の情報が必要であるが、未知の目標形状に対しては事前には知ることはできない。そのため、空間の各グリッドを個別に計算する時間領域手法が使われていた。本研究では、実空間とデータ空間の間に成り立つ可逆変換を用いた高速イメージング手法であるSEABED法を併用することで、周波数-波数領域で高速処理を実現するF-Kマイグレーションと統合し、高分解能画像化を高速処理することに成功した。図1に従来手法(DASマイグレーション、拡張キルヒホッフマイグレーション、F-Kマイグレーション)および提案手法による画像を示す。図中の値は空間分解能である。この結果より、提案法は高速処理を可能としただけでなく、従来法よりも高い空間分解能でのイメージングが可能であることがわかる。

(2) 歩行人体の各部位が異なる視線方向速度で運動している場合には、レーダ受信信号を周波数解析することで複数部位を周波数領域で分離し、各々の部位の到来角を3素子のみを用いた干渉計により推定することができる。しかし、従来の周波数領域干渉計法では複数部位が同一の視線方向速度で運動している場合には干渉により大きな誤差が生じていた。我々は、超広帯域レーダを導入することにより距離方向に複数目標を分離し、アレイアンテナを導入することで角度方向での分離も実現した。こうして、時間・距離・角度・速度空間の多次元での複数部位分離をレーダイメージングに導入することにより、少数のアンテナ素子のみで従来よりも大幅に分解能を改善することに成功した。続いて、ドップラー成分を多次元空間で表現し、人体の運動に固有の特徴を解析する手法を開発した。この手法により、推定された反射点位置が時間と共に滑らかに変化する性質を用いて人体の複数部位を追跡する手法を開発し、人体の運動・形状の同時計測を実現した。図2に歩行人体のマイクロドップラを時間・速度・距離の3次元空間で表現した例を示す。

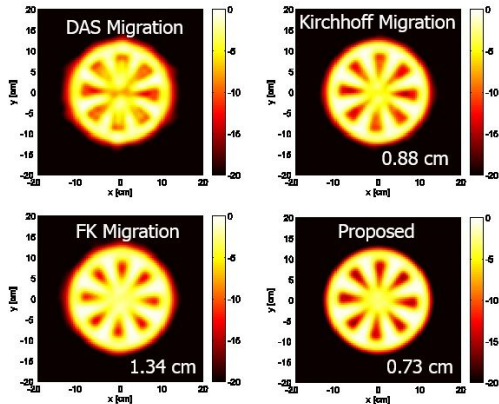


図1 3種の従来法および提案法の画像化例

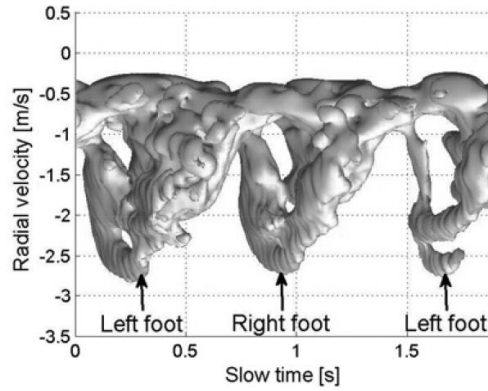


図2 人体マイクロドップラの3次元空間表現

(3) 複数アンテナ素子を用いたレーダイメージングの測定を高速化するため、複数の入出力ポートを有する多モード共振器を導入した。多モード共振器の入出力ポートの位相は、周波数に敏感であるため、わずかな周波数変化により応答が不規則に変化する。この性質を用いて、複数の送受信素子対を用いた測定を同時に行う。周波数に依存する各素子対の応答を事前に測定しておき、複数の送受信対が干渉した受信信号に周波数応答を乗じることにより、所望の素子対のみに対応する信号を得ることができる。これは、時間領域においては各信号が不規則系列で変調されているのと同値であるため、符号変調多元接続を受動素子のみで実現したものと考えることもできる。この手法を用いて、人体のレーダイメージングに必要な測定を高速化し、しかも簡易なシステムのみにより実現することに成功した。

(4) 人体からの反射波を解析して対象者の運動を調べる上で、四肢の運動によるドップラシフトであるマイクロドップラの情報が極めて重要である。マイクロドップラは時間と共に変化する周波数成分であるため、時間周波数解析が不可欠である。古典的な時間周波数解析法である短時間フーリエ変換は処理が簡単ではあるものの時間分解能と周波数分解能の間にトレードオフの関係がある。この計測限界を緩和するため、各種の高分解能手法が開発されてきた。我々は時間分解能のさらなる改善を図るため、超広帯域信号の性質を用いて、時間距離領域における信号を画像として考え、画像のテクスチャ成分から閉形式で複数の干渉信号を分離し、各々のドップラ速度を推定するための処理法を開発した。開発手法では、画像の3階微分を用いて直接的に速度を求めることができるため、時間方向に必要なサンプル数は僅か4と、従来の高分解能手法と比べても極めて小さく、高い時間分解能が実現された。開発手法の性能は歩行人体からの反射波に適用し、その有効性が確認された。図3に歩行人体の測定風景を、図4に開発手法で推定したドップラ速度を示す。赤色は接近、青色は遠ざかる方向の速度に対応している。

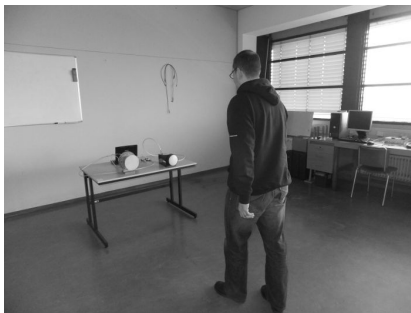


図3 歩行人体のレーダ測定風景

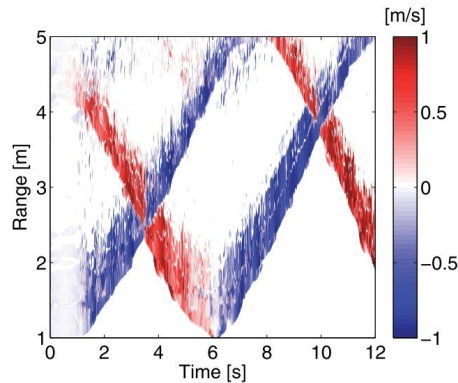


図4 閉形式で導かれるドップラ速度

(5) 以上で開発された要素技術を用いて、人体モニタリング技術の開発を行った。まず、複数人体からの反射波を信号のテクスチャ情報を用いて自動分離し、各人体からの反射波を多次元空間で統合的に解析する。人体から得られるレーダ信号の特徴を機械学習により学習し、対象者の運動種別を自動識別する。実験参加者に複数種類の行動を繰り返し行わせてレーダ測定を実施し、レーダデータに運動種別のラベル付けを行ったレーダ信号のデータベースを構築した。機械学習には畳み込みニューラルネットワークを用いた。正常時と異常時の運動種別をそれぞれ複数選択し、被験者のレーダ信号を学習させた。多層畳み込みニューラルネットワークによる運動種別の識別精度を評価した結果、約90%の精度で識別できることを確認し、開発手法の有効性が示された。

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計17件)

- (1) 大石健太郎, 奥村成皓, 阪本卓也, 佐藤 亨, 水谷研治, 井上謙一, 福田健志, 酒井啓之, "人体表面変位の高調波成分に着目した超広帯域 Doppラレーダによる非接触心拍間隔測定", *電子情報通信学会論文誌C*, vol. J101-C, no. 11, pp. 412-420, Nov. 2018.
- (2) Takuya Sakamoto, Xiaomeng Gao, Ehsan Yavari, Ashikur Rahman, Olga Boric-Lubecke, and Victor M. Lubecke, "Hand gesture recognition using a radar echo I-Q plot and convolutional neural network", *IEEE Sensors Letters*, vol. 2, no. 3, pp. 1-4, doi: 10.1109/LSENS.2018.2866371, Sep. 2018.
- (3) Takuya Sakamoto, Masashi Muragaki, Kazunori Tamura, Shigeaki Okumura, Toru Sato, Kenji Mizutani, Kenichi Inoue, Takeshi Fukuda, and Hiroyuki Sakai, "Measurement of instantaneous heart rate using radar echoes from the human head", *Electronics Letters*, vol. 54, no. 14, pp. 864-866, doi: 10.1049/el.2018.0811, July 2018.
- (4) Ashikur Rahman, Victor Lubecke, Olga Boric-Lubecke, Jan Prins, and Takuya Sakamoto, "Doppler radar techniques for accurate respiration characterization and subject identification", *IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems*, vol. 8, no. 2, pp. 350-359, doi:10.1109/JETCAS.2018.2818181, June 2018.
- (5) Takuya Sakamoto, Pascal J. Aubry, Shigeaki Okumura, Hirofumi Taki, Toru Sato, and Alexander G. Yarovoy, "Noncontact measurement of the instantaneous heart rate in a multi-person scenario using X-band array radar and adaptive array processing", *IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems*, vol. 8, no. 2, pp. 280-293, doi:10.1109/JETCAS.2018.2809582, June 2018.
- (6) Motoshi Anabuki, Shigeaki Okumura, Toru Sato, Takuya Sakamoto, Kenshi Saho, Mototaka Yoshioka, Kenichi Inoue, Takeshi Fukuda, and Hiroyuki Sakai, "Ultrawideband radar imaging using adaptive array and Doppler separation", *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 53, no. 1, pp. 190-200, Feb. 2017.
- (7) Takuya Sakamoto, Akihiko Matsuoka, and Hidekuni Yomo, "Estimation of Doppler velocities from sub-Nyquist ultra-wideband radar measurements", *IEEE Sensors Journal*, vol. 16, no. 23, pp. 8557-8565, Dec. 2016.
- (8) Takuya Sakamoto, Daichi Akiyama, Takuro Sato, and Toru Sato, "Spectrum-free estimation of Doppler velocities using ultra-wideband radar", *IEEE Access*, vol. 5, pp. 3240-3249, Oct. 2016.
- (9) Shigeaki Okumura, Takuya Sakamoto, Toru Sato, Mototaka Yoshioka, Kenichi Inoue, Takeshi Fukuda, and Hiroyuki Sakai, "Comparison of clutter rejection techniques for measurement of small displacements of body surface using radar", *Electronics Letters*, vol. 52, no. 19, pp. 1635-1637, DOI: 10.1049/el.2016.1461, Sep. 2016.
- (10) Takuya Sakamoto, Toru Sato, Pascal Aubry, and Alexander Yarovoy, "Fast imaging method for security systems using ultrawideband radar", *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 52, no. 2, pp. 658-670, April 2016.
- (11) Thomas Fromenteze, Ettiien Lazare Kpré, David Carsenat, Cyril Decroze, and Takuya Sakamoto, "Single-shot compressive multiple-inputs multiple-outputs radar imaging using a two-port passive device", *IEEE Access*, vol. 4, pp. 1050-1060, March 2016.
- (12) Takuya Sakamoto, Ryohei Imasaka, Hirofumi Taki, Toru Sato, Mototaka Yoshioka, Kenichi Inoue, Takeshi Fukuda, and Hiroyuki Sakai, "Feature-based correlation and topological similarity for interbeat interval estimation using ultrawideband radar", *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. 63, no. 4, pp. 747-757, April 2016.
- (13) Hiroki Yamazaki, Takuya Sakamoto, Hirofumi Taki, and Toru Sato, "False image suppression in two-dimensional shape estimates of a walking human using multiple ultra-wideband Doppler radar interferometers", *IEICE Transactions on Communications*, vol. E99-B, no. 1, pp. 134-142, Jan. 2016.
- (14) Takuya Sakamoto, Shigeaki Okumura, Ryosuke Imanishi, Hirofumi Taki, Toru Sato, Mototaka Yoshioka, Kenichi Inoue, Takeshi Fukuda, and Hiroyuki Sakai, "Remote heartbeat monitoring from human soles using 60-GHz ultra-wideband radar", *IEICE Electronics Express*, vol. 12, no. 21, pp. 20150786, Oct. 2015.
- (15) Yuan He, Pavlo Molchanov, Takuya Sakamoto, Pascal Aubry, Francois Le Chevalier, and Alexander Yarovoy, "Range-Doppler surface: a tool to analyse human target in ultra-wideband radar", *IET Radar, Sonar & Navigation*, vol. 9, no. 9, pp. 1240-1250, doi: 10.1049/iet-rsn.2015.0065, Dec. 2015.
- (16) Takuya Sakamoto, Hiroki Yamazaki, and Toru Sato, "Two-dimensional imaging of a pedestrian using multiple wideband Doppler interferometers with clustering-based echo association", *IEICE Transactions on Communications*, vol. E98-B, no. 9, pp. 1795-1803, Sep. 2015.
- (17) Takuya Sakamoto, Toru Sato, Pascal Aubry, and Alexander Yarovoy, "Ultra-wideband radar imaging using a hybrid of Kirchhoff migration and Stolt F-K migration with an inverse boundary

scattering transform", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 63, no. 8, pp. 3502-3512, Aug. 2015.

[学会発表](計63件)

- (1) Takuya Sakamoto, "Recent progress in millimeter-wave radar signal processing", *Global Symposium on Millimeter Waves 2019 (GSMM 2019)*, May 2019.
- (2) Takuya Sakamoto, "Noncontact measurement of human vital signs during sleep using low-power millimeter-wave ultrawideband MIMO array radar", *2019 IEEE International Microwave Biomedical Conference (IMBioC)*, May, 2019.
- (3) Kentaro Konishi and Takuya Sakamoto, "Automatic tracking of human body using millimeter-wave adaptive array radar for noncontact heart rate measurement", *2018 Asia-Pacific Microwave Conference*, November, 2018.
- (4) Takuya Sakamoto, Kentaro Konishi, Masashi Muragaki, Shigeaki Okumura, and Toru Sato, "Adaptive array radar imaging of moving human body for measurement of vital signs", *The 40th Progress In Electromagnetics Research Symposium*, August, 2018.
- (5) Takuya Sakamoto, Kentaro Konishi, Kosuke Yamashita, Masashi Muragaki, Shigeaki Okumura, and Toru Sato, "Adaptive array radar imaging of a human body for vital sign measurement", *2018 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting*, July, 2018.
- (6) Takuya Sakamoto, Hang Song, and Takamaro Kikkawa, "Radar imaging of breast cancer using Kirchhoff migration and singular value decomposition", *2017 IEEE Conference on Antenna Measurements & Applications*, December 2017.
- (7) Takuya Sakamoto, Xiaomeng Gao, Ehsan Yavari, Ashikur Rahman, Olga Boric-Lubecke, and Victor M. Lubecke, "Radar-based hand gesture recognition using I-Q echo plot and convolutional neural network", *2017 IEEE Conference on Antenna Measurements & Applications*, December 2017.
- (8) Takuya Sakamoto, Hang Song, and Takamaro Kikkawa, "Breast cancer imaging using ultra-wideband radar and modified Kirchhoff migration", *The 2nd International Symposium on Biomedical Engineering*, November, 2017.
- (9) Takuya Sakamoto, Pascal J. Aubry, Alexander G. Yarovoy, Shigeaki Okumura, Hirofumi Taki, and Toru Sato, "Super-resolution array radar imaging of human bodies for heartbeat monitoring", *XXXIIInd International Union of Radio Science General Assembly & Scientific Symposium*, August, 2017.
- (10) Takuya Sakamoto, Toru Sato, Kenta Iwasa, and Hidekuni Yomo, "Frequency-domain interferometric imaging and velocity vector estimation using networked ultra-wideband 80-GHz array radar systems", *2017 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting*, July, 2017.
- (11) Motoshi Anabuki, Shigeaki Okumura, Takuya Sakamoto, Kenshi Saho, Toru Sato, Mototaka Yoshioka, Kenichi Inoue, Takeshi Fukuda, and Hiroyuki Sakai, "High-resolution imaging and separation of multiple pedestrians using UWB Doppler radar interferometry with adaptive beamforming technique", *The 11th European Conference on Antennas and Propagation*, March, 2017.
- (12) Takuya Sakamoto, "Human body imaging and remote vital monitoring using UWB Doppler radar", *The 11th European Conference on Antennas and Propagation*, March, 2017.
- (13) Masashi Muragaki, Shigeaki Okumura, Katsutoshi Maehara, Takuya Sakamoto, Mototaka Yoshioka, Kenichi Inoue, Takeshi Fukuda, Hiroyuki Sakai, Toru Sato, "Noncontact respiration monitoring of multiple closely positioned patients using ultra-wideband array radar with adaptive beamforming technique", *The 42nd IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing*, March 2017.
- (14) Takuro Sato, Takuya Sakamoto, Shigeaki Okumura, and Toru Sato, "Multiple target tracking and separation technique based on texture information in range-time image using ultra-wideband radar", *2016 International Symposium on Antennas and Propagation*, Oct. 2016.
- (15) Masashi Muragaki, Shigeaki Okumura, Takuya Sakamoto, and Toru Sato, "Non-contact respiration measurement using ultra-wideband array radar with adaptive beamforming technique for cancer radiotherapy", *2016 International Symposium on Antennas and Propagation*, Oct. 2016.
- (16) Motoshi Anabuki, Shigeaki Okumura, Takuya Sakamoto, Kenshi Saho, Toru Sato, Mototaka Yoshioka, Kenichi Inoue, Takeshi Fukuda, and Hiroyuki Sakai, "High-resolution imaging and identification of multiple pedestrians using UWB Doppler radar interferometry and adaptive array processing", *2016 International Symposium on Antennas and Propagation*, Oct. 2016.
- (17) Shigeaki Okumura, Takuro Sato, Takuya Sakamoto, and Toru Sato, "Technique of tracking multiple pedestrians using monostatic ultra-wideband Doppler radar with adaptive Doppler spectrum estimation", *2016 International Symposium on Antennas and Propagation*, Oct. 2016.
- (18) Takuya Sakamoto, Toru Sato, Pascal Aubry, and Alexander Yarovoy, "Performance evaluation of

F-K Kirchhoff migration using ultra-wideband radar with sparse array", *European Conference on Antennas and Propagation 2016*, April 2016.

- (19) Takuya Sakamoto, Toru Sato, Pascal Aubry, and Alexander Yarovoy, "Frequency-domain Kirchhoff migration for near-field radar imaging", *2015 IEEE International Conference on Antenna Measurements and Applications*, Dec. 2015.
- (20) Takuya Sakamoto, "High-resolution ultra-wideband radar imaging using Kirchhoff integral and F-K migration with boundary scattering transform", *The First PEM International Workshop*, Nov. 2015.
- (21) Takuya Sakamoto, Toru Sato, Pascal Aubry, and Alexander Yarovoy, "Auto-focused imaging of a moving target using an ultra-wideband array radar", *Progress in Electromagnetics Research Symposium*, July 2015.
- (他42件)

〔産業財産権〕

取得状況（計2件）

名称：心拍測定装置、心拍測定方法、及び記録媒体
発明者：吉岡 元貴，福田 健志，佐藤 亨，阪本 卓也
権利者：パナソニック株式会社
種類：特許
番号：特許6487371
取得年：平成28年
国内外の別：国内

名称：Heartbeat measuring apparatus, heartbeat measuring method, and recording medium
発明者：Mototaka Yoshioka, Takeshi Fukuda, Toru Sato, Takuya Sakamoto
権利者：Panasonic Corporation
種類：United States Patent
番号：9,693,738
取得年：2017
国内外の別：国外

6 . 研究組織

(1)研究分担者
該当無し

(2)研究協力者
研究協力者氏名：Alexander Yarovoy
ローマ字氏名：Alexander Yarovoy

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。