

令和元年6月11日現在

機関番号：24506  
研究種目：国際共同研究加速基金（国際共同研究強化）  
研究期間：2016～2018  
課題番号：15KK0243  
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（国際共同研究強化）  
  
研究課題名（英文）Human imaging and anomaly detection using ultra-wideband radar(Fostering Joint International Research)  
  
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） 10,900,000円  
渡航期間： 6ヶ月

研究成果の概要（和文）：本研究では、体動のある場合に非接触心拍計測を実現するための技術を開発した。まず、アダプティブアレイによる適応的ビーム形成技術の開発を行った。開発技術により干渉成分となる部位からの反射波を抑圧し、高精度な心拍計測を実現できることが明らかになった。続いて、機械学習を非接触心拍計測に適用し、精度改善を行った。従来は体動により心拍推定精度が大幅に劣化する場合においても、機械学習に基づくアルゴリズムの導入により高精度な心拍計測が実現できることが分かった。

#### 研究成果の学術的意義や社会的意義

高齢化が急速に進行する中、在宅医療を安全かつ円滑に実施するためには、対象者の異常検出が不可欠である。レーダはプライバシーの懸念が少なく、非接触での心拍・呼吸の計測が可能であるため注目されている。本研究では、人体の姿勢・運動に加えて生体情報も同時に計測することで、対象者の異常を検出するために必要な要素技術を開発した。開発技術は安全かつ効率的に在宅医療を実施するために重要であり、その社会的な意義は大きい。

研究成果の概要（英文）：First, we developed a radar-based noncontact heartbeat monitoring technique using adaptive array signal processing that can suppress interfering echoes. Next, we also developed a technique for estimating the heart rate based on machine learning. This technique was demonstrated to be able to estimate the heart rate accurately even with the interfering motion of the target person.

研究分野：計測工学

キーワード：レーダ 人体 モニタリング 心拍

## 様式 F - 19 - 2

### 1. 研究開始当初の背景

レーダを用いた非接触人体センシングは、プライバシーに配慮したモニタリングを実現する技術として注目を集めている。特に、心拍・呼吸などの生体情報を非接触で計測する技術は対象者の異常や患者の容態変化などを早期に検出するために重要な技術である。レーダによる生体計測は接触型センサと異なり、装着による不快感やかぶれなどの心配もなく、ヘルスケアなどの広いアプリケーションへの応用が期待されている。ただし、従来の非接触生体計測技術には、体動を伴う場合に精度が大きく低下するという問題があった。そのため、体動の影響を抑えつつ生体情報を高精度に計測できる技術の開発が望まれていた。

### 2. 研究の目的

本研究では、異常検出への応用を想定し、対象者の体動を伴う場合にも使用可能なレーダ非接触生体計測技術の開発を目的とする。特に、皮膚変位の小さな心拍成分について、対象者の運動の影響を抑えるための手法を開発し、高精度で非接触測定を実現する。

### 3. 研究の方法

本研究では、我々が開発してきた非接触生体測定技術にアダプティブアレイ信号処理および機械学習を統合することで、対象者の体動が存在する場合にも適用可能な非接触心拍計測技術を開発する。アダプティブアレイ信号処理としてはCapon法およびDCMP法を用い、所望の方向からの反射波を受信しつつも干渉波を抑圧することで体動成分の抑圧を図る。Capon法およびDCMP法はいずれも複数の到来波間が無相関であることを前提にしているが、人体の複数部位に対してこの仮定が成立するかについては慎重に検討を行う。これに加えて、単一の到来波が支配的である場合には最大比合成(MRC)法による信号対雑音電力比(S/N)の改善を図る。MRC法の性能は位相キャリブレーションに依存せず、常に信号のS/Nを最大化できるという利点がある。さらに、従来の心拍数推定アルゴリズムに機械学習を導入することで心拍推定精度のさらなる改善を図る。

### 4. 研究成果

#### (1) 体動成分抑圧による生体情報の高精度測定

まず、微小変位検出に有効として知られるセルフインジェクションロッキング法による生体計測技術について検討を行ったが、同手法の原理は目標変位に応じた周波数シフトを検出するものであるため、複数波が干渉する場合には測定原理の非線形性により単純な波形の加算とはならず、複数成分の分離が困難になることが判明した。そのため、当初の研究計画とは異なるアプローチを採用することとなった。

人体が運動している場合、体動が小さい部位を選択的に測定することが有利である。そのため、アダプティブアレイ信号処理による適応的ビーム形成を用いて体動成分の大きい部位からの反射波を抑圧し、心拍計測の精度を改善する手法を検討した。4素子アレイアンテナレーダシステムを整備し、生体情報を含む部位にビームを向けつつ、干渉成分を抑圧することにより、心拍計測の精度改善を実現した。図1にアレイアンテナによる人体計測の実験風景を示す。図2にアダプティブアレイであるCapon法による適応的ビーム形成例を示す。胸部にビームがフォーカスしていることがわかる。開発手法を使うことで推定心拍間隔のRMS誤差は44.6msから27.3msへと改善した。

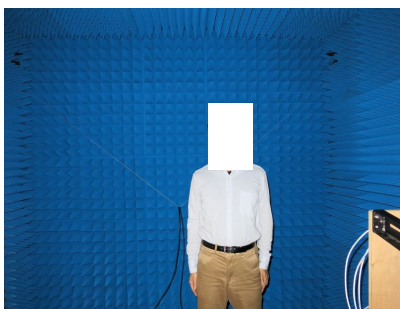


図1 アレイアンテナによる人体計測

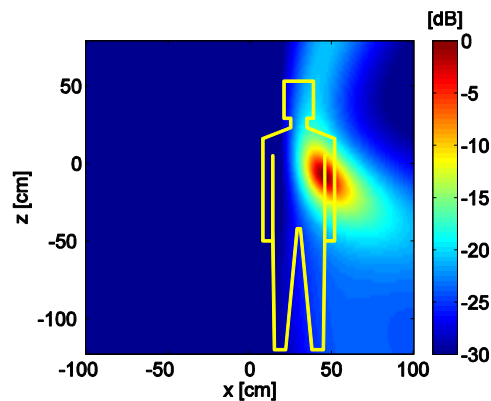


図2 アダプティブアレイによる胸部のみの測定

#### (2) 超広帯域信号およびMRC法を用いた体動成分抑圧

続いて、アダプティブアレイ信号処理の一種であるMRC法を用いて頭部からの反射波による非接触心拍計測技術を開発した。四肢・胴体の形状および運動は極めて複雑である一方、頭部については形状不変かつ運動は比較的単純である。そのため、頭頂部からの反射波を用いて測定することで、体動の影響を抑えることを考える。手法としては、超広帯域レーダを頭上に設置し、頭部からの反射波のみが含まれるレンジゲートを選択することで複雑な運動を示す四肢・胴体からの反射波を抑圧する。その上で、頭部の運動に追従するために4×4素子のMIMOア

レイを用いて測定された16チャンネルの信号をMRC法により合成する。MRC法では、マルチチャンネルの信号をベクトルで表現し、共分散行列の最大固有値に対応する固有ベクトルで重み付け加算することでS/Nを改善する。この方法により、頭部の運動に応じて適応的にビームの方向を変えることができ、高精度な測定が実現される。図3に頭頂からの反射波の測定風景を、図4に頭頂反射波による推定心拍間隔を示す。図4には心電計(ECG)による測定心拍間隔も比較のために示している。10名の被験者に対する推定心拍間隔の平均RMS誤差は16.3msと小さく、同手法の有効性が示された。

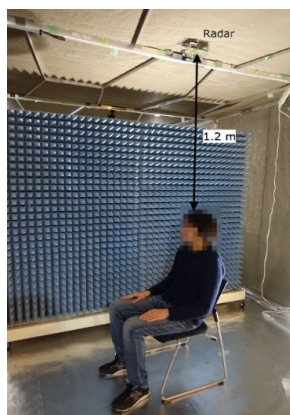


図3 頭頂反射波による心拍測定実験

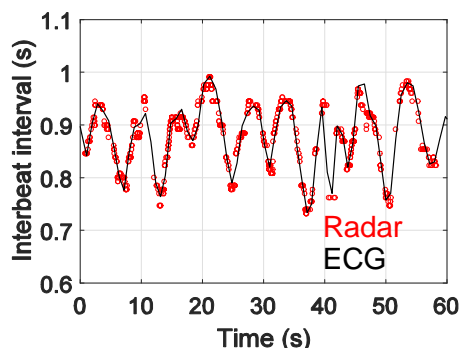


図4 頭頂反射波による推定心拍間隔

### (3) 機械学習による非接触心拍精度改善

上述のアダプティブアレイ信号処理による干渉波抑圧において、同一人体の複数部位の変位は無相関ではない。そのため、無相関性を仮定したCapon法などの手法による干渉抑圧は十分ではなく、別のアプローチを併用する必要がある。そこで、非接触心拍推定に機械学習を導入した精度改善を行った。体動を含む被験者の生体情報のパターンを学習することで、従来手法では体動により心拍計測精度が大幅に低下する場合においても、提案する機械学習の導入により高精度な心拍計測が実現できることが分かった。従来法および提案法による7名の被験者の瞬時心拍間隔の推定誤差の平均値は65.6msおよび20.6msと、提案法による大幅な精度改善が示された。体動により低精度となっていた被験者のデータにおいても、機械学習に基づく手法により精度改善が実現できることが明らかになった。

## 5 . 主な発表論文等

(研究代表者は下線)

[雑誌論文](計7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ドップ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.

[学会発表](計42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.

(他29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：US9693738B2  
取得年：2017  
国内外の別：国外

## 6 . 研究組織

### 研究協力者

〔主たる渡航先の主たる海外共同研究者〕

研究協力者氏名：Victor Lubecke

ローマ字氏名：Victor Lubecke

所属研究機関名：University of Hawaii at Manoa

部局名：Department of Electrical Engineering

職名：Professor

〔その他の研究協力者〕

研究協力者氏名：Alexander Yarovoy

ローマ字氏名：Alexander Yarovoy

研究協力者氏名：佐藤 亨

ローマ字氏名：Toru Sato

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。