

ミリ波レーダによる人体センシング Wireless Sensing of Human Body and Motion Using Millimeter-Wave Radar

阪本 卓也

Takuya SAKAMOTO

京都大学 大学院工学研究科

概要

本ワークショップでは、主にミリ波を用いたレーダによる人体センシング技術について、我々が開発してきた技術の概要を紹介する。人体の皮膚表面には、呼吸や心拍といった生体信号により数十ミクロンから数ミリ程度の変位が見られる。ヘルスケアやスクリーニングといった応用で必要となる非接触バイタル計測では、こうした皮膚の微小変位をミリ波レーダにより計測し、目的とする生体信号についての情報を高精度に推定することで様々な用途に用いられる。こうしたレーダによる人体センシングに関する著者らの取り組みの概要をトピックごとに紹介し、人体計測へ応用するうえで必要となるレーダの性能や、さらなる精度改善のためのポイントなどについて説明する。



図1 株式会社マリと共同開発したレーダ非接触見守りセンサ（2021年2月販売開始）



図2 被験者7人の呼吸のレーダによる非接触計測実験（呼吸空間クラスタリング法）

Abstract

This workshop presents our recent research on wireless measurements of the human body using millimeter-wave radar. The surface of the human body exhibits small displacements due to physiological signals such as respiration and heartbeat. In noncontact vital measurement, such minute displacements are measured using a radar system and the data are processed to estimate the target physiological signal. In this workshop, we explain how such radar measurements are applied to various applications including healthcare and medical screening.

1. はじめに

ヒトの状態を常時、正確に、対象者に負担をかけず計測できる人体センシング技術が注目されている。人体センシングといえば、心拍・加速度センサなどのセンサを搭載したウェアラブルデバイスが広く使われている。また、光学カメラを用いた監視カメラ網と機械学習(AI: artificial intelligence)の組み合わせで実現される自動識別技術は屋内外で広く用いられるようになってきた。これらの技術によるデバイス・システム・サービスは普及が進んできたが、欠点や懸念も無視し得ない。例えば接触型デバイスは、装着時や使用時の不快感が伴い、光学センサは個人情報の流出などのプライバシーの懸念が払拭できず、今後のセンサ技術と安心安全を両立するためには、こうした課題の解決が不可欠である。

そうした中、レーダなどの電波センサによる人体センシングが注目されている。レーダ等の電波計測は、非接触であるため装着の不快感や皮膚アレルギーの心配なく、プライバシーに関する懸念も少ない。その上、マイクロ波やミリ波は衣服などを容易に透過するため、多くの場面で人体の皮膚表面を直接測定できるという利点がある。米国 Google 社はミリ波レーダによる人体センシングのプロジェクトである Soli を推進しており、スマートフォン Google Pixel 4 やスマートホームデバイス Nest Hub には Soli のレーダチップが搭載されている。こうしたレーダ人体センシングの実用化も進んではいるものの、現状ではさまざまな性能上の制約があり、さらなる研究開発が不可欠である。本ワークショップでは著者らがこれまでに進めてきたワイヤレス人体センシングに関する研究の一部を紹介する。なお、本稿は[1]をもとに加筆修正したものである。

2. 皮膚変位と生体情報計測

人体の皮膚表面には数十ミクロンから数ミリ程度の微小な変位が見られる。こうした変位は呼吸や心拍などの生体情報を含み、レーダによる非接触バイタル計測では、こうした皮膚変位から生体信号を推定する信号処理技術が必要となる。対象者の電波反射点が 1 点のみとなる理想的な場合を想定すると、反射波の位相はアンテナから人体反射点までの距離に (2π の整数倍の不確定性を除いて) 比例し、その距離は平均距離に加え、体動による変位、呼吸による変位と心拍による変位の和となる。

レーダの受信信号を、直交検波により得られた I 成分と Q 成分からなる複素信号で表現すると、信号には円に沿って変動する生体信号成分に加え、送信波の漏れこみや静止目標からの反射波に相当する直流

成分が含まれており、これらは静止クラッタと呼ばれる。さまざまな静止クラッタ除去アルゴリズムがこれまでに提案されており[2]、クラッタ抑圧の後に位相を算出して距離に換算することで目標までの距離が時間の関数として得られる。その後、上記 4 成分に分離し、生体信号の解析が行なわれる。この分離には周波数領域でのフィルタリング[3]、ウェーブレット解析、経験的モード分解など、さまざまな手法が用いられる。

3. 高精度非接触心拍計測アルゴリズム

従来、変位時系列の心拍成分を単にフーリエ変換することで心拍数が計算されることが多かったが、心拍推定精度は概して低く、また心拍数は時間とともに変動するが、そうした時間に依存する情報が欠落していた。著者らは、心臓の収縮・弛緩の非対称性に着目し、皮膚変位の正負非対称性を活用したトポロジー法を開発した。26 GHz 帯の準ミリ波レーダによる計測を通じ、瞬時心拍数を約 1 % の誤差精度で高精度計測できることが示された[4-5]。その後、呼吸成分を効率的に抑圧する手法が開発され[6]、睡眠中の非接触心拍計測への応用[7]など、さまざまな研究が進展している。

こうした著者らの研究以外にも、レーダによる非接触心拍計測に関し、多くの研究が報告されてきた。その大部分は胸部の皮膚表面の変位計測に基づくものであったが、著者らは 60 GHz 帯のミリ波レーダによる人体の足底(足の裏)での心拍計測を初めて報告した[8]。さらに、79.0 GHz 帯のミリ波レーダにより人体の頭頂部での心拍計測も報告し[9]、さまざまな部位での生体信号計測の特徴を調べてきた。これらの報告ではアレイレーダを用い、相関行列の最大固有値に対応する固有ベクトルを重みとして用いる最大比合成の導入などにより信号対雑音電力比を改善することによる高精度化を達成している。足底および頭部の計測による心拍間隔の平均誤差はそれぞれ 14.0 ms および 16.3 ms であり、いずれも高い精度が達成されている。

このように計測される心拍間隔の変動である心拍変動は、自律神経の活動を反映していることが知られている。心拍変動を低周波(0.04-0.15 Hz)成分および高周波(0.15-0.4 Hz)成分に分離し、両者の強度比により精神的ストレスを見積もる方法が使われている。この手法をレーダによる非接触計測データに適用することはできるのだろうか。同手法では、低周波成分の低域カットオフ周波数 0.04 Hz の逆数である 25 秒を超える時間長にわたり心拍数変動を連続かつ高精度に計測する必要がある。しかし、レーダによる非接

触計測では体動などの影響により、精度が時間的に安定しない性質があり、自律神経計測への応用は容易ではなかった。著者らは、レーダ計測された心拍間隔の変動を用いて精度を見積もり、信頼できる時間区間のデータのみを選択的に抽出する手法を開発し、精神的ストレス指標を精度よく非接触計測することに成功した[10]。

こうして開発されてきた技術を社会実装するため、京都大学 COI (center of innovation) プロジェクトの枠組みにおいて株式会社マリ(京都市)などの企業と共同研究を進めてきた。同社と共同開発し、2021 年 2 月に上市した 79 GHz 帯ミリ波レーダによる非接触見守りセンサ VitaWatcher (図 1) は、高精度で呼吸と心拍を非接触計測する機能を有し、今後の幅広い応用が期待されている。

また、著者らは多人数を同時計測できる技術開発を進めており、図 2 に示すとおり、任意配置の対象者 7 人の生体信号を非接触で同時計測できることを実証した[11]。さらに、血圧と密接に関係する脈波伝播の非接触計測技術[12-14]の開発も進めている。これらの技術をヘルスケアや医療分野へ応用することにより、私たちの身近でさりげなく活躍する見守りサービスが実現し、社会の安心や安全に貢献できることを期待している。

4. レーダによる人体計測の新たな展開

前節までに説明した非接触バイタル計測に留まらず、ミリ波レーダによる人体計測はさまざまな応用可能性を秘めている。例えば、プライバシーについての懸念が残るカメラ等によらず、電波のみで個人識別を実現するべく、著者らは 2.4 GHz 帯レーダによる呼吸運動の計測とニューラルネットワークを用いた個人識別技術を開発した[15]。さらに、対象者の歩行・着座運動をレーダで計測し、運動に伴うマイクロドップラを算出した上で畳み込みニューラルネットワークを適用し、個人識別を実現した。この手法では 6 人の被験者全員を約 93.3%の精度で識別することに成功した[16]。

また、今後のスマート社会への応用が期待されるレーダによるジェスチャー識別技術の開発も注目されている。著者は、時間周波数解析を一切介さず、受信した時間領域信号のみを使って描出した複素信号軌跡 (IQ プロット) に畳込みニューラルネットワークを適用する手法により、6 種類のジェスチャーを 91.3%の高精度で識別できることを示した[17]。また、機械学習の応用により、レーダによる高精度心拍計測と個人識別を同時に実現する手法[18]も開発されている。さらに、レーダによる行動識別技術[19]の開

発も進められ、人体センシングのセキュリティ用途への展開を想定し、多くの研究が進められている[20-26]。このように、ミリ波レーダによる人体センシングの応用可能性は広い。

5. まとめ

本稿では、ミリ波レーダによる人体センシングに関する著者らの取り組みを紹介した。ミリ波レーダは微小変位を高感度に計測できる性質と衣服等を透過する性質を兼ね備え、プライバシーの懸念を回避しつつ、センサ類を身に着けずに人体のさまざまな情報が計測できるという利点を有する。今後、こうした研究により得られた技術や知見が社会応用され、私たちの社会や暮らしが豊かになることを強く望んでいる。

謝辞

本稿で紹介した研究の一部は日本学術振興会科研費 19H02155, 21H03427, JST さきがけ JPMJPR1873, JST COI JPMJCE1307 の助成により実施された。

文 献

- [1] 阪本卓也, “超広帯域レーダとワイヤレス人体センシング技術,” 電子情報通信学会論文誌 B, vol. J103-B, no. 11, pp. 505-514, Nov. 2020. (招待論文)
- [2] S. Okumura, T. Sakamoto, T. Sato, M. Yoshioka, K. Inoue, T. Fukuda, and H. 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, Sep. 2016.
- [3] T. Sakamoto and T. Koda, “Respiratory motion imaging using 2.4-GHz nine-element-array continuous-wave radar,” IEEE Microwave and Wireless Components Letters, vol. 30, no. 7, pp. 717-720, Jul. 2020.
- [4] T. Sakamoto, R. Imasaka, H. Taki, T. Sato, M. Yoshioka, K. Inoue, T. Fukuda, and H. 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, Apr. 2016.
- [5] T. Sakamoto, P. J. Aubry, S. Okumura, H. Taki, T. Sato, and A. 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, June 2018.
- [6] 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, vol. J101-C, no. 11, pp. 412-420, Nov. 2018.
- [7] T. Sakamoto, S. Mitani, and T. Sato, “Noncontact monitoring of heartbeat and movements during sleep using a pair of millimeter-wave ultra-wideband radar systems,” IEICE Transactions on Communications, vol. E104-B, no. 4, pp. 463-471, Apr. 2021.
- [8] T. Sakamoto, S. Okumura, R. Imanishi, H. Taki, T. Sato, M. Yoshioka, K. Inoue, T. Fukuda, and H. Sakai, “Remote

heartbeat monitoring from human soles using 60-GHz ultra-wideband radar,” *IEICE Electronics Express*, vol. 12, no. 21, pp. 20150786, Oct. 2015.

- [9] T. Sakamoto, M. Muragaki, K. Tamura, S. Okumura, T. Sato, K. Mizutani, K. Inoue, T. Fukuda, and H. Sakai, “Measurement of instantaneous heart rate using radar echoes from the human head,” *Electronics Letters*, vol. 54, no. 14, pp. 864-866, July 2018.
- [10] T. Sakamoto and K. Yamashita, “Noncontact measurement of autonomic nervous system activities based on heart rate variability using ultra-wideband array radar,” *IEEE Journal of Electromagnetics, RF, and Microwaves in Medicine and Biology*, vol. 4, no. 3, pp. 208-215, Sep. 2020.
- [11] T. Koda, T. Sakamoto, S. Okumura, and H. Taki, “Noncontact respiratory measurement for multiple people at arbitrary locations using array radar and respiratory-space clustering,” *IEEE Access*, vol. 9, pp. 106895-106906, Jul. 2021.
- [12] T. Sakamoto, “Signal separation using a mathematical model of physiological signals for the measurement of heart pulse wave propagation with array radar,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 175921-175931, Sep. 2020.
- [13] Y. Oyamada, T. Koshisaka, and T. Sakamoto, “Experimental demonstration of accurate noncontact measurement of arterial pulse wave displacements using 79-GHz array radar,” *IEEE Sensors Journal*, vol. 21, no. 7, pp. 9128-9137, Apr. 2021.
- [14] T. Sakamoto, “Generating a super-resolution radar angular spectrum using physiological component analysis,” *IEICE Communications Express*, Jul. 2021.
- [15] A. Rahman, V. M. Lubecke, O. Boric-Lubecke, J. H. Prins, and T. 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, June 2018.
- [16] 阪本卓也, “超広帯域レーダによる歩行および着座の測定と畳み込みニューラルネットワークを用いた個人識別技術,” *電子情報通信学会論文誌 C*, vol. J103-C, no. 07, pp. 321-330, Jul. 2020.
- [17] T. Sakamoto, X. Gao, E. Yavari, A. Rahman, O. Boric-Lubecke, and V. M. Lubecke, “Hand gesture recognition using a radar echo I-Q plot and a convolutional neural network,” *IEEE Sensors Letters*, vol. 2, no. 3, Sep. 2018.
- [18] S. Wu, T. Sakamoto, K. Oishi, T. Sato, K. Inoue, T. Fukuda, K. Mizutani, and H. Sakai, “Person-specific heart rate estimation with ultra-wideband radar using convolutional neural networks,” *IEEE Access*, vol. 7, no. 1, pp. 168484-168494, Dec. 2019.
- [19] Y. Yang, C. Hou, Y. Lang, T. Sakamoto, Y. He, and W. Xiang, “Omnidirectional motion classification with monostatic radar system using micro-Doppler signatures,” *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 58, no. 5, pp. 3574-3587, May 2020.
- [20] H. Yamazaki, T. Sakamoto, H. Taki, and T. 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.
- [21] T. Fromenteze, E. Lazare Kpré, D. Carsenat, C. Decroze, and T. Sakamoto, “Single-shot compressive multiple-inputs multiple-outputs radar imaging using a two-port passive device,” *IEEE Access*, vol. 4, pp. 1050-1060, Mar. 2016.
- [22] T. Sakamoto, T. Sato, P. Aubry, and A. Yarovsky, “Fast imaging method for security systems using ultrawideband radar,” *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 52, no. 2, pp. 658-670, Apr. 2016.
- [23] T. Sakamoto, D. Akiyama, T. Sato, and T. Sato, “Spectrum-

free estimation of Doppler velocities using ultra-wideband radar,” *IEEE Access*, vol. 5, pp. 3240-3249, Oct. 2016.

- [24] T. Sakamoto, A. Matsuoka, and H. Yomo, “Estimation of Doppler velocities from sub-Nyquist ultra-wideband radar measurements,” *IEEE Sensors Journal*, vol. 16, no. 23, pp. 8557-8565, Dec. 2016.
- [25] M. Anabuki, S. Okumura, T. Sakamoto, K. Saho, T. Sato, M. Yoshioka, K. Inoue, T. Fukuda, and H. Sakai, “Ultrawideband radar imaging using adaptive array and Doppler separation,” *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 53, no. 1, pp. 190-200, Jan. 2017.
- [26] K. Morimoto, T. Sakamoto, and T. Sato, “Accurate ultra-wideband array radar imaging using four-dimensional unitary ESPRIT,” *IEEE Access*, vol. 7, no. 1, pp. 161363-161374, Nov. 2019.

著者紹介

阪本 卓也 京都大学大学院工学研究科 准教授,
sakamoto.takuya.8n@kyoto-u.ac.jp