

[依頼講演] レーダ人体センシング

阪本 卓也[†]

[†] 京都大学 大学院 工学研究科 電気工学専攻 〒615-8510 京都市西京区京都大学桂

あらまし 本稿では、レーダによる人体の計測技術に関し、我々の研究の一部を紹介する。レーダによる計測では、対象となる人体の形状の情報を得るもの、腕や脚などの人体部位の運動や速度の情報を得るもの、および皮膚の微小な変位の情報を得るものの3つが主な対象となる。これらのうち、皮膚表面の動きには、呼吸や心拍といったバイタルサインの情報が含まれ、医療やヘルスケアにおけるスクリーニングやモニタリングといった応用への展開が期待されている。こうしたレーダによる人体センシングに関する計測データ例を紹介し、計測システムや信号処理法の利点や欠点などについて議論する。

キーワード レーダ, 人体計測, バイタルサイン

[Invited Lecture] Radar-based Human Sensing

Takuya SAKAMOTO[†]

[†] Graduate School of Engineering, Kyoto University Kyotodaigaku-Katsura, Nishikyo-ku Kyoto, 615-8510, Japan

Abstract We discuss the radar-based measurement of a human body. There are three main categories of radar measurement: (1) radar imaging of the human body, (2) radar-based measurements of limb motion, and (3) radar-based measurements of minute skin displacements. Among them, the motion of the skin surface contains information on vital signs such as respiration and heartbeat rates, and measurements of such motion are expected to be used in applications including screening and monitoring in medicine and healthcare. We discuss examples of our radar-based human measurements and highlight the advantages and disadvantages of such measurement techniques.

Key words radar, human sensing, vital signs

1. ま え が き

新型コロナウイルス感染症の拡大に伴い、非接触の人体計測技術の重要性が再認識されている。中でも、長期に亘り正確に対象者のバイタルサインなどを非接触計測できるレーダ人体センシング技術が注目され、多くの研究報告が見られると同時に製品化などの社会応用も活発化している。すでに広く普及している人体センシングには、脈波センサや加速度センサを搭載したスマートウォッチなどに加え、乳幼児や高齢者の見守りを目的としたカメラ・画像処理によるシステムも利用されている。これらの計測技術には、欠点や懸念も無視し得ない。例えばウェアラブルデバイスは装着時や使用時の不快感が避けられず、カメラによる見守りシステムは映像流出などの懸念が否定できない。

そうした中、レーダ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手間や不快感がなく、プライバシーに関する懸念も少ない。その上、衣服などを容易に透過する周波数帯の電波を用いれば、着衣のまま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 (Mountain View, CA, USA) 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、同社のスマートフォン 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。本稿では我々が進めてきたレーダ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] および [2] をもとに加筆修正したものである。

2. バイタルサインにより生じる皮膚の微小変位

人体の皮膚表面には呼吸や心拍などの生体情報に伴う変位が見られる。この変位は呼吸で数 mm 程度、心拍 (脈波) で約数十 μm 程度と微小である。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 $d(t)$ は平均距離に加え、体動による変位、呼吸による変位と心

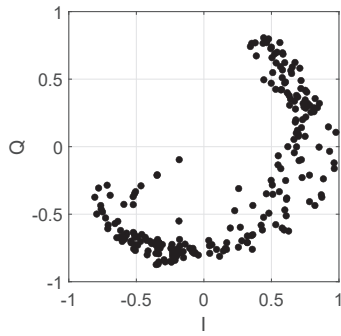


図1 レーダ信号のI-Qプロットに見られる円に沿った信号軌跡の一例

拍による変位の和となる．このうち，体動成分は状況により異なり，呼吸・心拍による変位波形は準周期性を有するとみなせる場合が多い．通常，呼吸および心拍の周期は約5秒および1秒程度であるが，個人差は大きい．さらに，同一個人であってもこれらの生体信号の性質は時間と共に大きく変動することに注意が必要である．

このようなモデルを想定した場合，直交検波により得られた複素受信信号は $s(t) = Ae^{j2kd(t)} + s_{DC}$ と書ける．ただし， A は複素振幅， k は波数， s_{DC} は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であり静止クラッタと呼ばれる．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，IQプロットで表現される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，これらが静止クラッタに相当する．呼吸中の皮膚変位を79 GHz帯のレーダで計測した場合に得られるI-Qプロットの一例を図1に示す．

静止クラッタ除去アルゴリズム[3]により s_{DC} を抑圧してから位相を計算することにより距離 $d(t)$ を得る．その後，適当なフィルタ処理などにより，上記4成分に分離する必要がある．例えば[4]では，ウェーブレット変換を用いて体動や呼吸成分を抑圧し，心拍成分を抽出している．著者らのグループの研究[5]では，心拍の基本周波数である約1 Hz付近には呼吸周波数(約0.2-0.3 Hz)の高調波が重畳し，精度が低下することを見出した．そのため，心拍の基本周波数あたりの成分をあえて抑圧し，心拍の高調波成分のみを取り出すハイパスフィルタ処理により，高精度な心拍計測が可能であることを報告している．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[6]，ウェーブレット解析，経験的モード分解などが用いられる．こうして分離された各成分を利用し，バイタルサインの情報を推定することで多くの応用が可能となる[7]～[16]．

3. レーダによる非接触心拍計測の高精度化

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[17],[18]．その後，呼吸成分を効率的に抑圧する手法が開発され[5]，睡眠中の非接触心拍計測への応用[19]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[20]．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[21]，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[22]．

こうして開発されてきた技術を社会実装するため，京都大学における科学技術振興機構センターオブイノベーション(COI)拠点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月に丸文株式会社(東京都中央区)より販売開始された79 GHz帯ミリ波レーダ非接触見守りセンサ VitaWatcher(図2)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3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[23]．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[24]～[26]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．



図2 79 GHz 帯レーダによる非接触見守りセンサ VitaWatcher



図3 79 GHz 帯レーダによる被験者7人の同時呼吸計測実験[23]

4. レーダによる非接触の個人・行動識別

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技術が注目されている。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[27]。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[28]。

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[29](図4)。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[30]も開発されている(図5)。さらに、レーダによる行動識別技術[31]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[32]~[36]。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く、今後の社会展開が期待される。

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

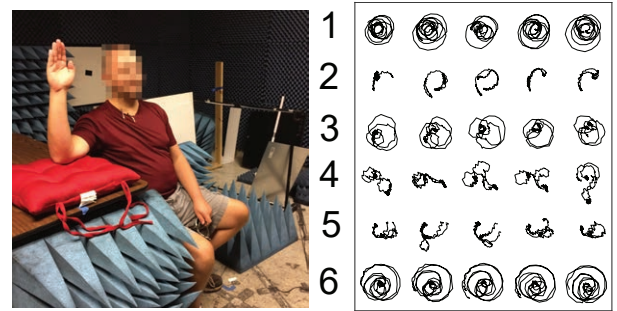


図4 2.4 GHz 帯 CW レーダによるジェスチャ計測とIQプロット例[29]

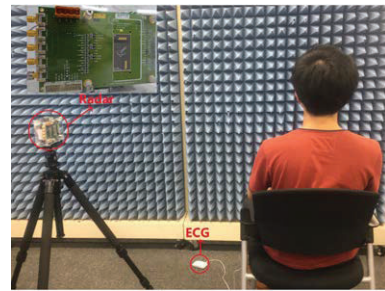


図5 非接触心拍計測のための79 GHz 帯レーダによる被験者の上腕の変位計測[30]

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

本研究の一部は日本学術振興会科学研究費補助金19H02155および21H03427, 科学技術振興機構さがけJPMJPR1873, 科学技術振興機構センターオブイノベーション(COI)JPMJCE1307, 京都産業21「産学公の森」, 株式会社マリ共同研究費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] 阪本卓也, “ミリ波レーダによる人体センシング,” Microwave Workshop & Exhibition (MWE)2021, ワークショップ TH2A-1, Nov. 2021.
- [3] 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.
- [4] S. Tomii and T. Ohtsuki, “Heartbeat detection by using Doppler radar with wavelet transform based on scale factor learning,” in 2015 IEEE International Conference on Communications (ICC), London, UK, 2015, pp. 483-488, DOI: 10.1109/ICC.2015.7248368
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] M. Nosrati, S. Shahsavari, S. Lee, H. Wang, and N. Tavassolian, "A concurrent dual-beam phased-array Doppler radar using MIMO beamforming techniques for short-range vital-signs monitoring," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 67, no. 4, pp. 2390-2404, Apr. 2019.
 - [8] X. Shang, J. Liu, and J. Li, "Multiple object localization and vital sign monitoring using IR-UWB MIMO radar," *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. 56, no. 6, pp. 4437-4450, Dec. 2020.
 - [9] K. Yamamoto, K. Toyoda and T. Ohtsuki, "CNN-Based Respiration Rate Estimation in Indoor Environments via MIMO FMCW Radar," 2019 *IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, 2019, pp. 1-6, doi: 10.1109/GLOBECOM38437.2019.9013951
 - [10] D. Sasakawa, N. Honma, T. Nakayama, and S. Iizuka, "Human activity identification by height and Doppler RCS information detected by MIMO radar," *IEICE Trans. Commun.*, vol. E102-B, no. 7, pp. 1270-1278, Jul. 2019.
 - [11] D. Sasakawa, N. Honma, T. Nakayama, and S. Iizuka, "Fast living-body localization algorithm for MIMO radar in Multi-path environment," *IEEE Trans. Antennas and Propagat.*
 - [12] N. Shiraki, D. Sasakawa, N. Honma, T. Nakayama, and S. Iizuka, "Method of estimating human orientation using array antenna," *MDPI Electronics*, vol. 7, no. 6, pp. 92, Jun. 2018.
 - [13] D. Sasakawa, N. Honma, T. Nakayama, and S. Iizuka, "Human posture identification using a MIMO array," *MDPI Electronics*, vol. 7, no. 3, pp. 37, Mar. 2018.
 - [14] D. Sasakawa, N. Honma, T. Nakayama, and S. Iizuka, "Human identification using MIMO array," *IEEE Sensors Journal*, vol. 18, no. 8, pp. 3183-3189, Feb. 2018.
 - [15] H. Yamada and T. Horiuchi, "High-resolution indoor human detection by using millimeter-wave MIMO radar," 2020 *IEEE International Workshop on Electromagnetics: Applications and Student Innovation Competition (iWEM 2020)*, Penghu, Taiwan, Aug. 2020.
 - [16] T. Horiuchi, J. Konishi, H. Yamada, and S. Muramatsu, "Indoor human tracking with millimeter-wave minimum redundancy MIMO radar," *Proc. ISAP2019*, X'ian, China, Oct. 2019.
 - [17] 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.
 - [18] 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.
 - [19] 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.
 - [20] 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.
 - [21] 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.
 - [22] 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.
 - [23] 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.
 - [24] 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.
 - [25] 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.
 - [26] T. Sakamoto, "Generating a super-resolution radar angular spectrum using physiological component analysis," *IEICE Communications Express*, Jul. 2021.
 - [27] 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.
 - [28] 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.
 - [29] 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.
 - [30] 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.
 - [31] Y. Yang, C. Hou, Y. Lang, T. Sakamoto, Y. He, and W. Xiang, "Omni-directional 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.
 - [32] 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.
 - [33] T. Sakamoto, T. Sato, P. Aubry, and A. Yarovoy, "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.
 - [34] 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.
 - [35] 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.
 - [36] 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.