

ミリ波レーダによる複数人の非接触呼吸センシング

阪本 卓也[†] 香田 隆斗[†] 奥村 成皓^{††} 瀧 宏文^{††}

[†] 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

^{††} 株式会社マリ 〒600-8815 京都市下京区中堂寺粟田町 91

あらまし 本稿ではミリ波レーダによる複数人を対象とした非接触呼吸センシング技術を提案する。静止した複数人からのレーダ信号を分離するには、距離・角度の各領域での信号分離やクラスタリングが用いられてきた。本稿では呼吸の特徴に焦点を当て、呼吸パターンの個人差を利用した高精度信号分離法を提案する。提案法は呼吸空間クラスタリング法と呼ばれ、従来技術よりも高い空間分解能を達成し、近接した複数人体からの反射波を正確に分離することが可能である。さらに、提案法は対象人数が未知の状況にも適用でき、対象者の人数と位置を正確に推定できる。本研究では、被験者7人の参加する計測を通じ、提案法の性能検証をおこなった。実験データにより、提案法による呼吸間隔の平均推定誤差は172 msとなり、平均的な成人の呼吸間隔3–5 sと比べて十分に小さい値となった。さらに、対象者数の推定精度は97.6%を達成し、従来法の9.1%と比べて大幅な改善がみられた。これらの結果から、複数人の呼吸をレーダにより高精度に非接触計測するうえでの提案法の有効性が実証された。

キーワード アンテナアレー、クラスタリング法、ドップラーレーダ、レーダ計測、レーダ画像化、レーダ信号処理

Respiratory Measurement of Multiple People Using Millimeter-Wave Radar

Takuya SAKAMOTO[†], Takato KODA[†], Shigeaki OKUMURA^{††}, and Hirofumi TAKI^{††}

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

^{††} MaRI Co., Ltd. 91 Chudoji Awatacho, Shimogyo-ku, Kyoto, 600-8815, Japan

Abstract In this study, we propose a non-contact respiratory sensing technique for multiple people using millimeter-wave array radar. We focus on the characteristics of respiratory signals and propose a new technique for the separation and clustering of signals. This technique exploits individual differences in respiration patterns. The proposed method, called respiratory-space clustering, can achieve higher spatial resolution than conventional methods and can accurately separate radar echoes from multiple people in close proximity. Furthermore, the proposed method can be applied to situations where the number of subjects is unknown, because the proposed method can also estimate the number of subjects and their positions. We validate the performance of the proposed method by measuring seven participants. Through our experiments, we show that the average estimation error of the respiratory interval using the proposed method is 172 ms, which is sufficiently small compared with the typical respiratory interval of healthy adults (3–5 s). Furthermore, the accuracy of the proposed method in estimating the number of target people was 97.6%, which shows a significant improvement over conventional methods. These results demonstrate the effectiveness and high accuracy of the proposed radar-based method for measuring the respiration of multiple people.

Key words antenna arrays, clustering methods, Doppler radar, radar measurements, radar imaging, radar signal processing

1. ま え が き

新型コロナウイルス感染症の世界的流行の影響もあり、非接触での計測技術が注目されている。特に、カメラや接触センサを用いず、遠隔から長期に亘って人体の状態を計測できるレーダ人体センシング技術には大きな潜在力があると期待される。本研究では、レーダによる非接触呼吸計測法を提案し、その性

能を実験により評価する。提案法では、ミリ波帯のアレーレーダにより対象者を自動検出し、対象者の人数と位置を推定する。さらに、各対象者からのレーダ反射波を分離識別し、呼吸パターンを計測する。レーダによる複数人体の計測に関しては、すでに報告がある[1]~[14]。しかし、これらの多く[1]~[10]は2–3人のみを対象としており、それを超える多人数計測の報告はほとんど無い。また、複数対象者の配置についても、全員が一直

線上に並んだ配置 [10], レーダから異なる距離となる配置 [8] など, 特殊な条件下の検討が多く, 任意の位置に対応した多人数計測の報告は, 著者らの知る限り存在しない. また, 対象者数を既知とするものや, 対象者数のみを推定する研究なども多いが, 本研究の目的とは異なる. 5 人を越える対象者の人数・位置が未知の状態で全員の呼吸を同時計測できるレーダ人体センシング技術は著者らの提案 [15] が初めてとなる. 本稿では, 著者らの提案技術の概要と適用例を紹介し, 今後の研究において必要な課題について議論する.

2. ミリ波アレーレーダとレーダ画像化

本研究では 79 GHz 帯のミリ波アレーレーダを用いる. 中心波長は $\lambda = 3.8$ mm, 占有帯域幅は 3.9 GHz, 距離分解能 43 mm である. 送信アンテナ 3 素子, 受信アンテナ 4 素子を有するアレーを用いる. 送信アレーは素子間隔 2λ , 受信アレーは素子間隔 $\lambda/2$ の等間隔リニアアレーである. 各アレー素子は E 面 $\pm 4^\circ$, H 面 $\pm 35^\circ$ のビーム幅を有する. パルス繰り返し周期は 100 ms である. アレーで受信された信号をテラー窓を乗じたうえでビームフォーマ法によりレーダ画像を生成する. ただし, 時間不変成分を推定したうえで減算することで静止クラッタ等を抑圧する. 複素数値をとる複素レーダ画像 $I_c(t, r, \theta)$ および電力値をとる実レーダ画像 $I_p(t, r, \theta) = |I_c(t, r, \theta)|^2$ を生成する. ただし, t は時間, r はレンジ, θ は方位角である. これらの処理の詳細は [15] を参照されたい.

3. 呼吸イメージングと従来のクラスタリング

提案法の重要なステップである呼吸イメージング処理について説明する. 前節で得た複素レーダ画像 $I_c(t, r, \theta)$ から位相時系列を得る.

$$d_0(t, r, \theta) = \frac{\lambda}{4\pi} \angle I_c(t, r, \theta). \quad (1)$$

この $d_0(t, r, \theta)$ が r と θ に依存する点が顕著な特徴である. 次に, 呼吸周期を次式によって求める.

$$\tau_r(t, r, \theta) = \arg \min_{0 < \tau \leq T_0} f_{t,r,\theta}(\tau) \quad (2)$$

ここで $T_0 = 8.0$ s とし, 最適化問題の目的関数 $f_{t,r,\theta}(\tau)$ は次式で与える.

$$f_{t,r,\theta}(\tau) = \frac{1}{2T_0} \int_{t-2T_0}^t |d(t', r, \theta) - d(t' + \tau, r, \theta)|^2 + |d(t', r, \theta) - d(t' - \tau, r, \theta)|^2 dt' \quad (3)$$

こうして得られた $\tau_r(t, r, \theta)$ は呼吸画像と呼ばれ, 次節で説明する提案法においてクラスタリング処理に用いられる.

提案法では x -means クラスタリング法 [16] を用いる. 同手法はクラスター数が未知の場合にも適用できるという点で k -means クラスタリングよりも開発技術に適している. すなわち, 対象者の人数が未知の場合にも適用が容易となるわけである.

一般的なアプローチでは, 実レーダ画像 $I_p(t, r, \theta)$ から点群を生成し, それをクラスタリングアルゴリズムにより処理する

方法が取られる. すなわち, 各時刻において r および θ の違いを手掛かりに信号分離をしているわけである. この場合, 分離性能は距離分解能および角度分解能といった主にハードウェアの性能に依存した空間分解能に依存する. 提案法では, この制約を超えた分離性能を達成すべく, 上記の呼吸画像を利用する.

4. 提案クラスタリング法

ここでは, 提案するクラスタリング法を説明する. 提案法は呼吸空間クラスタリング法と呼ばれる [15]. 各時刻 t において, r および θ を離散化したうえで, 次式で示す 4 次元ベクトル $\mathbf{x}_{l,n}$ を導入する.

$$\mathbf{x}_{l,n} = [r_l, \theta_n, \tau_r(t, r_l, \theta_n), \tau_r(t - T_{cy}, r_l, \theta_n)]^T \quad (4)$$

ここで $T_{cy} = 6.0$ s とする. このベクトルの第 1 次元および第 2 次元はそれぞれレンジと方位角を表しており, 従来のレーダ信号処理ではこれらの次元における分解能を利用して複数目標を分離識別していた. それに対し, 第 3 および第 4 次元には呼吸イメージングにより得られた呼吸画像の値 (推定呼吸周期) が用いられている. 特に, 第 4 次元は 6.0 s 前の呼吸周期を表しており, 健康な成人の典型的な呼吸周期が 3-5 s であることを考慮すると, 1 周期以上前の呼吸周期を意味する. すなわち, 現時点での呼吸周期だけでなく, 過去の呼吸周期の履歴も用いて複数目標を分離することを意図しているわけである. この 4 次元ベクトルで表現される空間を呼吸空間と呼ぶ. ここでは 4 次元の場合を取り上げたが, より過去の呼吸履歴を用いることで次元数を増加させる拡張も容易である.

提案法では, 呼吸空間において x -means アルゴリズムを適用し, 複数の対象者からの反射波を分離する. その後, 人体の大きさについての先験情報を取り入れ, 誤ってクラスター分離された成分の除去や統合を行う. この処理の詳細は [15] を参照されたい.

5. 提案法の性能評価

被験者の参加する実験により提案法の性能を評価する. 実験では 7 人の被験者が着座し, 静止している. 被験者の中心間の距離は図 1 に示すとおり約 1 m である. 同図の左に示すとおり, 被験者らの位置を定めている. 座標系としては, レーダのアレーの中心を原点とし, アレーベースライン方向を x 軸としている. 計測時間は 120 s とし, その間, 被験者らは自然に呼吸していた. 被験者らにはベルト型の呼吸計を装着し, レーダによる呼吸計測の精度評価に用いた.

図 2 に実レーダ画像 $I_p(t, r, \theta)$ の例を示す. 同図では, レーダから比較的近い距離に位置する 4 名の被験者の応答が明確に分離されていることがわかる. その一方, 3 m 以上離れた被験者 3 名の応答は近接し, 分離が容易ではないことがわかる. ここで示す図は 120 s の計測全体のうち, ある瞬間を切り出したスナップショットであり, 時間帯によっては複数被験者の応答が同図ほど明瞭でないものも存在することに注意いただきたい.

次に, 図 3 に呼吸画像 $\tau_r(t, r, \theta)$ の例を示す. 同図の画像値は推定された呼吸周期である. 同図より, 実レーダ画像では分離

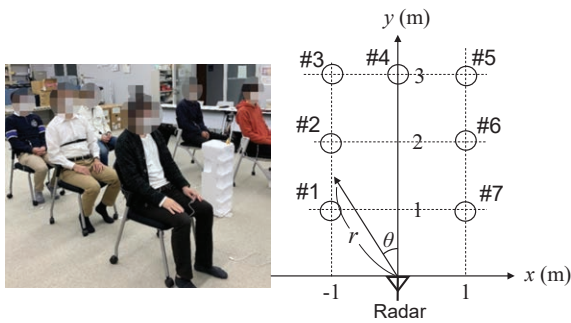


図1 着座した7人の被験者および被験者の配置 [15]

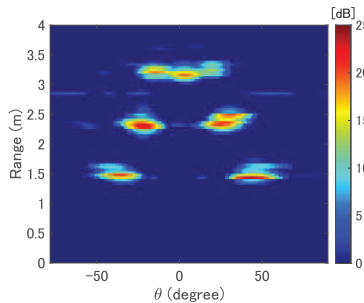


図2 実レーダ画像 $I_P(t, r, \theta)$ の例 [15]

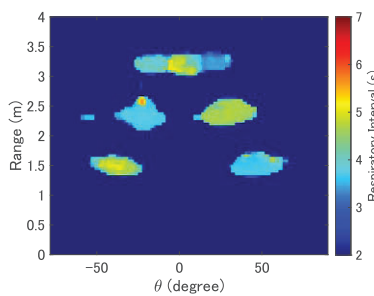


図3 呼吸画像 $\tau_r(t, r, \theta)$ の例 [15]

が容易ではなかった被験者3人に対し、異なる呼吸周期が推定されていることがわかる。よって、呼吸周期を新たな次元として追加した呼吸空間におけるクラスタリングが有効である可能性が示唆される。

図4に、提案する呼吸空間クラスタリング法により推定されたクラスターを示す。7人の被験者に対応する応答が正しくクラスタリングされていることがわかる。比較のため、 k -meansクラスタリングを用いた場合のクラスターを図5($k=6$)および6($k=8$)に示す。これらの例のように、 k -meansでは正しいクラスター数を指定しない場合には不正確な識別となることがわかる。なお、本稿では示さないが、呼吸空間を導入しないクラスタリングでは、被験者7人の分離精度は9.1%となるのに対し、提案する呼吸空間クラスタリング法では97.6%となり、顕著な精度改善が示された。

最後に、推定された各被験者の呼吸変位を図7に示す。ベルト型の呼吸計を参照値とし、レーダによる7人の呼吸同時非接触計測の精度を評価した。呼吸間隔の平均推定誤差は172 msとなり、健康な成人の呼吸間隔の典型値3-5 sと比較し、十分

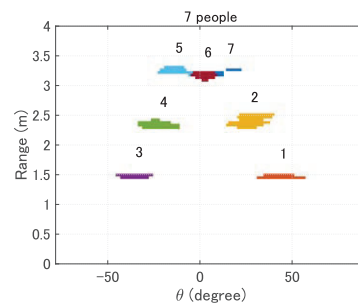


図4 提案法によるクラスタリング結果 [15]

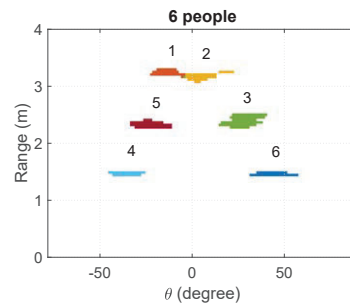


図5 k -meansを用いた場合のクラスタリング結果 ($k=6$)

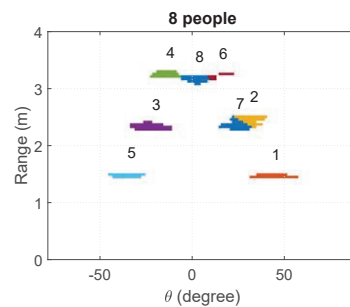


図6 k -meansを用いた場合のクラスタリング結果 ($k=8$)

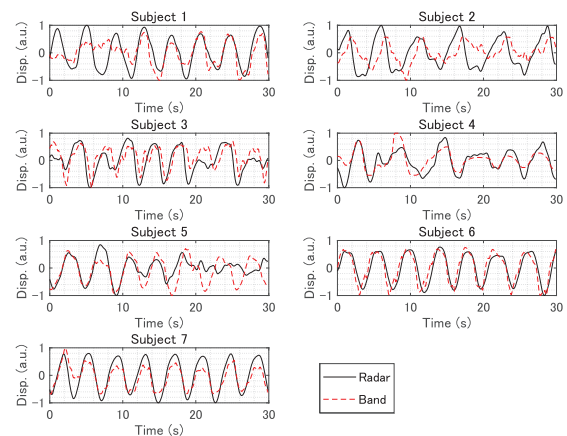


図7 レーダ (提案法) およびベルト型の呼吸計により推定された各被験者の皮膚変位 [15]

に高い精度で7人の呼吸を非接触でレーダ計測できることが示された。

6. ま と め

本稿では、著者らが開発してきた呼吸空間クラスタリング法と呼ばれるレーダ人体センシング技術を紹介した。同手法では、従来のレーダ計測に用いられる距離・角度による複数目標の分離性能の限界を超える性能を得るため、計測対象である人体の呼吸間隔の差異を利用した信号分離を行う。対象人体の距離・方位角に加えて呼吸間隔の過去の履歴を用い、呼吸の個人差に関する情報を取り入れたクラスタリングを行うことで、高精度に信号分離が可能であることが示された。開発法により任意位置に配置された7人の着座した被験者らの呼吸間隔を同時かつ非接触で計測できることを示し、平均誤差172 msという高精度計測を達成した。今後、対象者数をさらに増加させた場合や、対象者が静止せずに自然に行動している場合の精度を詳細に調べることが重要である。また、複数人が密集した場合に生じる遮蔽についても対応策を検討する必要がある。こうした、さらなる精度検証や手法改良は今後の課題としたい。

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、京都産業大学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。関係各位に心より感謝申し上げます。

文 献

- [1] Y. Li, X. Jing, H. Lv, and J. Wang, "Analysis of characteristics of two close stationary human targets detected by impulse radio UWB radar," *Progress in Electromagnetics Research*, vol. 126, pp. 429–447, 2012.
- [2] M. Muragaki et al., "Noncontact respiration monitoring of multiple closely positioned patients using ultra-wideband array radar with adaptive beamforming technique," *Proc. IEEE Int. Conf. Acoustics, Speech & Signal Processing (ICASSP)*, New Orleans, LA, USA, 2017, pp. 1118–1122, doi: 10.1109/ICASSP.2017.7952330.
- [3] S. M. M. Islam, O. Boric-Lubecke, and V. M. Lubecke, "Concurrent respiration monitoring of multiple subjects by phase-comparison monopulse radar using independent component analysis (ICA) with JADE algorithm and direction of arrival (DOA)," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 73558–73569, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2988038.
- [4] Y. Wang, Quanhua Liu, and A. E. Fathy, "Simultaneous localization and respiration detection of multiple people using low cost UWB biometric pulse Doppler radar sensor," *IEEE/MTT-S Int. Microw. Symp. Dig.*, Montreal, QC, Canada, 2012, pp. 1–3, doi: 10.1109/MWSYM.2012.6258423.
- [5] T. Ha and J. Kim, "Detection and localization of multiple human targets based on respiration measured by IR-UWB radars," *IEEE Sensors*, Montreal, QC, Canada, 2019, pp. 1–4, doi: 10.1109/SENSORS43011.2019.8956687.
- [6] O. Boric-Lubecke, V. M. Lubecke, A. Høst-Madsen, D. Samardzija, and K. Cheung, "Doppler radar sensing of multiple subjects in single and multiple antenna systems," *Proc. TELSIKS 2005: 7th, Int. Conf. Telecommun. Modern Satellite, Cable & Broadcasting Services*, Nis, Serbia, 2005, vol. 1, pp. 7–11, doi: 10.1109/TELSKS.2005.1572052.
- [7] C. Lu, Y. Yuan, C. Tseng, and C. Michael Wu, "Multi-target continuous-wave vital sign radar using 24 GHz metamaterial leaky wave antennas," *Proc. IEEE MTT-S Int. Microw. Biomed. Conf. (IMBioC)*, Nanjing, China, 2019, pp. 1–4, doi: 10.1109/IM-BIOC.2019.8777736.
- [8] J. Xiong, H. Hong, H. Zhang, N. Wang, H. Chu, and X. Zhu, "Multitarget respiration detection with adaptive digital beamforming technique based on SIMO radar," *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.*, vol. 68, no. 11, pp. 4814–4824, 2020, doi: 10.1109/TMTT.2020.3020082.
- [9] Y. Yang, J. Cao, X. Liu, and X. Liu, "Multi-Breath: Separate respiration monitoring for multiple persons with UWB radar," *Proc. IEEE 43rd Annu. Computer Software & Applications Conf. (COMPSAC)*, Milwaukee, WI, USA, 2019, pp. 840–849, doi: 10.1109/COMPSAC.2019.00124.
- [10] C. Ding, J. Yan, L. Zhang, H. Zhao, H. Hong, and X. Zhu, "Noncontact multiple targets vital sign detection based on VMD algorithm," *Proc. IEEE Radar Conf. (RadarConf)*, Seattle, WA, USA, 2017, pp. 0727–0730, doi: 10.1109/RADAR.2017.7944298.
- [11] I. Walterscheid, O. Biallawons, and P. Berens, "Contactless respiration and heartbeat monitoring of multiple people using a 2-D imaging radar," *Proc. 41st Annu. Int. Conf. IEEE Eng. Med. & Biology Society (EMBC)*, Berlin, Germany, 2019, pp. 3720–3725, doi: 10.1109/EMBC.2019.8856974.
- [12] W. Su, M. Tang, R. E. Arif, T. Horng, and F. Wang, "Stepped-frequency continuous-wave radar with self-injection-locking technology for monitoring multiple human vital signs," *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.*, vol. 67, no. 12, pp. 5396–5405, Dec. 2019, doi: 10.1109/TMTT.2019.2933199.
- [13] N. V. Rivera, S. Venkatesh, C. Anderson, and R. M. Buehrer, "Multi-target estimation of heart and respiration rates using ultra wideband sensors," *Proc. 14th Eur. Sig. Proc. Conf.*, Florence, Italy, 2006, pp. 1–6.
- [14] D. Novák and D. Kocur, "Multiple static person localization based on respiratory motion detection by UWB radar," *Proc. 26th Int. Conf. Radioelektronika, Kosice, Slovakia*, 2016, pp. 252–257, doi: 10.1109/RADIOELEK.2016.7477386.
- [15] 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.
- [16] D. Pelleg and A. W. Moore, "X-means: Extending K-means with efficient estimation of the number of clusters," *Proc. 17th Int. Conf. Machine Learning*, Stanford, CA, USA, June 2000, pp. 727–734.