

# 超広帯域ドップラアレイレーダを用いた 複数人体の呼吸情報非接触測定

村垣 政志<sup>†</sup> 奥村 成皓<sup>†</sup> 阪本 卓也<sup>††</sup> 水谷 研治<sup>†††</sup> 井上 謙一<sup>†††</sup>  
福田 健志<sup>†††</sup> 酒井 啓之<sup>†††</sup> 佐藤 亨<sup>†</sup>

<sup>†</sup> 京都大学大学院情報学研究科 〒606-8501 京都府京都市左京区吉田本町京都大学大学院情報学研究科通信情報システム専攻

<sup>††</sup> 兵庫県立大学工学研究科 〒671-2280 姫路市書写 2167 兵庫県立大学工学研究科電子情報工学専攻

<sup>†††</sup> パナソニック株式会社先端研究本部 〒619-0237 京都府相楽郡精華町光台 3 丁目 4 番地パナソニック株式会社先端研究本部空間センシング研究部

E-mail: <sup>†</sup>{mmuragaki,sokumura}@sato-lab.0t0.jp, <sup>†††</sup>sakamo@i.kyoto-u.ac.jp,

<sup>†††</sup>{inoue.kenichi,fukuda.takeshi,sakai.hiroyuki}@jp.panasonic.com <sup>†</sup>sato.toru.6e@kyoto-u.ac.jp

あらまし ヘルスケア分野において超広帯域ドップラレーダを用いた非接触呼吸情報測定は重要な技術である。レーダは体表面の微小な動き追跡することができ、呼吸や心拍の測定が可能である。現実的な測定環境を考えた場合、本研究では、アレイと Capon 法を用いて、同一レンジに存在する近接した複数の人体からの信号を分離する新たな手法を提案する。Capon 法は複数の信号の到来方向を推定・分離する適応型信号処理の 1 つである。Capon 法は到来する信号が無相関であることを仮定しているが、体表面から反射する信号は相関を持つため、推定精度が劣化する。そこで、到来方向推定と信号の分離をする際、それぞれ異なる疑似雑音係数を導入することで、推定精度が上昇する手法を提案する。70mm 離れた 2 人の呼吸を同時に測定する実験データを用いて提案法を評価した。その結果、従来法は 3.12 mm 以下の精度であるのに対し、提案法は 0.14mm 以下であり、精度が 20 倍向上したことが分かった。

キーワード ヘルスケア, 呼吸観測, UWB レーダ, Capon 法

## Non-contact respiration measurement of multiple people using ultra-wideband Doppler array radar

M. MURAGAKI<sup>†</sup>, S. OKUMURA<sup>†</sup>, T. SAKAMOTO<sup>††</sup>, K. MIZUTANI<sup>†††</sup>, K. INOUE<sup>†††</sup>, K. FUKUDA<sup>†††</sup>, H. SAKAI<sup>†††</sup>, and T. SATO<sup>†</sup>

<sup>†</sup> Graduate School of Informatics, Kyoto University Yoshidahonmachi, Sakyo-ku, Kyoto, 606-8501, Japan

<sup>††</sup> Graduate School of Engineering, University of Hyogo 2167 Shosha, Himeji, Hyogo 671-2280, Japan

<sup>†††</sup> Sensing Technology Research Group, Advanced Research Division, Panasonic Corporation, Hikaridai 3-4, Seika-cho, Souraku-gun, Kyoto 619-0237, Japan

E-mail: <sup>†</sup>{mmuragaki,sokumura}@sato-lab.0t0.jp, <sup>†††</sup>sakamo@i.kyoto-u.ac.jp,

<sup>†††</sup>{inoue.kenichi,fukuda.takeshi,sakai.hiroyuki}@jp.panasonic.com <sup>†</sup>sato.toru.6e@kyoto-u.ac.jp

**Abstract** Contactless respiration monitoring using Doppler radar is an important technology for healthcare applications. In this study, we propose a new algorithm to separate multiple targets placed closely together at the same range but at different lateral positions using ultra-wideband array radar and the Capon method. We improve the performance by introducing two different diagonal loading factor values for direction of arrival estimation and weight vector calculation.

**Key words** Healthcare, respiration, ultra-wideband radar, Capon method

## 1. まえがき

近年、健康管理アプリケーションの1つとして、ドップラレーダを用いた非接触でのバイタル情報測定が注目されている [1] [2]. ドップラレーダは体表面の微小な動きから心拍や呼吸といったバイタル情報を測定することができる. この研究では、特に呼吸の測定に焦点を当てる. [3].

家庭や病院での就寝時など、現実的な測定環境においてバイタル情報の測定を行う場合、複数人のバイタル情報を同時に計測する技術が広く求められている. 超広帯域レーダ (Ultra-Wide-Band:UWB) は高いレンジ分解能を持つため、異なるレンジゲートに存在する複数のターゲットを容易に分離することができる [4]. しかし、上記のような測定環境を考える場合、同一レンジゲートに複数のターゲットが存在する環境下での測定技術が必要である.

そこで、同一レンジゲート内に存在する近接複数目標の位置、信号を到来方向の差を利用してそれぞれ別々に推定する方法を提案する. 信号の到来方向を推定するため、アレイレーダを用いる. Capon 法は高分解能到来方向推定方法の一つであり、測定方向の応答を保持する拘束条件のもと、出力電力を最小化する最適化問題を解くことで、各アンテナに適用する最適なウエイトベクトルを計算することで高い角度分解能で信号の到来方向を高い角度分解能で推定することができる. 同様の原理を用いて所望方向からの信号を保持する拘束条件下でのウエイトベクトルを用いると、その方向以外からの信号を分離することができる [5].

Capon 法は到来する信号間の相関が無いことを仮定している. しかし、複数人から反射波を考えた場合、それぞれの信号間の相関は高いと考えられる. そこで、この問題を解決するために、複数の疑似雑音係数を用いたバイタル信号分離技術を提案する. 疑似雑音は角度分解能と測定の安定性を調整するパラメータである [6]. 従来、Capon 法を用いて到来方向の推定と信号の分離を行う場合、同一の疑似雑音を用いていた [7]. しかし、今回のアプリケーションの場合、信号の到来方向推定と分離では求める性質が異なる. 到来方向推定には高い角度分解能が重要であるのに対し、信号の分離には安定性が重要である.

次に、ターゲットからの信号強度は呼吸によってターゲットの体表面の向きや距離が変わるため、それぞれのターゲットの信号強度の大小関係は時間によって異なる. そのため、単純なしきい値処理を施して到来方向推定を行った場合、目標を見失う時間ができる. こうした状況でもターゲットからの信号の到来方向を推定するため、到来方向推定結果のヒストグラムを作成し、ある時間幅の中で目標が存在する角度を推定する.

最後に、到来方向推定結果には相関性に由来する誤差が含まれているので、ヒストグラムから得られた角度とその近傍について信号を分離し、分離済み信号の候補を作成し、それらについて変位を計算するとともに、最も信頼性の高いものを抽出することで、安定した測定を実現する. 本論文では、提案法を実験データで評価する.

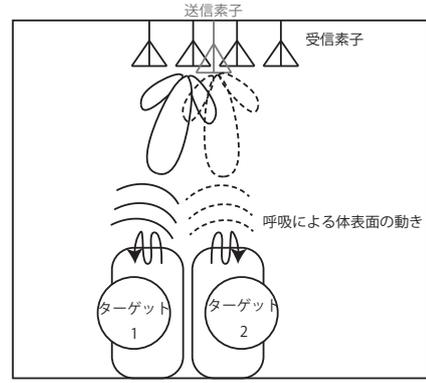


図 1 実験のモデル図

## 2. UWB レーダを用いた呼吸測定

まず、レーダで変位を測定する方法について説明する. 体表面の微小な変位はレーダの位相回転に現れる [8]. 体表面の変位  $l(t)$  は受信信号  $s(t)$  と中心周波数における波長  $\lambda$  を用いて次式で与えられる.

$$l(t) = \text{unwrap}(\arg[s(t)])\lambda/4\pi \quad (1)$$

複数のターゲットからの信号が混信している場合、正確に変位を推定することができなくなるため、信号を分離する必要がある.

### 2.1 Capon 法とヒストグラムを用いた到来方向推定

本論文では、同一レンジに存在するが視線方向が異なる 2 つのターゲットからの信号をアレイレーダを用いて分離する.  $M$  個の受信アンテナを持つアレイレーダの受信信号に適応型ビームフォーマを適用する. 図 1 に実験のモデル図を示す.

Capon 法は適応型ビームフォーマ法の 1 つで、所望方向からの応答を保持する拘束条件与えながら、非所望方向からの信号電力の寄与を最小化することで、高分解能に信号を分離することができる. 出力電力  $P_{\text{out}}(\theta, t)$  は、ウエイトベクトル  $\mathbf{w}$ 、相関行列  $\mathbf{R}(t)$ 、ステアリングベクトル  $\mathbf{a}(\theta)$ 、所望波方向  $\theta$ 、光速  $c$ 、忘却係数  $\beta$  を用いて次式で与えられる.

$$P_{\text{out}}(\theta, t) = \min\left(\frac{1}{2}\mathbf{w}^H\mathbf{R}(t)\mathbf{w}\right) \quad (2)$$

$$\text{subject to } \mathbf{a}^T(\theta)\mathbf{w}^* = 1,$$

$$\mathbf{a}(\theta) = [1, \dots, \exp\left(\frac{-j\omega d(M-1)\sin(\theta)}{c}\right)], \quad (3)$$

$$\mathbf{R}(t) = \beta\mathbf{R}(t - \Delta t) + (1 - \beta)\mathbf{R}_0(t), \quad (4)$$

$$\mathbf{R}_0(t) = \mathbf{s}(t)\mathbf{s}^H(t), \quad (5)$$

$$\mathbf{s}(t) = [s_1(t) \dots s_M(t)]^T, \quad (6)$$

式 (2) の最小化問題は、ラグランジュの未定乗数法で解くことができる. したがって、Capon 法の出力電力は疑似雑音係数  $\eta_\theta$  を用いて次式で与えられる.

$$P_{\text{out}}(\theta, t) = \frac{1}{\mathbf{a}^H(\theta)(\mathbf{R}(t) + \eta_\theta\mathbf{I})^{-1}\mathbf{a}(\theta)}, \quad (7)$$

疑似雑音係数は大きい値ほど与える雑音が大きくなり、角度分解能は低下するが安定性が増す. 出力電力はターゲットの到来

方向に近いほど大きな値になるので、角度に対する出力電力を計算した場合、そのピーク値が到来方向を表している。

前述したとおり、信号強度は時間とともに変化するので、出力電力のピークから2つの到来方向を常に推定することはできない。そこで、ある時間についての出力電力のピークについてヒストグラムを作成し、正しい到来方向を推定する。各スナップの到来方向は正しい到来方向近辺に出現するので、一定区間のヒストグラムを作成しその最大値に対応する角度を到来方向推定結果とすることで、時間による揺らぎを抑圧できる。

## 2.2 信号の分離と変位の推定

到来方向を推定することはできたが、到来波同士に相関があるため推定精度は低い。そこで、求めた到来方向近傍の角度を候補として加えることで、推定の安定性を向上する。本論文では、それぞれの到来方向とその近傍を候補として取り出した。本研究では候補を5つずつ選択した。このとき、候補である到来方向は角度推定間隔  $\Delta\theta$ 、候補番号  $i$  を用いて次のように与えられる。

$$\theta_{k,i} = \theta_k + (i - 2)\Delta\theta \quad (8)$$

これらの候補の角度についての Capon 法より得られる最適なウェイトベクトルは疑似雑音係数を用いて次式で与えられる。

$$\mathbf{w}_{\text{opt}}(\theta_{k,i}) = \frac{(\mathbf{R}(t) + \eta_w \mathbf{I})^{-1} \mathbf{a}(\theta_{k,i})}{\mathbf{a}^H(\theta_{k,i}) (\mathbf{R}(t) + \eta_w \mathbf{I})^{-1} \mathbf{a}(\theta_{k,i})}. \quad (9)$$

到来波同士の相関性が高いとき、Capon 法はそれらすべてをキャンセルすることで出力電力を最小化してしまい、信号を分離できなくなる。疑似雑音係数を到来方向推定で使用した値よりも大きくすることで、測定の安定性を確保できる。

候補角に対する信号  $s_{k,i}(t)$  とその変位  $l_{k,i}(t)$  は次式で与えられる。

$$s_{k,i}(t) = \mathbf{w}_{\text{opt}}^H(\theta_{k,i}) \mathbf{s}(t), \quad (10)$$

$$l_{k,i}(t) = \text{unwrap}(\arg[s_{k,i}(t)])\lambda/4\pi, \quad (11)$$

候補角が真値に近い値の場合、そこから求められる変位は正しい値に近くなる。一方、候補角が正しくない場合は Capon 法はすべての信号を抑圧しようとするため、分離された信号はランダム信号になる。

正しい到来方向を推定するため、候補角から求められる変位の差を考える。このとき、 $i_1$  番目と  $i_2$  番目の変位の差は次式で与えられる。

$$d_k(i') = \sum_{t=t_1}^{t_2} |l_{k,i_1}(t) - l_{k,i_2}(t)|, \quad (12)$$

本研究では、候補を5つとしたため、 ${}_5C_2 = 10$  通りの組み合わせが得られる。これを、すべての組み合わせについて計算し、その中から最小となる組み合わせを最終的な候補として選択する。最終的に提案法における変位は次式で与えられる。

$$l_e(t) = \text{unwrap}(\arg[s_{k,i'_1}(t) + s_{k,i'_2}(t)])\lambda/4\pi, \quad (13)$$

ここで、 $i'_1, i'_2$  は最終的に選択された組み合わせである。

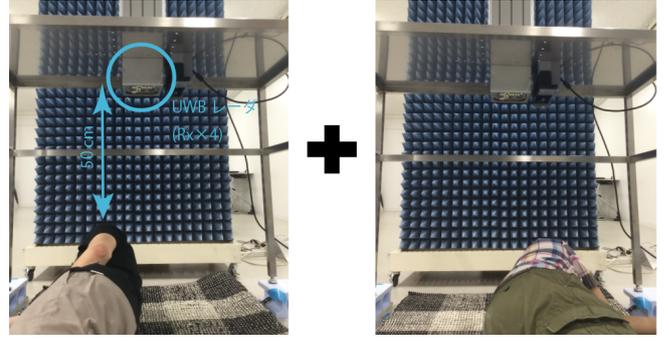


図2 実験の様子

## 3. 実験概要

図2に実験の様子を示す。2人の被験者をそれぞれ個別にレーダで1分間測定した。その後取得データを線形加算することで、2人で同時に測定した状況を模倣した。被験者はともに同一レンジに存在し、視線方向距離は約500 mmで、ターゲット間の距離は約70 mmであった。

使用するレーダについて、送信信号の中心周波数は60.5 GHz、帯域幅は1.25 GHz、パルス繰り返し間隔は7.3 ms、レンジ分解能は12 cm、受信素子の間隔は3.3 mm、受信素子数は4つである。提案法で使用した疑似雑音係数は受信信号強度に対して、 $\eta_\theta = -50\text{dB}$ 、 $\eta_w = -10\text{dB}$ とした。角度推定間隔  $\Delta\theta = 1\text{deg}$ 、忘却係数は0.5秒分のデータを平均することに相当する  $\beta = 0.99$  と定めた。

## 4. 結果

図3に提案法、従来法および高い疑似雑音係数を用いた Capon 法について到来方向推定結果を示す。従来法はノンアダプティブなビームフォーミング法を用いた。提案法は疑似雑音係数  $\eta_\theta = -50\text{dB}$  に設定しており、二つのターゲットの位置を正しく示している様子が分かる。一方、提案法および疑似雑音係数を  $\eta_\theta = -10\text{dB}$  に設定した場合は、それぞれの位置を特定できていない。

図4に到来方向推定結果のヒストグラムを示す。パルス繰り返し間隔は7.3msで相関行列の平均時間は0.5sなので、68サンプルごとに独立なデータが得られる。提案法は二つのターゲットの位置を正確に表しているが、片方のターゲットの位置しか推定できておらず、そのピークも鈍い。

図5に変位の推定結果を示す。提案法は変位を正確に推定できている。平均最小二乗法を用いてターゲット1とターゲット2についての誤差を評価すると、提案法の誤差は(ターゲット1, ターゲット2) = (0.08, 0.14) mmで、従来法は(ターゲット1, ターゲット2) = (3.13, 0.70) mmであった。提案法は疑似雑音係数を  $\eta_\theta = -10\text{dB}$  とし、安定性を高めることで、変位を正確に推定することができたが、 $\eta_\theta = -50\text{dB}$  とし、角度分解能を高めた場合は変位がランダムに動いており、推定することができていない。

図3-5の黒色の実践は疑似雑音係数を誤って設定した場合の結果を示している。これらの結果は、呼吸測定においては、適切

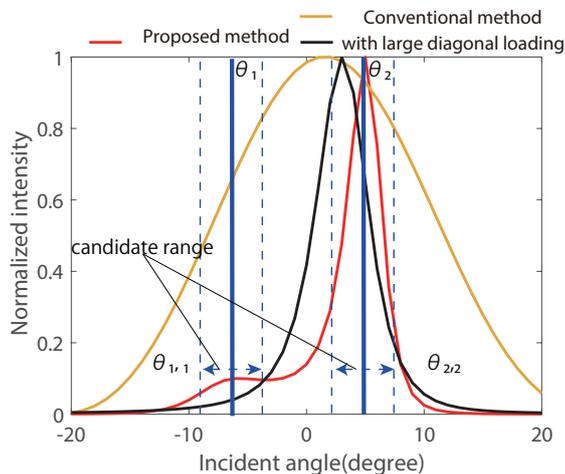


図3 提案法, 従来法および  $\eta_\theta = -10$  dB としたときの到来方向推定結果

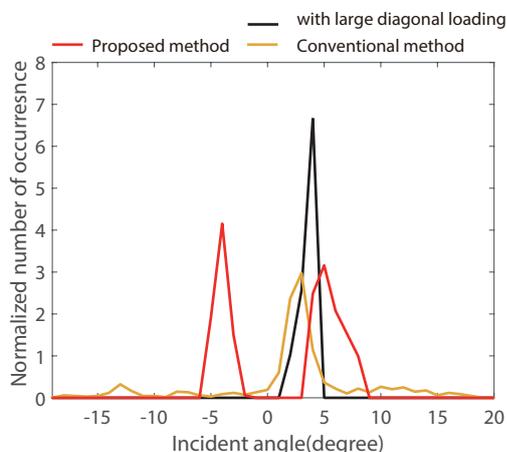


図4 到来方向推定結果のヒストグラム

な疑似雑音係数を用いることが重要であることを示している。

## 5. 結 論

本論文では, Capon 法を呼吸測定に適用する際, 到来方向の推定と変位の推定で異なる疑似雑音係数を用いることとヒストグラムを用いて安定性を挙げる手法を提案した. 2人の呼吸を測定したデータに提案法を適用し, 従来法のビームフォーマは RMSE が 3.12mm 以下であったのに対し, 提案法は 0.14mm 以下での測定に成功し, 精度が 20 倍向上した.

## 文 献

- [1] Jianxuan Tu, Taesong Hwang, and Jenshan Lin, "Respiration rate measurement under 1-d body motion using single continuous-wave doppler radar vital sign detection system," IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 64, no. 6, pp. 1937-1946, 2016.
- [2] Changzhan Gu, Zeeshan Salmani, Hualiang Zhang, and Changzhi Li, "Antenna array technology for radar respiration measurement in motion-adaptive lung cancer radiotherapy," in Biomedical Wireless Technologies, Networks, and Sensing Systems (BioWireless), 2012 IEEE Topical Conference on. IEEE, pp. 21-24, 2012.

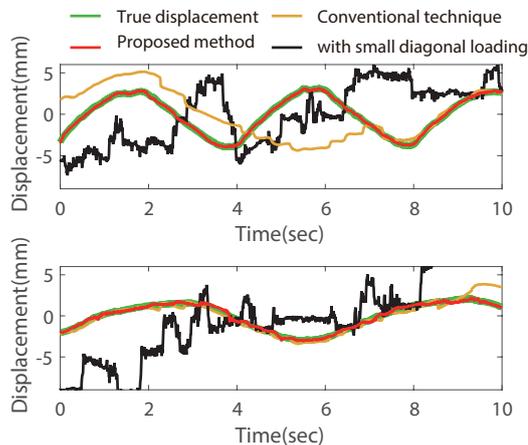


図5 提案法, 従来法および  $\eta_\theta = -50$  dB の変位推定結果

- [3] Mari Zakrzewski, Antti Vehkaoja, Atte S Joutsen, Karri T Palovuori, and Jukka J Vanhala, "Non-contact respiration monitoring during sleep with microwave doppler radar," IEEE Sensors Journal, vol. 15, no. 10, pp. 5683-5693, 2015.
- [4] Takuya Sakamoto, Ryohei Imasaka, Hirofumi Taki, Toru Sato, Mototaka Yoshioka, Kenichi Inoue, Takeshi Fukuda, and Hiroyuki Sakai, "Accurate heartbeat monitoring using ultra-wideband radar," IEICE Electronics Express, vol. 12, no. 3, pp. 20141197-20141197, 2015.
- [5] Jack Capon, "High-resolution frequency-wavenumber spectrum analysis," Proceedings of the IEEE, vol. 57, no. 8, pp. 1408-1418, 1969.
- [6] Jian Li, Petre Stoica, and Zhisong Wang, "On robust capon beamforming and diagonal loading," IEEE Transactions on Signal Processing, vol. 51, no. 7, pp. 1702-1715, 2003.
- [7] 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," in Antennas and Propagation (ISAP), 2016 International Symposium on. IEEE, 2016.
- [8] Wansuree Massagram, Victor M Lubecke, Anders HÅyst-Madsen, and Olga Boric-Lubecke, "Assessment of heart rate variability and respiratory sinus arrhythmia via doppler radar," IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 57, no. 10, pp. 2542-2549, 2009.