

ミリ波非接触呼吸モニタリングによる画像診断・治療精度向上

*¹近畿大学病院中央放射線部, *²近畿大学大学院医学研究科医学物理学専攻

小坂 浩之*^{1, 2}, 門前 一*²

Hiroyuki KOSAKA, Hajime MONZEN



1. はじめに

胸部単純X線撮影やCT検査, そして高精度放射線治療において, 患者の呼吸状態を正確に管理することは, 画像診断の再現性および治療線量の幾何学的精度を担保する上で極めて重要である^{1)~3)}。呼吸性移動は画像にモーションアーチファクトを生じさせ, 病変の不明瞭化やターゲットの位置ズレを引き起こす主要因となる^{4), 5)}。特に, 不適切な吸気状態での画像診断は, 健常者であっても肺炎様の陰影や心拡大, 横隔膜挙上といった偽陽性の所見を呈するリスクがあり^{6), 7)}, 結果として再撮影による患者の被ばく線量増加や診断の遅延を招くことが長年の課題であった。また, 放射線治療, とりわけ肺癌などに対する定位放射線治療においては, 照射中の呼吸性移動に伴う腫瘍位置の変動が著しく精度を低下させるため⁸⁾, リアルタイムでの呼吸の監視が重要である。

しかしながら, 現在の臨床現場における呼吸確認の手法は, 依然として検査実施者の目視確認という主観的な手法に依存している側面が強い。この手法は実施者の経験則に左右されやすく, 再現性に乏しい。加えて, 息止めの指示に従うことが困難な乳幼児や認知症患者, あるいは意識障害のある患者に対しては, 適切な撮影タイミングを捉えることが極めて困難であるという実情がある。既存の対策として, 赤外線カメラを用いた光学式トラッキングシステムやデプス(深度)カメラなどが開発されているが^{9), 10)}, 高額な導入コスト, マーカ装着の手間, あるいは測定のために衣服を脱ぐ必要があるといったプライバシーや臨床ワー

クフローへの干渉が障壁となり, 標準的な検査室への普及には至っていない。

一方, ミリ波センサはマイクロ波やミリ波を利用したセンサで, 環境ノイズに強く, 小型化・低消費電力が可能という特徴があり^{11), 12)}, これまでに動物病院・ペットホテルでの動物の健康管理や, センサを直接設置できない箇所の保守および点検, 施設等の在室検知, エリア内の密集度検知, 防犯自転車等の危険回避等で試用が始まっている¹³⁾。本稿では, これまでの課題を包括的に解決する革新的なアプローチとして, ミリ波センサを用いた非接触呼吸モニタリングシステムおよび体動検知システムの開発について詳述する。

2. ミリ波センサ技術の仕組みと特長

ミリ波は, 一般に30~300 GHzの周波数帯域を持つ電磁波と定義され, その波長は1~10 mmと極めて短い。この物理的特性により, マイクロ波と比較して高い分解能を有し, 対象物の微細な変位を高精度に検出することが可能である。本研究では, 産業科学医療用(ISM)バンドに属する24 GHz帯(波長約12.5 mm)のミリ波を採用している。77 GHz帯などのより高周波の帯域と比較して, 24 GHz帯は人体組織や衣服, 毛布, さらには放射線治療で用いられる熱可塑性シェルなどの固定具に対する透過性が高く, かつ適度な反射率を有するため, 医療現場における非接触モニタリングに最適な周波数帯である。

本システムの中核となるのは, ドップラー効果を応用した連続波レーダ(CW Radar)技術である。センサから送信された24 GHzの電波は, 対象物(患者の胸腹部)で反射し, 受信アンテナに戻る。この際, 対象物が移動(呼吸による胸壁の振動など)していると, 反射波の周波数は送信波に対して偏移する。このドップラー周波数偏移(f_d)は, 次の

■ 著者連絡先

近畿大学病院中央放射線部
(〒590-0197 大阪府堺市南区三原台1-14-1)
E-mail: h-kosaka@med.kindai.ac.jp

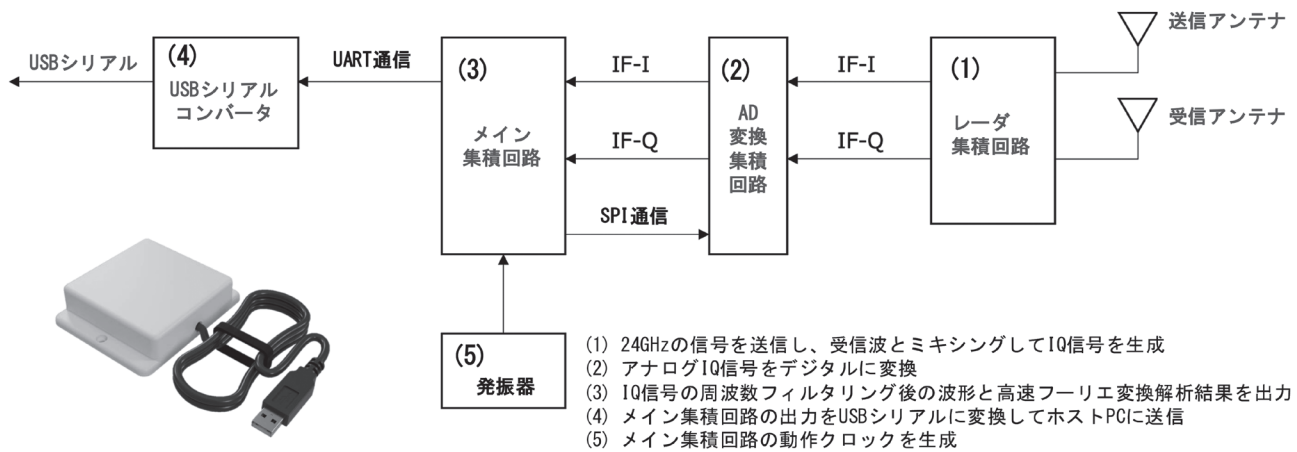


図1 ミリ波センサシステムの回路構成と主要コンポーネント

AD, analog to digital; IF, Intermediate Frequency; IQ, In-phase/Quadrature; SPI, Serial Peripheral Interface ; UART, Universal Asynchronous Receiver Transmitter; USB, Universal Serial Bus.

基本式で表される。

$$f_d = \frac{(2 \cdot v \cdot f_0 \cdot \cos \theta)}{c}$$

ここで、 v は対象物の速度、 f_0 は送信周波数(24 GHz)、 θ は速度ベクトルと送信ビームのなす角度、 c は光速である。この原理により、呼吸に伴う胸腹部の微細な変位を、リアルタイムかつ連続的な波形として可視化することが可能となる。利点として、①完全非接触であるため患者への負担がゼロであること、②衣服の上からでも正確に測定できプライバシーに配慮できること、③コンパクト設計で既存の医療機器に組み込みやすいこと、④そして従来のモニタリング機器より大幅にコストを削減できることが挙げられる。

3. 呼吸モニタリングシステム開発と性能評価

ミリ波センサ(Milweb[®], SMK株式会社)本体とその回路構成を図1に示す。本システムは24 GHz送受信アンテナ、レーダー集積回路(Radar IC)、中間周波数信号処理部からなるミリ波モジュール部、アナログ-デジタル変換器、高速フーリエ変換(FFT)処理、バンドパスフィルタからなるデジタル信号処理部、そしてUSB(Universal Serial Bus)通信モジュールとリアルタイム表示、ソフトウェアからなるインターフェース部の3つの部分から構成されている。システム内部では、レーダー集積回路が送信波と受信波の位相差を検出し、対象物の速度情報をエンコードしたIF(中間周波数)信号(I信号およびQ信号)を出力する。このアナログ信号はAD(analog to digital)変換された後、メイン集積回路(Main IC)にてFFT解析および帯域通過フィルタリング(Band-pass filtering)処理が施され、呼吸成分が抽出

される。

本センサのアンテナ指向性については、電波暗箱システムを用いて、方位角で約±20度、仰角で約±40度の有効ビーム幅を有していることが確認されている。この有効測定範囲の広さにより、被験者の体格の違いや少しの位置のズレがあっても、安定した測定が可能である。また、呼吸の動きを正確に捉えるため、センサの感度を高く設定し、周囲の雑音を除去する機能を用いた。さらに、正常呼吸数(1分間に12~18回)を確実に測定できるよう最適な閾値(上限:20 min⁻¹, 下限:10 min⁻¹)を設定し、被験者の体の動きや周囲の雑音による影響を最小限に抑える工夫をした。QUASAR呼吸動態ファントム(東洋メディック株式会社)との同期測定により精度を定量評価した結果、振幅5 mmで測定誤差2.7%、振幅10 mmで測定誤差0.7%、振幅15 mmで測定誤差1.3%という結果を得た。すべての条件で測定誤差3%以内を達成し、臨床使用に十分な精度であることを証明した。

4. 呼吸モニタリングシステムの臨床検証結果

健康なボランティア20名(年齢:6ヶ月~64歳)を対象に検証を実施した。実臨床での使用を想定して、CT撮影環境では仰向け姿勢、前後方向、センサ距離400 mmの条件で、単純X線撮影環境では立位姿勢、後前方向、センサ距離1,800 mmの条件で検証を行った(図2)。成人被験者18名において呼吸停止状態の検出精度を評価した結果、呼吸停止時には信号強度の平坦化であるプラトー形成が観察され、呼吸再開時には周期的振動パターンの再開が確認できた。図3aにボランティア2名(14歳男性, 41歳女性)のCT撮影環境での呼吸波形、図3bに単純X線撮影環境での

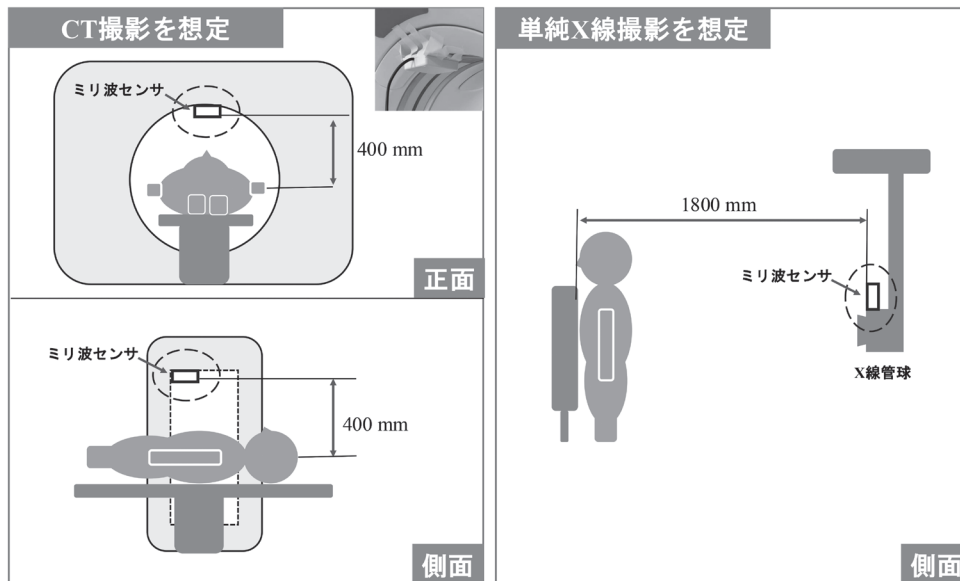


図2 ミリ波センサを用いた呼吸モニタリングシステム検証時の配置図

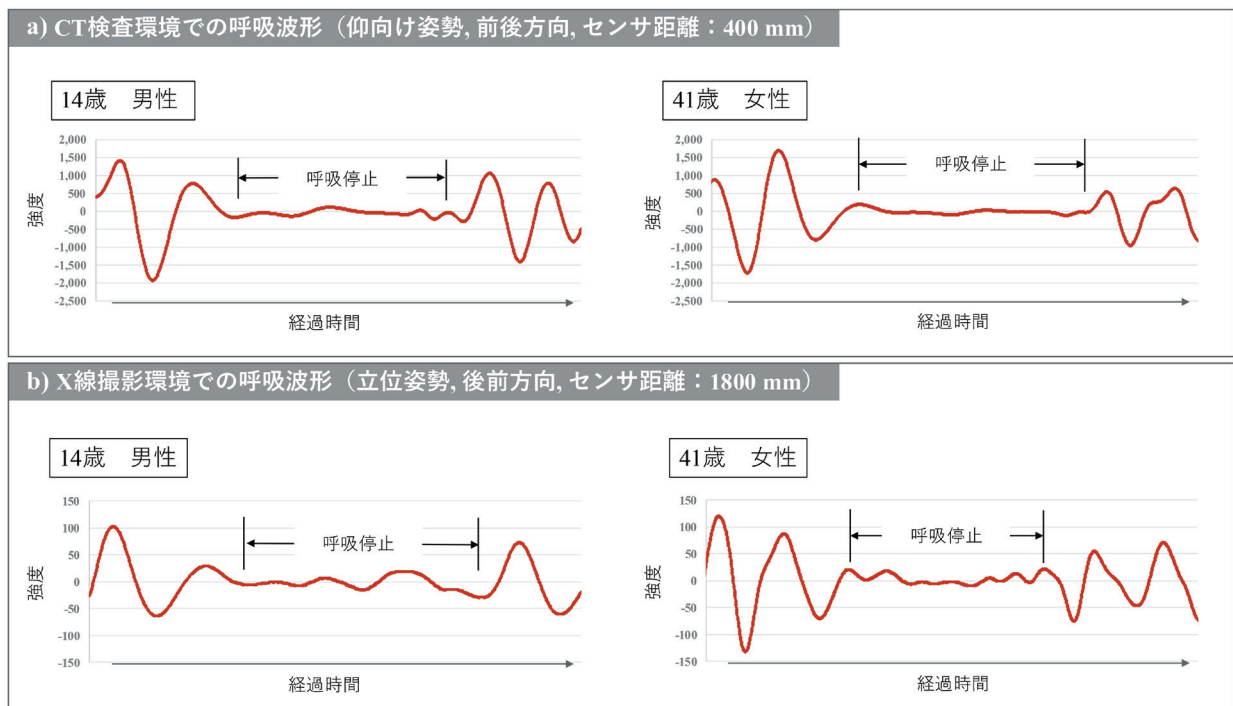


図3 仰臥位CT撮影環境時(a)と立位X線撮影環境時(b)の非接触呼吸モニタリング波形

呼吸波形を示す。検出遅延は0.5秒以内であった。

また、指示理解が困難な乳幼児(6ヶ月)と小児(4歳)も対象に実施した。睡眠中の自然呼吸を測定し、目視カウントとの本システムの波形の一致率を評価した結果、呼吸数の一致率は5回の測定すべてにおいて100%であり、安定した波形取得が可能で、体動の影響も最小限であった。この結果は、従来困難とされていた小児・乳幼児の呼吸モニタ

リングにおける本システムの有用性を明確に示している。

5. 体動検知システム開発と臨床検証結果

前述の通り、定位放射線治療や強度変調放射線治療では、治療中の患者の体動が線量分布の誤差やリスク臓器への過剰照射につながるため、mm単位での管理が求められる。本システムは、単一のセンサで患者の三次元的な動きを効

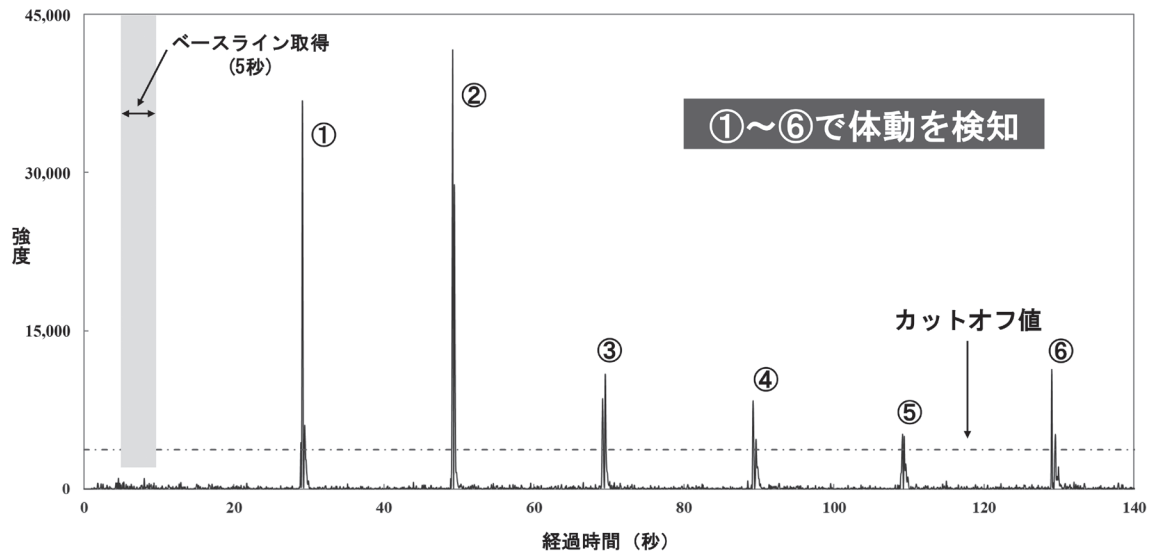


図4 ミリ波センサを用いた体動検知システムの概要

率的に捉えることを目的としている。その技術的工夫として、センサの配置を身体の軸に対して方位角45度、俯角35度に設定した。この最適な角度設定により、治療用カウチのわずか2 mm程度の微細な変位から、臨床上の課題となる四肢の動きや身震いまでを正確に捉えることが可能となった。特筆すべきは、衣服や固定具である熱可塑性シェルの上からでも、対象の動きを確実に検知できる点にある。システムの技術的な核心は、個々の患者の生理的変動と異常な体動を厳密に識別するアルゴリズムの構築である。得られるドップラー波形には、呼吸や心拍といった「定常的な成分」と、咳やくしゃみ、身じろぎといった「突発的な体動」が混在する。これらを高精度に区別するため、本システムでは独自の解析手法を確立した。具体的には、治療開始前の安静時データから基準振幅（ベースライン幅）を算出し、個別に最適化されたカットオフ値を設定する手法を採用している（図4）。

健康なボランティア10名（年齢：23歳～55歳）を対象とした検証の結果、最適な係数を用いることで、生理的な呼吸性移動と、治療の中断を要する有意な体動を100%分離できることが実証された。このアルゴリズムにより、個々の患者のバイタルサインに合わせた柔軟かつ厳密なモニタリングが可能となり、放射線治療などの精密さが必要となる現場における安全性と質の向上に寄与することが期待される。

6. 今後の展開と応用

現代医療において、診断精度の向上、検査効率の改善、および撮影手順の客観的な標準化は、医療の質を左右する

重要な課題である。本システムは、患者の息止め状態をリアルタイムで可視化することにより、最適なタイミングでの撮影を可能にする。これにより、不適切な呼吸状態による再撮影を大幅に削減し、撮影者の習熟度に依存しない高精度な医療環境を実現する。

本技術の応用範囲は診断に留まらず、放射線治療分野においても革新をもたらす。現在進行中の応用研究では、呼吸周期に合わせた精密な照射タイミングの最適化や、治療中の体動の即時検出を実現し、照射精度の飛躍的な向上を目指している。特に、呼吸による臓器の動きが激しい肺がん等の治療において、リアルタイムでの呼吸パターンの監視は安定した治療環境の提供に不可欠であり、本システムはその中核を担う。さらに、機械学習との融合により、個々の患者の呼吸特性を学習し、異常パターンの検知や撮影タイミングの予測を行う高機能化も進めている。2027年の市場投入を目指し、将来的には人工知能(AI)による自動化された撮影システムの構築を視野に入れ、次世代の医療インフラとしての確立を目指す。

7. まとめ

ミリ波センサを用いた非接触呼吸モニタリングシステムは、現代医療における診断精度の向上と業務効率化を推進する上で、中核を担う新規性の高いアプローチである。本システムは、従来のモニタリング技術において課題であった患者への身体的負担、測定精度の不一致、および導入コストの障壁を包括的に解決し、客観的かつ高精度な呼吸状態の把握を実現する。本技術の最大の特徴は、その高い汎用性と実用性にある。乳幼児から高齢者まで対象を選ばず

適用可能であり、低コストでの導入や既存の医療装置への容易な組み込みを可能にする。今後の製品化を通じて、胸部画像診断における呼吸管理の標準化を牽引し、次世代医療における新たなスタンダードを確立することを目指している。

さらに、本システムは放射線治療や救急医療といった多角的な分野への応用が進んでいる。放射線治療においては、患者の体動をリアルタイムで検出するシステムとしての研究を深化させ、治療精度の極大化を図っている。また、AED（自動体外式除細動器）へのシステム搭載による心肺停止状態の迅速な検知と、継続的な呼吸モニタリングとの両立など、救急医療現場における相乗効果を狙った研究開発も並行して実施している。このように医療のデジタル化推進における中核技術として、継続的な発展が見込まれ、医療現場のニーズに応える実用的な技術として、本システムの早期実用化が医療の質向上と効率化に大きく貢献することが期待される。

本稿のすべての著者には規定されたCOIはない。

文 献

- 1) 門前 一, 小坂浩之: 胸部X線撮影やCT検査時の呼吸状態の非接触モニタリングの概要と臨床実装への期待, 新医療 **52**: 86-89, 2025
- 2) 大阪府診療放射線技師会: 一般X線撮影検査. <https://www.daihougi.ne.jp/general-5-1> Accessed 1 Feb 2026
- 3) Palma D, Visser O, Lagerwaard FJ, et al: Impact of introducing stereotactic lung radiotherapy for elderly patients with stage I non-small-cell lung cancer: a population-based time-trend analysis. *J Clin Oncol* **28**: 5153-9, 2010
- 4) 瓜倉厚志: 基本的な胸部CT撮影の再考. 日放技学誌 **77**:

1337-44, 2021

- 5) Ryczkowski A, Piotrowski T: Forecasting of the composite dose for organs at risk and solid targets with random movements during different image-guided scenarios of the photon radiation therapy. Solution for the Varian therapeutic line. *Rep Pract Oncol Radiother* **26**: 489-94, 2021
- 6) De Ruyscher D, Faivre-Finn C, Moeller D, et al; Lung Group and the Radiation Oncology Group of the European Organization for Research and Treatment of Cancer (EORTC): European Organization for Research and Treatment of Cancer (EORTC) recommendations for planning and delivery of high-dose, high precision radiotherapy for lung cancer. *Radiother Oncol* **124**: 1-10, 2017
- 7) Masuda H, Kawahara D, Saito A, et al: Reduction of margin to compensate the respiratory tumor motion by the analysis of dosimetric internal target volume in lung SBRT with nonuniform volume prescription method. *Med Phys* **48**: 3200-7, 2021
- 8) Keall PJ, Mageras GS, Balter JM, et al: The management of respiratory motion in radiation oncology report of AAPM Task Group 76. *Med Phys* **33**: 3874-900, 2006
- 9) Berson AM, Emery R, Rodriguez L, et al: Clinical experience using respiratory gated radiation therapy: comparison of free-breathing and breath-hold techniques. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* **60**: 419-26, 2004
- 10) Wijenayake U, Park SY: Real-Time External Respiratory Motion Measuring Technique Using an RGB-D Camera and Principal Component Analysis. *Sensors (Basel)* **17**: 1840, 2017
- 11) Olick-Gibson J, Cai B, Zhou S, et al: Feasibility study of surface motion tracking with millimeter wave technology during radiotherapy. *Med Phys* **47**: 1229-37, 2020
- 12) Kosaka H, Kubo K, Matsumoto K, et al: Exploring the feasibility of millimeter-wave sensors for non-invasive respiratory motion visualization in diagnostic imaging and therapy. *Med Phys* **52**: 3088-96, 2025
- 13) Waldschmidt C, Hasch J, Menzel W: Automotive Radar From First Efforts to Future Systems. *IEEE J Microwaves* **1**, 135-48, 2021