

# 論文の内容の要旨

氏名：HU YAOKUN

博士の専攻分野の名称：博士（工学）

論文題名：Novel Remote Heart Rate Monitoring Systems Based on mm-Wave FMCW Radar  
(ミリ波 FMCW レーダに基づく新型リモート心拍モニタリングシステム)

## 1. 背景

日本において 65 歳以上の割合が 28.9%であり、今後も高齢化が進行する状況である。そのため、制度や体制では対応しきれない問題が露呈してきている。医療において要介護の高齢者が急速に増加する見込みである。しかしながら、介護できる者がいない、あるいは独身老人が増えているという問題点が挙げられる。心拍数は健康管理をするための指標となる。たくさんの病気は心拍数によって早期発見することができる。そのため、今は独身老人向けの心拍モニタリングアプリケーションの開発が急務となっている。

## 2. 従来方法

接触式測定器を長時間装着することは、患者に不快感を与える可能性がある。一方、皮膚潰瘍が大きい患者など一部の特殊な患者にとっては、接触式検出方法は患者に二度目の傷害を与える可能性がある。また、様々な原因で心拍数を遠距離で測定する必要がある場合が多いため、非接触でバイタルサインを検出する方法が登場してきた。

バイタルサインモニタリングの分野で一般的な非接触検出方法としては、音響振動検出、光学検出、赤外線検出などがある。光学検出技術は検出環境の光、曇り、雨、煙、埃、測定対象物の表面を覆う障害物などの影響を受けて検出結果が悪くなる可能性が高いである。音響振動検出技術は環境ノイズの影響を受けやすく、浸透力が弱いである。赤外線検出技術では、より厳しい環境温度が求められる。従って、これらの検出方法は、被験者に接触することなくリモートで生体信号を検出することができるが、実際に環境要因の影響を受けやすく、より理想的な環境しか測定できないため、実用化には困難となると考えられる。一方、レーダを用いた非接触バイタルサインモニタリングは、従来の非接触検出方法に比べて、消費電力が低くて浸透性や干渉耐性が高いであり、24 時間でモニタリングができる。

現在、非接触バイタルサインモニタリングによく使用されているレーダタイプとしては、連続波ドップラーレーダ、インパルス超広帯域レーダと周波数変調連続波レーダ (Frequency Modulated Continuous Wave Radar: FMCW Radar)である。FMCW レーダは連続波ドップラーレーダとインパルス超広帯域レーダの長所を併せ持ち、測距、速度能力、多目標分解能、高い感度及び強力な対妨害能力を備えている。それに、77GHz の波長が短く、微小な変位を測定しやすいため、本研究は 77GHz 帯の FMCW レーダを用いた。

近年、レーダを用いて非接触に呼吸や心拍と言ったバイタルサインを測定する研究が進んでいる。しかし、従来研究では、測定方向が単一であり、被験者が静止状態という前提条件が必要である。このため、我々は多方向からでも測定できる phase accumulation-linear interpolation (PA-LI)–improved complete ensemble empirical mode decomposition with adaptive noise (ICEEMDAN)連結方法(第 3 小節)や歩行者向けの improved adaptive range bin selection (IARBS)法(第 4 小節)を提案してきた。また、有効な測定範囲がレーダモジュールの仕様に制限されるため、自動化した回転台にレーダモジュールを設置し、目標をトラッキングしながら、心拍を測定する方法(第 5 小節)も提案した。しかしながら、被験者がレーダモジュールから遠く離れたり、他の物体に遮られたりすると測定精度が下がる。上記の課題を解決するため、レーダモジュールをマウントしたロボットが、自動で歩いている被験者の近くに移動し、非接触で心拍を測定する方法を提案した(第 6 小節)。最後、測定したデータを可視化するため、Amazon Web Service (AWS)を用いて、ウェブアプリケーション(第 7 小節)を開発した。

## 3. PA-LI–ICEEMDAN 連結方法

FMCW レーダを用いた生体信号検出の研究では、1 フレームに送信するチャープ信号を 1 とし、フ

フレーム周期は 50-100 ms (サンプリングレートは 10-20 Hz)とするのが普通である。その場合では、フレーム間のアイドルタイムが長すぎるため、時間利用率が低下である。また、強い非線形性の条件下で位相解析処理を行う。従って、フレーム周期に複数のチャープ信号を送信し、受信した信号を 1 フレームごとに位相累積(PA)して位相雑音を除去する方法を提案した。位相累積及び位相アンラッピング後、胸部皮膚の変位信号  $x(t)$  を取得することができる。 $x(t)$  から SNR の高い心拍信号を抽出するために、ICEEMDAN 処理を行う前に、 $x(t)$  に対して線形補間(LI)を行うことを提案した。レーダモジュールが被験者の正面、背面、左、右、斜め上及び天井などの位置(合計 9 パターン)に設置された。その内、Root mean square error (RMSE)が一番小さい方向は前方 1 m であり、平均 RMSE が 3.08 だった。この分野で有力な論文では、近距離で正面からの測定誤差が -7-5 bpm であるため、提案方法の有効性を証明した。また、天井に設置した場合の平均 RMSE が 8.02 bpm であり、他の各測定パターンの平均 RMSE も 6.5 bpm 以内であった。

#### 4. Improved adaptive range bin selection (IARBS)法

多くの研究では、被験者はベッドに横たわるか椅子に着座し、レーダは被験者の正面に設置して測定が行われていた。つまり、レーダベースの非接触心拍推定装置は、被験者が静止していることを前提条件として実装されているため、実際の 24 時間での医療モニタリングにおいて、患者に不便を与えることになる。従って、室内移動者向けの非接触で心拍を推定できる方法が必要とされている。

本提案方法は、初期位置確認及び適応レンジビン選択の二つの部分から構成されている。第一段階では、最初の  $K$  個のフレームのチャープ信号を累積し、目標の初期位置を確認することである。第二段階では、 $K+1$  番のフレームから、前のフレームから計算した目標の最適レンジビン及び速度を利用し、次のフレームでのピークシーキングの範囲を特定することである。これで、測定が終わるまでに、上記の処理が繰り返して実行される。次に、選択された最適レンジビンにおいて位相情報を抽出して、胸部変位信号を計算する。最後、ICEEMDAN を用いて心拍を測定する。実験の結果から、被験者は平均走行速度が 1 m/s で歩いていても、心拍測定の平均絶対誤差が 4.09 bpm であり、平均精度が 95.88% であった。他論文に比べて、提案方法の新規性と有効性を証明した。本提案方法は一番最初に提案した 1 m/s の速度で歩いて人向けの心拍測定法である。

#### 5. 非接触追跡心拍測定法

測定範囲はレーダモジュールの仕様に制限されているため、被験者とレーダモジュールとの距離が近いほど、測定範囲が狭くなる。また、1 台のレーダモジュールで部屋をカバーすることができない。従来の解決方法は複数のレーダモジュールを設置することである。しかし、干渉問題やコストが高くなるという課題が出てくる。このため、自動化した回転台にレーダモジュールを設置し、目標をトラッキングしながら、心拍を測定する方法を提案した。IF 信号の raw data に対し range-FFT 及び Doppler-FFT を行い、Range Doppler Matrix (RDM) を取得する。次に RDM に 2D-CFAR 及び angle-FFT 処理をかけた被験者をトラッキングする。Arduino 及びモータドライブボードを用いて、シリアル通信でコンピュータからステッピングモータへ角度データを送信する。ステッピングモータは受信した角度データに従って回転する。最後、IARBS 法及び ICEEMDAN を用いて心拍を計算する。実験方法について、固定ルート実験、ランダムルート実験、複数被験者実験、スイングあり・なし(腕を振ること)比較実験を行った。本研究は世界初で腕の動きは精度にどのような影響を与えるかどうか判明した論文である。全ての測定において、平均測定精度が 96%以上であった。比較方法より、提案方法の方が精度が高いことを証明した。

#### 6. 心拍見守り移動ロボット

本研究では 77GHz 帯の MIMO-FMCW レーダを用いた。IF 信号から RDM を取得して、2D-CFAR 及び angle-FFT 処理を行うことで、被験者の位置情報を計算する。被験者を最適な測定範囲内に確保するため、ロボットの走行ルートをリアルタイムに算出し、コントロールボードに送信する。コントロールボードは被験者の瞬時位置情報に応じて、ロボットのトラックに接続されている DC モータを制御する。トラックが左右に設置されているため、速度差を調整することで原位置でのステアリングが可能である。また、観測ウィンドウごとに IARBS 法を用いて、被験者が存在していたレンジビンを特定する。その後、位相情報を抽出して胸部皮膚の変位情報を算出する。最後に ICEEMDAN を用い

て心拍数を測定する。実験について、被験者は6平方メートルの範囲内に平均速度が0.5 m/sでレーダに向かって前後左右で移動した。毎回60秒で合計14回測定を行った。心拍測定の平均絶対誤差が3.78 bpmであり、平均精度が95.47%であった。他論文に比べて、提案方法の有効性及び応用性について論述した。

#### 7. ウェブアプリケーション

測定したデータを可視化するため、Amazon Web Service (AWS)を用いて、ウェブアプリケーションを開発した。MATLABがサーバにあって、処理したデータは一定な時間毎にクラウド上のストレージにアップロードされて、アプリケーションで表示される。ユーザーはリアルタイムで現在及び過去のデータを確認することができる。

#### 8. 結論

本研究では、5つの方法を提案して、レーダベース心拍推定領域でのいくつかの従来課題を解決した。PA-LI—ICEEMDAN 連結方法を提案することで、多方向からの高精度な心拍推定が実現できた。次に、提案したIARBS方法を用いることで、自由に歩いている人の心拍も測定できるようになった。また、非接触追跡心拍測定法及び心拍見守り移動ロボットの方法を提案した。これらの方法はレーダモジュールをステップモータに設置したり、移動ロボットにマウントしたりした。レーダの方向を調整しながら、目標の心拍を推定する。このような測定方法は世界初とされている。最後、測定したデータを可視化するため、ウェブアプリケーションを開発した。携帯やコンピュータでブラウザを使って、簡単に目標の心拍情報や位置情報を確認することができる。