

論文審査の結果の要旨

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)

審査委員：（主査） 教授 戸 田 健

（副査） 教授 篠 田 之 孝 教授 細 野 裕 行

教授 大 谷 昭 仁

健康寿命の延伸について 2000 年 WHO により提唱され久しいが、日本では近年、厚生労働省を中心とした健康日本 21 (2024 年度より 第三次がスタート) の施策の中で、日頃から体調や心身へのストレスを知ることができるよう社会全体で取り組みを推進するとしている。ここでは、基本的なバイタルサイン (呼吸や心拍、血圧) を常時モニタリングし、日常の健康状態把握が必要とされている。特に自律神経活動を反映する心拍活動は、循環器系疾患の診断やストレス指標にも用いられることから重要である。高齢者の家庭では、特に独居者の増加に伴い、転倒や突発的な体調不良と言った様々な危険が存在する。これは交通事故に比べ 4 倍以上である。近年プライバシー保護の観点からカメラの利用が難しくなっていることから、電波によって、特に入浴や起床時の動きを監視し、危険な状態をセンシングすることで、事故の重篤化を未然防止することができる。他方赤外線センサは分解能が低く細かい動作の同定が難しく、衣類や布団等の影響で測定精度が劣化する。このような社会的背景から、日常生活においてストレスや拘束のない、無意識でのバイタルサインモニタリング、さらに新型コロナウイルスのパンデミックやインフルエンザの流行も伴い、電波による非接触センシングへの期待が高まっている。非接触モニタリングの技術確立により、これまで測定ごとに必要であった機器等の消毒が不要になり、さらにまた他人との接触機会が少なくなり、感染予防への波及効果も期待できる。

本研究で採用したミリ波帯レーダの特徴は、マイクロ波帯に比べ広帯域化が可能なことと、微細な動きの高精度な測定である。つまり呼吸に伴う胸郭運動は勿論、心臓の収縮運動が体表面に伝わる 1 mm 以下の僅かな変位も非接触で捉えることが可能である。ミリ波は、電波として最後の未開拓域であり、高速大容量通信や高分解能レーダへの期待は昔よりあったが近年、車載ミリ波レーダが実用化普及し、ミリ波デバイスや通信モジュールが安価に入手できるようになってきた。また CMOS によるミリ波通信モジュールの実用化と言ったデバイス技術の発展、さらにワイヤレス通信の高速大容量化、新しい電波応用分野の普及から周波数が枯渇しつつあり、未開拓だったミリ波帯での広帯域周波数の開放が活発になっている。特に 2020 年総務省情報通信議会より、小電力広帯域センサシステム向けに、無線局免許が不要な 60 GHz 帯 (最大 7 GHz 幅) の開放が答申されたことが大きい。

これらの背景から申請者は、ミリ波帯レーダを用いた室内での非接触心拍測定に着目し、この研究分野でメジャーな世界的には米国電気電子学会 (Institute of Electrical and Electronics Engineers: IEEE) 及び国内では電子情報通信学会 (Institute of Electrical, Information and Communication Engineers: IEICE) において先行研究調査を行った。その結果、ターゲット (人) が a) レーダ正面からしか測定していない (できない)、b) 静止状態、c) レーダモジュールアンテナのビーム幅の制約による測定範囲内にいる必要がある、d) 他のオブジェクトに遮られる且つレーダモジュールから遠く離れた場合に測定精度が劣化する、という社会実装上多くの課題があることがわかった。これらの課題に対して申請者は、ステップバイステップで体系的に解決手段を提案し続け、博士前期課程より 5 年を経て、システムとしてまとめ、本学位論文として申請するに至った。

申請者の提案システムは、医療従事者用としては精度、瞬時性や携行性と言った観点からは完成度が高いとは言えないが、高齢者の有無に関わらず家や施設での日常的な心拍モニタリング (スマートホーム) 向けには十分完成度が高く、我が国が目指す超高齢健康社会の実現に向けてその基盤技術の一つとなり得るものとして期待される。

本論文は、全 8 章から構成されている。以下に各章の概要とその評価を述べる。

第 1 章「Introduction」では、序論として、ミリ波帯レーダを用いた室内での非接触心拍測定の社会

的・技術的背景, 先行研究及びそれらの問題点を明確に示し, 本研究の位置づけ及び解決すべき課題を明らかにした後で, 本研究の提案アルゴリズムやシステムの概要, 全体構成について概論している.

第2章「Principle for Heart Rate Monitoring」では, 心拍モニタリングの基本原則として, FMCW レーダを用いた心拍測定の基本原則について数式を用いてわかりやすく説明している.

第3章「PA-LI Joint ICEEMDAN Method」では, 申請者が提案した phase accumulation-linear interpolation (PA-LI)法及び improved complete ensemble empirical mode decomposition with adaptive noise (ICEEMDAN)による時間-周波数領域解析法を組み合わせた心拍推定手法について数式を用いて基本原則を示した上で, 実験評価としては, ターゲット(人)がレーダ正面からしか測定していない(できない)状況を克服するための証明として, 正面だけでなく, 左右横, 背面, 斜め上及び天井方向からの測定結果を従来手法と比較し, その優位性を示している.

第4章「Improved Adaptive Range Bin Selection」では, 申請者が提案した improved adaptive range bin selection (IARBS)法及び ICEEMDAN による時間-周波数領域解析法を組み合わせた心拍推定手法について数式を用いて基本原則を示した上で, 実験評価としては, 静止状態でしか測定できないという課題を克服することの証明として, 居室内の歩行者をターゲットに, レーダに対し前後方向での歩行であるが, 測定結果を従来手法と比較し, その優位性を示している.

第5章「Measurement Method Based on Stepping Motor and Radar」では, 申請者が提案した measurement method based on stepping motor について数式を用いて基本原則を示した上で, 実験評価としては, レーダモジュールアンテナのビーム幅の制約による測定範囲内にいる必要があるという問題を克服することの証明として, ランダム歩行, さらに腕を振ったときの影響についても評価し, その優位性を示している. モータにレーダをマウントしてランダム歩行者の心拍を測定する試みは世界初である.

第6章「Vital Signs Monitoring Mobility Robot」では, 申請者が提案した, ロボットにレーダをマウントし, measurement method based on stepping motor について数式を用いて基本原則を示した上で, 実験評価としては, 他のオブジェクトに遮られる且つレーダモジュールから遠く離れた場合に測定精度が劣化するという問題を克服することの証明として, ランダム歩行者に対し, レーダマウントのロボットが所要の測定向き及び距離にトランキングすることができ, 所要精度で心拍を推定できることを示している. レーダをロボットにマウントしランダム歩行者の心拍を測定する試みは世界初である.

第7章「A Web Application for Remote Vital Signs Monitoring」では, 申請者が提案するシステムの応用性として, Amazon web service (AWS)を用いて, 前述の提案システムで取得した心拍波形及び推定心拍周波数をスマートフォンでリアルタイムに表示するシステムを提案している. これについても我々が知る限り世界初の試みである.

第8章「Conclusion」では, 本論文で申請者が提案したアルゴリズムやシステムを概括するとともに, 先行研究に対する優位性及び有用性について具体的数値を再度挙げて示している. また今後の展望として, 人の心拍を含む広範囲な健康状態の非接触モニタリングを可能とするため, 当該提案システムを新しいレベルに押し上げるための技術発展に触れ, 本論文を締めくくっている.

以上のように本論文は, 提出者が自立して研究活動を行い, 又はその他の高度な専門的業務に従事するに必要な能力及びその基礎となる豊かな学識を有していることを示すものである.

よって本論文は, 博士(工学)の学位を授与されるに値するものと認められる.

以上

令和6年2月15日