

氏名	あぶどうさいみ あぶどうあい ABUDUSAIMI ABUDUAINI
本籍(国籍)	中国
学位の種類	博士(工学)
学位記番号	理工博 第23号
学位授与年月日	令和6年 3月22日
学位授与の要件	学位規則第5条第1項該当 課程博士
研究科及び専攻	理工学研究科システム創成工学専攻
学位論文 題目	Localization of Human Bodies Using Array-Based Bio-Radar with Imperfect RF Devices (非理想デバイスを用いたレーダによる生体測位法に関する研究)
学位審査委員	主査 副査 教授 本間 尚樹 副査 教授 大坊 真洋 副査 教授 小林 宏一郎

## 論文内容の要旨

昨今の一人暮らしの高齢者の増加に伴い、高齢者世帯における転倒事故の発生率も増加しているだけでなく、孤立死の問題も深刻な課題となっている。そのため、高齢者の安全を効率的にモニタするシステムの必要性が高まっている。この需要に対応するため、ビデオカメラやウェアラブルデバイスのような方法が用いられている。しかし、前者はプライバシーの点、後者は常時携帯・接触の必要があるという点で、精神的・肉体的な課題が多い。そこで、バイスタティック MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) レーダや SIMO (Single-Input Multiple-Output) レーダなどのワイヤレス生体センサの利用が注目されている。従来のモニタシステムとは異なり、このアプローチはプライバシーを侵害せず、身体接触も不要である。さらに、人体の位置の特定も可能である。しかし、通常レーダはコストの問題があり、一般家庭や介護施設への適用は困難である。そこで、比較的 low コストに入手可能な通信用民生デバイスを用いることができれば、レーダシステムの低コスト化が期待できる。しかしながら、通信用デバイスは必ずしもレーダシステムに適しておらず、様々な擾乱によりヒト検出用途への適用は容易ではない。

第1章では、レーダシステムの技術的背景を紹介し、これらのシステムの既存の問題点を議論する。次に、モニタリング用途としてのバイスタティック MIMO/SIMO レーダの有効性について言及する。その場合の民生デバイスにより生じうる問題点を列挙した。

第2章では、人体検出のための非同期バイスタティック MIMO レーダに適した周波数誤差除去技術を提案し、実験的に評価した結果について述べる。本方式では、送信機と受信機との周波数差によって生じる位相誤差を除去するために、ビームフォーミングにより抽出した直接波を参照信号として用いる。これによって位相誤差を除去した MIMO チャネルのドップラーシフト成分の抽出が可能になり、これを2次元 MUSIC (Multiple Signal Classification) 法に適用することで、複数ターゲット位置の同時検出を可能とする。本手法の評価を行うために、屋内マルチパス環境において実験を行った。非同期状態を模擬するため、送信機と受信機は独立した異なる信号発生器 (SG) を使用した。1~6人の被験者を用いて実験した結果、非同期レーダシステムであっても、提案手法によって複数ターゲット位置を同時に高精度に検出できることが明らかになった。

第3章では、より簡易なデバイス系である SIMO システムを用いる手法について検討を行った。各無線局は複数のアンテナのうち1つの送信 RF フロントエンドのみを持つものと仮定し、往復 SIMO チャネルを結合することによって、MIMO アレーが利用できない場合であっても、正確な人体位置を推定する方法を提案した。提案手法は2つの重要なアイデアから構成される。第一に、2局間の往復チャネルを結合し、両局の到来方向 (DoA) 情報を結合することで、複数ターゲットの同時測位を実現する。第二に、2局間の往復チャネルの周波数誤差除去技術の提案である。実験により評価を行った結果、様々な周波数誤差を持つ無線局を用いた場合でも、ターゲット位置を誤差 0.50m 以内の精度で測位できることを確認した。

第4章では、Wi-Fi の変調方式である OFDM (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing) に着目し、OFDM サブキャリアごとのチャネル情報を活用する手法について検討している。伝搬チャネル周波数特性を観測し、これによって ToF (Time-Of-Flight) 情報を算出することで、片方向の SIMO チャネル情報のみによって、ターゲット位置を推定する方法を提案している。Wi-Fi 装置を用いた実験により、屋内多重波環境であっても被験者位置検出が可能であることが示された。

第6章は結論であり、本学位論文の内容をまとめ、総括されている。

## 論文審査結果の要旨

本論文は学位申請者が取り組んできた民生用通信デバイスを応用した生体レーダに関する研究をまとめたものである。

第1章では、レーダシステムの技術的背景を紹介し、これらのシステムの既存の問題点を議論している。次に、モニタリング用途としてのバイスタティック MIMO/SIMO レーダの有効性について言及しており、その場合の民生デバイスにより生じうる問題点を列挙している。

第2章では、人体検出のための非同期バイスタティック MIMO レーダに適した周波数誤差除去技術を提案し、実験的に評価した結果について述べている。論文で挙げている非理想デバイスを用いた場合に最初に直面する重要な課題である、周波数オフセットについて、MIMO ならではの解決法が提案されており、工学的にも意義がある手法であると考えられる。実験によってその性能が定量的に測定されていることも評価に値する。

第3章では、より簡易なデバイス系である SIMO システムを用いる手法について新たな手法が提案されている。SIMO システムでは第2章で述べられた方法を適用することができないが、通信の双方向性に着目し、往復伝搬をを観測することで、レーダによる検出の妨げとなる位相誤差を除去する方法が考案されている。実験により評価を行った結果、様々な周波数誤差を持つ無線局を用いた場合でも、ターゲット位置を誤差 0.50m 以内の精度で測位できることが確認されている。

第4章では、非理想デバイスとして無線 LAN 機器を用いた場合の考察が述べられている。特に、無線 LAN で主に用いられる OFDM (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing) 変調方式を利用した新たな手法が提案されている。通信用信号では、伝搬路の絶対位相を取得することが困難であり、これはレーダによる測距が不可能となることを意味している。一方、提案によれば、既知の送受信局間距離情報を活用することで、絶対位相情報を復元することが可能であり、さらに電波の出発角の検出を同時に実現可能なアルゴリズムが実現されている。実験によって、生体測位に成功していることが示されており、これは画期的な成果であると考えられる。

第6章は結論であり、本学位論文の内容がまとめられており、これまでに得られた成果が総括されている。

以上のように、本論文はレーダ用途としては不安定な通信用デバイスを用いた人体センシング手法という新たな技術分野を開拓しており、得られた知見は今後の電子・通信システム工学の発展に大きく貢献するものである。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。

**原著論文名（1編を記載）**

題目                      Frequency Error Compensation of Unsynchronized Bistatic CW-MIMO Radar for Multiple Human-Body Localization

著者名（全員） Abudusaimi Abuduaini, Nobuyuki Shiraki, Naoki Honma, Takeshi Nakayama, Shoichi Iizuka

学術雑誌等名 IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems,  
（巻，号，ページ） vol. 16, no. 5, pp. 882-890

発行年月    2022年        10月