

研究終了報告書

「生体信号の数理モデルと電波センシングを融合した人体の非接触バイタルイメージング」

研究期間： 2018年10月～2022年3月

研究者： 阪本 卓也

1. 研究のねらい

スマートウォッチに代表されるようにバイタル計測の需要が高まっている。中でも心拍には疾患に関係する豊富な情報が含まれている。心臓の収縮拡張のサイクルに同期し、皮膚表面には脈波と呼ばれる血管に沿った弾性波が見られる。脈波の伝播速度は血圧や血管の硬さで決まるため、高血圧症や動脈硬化に関わる重要な物理量であり、長期間にわたり連続測定することで疾患のスクリーニングや治療などへの応用が期待できる。身体の複数部位で脈波の測定を同時に行えば、これら複数部位間の距離と脈波到達時間差から脈波速度を算出できる。これまで、脈波速度の測定には接触型センサが広く用いられてきた。ところが、接触型の場合、複数部位に複数センサを同時に装着する必要があるため、簡便性に欠け、さらに装着時の不快感により長期計測に適さない。そのため、こうした計測を日常生活に導入するためには、長時間にわたり連続的に脈波伝播速度を計測できる非接触計測技術が望ましい。

そこで、本研究では、電波による人体全身の脈波伝播の非接触計測技術を開発する。電波による非接触生体計測において、複数のアンテナ素子を有するアレイアンテナを用いた信号分離技術は、人体の複数部位の皮膚変位を同時に計測するために必須の技術である。しかし、複数部位の変位には高い相関があるため、従来の独立性や無相関性を前提とする信号分離手法は適用できず、分解能の制約が実用化を阻んでいた。本研究では、こうした従来のワイヤレス人体センシングの分解能限界を打破するべく、数理モデルや多次元最適化などの情報科学的アプローチと電波によるワイヤレス人体センシングを統合する。生体情報に関する先験情報を数理モデルとして定式化し、数理モデルに基づく最適化問題により生体信号分離の高精度化を可能とする信号分離手法を開発する。その結果、複数部位の脈波を高い分解能で高精度に非接触計測し、脈波伝播・脈波速度の人体における分布など、全身の血管に沿った脈波伝播のイメージングを世界に先駆けて実現する。開発技術により、生体数理モデルに基づくワイヤレス人体センシングという新アプローチを確立し、人体計測分野における学術的ブレークスルーへの道筋を狙う。さらに、心疾患・循環器疾患のスクリーニング・診断・治療への展開を目指し、医療・ヘルスケア分野への応用を進める。

2. 研究成果

(1) 概要

複数のアンテナ素子を有するアレイレーダを用いて人体の複数部位の脈波を同時に計測するとき、複数の到来波が重畳して受信される。適切な復元行列が得られると、受信信号ベクトルに復元行列を乗算して複数部位の脈波信号を分離復元できる。脈波による皮膚変位は、数十 μm 程度であり、脈波は動脈上を心臓から遠ざかる方向に向かって3-10 m/s程度の

速度で伝播する。本研究では、これらの皮膚変位および脈波伝播についての事前知識を数理モデルとして定式化し、数理モデルを用いた信号分離法(生体成分分析)を開発した。開発手法は、仮の復元行列により分離された信号波形と数理モデルの合致度を増加させるように復元行列の更新を繰り返す。復元行列の最適化は、大域的最適化が可能な遺伝的アルゴリズムを用いて実装した。

次に、生体成分分析の改良を進めた。まず、数理モデルを精密化した精密数理モデルを導入し、最適化に用いる目的関数を改良した。モデル精密化のため、人体の複数部位における変位波形を同時にレーザ計測し、波形間のインパルス応答を少数のパラメータで表現できるモデル関数を見出した。このモデル関数で表される精密数理モデルを目的関数に導入し、改良型の生体成分分析を開発した。続いて、生体成分分析の最適化に用いる決定変数の次元を削減するため、アレイ素子配置の特徴を利用した改良を行った。具体的には、等間隔アレイ素子に対して成り立つ性質を応用した決定変数ベクトルの低次元化法を開発した。その結果、大域的最適化ではなく、勾配法などの局所的最適化により、高速かつ高精度な信号分離が実現でき、生体成分分析の高速化が達成された。

さらに、生体成分分析により得られた復元行列を実空間にマッピングし、複数の角度スペクトルの情報を統合することにより、高分解能イメージングを可能とする生体成分分析イメージング法を開発した。同手法により、生体信号によって変位する人体部位を可視化でき、生体成分分析により得られた脈波変位波形およびイメージングにより得られた到来方向を組み合わせ、脈波速度が算出できる。算出された脈波速度とイメージング結果を統合することにより、脈波速度の人体に沿った分布を可視化できる脈波イメージング法が開発された。これら開発手法の精度を複数の被験者が参加する実験により定量評価し、有効性を明らかにした。

(2) 詳細

研究テーマA「生体情報の事前知識を用いた信号分離技術の開発」

本テーマでは、人体複数部位からのレーダ反射波を分離する手法である生体成分分析を開発した。数理モデルと計測信号の合致度を目的関数とし、目的関数を最大化する最適化問題として信号分離を定式化した。例えば、実験に用いた12チャンネルアレイレーダにより人体2部位の計測を行う場合、48次元の多次元最適化が必要となる。このような多次元最適化に対し、大域的最適化が可能な遺伝的アルゴリズムを採用し、実装した。図1に開発手法を実験データに適用して得られた人体2部位間の脈波波形インパルス応答を示す。世代とともにインパルス応答のピークが正の時間方向に移動し、因果律を満たすように信号分離されている。開発手法を従来のウィーナ解を用いた方法や独立成分分析と比較した。ある条件下では、ウィーナ解および独立成分分析を用いた場合の脈波変位の推定における平均二乗(RMS)誤差はそれぞれ9.6 μm および5.7 μm であったのに対し、開発された生体成分分析では3.7 μm となり、精度改善が確認された[1]。他の条件下でも、生体成分分析は従来法よりも高い信号分離精度を達成することを確認している。以上のように、研究目的として設定した「数理モデルに基づく高精度の信号分離技術の開発」は、予定通り遂行された。

次に、複数部位の変位波形間のインパルス応答をレーザ変位計により精密計測し、近似モデル関数の導出を行った。モデル関数を用いた精密数理モデルを生体成分分析に導入し

た。従来の生体成分分析と比較すると、精密数理モデルを用いた生体成分分析により、皮膚変位波形および部位間のインパルス応答の推定精度がそれぞれ21%および55%改善し、精密数理モデル導入による精度改善が実証された。その一方、遺伝的アルゴリズムによる実装では計算速度が課題となる。そこで、等間隔に配置されたアレイ素子に対して代数的な性質により成り立つシェルクノフ多項式を用いた決定変数の低次元化を行った。電波の到来角に依存する複素変数のシェルクノフ多項式に対し、特定の角度にヌル点が位置する制約条件のもとで、別の角度への応答を最大化する最適化問題の最適解を解析的に求め、復元行列を少数パラメータのみで表現する手法を導入した。その結果、例えば2部位の計測に対し、最適化問題の次元を48次元から2次元へと大幅に低下させることができ、準ニュートン法などの勾配法による最適化が可能となった。このように生体成分分析が高速化され、準リアルタイム動作が求められる医療・ヘルスケア分野への応用も期待できるようになった。

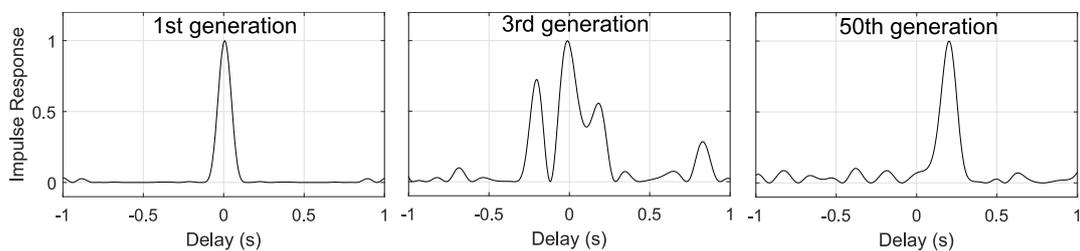


図1 開発した生体成分分析により分離された人体後背部と腓腹部の変位波形間のインパルス応答波形。遺伝的アルゴリズムの第1(左)、第3(中)、第50世代(右)の最適波形。第1～3世代では負の時間に非零の応答があり因果性が満たされていない。(論文発表[1])

研究テーマB「信号分離とアダプティブアレイの統合によるイメージング」

テーマAで開発された生体成分分析を応用した高分解能イメージング法を開発した。復元行列の各要素をアレイの重み係数としたときに形成されるビームパターンのヌル点を利用し、反射波の到来方向を示す角度スペクトルを高分解能化する手法を開発した。図2に示す通り、従来のビームフォーマ法(赤線)と比較し、提案法(黒線)により高分解能が達成された[2]。数値シミュレーション例では、開発手法により複数人体部位の位置推定誤差は平均24 mm、脈波伝播距離の推定における相対誤差は約12%と、十分な精度が得られた。

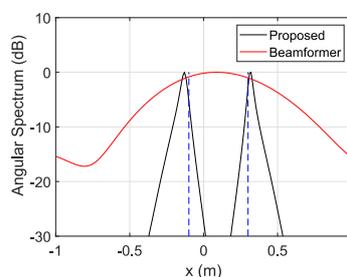


図2 人体2部位からの2波(真値: 青破線)が干渉している場合の従来法(赤線)および提案する生体成分分析イメージング(黒線)による角度スペクトル。(論文発表[2])

研究テーマC「アレイレーダシステムによる人体測定の実施」

アレイレーダによる人体計測システムを開発・整備した。対象者のレーダ計測と同時に複数部位の皮膚変位をレーザ変位計で計測できる実験系とした。その結果、レーダおよびレーザ変位計のデータ比較による精度検証が可能となった。伏臥位の被験者を上方に設置したレーダで計測する実験システムを図3に示す。人体の後背部・腓腹部の両部位の皮膚変位波形はレーザ変位計による計測波形と高い精度で一致し、開発手法の有効性が示された[3]。

開発された非接触計測システムに基づき、ヘルスケア分野での非接触見守りや複数人の呼吸・心拍の同時計測を目的とし、企業との共同開発を進めた。2021年2月に同システムの製品化を果たし、「VitaWatcher」の製品名で販売開始された。本システムの開発はNHK総合NHKニュースおはよう日本(2021年2月)や読売新聞(2021年9月)をはじめ、テレビ番組・新聞・ウェブニュース等で広く報道され、同技術が社会的に期待されていることがわかる。このように、社会実装の側面では、当初の予想を超えた大きな成果につながった。

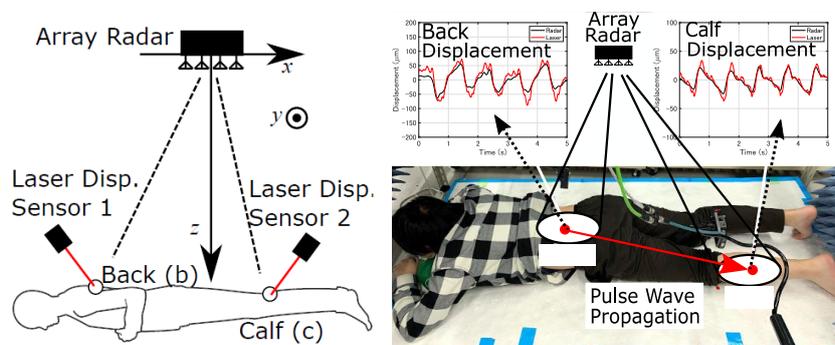
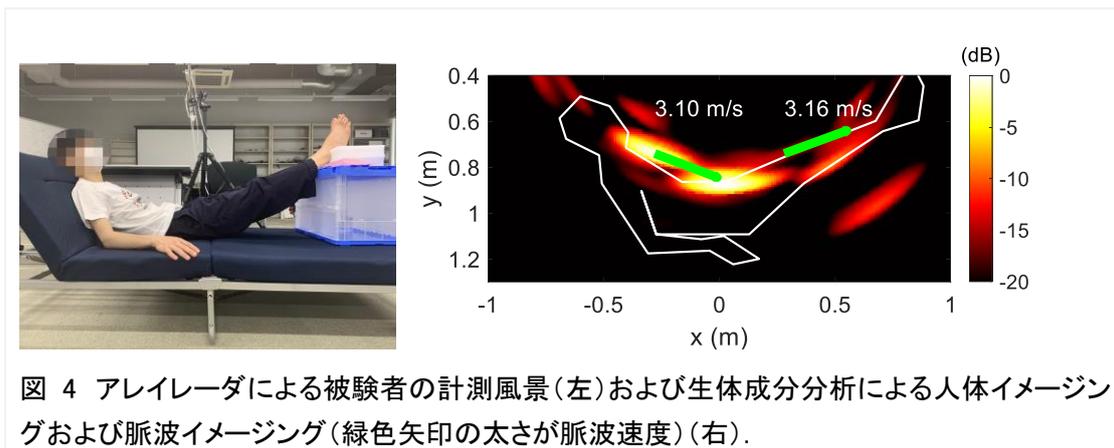


図3 アレイレーダとレーザ変位計を用いた実験概要(左)およびアレイレーダによる複数部位の脈波変位計測実験の様子(右)。(論文発表[3])

研究テーマD「人体全身の脈波伝播イメージングの実験検証」

テーマA・Bで開発された信号分離技術とイメージング技術を統合し、テーマCで開発された人体計測システムに実装することで、脈波伝播イメージングシステムを開発した。仰臥位の被験者をアレイレーダで計測している様子を図4左に示す。測定データを用いた脈波イメージング画像を図4右に示す。同図では、レーダ信号から生成された人体イメージに加え、脈波伝播の対応部位および脈波速度も可視化している。脈波伝播の対応部位は、脈波波形の相関が最大になる部位対を候補として抽出し、人体形状・姿勢・心臓の位置についての先験情報を用いた部位選択アルゴリズムにより特定されている。同図の緑色矢印は脈波伝播の始点と終点を示し、推定脈波速度を矢印の太さで示している。同図に示されたとおり、胸部から腹部、脚部に沿って脈波が伝播している様子が可視化されている。この脈波伝播イメージングは準リアルタイムの動画として生成されるため、時間と共に変化する体の状態をモニタリングすることもできる。今後、可視化された脈波伝播の対応部位と脈波速度の精度検証を進めてゆく予定である。以上のとおり、研究目的として挙げた「人体全身の脈波伝播イメージングの実験」が実現された。



3. 今後の展開

本研究で開発した技術の社会応用を目指し、「非接触見守りセンサコンソーシアム」を2021年4月に設立し、同さがけ研究者は副代表を務めている。同コンソーシアムには2021年10月時点で8企業4機関が参画しており、コンソーシアム内の協業を通じ、保育園・高齢者施設・病院などを対象とした事業化(2022年度末目途)に向けて活動を進めている。本さがけ研究期間の終了後も、同コンソーシアムを通じた社会実装に向けた活動を継続する。

また、開発技術の社会実装を加速するためには、家庭・職場・学校などの日常環境への応用が重要である。そのためには、現在のように対象者1名のみではなく、多人数が存在する一般環境への非接触バイタル計測を応用するための技術開発が必要である。そのための研究開発を開始しており、日常環境での呼吸・心拍・血圧の計測とともに動脈硬化のスクリーニングが可能となるシステム開発を進め、本研究成果の社会実装に向けて開発を進めている。

4. 自己評価

本研究課題では、被験者が参加する実験が中心となるため、コロナ禍による実験中断など、厳しい逆境は存在したものの、各時点で最良方策を練り、結果として当初の計画通りに研究が遂行できた。当初の計画どおり、人体の数理モデリングなどの情報科学的な手法とレーダによる人体センシングを融合し、従来の計測限界を超える分解能・精度を達成した。全体を通じ、新たな計測技術カテゴリーを提案し、学術的貢献ができたと考える。また、企業との共同研究により、非接触見守りセンサの製品化も達成し、社会・経済への波及効果についても、十分な成果が得られたといえる。残された課題としては、多チャネル2次元アレイレーダを用いた脈波伝播イメージングの3次元化、および脈波伝播イメージングの精度検証が挙げられる。

人体の数理モデルを用いたレーダ計測は前例がなく、手探りでの研究遂行において、研究目的の挑戦的側面を再認識した。しかし、同さがけ研究者のレーダ信号処理についての経験に基づき、生体信号の生理学的・数学的特徴のうち、信号分離において重要なものを慎重に選定し、数理モデルの構築を進め、最適化問題として定式化・実装することで、同アプローチの有効性を示すことができた。今後、数理モデルを全身へ拡張することで、脈波計測を含む人体センシング全般への拡張を展開し、学術的貢献とともに社会実装を加速することで、本課題が対象とする情報計測アプローチの有効性・発展性を示してゆきたい。

5. 主な研究成果リスト

(1) 代表的な論文(原著論文)発表

研究期間累積件数: 24件

[1] Takuya Sakamoto, "Signal separation using a mathematical model of physiological signals for the measurement of heart pulse wave propagation with array radar," *IEEE Access*, 2020, vol. 8, pp. 175921–175931. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3026539

アレイレーダによる人体複数部位の同時計測を可能とする信号分離手法である生体成分分析を提案した。複数部位のレーダ計測信号を数理モデルで表現し、そのモデルを用いて信号分離を最適化問題として定式化した。最適化を遺伝的アルゴリズムで実装し、シミュレーションおよび実験データにより提案手法の有効性を示した。従来のウィーナ解や独立成分分析などの手法と比べ、提案法の信号分離精度についての優位性が実証された。

[2] Takuya Sakamoto, "Generating a super-resolution radar angular spectrum using physiological component analysis," *IEICE Communications Express*, 2021. DOI: 10.1587/comex.2021XBL0137

アレイレーダによる人体複数部位の同時計測を可能とする生体成分分析を応用し、復元行列により形成された複数ビームのヌル点の情報を利用した高分解能イメージング法を提案した。従来法では分離不可能な近接部位からの反射波を正確に分離できることを数値シミュレーションにより示した。ある条件下での同手法による反射部位の位置推定誤差は約24 mmとなり、脈波速度の算出に必要な距離推定における相対誤差は12%となった。

[3] Yuji Oyamada, Takehito Koshisaka, and Takuya Sakamoto, "Experimental demonstration of accurate noncontact measurement of arterial pulse wave displacements using 79-GHz array radar," *IEEE Sensors Journal*, 2021, vol. 21, no. 7, pp. 9128–9137. DOI: 10.1109/JSEN.2021.3052602

アレイレーダによる複数部位の脈波計測について、実験により精度を定量評価した。人体の複数部位の皮膚変位をアレイレーダおよびレーザ変位計で同時計測できる実験システムを整備し、複数の被験者が参加する実験を実施した。実験の結果、レーダによる提案技術とレーザ変位計の双方で計測された脈波伝播インパルス応答の相関係数は4名の被験者の平均で0.97と高い値を取り、提案技術の有効性が示された。

(2) 特許出願

研究期間全出願件数: 1 件(特許公開前のもも含む)

(3) その他の成果(主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

1. テレビ報道, NHK総合 NHKニュースおはよう日本, "呼吸や心拍数 非接触で計測," 2021年2月11日.
2. 新聞報道, 読売新聞, "天井から電波 体調見守る 呼吸・脈拍計測 施設にデータ," 2021年9月3日.
3. 阪本卓也, "ワイヤレス人体センシングが拓くスマートなWith/Postコロナ社会," 第18回 STSフォーラム「科学技術が拓く人間の未来」公開シンポジウム, オンライン, 2021年10月2日.(基調講演)

4. 阪本卓也, “ワイヤレス人体センシングが創成するデジタルトランスフォーメーション,” Health Venture Conference KYOTO 2021 ポストイベント ウェルネスシンポジウム, 京都リサーチパーク(京都市), 2021年12月14日. (基調講演)
5. 電子情報通信学会 エレクトロニクスシミュレーション研究会 優秀論文発表賞 受賞, 2022年3月16日.
6. 公益財団法人電気通信普及財団 第37回電気通信普及財団賞 テレコムシステム技術賞 受賞, 2022年3月16日.
7. 阪本卓也, “ヘルスケアのスマート化を加速するワイヤレス人体センシング技術,” 日本人間工学会 関西支部総会・春季講演会, オンライン, 2022年3月26日. (基調講演)