

2025 年度中央大学共同プロジェクト 研究実績報告書

1. 概要

研究代表者		所属機関	理工学部	2025 年度助成額	
		氏名	土肥 徹次	3,800,000 円	
		NAME	Tetsuji Dohi		
研究 課題名	和 文	眼鏡型デバイスにおける体動ノイズ低減手法を用いた 血圧計測精度の向上と有用性の実証		研究 期間	2024～2026 年度
	英 文	Enhancing the accuracy of blood pressure wave measurement in glass-mounted devices using motion artifact reduction and its validation			

2. 研究組織

※所属機関・部局・職名は 2026 年 3 月 31 日時点のものです。

	研究代表者及び研究分担者		役割分担	備考
	氏名	所属機関/部局/職		
1	土肥 徹次	理工学部・教授	研究の統括と眼鏡型血 圧計測デバイス	
2	大草 孝介	理工学部・准教授	観測されたセンサデー タの数理モデリング・解 析	
3	吉田 昭太郎	理工学部・准教授	デバイスの改良及び生 体計測	
4				
5				
6				
合計 3 名				

3. 2025年度の研究活動報告 ※行が不足する場合は、適宜、行を追加してご記入ください。

(和文)

2025年度の研究は、当初申請した研究計画に基づき、研究課題①「リストバンド型デバイスにおける体動ノイズ低減手法による血圧計測精度向上」、研究課題②「眼鏡型および心電図計測用ウェアラブルデバイスの試作と体動ノイズ低減手法の実装」、および研究課題③「眼鏡型デバイスにおける血圧計測精度向上と心電図同時計測による数理モデリング・解析」の3つを柱として遂行した。

本年度は、2024年度に構築したセンサおよび計測基盤技術を発展させ、リストバンド型および眼鏡型デバイスの開発と統合を進めるとともに、頭部における血圧校正手法の確立および数理モデルに基づく解析へと研究を展開した。特に、体動ノイズ低減に向けたセンサ構造および機構設計の高度化、血圧脈波と心電図の同時計測による多モダリティ化、ならびに頭部計測における血圧校正という未確立課題に対する基盤技術の構築により、実環境下での高精度血圧計測に向けた実証段階へと研究を進展させた。

以下に、各研究課題①～③における具体的な成果を示す。

【研究課題①】リストバンド型デバイスにおける体動ノイズ低減手法による血圧計測精度向上

本課題では、トノメトリ法に基づく血圧脈波計測の高精度化に向けて、研究分担者と連携し、体動ノイズの低減を中心としたセンサ構造・機構設計・信号品質向上の観点から複数の技術的アプローチを統合的に検討した。

・高感度センサ構造の構築と信号品質向上

血圧脈波と体動ノイズを同時に高精度に計測するため、感度切換機構を有する3軸力センサを試作した。本センサは、高感度1軸センサと3軸力センサを組み合わせた構造とし、適切な押付け力領域において計測感度を切り替えることで、微小な血圧脈波信号と大きな押付け力を同時に取得可能とした。基礎特性評価において、押付け力約1.25～1.87 N付近で感度切換が生じ、Z軸方向の出力変化が最大で約453%向上することを確認した。

さらに、本センサを用いた血圧脈波計測実験において、SN比33.8の高品質な脈波信号を取得し、収縮期・拡張期および反射波といった特徴量の明瞭な抽出が可能であることを示した。これにより、ノイズ低減処理に必要となる高精度な信号取得基盤を確立し、また、体動ノイズに対する信号対雑音比の向上により、後段のノイズ分離処理の精度向上が期待できることを示した。

・皮膚条件の最適化による信号強度向上

皮膚のたるみに起因する計測誤差およびノイズの低減を目的として、Auxetic構造と呼ばれる負のポアソン比を持つ構造体を用いた皮膚伸展機構を導入した。本機構により押付け時に適切な引張応力を発生させることで、皮膚表面の張力状態を制御し、血圧脈波の検出感度を向上させた。その結果、脈波振幅が78.1%増加し、平均押付け力が低減されることを確認した。これにより、信号成分の増強とノイズ成分の相対的低減が同時に達成された。

・心臓動作および血管伸縮の数理モデリングによる心拍RRIおよび血圧推定技術の開発

血圧計測に直接関連する心臓動作および血管伸縮について、その変動を数理的にモデリングし、体動や外乱ノイズなどによるSN比の悪い環境下から非接触に対象の血圧を推定する技術の開発を行った。また、これらの成果から人の心拍とそれに関連する血管伸縮について、拡張三角波や拡張台形波といった特殊な波形で表現を行うと、より推定精度が上昇することが確認され、本研究課題において課題となるノイズ除去の一助となる可能性が期待できる。

・ノイズ低減手法の高度化に向けた基盤整備

以上のセンサ構造および機構設計の成果により、血圧脈波信号と体動ノイズの分離精度を向上させるための基盤が整備された。特に、3軸力センサにより取得される各軸方向の力情報を用いることで、ノイズの方向依存性を考慮した解析が可能となり、計画書で提案し

たノイズ相関解析および補正処理の高度化に向けた重要なデータ取得が可能となった。今後は、基準脈波を用いた差分処理および物理モデルに基づくノイズ補正手法を統合することで、センサ間で計測されるノイズ成分の対応関係を定量化し、個人差や環境変動に適應可能な高精度血圧計測の実現を目指す。

【研究課題②】眼鏡型および心電図計測用ウェアラブルデバイスの試作と体動ノイズ低減手法の実装

本課題では、頭部における血圧脈波計測の実現と多モダリティ生体信号計測を目的として、眼鏡型ウェアラブルデバイスの試作および心電図計測機能の統合、ならびに体動ノイズ低減手法の実装に向けた検討を行った。

・眼鏡型デバイスの試作と血圧校正手法の実証

浅側頭動脈における血圧脈波計測を目的として、トノメトリ法と心電図計測を組み合わせた眼鏡型ウェアラブルデバイスを試作した。本デバイスでは、MEMS 3 軸力センサによる血圧脈波と心電図を同時計測し、両者の時間差から脈波伝播時間 (PTT) を算出することで血圧校正を行う手法を導入した。その結果、PTT と収縮期血圧の間に強い相関 (相関係数 -0.93) を確認し、さらに校正後の血圧は市販血圧計と比較して相関係数 0.87 、平均誤差 $2.0 \pm 1.9 \text{ mmHg}$ を達成した。これにより、頭部における非侵襲連続血圧計測の実現に向けた基盤技術を確立した。

・頭部特有の体動ノイズ低減に向けた構造設計

頭部計測においては、咀嚼時の側頭筋の収縮に起因する押付け力変動が主要なノイズ源となる。この課題に対し、センサ押込み量の変動を低減可能なフレーム構造を設計・試作した。本構造では、咀嚼による変位をフレーム側へ逃がすことでセンサ接触状態を安定化させる。実験の結果、血圧脈波の極大値の標準偏差を 23.6 mN から 12.1 mN へと約 48% 低減できることを確認した。これにより、頭部特有の体動ノイズに対する有効な機構的低減手法を示した。

・心電図計測用ウェアラブルデバイスの試作

将来的な多モダリティ生体信号計測を見据え、軽量・高密着性を備えた心電図計測用ウェアラブルモジュールの設計と電極の材料および作成手法の開発を進めた。研究分担者の吉田により、柔軟かつ生体適合性の高い有機材料であるグラフェン、導電性高分子、炭素繊維を用いた、生体信号のセンシングに適する低インピーダンスの電極の作成手法を確立した。これらの材料は従来の金属電極と比較して高い可撓性を有し、皮膚への密着性に優れることから、長時間安定した生体信号計測が可能となる。本成果により、血圧脈波と心電図の同時計測に適したウェアラブル電極基盤を構築した。

・体動ノイズ低減手法の実装に向けた基盤整備

以上のデバイス試作および構造設計により、頭部における体動ノイズの発生要因およびその低減手法に関する知見を整理した。特に、筋活動に起因するノイズや装着状態変動の影響を考慮したセンサ配置および機構設計が重要であることを明らかにした。また、血圧脈波と心電図の同時計測により得られる時間情報 (PTT) を活用することで、従来の単一信号に基づく手法に比べてロバストな血圧推定およびノイズ耐性の向上が期待される。今後は、これらの知見を基に、眼鏡型デバイスに適したノイズ低減アルゴリズムの改良および統合を進める。

【研究課題③】眼鏡型デバイスにおける血圧計測精度向上と心電図同時計測による数理モデリング・解析

本課題では、研究課題①および②で得られたセンサ技術およびデバイス基盤を統合し、眼鏡型デバイスにおける血圧脈波計測と心電図の同時計測データを用いた数理モデリングおよび解析を通じて、血圧計測精度の向上とノイズ低減手法の高度化に向けた検討を行った。

・血圧変動を利用した校正手法の構築と高精度化

頭部におけるトノメトリ法では、皮下組織の影響により MEMS3 軸力センサで計測された力を血圧値へ校正する必要がある。この校正が適切に行われなければ血圧計測精度の評

価自体が困難となる。しかし、手首部と比較して頭部では血圧校正手法が確立されておらず、安定した校正が難しいという課題があった。この課題に対し、本研究では運動強度変化による血圧変動を利用した血圧校正手法を構築した。具体的には、握力運動により複数の安定した血圧状態を生成し、各状態における計測力と市販血圧計の値との関係から回帰モデルを構築した。その結果、相関係数 0.97 の高い線形関係が得られ、校正後の血圧誤差は -5.7 ± 3.0 mmHg となり、従来手法と比較して誤差のばらつきを大幅に低減できることを確認した。本手法により、従来は困難であった頭部における血圧校正を比較的容易かつ再現性良く実施できる見通しが得られた。これは、眼鏡型デバイスにおける血圧計測精度の定量評価およびノイズ低減手法の検証を可能とする基盤技術であり、本研究全体の進展において重要な役割を担うものである。

- ・ 体位変化を考慮した数理モデルの導入

さらに、日常生活における体位変化に伴う血圧変動および体位血圧反射の影響を考慮した校正手法を検討した。仰臥位から座位への体位変化において、血圧は一時的に低下した後、時間経過とともに安定する挙動を示すことを確認し、安定区間のみを抽出することで反射による誤差を低減した。その結果、約 406 秒の安静時間を確保することで安定した計測が可能となり、校正モデルは相関係数 0.96 を示し、血圧誤差は 1.4 ± 2.4 mmHg と高精度な校正を実現した。これにより、生理応答を考慮した数理モデルの導入が血圧計測精度向上に有効であることを示した。

- ・ 多モダリティ信号統合および特徴量解析に向けた基盤検討

研究課題①および②で構築した血圧脈波計測および心電図計測技術を基盤として、両者を統合した多モダリティ信号解析の検討を行った。特に、心電図と血圧脈波の時間差情報である脈波伝播時間 (PTT) に着目し、頭部における血圧校正および精度向上への適用可能性を検討した。その結果、異なる生体信号を組み合わせることで、単一信号では困難であった血圧推定精度の向上やノイズ耐性向上が期待されることを確認した。

また、血圧脈波および心電図から得られる特徴量について整理を行い、頭部計測におけるノイズの影響評価および手首部計測との比較を通じて、特徴量抽出における課題を明らかにした。これらの検討により、頭部における血圧脈波から有用な生体情報を抽出するためには、さらなるノイズ低減および数理モデルに基づく解析手法の導入が重要であることが示唆された。

【共同研究体制と進行状況】

本研究は、研究課題①～③に対応して、センサ開発、デバイス設計、信号処理および数理モデリングの各要素を分担しつつ、それらを統合する形で推進している。今年度は、各課題の成果を相互にフィードバックしながら研究を進めることで、個別技術の高度化とともに、血圧計測システム全体としての完成度向上を図った。

研究代表者（土肥）は、リストバンド型および眼鏡型デバイスの設計・試作および全体統合を担当し、研究分担者の吉田は心電図計測用ウェアラブルデバイスの開発、大草はセンサ信号の解析および数理モデリングを担当した。これにより、センサ・デバイス・解析を一体とした研究体制が構築されている。特に、研究課題①および②で得られた計測基盤とデバイス技術に対し、研究課題③で検討した血圧校正手法および数理モデルを組み合わせることで、頭部における血圧計測精度評価およびノイズ低減手法の検証が可能となった。これらは本研究を横断する基盤技術として重要な成果である。

また、本年度は研究代表者が 4 月～9 月にロンドンに滞在し、その後 9 月以降は日本に拠点を移して研究を推進した。海外滞在期間中はオンラインでの定期的な打合せおよびデータ共有により連携を維持し、帰国後は対面での議論・実験を通じて研究を加速させた。このように、国内外の活動を組み合わせることで、研究体制を効果的に機能させ、研究課題の統合的な進展につなげた。

【国際連携活動・学内外への波及および研究成果の発表と教育への還元】

研究代表者は、中央大学の研究促進期間制度により、2025 年度前半（～9 月）まで英国の Imperial College London, Department of Bioengineering において研究活動を実施した。滞在期間中は、所属研究グループにおいて中央大学および本共同研究プロジェクトの紹介を行い、ウェアラブル生体計測デバイスに関する研究内容についてディスカッションを実施した。また、帰国後もこれらの議論を継続し、本共同研究プロジェクトを発展させる形での国際共同研究に向けた準備および協議を進めている。

本研究成果については、国内外の学会において積極的に発表を行い、研究内容の発信を進めている。MicroTAS 2025 をはじめ、日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会、日本機械学会マイクロ・ナノ工学シンポジウム、日本生体医工学会、電気学会センサ・マイクロマシンシンポジウム等において、血圧脈波計測デバイス、MEMS3 軸力センサ、皮膚伸展機構、有機電極材料など、本研究の主要技術に関する成果を体系的に発表した。これにより、本研究の学術的・技術的意義を国内外に発信し、関連分野への波及を図っている。

教育面では、先進理工学部における共通開講科目「マイクロマシン」において、本研究成果を MEMS センサおよびウェアラブルデバイスの応用事例として活用する予定である。また、卒業研究テーマとしての展開に加え、オープンキャンパスや理工白門祭における装置展示・体験型コンテンツへの応用も計画しており、研究成果を教育および社会連携活動へ多面的に還元する方針である。

(英文)

The research conducted in FY2025 followed the original plan, focusing on three main objectives:

- (1) improving the accuracy of blood pressure measurement through motion artifact reduction in wristband-type devices,
- (2) developing a glasses-type wearable device with integrated ECG sensing, and
- (3) establishing calibration methods and physical modeling for multimodal physiological measurement.

For research objective (1), we developed a sensitivity-switching triaxial force sensor and a skin-stretching mechanism to enhance signal quality and reduce motion artifacts. The proposed system achieved a high signal-to-noise ratio and enabled clear extraction of pulse wave features, demonstrating its effectiveness for robust blood pressure sensing under motion conditions.

For objective (2), we developed a glasses-type wearable device integrating tonometry-based pulse wave measurement and ECG sensing. Pulse transit time (PTT)-based calibration showed strong correlation with reference blood pressure (correlation coefficient: 0.87, error: 2.0 ± 1.9 mmHg). In addition, a mechanical structure was introduced to suppress motion artifacts caused by temporal muscle movement, reducing signal variability by approximately 48%. Flexible organic electrodes were also developed to enable stable and comfortable long-term ECG measurement.

For objective (3), we established a novel calibration method for head-based blood pressure measurement using blood pressure variations induced by exercise and posture changes. This approach significantly improved calibration accuracy and enabled reliable quantitative evaluation, which had been a major challenge in head-based tonometry. Furthermore, preliminary studies on multimodal signal integration and modeling indicated the potential for improving robustness and accuracy in physiological parameter estimation.

As part of international collaboration, the principal investigator conducted research at the Department of Bioengineering, Imperial College London, under Chuo University's Research Promotion Program. The project was presented within the host group, followed by discussions on future collaboration. After returning to Japan, further discussions have been continued toward establishing an international joint research framework based on this project.

The research outcomes have been actively disseminated through international and domestic conferences, including MicroTAS 2025 and major conferences in MEMS, bioengineering, and sensor systems. Selected results will be submitted to international journals such as Sensors and Actuators A. Educational integration is also planned through the course “Micromachines,” as well as through graduation research projects and outreach activities.

4. 主な発表論文等（予定を含む）

2025年度に行った共同研究プロジェクトの研究課題としての成果内容についてご記載ください。

※行が不足する場合は、適宜、行を追加してご記入ください。

【学術論文】（著者名、論文題目、誌名、査読の有無（査読がある場合は必ず査読有りと明記してください）、巻号、頁、発行年月）＜発表予定を含む。但し、投稿中、投稿準備中のものは除く＞

Takashi Ota, Kosuke Okusa, “Study on Model-Based Estimation of Continuous Blood Pressure From Pulse Arrival Time Using Two Doppler Radar Sensors”, IEEE Access, 査読有, Vol.13, pp. 102505 – 102515, June 2025.

【学会発表】（発表者名、発表題目、学会名、開催地、開催年月）

- Arata Ohkoshi, and Shotaro Yoshida, “A lift-off-based simple and cost-effective micropatterning method of graphene electrode for organic microdevices,” The 29th International Conference on Miniaturized Systems for Chemistry and Life Sciences -Micro-Total Analysis Systems (MicroTAS 2025), Adelaide, Australia, Nov. 2025.
- Tatsuya Murakami, and Shotaro Yoshida, Printing of transparent organic microelectrodes using intaglio contact printing for neural activity measurement, The 29th International Conference on Miniaturized Systems for Chemistry and Life Sciences -Micro-Total Analysis Systems (MicroTAS 2025), Adelaide, Australia, Nov. 2025.
- Aoi Watanabe, and Kosuke Okusa, Non-Contact Identification of Sleep Apnea Using Integrated Cardiac and Respiratory Models on Microwave Doppler Signals, 17th International Congress of Physiological Anthropology (ICPA2025), Enschede, Netherlands, Aug. 2025.
- Mutsuki Tsuchiya, Aoi Watanabe, and Kosuke Okusa, Development of a Non-Contact Stress-Estimation Method Based on Cardiac Motion Modeling Using Microwave Doppler Radar, Enschede, Netherlands, Aug. 2025.
- 瀬越貴久・土肥徹次「血圧脈波計測デバイスのための安定性向上のための角度調節可能な小型押し付け機構」日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス 講演会 2025 in Yamagata, 山形, 2025 年 6 月
- 新津凜久・土肥徹次「感度切換機構を用いたトノメトリ法による血圧脈波計測用 3 軸力センサ」日本機械学会 第 16 回マイクロ・ナノ工学シンポジウム, 宇都宮, 2025 年 11 月

- 瀬越貴久・土肥徹次「トノメトリ法と心電計測を用いた眼鏡型ウェアラブルデバイス」日本機械学会 第 16 回マイクロ・ナノ工学シンポジウム, 宇都宮, 2025 年 11 月
- 高柳和弥・瀬越貴久・土肥徹次「血圧脈波計測デバイスにおける負のポアソン比をもつ構造を用いた皮膚伸展機構」日本生体医工学会関東支部若手研究者発表会 2025, 東京, 2025 年 11 月
- 大越 新・青木 俊也・金子 凜太郎・吉田 昭太郎「リフトオフを用いたグラフェンインクのコスト微細加工プロセスの開発」日本機械学会第 16 回マイクロ・ナノ工学シンポジウム, 宇都宮, 2025 年 11 月
- 青木 俊也・大越 新・吉田 昭太郎「グラフェン電極を用いた印刷型全有機電気化学トランジスタの開発」日本機械学会第 16 回マイクロ・ナノ工学シンポジウム, 宇都宮, 2025 年 11 月
- 村上 達哉・吉田 昭太郎「単一細胞レベル神経電位計測のための微細印刷加工とゲルを活用したマイクロ透明有機電極の開発」電気学会第 42 回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム, 宇都宮, 2025 年 11 月
- 中林 拓翔・吉田 昭太郎「高分子電解質と炭素繊維電極を統合した金属不使用の小型フレキシブル二次電池」電気学会第 42 回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム, 宇都宮, 2025 年 11 月
- 渡邊 葵・平田 喜己・大草 孝介「呼吸動作のモデル化による非接触呼吸特徴量推定法の開発」日本計算機統計学会第 39 回シンポジウム, 京都, 2025 年 11 月
- 土谷 睦月・渡邊 葵・太田 隆・大草 孝介「心動作モデリングに基づく非接触ストレス評価法の開発」日本計算機統計学会第 39 回シンポジウム, 京都, 2025 年 11 月

【図 書】(著者名、出版社名、書名、刊行年)

【その他】(知的財産権、ニュースリリース等)

- 特開 2025-180787 (大草 孝介・太田 隆)