

研究終了報告書

「生体情報操作を活用したウェアラブルセンシング基盤の拡張」

研究期間：2019年10月～2023年3月

研究者：村尾 和哉

1. 研究のねらい

IoT (Internet of Things) 機器がインターネットに接続されることで、IoT 機器が直接攻撃される危険性だけでなく、IoT 機器を踏み台とした大規模な攻撃事例も発生している。一方で、最近ではハードウェアトロイと呼ばれる悪意のある回路が IC の設計・製造段階で混入され、システムの機能低下/停止や情報漏洩の脅威がある。IoT 機器に対するソフトウェアやハードウェアの脅威は解決すべき喫緊の課題であり、既に世界各国の企業、大学、研究所がその対策に取り組んでいる。

これらの脅威以外にも IoT 機器に搭載されているセンサに対する攻撃でセンサデータを利用する上流の機器やアプリケーションが誤った処理や動作をする脅威がある。特に、小型で人間の身体に装着可能な機器(ウェアラブル機器)を用いた人間のセンシングでは、センサデータから人間の行動、移動手段、位置、周囲の状況、心理状態などの情報を得る。

この数年でウェアラブル機器は保険や医療、介護などの社会保障や福祉インフラに入り込み、個人特化した商品やサービスが提供されている。私が懸念しているウェアラブル機器のセキュリティリスクは、人間の体内において計測前に生体情報が改変される攻撃である。高性能なセンサ、堅牢なハードウェア、安全な通信路やストレージ、改ざん検出手法が登場しても、計測前に情報が改変される攻撃には対処できない。ウェアラブル機器が一層社会に浸透し、持続可能性を有するために、装着者自身による生体情報そのものに対する攻撃可能性を明確にする必要がある。

2. 研究成果

(1) 概要

生体情報攻撃による計測値改変として、体内における脈波操作に取り組んだ。マイコンで制御可能なエアポンプおよびバルブが接続されたカフを上腕に巻き、加圧と解放を行うことで、脈波を消失、振幅変調、位相変調する手法を考案し、心拍数および心拍変動を変化させる手法を提案した。市販ウェアラブルデバイスの計測心拍数の低下やストレス指標にも用いられる LFHF の低下を確認した。また、生体表面でセンサ素子に対して攻撃する手法の確立に取り組んだ。ディスプレイの明暗を高速に制御することで光電脈波センサに、任意の心拍数を計測させる手法を提案した。60～100bpm の範囲の 10bpm 刻みの心拍数となるように制御した実験の結果、いずれの範囲でも誤差 3bpm と高い精度が得られた。

攻撃の有効活用によるウェアラブルセンシング基盤の拡張として、手首で計測した脈波から上腕の筋活動量を推定する手法を提案した。4名に被験者に対して3種の異なる筋活動の分類問題とすると分類精度 75%以上となり、筋電位の RMS (root mean square) の回帰問題とすると誤差 20%となった。また、脈波を用いた把持物体の温度推定手法を提案した。4区分に分け

た温度帯を推定する実験を行ったところ、4名の被験者で87.5%の精度を得た。さらに、静電容量タッチパネルに電極アレイを接触させ、電極の電位を時間空間的に変化させることで、指でスクロールなどのインタラクションが発生したかのように誤認させる手法を提案した。実験の結果、タップ、プレスアンドタップ、スワイプ、ピンチイン、ピンチアウト、回転をほぼ100%の精度で発生させた。この技術を指サックの形状にして親指1本で同種のインタラクションを再現すると、タッチ、スワイプ、ピンチイン、ピンチアウトはほぼ100%、プレスアンドタップは80%、回転は42%の精度となった。このほか、脈波を用いたスマートウォッチとのインタラクション手法、心電位の心拍と脈波の脈拍の時間差からウェアラブルデバイスの装着部位を推定する手法、手首で計測される体温を制御する手法、ウェアラブルデバイスで取得される外気温時系列から滞在地域を推定する手法を提案した。

(2) 詳細

研究テーマA「生体情報攻撃による計測値改変」

体内における脈波の操作に取り組んだ。マイコンで制御可能なエアポンプおよびバルブが接続されたカフを上腕に巻き、適切なタイミングで加圧と解放を行うことで、脈波を消失、振幅変調、位相変調する手法を考案し、心拍数および心拍変動を変化させる手法を提案した。図1に示すデバイス構成で2名の被験者で5種類のスマートウォッチを用いて安静時と運動後で実験したところ、図2(図は運動後の1名の被験者)に示すように5種類すべてのスマートウォッチで計測心拍数の低下を確認した。また、脈波消失や遅延によってストレス指標にも用いられるLFHFを低下させることができた。本研究内容は神戸大学大学院工学研究科寺田努教授(CREST「共生インタラクション」代表研究者)と共同で研究を実施した。

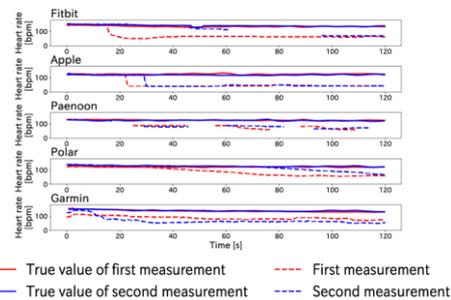
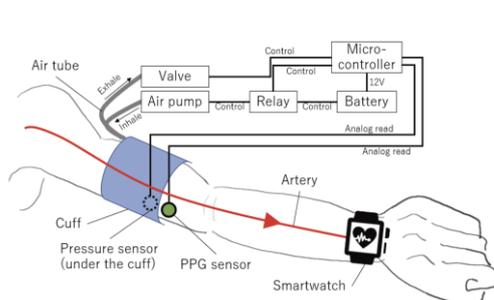


図1 心拍数、心拍変動制御デバイスの構成 図2 心拍数制御の実験結果

ディスプレイの明暗を高速に制御することで光電脈波センサに、任意の心拍数を計測させる手法を提案した。図3に示すように市販のノートパソコン、小型ディスプレイ、図4に示すエレクトロクロミックディスプレイを用いて、60~100bpmの範囲の10bpm刻みの心拍数となるように制御した実験の結果、いずれの範囲でも誤差3bpmと高い精度が得られた。本研究内容は東京大学生産技術研究所松久直司准教授（さきがけ「情報担体と新デバイス」代表研究者）と共同で研究を実施した。（文献(1)-3）

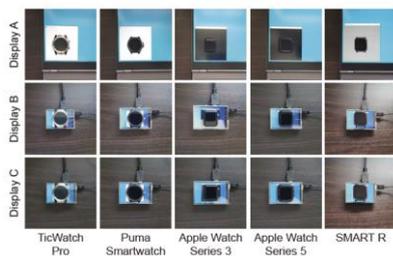


図3 脈波生成で利用したディスプレイ

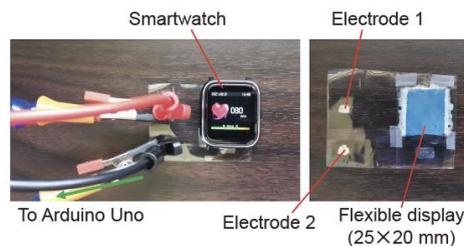


図4 脈波生成で利用した薄膜ディスプレイ

研究テーマ B「攻撃の有効活用によるウェアラブルセンシング基盤の拡張」

上腕の筋活動によって血管が圧迫されることで、図5に示すように手首で計測される脈波の形状が変化することを利用し、手首で計測した脈波から上腕の筋活動量を推定する手法を提案した(図6). 4名に被験者に対して3種の異なる筋活動の分類問題とすると分類精度75%以上となり、筋電位の root mean square の回帰問題とすると誤差20%となった. (文献(1)-2)

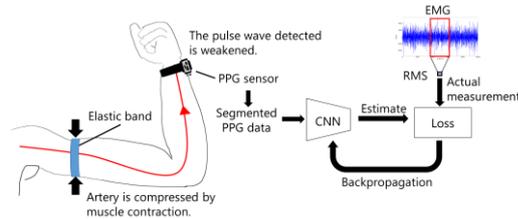
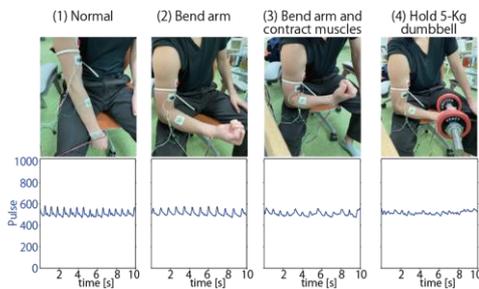


図5 脈波センサによる筋活動推定の機構

図6 脈波センサによる筋活動推定の機構

脈波を用いた把持物体の温度推定手法を提案した. 指先の脈波の振幅と物体の温度には相関があり、4区分に分けた温度帯を推定する実験を行ったところ、4名の被験者で87.5%の精度を得た.

図7に示すように静電容量タッチパネルに電極アレイを接触させ、電極の電位を時間空間的に変化させることで、指でスクロールなどのインタラクションが発生したかのように誤認させる手法を提案した. 実験の結果、ノートPCのタッチパネルに対してタップ、プレスアンドタップ、スワイプ、ピンチイン、ピンチアウト、回転をほぼ100%の精度で発生させた. この技術を図9に示すような指サックの形状にして親指1本で同種のインタラクションを再現すると、タッチ、スワイプ、ピンチイン、ピンチアウトはほぼ100%、プレスアンドタッチは80%、回転は42%の精度となった. 指先と画面の接触具合の影響を受ける形となった.

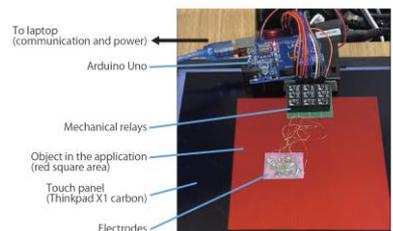


図7 マルチタッチ生成シート

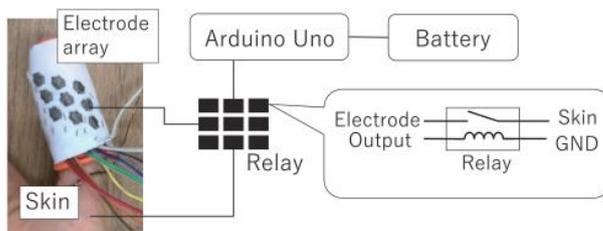


図8 マルチタッチ生成指サック

生体情報操作を活用したウェアラブルセンシング基盤の拡張として、脈波を用いたスマート

ウォッチとのインタラクション手法を提案した。右利きの人々が左手首にスマートウォッチを装着している状態で、右手で左上腕を軽く握り、握っている長さのパターンでスマートウォッチが計測する脈波の消失時間が変わるため、コマンドを送信できる。この技術を応用して体をコントローラとして握る動作で遊ぶことができるゲームを開発し、グランフロント大阪の The Lab.において2022年10月から2023年1月まで一般向けに展示した。

このほか、ウェアラブルデバイスが身体の任意の位置に装着される環境ではセンサ自身が自らの装着位置を認識する必要があるため、心電位の心拍と脈波の脈拍の時間差から装着部位を推定する手法を提案した。12か所の身体部位のデータを5人の被験者から採取し、身体部位の候補を変えてF値を計測したところ、5か所の部位に対してF値1.0を得た。(文献(1)-3)

2021年9月にオンラインで開催される国際会議 UbiComp2021 の併設ワークショップとして人間行動解析とコーパスに関するワークショップ HASCA2021 を名古屋大学、九州工業大学、Sussex 大学、Oulu 大学、Freiburg 大学の研究者らとともに主催した。また、人間行動認識に関するコンペティション Sussex-Huawei Locomotion Challenge 2021 を Sussex 大学の研究者らとともに開催した。また、過去3年間の成果が国際論文誌に採択され、Editor's Pick を受賞した。

3. 今後の展開

さきがけ期間中に生体情報と連携したサービスを提供する企業との共同研究を試みてきたが、今後は、2~3年程度で、多様なサービスの出現に備えて生体情報センシングに対する攻撃手法および攻撃による効果、対処法を一般に参照可能な形で公開することを目指す。また、2030年頃までには、自動車やウェブサービスのように研究者の立場でも攻撃を試みる事が可能なサービスが現れることを期待し、その際には攻撃と影響を調査したい。

4. 自己評価

研究目標「身体部位への非侵襲で軽微な攻撃によってウェアラブルセンサが取得する情報を制御できる可能性を明らかにし、生体情報への情報埋め込みなど攻撃を有効活用したウェアラブルセンシング基盤の拡張を目標とする。」は、特に多くのウェアラブルデバイスで計測可能な脈波に関して攻撃可能性を明らかにできた。また、当初構想していた以上に多様な生体情報計測の応用に取り組むことができた。これらの観点より、研究目標の達成状況は当初想定していた以上といえる。このほか、領域内外の数多くの研究者と連携してテーマが生まれたことは、目標としていたことであり、一定程度達成できたと考えている。

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:23件

1. K. Yoshida, K. Murao, "Load Position Estimation Method for Wearable Devices Based on Difference in Pulse Wave Arrival Time," MDPI Sensors, 22(3), 1090 (Jan. 2022).

ウェアラブルデバイスが身体の任意の位置に装着される環境ではセンサ自身が自らの装着位置を認識する必要がある。本論文では心電位の心拍と脈波の脈拍の時間差から装着部位を推定する手法を提案する。12か所の身体部位のデータを5人の被験者から採取し、身体部

位の候補を変えて F 値を計測したところ, 5か所であればF値 1.0 を得た.
2. M. Okamoto, K. Murao: PPG2EMG: Estimating Upper-Arm Muscle Activities and EMG from Wrist PPG Values, MDPI Sensors, 23(4), 1782 (Feb. 2023). [mdpi] (IF=3.847)
上腕の筋活動によって血管が圧迫されることで, 図5に示すように手首で計測される脈波の形状が変化することを利用し, 手首で計測した脈波から上腕の筋活動量を推定する手法を提案した. 4名に被験者に対して3種の異なる筋活動の分類問題とすると分類精度75%以上となり, 筋電位のRMS (root mean square) の回帰問題とすると誤差20%となった.
3. A. Fujii, K. Murao, N. Matsuhisa: Pulse Wave Generation Method for PPG by using Display, IEEE Access (Mar 2023).
ディスプレイの明暗を高速に制御することで光電脈波センサに, 任意の心拍数を計測させる手法を提案した. 図3に示すように市販のノートパソコン, 小型ディスプレイ, 図4に示すエレクトロクロミックディスプレイを用いて, 60~100bpmの範囲の10bpm刻みの心拍数となるように制御した実験の結果, いずれの範囲でも誤差3bpmと高い精度が得られた.

(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. M. Okamoto, K. Murao, “Multi-touch Interaction Generation Device by Spatiotemporally Switching Electrodes,” MDPI Electronics (June 2021).
2. M. Okamoto, K. Murao, “A Finger Sleeve with Fabricated Electrodes that Generates Multi-touch Interactions on Touch Screen,” in Proc. of the 26th International Symposium on Wearable Computers (ISWC 2022) (Sep. 2022).
3. K. Murao, IPSJ/IEEE-Computer Society Young Computer Researcher Award (2020).
4. L. Wang, H. Gjoreski, M. Ciliberto, P. Lago, K. Murao, T. Okita, D. Roggen, 2021 Editor's Pick: Computer Science, frontiers (Feb. 2022).
5. 村尾和哉: 情報処理学会マルチメディア, 分散, 協調とモバイルシンポジウム (DICOMO2022), 優秀プレゼンテーション賞 (July 2022)