

上腕の血流を止めて操作するゲーム

水野悟朗^{1,a)} 蔵田直生^{1,b)} 吉田航輝^{1,c)} 村尾和哉^{1,d)}

概要：ウェアラブルデバイス特有のセキュリティリスクとして、装着者の身体に攻撃して生体情報を操作する攻撃が考えられる。我々の研究グループでは上腕を圧迫して光電式脈波センサ値を改変する腕締め付けデバイスを提案している。血液中のヘモグロビンは入射光を吸収する性質があり、脈波到達の瞬間は血液量が増大するため反射光が減少する。そのため、上腕を圧迫して血液量を減少させることでセンサ値を改変できる。本研究では上腕の圧迫によって光電式脈波センサで計測される脈波を意図的に制御してプレイするビデオゲームである (1) 横スクロールゲームと (2) 早打ちシューティングゲームの 2 種類を実装した。また、実装したゲームをグランフロント大阪にある The Lab. で展示して来場者にプレイしてもらって体験評価を実施した。

1. 研究背景

近年、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。この他にも、IoT 機器に搭載されているセンサに攻撃してセンサデータを利用する上流の機器などに誤った処理をさせる攻撃も存在する。例えば、加速度センサ素子を超音波で振動させて誤った結果を出力させる攻撃 [1] が存在する。IoT 機器の中でも、身体に装着して利用するウェアラブルデバイスは直接インターネットに繋がらず、装着者が所持しているスマートフォンや小型 PC をゲートウェイとしていることが多い。また、専用アプリがデータを処理して、ユーザが結果をリアルタイムで閲覧可能でこまめな充電が必要であるため管理が行き届いている。したがって、屋外やビルに放置されたことによるメンテナンス不備のセキュリティリスクは低い。そのため、ウェアラブルデバイス特有のセキュリティリスクとして、装着者の身体に攻撃して生体情報を操作する攻撃が考えられる。生体情報操作によって取得されたセンサ値は現にその値が生体内で生じているものを数値化したものである。センサが高精度であるほど操作された情報を正しく数値化するため、計測以降のハードウェアやネットワーク、クラウドストレージが強固なセキュリティを備えていたとしても、既存の技術では攻撃を検知することは困難である。生体情報操作によ

る攻撃可能性を明らかにするために、我々の研究グループでは上腕を圧迫して光電式脈波センサ値を改変する (以後、脈波制御とする) 腕締め付けデバイスを提案している [2]。血液中のヘモグロビンは入射光を吸収する性質があり、脈波到達の瞬間は血液量が増大するため反射光が減少する。そのため、上腕を圧迫して血液量を減少させることでセンサ値を改変できる。先行研究では、この事実に基づいてコンピュータ制御で上腕を圧迫して脈波制御を行うデバイスを実装している。本研究では、先行研究のデバイスを使わずに上腕圧迫による脈波制御を行ってプレイするビデオゲームを提案する。提案するビデオゲームではデバイスを使わずにユーザの手だけで上腕を圧迫することで脈波制御を行う。以降、2 節で関連研究を紹介する。3 節で提案手法について述べる。4 節で評価実験について述べ、最後に 5 節で本研究をまとめる。

2. 関連研究

本節ではセンサへの攻撃手法に関する研究と脈波計測を用いた研究を紹介する。

2.1 センサへの攻撃手法に関する研究

Sharif ら [3] は、最先端の顔認証システムを効果的にだますことができるメガネフレーム型のアクセサリを生成する技術を提案している。Yamada ら [4] は、カメラのイメージセンサが近赤外光に敏感であるという事実を利用して、撮影画像にノイズを加えることで顔検出を回避することができる発光眼鏡を提案している。Eykholt ら [5] は、実世界の計測対象物である道路標識にシールを張り画像認識の

¹ 立命館大学

a) goro.mizuno@iis.ise.ritsumei.ac.jp

b) naoki.kurata@iis.ise.ritsumei.ac.jp

c) kazuki.yoshida@iis.ise.ritsumei.ac.jp

d) murao@cs.ritsumei.ac.jp

結果を誤認させるアルゴリズムを提案している。Son ら [6] は MEMS ジャイロ스코プを搭載したドローンに対して攻撃者が意図的な音響ノイズを用いて無力化できるかを調査している。Troppe ら [1] は、加速度センサ素子に超音波を当てて任意の波形を出力させる手法を提案している。

Farrukh ら [7] は iPad に搭載されているモーションセンサデータを用いて、Apple Pencil で何を iPad 上に書いたのかを特定するサイドチャンネル攻撃手法を提案している。Gazzari ら [8] は Myo アームバンドに攻撃して EMG と IMU データをハッキングし物理キーボードに入力されたキーストロークを推定する手法を提案している。Shen ら [9] はカメラと人間の目の画像形成原理の違いに着目して、可視光を用いたブラックボックス型顔認証システムに対する新しい攻撃手法である VLA を提案している。このように、モノやセンサ、人に対する攻撃手法は多く提案されているが、生体情報の操作による攻撃に関する研究は筆者の知る限り存在しない。

2.2 脈波計測を用いた研究

ウェアラブルデバイスで計測した脈波を利用する研究として、端ら [10] はウェアラブルデバイスで脈波の計測が正しく行われなことを防ぐためにセンサの位置ずれを推定する手法を提案している。堤野ら [11] は、自動車運転時に加減速や車線変更のタイミングで心拍数が上昇したことよっての事故を防ぐために、ファンで体を冷やして心拍数を下げる安全運転支援システムを提案している。Yoshida ら [12] は、装着部位ごとに脈波到達時間が異なることを利用して動的にウェアラブルデバイスの装着部位を推定する手法を提案している。このように、計測した脈波の情報を用いたシステムは提案されているが、脈波を制御することに着目した研究は筆者の知る限り存在しない。また、血圧値を計測するとき上腕に巻いたカフに空気を送り込んで血管を圧迫して血液の流れを止めている。そのため、血圧計測時は脈波を止める制御をしているが、本研究のように動的に脈波を制御するものではない。

3. 提案手法

3.1 脈波制御部

本研究では光電式脈波センサ (PPG センサ) を使用する。光電式とは、LED で 550nm 付近の緑色波長の光を皮膚表面に照射し、体組織によって反射した光を皮膚表面のフォトダイオードで受光する方式である。血中のヘモグロビンは入射光を吸収する性質があるため、脈波到達の瞬間は血流量が増大して反射光が減少することを利用して脈波を計測する。そのため、上腕を圧迫して血流量を減少させることで、上腕から指先にかけての末端部分ではセンサ値が小さくなる。血管に十分な圧力をかけることでその部位の脈波が減衰することは秋元ら [13] によって報告され

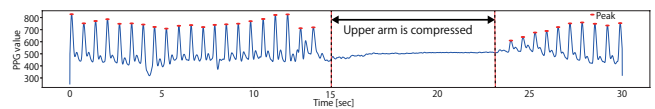


図 1 上腕圧迫時の指先脈波波形



図 2 ゲーム選択画面

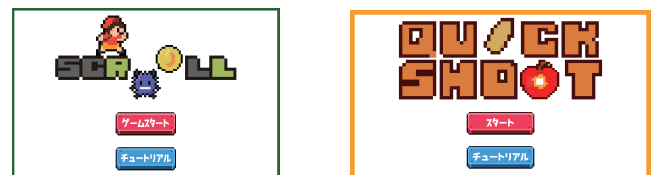


図 3 プレイ内容選択画面

ている。図 1 に実際に上腕を圧迫したときの指先での脈波センサの値を計測した脈波波形を示す。縦軸はセンサ値、横軸は時刻、赤丸はピークを示す。左上腕にカフを装着して空気を送って圧迫した。左手指先には脈波センサ (pulsesensor.com 製 *1) を装着して指先の脈波センサの値を 30 秒間観察した。図 1 を見ると、上腕を圧迫している間は脈波のピークが取れないほど脈波センサの値が小さくなっていることがわかる。また、圧迫を止めて解放すると正常に脈波が計測できていることがわかる。本研究ではこの事実に基づいて、上腕を圧迫して脈波制御をしている状態かどうかを検出する。

提案手法では上腕圧迫で脈波のピークを消失させているときを圧迫状態、上腕圧迫していないときを未圧迫状態と定義する。先行研究 [2] でも使用している脈波のピーク検出プログラム *2 でピークが検出できている間を未圧迫状態とする。検出されたピークのうち、最新のピーク時刻を t とすると、ピーク検出プログラムで $t + 1000$ ミリ秒以上経過していてもピークが検出されない間を圧迫状態とする。

3.2 ゲーム

本研究で実装したゲームは図 2、図 3、図 4、図 5、図 6 の 5 種類の画面から構成される。各画面はそれぞれゲーム選択画面 (図 2)、プレイ内容選択画面 (図 3)、チュート

*1 <http://pulsesensor.com/>

*2 https://github.com/WorldFamousElectronics/PulseSensor_Amped_Arduino

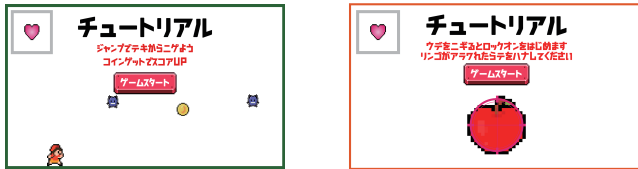


図 4 チュートリアル画面

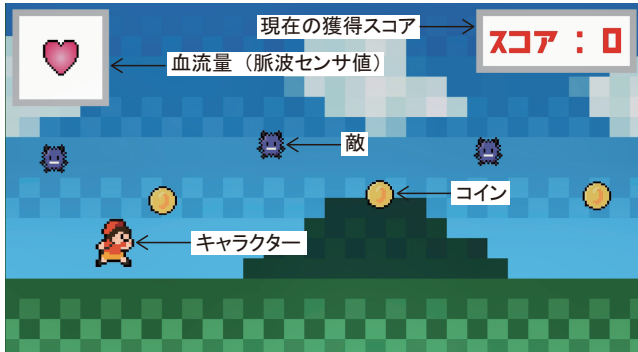


図 5 (1) のゲームプレイ画面

リアル画面 (図 4), ゲームプレイ画面 (図 5, 図 6) である。本研究では, (1) 横スクロールゲームと, (2) 早打ちシューティングゲームの 2 種類のゲームを実装した。(1) は脈波制御で画面中のキャラクターを動かして敵を避けながらコインを集めるゲームである。キャラクターは圧迫状態で画面の上方向へ, 未圧迫状態で画面の下方向へ移動する。コインに触れるとスコアが 1,000 増えて, 敵に触れるとその時点でゲーム終了となる。コインと敵は画面の右から左方向へ一定の速度で流れる。ゲーム終了となると, 最終スコアとこれまでのプレイ記録の中の最高スコアを画面に表示する。

(2) は圧迫状態から未圧迫状態になるまでのタイムを競うゲームである。初めにプレイヤーは上腕を圧迫して圧迫状態にする。圧迫状態では画面上に緑色の照準が表示される。次に, 圧迫状態が検出されたときから 1~5 秒のうちに的が出現する。その後, 的が出現するとタイム計測が始まり, プレイヤーは上腕圧迫をやめる。最後に, 未圧迫状態が検出されたら, タイム計測を停止してゲーム終了となる。もし, 上腕圧迫をやめるタイミングが的が出現するよりも前に行われた場合は失敗となり最初からやり直しとなる。ゲーム終了となると, 今回のタイムとプレイ記録の中の最短タイムを画面に表示する。

ゲームプレイ画面とチュートリアル画面では脈波データが計測されていることをプレイヤーが確認できるように, 画面左上に血流量 (脈波センサ値) に応じて画像サイズが変化するハート形の画像を表示している。実際に, ハート形の図形を表示している様子を図 4, 図 5 に示す。また, 両ゲームともにプレイヤーがゲーム本編をプレイする前に脈波制御に慣れるためのチュートリアルを実装した。(1) のチュートリアルでは, 圧迫状態でキャラクターを画面の上方向へ, 未圧迫状態で画面の下方向へ移動させる。ゲーム



図 6 (2) のゲームプレイ画面

本編と異なる点はコインに触れてもスコアが増えないこと, 移動できる範囲が半分ほどに狭められていること, 敵に触れるとゲームオーバーではなくプレイ内容選択画面に遷移することである。(2) のチュートリアルでは, 圧迫状態で緑色の照準が表示され, 圧迫状態が検出されてから 4 秒後に的が表示される。上腕圧迫をやめるタイミングが的が出現するよりも前に行われた場合は失敗となり最初からやり直しとなる。的が出現してから上腕圧迫をやめていると成功となるが, チュートリアルでは圧迫状態を行うところからやり直しとなる。

プレイヤーは 2 つのうちのいずれかのゲームをゲーム選択画面 (図 2) にて選択する。ゲーム選択画面では, 画面中央上部にゲーム選択画面用のロゴ, 画面中央下部に上から赤と青のボタンが配置されている (図 3)。青のボタンが (1) のゲームのプレイ内容選択画面に遷移するボタンである。赤のボタンが (2) のゲーム内容選択画面に遷移するボタンである (図 3)。ページ遷移を行う方法は外部に接続されたキーボードを用いて行う。画面に表示されたボタンの色と同じ色のキーを押すことでページ遷移が行われる。プレイ内容選択画面ではチュートリアル画面に遷移するか,

ゲームプレイ画面に遷移するかを選択する。プレイ内容選択画面では画面中央上部にそれぞれのゲームのタイトルロゴ、画面中央下部に上から赤と青のボタンが配置されている。赤色のボタンはチュートリアル画面に、青色のボタンでゲームプレイ画面にそれぞれ遷移する。チュートリアル画面の構成は、どちらのゲームも画面中央より下がゲームを描画する部分、画面中央にゲームプレイ画面に遷移するためのボタン、画面上部にチュートリアルの文字とそれぞれのゲームのプレイ方法の説明を記述している。

3.3 実装

脈波制御部は先行研究でも使用している脈波のピーク検出アルゴリズムの Arduino プログラムを使用した*3。また、現在時刻、脈波センサ値、圧迫状態のフラグ値の3つの数値を PC へ 100Hz で送信した。Arduino に接続する脈波センサは pulsesensor.com 製を使用した。

ゲーム部は Python で実装した。Arduino から PC に送られてきた現在時刻、脈波センサ値、圧迫状態のフラグを PC で受信してゲーム部で使用した。外部キーボード (vaydeer 製の 4 点キーボード) を PC に接続して、プレイヤーがボタンを押すことでページ遷移を行うようにした。キーキャップには赤、青、緑、黄の4色のシールを貼付した。赤と青のシールが貼られているキーは画面内のボタンの色と連動している。残りの黄と緑はプレイヤーが誤ったボタンを押してしまったときに使用するキーであり、黄のシールが貼られているキーはゲームセレクトに戻り、緑のシールが貼られているキーはひとつ前のページに戻る。

4. 評価実験

4.1 実験環境

実装したゲームをグランフロント大阪にある The Lab. で展示して来場者にプレイしてもらった。図7に展示している環境を示す。実装ゲームは2台分を設置した。机上の中央には手形をモチーフにした手の置き場を設置して、手形の中指の部分には脈波センサを取り付け、手形の横に外部キーボードを設置した。机横にはそれぞれのゲームのプレイ方法と脈波制御の方法の説明を記述した遊び方のポスターを設置した。

展示開始日である 2022 年 10 月 5 日から 11 月 25 日 17:30 までに採取したログのうち、プレイ開始からスコア表示までを 1 プレイずつ切り出した 6724 件とチュートリアルの開始から終了までを 1 プレイずつ切り出した 1576 件のデータを評価対象とした。評価指標として、ゲームプレイログのデータについてはプレイ回数、プレイ時間 (最大, 最小, 平均, 中央), スコア (最大, 最小, 平均, 中央) の 9 種類を算出した。チュートリアルログのデータについて



図7 実装したゲームを展示している環境

はプレイ回数、プレイ時間 (最大, 最小, 平均, 中央) の 5 種類を算出した。また、一部の来場者には展示会場のスタッフによってゲームをプレイした感想とゲームの難易度について回答してもらった。

4.2 結果と考察

表1に各ゲームプレイにおける評価指標を算出した結果、表2に各ゲームのチュートリアルにおける評価指標を算出した結果を示す。また、ゲームをプレイした感想の回答の一部を表3、ゲームの難易度の回答の一部を表4にそれぞれ示す。表1より、プレイ回数に着目すると(2)の方が1,000回以上多いことがわかる。(2)は脈波制御を1回だけすればゲームクリアとなることから、(1)に比べて短時間で簡単に繰り返し遊べたためだと考えられる。長時間遊ぶことを想定した(1)のプレイ時間に着目すると平均約37秒であり、1回あたりが短時間であることがわかる。また、(1)のスコアに着目すると中央値が0点であることがわかる。これらの要因として、的確に血管を押さえて脈波制御をすることが初見では難しく、体験者の思うようなプレイが出来ずにゲームが終了したためと考えられる。また、(2)のプレイ時間やスコアに着目すると、最大値が平均値や中央値と比べてかなり大きいことがわかる。これは未圧迫状態が正しく検出されなかったために思うような操作ができずにプレイ途中で放置したと考えられる。加えて、表4でも脈波制御が難しいといったゲームの難易度に関する否定的な意見が多い結果となった。一方で、解剖の経験があるなどの医療に精通したプレイヤーであれば、血管の位置を理解しているために脈波制御を容易に行うことができるといった回答も得られた。以上のことから、各ゲームに難易度を設けるなどプレイの放置をなくすような改良と、医療に精通していなくても的確に血管を押さえられる位置をより明確に提示する必要がある。

チュートリアルの結果に着目すると、表2よりプレイ回数は(1)の方が196回多い。(1)は操作するキャラクター

*3 https://github.com/WorldFamousElectronics/PulseSensor_Amped_Arduino

表 1 ゲーム本編のプレイログから算出した各指標の結果

評価指標	ゲーム種類		
	(1)	(2)	
プレイ回数	2815 回	3909 回	
プレイ時間	最大	501.135 秒	3174.018 秒
	最小	15.944 秒	1.5 秒
	平均	37.221 秒	27.313 秒
	中央	28.607 秒	15.653 秒
スコア	最大	21000 点	50.786 秒
	最小	0 点	0.204 秒
	平均	957.726 点	3.296 秒
	中央	0 点	2.129 秒

表 2 チュートリアルプレイログから算出した各指標の結果

評価指標	ゲーム種類		
	(1)	(2)	
プレイ回数	886 回	690 回	
プレイ時間	最大	419.742 秒	969.719 秒
	最小	1.117 秒	1 秒
	平均	13.272 秒	22.491 秒
	中央	6.939 秒	7.042 秒

表 3 体験の感想に関する意見

<ul style="list-style-type: none"> ・ハイスコア更新を狙ってグループでかわるがわるプレイしていた。
<ul style="list-style-type: none"> ・展示の趣旨をもうちょっとパネルとかで知りたいですね。 ・不整脈の人とか、これやっても大丈夫なんですかね。

表 4 ゲームの難易度に関する意見

<ul style="list-style-type: none"> ・反応が良くないときはありましたが、難しさは感じなかった。 ・自分でキャラクターを操作している感じはありました。 ・解剖をしていたから脈を止めるのは得意。
<ul style="list-style-type: none"> ・思ったように動かないから難しい。 ・いかに脈波を鎮めるかが難しすぎる。 ・難しいです。強く抑えすぎて疲れちゃいました。 ・難しいけど面白かったです。

が敵に当たりゲームオーバーになるとプレイ内容選択画面に遷移するため、(2) に比べてプレイ回数が多くなったと考えられる。(1) のゲームは長時間遊ぶことを想定していたが、チュートリアルプレイ時間は平均 13.272 秒であり、1 回あたりが (2) のゲームより短くなっている。また、(2) のチュートリアルプレイ時間についてプレイログ同様に最大値が平均値や中央値と比べてかなり大きいことが分かる。この要因として、(2) のゲームが (1) のゲームに比べてゲームルールの理解が難しかったこと、未圧迫状態が正しく検出されなかったため思うような操作ができずにプレイ途中で放置されたことが考えられる。そのため、ゲーム内容を理解を助けるためにプレイ方法の提示方法に変更を加える必要があると考えられる。

5. まとめ

本研究では上腕の圧迫によって PPG センサで計測され

る脈波を意図的に制御してプレイするビデオゲームを提案した。本研究では、横スクロールゲームと早打ちシューティングゲームの 2 種類を実装した。また、実装したゲームをグランフロント大阪内の The Lab. にて展示し、来場者による体験評価を実施した。

今後の予定として、脈波制御部の性能評価や展示期間全体における体験評価を実施する予定である。また、ゲームに難易度設定を行ってプレイ途中で中断されにくいゲームに改良する予定である。

参考文献

- [1] T. Trippel et al.: WALNUT: Waging Doubt on the Integrity of MEMS Accelerometers with Acoustic Injection Attacks, EuroS&P2017, pp. 3–18 (2017).
- [2] 吉田航輝ら：脈波の消失を体内で実現して脈波計測値を改変するための腕締め付けデバイス, UBI73, Vol. 2022-MBL-102, No. 15, pp. 1–8 (2022).
- [3] Mahmood Sharif et al.: *Accessorize to a Crime: Real and Stealthy Attacks on State-of-the-Art Face Recognition*, In Proc. of the 2016 ACM SIGSAC Conference on Computer and Communications Security, pp. 1528–1540, 2016.
- [4] T. Yamada et al.: *Privacy Visor: Method Based on Light Absorbing and Reflecting Properties for Preventing Face Image Detection*, 2013 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, pp. 1572–1577, 2013.
- [5] Kevin Eykholt et al.: *Robust physicalworld attacks on deep learning visual classification*, In Proceedings of Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR 2018), pp. 1625–1634, 2018.
- [6] Yunmok Son et al.: *Rocking drones with intentional sound noise on gyroscopic sensors*, 24th USENIX Security Symposium (USENIX Security 15), pp. 881–896, Washington, D.C., August 2015.
- [7] Habiba Farrukh et al.: *S3: Side-Channel Attack on Stylus Pencil through Sensors.*, In Proc. of the ACM Interact. Mob. Wearable Ubiquitous Technol., Vol. 5, No. 1, pp. 1–25, March 2021.
- [8] Matthias Gazzari et al.: *My(o) Armband Leaks Passwords: An EMG and IMU Based Keylogging Side-Channel Attack*, In Proc. of the ACM Interact. Mob. Wearable Ubiquitous Technol., Vol. 5, No. 4, pp. 1–24, December 2021.
- [9] Meng Shen et al.: *VLA: A Practical Visible Light-based Attack on Face Recognition Systems in Physical World*, In Proc. of the ACM Interact. Mob. Wearable Ubiquitous Technol., Vol. 3, No. 3, pp. 1–19, September 2019.
- [10] 端智士ら：血圧脈波の特徴量を用いたウェアラブルデバイスの位置ずれ量推定, 生体医工学, Vol. Annual57, No. Abstract, pp. S35.2–S35.2, 2019.
- [11] 堤野理貴ら：脈拍データに基づくファンの風を用いた安全運転支援システムの開発, 2019 年度情報処理学会関西支部大会講演論文集, No. 2019, sep 2019.
- [12] Kazuki Yoshida et al.: *Load Position Estimation Method for Wearable Devices Based on Difference in Pulse Wave Arrival Time*, MDPI Sensors, Vol. 22, No.3, pp. 1090, 2022.
- [13] 秋元優摩ら：手で上腕を圧迫することによる脈波制御を用いたウェアラブルデバイス入力インタフェース, 研究報告ヒューマンコンピュータインタラクション (HCI), Vol.

