

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

秋元 優摩¹ 村尾 和哉^{1,2}

概要：スマートウォッチや活動量計などさまざまな種類のウェアラブルデバイスが開発され、広く一般に普及しつつある。情報提示装置としてディスプレイを搭載している機種があるが、身体に装着するという特性上そのサイズは1.5インチ程度と小さい。そのため、スマートフォンと同様のQWERTキーボードやフリック入力による文字入力やタッチによる選択操作だと操作速度の低下や操作ミスが発生し不便さを感じる。また、自分自身の指で画面が見えずに操作がしづらいFat finger問題もウェアラブルデバイスでは顕著である。本研究では、手首装着型のウェアラブルデバイスの多くに搭載されている脈拍センサを用いて身体の圧迫による血流変化をセンシングすることで、簡易なコマンド入力を可能とするウェアラブルデバイス用の入力インタフェースを提案する。提案手法は、脈拍計測、ピーク検出、ピーク間の時間間隔計算、コマンド送信の4つの処理から構成される。身体を圧迫するパターンの組合せによってコマンドを決定する方式として、4種類の入力方法を提案する。4名の被験者に各入力方式によって選択肢からひとつを決定する実験を実施し、精度および入力に要した時間を評価した。その結果、短い圧迫を複数回行う方式より、長い圧迫を一度行う方式の方が入力に要する時間が短く、正確で、ユーザの負担が軽いことがわかった。

1. はじめに

スマートウォッチや活動量計などさまざまなウェアラブルデバイスが開発され、広く一般に普及しつつある。ウェアラブルデバイスは身体に装着するためハンズフリーであり、他の作業に影響を与えずに装着者のデータを取得したり、作業と平行して情報の閲覧などに利用できる。労働者管理や生産性向上につながると考えられており、工場などのビジネスの現場でも活用されている。具体的には、ウェアラブルデバイスで従業者の生体情報を計測することで体調や健康の問題を検知し、重大な事故やミスの発生を事前に防ぐように活用している。倉敷紡績株式会社が開発したSmartfit for work[1]という製品は、下着に搭載されたデバイスで、心拍などを計測し、それら個人の生体情報を解析と自動学習することによって、普段の体調の平常範囲から、当日の体調を3段階で把握することができる。

ウェアラブルデバイスが取得できる生体情報は、加速度、角速度、地磁気、位置などのデバイスの運動に関する情報や、脈波や心拍、体温など装着者の生理的な情報であり、それらは個人や状況によって異なる値となるため、状態推定や本人認証に利用されている。富士通株式会社の製品である、バイタルセンシングバンド[2]は、リストバンド型

の健康管理IoTサービスで、脈拍、加速度、ジャイロ、温湿度等を計測することができ、使用者の転倒・転落の検知などができる。

ウェアラブルデバイスには情報提示装置と入力装置を兼ねたタッチディスプレイを搭載している機種があるが、身体に装着する特性上そのサイズは1.5インチ程度と小さい。そのため、スマートフォンと同様のQWERTキーボードやフリック入力による文字入力、タッチによる選択操作ではタッチする領域が小さく、操作ミスが発生しユーザビリティが低下する。また、自分自身の指がブラインドとなりタッチする領域が見えずに操作が困難となるFat finger問題[13]も小型のディスプレイでは影響が大きい。

ウェアラブルデバイス、特にスマートウォッチ向けのインタラクション手法はこれまでに複数提案されている。たとえば、スマートウォッチの周囲に笛のような空洞が空いた枠を取り付けて、息を吹きかけることで吹きかけた方向などを推定する手法[3]や、内蔵のマイクを用いて指パッチンなどの手の動きを認識する手法[4]が提案されている。しかしながら、これらの手法は音や振動を発生させるため、周囲に迷惑がかかる可能性があり、また環境音によって精度が低下するという問題がある。また、腹囲を用いた秘匿入力手法の研究[5]は音や振動は発生しないが、腹囲を取得するデバイスを追加で身体に装着する必要がある。スマー

¹ 立命館大学大学院情報理工学研究科

² 科学技術振興機構さきがけ

トウォッチやユーザに追加で専用のハードウェアを取り付けるアプローチの場合、製品にそれらのハードウェアが組み込まれたり、追加のハードウェアを装着することが一般的になる社会が来るまで待つ必要がある。

本研究では、多くのスマートウォッチにすでに搭載されている脈波センサ（PPG センサ、光電脈波センサ）を用いて、上腕の圧迫による血流変化をセンシングすることで、スマートウォッチに対して簡易なコマンドを入力するウェアラブルデバイス入力インタフェースを提案する。本研究の優位性として、音や振動などは発生しないため周囲に影響を与えることはなく、また、周囲の影響を受ける媒体を使用しない点が挙げられる。これにより、混雑したバスや電車などの公共機関、会議中など音を発生させることが困難な状況でも周囲に迷惑をかけることなく、周囲の騒音が大きい状況でも影響を受けず、また周囲の人間に操作内容あるいは操作していること自体に気づかれることなく、文字入力や項目選択などの操作を行うことができる。さらに、既に多くのデバイスに搭載されている脈波センサを用いるため、追加のデバイスを必要としない点も提案手法の利点として挙げられる。市販のスマートウォッチにアプリをインストールするだけで提案手法を利用できる。手で上腕を圧迫することで手首に装着したウェアラブルデバイスとのインタラクションを行うが、圧迫は数秒間軽く握る程度でよい痛みは無く、身体的負担は極めて小さい。

以降、2 節では関連研究を紹介する。3 節では提案手法を説明し、4 節では提案手法の評価実験を行い、最後に 5 節で本研究をまとめる。

2. 関連研究

本節では、ウェアラブルデバイスやスマートフォンなどの小型デバイスとのインタラクション手法に関する研究と、脈波を用いた研究を紹介する。

2.1 小型デバイスとのインタラクションの手法

ウェアラブルデバイスやスマートフォンなどの小型デバイスへのインタラクションの手法の研究として、Han ら [4] は、スマートウォッチのマイクで指パッチンや物体を叩いたときに音の方向を取得して、手の位置を認識する手法を提案した。これを用いることで、スマートウォッチの特定のアプリや操作を画面をタッチすることなく実現できる。しかし、指パッチンなどの音を用いた入力手法は、公共の施設などでは周囲に迷惑をかけたり、環境音の影響を受ける可能性がある。また、何かを操作していることが周囲に明らかになるため、秘匿性の問題もある。

Sumitomo ら [5] は、対話中や会議中などの状況でウェアラブルデバイスを操作することは、周囲に迷惑をかけたり、会議に集中していないような悪い印象を与えてしまうため、ユーザの腹囲の動きを入力として使用することで秘

匿性を高めた入力手法を提案している。腹部に取り付けたデバイスによって腹囲の長さや変化速度を取得して、PC やモバイルデバイス、ウェアラブルデバイスとインタラクションを行う。しかし、この入力手法は、操作したいデバイスの他に腹囲を取得するためのデバイスが必要である。また、入力手法として腹囲を用いることは、呼吸を乱すなどの影響があるため、本研究で提案する身体を圧迫する手法より、身体的負担が大きいと考える。

Reyes ら [3] は、スマートウォッチの周囲に長さの異なる複数の空洞が空いた枠を取り付けることで、息を吹きかける動作によって発生する音から、息を吹きかけた場所を推定してデバイス进行操作する手法を提案した。船越ら [6] は、外部に接触電極、内部に非接触電極を組み込んだ指輪型デバイスを用いて身体に交流電流を印加し、その位相を測定することでユーザの指の曲がり方を認識したり、画面などをタッチした際の手を識別する手法を提案をした。

加藤ら [7] は、スマートフォンの側面に測距センサアレイを装着することで、スマートフォンの周辺での手のジェスチャによって端末を操作する手法を提案した。主にゲームなどのエンターテインメントに活用できると考えており、タッチ操作では実現困難な「つかむ」や「投げる」などの直観的な操作で遊ぶことができる。この手法は机上にスマートフォンを置くことを想定しており、複数人でスマートフォンを操作することができる。

Yeo ら [8] は、手首装着型のウェアラブルデバイスにカメラを組み込むことで、指を使ったポーズや手のジェスチャを認識する手法を提案している。手全体の撮影を必要とせず、手の甲の形状、腱、皮膚、骨などの動きから、ジェスチャを認識できる。そのため、指を出した本数で特定のアプリを起動させたり、電話をかける際に指の本数で番号を入力することができる。

Saka ら [9] は、スマートウォッチのバンドの部分に専用タッチ基盤を取り付けることで、スマートウォッチ特有の文字入力の際の Fat Finger 問題を解決する手法を提案している。文字入力方式として、取り付けしたタッチセンサでスライドやタップなどの操作を検出し、それらの操作と 8 つの画面周辺に配置したキーを組み合わせることで、ひらがなを入力することができる。独自の slit という手法を開発した。既存の手法では、この画面周辺に配置したキーをタップや長押しで入力していたが、Saka らはスライドインを用いた入力に変えることで、タップのように正確にキーを入力する必要がなくなり、画面に表示されるキーボードの画面の占有率が 26.4% まで減らすことに成功している。

このように、音声入力以外による小型デバイスとのインタラクション手法はさまざま提案されているが、いずれもウェアラブルデバイスのほかに、専用のハードウェアを取り付ける必要があるため、導入の敷居は高く、また重さ、大きさが増え、タッチ操作以外でユーザビリティが低下

する可能性が考えられる。

2.2 脈波を用いた研究

ウェアラブルデバイスで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などを測定する際に、センサの位置がずれることで計測が正しく行われないことを防ぐため、血圧脈波の特徴量からセンサの位置ずれを推定する研究を行った。血圧脈波の特徴量として、振幅や周期などに関連するものを 15 個設定し、血管直上を基準にセンサを 0.5mm 間隔でずらすことで、血圧脈波を計測し、位置ずれ量との相関関係を調べる実験を行った。その結果から、位置ずれ量の推定とその精度を評価する実験を行い、推定した値と位置ずれ量の誤差を測定した。結果は、誤差は 0.26mm となり、高精度な位置ずれ量推定が可能であることを示した。

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することで緊張状態になり、事故の要因になることから、心拍数が上昇した際にファンで風を当てることで、体を冷やして脈拍数を下げる安全運転支援システムを提案している。脈拍が上昇したときに音やメッセージで警告を行うと、運転中のユーザが混乱する可能性があるため、この研究では身体に風を当てることでユーザの脈拍数を下げている。

Takahashi ら [12] は、圧力センサと光学センサを用いて指先の血管から脈波波形を取得し、睡眠状態を判定する睡眠状態監視システムを提案している。圧力センサでは血管を介して動脈圧の電圧値を測定し、光学センサは皮膚を介して血管を伝播する脈波の変化を光学信号を用いて検出することで、電圧値を測定する。一定の間隔で圧力センサの電圧値が閾値より低く、光学センサの電圧値も閾値より低い時、人体が覚醒していないと判断し、圧力センサの電圧値が閾値より高く、光学センサの電圧値が閾値より低い時、人体が覚醒していないと判断する。

このように、脈波を計測する手法や計測した脈波の情報を生用いたシステムはこれまでに提案されているが、脈波を制御することに着目した研究は筆者らの知る限り存在しない。また、代表的な血圧計測の方法として、オシロメトリック法とコロトコフ法がある。上腕にカフ（腕帯）を巻いて空気を送り込んで血管を圧迫することで血液の流れを止め、その後徐々に圧迫を緩めると血液の圧力が血管を圧迫しているカフの圧力を上回り、血液が心臓の拍動に合わせて断続的に流れ始める。オシロメトリック法はカフを加圧した後に減圧する段階で心臓の拍動に同調した血管壁の振動を反映したカフ圧の変動（圧脈波）を計測することで血圧値を決定する。一般的には、圧脈波が急激に大きくなったときのカフ圧を最高血圧、急激に小さくなったときのカフ圧を最低血圧としている。一方、コロトコフ法はカフを加圧した後に減圧する段階で血液が心臓の拍動に合わ

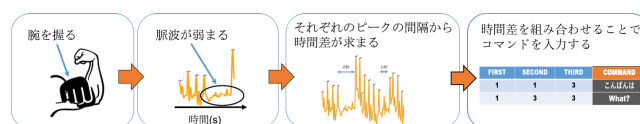


図1 提案する脈波制御によるウェアラブルデバイス用コマンド入力手法の概要

せて断続的に流れ始めたときに発生する血管音をコロトコフ音（K 音）と呼び、聴診器やカフに内蔵したマイクロホンで血管音を検出する。K 音発生開始時のカフ圧を最高血圧、K 音が消えたときのカフ圧を最低血圧とする。現在、電子血圧計はオシロメトリック法のものが主流である。血圧計測時は脈波と止める制御を行っているが、本研究のように動的かつ断続的に脈波を制御するものではない。

3. 提案手法

本節ではスマートウォッチなどの手首装着型デバイスを装着している方の上腕を他方の手で圧迫して脈波を制御することでデバイスにコマンド送信する提案手法について述べる。

3.1 概要

提案手法は手首装着型のウェアラブルデバイスを利用する入力手法である。具体的には、図1に示すように、デバイスを装着している方の上腕を他方の手などで圧迫することによって一時的に脈波を止める制御を行う。手首などに装着しているウェアラブルデバイスに内蔵された脈波センサは脈波を常時計測できるため、脈波が消えた区間を検出できる。脈波を止める時間間隔や回数の組合せによって任意の操作（コマンド）をウェアラブルデバイスに伝えることでウェアラブルデバイスあるいはウェアラブルデバイスに接続されているデバイス（ヘッドマウントディスプレイなど）を操作する。

装着者が脈波を制御する過程には計算機は介入しないため、提案手法は脈拍計測、ピーク検出、圧迫状態検出、コマンド決定の4つの処理から構成される。本研究では、身体を圧迫していない状態を通常状態、身体を圧迫している状態を圧迫状態と定義する。通常状態では脈波に一定間隔のピークが出現するが、圧迫状態ではピークが消失するため、ピークが一定時間（通常状態の脈波のピーク間隔）以上出現しない区間を圧迫状態として検出し脈波消失時間を計算する。そして、本研究で提案する4種類の入力方式に従って脈波消失時間の組合せからコマンドを発火させる。ユーザは事前に入力方式を選択し、その方式に応じた圧迫を行うという想定である。

3.2 脈波制御

提案手法で想定する脈波の制御手段について述べる。提案手法は人間によるウェアラブルデバイスに対するインタ

ラクション手法であるため、脈波を制御する方法としては右手で左上腕を握るような、肉体に対して外部から直接的に力を加える手段を考えている。また、脈波を消す以外の制御も考えられるが、本研究ではもっとも容易な制御である脈波を消す方法を採用する。

3.3 脈拍計測

本研究では、光電脈波方式脈波センサを搭載したウェアラブルデバイスをユーザの手首に装着していると想定する。光電脈波方式とは、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照射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。動脈内のヘモグロビンは近赤外光周辺の周波数の光を吸収する性質があるため、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ことを利用して脈拍を計測する。時刻 t において脈波センサによって取得される脈波計測値を $x(t)$ とする。

3.4 ピーク検出

LEDやフォトダイオードとユーザの皮膚の接触状況が変化すると計測値にノイズが含まれてしまう。誤った脈波のピークを脈拍として検出することを防ぐため、取得した脈波計測値 $x(t)$ に対して次式に従い移動平均フィルタを適用して脈波の波形を滑らかにする。サンプリング周波数は、約746.2Hzとし、移動平均フィルタの長さは50サンプルである。移動平均フィルタ適用後の脈波計測値を $x'(t)$ とする。

$$x'(t) = \frac{1}{50} \sum_{i=t-49}^t x(i) \quad (1)$$

その後、 $x'(t)$ に対してピーク検出を行う。ピークの検出にはPythonのSciPy[14]のパッケージのfind_peaksを使用する。find_peaksではdistanceというパラメータを設定することで、distanceで設定した連続するサンプル数の区間には高々1個のピークしか検出しないようにできる。本研究ではdistanceの値は400とした。検出の条件については、distanceを400としているため、それぞれ連続する400個の要素から単調に増加し続ける脈波の波形が、減少を始めた時に、その点を極大値として、先端を脈波のピークとする。脈波の波形の極大値の凸部が連続して同じ値で平坦となっている場合は、 $x(s)$ が減少を始めるまで $x(s)$ の最大値をキャッシュし続け、減少を始めた時の点をピークとして認識する。

圧迫状態では血流がせき止められるため、脈波が消失し、 $x'(t)$ に大きなピークが出現しなくなる。消失していない脈波のピークのみを検出するために、ピークの高さに閾値を設定して、閾値以下のピークを削除する。閾値は、通常時の $x'(t)$ を平均した値の80%とし、この閾値を下回るピー

ク値は削除する。これにより、例えば心拍数が60bpmのとき、通常時はピークが1秒ごとに出現するが、圧迫状態ではピークが出なくなり、圧迫状態と通常時を判別することができるようになる。このようにして検出されたピークのうち時間が若い方から k 番目のピークを p_k ($k = 1, \dots$)、ピークの発生時刻を t_k とする。

3.5 圧迫状態検出

提案手法はユーザが自身の上腕を圧迫して脈波が消失する時間の長さの組合せによってウェアラブルデバイスにコマンド入力を行うため、ピークの出現間隔から圧迫状態の区間と通常状態の区間を判別し、圧迫状態の区間を脈波消失時間として計測する。

検出されたピークのうち、 k 番目と $k-1$ 番目の2つの連続するピークの時刻 t_k と t_{k-1} からピークの時間差 $d_k = t_k - t_{k-1}$ を計算し、 d_k が閾値 d_{th} 以上の長さである場合は圧迫状態と判定し、閾値 d_{th} 未満の場合は通常状態と判定する。 d_{th} の設定方法について説明する。人間の安静時心拍数は年齢とともに減少するが、正常時は60~70bpm以上であるため、通常状態の脈波のピーク間隔はおおよそ0.85~1秒となる。一方で圧迫状態では脈波のピークが消失するため、少なくともひとつの脈波が消失すればピーク間隔は1秒以上となる。提案手法では、 $d_{th} = 1$ 秒とし、脈波のピーク間隔が1秒以上の区間を圧迫状態として検出する。心拍数が60bpm以下になる場合はほとんどないが、運動などによって心拍数が高くなることは一般的に起こりえて、通常状態のピーク間隔はさらに短くなる。例えば心拍数が120bpmのとき、通常状態の連続する2つのピークの間隔は0.5秒となるが、ユーザが身体を圧迫する時間が1秒であれば、ふたつのピークを消失してピーク間隔が1秒以上となり、正常に動作する。ただし、脈波のピークが圧迫する部位を通過するタイミングによっては圧迫する時間が1秒未満でも脈波が消えて圧迫状態と判定される場合もありうるが、圧迫する時間が短くなる分には大きな問題ではないと考える。また、心拍数が120bpmかつ圧迫する時間がちょうど1秒であれば脈波消失間隔が1秒となり圧迫状態と判定されない場合もありうる。ユーザビリティが低下するが、ユーザには1秒よりもやや長い時間圧迫してもらうことで対応する。

3.6 コマンド決定

本研究では検出された圧迫状態の時間の長さの組合せからウェアラブルデバイスに入力するコマンドを決定する方式として4種類の入力方式を提案する。

3.6.1 方式1：組合せ方式

決められた秒数を握る動作を3回組み合わせることでコマンドを入力する手法である。まず、圧迫状態の時間の長さとしてShort（以下、S）とLong（以下、L）の2種類を

定義する。本稿では、圧迫状態の継続時間が3秒未満である場合はS、3秒以上である場合はLと判定する。この閾値は自由に設定可能であるが、長すぎるとLの入力の時間を要する。ユーザはSとLのどちらかを3回行う組合せからなる事前に決められた8種類のコマンドを送信できる。

圧迫状態の長さの定義について、本稿では2種類としたが3種類以上でも可能であり、その場合は少ない回数の入力で多種のコマンドを送信できるが、圧迫状態の長さを細かに区別して入力する必要があるため、誤入力の割合が増えると考えられる。

3.6.2 方式2：グループ方式

事前に決められた複数種類のコマンドを可能な限り均等に2つ以上のグループに分ける。ユーザは入力したいコマンドが含まれているグループに対応する圧迫状態の長さだけ圧迫することでグループを決定する。この操作を最終的にコマンドが一つに決まるまで繰り返すことで特定のコマンドを入力する。本稿では、圧迫状態の長さとしてSとLの2種類を定義する。圧迫状態の継続時間が3秒未満である場合はS、3秒以上である場合はLと判定する。コマンドの種類は8種類とし、ウェアラブルデバイスの画面に8種類のコマンドが4種類ずつLとSのグループに分けて表示され、ユーザは入力したいコマンドがSとLのどちらに含まれているかを見て圧迫を行う。これによってコマンドが4種類に絞られるため、同様に2種類に絞り、3回目の圧迫で一つのコマンドを決定する。

方式Aと同様に、圧迫状態の長さの定義は3種類以上でも可能であり、その場合は少ない回数の入力で多種のコマンドを送信できるが、誤入力の割合が増える。また、入力するコマンドの頻度に応じてグループ分けを行うことも考えられる。

3.6.3 方式3：手動スクロール方式

事前に決められた複数種類のコマンドが画面に表示されており、圧迫状態の時間の長さによってコマンドを選択するカーソルの遷移と決定を行う手法である。これまでの手法と同様に本稿では、圧迫状態の長さとしてSとLの2種類を定義し、圧迫状態の継続時間が3秒未満である場合はS、3秒以上である場合はLと判定する。圧迫状態がSの場合、コマンドを選択するカーソルがひとつ次のコマンドに遷移し、圧迫状態がLの場合、カーソルがその時点で選択しているコマンドを決定して入力する。

3.6.4 方式4：自動スクロール方式

事前に決められた複数種類のコマンドが画面に表示されており、圧迫状態中はコマンドを選択するカーソルが自動で一定時間間隔で順番に遷移し、圧迫状態が終了した時点でカーソルが選択しているコマンドを決定して入力する方式である。本稿では、圧迫状態の継続時間がユーザのピーク間隔の時間差の平均の1.5倍の時間以上になった時点でカーソルが出現し、以降1秒ごとにカーソルが自動で遷移

するようにした。圧迫を離れた時にカーソルが選択しているコマンドを決定して入力するようにする。

圧迫を離れたときに脈波が流れるが、圧迫状態直後の脈波のピークは本来の心臓から送出されるタイミングではなく、離れたタイミングによって決まる。そのため、圧迫を離れたタイミングとウェアラブルデバイスで検出されるピークのタイミングの遅延は小さいが、カーソルが自動で移動してから次に移動するタイミングの直前に圧迫を離すと、誤って次のコマンドが入力される可能性もある。

4. 評価実験

本節では、提案手法によるコマンド入力の有用性を評価するためにコマンド入力精度と入力に要する時間を計測する実験を行った。

4.1 実験環境

被験者4名(A~D、全員男性、平均年齢22.4歳)の右手人差し指の指先にpulsesensor.com製の脈波センサを装着して、Arduino UNOを経由してノートパソコンで脈波を計測した。圧迫に関しては、被験者が自身の左手で右上腕二頭筋と上腕三頭筋の間を押さえた。サンプリング周波数は約746.2Hzとした。

評価方法は、まず各被験者に対して5分間の説明および練習の時間を設けた。説明では、圧迫するときは目標の秒数よりも少し長く握ってもらうように説明した。練習では、各手法でコマンドを入力してもらい、システムが計測した圧迫状態の秒数を表示することで自身の感覚と実際の入力までの時間の差なども慣れてもらうようにした。

その後、方式1, 2, 3, 4によってコマンドを入力してもらい、「入力を指示したコマンド」、「実際に入力されたコマンド」、「コマンドの入力までにかかった時間」を記録した。4種類の手法の順番は被験者ごとに変え、実験主催者が入力するコマンド(選択肢)をランダムで一つ指示し、被験者が入力した。一つの方式について4回コマンド入力を行い、別の入力方式に移った。各入力方式の間は5分程度の休憩をとった。

4.2 結果

4名の被験者の「コマンドの入力までにかかった時間」、「入力を指示したコマンド」、「実際に入力されたコマンド」および「入力の成功/失敗」を入力方式ごと方式AからDまでそれぞれ表1、表2、表3、表4に示す。被験者一人あたり4行の記載があるが、これは4回の試行の結果を示している。表中の「順番」は、4種類(4回)のうち当該手法を何番目に実験したかを示す。「時間」は、被験者の圧迫状態の時間(秒)を示す。方式ごとに回数が異なるが、これは方式1および方式2では8種類のコマンドから3回の圧迫によって1つのコマンドを選択したため、3回圧迫し

表 1 方式 1 (組合せ方式) によるコマンド入力の結果

被験者	順番	時間 [秒]			コマンド		結果
		1 回目	2 回目	3 回目	入力	指示	
A	2	4.73	2.05	1.16	when	Thank you	失敗
		5.26	2.17	2.81	who	when	失敗
		1.84	3.78	5.97	what	what	成功
		4.61	1.51	1.65	when	when	成功
B	3	2.02	3.22	4.10	what	what	成功
		3.61	1.54	1.43	when	when	成功
		2.60	2.04	3.33	こんばんは	こんばんは	成功
		4.82	5.24	5.17	why	why	成功
C	2	1.62	1.45	2.55	who	ok!	成功
		1.36	1.22	1.56	ok!	ok!	成功
		4.19	4.06	1.64	Thank you	Thank you	成功
		1.19	5.16	1.31	no	no	成功
D	2	3.83	3.47	2.17	Thank you	Thank you	成功
		1.82	2.14	3.99	こんばんは	こんばんは	成功
		1.00	2.20	1.15	ok!	ok!	成功
		3.13	3.10	4.04	why	why	成功

表 2 方式 2 (グループ方式) によるコマンド入力の結果

被験者	順番	時間 [秒]			コマンド		結果
		1 回目	2 回目	3 回目	入力	指示	
A	3	1.18	1.96	2.41	no	ok	失敗
		1.56	5.60	1.50	こんばんは	こんばんは	成功
		4.48	1.61	2.23	when	when	成功
		1.58	1.46	2.00	ok!	ok!	成功
B	4	2.58	1.48	3.92	no	no	成功
		3.72	3.42	5.33	why	why	成功
		1.21	3.93	2.02	こんばんは	こんばんは	成功
		3.31	2.15	1.47	when	when	成功
C	3	2.07	3.75	2.92	what	こんばんは	失敗
		4.14	1.40	1.08	when	when	成功
		1.24	1.45	4.43	NO	NO	成功
		3.75	1.43	5.48	who	who	成功
D	1	4.20	1.31	4.29	who	who	成功
		3.21	4.66	1.04	Thank you	Thank you	成功
		1.15	1.59	1.27	ok!	ok!	成功
		3.79	2.81	6.46	who	why	失敗

ており、それぞれの圧迫時間を示している。同様に方式 3 は指示されたコマンドが何番目に表示されているかによって圧迫した回数が異なる。方式 4 は 1 回の圧迫の長さで目的のコマンドを選択するためすべての試行で圧迫回数は 1 回である。「コマンド」は、実際に入力されたコマンドと指示されたコマンドを示す。「結果」は、入力と指示が同じであれば成功、異なれば失敗と表記している。これらの結果より、各手法の優位性などを次節で考察する。

4.3 考察

4.3.1 成功率と入力に要した時間

各方式の入力成功率は、方式 1 が 87.5%、方式 2 が 81.25%、方式 3 が 93.75%、方式 4 が 93.75% となった。平均のコマ

表 3 方式 3 (手動スクロール方式) によるコマンド入力の結果

被験者	順番	時間 [秒]				コマンド		結果
		1 回目	2 回目	3 回目	4 回目	入力	指示	
A	1	1.28	1.76	1.30		what	what	成功
		3.00				what	why	失敗
		2.00	2.10	1.24	5.51	Thank you	Thank you	成功
		5.63				ok!	ok!	成功
B	2	6.56				ok!	ok!	成功
		1.11	3.98			why	why	成功
		2.08	2.13	2.28	4.36	Thank you	Thank you	成功
		1.83	1.52	4.84		what	what	成功
C	1	1.44	1.55	1.48	3.48	Thank you	Thank you	成功
		1.44	3.89			why	why	成功
		4.79				ok!	ok!	成功
		1.21	1.39	3.16		what	what	成功
D	3	2.66	1.34	1.41	3.73	Thank you	Thank you	成功
		5.45				ok!	ok!	成功
		1.81	1.71	6.53		what	what	成功
		1.17	5.47			why	why	成功

表 4 方式 3 (自動スクロール方式) によるコマンド入力の結果

被験者	順番	時間 [秒]	コマンド		結果
		1 回目	入力	指示	
A	4	5.68	why	why	成功
		6.19	yes	yes	成功
		3.95	no	no	成功
		4.84	what	what	成功
B	1	6.84	no	no	成功
		6.82	yes	why	失敗
		4.25	what	what	成功
		6.32	yes	yes	成功
C	4	5.21	why	why	成功
		4.21	what	what	成功
		6.20	yes	yes	成功
		3.68	no	no	成功
D	4	4.68	what	what	成功
		5.14	why	why	成功
		6.93	yes	yes	成功
		3.09	no	no	成功

ンド入力時間に関しては、方式 1 が 8.5 秒、方式 2 が 8.1 秒、方式 3 が 6.85 秒、方式 4 が 5.25 秒となった。今回の実験で失敗したときの原因としては、握力の低下によって圧迫が不十分になったことや、握り方や握る位置が正しくなかったことが挙げられる。方式 1 に関しては、コマンドを決定するための入力が複雑だったため、被験者が正しく圧迫が行えていても、間違っって他のコマンドを選択してしまうことがあった。

4.3.2 圧迫状態終了時に発生する脈波計測値の増大

圧迫状態から腕を離して通常状態になったときの脈波計測値 $x'(t)$ の波形を図 2 に示す。図から、圧迫状態から腕を離したときに、直後に現れるピークの高さが圧迫状態前の通常状態のピークの高さと比較して増大していることが

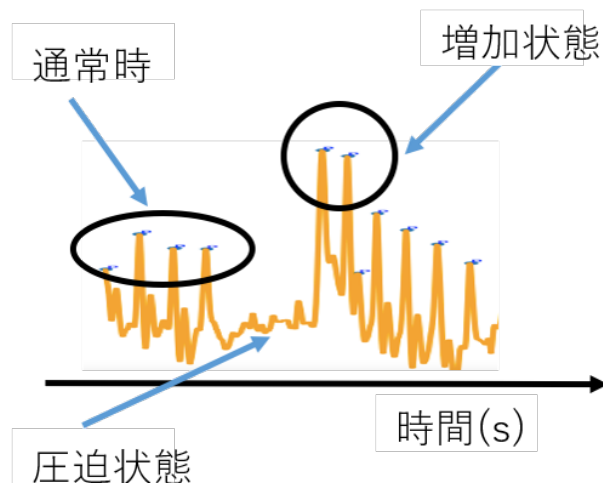


図 2 圧迫状態から腕を開放したときに増大する脈波計測値の例

わかる。増大したピークはその後減衰して通常状態のピークの高さに戻る。このように、ユーザが身体の圧迫を開放し、圧迫状態から通常状態に戻ったとき、脈波計測値が増大する特徴があることが分かった。これは、腕の圧迫によって溜まっていた血液が、圧迫を開放して急激に流れ出すことで、通常状態よりも多くの血流が流れたためであると考えられる。

圧迫状態の直後に脈波計測値が増大する状態のことを本研究では増加状態と呼ぶ。増加状態において再び腕を圧迫すると、正しく圧迫状態と認識されないことがある。これは、増加状態において腕を圧迫すると増加した血流を止めることができず、脈波計測値に閾値を上回るピークが出現してしまい通常状態として判定されたと推察する。

増加状態においても正しく圧迫状態を検出するには、増加状態に合わせて動的に変化するピークを検出の閾値を採用することが考えられる。増大した脈波計測値に合わせて、脈波のピークが通常状態と同程度の高さに戻るまでの間は閾値を大きく設定することで、圧迫状態を認識できている。このアルゴリズムによって、圧迫状態から次の圧迫状態までの間隔を短くすることができ、素早くコマンドを入力できるようになり、コマンド送信速度が向上し、提案手法はより実用的になると考えている。

4.3.3 圧迫状態後に起こる圧迫状態の誤認識

圧迫状態後の増加状態において、圧迫をしていないにもかかわらず圧迫状態と誤認識されることがあった。これは、増加状態の血流が急激に増加、減少することで脈波の波形が通常状態のように一定の波形を繰り返さず、凹凸の激しい波形になってしまうためである。具体的には、増加状態から通常状態に戻る直前に、脈波計測値が大きく減少する現象が見られた。これは、増加状態から落ち着くときに、増大の反動で小さくなりすぎることがあり、それによってピークが検出されずに圧迫状態と認識されてしまう

と考えている。今回の実験では圧迫から解放してから約 4 秒間は、圧迫状態の判定を行わない制御を行っており、誤認識が出ないようにした。

4.3.4 提案手法の優位性

実験結果より、入力方式ごとに精度や入力に要する時間差があり、特に複数回の圧迫を必要とする方式は精度が他の手法と比較して低いことが分かった。これは握り方によっては血流量が十分に低くならず、複数回圧迫することでその可能性が高まり、間違ったコマンドが入力されてしまうためだと考えられる。実験中も、1 回目の入力では失敗しないが、2 回目、3 回目の入力時に、圧迫が上手く行えてないことがあった。逆に、一度の入力でコマンドを決定する方式 4 は、後半に行った被験者が多かったが、精度は高かった。実験後に被験者に感想を聞いたところ、良い感触をもっていることが多かった。複数回の入力を必要とする方式 1, 2 は「手が疲れてしまう」、「十分に圧迫できる握る位置を何回も探すのが難しい」という感想を得た。そして、前述の「圧迫状態後に起こる圧迫状態の誤認識」から、増加状態から通常状態に戻るまでに 4 秒間検出を停止する制御を行うことを考えると、短い圧迫時間の入力を複数回行う手法より、握る時間が長くても、一度で入力できる手法の方が利用者にとっては良いと考えられる。

4.3.5 入力の慣れによる精度の向上

被験者 A, B の成功率が回数を重ねるごとに向上していることから、圧迫による入力に慣れることでコマンドの成功率も向上していくことが分かった。これは、被験者が血流を圧迫する入力方法に慣れたことによって、被験者がそれぞれ軽い力で十分に圧迫できる握り方や、位置を見つけ、握力が低下しにくくなったことが考えられる。一方、被験者に実験後の感想を聞いたところ、圧迫を繰り返すことで左手が非常に疲れたという意見が多かった。各被験者が 1 回目や 2 回目に行った手法では、強い力で腕の外側を圧迫していることが多く、それによって左手が疲れて握力が低下してしまう現象が多く見られた。しかし、回数を重ねた後半の実験は、握力が低下しているにも関わらず、圧迫の時間が多くなっていることが分かる。これは、後半になるにつれて、血流を止めやすい位置や握り方をそれぞれの被験者が見つけ、軽い力でも十分な圧迫ができるようになったため、握る時間をより伸ばすことができるようになったと考えられる。そのため、一度の入力でコマンドを決定する手法 D の結果からは分かりづらいが、複数回の入力を必要とする方式 1, 2, 3 では、それぞれの握る時間が多くなっており、握る位置などに慣れてきたことが分かる。そして各被験者は、後半では入力に慣れ、腕の外側から内側を握るようになっていったため、腕の内側を握ることでより効果的に血流を圧迫できることを発見したと考えられる。

5. おわりに

本研究では、脈波センサを用いて身体の圧迫による血流変化をセンシングすることで、簡易なコマンドを実行するウェアラブルデバイスとのインタラクション手法を提案した。提案手法は、脈拍計測、ピーク検出、圧迫状態検出、コマンド決定の4つの処理から構成される。手首や指先に装着したウェアラブルデバイスで脈波を計測し、取得したデータからピークを検出する。検出されたピークの時間差を計算することで上腕を圧迫した時間を取得し、圧迫した時間の組合せで簡易的なメッセージを送信できるようにした。その入力方式として4種類の方式を提案した。4名の被験者から、各方式において指示されたコマンドを入力してもらい、入力精度および入力に要した時間を得た。その結果から、複数回の入力を必要とする手法より、長時間かかるが一度の入力でコマンドを決定する手法の方が利用者は入力しやすいことが分かった。また、腕を圧迫してから離れた直後は、溜まった血流が急激に流れ出すため、脈波計測値が急激に増大することが分かった。この増加した状態から通常時に戻るまでには、約4秒かかることが分かった。

今後は、脈波計測値の急激な増大に合わせて、ピーク検出の閾値を動的に変化させるアルゴリズムを実装して、圧迫状態の検出精度を改善する。デバイスへのインタラクションの応用として、簡易的なメッセージの送信だけでなく、再生中の音楽の一時停止や次の曲への移行、本をページへめくる、などの操作を行うアプリケーションを構築する。

謝辞 本研究は、科学技術振興機構戦略的創造研究推進事業さきがけ(JPMJPR1937)の支援を受けたものである。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- [1] 倉敷紡績株式会社 Smartfit for work, <https://www.smartfit.jp>.
- [2] 富士通株式会社 バイタルセンシングバンド, <https://www.fujitsu.com/jp/solutions/industry/manufacturing/monozukuri-total-support/solutions/svuw-aa/spec/fuwv.html>.
- [3] G. Reyes, D. Zhang, S. Ghosh, P. Shah, J. Wu, A. Parnami, B. Bercik, T. Starner, G.D. Abowd, W.K. Edwards, "Whoosh: Non-voice Acoustics for Low-cost, Hands-free, and Rapid Input on Smartwatches," In Proc. of the 20th International Symposium on Wearable Computers (ISWC2016), pp. 120–127, 2016.
- [4] T. Han, K. Hasan, K. Nakamura, R. Gomez, P. Irani, "SoundCraft: Enabling Spatial Interactions on Smartwatches using Hand Generated Acoustics," In Proc. of the 30th ACM Symposium on User Interface Software and Technology (UIST2017), pp. 579–591, 2017.
- [5] H. Sumitomo, T. Katayama, T. Terada, M. Tsukamoto, "Implementation and Evaluation on a Concealed Interface using Abdominal Circumference," In Proc. of the 5th Augmented Human International Conference (AH2014), pp. 1–8, 2014.
- [6] 船越南斗, 池川航史, 志築文太郎, 高橋 伸, "位相に基づく指輪型入力デバイスの検討," 情報処理学会研究報告ヒューマンコンピュータインタラクション, Vol. 2019-HCI-182, No. 34, pp. 1–6, 2019.
- [7] 加藤花歩, 松村耕平, 杉浦裕太, "スマートフォンの周辺におけるジェスチャ入力手法," エンタテインメントコンピューティングシンポジウム 2019 論文集, pp. 87–92, 2019.
- [8] H.S. Yeo, E. Wu, J. Lee, A. Quigley, H. Koike, "Opis-thenar: Hand Poses and Finger Tapping Recognition by Observing Back of Hand Using Embedded Wrist Camera," In Proc. of the 32nd ACM Symposium on User Interface Software and Technology (USIT2019), pp. 963–971, 2019.
- [9] T. Tanaka, K. Saka, K. Akita, Y. Sagawa, "Micro Touch Board Specially Designed for SliT that Is the Japanese Character Input Method for Smartwatches," In Proc. of 21th International Conference on HCI International (HCII2019), pp. 49–61, 2019.
- [10] 端 智士, 土肥徹次, 堀 正峻, "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, p. S35-2, 2019.
- [11] 堤野理貴, 伊藤淳子, 宗森 純, "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," 情報処理学会関西支部支部大会 2019 講演論文集, 2019.
- [12] S. Takahashi, S. Chiba, A. Yagi, "Sleep State Monitoring System based on Pulse Wave Measurement," U.S. Patent Application No. 15/508, 304, 2017.
- [13] K.A. Siek, Y. Rogers, K.H. Connolly, "Fat Finger Worries: How Older and Younger Users Physically Interact with PDAs" In Proc. of the Tenth International Conference on Human-Computer Interaction (INTERACT'05), pp. 267–280, 2005.
- [14] SciPy.org, <https://www.scipy.org/>.