

# 自律型生体データ収集における 腕装着型センサの信頼性推定法の検討

林 正幸<sup>1</sup> 吉川 寛樹<sup>1</sup> 内山 彰<sup>1</sup> 東野 輝夫<sup>1</sup>

## 概要：

近年、ウェアラブルセンサの発展により、様々な生体データを手軽に収集することが可能となった。多種多様な環境において生体データ収集を行う場合には、センサの装着性やユーザーの意思により、特定の端末が利用できない場合もあり、異種端末の混在が避けられない。端末が異なる場合には測定原理や装着部位の違いによって精度の差があるため、測定値をそのまま比較できるとは限らない。また、デバイスの装着が適切に行われないと、測定値の安定性や精度の低下につながる。このため、生体データ収集にあたっては測定値だけでなくその信頼性もあわせて取得できることが望ましい。本研究では腕装着型センサに焦点を当て、バンドの締め具合が生体データの測定に重要であることに着目し、腕装着型センサに搭載した慣性センサを利用したバンドの締め具合推定手法を設計した。バンドの締め具合を変化させてジョギングにおける性能評価を行ったところ、3段階のバンドの締め具合を平均正解率51.1%で推定できることが分かった。

## 1. はじめに

近年、ウェアラブルセンサの発展により種々の生体データを手軽に収集することが可能になった。例えば、腕装着型センサの empatica E4 では、心拍数、発汗レベル（皮膚電気反射）、体表温が取得できる。また、イヤホン型端末の cosinuss<sup>o</sup> One では、心拍数、鼓膜温（深部体温）を収集し、スマートフォンに記録可能である。このような生体データは、ヘルスケアやスポーツなど、様々な場面での活用が期待されている [1]。我々は、図1に示すような生体データ収集基盤を構築し、上記のような生体データをスポーツジムや大学などの多種多様な環境において大量に収集することで、ウェアラブルセンサを用いた深部体温推定法 [2] の改良や、熱中症の予兆検知、ストレスレベルの推定といった目的で利用することを検討している。

異なる環境においては、状況に応じて生体データを収集するために様々な端末を用いる必要がある。例えば、ジョギングの場合は腕装着端末を装着しても動作の妨げにならないが、テニスの場合はラケットのスイング動作に違和感を感じるため、リストバンド型端末の利用ができない場合がある。このような場合には、胸部など動作の妨げにならない部位に装着する端末を利用する必要がある。また、同一環境であったとしてもユーザーの意思によって利用できる端末とそうでない端末が存在する。従って、多種多様な環

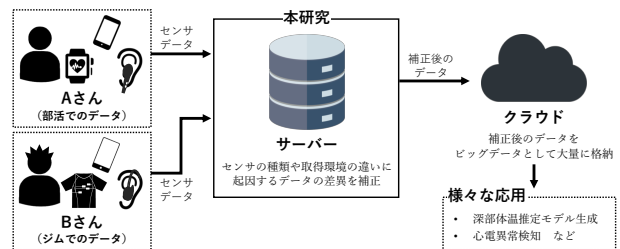


図1 生体データ収集基盤の概要

境において生体データ収集を行う場合には、異種端末の混在が避けられない。2章で示すように各センサごとに測定に適した条件があり、測定精度にばらつきがあるため、異種端末が混在する場合、それらの測定値を可能な限り適切に補正したり、除去することが求められる。また、ユーザーが正しい知識を有していない等の様々な理由により、デバイスの装着が適切に行われなかった場合があり、これらの原因による測定値の精度や安定性の低下は避けられない。

従って、様々な環境において大規模に生体データ収集を行う場合には、測定値のみならずその信頼性もあわせて取得できることが望ましい。測定値の信頼性が得られれば、必要に応じてデータを補正したり、除外するといった処理が可能となり、ビッグデータ解析におけるクレンジング処理に有効と考えられる。センサの測定値の信頼性推定の設計にあたっては、そのセンサの測定誤差や適切な測定条件といった、センサの特性を把握することが重要である。

これまでに、生体データを利用した様々な研究が成され

<sup>1</sup> 大阪大学 大学院情報科学研究科

ており、心拍の変動時系列データ (RRI: R-R Interval) の異常値除去に関する研究 [3], [4], 心電図 (ECG: Electrocardiogram) 波形の一致度から RRI を算出する手法 [5] や光電波形計の原理を用いた体動フィルタリング手法 [6] など、生体データの精度を高める手法が数多く提案されている。しかし、異種端末が混在する場合に生じる課題・不適當なデバイスの装着状態の検知・生体データ測定値の信頼性に関する研究は我々が知る限り存在しない。

様々な生体センサが存在するが、本研究では被験者の負担が軽く、比較的装着が容易な腕装着型センサに着目し、取得した生体データの信頼性に関わる要因の調査を行った。その結果、腕装着型センサの信頼性は行動・運動の種類やバンドの締め具合に大きく依存していることが分かった。そこで腕装着型センサに搭載した慣性センサに基づき、腕装着型センサの細かい動きを検知できる特徴量を抽出し、それらを用いた単回帰分析で算出した閾値に基づき、バンドの締め具合を推定する手法を考案した。腕装着型センサの細かい動きは、バンドの締め具合だけではなく、腕の動きの大きさにも影響を受ける。このため、腕の動きの大きさに依存しない固定の閾値では正しくバンドの締め具合を推定できない。この問題を解決するため本研究では腕装着型センサの慣性センサにより、おおよその腕の動きの大きさを推定し、それに応じて変動する閾値を設けることで、バンドの締め具合推定を実現する。

提案手法の性能を評価するため、被験者 1 名を対象に異なるバンドの締め具合でジョギング時のデータを収集した。評価結果より、全データに基づき定めた最適な閾値 (ベースライン) と提案手法の正解率の差は Loose で 7.78 ポイント、Medium で 19.72 ポイントであり、Tight では 8.33 ポイント上回った。結果の詳細は 5 章で詳述する。

## 2. 腕装着型センサの特性把握

我々は、スポーツジムや部活動といった様々な環境において、ウェアラブルセンサを用いて生体データを収集し、データベースに蓄積することを検討している。実環境のデータ収集においては、運動種や個人の趣向・ニーズから生じるセンサの着用部位の違いから使用可能なセンサは異なる。また、ユーザがセンサ装着に関する正しい知識を有していないために、正確ではない装着の仕方でも誤った測定を行う可能性がある。そこで我々は生体データの中でも利用頻度が高く、計測部位による違いや体動の影響が大きい心拍数に着目する。特に本研究では、装着が容易で利用頻度の高い腕装着型センサの測定値の信頼性を算出することに焦点を当て、実験によりセンサ特性の調査を行った。

### 2.1 特性把握実験の概要

特性把握実験では、Polar 社の腕装着型心拍センサ Vantage V (図 2) を用いることとした。Vantage V は腕時計



図 2 腕装着型センサ Vantage V

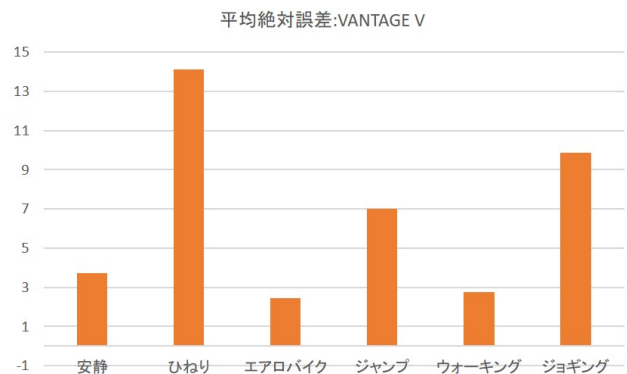


図 3 Vantage V の平均絶対誤差

型光学式心拍センサであり、手首に LED を照射し、血流で反射する光の量を測定することで血流の周期を測定し、その周期から心拍数を導出している。Vantage V は多くの腕時計型心拍センサと同様に LED の光を用いた測定原理であるが、複数の LED を搭載しているため、測定の失敗や誤差の増加につながりやすい運動時の動きに対して比較的耐性が高い。

腕は運動中に頻繁に動かす部位であり、腕装着型センサは体動の影響を受けやすいと考えられる。これを踏まえ、運動種別ごとにセンサの体動に対する耐性調査を行った。最も心拍数の真値に近い値を測定可能と考えられるホルター心電計を併用して、心拍を測定しながら運動の基本となる動作を行う。本実験では安静、ひねり、ジャンプ、ウォーキング、ジョギング、エアロバイクを加えた 6 種類の動作を 3 分ずつ (ジャンプは測定者の負担を考慮して 1 分半) 行った。被験者は 20 代男性 2 名であり、そのうちの 1 人が 2 回、もう 1 人が 1 回の測定を行い合計 3 回分のサンプルを得た。

### 2.2 実験結果

実験結果を図 3 に示す。Vantage V は腕を大きく振る動作が含まれているような動作 (ジョギング・ひねり) では平均絶対誤差が大きくなっており、腕の振動に対する耐性が低いことが分かった。特にひねりで最も大きい平均絶対誤差を示した。ジョギングやひねりの動作において Vantage V で正確に測定できない要因として以下の二点が考えられる。まず、腕の動きやバンドの締め具合により、センサ本

体が手首に対して細かく動き、手首から頻繁に離れて、物理的に血流を測定できない状態にあることが挙げられる。二点目はセンサと手首は接しており血流の測定はできているが、ひねりの動作などで腕を激しく振り回したときに発生する遠心力などの影響で血流に乱れが生じることが考えられる。これによって、血流周期が正しく心拍を表していない状態となり、心拍数の測定値に誤差が生じる。

以上の調査に基づき、本研究ではバンドの締め具合を推定することで、測定値の信頼性推定を試みる。なお、血流の乱れを推定することは容易でないが、腕装着型センサの加速度や角速度を利用した行動認識によって、血流の乱れが生じやすい行動を認識できれば、バンドの締め具合推定と同様に測定値の信頼性推定に有益な情報が得られると考えている。続く3章では、腕装着型センサの加速度および角速度を利用して、センサ本体の動きと測定値の信頼性の関係を調査する。

### 3. バンドの締め具合と測定値の信頼性調査

#### 3.1 実験概要

実環境でのデータ収集においては、できるだけバンドを正しく締めるよう被験者に伝えはするものの、最終的にはバンドの締め具合は被験者の裁量に任される場合がほとんどであり、正しく装着されない恐れがある。そこで我々はバンドの締め具合と心拍測定値信頼性の関係、ならびにバンドの締め具合が慣性センサの測定値にどのような影響を与えるかを調査した。

まず最初に Vantage V のバンドの締め具合を最もきつい状態にしてジョギングを2分間行う。次に Vantage V のバンドを1段階緩めてまたジョギングを2分間行う。これを繰り返し、5段階の締め具合でジョギングを2分間ずつ行った。締め具合の定義は、手首の尺骨茎状突起回りの長さに対して決定した。具体的には、手首の尺骨茎状突起回りの長さに対してバンドの長さが+1.0cmとなる場合を Very Tight, +1.5cmを Tight, +2.0cmを Medium, +2.5cmを Loose, +3.0cmを Very Loose とした。以上のデータ収集を被験者1名を対象として2セット行った。

なお、Vantage V では加速度や角速度の生データを取得できないため、図4のように慣性センサ TSND151 を Vantage V に接着した。TSND151 はサンプリング周波数1000Hzで加速度ならびに角速度を測定できる。この2つのセンサに加え、ホルター心電計により心拍数の真値を測定した。

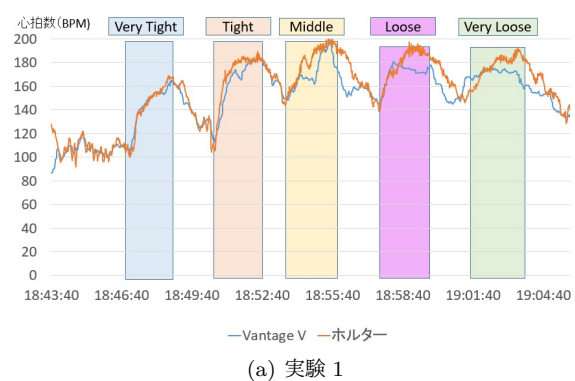
#### 3.2 実験結果

##### 3.2.1 バンドの締め具合と心拍測定値

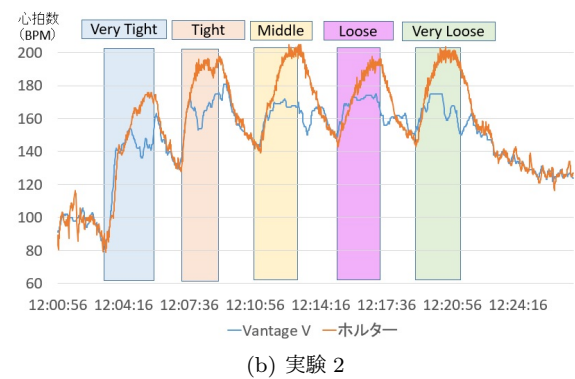
Vantage V とホルター心電計の計測値のグラフを図5に示す。1回目の実験(図5(a))では Very Tight や Tight で Vantage V の計測値はホルター心電計に近い値を示してい



図4 慣性センサ TSND151 を装着した様子



(a) 実験1



(b) 実験2

図5 バンドの締め具合と心拍測定値

る。Medium は Tight や Very Tight ほどでは無いものの、ピーク値は一致しており、比較的近い値を示している。一方、Loose, Very Loose ではホルター心電計とは大きく異なる計測値を示していることが分かる。

しかし、2回目の実験(図5(b))では Very Tight や Tight, Medium でもホルター心電計に近い値とはなっていない。Loose, Very Loose では実験と同様、ホルター心電計とは異なる計測値を示した。1回目の実験とは異なり締め具合がきつい場合でも誤差が大きくなった原因として、そもそもの腕の動きの大きさが影響している可能性が挙げられる。前述のように腕の動きが大きいと血流に乱れが生じ、腕装着型センサを正しく装着していても正しく心拍測定値

が得られなくなってしまう。

以上の実験結果から、腕の動きの大きさなどのバンド装着の正しさ以外の要因によっても心拍測定値の信頼性は変化するものの、バンドの締め具合が Loose や Very Loose の状態では測定値の信頼性は低いと考えられる。一方、Tight や Very Tight の状態では少なくとも Loose や Very Loose の状態の信頼性よりは高いと考えられる。

### 3.2.2 バンドの締め具合と腕装着型センサの動き

3.2.1 節の結果より、バンドの締め具合を推定できれば、測定した生体データの信頼性を測る指標として有用と考えられる。そこで、前 3.2.1 節の実験で取得した腕装着型センサの 3 軸加速度および 3 軸角速度とバンドの締め具合の関係性を調査した。

図 6 は実験 1 の Very Tight と Very Loose の加速度および角速度の分散を表している。グラフでは、各成分に対してハイパスフィルタを適用後、500ms ごとに分散を算出した。この結果から y 軸角速度において特に Very Tight と Very Loose の差が大きいことが分かる。この理由はバンドの締め具合が緩ければ緩いほど手首周りに沿ってセンサ本体が回転しやすくなるためである。より詳細にバンドの締め具合と y 軸角速度の関係を調べるため、各バンドの締め具合について、異なるウィンドウ幅に対して求めた分散の中央値を図 7 に示す。

この結果より、ウィンドウ幅約 500ms 以降において、分散の中央値は一定の値に収束していることが分かる。また、締め具合が緩ければ緩いほど分散が大きくなっていることから、締め具合は y 軸角速度に影響を及ぼすことが確認できる。実験 1 の方が全体的に収束する値が小さくなっているが、これは実験ごとに腕の振りの大きさが異なることに起因するものと考えられる。実際にそれぞれの試行での加速度の大きさの平均を算出すると、実験 1 では  $19.51[m/s^2]$ 、実験 2 では  $21.7[m/s^2]$  となっており、実験 2 の加速度が大きいことが分かる。腕の動きの大きさは加速度に反映されており、y 軸角速度にも影響を与えるため、4 章ではこの影響を考慮に入れてバンドの締め具合推定法を設計する。

## 4. バンドの締め具合推定法

Very Tight, Very Loose は極端な締め具合であり、実際の環境では起こりにくいと考えられるため、推定対象クラスは {Tight, Medium, Loose} の 3 クラスとした。提案手法では、得られた y 軸角速度に対して、Loose と {Medium, Tight} を分ける閾値  $T_L$  と Medium, Tight を分ける閾値  $T_M$  をそれぞれ定めることで、バンドの締め具合を推定する。事前実験によりバンドのぶれは腕の動きの大きさ、およびバンドの締め具合によって変化することが分かっている。このため、バンドの締め具合推定に用いる閾値は、腕の動きの大きさに応じて変化するように定める。

表 1 バンド締め具合推定の正解率

手法	Loose	Med	Tight
提案手法	75.00%	8.61%	69.72%
固定閾値	77.22%	13.33%	55.00%
ベースライン	82.78%	28.33%	61.39%

閾値の決定には事前に収集した学習データを用いる。以下では閾値  $T_L$  の定め方を例に説明するが、 $T_M$  の場合も同様である。各学習データ  $i$  について、腕の動きの大きさは同じと仮定し、3 軸加速度の大きさ  $|\vec{a}_i|$  を算出する。さらにウィンドウ幅  $W$  に対して y 軸角速度の分散を算出し、最もクラス分類の正解率が高くなるような閾値  $T_L^i$  を求める。このようにして得られた  $(|\vec{a}_i|, T_L^i)$  の全組に対して、腕の動きの大きさと閾値の間には線形関係があると仮定し、線形回帰によって回帰直線を得る。バンドの締め具合推定を行う際には、回帰直線に加速度  $|\vec{a}_j|$  を与えることで、対応する閾値  $T_L^j$  を得る。

得られた閾値  $T_L^j, T_M^j$  に対して、以下の式に従ってバンドの締め具合を推定する。

$$\begin{cases} \text{Loose} & (\sigma^2(j)_y > T_L^j) \\ \text{Medium} & (T_L^j \geq \sigma^2(j)_y > T_M^j) \\ \text{Tight} & (T_M^j \geq \sigma^2(j)_y) \end{cases}$$

ここで、 $\sigma^2(j)_y$  はサンプル  $j$  に対する y 軸角速度の分散である。

## 5. 性能評価

### 5.1 評価環境

性能評価のため被験者 1 名がジョギングを行い、データを収集した。実験では、締め具合を Loose, Medium, Tight の 3 段階に変化させ、各締め具合において 2 分間ずつジョギングを行った。このデータ収集を異なる日時において 3 セット行った。なお、腕振りの大きさは特に指示していないが、同一のセットではほぼ同等の大きさと見なした。収集したデータに対し、1 個抜き交差検証を行うことで、クラス分類の正解率を評価する。評価では、全てのデータセットに対して 3 種類の締め具合の正解率の平均が最も良くなるように固定の閾値を定めた場合（ベースライン）と、交差検証時の各学習データに対して固定の閾値を定めた場合（固定閾値）の 2 種類との比較を行った。バンド締め具合推定におけるウィンドウ幅  $W$  は 1 秒とした。

### 5.2 評価結果

評価結果を表 1 に示す。提案手法による Loose の分類正解率は 75.00% となり、ベースラインとの差は 7.78 ポイントと小さかった。一方で Medium の分類正解率は 8.61% と非常に低くベースラインよりも 19.72 ポイント低い。また、Tight の分類正解率は 69.72% となり、ベースラインを 8.33

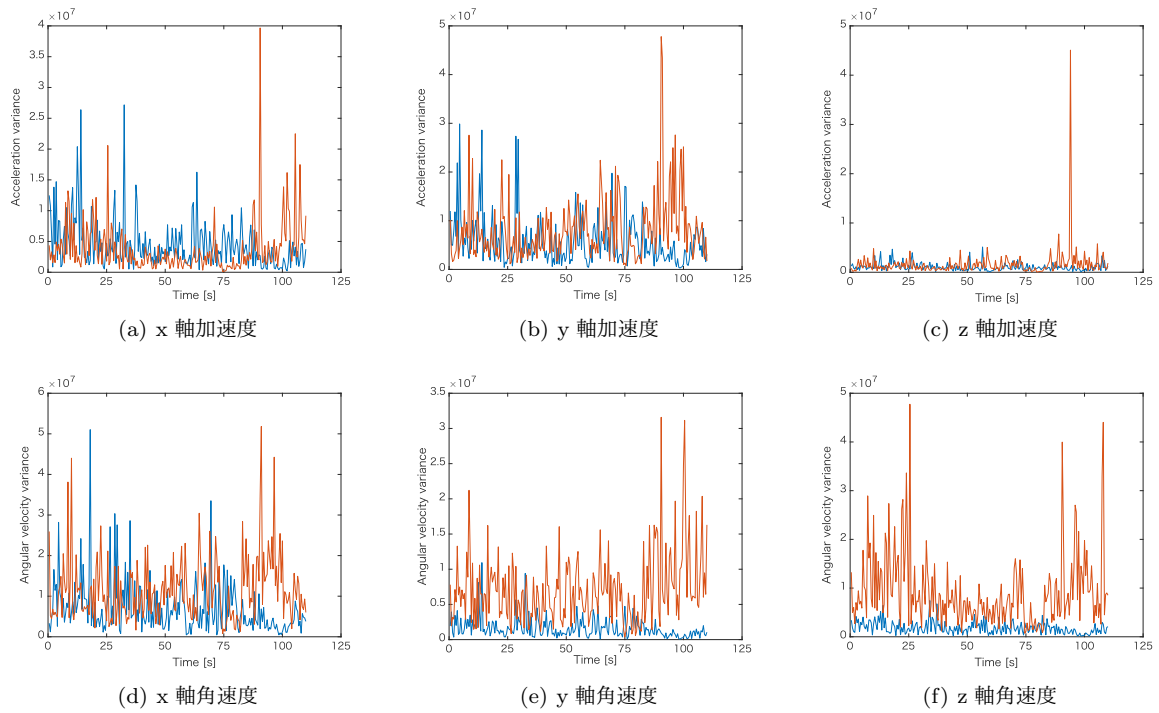
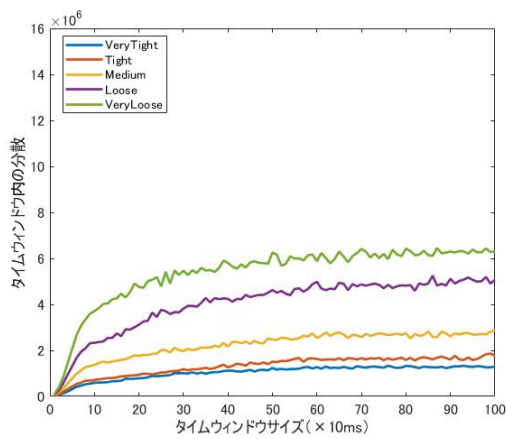
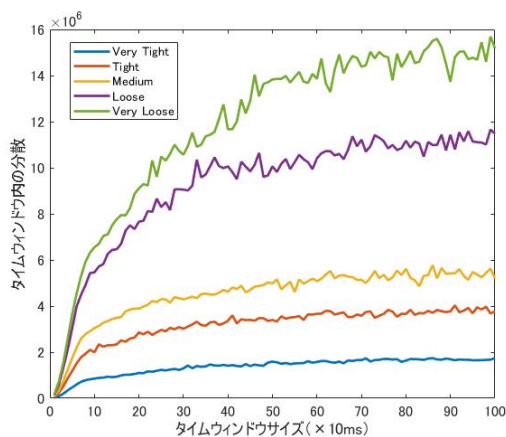


図 6 加速度および角速度成分の分散 (実験 1)



(a) 実験 1



(b) 実験 2

図 7 ウィンドウ幅に対する y 軸角速度の分散中央値

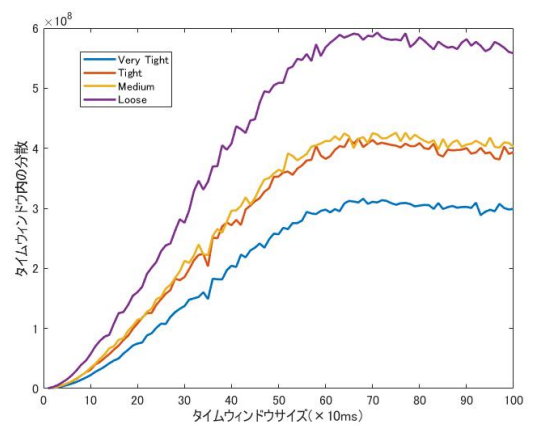


図 8 ある試行の y 軸角速度の分散中央値

ポイント上回った。この理由として、Loose の場合には腕の動きに伴う腕装着型センサの動きが顕著に表れるが、図 8 に示す試行のように腕装着型センサの Medium, Tight 間で動きに大きな差が無い場合があるため、分類がより困難であったことが考えられる。このような測定結果になったのは、Medium でジョギング中に手首の骨などにセンサ本体がひっかかって固定され、想定するセンサ動きの大きさにならず、その結果 Tight と同程度の動きになるからではないかと考えられる。また、Tight で提案手法がベースラインを上回った理由は、ベースラインは 3 種類の締め具合の正解率の平均が最も高い場合の閾値であり、必ずしも個々の締め具合に対して最良の正解率を示さないからである。

また、Loose, Medium の分類においては固定閾値の場合が提案手法よりも高い正解率となっている。この結果だけ

を見ると、閾値の決定に腕の動きの大きさを考慮することの有意性は十分に示せていないが、今回の実験ではサンプル数が少なく、図8の試行のような極端なデータのバイアスを多分に含んでおり、様々な腕の動きの大きさにおける性能を評価するうえでは十分なデータセットが得られていない。このため、いくつかの腕の動きの大きさに対してデータを収集し、評価することが必要である。

## 6. おわりに

本研究では自律型生体データ収集における腕装着型センサの信頼性推定法の検討を行った。腕装着型センサの特性を調査した結果、行動の種類やバンドの締め具合が測定値の信頼性に影響を及ぼすことが分かった。この調査結果に基づき、腕装着型センサに搭載した慣性センサでセンサ本体の加速度と角速度を取得し、その加速度の大きさと角速度のy成分の分散を活用することにより、腕装着型センサのバンドの締め具合の推定する手法を考案した。評価結果より、最適な閾値での正解率との誤差はLooseとMediumでは3.19ポイント、TightとMediumでは12.50ポイントとなった。

今後の課題として、データ数を増やして提案手法の性能評価・改善を行いたい。また、本研究では測定値の信頼性に影響を及ぼす要因の1つであるバンドの締め具合に焦点を絞って調査を行ったが、2章で述べたように腕の動きによる血流の乱れも要因の1つとして考えられる。今後、血流の状態(Blood Volume Pulse)などを手首で測定可能なセンサを用いて、信頼性にどれだけの影響を及ぼしているのかを調査したい。将来的には実際のデータ収集で被験者にデバイスを渡して測定を行ってもらうだけで、測定値から自律的に血流の影響も加味して信頼性を推定するシステムの構築を目指す。

謝辞 本研究の一部は、文部科学省 Society 5.0 実現化研究拠点支援事業「ライフデザイン・イノベーション研究拠点」の支援を受けたものである。

## 参考文献

- [1] Pantelopoulos, A. and Bourbakis, N. G.: A survey on wearable sensor-based systems for health monitoring and prognosis, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)*, Vol. 40, No. 1, pp. 1–12 (2010).
- [2] 濱谷尚志, 内山彰, 東野輝夫: ウェアラブルセンサと生体温熱モデルを用いた暑熱環境下での深部体温推定の一手法, *情報処理学会論文誌*, Vol. 56, No. 10, pp. 2033–2043 (2015).
- [3] 江口佳那, 青木良輔, 吉田和広, 山田智広: ウェアラブル心電計から計測された心拍の周波数特徴量解析を対象とした欠損RRIの補完手法, *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 (DICOMO2017)*, pp. 888–897 (2017).
- [4] Salai, M., Vassányi, I. and Kósa, I.: Stress detection using low cost heart rate sensors, *Journal of Healthcare Engi-*

*neering*, Vol. 2016 (2016).

- [5] Nakano, M., Konishi, T., Izumi, S., Kawaguchi, H. and Yoshimoto, M.: Instantaneous Heart Rate detection using short-time autocorrelation for wearable healthcare systems, *2012 Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, pp. 6703–6706 (2012).
- [6] 島崎拓則, 原晋介, 奥畑宏之, 中村肇, 河端隆志: 光電脈波計の原理を利用した適応フィルタによる運動中の心拍数センシング, *生体医工学*, Vol. 54, No. 5, pp. 225–235 (2016).