

# おなかのげんじつ： ベルト着用をトリガとした自動腹囲測定システムの開発

松田 裕貴<sup>1</sup> 岩波 慶一朗<sup>1</sup> 長谷川 高志<sup>1</sup> 石岡 匠也<sup>2</sup> 齊藤 直矢<sup>2</sup> 新井 イスマイル<sup>2</sup>

**概要：**近年、肥満およびメタボリックシンドローム患者の増加は世界的に問題となっている。メタボリックシンドロームは動脈硬化のリスクを高め、さらに心臓病と脳卒中を誘引することから、予防対策が重要視されている。スマートフォンおよびウェアラブルデバイスの台頭により、ヘルスケアに関するデータの記録・管理は容易となったが、メタボリックシンドロームの診断基準のひとつである「腹囲」に関しては、既存のデバイスでは対応することができない。そこで本研究では、ベルトがバックルを通過した距離を測定し、腹囲を自動推定するベルト型ウェアラブル計測デバイス、および測定データの記録、可視化を自動化するスマートフォンからなるシステム“おなかのげんじつ”を提案、実装する。測定精度実験の結果、平均相対誤差は0.66 [%]となった。また、スマートフォンアプリケーションにより測定データの記録、グラフによる可視化を実現した。

**キーワード：**ウェアラブルコンピューティング、ヘルスケア、腹囲測定

## Development of A Belt-type Device and Smartphone Application for Automatic Abdominal Circumference Measurement

YUKI MATSUDA<sup>1</sup> KEIICHIRO IWANAMI<sup>1</sup> TAKASHI HASEGAWA<sup>1</sup> TAKUYA ISHIOKA<sup>2</sup> NAOYA SAITO<sup>2</sup>  
ISMAIL ARAI<sup>2</sup>

**Abstract:** In recently, the rise of number of metabolic syndrome patient is serious problem. Metabolic syndrome causes arteriosclerosis, and may become cause of heart disease or stroke. So, preventions of metabolic syndrome is very important. With the spread of smartphones and wearable devices, we can record and manage data about healthcare easily. However, any wearable devices can't measure abdominal circumference which is a criterion of metabolic syndrome. Therefore, we propose a belt-type device and a smartphone application for automatic abdominal circumference measurement. This system has functions of measurement, recording, and visualization of abdominal circumference data. As a result of the evaluation, the mean relative error of abdominal circumference measurement was 0.66 [%]. In addition, we confirmed the smartphone application can record and visualize measured data efficiently.

**Keywords:** Wearable Computing, Healthcare, Abdominal Circumference Measurement

### 1. はじめに

近年、世界的に肥満人口の増加が問題となっている。日

本においても、厚生労働省の行った調査によると、成人男性のうちでも半数近くがメタボリックシンドローム患者、あるいはその予備群とされている [1] (図 1)。メタボリックシンドローム (以下、メタボ) とは、高血糖・高血圧・脂質異常のうちで2つ以上の症状が合併されている状態を言う。また、日本人の死因の大きな割合を占める心臓病と脳卒中は動脈硬化が要因となる。高血糖・高血圧・脂質異常は単独でも動脈硬化のリスクを高めるが、複数重なったメタボの状態では、飛躍的に動脈硬化のリスクを高めると

<sup>1</sup> 明石工業高等専門学校 専攻科 機械・電子システム工学専攻  
Advanced Course of Mechanical and Electronic System Engineering, National Institute of Technology, Akashi College, Akashi, Hyogo 674-8501, Japan

<sup>2</sup> 明石工業高等専門学校 電気情報工学科  
Department of Electrical and Computer Engineering, National Institute of Technology, Akashi College, Akashi, Hyogo 674-8501, Japan

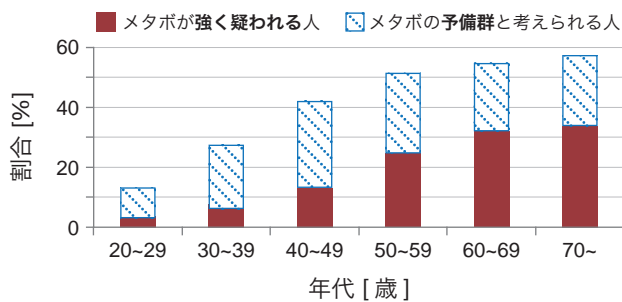


図1 成人男性のメタボ患者・予備群の割合

言われている [2]。メタボの診断基準として重要かつ最も分かりやすく、自分で測定・記録が行いやすいものとしては、腹囲の測定が挙げられる。以上より、動脈硬化のリスクを避けるためにはメタボ予防が有効であり、その為には定期的な健康診断だけでなく、日々の腹囲測定・記録が重要であるといえる。しかしながら、毎日自ら巻き尺を用いて腹囲測定・管理することは、ユーザにとって負担が大きい。そのため、毎日腹囲測定を行う人は殆どおらず、定期的な健康診断のみに頼りがちである。

そこで、本研究では現在世界的に普及してきているウェアラブルデバイスを用いることでユーザが普段どおりの生活を行いながら腹囲の測定を同時に行うベルト型ウェアラブル計測デバイス、そして測定データの記録、可視化を自動化するスマートフォンからなるシステム“おなかのげんじつ”を提案する。ベルトのバックル部分をデバイスに置換し、内部に搭載されたロータリエンコーダによってベルトが差し込まれた時の挿入距離を測定することで、腹囲を推定する。これにより、日々ベルトを身に着ける際に腹囲測定・記録することを可能とした。また、このデバイスを用いた測定精度実験を実施し、実際の腹囲測定が可能であることを確認した。

本稿では、2章において関連研究を示し、3章で本研究の提案手法の概要、4章で提案手法の実装について述べる。提案した手法による腹囲測定の精度評価実験および考察を5章にて述べ、最後に6章でまとめる。

## 2. 関連研究とその課題

### 2.1 近年のウェアラブルデバイスの動向

近年、ウェアラブルデバイスの市場は急激に拡大し、ユーザの関心も高まっている。特に2014年度には眼鏡型や腕時計型のウェアラブルデバイスが多く発売された。これらウェアラブルデバイスが普及した理由の一つとして、スマートフォンとの連携が容易であることが一因である。小型ディスプレイやバイブレーションを用いたユーザーへの通知や、センサから体の動きなどを読み取ってスマートフォン上で確認できるようなライフログを目的とした使用も可能である。また、ウェアラブルデバイスが普及した理由はスマートフォンの普及に伴ったものであったが、実際

にはその種類や用途は多岐にわたり、様々な分野への応用が可能である。例えば、GoogleGlassに代表されるような眼鏡型ウェアラブルデバイスは、工場などの専門的な職場において、組み立て手順をARで図示して全体的な技量の引き上げを行ったり、遠方と作業者視線での映像を共有しながらコミュニケーションを行うなどの用途にも用いられている [3]。

このようにウェアラブルデバイスは様々な用途に用いられているが、中でも発展が目覚ましく応用が期待される分野がヘルスケアである。この分野は従来、煩雑な機器操作、専門的なセンサを多数身につける必要性があり、患者・ユーザに対する負担が大きかったが、ウェアラブルデバイスの発展に伴い負担の軽減が見込めるようになったといえる。

### 2.2 ウェアラブルとヘルスケア

眼鏡型や腕時計型をはじめとし、ウェアラブルデバイスはユーザが日常生活の中で長時間装着されることが想定される。そのため、心拍・血圧・体温などを測定する生体センサや、歩行・走行などユーザの運動量を測定するセンサを組み込むことによるデータ収集が容易であることから、ウェアラブルデバイスとヘルスケアは相性がよいと言える。

ヘルスケアに特化したウェアラブルデバイスの代表例としては、Withingsが挙げられる\*1。Withingsは万歩計、体重計、血圧計など様々な機器で測定されたフィットネス情報をクラウド上で管理し、グラフ化などのヴィジュアライズを行う。また、近年ではWithings Activeという腕時計型アクティビティトラッカーが発売されており、ウェアラブル化も進んでいる。これにより、ヘルスケア・フィットネス情報のクラウド上での統合管理及びユーザの日常生活に溶け込んだ測定が可能となり、従来に比べて情報の閲覧も時間や場所を問わず行えるという利点がある。

医療分野では、要介護者・患者に装着することで身体の異変を察知し、病院や地域と連携して高齢者人口に対する施設数や介護者などの不足に対応するハイパーホスピタル構想が参照されている。岸本らは、筋電位検出システムと加速度検出システムを統合し、転倒時を含めた姿勢をリアルタイムで検出することが可能なシステムを提案している [4] ほか、塚田らは、シャツに小型化した電極を同化させることで患者の心拍数や心電図などを常時測定可能にし、また従来よりも幅広い状態で患者に負担なく測定することが可能なウェアラブル電極インナーを提案している [5]。

### 2.3 現代病予防に対する腹囲測定とその課題

メタボの日本における判断基準では、男性の場合85cm以上、女性の場合90cm以上であれば内臓脂肪が蓄積していると判断される [6]。メタボ予防のためには日々の腹囲測定が重要となってくるが、巻き尺などで測定・記録する

\*1 <http://www.withings.com/eu/withings-activite.html>

作業に対しては、人々は消極的になりがちである。また、メタボの判定基準となっているものの、血圧などと比べるとユーザの危機意識が低いことも継続的な測定を妨げる要因だと考えられる。

腹囲自動測定デバイスとしては、デジタル・メタボ・メジャー<sup>\*2</sup>が発売されている。これは、環状になったメジャーの値を機器で読み取り、Bluetoothを用いてパソコンに送信、記録する機器であるが、ユーザが自発的に測定をする必要があるなどの問題から、医療向け測定機器にとどまっている。

### 3. “おなかのげんじつ”の提案

前節での議論から、既存のウェアラブルデバイスではフィットネス機能に重点が置かれているものの、メタボの指標である腹囲を測定することは想定していない。しかし、メタボを予防するための腹囲測定デバイスとして、日々着用するウェアラブルデバイスを活用することは有効である。

そこで本研究では、腹囲の自動測定および記録・可視化システム“おなかのげんじつ”を提案する。“おなかのげんじつ”（以下、本システム）は、日常的に着用することで腹囲の自動測定を行うベルト型ウェアラブル計測デバイス、および測定データの記録・可視化を自動化するスマートフォンからなるシステムである。

ユーザが腹部周辺に着用するものとしては、下着やズボン・ベルトなどが挙げられる。ベルトは一般的に帯状になっており、バックルを通して環状を形成する。すなわち、ベルトがバックルを通過した距離（以下、ベルト挿入距離）を測定することで腹囲の推定が可能であるといえる。この点に着目し、本研究では腹囲測定デバイスとしてベルトを採用した。また、腹囲測定値をユーザに提示する方法としては、バックル上に表示することが考えられるが記録・可視化の面から合理的ではない。そこで本システムでは、デバイス本体を測定のみ限定し、測定データの管理や可視化をスマートフォンによって行うこととした。

#### 3.1 ロータリエンコーダを用いたベルト挿入距離の測定

ベルトの全長が既知な上で、ベルト挿入距離を測定することが可能であるならば、形成される環の内周を算出することができる。この挿入距離を測定する方法としては、以下のものが考えられる。

**手法 1** ベルト上に縞模様を印字、バックル内部のフォトリフレクタで通過する縞の数を測定する。

**手法 2** バックル内部にイメージセンサを設置し、ベルト上の特徴点の移動距離を測定する。

**手法 3** バックル内部にロータリエンコーダを設置し、ベルト挿入時の回転数を測定する。

いずれの手法を用いた場合においても、既存のデバイスの応用またはそれらの組み合わせで実現可能といえる。しかし**手法 1**では、ベルトを加工することによりバックル内部を簡易な構造で実現可能であるものの、ベルト自体の摩擦や劣化の影響が大きいと、ベルトの状態に依存しない測定方法であることが望ましいと考えられる。また**手法 2**は、光学式マウスと同様の方式で実現可能であると考えられるが、イメージセンサにより得た画像解析が必須となることから、デバイス側の処理コストが高いと考えられる。さらに、対象物を照らす光源が常に必要であることから消費電力の増加にも繋がることも考えられる。一方、**手法 3**では機械式ロータリエンコーダを用いることから、単純なパルスパターンでの識別によりベルトの移動が検出でき、デバイス側の処理コストが低い。さらに機械式ロータリエンコーダはシャフトの回転によってON、OFFが切り替わるスイッチであるため、OFF状態で待機している場合に消費電力が発生しない。また、ON状態であってもプルアップ抵抗が搭載されているため低消費電力で実装可能である。

以上の議論から、本システムではバックル内部で完結し、かつ簡易な手法として、**手法 3**のバックル内部にロータリエンコーダを設置する方法を採用することとした。

#### 3.2 デバイスとスマートフォンの連携による機能分担

スマートフォンの爆発的普及により、近年のウェアラブルデバイスはスマートフォンとの連携が主流となっている。

2.2節で述べたWithingsをはじめとする、ヘルスケアに特化し日常的に着用されるウェアラブルデバイスは、一般の人々にも利用されることが前提であるため、測定データを記録し、そして可視化することが不可欠である。さらに、他のデバイスから得られる情報を加えることで高度な解析が可能になるため、ネットワークとの接続は、データのさらなる価値向上に寄与すると考えられる。例としては、腹囲データとネットワークを介して得た血圧・血糖などのデータを組み合わせることで正確なメタボ判定が可能となることなどが挙げられる。

以上の機能は、画面サイズや消費電力の制約からデバイス単体での実装が難しいといえるが、スマートフォンと連携することにより実現することが可能である。そこで、本システムにおいても、デバイスとスマートフォンとBluetoothで通信し、測定データの記録・可視化をスマートフォンに分担する。

### 4. “おなかのげんじつ”の実装

本システムは、**図 2**に示すベルト型ウェアラブル計測デバイス（ベルト挿入距離の測定機能を有するバックル：測距バックル）と、測定データを管理、可視化するスマートフォンで構成される。**表 1**に本システムの機器構成を示し、構成図を**図 3**に示す。

<sup>\*2</sup> <http://www.yamayo.co.jp/catalogue/products/8001health.htm>

表 1 “おなかのげんじつ” の機器構成

部位	モジュール名称	機器名称	備考
測距バックル	メインボード	Arduino Pro Mini 328 (Spark Fun)	3.3[V], 8[MHz]
	通信	RN-42-I/RM (Microchip)	Bluetooth 2.1 SSP 通信
	挿入距離測定	ロータリエンコーダ	12 パルス (機械式)
	基準点検出	フォトリフレクタ TPR-105	反射型
	電源	単 4 電池アルカリ一次電池	2 個, 3.0[V]
スマートフォン	データ管理, 可視化	Nexus5 (LG 電子)	-



図 2 “おなかのげんじつ” 測距バックルの外観

#### 4.1 測距バックルの実装

メインボードには、測距バックルが搭載しているすべてのデバイスが接続されている。挿入距離測定モジュールは、ロータリエンコーダのシャフトがベルトの移動によって回転した際に発生するパルスをメインボードに送信する。これを計数したパルス数  $P_c$  から挿入距離  $L$  を式 1 によって算出する。なお、シャフトの直径  $d$  は定数であり、本実装では  $d = 13.3$  [mm] とした。また、本デバイスの測定値の分解能は式 1 より、 $3.48$  [mm] である。

$$L = \frac{\pi \cdot d}{12} \cdot P_c \quad [\text{mm}] \quad (1)$$

通信モジュールは、Bluetooth 通信を用いて、挿入距離をスマートフォンへ送信する。通信モジュールとメインボード間は UART によるシリアル通信でデータを送受信する。本研究では図 4 で示す手順に従って、スマートフォンとの通信を行った。

基準点検出モジュールは、ベルトがバックルに挿入されたのを検知し、その点を挿入距離測定の基準点とする。すなわち、挿入距離測定モジュールでは、この基準点からの相対距離を測定する。なお、本研究では反射型フォトリフレクタを用いたため、反射率の高い白線をベルト上に設けることにより擬似的に基準点検出を行う。

#### 4.2 ソフトウェア実装

本システムは、図 5 に示すスマートフォンアプリケーションにより測定データの記録やユーザへの情報提示機能を実現する。

測定データは、4.1 節で述べた手順により、Bluetooth を介し送信されるため、日付情報と共にデータベースに格納する。データベースには Android で標準実装されている SQLite を使い、データ格納頻度は 1 [セット/日] とした。

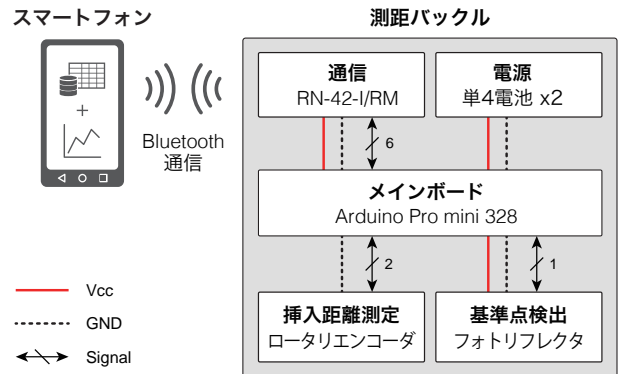


図 3 “おなかのげんじつ” の構成図

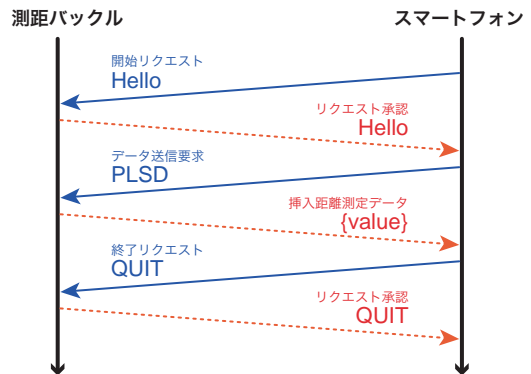


図 4 Bluetooth 通信手順



(a) ホーム画面

(b) 統計情報画面

図 5 アプリケーションの表示



また、測距バックルとの通信はバックグラウンドで動作するため、測距バックルとスマートフォンのペアリング以後は、ユーザの特別な操作は不要となっている。

さらに、ユーザへ情報を提示するためのフォアグラウンドアプリケーションを実装した。データベースに格納されたデータおよび移動平均を時系列グラフとして提示する(図 5 (a)) 他、曜日ごとの傾向のグラフやメタボ指標との差分などの情報(図 5 (b)) を提示する。なお、グラフ化には GraphView ライブラリ<sup>\*3</sup>を用いた。

また、ユーザの継続意識を向上させるため、図 5 (a) 中央にキャラクターを配置した。このキャラクターは、腹囲の変化状況に応じたメッセージをユーザに発信する。例を以下に示す。

- 目標達成だトン (設定した目標を達成した場合)
- 目標に近づいてきたトン (減少傾向の場合)
- このままだとメタボになるトン (増加傾向の場合)

## 5. “おなかのげんじつ” システムの評価と考察

本システムのウエスト測定精度を評価するため、距離測定精度実験を行った。実験の概要を 5.1 節、実験結果および考察を 5.2 節に示す。また、システム全体の今後の課題について 5.3 節で議論する。

### 5.1 ウエスト測定精度実験概要

本システムのウエスト測定方法では、全体のベルト長から挿入距離を減算するため、本実験では、挿入距離の測定精度を評価する。測定は、バックル部分を固定しベルトを定数距離  $D = 30$  [cm] 挿入することにより行う。この定数距離は、一般的なフォーマルベルトのベルトの先端から最遠の調節穴までの距離、すなわちユーザが調節しうる最大距離を十分超える値として設定した。本実験では、図 6 に示す白線をフォトリフレクタによって検出し、これらを測定開始場所と終了場所とした。測定したロータリエンコーダのパルス数から、式 1 により挿入距離  $L$  を算出する。

この挿入距離から絶対誤差  $\varepsilon_{\text{abs}}$ 、相対誤差  $\varepsilon_{\text{rel}}$  を式 2、3 により算出することで評価する。また、挿入時の平均速度と絶対誤差の関連性についても考察する。

$$\varepsilon_{\text{abs}} = L - D \quad (2)$$

$$\varepsilon_{\text{rel}} = \frac{\varepsilon_{\text{abs}}}{D} \quad (3)$$

### 5.2 ウエスト測定精度実験結果

表 2 にウエスト測定精度実験を 100 回行った実験結果を示す。30 [cm] 挿入時の絶対誤差の平均および標準偏差はそれぞれ 1.99 [mm]、1.61 [mm] となったが、ロータリエンコーダの分解能が 3.48[mm] であることを考慮すると、

<sup>\*3</sup> <http://android-graphview.org/>



図 6 ベルトの挿入範囲

表 2 ウエスト測定精度実験結果

絶対誤差 [mm]		相対誤差 [%]	
平均	標準偏差	平均	標準偏差
1.99	1.61	0.66	0.54

誤差およびばらつき共に、良好な結果といえる。また、相対誤差が 1 [%] 未満となっていることから、本システムは十分な精度であるという結果が得られた。

続いて、図 7 に各試行に対する絶対誤差と平均挿入速度の関係、そして図 8 にパルス数  $P_c$  の発生頻度を示す。80 [%] 程度のパルス数は、真値を挟んだものとなっているが、低速挿入される場合において少ないパルス数が計数されていることが分かる。これは、低速挿入時に生じる微妙なベルトの抜き差しが原因として考えられる。概略図を図 9 に示す。ロータリエンコーダはそのシャフトの回転によって、位相の 90° ずれた 2 相の方形波を出力する。本システムでは片方の波形を常時監視し、その立ち上がり時に他方の方形波の“H”、“L”によってパルスのインクリメント、デクリメントを判定する。しかし、ベルト挿入中のインクリメント時に、 $P_1$  点を検出しインクリメントした後、 $P_2$  点を通過、 $P_2$ - $P_3$  点間でベルトが引き出された場合、 $P_2$  点を立ち上がりと検出するため、デクリメント操作が行われてしまう。その後、 $P_1$  点を通過する前にベルトの挿入が再開されると、先のデクリメント操作を相殺するインクリメントが生じず、 $P_1$  点、 $P_2$  点のあるパルスは数えられないことになる。これにより、パルス数が減少すると考えられる。

### 5.3 システム全体としての考察および今後の課題

本システムは日常的な使用を想定しているが、本稿で提案したデバイスは、一般に普及しているベルトのバックルと比較し、3~4 倍程度の体積を要する。これは機械的構造上、ベルトをギアと金属棒で挟み込むことで、ギアとベルトの間に十分な摩擦力を発生させる必要があることから、測定部にロータリエンコーダ・ギア・金属棒を設置したことが原因である。今後の課題としては、シャフトに装着する材質をはじめとする機構を再検討し、測定精度を保持し

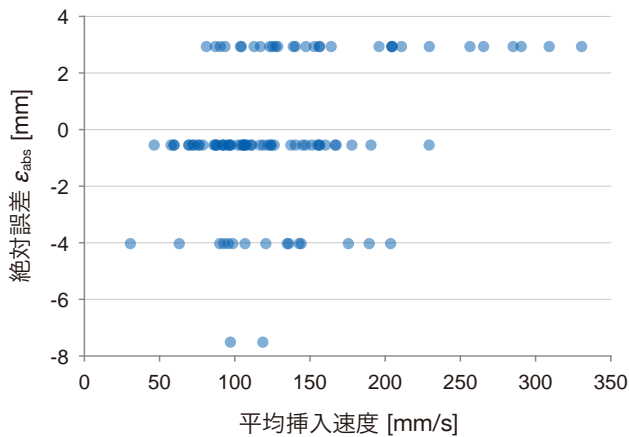


図 7 絶対誤差と平均挿入速度の関係

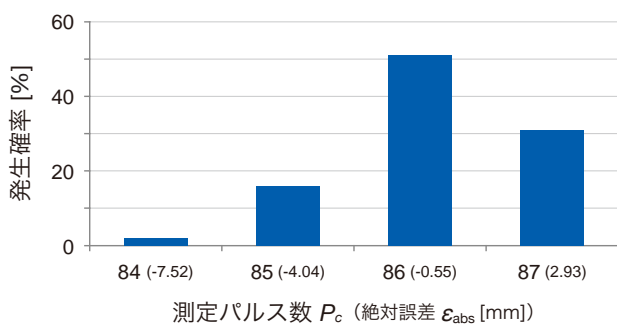


図 8 パルスの発生頻度

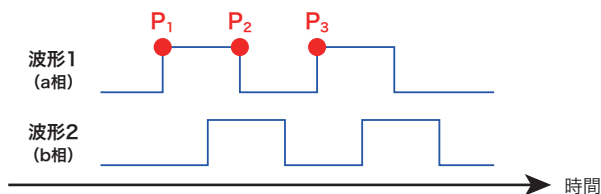


図 9 パルスの減少問題の原因

つつ小型化することが挙げられる。

ところで、本稿ではロータリエンコーダによる測距手法を提案したが、3.2 で述べた他の手法の精度については議論していない。例えば、イメージセンサを設置しベルト上の特徴点の移動距離を測定する手法では、処理コストや消費電力などは大きいですが、ベルトを強い力で押さえつける必要が無く薄型化が期待できる。今後は、他の手法においても測定精度を検証・比較し、コストなどを加味した上で妥当な測距手法を検討することが必要である。

スマートフォンとデバイスの連携においては、アプリケーションは本システムの要件である記録・可視化を満たしているが、基本的な実装に留まっている。しかし、データの記録間隔や処理方法を検討することで、新たな価値を創出することが可能であると考えられるため、今後様々なユーザー層のニーズを調査し、明らかとなった必要機能を実装したい。

また、本システムではユーザーの継続意識を保つ仕組みとして、アプリ内にキャラクターによるメッセージを実装したが、簡易的なものである。今後は、心理学的観点における適切なメッセージおよび提示方法について検討し、ベルト装着時にデバイスが何らかのフィードバックを発生させる（増加傾向の場合に装着時にバイブレーションを発生させるなど）機能の実装や、腹囲の変化に応じたアプリ内の表示変更機能の充実化などを行いたい。

## 6. おわりに

本稿では、スマートフォン及びウェアラブルデバイスの普及からヘルスケア分野への応用を取り上げ、腹囲測定を課題として設定した。そして、日常生活に溶け込んだ腹囲測定及びその記録、可視化を行う、ベルト型ウェアラブル計測デバイスとスマートフォンアプリケーションからなるシステムを提案、開発し、実験を行った。その結果、ベルト型ウェアラブルデバイスの測定精度としては、平均相対誤差 0.66 [%]、標準偏差 0.54 [%] という結果が得られ、分解能 (3.48[mm]) を考慮すると十分な精度が得られることがわかった。また、スマートフォンアプリケーションにより、データの管理・閲覧を実現した。

今後の課題は、ベルト挿入距離の測定手法を複数検出・比較し、測定精度を保持しつつ小型化することである。また可視化については、腹囲に関連する医学的情報を調査、追加実装することが挙げられる。これにより腹囲測定システムの完成を目指したい。

## 参考文献

- [1] 厚生労働省：国民健康・栄養調査（平成 24 年），入手先 ([http://www.mhlw.go.jp/bunya/kenkou/kenkou\\_eiyouchousa.html](http://www.mhlw.go.jp/bunya/kenkou/kenkou_eiyouchousa.html)).
- [2] 厚生労働省：基礎知識編メタボリックシンドローム（内臓脂肪症候群）を知ろう，入手先 (<http://www.mhlw.go.jp/bunya/kenkou/metabo02/kiso/danger/index.html>).
- [3] 正二塩川，公太郎永浜：ウェアラブルコンピュータシステム Tele Scouter と社会基盤の変化（ユビキタスサービスを支える基盤技術特集）－（ユビキタスのサービス事例），*NEC technical journal*, Vol. 62, No. 4, pp. 104-108 (2009).
- [4] YOSHIDA, T., MIZUNO, F., HAYASAKA, T., TSUBOTA, K., WADA, S. and YAMAGUCHI, T.: 424 Detecting a dysfunctional body part with a wearable computer system, バイオエンジニアリング講演会講演論文集, Vol. 2005, No. 18, pp. 267-268 (2006).
- [5] 信吾塚田，奈保子河西，龍介川野：着るだけで心電図を測るウェアラブル電極インナー（特集 新分野事業の開拓に貢献する先端デバイス・材料技術），*NTT 技術ジャーナル*, Vol. 26, No. 2, pp. 15-18（オンライン），入手先 (<http://ci.nii.ac.jp/naid/40019970061/en/>) (2014).
- [6] 厚生労働省：メタボリックシンドロームの考え方 (2) メタボリックシンドロームの診断基準，入手先 (<http://www.mhlw.go.jp/shingi/2005/08/s0826-9d.html>).