

# 複数のウェアラブルセンサを用いた 歩行動作による本人認証法の精度向上

今野 慎介<sup>1,a)</sup> 中村 嘉隆<sup>2</sup> 白石 陽<sup>2</sup> 高橋 修<sup>2</sup>

受付日 2015年4月12日, 採録日 2015年10月2日

**概要:** 近年, 携帯端末における認証操作による煩わしさを軽減するために, 様々な行動的特徴を用いた本人認証法が研究されている. その1つとして, 歩行動作を用いて本人認証を行う「歩行認証」が存在する. 本研究は, この歩行認証の精度を向上させるための方法を提案するものである. 携帯端末には様々なセンサが搭載されている. 本研究で提案する手法は, 加速度センサと角速度センサから計測された信号を比較することで, あらかじめ登録されたテンプレートと入力信号の間で複数の距離を取得する. 得られた複数の距離はユーザ個性をなくし, 全ユーザ共通の識別器により判定することで, 歩行動作による認証精度を向上させるものである. 被験者 50 人に対して実験を行い, 提案手法はセンサ単独で認証を行う手法と比較し, 認証精度が向上することを確認できた.

キーワード: 歩行認証, 加速度センサ, 角速度センサ

## Improvement of Gait-based Authentication by Using Multiple Wearable Sensors

SHINSUKE KONNO<sup>1,a)</sup> YOSHITAKA NAKAMURA<sup>2</sup> YOH SHIRAISHI<sup>2</sup> OSAMU TAKAHASHI<sup>2</sup>

Received: April 12, 2015, Accepted: October 2, 2015

**Abstract:** In recent years, in order to reduce the inconvenience that caused by the authentication operation in the portable terminals, personal authentication methods based on various behavior characteristics has been studied. Gait-based authentication which authenticates users based on their walking behavior is one of them. In this paper, we present the method which improves the accuracy of gait-based authentication. Previous studies measured gait motion by using one wearable sensor, such as acceleration sensor. However they have not showed sufficient accuracy in case where the sensor has been in one's pants front pocket. This paper proposes a method which used both acceleration sensor and angular velocity sensor to improve the accuracy of gait-based authentication. We construct human authentication system based on machine learning. Multiple distances computed from values measured by each sensors are eliminates the individuality and are used machine learning for common user classifier. In experiments, we validated with 50 subjects. The experimental results indicate the proposed method improve the authentication accuracy in comparison with the single sensor based authentication methods.

**Keywords:** gait-based authentication, acceleration sensor, angular velocity sensor

### 1. はじめに

近年, スマートフォンをはじめとした携帯端末を活用する場面はますます広がっている. 通話や, Web を閲覧するといっただけの使用方法から, ショッピングなどでの支払いやビジネスでの活用, 搭載したセンサによるライフログの収集といったことが行われ, 携帯端末の活用方法は今後

<sup>1</sup> 函館工業高等専門学校  
National Institute of Technology, Hakodate College, Hakodate, Hokkaido 042-8501, Japan

<sup>2</sup> 公立はこだて未来大学システム情報科学部  
School of Systems Information Science, Future University Hakodate, Hakodate, Hokkaido 041-8655, Japan

a) skonno@hakodate-ct.ac.jp

も増えると考えられる。

それにともない、金銭の授受に関する機能や、個人情報、ビジネスに関わる情報といった重要性の高いデータが搭載・蓄積されるようになり、他人の不正利用を防ぐためにセキュリティを高める方法が様々、実装されている。本人認証法もその1つとしてあげられ、従来のPINコードによる認証から、パスワード、パターンロックなど、他人による不正な解除がより困難となる認証方法が実装されている。また、身体的特徴を利用したバイオメトリクス認証機能の搭載も行われており、顔による認証機能や、機種によっては指紋認証機能を搭載しているものも存在する。このように、不正利用を防ぐための努力が行われる一方で、そのセキュリティ機能の利用が進まないという調査やニュースが複数なされている。この理由の1つとして「解除の煩雑さ」が考えられる。複雑な入力を省くために、より簡単な行動、たとえばジェスチャ認識 [1] で本人認証を行う研究や、タッチパネルを軽く叩く「タップ」操作から個人の特徴をとらえ、本人認証を行う研究 [2] などが報告されている。しかしながら、これらの方法は意識的に認証のための動作をする必要があり、本人認証に関わる操作を完全になくすことはできない。

一方、日常的に繰り返し行う行動によって、本人認証が可能となれば、意識的に認証操作をする必要がなくなるという考えをもとに、本人認証を行うアプローチも存在する。本研究で取り扱う歩行動作による認証（以下、歩行認証）がこれにあたる。歩行動作は成人男性で1日平均7,099歩との調査報告 [3] がされており、歩行動作は日常において様々な場面で行われている。歩行認証が実現できれば、歩行動作をウェアラブルセンサで計測し、認証のための操作をしなくても、本人認証を継続的に行うことが可能となる。これにより、認証機能に対してユーザが感じていた煩わしさを軽減することが可能となる。

もちろん、日常生活において人間はつねに歩行をしているわけではない。したがって、歩行認証が実現、実装された場合も、すべての場面で歩行認証によってカバーすることは不可能であり、歩行していない状態でも利用可能である他の認証方法との併用が必要と考えられる。しかしながら、日常生活において、端末を身に付けた状態で歩行を行い、その後端末を取り出して使用するという場面は多く存在する。一例をあげるとICカードにより支払いが行われる自動改札や、レジに向かって歩いて行き、端末を取り出して支払いをするといった場面などが考えられる。このような場面でロックを解除する操作が不要になれば、利便性が高まると考えることができる。

また、自動車の鍵に歩行認証を実装し、乗車の際の人物確認とともに人物ごとのサービスを提供することが提案されている [4]。歩行認証は、意識的に認証操作をすることが不要なことから、様々な場面へ導入することで、より利便

性を高めるサービスを提供することが可能であると考えられる。

歩行動作に着目した行動的特徴による認証については、近年、数多く行われており、その代表例として歩容認証があげられる。歩容認証は、カメラで撮影された画像から歩き方などの行動的特徴を抽出し、個人の識別に利用するものである。これらの研究結果は歩行動作に個人ごとの特徴があり、本人認証が可能な違いが存在していることを示唆しているものと考えられる。歩容認証においては、ビデオカメラにより、体全体の歩行の様子を撮影し、識別を行う。したがって、手の振りや姿勢、身長といった多くの特徴を識別に利用可能となる。一方、本研究で扱うデータは携帯端末で測定したものであり、センサは体の1カ所に装着することになる。したがって、測定可能な部位は歩容認証より少ない。しかし、直接、体に身に付けているため、精度良く動作を測定でき、個人の違いを識別できる可能性が存在する。

本研究では認証精度向上のため、先行研究で行われる単一センサによる認証ではなく、複数のセンサの結果を統合するマルチバイオメトリクス認証を導入する。マルチバイオメトリクス認証とはバイオメトリクス認証の際に、複数の手法を統合し、認証精度を向上させる手法である。その統合方法により、以下の5種に分類される [5]。

- 1) 同一の部位の情報を複数のセンサで計測し、複数の情報による識別結果を統合する方法。
- 2) 1つの生体情報を複数の識別器・アルゴリズムで判定し、その識別結果を統合する方法。
- 3) 同一部位から複数回データを収集し、それぞれに対する識別結果を統合する方法。
- 4) 同種の身体的特徴（たとえば、各指の指紋など）をそれぞれ収集し、各々の識別結果を統合する方法。
- 5) 異なる部位から収集した情報による識別結果を統合する方法。

これらの統合方法について、1), 2), 3) については同一部位の情報をもとに判定を行うため、認証精度の向上は高くないと考えられている。そのため、特に5) の方式による認証方法の研究が、さかんに行われている。Fernandoらは顔画像と指紋を組み合わせることで、それぞれ単独の認証方式と比べて認証精度が向上する効果を得ている [6]。Xhiaoliらは顔および歩行画像から得られる情報から主成分分析を使用し、人物の識別を行っている [7]。市野らは音声と唇より得られたスコアをカーネル判別分析により統合して認証を行っている [8]。歩行認証においても複数の部位にセンサを装着することで、認証精度向上が期待できるが、携帯端末による認証のために様々な部位にセンサを装着することは、歩行動作における本人認証法のメリットである簡便さが大きく損なわれてしまう。そこで本研究では、ユーザへの負担が小さい1)の同一の部位を複数のセンサで計測し

て認証を行う「マルチセンサ認証」と3)の複数回データを取得する「マルチサンプル」による認証方法の2つを組み合わせることで精度の向上を行う。1つの携帯端末に複数のセンサを搭載することは可能であり、ユーザへの負担をかけずに、マルチセンサ認証が可能となる。最近のスマートフォンは加速度センサだけでなく、角速度センサも備えている機種が多い。本研究は、この2つのセンサを使用して歩行動作を計測し、認証精度を高める手法の検討を行う。

ここで問題となるのは、2つのセンサが計測する対象は、同じ部位の同じ動作であることから、計測された2種の信号どうしの相関が高く、大きな精度向上が望めない可能性があることである。本研究では、計測した加速度信号に対して処理を施すことで、異なる種類の情報に変換を行い、独立性の高い情報として認証への導入を試みることにした。

## 2. 関連研究

### 2.1 端末の所持位置の検討

これまで歩行認証を実現すべく、多くの研究が行われてきた。表1に先行研究の概要を示す。これらの研究については認証精度を高めるための歩行信号の照合方法について多く議論がされてきたが、日常に受け入れやすいセンサの取り付け位置という観点からは研究がなされてこなかった。加速度信号における歩行認証の先行研究では主に、腰の中央、または両側面において歩行動作を計測し、その信号をもとに認証をしている。ところが、日常において腰に端末を固定することは少なく、たとえばホルスタ型スマートフォンケースのような特別な道具が必要となってしまう。

この結果、簡便さを求める歩行認証を実現するために道具が必要となってしまう、ユーザにとって受け入れがたい認証方法になる恐れがある。そこで我々はユーザに受け入れやすい端末の所持位置を、保持のための道具が不要であるズボン前ポケットとし、この部位において認証精度を高めるための手法を検討することとした。この所持方法による検討を行っている研究は文献[12]である。この先行研究より高い精度を得ることが本研究の目的となる。

### 2.2 使用センサの検討

脚部に装着したセンサにおいて、歩行信号を計測した結果を図1と図2に示す。加速度信号は図1であり、図2

表1 歩行認証における先行研究の概要

Table 1 Summary of previous researches.

研究	被験者数	センサ保持部位	センサ
Mäntyjärvi et al.[9]	36	腰	加速度
Gafurov et al.[10]	22	腰	加速度
Gafurov et al.[11]	21	足首	加速度
Gafurov et al.[12]	50	ズボン前ポケット	加速度
Rong et al. [13]	21	腰	加速度
Gracian et al.[14]	11	腰	加速度
Derawi et al. [15]	60	腰	加速度
Soumik et al.[16]	30	関節 8 か所	角速度

は同一被験者の角速度信号である。図1でのxは鉛直方向、yは側方方向、zは前後方向の加速度信号であり、角速度信号は、それら加速度の方向を中心軸として観測された値となる。歩行時には加速度と角速度両方において、類似の信号が繰り返し検出される。このことから、あらかじめ登録していた本人のテンプレート信号と、入力された信号を比較し、信号間距離を求め、その距離をもとに認証を行うことでテンプレートと入力信号が同一人物のものであるのか、判定が可能と考えられる。

歩行認証においては、これまでは加速度信号をもとに本人認証をする研究が多数行われてきた。加速度をもとに認証するアルゴリズムとしては、Mäntyjärviら[9]は正規化相互相関やFFT、ヒストグラム、尖度・歪度などを用いて本人認証を試みている。また、Gafurovらは様々な部位の加速度で歩行認証を試み、ズボンポケットにおける報告では差の絶対値や、尖度や歪度などをもとに本人認証を行っている[10],[11],[12]。Gracianらは、加速度信号から歩行の特性に基づいた特徴量を提案し、個人認証を行った[14]。しかし、従来の歩行認証についての研究は、歩行動作によって測定される加速度信号の特性を考慮した事例はない。関節の動作は、関節を中心とした円運動とモデル化を行った場合、測定される加速度は中心からの距離の影響を受ける。脚部にセンサを保持した場合も、股関節を中心とした

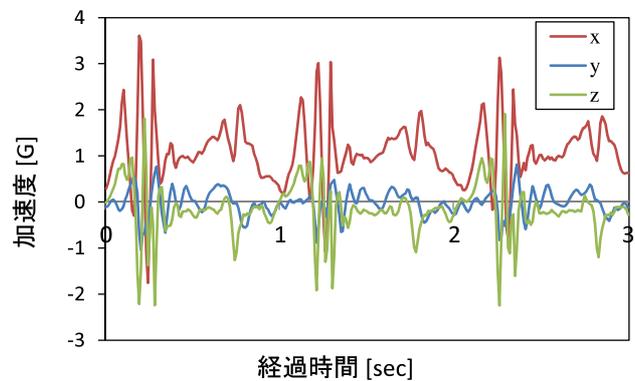


図1 前ポケットにおける加速度信号波形

Fig. 1 Acceleration waveform of in-pocket situation.

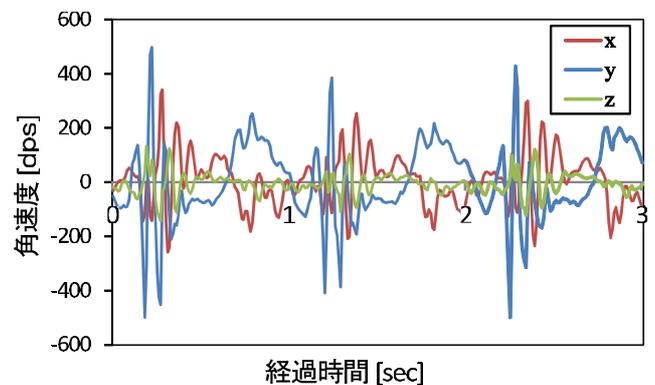


図2 前ポケットにおける角速度信号波形

Fig. 2 Angular velocity waveform of in-pocket situation.

円運動と考えると、その特性を考慮した距離計算法が必要となると考えられる。また、角度センサを用いた歩行認証に関する研究も存在する。Soumik らは各関節に装着した8個の角度センサにより信号を計測し、ニューラルネットワークなどを使用して本人認証を行っている [16]。理想的な状態において、円運動の際に測定される角度は、その中心からの距離に影響を受けることはない。したがって、股関節を中心に脚部を振る動作を計測する本研究において、適したセンサであると考えられる。しかしながら、この研究は、体の各関節8カ所にセンサを装着して歩行動作を計測しており、その煩雑さから、ユーザにかかる負担が大きい。センサの装着部位が複数であることから、本研究にそのまま適用することはできない。

これらの先行研究に共通していることは、1種類のセンサ由来の情報をもとに認証をしており、脚部にセンサを保持した研究においては、2種類以上のセンサを活用している研究は存在しないことである。また、脚部における加速度認証においては部位の特性を考慮せず、他の部位に置き換えても使用可能な汎用的な信号のマッチング手法となっている。本研究では認証精度向上のために、2種の信号はともに類似性が高いことを利用し、加速度信号によるスコアと、角速度信号によるスコアのスコアレベル統合 [5] を行い、従来研究より脚部における認証精度を改善することを目的とする。

### 3. 提案方式

図3に本研究で提案するシステムの概要を示す。提案システムは識別器を用いることから、事前に信号を登録し、学習するフェーズと、認証を行うフェーズから構成される。学習のフェーズでは、認証を受理するか棄却するかを判断するために、識別器の学習を行う。事前に複数の人物の信号をDBに登録し、歩行信号間で距離を計算し、距離を学習データとする。次に認証のフェーズでは、認証を行うためにシステムへ入力された歩行信号（以下、入力信号）と事前に登録された信号から選出した信号（以下、テンプレート信号）との間で信号間距離を求め、その距離を

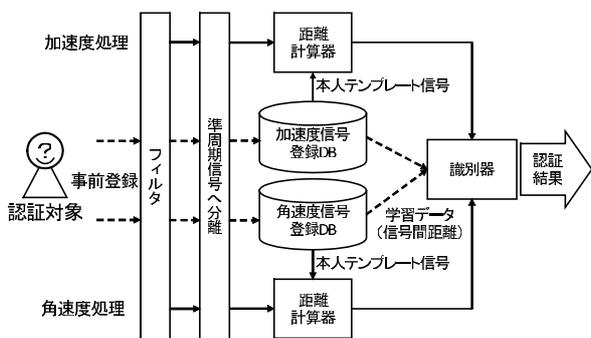


図3 提案する認証システムの構成図

Fig. 3 Architecture of the proposed authentication system.

もとに前述の識別器が判断を行う。本研究では携帯端末の認証法として歩行認証を利用することから、識別器や他人を含めた歩行信号を保持するDBはそのユーザの端末に収められることを想定する。ユーザ自身が他人の歩行信号を収集することは困難であることから、事前にシステム開発企業が他人の歩行信号データを収集し、認証システムを構成するための学習データとして提供することとする。

ここで問題となるのは、開発者側がシステムを使用するユーザすべての歩行信号を予測し、ユーザごとに類似の他人の信号を収集することが困難な点である。そこで、本研究では認証に用いる識別器をユーザごとに作成せず、ユーザ共通の識別器とする。これは精度の高い識別器を作成するためには、歩行信号が著しく異なる人物よりも、認証する人物と信号が類似している人物の信号を、拒否すべき信号として学習し、各信号に対する適切なパラメータを決定する必要があると考えられるためである。しかし、測定した信号から実際の歩行動作を予測することは難しく、そのような類似の信号を有する人物を選んで、他人の信号として収集をすることは、ユーザの信号が登録された後であっても困難であると考えられる。ユーザごとに学習データの収集が困難な問題に対応するために、ユーザ依存性をなくした他のユーザの学習データも用いてユーザ共通の識別器を構成することで、本人になりすました他人データを増やし、認証精度を高めた研究が報告されている [17]。本研究においても、識別器は事前登録された認証すべき人物であるかを判定する2クラス分類を行う識別器として構成し、認証精度の検証を行う。この研究と異なり、なりすましデータを増やすことはできないが、学習データ生成の際に、本人信号として利用する人物を増やすことができる。事前登録した信号の中で学習データを生成する際、本人信号が1人である個別識別器と比較し、類似性の高い他人の信号との間で計算した距離が得られる可能性を高められるため、識別器の高精度化ができる可能性があると考えた。

なお、携帯端末は個人が利用することが一般的であり、ユーザ個別の識別器を構成することは容易である。ユーザ1人1人に対して、個別に識別器のパラメータを決定するために十分な他人データを得られた条件下では、ユーザ個別の識別器は、より高い認証精度を得られると考えられる。しかし、本研究では前述の理由から、ユーザ共通識別器により認証精度向上の可能性があると考え、採用した。

このような場合、1人1人に違いが存在する特徴量、たとえば分散や平均、最高値といったものを学習データとした場合、1人1人の特徴ベクトルの分布が異なることから、2クラス分類を行うための識別器を生成することは、困難になると考えられる。本研究で使用する識別器は、登録したテンプレート信号と入力された信号との間の距離を入力することで、入力された距離が同一人物の間で算出されたものであるか、異なる人物の間のものであるかを判別す

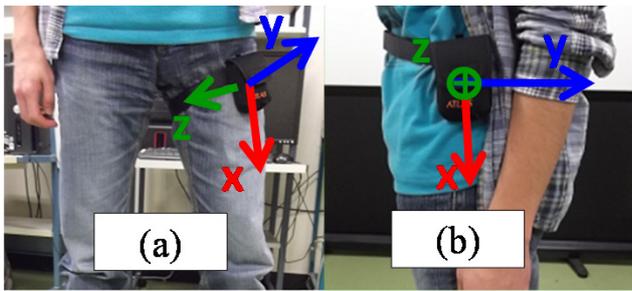


図 4 センサの所持位置, (a) 前ポケット, (b) 左腰  
 Fig. 4 Position of the sensor, (a) left front pocket, (b) left waist.

る識別器である。歩行信号は類似の信号が繰り返し観測されることから、登録されたどの人物であっても、本人同士の信号間距離は小さく、異なる人物同士の信号間距離は大きくなるという傾向が存在する。したがって、ユーザ共通の識別器は構成可能と考えられる。

### 3.1 歩行信号の取得方法

歩行信号は左脚部に装着したセンサにより計測した。本研究では複数の実験を行っており、装着法に違いが存在する。脚部と腰部における認証精度の違いについて検討した実験において、センサの取り付け位置と各軸の方向は図 4 に示す方式で計測した。ポケットの形状や位置の違いは実際の利用を考慮した場合、精度の低下を招く一因になると考えられる。しかし、本研究の2つの実験では計測回数は1回である。歩行信号の個人差が小さい場合、ポケットの違いにより信号が変化し、逆に個人の区別が容易になる可能性も考えられる。これを防ぐため、被験者のポケットにセンサを保持させることをせず、ポケットの上部にポシェットを固定し、その中にセンサを所持させることとした。加速度および角速度センサは、各々3軸について測定可能であり、センサのx軸は直立時に鉛直下向きに、y軸は胴体側方に、z軸は大腿部後方とした。腰部においてx軸は直立時に鉛直下向きに、y軸は体の後方に、z軸は胴体の側方外側とした。センサ統合による認証精度を評価する実験では、測定時のセンサの位置と各軸の方向は図 4(a) に示す左脚大腿上部と同じ位置であるが、センサの固定方法がポシェットではなく面ファスナとなっている。この理由は、最初の実験で使用したポシェットを固定するベルトは、長距離を歩行した場合、ベルトに緩みが発生することが確認されたためである。緩みの発生し難い身体計測用のベルトに変更するとともに、このベルトの仕様に合わせて面ファスナでセンサを固定した。

歩行認証に必要な入力信号の長さについては、歩行認証に用いる簡便さを考慮する必要がある。認証するために長い時間歩行する必要があると、認証の判断を繰り返し、その結果について多数決などで統合することで精度を向上

させる手法が可能となるが、実際の使用を考えた場合に長い期間歩く必要があり、認証システムとしては不便が残る。ズボンポケットに保持した場合、端末はどちらかの足のポケットに保持することになる。したがってセンサは、端末を保持している脚を振る動作によって生じる信号、両脚が接地している期間の信号、端末を保持していない反対側の脚を振る動作によって生じる信号を観測することになる。いずれの期間の信号にも個人の特徴があるという仮説のもと、認証に用いる信号は2歩を1周期の信号として認証に用いる方式とした。測定される歩行信号は振幅も周期も異なる準周期信号となる。このため周期の長さを固定して信号を抽出する手法では、正しく2歩分の信号を抽出することはできない。そこで本研究では先行研究の、歩行開始時間を検出するために閾値を用いる手法 [12] と、逐次、準周期を検出する手法 [15] に、行動推定に用いられる分散と Dynamic Time Warping (以下, DTW) を導入することで、準周期信号へ信号を分離し、取得する手法を考案した。以下の手順で2歩分の準周期信号に分離した。

- 1) 鉛直方向の加速度を監視し、閾値を超えることによって、自動で以下の分離を開始する。
- 2) 閾値を超えた時間から、一定時間内の振幅最大値を準周期に分離するための最初の歩行信号開始時間とする。
- 3) 次の準周期信号の開始時間を、一定時間内にある極大値をすべて候補として選出する。
- 4) 2) および極大値を中心とした一定時間内の正規化相互相関をすべて計算する。この値が最大の極大値を次の周期開始時間として選出する。この処理により、1周期の開始時間と終了時間を得ることが可能となる。
- 5) 4) で求めた準周期信号と、4) の周期の終わりから一定時間内に存在する極大値との間で、DTWによる距離計算を行い、最小となった極大値までの信号を次の周期開始時間とした。距離については、DTWを計算する信号の長さの合計で除算し、1サンプルあたりに正規化した距離を比較する。
- 6) 5) の極大値抽出と、直前の準周期信号との間でDTWによる距離計算を繰り返すことで、すべての準周期信号の抽出を行った。
- 7) 6) を2) で求めた最大値から、時間を戻る信号についても繰り返し行う。
- 8) 歩きはじめの最初の2歩は、分散が閾値を超える傾向が観察された。そこで歩行動作が開始された最初の2歩分の準周期信号を、分散が閾値を超えた信号とする。
- 9) 最初の準周期信号の信号波形が、他の準周期信号と比較して歪みが大きいことが観察された。そこで、最初の2歩は認証のデータから除外することにし、それに続く、次の準周期信号から認証に利用するとしてデータセットを収集した。

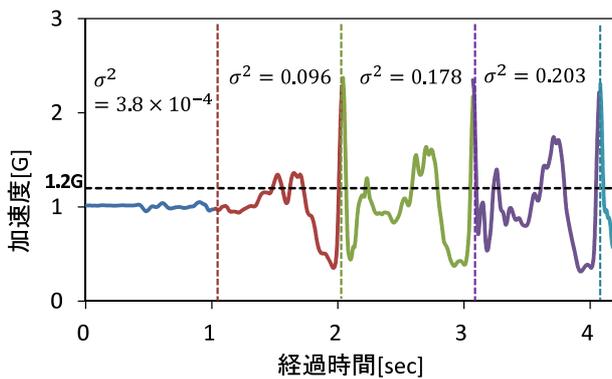


図 5 準周期信号と分散

Fig. 5 Quasi-periodic signals and their variances.

この鉛直方向の加速度信号と分散との関係を示した一例を図 5 に示す。この信号の場合、約 2 秒から開始される準周期信号および、それ以降に続く準周期信号を認証に使用するデータとして採用する。得られた周期開始時間で他の軸、他のセンサの計測信号も分離し、開始時間および終了時間が対応する計 6 種の信号を取得した。

各パラメータについては実験的に試行を繰り返し、以下のように設定した。1) については、x 軸方向（鉛直方向）の加速度の閾値を 1.2G とした。2) については、2 秒とした。3) は、2) で求めた極大値を検出する範囲を、開始時間から 0.7 秒後～1.3 秒後以内とした。4) については開始地点（最大値）および、選出した極大値を中心とした 0.6 秒間とした。8) の分散の閾値は 0.09 とした。

### 3.2 前処理

計測された加速度および角速度信号に対して、端末の振動など、ユーザの本来の動作ではないノイズの影響を軽減する。多くの研究において単純移動平均フィルタが適用される傾向があるが、信号に歪みが生じ、認証精度が悪化する恐れがある。そこで本研究では本来の信号からの歪みを抑制するため、Savitzky-Golay 法 [18] による 3 次多項式フィルタを適用した。センサの単一軸の信号による認証精度を検証し、加速度および角速度信号両方で精度が全般的に高い傾向が得られた点数を採用することとした。

### 3.3 周期の整合方法

歩行信号は前述のとおり、つねに一定の周期とはならない。図 6 は、準周期信号抽出方法で得られた同一被験者の 2 つの x 軸加速度信号を示したグラフである。実際に抽出された準周期信号の周期が異なるため、距離計算を行うためには何らかの方法で周期の長さを合わせる必要がある。歩行信号の周期時間を合わせる手法として、先行研究では以下の 3 つの方法が主に採用されてきた。

1 つ目は固定長のウィンドウにより歩行信号を取り出す手法である。この場合は固定長で毎回信号が得られるため、

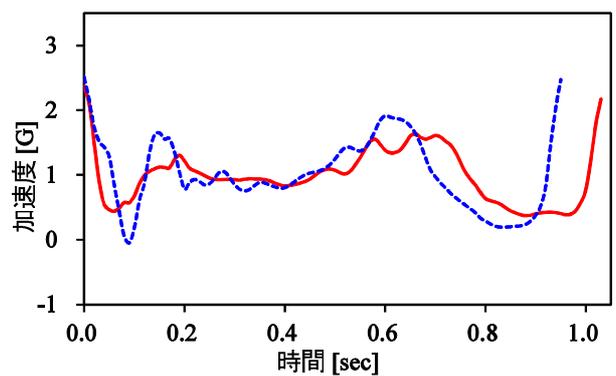


図 6 同一被験者における準周期信号の比較

Fig. 6 Comparison among quasi-periodic signals in same subject.

3.1 節で行った抽出方法や周期合わせは必要ないが、歩行信号の周期が一定でないことから、周期とウィンドウサイズとのずれが重畳され、信号の切り出される位置が大きくなる現象が発生する。本研究がユーザ固有の特徴を除くために採用する信号どうしの距離計算では、ウィンドウによって切り出される信号と、DB に登録されたテンプレート信号との間にずれが存在すると、同一人物間の適切なサンプルどうしのマッチングがなされなくなり、同一人物であっても距離が大きくなってしまふ。さらに、ウィンドウサイズが歩行周期より短くなると、1 周期の信号の一部だけが取り出され、個人の特徴が欠落し、認証精度の悪化を招く恐れが考えられる。

2 つ目の手法は抽出した準周期信号を補間と組み合わせることで線形に信号長を伸縮し、テンプレート信号と入力信号の長さを等しくする方法である。しかしながら、線形に伸縮しても、波形のずれが非線形の場合は時間の不一致が解消されない。

3 つ目は DTW により、信号を非線形に伸長し、各サンプルの対応付けを行うものである。本研究では DTW により、信号間距離を求める方法を採用した。DTW は信号間距離が最小になるように信号の長さを調整することができ、線形な信号長の伸縮では合わせることができないマッチングのずれを解決することが可能となる。長さ  $m$  の信号  $\mathbf{X} = \{x_i \mid i = 1, 2, \dots, m\}$  と長さ  $n$  の信号  $\mathbf{Y} = \{y_j \mid j = 1, 2, \dots, n\}$  の DTW による信号距離  $D(\mathbf{X}, \mathbf{Y})$  は以下で定義される。

$$D(\mathbf{X}, \mathbf{Y}) = f(m, n)$$

$$f(i, j) = \min \begin{cases} f(i-1, j-1) + \text{dist}(x_i, y_j) \\ f(i, j-1) + \text{dist}(x_i, y_j) + GP \\ f(i-1, j) + \text{dist}(x_i, y_j) + GP \end{cases} \quad (1)$$

$GP$  は非線形に信号を伸長してマッチングを行った場合のギャップペナルティである。また、 $\text{dist}(x_i, y_j)$  は、マッチングさせた  $i$  番目と  $j$  番目の振幅値の距離を示し、信号種別に応じた距離計算法を適用することで求めることが可能となる。

### 3.4 加速度信号の距離算出法

本研究で採用した加速度信号の距離計算方法について述べる。パターン認識やバイオメトリクス認証において、不要な情報を排除し、信号や画像などから固有の特徴のみを抽出することで、高い識別精度や認証精度を得る手法が存在する。その一方で、歩行認証における先行研究では、一般的な特徴を抽出するより、信号どうしのマッチングによる手法の方が高い認証精度を報告していた [9], [12]。そのため本研究でも信号どうしのマッチングによる距離計算法を採用した。計測される信号は端末の位置や姿勢の変化などが原因となり、信号そのものが変化することがあると推測されるため、本研究で採用した信号どうしの距離を基に認証を行う場合において、高い認証精度を得るための距離計算法は、この信号の変化に対応するために脚部で測定される信号の特性を考慮することが重要と考えられる。歩行は脚を振る遊脚期と足を接地した状態である立脚期の繰返しであり、各センサは歩行時の大腿部の運動を大腿部と一体となって、計測する。この運動を単純な物理モデルに置き換え、遊脚期は股関節を支点として脚部を振る運動を行っていると考え、股関節を中心とした回転運動ととらえることができる。  $r = |\mathbf{r}|$  = 一定とする回転運動の物理式にあてはめた場合、センサの  $x$  軸方向で観測される加速度の大きさは式 (2) となる。

$$a_x = r \left( \frac{d\theta}{dt} \right)^2 \quad (2)$$

同様にセンサの  $z$  軸方向は、式 (3) で示される式となる。

$$a_z = r \frac{d^2\theta}{dt^2} \quad (3)$$

次に  $y$  軸で観測される加速度信号も股関節を中心とした角度を  $\varphi$ 、鉛直方向との角度を  $\alpha$  とする円錐運動の加速度を検出すると仮定する。測定される加速度は式 (4) となる。

$$a_y = r \sin \alpha \frac{d\varphi^2}{dt} \quad (4)$$

これらの式において共通する項である  $r$  は回転の中心である股関節からの距離であり、ユーザがまったく同じ動作で歩行をしている場合においても、股関節からの距離に比例した値をセンサで測定されることを示している。このことより、ユーザがまったく同じ動作をしていても、股関節からのセンサの保持距離が異なれば、マッチングをした際に信号間距離は 0 にはならない。したがって、加速度を何らかの方法で正規化しない信号距離計算法は、センサの保持位置の変化に対応できないと考えられる。

また、実際は同一人物の歩行動作であっても、歩行測定信号の準周期性が示すように、その人物の固有の動作に、固有の動作からの「ゆらぎ」を加えた結果が測定されると考えられる。図 6 から周期の違いだけでなく、振幅の差が大きい箇所と、小さな箇所が存在することが分かる。した

がって、「ゆらぎ」は同一周期の信号において一様に加算されるものではなく、時間ごとに変化する値であると考えられる。このことより、一定の値で周期の全時間の振幅を正規化する手法は、各時刻における「ゆらぎ」がその時間の振幅値に対して一様の割合で加算されると仮定して正規化するものであり、その人物の本来の信号に正規化し、算出する距離を 0 にすることは難しいと考えられる。さらに、このような振幅手法を各軸に行うと、各軸を別々の比率で正規化することになり、同時刻における 3 軸の加速度は、それぞれ異なった比率で正規化されることになる。結果として、正規化された各軸の加速度をベクトルとして合成すると、その合成ベクトルの方向は正規化前から変化し、元のユーザの動作を正しく保存することができず、別の運動に変化させたと考えることができる。これらのことから、本研究では、同時刻に起こる各軸での加速度の「ゆらぎ」は、その合成方向を保ったまま生じると仮定し、各時刻における 3 軸加速度の成分をベクトルとしてとらえ、コサイン類似度をもとに、その逆関数を計算することで、加速度の方向の違いを評価することができる手法を用いて計算する [19]。

テンプレート信号として使用するユーザの 3 軸加速度準周期信号において、 $i$  番目に計測された加速度を要素とした 3 次元ベクトルを  $\mathbf{a}(i)$  とする。同様に、認証を試みるために入力された 3 軸加速度準周期信号における  $j$  番目の加速度を要素としたベクトルを  $\mathbf{a}'(j)$  とする。

$$\mathbf{a}(i) = (a_x(i), a_y(i), a_z(i)) \quad (5)$$

$$\mathbf{a}'(j) = (a'_x(j), a'_y(j), a'_z(j)) \quad (6)$$

以下の式により 3 軸加速度の角度差が計算される。

$$\text{dist}(\mathbf{a}(i), \mathbf{a}'(j)) = \arccos \frac{\langle \mathbf{a}(i), \mathbf{a}'(j) \rangle}{\|\mathbf{a}(i)\| \|\mathbf{a}'(j)\|} \quad (7)$$

合成した加速度の角度差を評価することで、ある時刻における入力信号の加速度の大きさに変動が生じて、3 軸の比率が保たれた変動であれば、その人物における 3 軸加速度がなす方向は変化しないため、信号間の距離は 0 となる。また、円運動の式より、センサで測定される各加速度は、股関節からの距離に比例した値と考えられることから、振幅の大きさを距離として使用しないこの手法は、センサの取り付け位置の違いに対応することが可能と考えられる。

なお、テンプレート信号と入力信号の各サンプルの対応付けを誤ることにより、角度差の評価であっても計算される距離が大きくなるのが考えられるが、信号長を正規化するのではなく、DTW を適用することにより信号ベクトルの各要素の最適な対応付けが可能となり、この問題は解決できる。また、式 (2)~(4) から、検出される加速度は、角速度もしくは、角速度の変化量である角加速度によって発生すると推測される。したがって、加速度と角速度両方

の大きさを評価すると、相関性の高さから、大きな精度向上が望めない可能性がある。本研究では加速度は大きさではなく、方向を評価することで、角速度とは独立性を高めた特徴となると考え、採用した。

### 3.5 角速度信号の距離算出法

角速度は、加速度信号とは異なり、回転の中心である股関節からセンサの取り付け位置までの距離によって測定される値が変化するという問題は発生しない。したがって、軸ごとに信号を評価することが可能であるとした。ただし、従来の研究で行われている信号の振幅を正規化せずに距離計算する方法に加え、本研究では歩行信号の振幅を正規化するため、以下の3つの方法で振幅を正規化した。

- 1) 正規化なし
- 2) 振幅絶対値最大値 (以下, MAX)
- 3) 振幅の最大値と最小値の差 (以下, PP)
- 4) 二乗平均平方根 (以下, RMS)

この正規化は、加速度信号についても行い、提案する3軸加速度角度差の有効性について検討を行った。

$q$  軸で測定された角速度テンプレート信号の  $i$  番目の振幅値を  $g_q(i)$  とする。同様に  $q$  軸角速度入力信号における  $j$  番目の振幅値を  $g'_q(j)$  とする。2つの準周期信号の距離は以下の式 (8) を式 (1) に導入することにより計算する。

$$\text{dist}(g_q(i), g'_q(j)) = |g_q(i) - g'_q(j)| \quad (8)$$

加速度についても、軸ごとに評価する場合は、同様の正規化をし、式 (8) の差の絶対値を求めることで距離を求めた。

### 3.6 複数テンプレートの採用

本研究では、複数のセンサの認証結果を統合するマルチセンサ認証とともに、テンプレートも複数使用し、認証精度の改善を試みる。入力信号については1つであるため、ユーザの利便性に影響を与えることはない。1つの入力信号に対して  $N$  個のテンプレート信号との間で DTW により距離を求め、その中央値を信号間距離とした。本研究では脚歩行認証 [12] との比較のため、 $N$  を 6 とした。

### 3.7 信号間距離の統合による識別器の学習

加速度信号および、角速度信号から算出した各種距離を統合して学習を行う。統合方法は様々提案されているが、本研究では SVM によるスコア統合手法を使用する。

ただし、本研究では入力された距離が同一人物による信号から求められたものか、異なる人物の信号間で求めたものかだけを判断するユーザ共通の識別器とするため、学習の際には DB に登録した各ユーザの距離から個人に依存した特徴を排除する必要がある。そのため、式 (1) に示した DTW によって求められた距離  $D(\mathbf{X}, \mathbf{Y})$  に対して以下の2段階の正規化処理を行う。

- 1) 2つの信号の長さの合計 ( $m+n$ ) で距離を割る。
- 2) 1) によって得られた距離をユーザごとに  $z$  標準化を行う [20]。テンプレート信号と学習用信号との間で、種々の距離計算法を適用することで平均および標準偏差を求めた。各ユーザの6周期のテンプレート信号は、認証精度を評価する際と同じ手順で1周期ずつ入れ替えを実施し、使用するすべてのテンプレートは、全学習用信号との間で計算を行った。

1) は周期が長い人物による距離は、短い人物に比べて大きくなる可能性がある。そこで1サンプルあたりの距離として、正規化を行うためである。

2) については、1サンプルあたりに正規化を行っても、「ゆらぎ」の大きい人物は、信号間の距離の平均値や標準偏差が大きくなる個人依存性が考えられる。 $z$  標準化により人物ごとの個人依存性を排除してユーザ共通識別器の学習を行う。評価用の入力信号で認証をする際も、各ユーザはこのフェーズで得られたパラメータを使用して、 $z$  標準化を行った距離を統合して認証を行う。

統合方法としては Support Vector Machine (以下, SVM) による方法 [21] や、線形ロジスティック回帰 (LLR: Linear Logistic Regression) を用いた方法 [6] などが提案されている。本研究はユーザ統一識別器であることから、入力される距離にも正規化では対応しきれない違いが存在する可能性がある。これに対応するため、汎化能力を高めることで識別精度の向上に寄与できる可能性があると考えた。そこで動基底関数 (RBF: Radial basis function) を導入した SVM により距離の統合を行う。

### 3.8 学習に使用する信号間距離数の調整

フィルタおよび正規化を行った準周期信号を、テンプレート信号として DB に登録を行う。DB に登録された本人を含む複数の人物の複数の準周期信号との間で距離計算を行い、得られた距離を識別器の学習に用いる。本人信号間についてはすべての組合せで距離を検出し学習を行う。一方、他人との距離算出については、すべての準周期信号の組合せについて距離計算を行うと、膨大な組合せ数となり、正例 (本人信号間距離) と負例 (異なる人物間の信号間距離) に偏りが生じる。学習データに偏りがある場合、SVM やニューラルネットワーク、決定木のようなアルゴリズムにおいて、識別精度が悪化することが知られている。精度を改善するためには、2クラスの偏りを解消してから学習を行うことが必要となる。本研究では数の少ない正例については、 $k$  最近傍法により得た他の正例との間に正例を追加し、数が多い負例についてはランダムに間引きを行う手法を適用した [22]。

### 3.9 入力と認証

認証システムに信号の入力があつたならば、DB からテ

ンプレートを選出し、入力信号との間で距離を計算する。求めた距離を 3.7 節の手法に従って正規化した後、識別器に入力し、判定を行う。識別関数から得られた値が閾値以下であれば本人であると判定して認証し、閾値より大きければ選出したテンプレートとは異なる人物であると判定し、認証を行わない。なお、携帯端末は本人のみで利用することが通常であることから、その所有者として認証を試みる。したがって、テンプレート選択の際に、誰のテンプレートを選択すべきであるかという課題は存在しないとする。

#### 4. 実験

本章では、3つの実験を行う。はじめに、提案した信号間距離計算法を導入することで、先行研究事例の多い腰部だけでなく、脚部においても十分に歩行認証が可能であることを示す。この実験では単独の信号間距離による認証精度の検証のため、左大腿上部と左腰部にセンサを保持した状態で計測を行う。

次にズボンポケットによる歩行認証において、予備実験および、提案するマルチセンサ認証の有効性を確認する。単独のセンサによる種々の距離計算方法との比較を行う。

最後に、ポケットの出し入れにともない、端末の保持姿勢が変化することで認証精度へ影響を与える可能性があることから、これを検証するための実験を行った。

##### 4.1 センサ装着部位における、提案手法の有効性の検討

脚部においても、提案手法導入により歩行認証が可能であることを示すため、基礎実験として各距離計算法を単独で適用した場合の認証精度を検証した。表 2 に歩行信号測定条件を示す。被験者数は 15 人である。被験者 1 人あたり、各センサの軸ごとに準周期信号 30 周期を抽出した。そのうちの 1 周期をテンプレート信号とし、本人の残りの 29 周期と他人のすべての信号は入力信号として扱う。テンプレート信号および被験者を入れ替えることで、すべての準周期信号の組合せにおける、本人間および、他人間信号距離を算出した。求めた距離に対して閾値を設定し、閾値以下であれば本人であるとして認証を受理し、閾値より大きい場合は他人であるとして認証を拒否することとした。認証精度の評価については、バイオメトリクス認証の精度を評価する一般的な指標である等価エラー率 (Equal

表 2 測定条件

Table 2 Measurement condition.

条件	設定値
センサ保持位置	左脚大腿上部/腰部左側面
計測時間	約 70 秒
被験者数	15 人
年齢	18~32 歳
使用センサ	TSND 121
サンプリング周波数	1000Hz

Error Rate, 以下, EER) により評価を行った。一例として、図 7 に脚部加速度の信号間距離を提案した 3 軸加速度角度差により求め、False Rejection Rate (以下, FRR) と False Acceptance Rate (以下, FAR) を記録したグラフを示す。図の横軸は信号間距離であり、縦軸はその信号間距離を認証のための閾値とした場合に集団に占める割合である。本研究における FRR は、同一人物間でのテンプレート信号と入力信号の距離を算出し、その距離が閾値よりも大きくなる割合である。つまり入力信号が本人のものであるにもかかわらず、他人であるとして拒否する割合を計算したものとなる。FAR は、テンプレートと入力信号で異なる人物である場合の距離を算出し、その距離が閾値以下である入力信号の割合である。入力信号が他人であるにもかかわらず、誤って本人であるとして本人認証を受け入れてしまう割合を計算したものとなる。閾値を増減させることで、各閾値における FAR と FRR を求めることができる。この FRR と FAR が等しいときの割合が EER であり、バイオメトリクス認証における認識精度を表す指標の 1 つとされている。図 7 のグラフにおける FRR と FAR の交点が EER であり、この値が小さいほど優れた認証法であるといえる。

距離計算方法による効果を比較するために、表 3 にズボン前ポケットの位置での認証を想定した大腿上部での計測

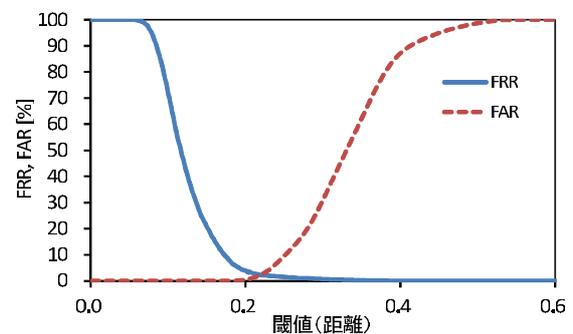


図 7 EER の例

Fig. 7 Example of EER.

表 3 左大腿上部における EER [%]

Table 3 EER [%] in left thigh.

GP	信号種別	正規化なし	MAX	PP	RMS
あり	$A_x$	7.8	13.7	17.9	5.9
	$A_y$	4.9	8.6	7.4	3.9
	$A_z$	6.8	9.5	7.5	4.0
	3 軸角度差	2.3			
なし	$G_x$	10.2	5.2	4.4	6.1
	$G_y$	11.9	7.7	6.2	6.9
	$G_z$	9.4	7.0	5.2	8.5
	3 軸角度差	2.6			
なし	$A_x$	12.6	16.6	19.5	11.1
	$A_y$	6.8	9.8	8.7	6.7
	$A_z$	8.9	10.2	8.8	5.8
	3 軸角度差	2.6			
なし	$G_x$	12.8	9.7	9.0	10.4
	$G_y$	13.5	9.9	8.7	8.4
	$G_z$	11.3	11.4	9.2	11.4

表 4 左腰部における EER [%]  
Table 4 EER [%] in left waist.

GP	信号種別	正規化なし	MAX	PP	RMS
あり	$A_x$	7.1	11.3	16.0	6.4
	$A_y$	5.3	7.3	4.5	3.5
	$A_z$	3.8	4.3	7.6	5.7
	3 軸角度差	2.9			
	$G_x$	13.4	9.5	7.9	7.0
	$G_y$	8.8	8.5	7.5	6.4
	$G_z$	10.0	6.3	5.3	4.0
なし	$A_x$	12.1	17.3	22.5	12.1
	$A_y$	6.7	9.0	6.9	6.3
	$A_z$	6.6	7.7	7.4	9.2
	3 軸角度差	5.1			
	$G_x$	13.6	12.9	12.2	12.1
	$G_y$	11.1	11.6	11.0	10.0
	$G_z$	11.1	10.2	9.2	9.1

表 5 測定条件

Table 5 Measurement condition.

条件	設定値
センサ保持位置	左脚大腿上部
計測時間	約 70 秒
被験者数	50 人
年齢	19~21 歳
使用センサ	TSND 121
サンプリング周波数	1000Hz

信号による EER を、表 4 は腰での認証を想定した測定信号による EER を示す。加速度信号においては、振幅値の正規化手法と差の絶対値による距離を併用した場合、部位による大きな認証精度の差は存在しなかった。また、脚部認証精度向上のために提案した 3 軸角度差による認証は、EER が 2.3% と最も優れた精度を示した。

#### 4.2 マルチセンサによる認証精度の検証

本研究で提案するマルチセンサ認証の有効性を確かめるための実験を行う。単独センサによる認証法に比べて、EER が低下することを示す実験を行う。

##### 4.2.1 データの取得方法

データ取得法は 4.1 節の実験方法と同じである。表 5 に歩行信号測定条件を示す。ただし、この実験のデータセットについては、携帯端末上での測定環境と同じ状況とするため、1,000 Hz のデータの間引きを行うことによって、信号の計測周波数を 100 Hz に変更した。日常における歩行信号を計測するため、被験者自身がふだん歩いている普通と思われる速度で歩くように指示をしてから計測を行った。計測開始から約 5 秒間その場で直立した状態で静止した後、定められた距離を歩行し、目的の距離を歩き終わったら計測を終了した。被験者にはメトロノームなどで、歩行のタイミングや速度を通知することは行っていない。歩行するコースについては屋内の平坦かつ、ほぼ直線状の廊下であり、測定回数は各被験者 1 回である。

表 6 正規化手法ごとの EER [%]

Table 6 EER [%] by each normalization.

	正規化なし	MAX	PP	RMS
$A_x$	10.8	19.5	25.0	<b>9.8</b>
	14.0	15.8	15.8	<b>5.9</b>
	13.9	12.1	9.7	<b>5.3</b>
$G_x$	14.3	12.8	10.3	<b>7.1</b>
	14.2	11.8	10.2	<b>8.7</b>
	20.3	13.9	12.8	<b>7.8</b>

表 7 フィルタ点数ごとの EER [%]

Table 7 EER [%] by each smoothing.

	なし	5	7	9	11
$A_x$	9.8	9.4	9.3	<b>8.8</b>	9.7
	5.9	5.9	5.8	<b>5.3</b>	5.9
	5.3	5.3	5.1	<b>4.6</b>	5.2
3 軸角度差	6.0	6.0	5.9	<b>4.8</b>	5.5
$G_x$	7.1	7.1	7.0	<b>6.6</b>	7.1
	8.7	8.7	8.7	<b>8.2</b>	8.8
	7.8	7.8	7.7	<b>7.4</b>	7.5

#### 4.2.2 正規化手法とフィルタ点数の検討

各センサから得られた信号に対して最適な正規化方法とフィルタ点数を決定するため、予備実験を行った。まず初めに、フィルタなしで各正規化の認証精度を求め、最も精度の高い認証法を決定した。次に、決定した正規化方法に対してフィルタ点数を変化させ、最適な Savitzky-Golay 法の点の数を決定した。各距離計算方法は DTW によるものである。DTW により求めた距離に閾値を設定することで、EER を求めた。なお、ギャップペナルティがない場合、認証精度が大きく悪化することが確認されたため、すべてギャップペナルティがある場合のみの結果である。また、テンプレート信号数は 1 つのみで計算を行っている。

結果を表 6 および、表 7 に示す。太字は、それぞれの実験におけるセンサ種別ごとの最高精度を示す。正規化手法としては、どの信号についても RMS が最も良い精度を得られることが確認できた。また、フィルタ点数については 9 点が最も良い結果を示した。これらの結果から、センサの軸ごとに距離計算を行う手法については、正規化手法は RMS を採用し、Savitzky-Golay 法によるフィルタについては、9 点とした。

#### 4.2.3 実験方法と結果

各被験者の 30 周期の信号に対して 5-分割交差検定を用いて評価を行うことで、学習用の信号と精度評価用の信号が重ならないようにした。各被験者は全員 DB に登録されているものとし、24 周期を事前に DB に登録された信号、残り 6 周期を認証精度評価用の信号とする。すべてのテンプレート信号間で距離計算を行い、正例数および、負例数を同数に調整した後に識別器の学習を行った。

次に入力信号に対する認証精度の評価を行う。6 つのテンプレート信号の選出方法については、すべての組合せで

表 8 センサ統合による EER [%]

Table 8 Verification results of the fusion in terms of EER [%].

統合した信号間距離	EER[%]
$A_x + A_y + A_z + G_x + G_y + G_z$	1.3
3 軸加速度角度差+ $G_x + G_y + G_z$	0.8
$A_z + G_x + G_y + G_z$	1.2

表 9 従来手法による EER [%]

Table 9 Verification results of the previous methods in terms of EER [%].

距離計算法	EER[%]
距離絶対値[12]	10.0
ZNCC $A_x$	21.3
ZNCC $A_y$	9.2
ZNCC $A_z$	13.7
ZNCC $G_x$	11.2
ZNCC $G_y$	16.2
ZNCC $G_z$	9.8

はなく、24 周期の中から、時間が連続する 6 つを選択した。ただし、交差検定により、連続する信号が入力信号であった場合は、入力信号を除いた信号の中で、準周期の開始時間が近いものから順番にテンプレート信号として選出した。

センサを統合した結果を表 8 に示す。「 $A_x + A_y + A_z + G_x + G_y + G_z$ 」および「 $A_z + G_x + G_y + G_z$ 」は、各センサ・各軸の準周期信号に 9 点によるフィルタ処理を行い、振幅の RMS 正規化および DTW による距離計算を行った距離を SVM により統合した認証結果である。一方、「3 軸加速度角度差 +  $G_x + G_y + G_z$ 」は本研究で提案する 3 軸角度差による距離計算法と角速度を組み合わせた認証結果である。加速度を方向として評価することで、歩行による脚の運動により発生する角速度と加速度の認証の独立性を高め、統合により高い結果が得られる可能性があると考え採用した。提案手法の EER は 0.8% であり、個別に距離を組み合わせた場合よりも高い精度で認証を行えることが確認できた。

比較のため、センサ単独での従来の認証手法を適用した結果を表 9 に示す。「距離絶対値」は脚部による歩行認証で EER を報告した Gafurov らの手法 [12] によるものである。これは、6 個の準周期信号の周期を正規化し、テンプレート信号の各時刻における振幅値を、同時刻での振幅中央値としてテンプレート信号を生成する。入力信号との差の絶対値を 2 つの信号間距離として認証を行う手法である。ZNCC は 2 つの信号の長さを正規化し、正規化相互相関 (Zero-mean Normalized Cross-Correlation) により認証を行う手法である。各センサ・各軸の信号ごとに算出し、類似度に閾値を設定することで EER を求めた。なお、テンプレート信号は複数ではなく 1 個とした。

表 10 測定条件

Table 10 Measurement condition.

条件	設定値
センサ保持位置	ズボン左脚前ポケット
計測時間	約 15 秒×4 回
被験者数	17 人
年齢	17~21 歳
使用センサ	TSND 121
サンプリング周波数	100Hz
スマートフォンケースのサイズ	127mm×63mm×11mm

本研究で提案する 3 軸加速度角度差と RMS 正規化を行った 3 軸角速度による距離を統合したマルチセンサ認証法の EER は 0.8% となり、従来の手法よりも大きく認証精度が改善される結果となった。

#### 4.3 ポケット収納に対する認証精度への影響の検証

本研究はズボン前ポケットでの端末保持による認証を想定している。端末をポケットから出し入れすることで、ポケット内の端末姿勢が変化し、認証精度を低下させる可能性がある。そこで、この影響を検証する実験を行った。

##### 4.3.1 データの取得方法

1 人の被験者につき 4 回の計測を実施した。携帯端末を閲覧した状態を模擬するために、1 度の計測が終了するたびに、ポケットからセンサ端末を取り出し、胸の高さまで持ち上げて視認した後、ポケットに端末を収納して次の計測を行った。センサ端末はスマートフォンと比べると小さいため、市販されているスマートフォンケースにセンサを固定して計測を実施した。計測条件について表 10 に示す。歩行するコースや歩行速度の指示、時計などの使用状況については、これまでの実験と同じである。計測信号を提案した準周期信号抽出法の適用により分離し、各被験者の各計測から 10 周期ずつの 6 軸の準周期信号を取得した。

##### 4.3.2 実験方法と結果

本実験では学習用の信号と、評価用の信号は計測回ごとに分割して 4 交差検定による評価を行った。3 回の計測から得られた準周期信号は事前に DB に登録されている学習用のデータとし、1 回の計測信号から得られた準周期信号を評価用の入力信号とした。また、評価用の計測回を入れ替えて交差検定を実施した。テンプレート信号の選出法については、周期の開始時間順に各計測から 2 周期ずつ、合計 6 個のテンプレート信号を選出し、すべての評価用信号を使用して評価した。テンプレート信号は各計測における周期の開始時間順に 1 個ずつ入れ替え、繰り返し評価を実施している。表 11 に各センサ各軸の準周期信号を平滑化点数 9、振幅を RMS により正規化をし、テンプレート数 1 で精度を評価した結果および、提案手法の 3 軸加速度角度差の結果を示す。表 12 は提案手法を含めた、各信号の統合による評価結果を、表 13 は比較のために従来手法の結

表 11 個別の信号による EER [%]  
Table 11 EER [%] by each axis of sensors.

	EER[%]
$A_x$	6.6
$A_y$	10.4
$A_z$	5.4
3 軸角度差	5.6
$G_x$	6.1
$G_y$	6.9
$G_z$	12.3

表 12 センサ統合による EER [%]  
Table 12 Verification results of the fusion in terms of EER [%].

統合した信号間距離	EER[%]
$A_x + A_y + A_z + G_x + G_y + G_z$	0.5
3 軸加速度角度差+ $G_x + G_y + G_z$	0.3
$A_z + G_x + G_y + G_z$	0.6

表 13 従来手法による EER [%]

Table 13 Verification results of the previous methods in terms of EER [%].

距離計算法	EER[%]
距離絶対値[12]	7.0
ZNCC $A_x$	19.2
ZNCC $A_y$	7.4
ZNCC $A_z$	13.1
ZNCC $G_x$	8.7
ZNCC $G_y$	10.6
ZNCC $G_z$	12.7

果を示す. 提案手法の EER は 0.3%であり, 最も高い精度を示した.

#### 4.4 実験結果への考察

本研究では, 脚部における歩行認証の高精度化を実現するために2つの手法を取り入れた. 1つ目に脚部の動作を考慮した距離計算法を導入すること. 2つ目に各センサから得られたテンプレートと入力信号間の距離をユーザ共通の識別器で統合, 判定することで認証精度を高めることである.

はじめに, 先行研究では腰部にセンサを固定した認証が主に行われているが, よりユーザにとって受け入れやすいズボン前ポケットであっても認証が可能であることを検証するために, 単独のセンサによる認証精度の評価を行った. 測定したセンサのサンプリング周波数がスマートフォンなど, 一般的な携帯端末の10倍である1,000 Hzではあるが, 提案した3軸加速度角度差による距離計算法を導入することで精度が改善され, 従来の研究で行われていた腰部での認証と同程度の認証精度を得られることが確認できた.

次に, 予備実験をもとに最適振幅の正規化法とフィルタ点数を決定し, 大腿上部において, 提案するマルチセン

サ認証による精度評価を行った. 計測した信号からデータを間引きし, サンプリング周波数を100 Hzとした信号を評価に使用した. EERは3軸加速度角度差と3軸角速度を個別に評価した距離を統合することで0.8%となり, 個別に各センサの各軸で距離を求めて統合した手法や, 単独センサによる方法, 一般的に行われる正規化相互相関による認証法, および脚部歩行認証の先行研究による手法, それらすべてよりも高い精度を得ることができた. 文献[8]より, 有意水準5%で, データ数  $N$  であるときの評価限界  $p_{min}$  は式(9)で定義される.

$$N = 3/p_{min} \tag{9}$$

この式を用いて得られた認証精度の有効性の検証を行った場合, 本人テストデータ  $N$  は50人, 本人信号30周期なので1,500となる. この実験においては  $p_{min} = 0.002$  となり, 0.2%の識別精度の差が有意水準5%で有意となる. これをふまえると, 統合した結果は, 従来手法に比べて高い識別率を得ることができたことを示している.

また, 加速度の距離計算を軸ごとに行い, 角速度と統合した結果に比べて, 3軸加速度角度差による距離を統合した結果は, より良い認証精度を示した. この結果は, 加速度を大きさではなく, 方向として評価することで角速度とは独立性の高い特徴となり, 認証精度向上に寄与した可能性が考えられる.

最後に, ポケット入れ直しによる端末姿勢の変化を検証した実験ではセンサ1軸の信号を認証に用いる手法や, 従来手法と比べて高い精度で認証できる結果を示した. 4.2節のセンサ各軸の結果と比較すると4.3節では被験者数が約1/3であるにもかかわらず, 認証精度が同程度または, 低下している信号が存在する. このことより, 端末の保持姿勢の変化は発生し, 認証精度を低下させたと推察できる. この実験においては  $p_{min} = 0.0044$  となり0.44%の識別精度の差が有意水準5%で有意となる. 加速度3軸角度差を統合した結果は, 他の信号統合方法との有意差は示さなかったものの, 高い認証精度を保った. 提案手法は複数のテンプレートを使用および, 認証結果の統合により, 保持姿勢の影響を補うことができたと考えられる. 比較のため求めた他の信号統合法も, 各信号6個のテンプレートで距離を求め, スコアを統合しており, これらも高い認証精度を維持することができたことから推察できる.

提案する3軸角度差を統合した手法は被験者数が多い実験, 端末の入れ直しを検証した実験, 両方において最も高い認証精度を示した. この結果より, 歩行認証の精度改善の手法として有効であると考えられる.

また, 今回のすべての実験を通して, 単独の信号で認証精度を評価した場合,  $A_z$  は最高精度を示した. 大腿上部正面にセンサを固定した本研究の場合, 加速度  $z$  軸は大腿部正面を通る軸であり, 前方へ歩行する際の主要な役割を

表 14 先行研究で報告された EER [%]  
Table 14 EER of accelerometer-based works.

研究	被験者数	EER[%]
Mäntyjärvi et al.[9]	36	7, 10, 18, 19
Gafurov et al.[10]	22	16
Gafurov et al.[11]	21	5, 9
Gafurov et al.[12]	50	7.3, 9.2, 14, 20
Rong et al. [13]	21	5.6, 21.1
Gracian et al.[14]	11	3
Derawi et al.[15]	60	5.7
本研究	50	0.8

担う脚の動作を計測できる。歩行において大きな動作をとまなうために、個人差も大きく表れ、他の信号と比較した場合、本研究の手法で個人差をとらえることができたことと推察する。

一方、本研究の問題点として、用いたデータセットは屋内の直線状の廊下で計測した点があげられる。実用を考えた場合、傾斜や曲がり角が存在する場合や、路面状況、服装の違い、靴の違いなどについても検討を行う必要がある。

最後に、これまで行われた歩行時の加速度信号をもとに認証した結果を表 14 に示す。精度評価に用いたデータセットが公開されておらず、異なるデータセットであるため、単純な比較は難しいが、先行研究より高い精度を示すことができた。また、同じ部位における認証方法 [12] を同じデータセットに適用した場合の比較では、その精度は大きく改善されることを示した。

## 5. まとめ

本研究ではズボン前ポケットにおける歩行認証を実現するため、従来行われてきた加速度センサだけでなく、角速度センサを統合して改善する手法を提案した。

まず初めに、2 歩 1 周期の準周期信号を認証に用いるために、その分離方法を提案した。

次に脚部においても腰部同様に認証が可能であることを示す検討を行った。時間軸のマッチングには DTW を採用し、センサごとに最適な信号間距離計算方法を提案した。これにより、脚部においても従来使用されている部位と同程度の精度で認証可能であることを示した。

センサ統合については、50 人の被験者を用いて検討を行った。まず予備実験として、フィルタの最適な点数と、各センサの振幅正規化方法および、距離計算方法を決定した。これらをもとに、各センサから得られた距離の統合方法に SVM を採用し、ユーザ統一の識別器により認証を行った。信号間距離を、2 つの信号の合計長さで正規化し、さらに、テンプレート信号の z 標準化により、ユーザの個人差を排除した距離とした。これらの提案手法を導入することで、脚部歩行認証における EER は 0.8% となり、従来手法に比べて大きく改善されること示すことができた。

最後に、端末の出し入れにともなう精度への影響を検証したが、提案手法において認証精度の低下は起こらず、高

い認証精度を保った。これらにより、同じズボンを着用し、方向（上下や表裏）が同一の状態でも端末を所持した条件下において、提案手法は歩行認証の精度改善に有効であることを示すことができた。今後は、より実際の使用に即した条件下でデータを収集し、精度の検証と向上方法を検討する予定である。

## 参考文献

- [1] Akl, A., Feng, C. and Valaee, S.: A Novel Accelerometer-Based Gesture Recognition System, *IEEE Trans. Signal Processing*, Vol.59, No.12, pp.6197–6205 (2011).
- [2] 喜田義弘, 神里麗葉, 朴 美娘, 岡崎直宣: マルチタッチ操作を利用したリズム認証方式の検討, 情報処理学会研究報告 MBL, Vol.70, No.19, pp.1–7 (2014).
- [3] 厚生労働省: 平成 25 年国民健康・栄養調査結果の概要, 入手先 (<http://www.mhlw.go.jp/file/04-Houdouhappyou-10904750-Kenkoukyoku-Gantaisakukenkouzoushinka/0000068070.pdf>) (参照 2015-01-27).
- [4] 澤田武士, 柳原 正, 三宮千尋ほか: 加速度センサの装着依存性が小さい歩行認証技術の研究, 第 18 回バーチャルリアリティ学会大会論文集, pp.394–397 (2013).
- [5] 半谷精一郎, 映像情報メディア学会 (編): バイオメトリクス教科書, コロナ社 (2012).
- [6] Fernando, A. et al.: Dealing with sensor interoperability in multi-biometrics: The UPM experience at the Biosecure multimodal Evaluation 2007, *Proc. SPIE Defense and Security Symposium, Workshop on Biometric Technology for Human Identification*, pp.69440J–69440J (2008).
- [7] Xhiao, Z. and Bir, B.: Feature fusion of side face and gait for video-based human identification, *Pattern Recognition*, Vol.41, pp.778–795 (2008).
- [8] 市野将嗣, 坂野 鋭, 小松尚久: 唇動作と音声を用いたカーネル判別分析による個人認証方式, 電子情報通信学会論文誌 D, Vol.J92-D, No.8, pp.1363–1372 (2009).
- [9] Mäntyjärvi, J. et al.: Identifying users of portable devices from gait pattern with accelerometers, *Proc. IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing*, pp.973–976 (2005).
- [10] Gafurov, D., Sneekenes, E. and Buvarp, T.E.: Robustness of biometric gait authentication against impersonation attack, *Proc. 1st International Workshop on Information Security (IS '06), OnTheMove Federated Conferences (OTM '06)*, Vol.4277, pp.479–488 (2006).
- [11] Gafurov, D., Helkala, K. and Sondrol, T.: Gait recognition using acceleration from MEMS, *Proc. IEEE International Conference on Availability, Reliability and Security*, pp.479–488 (2006).
- [12] Gafurov, D., Sneekenes, E. and Bours, P.: Gait authentication and Identification using wearable accelerometer sensor, *Proc. IEEE Workshop on Automatic Identification Advanced Technologies*, pp.220–225 (2007).
- [13] Rong, L. et al.: A wearable acceleration sensor system for gait recognition, *Proc. IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications*, pp.2654–2659 (2007).
- [14] Gracian, T., Alberto A. and Gonzalo, B.: Application of the computational theory of perceptions to human gait pattern recognition, *Pattern Recognition*, Vol.43, pp.2572–2581 (2010).
- [15] Derawi, M.O., Bours, P. and Holien, K.: Improved Cycle Detection for Accelerometer Based Gait Authentica-

tion, *Proc. 6th International Conference on Intelligent Information Hiding and Multimedia Signal Processing (IIH-MSP '10)*, pp.312-317 (2010).

- [16] Soumik, M., Nandy, A., Chakraborty, P., et al.: Gait Based Personal Identification System Using Rotation Sensor, *Journal of Emerging Trends in Computing and Information Sciences*, Vol.3, No.3, pp.395-402 (2012).
- [17] 村松大吾, 本郷保範, 松本 隆: ユーザ共通 Fusion モデルを用いたオンライン署名認証, *電子情報通信学会論文誌 D*, Vol.J90-D, No.2, pp.450-459 (2007).
- [18] Savitzky, A. and Golay, M.J.E.: Smoothing and differentiation of data by simplified least-squares procedures, *Anal. Chem.*, Vol.36, No.8, pp.1627-1639 (1964).
- [19] Okumura, F. et al.: A Study on Biometric Authentication based on Arm Sweep Action with Acceleration Sensor, *Proc. International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communications, 2006 (ISPACS '06)*, pp.219-222 (2006).
- [20] 村松大吾, 岩間晴之, 木村卓弘ほか: 一歩行映像から取得される複数特徴を用いた個人認証, *電子情報通信学会論文誌 A*, Vol.J97-A, No.12, pp.735-748 (2014).
- [21] Yacoub, S.B.: Multi-Modal Data Fusion for Person Authentication using SVM, *Proc. 2nd Intelligent Conference Audio-Video Based Biometric Person Authentication*, pp.25-30 (1999).
- [22] Chawla, N.V. et al.: SMOTE: Synthetic Minority Over-sampling Technique, *Journal of Artificial Intelligence Research*, Vol.16, pp.321-357 (2002).



今野 慎介 (正会員)

2002年北海道大学工学部システム工学科卒業。2004年同大学大学院工学研究科システム情報工学専攻修士課程修了。同年富士通株式会社入社。2006年より函館工業高等専門学校情報工学科助手, 助教を経て, 2013年より同校

生産システム工学科助教。電子情報通信学会会員。



中村 嘉隆 (正会員)

2002年大阪大学基礎工学部情報科学科卒業。2007年同大学大学院情報科学研究科博士後期課程修了。同年奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科助教。2010年大阪大学大学院情報科学研究科特任助教。2011年より公

立はこだて未来大学システム情報科学部助教。博士(情報科学)。センサネットワークセキュリティに関する研究に従事。IEEE 会員。



白石 陽 (正会員)

2002年慶應義塾大学大学院理工学研究科博士課程単位取得退学。東京大学空間情報科学研究センター研究機関研究員, 助手, 助教を経て, 2009年より公立はこだて未来大学助教, 2011年より同大学准教授。博士(工学)。

データベース, 高度交通システム, 都市センシング, 地理情報システムに関する研究に従事。電子情報通信学会, 地理情報システム学会, ACM 等各会員。



高橋 修 (正会員)

1975年北海道大学大学院工学研究科修士課程修了。同年電電公社(現, NTT)横須賀電気通信研究所入所。コンピュータネットワークの研究・開発・標準化に従事。NTTドコモを経て, 2004年より公立はこだて未来大

学教授。博士(工学)。本会業績賞。電子情報通信学会, IEEE 各会員。本会フェロー。