

# WARAJI:曲げセンサを用いた路面状態の推定が可能な センサ内蔵靴

溝口 泉<sup>†1,a)</sup> 井上 亮史<sup>†1</sup> 星 徹<sup>†1</sup>

**概要:** 足の不自由な人向けや利便性を目的とした、段差なしルート検索や雨に濡れないルート検索などが行える歩行者向け地図サービスが増加している。このような特殊な地図サービスは調査や更新が困難な路面の形状データや建造物の情報を必要とする。本研究では、曲げセンサと加速度センサを内蔵した、装着者の爪先立ちやベタ足歩きといった歩行動作と路面の歩きやすさの推定が可能な靴 WARAJI を提案する。提案手法は靴の足底部に設置した曲げセンサにより、足の関節の動きを認識し、歩行動作を推定することができる。歩行動作は路面の状態に左右されることから、路面の状態の推定を行う。本研究では、最終的に3種類の歩行状態を約70%の精度で分析することに成功した。

## WARAJI: Gait and Road Assessment Shoes with Flex Sensor

MIZOGUCHI IZUMI<sup>†1,a)</sup> INOUE AKIFUMI<sup>†1</sup> HOSHI TOHRU<sup>†1</sup>

**Abstract:** Some pedestrian navigation services can suggest specific routes. For example, roofed routes are useful for those who don't want to get the dress wet. Barrier-free routes are useful for the elderly and the disabled. Such services require a geographical database that has the information about the detailed road surface and the shape of buildings. However, it is hard to collect and update them. In this paper, we propose sensor-built-in shoes that can collect the condition of the road and gait characteristics by walking with the shoes on. The collected information is automatically uploaded to a web service, and is visualized on a map. We developed a prototype system "WARAJI". In the classification experiment, we confirmed to classify 3 steps at about 70%.

### 1. はじめに

携帯電話やスマートフォンのように、GPSシステムの搭載された小型情報端末が普及したことにより、都市圏における歩行者ナビゲーションシステムは利用頻度が高くなってきている。近年では、単に最短距離や最短時間などの検索を行うだけでは無く、屋根のある場所を優先し雨に濡れずに目的地へ向かうためのルートを検索できる機能や、足が不自由である人のために段差を通らない機能といった特徴的な機能を持ったサービスが登場している。これらのサービスは、階段や坂などの道路の形状やその範囲などを保持するデータベースによって成り立つものである。現在

このようなデータを収集するためには、路面形状を認識するための専用の撮影機材を搭載した車 [1] の使用や、担当者が実際に現地へ赴いて路面や建造物の情報を記録するといった手法が取られている。しかし、これらの手法でのデータ収集は、1度あたりの金銭的・人的・時間的コストが非常に大きく、またデータの更新頻度が低くなってしまおうという問題がある。

データ収集の効率化のため、既存のサービスや研究では、主に画像認識やセンサによる斜度や凹凸などの路面の形状の認識が行われてきている。これらにより収集されるデータは月・年単位でしか変化しないような時間経過による変化の少ないものであり、分・時間単位のような短い時間間隔で変化していく濡れや凍結のような路面の状態や、工事中などで障害物がある場所などのデータ収集に関する研究は少ない。本研究では、靴に曲げセンサ及び加速度センサ

<sup>†1</sup> 現在, 東京工科大学  
Presently with Tokyo University of Technology  
<sup>a)</sup> c0111512ba@edu.teu.ac.jp

を取り付けることにより、装着者の足裏の動きと歩行動作を取得する。そして得られたデータの分析を通して、路面の状態及び形状を推定・共有することができるセンサ内蔵シューズ WARAJI を提案する。WARAJI は既存の路面認識手法と違い装着者の歩行状態に着目する。雪上や氷上、水たまりなどの上では爪先立ちで歩いたり、ベタ足で歩くといったように歩行状態は変化する。このことに着目し、曲げセンサを足底に埋め込むことで加速度センサなどでは取得しにくい足裏の形状変化を詳細に取得することで、路面の歩きやすさや路面に付随する状態の変化を推定する。また WARAJI より得たデータをインターネット上に蓄積・共有することにより、時間変化に対応しやすく更新頻度の高い地図アプリケーションを作成することが可能である。

## 2. 関連研究

靴に取り付けたセンサで路面の形状や状態を認識する研究としては、佐藤らの靴型センサによる路面センシングの研究 [2] がある。この研究では加速度センサと角速度センサを用いて、歩行者の足が着地する時の靴の動きを認識することにより、路面の形状を認識している。しかし、加速度センサに必ずしも反応しない爪先立ちなどの歩き方や、水たまりなどの濡れや雪や水による凍結などの認識はされておらず、データの共有もされていない。

同じような研究として、Sim らの段差認識の研究 [3] がある。この研究では靴に載せた加速度センサにより、段差を認識するアルゴリズムを提案している。加速度センサの値の変化を利用して足の落下や上昇を検知することで段差の有無を認識する事ができる。やはり路面形状の認識が主となっており、路面の状態の変化などについては認識することができない。

データ共有による歩行者支援を行う研究として、Shubham らの LookUp[4] がある。この研究では靴に取り付けた加速度センサにより段差とカーブを認識し、近くを通る時スマートフォンの画面に警告が出るというものである。この研究では近くを通ると画面に警告が出るが、地図上で見ることができないため、ルートを決める時の助けにはならない。

## 3. WARAJI:曲げセンサを用いた路面状態の推定が可能なセンサ内蔵靴

本研究では、加速度及び曲げセンサを取り付けた靴を用いて、足裏の動作の認識を行い装着者の歩行状態を推定する。得られたデータを送信・共有して、地図上に表示するシステムを提案する。

### 3.1 システム概要

本システムの概要を図 1 に示す。本システムはセンサ内蔵シューズと Android 端末、サーバで構成される。センサ

内蔵シューズは加速度センサ、BluetoothLE モジュール、マイクロコンピュータ、及び曲げセンサによって構成される。



図 1 システム概要

本システムの処理の流れを以下に示す。

- (1) センサ内蔵シューズを装着し歩行する
- (2) 歩行中の加速度及び曲げセンサのデータを、Bluetooth 経由で Android へ送信する
- (3) 受信した加速度データを 1 歩毎に分割するため、ステップ認識を行う
  - 分割したステップデータにおける左右の曲げセンサの変化の違いを利用してその場の歩きやすさを推定する
  - それぞれのステップデータごとに曲げセンサ値を元に歩行動作を推定する
- (4) 一定以上の距離を移動する度、それまでの分析結果に位置情報を付加してサーバへ送信する
- (5) Android 端末より送られてきたデータをサーバ上のデータベースに保存する

加速度センサは足全体の動きを把握することに優れているが、爪先立ちなどの歩行動作の認識を行うことが難しい。そこで曲げセンサを利用して足裏の動きの変化を認識することにより、装着者の歩行状態を詳細に認識し、歩行状態の変化から水たまりや雪などの路面の状態を推定することが可能になる。また WARAJI を多くの人が履くことにより、人が通った場所のデータが高い頻度で更新される。これにより短い時間で変化してしまう水たまりなどの情報を取得することが可能となる。

以下、図 1 の③における推定の流れについて説明する。

### 3.2 ステップ認識手法

通常の歩き方における加速度 - 時間グラフの変化は図 2 のようになると考えられる。通常歩く動作は①足を下ろす、②足を地面に付ける、③足をあげる、を繰り返し、足の上げ下げの間には④地面から足が離れる、部分が存在す

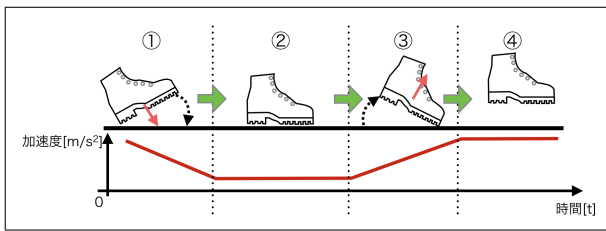


図 2 ステップ時の加速度グラフ

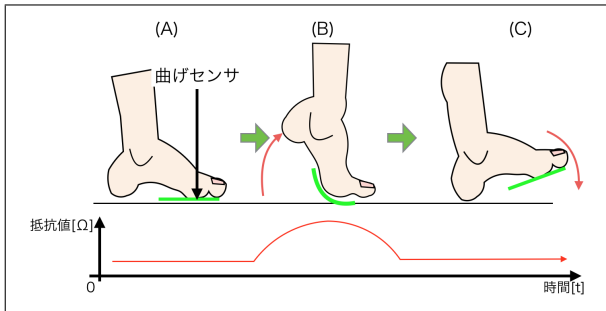


図 3 歩き動作における曲げセンサの変化

る。このことから②の時、加速度の変化率が0に近くなる時間がある。この変化を利用することにより、足が接地している時間と歩数を算出することが可能である。

### 3.3 装着者の歩行状態認識

センサデータを1歩毎のステップに分析した後、歩行状態の認識を行う。本研究においては、歩行状態を以下の2つから認識する。

- 両足の動きのバランス
- 足全体の形状の変化

両足の動きのバランスは歩きやすい場所においては安定するが、歩きづらい場所では不安定になる。このことを利用し両足の動きのバランスを測ることで歩きやすさの推定を行う。また、足の形状の変化を認識することにより、爪先立ちなどの歩行動作を推定する。歩行動作は水たまりの存在などにより変化するため、この変化を利用して、路面の状態を推定することができる。歩行動作を行う時、足底に設置した曲げセンサの抵抗値は図3の様に変化すると予想できる。図3-(B)のように足で蹴り出す時、足の関節が大きく曲がるため、抵抗値が大きくなる。このことを利用し、装着者の歩行状態の認識を行っていく。

#### 3.3.1 両足の動きのバランスの認識

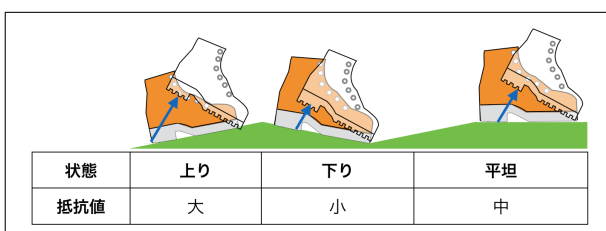


図 4 安定した場所を歩いた時の変化

足を着いた場所の角度によって、蹴り出す時の足関節の曲がり具合は図4のように違いが出ると考えられる。足が上向いている時は大きく曲げる必要があるが、下向いている際は大きく曲げる必要がない。このことから平坦な安定した場所、例えば舗装された道路・建物の中などでは両足の曲げセンサの変化はほとんど同一のものとなることが予想できる。逆に、凹凸があるような不安定な道においては、左右の足の着地している場所の状態が異なるため、曲げセンサの取る値は両足で違いが出ると予想できる。

よって1歩毎の両足の曲げセンサの値の変化を比較することによって、歩いている場所が安定した場所か、凹凸がある場所かを推定することが可能である。

#### 3.3.2 足の形状変化の認識

本研究における歩行動作は以下の3つとする。

- (1) 通常の歩き方
- (2) 爪先立ち歩き
- (3) ベタ足歩き

爪先立ちで歩く状況は、水たまりや汚れなどがある状態と考えることができ、ベタ足で歩いている状況は、路面が滑りやすい状況であると考えられる。よって歩行動作を推定することを通して、路面の状態・障害物の有無の推定を行えると考えられる。図3で示したように足関節が大きく曲がっている時、曲げセンサは大きな値を出力する。よって接地時の抵抗値が高い状態であるならば爪先立ちをしていると考えられる。同じように、接地時の抵抗値が低い状態であるならばベタ足でいると考えることができる。

### 3.4 歩行状態データの共有

収集した歩行状態データは、スマートフォンを經由して送信する。スマートフォンを利用することで、収集した情報はリアルタイムでユーザが意識する事無くインターネット上に蓄積・共有することが可能である。また単純に歩行状態から得られるデータだけでなく、最終的には天候や気温などのデータベースと連携を行うことにより、より精度を高めた情報の提供が可能になると考えられる。

## 4. 実装

本研究で提案したシステムのプロトタイプを実装した。実装環境はハードウェアとソフトウェアに分けて説明する。ハードウェアでは本システムで使用した機材について、ソフトウェアでは、センサ値の解析処理部、及びアプリケーションの処理部について説明する。

### 4.1 ハードウェア

#### 4.1.1 センサ内蔵シューズの実装

本研究を進めるにあたり、それぞれのセンサの実際の動作を確認するため、図5に示すように、ランニングシュー



ズを利用したセンサ内蔵シューズを作成した。足の動きを認識するため、靴紐があり柔軟性のあるランニングシューズを利用して作成した。

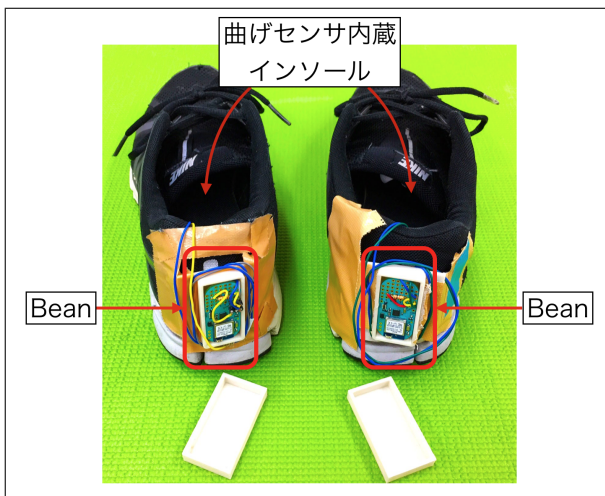


図 5 センサ内蔵シューズ外観

#### 4.1.2 曲げセンサの搭載方法

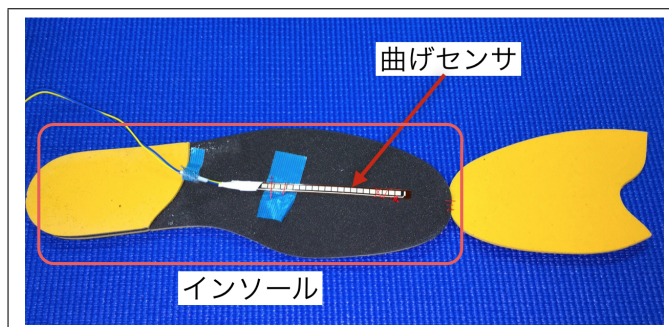


図 6 曲げセンサ搭載方法

曲げセンサの搭載方法を図 6 に示す。歩き動作を行うにあたって、人間の足で極端に変化する部分は足の関節部である。そのため曲げセンサは足関節の曲がり具合を取得できるようにインソールの前方部に取り付けた。

#### 4.2 ソフトウェア

本システムのソフトウェア構成を図 7 に示す。まず曲げセンサを接続した Bean より曲げセンサの値、及び内蔵の加速度センサの値を BluetoothLE によるシリアル通信で Android へ送信する。その後 Android 内でステップの分析を行い、路面状態を推定する。推定された結果は JSON 形式でサーバへ送信される。Bean からの Bluetooth 経由でのセンサデータ送信間隔は 1 秒あたりおよそ 10 回の 10 Hz である。

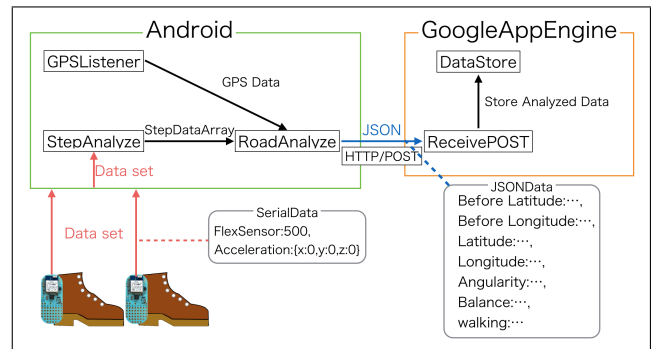


図 7 ソフトウェア構成

#### 4.3 Android アプリケーション

サーバと Bean 間のデータ送信の中継に、Android を使用する。Android アプリケーションの実行画面を図 8 に示す。左右の靴のマイコン Bean からのデータ及び現在の位置の座標情報を画面に表示することができる。Bean からのデータを動的に分析し続け、ステップが認識されると、それを配列に追加する。位置情報の取得間隔は最低 3m 以上の移動と 3 秒以上の間隔を開けて行い、位置情報が更新される度、それまでのステップを保存した配列を分析し、歩き方・斜度・凹凸、そして位置情報をサーバへ送信する。

#### 4.4 データ共有地図アプリケーション



図 9 地図アプリケーション実行画面

地図画面の動作を図 9 に示す。本アプリケーションは GoogleAppEngine 内で動作しており、規定したアドレスにアクセスすることにより、図のような地図を表示することができる。分析された情報はマーカーの形で表示され、選択することで閲覧できる。

#### 4.5 分析手法

本システムにおける分析は、まず時系列データをセグメント化するため、まず 1 ステップごとに分類するステップ分析を行う。その後、左右のステップを比較することによる路面安定度分析、及びそれぞれのステップごとに分析す

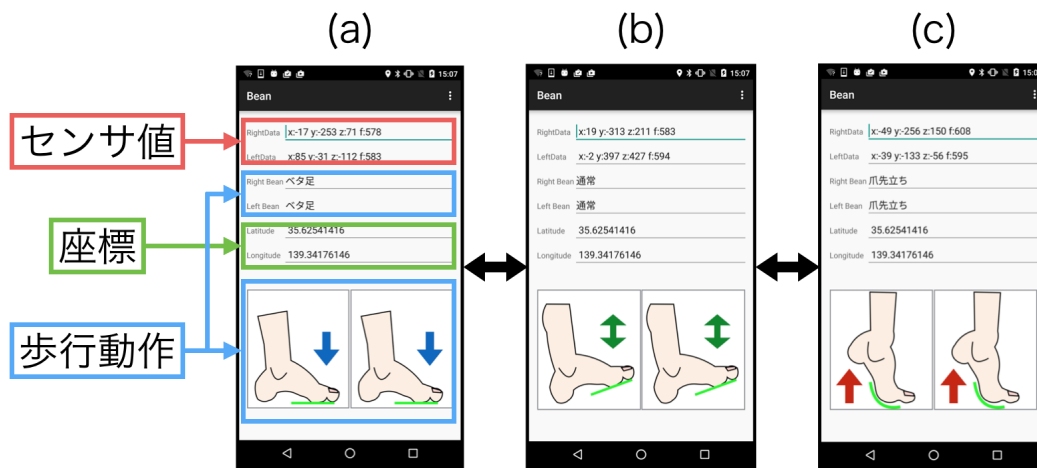


図 8 Android アプリケーション実行画面

る歩行動作分析という順番で分析・分類を行う。

#### 4.5.1 ステップ分析

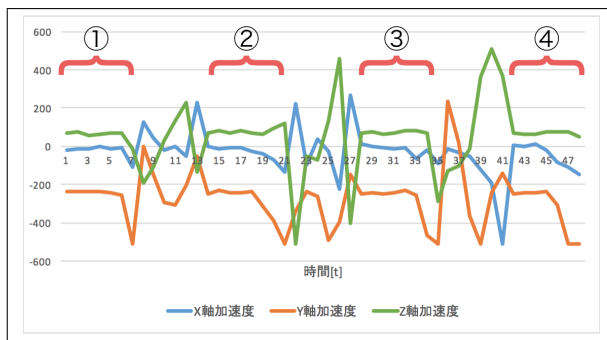


図 10 ステップ判定グラフ

図 10 は平坦な安定した場所を、プロトタイプ of 靴型センサで歩いた時の 3 軸加速度の変化である。赤線の 1~4 で囲んだ箇所は足が着地していた時である。このことからわかるように、足が着地している時、加速度の変化率は 0 に近くなっている。このことを利用し、加速度の変化率が一定以下である状態が一定時間以上続いた時、足が着地していると判断することにより、ステップ分析を行う。ステップごとの分解には、3 軸加速度から算出した全体としての加速度  $Acc_{all}$  を使用する。 $Acc_{all}$  は以下の式により算出した。

$$Acc_{all} = \sqrt{Acc_x^2 + Acc_y^2 + Acc_z^2} \quad (1)$$

図 10 から読み取れるように、着地している時の加速度の変化はそれぞれ 100 未満である。そして足を上げ下ろしする間はそれを遥かに超える 200 近い変化量が観測されている。そして着地している時間をデータを分析して算出した所、最低 3 回分であった。以上のことより、3 回以上変化率が 100 未満の状態が続いた時、その時間をステップとして認識することとした。

#### 4.5.2 路面の歩きやすさ分析

左右のステップの類似度を算出するため、動的時間伸縮法を使用する。動的時間伸縮法は 2 つの時系列データの各点を総当りで比較し、最短となるパスを発見した上で距離を定義するものである。左右のステップデータは系列長に差がでてしまうため、今回この手法を使用して、類似度を比較する。

プロトタイプで安定した場所（室内の廊下）及び不安定な場所（未舗装の荒れ道）でそれぞれ 30 歩歩行し、動的時間伸縮法で求めた数値を平均化した所、安定した場所で 139.67、不安定な場所で 215.6 となった。これを利用し 2 つの値の中間を今回閾値として安定度の指標とする。

#### 4.5.3 歩行動作分析

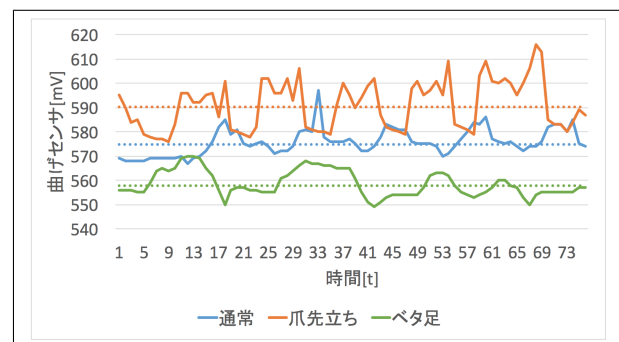


図 11 歩行動作の比較

図 11 は先述した 3 つの歩き方でそれぞれ 5 歩進ませた時のグラフである。実線は実際のデータ、破線は全体の平均値である。このグラフからもわかるようにそれぞれの歩き方における平均値は 10~20 程度の隔りがある。このことを利用し、3 軸加速度・曲げセンサそれぞれの平均・最大・最小値を特徴ベクトルとして、12 次元の特徴ベクトルを算出した。この特徴ベクトルを使用し SVM による学習を行い、3 クラスへの分析を行う。今回予備実験としてプロトタイプでデータを収集した結果、ステップ中の曲げ

センサ平均値を  $F$  とすると、右足・左足それぞれで表 1 のようになった。左右の曲げセンサは、個体差があり、平坦な時の出力が同一でなかったため、左右それぞれにおいて学習を行い分類器を作成した。

表 1 歩き動作分析における閾値

歩き方	左足閾値	右足閾値
つま先立ち	$F > 577$	$F > 583$
通常	$577 > F > 572$	$583 > F > 573$
ベタ足	$572 > F$	$573 > F$

## 5. 評価

本研究では、4章で挙げた3つの分析手法について、認識精度を検証する必要がある。はじめにステップ認識の精度について検証を行い、その後路面安定度及び歩行動作分析について精度評価を行った。

### 5.1 ステップ認識の精度評価実験

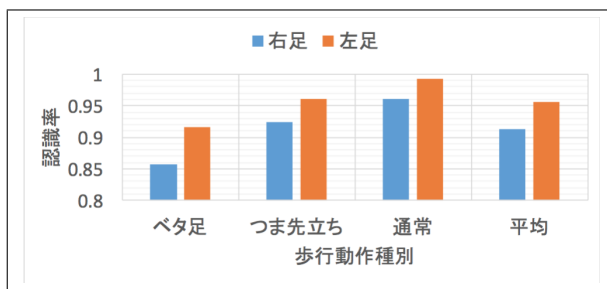


図 12 ステップの認識精度

#### 5.1.1 方法

WARAJI を履いた状態で、通常・爪先立ち・ベタ足歩きの3種類の歩行動作をそれぞれ10歩ずつ10セットの30セットを被験者に歩いてもらった。実験環境は、平坦かつ安定した室内で行い、被験者には3種類の歩き方を普段通りに行ったもらった。被験者は2123歳の健康な男性6名で行った。その後、提案手法によるステップ分析を行い、合計ステップ認識数を合計ステップ数1800で割ることにより、認識率を求めた。

#### 5.1.2 結果

結果を図 13 に示す。全体では約 93 % の精度でステップを認識することに成功した。ベタ足時の認識率が低い原因としては、ベタ足ではゆっくりと歩く被験者が多く存在したため、足を上げている際の静止時間がステップとして認識されてしまったためであると考えられる。また爪先立ちで歩行する場合、被験者によってはバランスが不安定になってしまい、加速度が安定しなかったため認識率が落ちてしまっていると考えられる。

## 5.2 歩行動作認識精度評価実験

### 5.2.1 方法

ステップ認識の精度評価で収集した1800歩分のステップデータを分析し、3つの歩法それぞれにおける曲げセンサの抵抗値の平均値を算出した。その後平均値の中央値を閾値として設定し、分類を行い、認識の精度を求めた。

### 5.2.2 結果

結果を図 13 に示す。両足を総合した場合、ベタ足での歩行の認識率は56%、爪先立ちの認識率は51%、通常の歩き方は34%となった。認識率が低い原因としては、被験者それぞれの歩き方に大きな個人差が存在したことが挙げられる。例として被験者Cは力強く歩くタイプであったため、曲げセンサの反応が多く、爪先立ちの認識は100%となったが、ベタ足歩きが全て通常の歩行として認識されてしまっている。今回は一意な閾値を求めようとしたため、全体での認識率は低くなってしまった。しかし個人に対するキャリブレーションを行った場合、認識率は80%以上を記録することができた。このことから歩行状態の認識においては、個人差を吸収する手法がキャリブレーションが必要であると考えられる。

## 5.3 路面の歩きやすさ認識精度実験

### 5.3.1 実験方法

室内の安定した歩きやすい場所、及び屋外の木の根が出ているような不安定で歩きにくい場所それぞれで30歩ずつ被験者に歩行してもらい、それぞれにおける左右のステップを動的時間伸縮法で比較した。その後左右のステップ類似度の平均値を閾値として分析を行った。実験は22~23歳の男性4名を対象として行った。

### 5.3.2 結果及び考察

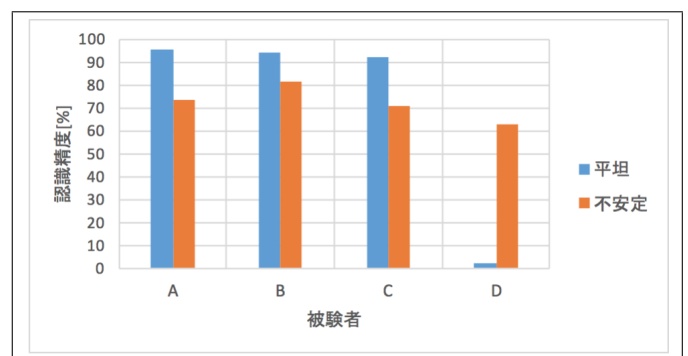


図 14 場所別の認識精度

表 2 場所別の認識率

状況	A	B	C	D
安定	95.65	94.00	92.00	2.04
不安定	73.33	81.25	70.58	62.50

実験結果を図 14 および表 2 に示す。図表から読み取れ



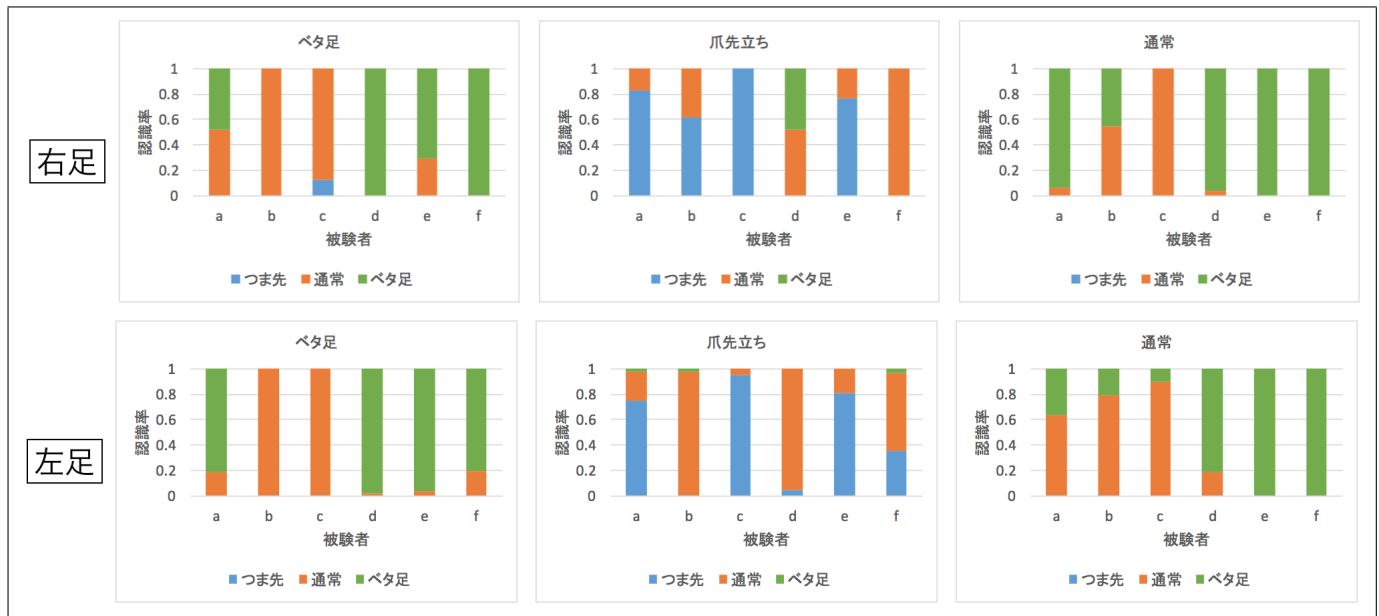


図 13 歩行動作の認識精度

るように、被験者 A~C は 70 % 以上の精度で認識することができ、十分な認識率を達成することができたと言える。しかし、被験者 D は 2 つとも認識率が低く、平坦であることの認識はほぼできていない。これは被験者 D の歩き方が特徴的であるからであると考えられる。被験者 D を除くと平坦であることの認識は 90 % を超え、不安定なことの認識率も 70 % を超えている。実際の環境で不安定や安定な場所は 1,2 歩で変化するものではないと考えられるため十分な認識率を達成することができた。

## 6. おわりに

本論文では、曲げセンサを用いて装着者の歩行状態を認識することによる路面の状態を取得し、スマートフォンを経由することでリアルタイムでの地図データ収集共有を行うことができるセンサ内蔵靴 WARAJI を提案した。WARAJI を用いた評価実験により、ステップの認識・歩きやすさの認識については十分に認識を行うことが可能であることが示された。歩行動作の認識については、一意な閾値を求めることはできなかったが個人個人に合わせたキャリブレーションを行うことにより 8 割以上の高い認識率で 3 種類の歩行動作を認識可能であることを示した。

今後の課題として、ステップ認識の更なる精度向上、及び歩行状態認識のための個人キャリブレーションを自動で行う方法が求められる。

## 参考文献

- [1] 三菱電機 三菱モービルマッピングシステム高精度 gps 移動計測装置  
<https://www.mitsubishielectric.co.jp/mms/>.
- [2] 佐藤匠, 廣森聡仁, 山口弘純, 東野輝夫. 靴型ウェアラブルセンサによる通行路状況推定手法の提案. 研究報告グループウェアとネットワークサービス (GN), Vol. 2015, No. 9, pp. 1-8, jan 2015.

- [3] etal Sim SY. Fall detection algorithm for the elderly using acceleration sensors on the shoes. *Engineering in Medicine and Biology Society, EMBC, Annual International Conference of the IEEE*, 2011.
- [4] Shubham Jain, Carlo Borgiattino, Yanzhi Ren, Marco Gruteser, Yingying Chen, and Carla Fabiana Chiasserini. Lookup: Enabling pedestrian safety services via shoe sensing. In *Proceedings of the 13th Annual International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services*, MobiSys '15, pp. 257-271, New York, NY, USA, 2015. ACM.