

# 振動発電素子内蔵靴から得られる 発電特徴に基づく路面種別推定手法

國武勇希<sup>1,a)</sup> 大西鮎美<sup>1,b)</sup> 寺田 努<sup>1,c)</sup> 塚本昌彦<sup>1,d)</sup>

**概要：**移動経路における坂道や階段の有無といった路面情報は、身体障害者にとって重要な情報であり、これらが記されたバリアフリーマップは近年普及しつつある。このような路面情報の収集には労力がかかるため、先行研究ではセンサを搭載した靴を用いた自動収集が試みられている。しかし、これらのシステムは普及しておらず、その大きな理由の一つにバッテリーをこまめに充電しなければならないことが挙げられる。そこで本研究では、振動発電モジュールが内蔵された靴を用いて、着地時の衝撃で発電して得られた発電情報に基づき路面種別を推定し、推定結果を収集するシステムを提案する。提案システムの路面種別推定精度を評価した結果、自分自身のデータを学習データに用いて機械学習モデルを構築した場合にはバリアフリーマップ作成に必要な8種類の路面を約63%の精度で推定できた。

## 1. はじめに

路面に関する情報は、高齢者や身体障害者、怪我をしている人などが安全な移動経路を知るうえで重要である。例えば、坂道は傾斜をとまなう路面であり車椅子を利用している人の移動経路に適していない。バリアフリーマップの中には、このような路面情報を含んだものが存在しており、狛江市が提供しているココシルこまえバリアフリーナビ [1] はスロープの少ないルートを提示できる。このようなバリアフリーマップは近年普及しつつある。

路面情報を含むバリアフリーマップを作成するためには路面情報の収集が必要であるが、路面情報の収集にはいくつか課題がある。まず、バリアフリーマップの一般的な作成手法では、サービス作成に携わる人々が街を歩いて地図上に路面情報を記録していく必要があるため、膨大な労力がかかってしまう。また、砂利道が平地に舗装されるといった路面情報の更新はしばしば起こるが、これらの情報はボランティアによる情報提供の後に更新される。したがって、路面の形状変化に対して更新が遅れやすい。

近年では、靴にセンサを取り付けた靴型ウェアラブルデバイスを用いて路面の推定を行う手法が提案されており [2], [3], [4], これらの手法を用いることにより路面情報における地図データ作成の労力を減らすことができる。し

かし、そのような靴型ウェアラブルデバイスを用いた路面推定手法では、デバイスはバッテリーによって駆動されているため、バッテリーの充電が不足するとシステムを駆動できない。常時システムを駆動し続けるためにはこまめな充電が必要であるが、日々デバイスを充電することはユーザにとって負担である。

バッテリー充電問題の解決にむけて、環境発電技術を活用すれば、システム自体で発電して消費電力をまかなうことで、充電無しでシステムを駆動できる。関連研究として、Kalantarian らは圧電素子を内蔵した靴型ウェアラブルデバイスを用いて足の着地時の発電から歩行した際の歩数を認識している [5]。また、大西らは、振動発電素子を搭載した靴型ウェアラブルデバイスを用いて歩行時の衝撃による発電から足圧を推定するシステムを構築している [6]。靴には直接着地衝撃がかかるため、先行研究 [2], [3], [4] では慣性センサやモーションセンサを搭載した靴を利用して路面種別の自動推定を試みている。着地衝撃は衝撃発電素子の発電情報と関係がある可能性があるため、発電情報から路面種別が推定できるのではと考えた。しかし、発電素子を路面情報の推定に用いた研究は筆者らが知る限りない。

そこで本研究では、振動発電素子が搭載された靴を用いて、発電情報から路面種別を推定するシステムを提案する。提案システムは、歩行時の衝撃で発電モジュールが振動して発電する。これにより、充電無しでシステムを駆動しつつ、取得した発電情報に基づき路面種別の推定を行うため、従来のバリアフリーマップ作成手法や靴型ウェアラブルデバイスを用いた路面推定手法が抱える労力やバッテ

<sup>1</sup> 神戸大学大学院工学研究科

a) yuki-kunitake@stu.kobe-u.ac.jp

b) ohnishi@eedept.kobe-u.ac.jp

c) tsutomu@eedept.kobe-u.ac.jp

d) tuka@kobe-u.ac.jp

リなどに関する課題を解決できる。本論文では、バリアフリーマップを作成する際に必要と考えられる、アスファルトの平地、砂利道、芝生、階段(上り/下り)、坂道(上り/下り)、一段の段差の8種類の路面を推定対象とし、推定精度を評価した。

本論文は以下のように構成されている。2章では関連研究を紹介し、3章で提案システムについて説明する。4章では評価実験とその実験結果について記述する。5章では提案手法と実験結果について議論し、最後に6章で本論文をまとめる。

## 2. 関連研究

本章では、路面推定に関する研究および環境発電技術に関する研究について述べる。まず、路面情報の収集に用いられている路面推定手法について紹介する。次に、本研究では環境発電素子を用いた充電無しで駆動するシステムを用いて路面推定を行うため、環境発電技術に関する研究を紹介する。

### 2.1 路面推定に関する研究

路面の推定に関する研究には、自動車や自転車を用いたものが存在する。久野らは車載カメラを用いて路面状態を検出し [7]、奥川らは8個の圧力センサと1個の加速度センサを搭載したサドルカバー型センサを搭載した自転車を用いて道路勾配などの推定を行っている [8]。これらの手法は、自動車や自転車などを使用することで、効率良く路面情報を収集できるものである。しかし、歩行者しか通行できないような路面情報の収集には適しておらず、バリアフリーマップのデータベース作成には不向きである。

歩行者にセンサを装着してもらうことで路面情報を収集する手法が存在する。宮田らは加速度センサなどの部品を組み合わせて制作したスマートフォンサイズの専用のデバイスをポケットに入れて歩行した際に得られる加速度データを用いて階段や坂道などを推定する手法を提案している [9]。また、上記の手法の中には靴型ウェアラブルデバイスを用いた手法もいくつか存在する。表1に靴型デバイスを用いて路面推定を行う先行研究をまとめる。表1には、それぞれの研究において、靴に取り付けるセンサ、測定対象とする路面を記述している。Satoh らは坂道や砂利道などを歩行し、靴に取り付けた6軸慣性センサから路面の斜度、凹凸、安定性の推定を行っており [2]、Jain らは靴に9軸モーションセンサを取り付けて歩行し、縁石やスロープなどの歩道の段差や傾斜を感知している [3]。Mitake らは靴に搭載した慣性センサから得られるデータの他に足音を利用し、両データから水溜まりや砂利道等の推定を試みている [4]。

これらの手法は、歩行者用道路の路面情報の収集に適しているため、バリアフリーマップのデータベース作成に向

表 1 靴型デバイスを用いて路面推定を行う先行研究一覧

著者	靴に取り付けるセンサ	測定対象の路面
Satoh ら (2015)[2]	6 軸慣性センサ	石畳 坂道 砂利道 スロープ
Jain ら (2015)[3]	9 軸モーションセンサ	縁石 スロープ
Mitake ら (2019)[4]	慣性センサ マイクロフォン	泥 土 砂利道 新雪道 圧雪道 水溜まり シャーベット アスファルトの平地

いている。しかし、いずれの手法もセンサがバッテリーを必要とするため、常時システムを駆動するためには日々デバイスを充電しなければならない。

本研究で提案するシステムでは、発電モジュールを搭載した充電不要な靴型デバイスより得られた発電情報から路面種別を推定することで、ウェアラブルデバイスが抱えているバッテリー充電の問題の解決を目指す。このように、発電情報をもとに路面を推定した研究は筆者らの知る限り存在しない。

### 2.2 環境発電技術に関する研究

バッテリーの充電はウェアラブルコンピューティング分野における大きな課題の一つであり、この課題を解決するため、環境発電に関する研究が数多く行われている。環境発電とは、振動や熱、光などのエネルギーを電気エネルギーに変換する技術であり、これを用いることで消費電力の低い電子機器を充電せずに駆動できる [10]。

環境発電素子から得られる発電情報から、その素子に関わる環境の変化などが推定できることがわかっている。吉田らは、列車通過時の部材の振動による圧電素子の発電を利用し、橋梁の変状のセンシングを行い、センシング結果を列車に無線送信するシステムを開発している [11]。

靴型ウェアラブルデバイスに環境発電素子を内蔵し、素子の発電情報からユーザの情報や外部の環境を推定する研究も数多く行われている。Kalantarian らは圧電素子を内蔵した靴型ウェアラブルデバイスを用いて足の着地時の発電から歩行した際の歩数を平均誤差率 11.1% で検出している [5]。Feng らは、靴に薄膜状の圧電素子を密着させるように8箇所配置し、発電電圧とサッカーボールの速度の関係などを調査している [12]。大西らは、靴に着地衝撃で発電する振動発電素子が搭載された発電モジュールとインソール型足圧センサを装着し、トレッドミル上を時速 6km で歩行した際の発電量と足圧データを収集し、得られた発電量から足圧値の推定を行っている [6]。本研究では靴型

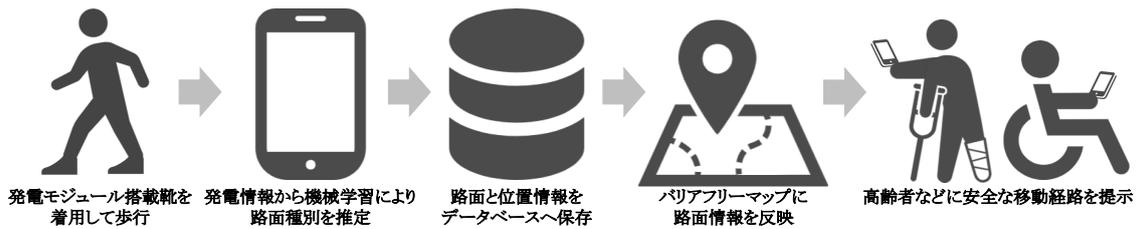


図 1 提案システムのイメージ

ウェアラブルデバイスを用いたコンテキスト推定手法を参考にし、振動発電素子を利用して路面推定を行う。

本研究では、発電モジュールを靴底に内蔵した靴型ウェアラブルデバイスを使用する。路面種別によって振動発電素子の発電情報に異なる特徴が表れると予想し、発電情報を用いて路面推定を行う。

### 3. 提案システム

本章では、振動発電素子が内蔵された靴より得られた発電情報から路面種別を推定するシステムについて述べる。

#### 3.1 想定環境

本研究では、日常生活のなかで、健康な人々が歩くだけでバリアフリーマップに必要な路面情報が自動で収集できる環境の構築を目指す。そのようにして得た路面情報から地図を生成することで、バリアフリーマップを常に更新し続け、最新の状態に保つ。日常生活での利用を想定しているため、路面を推定するシステムは、見た目を損なわない社会性や日常生活が制限されず継続的に使用できる利便性を考慮する必要がある。

路面に最も近い身体部位は足であり、足には着地の衝撃が直接伝わるため、筆者らは靴型のデバイスが路面推定に適していると考えた。人々は普段出かけるときに靴を履くが、靴は一人一足ではなくその日の服装などで履き替えることもあるため、日々充電を完了した状態に保つことはユーザの負荷が大きい。加えて、歩いている途中でバッテリー切れを起こすことも考えられるため、充電不要であることが望ましい。そこで本研究では、振動発電素子が搭載された靴型ウェアラブルデバイスを用いて路面情報を収集するシステムを提案する。これにより、日々の充電をする必要が無くデバイスを着用して生活しているだけで路面の情報を収集し続けることができ、バリアフリーマップ作成に貢献できる。

#### 3.2 システム構成

提案システムのイメージを図 1 に示す。提案システムは発電モジュール搭載靴、携帯端末、データベースの 3 つで構成されている。まず、ユーザは発電モジュールが搭載さ



図 2 発電モジュール搭載靴を装着した様子

れた靴を着用して歩行する。発電モジュール搭載靴は、歩行時の着地衝撃から得られる発電情報を携帯端末へ送信し、携帯端末上で路面種別を推定する。最後に、携帯端末は推定路面と位置情報をクラウド上のデータベースへと送信し、データを保存する。保存された路面情報から誤推定を精査し、路面を考慮したバリアフリーマップが作成され、一般に公開される。本論文では、このシステムのうち、路面推定を行いデータを収集する部分について実装した。

発電モジュール搭載靴を装着した様子を図 2 に示す。靴のアウトソールには振動発電素子を備えた発電モジュール [13] が埋め込まれており、発電モジュールに着地衝撃が加わると発電を行い、取得した発電情報を BLE によって携帯端末に送信する。なお、発電モジュールは筆者らの研究に関連してパナソニックにて開発された非売品である。

#### 3.3 発電情報の取得

発電モジュールは、発電パルスおよび充電電圧といった 2 つの発電情報を送信する。発電パルスとは、発電モジュール内の振動発電素子が、歩行時の着地により継続的に発生する衝撃などの外力を受ける際、圧電効果により発生させる信号電圧である。充電電圧とは、発電モジュールに蓄積される電力の電圧値のことである。この電力は、発電パルスの計測・記録やデータ送信回路を起動する際に用いられる。

データを取得する際、発電パルスの値は現在の充電電圧の値を基準に算出されるため、充電電圧によって変化しな

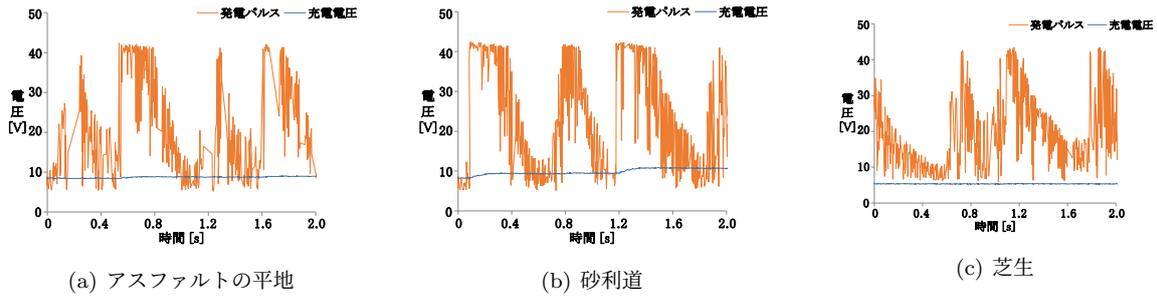


図 3 路面ごとの発電量波形 (片足分)

いようスケーリングする．具体的には，充電電圧の値を  $X$ ，スケーリング前，スケーリング後の発電パルスの値をそれぞれ  $Y$ ， $Y'$  とすると以下のような処理である．

$$Y' = Y * 100 / X \quad (1)$$

図 3 および以降で説明する発電パルスの波形は全てスケーリング後のものである．

発電モジュール搭載靴で取得できる発電情報は，発電された際にのみ送信される．データの無線送信判定について，モジュール内では約 5 V まで充電を行い，5 V を超えると送信用回路が動作し，回路が停止するまでデータを送信し続ける．回路の停止条件は，動作に必要な充電量約 4 V を充電電圧が下回ることである．発電情報は発電が行われ始めてから 4 ms 間隔で計測され，発電情報の送信は 8 回の計測ごとに 32 ms 間隔で行われる．

本論文では研究の初期段階として，まず高頻度で発電情報を取得できた際に，路面種別が推定できるかを確認するために，提案デバイスにボタン電池を取り付けて，送信回路が停止せず 4 ms の周期で継続的に発電情報を計測し続けられるようにした．図 3 および以降で説明する発電量波形と評価内容は，この電池ありの評価用デバイスを用いたものである．実際の利用時には電池は用いないが，その場合はデータの送信が行われない期間が存在するため，路面種別は間欠的に推定されることになる．しかし，想定環境で述べたとおり，本システムの出力結果は，複数人の多数の試行を組み合わせるバリエーションマップを作ることを想定しているため，実用上大きな問題とはならない．

さまざまな路面を発電モジュール搭載靴を着用して歩行した際の発電量波形 (片足分) を図 3 に示す．路面種別によって着地衝撃は異なる為，図のように異なる発電量波形が得られることがわかる．本研究では，これらの特徴を用いて路面種別を推定する．以降，路面種別推定手法について詳しく説明する．

### 3.4 路面種別推定手法

提案手法では，歩行した際に取得した発電パルスと充電電圧に対して前処理を行い，機械学習で学習されたモデルから路面種別を推定する．

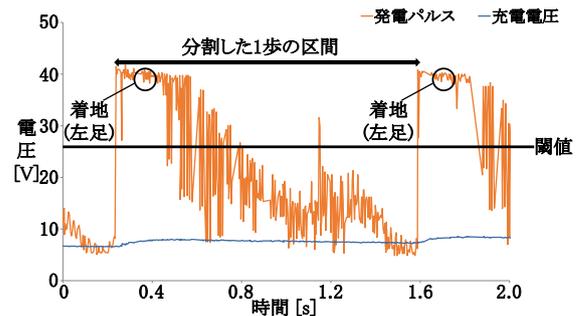


図 4 分割した 1 歩の区間

### データの前処理

1 歩の区間に路面の特徴が現れやすいため，路面種別の推定では，まず前処理として 1 歩ごとにデータを分割する．1 歩歩行するのにかかる時間は 1.2~1.3 秒とされていることと発電パルスの形に着目し，分割する 1 歩は，発電パルスが図 4 に示す閾値 26 V を超えてから 1 秒間を超過し，再び閾値を超えるまでの区間と定めた．閾値を 26 V とした理由は，複数人での予備計測の結果によるものである．以降，このように定めた 1 歩ごとに特徴量の抽出および路面種別の推定を行う．

### 路面推定の際に用いる特徴量と分類方法

路面種別推定の際に用いる特徴量は，図 4 で定めた 1 歩間における発電パルスの平均，分散，最大値，最小値，充電電圧の最大最小差，分散の計 6 種類である．分類器には集団学習により高精度の分類・予測を実現する機械学習アルゴリズムである RandomForest[14] を用いる．

### 多数決処理

最後に，現在の 1 歩の推定路面は現在の 1 歩と直前の 2 歩，直後の 2 歩の計 5 歩のうち，最も多く推定されたものとする多数決処理を行う．例えば，直前の 2 歩分が芝生，現在の 1 歩，直後の 2 歩分が全て砂利道と推定されれば，今歩いている場所は砂利道とする．ただし，一段の段差のような 1 歩のギャップが推定された場合にはこの処理は行わないものとする．

## 4. 評価実験

発電モジュール搭載靴の発電情報から得られる特徴量を

もとにバリアフリーマップ作成に必要とされる8種類の路面種別を推定し、推定精度を評価した。なお本実験は、神戸大学大学院工学研究科人を直接の対象とする研究倫理審査委員会の承認(承認番号04-07)を得て行ったものである。

#### 4.1 測定対象の路面

測定対象の路面はまず、宮田らの先行研究[9]と表1で調査対象となっている路面のうち、バリアフリーマップ作成に必要と考えられるアスファルトの平地、階段、坂道、砂利道、一段の段差とした。加えて、芝生は雨や露などで濡れているときに滑りやすくなる路面と想定し、測定対象の路面に追加した。階段および坂道の上下りは、発電特性が大きく異なるため、これらを分けたほうが正確な推定になると考え、区別することとした。

#### 4.2 実験方法

被験者は20代から30代の男性4名、女性1名の計5名で、右足に発電モジュール搭載靴を装着し、測定対象の路面を歩行した。実験では、各被験者がそれぞれの路面を100歩×5セット歩いた際の発電情報を取得した。

ただし、一段の段差においては10回躓いた際の発電情報を取得し、機械学習の学習データは10倍の水増しを行う。まず、一段の段差以外の7種類の路面の100歩×4セットのデータと、一段の段差の8回×水増し10倍のデータを学習データとし、残りのデータをテストデータとする被験者内5分割交差検証によって評価を行った。この検証における推定精度が高ければ、実生活で提案システムを使用する際にあらかじめ本人のデータを学習しておくことで、高精度に路面種別を推定できる。次に、被験者4人分のデータを学習データとし、異なる1人分のデータをテストデータとする被験者間5分割交差検証によって評価を行った。この検証における推定精度が高ければ、実生活で提案システムを使用する際にユーザ本人のデータを学習せずとも高精度に路面種別を推定できる。

#### 4.3 実験結果

この節では被験者内5分割交差検証、被験者間5分割交差検証の2つの実験結果について述べる。

##### 被験者内5分割交差検証

全被験者の5分割交差検証の結果を合計した際の混同行列を算出した。その混同行列を図5に示す。8種類の路面種別の推定精度は約63%であった。一段の段差以外の路面は、各路面における正解が最も多く推定されていたため、ある程度推定できていたといえる。しかし、一段の段差のF値は0.13であり、他の路面種別と満遍なく誤推定されていた。一段の段差のF値を向上させるためには、躓きのような動作をより検出できるモジュールの配置の工夫やアルゴリズムの見直しが必要である。

	Prediction								Recall
	a	b	c	d	e	f	g	h	
a=アスファルトの平地	1820	103	108	85	227	132	38	2	0.72
b=砂利道	368	643	216	284	386	382	143	5	0.26
c=階段下り	138	128	1355	370	48	180	143	5	0.57
d=階段上り	92	125	249	1717	98	237	98	4	0.66
e=坂道下り	217	123	36	45	1813	119	8	3	0.77
f=坂道上り	202	297	177	279	145	1283	20	2	0.53
g=芝生	29	21	41	37	2	2	2179	1	0.94
h=一段の段差	10	5	4	9	5	8	4	5	0.10
Precision	0.63	0.44	0.62	0.61	0.67	0.55	0.83	0.19	0.63

図5 全被験者の推定結果の合計

	Prediction								Recall
	a	b	c	d	e	f	g	h	
a=アスファルトの平地	908	186	384	372	271	187	204	3	0.36
b=砂利道	349	352	277	372	629	202	239	7	0.15
c=階段下り	498	208	577	305	176	191	403	9	0.24
d=階段上り	437	207	302	653	503	403	111	4	0.25
e=坂道下り	203	324	139	392	786	406	100	14	0.33
f=坂道上り	158	278	263	647	693	282	78	6	0.12
g=芝生	132	34	392	89	44	16	1603	2	0.69
h=一段の段差	8	9	3	10	12	6	2	0	0
Precision	0.34	0.22	0.25	0.23	0.25	0.17	0.59	0	0.30

図6 全被験者の推定結果の合計

#### 被験者間5分割交差検証

全被験者の5分割交差検証の結果を合計した際の混同行列を算出した。その混同行列を図6に示す。8種類の路面種別の推定精度は約30%であった。被験者内5分割交差検証の時の結果と比較すると、推定精度は低くなった。これは、被験者によって歩き方がバラバラであるため、着地衝撃が大きく異なるものとなっていることが原因であると考えられる。今回の結果からでは、実生活で提案システムを使用する際にユーザ本人のデータを学習せずとも高精度に路面種別を推定できるとは言えないが、今後より多くの被験者からデータを収集すればユーザ本人と歩き方が似た人のデータを得られ、推定精度を向上させられる可能性がある。

### 5. 議論

#### 5.1 先行研究との比較

今回の測定対象の路面は先行研究の測定対象の路面とは異なるため直接推定精度を比較することができないが、先行研究[4]では8種類の路面を77%の精度で推定できていたのに対し、提案手法による8種類の路面種別の推定精度は、63%であった。しかし、提案手法ではバッテリーが不要である。また、複数人分の推定結果を集約することを想定しているため、多人数のデータが集まることで推定精度は向上すると考えている。

また、提案システムは環境発電素子を用いて充電の問題を解決し、継続的に路面推定ができる環境を構築することを目指しているが、その他のアプローチとして無線給電技

術の活用が考えられる。近年では無線給電でウェアラブルデバイスを駆動する研究も盛んに行われており [15], 無線給電が可能な靴型ウェアラブルデバイス [16] などを用いて路面種別を推定する方法も考えられる。しかし, 無線給電の場合, 靴の中に小型のリチウムイオンバッテリーなどを入れる必要があり, 大きな衝撃を加えると発火する恐れもあるため, 本研究のアプローチは安全面で日常利用に適していると考えている。一方で, これらのアプローチを相補的に用いることで, より安定したセンシングを行える可能性がある。

## 5.2 実利用を想定した評価

評価実験では, 発電情報を高頻度で取得できたときに路面種別が推定可能かを確認するため, 分析にはボタン電池を取り付けた評価用デバイスを用い, 発電情報の送信頻度をあげてデータを取得した。しかし, 実際に無電源で駆動した場合には, デバイスからはより疎な間隔でデータが送信される。このような環境での評価は, 今後必要である。

また, 本実験では被験者が普段通り歩行した場合についてのみ調査したが, 日常生活では急いでいるときや会話しながら歩いているときなどさまざまな状況があり, 歩行速度は常に一定ではない。したがって, 歩行速度が異なる場合についても調査する必要がある。

## 6. まとめ

本論文では, 発電モジュール搭載靴を用いて, 歩行時の発電情報に基づき路面種別を推定するシステムを提案した。提案システムの路面種別推定精度を確認するため, アスファルトの平地, 砂利道, 芝生, 階段(上り/下り), 坂道(上り/下り), 一段の段差の8種類の路面を歩行した際の発電パルスと充電電圧のデータを取得して評価を行った。実験の結果, 自分自身のデータを学習データに用いた場合にはバリアフリーマップ作成に必要なと考えられる8種類の路面を約63%で推定できた。今後は, デバイスを無電源で駆動した場合や歩行速度が異なる場合についても評価していく。

## 謝辞

本研究の一部は, JST CREST(JPMJCR18A3), および JSPS 科学研究費補助金若手研究(21K17790)の支援によるものである。ここに記して謝意を表す。

## 参考文献

[1] 国土交通省: みんなでつくるバリアフリーマップ作成マニュアル, <https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/barrierfree/content/001338556.pdf> .

[2] T. Satoh, A. Hiromori, H. Yamazaki, and T. Higashino: A Novel Estimation Method of Road Condition for Pedestrian Navigation, *Proc. of the 4th IEEE Interna-*

*tional Workshop on the Impact of Human Mobility in Pervasive Systems and Applications (PerMoby 2015)*, pp. 427–432 (Mar. 2015).

[3] S. Jain, C. Borgiattino, Y. Ren, M. Gruteser, Y. Chen, and C. F. Chiasserini: LookUp: Enabling Pedestrian Safety Services via Shoe Sensing, *Proc. of the 13th Annual International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services (MobiSys 2015)*, pp. 257–271 (May 2015).

[4] H. Mitake, H. Watanabe, and M. Sugimoto: Footsteps and Inertial Data-based Road Surface Condition Recognition Method, *Proc. of the 18th International Conference on Mobile and Ubiquitous Multimedia (MUM 2019)*, No. 22, pp. 1–10 (Nov. 2019).

[5] H. Kalantarian and M. Sarrafzadeh: Pedometers Without Batteries: An Energy Harvesting Shoe, *IEEE Sensors Journal*, Vol. 16, No. 23, pp. 8314–8321 (Dec. 2016).

[6] 大西鮎美, 寺田 努, 塚本昌彦: 発電機能をもつシューズの発電情報に基づく足圧推定手法の提案, ユビキタスウェアラブルワークショップ2020 (UWW 2020) 論文集, p. 67 (Dec. 2020).

[7] 久野徹也, 杉浦博明, 吉田潤一: 車載カメラによる路面状態検出方式の検討, 電子情報通信学会論文誌 D-2, Vol. 81, No. 10, pp. 2301–2310 (Oct. 1998).

[8] 奥川 遼, 村尾和哉, 寺田 努, 塚本昌彦: サドルカバー型センサを用いた自転車運転時の状況認識システム, 情報処理学会研究報告, Vol. 2016-HCI-167, No. 14, pp. 1–7 (Mar. 2016).

[9] 宮田章裕, 荒木伊織, 王 統順, 鈴木天詩: 健常歩行者センサデータを用いたバリア検出の基礎検討, 情報処理学会論文誌, Vol. 59, No. 1, pp. 22–32 (Jan. 2018).

[10] 桑野博喜: マイクロエネルギーハーベスティング—イノベーションを目指して—, 電気学会論文誌 E, Vol. 133, No. 9, p. 229 (Sep. 2013).

[11] 吉田善紀, 小林裕介, 内村太郎: 鋼鉄道橋の振動発電を利用したモニタリングシステムの開発, 土木学会論文集 A1(構造・地震工学), Vol. 70, No. 2, pp. 282–294 (2014).

[12] K. Feng and Z. Fan: A Soft Battery-free Piezoelectric Sensing Platform Toward Pressure Monitoring on Shoes in Football Training, *IEICE Electronics Express*, Vol. 19, No. 3, pp. 1–6 (Feb. 2022).

[13] H. Katsumura, T. Konishi, H. Okumura, T. Fukui, M. Katsu, T. Terada, T. Umegaki, and I. Kanno: Development of Piezoelectric Vibration Energy Harvesters for Battery-less Smart Shoes, *Journal of Physics: Conference Series*, Vol. 1052, pp. 1–4 (July 2018).

[14] Leo Breiman: Random Forests, *Journal of Machine Learning*, Vol. 45, No. 1, pp. 5–32 (Oct. 2001).

[15] R Takahashi, W Yukita, T Yokota, T Someya, and Y Kawahara: Meander Coil++: A Body-scale Wireless Power Transmission Using Safe-to-body and Energy-efficient Transmitter Coil, *Proc. of the 2022 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI 2022)*, pp. 1–12 (Apr. 2022).

[16] G. Talavera, J. Garcia, J. Rosevall, C. Rusu, C. Carenas, F. Breuil, E. Reixach, H. Arndt, S. Burkard, R. Harte, L. Glynn, and J. Carrabina: Fully-Wireless Sensor Insole as Non-invasive Tool for Collecting Gait Data and Analyzing Fall Risk, *Proc. of Ambient Intelligence for Health (AmIHealth 2015)*, pp. 64–71 (Sep. 2016).