Vol.2019-MBL-93 No.12
Vol.2019-ITS-79 No.12
2019/11/20

インソール型デバイスによる 足圧を用いた路面状況推定手法の検討

若林勇汰 [1,a)]　白石陽 [1,b)]

概要：近年，Google Maps や Yahoo! MAP，NAVITIME をはじめとする地図アプリケーションが普及し，歩行者ナビゲーションとして広く使用されている．これらのアプリケーションでは，目的地までの所要時間や距離を重視して経路を推薦しているため，推薦された経路が歩行者にとって，必ずしも歩きやすいとは限らない．歩行者が歩きやすいと感じるためには，路面状況が大きく影響すると考える．また，路面状況によって歩き方が変わるため，それに伴い足圧の大きさ，分布にも影響があると考える．ここで足圧とは足の裏にかかる圧力を指す. そこで本研究では足圧の強度と分布を測定することによって歩道の路面状況推定を行う. 提案手法では，足圧の測定方法として，インソールの裏側に複数の圧力センサを取り付けたインソール型デバイスを自作し，利用する．複数の圧力センサを取り付けることで足圧の強度に加え，どこにどれくらいの圧力がかかっているかという分布を測定する．推定対象とする路面は，傾斜路面，凹凸路面，自然環境により変化する路面（濡れた路面，凍結路面，積雪路面）と平坦な道である．これらの路面を歩行し，路面ごとの足圧の強度データを収集し，分析することによって路面状況を推定する．

キーワード：路面状況推定，インソール，足圧，ナビゲーション

1. はじめに

近年，歩行者ナビゲーションとして Google Maps や Yahoo! MAP, NAVITIME をはじめとする地図アプリケーションが普及し，広く使用されている．また，歩行者ナビゲーションによる研究も盛んに行われており，例えば，歩行者移動時間を推定するシステムに関する研究[1], [2]も行われている．文献[1]では，ユーザ自身の感覚である「体調」「気分」「体感温度」と経路の上り坂と下り坂の割合を加味し，文献[2]では，歩行者の身体状況と周辺環境と歩行速度を合わせた歩行者ログを用いている．

既存の歩行者ナビゲーションのアプリケーションユーザは，目的地までの経路や所要時間を知りたい時に地図アプリケーションを使用する．しかし，これらのアプリケーションでは，目的地までの所要時間や距離を重視して経路を推薦しているため，推薦された経路が歩行者にとって，必ずしも歩きやすいとは限らない．加えて，路面状況に関する情報を提供する機能が備わっていないため，歩行者は路面状況を加味した経路選択ができない．歩行者に，あらかじめ目的地までの歩きやすい経路を提示することで，凍結路面や凹凸路面による転倒や濡れた路面により靴が濡れることなどを回避することができると考える．よって，本研究では，歩きやすい経路を歩行者に提示することを目的として，路面状況の推定手法を検討する．

歩きやすさに影響する路面として 1) 傾斜路面，2) 凹凸路面，3) 自然環境により変化する路面の 3 種類が考えられる．自然環境により変化する路面とは，降雨や降雪などの自然環境により路面状況が変化するものを指す．例えば，濡れた路面では，水たまりの有無や，自動車が通行する際の水しぶきに注意して歩行する．凍結路面では，凍結箇所を探し回避しながら歩行する．もしくは，滑りやすいか注意して歩行する. このように, 同じ道を歩行する場合にも，路面状況の変化により歩きやすさは変化する．晴れや雨，雪などの天候などにより歩き慣れている道であっても歩きやすさは変わってくる. 本研究では, 路面 1 に属する坂道，路面 2 に属する砂利道とコンクリートが剥がれた路面，路面 3 に属する濡れた路面と凍結路面，積雪路面，加えて比較対象として平坦な道の 7 種類の路面状況の推定を目指す.

本研究のデータの収集方法として，参加型センシングを想定している．参加型センシングとは，計測対象者領域に分散した多数の協力者が自身のスマートフォンなどに搭載されているセンサを用いて計測した何らかのデータを相互に共有する方法である[3]．本研究では，推定すべき路面状況として自然環境により変化する路面を含み，路面状況が急激に変化する状況にも対応しなければならない．そのため，路面状況に関するデータを継続的かつ網羅的に収集する必要がある．そこで参加型センシングをデータ収集方法として用いることで，変化に対応したデータ収集を行う．

本研究では，路面状況推定手法として，足圧に注目した．ここで足圧とは，足の裏にかかる圧力を指す．路面状況が変化すると，それに伴い歩き方も変化する．例えば，坂道を登る時は，平坦な道に比べ足の前方に体重がかかる．凍結路面を歩行する時は，滑らないようにすり足で歩行する

1 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.
a) b1016094@fun.ac.jp
b) siraisi@fun.ac.jp

ⓒ2019 Information Processing Society of Japan

Vol.2019-MBL-93 No.12
Vol.2019-ITS-79 No.12
2019/11/20

ため，体重の移動が少ない．このように，足裏にかかる圧力の違いにより路面状況を推定できると考える．また，足圧を用いた研究として，文献[4], [5], [6]では，坂道の推定や路面の凹凸の種類（点状，もしくは線状）を推定している．これらことから，路面状況の推定に足圧を用いることは適していると考える．

本研究では，インソール型デバイスによる足圧を用いた路面状況の推定を行う．インソールに圧力センサを設置することで，足圧の特徴が最も現れると考えたため，足圧の収集方法として，インソール型デバイスを用いる．本稿では，まず足圧による路面状況推定の有効性について調査する．推定対象とする路面を歩行し，インソール型デバイスから足圧の強度に関するデータを収集し，分析を行った．

2. 関連研究

路面状況推定に関する研究として，加速度と角速度を用いた研究[7]と，足圧を用いた研究[4], [5]，クラウドセンシングを用いた研究[9]がある．

2.1 加速度と角速度を用いた路面状況推定の研究

加速度と角速度を用いた路面状況推定の研究として，佐藤らは，加速度と角速度を計測する慣性センサを靴に取り付け，路面の傾斜推定，凹凸の有無を推定している[7]．この研究では，センサの傾きから，路面の傾斜を測定し，加速度の分散の大小によって路面の安定性を推定する．その後，路面の傾斜の分散を複数の歩行者から集約することにより，通路の凹凸の有無を推定している．加速度と角速度だけでは，歩き方に大きな変化がない限り収集したデータに変化が見られないと考えるため，本研究で対象とする凹凸路面が砂利道なのかコンクリートが剥がれた路面なのかまた，自然環境により変化する路面の推定が困難であると考えられる．

2.2 足圧を用いた路面状況推定の研究

足圧を用いた路面状況推定の研究として，足圧中心の軌跡を用いた研究[4]と足圧の最大値を用いた研究[5]がある．ここで足圧中心とは，人が床（地面）に加えた力の中心点である[8]．堀江らは，足圧センサシートを靴の中敷き（インソール）に装着して，平地歩行時，階段昇降時，坂道歩行時の足圧中心の軌跡を比較し，各歩行状態の足圧中心の軌跡の変化により，平地歩行・階段昇降・坂道歩行の判別を行っている[4]．歩き方が異なる路面を推定することは可能であるが，歩き方に変化があまり見られない凹凸路面を推定することは困難であると考える．大島らは，最大圧力を用いて接地部分の路面形状を取得する路面形状識別手法を提案している[5]．この手法では，足が接地していた時，各計測点における最大圧力値を選択することで平面，点ブロック，線ブロックの推定を行っている．この研究では，足圧の最大値を用いて路面形状を推定することができているが，本研究で対象としている凍結路面には，凹凸がないスケートリンクのような路面の場合がある．その際にすり足で歩行することが考えられる．圧力が均等にかかり圧力の最大値が強調されないため特徴があまり現れず推定が困難であると考えられる．

2.3 クラウドセンシングを用いた路面状況推定の研究

クラウドセンシングを用いた路面状況推定の研究として，藤井らは，スマートフォンのセンサを用いて集めた加速度データから，SVM (Support Vector Machine) を用いて路面状況を推定している[9]．この研究では，歩行時の加速度データから，平坦な場所に対応するのか，坂や段差に対応するのかを推定し，GPS (Global Positioning System) などで得られる位置情報と組み合わせることで，都市を移動する際に障害となる路面状況を収集している．加速度データは，この研究で対象としている平坦，段差，坂のような歩行時に歩き方が異なる路面には適応できるが，歩き方に変化があまり見られない凹凸路面を推定することは困難であると考える．

3. 提案手法

本章では，まず 3.1 節で本研究の目的を述べ，3.2 節では研究課題とアプローチについて述べる．3.3 節では開発したデバイスについて，3.4 節ではシステム構成について述べ，3.5 節では路面状況推定の流れについて述べる．

3.1 研究目的

本研究の目的は，歩きやすい経路をユーザに提示するため，歩行時の足圧を測定することで，路面状況を推定することである．既存の歩行者ナビゲーションのアプリケーションでは，目的地までの経路が表示されるが，その経路が必ずしも歩きやすい経路であるとは限らない. 季節や天気，時間によって路面状況は変化するため，実時間の路面状況を考慮して，目的地までの歩きやすい経路を提示することで，ユーザは快適に歩行することができると考える．

3.2 研究課題とアプローチ

本研究では，以下の 3 つを研究課題とする．

a) 導入コストを考慮した足圧計測デバイスの検討
b) 足圧による路面状況推定の有効性の調査
c) 路面状況の推定に有効な特徴量の検討

課題 a に対するアプローチとして，インソール型デバイスを利用する．本研究では，参加型センシングを用いるためデバイスは安価なことが望ましい．インソール型デバイ

ⓒ2019 Information Processing Society of Japan

Vol.2019-MBL-93 No.12
Vol.2019-ITS-79 No.12
2019/11/20

スは文献[10], [11]のような高価な市販デバイスと文献[12]で使われているような安価な自作デバイスがある．文献[10], [11]のデバイスは，足圧のデータを詳細に収集することができるが，高価であり，研究デバイスとして作られているものが多いことから，一般ユーザにとって導入コストが高い．文献[12]のデバイスは，圧力センサをインソールの 5 箇所に設置したデバイスである．このデバイスは，比較的導入コストが低く，足圧の強度データの取得が可能である．これらの理由により，本研究では，圧力センサを複数取り付けたインソール型デバイスを用いる．

課題 b に対するアプローチとして，砂利道と平坦な道を対象に足圧のデータを収集し，分析することを検討している．対象とする路面のうち，最も足圧の変化が大きく現れるのは凹凸の路面だと考える．凹凸部分を踏むと，その部分の足圧のデータだけ不規則な値が収集されると考える．凹凸路面の中でも，砂利道は特に凹凸の変化が激しいと考えるため，足圧による路面状況推定の有効性の調査は，砂利道と平坦な道を対象に行う．

課題 c に対するアプローチとして，足が路面に接している間の基本統計量を特徴量とすることを検討している．本研究では基本統計量として，平均，分散，標準偏差，歪度，尖度の合計 5 種類を求める．歪度は，データがどれだけ歪んでいるかを表す．尖度は，データを分布にした時に，どれだけ尖っているかを表し，山の尖り度や裾の広がり度を示す．これら 5 種類の基本統計量を求めることで，足圧の偏りやどこに大きく圧力がかかっているかなどの足圧の特徴を把握することができると考える．

3.3 開発したプロトタイプデバイス

開発したプロトタイプデバイスを図 1 に示す．

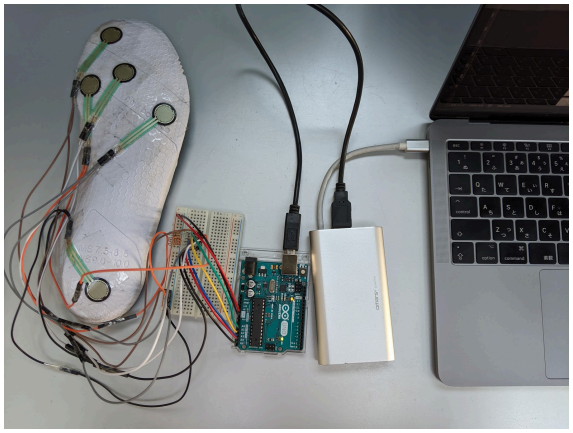


図 1 開発したプロトタイプデバイス

インソールの裏側に 5 個の圧力センサを取り付け，各センサをジャンプワイヤーで Arduino に接続する．圧力センサは厚さ 0.25mm～1.25mm，感圧範囲は 0.2N～20N のものを使用した．このデバイスの出力は，各圧力センサに対応するアナログピンの値である．Arduino ボードは 6 チャネルの 10 ビット A/D コンバータを搭載しており，これにより，0 から 5V の入力電圧を 0 から 1023 の整数値に変換することができる．その変換した値をアナログピンの値としている．本研究では，これを圧力値と呼ぶ．

3.4 提案システム

本研究の提案システムの全体像を図 2 に示す．

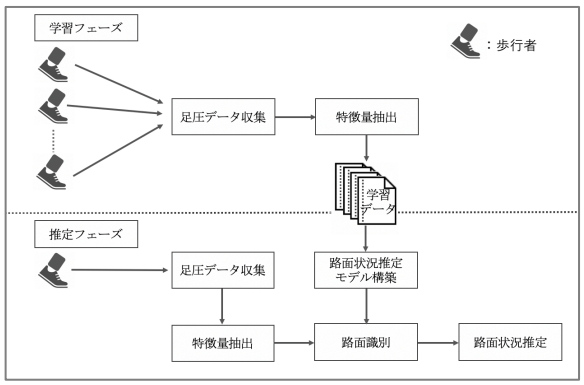


図 2 提案システムの全体像

提案システムは，学習フェーズと推定フェーズの 2 つのフェーズで構成される．学習フェーズでは，参加型センシングの協力者である歩行者が歩行時に収集した足圧データから，学習に用いる特徴量を抽出する．抽出した特徴量を正解ラベルとともに学習データとする．そして，この学習データを用いて路面状況推定モデルを構築する．推定フェーズでは，歩行者から収集した足圧データから，特徴量を抽出し，構築した路面状況推定モデルを用いて路面状況を推定する．

3.5 推定の対象とする路面と路面の種類

本研究で対象とする 7 種類の路面を表 1 に示す．

表 1 対象とする路面

対象とする路面	路面の種類
1) 傾斜路面	坂道
2) 凹凸路面	砂利道
	コンクリートが剥がれた路面
3) 自然環境によって変化する路面	濡れた路面
	凍結路面
	積雪路面
比較対象	平坦な路面

ⓒ2019 Information Processing Society of Japan

Vol.2019-MBL-93 No.12
Vol.2019-ITS-79 No.12
2019/11/20

歩きやすさに影響する路面として 1) 傾斜路面，2) 凹凸路面, 3) 自然環境により変化する路面の 3 種類を推定対象とする．この 3 種類を選択した理由として，路面 1 は，歩道の傾斜が歩きやすさに影響するため，路面 2 は，歩道の凹凸が大きい場合, 歩きやすさに影響するため, 路面 3 は，降雨や降雪などの自然環境が歩きやすさに影響するためである．これらの理由より，本研究では，歩きやすさに影響する路面として，路面 1 に属する坂道，路面 2 に属する砂利道とコンクリートが剥がれた路面，路面 3 に属する濡れた路面と凍結路面，積雪路面と比較対象として平坦な道の 7 種類を推定の対象とする．

3.6 路面状況推定の流れ

路面状況推定の流れを以下に示す．

(1) 足圧データの収集
(2) 足圧データから特徴量の抽出
(3) 路面状況の推定

(1) として，路面状況を推定するため，開発したインソール型デバイスを導入した靴を履き，対象とする路面を歩行することで足圧データを収集する．データの収集は，対象とする 7 種類の路面を 1 つずつ歩行することを想定している．収集する足圧データは，日付，時刻，位置情報，圧力センサの圧力値, ピンの番号である. ピンの番号とは，Arduino ボードのアナログ入力を識別する番号である．また, 位置情報は, スマートフォンの GPS を用いて収集する．

(2) として，(1) の方法で収集した足圧データから，特徴量を抽出する．1 試行分の足圧データを切り出し，各ピンの圧力値から基本統計量 5 種類を計算し，特徴量として抽出する．

(3) として，抽出した特徴量と路面の種類を利用し，路面状況の推定を行う．路面状況の推定は，教師あり機械学習によって行う. (2) で述べた特徴量を用いて SVM による推定を行う．

4. 予備実験および考察

本章では，足圧による路面状況推定の有効性を調査することを目的として行った予備実験について述べる．4.1 節では, 足圧データの収集について述べる. 次に 4.2 節では，収集したデータの分析について述べる．最後に 4.3 節では考察を述べる．

4.1 足圧データの収集

開発したプロトタイプデバイスを用いて足圧データを収集した．今回の予備実験の目的が足圧による路面状況推定の有効性を調査することであるため，収集するデータに個人差が出ないよう被験者を 1 人とし, 収集するデータは，各ピンの圧力値のみとした．今回の実験では，男性 1 人を被験者とし，砂利道と平坦な路面の各路面状況について 1 試行分の足圧データを収集した．

1 試行とは，足が地面に接地してから離地するまでのことを指す. 1 試行分のデータの切り出し方は, 5 個のピンの内，1023 を出力するピンがあった場合でも，他のピンの出力が 1023 未満であれば, そのデータを切り出すことを考えている． Arduino の出力では，圧力センサに圧力がかかっていない状態では, 圧力値が 1023 と出力されており，かかった圧力の大きさによってその値が小さくなり出力される. そのため, 圧力値が 1023 未満であるデータを全て切り出すことにより，足が接地しているデータを切り出すことができると考える．

予備実験では，1 試行分のデータを切り出すことはせず，推定対象の路面を一歩だけ歩行しそのデータを 1 試行分として用いることとした. 各路面に対して 20 個のデータを収集した．予備実験でデータ収集を行った路面の例，足圧データ収集の様子を，それぞれ図 3, 4 に示す．



(a) 砂利道　　(b) 平坦な路面

図 3 データ収集を行った路面の例

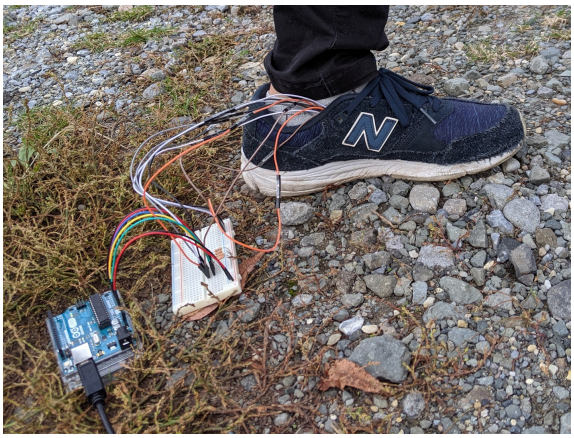


図 4 足圧データ収集の様子

インソール型デバイスをポータブル化していないため，PC から電力を供給し，収集した足圧のデータを，PC に保存した. ここでインソール型デバイスのポータブル化とは，電力供給をモバイルバッテリーで行い，足圧データを PC に Bluetooth で送信することで，PC を接続することなく軽量化し携帯可能にすることである．ポータブル化を行うこ

ⓒ2019 Information Processing Society of Japan

とで，1 試行ごとの足圧データの収集ではなく，連続歩行時の足圧の時系列データの収集が可能となる．

4.2 収集したデータの分析

4.2.1 収集したデータ

Arduino に接続した各圧力センサに対応するアナログピンの番号を図 5 に示す．

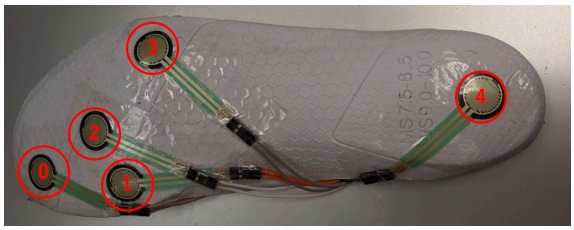


図 5 圧力センサに対応したピン番号

砂利道および平坦な路面における各ピンからの圧力値の変化の一例を図 6 に示す．縦軸は圧力値，横軸の数字は，時系列データのサンプル番号を表す．

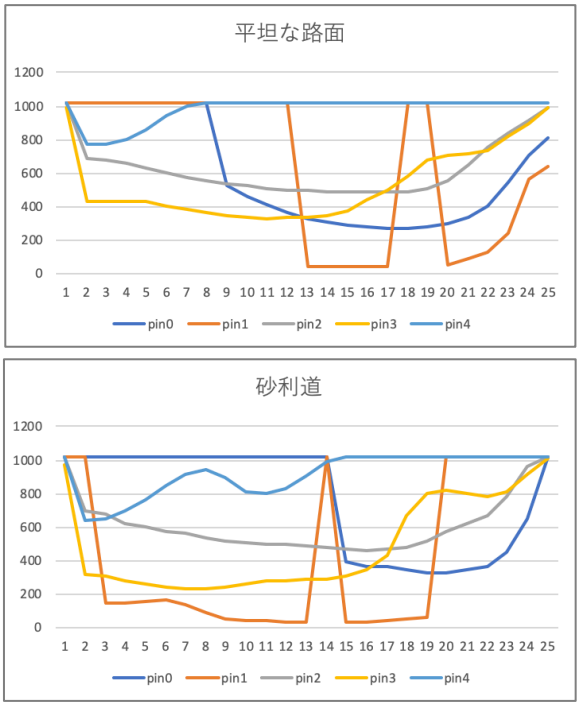


図 6 ピン番号ごとに収集した圧力データ

4.2.2 収集したデータの欠損値の処理

収集したデータは，収集した圧力データの変化を見ると，例外値である 1023 を出力し，変化する前の数値に戻っている場合が見られる．これは，圧力センサの接触が悪く圧力を取得できなかったことが原因であるため，この場合を欠損値として処理することとする．欠損値の前後のサンプルデータから平均値を算出し，その平均値を欠損値の補完データとした．この欠損値の処理を行ったデータを図 7 に示す．

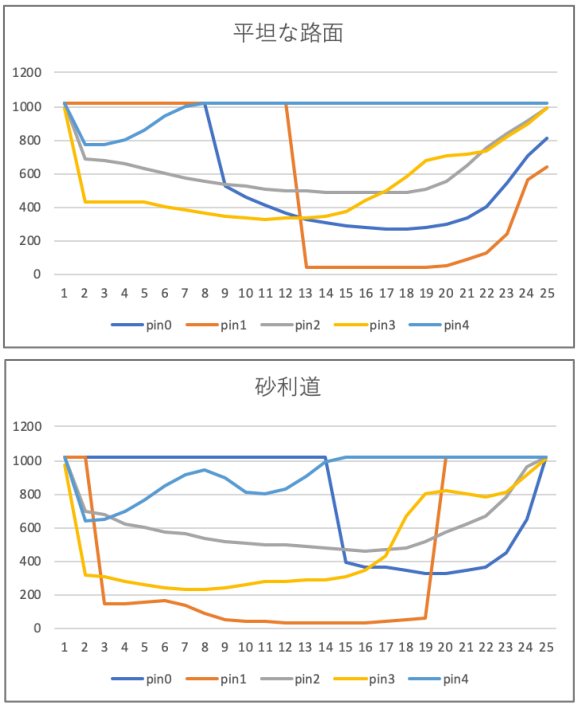


図 7 欠損値を処理した圧力データ

4.2.1 項に示したデータでは，圧力値を収集できなかった欠損箇所が含まれており，歪なグラフになっている．欠損値を補完することで，圧力値の変化が連続的なものとなり，路面の特徴を捉えやすくなると考える．

4.2.3 収集したデータの分析

前述の欠損値処理を行う，平坦な路面の場合，圧力値が一度減少してから増加すると，再度減少することはない．しかし，砂利道の場合は．圧力値が上限に達した場合でも，再度減少することがある．その原因としては，砂利を踏んだことによるものだと考えられる．この傾向が顕著に現れているのは，ピン 3，4 の出力データである．砂利を踏んだ時のデータを図 8 に示す．

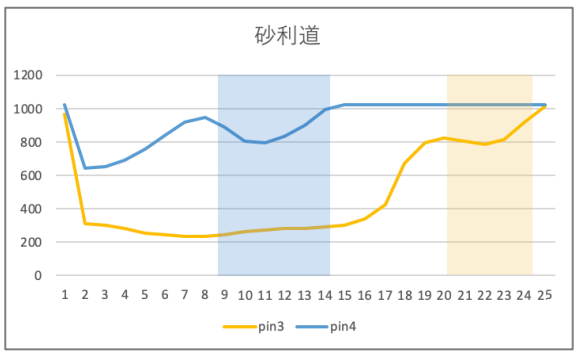


図 8 砂利を踏んだ時のデータ

ピン 3 は，足の外側の圧力センサの値を出力する．図 8

ⓒ2019 Information Processing Society of Japan

のピン 3 (pin3) の 9 から 14 の変化を見ると, 足が離れる直前に足のどこかで砂利を踏んだことにより，足の外側に少し体重がかかったことが推測される．ピン 4 は，踵の圧力センサの値を出力する．図 8 のピン 4 (pin4) の 20 から 24 の変化を見ると，踵が地面から離れる直前にピン 3 の場合と同様に足のどこかで砂利を踏んだことにより，踵に少し体重がかかったことが推測される．以上より，足圧を測定することで，砂利道に関しては路面状況の特徴を捉えることが可能であると考える．

4.3 考察

4.2 節の結果から，砂利道と平坦な道を比べる上では，計測された足圧の時系列データに異なる傾向が見られたため，抽出する基本統計量にも差異が生じると考えられるため, 足圧は路面状況の推定に有効であると考える. しかし，常に今回のような砂利を踏んだことがわかるようなデータを収集できるとは限らないため，どこに圧力センサを取り付けると最も特徴が取りやすいかを検討していく必要がある．

4.1 節で収集したデータは，一歩ごとに収集しているため，歩行し始めるタイミングや歩行の速さは各データによって異なる．これにより，データの始まりと終わりにばらつきが生じた．このことから，歩行し始めのデータは，その時の状況によって歩行のタイミングや速さが異なるため, 除外した方が良いと考えられる．

5. まとめ

本研究の目的は，歩きやすい経路をユーザに提示するため，歩行時の足圧を測定することで，路面状況を推定することである．本稿では研究課題として挙げた，足圧による路面状況推定の有効性に関する予備実験を行った．その結果, 予備実験で対象とした砂利道と平坦な路面に関しては, 足圧は路面状況を推定する手段として有効であることが示唆された．

今後は，まず，他の路面のデータを収集するために，インソール型デバイスのポータブル化を行う．次に，データの切り出しができると仮定して，砂利道と平坦な道以外の 5 種類の路面状況に関するデータを収集し，足圧が路面状況を推定する手段として有効であるかを調査する．その上で，歩行しているデータから 1 試行分のデータを切り出す処理の実装を行う．

謝辞 本研究の一部は東北大学電気通信研究所共同プロジェクト研究による．

参考文献

[1] 宮本健太，梅津高朗，ユーザ体感と歩行履歴情報を用いた移動時間推定システム，情報処理学会研究報告高度交通システムとスマートコミュニティ (ITS)，Vol.2017-ITS-68，No.5，pp.1-7 (2017).
[2] 夏堀友樹，白石陽，歩行者ログを用いた移動所要時間推定システムの提案，マルチメディア，分散協調とモバイルシンポジウム 2013 論文集，pp.1051-1056(2013).
[3] J. Burke, D.Estrin, M.Hansen, A Parker, N.Ramanathan, S.Rebby and M.B.Srivastava, “Participatory Sensing”, World-Sensor-Web (WSW ’06) at SenSys ’06, pp1-6 (2006).
[4] 堀江直正，満田隆，川村貞夫，足圧情報による歩行状況の推定法，生体医行学：日本エム・イー学会誌，Vol.44，No.4，pp621-627(2006).
[5] 大橋勇介，榎堀優，間瀬健二，歩行時の最大圧選択足圧データを用いた路面コンテキストの識別，情報処理学会研究報告ヒューマンコンピュータインタラクション (HCI)，Vol.2014-HCI-160，pp.1-8 (2014).
[6] Kikuchi, T., Contribution of Senses of Foot for Identification of Shape, Elasticity and Tilt Angle of Ground, International Conference on Artificial Reality and Telexistence (ICAT), pp.61-66 (2013).
[7] 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，情報処理学会研究報告コンシューマ・デバイス&システム(CDS)，Vol.2015-CDS-12，No.9，pp.1-8 (2015).
[8] 前田哲男，木山良二，大渡昭彦，(2015)解いてなっとく使えるバイオメカニクス，医学書院
[9] 藤井海斗，羽田野真由美，西田京介，戸田浩之，澤田宏，鹿島久嗣，歩行者クラウドセンシングによる路面状況の推定，DEIM Forum 2016，D6-5 (2016).
[10] インソール型足圧測定 Pedar, https://www.creact.co.jp/item/measure/pressure/novel/novel-pedar，(参照 2019-10-12)
[11] インソール型足底荷重計測モニタリングデバイス loadsol, https://www.creact.co.jp/item/measure/pressure/novel/novel-loadsol，(参照 2019-10-12)
[12] 田宮大暉，長谷川大，佐久田博司，身体知獲得を目的とした足裏にかかる圧力のリアルタイム可視化によるフォーム矯正の提案，情報処理学会インタラクション 2018，3A12(2018).

ⓒ2019 Information Processing Society of Japan