

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

佐藤 匠^{1,a)} 廣森 聡仁^{1,b)} 山口 弘純^{1,c)} 東野 輝夫^{1,d)}

概要：

歩行する際、足は路面に接しており、足の動きは傾斜や路面の凹凸など、通路の状況を少なからず反映している。本研究では、靴に慣性センサを装着し、足の詳細な動きを把握することにより、通路の状況を推定する手法を提案する。提案手法では、まず、加速度センサとジャイロセンサの計測結果に基づき、足が地面に接していることを検出する。その際、加速度センサからの情報に基づき、センサ自体の傾きから、路面の傾斜を推定するとともに、加速度の分散から路面の安定性を判断する。加速度の分散が小さい場合には、路面の傾斜は一定の値に収まっていることから、安定した路面と判断できる。一方、加速度の分散が大きい場合には、砂利などで構成される不安定な路面と判断できる。一人の歩行者が通路を通過しただけでは、通路の傾斜を点として把握することに留まることから、複数人のユーザから路面の傾斜情報を集約し、路面の傾斜の分散から、通路の凹凸の存在を把握する。評価実験においては、提案手法により、様々な通路及び被験者に対しても、足が接地しているタイミングを確実に認識できることを示し、また、その際に、高精度に路面の傾斜を認識できること、路面の安定度を判断できることを示した。さらに、路面の傾斜を複数の歩行者から集約することによって、通路の凹凸の有無を判断できることを示した。

1. はじめに

スマートフォンの標準アプリケーションの一つとして Google Map が搭載されているように、近年、都市街区における歩行者ナビゲーションサービスはより身近なものになってきている。このような歩行者ナビゲーションサービスにおいて、NAVITIME [1] は、例えば、雨に濡れないよう、アーケードなど屋根がある経路や、高齢者や障害者に対しては、階段の少ない経路を提示するなど、他のサービスとは異なる特徴的な機能を有している。これらの経路は、通路毎の距離だけでなく通路の特徴を保持するデータベースに基づき導出されるものであるが、このようなデータベースの構築には膨大な人的コストを要するため、利用者が多く費用対効果の高い大都市のみで提供される機能となっている。一方、災害現場において、避難者の避難行動を効率よく支援するためには、階段の有無だけ通路の特徴だけでなく、路面の状況の情報を即座に把握することが求められる。例えば、瓦礫の上では高齢者や子供は円滑に避難を行うことが困難であり、また、重機や救助ロボットは

悪路によって動きが妨げられてしまうことが想定される。このように、歩行者ナビゲーションと災害支援のいずれの場合においても、通路の情報（階段や段差等の存在）と路面の状況（瓦礫や砂利等の存在）を効率よく収集することが課題となる。このために、専用の計測機器を配置することは、コストの観点から現実的ではなく、様々な場所において、協力者同士が計測結果を提供し、かつ共有する参加型センシングによる状況把握が現実的な手法として挙げられる。また、スマートウォッチや靴型ウェアラブルデバイス等、日々の行動を認識することで、健康管理を行うウェアラブルデバイスが普及しつつあり、本来の目的である自身の活動を把握だけでなく、これらのデバイス（特に靴型ウェアラブルデバイス）によって、人々の動きを詳細に把握することで、通路や路面の情報を推定し、かつ効率よく集められると考えられる。

本研究では、慣性センサの一種である加速度センサとジャイロセンサを搭載した靴から得られる情報に基づき、人の歩容を詳細に把握することで、足が接地した通路内の各点の情報として、路面の状況を推定する手法を提案する。また、路面の状況を用いてその通路全体の状況も推定する。まず、加速度センサとジャイロセンサを両足の靴に搭載し、足が接地した時間を検出する。また、接地のタイミングにおける加速度センサの値から、足が接地している箇所の傾斜を推定する。同時に、足が路面に接している間

¹ 大阪大学大学院情報科学研究科
Graduate School of Information Science and Technology, Osaka Univ.

a) t-satoh@ist.osaka-u.ac.jp

b) hiromori@ist.osaka-u.ac.jp

c) h-yamagu@ist.osaka-u.ac.jp

d) higashino@ist.osaka-u.ac.jp

に観測された加速度の分散の程度から、その路面が安定しているかを判断する。さらに、複数のユーザからある通路の路面の傾斜を収集し、路面の傾斜の分散からその通路の凹凸の有無を判断する。

様々な通路を対象に評価実験を行い、高い精度で接地しているタイミングを検出し、異なる7種類の路面の傾斜を検出するだけでなく、路面の安定度を認識できることを示した。また、路面の傾斜を複数のユーザから集約することによって、傾斜の分散から通路の凹凸の程度を判断できることを示した。

2. 関連研究

近年、小型のセンサが安価で入手できるようになり、センサから得られた計測結果に対し、機械学習を適応することで、人々の日常的な行動を認識することが可能となってきた。特に、リストバンド、ベルト、靴など人々が身に付ける身近なデバイスにも、様々なセンサが搭載され、行動認識において欠かせないものとなっている [4], [5], [6], [7]。例えば、加速度センサを身体のような部位に装着することにより、歩く、座る、立つ、走る、テレビを視聴する、自転車に乗る、食事をとる、読書をする等の様々な行動を認識できることが示されている [4]。Bao らの研究 [5] では、2軸の加速度センサを身体のある箇所に装着し、約20種類の行動を認識する手法が提案されている。同様に、様々なセンサを搭載するスマートフォンも人々の行動を推定するためのデバイスとして利用されている [8]。しかしながら、スマートフォンは常に身体に直接接触しているものではないため、人々の振る舞いを詳細に推定することはできず、スマートフォンによる行動推定には限界がある。そこで、人々の振る舞いを正確に測定するために、ウェアラブルデバイスを活用した取組が多数実施されている。例えば、靴にセンサを装着することで、人々の歩容を分析し、歩行行動を支援するシステムが開発されている [9], [10], [11], [12]。文献 [10] では、靴に加速度センサを搭載することで、対象者の転倒を検出するシステムが提案され、また、Morris らは、実際の病院において、患者の歩容を簡単に分析可能なシステムを開発している [12]。

一方、スマートフォンの普及に伴い、人々が保持するスマートフォンから得られた情報を継続的に収集、処理、共有する参加型センシングは、都市を対象とした調査の重要な情報源として利用されている [13]。スマートフォン一つの計測結果の精度は高いものではないが、多数の参加者からの計測結果を集約することにより、都市レベルの観測を実現している。例えば、文献 [14] においては、スマートフォンのマイクから得られた音声データを都市レベルで集約することで、街中の騒音を把握する手法が提案されている。また、スマートフォンに搭載されているセンサから直接得られる情報だけでなく、センサから得られる

情報を基に、周辺の状況を推定する取組も実施されている。例えば、従来の道路メンテナンス手法においては高価な専用の機器を必要としているが [15]、車に乗っている人が保持するスマートフォンに搭載されている GPS や加速度センサを利用することで、車が通過する道路の凹凸の程度を把握し、安価に路面状況を推定する手法が提案されている [16], [17], [18]。

提案手法は、ウェアラブルデバイスを活用し、人々の挙動を詳細に把握することで路面状況を推定する点で、既存研究と異なっているだけでなく、従来の距離に基づく経路推薦に対し、個々人の好みに則した経路を推薦できるように、路面状況を地理情報として付与する点で特徴的な取組である。

3. 提案手法

本章では、ウェアラブルセンサから収集される慣性センサの観測値を用いて、通路の状況を推定する手法について説明する。提案手法では、歩行者に対し、各通路における歩行行動の負担を判断できる情報として、以下の3つの通路状況を推定する。

- (1) 路面の傾斜
- (2) 通路の凹凸
- (3) 路面の安定性

一般に、図1の左図に示されるような路面の傾斜が5度を超えるような通路を歩行する際、歩行者は疲れを感じるようになる。図1の中央の図に示すような凹凸のある通路は、車椅子利用者にとっては車体が大きく揺さぶられるものであり、また、高齢者にとっては凹凸に足が引っ掛かり転倒の恐れがある危険なものである。同様に、図1の右図に示すような、路面が柔らかく安定しない道も、歩行者によっては容易に歩行できる通路ではなく、例えば、車輪がとられてしまうなど、車椅子利用者に対しては危険な状況が想定される。以下に、これらの通路や路面の状況を靴型ウェアラブルセンサを用いて推定する手法について述べる。

歩行時の足の動きを図2に示す。図2(2),(3),(4)の状態に示されるように、足にセンサを装着していたとしても、これらの状態においては、センサからの観測値は足の動きと路面の状況が混在したものとなる。一方、(1)の状態(接地している状態)では、足は大きく動いていないため、その時の観測値は地面の状況のみが反映される。従って、路面の状況を適切に認識するためには、接地している状態を認識することが必要である。

接地している状態を認識するため、提案手法では、まず足が停止しているタイミング(以下、接地時間と呼ぶ)を検出する(図2(1))。この状態においては、足は動いていないため、加速度センサは重力しか観測しておらず、また、ジャイロセンサによる角速度の観測値はほぼ0となる。そこで、サンプリングされた3軸の加速度及び角速度

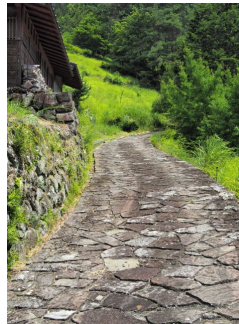


図 1 急坂(左), 平らでない道(中央), 安定しない道(右)の例



図 2 歩行時の足の動き

に対し, それらの大きさを計算し, その大きさに基づき接地時間を検出する. ここでいう大きさとは, 3 軸の各値をベクトルとみなした時のノルムである. 時刻 t に X, Y, Z 軸のそれぞれで観測された加速度の値をそれぞれ $a_{x,t}, a_{y,t}, a_{z,t}$ で表すと, 時刻 t における加速度の大きさは $\sqrt{a_{x,t}^2 + a_{y,t}^2 + a_{z,t}^2}$ と表される. 角速度についても同様である. 次に, ここで得られた加速度と角速度の大きさの系列を, 移動平均法を用いて平滑化し, 細かな値の振動を取り除き, 足の動きの大きな視点での観察を実現するとともに, センサの計測誤差を除去する. 平滑化の後, 加速度及び角速度ともに大きさが一定の閾値以下となっている時間帯を抽出することで, 足が動いていない時間帯を検出する. 但し, 足が空中にあっても加速度が重力と同程度で角速度がほぼ 0 となる時間帯が瞬間的に存在する可能性がある. 足が完全に地面についている時間は少なくとも 0.2 秒から 0.3 秒程度であることから, 抽出された時間帯のなかで継続時間が 0.1 秒以下のものを除去する. 最終的に残ったものが, 足が停止している時間帯となる.

3.1 通路の傾斜と路面の凹凸の推定

3.1.1 路面の傾斜の推定

通路の通行の困難さの判断材料として, 通路の傾斜やその路面の凹凸は有用な情報である. 以下では前述の接地時間に基づき, 通路の傾斜やその路面の凹凸を推定する手法について述べる. 提案手法では, 一步毎に通路の傾斜を推定する. さらに, 一步毎の通路の傾斜の情報に基いて, 路面の凹凸を推定する. 接地時間においては, 加速度センサの観測値は重力とほぼ等しく, またその重力は 3 軸加速度センサの各軸にセンサ自体の傾きに従って分散されてい

る. 図 3 に示されるように, センサの X 軸, Y 軸方向の傾きがそれぞれ θ, ψ とすると, 加速度センサの観測値とセンサの傾きの関係は式 (1), (2), (3), (4) として表される. 従って, θ と ψ はそれぞれ式 (5), (6) により求めることができる.

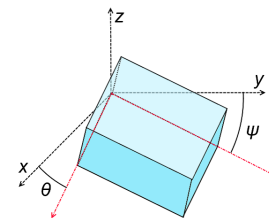


図 3 X 軸方向に θ Y 軸方向に ψ 傾いているセンサ (水色の箱)

$$a_x = g \sin \theta \quad (1)$$

$$\sqrt{a_y^2 + a_z^2} = g \cos \theta \quad (2)$$

$$a_y = g \sin \psi \quad (3)$$

$$\sqrt{a_x^2 + a_z^2} = g \cos \psi \quad (4)$$

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{a_x}{\sqrt{a_y^2 + a_z^2}} \right) \quad (5)$$

$$\psi = \tan^{-1} \left(\frac{a_y}{\sqrt{a_x^2 + a_z^2}} \right) \quad (6)$$

ここで g は重力加速度 ($9.8m/s^2$) とする. また, 傾きが反時計回りの方向であるとき, θ と ψ は正の値を持つものとする (すなわち, 図 3 においては $\theta \leq 0$ かつ $\psi \geq 0$ である). 傾斜のない路面上でのセンサの X 軸, Y 軸方向での傾斜をそれぞれ θ_{mount} と ψ_{mount} とすると, センサの X

軸, Y 軸方向の路面の傾斜 (Θ と Ψ) はそれぞれ式 (7), (8) で求めることが可能である.

$$\Theta = \theta - \theta_{mount} \quad (7)$$

$$\Psi = \psi - \psi_{mount} \quad (8)$$

センサの X 軸を靴の前方, Y 軸を靴の側方に向けてようにセンサを靴に設置すれば, Θ と Ψ はそれぞれ靴の側方, 前方への傾斜を表す値となる.

3.1.2 路面の凹凸の推定

以下に, 前節で述べた通路の傾斜情報を用いて路面の凹凸を推定する手法について述べる. ユーザが凹凸のある路面上を歩行した時, 提案手法によって得られる通路の傾斜は凹凸に従い, 接地毎で様々な値として観測され, 凹凸の程度は傾斜の値の分散に反映される.

まず, 路面の凹凸を知りたい時間帯に対し, 接地時に観測された通路の傾斜を集約し, 傾斜の分散を計算する. この傾斜の分散は路面の凹凸を反映していると考えられるが, ある場所において一人のユーザが接地する数は限られることから, 一人のユーザからの傾斜の分散だけで, 路面の凹凸を判断することはできない. そこで, 提案手法では, 同一通路を歩行した複数のユーザの傾斜の分散を集約し, その通路を歩行した複数のユーザの傾斜の分散を平均した際, ある閾値を超えていれば, その通路には凹凸が存在すると判断する.

3.2 路面の安定性の推定

砂利道や泥道の上を歩いたり走ったりすると, 足で踏んだ場所が凹むなど, 路面が不安定ならば, 一回の接地時間の中でも路面になにかしらの変化が生じる. そこで, 接地時間における足の動きから, 路面の安定性を判断する. 事前実験によって, 不安定な路面を歩行した際の各軸における加速度の観測値は, 安定した路面における歩行と比較し, 大きく変動することがわかっている. 提案手法では, ある接地時間における加速度の観測値の系列に対し, それらの分散を各軸に対して計算する. この各軸に対し計算した加速度の分散の中で最も小さいものが閾値以下であれば, そのステップにおいて踏んだ路面は安定している, と判断する. 逆に, 最も小さいものが閾値以上であれば, 接地中に足が動いたと推測され, その路面は不安定である, と判断する.

4. 性能評価

本章では, 提案手法を用いて通路の状況を推定できることを示すため, 本システムのプロトタイプを作製し, 実環境において実験を行った. 使用した慣性センサは多機能センサである "TSND-121" (図 4) であり, 3 軸の加速度センサ (分解能 0.48mG), ジャイロセンサ (分解能 0.06dps (度毎秒)) を備え, それぞれ 100Hz でサンプリングする. この

慣性センサを, 図 5 のように, X 軸を靴の前方, Y 軸を靴の側方に向けてるように靴に取り付けた.



図 4 多機能センサ TSND-121



図 5 靴に搭載されたセンサ

ここまでの章で, (a) 通路の傾斜, (b) 路面の凹凸, (c) 路面の安定性の 3 種の状況を接地時間の情報に基づいて推定する手法について述べてきた. そこで本章では, まず接地時間の推定手法についての評価実験を行い, 次いで別の実験を行い (a), (b), (c) のそれぞれの推定手法を評価する.

4.1 接地時間の認識

提案手法では接地時間における通路の傾斜, 路面の凹凸と安定性を推定する. したがって, 路面状況の推定は接地時間の認識精度に依存している. 性能評価のため, 以下に示す 7 箇所の異なる場所で実験を行なった. (1) 階段, (2) 凹凸のない場所と石畳とを含む道, (3) 凹凸のない坂道, (4) 芝生, (5) 土がむき出しの坂道, (6) 石畳の坂道, (7) 砂利道. 各場所について, 4 人の被験者に対し 4 回の歩行を行い, 慣性センサの観測値を収集したため, 112 個のサンプルが収集された. これら 112 個のサンプルに対し, ステップの認識を行なった. 表 1 に, 被験者ごと, 歩行場所ごとに観測されたステップの回数と実際の歩行回数が異なったサンプルの個数を示す.

表 1 に示されるように, 提案手法では 110 個のサンプルにおいてステップを正しく認識した. これらの 110 個のサンプルに含まれるステップは, 全部で 3000 ステップを超えている. しかしながら, 2 つのサンプルではうまく認識できていないステップが存在した. これはそのサンプル内に普段では起きないような足の動きが起こったことに因る.

被験者 \ 場所	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	計
A	1	0	0	0	0	0	0	1/28
B	0	0	0	0	0	0	0	0/28
C	0	0	0	0	1	0	0	1/28
D	0	0	0	0	0	0	0	0/28
計	1/16	0/16	0/16	0/16	1/16	0/16	0/16	2/112

表 1 ステップの誤認識・認識漏れが発生したサンプルの個数

あるサンプルでは、足が地面にきちんと接地していなかったステップがあり、そのステップは認識できなかった。もう一つのサンプルでは、足が接地してから次の一步に踏み出す前に大きく動いたため、実際には1歩であるところを2歩歩いたものとして認識されてしまった。ただし、これら2つのサンプルにおいても、認識に失敗したステップ以外のステップは漏れ・重複なく認識できていることを確認した。従って、全体では、様々な被験者や歩行場所に対して、提案手法を用いることでステップを高精度で認識できている。

4.2 通路の傾斜と路面の凹凸の推定

次に、通路の傾斜の推定手法について評価実験を行なった。3人の被験者は接地時間の認識実験と同様の靴を履き、平地(0°)、スロープ(3°)、坂道(7°)、急坂(16°)の4種類の傾斜の場所を歩行した。平地ではある場所を往復し、傾斜のある道では坂を昇降し、各ステップについて傾斜を提案手法により推定した。図6, 7, 8, 9にそのとき全ユーザにおいて推定された傾斜を集約し箱ひげ図に示す。なお、X軸, Y軸を別で表しており、ascendは往路(坂では坂を下る方向)、descendは復路(坂では坂を登る方向)に歩行した時の傾斜の推定結果である。

図6などに示されたように、X軸方向の傾斜は全てのケースで凡そ0°となり、推定結果が正しいことが示されている。しかしながら、Y軸方向の傾斜は図6のように往復の両方で約1.5°に収束している。これは、傾斜の推定を行うタイミングにおいて、靴底は全て地面についてはいるものの、踵に体重が懸かっており、靴が変形し、つま先が浮き上がりセンサが傾いたことによるものである。同様の傾向が図7, 8, 9でも観測される。これらにおいて観測値が1.5°加算されているものとして値を観測すると、それぞれ凡そ±4°, ±7° and ±20°に収束しているとみなすことが可能である。特に実際の傾斜と大きな差異があるのは急坂(16°)歩行時の実験結果であるが、ここでの結果をみれば傾斜が大きい、ということは明白であるので、歩行の困難さを知るための通路の傾斜推定という観点からは問題がない。また、外れ値(図に+で記載)が観測されることがあるが、これは多くのユーザから傾斜の推定値を収集することで除去可能である。従って、提案手法を用いると、複数のユーザから収集した傾斜の収束値という形で通路の傾

斜を推測可能である。

次に、凹凸のある道で計測された16個のトレースを用いて、傾斜の分散が凹凸を反映することを示す。このトレースは、なめらかな道と石畳で凹凸のある道を含む道で収集されたものである。それぞれの路面において推定された傾斜の分散を、トレースごとに図10に示す。

図10のように、なめらかな道と凹凸のある石畳の道では傾斜の分散に明らかな差異はない。そこで、各軸について両方の道での傾斜の分散に有意な差があるか否かを、有意水準5%のt検定を用いて検証した。結果として、X軸については帰無仮説を棄却出来なかった(p値は0.507)。一方で、Y軸については帰無仮説が棄却された(p値は0.008)。したがってY軸の傾斜の分散は路面の凹凸によって有意に変化し、提案手法ではこれを用いて路面の凹凸を推定可能である。

4.3 路面の安定性の推定

ここでは路面の安定性の評価を行う。提案手法では接地時間における加速度の分散を用いることで、各ユーザの各ステップに対して路面の安定性を推定する。評価実験として、安定した道と不安定な道(砂利道)の両方で歩行しデータを収集した。収集されたデータに対し、各ユーザの各ステップが安定な路面で行われたか否かを提案手法を用いて推定し、その推定性能をF値を用いて評価する。まず、ステップが安定か否かを、加速度の分散の閾値を変化させながら推定し、それぞれ閾値における安定性の推定結果をtrue-positive(TP), false-positive(FP), false-negative(FN), true-negative(TN)の4種に分類した。なお、安定した道の上で行われたステップの回数と、砂利道の上で行われたステップの回数が異なるため、式(9), (10), (11), (12)のようにして正規化を行なった。

$$TP' = \frac{TP}{TP+FN} \quad (9)$$

$$FP' = \frac{FP}{FP+TN} \quad (10)$$

$$FN' = \frac{FN}{TP+FN} \quad (11)$$

$$TN' = \frac{TN}{FP+TN} \quad (12)$$

この正規化を行なった後、以下の式(13), (14), (15)を用いてrecall(再現率), precision(精度), F-measure(F値)を計算した。このF値が高い時、推定性能が良い。

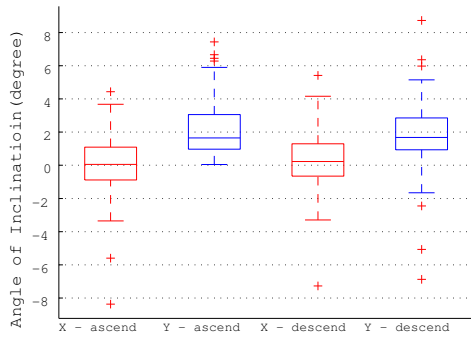


図 6 平地歩行時の X 軸, Y 軸方向の傾斜

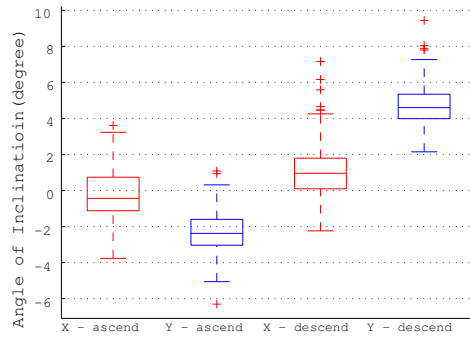


図 7 3° の坂歩行時の X 軸, Y 軸方向の傾斜

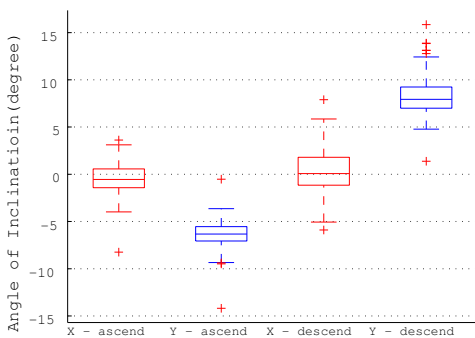


図 8 7° の坂歩行時の X 軸, Y 軸方向の傾斜

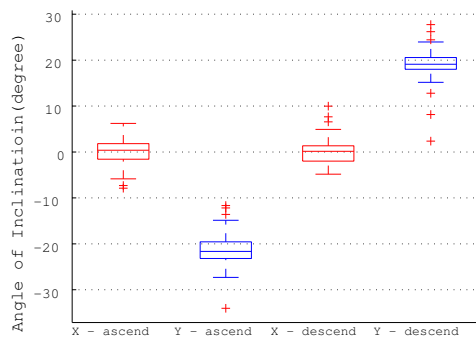


図 9 16° の坂歩行時の X 軸, Y 軸方向の傾斜

$$Recall = \frac{TP'}{TP'+FN'} \quad (13)$$

$$Precision = \frac{TP'}{TP'+FP'} \quad (14)$$

$$F-measure = \frac{2 \cdot Recall \cdot Precision}{Recall + Precision} \quad (15)$$

閾値を変化させた時の recall, precision, F-measure のそれぞれの値を図 11 に示す。緑線で表される F-measure は判断の閾値が $0.46(m/s^2)^2$ のとき最大値 0.905 をとる (このとき recall と precision はそれぞれ 0.938 と 0.875 である)。従って、提案手法ではこの $0.46(m/s^2)^2$ という閾値を用いることで、最も性能良く路面の安定性を推定可能である。

5. おわりに

本研究では、靴に搭載した慣性センサを用いて通路の状況を推定する新たな手法を提案した。提案手法では、センサを搭載した靴を履いたユーザが歩行した通路に対し、通路の傾斜、その路面の凹凸、その路面の安定性という 3 種の状況を推定することができる。

また、性能評価実験を行い、提案手法の推定性能を検証した。実験の結果として、提案手法では接地時間の認識を

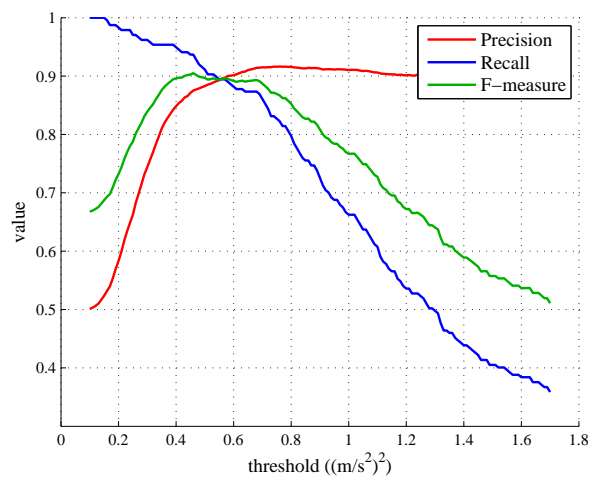


図 11 路面の安定性推定において閾値を変化させた時の Recall, Precision と F-値

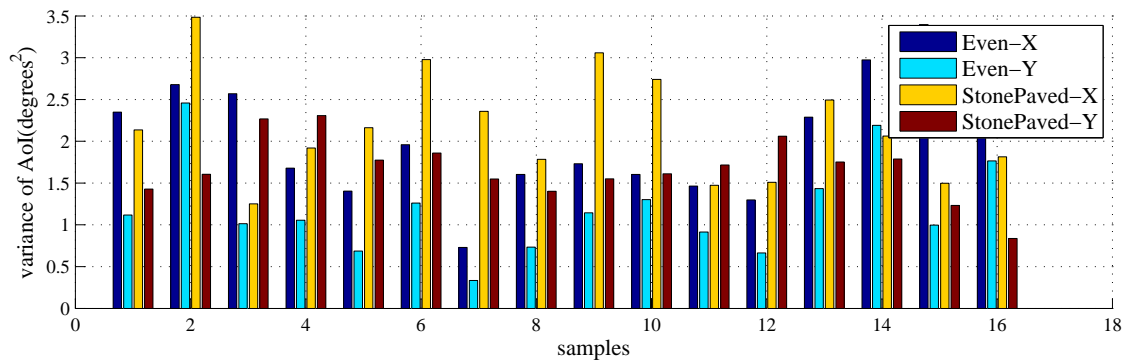


図 10 平地 (Even) と凹凸のある道 (Stone-paved) における傾斜の分散

ほぼ確実に行うことが可能であること、通路の傾斜や路面の安定性を正確に推定可能であることを示した。また、ある通路において、複数のユーザから傾斜の分散を計算したものを集約することで、路面の凹凸の推定が可能であることも示した。今後の発展として、高齢者や車椅子利用者に対する大きな障壁となり得る“段差”などの、新たな種類の道路の特徴や状況を推定する手法や、“ぬかるんでいる”、“砂利が散らばっている”、“凍結している”などの、凹凸や不安定な道に対し、その原因を推定する手法を確立し、より詳細な通路状況の推定手法を考案する。

参考文献

- [1] Arikawa, M., Konomi, S. and Ohnishi, K.: Navitime: Supporting Pedestrian Navigation in the Real World, *Pervasive Computing, IEEE*, Vol. 6, No. 3, pp. 21–29 (2007).
- [2] Foxlin, E.: Pedestrian tracking with shoe-mounted inertial sensors, *Computer Graphics and Applications, IEEE*, Vol. 25, No. 6, pp. 38–46 (2005).
- [3] Harle, R.: A Survey of Indoor Inertial Positioning Systems for Pedestrians, *Communications Surveys Tutorials, IEEE*, Vol. 15, No. 3, pp. 1281–1293 (2013).
- [4] DeVaul, R. W. and Dunn, S.: Real-time motion classification for wearable computing applications, *2001, project paper, http://www.media.mit.edu/wearables/mithril/realtime.pdf* (2001).
- [5] Bao, L. and Intille, S.: Activity Recognition from User-Annotated Acceleration Data, *Pervasive Computing* (Ferscha, A. and Mattern, F., eds.), Vol. 3001, Springer Berlin Heidelberg, pp. 1–17 (2004).
- [6] Ravi, N., Dandekar, N., Mysore, P. and Littman, M. L.: Activity Recognition from Accelerometer Data, *Proceedings of the 17th Conference on Innovative Applications of Artificial Intelligence - Volume 3*, AAAI Press, pp. 1541–1546 (2005).
- [7] Consolvo, S., McDonald, D. W., Toscos, T., Chen, M. Y., Froehlich, J., Harrison, B., Klasnja, P., LaMarca, A., LeGrand, L., Libby, R., Smith, I. and Landay, J. A.: Activity Sensing in the Wild: A Field Trial of Ubifit Garden, *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, ACM, pp. 1797–1806 (2008).
- [8] Kwapisz, J. R., Weiss, G. M. and Moore, S. A.: Activity Recognition Using Cell Phone Accelerometers, *SIGKDD Explor. Newsl.*, Vol. 12, No. 2, pp. 74–82 (2011).
- [9] Aminian, K., Rezakhanlou, K., De Andres, E., Fritsch, C., Leyvraz, P.-F. and Robert, P.: Temporal feature estimation during walking using miniature accelerometers: an analysis of gait improvement after hip arthroplasty, *Medical & Biological Engineering & Computing*, Vol. 37, No. 6, pp. 686–691 (1999).
- [10] Sim, S., Jeon, H., Chung, G., Kim, S., Kwon, S., Lee, W. and Park, K.: Fall detection algorithm for the elderly using acceleration sensors on the shoes, *Engineering in Medicine and Biology Society, EMBC, 2011 Annual International Conference of the IEEE*, pp. 4935–4938 (2011).
- [11] Sabatini, A., Martelloni, C., Scapellato, S. and Cavallo, F.: Assessment of walking features from foot inertial sensing, *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, Vol. 52, No. 3, pp. 486–494 (2005).
- [12] Morris, S. and Paradiso, J.: Shoe-integrated sensor system for wireless gait analysis and real-time feedback, *Engineering in Medicine and Biology, 2002. 24th Annual Conference and the Annual Fall Meeting of the Biomedical Engineering Society EMBS/BMES Conference, 2002. Proceedings of the Second Joint*, Vol. 3, pp. 2468–2469 vol.3 (2002).
- [13] Lee, U. and Gerla, M.: A survey of urban vehicular sensing platforms, *Computer Networks*, Vol. 54, No. 4, pp. 527–544 (2010).
- [14] Rana, R. K., Chou, C. T., Kanhere, S. S., Bulusu, N. and Hu, W.: Ear-phone: An End-to-end Participatory Urban Noise Mapping System, *Proceedings of the 9th ACM/IEEE International Conference on Information Processing in Sensor Networks*, pp. 105–116 (2010).
- [15] Pavement Interactive: Pavement Interactive Core: Roughness, <http://www.pavementinteractive.org/article/Roughness/>.
- [16] Chu, X. and Wu, Y.: Designed on the Low Cost System Framework of Road Condition Recognition Based on Roadside Multi-sensors, *Asia-Pacific Conference on Information Processing, 2009. APCIP 2009.*, Vol. 2, pp. 173–176 (2009).
- [17] Eriksson, J., Girod, L., Hull, B., Newton, R., Madden, S. and Balakrishnan, H.: The Pothole Patrol: Using a Mobile Sensor Network for Road Surface Monitoring, *Proceedings of the 6th International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services*, ACM, pp. 29–39 (2008).
- [18] Mohan, P., Padmanabhan, V. N. and Ramjee, R.: Ner-cell: Rich Monitoring of Road and Traffic Conditions Using Mobile Smartphones, *Proceedings of the 6th ACM*

Conference on Embedded Network Sensor Systems, pp.
323-336 (2008).