

路面状況に基づいた通行経路推薦システムの研究開発

代表研究者

廣森 聡仁

大阪大学 大学院情報科学研究科 准教授

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い。一方、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す。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す。

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ている。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[5][6][7][8]。例えば、加速度センサを身体の様々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5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[6]。しかしながら、スマートフォンは常に身体に直接触れ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[10][11][12][13]。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 [13].

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 [14]. スマートフォン一つ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、周辺の状態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 [18]、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 [15] [16] [17]. 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、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



図1 急坂 (左), 平らでない道 (中央), 安定しない道 (右) の例

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、路面の傾斜、通路の凹凸、路面の安定性の 3 つの通路状況を推定する. 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.



図2 歩行時の足の動き

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、ステップ時間と呼ぶ）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に対し、それらの大きさを計算し、その大きさに基づきステップ時間を検出する。ここでいう大きさは、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 路面の傾斜と凹凸の推定

(1) 路面の傾斜の推定

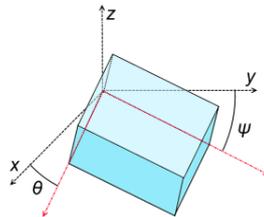


図3 X軸方向に θ Y軸方向 ψ に傾いているセンサ（水色の箱）

道路の通行の困難さを把握する指標として、路面の傾斜と凹凸が挙げられる。以下では前述のステップ時間の情報を利用し、これらを推定する手法について述べる。提案手法では、一步毎に路面の傾斜を推定する。そして、一步毎の路面の傾斜の情報に基づいて、路面の凹凸を推定する。ステップ時間においては、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の傾きに伴って分散する。図3のようにセンサの X 軸、 Y 軸方向の傾きがそれぞれ θ 、 ψ で表すと、このときの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)のように表される。従って、 θ と ψ は式(5)、(6)でそれぞれ求めることが可能である。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 $\theta \leq 0$ 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)で求めることができる。センサの X 軸を靴の前方、 Y 軸を靴の側方に向ける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。

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

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

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

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

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

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

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

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

(2) 路面の凹凸の推定

以下に、前述の路面の傾斜の情報から路面の凹凸を推定する手法について述べる。歩行者が凹凸のある道を歩いた時、提案手法によって得られる路面の傾斜は凹凸にしたがってステップごとに様々な値となる。したがって、凹凸の程度は傾斜の値の分散に反映されている。まず、路面の凹凸を知りたいある時間帯(例えばある一歩からその10歩前まで)を選ぶ。次に、その時間帯内の各ステップにおいて観測された路面の傾斜をX軸、Y軸のそれぞれについて集約し、それぞれの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ため、その推定に利用可能である。しかしながら、この傾斜の分散は傾斜の誤差の影響を受けることがある。また、ある場所で一人のユーザがステップする回数は限られてしまっていることから、一人のユーザの傾斜の分散だけでは凹凸の存在を把握する情報として十分ではない。そこで、提案手法では同一地点を歩いた複数のユーザの傾斜の分散を集約して路面の凹凸を推定する。ある道路において、その道路を歩いた複数のユーザの傾斜の分散を平均したときに、ある閾値を超えていれば、その道路には凹凸が存在すると判断する。

(3) 路面の安定性の推定

路面の安定性は路面の凹凸とともに、特に車椅子利用者においては道路の通行の困難さを判断するのに有用な情報である。路面が不安定ならば、一ステップの中でも変化が起こる。例えば、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。逆に言えば、提案手法のステップ時の足の動きが分かることを利用して、ステップ時に道路が変形したことを検出することによって、路面の安定性を評価することができる。事前実験によって、不安定な路面を歩いた時には安定した路面に比べてステップ中の加速度が加速度センサの各軸において大きく変動する事がわかっている。したがって、提案手法では、あるステップの中での加速度の観測値の分散を加速度センサの各軸に対して計算し、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、ある閾値以下であれば、その道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、ステップ中に足が動いたと推測され、その道は不安定な道であると判断する。

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種の状況をステップ時間の情報に基いて推定する手法について述べてきた。本章では、まずステップ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 ステップ時の認識

提案手法ではステップ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、路面状況の推定はステップ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、112個のサンプルが収集した。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 ステップの誤認識・認識漏れが発生したサンプルの個数

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。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 傾斜と路面の凹凸の認識

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人の被験者はステップ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に全ユーザにおいて推定された傾斜を集約し箱ひげ図として示す。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。

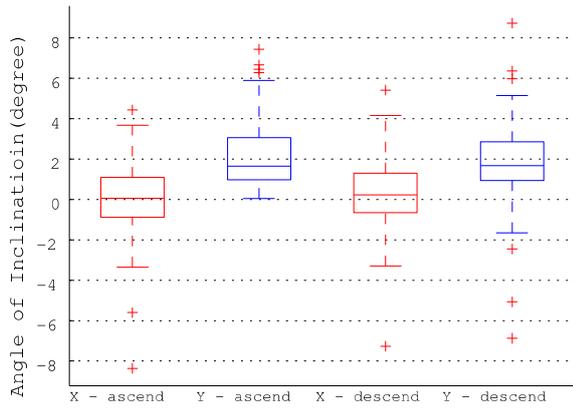


図6 平地歩行時の X 軸,Y 軸方向の傾斜

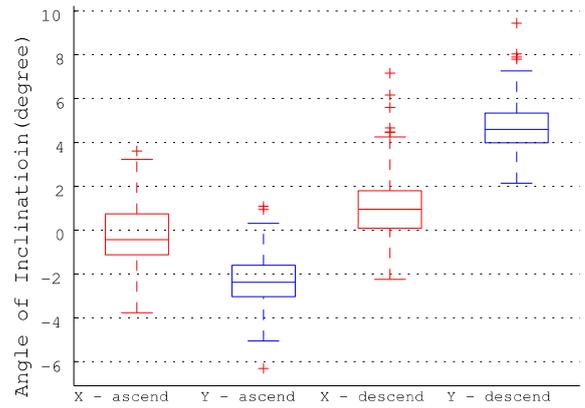


図7 3°の坂歩行時の X 軸,Y 軸方向の傾斜

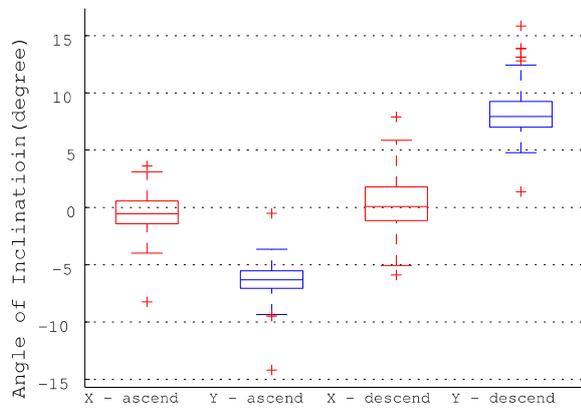


図8 7°の坂歩行時の X 軸,Y 軸方向の傾斜

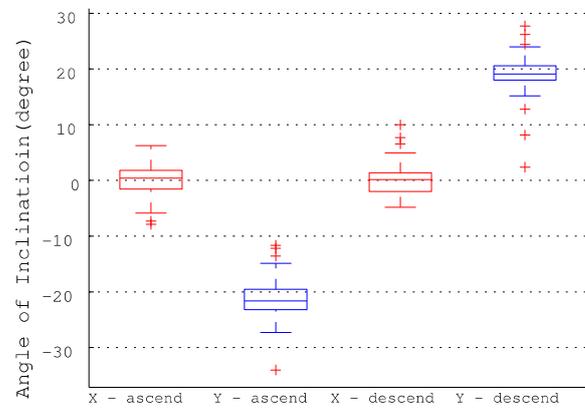


図9 16°の坂歩行時の X 軸,Y 軸方向の傾斜

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 $\pm 4^\circ$, $\pm 7^\circ$, $\pm 20^\circ$ に収束しているとみなすことができる。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役立つものと考えている。

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。

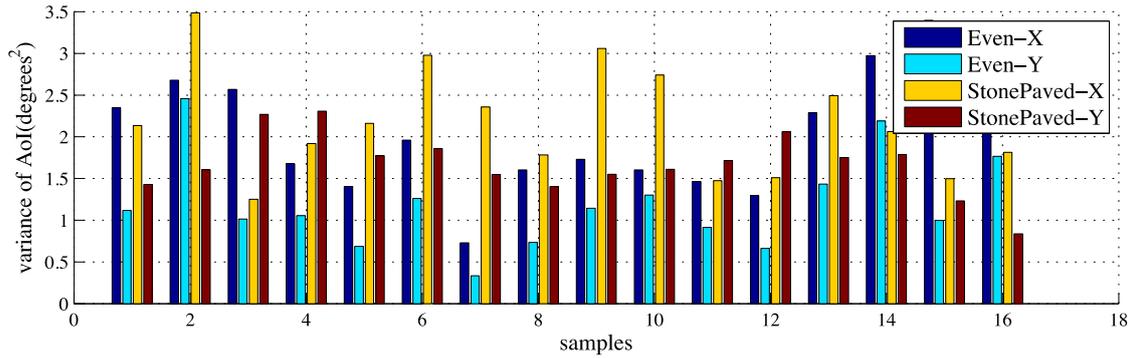


図 10 平地 (Even) と凹凸のある道 (Stone-paved) における傾斜の分散

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

ここでは路面の安定性の評価を行う。提案手法ではステップ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、推定性能が良いことを示す。

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

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

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

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ことがわかる。

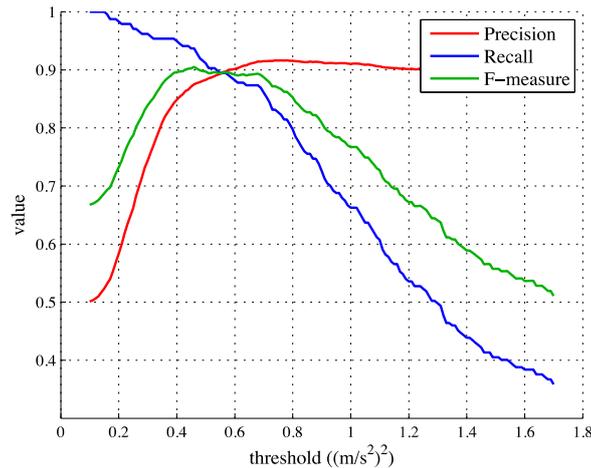


図 11 路面の安定性推定において閾値を変化させた時の Recall, Precision と F-値

5 まとめと今後の課題

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ー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、提案手法ではステップ時間の認識を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、複数のユーザー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し、歩行者ナビゲーションシステムの高度化に貢献したい。

【参考文献】

- [1] M. Arikawa, S. Konomi, and K. Ohnishi, “Navitime: Supporting pedestrian navigation in the real world,” *Pervasive Computing, IEEE*, vol. 6, no. 3, pp. 21–29, July 2007.
- [2] E. Foxlin, “Pedestrian tracking with shoe-mounted inertial sensors,” *Computer Graphics and Applications, IEEE*, vol. 25, no. 6, pp. 38–46, Nov 2005.
- [3] R. Harle, “A survey of indoor inertial positioning systems for pedestrians,” *Communications Surveys Tutorials, IEEE*, vol. 15, no. 3, pp. 1281–1293, Third 2013.
- [4] R. W. DeVaul and S. Dunn, “Real-time motion classification for wearable computing applications,” 2001, *project paper*, <http://www.media.mit.edu/wearables/mithril/realtime.pdf>, 2001.
- [5] L. Bao and S. Intille, “Activity recognition from user-annotated acceleration data,” in *Pervasive Computing*, ser. Lecture Notes in Computer Science, A. Ferscha and F. Mattern, Eds. Springer Berlin Heidelberg, 2004, vol. 3001, pp. 1–17.
- [6] N. Ravi, N. Dandekar, P. Mysore, and M. L. Littman, “Activity recognition from accelerometer data,” in *Proceedings of the 17th Conference on Innovative Applications of Artificial Intelligence - Volume 3*, ser. IAAI’05, 2005, pp. 1541–1546.
- [7] S. Consolvo, D. W. McDonald, T. Toscos, M. Y. Chen, J. Froehlich, B. Harrison, P. Klasnja, A. LaMarca, L. LeGrand, R. Libby, I. Smith, and J. A. Landay, “Activity sensing in the wild: A field trial of ubifit garden,” in *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, ser. CHI ’08, 2008, pp. 1797–1806.

- [8] J. R. Kwapisz, G. M. Weiss, and S. A. Moore, “Activity recognition using cell phone accelerometers,” *SIGKDD Explor. Newsl.*, vol. 12, no. 2, pp. 74–82, Mar. 2011.
- [9] K. Aminian, K. Rezakhanlou, E. De Andres, C. Fritsch, P.-F. Leyvraz, and P. Robert, “Temporal feature estimation during walking using miniature accelerometers: an analysis of gait improvement after hip arthroplasty,” *Medical & Biological Engineering & Computing*, vol. 37, no. 6, 1999.
- [10] S. Sim, H. Jeon, G. Chung, S. Kim, S. Kwon, W. Lee, and K. Park, “Fall detection algorithm for the elderly using acceleration sensors on the shoes,” in *Engineering in Medicine and Biology Society, EMBC, 2011 Annual International Conference of the IEEE*, Aug 2011, pp. 4935–4938.
- [11] A. Sabatini, C. Martelloni, S. Scapellato, and F. Cavallo, “Assessment of walking features from foot inertial sensing,” *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. 52, no. 3, pp. 486–494, March 2005.
- [12] S. Morris and J. Paradiso, “Shoe-integrated sensor system for wireless gait analysis and real-time feedback,” in *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, Oct 2002, pp. 2468–2469 vol.3.
- [13] U. Lee and M. Gerla, “A survey of urban vehicular sensing platforms,” *Computer Networks*, vol. 54, no. 4, pp. 527 – 544, 2010, advances in Wireless and Mobile Networks.
- [14] R. K. Rana, C. T. Chou, S. S. Kanhere, N. Bulusu, and W. Hu, “Ear-phone: An end-to-end participatory urban noise mapping system,” in *Proceedings of the 9th ACM/IEEE International Conference on Information Processing in Sensor Networks*, ser. IPSN ’10. New York, NY, USA: ACM, 2010, pp. 105–116. [Online]. Available: <http://doi.acm.org/10.1145/1791212.1791226>
- [15] X. Chu and Y. Wu, “Designed on the low cost system framework of road condition recognition based on roadside multi-sensors,” in *Asia-Pacific Conference on Information Processing, 2009. APCIP 2009.*, vol. 2, July 2009, pp. 173–176.
- [16] J. Eriksson, L. Girod, B. Hull, R. Newton, S. Madden, and H. Balakrishnan, “The pothole patrol: Using a mobile sensor network for road surface monitoring,” in *Proceedings of the 6th International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services*, ser. MobiSys ’08, 2008, pp. 29–39.
- [17] P. Mohan, V. N. Padmanabhan, and R. Ramjee, “Nericell: Rich monitoring of road and traffic conditions using mobile smartphones,” in *Proceedings of the 6th ACM Conference on Embedded Network Sensor Systems*, ser. SenSys ’08, 2008, pp. 323–336.
- [18] “Pavement interactive core: Roughness.” [Online]. Available: <http://www.pavementinteractive.org/article/Roughness/>

〈発表資料〉

題名	掲載誌・学会名等	発表年月
スマートフォンと靴センサを活用した災害時通行路の状況推定	情報処理学会 マルチメディア、分散、協調とモバイル (DICOM02014) シンポジウム論文集 pp. 258-265	2014. 7
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, No.9, pp.1-8	2015. 1
A novel estimation method of road condition for pedestrian navigation	2015 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communication Workshops (PerMoby 2015) , pp. 427-432	2015. 3