

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

佐藤 匠¹ 廣森 聡仁¹ 山口 弘純¹ 東野 輝夫¹

概要：都市部などでの災害時には建物の倒壊や落下物の散乱、道路陥没など、地形が大きく変化していることが多く、迅速な避難誘導や救助活動のためには、災害時環境の把握が求められる。しかし、災害救助チームや警察、自治体は被害対応に追われ、それらの状況把握に割り当てる人的余裕はないため、救助活動や避難行動などの個人センシングからそのような状況把握が可能であることが望ましい。そこで、本研究ではスマートフォンとウェアラブルセンサを用いて災害現場の安全状況や地形を推定する手法を提案する。スマートフォンを用いて被災者の避難行動を認識し、災害時特有の行動（危険回避行動など）を検出することで、各地点の安全性を判断する。また、複数人からの情報集約により推定精度を向上させる枠組みも設計している。さらにスマートフォンで把握できない詳細な地形情報は、救助隊などが装着すると仮定する靴に装着された三軸加速度センサを用いて地面の傾斜ならびに歩きやすさを算出する方法も提案する。評価実験を行い、スマートフォンを用いて移動行動を識別できること、ならびに靴のセンサを用いて地面の傾斜が高精度で算出できることを示した。

Mobile Sensing via Activity Recognition in Emergency Site

TAKUMI SATOH¹ AKIHITO HIROMORI¹ HIROZUMI YAMAGUCHI¹ TERUO HIGASHINO¹

1. はじめに

わが国は地震大国ともいわれるように地震が多く発生し、それに伴う建物の崩壊、火災や津波など、人命を脅かす災害の脅威に常にさらされている。災害発生時には、避難者のみで避難する必要に迫られる場合も多く、特に、ショッピングモール、地下街、高層ビル街など、人が密集する都市街区では、避難経路や危険箇所など、避難者の安全に役立つ情報提供を正確かつ迅速に行うことが求められる。現状、火災報知器による火災発生の周知や、非常口の場所を示す誘導標識の掲示が法律で規定されている [1] が、大規模な災害が発生した際には、火災による煙の充満、停電、瓦礫の散乱、通路の封鎖など、時々刻々と変化する様々な環境要因が避難の妨げとなる。被災者はこのような状況を適切に把握できるわけではないため、建物から安全かつ迅速に避難することは困難である。同様に、救助隊が被災者を救助する際においても、自力での避難が困難な車いすの被災者への避難支援や、災害救助に欠かせない重機や機材の搬入など、様々な救助活動を効率的にすすめることは難しく、被災者と救助者が災害時に安全かつ効率よく行動す

るためには、災害現場における通行路の状況を即座に把握できることが望ましい。

災害時の通行路の状況を迅速に把握する方法として、監視カメラや赤外線センサ等の既存インフラを活用することや、新たなセンサを設置することが考えられるが、建物に設置されたセンサは、通信回線を含め災害時に損傷あるいはサービス不能になる恐れがある。一方、その場に滞在する人が保持するスマートフォンから得られた情報を集約することにより、周辺環境を把握する方法が多数提案されており、例えば、文献 [2] では、スマートフォンに搭載された音声マイクから周辺の音声を計測し、それらを集約することで、都市部の騒音マップを作り上げる方法が提案されている。しかし、災害時には、煙が充満している通路では煙を避けられるよう腰をかがめて歩行するといったように、被災者がとる特殊な行動が非常状態を表すことが多い。そのような特徴的な行動を把握することができれば、災害に起因する通行路の安全状況を把握できると考えられる。

本研究では、災害時における避難行動及び救助活動を支援するため、被災者及び救助隊が保持するスマートフォンとウェアラブルセンサにより、それらの人々の特殊行動を把握し、それに基づき通行路状況を推定する方法を提案する。提案手法では、スマートフォンにより推定された人の移動行動に基づき、災害現場の各地点の安全性や危険性を把握するとともに、靴に装着されたウェアラブルデバイス

¹ 大阪大学 大学院情報科学研究科 モバイルコンピューティング講座
Mobile Computing Laboratory, Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University

により、その地点における移動しやすさを詳細に推定する。スマートフォンによる行動推定では、スマートフォンの加速度センサから得られる情報から、歩行、走行などの通常の移動行動、災害時の移動行動のそれぞれの尤度算出を行う。複数人から得られた尤度を地点毎で集約することにより、その地点で数多く為されている移動行動を把握し、安全通行可能性や危険予測の精度を向上させる。一方、スマートフォンは身体上部に位置するデバイスであり、歩きやすさなど地面の状況を詳細に把握することができないため、靴に装着されたウェアラブルデバイスの加速度センサから得られる情報に基づき、地面の傾斜を把握し、各地点における移動しやすさを推定する方法もあわせて提案する。足が地面を踏みしめている際には、センサにより計測される加速度は重力加速度のみとなるため、加速度センサの各軸にかかる加速度から、鉛直方向に対するセンサの傾きが把握し、地面の傾斜を計算することができる。これらの地面の傾斜を、移動行動と同様に、各地点毎に集約することで、その地点における傾斜の程度を把握することができる。例えば、傾斜が観測されない地点や一定のゆるやかな傾斜のみが観測される地点であれば、通常通りに移動できる地点であることがわかり、多様な傾斜や急な傾斜が観測される場合には、瓦礫などの障害物散乱しているような、移動が困難な地点であることが推測される。

性能評価実験では、提案手法により構築した行動尤度計算器を利用することで、各行動尤度計算器が対象とする移動行動に対しては高い尤度を算出し、そうでない移動行動に対しては尤度を低く算出し、各地点における災害時の移動行動を認識できることを示す。また、靴に装着した加速度センサにより計測された加速度データから、高い精度で様々な傾斜角を算出可能で、この傾斜角に基づき、通行路における移動しやすさを判断できることを示す。さらに、平らな場所と凹凸が多い場所で歩行する実験を行い、提案手法により、凹凸の程度を判断できることを示す。

2. 関連研究

近年、スマートフォンの普及に伴い、スマートフォン上で地図を閲覧できる「GoogleMap」や「NAVITIME」などのサービスが普及してきており、二点間の経路をナビゲーションする機能が提供され、自動車を利用する場合の運転経路や、公共交通機関を利用する場合の経路、歩行者の歩行経路などの目的地までの経路など、利用する移動手段に応じてその経路を簡単に把握することができる。また、都市街区における階段、エレベータ、エスカレータなどを考慮した歩行経路も検索可能で [3]、最短経路を提示するだけでなく、階段を避けて、エレベータやエスカレータを優先的に利用する経路を提示することが可能で、車椅子やベビーカーを利用する人など、階段を通過するのが困難な人に対し、利便性の高いナビゲーションサービスが提供されている。しかしながら、このような階段を避ける経路を提示するために、事前に階段やエレベータ、エスカレータの位置を把握する必要があり、災害時における避難支援には必ずしも有効ではない。

災害時の避難活動や救護活動を支援するための研究や開発が多数行われており、文献 [4] では、被災者がアドホッ

ク通信によりビーコンを発信し、救助隊に被災者の位置を伝えることで、救護活動を支援するシステムが提案されている。また、Betts ら [5] の研究では、救急隊が記録した画像とテキストから構成されるレポートを GPS により取得した位置情報と紐付けし、それらを救急隊で共有するシステムが開発されている。文献 [6] では、GPS により取得した救急隊の移動履歴と、救急隊により把握された通路閉塞状況や傷病者の位置、探索済み領域を統合し、災害現場環境を可視化することで、救護活動を支援するシステムが提案されている。これらの手法では、救急隊が現場の状況について記したメモや撮影した画像を集約しているため、極めて正確な情報を集めることができる一方で、情報収集は人に依存しており、人員が不足しがちな災害現場においては、必ずしも適切に状況を把握できるわけではない。特に地震では、同時に多くの場所で通路の閉塞や瓦礫の散乱などにより通行が阻害されるため、これらの情報を救急隊のみで収集することは極めて困難である。

スマートフォンの高機能化に従い、搭載されたセンサを利用し、かつ複数人からセンサの情報を収集することにより、都市環境を把握する手法が多数提案されている [2,7-9]。例えば、Ear-phone [2] では、都市部における騒音の程度を把握するために、センシングへの参加者のスマートフォンから提供される不完全な音声データから、都市全体のノイズマップを作成する手法が提案されている。我々の研究グループにおいても、災害時の状況把握を支援するため、通信端末間の電波伝搬状況から建物の形状を推定する手法を提案している [8,9]。このように、スマートフォンに搭載されるセンサを利用した都市環境把握する手法は、様々な場面で有用であると考えられるが、その環境把握能力は、スマートフォンに搭載されるセンサの能力に大きく依存する。一方、スマートフォンに搭載されたセンサを利用する研究として、人間の行動を対象とした取組も多数行われており [10-13]、さらに、スマートフォンだけでなく、体の様々な部位にウェアラブルデバイスを装着することにより、多種多様な行動を高い精度で推定できることが示されている [14-17]。人の行動は周辺環境の影響を少なからずうけると考えられ、例えば、通常ではみられないような行動を観測されれば、なにかしら災害の影響が及んでおり、間接的に周辺環境を推定できると考えられる。また、そのような行動を詳しく把握できれば、その要因を推定することもできる。本研究では、スマートフォンやウェアラブルデバイスにより、人の行動を認識するだけでなく、その行動を解釈し、周辺の環境を推定する点で、既存研究と大きく異なっており新しい取り組みである。

3. スマートフォンによる移動行動推定手法

煙が充満している環境においては、腰をかかめて移動するといったように、災害により生じた環境変化は、その地点を通行する人の行動に影響を与えるため、本手法では、人の移動行動を認識し、かつそれらの移動行動を地点毎で集約することで、各地点における災害の影響を判定する。提案手法では、日常的に為される通常の移動行動として、「歩行」、「走行」を、災害時の移動行動として、煙が充満している状況において、煙を避けるための「腰をかかめて歩

行」、「床を這って進行」を推定手法の対象とする。また、これらの移動行動のいずれにも当てはまらない行動を正しく把握できるよう、「停止」も移動行動の一つとする。災害時に想定される移動行動を推定するため、スマートフォンにより計測された加速度データに対し、対象とする移動行動毎に、その移動行動が為されている程度を表す尤度を計算し、最も高い尤度となる移動行動をその地点での推定結果として導出する。

まず、人が保持するスマートフォンに搭載された加速度センサから、推定対象の移動行動全てに対し、その移動行動が為されている程度を示す尤度を計算する方法を説明する。個々の移動行動の実測データに基づき、機械学習により作成された尤度計算器により、計測された加速度センサに対する尤度が計算され、ある人の移動行動が通常の移動行動と災害時の移動行動のいずれに近いかを判断することができる。多様な移動行動を把握できるよう、使用する加速度センサは、20ミリ秒間隔でX軸、Y軸、Z軸のそれぞれの加速度の値を取得できるものとし、過去10秒間の加速度の値の系列について、統計量として表される9種の特徴量と、時間的な変化を表される5種の統計量を利用する。前者の特徴量として、各軸の平均値と分散、XY、XZ、YZ軸間の相関係数の9種類を利用する。平均値は各軸方向の動作の速さ、分散は動作の大きさを示す指標で、二軸間の相関係数は、加速度センサが動いた方向が反映される指標である。後者の特徴量としては、各軸の周波数帯毎の振幅を表すエネルギースペクトラム、Z軸に対してのピーク間隔、Z軸に対してのピーク間隔の分散の5種類を利用する。エネルギースペクトラムは加速度の各周波数成分の振幅を表し、動作の素早さを示す指標で、ピーク間隔とは加速度の系列において極大値となる部分(ピーク)の時間間隔であり、移動動作の一步の時間間隔を表し、移動の速さを反映する指標である。「歩行」、「走行」、「腰をかがめて歩行」それぞれの移動行動で計測された加速度を図1に示す。これらの行動は一定の間隔で直進するという点で共通した移動行動であり、加速度に周期的な波が観測される。図1(a)では、歩行の間隔が周期的な波として現れており、この一步の時間間隔はピーク間隔により表現される。図1(a)と図1(b)を比較すると、走行の動作は一步の時間間隔が短いため、波の間隔が短くなっており、ピーク間隔により双方の移動行動を区別できると考えられる。これら二つの移動行動の一步の間隔ははっきりとしている一方、図1(c)に示されるように、「腰をかがめて歩行」で観測される加速度の波ははっきりしたものではなく、ピーク間隔は安定せず、その分散は大きくなる。このことから、「腰をかがめて歩行」はピーク間隔の分散により、他の移動行動と区別できると考えられる。

これらの特徴量に基づき、五種類の移動行動について、実際の行動から得られた加速度を訓練データとし、サポートベクトルマシン[18,19]の一つであるC-SVM[20]により、移動行動毎の尤度計算機を作成する。C-SVMは2クラス分類器であり、特徴量空間上にある移動行動の特徴量を配置し、対象とする移動行動とそうでない移動行動の間に最適な決定境界を定める。これにより、入力された加速度の特徴量が、特徴量空間上で、決定境界で分割されるいずれの領域に属するかを算出し、対象とする移動行動であ

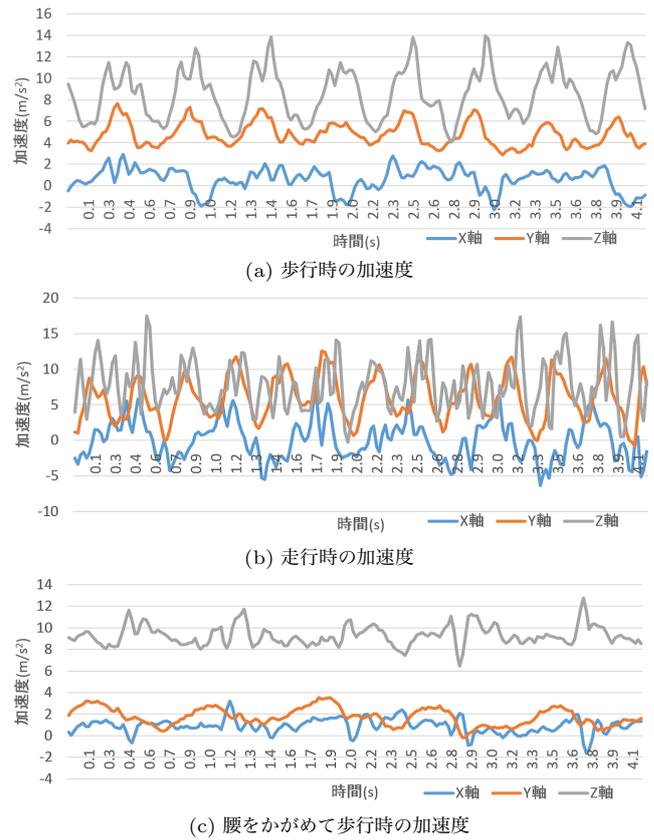


図1 移動行動毎の加速度

るか否かを判定する。また、C-SVMは、その判断の確からしさを計算することができる。この確からしさは、特徴量空間上での決定境界のいずれ側に位置するかと、決定境界までの距離により定まる。入力された加速度の特徴量が決定境界よりも対象行動側に位置し、決定境界からの距離が対象行動までの距離と同じである場合、その確からしさは最も高くなる。この確からしさを移動行動に対する尤度とし、各移動行動の学習データにより構築された尤度計算機により、各移動行動の尤度を計算する。

また、推定された移動行動から、各地点が災害の影響を受けているか否かを判定する。その際、GPS[21]、Wi-Fi電波強度による位置測位[22]、歩行者慣性航法[23]などの位置推定手法により把握された位置に従い、各人で計算された移動行動の尤度を地点毎で集約する。移動行動毎の尤度の集約は、スマートフォンによる携帯通信網を介した通信やスマートフォン間で構築されるアドホックネットワーク通信で為されるものとする。集約された行動の尤度は、その地点において為された移動行動の傾向を示すことから、ある地点において、歩行または走行している人が多ければ、その地点は安全な通路であると判断でき、逆に、歩行または走行している人が少なければ、安全な通路ではないと判断することができる。

4. ウェアラブルデバイスによる傾斜推定手法

本章では、足に装着されたウェアラブルデバイスの加速度センサを用いて、地面の傾斜を推定する手法について説明する。提案する手法では、最も地面の影響を最も受けやすい部位である足の動きを把握することで、地面の情報を

一步毎確実に取得する。歩行時の足の動きには、図 2 に示すように、以下の 4 つの状態が存在する。

- (1) 靴底が地面に全部付いている状態 (接地状態)
- (2) かかとが地面から離れ、つま先のみが地面と接している状態
- (3) つま先も地面から離れ、靴底が全部地面から離れている状態
- (4) 靴底のみが地面に接している状態

この図に示されているように、(2) から (4) の状態においては、足自体が動いているため、足にセンサを装着していたとしても、観測されるデータは足の動きと地面の状態が混在したものとなるが、(1) の状態では足は大きく動かず、その時に観測されるデータは地面の状態のみが反映される。地面の状況を把握するためには、地面に靴底が接地している (1) の接地状態が適しており、ウェアラブルデバイスの三軸加速度センサにより、足の動きから接地状態を認識するだけでなく、センサの傾きから地面の傾斜を算出する。以下、提案手法の詳細について述べる。

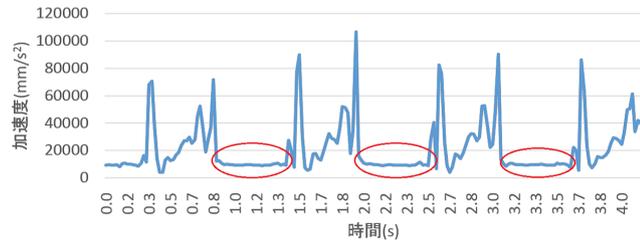


図 3 0.02 秒間隔で計測された加速度 (赤丸内が接地のタイミング)

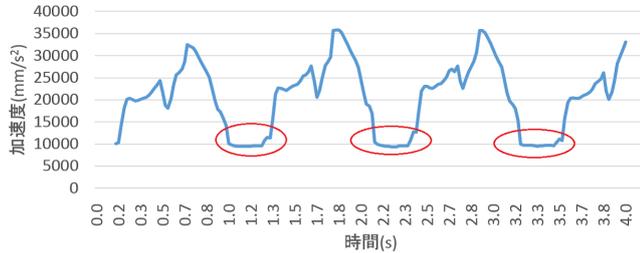


図 4 移動平均による平滑化処理後の加速度

重力加速度は常に観測されるため、計測された加速度から重力加速度のみが観測される状態が前述の接地状態であるといえる。時刻 t において、三軸加速度センサにより計測された各軸の加速度を $a_{x,t}, a_{y,t}, a_{z,t}$ とすると、加速度の大きさ \mathbf{a}_t は下記の式で表現される。

$$\mathbf{a}_t = \sqrt{a_{x,t}^2 + a_{y,t}^2 + a_{z,t}^2} \quad (1)$$

0.02 秒間隔で計測された加速度の大きさを図 3 に示す。図 3 の赤丸部分に示される接地状態のように、接地状態においては、加速度の大きさはほぼ重力加速度 ($9.8m/s^2$) 程度であることがわかる。しかしながら、加速度の大きさは必ずしも安定していないため、移動平均により平滑化させる。時刻 t' において δ 秒分の加速度の大きさを移動平均した $\bar{\mathbf{a}}_{t'}$ は以下の式で表現される。

$$\bar{\mathbf{a}}_{t'} = \frac{1}{n} \sum_{t=t'-\frac{\delta}{2}}^{t'+\frac{\delta}{2}} \mathbf{a}_t \quad (2)$$

ここで n は時間 $[t - \frac{\delta}{2}, t + \frac{\delta}{2}]$ の間で加速度が計測された回数である。移動平均により平滑化された加速度の大きさを図 4 に示す。図 3 と異なり、赤丸で囲った接地状態のみで重力加速度程度のものが観測されており、加速度のみから接地状態を判定できることがわかる。

次に、接地状態において、地面の傾斜を算出する方法について説明する。加速度センサの Z 軸が鉛直上向き、X 軸が人体の前方、Y 軸が側方となるように装着することで、前方への傾斜と、側方への傾斜を把握することができる。図 5 のように、加速度センサが X 軸方向に対し θ 度、Y 軸方向に対し ψ 度傾いている場合、X, Y, Z の各軸で計測される加速度 a_x, a_y, a_z について以下の式が成り立つ。

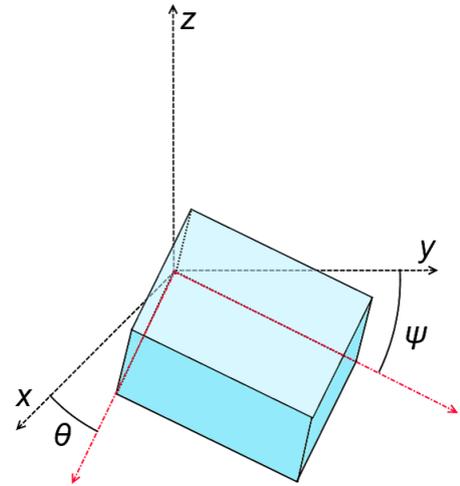


図 5 X 軸方向に θ 度、Y 軸方向に ψ 度傾斜している加速度センサ

$$a_x = g \sin \theta \quad (3)$$

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

$$a_y = g \sin \psi \quad (5)$$

$$\sqrt{a_x^2 + a_z^2} = g \cos \psi \quad (6)$$

これらの式から、 θ, ψ は以下のように表現される。

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{a_x}{\sqrt{a_y^2 + a_z^2}} \right) \quad (7)$$

$$\psi = \tan^{-1} \left(\frac{a_y}{\sqrt{a_x^2 + a_z^2}} \right) \quad (8)$$

但し、重力加速度を g 、 θ, ψ は X 軸、Y 軸の方向に対して反時計回りに傾いている場合を正とする (つまり、図 5 においては、 $\theta \leq 0, \psi \geq 0$ となる)。このようにして、三軸加速度センサの観測値から、センサ自体の傾きを算出することができる。平らな面におけるセンサの X 軸方向の傾斜を θ_{mount} 、Y 軸方向を ψ_{mount} とすると、地面の X 軸、Y 軸の傾斜角度 Θ, Ψ は、それぞれ以下のように表現される。

$$\Theta = \theta - \theta_{mount} \quad (9)$$

$$\Psi = \psi - \psi_{mount} \quad (10)$$



図 2 歩行時の足の動き

このように算出された地面の傾斜も、前述の移動方向と同様に、各地点毎に集約され、傾斜角度の平均値が小さく、かつ傾斜角度の分散は少ない場合には、傾斜がほとんどないか、ゆるやかな傾斜のみが観測されており、通常通りに移動できる地点であることがわかる。一方、傾斜角度の平均値が大きい場合には、急な傾斜が観測され、車いすの方や負傷者の移動には不向きな地点であることがわかる。さらに、傾斜角度の分散が大きい場合には、多様な傾斜が観測され、瓦礫などの障害物が散乱しているような、移動が困難な地点であることが推測される。

5. 性能評価

本章では、災害時における避難行動及び救助活動を支援するため、提案手法により、スマートフォンを利用することで、通常の移動行動と災害時特有の移動行動を区別できること、及び、ウェアラブルデバイスを利用することで、地面の傾斜を算出できることを示す。

5.1 移動行動の推定

まず、スマートフォンにより計測された加速度センサから得られた加速度データに対し、提案する手法により算出された尤度により、対象とする移動行動が正しく認識できることを評価する。この性能評価のために、加速度センサから約 20ms 間隔で加速度データを取得するとともに、取得された加速度データを CSV 形式で記録する Android アプリケーションを開発した。このアプリケーションを Nexus S 上で動作させ、「歩行」、「走行」、「床を這って進行」、「腰をかがめて歩行」、「停止」の五つの移動行動毎で加速度データを計測した。大阪大学情報科学研究科棟内の居室では、被験者 9 人に対し、10 秒間の加速度データ計測を 50 回実施し、図 6 に示す大阪府消防学校の瓦礫救助訓練所では、被験者 4 人に対し、7 秒間の加速度データ計測を 50 回実施した。実際に得られた加速度データから、95% のデータを無作為に抽出し、それを機械学習のための訓練データとして利用し、各移動行動に対する尤度計算器を作成した。残りの 5% の加速度データを評価用データとし、各移動行動に対する尤度計算器から尤度を算出し、対象とする移動行動に対してのみ尤度が高く出力できているかを評価する。各移動行動に対する加速度データから算出された尤度の平均を、尤度計算器毎にまとめた結果を表 1 に示す。表 1 に示されるように、いずれの尤度計算器も、その尤度計算器が対象とする移動行動の尤度が、他の行動に対する尤度と比較し、高く算出されている。特に、「停止」、「床を這って進行」の二種類の行動に対応する尤度計算器は、これらの移動行動は他の移動行動とは大きく



図 6 瓦礫救助訓練所

異なっていることから、その尤度計算器の対象行動の尤度とそれ以外の行動に対する尤度の差が顕著である。「停止」に対する尤度計算器は、「停止」の加速度に対しては 0.96 の尤度を算出する一方、それ以外の移動行動の加速度に対しては高々 0.06 程度の尤度となっている。一方、3 章で示したように、「走行」、「歩行」、「腰をかがめて歩行」の三種類の移動行動は似通っていることから、これらの尤度計算器においては、例えば、「腰をかがめて歩行」を対象とする尤度計算器が「歩行」に対して尤度を 0.52 と算出するなど、対象の移動行動以外に対しても、比較的高い尤度が算出されている。

5.2 傾斜の推定

次に、ウェアラブルデバイスに装着された加速度センサから地面の傾斜を正確に計測できることを示す。提案手法の評価では、加速度センサとして、ATR-Promotions の小型三軸加速度センサ TSND-121 [24] を使用する。この加速度センサを被験者所有の靴上で、X 軸を靴の前方、Y 軸を靴の左方向、Z 軸を鉛直上方向となるよう装着する (図 7)。提案手法により、移動しやすさを判定できる精度で地面の傾斜を算出できることを示すため、以下の 4 段階の傾斜に対し、評価実験を実施した。

- (1) 平地 (傾斜が 0 度から 2 度)
- (2) スロープ (傾斜が 2 度から 5 度)
- (3) 坂道 (傾斜が 5 度から 10 度)
- (4) 急坂 (傾斜が 10 度以上)

通行者の負担なく通行できるよう、一般に、スロープは高々 5 度程度の傾斜となっており [25]、これを超える傾斜は、歩行や車椅子の通行に幾分負担を要する坂道とされ、これよりもさらに急な傾斜は急坂とされる。三軸加速度センサを装着した靴を 3 人の被験者の両足に履いてもらい、平地、スロープ、坂道、急坂の四種類の傾斜に対し、それ

表 1 通常行動及び災害時行動に対する尤度の平均値

実際の行動	尤度計算器の対象行動				
	停止	歩行	走行	床を這って進行	腰をかかめて歩行
停止	0.96	0.11	0.01	0	0.08
歩行	0.06	0.86	0.29	0.01	0.22
走行	0	0.26	0.87	0.15	0.2
床を這って進行	0.04	0.01	0.17	0.94	0.02
腰をかかめて歩行	0	0.52	0.04	0	0.8



図 7 靴に装着された三軸加速度センサ

それを 8 回 (該当区間を 4 往復) 歩行し、加速度データを計測した。なお、平地以外は一定方向に一定の傾斜角をもつもので、3 度のスロープ、7 度の坂道、16 度の急坂で実験が実施された。まず、平地を歩行した時、提案手法により算出された、被験者毎の X 軸、Y 軸の傾斜角を図 8 に示す。箱の上下にある線の両端が実験における観測された最大及び最小の傾斜角を示す。また、箱の上下端はそれぞれ、実験で算出された傾斜角の第三四分位、第一四分位を表しており、箱の面積が小さければある値に収束する傾向が強いことがわかる。図 8 に示されるように、X 軸、Y 軸ともにほとんどの値が 0 度附近に集中しており、平地であることを正しく判断できているといえる。次に、スロープを上り方向及び下り方向に歩行した時、提案手法により算出された X 軸、Y 軸の傾斜角を図 9 に示す。いずれの人においても X 軸の値はほぼ 0 度付近を示し、また、被験者 A 以外の人については、Y 軸の値は上り方向では 3 から 4 度、下り方向では -4 から -3 度を示しており、スロープの傾斜を正しく把握していることがわかる。一方、被験者 A については、左足のみ、スロープの傾斜を正しく反映している。坂の歩行が負担となる場合、踵をしっかりと地面に押し付け、つま先があがりがちになることから、算出される傾斜角は幾分異なる。坂道を歩行した際に算出された傾斜角を図 10 に示す。被験者 B については、上り方向、下り方向のいずれも 7 度程度の傾斜角となっているが、それ以外の被験者については、片足のみ正しい傾斜角を示している。急坂を歩行した際に算出された傾斜角を図 11 に示す。この場合、ほぼつま先上がりの歩行となることから、いずれの被験者についても、Y 軸の傾斜角は実際の傾斜よりも大きく算出されており、20 度程度となっている。このように 16 度より数度異なっている結果ではあるが、10 度以上となる急坂の分類に収まっており、移動のしやすさを判断する上では十分な精度で傾斜角を算出できているといえる。

次に、傾斜角を地点毎で集約することで、その地点の歩きやすさを推測できることを示す。凹凸が多い場所を人が移動する際、凹凸の様々な箇所にて靴が接地することから、加速度センサで算出される傾斜角も様々な値となると考えられる。評価実験では、両足の靴にセンサを装着し、なめらかな場所と凹凸の多い場所のそれぞれで、20 歩歩行する実験を 5 回ずつ試行し、地面の傾斜角を推定した。なお、凹凸の多い場所には、5 cm から 10 cm 程度の石が散乱し、また幅 50 cm 程度の窪みが点在している。各試行について、算出された地面の傾斜の X 軸、Y 軸それぞれにおける最大値と最小値の差を表 2 に示す。表 2 から、なめらかな平地と比べて凹凸の多い場所では測定される傾斜角の変化が大きいがわかる。したがって、傾斜角の分散値は地面の凹凸の程度を表しており、これにより、歩きやすさを判断できると考えられる。

表 2 各路面条件における 20 歩での傾斜の最大値と最小値の差

試行回	なめらかな平地		凹凸の多い場所	
	X 軸	Y 軸	X 軸	Y 軸
A	4.39	3.74	23.48	25.66
B	2.84	3.49	20.79	19.22
C	2.47	1.78	21.19	19.31
D	4.78	2.96	23.52	17.78
E	3.09	2.71	28.69	22.72
平均	3.51	2.94	23.53	20.94

6. まとめと今後の課題

本研究では、災害時における避難行動及び救助活動を支援するため、被災者及び救助隊が保持するスマートフォンとウェアラブルセンサにより、それらの人々の特殊行動を把握し、それに基づき通行路状況を推定する方法を提案した。

提案手法では、スマートフォンにより推定された人の移動行動に基づき、災害現場の各地点の安全性や危険性を把握するとともに、靴に装着されたウェアラブルデバイスにより、その地点における移動しやすさを詳細に推定する。スマートフォンによる行動推定では、スマートフォンの加速度センサから得られる情報から、歩行、走行などの通常の移動行動、災害時の移動行動のそれぞれの尤度算出し、各地点で数多く為されている移動行動を把握する。一方、靴に装着されたウェアラブルデバイスの加速度センサから得られる情報に基づき、地面の傾斜を把握し、各地点における移動しやすさを推定する。性能評価実験においては、スマートフォンを用いた行動認識において各尤度計算器が高い精度で対象とする行動を認識していることを示すと

もに、靴センサを用いて高精度に地面の傾斜が算出できることを示した。

今後の課題としては、通行路における移動しやすさをより詳細に把握するために、傾斜以外の観点から通行路の状況を把握することが挙げられ、本手法と同様に、靴センサにより、段差及び滑りやすさを計測する方法について検討をすすめていく。

7. 謝辞

本研究は文部科学省国家課題対応型研究開発推進事業 次世代 IT 基盤構築のための研究開発 - 「社会システム・サービスの最適化のための IT 統合システムの構築」(2012 年度~2016 年度) の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] 総務省: 消防法施行令, <http://law.e-gov.go.jp/htmldata/S36/S36SE037.html> (2012).
- [2] 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 (IPSN '10)*, pp. 105-116 (2010).
- [3] ナビタイムジャパン: 『エレベーター/エスカレーター優先ルート』提供開始, http://corporate.navitime.co.jp/topics/pr/200912/16_643.html (2009).
- [4] Al-Akkad, A., Ramirez, L., Boden, A., Randall, D. and Zimmermann, A.: Help Beacons: Design and Evaluation of an Ad-hoc Lightweight S.O.S. System for Smartphones, *Proceedings of the 32Nd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '14*, pp. 1485-1494, (2014).
- [5] Betts, Bradley J and Mah, Robert W and Papsin, Richard and Del Mundo, Rommel and McIntosh, Dawn M and Jorgensen, Charles: Improving situational awareness for first responders via mobile computing, Technical report (2005).
- [6] Kleiner, A., Behrens, N. and Kenn, H.: Wearable computing meets multiagent systems: A real-world interface for the RoboCupRescue simulation platform, *Proceedings of First International Workshop on Agent Technology for Disaster Management*, pp. 116-123 (2006).
- [7] Kanhere, S. S.: Participatory Sensing: Crowdsourcing Data from Mobile Smartphones in Urban Spaces, *Proceedings of the 2011 IEEE 12th International Conference on Mobile Data Management - Volume 02, MDM '11*, IEEE Computer Society, pp. 3-6 (2011).
- [8] 南本真一, 藤井彩恵, 山口弘純, 東野輝夫: 移動無線端末の位置情報と通信情報を用いた災害現場地図の自動生成 (情報処理学会創立 50 周年記念論文賞受賞論文) (2010).
- [9] 東野輝夫: 災害時救命救急支援を目指した人間情報センシングシステム (JST CREST 「先進的統合センシング技術」平成 19 年度採択課題)
- [10] Khan, W. Z., Xiang, Y., Aalsalem, M. Y. and Arshad, Q.: Mobile PhoneSensing Systems: A Survey, *Communications Surveys Tutorials, IEEE*, Vol. 15, No. 1, pp. 402-427 (2013).
- [11] Kwapisz, J. R., Weiss, G. M. and Moore, S. A.: Activity recognition using cell phone accelerometers, *SIGKDD Explorations Newsletter*, Vol. 12, No. 2.
- [12] Reddy, S., Mun, M., Burke, J., Estrin, D., Hansen, M. and Srivastava, M.: Using mobile phones to determine transportation modes, *Transactions on Sensor Networks*, Vol. 6, No. 2, pp. 13:1-13:27 (2010).
- [13] Park, J.-g., Patel, A., Curtis, D., Teller, S. and Ledlie, J.: Online pose classification and walking speed estimation using handheld devices, *Proceedings of the 2012 ACM Conference on Ubiquitous Computing (UbiComp '12)*, ACM, pp. 113-122 (2012).
- [14] Bao, L. and Intille, S. S.: Activity recognition from user-annotated acceleration data, *Proceedings of the 2nd International Conference on Pervasive Computing*, pp. 1-17 (2004).
- [15] Maurer, U., Smailagic, A., Siewiorek, D. P. and Deisher, M.: Activity Recognition and Monitoring Using Multiple Sensors on Different Body Positions, *Proceedings of the IEEE International Workshop on Wearable and Implantable Body Sensor Networks (BSN'06)*, pp. 113-116 (2006).
- [16] El-Achkar, C. M., Massé, F., Arami, A. and Aminian, K.: Physical Activity Recognition via Minimal In-shoes Force Sensor Configuration, *Proceedings of the 7th International Conference on Pervasive Computing Technologies for Healthcare, PervasiveHealth '13*, pp. 256-259 (2013).
- [17] Lijffijt, J., Papapetrou, P. and Hollmén, J.: Tracking Your Steps on the Track: Body Sensor Recordings of a Controlled Walking Experiment, *Proceedings of the 3rd International Conference on Pervasive Technologies Related to Assistive Environments, PETRA '10*, pp. 58:1-58:5 (2010).
- [18] Vapnik, V.: *The nature of statistical learning theory*, springer (1999).
- [19] 栗田多喜夫: サポートベクターマシン入門, <http://www.neurosci.aist.go.jp/kurita/lecture/svm/>.
- [20] Bishop, C. M.: *Pattern Recognition and Machine Learning (Information Science and Statistics)*, (2006).
- [21] Kourog, M., Sakata, N., Okuma, T. and Kurata, T.: Indoor/outdoor pedestrian navigation with an embedded GPS/RFID/self-contained sensor system, *Advances in Artificial Reality and Tele-Existence*, Springer, pp. 1310-1321 (2006).
- [22] Chen, Y.-C., Chiang, J.-R., Chu, H.-h., Huang, P. and Tsui, A. W.: Sensor-assisted wi-fi indoor location system for adapting to environmental dynamics, *Proceedings of the 8th ACM international symposium on Modeling, analysis and simulation of wireless and mobile systems*, pp. 118-125 (2005).
- [23] Fang, L., Antsaklis, P. J., Montestruque, L. A., McMickell, M. B., Lemmon, M., Sun, Y., Fang, H., Koutroulis, I., Haenggi, M., Xie, M. et al.: Design of a wireless assisted pedestrian dead reckoning system-the NavMote experience, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol. 54, No. 6, pp. 2342-2358 (2005).
- [24] ATR-Promotions: 小型無線多機能センサ「TSND121」, <http://www.atr-p.com/products/TSND121.html>.
- [25] 日本建築学会: 建築設計資料集成, 丸善, 全面改訂版 edition (2001).

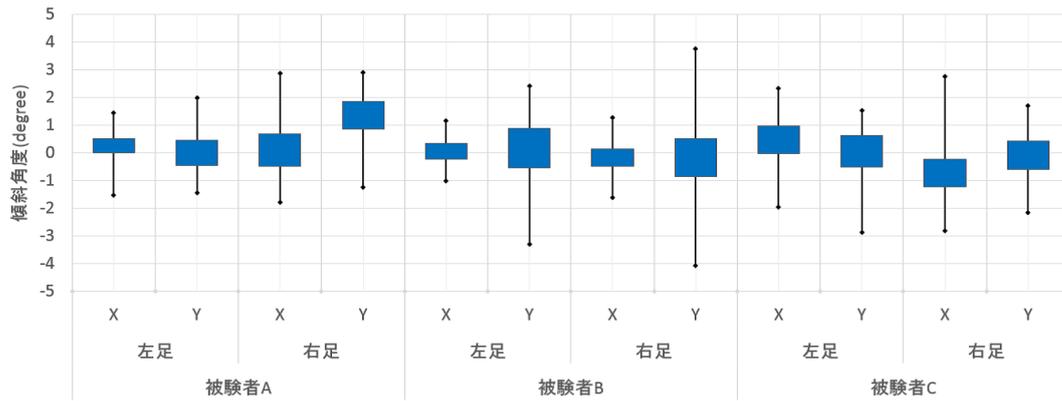


図 8 平地歩行時に算出された傾斜角

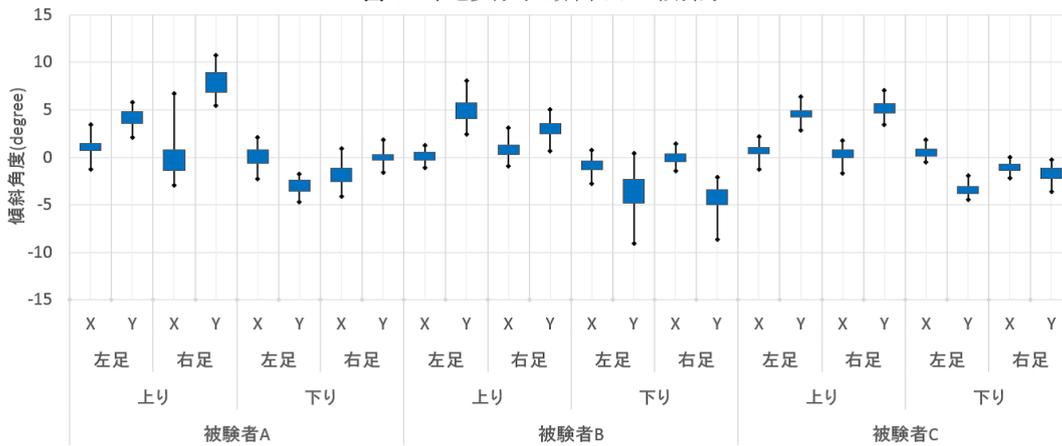


図 9 スロープ歩行時に算出された傾斜角

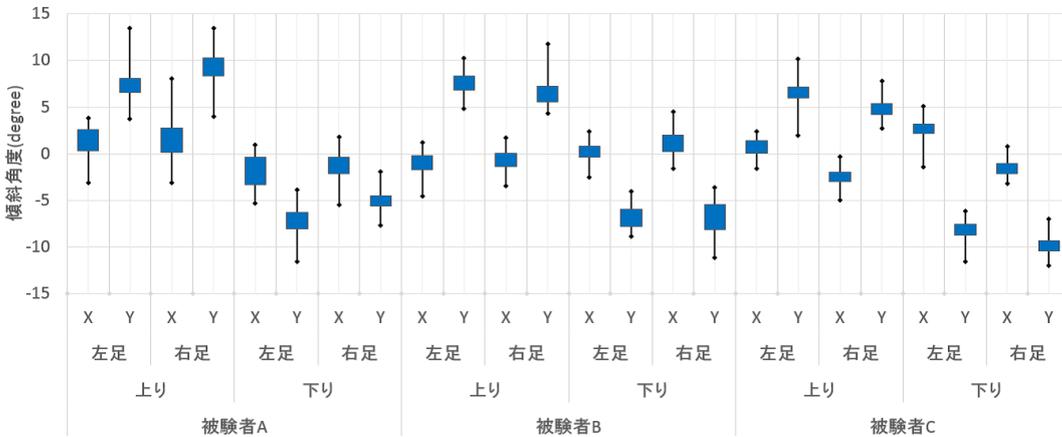


図 10 坂道歩行時に算出された傾斜角

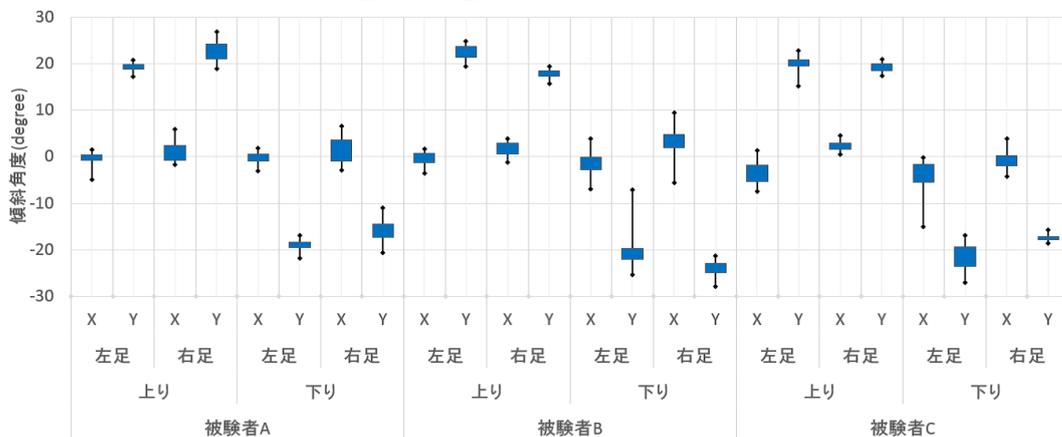


図 11 急坂歩行時に算出された傾斜角