

スマートフォンを活用した災害時における建物内の歩きやすさ推定手法

Walkability Estimation using Smartphones in Buildings at the Time of Disaster

佐藤 匠^{†1} 廣森 聡仁^{†1} 山口 弘純^{†1} 東野 輝夫^{†1}
Takumi Satoh Akihito Hiromori Hirozumi Yamaguchi Teruo Higashino

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だけ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、高層ビル街などの都市街区では、災害発生時、避難経路や危険箇所の情報提供など、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。現状では、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、様々な環境の変化が避難の妨げとなる。例えば、被災者が建物から避難する際、災害現場の最新の状況を把握できなければ、通行しやすくかつ安全な道を探し出し、効率よく避難することはできない。また、同様に、救助隊が被災者を救助する際においても、災害現場の現状を適切に把握できなければ、自力での避難が困難な要救助者の発見や救助機材の搬入など、様々な救助活動を効率的に進めることは難しい。このように、被災者と救助者の両方が災害時の行動を安全かつ効率よく実施するためには、災害現場の環境を即座に把握できることが望ましい。

災害時の環境情報を取得する方法として、監視カメラ等の既存インフラを活用することや、環境情報取得用に新たなセンサを設置することが考えられる。しかしながら、建物に設置されたセンサは、災害時に損傷する恐れもあることから、インフラに依存せず、様々な状況において環境情報を把握可能な手法が求められる。

本研究では、災害時における避難行動及び救護活動を支援するため、インフラに依存しない環境推定手法として、避難者が保持するスマートフォンのセンサから避難者の行動を認識することにより、避難者周辺の環境情報を推定する手法を提案する。提案手法は、スマートフォンの加速度センサから得られた情報から、例えば、歩行、走行など、避難者の通常の移動行動だけでなく、災害時特有の移動行動を推定し、さらに、個々の地点において、複数人の移動行動を集約することにより、その地点が通常環境、災害環境のいずれに近いかを判定し、その地点における歩きやすさを算出する。また、通常の移動行動と異なり、災害時特有の移動行動は、煙が充満している箇所では煙を避けられるよう腰をかがめて歩行するというように、その環境を特徴づける行動が為されることが多いため、災害時特有の移動行動を推定することで、その地点が災害環境であることだけでなく、その原因を推測することが可能である。提案手法の基となる行動認識手法は、機械学習により、行動毎に構築され

た行動尤度計算器を利用しており、避難者毎に、想定する通常行動、災害時行動全てについて尤度が計算される。この尤度を行動及び地点毎で集約することにより、その地点で為されている行動を把握可能で、通常行動が多い場合には、歩きやすく安全な地点であること、通常行動と災害時行動が同等である場合には、やや歩きにくい地点であることなど、その地点における歩きやすさを算出し、歩きにくい場合には、その地点において最も頻度が高い災害時行動から、歩行を妨げる要因を推定する。

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行動に対しては平均 0.9 の尤度を出力し、そうでない行動に対しては平均 0.1 の尤度を出力できることが示され、高い精度で対象とする行動を認識できており、これらを利用することで、歩きやすさと歩行を妨げる原因を推定できることを示した。以下、関連研究については 2 章で、スマートフォンの加速度センサに基づいた行動認識手法については 3 章で、歩きやすさと歩行を妨げる原因の推定については 4 章で説明する。

2. 関連研究

2.1 災害時の環境把握

災害時の救急活動や避難活動を支援するための研究や開発が行われており、Betts ら [2] の研究では、救急隊員が記録した画像との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、それらを救急隊員の間で共有するシステムが開発されている。また、Kleiner ら [3] は GPS により取得した救急隊員の移動履歴と、救急隊員のが登録した通路閉塞状況や傷病者の位置情報、探索済み領域の情報を統合し、現場環境を可視化することで救助活動を支援するシステムを提案している。これらの手法では、救急隊員が現場の状況について入力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、災害現場においては人員が不足することが多く、適切に状況を報告できないことも考えられる。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の通行障害が発生するため、これらの情報を救急隊員のみで収集することは極めて困難である。

それに対し、本手法では、避難者が保持するスマートフォンから、提案する行動尤度情報を多数集約することで、歩きやすさと歩行を妨げる要因を推定する。この手法による環境情報の精度は、救急隊員による報告と比べ劣るものの、都市部での災害など多くの避難者が発生する状況では、避難者の行動のみを収集することにより、短い時間で環境を推定できる。

2.2 モバイルセンサを用いた行動認識

人間の行動認識はユビキタスコンピューティングにおいて重大なテーマであり [4-6]、スマートフォンに搭載された様々な小型センサを利用し、ユーザの行動を認識する取り組みが行わ

^{†1} 大阪大学大学院情報科学研究科
Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University

れている。Baoら [7] は人体（太もも、足首、腕、手首、股関節）の各部分に取り付けた 5 つの加速度センサを使用し、20 種類の日常的な行動を対象とした行動認識を実現している。評価実験では、認識精度 84% でこれらの行動を認識できること、太ももと手首の二箇所の加速度センサだけでも同等の精度で行動を認識できることを示している。Mourerら [8] は腕時計型の加速度センサ、光センサ、気温センサとマイクを備えた装置を用いて、6 種類の行動（坂を下る、坂を上る、走る、座る、歩く、立ち止まっている）の推定を行い、その認識精度は、装置の保持位置により、50%から 80%と大きく変化することを示している。

近年、人間の行動を推定する手法として、一般的なスマートフォンに搭載されるセンサを利用する研究も行われている [9–11]。Kwapiszら [10] は、歩いている、走っている、階段を昇降している、座っている、立っているという 5 つの行動の認識を、ポケットに入れた携帯電話の加速度センサを用いて実現している。この研究では、行動分類に利用する特徴量を行動毎に調整することにより、階段昇降以外の行動を 90% 程度の精度で推定できることを示している。

本手法においても、既存のインフラがなくても災害時に歩きやすさや歩行を妨げる要因を推定できるよう、スマートフォンを用いて得られる避難者の行動から、各地点の環境を推定する。一方、既存の手法と異なり、床を這う、腰をかがめて歩くなどの災害時特有の行動を対象とし、このような情報を集約及び分析することで、歩きやすさや歩行を妨げる要因を把握するように、その場に滞在する人の行動から、周辺の環境を推定する新しい取り組みである。

3. 加速度センサを用いた通常行動及び災害時行動推定手法

まず、避難者が保持するスマートフォンに搭載される加速度センサから、その避難者の行動を推定する手法について説明する。推定された行動から、その地点における歩きやすさを把握できるように、この手法では、日常時と同様の通常行動だけでなく、災害に起因し、歩きにくい状況を反映する災害時行動を推定対象とする。これらの行動は加速度により特徴づけられるものとし、スマートフォンに搭載された加速度センサの値から、それを保持する避難者に対し、推定対象の行動全てについて、その行動が為されている程度を示す尤度を計算する。この尤度計算は、個々の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実現され、ある避難者の行動が通常行動と災害時行動のいずれに近いかを判断することができる。

3.1 推定対象となる行動

提案手法では、各地点毎の歩きやすさの程度を判断できるように、日常的に為される行動である「歩行」、「走行」の二つの通常行動とし、その推定対象とする。また、歩きにくい場合には、通行を妨げる要因を、その状況に為される特有な行動を推定することにより判断する。本研究では、通行を妨げる要因として、煙が充満している状況、瓦礫が通路に散乱している状況を想定する。煙が充満している状況においては、煙を避ける行動が為されると想定されることから、「床を這って進行」、「腰

をかがめて歩行」の二つを、その状況を反映する災害時行動とする。瓦礫が通路に散乱している状況においては、不安定な瓦礫上を歩く必要があることから、「よろめきながらの歩行」を、その状況を反映する災害時行動とする。さらに、これら日常行動と災害時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」も推定対象とする。

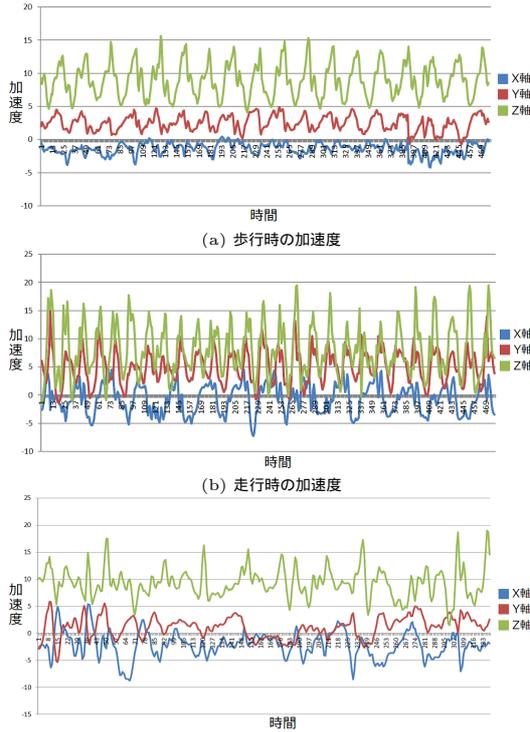
3.2 行動の特徴量

避難者が常に保持しているスマートフォンに搭載されている加速度センサを利用し、避難者の行動を認識する。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することができる。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特徴量と、時間的な変化を表される統計量を利用し、避難者の行動を認識する。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 種類を使用する。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ある。2 軸間の相関係数は、端末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 種類を使用する。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、動作の素早さが示す指標である。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、よろめきながらの歩行それぞれについて計測された、10 秒間の加速度を図 1 に示す。図 1(a) に示されるように、歩行の間隔が周期的な波として現れており、一步の時間間隔をピーク間隔により表すことができる。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、ピーク間隔は短くなっていることがわかる。ピーク間隔の分散は、ピークの時間間隔のばらつきを示す指標であり、この値が小さければ、一定のリズムで歩いていることを示す。一方、図 1(c) に示されるように、この動作のピークの間隔は一定していない行動については、ピーク間隔の分散は大きくなる。

3.3 尤度計算器の作成

推定対象とする行動それぞれについて、尤度を計算する尤度計算器を設ける。本研究では、6 種類の行動を対象としており、尤度計算器を 6 個作成する。いずれの尤度計算器も、上記の特徴量を入力とし、ある行動に対して尤度を計算し出力する。尤度計算器は、与えられた特徴量に対して、対象とする行動に対しては高い尤度、そうでない行動に対しては低い尤度を出力することが求められる。機械学習を用いて、各行動それぞれに対して尤度計算器を作成する。それぞれの行動について、実際の行動から得られた加速度を訓練データとし、機械学習を利用して、尤度計算器を作成する。

本研究ではサポートベクトルマシン [12, 13] の一種である C-SVM [14] を、尤度計算器として利用する。C-SVM は 2 クラス分類器であり、特徴量空間上に各行動の特徴量を配置し、対象とする行動とそうでない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、



(c) よろめきながらの歩行の加速度
図 1 3 種類の歩行時の加速度

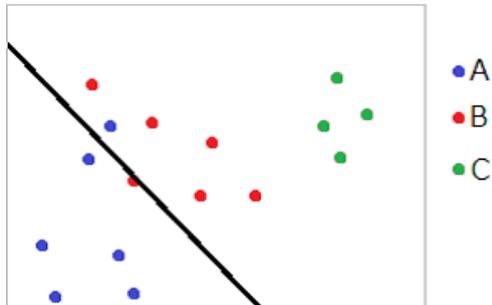


図 2 サポートベクトルマシンにより決定された特徴量空間上の決定境界の例 (行動 A を識別)

対象とする行動であ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，図 2 に示すように特徴量空間上での決定境界 (黒線) 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のとき，その確からしさは高くなる．図 2 の場合，行動 A が属する左下の領域では，決定境界から離れるにつれ確からしさは高くなり，一方，右上の領域では，決定境界から離れるにつれ，確からしさは低くなっている．

4. 歩きやすさと歩行を妨げる要因の推定

提案手法では，3 章で示した行動推定手法を用いて，歩きやすさと歩行を妨げる要因を推定する．まず，GPS [15]，Wi-Fi 電波強度による位置測位 [16]，歩行者慣性航法 [17] などの手法により把握された避難者の位置に従い，各避難者で計算され

た各行動の尤度を地点毎で集約する．この集約された行動の尤度は，その地点において為された行動の傾向を示すことから，これに基づき，歩きやすさと歩行を妨げる要因を推定する．例えば，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，その地点は安全な環境であると判断できる．逆に，歩行または走行している人が少なければ，安全な環境ではないと判断され，さらに，その地点で多く為された行動から，歩行を妨げる要因を推定することができる．以下に，歩きやすさと歩行を妨げる要因を推定する方法について説明する．

本研究では，各地点における歩きやすさの程度を，その地点において，通常行動で移動する避難者の数で判断する．まず，各避難者が通常行動で移動しているかを判定する基準について説明する．ある避難者 i についての行動 X についての尤度を L_X ，平常時行動と災害時特有行動の集合をそれぞれ N ， E で表すと，避難者の行動が通常行動である確率 \mathcal{W}_i は式 1 で表される．

$$\mathcal{W}_i = \frac{\sum_{X \in N} L_{X,i}}{\sum_{X \in N} L_{X,i} + \sum_{X \in E} L_{X,i}} \quad (1)$$

具体的には， $N = \{\text{歩行}, \text{走行}\}$ ， $E = \{\text{床を這って進行}, \text{よろめきながらの歩行}, \text{腰をかがめて歩行}\}$ となっている．

ある地点の歩きやすさが低い場合には，その地点は災害時環境であると判断される．このとき，災害時行動の尤度が高くなるはずである．例えば，瓦礫が散乱している場合には，よろめきながらの歩行の尤度が高くなり，煙が充満している場合には，床を這って進行と腰をかがめて歩行のいずれかもある尤度が高くなると考えられる．災害時環境 env が反映する行動の集合を $ACT(env)$ で表すと，ある避難者 i が滞在する地点が災害時環境 env であるかを表す指標 $\mathcal{E}_{env,i}$ は式 2 のように表される．

$$\mathcal{E}_{env,i} = \frac{\sum_{X \in ACT(env)} L_{X,i}}{\sum_{X \in N} L_{X,i} + \sum_{X \in E} L_{X,i}} \quad (2)$$

具体的には， $ACT(\text{煙が充満している}) = \{\text{腰をかがめて歩行}, \text{床を這って進行}\}$ ， $ACT(\text{瓦礫が散乱している}) = \{\text{よろめきながらの歩行}\}$ となっている．各地点での歩きやすさの推定と同様に，ある地点を移動する避難者全員について，避難時行動毎に \mathcal{E} を集約し，その平均を得た後，最大となる env が，その地点における歩行を妨げる要因として算出される．

5. 性能評価

提案手法が歩きやすさと歩行を妨げる要因を推定できることを示すために，行動の尤度が尤度計算器によって正しい行動に対しては高く，そうでない行動に対しては低く評価されることを検証する．また，災害時に本手法で対象としない環境となっている場合に，歩きやすさと歩行を妨げる要因の推定を行うことが可能か否かを検証する．実際の環境において，避難者の行動は，想定される行動のみが為されるわけではない．



図 3 災害現場を模した設備（瓦礫救助訓練所内）

5.1 性能評価に用いる実測データ

評価する尤度計算器の作成に利用した訓練データは、独自に開発した Android アプリケーションにより収集された。このアプリケーションは、一定時間の間加速度センサのデータを約 20ms 間隔で取得し、連続した加速度を記録可能で、これを動作させたスマートフォンを持ったまま行動を行なうことで、実際の行動の加速度を計測している。対象とする行動のうち、停止、歩行、走行、床を這って進行、腰をかがめて歩行の加速度は、大阪大学情報科学研究科棟内の居室で収集した。この各行動について 10 秒間の計測を、被験者 9 人が 50 回実施した。また、よろめきながらの歩行の加速度は、大阪府消防学校瓦礫救助訓練所が保有する、コンクリートの破片などを積み重ねた災害現場を模した設備（図 3）で収集した。この設備の規模に合わせ、7 秒間の計測を、被験者 4 人で 50 回実施した。

対象とする行動以外の行動として「全力疾走」「スキップ」、「後ろ向きの歩行」、「壁に手をつけて歩行」、「腰をかがめてよろめきながらの歩行」の 5 種類の行動について計測を行った。これらの行動のうち「全力疾走」「スキップ」「後ろ向きの歩行」、「壁に手をつけて歩行」の加速度は、大阪大学情報科学研究科棟内の居室で収集した。また、腰をかがめてよろめきながらの歩行の加速度は、先に述べた災害現場を模した設備で収集した。5 種類の行動それぞれについて、10 秒間の計測を、被験者 1 人が 50 回実施した。

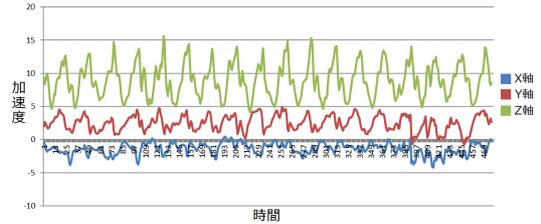
5.2 尤度計算器に対する性能評価

実際に得られたデータから、全数の 95% のデータを無作為に抽出し、それを訓練データとして用いて各行動に対する尤度計算器を作成する。残りの 5% のデータは、評価用データとして使用し、対象とする行動を尤度計算器により正しく判断できているかを評価する。以下、評価実験の結果を述べる。

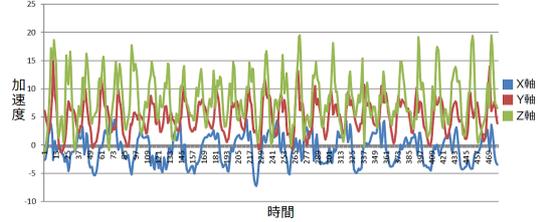
5.2.1 通常行動及び災害時行動に対する尤度

作成した各行動に対する尤度計算器に対し、評価用データの特徴量から、尤度を算出し、対象とする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。各行動の評価用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。

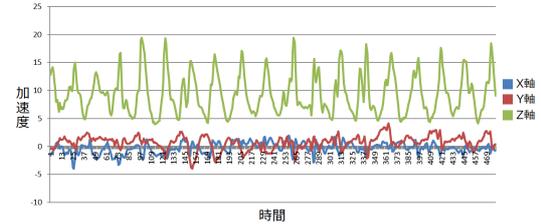
表 1 に示されるように、いずれの尤度計算器も、その尤度計算器が対象とする行動の尤度が、他の行動に対する尤度と比較し、高く評価されている。特に、停止、よろめきながらの歩



(a) 歩行時の加速度



(b) 走行時の加速度



(c) 腰をかがめて歩行時の加速度

図 4 3 種類の行動の加速度

行、床を這って進行の 3 種類の行動に対応する尤度計算器は、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。例えば、停止に対する尤度計算器は、停止という行動の加速度に対して 0.96 の尤度を算出する一方、それ以外の行動の加速度に対しては最大で 0.06 の尤度しか算出していない。これは、この 3 種類の行動は他の行動とは大きく異なっており、それらの特徴量が他の特徴量を区別しやすいためである。これらの行動のうち、よろめきながらの歩行の尤度は、対象とする尤度計算器でも 0.89 程度と他の行動の尤度より低い値となっている。この尤度の低さは、瓦礫が大小のコンクリート片から構成され、よろめき方が測定毎に異なっており、よろめきながらの歩行の特徴量のばらつきが大きくなってしまったことに起因すると考えられる。走行、歩行、腰をかがめて歩行の 3 種類の行動の尤度計算器では、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、対象行動以外の行動の尤度も比較的高い尤度を算出している。これは、この 3 種類の行動が「一定のリズムで足を出して直進する」という基本的な行動で、加速度が類似しているため、特徴量の傾向が似通っているためだと考えられる。走行、歩行、腰をかがめて歩行の 3 種類の行動の加速度を図 4 に示す。走行と歩行のピーク間隔は明らかに異なっているが、いずれのピーク間隔もそれぞれ安定しており、ピーク間隔の分散の値は小さくなる。このように、傾向の近い特徴量が入力された場合、行動は異なっていると見ても、特徴量空間上の距離は近くなってしまいうため、高い尤度が算出される。

5.2.2 通常行動及び災害時行動ではない行動に対する尤度
対象としない行動に対し、尤度計算器が算出する尤度を評価

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 | 腰をかがめて歩行 | よるめきながらの歩行 |
| 停止 | 0.96 | 0.11 | 0.01 | 0 | 0.08 | 0.01 |
| 歩行 | 0.06 | 0.86 | 0.29 | 0.01 | 0.22 | 0.04 |
| 走行 | 0 | 0.26 | 0.87 | 0.15 | 0.2 | 0 |
| 床を這って進行 | 0.04 | 0.01 | 0.17 | 0.94 | 0.02 | 0.01 |
| 腰をかがめて歩行 | 0 | 0.52 | 0.04 | 0 | 0.8 | 0.01 |
| よるめきながらの歩行 | 0 | 0.17 | 0.01 | 0.08 | 0.12 | 0.89 |

表 2 通常行動及び災害時行動ではない行動に対する尤度の平均値

| 実際の行動 | 尤度 | | | | | |
|------------------|----|----|----|---------|----------|------------|
| | 停止 | 歩行 | 走行 | 床を這って進行 | 腰をかがめて歩行 | よるめきながらの歩行 |
| 全力疾走 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| スキップ | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 |
| 後ろ向きに歩行 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 |
| 壁に手をついて歩行 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 |
| 腰をかがめてよるめきながらの歩行 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 |

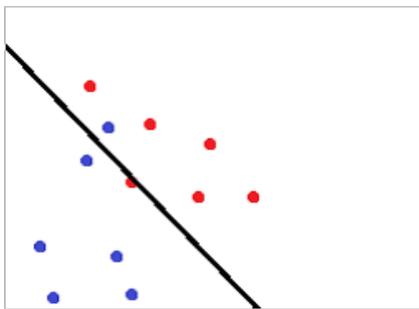


図 5 C-SVM による決定境界の作成

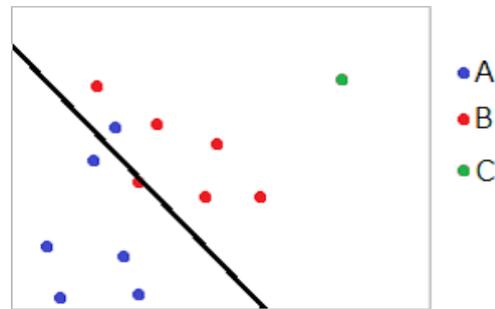


図 6 対象としない行動 C の特徴量空間上での位置

する。この評価では、作成した尤度計算器全てに対し、「全力疾走」（走行よりも速く走る）、「スキップ」、「後ろ向きに歩く」、「壁に手をついて歩く」、「腰をかがめてよるめきながらの歩行」の尤度を算出した。算出された尤度を、尤度計算器毎にまとめた結果を表 2 に示す。

表 2 のいくつかの項目で尤度が 1 と算出されているように、いくつかの行動を対象とする行動であると誤認していることがわかる。C-SVM で作成した尤度計算器は、図 5 のように特徴量空間を決定境界により、二つの領域に分割し、入力された特徴量がいずれの領域に属するかにより、対象行動であるか否かを判断する。この決定境界は訓練データにより定められるが、対象としない行動は訓練データに含まれないため、尤度計算器により正しく判断できず、誤って対象行動のものであると判断されてしまう場合がある。例えば、図 6 に示されるように、対象行動を B とする尤度計算器において、想定しない行動 C が入力された場合、決定境界により、行動 C を行動 B であると判定してしまう。また、決定境界までの距離に基づき確からしさを算出しているため、図 6 の行動 C のように、決定境界から遠く離れた行動の確からしさを 1 としてしまう。このように、対象としない行動に対して、必ずしも正しく尤度を算出できない場合もあることから、災害時に想定される行動を可能な限り、対象行動として考慮することが求められる。

6. まとめと今後の課題

本論文では、災害時の建物内における避難・救助を効率よく

実施するための環境推定手法として、歩きやすさと歩行を妨げる要因の推定手法を提案した。提案手法は、避難者が保持するスマートフォンにより認識された行動を集約することで、ある地点での行動の傾向を把握し、その地点の歩きやすさの推定を行い、さらに、歩きにくい場合は行動の傾向から歩行を妨げる要因を知ることができる。評価実験では、対象とする行動を高い尤度で推定可能で、歩きやすさと歩行を妨げる要因の高い精度での推定が可能であることを示した。しかしながら、訓練データに含まれない行動に対しては、他の行動であると認識してしまう場合があり、災害時の行動を可能な限り考慮することが望ましいことがわかった。

現時点では、スマートフォンは常に通信可能であり、サーバに行動を集約可能であることを想定している。今後は、3G のような通信環境がない環境でも動作できるように、スマートフォン間によるアドホック通信により、避難者間で行動情報を共有することで、歩きやすさの推定を実現する方法を検討している。

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。

本研究での情報収集実験にあたり、瓦礫救助訓練所を利用する許可を下された大阪府消防学校の皆様方に心から感謝いたします。

参考文献

- 1) 総務省：消防法施行令 (2012). Available : <http://law.e-gov.go.jp/htmlldata/S36/S36SE037.html>.
- 2) Betts, B.J., Mah, R.W., Papasin, R., Mundo, R.D., McIntosh, D.M. and Jorgensen, C.: Improving situational awareness for first responders via mobile computing, Technical report (2005).
- 3) 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).
- 4) Avci, A., Bosch, S., Marin-Perianu, M., Marin-Perianu, R. and Havinga, P.: Activity Recognition Using Inertial Sensing for Healthcare, Wellbeing and Sports Applications: A Survey, *Proceedings of the 23rd International Conference on Architecture of Computing Systems (ARCS'10)*, pp.1854–1859 (2010).
- 5) Ravi, N., D, N., Mysore, P. and Littman, M.L.: Activity recognition from accelerometer data, *Proceedings of the Seventeenth Conference on Innovative Applications of Artificial Intelligence (IAAI)*, pp.1541–1546 (2005).
- 6) Lee, S.-W. and Mase, K.: Activity and Location Recognition Using Wearable Sensors, *IEEE Pervasive Computing*, Vol.1, No.3, pp.24–32 (2002).
- 7) 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).
- 8) 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)*, Washington, DC, USA, pp.113–116 (2006).
- 9) 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).
- 10) Kwapisz, J.R., Weiss, G.M. and Moore, S.A.: Activity recognition using cell phone accelerometers, *SIGKDD Explorations Newsletter*, Vol.12, No.2.
- 11) 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).
- 12) Vapnik, V.: *The nature of statistical learning theory*, springer (1999).
- 13) 栗田 多喜夫：サポートベクターマシン入門. Available : <http://www.neurosci.aist.go.jp/~kurita/lecture/svm/>.
- 14) Bishop, C. M.: *Pattern Recognition and Machine Learning (Information Science and Statistics)*, Secaucus, NJ, USA (2006).
- 15) Kourogi, 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).
- 16) 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*, ACM, pp.118–125 (2005).
- 17) 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).
- 18) George, S.M., Zhou, W., Chenji, H., Won, M., Lee, Y.O., Pazarloglou, A., Stoleru, R. and Barooah, P.: DistressNet: a wireless ad hoc and sensor network architecture for situation management in disaster response, *Communications Magazine, IEEE*, Vol.48, No.3, pp.128–136 (2010).
- 19) Lorincz, K., Malan, D.J., Fulford-Jones, T.R., Nawoj, A., Clavel, A., Shnayder, V., Mainland, G., Welsh, M. and Moulton, S.: Sensor networks for emergency response: challenges and opportunities, *Pervasive Computing, IEEE*, Vol.3, No.4, pp.16–23 (2004).