

自転車走行時の路面情報抽出：基本検討および実測定

小花 祐輔^{†1} 高橋 淳二^{†2} 宇佐美 格^{†1}
狐崎 直文^{†2} 戸辺 義人^{†2} LOPEZ Guillaume^{†2}

概要：社会基盤のメンテナンスが重要となってきた中、道路の維持管理も重要課題となっている。しかし、路面状況の調査には、その範囲が広大で網羅的な調査を十分に行うことができていないという問題がある。自治体による定期検査を補う方法として、我々は低コストかつ網羅的な路面調査を実現するため、自転車とスマートフォンのみを用いた一般利用者向けの路面調査手法 YKOB を提案する。本稿では、YKOB の設計と、実環境における路面の異常箇所発見の結果による評価結果を述べる。

Inspection of Road Status by Bicycle Riders: Basic Principle and Preliminary Experiments

Yuusuke Kobana^{†1} Junji Takahashi^{†2} Itaru Usami^{†1}
Naofumi Kitsunozaki^{†2} YoshitoTobe^{†2} Guillaume Lopez^{†2}

Abstract: Maintenance and management of roads is becoming an important issue as well as other kinds of social infrastructure. A problem in inspecting the status of roads is its vast range and huge number for investigation. To compensate official inspection by local governments, we propose YKOB, a system of inspecting the road status by bicycle riders who carry smartphones. In this paper we describe the design principle of YKOB and its evaluation results by obtaining ill-maintained portions in the real environment.

1. はじめに

2012年12月に起きた笹子トンネル天井板落下事故以降、社会基盤のメンテナンスの重要性は高まってきている。道路のメンテナンスもまたインフラ整備には欠かせないものである。道路は地震のみではなく、その他の自然現象や経年劣化により陥没や隆起といった損壊を引き起こす。こういった異常箇所は歩行者の転倒や自転車の損傷等の原因となるため、早急な発見と修繕が必要である。しかし、道路のメンテナンスは、その総敷設距離が大きく財政面から十分に行われていないという問題がある。実際、地方公共団体において、定期的に点検を行っている団体は、半数に満たない¹⁾。

近年、自転車は「環境にやさしい乗り物」として注目を集めるようになり、その利用者数は増加傾向にある。自転車保有台数は平成元年の5,978万台から平成20年には6,909万台と、20年間で1,000万台の増加がみられる²⁾。自転車の主な利用目的として買い物や通勤・通学などの日常生活における、身近な目的地への交通手段として幅広く活用されている。また、全国各地で一般人を対象としたサイクリングのイベントやレンタサイクルが導入されるよう

になった。今後も利用者数の増加が考えられる。

一方、スマートフォンをはじめとする携帯端末の普及や加速度センサ、GPS、マイク、ジャイロセンサといった各種センサの登場により、参加型センシングが注目されつつある。参加型センシングは、情報端末を有している者であれば、その端末のもつセンサ等を活用して多くの人がセンシングに参加し情報を取得することができる。近年のスマートフォンの普及率と照らし合わせると、広範囲において網羅的なセンシングを行うことが期待できる。参加型センシングの例としては、Matthaiasらによる携帯端末を用いた参加型センシングによる騒音マップの作成がある³⁾。これは、端末に搭載されるマイクとGPSを用いて、騒音タグと位置情報タグをマップに反映させるというものである。もう一つの例として、OpenStreetMapを利用した「Yahoo!ロコ地図」がある⁴⁾。このサービスでは提供されている地図に対して、ユーザが自由に情報を追加していくことができる。いずれもユーザ側が必要とするのはスマートフォンやパソコンといった汎用的に扱われる端末が主体となっており、管理者側が維持管理にかかるコストが低いという利点がある。

そこで、我々は問題の解決策となる低コストかつ網羅的な調査方法として、近年増加傾向にある自転車とスマートフォンのみを用いた一般ユーザ向けの路面状況の調査方法

^{†1} 青山学院大学大学院
Graduate School of Aoyama Gakuin University

^{†2} 青山学院大学
Aoyama Gakuin University

YKOB (Your Kinetic Observation Bike) を提案する。具体的には、自転車走行者が衣服内にスマートフォンを入れて走行することで、その端末のもつ加速度センサから加速度信号の収集を行う。ただし、こうして収集した加速度信号には自転車走行者の足の運動であるペダリング信号と路面の凹凸を表す路面信号が混在していると考えられる。路面情報の抽出において、このペダリング信号は雑音となる。本研究ではペダリング信号を取り除くために、独立成分分析を用いて路面信号とペダリング信号の分離を行う。抽出した路面信号に対しては、その特徴量から登り段差 (PS: Positive Step), 下り段差 (NS: Negative Step), 凸段差 (CS: Convex Step) の分類アルゴリズムを提案し、その評価を行った。本稿では、実環境で発見した路面の異常箇所から調査方法の有用性の検証を行う。

本論文は以下の構成とする。第2章では、本研究における関連研究について述べる。第3章では、本研究で用いる独立成分分析について述べる。第4章では、YKOBの路面段差分類アルゴリズムと異常箇所検出アルゴリズムについて述べる。第5章では、路面段差分類アルゴリズムと異常箇所検出アルゴリズムの評価実験とその結果について述べる。第6章で考察について述べ、第7章でまとめとする。

2. 関連研究

本研究は、参加型センシングを前提としてシステム設計を進める。我々のグループで人が持つ傘を用いたセンシング⁵⁾を行っていたのと同様に人に着目した研究は多くあったが、Participatory Sensing⁶⁾という名称で2006年に参加型センシングの諸問題が整理された。その後、crowdの力を利用するという意味でCrowdsensingというより広義の名称で称され、システム構築⁷⁾、カバー範囲⁸⁾、ノード間協調⁹⁾に関する検討などを経て、適応範囲に議論が発展してきた。

我々の都市環境の調査にParticipatory Sensingを適用する事例も多く、最近の事例ではMeurisch等が都市騒音地図を作成している¹⁰⁾。多くの適用事例は、Christin等がまとめている¹¹⁾。

人ではなくて移動体を利用するものとして、先駆的研究としてプローブカー¹²⁾がある。これは車をセンサとして用いるのであるが、同様にバスなどの公共交通機関を用いてセンシングする事例もあり、Hasenfratz等の研究では路面電車をを用いてZurich市内の受信電波状況を調べている¹³⁾。さらに移動体に乗る人が装着するスマートフォンを用いた例としてNericell¹⁴⁾がある。

さて我々の研究も自転車という移動体に乗る人に着目するので、自転車に関する先行研究について述べる。自転車そのものにセンサを装着するものとして、BikeNet¹⁵⁾、プローブバイシクル¹⁶⁾がある。BikeNetは環境情報収集を目的としたものであり、プローブバイシクルは安全感評価モ

デルを作成するために走行環境を計測するものである。いずれの研究も図1, 2に示すように自転車本体に加速度センサ、サイクルコンピュータ、GPSといった様々なセンサを装着し、調査を行うというものである。一般利用向けを考えた場合、コスト面から自転車にセンサを取り付けることは有用であるとは言い難い。本研究ではスマートフォン1台を有している一般人であれば、誰でも路面調査に参加することができるため、低コストで網羅的な調査を実現することができる。

路面段差の検出を行う研究として、八木氏による車とスマートフォンを用いた検出手法がある¹⁷⁾。これは車のダッシュボードの上にスマートフォンを置くことで、その加速度センサとジャイロセンサから段差の検出を行うというものである。これらを利用して、地震が発生した際に、路面段差の観測を速やかに行うことを目的としている。取得した情報はWebサイトから閲覧することができる。八木氏の研究と本研究との違いは、路面調査の対称となる空間の違いである。八木氏の研究の場合、自動車の路面調査を対象としているため、歩道やサイクリングロードといった自転車が走行するような空間に対しての調査を行うことはできない。

我々の研究では、自転車に乗る人の衣服内にあるスマートフォンのみを用いて路面情報を抽出する点で先行研究とは異なる。



図1 BikeNetのセンサ¹⁵⁾

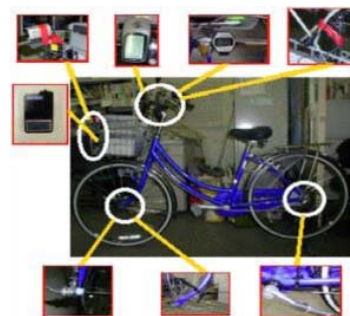


図2 プローブバイシクル¹⁶⁾

3. 独立成分分析

本章では、YKOBで用いる独立成分分析の概要について説明する。

3.1 独立成分分析の概要

独立成分分析 (ICA: Independent Component Analysis) とは、複数の観測された信号から隠された因子を見つけ出すための分析手法である¹⁸⁾。未知の因子に対しても分析を行うことができる。ICA に対する研究は数多くなされており、音の解析¹⁹⁾や車両の振動解析²⁰⁾など幅広い分野で応用されている。ICA の定義について述べる。t を時間または標本番号とし、複数の確率変数の観測値の集合を $\mathbf{x}_i (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in})$ とする。また、信号源となる信号の集合を $\mathbf{s}_i (s_{i1}, s_{i2}, \dots, s_{in})$ とする。ここで確率変数 \mathbf{x}_i から信号源 \mathbf{s}_i へ分離を行うための復元行列 \mathbf{W} を用いて以下のような式で表される。

$$\begin{pmatrix} s_1(t) \\ s_2(t) \\ \vdots \\ s_n(t) \end{pmatrix} = \mathbf{W} \begin{pmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ \vdots \\ x_n(t) \end{pmatrix} \quad (1)$$

ICA では独立信号 \mathbf{s} が統計的に最も独立となるように分離行列 \mathbf{W} との同時推定を行っていく。統計的に独立とは、その信号が非ガウス分布に従うことを意味する。これは、中心極限定理の確率論に基づいている。非ガウス性を最大化することによって、独立な因子の推定を行う。本研究では、他の ICA のアルゴリズムに比べてより速く確実に収束する FastICA を用いる。

3.2 FastICA

FastICA とは、観測信号に対し、中心化と白色化という前処理を行うことで、非常に速くガウス性を最大化することのできるアルゴリズムである。本研究では、複数の成分に対してのガウス性を最大にする方法として、直交性によるアルゴリズムである逐次直交化を用いる。中心化により、平均値を 0 とすることによって、アルゴリズムが非常に単純なものとする。観測信号 \mathbf{x}' は ICA の前に、

$$\mathbf{x} = \mathbf{x}' - E\{\mathbf{x}'\} \quad (2)$$

を適用することにより中心化される。次に白色化により、相関行列が単位行列になるように線形変換を行う。すなわち無相関で分散が 1 となるようにすることを意味する。白色化された確率ベクトルは以下のように表される。E は固有ベクトル、D は n 個の要素をもつ確率ベクトルである。中心化された観測信号を $\tilde{\mathbf{x}}$ とすると、以下の式によって白色化される。

$$\mathbf{x} = \mathbf{D}^{-1/2} \mathbf{E}^T \tilde{\mathbf{x}} \quad (3)$$

FastICA の中にも多くのアルゴリズムが存在するが、本研究では少ない計算量で複数の独立成分の推定を行うことが可能な逐次的直交化のアルゴリズムを用いる。

4. YKOB の□□

本章では YKOB の設計について述べる。具体的には、前節で述べた ICA の適用方法と、路面信号分類方法、異常箇所検知アルゴリズムを述べる。

4.1 独立成分分析の路面□□分□□の□□

ICA の路面信号抽出への適用方法について述べる。ペダリング信号と路面信号をそれぞれ独立な信号とみなし、それぞれ独立信号 $\mathbf{s}_1, \mathbf{s}_2$ とする。次に、スマートフォンの 2 軸から観測される加速度信号を観測信号 $\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2$ とする。この 2 軸は、3 軸加速度信号の中でよりペダリング信号がみられる 2 軸である。これに対して ICA を適用することにより、観測信号からペダリング信号と路面信号の分離を行う。

ICA の適用方法の有用性の検証のために、予備実験を行った。1 台のスマートフォンをポケットに入れ、アスファルトの上を 30 秒間自転車で走行し、取得した加速度に対して ICA による分離を行った。取得した加速度信号を図 3 に示す。上側の実線で表される信号が z 軸の加速度信号で下側の破線で表される信号が y 軸の加速度信号である。ICA により分離された信号を図 4、5 に示す。

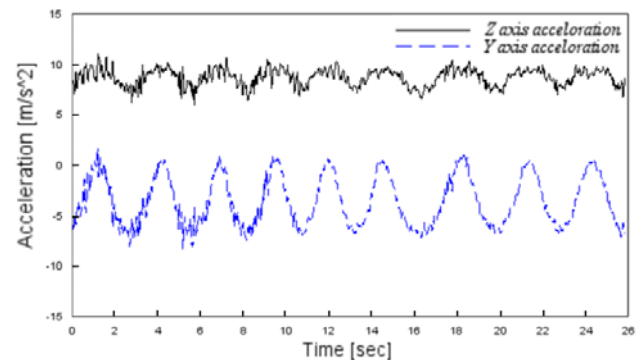


図 3 観測信号

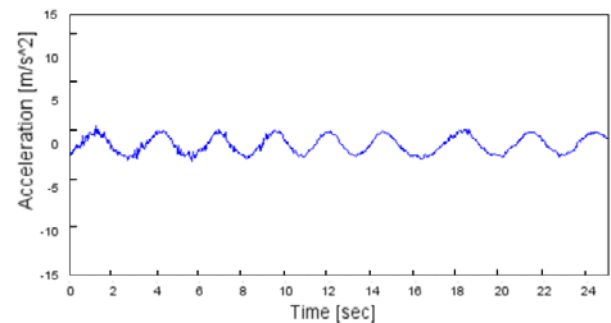


図 4 ICA により分離された信号(1)

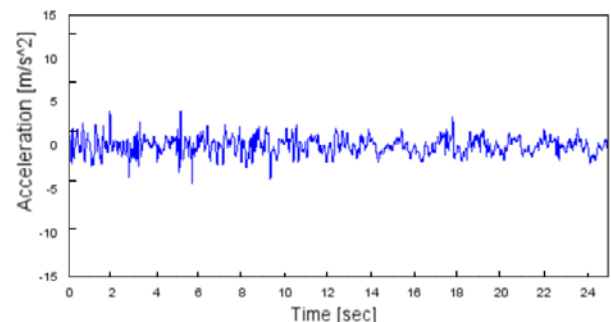


図 5 ICA により分離された信号(2)

図4には一定の周期がみられるため、ペダリング信号 s_1 であると考えられる。一方、図5には周期はみられないため、路面信号 s_2 であると考えられる。ICAの路面信号分離への適用は有用であると考えられる。

抽出した路面信号をもとに段差の分類を行っていく。

4.2 路面信号分類方法

路面信号分類までのフローチャートを図6に示す。それぞれの処理の以下に示す。

・ Selecting two signals

取得した生信号に対し、3軸の中でペダリングによる周期性のみられる2軸を選択する。

・ FastICA

選択した2軸の加速度信号に対し、前節で述べたICAの適用方法を用いて分離を行う。

・ Selecting a road signal

分離された信号 s に対し路面信号とペダリング信号の判定を行う。これには、ペダリング信号にみられる周波数特性に着目し、FFTを用いることで判定する。4Hz以下における周波数成分の高い方をペダリング信号とし、路面信号を抽出する。

・ Correcting signal direction

ICAにより分離された加速度信号は正負が反転している場合があるため、正しい方向をもつ軸の加速度信号と比較することでこれを判定し、正しい方向に修正する。

・ Classifying road condition

抽出した路面情報から路面形状の分類を行う。

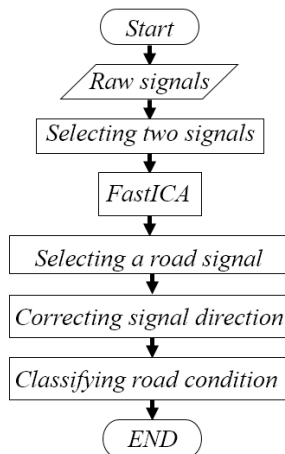


図6 YKOBにおける路面信号分類

4.3 段差分類アルゴリズム

PS, NS, CSの分類アルゴリズムについて述べる。まずは、通過した段差がNSかNot NSかの分類を行う。次にNot NSと判定された段差に対してPSかCSかの分類を行う。

ICAにより取得した路面信号 $R(t)$ に対し閾値を設け、一定の時間内に超えた正方向の閾値 T_{plus} の時間を段差の発生

時間 t_{step} とする。次に段差の発生した時間から短時間前 t_{pre} の時間幅における加速度の負方向の変化量を A_{minus} とする。NSの場合の A_{minus} はPS, CSと比較して自由落下が生じる分、大きい値をとると考えられる。これを利用して分類を行う。負方向の変化量の閾値を M_{thre} とし、NS段差分類アルゴリズムを図7のように定義する。

```

A_{minus} = 0
for t = t_{pstep} - t_{pre} to t_{pstep}
  if R'(t) < 0 then
    A_{minus} = A_{minus} + R'(t)
  endif
endfor

if A_{minus}^2 > M_{thre} then
  Road condition ← Negative Step
else
  Road condition ← Positive Step
endif
  
```

図7 NS分類アルゴリズム

次にNot NSと判定された段差に対し、PS, CSの分類を行う。これらの分類には、路面信号の負方向の閾値 T_{minus} を超えたピーク値の数を用いる。 t_{step} の短時間後の時間幅 $t_{interval}$ における T_{minus} を超えたピーク値の数を N_{minus} とする。CSの場合はPSに比べ自由落下が発生する分 N_{minus} の数が多くなる。 N_{minus} が4つ以上の場合にCS、それ以外の場合にPSと判定する。PS, CS分類アルゴリズムを図8に示す。

```

if N_{minus} ≥ 4 then
  Road condition ← Convex Step
else
  Road condition ← Positive Step
endif
  
```

図8 PS, CS分類アルゴリズム

4.4 異常箇所検出アルゴリズム

分離された路面情報から通過した異常箇所の検出を行う。自転車で異常箇所を通過した場合、前輪と後輪で通過するため、短時間で2箇所のピーク値が見られると想定する。これに基づいて検出を行う。実際に異常箇所を通過した際の加速度変化の様子を図9に示す。まずは、 T_{plus} を超えるピーク値の時間を算出する。算出したピーク値間の時間が $t_{interval}$ に収まっていた場合に、段差と判別する。 $t_{interval}$ は自転車のホイールベースによる。

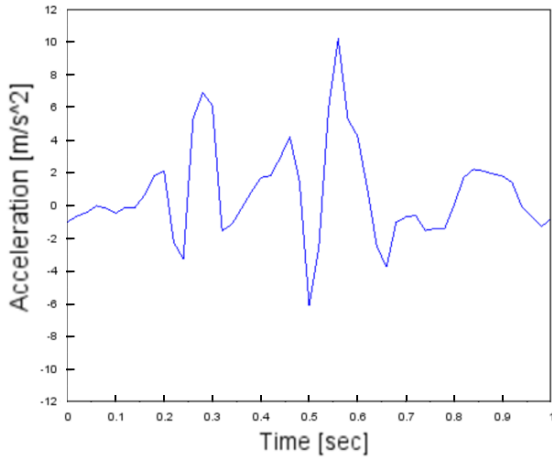


図9 異常箇所通過時の加速度変化

5. 評価実験

本章では、第4章の段差分類アルゴリズムと異常箇所検出アルゴリズムの評価実験を述べる。

5.1 実験環境

走行速度は自転車の平均速度である 12~14 km/h で行った。実験に使用した自転車は一般的に使用されている軽快車である。加速度のサンプリング周波数はハードウェアの制約により 50 Hz とした。

5.2 段差分類実験

4.3 節で述べた段差分類アルゴリズムの精度の検証を行う。分類する段差は PS, NS, CS に平地 (FL: Flat) を加えた 4 種類の段差とした。実験用走行路を図 10 に示す。通過する段差は 2004 年に発生した新潟県中越地震において、震度 5 強が観測された地域に多く発生した 50 mm 程の段差を想定し、通過する²¹⁾。試行回数はそれぞれの走行路に対して 50 回とした。設定した値を表 1 に示す。

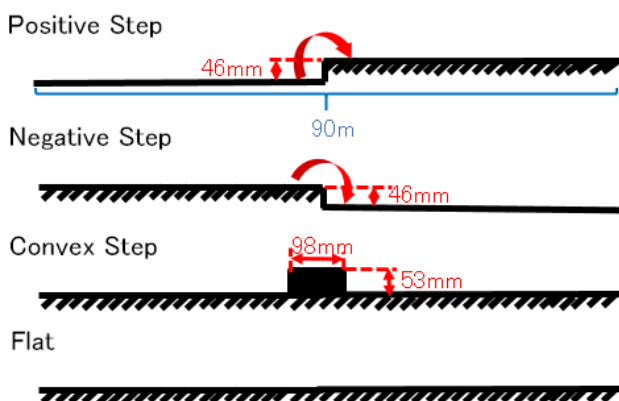


図 10 実験走行路図

表 1 設定した閾値

変数	設定値
T_{plus}	2.5 m/s ²
t_{pre}	0.1 s
M_{thre}	-15 m/s ²
T_{minus}	-3 m/s ²
$t_{interval}$	0.5 s

実験結果を表 2 に示す。NS の識別精度に比べ、PS, CS に低い精度がみられた。

表 2 実験結果

		正解			
		PS	NS	CS	FL
推定	PS	38	4	8	0
	NS	6	42	8	0
	CS	6	4	34	0
	FL	0	0	0	50
正答率		0.76	0.84	0.68	1.00

5.3 実験環境における実験

4.4 節で述べた異常箇所検出アルゴリズムを評価するため、青山学院大学相模原キャンパス周辺において観測した 42 個の異常箇所を通過する実験を行った。観測した異常箇所のマップと異常箇所の写真を図 11, 12 に示す。

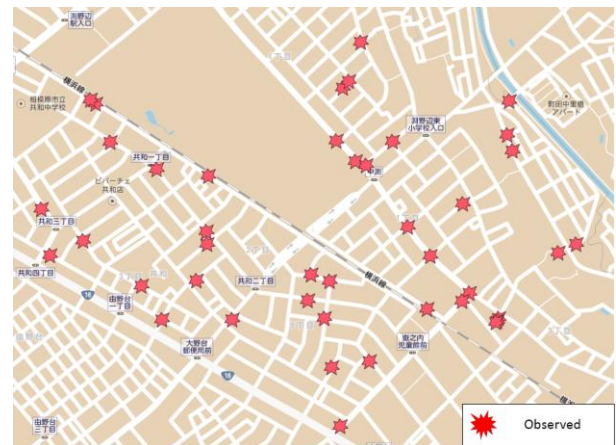


図 11 異常箇所マップ



図 12 観測した異常箇所

これらの異常箇所に対し、スマートフォンをポケットに入れ走行し、その端末から加速度信号とGPSによる位置情報を取得する。\$T_{plus}\$, \$T_{interval}\$ の設定値は、5.2 節と同様とした。取得した加速度信号に 4.4 節に記述した異常箇所検出アルゴリズムを適用し、検出した異常箇所の位置情報をプロットする。観測した箇所と検出された箇所の距離が 20 m 以内の場合に正しく検出されたと判定する。位置精度の評価は観測した異常箇所を \$N_o\$、正しく検出された異常箇所の数を \$N_d\$ とし、正答率 \$\eta\$ を

$$\eta = \frac{N_d}{N_o} \quad (4)$$

で求める。

実験結果を図 13 に示す。図中、ピンマークが正しく検知された箇所で、四角形のマークが誤検知された箇所である。

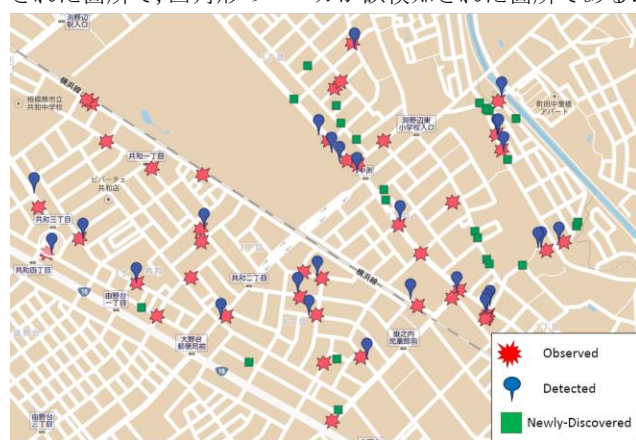


図 13 実験結果

観測した異常箇所に対し、\$N_d\$ は 28 箇所、\$\eta=0.67\$ で検知できることが分かった。また、誤検知された異常箇所の数は 26 箇所であった。

6. 考察

段差分類実験では、全体の正答率としては 70% 以上の精度で識別することができた。段差分類アルゴリズムで示した加速度の変化の仮定は正しかったといえる。NS に比べ、PS, CS に低い精度がみられた。これは、段差通過時の足の位置やペダリング運動による加速度変化の取得過程の影響であると考えられる。この問題に関しては、ICA から分離されたペダリング信号などを用いて段差通過時の足の位置を特定することにより、補正をすることで解決可能であると考えられる。また、今後の課題としては分類できる路面形状の種類が増加があげられる。

実環境における実験において、発見した異常箇所が正しく検知できなかった原因としては、その高さが低く閾値を超える十分な加速度の変化が得られなかったためであると考えられる。1~2cm 程の高さの場合、十分な変化を得られないことが多い。誤検知の原因としては、交通整備がなされている地域において、図 14 に示すような車道と歩道の

間に設けられる段差を異常箇所と検知してしまったためであると考えられる。そのため、これらを分類するような手段が必要となってくる。これに対しては、検知した位置情報と管理している道路の情報を照らし合わせることやこれらを分類するアルゴリズムの開発を行うことによって対処することを考えている。また、4 章で述べた段差分類アルゴリズムと組み合わせることで路面形状の判別を行う必要がある。

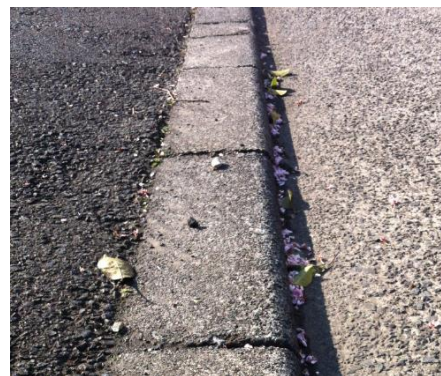


図 14 歩道と車道間の段差

7. まとめ

本稿では、実環境において発見した路面の異常箇所を通過した。その結果、67% の正答率で異常箇所の検知を行うことが確認できた。今後、より複雑な路面形状の分類を行うことができれば、道路管理者の更なる調査コストの軽減が望める。また、路面情報マップを作成し、他の自転車利用者と路面情報を共有することで、安全な自転車の走行が実現できると考えられる。

参考文献

- 1) 小澤隆: 自転車道を取り巻く現状と課題, 国立国会図書館, pp. 67-68(2007), http://www.ndl.go.jp/data/publication/refer/200704_675/067503.pdf.
- 2) 内閣府: 自転車交通の総合的な安全性向上策に関する調査報告書, pp.4(2011), <http://www8.cao.go.jp/koutu/chou-ken/h22/pdf/houkoku/2.pdf>.
- 3) Stevens, M., D'Hondt, E.: Crowdsourcing of Pollution Data using Smartphones, UbiComp'10 (2010.9).
- 4) Yahoo! JAPAN: Yahoo! ロコ地図(2011.6), <http://loco.yahoo.co.jp/>.
- 5) Sasaki, K., Inoue, U., and Tobe, Y.: WINFO: A human-assisted sensor network, INSS 2005, (2005).
- 6) Burke, J., Estrin, D., Hansen, M., Parker, A., Ramanathan, N., Reddy, S., and Srivastava, M. B.: Participatory sensing. Prof. of Workshop on World-Sensor-Web (WSW'06): Mobile Device Centric Sensor Networks and Applications, (2006).
- 7) 井村和博, 中澤仁, 徳田英幸: Sensus: Human as a Sensor サービス構築支援ツール, 電子情報通信学会技術研究報告, pp.27-32 (2012.7).
- 8) Ahmed, A., Yasumoto, K., Yamauchi, Y., Ito, M.: Probabilistic Coverage Methods in People-Centric Sensing. JIP 19: pp. 473-490 (2011).

- 9) Thepvilojanapong, N., Konomi, S., and Tobe, Y.: A study of cooperative human probes in urban sensing environments. IEICE Trans. on Comm., Vol. E93-B, No.11, pp.2868-2878(2010.10).
- 10) Meurisch, C. and Planz, K.: Noisemap – discussing scalability in participatory sensing, ACM SenseMine'13 (2013.11).
- 11) Christin, D., Reinhardt, A., Kanhere, S., and Hollick, M.: A survey on privacy in mobile participatory sensing applications, Journal of systems and software (2011).
- 12) 植原 啓介: 情報インフラとしてのインターネット自動車 InternetCAR, インプレス R&D(2009.4).
- 13) Hasenfratz, D., Sturzenegger, S., Saukh, O., and Thiele, L.: Spatially resolved monitoring of radio-frequency electromagnetic fields, ACM SenseMine'13 (2013.11).
- 14) Prashanth, M., Padmanabhan, V. N., and Ramjee, R. Nericell: rich monitoring of road and traffic conditions using mobile smartphones, ACM SenSys'08, pp. 323-336 (2008).
- 15) Eisenman, B. Shane, Miluzzo, E., Lane, N. D., Peterson, R. A., Ahn G.S., and Campbell, A. T.: BikeNet: A mobile sensing system for cyclist experience mapping. ACM. Trans. Sensor Networks, Vol.1, No.6, (2009.12).
- 16) 山中英生, 土岐源水, 二神彩, 亀谷一洋: プローブバイシクルを用いた自転車利用環境の評価, 土木計画学研究・講演集, Vol.26 月(2002.7).
- 17) 八木浩一: スマートフォンの加速度センサを用いた路面段差検出方法, 第9回 ITS シンポジウム 2010(2010).
- 18) Hyvärinen, A. Karhunen, J. and Oja, E.: Independent Component Analysis, John Wiley & Sons(2001).
- 19) 堤憲亮, 半田晶寛, Persia, L. D., 柳田益造: 独立成分分析を用いたブラインド音源分離の実環境に対する有効性の検証, 電子情報通信学会技術研究報告, pp. 1-6(2004).
- 20) 中村弘毅, 中野公彦: 独立成分分析法を用いた車両振動の解析, 日本機械学会論文集, pp. 1163-1170(2009).
- 21) 依藤光代, 常田賢一: 地震時の段差被害に対する補修と交通開放の管理・運用方法について, 国立国会図書館, p.67(2007).