Vol.2017-HCI-175 No.9
Vol.2017-UBI-56 No.9
2017/11/2

実環境における自転車とスマートフォン端末を用いた路面状態検出

鈴木隆二[†1]　ロペズギヨーム[†2]　高橋淳二[†2]　戸辺義人[†2]

概要：道路メンテナンスは重要な社会問題となっているが，コスト面などにより実際にはメンテナンスが実施されないことが多い．近年，この様な問題に対して参加型センシングを用いたメンテナンスに関する研究が行われている．我々も参加型センシング志向のスマートフォンと自転車のみを用いた路面異常検出を行う YKOB（Your Kinect Observation Bike）を提案してきた．YKOB では，スマートフォンに付属している加速度信号を用いて，自転車走行時に携帯しているスマートフォンで加速度信号を取得している．取得した信号に対して独立成分分析（ICA）を用いてペダリング信号と路面信号に分離し，実信号マザーウェーブレットを用いることで解析する．既に提案している YKOB のシステムでは，事前に用意した環境で取得した段差信号を 4 種類の段差に分類するということを実施し，0.7 を超える分類精度で分類ができている．本論文では，YKOB を実際の道路を走行した際に取得した信号に対して，ICA と RMW による手法で検出できるかを評価する． YKOB について説明した後に，実際に実環境でのデータ取得方法，データ解析方法，実験結果について述べる．

キーワード：参加型センシング，独立成分分析，実信号マザーウェーブレット，社会基盤メンテナンス，ニューラルネットワーク

Road Condition Detection using a Bicycle and Smartphones in Real Environment

SUZUKI RYUJI[†1]　JUNJI TAKAHASHI[†2]
YOSHITO TOBE[†2]

Abstract: Maintenance for social infrastructure is important. However, maintenance is not conducted in many cases due to cost. In recently years, researches for maintenance on participatory sensing has been conducted to solve problems. We proposed monitoring system based participatory sensing named Your Kinetic Observation Bike (YKOB) that only uses a smartphone and a bicycle previously. YKOB gathers acceleration signals recorded on smartphone that a cyclist posse. After independent component analysis (ICA), the gathered data are analyzed through real mother wavelet (RMW) to predict the road conditions. In case of proposed type of YKOB system, we classified the road conditions into four types of step and the prediction accuracy overtook 0.7 in artificially set real environment. In this paper, we gathered acceleration signals when a cyclist runs actual city roads and analyzed them with ICA and RMW based algorithm. After a brief introduction of the YKOB, we describe the data gathering method in actual city roads, data analysis method, and their results.

Keywords: participatory sensing, independent component analysis, real mother wavelet, maintenance of social-infrastructure, neural network

1. はじめに

社会基盤のメンテナンスは重要事項であるが，自治体の財政状況などが原因となり，十分なメンテナンスが行き届いていない．但し，安全面を考慮すると道路の路面異常はできるだけ早く検出し，修復する必要性がある．現在の道路メンテナンスとして，特別なセンサを搭載した車両を用いたメンテナンス方法があるが，特別なセンサを使用するため費用が高い，用意するのが困難であるという問題がある．そのため，より容易なセンシング方法が必要となる．近年，スマートフォンやウェアラブルデバイスなどの端末の普及が急激に進んだことにより，端末使用者の情報を端末上のセンサから気軽に取得できる様になっている．そのため，取得した情報を元に，参加型センシングを利用した新しいシステムの開発が活発に行われている．

これらを踏まえて，我々は低コストで参加型センシングを想定した，自転車運転者が携帯するスマートフォンで計測した加速度信号から路面異常を検出する YKOB（Your Kinetic Observation Bike）を提案してきた[1][2]．YKOB では，実信号マザーウェーブレット（RMW : Real signal Mother Wavelet）を用いて，検出した路面異常を 4 種類の段差に分類することを実施してきたが，未知の信号にも対応することができている．しかしながら，事前に想定した人工段差で取得したデータに対しての適応しかできておらず，実際の環境下においてのデータの取得は出来ていない．そのた

†1 青山学院大学大学院理工学研究科理工学専攻知能情報コース
Intelligence and Information, Graduate School of Science and Engineering, Aoyama Gakuin University

†2 青山学院大学理工学部情報テクノロジー学科
Department of Integrated Information Technology, College of Science and Technology, Aoyama Gakuin University

ⓒ 2017 Information Processing Society of Japan

め，実際の環境で取得したデータに対して検出，分類を実施し，最終的にその結果について考察する．

本論文の構成は以下の通りである．第二章では，関連研究について概説する．第三章では，YKOB の全体設計について述べる．第四章では，以前提案した分類手法に用いている実信号マザーウェーブレットについて説明する．第五章，第六章では，それぞれ人工環境，実環境における評価実験を実施し，評価する．最後に，第七章で結論を述べる．

2. 関連研究

参加型センシングは，個人で気軽に携帯端末を所持できる様になったことから，以前に比べて注目度が上がっている[3]．例えば，Christin らによる，交通量，温度，排気ガスをマップへと可視化する研究[4]，Hasenfratz らによる路面電車を用いて市内の受信電話状況を調べる研究[5]，Stevens らによる携帯端末と GPS による位置推定を用いた，騒音マップを作成する研究[6]などがある．

参加型センシングの中でも，道路環境をモニタリングするための研究の進展も著しい．車を使った例では，自動車乗車時に，人が携帯しているスマートフォンを用いて加速度信号を取得し，端末と自動車の姿勢のずれから自動車の加速度を算出し，路面状態を検出する研究[7]やタクシーに 3 軸加速度センサを装着して修復が必要な箇所を調査する研究[8]がある．しかし，前者は検出精度が低く，後者は特殊な端末を取り付ける必要性があるという問題点がある．これらに加えて，スマートフォンと自動車を用いた，路面状況をモニタリングする仕組み[9][10]が進んでいる。こうした研究では，スマートフォンを車内や列車内，自転車に固定し，付属している慣性センサを用いて，路面状況の検出を行うものであり、移動体に COTS (Commercial off-the-shelf)センサを取り付けるアプローチとして確立されてきた。この様に装置を取り付けて行う場合，自ら意識的に装置の取り付けを行う必要性があり，手間がかかるため，参加者の意欲を下げてしまう．

道路環境をモニタリングする研究には，自転車を用いた研究も幾つか報告されている．自転車は車と比べた際に重量が軽く，サスペンションが付いていない．そのため，走行速度が遅い場合でも，低い段差についても検出が可能であることや車両毎に検出アルゴリズムのパラメータ調整の必要性が少ない．同様に，自転車走行空間は自動車走行空間よりも広範囲であるため，より広義な空間での検出が可能となる．例えば，自転車にカメラを取り付けて走行環境を取得する研究[11]や自転車走行中のサイクリストの状態を検出する研究[12]がある．これらの研究では，カメラやスマートフォンなどの端末を自転車に固定して計測を実施しているため，自転車運転者の動作によるノイズの影響は少なくなる．しかし，自転車に端末を装着して，走行するのは，一般的ではなく参加者を多く募ることを考えると，モニタリングを行う人を限定するという問題がある．

そのため，YKOB では計測に使用するスマートフォンを自転車に固定することや特別なセンサを使用するということは行わずに，自転車走行者が普段通りに自転車で走行するだけで，センシングを行うことを提案してきた．YKOB では，アプリケーションを起動しているだけで，意識することなくデータを取得することが可能である．

3. YKOB の全体設計

YKOB は，自転車運転者が走行中に携帯しているスマートフォンから取得する加速度信号を解析することで，道路の状態を推定する道路モニタリングのシステムである．YKOB システムにおける路面情報の取得と分析の流れを以下に示す．

1. スマートフォンの加速度センサを用いて，自転車走行中の加速度信号を取得する
2. 取得した信号からペダリング信号と路面信号を独立成分分析（ICA）により分離する
3. 抽出した路面信号から路面異常箇所を特定する
4. 路面異常を分類する
5. 路面異常箇所と種類を地図上に表す

図 1 に YKOB を構成する要素を示す. 要素には, 参加者, サーバ，道路管理者の 3 つがあり，それぞれの役割について以下で説明する．

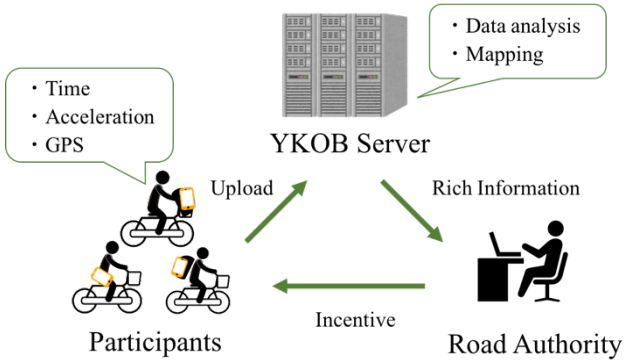

図 1. YKOB の構成要素

3.1 参加者

YKOB への参加者は，自転車とスマートフォンを携帯している必要性がある．スマートフォンの携帯位置は，腰のポーチ，ズボンの前ポケット，胸ポケット，カバンとし，取得した加速度信号と GPS により路面状態を調査する．この時，特別なセンサの取り付けは必要なく，スマートフォン内で道路調査のためのアプリケーションを起動しておくだけで，日常生活において調査が行われる．スマートフォンは，時刻，3 軸加速度，GPS をサンプリング周波数 50 で取得しており，データ量としては 1 分間で約 100KB である．データの収集が終了した後に，参加者はデータをサー

バ上にアップロードする．参加者の数が増えれば増えるほど，広い範囲において，より詳細に調査が可能となる．

3.2 サーバ

サーバの主な役割は，データを収集し，収集したデータを解析後，路面の異常箇所を検出することである．はじめに，サーバは複数の信号が混ざっている加速度信号から路面信号を抽出する必要性がある．ズボンの前ポケットで取得した信号には，路面信号のみではなく，自転車をペダリングする際のペダリング信号も含む複数の信号であるため，路面信号のみを抽出する．路面信号を抽出したら，その信号が人工段差か路面異常であるかを分類する必要がある．最終的には，路面異常と判断されたものを道路状態マップに可視化する．

3.3 道路管理者

道路管理者は，視覚的に路面の状態を発見された時間と位置を共に確認することが可能である．全ての道路管理者はサーバにアクセスすることが可能で，道路状態マップを確認した上で，修繕するかどうかを選択する．そのため，道路管理者側で自ら道路状況を調べる必要性がなく，道路メンテナンスにかかるコストを大幅に削減することが可能となる．

4. 実信号マザーウェーブレット

4.1 路面異常の種類と加速度信号

道路異常のモニタリングの際には，異常箇所を特定することは勿論のこと，異常の種類を特定できるようにすることが必要である．特に，車道と歩道との間に存在する様な人工段差と亀裂や隆起などの路面異常との区別は必須である．そのため，これらの形状を区別するために，本研究では図 2 に示す様に，PS（Positive Step），NS（Negative Step），CV（ConVex Step），CC（ConCave Step）の 4 種類の段差があるとし，検出した段差をこれらの 4 種類に分類すること

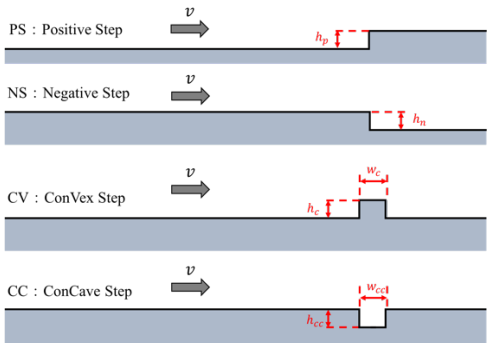

図 2. 検出している 4 種類の段差

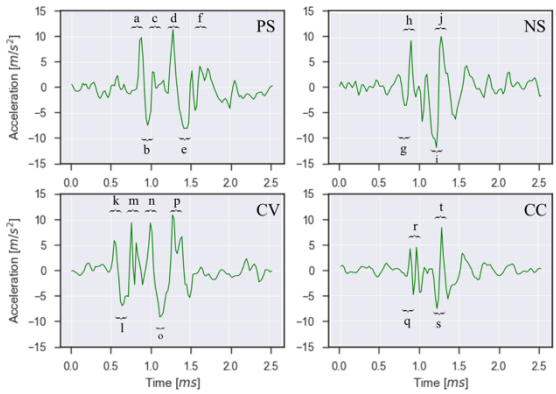

図 3. 取得した段差別の加速度信号波形

表 1. 加速度信号における路面異常と車輪との関係性

wheel condition	PS	NS	CV	CC
front wheel, tip up	a	–	k	–
front wheel, free fall	b	g	l	q
front wheel, landing	c	h	m	r
rear wheel, tip up	d	–	n	–
rear wheel, free fall	e	i	o	s
rear wheel, landing	f	j	p	t

を考える．自転車走行者が段差に衝突した際に，加速度信号の波形が変化するので，段差に衝突したと推測することができる．図 3 に実際に段差に衝突した際の信号波形を示す．2 つの箇所（a, b, c）（d, e, f）では似ている信号波形が現れていて，$a-b$間における時間間隔は$\Delta t_{a-d} = 0.4$[s]となる．この信号を記録した時の自転車の速度は$v = 9.9$[km/h]なので，距離は$\Delta d_{a-d} = 1100$[mm]と求めることができる．観測に使用した自転車の前輪と後輪との幅は$wb = 1100$[mm]なので，等しく，aとdは前輪と後輪が段差に衝突した際のものであるとすることができる．それぞれの段差に衝突した際の加速度信号，前輪と後輪とが段差に衝突した際の特徴が現れている箇所を表 1 に示す．これらの特徴の違いから，それぞれの段差に衝突した際の信号を区別することが可能となる．

4.2 RMW による路面異常の分類

前節では，それぞれの信号波形には特徴があることを述べた．そこで，YKOB ではそれぞれの信号波形を実信号マザーウェーブレット（RMW）で表現することで，新たに取得した未知な信号に対しても作成した RMW により，段差種類を特定することを行なってきた．初めに，RMW の作成方法について説明し，その後 RMW による分類アルゴリズムについて説明する．

4.2.1 RMW の作成方法

それぞれの段差に対応した RMW $\psi^i(t)(i = PS, NS, CV, CC)$を図 2 の段差を通過した際の加速度信号か

ⓒ 2017 Information Processing Society of Japan

ら作成する．RMW の作成手順は以下になる．

(1) RMW の候補信号をサンプル数pで切り出し

(2) ハミング窓関数を適用

(3) スケールaの調整を用いて関数組$\psi_{a,b}$の生成

$$\psi_{a,b}(t) = a^{-\frac{1}{2}}\psi(\frac{t-b}{a}) \qquad (1)$$

(4) ノルム$\|\psi_{a,b}(t)\|$が 1 となるように正規化

本研究では，サンプル数$p = 128(2.56[s])$として，$a = 0.6, \ldots, 1.4$の 9 つを関数組とした．aの範囲この様に限定したのは，加速度信号を取得した際の実験では，自転車速度を 8.0~12.0[km/h]の範囲で収まる様にしたためである．生成した関数組を図 4 に示す．

新たに観測した未知な信号$f(t)$の分類方法について説明する．初めに，未知な信号$f(t)$と関数組$\psi^i_{a,b}(t)$との相関を次式で求める，

$$w^i(a,b) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)\,\psi^i_{a,b}(t) \qquad (2)$$

得られた相関関数$w^i(a,b)$の最大値を類似度simとした時，全ての関数組の中から最大のsimを与える$\psi^i_{a,b}(t)$のiをその信号の段差として判定する．例として，段差 PS を通過した際に計測された信号と図 4 に示す関数組との相関を計測した結果を図 5 に示す．simが最大となるのは$i = PS$の時であるため，この信号は段差 PS を通過した時の信号であると判断できる．RMW のサンプル元信号と新たに取得した信号の自転車速度が異なっている場合でも，時間スケールの調整パラメータとしてaが作用しているので，相関を適切に計算することができる．

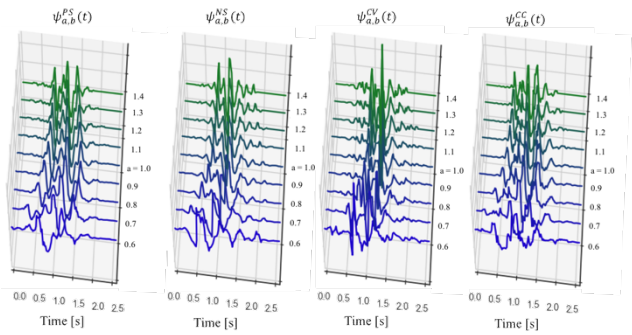

図 4. 作成した RMW の関数組

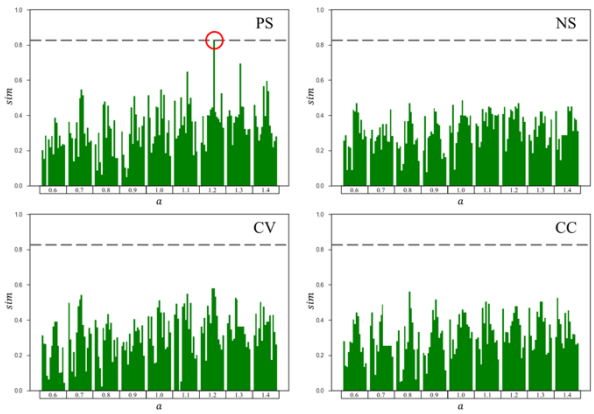

図 5. 未知な信号$f(t)$と関数組$\psi^i_{a,b}(t)$との相関

5. 人工環境における実験

我々は，提案してきた RMW よる分類アルゴリズムによる分類アルゴリズムが正しく行えているかを評価した[1]．再度，確認のために人工環境における実験方法について説明する．実験では図 6 に示した事前に想定した 4 種類の段差を通過した際の加速度信号を取得し，収集した信号を分類する．それぞれの段差の高さと幅は，$h_p = 46$，$h_n = 46$，$h_{cv} = 53$，$w_{cv} = 98$，$h_{cc} = 58$，$w_{cc} = 200[mm]$である．自転車速度を$8.0\sim12.0[km/h]$と低速にしたため，横 G の影響はほとんど影響を与えない．図 7 にスマートフォンの携帯位置と使用した自転車を示す．加速度信号は，p1，p2，p3，p4 の 4 箇所で周波数 50[Hz]で取得した．今回は，p1 で取得したデータについてのみ扱う．実験は，体格の異なる 8 人の被験者（身長：165～180[cm]，体重：50～80[kg]）に協力してもらい，4 つの段差毎に 1 人の被験者が 20 回ずつ通過したため，データとしては 640 データ取得した．

RMW を用いた分類方法としては，one vs one 方式，one vs all 方式，multi vs all 方式の 3 種類の方式がある．one vs one 方式では，各運転者に対して RMW を作成し，被検証

図 6. 人工環境における実験で通過した段差

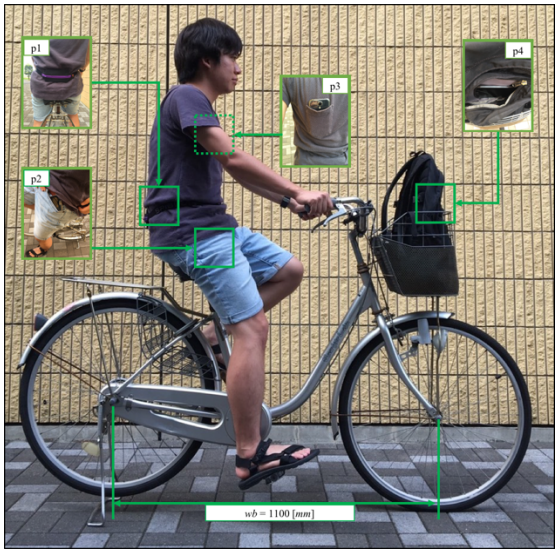

図 7. 実験で使用した自転車と端末の位置

ⓒ 2017 Information Processing Society of Japan

信号との評価をする． one vs all 方式では，1 人の運転者の RMW で全員の被検証信号を評価する. one vs one 方式では，精度が 0.83 と高く，one vs all 方式においても 0.73 と提案した分類手法は効果的であると考えられる．

しかし，one vs all 方式では one vs one 方式に比べて精度が少し下がっていて，これは速度などの個人差によって生まれた信号間の相違によって発生するものであると考えられる．そのため，multi vs all 方式では，速度差を考慮して新たに RMW を作成することを提案した[2]．作成方法としては，適当に選択した運転者の RMW の速度差を考慮して信号幅が統一されるように時間軸方法に調整した後に，平均値を取り新たな RMW とする．作成した RMW を元に全員の被検証信号を評価する．被験者 10 人からランダムで選択した被験者 3 人の信号から multi vs one 方式作成した RMW での正解率は 0.71 となった．この結果は表 3 の場合よりも低い結果となったが，選択した 3 人の被験者の信号で作成した RMW で one vs all 方式で分類を行なった正解率が 0.73，0.63，0.58 であり，平均値である 0.65 よりも高い値となり, one vs all 方式の平均値を上回る結果となった．

6. 実環境における実験

提案した RMW による段差分類方法が実環境でも適用できるかを確認するために，実際の道路でデータの取得を行なった．図 8 の赤線で実際の走行ルートを示す．走行ルートは，片道走行距離は約 7km，片道走行時間は約 25 分である．被験者は一人で，スマートフォンの携帯位置は，ズボンの前ポケットのみとした．この走行ルートにおいて，サンプリング周波数 50Hz で計測した加速度信号に対して，RMW による分類手法を用いて路面異常の検出を実施する．事前に作成した RMW に対して，取得した信号の窓サイズを 128，シフトサイズを 64 として分割し，各 RMW との相関を取る．その際，最も高い相関値が閾値 0.5 を超えて

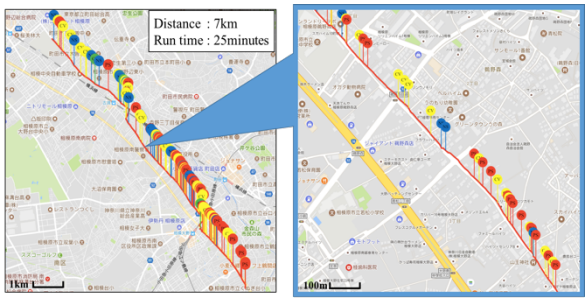

図 8. 走行ルートと実際に検出された路面異常箇所
（左図：全体図，右図：一部拡大）

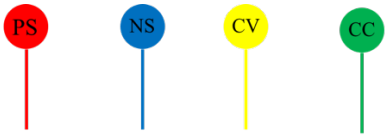

図 9. 使用したピンの種類と色

表 4. 往復路の段差計測回数の平均値（標準偏差）

経路	往路	復路
PS	51（7.23）	46（4.62）
NS	42（4.62）	35（4.04）
CV	60（9.64）	49（4.73）
CC	9（1.00）	6（3.06）
合計	162	136

いた場合に，その信号を路面異常とする．図 8 の左図は走行ルート全体に対して路面異常を検出した結果である．段差 PS，NS，CV，CC はそれぞれ赤，青，黄，緑色のピンで表される（図 9）．図 8 の右図は左図の一部を拡大した場合である．表 4 に観測された往路と復路における段差計測回数の平均値と標準偏差を示す．往路と復路では 5 回ずつデータを取得しているが，合計回数の平均値と各段差の検出回数の標準偏差に違いが発生しているのが読み取れる．これは走行している時間帯によって，走行している自動車や自転車などの走行物など環境が異なることによる影響かと考えられる．往路に関しては，交通量が多い朝の時間帯を走行していて，走行物を避けるために走行中に凸凹などの路面の異常が多い箇所も必然的に走行する必要性があることが影響し，結果となり現れている．

走行ルートを全体ではなく部分的に見ていき，路面状態を確認する．図 10 と図 11 に往路・復路間の一部で検出された路面異常の位置と種類，図 12 に実際の走行経路の路面を示す. 往路に関しては黄色と紫色で囲まれた Area-1 と Area-2 について，復路に関しては青色と緑色で囲まれた Area-3 と Area-4 について注目していく．Area-1 では，5 回の走行の内 1 回だけの走行で多くの段差が検出された．実際の経路を確認すると，Surface-1 のように砂利道であった．これは，1 回の走行において砂利道を通り，他の走行では違う箇所を走行したことが伺える. Area-2 においては, PS と CV が検出されているが, 実際の路面は Surface-2 であり，正しく検出されたことが確認できた．Area-3 では，NS と複数の CV が検出された．NS に関しては，5 走行中 4 走行で確認され，確認すると Surface-3 となり，正しく検出されているのが分かる．Area-4 に関しては，不規則に複数の異常が検出されている．路面は Surface-4 のようにアスファルトの凸凹となっていて，早い速度で走行していた際に，路面異常と誤検出されたと考えられる．

ここで問題となってくるのは，検出した路面異常が正しく検出されているかということである．現状では，2 つの方法が考えられる．1 つ目は自転車走行中の路面状態を撮影し, 路面異常検出箇所と照らし合わせる方法である. 2 つ目は，自転車の走行ルートというのは，同じ道を走行していても違う日に走行した時と違う箇所を通過する場合が発生すると考えられることから，再現率を考慮する方法である．走行回数を重ねことで，ある程度の基準となる検出回数を超えたものを路面異常と見なし，実際の路面と照合するということを考える．

ⓒ 2017 Information Processing Society of Japan

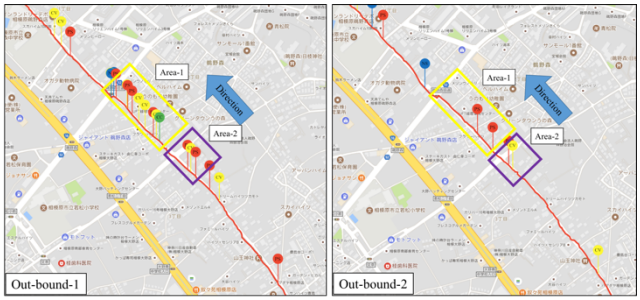

図 10. 路面異常の位置と種類（往路）

図 11. 路面異常の位置と種類（復路）

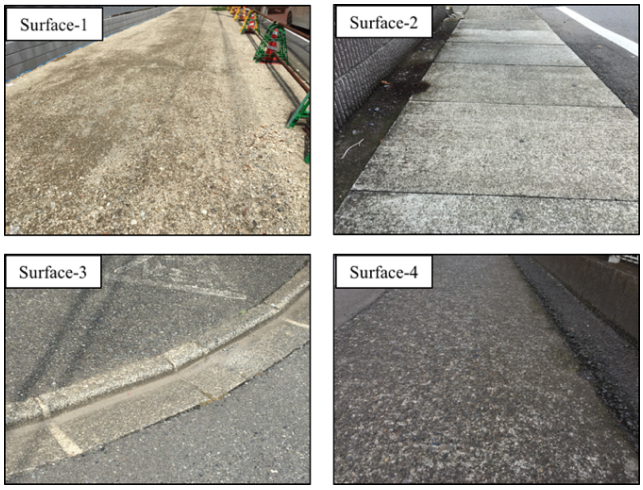

図 12. Area-1 から Area-4 までの路面
（上：Area-1 と Area-2，下：Area-3 と Area-4）

7. まとめ

本研究では，スマートフォンと自転車を用いた路面状態の検出を実施するために，実環境で 175km のデータを取得した．取得したデータについて，RMW による分類手法で実施した結果，ある程度の検出が行えていると考えられる結果となった．しかし，RMW による手法では人為的に最適な信号を選択しているのが現状である．そのため，今後は DNN による学習を行い，新たな分類手法を提案する．そこで，DNN の構造決定やどのような形の学習データが本研究に適しているかなどの設計について考案する．また，学習の行うためには，多くの学習データが必要となると考えられるため，継続してデータの収集を行なっていく．最終的には，実環境における高精度な路面状態の検出を実現する．

参考文献

[1] 高橋淳二，小花祐輔，磯山直也，戸辺義人，ロペズギョーム，“YKOB: 参加型センシング志向の自転車とスマートフォン端末を用いた道路路面状 態の調査”，電気学会論文誌 C, Vol.136, No.1 pp.1–9, 2016.

[2] 鈴木隆二，高橋淳二，戸辺義人，“速度差を考慮した自転車とスマートフォン端末を用いた路面異常検出”，第 79 回情報処理学会全国大会, 2017.

[3] J. Goldman, K. Shilton, J. Burke, J. Estrin, M. Hansen, N. Ramanathan,S. Reddy, V. Samanta, M. Srivastava, and R. West, “ Participatory Sensing: A citizen-powered approach to illuminating the patterns that shape our world, ” Washinton, DC:Woodrow Wilson International Center for Scholars, 2009.

[4] Christin, D., Reinhardt, A., Kanhere, S., and Hollick, M.,“ A survey on privacy in mobile participatory sensing applications ”, Journal of systems and software, 2011.

[5] Hasenfratz,D.,Sturzenegger,S.,Saukh,O.,andThiele,L. ,“Spatially resolved monitoring of radio-frequency electromagnetic fields ”, Proc. of ACM SenseMine, 2013.

[6] Stevens, M., D ’Hondt, E.,“ Crowdsourcing of Pollution Data using Smartphones, “ Proc. of UbiComp ”, 2010.

[7] Eriksson,J.,Girod,L.,HullB.,Newton,R.,MaddenS.,Balakrishnan, H., “ The Pothole Patrol: Using a Mobile Sensor Network for Road Surface Monitoring ”, Proc. of The Int. Conf. on Mobile Systems, Applications, and Services, 2008.

[8] Hasenfratz,D.,Sturzenegger,S.,Saukh,O.,andThiele,L.,“Spatially resolved monitoring of radio-frequency electromagnetic fields ”, Proc. of ACM SenseMine, 2013.

[9] Fatjon Seraj, Nirvana Meratnia and Paul J.M. Havinga, ” RoVi: Con- tinuous Transport Infrastructure Monitoring Framework For Preventive Maintenance ”, Pervasive Computing and Communications, 2017.

[10] Tomonori Nagayama, Akira Miyajimaa, Shunya Kimuraa, Yuuki Shimadaa, Yozo Fujino, "Road condition evaluation using the vibration response of ordinary vehicles and synchronously recorded movies," SPIE Smart Structures and Materials + Nondestructive Evaluation and Health Monitoring, April, 2013.

[11] Frank Westerhuis, Dick de Waard, “Using Commercial GPS Action Gameras for Gathering Naturalistic Cycling Data”，計測自動制御, Vol.55, No.5, pp 422-430, 2016.

[12] 山中英生，滑川達，中嶋康博，牧村和彦:プローブバイシクルの開発と 自転車走行環境の評価，交通工学研究発表会論文集, Vol.23, No.1,pp 157–160, 2003.

ⓒ 2017 Information Processing Society of Japan