加速度センサを用いた路面段差検出手法の改善と 東北地方太平洋沖地震後の観測データへの適用

八木浩一*1 災害時交通流監視システム研究会*1

地震などの広域災害時に道路状況を即座に把握、共有することは迅速な復旧復興活動にとって重要である。 路面段差はそのひとつに挙げられる。しかしこれまでその検出には、人手と手間のかかる目視による確認、 または特別な機器を使用し行われてきた。筆者らはこれまで GPS と加速度センサが搭載されたスマートフォ ンを自動車のダッシュボード上に置き、通常通り走行するだけで路面段差が観測できる手法を提案してきた。 本稿ではその観測精度を向上させるための前処理手法を提案するとともに、その手法を 2011/3/11 に発生した 東北地方太平洋沖地震後の現地調査で得たデータに適用し、地震後の路面段差の分布図を作成したので報告 する。

Improvement of the Road Bump detection method by using smartphone and an application result of TOHOKU earthquake

YAGI, koichi*1
Traffic Hazard Technology*1

When a wide area disaster like an earthquake is occurred, immediate monitoring of road condition is important for immediate rescue operation. A road bump is one kind of information. Currently, road bump detection is done by human visual confirmation and using special equipment. The author proposed easier method that is only use smartphone. In this paper, an improvement method is proposed. And using this method, a road bump distribution map is drawn of the 2011 off the pacific coast of TOHOKU earthquake. This result is also reported.

Keyword: Road Bump, monitoring, accelerometer, earthquake, smartphone

1. はじめに

これまで路面段差の観測はプロファイルメータなどの特殊な機器を用いたり、あるいは工数を要する目視確認により行われてきた。より簡便な方法として、加速度センサを自動車のショックアブソーバの

上下に設置する方法 ^{1) 2) 3)}などが提案されているが、その設置には専門の知識と技能が必要である。災害時の被災状況確認のため、発災後速やかに被災地全域を調査することは容易ではない。筆者らは ITS シンポジウム 2010 ならびに Asia-Pacific ITS Forum

2011 において、スマートフォンを自動車のダッシュボードに置いて通常通りに走行するだけで路面段差を検出する手法を提案した⁴⁾⁵⁾。

2. 段差位置検出手法

従来の GPS と加速度センサのみを用いた手法 ^{2) 3)} では最大加速度から段差量を推定するもので耐ノイズ性に課題があった。その他の手法では光学センサやジャイロセンサを併用している。これに対し ITS シンポジウム 2010 で提案した手法 ⁴⁾では以下に示す 2 つの判別条件により加速度センサのみを用いて耐ノイズ性の高い段差判定を実現した。

判定条件1:9イヤが段差を乗り越える際、上下方向だけでなく、前後方向にも動加速度が観測される。観測順序をi、前後方向、上下方向の加速度データをy(i)、z(i)、50[ms]ごとの標準偏差 SDy(i)、SDz(i) とし、前後方向、上下方向の動加速度が同時に発生していることを示す値として、同時性指標 SDyz(i)を式1で定義する。

判定条件2:段差通過時には前輪と後輪に相当する動加速度のピークが2回観測される。前輪から後輪までの時間差、つまりホイールベースの距離に相当する観測周期数をNwとし、段差を示す値として、段差指標Byz(i)を式2で定義する。また、Nw は車速V[m/s]、ホイールベースをLw[m]、観測周期をH[Hz]としたとき式3で与えられる。

$$Byz(i) = SDyz(i) \times SDyz(i + Nw)$$
 ... $(\vec{\mathbb{Z}} 2)$

$$N_W = \frac{L_W}{V} \times H \qquad \cdots \quad (\not \equiv 3)$$

1周 620[m]の長方形の周回コースに直径 24[mm] の丸棒を置き、段差の模擬実験を行った。

図1にこのコースを右回りに5周走らせたときの結果を示す。左は50[ms]間の上下方向加速度の標準偏差、右は段差指標の大きさをそれぞれ円の直径で示している。丸棒は両図右下の赤の矢印部分に設置している。段差指標により段差以外の加速度変化を除去し段差を抽出できた。丸棒設置場所以外の2箇所でも検出しているが、実験後に路面を確認したところ、アスファルトの継ぎ目に割れが発見された。この結果からもこの提案手法により段差検出が可能なことが確認された。

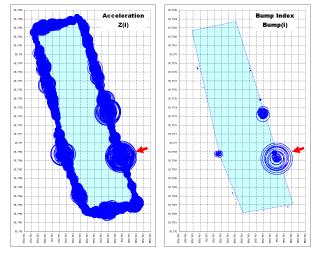


図1 上下方向加速度の 50[ms]標準偏差と段差指標

3. 被災地の観測で見つかった問題

2011 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地 震の被害の全体像を調査するため、地震発生の 3 週 間後から同手法を用いた現地調査を開始した。しか し調査開始まもなく以下の 2 つの問題が見つかった。

問題1:路面に割れが生じ、そこが段差となるような小さな階段状の形状を想定してロジックを設計していた。このような段差は検出できたが、それらは速やかに補修が行われ車両への衝撃が小さくなるようにスロープ状の路面形状になっていた。これにより特に前後方向の加速度の変化が小さくなることで段差指標の値が小さくなり、体感で大きな段差と感じた場合でも検出できないケースが散見された。

問題2:段差指標が段差形状の何を示しているかが不明であった。段差指標の計算には上下方向と前後方向の加速度を用いているが、段差形状が異なりこれらの加速度の比が変わっても、段差指標が同じ値となることがある。また同じ段差形状でも車速の違いにより加速度の大きさが変わり、段差指標が違う値になることがある。このため段差の存在とその位置は確認できても、地震被害の調査に有益な段差の大きさや形状についての情報が得られなかった。

4. 段差高と段差長の測定手法

Asia-Pacific ITS Forum 2011 で提案した手法⁵⁾では、スロープ状に変化する段差も検出しつつ、段差の特徴を示すため、段差の高さと段差の長さを推定するロジックに改良した。基本的な原理は次の通りである。車両の上下方向変位量を上下方向加速度の二重積分により推定し、隣接する極大点と極小点の変位量の差を段差高として定義し推定する。さらにその

間の進行方向の移動距離を段差長として定義し、これを GPS の測位データから推定する。

加速度を二重積分すると距離になるのは理屈の上では正しいが、重力や登坂時の車両の傾きなどに起因する静加速度の存在や、センサのヒステリシス特性、計算上の丸め誤差などにより、累積誤差が大きくそのままでは二重積分して求めた上下変位量が発散し実用に耐えない。そこでそれぞれの積分の前に補正をかける。

まず加速度→速度の積分時の補正について述べる。上下方向加速度 $Z(i)[\text{m/s}^2]$ から静加速度成分を除去する。Z(i)には重力加速度などの静加速度成分が含まれているが、これは上下変位量に影響しない。そこで直前 1 秒間の上下方向加速度の平均を静加速度成分とみなして減じ、動的加速度成分 $dZ(i)[\text{m/s}^2]$ を式 4で求める。ここで H は観測周期 [Hz]である。そしてdZ(i) を式 5 で和分することで上下方向速度Vz(i)[m/s]を求める。

$$dZ(i) = Z(i) - \frac{\sum_{j=i-H+1}^{i} Z(j)}{H} \qquad \cdots \quad (\text{± 1})$$

$$Vz(i) = Vz(i-1) + \frac{dZ(i)}{H}$$
 \cdots $($ \sharp 5 $)$

次に速度→変位量の積分時の補正について述べる。Vz(i)から登坂時の上昇速度のような段差に起因しない速度成分を除去する。直前直後の1 秒ずつ(計2 秒間)の上下方向速度の平均を静的な速度成分とみなし、段差に起因する動的な上下方向速度 dVz(i)を式6 で求める。そして dVz(i)を式7 で和分することで、上下変位量 Lz(i)[m]を求める。

$$dVz(i) = Vz(i) - \frac{\sum_{j=i-H+1}^{i+H} Vz(j)}{2H} \qquad \cdots \quad (\text{$\not{\vec{\Lambda}}$ } 6)$$

$$Lz(i) = Lz(i-1) + \frac{dVz(i)}{H} \qquad \cdots \quad (\vec{x}, 7)$$

加速度の補正には直前1秒間、速度の補正には直前直後の1秒間(計2秒間)の平均を用いたが、加速度にも前後2秒の平均を用いる方法が考えられる。しかし、後ろ側1秒分を含めるためには判定を1秒待つ必要があり計算のリアルタイム性が損なわれる。また速度を前後2秒の平均で補正すれば誤差の累積が抑制できることが基礎実験より確認された。この手法による観測結果と体感が一致するかを確認ためには走行中のリアルタイム表示が必要と判断し、こ

のような組み合わせを採用した。

次に段差高 Hbump[m]と段差長 Lbump[m]を求める。 上下変位量 Lz(i)が $i=i_1$ で極値となり、その直後の $i=i_2$ で再び極値となったとき、段差高 $Hbump(i_2)$ を式8で 定義する。

$$Hbump(i_2) = Lz(i_2) - Lz(i_1)$$
 ... $(\vec{\Xi} 8)$

段差長 *Lbump*[m]は、極大と極小の間に移動した距離を GPS の測位データから求める。

5. スマートフォンの傾き補正手法

Asia-Pacific ITS Forum で提案した段差高・段差長 測定手法により路面段差の観測を行ったが、交差点 付近で体感よりも大きな段差が観測された。本稿で はこれを補正する前処理方法を提案する。

スマートフォンは道路と平行になるように設置されているが、若干の傾きを持つことがある。その結果、車両の加減速や右左折によって生じる前後方向(Y軸)、左右方向(X軸)の加速度が、Z軸上に見かけの上下方向加速度として現れる。二重積分を行う測定手法ではこの誤差が累積し結果に影響を与えたと考えられる。そこでこの傾きの補正を行うこととした。ちなみにこの傾きは通常小さく、見かけの加速度は小さいため、前後方向(Y軸)、上下方向(Z軸)の加速度の50[ms]標準偏差に同じ程度のピークが現れることを期待したITSシンポジウム2010での段差位置検出手法では問題とならない。

図 2 をもとに見かけ上の加速度を検討する。横軸は前後方向(Y軸)と左右方向(X軸)の加速度、縦軸は上下方向(Z軸)の加速度を示す。スマートフォンが道路と平行に設置されていれば、X軸、Y軸と Z軸の間に相関は見られないはずである。しかし若干の相関が見られ、スマートフォンが傾いていることがわかる。最小二乗法によりこの傾きを求め、これをもとに傾きがゼロとなるよう座標を回転させ加速度を補正する。ここで i 番目に観測された加速度を x(i)、y(i)、z(i)とする。x-z 平面に対して式 9、z

$$z = Ax \cdot x + Bx \qquad \cdots \quad (\vec{x} 9)$$

$$z = Ay \cdot y + By \qquad \cdots \quad (\vec{x} \ 10)$$

傾き Ax と Ay はスマートフォンの傾きの正接と見ることができる。そして Y-Z 平面に対して式 11 により正弦と余弦を求め、式 12 により傾きを補正する。

$$\left(\frac{\sin y}{\cos y}\right) = \frac{1}{\sqrt{Ay^2 + 1}} \left(\frac{Ay}{1}\right) \qquad \cdots \quad (\not \equiv 11)$$

$$\begin{pmatrix} Y(i) \\ Ztmp(i) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos y & \sin y \\ -\sin y & \cos y \end{pmatrix} \begin{pmatrix} y(i) \\ z(i) \end{pmatrix} \cdot \cdot (\vec{x} \cdot 12)$$

さらに X-Z 平面に対して式 13 により正弦と余弦 を求め、式 14 により傾きを補正する。

$$\left(\frac{\sin x}{\cos x}\right) = \frac{1}{\sqrt{Ax^2 + 1}} \left(\frac{Ax}{1}\right) \qquad \cdots \quad (\not \exists 13)$$

$$\begin{pmatrix} X(i) \\ Z(i) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos x & \sin x \\ -\sin x & \cos x \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x(i) \\ Ztmp(i) \end{pmatrix} \cdot \cdot (\not \exists 14)$$

このようにして求めた X(i)、Y(i)、Z(i)を傾き補正後の加速度とし、この値を段差高・段差長測定手法により二重積分し上下方向変位量を求める。

傾き補正のもととなる直線回帰時に停止時のデータを含めるとその時の値に回帰直線が誘導されすぎる。また、段差通過時のデータを含めると傾きを正しく判断できない。このため、上下方向(Z軸)加速度の 50[ms]標準偏差が 0.002~0.135[m/s2]のデータをもとに直線回帰を行った。下限値はゼロより大きくやや余裕を持たせた値として設定し、上限値は一般道を 10 分間走行した際に観測された標準偏差の 85%タイルの値を用いた。

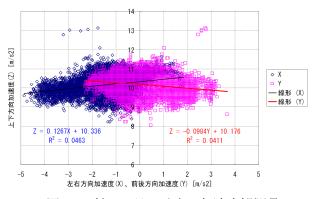


図2 Z軸への見かけ上の加速度観測量

実験により補正効果を確認した。図3に交差点での前後方向(Y軸)、左右方向(X軸)の加速度観測値を示す。このとき、停止線手前で減速停止し、続いて発進加速、右折、横断歩道前での停止、再発進加速を行っている。図4にこのときの傾き補正前のZ軸(上下方向)の加速度を、図5に傾き補正後の加速度を示す。図4、図5に示した赤線は直前1秒間の移動平均である。図4では移動平均が大きく変

化しているが、図5ではそれが抑制されている。

次に二重積分により上下変位量を求めた結果を図6に示す。傾き補正前では右折時と加減速時に±3 [cm]程度の変位量が見られるが、目視確認ではこの地点にそのような段差はなかった。これに対し、傾き補正後ではそれが±1[cm]程度に抑制され、傾き補正の効果が確認された。

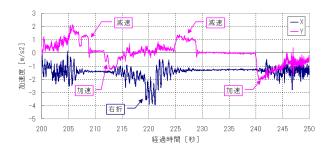


図3 補正前のZ軸加速度観測値

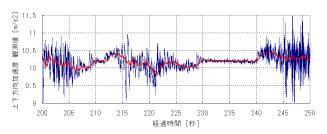


図4 傾き補正前の Z 軸加速度

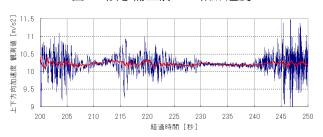


図5 傾き補正後の Z 軸加速度

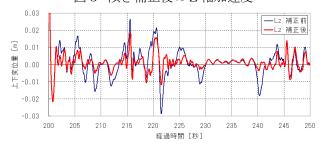


図6 補正前後の上下変位量

6. 実験結果

傾き補正を行ったうえで段差高・段差長測定手法を用い一般道での走行実験を行った。図7に加速度dZ(i)と、速度Vz(i)、上下変位量Lz(i)、段差高Hbump、段差長Lbumpの例を示す。

この道路はほぼ東西を向いていたため、横軸は経度とした。図8にこれと同じ場所を同じ方向に5回走行したときの結果を示す。これを見ると5回の走行において上下変位量Lz(i)が同様のプロファイルで得られており、段差高Hbump、段差長Lbumpに一定の信頼性があることが分かった。段差位置には±0.00003度(±3[m])程度のずれが見られるが、この要因としてはGPSの測定誤差などが考えられる。

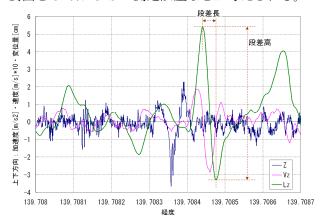


図7 上下方向加速度、速度、上下変位量

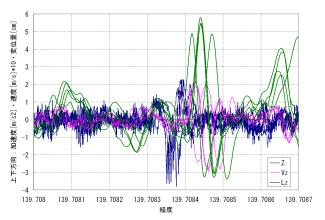


図8 5回走行時の測定結果

7. 東北地方太平洋沖地震後の観測データへの適用

東北地方太平洋沖地震による被害の全体像を把握するため、2011/4/2~4(岩手)、4/9~10(宮城、福島)、4/17(茨城)、5/6~8(山形、秋田)の4回に分け計9日間の現地調査を行った。調査地域は、北は青森県八戸市、南は茨城県水戸市、西は国道13号線、国道121号線の沿線、東は沿岸部までで、南北450km、

東西 120km にわたる範囲である。延べ走行距離は約 4600km である。

このときの観測データをもとに今回提案の手法を 用いて東北地方全体の段差高分布を作成した。その 結果を図9に示す。赤丸は2011/3/11の本震時の震央 を示し、青丸の直径で段差高を示している。内陸部 に比べ沿岸部に近い地域で、より大きな段差が観測 されているようだが、この図では周辺に大きな段差 が1つでもあれば大きな丸で表示されるため、あま り明確ではない。そこで走行1kmごとに2cm以上の 段差高の平方和を求め図10に示した。この図では周 辺に大きな段差が多く存在したときに大きな丸とな り、区間ごとの段差の大きさと頻度を示す図となる。 これを見るとよりはっきりした特長が現れており、 震央より南側に多くの段差が存在している。特にい わき市を中心に郡山、白河、水戸にかけて多くの段 差が発生していることが見て取れる。

8. おわりに

東北地方太平洋沖地震において、スマートフォンを用いた路面段差の調査を行った。これにより南北 450km、東西 120km の非常に広い範囲で延べ 4600km の距離を 9 日間と言う短い期間で観測することができた。このときの観測データをもとに、地震後の段差高の分布を示した。

今回、スマートフォンの傾き補正を行うことで段差高の測定精度を向上させたが、なお課題が残っている。頻度はそれほど多くないが、段差高が高く滑らかに変化するスロープ状の道路形状において、ほとんど体感しなかったのに検出される場合があった。また逆に、段差高が低い突起状の道路形状において、体感したのに検出されない場合があった。これらを改善するためには、加速度またはその変化量である躍度の大きさにより段差の存在を判断した上で、その大きさを判断するなどの改良を行う必要がある。

課題が残っているものの、地震による被害分布を 速やかに把握するのに有効な手段だと考えている。 このような手法が普及することで被災状況がより速 やかに把握され、復旧復興活動の更なる迅速化につ ながることを期待している。

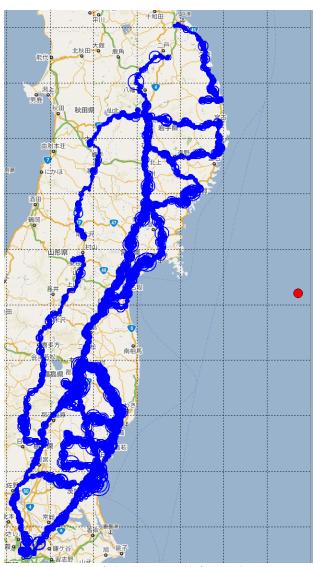


図9 観測された段差高の分布

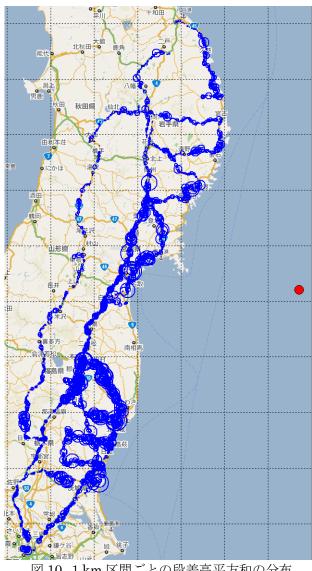


図 10 1 km 区間ごとの段差高平方和の分布

参考文献

- 1) 福原敏彦ほか: IRI を用いた廉価な道路維持管理 手法の為の測定器開発、第27回日本道路会議、 http://www.surftechno.jp/pdf/20068.pdf、2007
- 2) 藤野陽三: 巡回車による舗装・伸縮装置の高頻度 簡易診断に関する研究開発、建設技術研究開発平 成17年度成果発表会、
 - http://www.mlit.go.jp/chosahokoku/h18giken/seika/pr ogram/pdf/seika 1.pdf
- 3) 河野整ほか: 道路高速診察システム(VIMS)の実 用化に向けた研究, 土木学会第 58 回年次学術講 演会講演概要集, 2003.9.
 - http://library.jsce.or.jp/jsce/open/00035/2003/58-cs/58cs-0002.pdf

- 4) 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, CD-ROM
- 5) YAGI koichi, Road Bump Detection Method by Using Smartphone and Measurement Result on TOHOKU Earthquake, 11th Asia-Pacific ITS Forum 2011, CD-ROM