

平成 30 年 5 月 14 日現在

機関番号：12501

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H04023

研究課題名(和文)カープローブデータを活用した広域かつ経時的な道路路面診断手法の構築

研究課題名(英文)Evaluation of road surface irregularity using car probe data

研究代表者

丸山 喜久(Maruyama, Yoshihisa)

千葉大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号：70397024

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、カープローブデータの加速度を活用した道路路面の診断手法を構築することである。具体的には、カーナビゲーションシステムによって収集される走行・挙動履歴データのうち、車両横方向の加速度記録を用いて路面の平坦性が不良な区間を抽出する数理モデルを構築した。また、スマートフォン内蔵のMEMSセンサが取得する加速度を記録できるようなアプリを開発し、スマートフォンを用いた路面不良判定手法を提案した。研究成果の社会実装を目指し、福岡県直方市を対象として、日常業務中にスマートフォンで加速度を計測し路面不良区間を定期的に評価する取り組みに着手した。

研究成果の概要(英文)：This study aims to develop a numerical model to evaluate road surface irregularity using acceleration time histories recorded by car navigation systems and smartphones. The records of the transverse component of acceleration of the vehicle recorded by car navigation systems are employed to detect road sections with an international roughness index (IRI) of 12 mm/m or above. In addition, the records of the vertical accelerations recorded by smartphones are also considered to develop the numerical model to evaluate the road surface irregularity. Logistic regression analyses and support vector machine are employed to construct the numerical model. According to the evaluation of the accuracy, the result of the logistic regression analysis is suitable to detect the road sections with the IRI of 12 mm/m or above. Lastly, the numerical model is applied to a daily road patrol performed by road authority of local government.

研究分野：都市安全工学

キーワード：カープローブデータ スマートフォン 路面性状 国際ラフネス指数(IRI) ロジスティック回帰分析

1. 研究開始当初の背景

我が国の社会基盤施設は高度経済成長期に集中的に整備されたため、道路ストックの老朽化問題や崩落等の事故の可能性は以前から懸念されてきた。2012年12月に発生した笹子トンネル天井板落下事故を教訓として、戦略的な維持管理、更新の必要性が一層高まっている。これを受けて国土交通省は、橋梁、トンネル、舗装などの道路構成要素ごとに総点検実施要領(案)を2013年にとりまとめた¹⁾。さらに、2013年の道路法改正などを受けて、2014年6月には道路橋、トンネルなどの定期点検要領が示され、道路管理者は同年7月から全ての橋梁、トンネル等について5年に1度、近接目視で点検を行い、健全性を4段階で診断することとなった²⁾。

このような背景を受けて、2016年度までの道路の累積点検実施率は、橋梁54%、トンネル47%、歩道橋や標識などの道路付属物等57%となっており、5年間での全数点検を目指し、計画的に進められている³⁾。一方、舗装路面の点検は、橋梁等とは状況が異なり、とくに市町村の道路管理者では実施率が約2割にとどまっている⁴⁾。この原因には、舗装の維持管理修繕費が1990年前半をピークに約6割程度まで減少していることに加えて、小規模自治体では技術系職員の人材が不足し、目視点検すらままならず全てが外注となってしまうこと⁵⁾などが挙げられる。このため、安価で簡易に路面性状を評価する技術が求められている。

2. 研究の目的

本研究の目的は、カープローブデータを用いた路面性状評価手法を提案することである。具体的には、スマートフォンを車載し取得した車両の上下加速度を用いた路面性状評価手法をカーナビゲーションシステムが記録する車両の横方向加速度を用いた路面性状評価手法の2手法を検討した。さらに、本研究成果の社会実装を目指し、提案手法を自治体職員による道路パトロールに適用した。

3. 研究の方法

カープローブデータを用いた路面性状評価手法を構築するには、手法の精度を定量化する必要があり、それには詳細な路面性状データが必要となる。本研究では、2015年9月29日、10月9日にそれぞれ神奈川県横浜市と東京都調布市において実走調査を行った。鹿島道路(株)の多機能路面測定車⁶⁾によって、国際ラフネス指数(IRI)⁷⁾を10mおよび100m間隔でそれぞれ計測した。

また、鹿島道路(株)の路面性状測定車に、加速度の記録が可能なパイオニア(株)製のカーナビゲーションシステムを装着した。これによって、路面性状調査と同時に車両の加速度を取得した。さらに、路面性状測定車を別の自動車(マツダ・デミオ)で併走し、そ

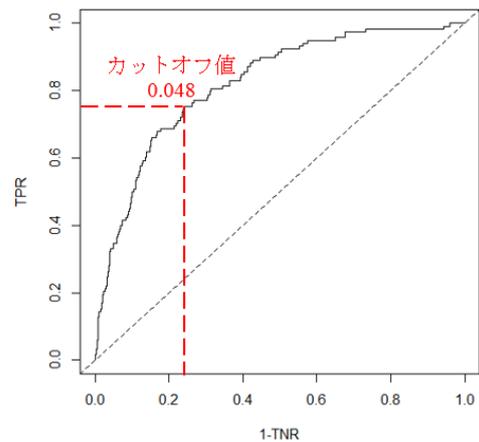


図1 学習データ80%で構築したロジットモデルのROC曲線

の車中でスマートフォン(アップル・iPhone 5)に内蔵されている加速度センサを用いて上下加速度を計測した。カーナビゲーションシステムの加速度のサンプリング周波数は5 Hz、スマートフォンの加速度のサンプリング周波数は100 Hzに設定した。

10mごとのIRIと加速度記録をカーナビゲーションシステムやスマートフォンで取得した位置情報で関連づけ、自動車の走行速度、IRI、加速度振幅の関係性を分析した。さらに、ロジスティック回帰分析によって、IRIが12 mm/m以上の路面不良区間を抽出する数理モデルを構築した。

4. 研究成果

(1) スマートフォンを用いた路面性状評価手法の構築

スマートフォンで計測した自動車のばね上加速度(上下成分)を用いて、路面不良区間を抽出する数理モデルを構築する。本研究では、式(1)を仮定したロジスティック回帰分析を行う。

$$p = 1/[1 + \exp\{-(b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3)\}] \quad (1)$$

ここで、 x_1 は10m区間の平均速度(m/s)、 x_2 は10m区間の平均加速度振幅(m/s²)、 x_3 は10m区間の最大加速度振幅(m/s²)を表す説明変数である。

式(1)の p はIRIが12 mm/m以上になる確率を表し、確率変数を Y (IRIが12 mm/m以上: 1, 12 mm/m未満: 0)とすると式(2)、(3)のようになる。

$$p = \Pr(Y = 1|x_1, x_2, x_3) \quad (2)$$

$$1 - p = \Pr(Y = 0|x_1, x_2, x_3) \quad (3)$$

ロジットモデルをROC曲線⁸⁾を用いて検証する。IRIが12 mm/m以上の区間を正しく判別する率を敏感度TPR(True positive rate)、IRIが12 mm/m未満の区間を正しく判別する率を特異度TNR(True negative rate)と定義する。式(1)の p の値を適宜変化させ、TPRおよびTNRをその都度算出する。そして、横軸を1-TNR、縦軸をTPRとして図化したもの

表 1 スマートフォンを用いた路面不良抽出モデルの回帰定数と判定精度

b_0	b_1	b_2	b_3
-2.043	-0.507	3.630	0.278
AUC	カット オフ値	TPR	TNR
0.82	0.045	0.76	0.76

が ROC 曲線である。一般にモデルが有効である場合、ROC 曲線は FPR と TPR との比が 1:1 である直線から左上に離れ、判別能力が高いほど、ROC 曲線はグラフの左上隅に近づく⁸⁾。ROC 曲線下の面積は AUC (Area under the curve) と呼ばれ、最大値は 1、ランダムな判別では 0.5 となり、ROC 曲線下の面積が大きいほどモデルの精度が良い (優: 0.9~1.0, 良: 0.8~0.9, 可: 0.7~0.8)⁹⁾。

図 1 に式(1)の ROC 曲線を示す。ここで、全データをモデル構築に使用するデータ (学習データ) と、モデルの精度検証のテストデータに予め分割している。図 1 は学習データの割合を全体の 80%としたときの結果である。AUC は 0.82 となり、モデルの判別能力は良好である。これを用いて、IRI が 12 mm/m 以上の路面不良区間を抽出するための最適なカットオフ値を定める。TPR と TNR がともに最大となるカットオフ値は、ROC 曲線のグラフの左上隅に最も近い点に対応する。図 1 の場合は、0.048 となる。

学習データの割合を 20~80%に変化させながら、ロジスティック回帰分析を行った。テストデータを用いてモデルの精度を評価したところ、学習データの割合を 40%以上とすれば、TPR と TNR は共に 75%程度以上の値を示す。このように、式(1)のロジットモデルは、未知のデータに対しても概ね学習データと同程度の判定精度を示すため、全てのデータを用いて構築した (学習データの割合: 100%) ロジットモデルを路面不良判定モデルとして提案する (表 1)。

(2) カーナビゲーションシステムを用いた路面性状評価手法の構築

パイオニア (株) では、2006 年に発売されたモデルからプローブデータを蓄積しており¹⁰⁾、2013 年 8 月末時点で走行履歴 (走行速度、経路、時刻など) が 35 億 km 分に相当する。また、パイオニア (株) では、一般車両の加速度を 2012 年以降に発売されたカーナビゲーションシステムから収集しており、2 年間で 3.5 億 km 分蓄積された。現在のカーナビゲーションシステムの加速度のサンプリング周波数は 5 Hz であり、車両の進行方向と横方向の加速度が記録されている。これらは 3 秒毎に記録される走行履歴 (走行速度、経路、時刻など) と紐付けられており、車両ごとに時空間的な分析が可能である。

表 2 カーナビゲーションシステムを用いた路面不良抽出モデルの回帰定数と判定精度

b_0	b_1	b_2	b_3
-1.274	-0.104	—	0.305
AUC	カット オフ値	TPR	TNR
0.77	0.040	0.71	0.72

路面凹凸と相関が最も高いのは上下方向の加速度であると想像されるが、カーナビゲーションシステムでは水平 2 成分の加速度だけが記録できる。車両進行方向の加速度は路面凹凸よりも加減速の影響を強く受けるものと考えられるため、本研究では横方向の加速度記録に着目し分析を行うこととした。スマートフォンの加速度を用いた場合と同様に、式(1)~(3)を仮定したロジスティック回帰分析を行うこととした。

本モデルは、パイオニア (株) が蓄積しているカープローブデータへの適用することを目指し、構築を図る。カープローブデータは、複数の車種のデータが混在しているため、車種の違いが路面凹凸に対する横方向応答加速度に与える影響について配慮する必要がある。そこで、本研究では以下のように横方向加速度 acy を平均値 μ 、標準偏差 σ で標準化した加速度 acy_s を用いて、ロジスティック回帰分析を行った。

$$acy_s = (acy - \mu) / \sigma \quad (4)$$

赤池情報量規準 (AIC) の値に基づき式(2)の変数選択¹¹⁾を行ったところ、 x_2 に該当する 10 m 区間内の平均加速度は不要と判断された。本研究で得られたロジットモデルの回帰定数と判定精度を表 2 に示す。カーナビゲーションシステムの加速度に関するロジットモデルは、上下方向の加速度が記録されていないため、車両横方向の加速度を用いている。したがって、バネ上加速度のモデルよりも精度が低くなることが予想されたが、AUC は 0.77 となり、ほぼ同程度の値を示した。TPR および TNR に関しても、カーナビゲーションシステムの加速度を用いたモデルは、バネ上加速度を用いたモデルと比べてわずかに小さいだけで大きな差は見られない。

本モデルを 2015 年 3 月の 1 ヶ月間にパイオニア (株) が蓄積したカープローブデータに適用した。対象は、東京都調布市とした。パイオニア (株) のカープローブデータでは、自動車の個別 ID が 1 日ごとに更新される。本研究では、横方向加速度を個別 ID ごとの時系列データとして整理し、路面性状判定モデルを適用する。2015 年 3 月の調布市での加速度データは、便宜的に個別 ID 数を車両台数とみなすと、延べ 1,429 台分のデータから構成されている。路面不良と抽出された回数



図 2 カープローブデータに適用した路面性状判定結果（東京都調布市，2015 年 3 月）

表 3 福岡県直方市に適用した路面不良抽出モデルの回帰定数と判定精度

b_0	b_1	b_2	b_3
-0.275	-0.594	2.746	—
AUC	カット オフ値	TPR	TNR
0.87	0.119	0.76	0.82

を車両通過台数で除したものを不良率と定義し、図 2 にその分布を示す。本研究で計測した 10 m ごとの IRI と不良率を比較すると、IRI が 12 mm/m 以上のとき不良率が 0.6 以上を示すことが多かった。今後は、カープローブデータによる抽出結果を自治体の調査結果などと比較し、精度の定量化および手法の高精度化に関する検討を行う必要がある。

(3)道路パトロールへの適用

本研究で構築したスマートフォンを用いた路面不良抽出モデルを自治体職員による道路パトロールに適用した。具体的には、福岡県直方市産業建設部土木課が保有する道路パトロール車両にスマートフォンを設置し、日常の道路パトロール業務中の走行履歴データを取得した。この記録を携帯電話通信網を通じて著者らのサーバーに転送し、路面の平坦性の不良が疑われる区間を定期的に抽出する取り組みを開始した。

まず、2017 年 2 月 28 日から 3 月 1 日に、福岡県直方市内で鹿島道路（株）の多機能路面測定車⁶⁾を用いて IRI を計測した。IRI の取得間隔は 10 m とし、10.28 km 分のデータを取得した。スマートフォンを車載した別の自動車（日産・セレナ）で多機能路面測定車と並走し、IRI の計測と同時にスマートフォンで加速度と位置情報を取得した。なお、スマートフォンは、直方市職員が使用するスマートフォンと同一の機種である AQUOS PAD SH-05G を用いた。著者らが開発した Android アプリをスマートフォンにインストールし、後部座席の床上に固定した。アプリを用いて、

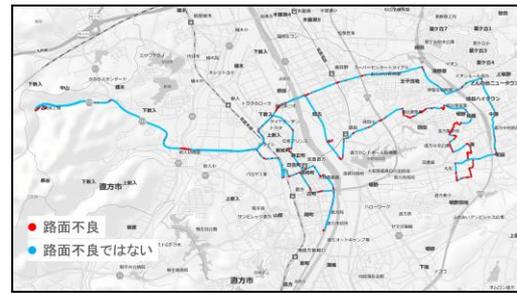


図 3 2017 年 8 月 25 日の記録結果に基づく舗装路面の平坦性評価結果

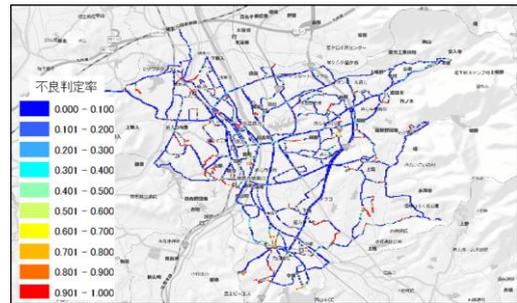


図 4 2017 年 8 月の不良判定率

走行中の時刻、加速度（水平 2 成分，上下 1 成分），端末の角度，位置情報を記録した。加速度および角度のサンプリング周波数は 100 Hz とし、位置情報は 1 秒ごとに取得した。自動車の走行速度は、位置情報からヒュベニの公式¹²⁾を用いて走行距離を算出し、所要時間で除すことによって推定した。

式(4)と同様に上下加速度を標準化し、これを用いて式(1)～(3)のロジスティック回帰分析を行った。表 3 にロジットモデルの回帰定数と判定精度を示す。横浜市や調布市を対象とした場合のモデルと同程度の判別性能、精度を示した。

福岡県直方市産業建設部土木課が保有する道路パトロール車両にスマートフォンを設置した。車載するスマートフォンに著者らが開発した Android アプリをインストールし、前章と同条件で道路パトロール中の加速度と位置情報を記録する。記録結果は、CSV 形式のテキストファイルとしてスマートフォン端末内に保存される。さらに、Android アプリにデータ転送機能を搭載し、テキストファイルを著者らのサーバーにアップロードできるようにした。

2017 年 8 月 15 日に最初の記録結果を受信し、その後、2018 年 2 月末までに 76 個の記録ファイルを受信した。10 m ごとに IRI が 12 mm/m 以上の路面不良と評価される区間を抽出した。一例として、図 3 に 2017 年 8 月 25 日の記録結果に基づく舗装路面の平坦性の評価結果を示す。

本研究の表 3 の路面不良抽出モデルの精度は、TPR が 0.76，TNR が 0.82 である。そのため、一日単位の走行記録だけで路面性状を

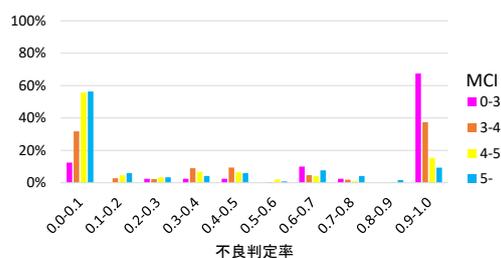


図5 MCIに基づく路面性状評価結果ごとの不良判定率の割合 (2017年8月)

評価するよりも、複数データを集計して利用の方が望ましいと考えられる。そこで、図3のような1日ごとの評価結果を一ヵ月単位で集計することとした。図4に2017年8月の不良判定率を示す。ここで、不良判定率とは表3の路面不良抽出モデルによって路面不良と判定された回数を、1ヵ月間の通過回数で除したものである。

福岡県直方市の一部の幹線道路では、舗装の維持管理指数 (MCI)¹³⁾を100m間隔で計測し、補修計画の立案に役立っている。MCIは1981年に建設省土木研究所によって提案されたもので、ひび割れ率、わだち掘れ量、平坦性の3要素の統合指標である。MCIは10を満点とし、舗装の劣化に伴い低下する。福岡県直方市では、 $MCI \leq 3$ のとき早急に修繕が必要、 $3 < MCI \leq 4$ のとき修繕が必要、 $4 < MCI \leq 5$ のとき修繕を行うことが望ましい、 $5 < MCI$ のとき望ましい管理水準と評価している。

本研究で算出した1ヵ月ごとの不良率とMCIに基づく路面性状の評価結果を比較する。MCIに基づく路面性状の評価結果ごとに不良判定率を0.1刻みで集計し、その割合を算出した (図5)。2017年8月の結果の場合、 $MCI \leq 3$ である早急に修繕が必要な区間の約7割で、不良判定率が0.9-1.0と高い値を示す。また、 $MCI > 5$ である望ましい管理水準と判定される区間に関しては、約6割が不良判定率0.0-0.1と低く、不良判定率0.0-0.5の範囲で全体の約75%を占める。このことから、本研究の平坦性評価モデルは、概ね良好な精度で路面が不良な区間を抽出できていることが分かる。一方、早急に修繕が必要な区間 ($MCI \leq 3$)の約1割で、不良判定率が0.0-0.1と低い値が見られた。同様に、望ましい管理水準と判定される区間 ($MCI > 5$)の約1割で、不良判定率が0.9-1.0と高い値となった。本研究の平坦性評価モデルは、TPRとTNRが共に1に近くなるようなカットオフ値を設定しているため、路面性状が不良な区間の見逃しが1割程度起こり得ることが分かった。一般に、TPRを高めればTNRは低下するため、今後は現場の運用性を考慮し、カットオフ値を再設定する必要があるものと考えられる。

<参考文献>

- 1) 国土交通省：道路ストックの総点検，<http://www.mlit.go.jp/road/sisaku/yobohozen/stock.html>
- 2) 国土交通省：「定期点検要領」の策定について，http://www.mlit.go.jp/report/press/road01_hh_000429.html

- 3) 国土交通省道路局：道路メンテナンス年報，2017.
- 4) 国土交通省：これからの舗装マネジメント (第6回道路技術小委員会配付資料)，<http://www.mlit.go.jp/common/001145725.pdf>
- 5) 日本道路協会：道路ストックの総点検・老朽化対策，<https://www.road.or.jp/conference/data/30kaigi/douro.pdf>
- 6) 鹿島道路 (株)：多機能路面測定車，<http://www.kajimaroad.co.jp/technology/detail.php?pcat=1&cat=17&seq=91>
- 7) 池田拓哉，東嶋奈緒子：国際ラフネス指数の計測方法に関する研究，土木学会舗装工学論文集，Vol. 3，pp. 9-14，1998.
- 8) Hanley, J.A. and McNeil, B.C.: The meaning and use of the area under a receiver operating characteristic (ROC) curve, *Radiology*, Vol. 143, No. 1, pp. 29-36, 1982.
- 9) ハスパートル，丸山清輝，野呂智之，中村明：ロジスティック回帰分析を用いた既存地すべり地形の地震時の危険度評価，日本地すべり学会誌，Vol.49, No.1, pp.12-21, 2012.
- 10) パイオニア (株)：プローブ情報システム，<http://pioneer.jp/carrozzeria/carnavi/smartloop/system/01.php>
- 11) 青木繁信：Rによる統計解析，オーム社，2009.
- 12) Sugimoto, T.: カシミール 3D Ver9.3，http://www.kashmir3d.com/kash/manual/std_siki.htm
- 13) 藤井治嘉：道路舗装の維持管理，土木学会論文集，Vol. 366, pp. 13-26, 1986.

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 3 件)

1. Maruyama, Y., Itagaki, O.: Development of tsunami fragility function for ground-level roads, *Journal of Disaster Research*, Vol. 12, No. 1, pp. 131-136, 2017.
2. 丸山喜久，永田茂：カーナビゲーションシステムが記録した加速度による路面性状のモニタリングに向けた基礎的検討，電気学会論文誌 C (電子・情報・システム部門誌)，Vol. 137, No. 7, pp. 877-883, 2017.
3. 河井大地，丸山喜久，永田茂：スマートフォンで計測した自動車の上下加速度を用いた舗装路面凹凸の評価，土木学会論文集 E1 (舗装工学)，Vol. 71, No. 3, pp. I_79-I_87, 2017.

[学会発表] (計 6 件)

1. 市川恭平，丸山喜久：バネ下加速度を用いた IRI 推定のための基礎的検討，第8回インフラ・ライフライン減災対策シンポジウム，2018年1月19日，新潟大学 (新潟県新潟市)
2. Y. Maruyama, S. Nagata: Evaluation of road

- surface irregularity using accelerations recorded by car navigation systems, 12th International Conference on Structural Safety and Reliability, 2017年8月6日～10日, ウィーン工科大学 (オーストリア)
3. Y. Maruyama: Damage to road network during recent earthquakes in Japan, 18th ASEP International Convention, 2017年5月25日～27日, NOVOTEL Araneta Center, Cubao, Q.C (フィリピン)
 4. 瀬崎陸, 丸山喜久: 車載カメラ画像を用いた道路の地震被害抽出に向けた基礎検討, 第7回インフラ・ライフライン減災対策シンポジウム, 2016年12月5日, 熊本大学 (熊本県熊本市)
 5. 河井大地, 丸山喜久, 永田茂: 自動車のばね上加速度を活用した道路路面診断に向けた基礎検討, 土木学会第71回年次学術講演会, 2016年9月7日～9月9日, 東北大学 (宮城県仙台市)
 6. 丸山喜久, 永田茂: カーナビゲーションシステムが記録した加速度を用いた路面不良区間の抽出に向けた試み, 平成28年度電気学会 電子・情報・システム部門大会, 2016年8月31日～9月2日, 神戸大学 (兵庫県神戸市)

[図書] (計0件)

[産業財産権]

- 出願状況 (計0件)
- 取得状況 (計0件)

[その他]

ホームページ等

<http://ares.tu.chiba-u.jp/marulab/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

丸山 喜久 (MARUYAMA, Yoshihisa)
千葉大学・大学院工学研究院・准教授
研究者番号: 70397024

(2) 研究分担者

永田 茂 (NAGATA, Shigeru)
鹿島建設株式会社・技術研究所・上席研究員
研究者番号: 50217999