

自動車のばね上加速度に基づく舗装路面の平坦性の評価手法の構築と自治体への適用

Evaluation method of road surface irregularity based on vertical accelerations of an automobile and its application

16TM0322 河井 大地
Daichi Kawai

指導教員 丸山 喜久

SYNOPSIS

This study aims to develop a numerical model to evaluate road surface irregularity using acceleration time histories recorded by smartphones. The records of the vertical component of acceleration of the automobile are employed to detect road sections with an international roughness index (IRI) of 12 mm/m or above. To achieve this objective, the IRI was measured with an interval of 10 m in the cities of Yokohama and Chofu. The authors employ logistic regression analysis and support vector machine to detect the road sections with an IRI of 12 mm/m or above. The numerical model is applied to the inspection by the road administrator in Nogata City, Fukuoka Prefecture.

1. はじめに

我が国では社会基盤施設が高度経済成長期に主に整備された。このため、近年道路ストックの老朽化が懸念されており、集中的な修繕が今後必要になると言われている。このような背景から、2013年に国土交通省は総点検実施要領(案)¹⁾をとりまとめ、橋梁やトンネル、舗装等の道路ストックごとに、安全で円滑な交通の確保のための維持管理の効率化を目指した点検要領を示している。

舗装路面の点検は、道路管理者の予算制約や技術者不足が原因となって、思うように進まないこともある²⁾。幹線道路では、路面性状測定車^{3), 4)}による高精度な点検が行われ、合理的な維持管理が図られている⁵⁾。しかし、路面性状測定車は、初期費用や運用費が高額であるため、簡易な路面のモニタリングシステムの検討も行われている⁶⁾⁻⁹⁾。

そこで本研究では、生活道路でも客観的データに基づく路面性状評価が行えるようになることを目指し、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の平坦性の評価に関する検討を行う。鹿島道路(株)の多機能路面測定車¹⁰⁾とスマートフォンを車載した自動車を併走させ、高精度な路面性状データと自動車の上下加速度を同時に計測した。計測結果を用いて、ロジスティック回帰分析¹¹⁾に基づき、路面凹凸が不良である区間を抽出する数理モデルを構築した。さらに一連の研究成果を福岡県直方市に適用した。道路パトロール車両にスマートフォンを搭載し、その加速度記録を携帯電話通信網を通じて千葉大学のサーバーに転送するアプリを構築した。約25mメッシュごとに不良と判定された回数と通過した回数を毎月集計し、直方市が別途計測した維持管理指数(MCI)¹²⁾と比較することで、実用化に向けて路面凹凸の判定精度を定量的に評価した。

2. 本研究で使用したデータ

(1) 計測した路面性状データ

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¹⁰⁾によって、国際ラフネス指数(IRI)を10mおよび100m間隔でそれぞれ計測した。

IRIは、車両下部に取り付けたレーザー変位計によって測定した路面の縦断プロファイルを用いて算出した。縦断プロファイルからIRIを算出するには、図-1に示すようなクォーターカーモデルを仮定し、一定の速度で路面上を走行させたときの車を受ける上下方向の変位の累積値(mm)と走行距離(m)との比を算出する(式(1))¹³⁾。なお、図-1の m_s は車体の質量(ばね上質量)、 m_u は車輪質量(ばね下質量)である。 k_s と c_s はサスペンションのばね係数およびダンピングを表し、 k_t はタイヤのばね係数である。

$$IRI = \left\{ \int_0^{LV} |\dot{z}_s - \dot{z}_u| dt \right\} / L \quad (1)$$

ここで、 z_s はばね上質量の高さ(mm)、 z_u はばね下質量の高さ(mm)、 L は区間長(m)、 V は走行速度(80 km/h)、 t は時間(s)を表す。IRIを算出するには、縦断プロファイル(路面凹凸量) z_{in} に対する車両のばね上、ばね下質量の応答 z_s 、 z_u を推定する必要がある。このときのパラメータは $c_s/m_s = 6.0$ 、 $k_t/m_s = 653$ 、 $k_s/m_s = 63.3$ 、 $m_u/m_s = 0.15$ と定められている¹⁴⁾。

総点検実施要領(案)の参考資料¹⁾では、IRIが8 mm/m程度以上で損傷レベル大、特にIRIが11~12 mm/mでは、古い舗装の場合で劣化が進行し明確な損傷が連続的に発生している状態としている。図-2に損傷レベル¹⁾ごとの本研究で取得

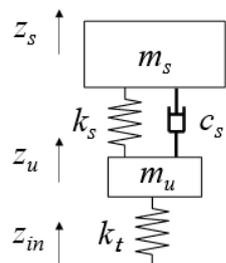


図-1 クォーターカーモデル

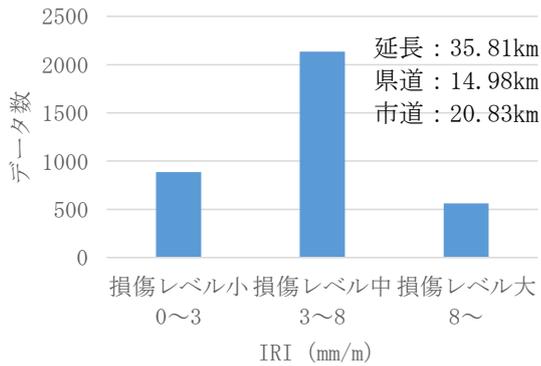


図-2 計測した IRI の損傷レベルごとのデータ数

した IRI のデータ数を示す。なお、データを取得した道路延長は 35.81 km (県道 14.98 km, 市道 20.83 km) である。

(2) スマートフォンで計測した上下加速度データ

鹿島道路(株)の多機能路面測定車を、別の自動車(マツダ・デミオ)で併走し、そ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。スマートフォンは、運転席側と助手席側の2カ所に設置した。運転席側のスマートフォンはホルダーで固定し、助手席側はアームレスト上にテープ等で固定した。

サンプリング周波数を 100 Hz とし、スマートフォンで水平2成分、上下1成分の加速度を計測した。さらに、スマートフォン内蔵のGPSを用いて、車両の位置を同時に記録した。路面凹凸と相関が最も高いのは上下方向の加速度と想像される。そこで本研究では、上下方向の加速度に着目し分析を行うこととした。

3. 路面不良判定モデル

(1) 路面不良判定モデルの構築

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。スマートフォンのGPSの緯度、経度と加速度時刻歴を関連付け、最も近傍の10 m 間隔の IRI と比較した。本研究では10 m 間隔の IRI が 12 mm/m 以上である区間を路面不良と定義した。2章で説明したデータセットからランダムに選んだ学習データをモデルの構築に用い、残りのデータをテストデータとしてモデルの精度評価に用いる。なお、学習データ数の割合は、全データの20~100%まで20%刻みで変化させた。

本研究では、式(2)を仮定したロジスティック回帰分析を行う。

$$p = 1/[1 + \exp\{-(b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3)\}] \quad (2)$$

ここで、 x_1 は 10 m 区間の平均速度 (m/s), x_2 は 10 m 区間の平均加速度振幅 (m/s²), x_3 は 10 m 区間の最大加速度振幅 (m/s²) を表す説明変数である。なお、平均加速度、最大加速度は、助手席側に設置したスマートフォンの加速度振幅の絶対値を用いて算出し、停車時のデータは除いている。また、 b_0 は定数、 b_1, b_2, b_3 は偏回帰係数である。最適なロジットモデルを構築するために、AIC (赤池情報量基準) が最小になるように説明変数を選択した⁷⁾。式(2)の

表-1 路面不良判定モデル検証のための混同行列

		予測	
		Positive 路面不良	Negative 不良でない
計測	True IRI \geq 12mm/m	True positive (TP) 路面不良 の的中数	False negative (FN) 路面不良 のはずれ数
	False IRI<12mm/m	False positive (FP) 不良でない区間の はずれ数	True negative (TN) 不良でない区間の 的中数

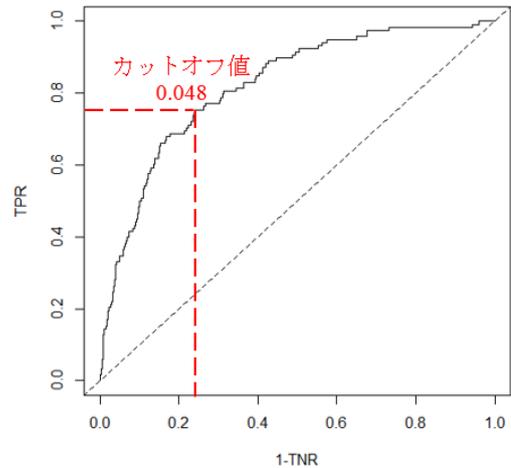


図-3 学習データ 80%で構築したロジットモデルの ROC 曲線

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(3), (4)のようになる。

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

$$1 - p = \Pr(Y = 0 | x_1, x_2, x_3) \quad (4)$$

(2) 路面不良判定モデルの検証

式(2)の関数形を仮定したロジットモデルを ROC 曲線¹⁵⁾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), 12 mm/m 未満と 12 mm/m 以上の区間を正しく判別する率を有効度 ER (Efficacy rate) と定義する。感度および特異度、有効度は、表-1 の混同行列に基づき式(5), (6), (7)のようになる。

$$TPR = TP/(TP + FN) \quad (5)$$

$$TNR = TN/(TN + FP) \quad (6)$$

$$ER = (TP + TN)/(TP + FN + FP + TN) \quad (7)$$

式(2)の p の値を適宜変化させ、学習データの 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

表-2 ロジットモデルの回帰定数と判定結果の精度

学習データの割合	b_0	b_1	b_2	b_3
20%	-1.777	-0.463	—	0.761
40%	-2.681	-0.462	5.406	—
60%	-1.792	-0.550	4.753	—
80%	-1.908	-0.510	3.357	0.310
100%	-2.043	-0.507	3.630	0.278

学習データの割合	AUC	カットオフ値	TPR/TNR	ER
20%	0.81	0.053	0.75/0.84	0.84
40%	0.83	0.034	0.83/0.70	0.70
60%	0.82	0.028	0.83/0.67	0.67
80%	0.82	0.048	0.75/0.76	0.76
100%	0.82	0.045	0.76/0.76	0.76

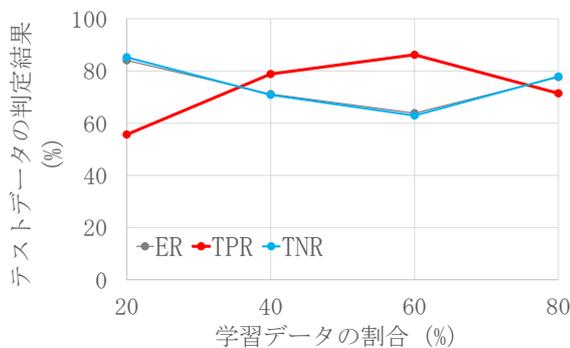


図-4 テストデータに対する路面不良判定モデルの判定精度

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¹⁵⁾。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)¹⁶⁾。

図-3に学習データの割合を80%として構築したロジットモデルのROC曲線を示す。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。表-2に構築したロジットモデルの回帰定数、カットオフ値、モデルの精度を示す。モデルの精度は、学習データのTPR、TNRとERで評価する。IRIが12 mm/m未満のデータ数が多いため、TNPとERの値は同じ値を示した。本研究で構築したすべてのロジットモデルでAUCは0.8以上となり、判別能力は良となった¹⁶⁾。図-4に構築した路面不良判定モデルのテストデータに対する判定精度を比較する。ロジスティック回帰分析では、全データのうち40%以上を学習データとすれば75%程度の判定精度を示す。

このような検討結果に基づき、本研究ではロジスティック回帰分析に基づく路面不良判定モデルを提案する。図-4のように、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。そこで、別の計測



図-5 計測した IRI と提案モデルの判定結果の例

表-3 直方市適用モデルの回帰定数と判定結果の精度

b_0	b_1	b_2	b_3
-0.275	-0.594	2.746	—

AUC	カットオフ値	TPR/TNR	ER
0.84	0.103	0.80/0.79	0.79

データに対しても同程度の判定精度を与えるものと考え、ここでは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-2)。図-5に計測したIRIと提案モデルの判定結果の一部を地図上に示す (判定精度: 76%)。

4. 自治体による道路パトロールへの適用

一連の研究成果を福岡県直方市に適用する。本研究では、2017年2月28日、3月1日に直方市で2章と同様の実走調査を行い、直方市へ適用する際の数理モデルを構築した。なお、加速度の計測には AQUOS PAD SH-05G (Android 5.0.2) を用いた。一連の研究成果を、自治体の計測結果に適用するには、車種の違いが路面凹凸に対する上下方向応答加速度に与える影響について考慮する必要がある。そこで、次式のように上下加速度 acz を平均値 μ 、標準偏差 σ で標準化した加速度 acz_s に関してロジスティック回帰分析を行い、路面不良区間を抽出する数理モデルを構築した。

$$acz_s = (acz - \mu) / \sigma \quad (8)$$

表-3に構築したロジットモデルの回帰定数、カットオフ値、モデルの精度を示す。加速度を標準化して構築したモデルの TPR および TNR, ER の値はほぼ同程度となった。なお、上下加速度を式(8)で標準化し、モデルに適用することとしたが、この処理によって適切に車種の影響が消去されているかは今後検討する必要がある。

本研究では、道路パトロール車両にスマートフォンを搭載し、その加速度記録を携帯電話通信網を通じて千葉大学のサーバーに転送するアプリを構築した。なお、直方市の道路パトロールで用いられるスマートフォンは、本研究の実走調査と同型のものである。サーバーに転送された上下加速度を式(8)で標準化してから表-3のモデルに適用し、約 25 mメッシュごとに不良と判定された回数と道路パトロール車が通過した回数を毎月集計した。ここで、不良と判定された回数を通じた回数で除したものを不良率と定義する。図-10に2017年9月の不良率の分布と直方市が平成28年4月に別途計測した100 m間隔の維持管理指数 (MCI)¹²⁾を示す。なお、MCI値は式(9), (10), (11), (12)の値が最も小さい値を採用するものとした。



図-10 2017年9月の不良率の分布と維持管理指数(MCI)

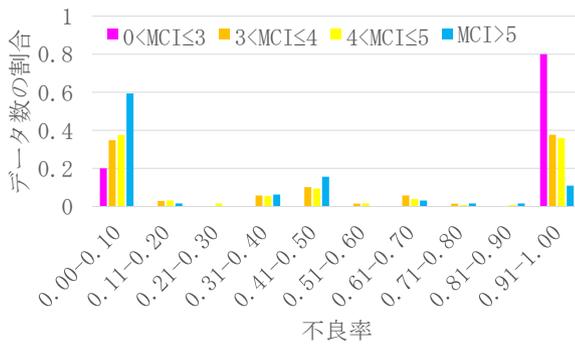


図-11 9月の不良率とMCIの関係

$$MCI = 10 - 1.48C^{0.3} - 0.29D^{0.7} - 0.47\sigma^{0.2} \quad (9)$$

$$MCI_0 = 10 - 1.51C^{0.3} - 0.30D^{0.7} \quad (10)$$

$$MCI_1 = 10 - 2.23C^{0.3} \quad (11)$$

$$MCI_2 = 10 - 0.54D^{0.7} \quad (12)$$

ここで、 C はひび割れ率 (%), D はわだち掘れ量 (mm), σ は平坦性 (mm) を表す。MCI は、5 以上であれば望ましい管理水準、4 以下であれば修繕が必要、3 以下であれば早急に修繕が必要とされている¹²⁾。

本研究では、自治体への適応結果の精度を検証するために、不良率のメッシュに交差する MCI のラインの平均値を集計した。図-11 に 9 月の不良率と MCI の関係を示す。早急に修繕が必要な区間において不良率 0.91~1.00 の割合は 0.80 と非常に高かった。また、望ましい管理水準の区間において不良率 0~0.10 の割合は 0.59、不良率 0~0.50 の割合は 0.83 となり、本研究の提案モデルの妥当性を示すことができた。

5. まとめ

本研究では、スマートフォンで計測した自動車の上下加速度を用いて舗装路面の平坦性を評価する数理モデルを構築し、提案手法を用いた判定結果と自治体の調査結果を比較することで、判定精度を定量的に評価した。

モデル構築に使用していないデータに対してロジットモデルを適用したところ、全データのうち 40% 以上を学習データとすれば 75% 程度の判定精度を示す。学習に用いるデータの割合を変化させ、ロジットモデルの精度の変化を検討したところ、精度に大きな違いを与えなかったため、汎化能力が高いことが期待される。

さらに一連の研究結果を福岡県直方市に適用した。不良率と直方市が別途計測した MCI の関係の評価したところ、早急に修繕が必要な区間において不良率 0.91~1.00 の割合が非常に高く、望ましい管理水準の区間において不良率 0~0.10 の割合が高くなる傾向となることがわかった。この

ことから、本研究の提案モデルの妥当性が確認された。今後は、本手法の自治体の道路パトロールへの適用を目指し、継続的なデータの蓄積が必要である。

参考文献

- 1) 国土交通省道路局：総点検実施要領(案)【舗装編】(参考資料), 2013.
- 2) (公社)日本道路協会：第 30 回日本道路会議：ワークショップと点検機材等の展示, 解説, <https://www.road.or.jp/conference/data/30kaigi/douro.pdf> (2017年5月13日閲覧)
- 3) 遠山貞則, 小沼浩, 篠崎昌浩, 兼平信蔵, 大貫薫, 幸田信則：路面性状測定車の開発, 三菱重工技報, Vol. 34, No. 2, pp. 132-135, 1997.
- 4) (一社)日本道路建設業協会：路面性状調査システム, <http://www.dohkenkyo.net/pavement/kikai/chosa.html> (2017年5月13日閲覧)
- 5) 小田宏一, 児玉英二, 青木一也, 貝戸清之, 小林潔司：劣化ハザード率を用いた学習機能を有する舗装マネジメントシステム マネジメントシステム, 土木情報利用技術論文集, Vol. 18, pp. 165-174, 2009.
- 6) 朝川皓之, 長山智則, 藤野陽三, 西川貴文, 秋本隆, 和泉公比古：一般車両の走行時動的応答を利用した舗装路面の簡易状態評価システムの開発, 土木学会論文集E1 (舗装工学), Vol. 68, No. 1, pp. 20-31, 2012
- 7) 森石一志, 中村博康, 渡邊一弘：三次元点群データを用いた新たな路面評価手法の検討, 土木学会論文集 E1 (舗装工学), Vol. 69, No. 3, pp. I_9-I_16, 2013.
- 8) 富山和也, 川村彰, 大廣智則：モバイルプロファイルメータを利用した高速道路における絶対プロファイルの推定, 土木学会論文集 E1 (舗装工学), Vol. 70, No. 3, pp. I_41-I_48, 2014.
- 9) (株)共和電業：IRI簡易測定装置 STAMPER, <http://www.kyowa-ei.com/jpn/product/special/stamper/index.html> (2017年5月13日閲覧)
- 10) 鹿島道路(株)：多機能路面測定車, <http://www.kajimaro.co.jp/technology/detail.php?pcat=1&cat=17&seq=91> (2017年5月13日閲覧)
- 11) 青木繁信：Rによる統計解析, オーム社, 2009.
- 12) 吉田武：道路観点からの舗装の維持管理ニーズを評価するための複合指標, 土木学会論文集E1 (舗装工学), Vol. 72, No. 1, pp. 12-20, 2016.
- 13) 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, 第3巻, pp. 9-14, 1998.
- 14) Sayers M. W.: Two quarter-car models for defining road roughness: IRI and HRI, Transportation Research Record, No. 1215, pp. 165-172, 1989.
- 15) 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.
- 16) ハスバートル, 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.