

モバイルプロフィロメータによる路面の空間周波数特性を考慮した点検手法

A Road Surface Inspection Method Considered with Spatial Frequency Characteristics by Use of a Mobile Profilometer

北見工業大学工学部 ○ 正 員 富山和也 (Kazuya Tomiyama)
北見工業大学工学部 正 員 川村 彰 (Akira Kawamura)

1. はじめに

急激な社会資本の老朽化が進む昨今、舗装マネジメントシステム（以下、「PMS」とする）は、道路ネットワークにおける維持・修繕の必要性や優先順位の決定において有力なツールとなる。PMSにおいて、舗装の供用性能を定量的に把握することは極めて重要である¹⁾²⁾。舗装の供用性能評価の概念は、1955年に米国で実施されたAASHO道路試験に始まり³⁾、特にラフネスと関係した車両の乗り心地が重要視されている⁴⁾。今日、我が国においても、国土交通省が発表した道路ストックの総点検実施要領(案)において、平坦性（ラフネス）の評価には乗り心地と関連したIRI(International Roughness Index: 国際ラフネス指数)が導入されている。

PMSを効果的に稼働させ、道路ネットワークにおける路面状態をデータベース化し、将来的な劣化予測をするためには、路面性状データの定量的かつ高頻度なモニタリングが必要である。しかし、日本の道路総延長の90%以上を管理する多くの地方自治体では、管理者の目視による路面点検が主流であり、定量的なモニタリングは行われていない。

一方、近年では、道路センシング技術の発達により、車両の振動応答に基づき平坦性の測定が可能な、簡易型の路面モニタリングシステムが開発されている⁵⁾⁷⁾。特にこれらのシステムでは、RTRRMS (Response Type Road Roughness Measuring System)に代表されるように、クォーターカー（以下、「QC」とする）モデルを採用し、IRIの算定を指向したものが多く。

本研究の目的は、加速度センサを用いた簡易路面平坦性測定装置（モバイルプロフィロメータ：Mobile Profilometer, 以下、「MPM」とする）による路面の空間周波数特性を考慮した点検手法の開発である。特に、本研究では、目視では識別困難な外観上の類似性を有する路面損傷について、車両の振動乗り心地と関連した空間

周波数特性を有する箇所の特定期間を検討する。

路面の空間周波数特性を考慮した損傷箇所の特定には、解析対象波形の定常性を仮定する必要がなく、局在する損傷の位置情報と空間周波数（波数）情報の同時識別が可能で、ウェーブレット変換が有望である⁸⁾。今日、ウェーブレット変換は、路面の局所損傷解析への有効性が認識されており、路面データの分析においても多くの適用事例が報告されている⁹⁾¹¹⁾。また、既存のウェーブレット変換に対し、波形の特徴を学習した上で分解および再構成が可能な、リフティングスキームが開発されている¹²⁾。本研究では、加速度センサを用いたセンシング技術に、ウェーブレット変換およびリフティングスキーム理論による情報処理を応用することで、損傷検出を自動化した、効率的な路面点検手法を目指す。

2. MPMによる路面モニタリング

本章では、従来のレーザー変位計や水準測量による路面測定に比べ、経済的に導入でき効率的運用が可能な、加速度センサを用いたMPMによる路面モニタリングについて述べる。

2.1 MPMの概要

本研究で用いたMPMは、任意の車両のバネ上およびバネ下に設置した2つの加速度センサから得られた上下加速度について、車種および車速依存成分を除去した後、逆解析により路面プロファイルを測定し、プロファイルを基にIRIなどの平坦性指標を算出する装置である。MPMの平坦性測定原理は、2つの加速度センサにより、実車両上でQCを再現するため、IRIの算出原理に忠実である。また、路面プロファイルを基に平坦性指標を算出することから、プロファイルとしてはASTM Internationalが規定する分類¹³⁾上、Class 2と同等の精度を有する。一方、加速度センサによる簡便な測定方式のため、Class 3と同等の利

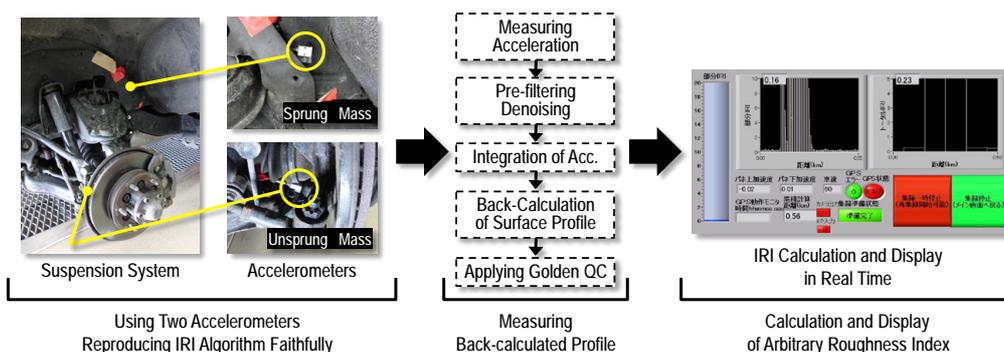


図-1 簡易路面平坦性測定装置(MPM)の路面測定原理

便性で運用可能である。MPMの路面測定原理を図-1に示す。なお、筆者らは、本研究で用いたMPMについて、Class 2と同等の測定精度を有することを確認している。

2.2 QCモデルを用いたIRIの算出原理

QCモデルとは、二軸四輪車の一輪を取り出した2自由度の車両運動モデルであり、その特徴として、比較的単純なモデルでありながら、車両上下振動に関して、一般的な乗用車と同様の応答を持つ¹⁴⁾。IRIは、ゴールデン・パラメータとよばれる、規格化された諸元を有するQCモデルを用い、80km/hで走行した際のサスペンションストローク累積値を、走行延長で正規化した値である。

2.3 ラフネスプロファイルの算出

ここで、IRIの算出原理は、波長0.1~100mの間で重み付けする、QCフィルタと呼ばれる一種のバンドパス・フィルタとして作用する。フィルタ適用後のプロファイルは、車両乗り心地や動的荷重と関連し、ラフネスプロファイルと称され、絶対値を累積し走行延長で正規化することでIRIを算出できる。そのため、ラフネスプロファイルは、IRIと同様に勾配の単位 (mm/mやm/km) を持つ。IRIの算出過程で計算されるラフネスプロファイルから、所要の路面損傷箇所を特定することは、路面モニタリング上、非常に効率的である。そこで、本研究では、MPMから得られるラフネスプロファイルを解析対象とする。

3. リフティングスキームによる路面損傷検出理論^{15), 16)}

従来のウェーブレット変換結果は、マザーウェーブレットの性質に大きく依存する。一方、リフティングスキームは、既存のマザーウェーブレットに、検出したい波形の特徴など、特定の性質を付加し、その分解性能を高めるための手法である。特に、任意の双直交ウェーブレットフィルタに自由パラメータを加えた、リフティングウェーブレットフィルタ (LWF) を用いることで、ラフネスプロファイルに含まれる特徴的な形状を検出することが可能である。

3.1 LWFの概要

LWFとは、任意の双直交ウェーブレットフィルタに、調整可能な自由パラメータを加えたものである。双直交ウェーブレットフィルタは低周波および高周波側の分解と再構成に関する4つのフィルタ $\{h_{k,l}^{old}, \tilde{h}_{k,l}^{old}, g_{m,l}^{old}, \tilde{g}_{m,l}^{old}\}$ で構成される。ここで、 $\tilde{h}_{k,l}^{old}$ および $\tilde{g}_{k,l}^{old}$ は低周波および高周波分解フィルタを、 $h_{k,l}^{old}$ および $g_{m,l}^{old}$ は低周波および高周波再構成フィルタを表す。また、 l は解像度 (空間周波数) パラメータを、 k と m は、低周波側および高周波側の位置パラメータをそれぞれ表す。oldは初期双直交ウェーブレットフィルタであることを示す。ここで、自由パラメータを $\tilde{s}_{k,m}$ とすると、LWFは、次式の新しい双直交ウェーブレットフィルタ組 $\{h_{k,l}, \tilde{h}_{k,l}, g_{m,l}, \tilde{g}_{m,l}\}$ で構成される。

$$\begin{aligned} h_{k,l} &= h_{k,l}^{old} + \sum_m \tilde{s}_{k,m} g_{m,l}^{old} \\ \tilde{h}_{k,l} &= \tilde{h}_{k,l}^{old} \\ g_{m,l} &= g_{m,l}^{old} \end{aligned}$$

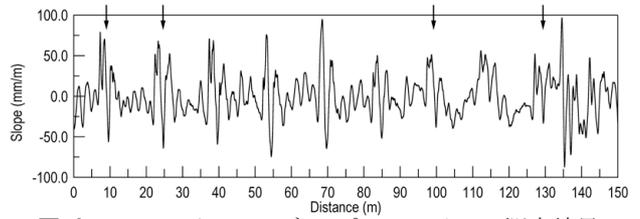


図-2 MPMによるラフネスプロファイルの測定結果

$$\tilde{g}_{m,l} = \tilde{g}_{m,l}^{old} - \sum_m \tilde{s}_{k,m} \tilde{h}_{k,l}^{old} \quad (1)$$

ここで、 $\tilde{h}_{k,l}$ および $\tilde{g}_{m,l}$ は新しい低周波および高周波分解フィルタを、 $h_{k,l}$ および $g_{m,l}$ は新しい低周波および高周波再構成フィルタを表す。

3.2 自由パラメータの学習

自由パラメータ $\tilde{s}_{k,m}$ の学習は、はじめに、検出したい路面損傷を含む $2n$ 個のトレーニング信号 ($v=1,2,\dots,2n$) を用意する。トレーニング信号は、ひび割れやパッチング、ポットホールなど、管理目的に合わせて、任意に選定することができる。ここで、トレーニング信号の、初期フィルタによる低周波および高周波成分を a_m^n および r_m^n とすると、自由パラメータ $\tilde{s}_{k,m}$ は、以下の連立一次方程式を解くことで算出できる。

$$\begin{bmatrix} a_{m-n}^1 & a_{m-n+1}^1 & \dots & a_{m+n}^1 \\ a_{m-n}^2 & a_{m-n+1}^2 & \dots & a_{m+n}^2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m-n}^{2n} & a_{m-n+1}^{2n} & \dots & a_{m+n}^{2n} \\ 1 & 1 & \dots & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{s}_{m-n,m} \\ \tilde{s}_{m-n+1,m} \\ \vdots \\ \tilde{s}_{m+n-1,m} \\ \tilde{s}_{m+n,m} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_m^1 \\ r_m^2 \\ \vdots \\ r_m^{2n} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

3.3 LWFによる損傷検出理論

LWFによる高周波成分を d_m^0 とすると、自由パラメータ $\tilde{s}_{k,m}$ は、特徴点における d_m^0 が理論上0 (ゼロ) となるよう最適化されており、特徴点以外では、初期フィルタによる高周波成分 \hat{d}_m^0 と d_m^0 が等しくなる性質を有する。そのため、特徴箇所は、次式で表される波形の類似度 I_m が正の値 ($I_m > 0$) となることで特定できる。

$$I_m = |\hat{d}_m^0| - |d_m^0| \quad (3)$$

4. 空間周波数特性を考慮した路面点検手法の開発

本章では、代表的な路面損傷である横断ひび割れに着目し、MPMを用いた路面点検データから、ウェーブレット変換により空間周波数特性を考慮し、LWFによる損傷の検出を試みる。

4.1 路面モニタリングデータ

横断ひび割れのラフネスプロファイルデータは、2013年3月に北海道内の市街地道路において、道路パトロール車に用いられるSUVタイプの車両に設置したMPMを用いて測定した。測定結果を図-2に示す。図中、矢印は、特徴点として抽出した、後述の学習箇所である。なお、ラフネスプロファイルのサンプリング間隔は0.1mである。図より、当該区間は、連続して横断ひび割れが発生して

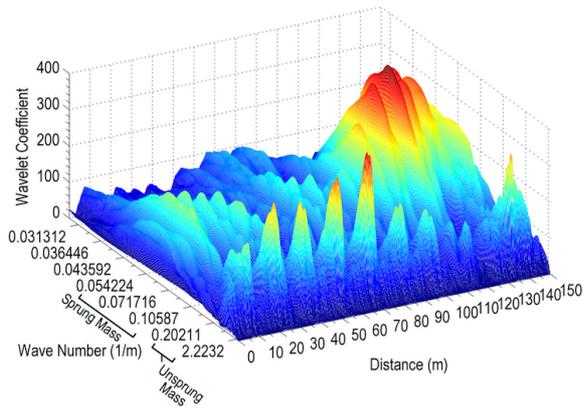


図-3 市街地道路で測定したラフネスプロファイルの連続ウェーブレット変換結果

いるため、局所的な著大波形が頻繁に発生しているのが確認できる。

4.2 ラフネスプロファイルの空間周波数解析

(1) 連続ウェーブレット変換の概要

ウェーブレット変換は、従来のフーリエ変換による方法と異なり、解析プロファイルの定常性を仮定する必要がなく、局在するプロファイル波形の位置情報と波数情報を同時に識別できる利点を有する。本研究では、連続ウェーブレット変換による空間周波数解析を行ない、ラフネスプロファイルの空間周波数特性について検討する。ウェーブレットの連続変換は、離散変換に比べ、計算効率は劣るが、スカログラム (Scalogram) と呼ばれる三次元表示により、空間周波数情報と位置情報を視覚的に把握することができる¹⁷⁾。ここで、位置 u 、スケール s における距離 x の関数 $f(x)$ の連続ウェーブレット変換は次式で与えられる。

$$Wf(u, s) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \frac{1}{\sqrt{s}} \psi^* \left(\frac{x-u}{s} \right) dx \quad (1)$$

式中、*は共役複素を表す。また、ザウウェーブレット $\psi(x)$ は、再構成および分解に用いるフィルタ長と関連するパニングモーメントが2および4の双直交スプラインウェーブレットである。このウェーブレットフィルタは、比較的短い次数であり、鋭いピークを持つ基本関数で構成されるため、ひび割れのような局在する路面損傷箇所の特定に適するものといえる。

(2) 測定ラフネスプロファイルの空間周波数特性

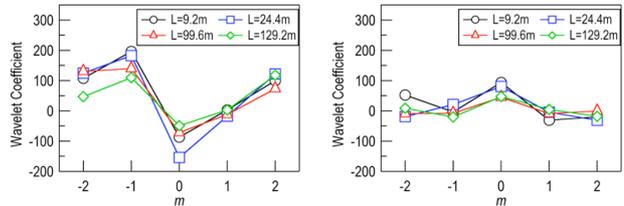
市街地道路において測定した、ラフネスプロファイルの連続ウェーブレット変換結果を図-3に示す。図中、市街地道路の常用速度(40~60km/h)における、一般的な乗用車のバネ上およびバネ下固有振動数と対応する波数範囲を合わせて示した。ここで、ウェーブレット係数は絶対値表示であり、ラフネスプロファイルの振幅スペクトルに相当する。

図-3より、距離10~70m区間での、ひび割れを原因とする局所波形のように、一見して空間領域では同様の傾向であっても、空間周波数平面では、特徴が異なることが



(a) トレーニング箇所 (b) 非トレーニング箇所

図-4 トレーニング箇所の損傷状況



(a) 低域通過成分 (b) 高域通過成分

図-5 トレーニング信号

わかる。ここで、横断ひび割れの空間周波数特性は、常用速度における、バネ下固有振動数と対応した波長の卓越が顕著であるが、距離10, 25, 100, 130mでは、バネ下に加え、バネ上固有振動数と対応した波長成分への寄与も大きく、2つのピークが生じている。特に、車両のバネ上振動は、乗り心地に直結する損傷であるといえる。そこで、本研究では、当該ひび割れ4箇所をトレーニング信号とし、LWFを設計する。ここで、図-4に、トレーニング箇所と非トレーニング箇所における損傷状況の例を示す。図より、損傷形状に大きな違いはなく、目視では、空間周波数特性上の違いが識別困難であることがわかる。

4.3 自由パラメータの学習とLWFの設計

LWFは、上述の空間周波数解析結果に基づき、図-2に矢印で示した損傷箇所をトレーニング信号に用いて自由パラメータを学習し設計する。自由パラメータの学習は、初期フィルタを用いた離散ウェーブレット変換による多重解像度解析において、高周波(詳細)成分が、市街地道路の常用速度における、一般的な乗用車のバネ上およびバネ下固有振動数と対応する路面波長(通過波数: 0.625~1.25m(1/m))を含む、分解レベル3から学習した。図-5に、自由パラメータの学習に用いたトレーニング信号を示す。ここで得られた自由パラメータを、式(1)に代入することで、LWFが設計できる。なお、初期フィルタは、空間周波数解析と同様の双直交ウェーブレットとする。

4.4 LWFによる路面点検結果

前節までに、横断ひび割れに着目し、空間周波数解析結果に基づく、特徴的な路面損傷形状に最適化したLWFを設計した。損傷箇所は、式(3)より初期フィルタおよびLWFを用いて \hat{d}_m^0 と d_m^0 を算出し、類似度 $I_m > 0$ となる距離 m により特定できる。

図-6に、設計したLWFによる横断ひび割れの検出結果を示す。図中、矢印は自由パラメータの学習箇所である。

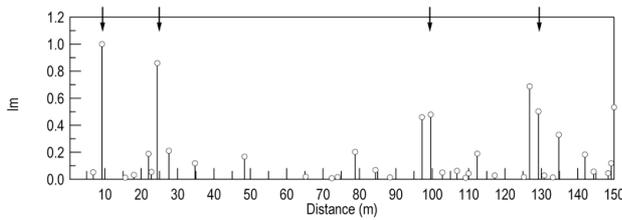


図-6 LWFによる路面点検結果

なお、類似度 I_m は最大値が1となるよう正規化した。図より、学習したひび割れ発生箇所が強調されており、目視点検では困難な空間周波数特性の違いを識別した上で、局在する路面損傷の検出が可能であることがわかる。ここで、特徴点検出時の指標であるの閾値については、舗装の管理目的に応じた設定が必要である。なお、LWFの特性は、学習するトレーニング信号に依存するが、高頻度に行なわれている道路パトロール時に、MPMを用いて損傷データを蓄積し、路面実態に合わせたフィルタを設計することで、その性能を高めることができる。以上から、MPMの測定結果にリフティングスキームを適用することで、路面測定データの効率的な情報処理、およびデータ処理結果に基づく損傷検出の自動化により、市街地道路における効果的な路面点検に貢献することが期待できる。

5. まとめ

本研究では、加速度センサを用いた簡易路面平坦性測定装置(MPM)を導入し、ラフネスプロファイルの空間周波数解析に基づき設計したリフティングウェーブレットフィルタ(LWF)を適用した、特徴的な路面損傷の検出方法を開発した。また、開発手法について、市街地道路の常用速度(40~60km/h)における、一般的な乗用車のバネ上およびバネ下固有振動数と対応する路面波長が卓越した、横断ひび割れ箇所の特定事例を示した。その結果、従来の目視点検では識別困難な、特徴的なひび割れ発生箇所が強調され、局在する路面損傷の検出が可能であることを示した。本成果は、路面情報を効率的に処理し、データ処理結果に基づく損傷検出を自動化できるため、市街地道路における効果的な路面点検に貢献するものと期待できる。

謝辞：本研究は、一般財団法人 日本デジタル道路地図協会からの助成を受けて実施したものである。また、市街地道路の測定に際しては、北海道北見市都市建設部の協力を得た。ここに記して感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 山之口浩, 丸山暉彦: 超・舗装学入門 アスファルト舗装修繕技術 続・舗装学のすすめ・AからZまで, 山海堂, 1997.
- 2) 笠原篤: 舗装マネジメントシステム, 土木学会論文集, No.478/V-21, pp.1-12, 1993.
- 3) Mallick, R.B., and El-Korchi, T.: *Pavement Engineering Principles and Practice*, CRC Press, 2009.

- 4) Papet, L.M.: Federal Highway Administration – Current PMS Requirements, Pavement Management Implementation, *ASTM STP 1121*, Holt, F.B. and Gramling, W.L., Eds., American Society of Testing and Materials, Philadelphia, pp.3-10, 1992.
- 5) 城本政一, 川村 彰, 坂田光児, 中島繁則: IRI測定装置の一般道への適用に関する検討, 土木学会年次学術講演会概要集, Vol.66, V-405, pp.809-810 (CD-ROM), 2011.
- 6) 遠藤哲雄, 鬼倉一展, 金井利浩: 多機能路面測定システムの標準化に関する検討(その2) -路面の段差量の推定方法の考案-, 土木学会年次学術講演会概要集, Vol.66, V-407, pp.813-814 (CD-ROM), 2011.
- 7) Tomiyama, K., Kawamura, A., Nakajima, S., Ishida, T., and Jomoto, M.: A Mobile Data Collection System Using Accelerometers for Pavement Maintenance and Rehabilitation, *Proceedings of 8th International Conference on Managing Pavement Assets*, Paper No. 142 (CD-ROM), 2011.
- 8) 富山和也, 川村 彰, 石田 樹: クォーターカーアルゴリズムを用いた舗装モニタリングにおける路面損傷の検出方法, 土木学会論文集F3 (土木情報学), Vol. 68, No.2, pp.I_127-I_134, 2013.
- 9) Wei, L., and Fwa, T.F.: Characterizing Road Roughness By Wavelet Transform, *Transportation Research Record*, No. 1869, pp.152-158, 2004.
- 10) Yi, P., Sheng, L., and Yu, L.: Wavelet Transform For Feature Extraction to Improve Volume Adjustment Factors for Rural Roads, *Transportation Research Record*, No. 1879, pp. 24-29, 2004.
- 11) Shokouhi, P., Gucunski, N., Maher, A., and Zaghoul, S.M.: Wavelet-Based Multiresolution Analysis of Pavement Profiles as a Diagnostic Tool, *Transportation Research Record*, No. 1940, pp.79-88, 2005.
- 12) Sweldens, W.: The Lifting Scheme: A Construction of Second Generation Wavelets, *SIAM Journal on Mathematical Analysis*, Vol. 29, No. 2, pp. 511-546, 1997.
- 13) ASTM International: Standard Test Method for Measuring the Longitudinal Profile of Traveled Surfaces with an Accelerometer Established Inertial Profiling Reference, *ASTM No.E950*, 2004.
- 14) Sayers, M. W. and Karamihas, S. M.: *The Little Book of Profiling, - Basic Information about Measuring and Interpreting Road Profiles*, The University of Michigan, 1998.
- 15) Jansen, M., and Oonincx, P.: *Second Generation Wavelets and Application*, Springer, 2004.
- 16) Takano, T., Minamoto, H., Arimura, K., Niijima, T., Iyemori, T., and Araki, T.: Automatic detection of geomagnetic sudden commencement using lifting wavelet filters, *Proceedings of the Second International Conference on Discovery Science*, pp. 242-251, 1999.
- 17) Mallat, S. A.: *Wavelet Tour of Signal Processing*, Academic Press, 1999.