

カスタムウェーブレットフィルタによる路面プロファイルの平滑化について

北見工業大学工学部 正会員 ○富山 和也
 北見工業大学工学部 正会員 川村 彰

1. はじめに

路面のプロファイリングには、測定データからの不要なノイズ除去や必要な情報を抽出するため、信号処理に基づくフィルタリングが必要である。しかし、従来から路面測定データの処理に用いられるデジタルフィルタは、入力波形に対する指向性を有しておらず、プロファイルに含まれる特定の形状の識別が困難であった。一方、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スキームによりカスタムウェーブレットフィルタを設計し¹⁾、信号に含まれる特異形状を検出する方法が提案されている²⁾。本研究では、路面プロファイルの平滑化について、ひび割れ除去を例にフィルタを設計し、リフティングスキームの適用性を検証する。

2. リフティングスキームの概要

2.1 カスタムウェーブレットフィルタの設計方法

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を付加し、その分解性能を高めた手法であり、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、カスタムウェーブレットフィルタを設計することが可能である。低周波および高周波側の分解と再構成に関する初期の双直交ウェーブレットフィルタ組を $\{h_{k,l}^{old}, \tilde{h}_{k,l}^{old}, g_{m,l}^{old}, \tilde{g}_{m,l}^{old}\}$ とすると、カスタムウェーブレットフィルタ組 $\{h_{k,l}, \tilde{h}_{k,l}, g_{m,l}, \tilde{g}_{m,l}\}$ は以下となる。

$$h_{k,l} = h_{k,l}^{old} + \sum \tilde{s}_{k,m} \delta_{m,l}^{old}, \quad \tilde{h}_{k,l} = \tilde{h}_{k,l}^{old}, \quad g_{m,l} = g_{m,l}^{old}, \quad \tilde{g}_{m,l} = \tilde{g}_{m,l}^{old} - \sum \tilde{s}_{k,m} \tilde{h}_{k,l}^{old} \tag{1}$$

ここで、 $\tilde{s}_{k,m}$ は自由パラメータであり、 l は解像度（空間周波数^k）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。なお、*old* は初期の双直交ウェーブレットフィルタであることを示す。

2.2 自由パラメータの学習方法

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 c_l^{ν} ($\nu=1,2,\dots,2n$) を用意する。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。

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

3. 路面プロファイル平滑化のためのフィルタ設計

3.1 解析対象プロファイル

リフティングスキームによる平滑化では、前述の通り、自由パラメータの学習およびフィルタ組の設計が必要である。本研究では、路面プロファイル上のひび割れを除去する平滑化フィルタを設計するため、米国 LTPP (Long Term Pavement Performance) プログラム SPS-5 の内、ひび割れ損傷の顕著な、Arizona (State Code: 04) の試験区間 9 (Section ID: 04-0509) において、1997 年 12 月に測定されたプロファイルを解析対象とした。

3.2 カスタムウェーブレットフィルタの設計

ひび割れの発生は、将来的な平坦性の低下につながる場合もあるが、ひび割れの幅がタイヤの接地長に比べ十分に狭い場合、車両の振動に必ずしも影響しない。そこで、本研究では、路面プロファイル波形が、IRI (国際ラフネス指数) に影響を及ぼす最短波長 1.2m 以下となる、類似形状のひび割れ箇所 6 箇所をトレーニング信号として自

キーワード 路面プロファイル, プロファイリング, リフティングスキーム, フィルタ, ひび割れ

連絡先 〒090-8507 北海道北見市公園町 165 番地 北見工業大学 工学部 交通工学研究室 TEL 0157-26-9496

由パラメータを学習し、カスタムウェーブレットフィルタを設計した。なお、初期の双直交ウェーブレットフィルタは、双直交スプライン (Biorthogonal 2.4) とする。

4. カスタムウェーブレットフィルタの検証

4.1 検証の概要

カスタムウェーブレットフィルタの平滑化性能の検証は、従来から路面のプロファイリングに用いられている、バターワースおよび移動平均フィルタによる平滑化結果と比較することで行なった。ここで、路面プロファイルの測定データから、ノイズ等の不要な波形を除去し平滑化するためには、ローパスフィルタが必要となる。本研究では、それぞれのフィルタリングアルゴリズムにおいて、遮断波長が IRI に影響を及ぼす最短波長 1.2m となるよう、ローパスフィルタを設計した。また、カスタムウェーブレットフィルタにおいては、分解レベル 2 の低周波成分が、遮断波長 1.2m のローパスフィルタ通過成分に対応する。なお、従来のフィルタ処理は、路面プロファイルの可視化および解析ソフトである ProVAL を用いた。

4.2 検証結果

図-1 に、解析対象プロファイルと各フィルタリングアルゴリズムによる平滑化結果を示す。なお、矢印は、自由パラメータの学習箇所である。図-1 より、全区間を通しての傾向に顕著な違いはみられないが、図-2 に示す、ひび割れ箇所の詳細より、フィルタ後のプロファイルでは、ひび割れが軽減もしくは除去されていることがわかる。

しかし、図-3 のフィルタ処理前後の PSD (パワースペクトル密度) による波長分布より、移動平均フィルタでは、ラフネスと関連した重要な情報である、フィルタ通過域の成分を失っており、過剰に平滑化されていることがわかる。一方、バターワースフィルタとリフティングスキームによるカスタムウェーブレットフィルタは、同様の傾向を示し、遮断域のみで波長成分を減衰させることができる。また、図-2 より、バターワースフィルタでは、ひび割れによる凹状成分が残存しているにもかかわらず、カスタムウェーブレットフィルタは、完全にひび割れを除去していることがわかる。以上より、リフティングスキームによる、カスタムウェーブレットフィルタは、路面プロファイルの必要な波長成分を残したまま、特異形状の除去が可能であり、他のフィルタリングアルゴリズムに対する優位性が確認できた。今後、様々な路面プロファイルの特徴を学習することで、解析用途に応じた高精度なフィルタの設計が可能になるものと期待できる。

5. まとめ

本研究では、路面のプロファイリング上必要不可欠な、測定データのフィルタリングについて、ひび割れ除去を例にリフティングスキームによるカスタムウェーブレットフィルタの適用性を検証したものである。その結果、カスタムウェーブレットフィルタは、路面プロファイルの必要な波長成分を残したまま、特異形状の除去が可能であり、解析用途に応じた高精度なフィルタ設計が期待できることを示した。

参考文献

- 1) Sweldens, W: The Lifting Scheme: A Construction of Second Generation Wavelets, *SIAM Journal on Mathematical Analysis*, Vol. 29, No. 2, pp. 511-546, 1997.
- 2) Takano, T., Minamoto, H., Arimura, K., Nijima, 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.

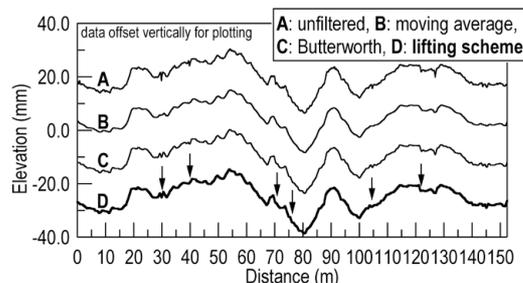


図-1 解析対象プロファイル

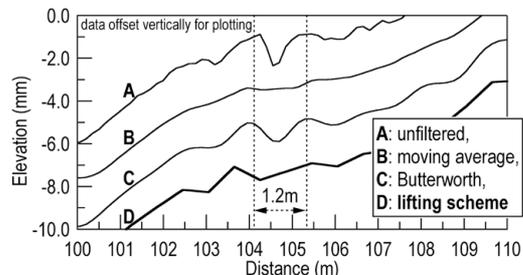


図-2 ひび割れ箇所の詳細

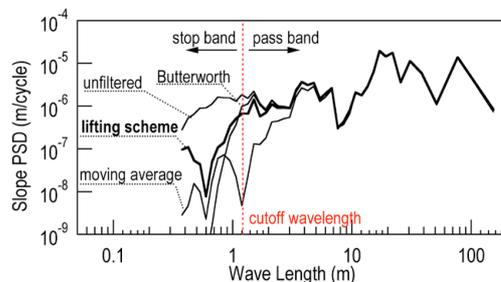


図-3 フィルタ処理前後の波長分布