

デジタルフィルタを用いた路面プロファイルデータ処理について

-ウェーブレットの概念を導入したデジタル信号処理-

Study on the Data Processing of Road Profile by use of the Digital Filter

- The Digital Signal Processing Method, Based on the concept of Wavelet -

北見工業大学工学部 ○正 員 白川龍生 (Tatsuo Shirakawa)
 北見工業大学大学院 学生員 松原正人 (Masahito Matsubara)
 北見工業大学工学部 正 員 川村 彰 (Akira Kawamura)

1. はじめに

路面プロファイルに関する路面特性の評価手順は、一般的に(1)プロファイルの測定、(2)測定データの処理、(3)特性要約指標(例えば、平坦性指標など)の算定、(4)評価、というフローにより実施される。このうち「平坦性」に関する路面特性評価は、歴史的に最も古く、車の乗り心地や操縦性など道路利用者の快適性・安全性に重大な影響を及ぼすものであり、その測定および評価方法の確立は極めて重要な課題となっている。

著者らはこれまでに総合的な平坦性評価方法に関する考察を重ねてきたが、その過程で、位置情報と周波数情報を同時識別する方法が局所的な損失箇所を特定できる手法であり、舗装マネジメントの見地からも有効であるとの見解を得た。そこでこれらの解析に適するとされているウェーブレット変換に着目し、適用例を報告してきた。しかし以下の3点については課題が残り、結論を導くには至らなかった。

- ・ 出力結果がアナライジング・ウェーブレットの形状に依存する。
- ・ 離散ウェーブレット変換の場合、解像度が 2^n の組み合わせとなるため、任意の解像度(周波数)を設定することが困難である。
- ・ 入力となるプロファイルデータは、測定の際に生ずる検出特性を演算補正した後のものであるため、補正によって損失する周波数情報については解析できない。

そこで、ウェーブレット変換の理論的整備段階を鑑みて検討した結果、離散ウェーブレット変換を利用した多重解像度解析の概念を導入し、数種のデジタルフィルタを組み合わせる方法により、ウェーブレット変換の利点である位置情報と周波数情報の同時識別が可能となるほか、上記課題についての解を得ることができたことから、以下、概要を報告する。

2. 多重解像度解析

ウェーブレット変換は測定データに含まれる異常性の検出、その位置の同定などの目的で応用されており、現在、その範囲は理論から実際まで多岐にわたっている。

ウェーブレット変換は「連続ウェーブレット変換」と「離散ウェーブレット変換」に大別される。前者は解析データにおける特定パターンの発生箇所及び発生頻度、

あるいは他のパターンの発生との相関関係について分析することを目的とすることが多く、後者は信号のノイズ除去や異なる性質を持つ信号の分離・比較することを主目的とする場合が多い。また、離散化することにより数量的把握がしやすい、計算機による解析が容易、等の利点がある。

離散ウェーブレット変換式は式(1)のように示される。

$$w_{m,n} = a_0^{m/2} \int f(t) \psi(a_0^m t - nb_0) dt \quad \dots(1)$$

ここで $w_{m,n}$: ウェーブレット係数 (出力波形)

$f(t)$: 任意の関数 (入力波形)

$\psi(t)$: アナライジング・ウェーブレット

a_0 : スケーリング (伸縮)

b_0 : トランスレート (移動)

m, n : 整数

式(1)は、任意の関数と伸縮・移動の処理を施したアナライジング・ウェーブレットとの積分演算によってウェーブレット係数を得るための計算式である。したがって、アナライジング・ウェーブレットの種類が異なれば計算結果も異なったものが出力される(図-1)。

なお、 $f(t)$ の再構成は次式で与えられる。

$$f(t) = \sum_m \sum_n w_{m,n} \psi_{m,n}(t) \quad \dots\dots\dots(2)$$

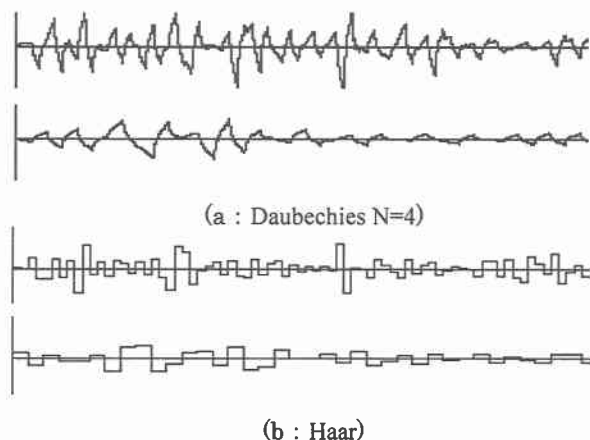


図-1 アナライジング・ウェーブレットの変化による出力波形の違い (Daubechies と Haar の比較)

ここで、アナライジング・ウェーブレット $\psi(t)$ が直交基底であれば、内積が $n=k$ (ここで、 n, k は整数でシフト量) の場合以外は全て 0 となるため、この性質を利用すると信号から相似関数の検出が可能となる。直交基底となるような $\psi(t)$ は多重解像度解析と呼ばれる関数空間の階層構造を利用して作られる。

多重解像度解析の概念は以下のようになる。

関数 $f(t)$ を関数 $\phi(t)$ で近似する。ここで、 $\phi(t)$ をスケーリング関数という。

$$f(t) \approx \phi_f^{(m)}(t) = \sum_k c_{m,k} \phi_{m,k}(t) \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 $c_{m,k}$: スケーリング係数

$$c_{m,k} = 2^{m/2} \int_{\frac{k}{2^m}}^{\frac{k+1}{2^m}} f(t) dt \quad \dots\dots\dots (4)$$

$\phi(t)$ もスケーリング関数で表現される。

$$\phi(t) = \sum_k h_k \sqrt{2} \phi(2t - k) \quad \dots\dots\dots (5)$$

関数 $\phi_g^{(m)}(t)$ を 2 つに分解する。

$$\phi_g^{(m)}(t) = (\phi_g^{(m-1)}(t)) + (\phi_g^{(m)}(t) - \phi_g^{(m-1)}(t)) \quad \dots\dots\dots (6)$$

生じた差 $\phi_g^{(m)}(t) - \phi_g^{(m-1)}(t)$ をウェーブレット関数 $\phi_{m-1,k}(t)$ で表現すると次のようになる。

$$\phi_g^{(m)}(t) - \phi_g^{(m-1)}(t) = d_{m-1,k} \phi_{m-1,k}(t) \quad \dots\dots\dots (7)$$

ここで、 $d_{m,k}$: ウェーブレット係数

ゆえに、式(3)、(6)、(7)より、多重解像度解析は、

$$\phi_g^{(m)}(t) = \sum_k c_{m-1,k} \phi_{m-1,k}(t) + \sum_k d_{m-1,k} \phi_{m-1,k}(t) \quad (8)$$

により行われる。

式(8)のうち、 $c_{m-1,k} \phi_{m-1,k}(t)$ がローパス(低周波数域通過型)フィルタ、 $d_{m-1,k} \phi_{m-1,k}(t)$ がハイパス(高周波数域通過型)フィルタの役割を果たす。

多重解像度解析の適用例を図-2 に示す。 $m-1$ 次の解像度は、 m 次の解像度(近似の精度)の 1 つ下の低解像度表現であり、解析周波数及び時間(距離)解像度が m 次の 1/2 となる。このようにスケーリング関数は解像度の階層構造で表現できるが、この性質を利用して解像度ごとに信号の性質を解析することを多重解像度解析という。

3. 多重解像度解析の問題と本報告の目的

前章において、多重解像度解析を用いることによって入力波形を低周波数域と高周波数域に分解し、例えばノイズなどの成分を除去し再構成することによって、一種のフィルタ操作が可能であることを示したが、離散ウェーブレット変換が基本にあることから、スケーリング関数及びウェーブレット関数の種類によって出力波形の形

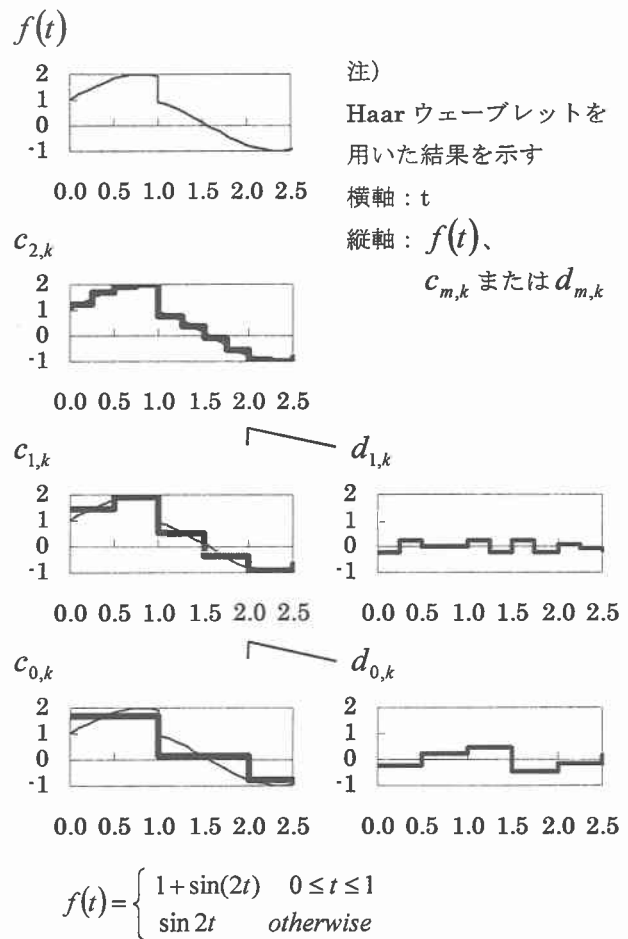


図-2 多重解像度解析の適用例

状が異なる。また解像度が 2^n の組み合わせとなるため、任意の解像度(周波数)を設定することが困難である。例としてサンプリング間隔 $\Delta t=0.5m$ である場合、最大周波数は波数 (Wave Number、以下「WN」とする) $WN=1.0m^{-1}$ となるが、多重解像度解析では 1 つ下の階層の解像度は $WN=0.5m^{-1}$ となり、以下 $WN=0.25m^{-1}$ 、 $WN=0.125m^{-1}$ となる。解像度が 1/2 となるに伴い波長が 2 倍となることから、任意の波長を得たい場合、この方法ではサンプリング間隔を調整しなければならない。

路面プロファイルデータの場合、例えば m 次の解像度 $WN=0.125m^{-1}$ (波長 $\lambda=8m$ に相当) であれば、 $m+1$ 次の解像度は $WN=0.0625m^{-1}$ ($\lambda=16m$ に相当) となり、波長換算で $\lambda=8\sim16m$ の任意の成分を抽出することが困難で、さらに次の階層では $\lambda=16\sim32m$ と解析不能な周波数帯がさらに増加する。この周波数帯は自動車のばね上の固有振動数に相当する領域であり (図-3)、実務上必要な周波数帯の範囲内で特定の波長以外の検出が不可能ということは大きな欠点である。

さらに路面プロファイルデータを測定する際に測定車の検出特性が掛かるため、水準測量のように絶対基準によって得られた波形とは異なる波形が入力波形として与えられるため、車の振動加速度との周波数応答関数を求める場合などは絶対基準と同等の波形となるよう特殊な

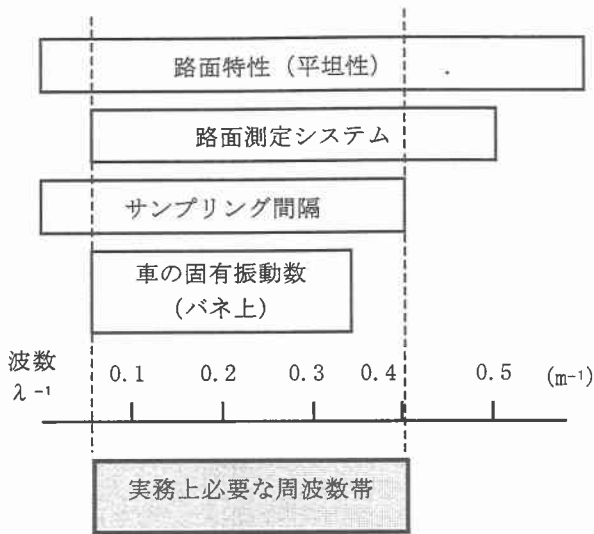


図-3 実務上必要な周波数帯の設定

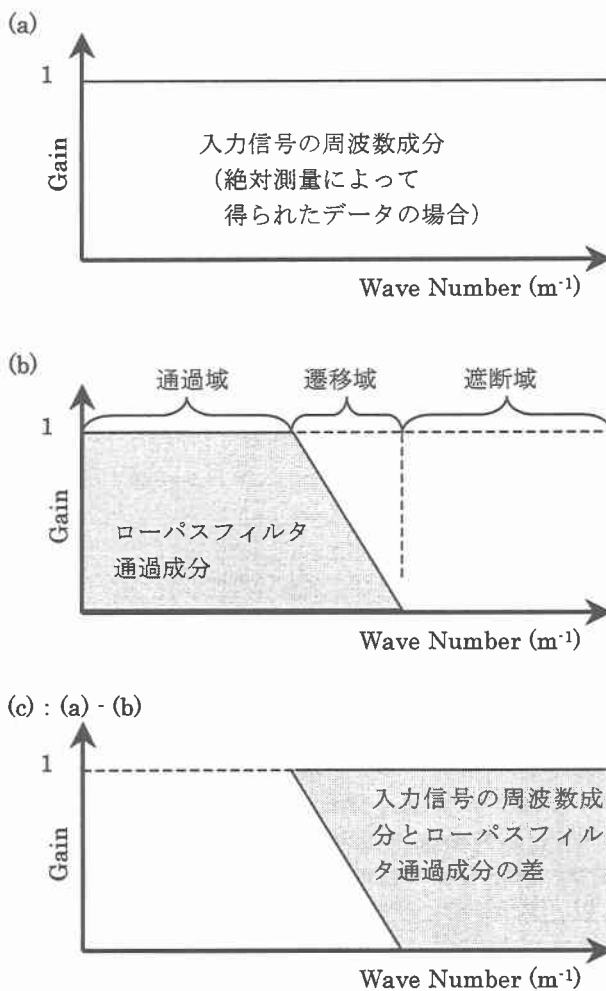


図-4 フィルタ特性及びデータ処理の考え方

バンドパスフィルタによる演算補正を要する。多重解像度解析は演算補正した後の波形を用いるため、補正により損失する周波数情報については解析できない。

そこで、多重解像度解析の式(8)の概念を取り入れ、

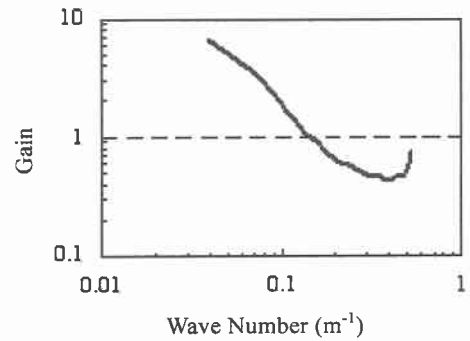


図-5 特殊なバンドパスフィルタの例

一般的なデジタルフィルタを用いることによって、 $c_{m,k}$ 及び $d_{m,k}$ の種類に依存することなく、入力データに演算補正を施しつつ任意の周波数帯を抽出することができるデータ処理手法についての考察を行った。

4. デジタルフィルタの設計

前述の諸条件を満足するデータ処理方法として、基本的に用いるフィルタはローパスフィルタとし、フィルタの振幅特性図とその考え方を図-4に示す。式(8)の概念のように、入力信号にローパスフィルタ演算を施し、入力波形とフィルタ通過成分の差をハイパスフィルタ成分とみなし、以下必要に応じこの手順を繰り返すこととした。多重解像度解析と同様にデータは完全再構成されるほか、通過域、遷移域の周波数帯はフィルタの安定性を損なわない限り任意に設定できる。また通過域の Gain(絶対測量によって得られたデータとの振幅比)は1であり、入力データの成分を歪めずに出力することができる(多重解像度解析の場合の Gain は $c_{m,k}$ 及び $d_{m,k}$ の種類に依存した値となる)。

入力波形に測定車の検出特性の影響が見られる場合のデータ処理方法としては、検出特性の逆数の値とした特殊なバンドパスフィルタを作成する(図-5)。ここで必要な周波数帯は任意に設定することができる。

5. デジタルフィルタによる信号処理と

ウェーブレットによる多重解像度解析の比較本章では、図-6に示す入力信号を用いて本報告で提案

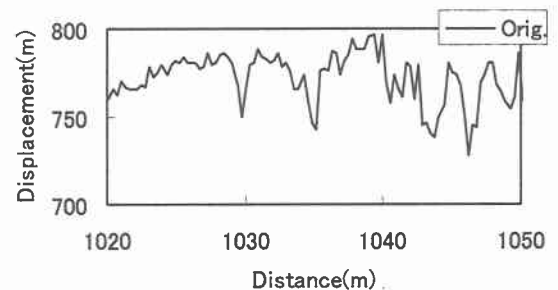


図-6 適用例 (入力信号)

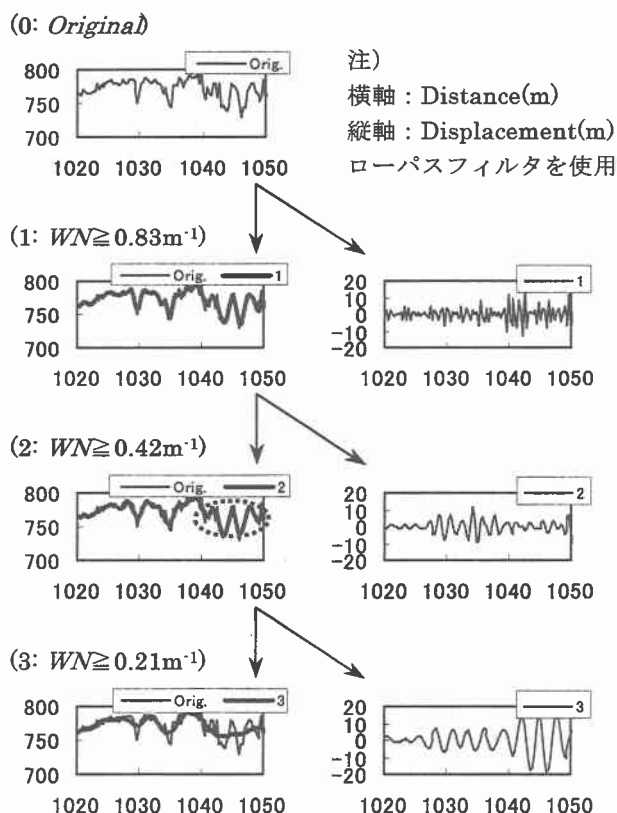


図-7 デジタルフィルタによる信号処理

するデータ処理方法と多重解像度解析との比較を行った(図-7、図-8)。なおデジタルフィルタによる信号処理の場合は帯域を任意に設定することが可能であるが、図-7では多重解像度解析との比較のため、ウェーブレットの解像度に対応させている。

図-7及び図-8を比較すると、ローパスフィルタ通過成分は概ね同様な傾向が見られる。しかし細部には違いが生じており、顕著な例として図-7、図-8の(3)に点線で示した。

図-8の多重解像度解析については、 $c_{m,k}$ のフィルタ特性によって入力信号から成分の一部が前段階の処理で既に切り離されているため、差である $d_{m,k}$ (図の右側)の値が大きい。

一方、図-7については、ローパスフィルタが入力信号に追従しており、多重解像度解析のように $c_{m,k}$ 及び $d_{m,k}$ の種類に依存することなく出力されていることがわかる。さらに、前述のように帯域を任意に設定することが可能であることを考慮すると、路面プロファイルデータ処理にあたってはウェーブレット(多重解像度解析)の概念を導入したデジタルフィルタによる信号処理が実務上有効であると思われる。

6. まとめ

本報告から得られた知見を整理すると次のようになる。

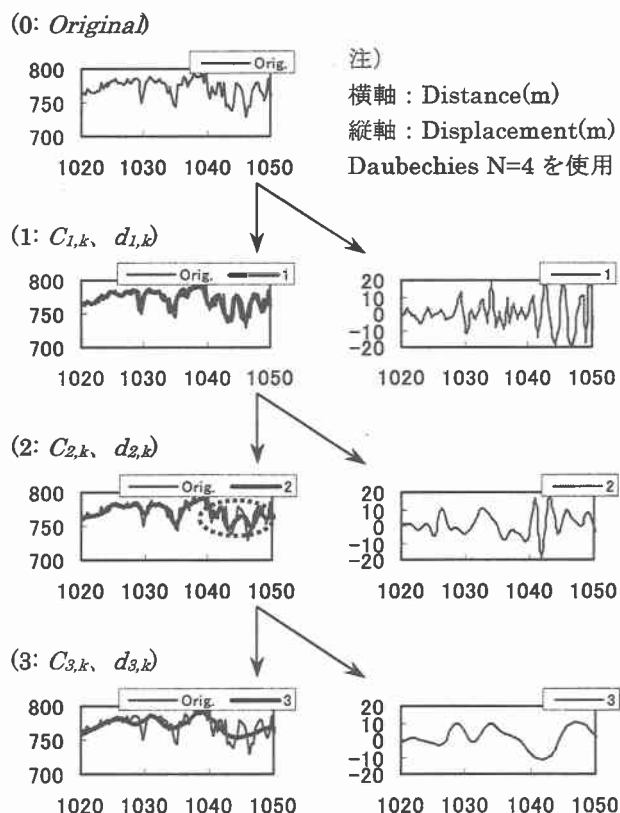


図-8 ウェーブレットによる多重解像度解析

- ウェーブレットによる多重解像度解析の結果得られる出力波形は、 $c_{m,k}$ 及び $d_{m,k}$ の種類に依存する。このことは長所とも考えられるが、実務上限られた周波数帯域でデータのノイズ除去や異なる性質を持つ信号の分離・比較を行う場合、 $c_{m,k} \cdot d_{m,k}$ のフィルタ特性に重み付けをする必要性はないと考えられ、ローパスフィルタ通過成分はGain=1となることが望ましい。この点を踏まえると、路面プロファイルデータを処理する場合、デジタルフィルタを用いたほうがよい。
- 多重解像度解析では、解像度が 2^n の組み合わせとなるため、任意の周波数帯域を設定することが困難であるが、デジタルフィルタによる信号処理では容易に設定することができる。
- 入力波形に測定車の検出特性の影響が見られる場合、特殊なバンドパスフィルタによって周波数帯域に重み付け演算処理を行いつつフィルタリングすることができ、計算上合理的である。

参考文献

白川龍生、川村彰、高橋清、中辻隆：ウェーブバンドを考慮した路面データ処理手法について・EVEN データを用いて、舗装工学論文集、第7巻、15-1~12、2002。