

第二世代ウェーブレット変換を用いた 路面凹凸検出方法の基礎的研究

白川龍生¹・川村 彰²・中辻 隆³・上浦正樹⁴

¹正会員 北見工業大学 工学部土木開発工学科 (〒090-8507 北見市公園町 165)

²正会員 工博 北見工業大学助教授 工学部土木開発工学科 (〒090-8507 北見市公園町 165)

³正会員 工博 北海道大学大学院助教授 工学研究科 (〒060-8628 札幌市北区北 13 条西 4 丁目)

⁴正会員 工博 北海学園大学教授 工学部土木工学科 (〒063-0926 札幌市中央区南 26 条西 11 丁目)

路面性状は、車と路面の相互作用に関わる諸問題と密接に関わるため、評価の基礎となる路面プロファイルデータ処理方法の確立は今日の重要な課題となっている。本研究は、路面プロファイルデータから特徴的な形状を抽出するためのデータ処理方法として、パラメータ学習機能を有する第二世代ウェーブレット変換 (SWT) に着目し、PIARC EVEN データを用いて特徴的な形状の学習及び検出方法について基礎的な研究を行なった。その結果、SWT は学習したトレーニング信号との相関係数がデータに重み付けされるため、これまで振幅が小さく不明瞭だった波形をクローズアップできる一方、形状が大きく異なる成分は特徴点として検出しない。これは路面管理目的に応じた基底関数を設計する上で重要な性質と考えられる。

Key Word : Second Generation Wavelets , Learning and Detection Theory , Road Roughness

1. はじめに

路面性状は、車の操縦性、乗り心地など道路利用者の安全性及び快適性に関わる諸問題と密接に関わっており、路面性状評価の基礎となる路面縦断プロファイル (以下、「路面プロファイル」という) データ処理方法の確立は極めて重要な課題である^{1),2)}。

路面プロファイル上に局在する凹凸を識別する方法としては、発生位置及び空間周波数情報を同時に識別できるウェーブレット変換 (Wavelet Transform, 以下、「WT」という) が注目されるようになった²⁾。

従来のスペクトル解析では、空間領域のデータを周波数領域へ変換する際に路面凹凸の発生位置に関する情報が不明確となるほか、局在する路面凹凸の影響により、平均的な路面プロファイル特性が歪められて表現される場合が見受けられる^{2),3)}。

WT の長所は、(1) 周波数領域で信号を表現するフーリエ変換の性質に加え、変動の空間的推移も同時に把握でき、(2) 初期の段階で決定する分解・再構成アルゴリズムが全計算過程で同一であり、高速演算が可能なことである。このため、WT は音響・画像信号処理をはじめ、数多くの工学的分野で用いられるようになった (ISO 15444 で規格された画像

圧縮技術の JPEG 2000 は代表的な応用例である)。路面性状評価への WT の適用に関する研究は、近年精力的に行なわれており、従来困難であった路面プロファイル上に局在する損失データの処理、評価に有効であることが示されている^{2),4)-6)}。

一方、WT の短所として、(1) 空間領域 (位置情報) の分解性能は高いが、周波数領域の分解性能は高周波帯域で急速に劣化するため、特定の周波数成分の空間領域における変化は検出が困難であり、(2) 基底関数と呼ばれる特殊な信号の構成要素に分解するため、種類の選択方法によっては出力結果 (形状及び特徴点の検出など) が大きく異なることが挙げられる。このうち (1) については、高周波成分の分解性能を高めたウェーブレットパケット変換が開発されており、必要によりこの方法を用いるとよい⁵⁾。(2) については、必要なデータの性質に応じた基底関数を設計または選択することによって問題を回避できる。しかし、基底関数は直交条件 (モーメント・コンディション) など、様々な制約条件を満足する必要があるため、設計は容易ではない。また Daubechies など広く知られている基底関数の場合、路面凹凸の形状に類似したものは少なく、現状では最適な基底関数の選択についても困難である^{2),4)-6)}。

上記のように，路面性状評価における WT の適用については基底関数の最適化が最大の課題であったが，1996 年に W. Sweldens によって従来の WT にパラメータの学習機能を付加した Lifting Scheme 法が発表されて以降，これまでの WT の問題点が解消されつつある⁷⁾．特に高野らの研究によって自由パラメータを導入した WT が「第二世代ウェーブレット変換」(以下，「SWT」という)として体系化され，基底関数の最適化処理が飛躍的に向上した^{8),9)}．

本研究は，SWT を路面維持管理へ適用するための基礎的な研究を行なった．SWT の有効性を検証するため，(1) 路面プロファイルデータ(特徴的な路面凹凸を含む)から自由パラメータを学習し，(2) 特徴的な形状と類似した成分を検出する方法について考察した．また，特徴点検出のための SWT の別解法を考案したので，併せて報告する．なお，研究に用いた路面プロファイルデータは，1998 年に世界道路協会(以下，「PIARC」という)による国際共同試験(以下，「EVEN」という)結果の一部を用いた¹⁰⁾⁻¹²⁾．データ処理は Wolfram Research 社の Mathematica を用いた¹³⁾．

2. 第二世代ウェーブレット変換の概要

(1) 第二世代ウェーブレット変換とは^{2),4)-9)}

WT は，入力データに含まれる周波数帯域(角周波数 0~ の領域)を低周波及び高周波分解フィルタによって 2 等分し，同時にダウンサンプリング操作によって解像度を 1/2 倍する演算を低域通過成分について展開する演算方法である．

入力信号(c_l^1)は，分解フィルタによって式(1)，(2)のように分解される．

$$\hat{c}_k^0 = \sum_l \tilde{h}_{k,l}^{old} c_l^1 \quad (1)$$

$$\hat{d}_m^0 = \sum_l \tilde{g}_{m,l}^{old} c_l^1 \quad (2)$$

ここに \hat{c}_k^0 : 低周波成分

\hat{d}_m^0 : 高周波成分

$\tilde{h}_{k,l}^{old}$: 低周波分解フィルタ

$\tilde{g}_{m,l}^{old}$: 高周波分解フィルタ

l : 解像度(周波数)パラメータ

k : 位置パラメータ(低周波成分)

m : 位置パラメータ(高周波成分)

$\tilde{h}_{k,l}^{old}$ 及び $\tilde{g}_{m,l}^{old}$ は，基底関数の種類により性能が異なる．

c_l^1 は \hat{c}_k^0 ， \hat{d}_m^0 より以下のように再構成することができる．

$$c_l^1 = \sum_k h_{k,l}^{old} \hat{c}_k^0 + \sum_m g_{m,l}^{old} \hat{d}_m^0 \quad (3)$$

ここに $h_{k,l}^{old}$: 低周波復元フィルタ

$g_{m,l}^{old}$: 高周波復元フィルタ

フィルタには以下の条件が与えられる．これを双直交条件(biorthogonal conditions)という．

$$\begin{aligned} \sum_l h_{k,l}^{old} \tilde{h}_{k,l}^{old} &= \delta_{kk}, & \sum_l g_{m,l}^{old} \tilde{h}_{k,l}^{old} &= 0, \\ \sum_l h_{k,l}^{old} \tilde{g}_{m,l}^{old} &= 0, & \sum_l g_{m,l}^{old} \tilde{g}_{m,l}^{old} &= \delta_{mm} \end{aligned} \quad (4)$$

SWT は，上述の WT に自由パラメータを与えたものであり，次式によって定義される．

$$\begin{aligned} h_{k,l} &= h_{k,l}^{old} + \sum_m \tilde{s}_{k,m} g_{m,l}^{old} \\ \tilde{h}_{k,l} &= \tilde{h}_{k,l}^{old} \\ g_{m,l} &= g_{m,l}^{old} \\ \tilde{g}_{m,l} &= \tilde{g}_{m,l}^{old} - \sum_m \tilde{s}_{k,m} \tilde{h}_{k,l}^{old} \end{aligned} \quad (5)$$

ここに $h_{k,l}$: 新しい低周波復元フィルタ

$\tilde{h}_{k,l}$: 新しい低周波分解フィルタ

$g_{m,l}$: 新しい高周波復元フィルタ

$\tilde{g}_{m,l}$: 新しい高周波分解フィルタ

$\tilde{s}_{k,m}$: 自由パラメータ

SWT は， $\tilde{s}_{k,m}$ を調整することにより，信号に適應する新しいフィルタを構成することができる．双直交条件は以下ようになる．

$$\begin{aligned} \sum_l h_{k,l} \tilde{h}_{k,l} &= \delta_{kk}, & \sum_l g_{m,l} \tilde{h}_{k,l} &= 0, \\ \sum_l h_{k,l} \tilde{g}_{m,l} &= 0, & \sum_l g_{m,l} \tilde{g}_{m,l} &= \delta_{mm} \end{aligned} \quad (6)$$

(2) 特徴点の検出と自由パラメータの学習方法^{8),9)}

SWT は，信号の特定部分(特徴的な形状)を検出するため， $\tilde{s}_{k,m}$ を用いて特徴点における高周波成分(d_m^0)を 0 とする演算を行なう．

WT における \hat{d}_m^0 の絶対値から d_m^0 の絶対値を差引くと、特徴的な形状と異なる箇所では値が小さくなるが、類似箇所ではほとんど変化しない。SWT は、この重み付けによって特徴的な形状の箇所を容易に検出することができる（式(7)）。

$$I_m = \left| \hat{d}_m^0 \right| - \left| d_m^0 \right| \quad (7)$$

ここに I_m : $\left| \hat{d}_m^0 \right|$ と $\left| d_m^0 \right|$ の差

ここで、 d_m^0 は式(8)によって求める。

$$\begin{aligned} d_m^0 &= \sum_l \tilde{g}_{m,l} c_l^1 \\ &= \sum_l \tilde{g}_{m,l}^{old} - \sum_k \tilde{s}_{k,m} \tilde{h}_{k,l}^{old} c_l^1 \\ &= \hat{d}_m^0 - \sum_k \hat{c}_k^0 \tilde{s}_{k,m} \end{aligned} \quad (8)$$

特徴点では、 d_m^0 が 0 となるため、

$$d_m^0 = \hat{d}_m^0 - \sum_k \hat{c}_k^0 \tilde{s}_{k,m} = 0 \quad (9)$$

$\tilde{s}_{k,m}$ は、特徴的な形状を有するトレーニング信号（以下、「TS」という）を $v = 2n$ 個用意し、式(10)によって学習すると効率的である。

$$\begin{aligned} \hat{c}_k^{0,v} \tilde{s}_{k,m} - \hat{d}_m^{0,v} &= 0, \quad v = 1, 2, \dots, 2n \\ \hat{c}_k^{0,v} &= \sum_l \tilde{h}_{k,l}^{old} c_l^{1,v}, \quad \hat{d}_m^{0,v} = \sum_l \tilde{g}_{m,l}^{old} c_l^{1,v} \end{aligned} \quad (10)$$

さらに、式(10)に $\tilde{g}_{m,l}$ の総和が 0 となる条件を加える。すなわち、

$$\sum_l \tilde{g}_{m,l} = \sum_l \tilde{g}_{m,l}^{old} - \sum_{k=m-n}^{m+n} \tilde{s}_{k,m} \tilde{h}_{k,l}^{old} = 0$$

ここで、 $\tilde{g}_{m,l}^{old}$ が $\sum_l \tilde{g}_{m,l}^{old} = 0$ と $\sum_l \tilde{h}_{k,l}^{old} = const.$ (定数) を満足させるならば、この条件は式(11)と等しい。

$$\sum_{k=m-n}^{m+n} \tilde{s}_{k,m} = 0 \quad (11)$$

式(10)及び式(11)から、式(12)を導出することができる。式(12)を展開することにより、 $\tilde{s}_{k,m}$ を求

めることができる。

$$\begin{aligned} \begin{matrix} \hat{c}_{m-n}^{0,1} & \hat{c}_{m-n+1}^{0,1} \\ \hat{c}_{m-n}^{0,2} & \hat{c}_{m-n+1}^{0,2} \end{matrix} & \begin{matrix} \hat{c}_{m+n}^{0,1} & \tilde{s}_{m-n,m} \\ \hat{c}_{m+n}^{0,2} & \tilde{s}_{m-n+1,m} \end{matrix} & \begin{matrix} \hat{d}_m^{0,1} \\ \hat{d}_m^{0,2} \end{matrix} \\ & & & = \\ \begin{matrix} \hat{c}_{m-n}^{0,2n} & \hat{c}_{m-n+1}^{0,2n} \\ 1 & 1 \end{matrix} & \begin{matrix} \hat{c}_{m+n}^{0,2n} & \tilde{s}_{m+n-1,m} \\ 1 & \tilde{s}_{m+n,m} \end{matrix} & \begin{matrix} \hat{d}_m^{0,2n} \\ 0 \end{matrix} \end{aligned} \quad (12)$$

(3) 特徴点の検出手順^{8),9)}

特徴点の検出手順を整理すると以下ようになる。

- 1) \hat{d}_m^0 の算出（式(2)）
- 2) データの分析目的に応じた TS を選定
- 3) $\tilde{s}_{k,m}$ を学習（式(12)）
- 4) d_m^0 の算出（式(8)）
- 5) I_m の算出（式(7)）

(4) 特徴点検出の別解法^{8),9)}

本研究では、 $\tilde{g}_{m,l}$ を設計することなく、特徴点を検出する別解法を以下のように考案した。

式(8)を考察すると、WT によって \hat{d}_m^0 及び \hat{c}_k^0 を求め、2.(2)の手順により $\tilde{s}_{k,m}$ が得られれば、 c_l^1 の各点で d_m^0 を求めることができる。このため、実用的な演算レベルの場合、 $\tilde{g}_{m,l}$ の構成は不要と思われる。

また、 d_m^0 の積分演算は一般的な表計算ソフトウェアで実現でき、このことは式(7)の計算を行なう上でも有利と考えられる。したがって、特徴点の検出を目的とする場合は、本節で提案する別解法が実用的と思われる。

3. 路面凹凸の検出方法

本章では、SWT を用いた自由パラメータの学習方法及び TS に類似した路面凹凸の検出方法について考察する。

(1) 研究に用いるデータ

本研究では、PIARC によって公開されている EVEN 試験データの一部を用いた。EVEN 試験とは、

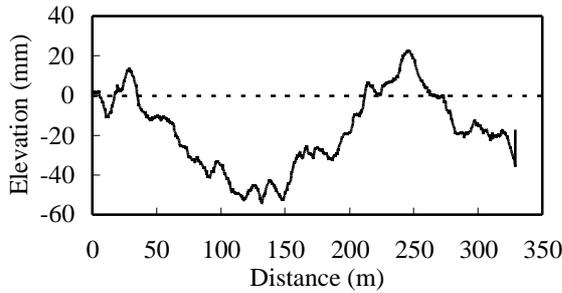


図-1 入力信号 c_l^1

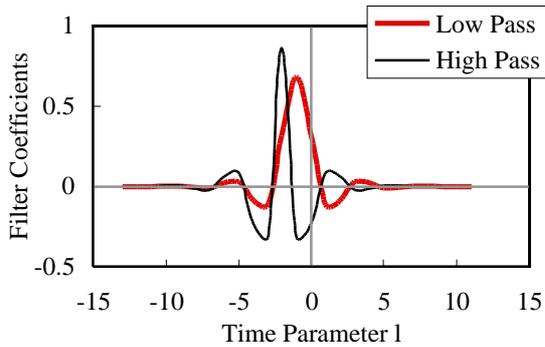


図-2 基底関数 (Spline N=2)

各種プロファイラから得られた結果の調和を目的として実施された試験である．本研究は日本で行われた試験における区間 No. 3 の真のプロファイル（以下、「True Profile」という）を用いた¹⁰⁾⁻¹²⁾．

True Profile は、水準測量、The Rolling Dipstick 及び the Static Dipstick によって構成されており、サンプリング周波数は Wave Number（以下、「WN」という） $=20\text{m}^{-1}$ と高いため、非常に幅広い周波数情報が含まれている．

そこで本研究では、一例として、True Profile から乗用車のパネ下固有振動数に相当する周波数帯域（10～17Hz：自動車の走行安全性に関する周波数帯域）を抽出し、この中から TS を選出することとした¹⁴⁾．また、事前処理として WT による 4 段階の成分分解を行い、一定の周波数帯域($\text{WN}=0 \sim 1.25\text{m}^{-1}$)を抽出した．この成分を c_l^1 とし、図-1 に示す．また、基底関数は双直交基底である Spline N=2 を用いた（図-2）^{2),4),5)}．

(2) 自由パラメータの学習

特徴点を抽出するため、入力信号 c_l^1 を式(1)及び式(2)によって \hat{c}_m^0 、 \hat{d}_m^0 に分解する． \hat{d}_m^0 を図-3 に

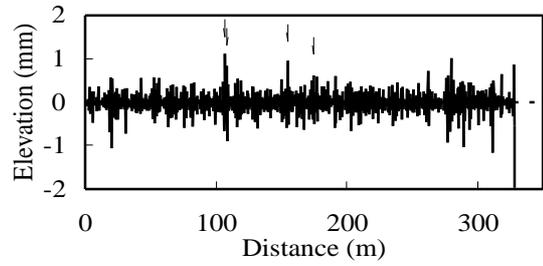


図-3 高周波成分 \hat{d}_m^0 (矢印は $\tilde{s}_{k,m}$ の学習区間)

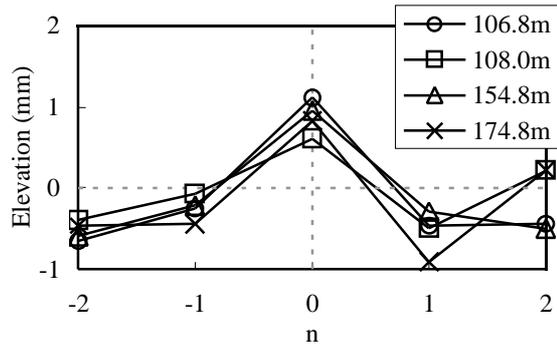


図-4 トレーニング信号 TS ($\gamma_{m-2}^n \sim \gamma_{m+2}^n$)

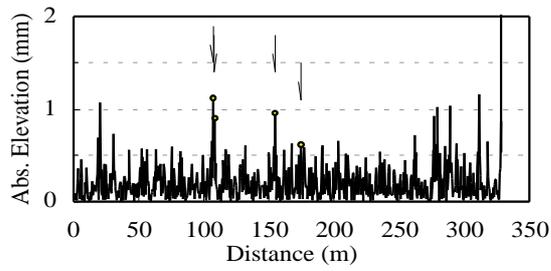
表-1 学習した自由パラメータ $\tilde{s}_{k,m}$

k	$\tilde{s}_{k,m}$
m-2	-1.336
m-1	2.980
m	-2.797
m+1	1.746
m+2	-0.594

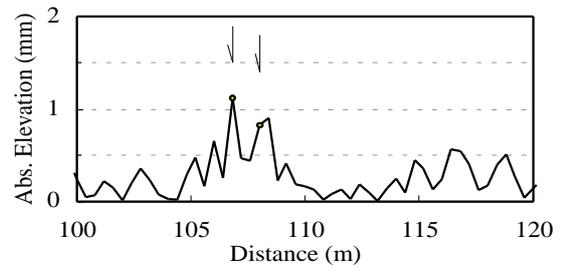
示す．本研究では、 \hat{d}_m^0 の振幅（波高）が大きい地点を上位 10 箇所抽出し、この地点付近の波形が類似している 4 箇所 ($v=1,2,3,4$) 付近を TS として設定した（図-4）^{8),9)}．式(12)へ代入すると以下のようになる．

$$\begin{array}{cccccc}
 \hat{c}_{m-2}^{0,1} & \hat{c}_{m-1}^{0,1} & \hat{c}_m^{0,1} & \hat{c}_{m+1}^{0,1} & \hat{c}_{m+2}^{0,1} & \tilde{s}_{m-2,m} & \hat{d}_m^{0,1} \\
 \hat{c}_{m-2}^{0,2} & \hat{c}_{m-1}^{0,2} & \hat{c}_m^{0,2} & \hat{c}_{m+1}^{0,2} & \hat{c}_{m+2}^{0,2} & \tilde{s}_{m-1,m} & \hat{d}_m^{0,2} \\
 \hat{c}_{m-2}^{0,3} & \hat{c}_{m-1}^{0,3} & \hat{c}_m^{0,3} & \hat{c}_{m+1}^{0,3} & \hat{c}_{m+2}^{0,3} & \tilde{s}_{m,m} & \hat{d}_m^{0,3} \\
 \hat{c}_{m-2}^{0,4} & \hat{c}_{m-1}^{0,4} & \hat{c}_m^{0,4} & \hat{c}_{m+1}^{0,4} & \hat{c}_{m+2}^{0,4} & \tilde{s}_{m+1,m} & \hat{d}_m^{0,4} \\
 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & \tilde{s}_{m+2,m} & 0
 \end{array} = \hat{d}_m^0$$

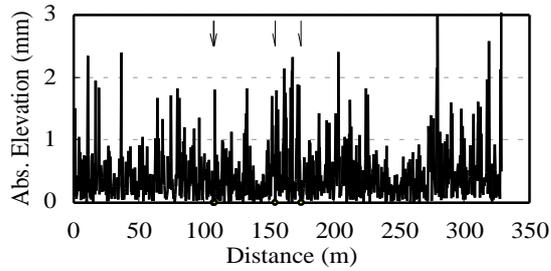
$\tilde{s}_{k,m}$ の算出結果を表-1 に示す．



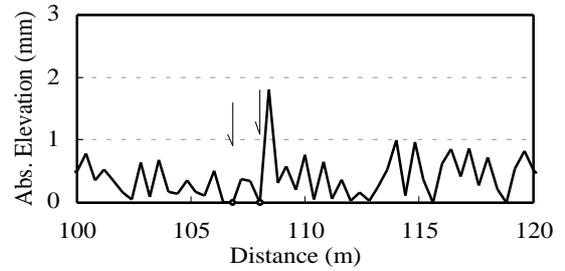
(a.1) $|\hat{d}_m^0|$



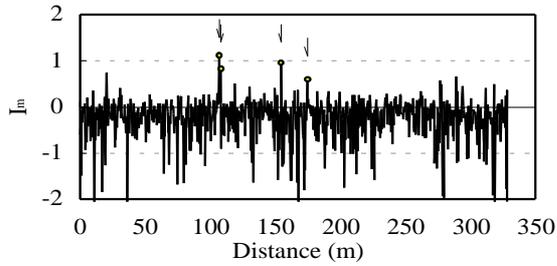
(a.2) $|\hat{d}_m^0|$ (一部拡大)



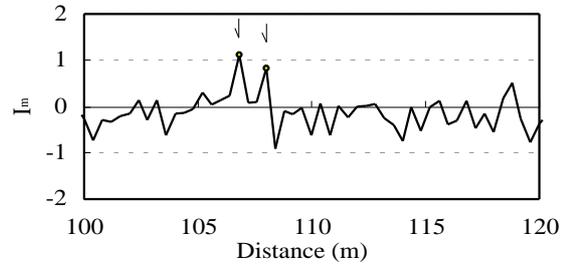
(b.1) $|d_m^0|$



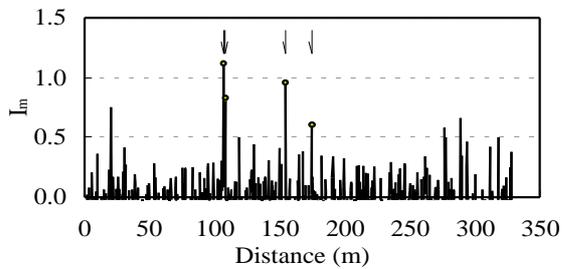
(b.2) $|d_m^0|$ (一部拡大)



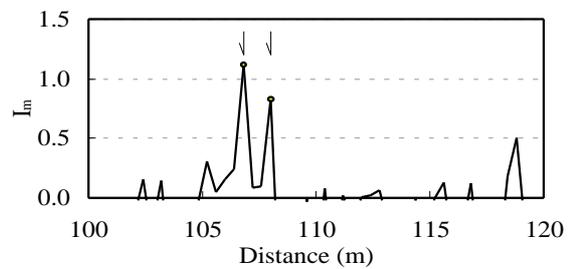
(c.1) $I_m = |\hat{d}_m^0| - |d_m^0|$



(c.2) I_m (一部拡大)



(d.1) $I_m - 0$



(d.2) $I_m - 0$ (一部拡大)

図-5 特徴点の検出

(3) 特徴点の検出

$\tilde{s}_{k,m}$ が求まると、2.(4)の方法を用いて特徴点を検出することができる(図-5)。図中、TSとして設定した箇所を矢印及び印で示した。

図-5(a.1), (a.2)は、 $|\hat{d}_m^0|$ の波形を示しており、これは従来のWTの演算結果と同値である。始点からの距離260~320m付近では、振幅が0.5mm以上の

の箇所が多く見受けられる(図-5(a.1))。

図-5(b.1), (b.2)は、 $\tilde{g}_{m,l}$ を用いて算出した $|d_m^0|$ の波形である。TSに類似した箇所では、 $|d_m^0|$ の値が0程度である。

図-5(c.1), (c.2)は、 $|d_m^0|$ と $|d_m^0|$ の差(I_m)を示しており、この演算によってTSと類似する箇所

がクローズアップされている。

図-5(d.1), (d.2)は, $I_m = 0$ の値を示しており, この値が大きいくほど TS との相関が高い。図-5(a.1)において, 始点からの距離 260~320m 付近では $|\hat{d}_m^0|$ の値は大きい, TS との相関が低い, 図-5(d.1)では TS 箇所 비해 I_m が小さな結果となった。

従来の WT では, 例えば橋りょう部の段差とポットホールなど, 路面損傷データの周波数帯域が同程度である場合, 一般的な基底関数ではこれらを識別することが困難である。したがって, 特徴的なデータのみを抽出する場合は, 用途に応じた基底関数を設計しなければならないが, 設計は様々な制約条件を満たさなければならない。また段差などの形状は一概に規定することが難しい。

SWT は, $\tilde{s}_{k,m}$ を導入することによって特徴的な形状を学習することができ, 用途に応じたフィルタを作成できる。例えば, 路面プロファイルのデータベースを構築した場合など, 解析データの蓄積に応じた適宜フィルタを改良することも可能である。

(4) 路面管理における第二世代ウェーブレットの適用について

上記のように, SWT は特徴点の検出において, 従来法より優れている点が多いことがわかった。しかし本研究は基礎的な研究段階であるため, 今後以下の点について分析を進め, 路面管理における SWT の適用範囲などを整理する必要があると思われる。

- ・ 路面凹凸(段差, ポットホール, コルゲーションなど)を記録したプロファイルデータから複数の TS を抽出し, 2 章の方法によって事前に最適な $\tilde{s}_{k,m}$ を算出する。
- ・ 特徴点は I_m の大小によって判別するため, 特徴点とみなすための定量的な基準を設定する。
- ・ 初期段階における \hat{d}_m^0 は, WT 基底関数の種類によって値が異なるため, d_m^0 との組み合わせなどを考慮した最適な基底関数を設計する。

4. まとめ

本研究は, 路面凹凸の新しい分析ツールとして SWT に着目し, PIARC EVEN 試験データを用いて特徴点の学習及び検出について基礎的な考察を行なった。その結果, 従来の WT を補完する強力な分析ツールであることがわかった。SWT 理論を路面プロファイルデータ処理に応用した例としては, 本研究が国の内外を問わず最初の報告になると思われる。本研究で得られた知見を要約すると以下のようになる。

- ・ TS と形状が類似する箇所では, 出力成分がクローズアップされる一方, 形状が異なる場合は, 振幅の大きな場合でも特徴点として検出されず, 必要な成分のみが抽出された。これは, 路面管理目的に応じたフィルタを設計する上で, 非常に重要な性質である。
- ・ 新たに $\tilde{g}_{m,l}$ を設計することなく, 特徴点を検出する別解法を考案した。特徴点の検出を目的とする場合, 実用的にはこの方法で十分と考えられる。
- ・ SWT を道路維持管理に用いる場合, 段差など路面凹凸を記録したプロファイルデータから複数の特徴的な波形を抽出し, 路面管理目的に応じた自由パラメータを事前に算出するなど, SWT の適用方法を体系化する必要がある。

参考文献

- 1) 川村彰: 路面の評価(1)-平坦性に着目して-, 舗装, Vol.36, No.8, pp.31-35, 建設図書, 2001.
- 2) 川村彰, 姫野賢治, 藤原隆, 秋本隆: ウェーブレット解析の路面評価問題への適用性について, 舗装工学論文集, 第2巻, pp.23-28, 1997.
- 3) 日野幹雄: スペクトル解析, 朝倉書店, 1977.
- 4) 白川龍生, 川村彰, 上浦正樹, 中辻隆: 軌道メンテナンスへのウェーブレット理論の適用と可能性について, 土木計画学研究・講演集, 第26巻, No.194, 2002.
- 5) 榊原進: ウェーブレットビギナーズガイド, 東京電機大学出版局, 1995.
- 6) 芦野隆一, 山本鎮男: ウェーブレット解析 誕生・発展・応用, 共立出版, 1997.
- 7) W.Sweldens: The lifting scheme - A custom design construction of biorthogonal wavelets-, Appl. Comp. Harmon. Anal Vol.3(2), pp.186-200, 1996.
- 8) S.Takano, T.Minamoto, H.Arimura, K.Nijijima, T.Iyemori and T.Araki: Automatic detection of geomagnetic

- sudden commencement using lifting wavelet filters. LNAI 1721, Proc. of the Second International Conference on Discovery Science, pp.242-251, 1999.
- 9) S.Takano: Signal and Image Extraction by Lifting Wavelets, Doctorial Thesis, Kyushu University, 2001.
- 10) Akira Kawamura et al: Basic Analysis of measurement Data from Japan in PIARC EVEN Project, TRB 80th Annual Meeting, 2001.
- 11) 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プロファイリング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8巻, pp.15.1-12, 2002.
- 12) 川村彰: PIARC 路面性状国際共通試験報告,北の交差点,Vol.4, pp.34-35,北海道道路管理技術センター,1998.
- 13) Stephen Wolfram: The Mathematica Book Fourth Edition,東京書籍, 2000.
- 14) 景山克三,景山一郎: 自動車力学,理工図書,1984.

BASIC STUDY ON THE ROAD ROUGHNESS DETECTION METHOD USING THE SECOND-GENERATION WAVELET TRANSFORM

Tatsuo SHIRAKAWA , Akira KAWAMURA , Takashi NAKATSUJI and Masaki KAMIURA

This study proposes a method for detecting road roughness using the second-generation wavelet transform (SWT). New wavelet filters by the SWT are biorthogonal wavelet filters containing free parameters. This method is adopted to learn free parameters based on some training signals, which contain the localized road distress. Learning wavelet filters have the special feature of the training signals and an application of the filters for the test signals leads to detection of a characteristic waveform of the road roughness effectively.