

デジタル画像処理及びウェーブレット解析による冬期路面判別

Winter pavement discriminant based on digital image processing and wavelet analysis

北海学園大学大学院 ○学生員 平河内 雄也 (Hirakouchi Yuya)

北海学園大学工学部 正会員 武市 靖 (Takeichi Kiyoshi)

1. はじめに

北海道など積雪寒冷地での冬期間の路面状態は、日中と夜間では大きく異なることが多い。路面管理において路面状態を正確に判別することは、適確な管理方法とタイミングを決定する上で重要である。

本研究ではこれまで、面的な判別方法としてデジタル画像処理をとりあげ、室内実験と現場撮影の各種路面状態についてデジタル画像処理の検討結果についてまとめた¹⁾²⁾。

今回、輝度信号の時間-スケール解析を同時に行うことができるウェーブレット解析により路面判別を試みた。フーリエ変換による解析では周波数成分を求める際に空間情報が失われるのに対し、ウェーブレット解析では空間情報も得られるため、様々な路面状態が入り混じった画像に対しても路面状態と位置を求めることが可能であると考えられる。わだち路面の画像のような方向性のあるものに1次元ウェーブレット解析、複数の路面状態が不規則に点在するような画像に2次元ウェーブレット解析を用い、位置的な路面判別の可能性について検討した。

2. 現場路面の撮影

冬期路面状態の判別を行うため、現場路面の撮影を行った。撮影場所は、大学周辺の市道で細粒度舗装である。路面状態は写真-1のようにa乾燥(dry)、b湿潤(wet)、c氷板(ice-film)、d圧雪(compact-snow)の4種類、路面からの高さは70、100、150、200cmの4段階、フラッシュを焚いて各10枚ずつ撮影した。撮影時間帯は日中(10～13時)、天候は曇りである。

3. ウェーブレット解析

3.1 概要

統計学的パラメータによるテクニカル解析では、路面画像の画素の輝度分布に注目している。また、自己相関関数やパワースペクトルを求めるためのフーリエ変換による解析では輝度の不規則波形を一連の周波数成分と考えて、時間領域から周波数領域に変換して分析を行っている。

しかし、このようなフーリエ変換後の周波数領域では、時間的情報、すなわち空間的情報が完全に失われてしまう。

従って、例えば、路肩側に氷板路面、車道側に乾燥路面が混在する複合路面や、氷板によるわだちが車線方向に形成された路面などは、冬期間によく発生するが、上記の解析

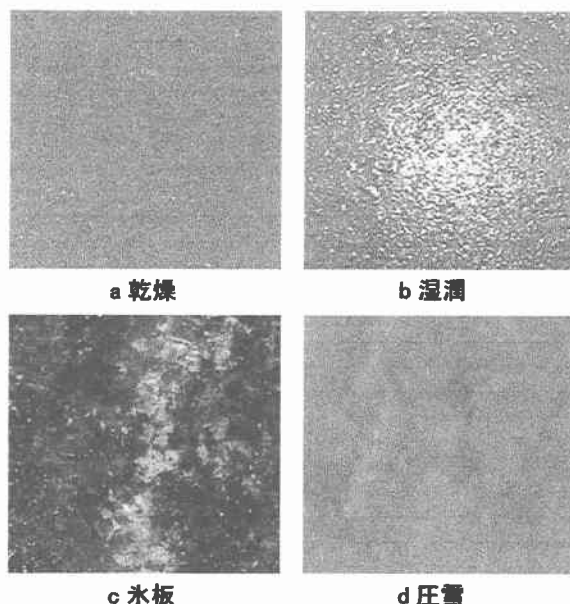


写真-1 現場路面の画像 (256×256pixel)
(高さh=200cm)

では、路面状態の空間的配置、局所的な存在までは知ることができない。

ウェーブレット解析では、アナライジング ウェーブレットをスケールを変えながらシフトさせ信号との相似性を計り、画像の輝度信号の時間-スケール解析を同時に行うことができるので、画像の周波数情報のみならず時間的(位置的)情報を得ることができる³⁾。

本研究では、各路面状態別の輝度の違いを表す低周波成分、一定路面内での輝度の乱れを表す高周波成分に着目してみた。試みとして、わだち路面画像のような方向性のあるものの1次元輝度信号に1次元ウェーブレット解析、複数の路面状態が不規則に点在するような画像の2次元輝度信号に2次元ウェーブレット解析を用い、位置的な路面判別の可能性について検討した。

また、1次元ウェーブレット解析には連続ウェーブレット変換と離散ウェーブレット変換がある。前者はアナライジング ウェーブレットをスケールを変えながら1pixelずつシフトさせる。後者はアナライジング ウェーブレットの幅だけシフトさせながら解析を行うので前者に比べると解析時間も容量も少なくてすむ。

3.2 1次元ウェーブレット変換

(1) 連続ウェーブレット変換

ウェーブレット関数を $\phi(t)$ と表すと、 $\phi(t)$ を t 軸上で平行移動(シフト)、拡大縮小(ダイレーション)して、基底関数 $\phi_{a,b}(t)$ を生成できる。 $\phi_{a,b}(t)$ は(1)式で表される。

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (1)$$

ここで、 a は拡大縮小、 b は平行移動のパラメータである。 $\phi_{a,b}(t)$ と信号 $f(t)$ との内積がウェーブレット変換で(2)式で表され、出力された数値は信号 $f(t)$ とアナライジング ウェーブレット $\phi(t)$ の相似性の度合いを表すウェーブレット展開係数と呼ばれる。

$$(W_\phi f)(b,a) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \overline{\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)} dt \quad (2)$$

(2) 離散ウェーブレット変換

信号の効率的な時間周波数解析を得るには、座標を離散化する離散ウェーブレット変換を用いるとよい。離散ウェーブレットでは、(2)式は(3)式で表される。

ここで、 j はレベル、 k はシフト量である。

$$\psi_{j,k}(t) = 2^{-\frac{j}{2}} \psi(2^{-j}t - k) \quad (3)$$

信号 $f(t)$ をスケーリング関数 $\phi(t)$ 関数の一次結合で近似する。 $\phi(t)$ の一次結合は、近似関数 $f_0(t)$ として、(4)式で表される。

信号 $f(t)$ はレベル 1 から任意のレベルまでのウェーブレットと $\phi(t)$ との一次結合の和で表される。

$$f_0(t) = \sum_k s_k \phi(t - k) \quad (4)$$

s_k は、区間 $[k, k+1]$ における信号 $f(t)$ の平均値であり、(5)式で表される。

$$s_k = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \overline{\phi(t-k)} dt = \int_k^{k+1} f(t) dt \quad (5)$$

ウェーブレットと同様、このスケーリング関数の整数シフトおよびダイレーションを考え、 $\phi_{j,k}$ を、(6)式で定義する。また、 $\phi_{j,k}$ を用いて、レベル j の近似関数 $f_j(t)$ を(7)式で表す。

$$\phi_{j,k}(t) = 2^{-\frac{j}{2}} \phi(2^{-j}t - k) \quad (6)$$

$$f_j(t) = \sum_k s_k^{(j)} \phi_{j,k}(t) \quad (7)$$

$s_k^{(j)}$ はスケーリング係数であり、スケーリング関数 $\phi_{j,k}$ との内積で求められる。

$f_j(t)$ は $f_0(t)$ から情報が欠落した状態であり、この欠落部分 $g_j(t)$ が高周波成分である。したがって、 $f_0(t)$ は、多重解像度近似(MRA)として(8)式で復元される。

$$f_0(t) = f_j(t) + g_j(t) \quad (8)$$

図-1 は、本研究で用いた信号 s の分解モデルである。 s から高周波成分 d_1 を除くと、低周波成分 a_1 が得られ、 a_1 から d_2 を除くと a_2 が得られる。逆に、 a_3 、 d_1 、 d_2 、 d_3 を組み合わせると、信号 s が再構成される。

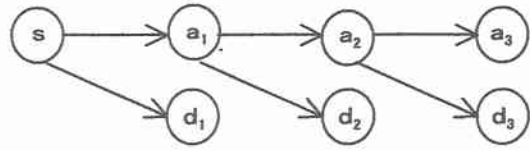
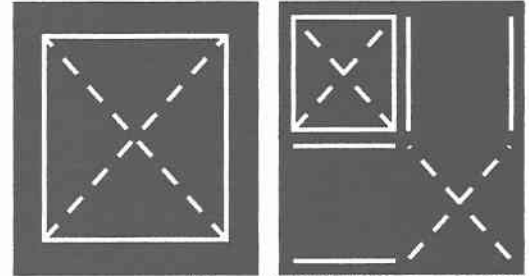
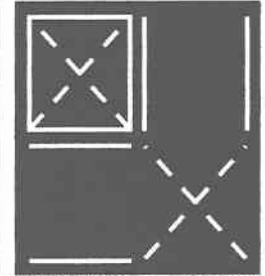


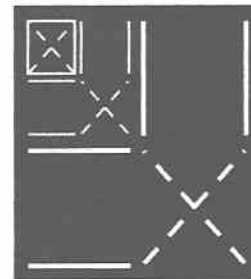
図-1 MRA における信号の分解モデル



(a) 原画像 $s^{(0)}$



(b) 分解後の 4 つの成分



(c) $s^{(1)}$ をさらに 4 つに分解した図

図-2 2次元の多重解像度解析の例

3.3 2次元ウェーブレット解析

解析画像を面で捉え画像全体についてウェーブレット解析を行うことで方向性のない路面であっても路面状態と位置的情報を得ることができる。図-2 は 2 次元多重解像度解析のモデルを示したものである。

図-2(a) は解析を行う原画像 $s^{(0)}$ である。図-2(b) は $s^{(0)}$ をレベル 1 のアナライジング ウェーブレットで分解した図であり、左上に分解後の低周波成分 $a^{(1)}$ 、左下、右上、右下はそれぞれ水平方向 $d^{(1,h)}$ 、鉛直方向 $d^{(1,v)}$ 、対角方向 $d^{(1,d)}$ にウェーブレット変換を行った後の高周波成分 $d^{(1,h)}$ 、 $d^{(1,v)}$ 、 $d^{(1,d)}$ である。図-2(c) は $a^{(1)}$ をレベル 2 のアナライジング ウェーブレットでさらに 4 つの成分に分解した結果である⁴⁵⁾。

本研究では、検討例として 1 次元ウェーブレット解析、2 次元ウェーブレット解析ともにアナライジング ウェーブレットの中で最も基本的な Haar(ハール)による解析結果を示した。Haar は最も単純なマザーウェーブレットで、(9)式で表される。

$$\phi(t) = \begin{cases} 1 & (0 \leq t < 1/2) \\ 1 & (1/2 \leq t < 1) \\ 0 & (\text{その他}) \end{cases} \quad (9)$$

4. 解析結果

4.1 1次元ウェーブレット解析の結果

わだち路面などの方向性のある路面の解析を行うために、写真-1を張り合わせた画像-1のA-A断面について1次元ウェーブレット解析を行った。

(1) 連続ウェーブレット変換の結果

図-3は連続ウェーブレット変換の結果のうちスケール $a=10$ までを示したものである。内積が大きいほど白く、小さいほど黒くなる。スケール $a=10$ の部分に着目すると乾燥、湿潤、氷板、圧雪の各部分における絶対値の平均はそれぞれ1.580、5.695、3.935、1.580であり乾燥と圧雪の値は等しくなった。標準偏差はそれぞれ5.9140、92.786、27.423、7.637であった。

(2) 離散ウェーブレット変換の結果

画像-1のA-A断面における輝度信号の多重解像度解析の結果が図-4である。Original輝度信号をレベル4まで分解した。レベル1で分解した結果のd1に着目すると乾燥、湿潤、氷板、圧雪の各部分における絶対値の平均はそれぞれ1.154、14.731、6.869、1.008であり、標準偏差はそれぞれ1.539、22.965、9.080、1.217であった。

連続ウェーブレット変換、離散ウェーブレット変換ともに乾燥と圧雪は絶対値の平均、標準偏差はほぼ等しい値となり判別は困難であると考えられる。

4.2 2次元ウェーブレット解析の結果

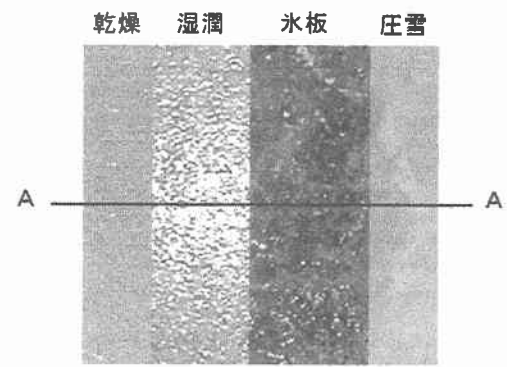
2次元ウェーブレット解析には写真-1の乾燥路面の画像に湿潤、氷板、圧雪路面の画像をそれぞれ貼り付けた画像-2を用いた。画像-2をレベル2まで分解した低周波成分 $a^{(1)}$ 、 $a^{(2)}$ 、レベル4まで水平方向に分解した高周波成分 $d^{(1,h)}$ 、 $d^{(2,h)}$ 、 $d^{(3,h)}$ 、 $d^{(4,h)}$ を図-5に示した。

画像-2では乾燥部分と圧雪部分では輝度に大きな違いが見られず判別が困難であり、図-5の低周波成分 $a^{(1)}$ 、 $a^{(2)}$ の結果では氷板以外の路面状態はほぼ白一色となり判別は不可能である。しかし、高周波成分 $d^{(1,h)}$ 及び $d^{(2,h)}$ では圧雪部分はほぼ黒一色であるのに対し、乾燥部分ではまばらではあるが、白い部分を確認できる。湿潤は数値の高い部分が目立ち白い部分が多くなっている。氷板も乾燥、圧雪に比べると白い部分が多く数値が高いと考えられる。

鉛直方向 $d^{(1,v)}$ 、 $d^{(2,v)}$ 及び対角方向 $d^{(1,d)}$ 、 $d^{(2,d)}$ においても同様なことが言える。

更に、路面状態が変わる境目を強調するためレベル1で水平方向、鉛直方向、対角方向にそれぞれ分解した高周波成分を合成した結果を図-6に示す。乾燥、湿潤、氷板、圧雪の各部分における絶対値の平均はそれぞれ2.308、16.840、4.513、0.761であり、標準偏差はそれぞれ2.257、16.376、4.616、0.660という結果が得られた。

2次元ウェーブレット解析による絶対値の平均、標準偏差の結果は各路面状態でそれぞれ特徴のある値が得られた。



画像-1 方向性のある画像

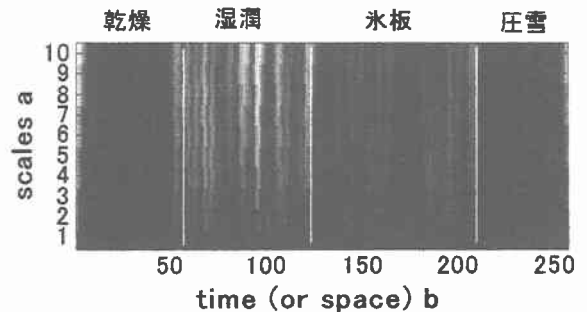


図-3 連続ウェーブレット変換の結果

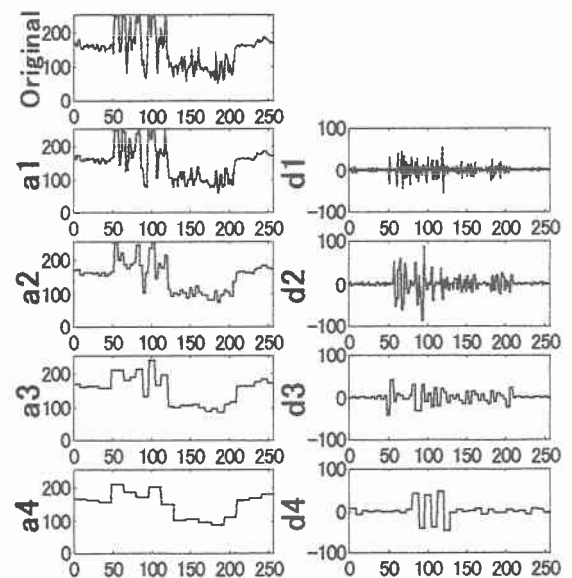
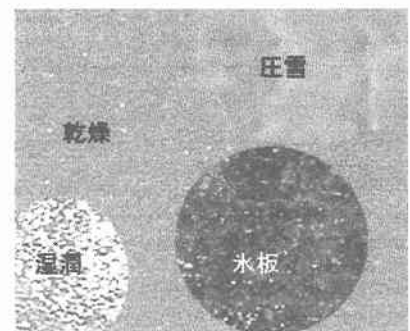


図-4 離散ウェーブレット変換の結果



画像-2 方向性のない画像

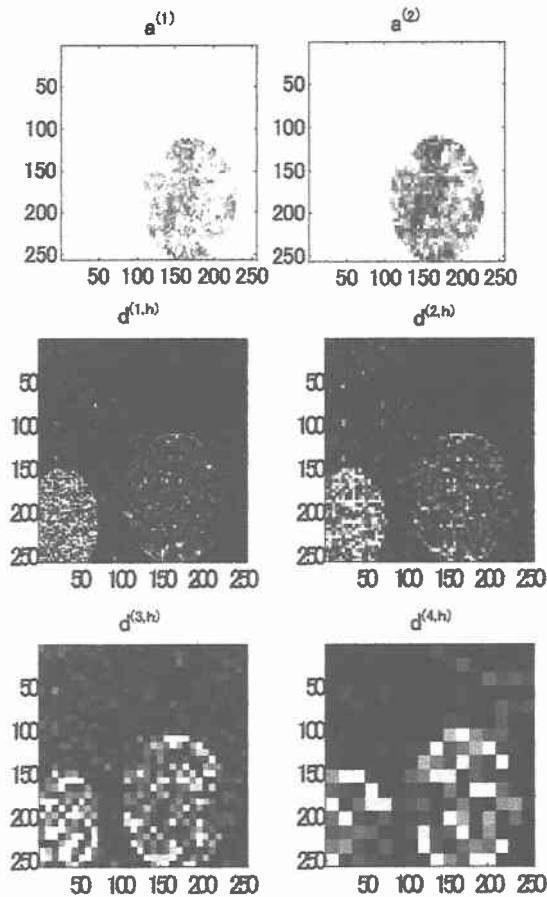
5. 結論

今回、本研究ではウェーブレット解析により各路面状態における輝度信号の周波数成分と位置的情報を得ること
で冬期路面判別を試みた。解析結果を以下のようにまとめた。

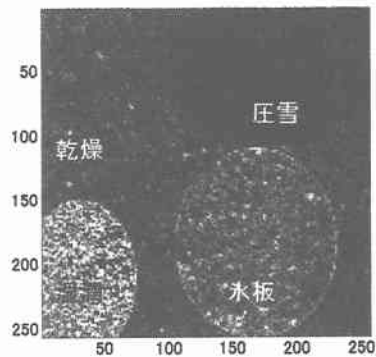
- ・1 次元連続ウェーブレット変換による内積では湿潤、氷板については絶対値の平均がそれぞれ 5.695、3.935、標準偏差がそれぞれ、92.786、27.423 と特有の値が得られたが、乾燥、圧雪では絶対値の平均がそれぞれ 1.580、1.580 と完全に一致し、標準偏差がそれぞれ、5.914、7.637と非常に近い値となり路面判別は困難であると考えられる。
- ・1 次元多重解像度解析による結果は、乾燥、湿潤、氷板、圧雪の各部分における絶対値の平均はそれぞれ 1.154、14.731、6.869、1.008 であり、標準偏差はそれぞれ 1.539、22.965、9.080、1.217 であった。多重解像度解析においても、乾燥と圧雪は絶対値の平均、標準偏差ともに近い値となり判別は困難であり、乾燥、圧雪の輝度信号が似たような周波数成分を持っていることがわかる。湿潤、氷板はそれぞれ特有の数値が得られ判別可能であると考えられる。
- ・2 次元多重解像度解析の結果は、乾燥、湿潤、氷板、圧雪の各路面における絶対値の平均はそれぞれ 2.308、16.840、4.513、0.761 であり、標準偏差はそれぞれ 2.257、16.376、4.616、0.660 という結果が得られた。1 次元ウェーブレット解析と比較すると各路面状態の数値が得られ路面判別は可能であると考えられる。

【参考文献】

1) 平河内雄也、武市靖：デジタル画像解析による複合路面状態の判別解析、土木学会道支部論文報告集、第 57 号、pp.712-715、2001。
2) 平河内雄也、武市靖：デジタル画像処理による冬期路面状態の判別方法に関する検討 その 2、第 56 回年次学術講演会講演概要集、第 V 部門、V-4、V-035、2001。
3) 川村彰：Wavelet 関数による路面凹凸特性の把握方法について、土木学会第 51 回年次学術講演概要集 V、pp.66-67、1996。
4) 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、pp.2-40、1999。
5) 中野宏毅他：ウェーブレットによる信号処理と画像処理、共立出版、pp.17-73、1999。



図ー5 2次元ウェーブレット解析の結果



図ー6 レベル 1 で 3 方向から分解した高周波成分を合成した結果