同一帯域制限下におけるウェーブレットとフーリエ記述子による 画像の幾何学的特徴記述の復元度の比較

A comparison of image quality of the restored by wavelet and Fourier descriptors for extracted spatial features under the condition of the same band width for both descriptors

新井 康平*・瀬戸 要・中尾 太郎
Kohei Arai, Kaname Seto and Taro Nakao

Abstract: A new spatial feature description method based on Wavelet Descriptors is proposed. It is found that the proposed method shows twice much better quality of the restored spatial feature depending on the support length of the Wavelet transformation in comparison with the Fourier Descriptor.

Keywords: Wavelets, Fourier Descriptor, Spatial feature extraction, Haar transformation, Daubechies Wavelets

1. まえがき

ウェーブレット解析（展開，変換等）を地球観測衛星画像の処理解析に応用した例として，複数の可視画像の重ね合わせをウェーブレット変換後に行う方法¹⁾，オフナディア角の異なる複数の SAR 画像の重ね合わせをウェーブレット変換後に行う方法²⁾，衛星データから推定した海面温度の年変動のパターンにウェーブレット変換を適用してその特徴を抽出する方法³⁾，海水の表面粗度の抽出にウェーブレット変換を適用する方法⁴⁾，土壌水分を抽出した画像から空間的特徴を抽出する方法⁵⁾等がある^{6),7)}。また，衛星画像から抽出した幾何学的特徴（エッジ，ライン等）を閉曲線として関数表現し，それをフーリエ展開して有限個の展開係数によって曲線を近似することにより，幾何学的特徴を記述する「フーリエ記述子」が提案され，多用されている^{8),9)}。また，フーリエ記述子を閉曲線にも適用範囲を広げた方法も提案されている¹⁰⁾。さらに，これらの幾何学的特徴の記述結果を認識する方法についても提案がある¹¹⁾。

フーリエ変換とウェーブレット変換と比較すると，フーリエ変換が時間周波数次元において，元の信号，または，画像に関係なく，すべての時間周波数を等しく扱っているのに対し，ウェーブレット変換においては，調べたいところをより詳細に扱うことができる点が異なる^{12),13)}。すなわち，幾何学的特徴の記述にこれらを適用する場合，後者の方がより効率の良い解析が可能になると考えられる。この基本的考え方に基づき，新たなウェーブレット記述子による幾何学的特徴の記述方法を考案した。現実の地球観測衛星画像に提案手法を適用し，提案手法の有効性を確認したのでここに報告する。

2. 提案手法

幾何学的特徴を微分演算子，ウェーブレット解析等により，まず抽出する。その後，弛緩法，ウェーブレット解析等により断続的な曲線の断片を接続し，閉曲線を得る。この時，閉曲線が凸曲線であることを確認し，凹曲線の場合は，当該曲線を細分化して凸曲線になるまで細分化を繰り返す。

閉曲線によって囲まれた領域の中の任意の画素（内点）からの距離として閉曲線を記述する。その際，一定の角度間隔にて閉曲線を標本化し，閉曲線上の標本点と内点間の距離の系列により，閉曲線を記述する。ここまでの処理はフーリエ記述子も，ここで提案する

*佐賀大学理工学部知能情報システム学科
Dept. of Information Science, Saga University
〒840-8502 佐賀市本庄 1
1 Honjo, Saga 840-8502 Japan
「写真測量とリモートセンシング」VOL. 40, NO. 5, 2001

ウェーブレット記述子も同様であるが、この後の系列の記述方法が両者で異なる。すなわち、前者ではこの系列にフーリエ展開を用いて有限個の展開係数によって記述するが、後者ではウェーブレット展開を施し、その展開係数で系列を記述する。

ここでは、まずフーリエ展開とウェーブレット展開を定義し、提案手法を詳細に記述することにする。

2.1 フーリエ展開とウェーブレット展開

与えられた関数（信号、または、画像） $f(t)$ のフーリエ展開は、

$$\int_{-\infty}^{\infty} e^{-i\omega t} \cdot f(t) dt \quad (1)$$

により表現できる。ウェーブレット展開は、

$$2^j \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \psi(2^j t - k) \cdot f(t) dt \quad (2)$$

により表すことができる。ここで、 i, j, k は、それぞれ、虚数、スケール、シフトである。

2.2 フーリエ記述子とウェーブレット記述子

フーリエ記述子は、抽出した空間的特徴情報をフーリエ展開し、その展開係数を記述子とする。ウェーブレット記述子は、抽出した空間的特徴情報をウェーブレット展開し、その展開係数を記述子とする。フーリエ記述子は、式(1)より無限個の展開係数を必要とする。ウェーブレット記述子は、式(2)より無限個の展開係数を必要としない（コンパクト・サポート）。

2.3 閉曲線に対するウェーブレット記述子

閉曲線を $Z(l)=(x(l), y(l))$ とする。 $Z(l)$ は、閉曲線上のある始点から閉曲線上を距離 l 進んだ点である。閉曲線の内部のある点から閉曲線上の点までの距離を $u(l)$ と定義すると、関数 $u(l)$ は閉曲線の全長 L の周期関数になる。概念図を図1に示す。関数 $u(l)$ に対し

図1 地球観測衛星画像の幾何学的特徴の記述

てウェーブレット展開を行う。

3. 実験

3.1 実験概要

使用するデータは、Terra 衛星搭載の ASTER/VNIR 画像であり、有珠山付近における実観測画像である。図2に取得された ASTER 画像を示す。図2(a)は実観測画像を示し、図2(b)は輪郭抽出を行った結果画像を示す。本実験では、図2(b)を用いて実験を行う。図3は図2(b)における閉曲線の内部のある点から閉曲線上の点までの距離を示したものである。本実験の目的は、ウェーブレット記述子の有効性をフーリエ記述子と比較し、復元精度の評価により確認する。したがって、フーリエ記述子においてはローパス・フィルタによりフーリエ展開係数の個数を半分にして復元した結果を用い、ウェーブレット記述子においては低周波成分のみにより復元した結果を用いる。併せて、ウェーブレットのサポート長による影響も検討する。また、復元精度の評価のために、

(a) 観測画像（湖上の浮き島） (b) 抽出したエッジ画像

図2 衛星搭載の ASTER（バンド1）画像

図3 抽出した幾何学的特徴画像（縦軸：中心からの距離、横軸：角度）

$$J1 = \sqrt{\frac{\sum_{s=1}^N ((\widehat{x(s)} - x(s))^2 + (\widehat{y(s)} - y(s))^2)}{N}} \tag{3}$$

を用いる。なお、図3より $N=256$ である。

3.2 実験結果

図4は、図3に対するフーリエ記述子である。ただし、図5の縦軸はフーリエ展開係数の絶対値の常用対数で表す。図5は、フーリエ展開係数に対してローパス・フィルタを施し、フーリエ展開係数の個数を半分にして復元した結果である。図6は図3に対するハール基底によるウェーブレット記述子である。図6(a)は低周波成分を表し、図6(b)は高周波成分を表す。図7は図6(a)のみを用いて復元した結果である。表1はフーリエ記述子による復元精度 $J1$ を示す。すなわち、ローパス・フィルタによりフーリエ展開係数の個数を

半分にして復元した結果 $J1$ を示す。表2はウェーブレット記述子による復元精度 $J1$ を示す。すなわち、Dawbechies 基底のサポート長 sup を変化させた場合における低周波成分のみを用いて復元した結果 $J1$ を示す。サポート長 $sup=2$ のDawbechies 基底は、Haar 基底と一致する。

3.3 考 察

表2および表1より、ウェーブレット記述子による復元精度がフーリエ記述子による復元精度に比べ良いことが判る。図5および図7より、復元された形状に

表1 フーリエ記述子による復元における2乗誤差 $J1$

$J1$
3.598063

図4 フーリエ記述子による幾何学的特徴の記述（縦軸：周波数成分の対数，横軸：空間周波数）

図5 フーリエ記述子による幾何学的特徴の復元画像（縦軸：中心からの距離，横軸：角度）

(a) 低周波成分

(b) 高周波成分

図6 Haar 基底に基づくウェーブレット記述子による記述（縦軸：ウェーブレット展開係数，横軸：ウェーブレット展開次数）

表 2 Daubechies 基底に基づくウェーブレット記述子による復元における 2 乗誤差 $J1$ (サポート長 sup の関数)

sup	$J1$
2	0.398013
4	0.204359
6	0.176750
8	0.170164
12	0.180813
16	0.181079
20	0.162560

図 7 Haar 基底に基づくウェーブレット記述子による復元画像 (縦軸：中心からの距離, 横軸：角度)

においてもウェーブレット記述子による復元精度がフーリエ記述子による復元精度に比べ良いことが判る。

4. あとがき

ここで提案した Daubechies 基底に基づくウェーブレット変換による画像の幾何学的特徴の記述 (ウェーブレット記述子) は, 同じ帯域制限の下では, 既存のフーリエ記述子によるものよりも再現度が高いことを示した。これは, フーリエ展開およびウェーブレット展開によって画像空間領域からフーリエおよびウェーブレット周波数領域に変換し, 同じ帯域制限 (たとえば最高が周波数の半分) を加えると, 前者は最高周波数の半分が消滅してしまうのに対し, 後者は高低周波数成分に 2 分した低周波側にも高周波数成分が残されるためと考えられる。また, このウェーブレット記述子による高周波成分の再現度は, 基底関数のサポート長に依存することが判った。サポート長が 2 の場合を除き, それよりも長ければ, ウェーブレット記述子の再現度はフーリエ記述子のそれを上回ることを確認した。このことから, ウェーブレット記述子の方がフー

リエ記述子よりも画像の幾何学的特徴の記述に適していることが確認できた。

(受付日 2001.6.4, 受理日 2001.9.11)

参考文献

1) J.P. Djamdji, A. Bijaoui, and R. Maniere: "Geometrical Registration of Images: The Multiresolution Approach," Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol. 59, No. 5, pp.645-653, (1993).

2) W.M. Moon, J.S. Won, V. Singhroy, and P.D. Lowman Jr.: "ERS-1 and CCRS C-SAR data integration for look-direction bias correction using wavelet transform," Canadian Journal of Remote Sensing, Vol. 20, No. 3, pp.280-285, (1994).

3) M. Mak: "Orthogonal Wavelet analysis: Interannual Variability in Sea Surface Temperature," Bulletin of the American Meteorological Society, Vol. 76, No. 11, pp.2179-2186, (1995).

4) R.W. Lindsay, D.B. Percival, and D.A. Rothrock: "The Discrete Wavelet Transform and the Scale Analysis of the Surface Properties of Sea Ice," IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 34, No. 3, pp.771-787, (1996).

5) Z. Hu, Y. Chen, and S. Islam: "Multiscaling properties of soil moisture images and decomposition of large- and small-scale features using wavelet transforms," International Journal of Remote Sensing, Vol. 19, No. 13, pp.2451-2467, (1998).

6) 新井康平, 瀬戸 要, L.M. Jameson: "極座標表現 Wavelet による衛星画像からの水塊特徴の抽出," 可視化情報学会誌, Vol. 19, Suppl. No. 1, pp.99-102, (1999).

7) 新井康平, 瀬戸 要: "ウェーブレット分解とタイリングに基づく多時期地球観測衛星画像の変化点抽出," 可視化情報学会誌, Vol. 20, Suppl. No. 1, pp. 285-288, (2000).

8) C.T. Zahn and P.Z. Roskies: "Fourier descriptors for plane closed curves," IEEE Trans. Computer, Vol. C-21, pp.269-281, (1972).

9) G.H. Granlund: "Fourier preprocessing for hand print character recognition," IEEE Trans.

- Comput, Vol. C-21, No. 2, pp.195-201, (1972).
- 10) 上坂吉則：“開曲線にも適用できる新しいフーリエ記述子,” 電子通信学会論文誌, Vol. J67-A, No. 3, pp.166-173, (1984).
- 11) 宮武孝文, 松山隆司, 長尾 真：“フーリエ記述子を用いたアフィン変換に不変な曲線の認識について,” 情報処理学会論文誌, Vol. 24, No. 1, pp.64-71, (1983).
- 12) 新井康平：“ウェーブレット解析の基礎理論”, 11月2000年, 森北出版 (2000).
- 13) 新井康平, Leland Jameson：“ウェーブレット解析による地球観測衛星画像の利用方法” 6月2001年, 森北出版 (2001).