

影像融合与复原的小波模型*

李德仁 邵巨良

(武汉测绘科技大学信息工程学院,武汉市珞喻路 39号,430070)

摘要 本文给出影像融合和复原的小波模型。其精髓在于小波的多分辨率性质可将一个复杂而相互交织的症结分解为一系列弱相关和容易解决的小问题。本文着重探讨影像融合与复原中如何利用小波模型的理论与算法。

关键词 小波;影像融合;影像复原;多分辨率

分类号 P231.5 TP751

1 影像融合与复原

影像融合是将不同时相、不同传感器及不同分辨率的数字影像拼接、组合成几何和辐射连续的、具有尽可能高分辨率的“无缝”影像的技术。影像融合在下列方面具有重要应用价值:

——全球环境和变化监测 此任务的主要数据来源是卫星影像,然而卫星装有不同的影像传感器,它们工作在不同的谱段,具有不同的空间分辨率,或在不同时刻成像。因此,需要不同时相、不同传感器和不同分辨率下的影像融合。

——医学诊断 人体是一个具有三维形状的实体,为了准确诊断病情,需要从多个视角获取人体(或部分器官)图像,以尽可能逼近人的实体,这一任务无疑需要影像融合。

——计算机图像显示 经常遇到两幅甚至多幅影像叠加的情况,尤其是在广告设计和动画制作中,前景必须在视觉上镶嵌于背景之中。这种视觉效果需要好的融合方式。

——军事设施的遮蔽 某地区的影像需出售或民用,其上如有军事设施则需加以掩盖,换一块影像盖上去,此时影像融合也是必需的。

影像融合的质量主要取决于它的视觉量测。融合后的影像越“无缝”,融合效果越好。“无缝”在此指几何和辐射的连续性。前者由几何纠正、影像配准实现,已有许多研究。例如 Zhang 等人 [1994] 已将它用于三行 CCD 扫描形成的 MOMS-02 影像中。后者的辐射不连续性(见图 1),传统的方法是通过影像的光滑化或直方图均衡处理之。可是简单的光滑化将使整个影像变得模糊。直方图均衡虽然缩小了被融合影像接边处的反差,但会引起整个影像灰度的改变,这有时是不允许的。由于小波变换具有多通道分解性,可望用来解决上述问题,即解决两幅被融合影像接边区域的辐射不连续的局部衔接。关于小波理论的基本概念、分解和重建过程可参阅 [Daubechies, 1988; Mallat, 1989]。

影像复原的目的是改善恶化(或退化)了的影像的逼真度。通常情况下,恶化是由噪声和存储媒质退化而引起的,噪声则来源于传感器、传播环境、量化处理和附加的随机噪声。本文讨论

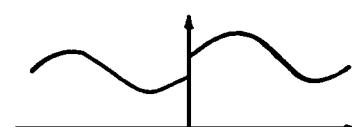


图 1 影像辐射值的不连续性

收稿日期: 1995-11-13. 李德仁,男,56岁,教授,博士生导师,中国科学院院士,中国工程院院士,现从事摄影测量、遥感、地理信息系统和计算机视觉等研究。

* 国家自然科学基金资助项目,编号 49371055

的是白噪声。去噪声的原则是：1)有意义的信息，如边缘不能损害。2)视觉效果应该得到增强。频率域中，经典的影像复原方法有最小均方差滤波和维纳滤波 [Bates & McDonnell, 1986] 空间域中，则有光滑化运算和统计方法滤波 [Gem an, 1984] 最近基于 Hopfield 网和马尔可夫随机场的方法亦有探讨。本文的策略仍是基于小波变换理论，因为它在频率域和空间域中同时具有良好的局部化性质。此时，噪声的抑制是在由多通道子空间组成的小波空间里通过噪声分析来实现。噪声分析在小波空间的每个子空间内执行，以决定去噪的力度。每个子空间经去噪后，再重建得到复原影像。这一策略简化了问题的复杂性，将一相互缠绕的问题化解为一系列弱相关和易处理的小问题。这种“化整为零”的方法，显然有利于上述复杂问题的解决。

2 影像融合的小波模型

如图 2 所示，本文中的影像融合的关键在于融合曲线 AB 邻域内的局部灰度改正。邻域的大小由被选小波段宽和影像分解层数来决定。

2.1 设置均匀化系数

假设区域 I_1 、 I_2 （如图 2 所示）为两个即将被融合的区域， I_1 的灰度值大于 I_2 的灰度值。为了将 I_1 和 I_2 合并为一个大区域 I_m ，可先设置均匀化系数。如图 3 所示，原 I_1 中的区域 R_1 设均匀化系数值为 k ($1/2 \leq k \leq 1$)，原 I_1 中其它部分即 R_2 设值为 1。相应地，原 I_2 中的区域 R_3 设值为 $1 - k$ ，其余部分即 R_4 设值为 0。简单地以公式形式表示为：

$$\text{均匀化系数} = \begin{cases} 1 & \text{像素} \in R_1 \\ k & \text{像素} \in R_2 \\ 1 - k & \text{像素} \in R_3 \\ 0 & \text{像素} \in R_4 \end{cases} \quad (1)$$

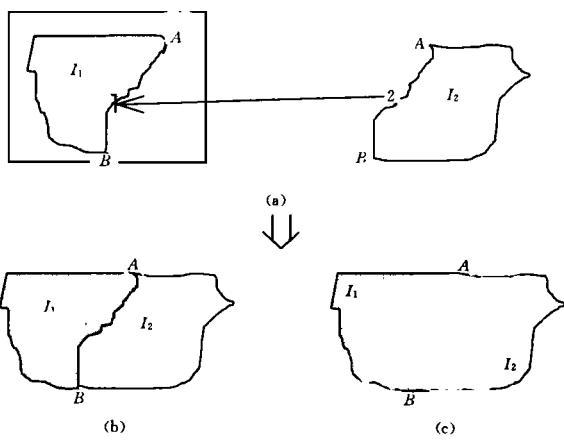


图 2 影像融合示意图

图 3 中变量 d 是被选小波的阶数（或叫波段宽），变量 k 与接边处两边的反差有关。若灰度差较大，则 k 较小，从 $\rightarrow 1/2$ ；反之， k 则较大，从 $1/2 \rightarrow 1$ 。

2.2 影像的多分辨率分解

原始影像经过小波分解，形成了多分辨率 多波段的空间。在此空间内，不同层下的子影像有各自突出的性质，可利用其明显特征抑制无益噪声。小波变换的分解公式为：

$$\dot{d}_k = \sum_n h(n - 2k) \dot{\phi}_k^{j-1}, d_k = \sum_n g(n - 2k) \dot{\phi}_k^{j-1} \quad (2)$$

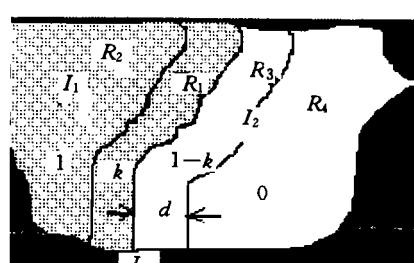


图 3 均匀化系数配置图

其中 g 和 h 组成一对滤波器， h 叫高通滤波器， g 是低通滤波器。 \dot{d}_k 是 d_k^{j-1} 的光滑， d_k^{j-1} 表示 d_k 和 \dot{d}_k^{j-1} 的差，即细节影像。最后分解结果即 $\{d^j, j \leq J\}$ 和 $\{c^j, j \leq J\}$ ， J 是分解层数。有关这一分解过程请参见 [邵巨良, 李德仁, 1993 b]。

为了使 I_1 、 I_2 两区域在分解后的各自层次上融合，按式 (2) 分解该两区域，得到：

$$\{I_1: [d_1^j, 1 \leq j \leq J \text{ 和 } c_1^j]; I_2: [d_2^j, 1 \leq j \leq J \text{ 和 } c_2^j]\}$$

为了使接边处更光滑,均匀化系数 I_m 也需要按小波变换分解成多层子空间:

$$\{I_m: [d_m^j, 1 \leq j \leq J \text{ 和 } c_m^j]\}$$

即图 4a 中的阶跃函数经多次小波光滑,变成如图 4b 所示的光滑函数,从而使接边处光滑化。

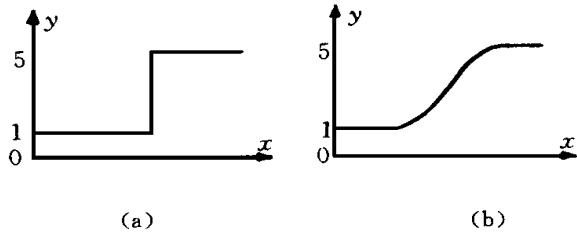
2.3 影像融合

影像经分解后成为多波段的子影

像。相同波段的子影像由下式合并:

$$\begin{aligned} \bar{d}^j &= \bar{c}_m^j (d_1^j - d_2^j) + d_2^j, \\ \bar{c}^j &= \bar{c}_m^j (c_1^j - c_2^j) + c_2^j \end{aligned} \quad (3)$$

当像素远离接边处时,由于 \bar{c}_m^j 等于



1 或 0,所以 \bar{d}^j 保持融合前的各自影像

图 4 阶跃函数的光滑化

只有在接边处两影像的灰度得到光滑,但接边处应有该波段宽 2 倍的重叠影像

2.4 影像的多分辨率合成

影像在各自的波段内融合后,需按小波逆变换合成原分辨率下的融合影像:

$$\bar{c}_{2k+1}^{j-1} = \sum_{k=0}^{M-1} h_{2k+1} \bar{c}_n^j + \sum_{k=0}^{M-1} g_{2k+1} \bar{w} d_{n-k}^j, \quad W = 0, 1 \quad (4)$$

最后得融合影像 $\bar{I} = \bar{c}_0^0$

3 影像复原的小波模型

3.1 成像模型

影像函数通常可由扩散方程表示 [Younes, 1994]

$$I = P^* F + N \quad (5)$$

其中 F 是目标反射量的真值, P 是点扩散函数, N 是方差为 σ^2 的高斯白噪声。影像复原即是最大限度地减小白噪声方差 σ^2 的值。

3.2 噪声分析

影像中的白噪声属于一种叠加性噪声,它具有以下特性 [金光磊, 1991] 在整个影像域中均匀地随机分布;瞬时值服从高斯正态分布;自相关函数具有 W 函数的性质。

由上述特性,我们假设 $n(x)$ 是一个方差为 σ^2 的实数值白噪声, $E(X)$ 是随机变量 X 的期望值,则有:

$$E[n(u)n(v)] = \sigma^2 W(u - v) \quad (6)$$

Mallat 和 Hwang [1992] 引用了 Grossmann [1986] 关于白噪声的小波变换公式,即

$$|Wn(s, x)|^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} n(u)n(v) j_s(x - u) j_s(x - v) du dv \quad (7)$$

其中, s 是分辨率参数, $j_s(x)$ 是基本小波函数。对式(7)求期望值:

$$E[|Wn(s, x)|^2] = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} E[n(u)n(v)] j_s(x - u) j_s(x - v) du dv \quad (8)$$

将式(6)代入式(8)即得:

$$E[|Wn(s, x)|^2] = \frac{\|j\|^2 e^2}{s} \quad (9)$$

此式说明,随着分辨率的降低(s 增大),白噪声的小波变换值也逐渐减小,从而使信号占主导地位 反之,分辨率提高(s 减小),白噪声的小波变换值将增大,信号将被噪声湮没。

3.3 噪声消除

由上述噪声分析结果可知,影像分解后系列影像中高分辨率影像信噪比低而低分辨率影像信噪比高。因此为了复原影像,关键在于怎样提高细节影像中的信噪比。我们采用的策略很简单,即从信噪比低的细节影像中提取影像的特征信息,如边缘和纹理 [Li 和 Shao, 1994; Shao 和 Forstner, 1994],但保留这些特征所在像素的灰度值。然后把特征影像作为无噪声细节影像 $\{d^l, l \leq J\}$,再通过逆小波变换(式(4))重构复原影像 c^l 。

4 试验与结论

我们用了南极中山站一幅影像测试影像融合的小波模型。图 5a 中小方块影像将要拼接到大的框架影像中。图 5b 是不用小波变換作灰度改正的拼接,明显看出中间嵌入的那一块亮度远比周围高,灰度的不连续性是显而易见的。图 5c 为小波变換得到的影像融合,拼接之处已经光滑而看不出灰度的不连续性。

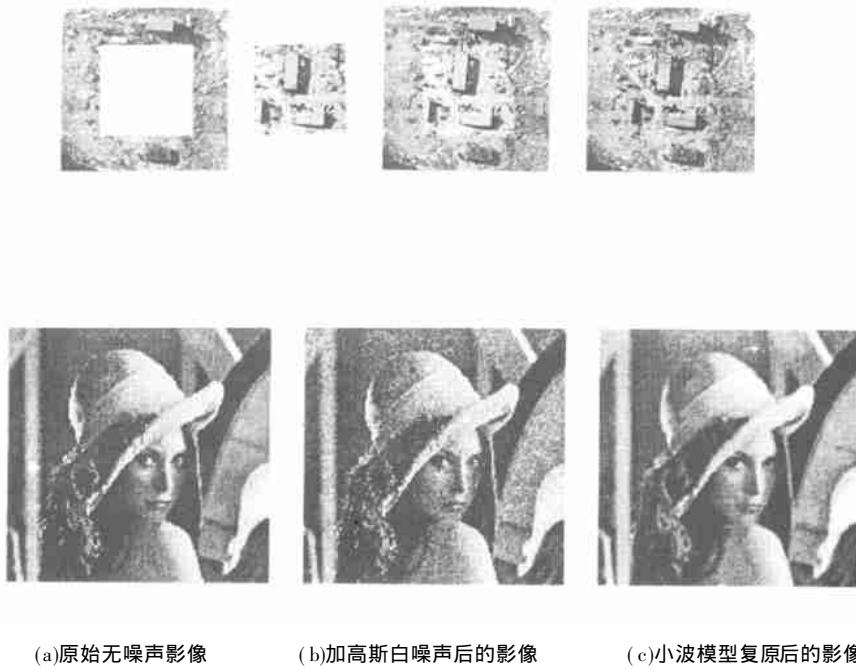


图 6

对于影像复原,我们仍采用了著名的 LENNA 影像。图 6a 为原始无噪声影像,图 6b 为加高斯白噪声后的影像,图 6c 则是用小波变換复原后的影像。3 个影像对比,不难看出用小波变換使被噪声污染的影像得到了较好的复原。

以上试验只能说是初步检验了文中所提出的影像融合和影像复原的小波方法。为了将该方法用于影像处理尚需要继续进行更深入的试验,特别是对不同传感器的影像融合时,尚包括几何配准和不同纹理的特殊处理,需认真对待。

参 考 文 献

- 1 邵巨良, 李德仁. 小波变换及其在影像边缘检测中的应用. 测绘学报, 1993(2): 111~120
- 2 邵巨良, 李德仁. 小波变换及其在影像表示中的应用和其方向性选择算法的改进. 武汉测绘科技大学学报, 1993, 18(2): 1~9
- 3 金光磊. 数字图像像质的评定. 武汉测绘科技大学学报, 1991, 16(3): 38~46
- 4 Bates R H T, McDonnell M J. Image Restoration and Reconstruction. Oxford: Clarendon Press, 1986.
- 5 Daubechies I. Orthonormal Bases of Compactly Supported Wavelets. Commun. Pure Appl. Math., 1988 (41): 909~996
- 6 Geman G, Geman D. Stochastic Relaxation, Gibbs Distribution, and Bayesian Restoration. IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1984, 6(6): 721~741
- 7 Grossmann A. Wavelet Transform and Edge Detection. In: Stochastic Proc. in Physics & Engineering. Hazewinkel M, eds. Dordrecht: Reidel, 1986.
- 8 Li D, Shao J. The Wavelet and Its Application in Image Edge Detection. ISPRS J. of Photogrammetry and Remote Sensing, 1994, 49(3): 4~11
- 9 Mallat S G. A Theory for Multiresolution Signal Decomposition: the Wavelet Representation. IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1989, 11(7): 674~694
- 10 Mallat S G, Hwang W L. Singularity Detection and Processing with Wavelets. IEEE Trans. Inf. Th., 1992, 38(1)
- 11 Shao J, Förstner W. Gabor Wavelets for Texture Edge Extraction. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing Part 3, 1994(30): 745~752
- 12 Thacore S. Pattern Classification, Image Restoration, and Image Coding Using Neural Network. University of Melbourne, 1993.
- 13 Younes L. Synchronous Image Restoration. In: Proc. of ECCV'94. Eklundh J, eds. Sweden: Stockholm, 1994. 213~217
- 14 Zhang W. Digital Orthoimage from Airborne Line Scanner Imagery Utilizing Flight Parameters. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Part 3. 1994(30): 945~950

Wavelet Models for Image Fusion and Image Restoration

Li Deren Shao Juliang

(School of Information Engineering, W TU SM, 39 Luoyu Road, Wuhan, China, 430070)

Abstract In this paper, a wavlet model is given for image fusion and image restoration. The key point is that the multi-resolution character of wavelet is used to decompose a very complex and highly correlated problem into a set of less correlated and easily solved problems. The discussion in this paper is on the theory and algorithm of wavelet models for image fusion and image restoration with simple examples.

Key words wavlet; image fusion; image restoration; multi-resolution