

一种顾及影像纹理特性的自适应分辨率增强算法

沈焕锋, 李平湘, 张良培

(武汉大学 测绘遥感信息工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430079)

摘要: 针对传统的影像分辨率增强算法存在的缺点, 提出了一个顾及影像纹理特性的自适应分辨率增强算法。在算法中, 首先通过影像分析, 根据定义的 3 种纹理特性, 确定出像素在影像中所在的位置是属于平滑纹理、一般纹理还是边缘纹理, 然后根据不同的属性应用不同的滤波器进行内插增强。特别是对边缘纹理的处理, 为了提高精度, 是通过两次迭代来完成的。实验中利用该算法和传统的增强方法对三峡地区航空影像和武汉 TM 影像分别进行了处理, 并用常用的影像质量评价方法对增强处理结果进行了对比评价, 实验证明, 所提出的算法在保持纹理、边缘方面有较强的优越性, 具有实用价值。

关键词: 分辨率; 增强; 内插; 纹理

中图分类号: TP751.1 **文献标识码:** A

1 引言

为了得到较高分辨率的影像, 一般可以通过两种途径来实现。一是改进硬件设备, 直接提高传感器的性能; 另一种方法就是通过设计适当的数学算法来对影像进行分辨率增强^[1]。

传统的影像增强方法, 如平滑、锐化、均衡等, 它们的目的是为了改变影像的视觉效果, 提高影像的清晰度, 但处理后影像的像素数量并没有发生变化。影像的分辨率增强则不同, 为了增加影像的信息量, 这类方法对影像进行像素增加的处理, 用更多的像素来表示同一地物。

利用数学算法来对影像进行分辨率增强, 按影像数据的来源及数量可以分为 3 类: 第一类是对同一地区有多种来源的、具有不同分辨率的影像数据, 可以根据高分辨率的影像来增强低分辨率的影像。第二类是对同一地物只有一种影像数据来源, 但有多影像数据, 通过算法求解出一个高分辨率的影像^[1,2]。第三类是只有一景影像数据, 此时, 只能通过灰度内插的方法来进行分辨率的增强。

比较常用的影像灰度内插增强方法有最临近

法、双线性内插法和三次内插法^[3]。但是, 这些方法的缺陷是: 在处理中, 没有考虑影像的纹理特性, 对所有像素都采取相同的方法进行处理, 往往带来纹理消失、边缘模糊等现象^[4]。基于此, 本文提出了一个顾及影像纹理特性的自适应内插增强算法。

纹理是对影像各像元之间的空间分布的一种描述, 可定性地使用一种或几种描述来表征, 如粗细、颜色、平滑度、形状等。在本文中涉及的纹理特性主要是对影像平滑度的表征, 为此作者定义了平滑纹理、一般纹理和边缘纹理 3 种属性。根据不同的属性采用不同的滤波器进行内插增强, 可以最大限度地保持影像的边缘和纹理特性。

2 纹理特性的确定

要实现对不同的纹理特性进行不同的增强处理, 首先需要确定它们的位置及其属性。在本文的算法中, 通过定义方向模板的方法来确定像素所属的纹理特性及其位置。

采用图 1 所示的四个模板来计算中心像素在 4 个方向上的梯度值^[3,5], 即水平方向、竖直方向、对角线方向和反对角线方向, 用 $Grads_i$ 来表示 ($i=1,$

收稿日期: 2004-01-15; 修订日期: 2004-04-06

基金项目: 国家自然科学基金(40471088)、中国 973 发展计划(2003 CB4 15205)、中国科学院遥感信息工程国家重点实验室开放基金、地理空间信息工程国家测绘局重点实验室开放基金。

作者简介: 沈焕锋(1980—), 男, 2002 年毕业于武汉大学测绘工程专业, 现任武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室博士生, 主要研究方向为遥感图像处理、遥感应用。

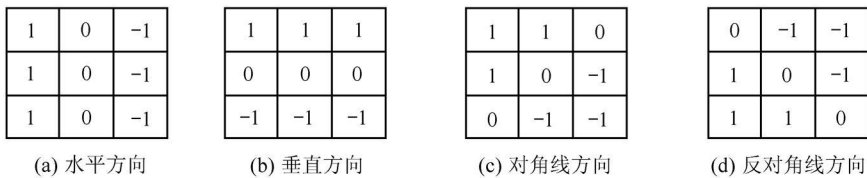


图 1 用以确定像素纹理特性的 4 个模板

Fig.1 The four templates for determining the texture cottribute

2,3,4)。然后求出 4 个梯度中最大的一个作为此中心像素的代表梯度,用 $MaxGrads$ 来表示。然后计算其它 3 个梯度值与最大梯度值之差的平方和,用 σ^2 表示。公式为:

$$\sigma^2 = \sum_{i=1}^4 \left(MaxGrads - Grads_i \right)^2 \tag{1}$$

如果 $MaxGrads$ 小于某个阈值 $ThresGrads$,就把此中心像素所在位置的属性定义为平滑纹理;如果 $MaxGrads$ 大于等于 $ThresGrads$,同时 σ^2 又小于某阈值

$ThresVarious$,就把其所在的位置的属性定义为一般纹理;除此以外的即为边缘纹理情况,其边缘方向与最大梯度的方向垂直。为了方便下一步的计算,在边缘纹理情况下,要记录下此边缘的方向和此中心像素的位置。作者用此方法对三峡地区某一航空影像(图 2(a))进行了属性分类处理,如图 2(b),白色代表边缘纹理,灰色代表一般纹理,黑色则代表平滑纹理。

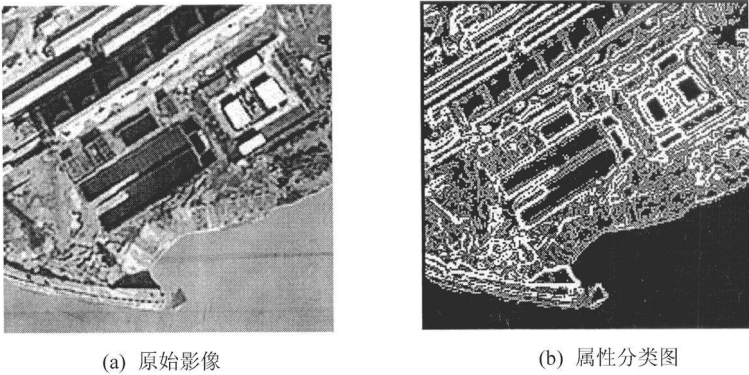


图 2 航空影像及其属性分类图

Fig.2 Aerial image and its attribute-classified result

在处理过程中,阈值 $ThresGrads$ 和 $ThresVarious$ 定义的过大或过小都会混淆 3 种属性之间的区别,给处理结果带来一定的影响。定义的过小,一般会增大计算量,处理结果也不一定最优;定义的过大,则会跟一般的方法一样,处理结果会带来边缘、纹理的模糊。在本算法中阈值是通过实际经验来确定的。

3 像素的内插

在确定了中心像素的纹理特性后,接下来就是根据不同的纹理特性采取不同的滤波器内插其周围的像素,为此,作者定义了一个滤波函数系:

$$WeightAver(a,b,c,d,m,n) = (-a * m + b * n + c * n - d * m) / (2 * n - 2 * m) \tag{2}$$

A		B		C	g_1	D		E
F		G		H	g_2	I		J
			x_6	x_5	x_4			
K		L	x_7	M	x_1	N		O
			x_8	x_2	x_3	g_5		
P		Q		R	g_3	S		T
U		V		W	g_4	X		Y

图 3 内插增强窗口示意图

Fig.3 The enhancement window

式中, a, b, c, d 分别代表影像中 4 个像素的灰度值, m 和 n 代表在计算过程中它们所占的权重, 其返回值即为此 4 个像素值的加权平均。公式(2)之所以称为滤波函数系是因为可以针对不同的属性情况, 通过改变 m, n 的值, 来得到不同的计算公式。

为了说明公式(2)的具体应用, 利用图 3 来进行具体的解释。在图 3 中, A, B, \dots, X, Y 为待增强影像的已知点, 其中 M 为此窗口的中心像素; M 周围的点, $x_1 \dots x_8$ 为内插点; g_1, \dots, g_5 为计算中可能用到的中间过度点。其算法流程图如图 5。

具体算法步骤如下。

3.1 平滑纹理

在此情况下, 只内插 x_1, x_2, x_3 , 参数 $m=1, n=9$, 即:

$$x_1=WeightAver(L, M, N, O, 1, 9) \tag{3}$$

$$x_2=WeightAver(H, M, R, W, 1, 9) \tag{4}$$

对于 x_3 的计算, 首先用同样的方法计算出 g_2, g_3, g_4 , 再用 g_2, x_1, g_3, g_4 计算求得 x_3 。

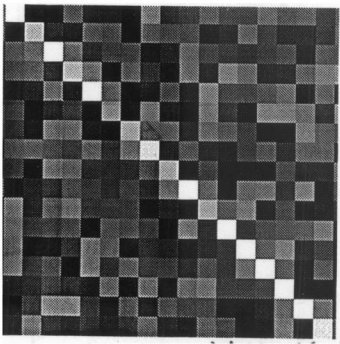


图 4 边缘像素分布示例

Fig.4 Demonstration of edge pixels distribution

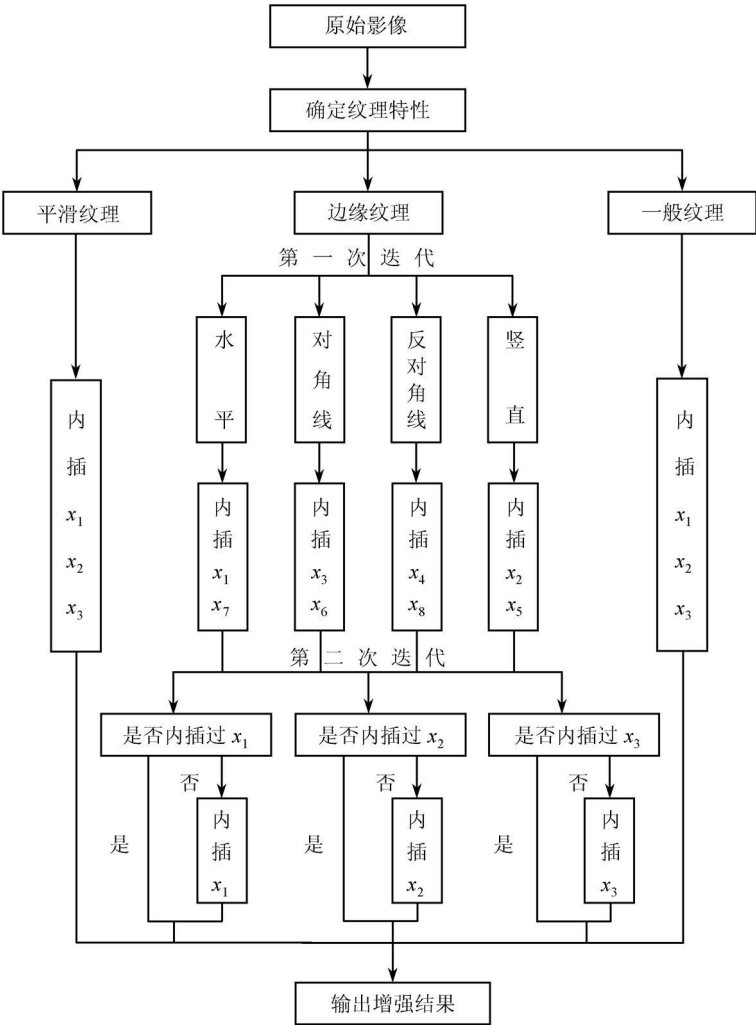


图 5 自适应内插增强算法流程图

Fig.5 The flow chart of the proposed algorithm

3.2 一般纹理

一般纹理情况与平滑纹理情况的不同之处在于,相邻像素之间数值相差较大。所以计算时应加大较远像素的权重。可以通过改变后两个参数的比例关系来达到这个目的,让 $m=1, n=6$ 。其它计算过程与平滑纹理情况相同。

3.3 边缘纹理

对边缘像素附近的内插点进行内插,应尽量满足一个原则:用边缘上已知点来求得边缘上的内插点^[6]。如在图 4 中,在对角线方向上像素有明显的边缘分布,如果用非对角线上的像素来内插对角线上的点,由于边缘像素和非边缘像素数值相差较大,内插结果势必会导致边缘模糊甚至消失。为了满足这一原则,可以通过两次迭代计算的方法来完成对边缘情况的求解。

3.3.1 第一次迭代

在第一次迭代中,根据边缘的方向,首先求得位于边缘方向上的内插点:

如果边缘为水平方向,内插 x_1 和 x_7 :

$$x_1 = WeightAver(L, M, N, O, 1, 6) \tag{5}$$

$$x_7 = WeightAver(K, L, M, N, 1, 6) \tag{6}$$

如果边缘为垂直方向,内插 x_2 和 x_5 :

$$x_2 = WeightAver(H, M, R, W, 1, 6) \tag{7}$$

$$x_5 = WeightAver(C, H, M, R, 1, 6) \tag{8}$$

如果边缘为对角线方向,内插 x_3 和 x_6 :

$$x_3 = WeightAver(G, M, S, Y, 1, 18) \tag{9}$$

$$x_6 = WeightAver(A, G, M, S, 1, 18) \tag{10}$$

如果边缘为反对角线方向,内插 x_4 和 x_8 :

$$x_4 = WeightAver(E, I, M, Q, 1, 18) \tag{11}$$

$$x_8 = WeightAver(I, M, Q, U, 1, 18) \tag{12}$$

3.3.2 第二次迭代

通过第一次迭代,能够保证把边缘方向上的内插点全部用边缘上的已知点内插求得。第二次迭代的任务就是求解剩下的内插点。方法是对每一个窗口中心位置(M)进行判断,判断其右方、下方以及右下方的像素(x_1, x_2, x_3)是否已经求出,如果没有,则要进行求解。

因为边缘附近的像素值变化较大,所以这次迭代求解过程中要满足另一个原则:待定点应该尽量用与其最临近(如属于同一行或同一列)的已知点来内插,尽量不用刚刚求出的内插点来解算新的内插

点,以避免误差的连续传播。

遵循以上原则,对 x_1 和 x_2 的求解分别是通过公式(5)、(7)来完成的,而对于 x_3 ,则分以下情况:

如果 M 的边缘为对角线方向,则在第一次迭代中已经求得,不用再做运算。

如果 M 的边缘为反对角线方向,则:

$$x_3 = WeightAver(J, N, R, V, 1, 18) \tag{13}$$

如果 M 的边缘为水平方向,则:

$$x_3 = (x_2 + g_5)/2 \tag{14}$$

如果 M 的边缘为竖直方向,则:

$$x_3 = (x_1 + g_3)/2 \tag{15}$$

这样对前面记录的边缘点一个一个的判断、求解,最后把所有的待定点全部求解出来。经过这样一系列的处理过程,最后增强后的影像像素个数是原来的 4 倍。

4 实验结果及比较

4.1 航空影像的实验

为了检验本文算法的正确性和有效性,我们首先利用图 2(a)所示的航空影像进行算法的检测试验。在实验中,作者首先把原始的航空影像在所有的行和列上隔点取值,得到一个在水平方向和竖直方向上分辨率都降低一倍的影像,对这个低分辨率影像进行处理,然后以原始影像为标准对处理结果进行评价。

图 6(a)为对航空影像隔点取值后的低分辨率影像,作者分别用上述自适应内插增强方法以及传统的双线性和三次内插增强^[3,7]方法对其进行了处理。由于在一般情况下,三次内插增强算法优于双线性内插增强算法,这里作者只列出了三次内插方法和自适应方法处理的结果,图 6(b)和图 6(c)。

通过比较可以看出,图 6(c)在视觉效果上明显强于图 6(b)。为了定量的描述它们之间的差异,作者用了当前比较常用的平均平方差(MSE)影像评价方法对两幅影像分别进行了评价计算^[8]。

评价公式为:

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{x=1}^n (f(x) - g(x))^2 \tag{16}$$

式中 n 代表影像像素的个数, $f(x)$ 代表原始影像在 x 位置处的灰度值, $g(x)$ 代表处理影像在 x 位置的灰度值,评价系数越小说明处理影像的质量越高。

作者用公式(16)对双线性内插法、三次内插法和自适应内插法分别进行了评价计算,计算结果见



图 6 对航空影像的实验结果
Fig.6 Experiment results of aerial image

表 1, 双线性内插方法为 83.95, 三次内插方法为 74.53, 本文算法为 67.15。可以认为, 本文提出的自适应算法比传统的内插方法有了较为明显的改进和提高。

表 1 Lina 影像处理结果评价

Table 1 Evaluated result of arial image	
内插方法	MSE 系数
双线性内插	83.95
三次内插	74.53
自适应内插	67.15

表 2 TM 影像处理结果评价

Table 2 Evaluated result of TM image	
内插方法	MSE 系数
双线性内插	29.96
三次内插	29.25
自适应内插	26.45

4.2 TM 遥感影像的实验

对航空影像的处理证明, 本文算法是正确的、有效的。接下来我们进一步把它应用到卫星遥感影像的处理。

图 7(a) 是 1998 年 10 月份获取的武汉地区的 TM 第 5 波段遥感影像数据, 图 7(b) 为隔点取值后的低分辨率影像, 图 7(c) 为三次内插处理增强结果, 图 7(d) 为自适应内插处理增强结果。从视觉效果上, 本文算法处理结果比传统方法同样较为明显的改善。用平均平方差影像评价方法对影像进行定量评价计算, 评价结果见表 2。双线性内插方法为

29.96, 三次内插方法为 29.25, 本文算法为 26.45。上述结果再一次证明, 本文提出的自适应算法有较大的改进。

为了更进一步的说明本文算法的优势所在, 作者从图 7(a), 图 7(c), 图 7(d) 中河流中央和河流边缘分别随机取了一些内插点进行对比, 河流中央代表平滑纹理区域, 河流的边缘代表边缘纹理区域, 对比结果见图 8(a) 和图 8(b)。

图 8(a)、8(b) 中曲线节点的竖坐标分别代表原始 TM 影像、三次内插增强影像和自适应内插增强影像的像素值, 把原始影像的曲线看作标准曲线, 其它两条曲线与标准曲线的接近程度表示其内插的精度, 接近程度越高, 表示内插结果越好。

从图 8(a)、8(b) 中可以看出, 平滑区域像素分布均匀, 相邻像素之间数值变化不大, 大部分在 10—15 之间, 而边缘区域像素值则变化很大, 在 30—60 之间。用质量评价系数进行计算, 计算结果见表 3。从表 3 可以看出, 对平滑区域的处理结果, 两种方法相差不大, 分别为 2.2, 1.8; 而对于边缘区域的处理, 本文算法精度提高了将近 1 倍, 两种方法分别为 102.47, 53.93。由此可见本文算法的优势主要体现在对边缘区域像素的处理上。

表 3 对平滑区域和边缘区域处理的对比比较

Table 3 Compared evaluation results of smooth area and edge area		
方 法	区 域	
	平滑区域	边缘区域
三次内插法	2.2	102.47
自适应内插法	1.8	53.93



(a) 武汉 TM 影像



(b) 武汉 TM 低分辨率影像



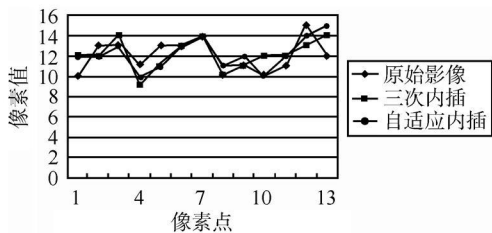
(c) 武汉 TM 三次内插增强影像



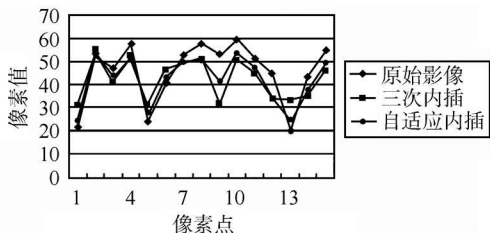
(d) 武汉 TM 自适应内插增强影像

图 7 对 TM 影像的实验结果

Fig.7 Experiment results of TM image



(a) 平滑区域处理对比曲线图



(b) 边缘区域处理对比曲线图

图 8 平滑和边缘区域的处理结果对比曲线图

Fig.8 Compared curves of smooth area and edge area

5 结 论

(1) 本文提出的自适应内插增强算法顾及了影像中纹理特性的不同,对不同属性采用不同的滤波器进行内插增强处理,在一定程度上克服了传统方法中的纹理消失、边缘减弱等缺陷。

(2) 通过实验证实:本文提出的增强方法处理

结果优于传统的双线性内插增强和双三次内插增强方法,对 Lina 影像处理结果的影像质量评价系数从 83.95, 74.53 减小到 67.15;对武汉 TM 数据处理结果的评价系数从 29.96, 29.25 减小到 26.45;本文方法的优越性主要体现在对影像边缘的处理上。

(3) 对处于边缘纹理位置、但在边缘方向上没有已知邻近点的未知像素的内插,还有待于进一步的优化。

参考文献(References)

[1]

John Fryer, Kerry McIntosh. Enhancement of Image Resolution in Digital Photogrammetry [J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2001, **67**(6): 741—749

[2]

Battiato S, Buemi A, Mancuso M, *et al.* Adaptive Techniques for Digital Images Resolution Enhancement [A]. ICCE (International Conference on Consumer Electronics) [C], 2002.

[3]

Jia Y H. Computer Image Manipulation and Analysis [M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2001. [贾永红. 计算机图像处理与分析[M], 武汉: 武汉大学出版社, 2001.]

[4]

Simant Dube, Li H. An Adaptive Algorithm for Image Resolution Enhancement [J]. *IEEE Signals, Systems and Computers*, 2000, **2**: 1731—1734

[5]

Zhang Y J. Image Engineering [M]. Beijing : Tsinghua University Press, 2002. [章毓晋. 图像工程[M], 北京: 清华大学出版社, 2002.]

[6]

Xin L, Orchard, M.T. New Edge-Directed Interpolation [J]. *IEEE Transactions, Image Processing*, 2001, **10**(10): 1521—1527

[7]

Zhang Z X, Zhang J Q. Digital Photogrammetry [M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2002. [张祖勋, 张剑清. 数字摄影测量学[M], 武汉: 武汉大学出版社, 2002.]

[8]

Zhou W, Alan C Bovik. A Universal Image Quality Index [J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2002, **9**(3): 81—84

An Adaptive Algorithm for Resolution Enhancement Considering the Texture Attribute of Images

SHEN Huan-feng, LI Ping-xiang, ZHANG Liang-pei

(State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430079, China)

Abstract: Image resolution enhancement is useful in many applications. However, traditional image resolution enhancement algorithms often produce images with various artifacts, especially around edges on the image. In this paper, contraposing the disadvantages of traditional algorithms, we present an adaptive algorithm to enhance image resolution. In this algorithm, the texture attribute of images is considered. Appropriate filters are selected in different texture circumstances. Especially for the edge positions, the resolution enhancement is completed in two iterations in order to improve the precision and try to interpolating along edges, not across them. Therefore, this algorithm is based on edge detection technique. Through a MSE evaluation comparison, this algorithm is better than traditional interpolation methods (quadratic and cubic interpolation functions). This algorithm does not suffer from ringing and blurring artifacts. It is demonstrated that our algorithm is reasonable and effective.

Key words: resolution; enhancement; interpolation; texture