文章编号: 1008-1542(2006)02-0158-04

基于小波变换和数学形态学的航空图像边缘检测

段培超[1], 周春平[2]

(1. 中国民用航空学院理学院, 天津 300300; 2. 北京市遥感信息研究所, 北京 100011)

摘 要: 为有效提取噪声较大的航空图像的边缘信息, 对基于小波变换和数学形态学相结合的图像边缘检测算法进行了改进, 将小波分解后的高频和低频子图分别进行边缘处理。对分解后的低频系数图像采用小波边缘检测方法, 而对包含细节较多的高频系数图像则选取合适的结构元素, 提出一种新的梯度算子, 采用基于小尺度的数学形态学方法进行边缘检测, 最后对2种边缘图像采用小波重构方法得到新的边缘图像。

关键词: 小波变换; 数学形态学; 结构元素; 边缘检测

中图分类号: TN911.73 文献标识码: A

Aerial image edge detection based on wavelet transform and mathematical morphology

DUAN Pei-chao[1], ZHOU Chun-ping[2]

(1. College of Sciences, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China; 2. Beijing Remote Sensing Information Institute, Beijing 100011, China)

Abstract: Traditional edge detection arithmetics are very sensitive because of much noise of the aerial image, so an improved edge detector based on wavelet transform and mathematical morphology is proposed in this paper. It handles the high frequency and low frequency part with wavelet and mathematical morphology independently. The low frequency coefficients are detected with wavelet local maximum modulus and the high frequency coefficients including many details done with mathematical morphology by choosing appropriate structure elements. The two kinds of edge images are reconstructed by wavelet method.

Key words: wavelet transform; mathematical morphology; structure element; edge detection

航空图像包含大量宝贵的信息, 如航空照片的判读在军事、生活中具有重大的研究价值, 而图像的边缘携载了许多重要的特征信息, 是图像识别和理解景物的重要依据。但航空图像由于拍摄距离远, 且在成像过程中的混合、畸变等易导致图像特征的模糊和变形, 因此含有大量噪声, 故而难以得到"定位准确"的边缘图像。由于边缘和噪声都表现为灰度的突变, 已有的边缘检测算子如 Sobel算子、Roberts算子、拉普拉斯算子等都不能很好地抑制噪声, 从而对于噪声较大的航空图像不能进行准确的边缘提取。

小波变换由于具有良好的时频局域化特征及多尺度分析能力, 且噪声与边缘表现出不同的小波变换特征, 因而是检测图像边缘的良好工具[1~3]。数学形态学是一种非线性滤波方法, 克服了常用的多尺度分析方法易对图像细节造成模糊的缺点, 是一种分析图像几何特征的有力工具[4]。笔者针对航空图像景物复杂,

收稿日期: 2005-12-19; 修回日期: 2006-02-15; 责任编辑: 李 穆
基金项目: 中国民用航空学院校立基金资助项目(04-CAUC-15S)
作者简介: 段培超(1977-), 女, 河北衡水人, 助教, 硕士, 主要从事小波分析、形态学应用于图像处理方面的研究。

噪声大等特点, 提出了一种基于小波变换和数学形态学的航空图像边缘检测算法。实验结果表明, 通过选择合适的小波分解层次和构造恰当的结构元素, 可以达到比较理想的边缘检测效果。

1　基于小波变换的边缘检测算法

由于图像是二维信号, 故要采用二维小波变换, 定义[2]如下。令 $f(x, y)$, 表示一幅图像在某个像素点 (x, y)的灰度值, $(x, y)\in \Omega$, 其中 Ω表示图像的定义域, $\Psi(x, y)$代表二维的基本小波。

定义 **1**　令

$$\Psi_{a; b_1 b_2}(x, y) = \frac{1}{a}\Psi\left(\frac{x - b_1}{a}, \frac{y - b_2}{a}\right) \tag{1}$$

表示 $\Psi(x, y)$的尺度伸缩与二维位移, 则二维连续小波变换可定义为

$$WT_f(a; b_1, b_2) = \langle f(x, y), \Psi_{a b_1, b_2}(x, y)\rangle = \frac{1}{a}\iint f(x, y)\Psi\left(\frac{x - b_1}{a}, \frac{y - b_2}{a}\right)\mathrm{d}x\,\mathrm{d}y, \tag{2}$$

相应的小波逆变换为

$$f(x, y) = \frac{1}{C_{\Psi 0}}\int_0^{\infty}\frac{1}{a^3}\iint WT_f(a; b_1, b_2)\Psi\left(\frac{x - b_1}{a}, \frac{y - b_2}{a}\right)\mathrm{d}x\,\mathrm{d}y, \tag{3}$$

其中

$$C_{\Psi} = \frac{1}{4\pi^2}\iint\frac{|\hat{\Psi}(\omega_1, \omega_2)|^2}{|\omega_1^2 + \omega_2^2|}\mathrm{d}\omega_1\,\mathrm{d}\omega_2。 \tag{4}$$

式 (1) – 式 (3)中的 a为尺度因子, 改变 a的值, 对函数 $\Psi(x, y)$具有伸展和收缩的作用。这一性质使得小波变换成为检测信号时频局域化特征的有力工具。

图像的突变点可由小波变换的零交叉点[5]或极值点在不同尺度下的变化来表达。基于小波变换的边缘检测算法[6]主要根据以下步骤完成。

步骤 1)　对图像 F的每一行, 用式 (5)分别计算尺度 j下的小波变换结果 $W_{2^j}^x f(x, y)$, $j = 1, 2$。

$$W_{2^j}^x f(x, y) = \frac{\sum_{m=-1}^{j}\sum_{n=-1}^{j} f(x - m, y - n)\cdot m\cdot \exp\left(\frac{m^2 + n^2}{k}\right)}{k\sigma\delta^2}, \tag{5}$$

$$W_{2^j}^y f(x, y) = \frac{\sum_{m=-1}^{j}\sum_{n=-1}^{j} f(x - m, y - n)\cdot n\cdot \exp\left(\frac{m^2 + n^2}{k}\right)}{k\sigma\delta^2}。 \tag{6}$$

步骤 2)　找出零交叉点, 并根据这些零交叉点求出相邻零交叉点间的极大值点, 并记录这些极大值点。

步骤 3)　对给定图像的每一列用式 (6)重复步骤 1)、步骤 2), 求出每列变换系数的极大值, 并记录下来。

步骤 4)　对行、列 2次均获得的极大值点认为是候选边缘点, 否则认为不是边缘点。

步骤 5)　由步骤 4)检测到的大部分边缘点往往是离散的、间断的, 故要对其进行连接。一种方法就是对边缘检测图像中的每一点周围的小邻域进行特征分析: 若待处理点 (不一定是边缘点)与其 8邻域内的边缘点足够相似, 则将 2点相互连接。用来建立边缘像素相似性的特征主要有梯度算子的响应强度及梯度方向。

2　基于数学形态学的边缘检测算法

数学形态学是 20世纪 60年代由 SERRA 等提出的[7], 近年来在数字图像处理和计算机视觉领域中得到广泛应用, 成为计算机科学的研究热门之一。由于实际的物理过程常常是非线性的, 用线性近似无法描述其主要性质, 而数学形态学正是一种非线性图像处理和分析理论, 更符合图像处理与识别的实际特点。

数学形态学的基本思想是用具有一定形态的结构元素去度量和提取图像中的对应形状, 以达到对图像进行分析和识别的目的。数学形态学的应用可以简化图像数据, 保持其基本形状特征, 并除去不相干的结构。

数学形态学的基本运算[4]有 4个: 腐蚀 (或侵蚀)、膨胀 (或扩张)、开启和闭合。

用结构元素 b(灰度)对输入图像 $f(x, y)$进行灰度腐蚀, 记为 $f \ominus b$, 其定义[4]如下。

定义 **2**　$(f \ominus b)(x, y) = \min_{(i, j)}\{f(x + i, y + j) - b(i, j) \mid (x + i, y + j)\in D_f \text{ and } (i, j)\in D_b\}$, (7)

式中 D_f 和 D_b 分别表示 f 和 b 的定义域。

用结构元素 b 对输入图像 $f(x, y)$ 进行灰度膨胀, 记为 $f \oplus b$, 其定义[4]如下。

定义 **3** $$(f \oplus b)(x, y) = \max_{(i\,j)}\{f(x-i, y-j) + b(i, j) \mid (x-i, y-j) \in D_f \text{ and } (i, j) \in D_b\}。 \quad (8)$$

定义 **4** (开启运算)[4] $$f \circ b = (f \ominus b) \oplus b。 \quad (9)$$

定义 **5** (闭合运算)[4] $$f \bullet b = (f \oplus b) \ominus b。 \quad (10)$$

在文献[8]中, 已提出多种灰度形态学边缘检测算子。若采用膨胀运算, 则边缘检测算子记为 E_d, 有

$$E_d(x, y) = (f \oplus b)(x, y) - f(x, y) = \max_{(i\,j)}\{f(x-i, y-j) + b(i, j)\} - f(x, y) = \max_{(i\,j)}(f(i, j) - f(x, y)); \quad (11)$$

若采用腐蚀运算, 则边缘检测算子 E_e 为

$$E_e(x, y) = f(x, y) - (f \ominus b)(x, y) = f(x, y) - \min_{(i\,j)}\{f(x-i, y-j) - b(i, j)\} = \max_{(i\,j)}(f(x, y) - f(i, j))。 \quad (12)$$

但上述 2种方法对噪声比较敏感, 因此本文对形态学梯度算法进行了改进, 提出一种复合梯度算子。由于形态学开启运算一般能平滑图像的轮廓, 去掉细小的凸出, 删除图像中比结构元素 b 还小的几何结构, 因此采用开启运算能在某种程度上去除噪声。若采用开启运算, 则考虑将其与膨胀边缘检测算子 E_d 结合, 得到如下的边缘检测算子:

$$E_{o\text{-}d}(x, y) = E_d(x, y) - [f(x, y) - (f \circ b)(x, y)], \quad (13)$$

式(13)中方括号里的部分表示属于原图像但不属于开启后图像的那部分像素点, 而这些点往往是由噪声引起的, 故在初步检测到的边缘图像中去掉这些点, 从而能得到比之更精确的边缘图像。

3 改进的航空图像边缘检测算法

图像形态变换的结果与结构元素的形状和尺寸密切相关。因此, 在图像边缘检测时应尽量采用与物体形状相似的结构元素, 这样有利于保护图像的边缘信息, 且能在一定程度上消除噪声。考虑到航空图像的景物特点, 笔者采用图 1所示的 4种基本的结构元素 (从左至右依次为 b_1, b_2, b_3, b_4)。

b_1: {(0, −1), (0, 0), (0, 1)}; b_2: {(−1, 0), (0, 0), (1, 0)}; b_3: {(−1, −1), (0, 0), (1, 1)}; b_4 = {(−1, 1), (0, 0), (1, −1)}。

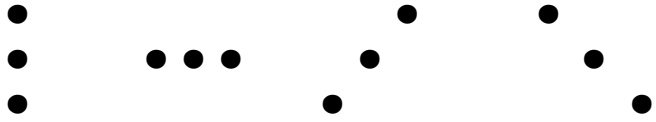

图 1 笔者采用的 4种基本的结构元素

Fig 1 Four basic structure elements adopted in this paper

由于航空街区图像中含有大量建筑物、道路等人造景物, 而由以上 4种结构元素能组合成线形、L形、V形、矩形等组合结构元素, 适合检测楼房、场地、道路、道路交汇处等人造景物的边缘。

根据航空图像的特点, 提出以下的改进算法, 步骤如下。

步骤 1) 选择合适的小波和小波分解的层次 N, 对所给卫星图像进行 N 层小波分解。

步骤 2) 对于第 1层到第 N 层的低频系数图像, 通过小波模极大值方法检测边缘点, 记录各级边缘子图。

步骤 3) 用基于小尺度的数学形态学方法对高频子图进行边缘检测。采用图 1所示的 4种结构元素及其组合结构元素, 对图像进行开启运算 (开启运算中的腐蚀和膨胀可以采用不同的结构元素)。

步骤 4) 利用由上述步骤处理后得到的除第 N 层低频系数外的其余所有系数重构图像。

步骤 5) 对初始边缘图像进行细化平滑, 连接间断边缘点, 消除假边缘点, 以获得单一连续平滑的边缘。

4 实验结果及结论

在对本文的改进算法进行计算机仿真时, 步骤 1)采用高斯函数的一阶偏导数作为基本小波, 考虑到计算速度及对精度的要求, 取 $N = 2$ 即对图像进行 2层小波分解。

实验结果见图 2,其中图 2b)为结合数学形态学与小波变换的边缘检测图像,利用小波变换与数学形态学各自的优势,得到了较好的图像特征和边缘。可以看出,与 Sobel算子和 Canny算子边缘检测图像相比较,本文中方法提取的图像边缘更加完整清晰,特征更明显。

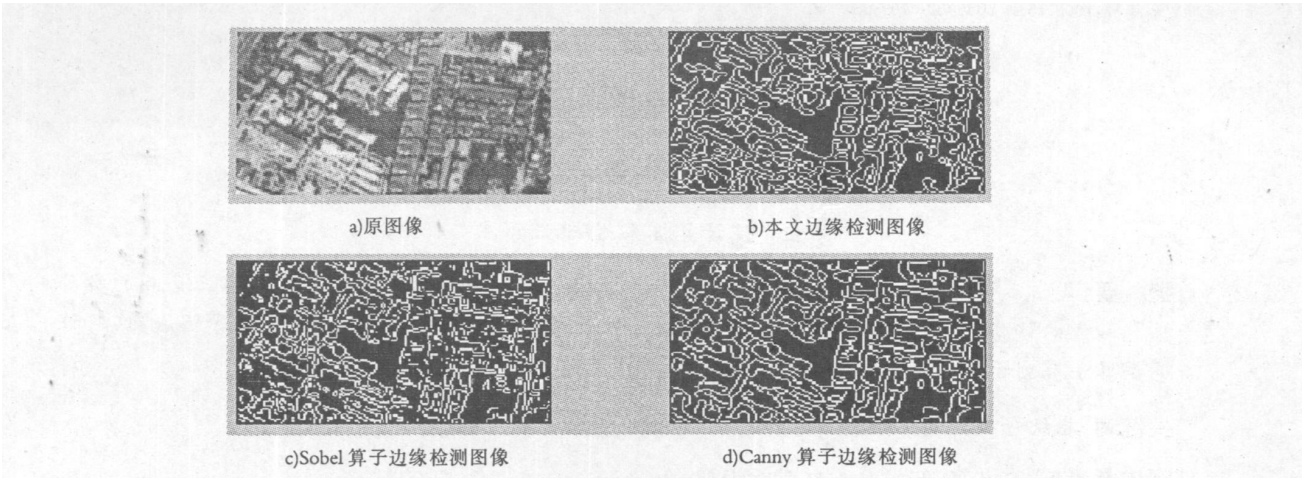

图 2　航空图像边缘检测结果比较图

Fig 2　Aerial image edge detection comparing results

实验证明,通过选择合适的小波分解层次和结构元素,用基于小波变换和数学形态学的边缘检测算法能检测出比较完整、定位准确的边缘,但当噪声很大时,边缘密集部分的检测结果会受到影响。

通常,为了解决此问题,往往需要同时使用大量不同形状的结构元素,从而导致了很大的结构元素集,使系统效率降低,也难以获得满意的结果。为了弱化形状对噪声去除的影响,可以进一步考虑将基于轮廓结构元素的形态学[6] (简称 CB形态学)和小波变换相结合,应用到含有大量噪声的航空图像边缘检测中来。

参考文献:

[1] MALLAT S. 信号处理的小波导引[M]. 杨力华,戴道清,黄文良,等译. 北京: 机械工业出版社, 2003.
[2] 杨福生. 小波变换的工程分析与应用[M]. 北京: 科学出版社, 1999.
[3] 刁彦华,王玉田,陈国通. 基于小波变换模极大值的信号奇异性检测[J]. 河北工业科技, 2004, 21(1): 1-3.
[4] 龚　炜,石青云,程民德. 数字空间中的数学形态学——理论及应用[M]. 北京: 科学出版社, 1997.
[5] HARALICK R. Digital step edges from zero crossing of second directional derivatives[J]. IEEE Trans on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1984, (6): 58-68.
[6] CANNY J. A computational approach to edge detection[J]. IEEE Trans on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1986, (6): 679-698.
[7] SERRA J. Image Analysis and Mathematical Morphology[M]. San Diego: Academic, 1982.
[8] 陶洪久,柳　健,田金文. 基于小波变换和数学形态学的遥感图像边缘检测[J]. 红外与激光工程, 2002, (4): 154-157.

(上接第 **149**页)

[5] 王建英,胡永琪,赵瑞红,等. 活性炭纤维的制备及其在环保领域的研究应用[J]. 河北工业科技, 2004, 21(4): 46-49.
[6] 祁梦兰,韩兆瑞,李赶响,等. 微电解-催化氧化-吸附法处理活性染料生产废水[J]. 河北科技大学学报, 2000, 21(3): 62-65, 71.
[7] AN Tai-cheng. Feasibility study of photoelectrochemical degradation of methylene blue with three-dimensional electrode-photocatalytic reactor[J]. Chemosphere, 2002, (6): 897-903.
[8] WALDNER G. Photoelectrocatalytic degradation of 4-chlorophenol and oxalic acid on titanium dioxide electrodes[J]. Chemosphere, 2003, (8): 989-998.
[9] SHEN Z. Catalytically assisted electrochemical oxidation of dye acid red B[J]. Water Environ Res, 2002, 74(2): 117-121.
[10] 李学萍. 活性炭载体对 TiO_2光催化降解 $Cl_3CHCOOH$性能的影响[J]. 感光科学与光化学, 2001, 19(3): 165-168.
[11] 陈　震. 溶液 pH及电流浓度对电化学法生成羟基自由基降解机制的影响[J]. 环境科学研究, 2002, 15(3): 42-44.
[12] 申哲民. 电催化氧化中的三种催化材料处理酸性红 B染料的比较研究[J]. 环境污染治理技术与设备, 2001, 2(1): 55-58.
[13] 冀小元. H_2O_2-Fe^{2+} /TiO_2-H_2SO_4体系处理有机溶剂的研究[J]. 上海环境科学, 1996, 15(8): 34-36.
[14] 钟　萍. 光助 Fenton试剂法氧化处理煤油废水溶液[J]. 中国环境科学, 2002, 22(5): 460-463.