

结合四元数与小波的彩色图像 边缘检测算法*

许姜严¹, 王卫星^{1,2}

(1. 电子科技大学 电子工程学院, 成都 610054; 2. 重庆邮电大学 计算机科学与技术学院, 重庆 400065)

摘要: 针对岩石节理裂隙图像噪声多、分割困难等问题, 提出一种使用四元数卷积, 由反对称小波系数加权的彩色图像边缘检测算法。该算法将彩色图像的 R 、 G 、 B 三个分量表示为四元数的三个虚部, 通过四元数卷积后, 其方向产生了一定角度的旋转; 将旋转后的四元数与水平方向和垂直方向的结果相加, 得到相应的幅值和角度; 使用反对称双正交小波系数对这些幅值和角度加权后, 再使用 Otsu 阈值并进行模极大抑制, 即可得到彩色图像边缘。通过对常用彩色图像和岩石节理裂隙图像的实验结果表明, 本算法对彩色图像边缘检测具有较好的效果。

关键词: 岩石节理裂隙; 边缘检测; 彩色图像; 四元数; 小波变换

中图分类号: TP391 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3695(2010)05-1981-03

doi: 10.3969/j.issn.1001-3695.2010.05.109

Color edge detector combining quaternion convolution and wavelet transform

XU Jiang-yan¹, WANG Wei-xing^{1,2}

(1. School of Electronic Engineering, University of Electronic Science & Technology of China, Chengdu 610054, China; 2. School of Computer Science & Technology, Chongqing University of Posts & Telecommunications, Chongqing 400065, China)

Abstract: Because the rock fracture image was noisy, this paper presented a color edge detection algorithm using quaternion convolution which was weighted by wavelet coefficients. The R , G and B components of a color pixel could be denoted by quaternion. After convoluted the pixel, its direction might be changed. And then added to the corresponding result in the horizontal and vertical directions. After computed the magnitude, also computed the edge strength and direction using the magnitudes. Last, obtained the color edge image via Otsu threshold and modulus maxima suppression. Experimental results show the proposed approach is efficient and robust for general color images and rock fracture images.

Key words: rock fracture; edge detection; color image; quaternion; wavelet transform

0 引言

边缘是图像信号的突变点, 是图像的重要特征之一, 因而边缘检测成为许多图像处理的基础。关于灰度图像的边缘检测有很多, 如传统的 Sobel、Laplace、Roberts 等边缘检测算子, 以及经典的 Canny 算子。近年来, 小波变换在图像处理中获得了极大的成功, 并产生了许多基于小波变换的边缘检测算法, 但这些算法大部分是基于灰度图像处理的。

彩色图像含有比灰度图像更为丰富的边缘信息。研究表明, 灰度图像仅含有彩色图像 90% 的边缘, 也就是说, 大约有 10% 的彩色图像边缘在相应的灰度图像中丢失。因此, 基于彩色图像的边缘检测算法引起了广泛关注, 同时也提出了大量的彩色边缘检测算法, 如基于四元数的边缘检测^[1,2]、向量统计边缘检测^[3,4]及 Cumani 算子等^[5]。由于彩色图像的 R 、 G 、 B 三个分量可以表示为四元数的三个虚部, 基于四元数卷积的彩色图像边缘检测具有先天的优势。近年来, 小波变换因其具有良

好的时频特性被广泛应用于图像处理领域^[6~9]。例如, Mallat 进行了基于小波变换的多尺度边缘提取的研究; 使用反对称的小波对图像进行变换, 并通过模极大抑制提取图像边缘, 获得了良好的效果。

岩石节理裂隙检测在岩石工程运用中具有重要意义。岩石在长期的地应力作用下, 往往产生裂隙而出现碎裂或变形, 对于放射性物质掩埋后, 岩石节理裂隙就成为放射线泄漏的主要途径。因而对裂隙岩体中节理裂隙的几何形态特征进行研究就显得十分必要。瑞典核燃料及核废料管理公司 (Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company) 对岩石节理裂隙取样的流程为: 首先在岩石上钻一小孔并注入绿色环氧树脂, 待环氧树脂干燥后再在相同位置对岩石取样, 并获得相应的岩石节理裂隙彩色图像。

本文首先给出了四元数卷积的基本性质, 在此基础上提出了反对称小波加权的边缘检测算法, 并分析了边缘像素幅值及方向的模极大抑制的性质。对普通图像和岩石节理裂隙图像

收稿日期: 2009-08-30; **修回日期:** 2009-10-09 **基金项目:** 国家自然科学基金资助项目 (60873186/F020509)

作者简介: 许姜严 (1978-), 男, 四川资中人, 博士研究生, 主要研究方向为图像处理、模式识别等 (xujiangyan@126.com); 王卫星 (1948-), 男, 教授, 博导, 主要研究方向为图像处理。

的实验结果表明,本算法具有较好的彩色图像边缘检测能力。

1 四元数卷积及小波的基本性质

一个四元数 q 由一个实部 a 和三个相互正交的虚部 (b, c, d) 组成。通常记为如下形式:

$$q = a + bi + cj + dk \tag{1}$$

其中复数算子 i, j 和 k 具有如下性质:

$$\begin{aligned} i^2 = j^2 = k^2 = ijk = -1 \\ ij = k, jk = i, ki = j \\ ji = -k, kj = -i, ik = -j \end{aligned} \tag{2}$$

从式(2)可知,四元数乘积是不可交换的。另外,四元数 q 也可以表示为一个标量 $S(q)$ 与矢量 $V(q)$ 之和,即 $q = S(q) + V(q)$ 。其中: $S(q) = a$; $V(q) = bi + cj + dk$ 。当标量 $S(q) = 0$ 时,称之为纯虚四元数。对于 RGB 空间中的一个彩色图像像素 (r, g, b),可用四元数表示为 $q = ri + gj + bk$,其中实部 $a = 0$ 。一个四元数的模可由式(3)计算得到。

$$|q| = \sqrt{a^2 + b^2 + c^2 + d^2} \tag{3}$$

由于四元数乘积是不可交换的,使用四元数乘积进行边缘检测时必须要有左、右两个四元数卷积模板。以最简单的 Prewitt 边缘检测算子为例,与之类似的水平方向四元数卷积模板^[1,2,4]为

$$\begin{bmatrix} \mu & 0 & \mu^* \\ \mu & 0 & \mu^* \\ \mu & 0 & \mu^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mu^* & 0 & \mu \\ \mu^* & 0 & \mu \\ \mu^* & 0 & \mu \end{bmatrix} \tag{4}$$

其中:纯虚数 $\mu = (i + j + k)/\sqrt{3}$; μ^* 为 μ 的共轭; $[\]$ 表示待卷积的彩色图像像素。由于纯虚数 μ 的三个虚部系数相等,在 RGB 空间中可将其称为灰度线。与 Prewitt 算子类似,式(4)的作用相当于是对彩色图像的一种微分,当用其幅值作边缘检测算子输出时,其结果就表征了彩色图像边缘强度的微分。

由文献[9]讨论可知,用于边缘提取的小波函数 $\varphi(x)$ 为反(奇)对称,而它所对应的尺度函数 $\phi(x)$ 为偶对称。令 $\varphi(x)$ 是一个具有反对称的双正交小波函数, $\theta(x)$ 是 $\varphi(x)$ 的积分,即

$$\theta(x) = \int_{-\infty}^x \varphi(t) dt \tag{5}$$

两边进行傅里叶变换后,利用二尺度方程的频域表达式可得

$$\hat{\theta}(\omega) = \hat{\psi}(\omega)/j\omega = G(\omega/2)\hat{\Phi}(\omega/2)/j\omega \tag{6}$$

式中: $\hat{\Phi}(\omega)$ 是尺度函数 $\phi(x)$ 的傅里叶变换。 $\varphi(x)$ 满足

$$\varphi(x) = 2^{1/2} \sum_k g(k)\phi(2x - k) \tag{7}$$

$G(\omega)$ 的定义为

$$G(\omega) = 2^{1/2} \sum_k g(k) \cdot e^{-j\omega k} \tag{8}$$

假设小波函数的对称点为 -0.5 ,则 $G(\omega)$ 可写为

$$\begin{aligned} G(\omega) &= 2^{-1/2} \sum_{k=0}^{n-1} g(k) \cdot (e^{-j\omega k} - e^{-j\omega(-1-k)}) = \\ &= 2^{-1/2} j e^{j\omega/2} \sum_{k=0}^{n-1} g(k) \cdot \sin(k + 0.5)\omega \approx \\ &= 2^{-1/2} j \omega e^{j\omega/2} \sum_{k=0}^{n-1} g(k) \cdot (k + 0.5) \end{aligned} \tag{9}$$

将式(9)代入(6)可得

$$\hat{\theta}(\omega) \approx \eta e^{j\omega/4} \hat{\Phi}(\omega/2)$$

$$\eta = 2^{-1/2} \sum_{k=0}^{n-1} g(k) \cdot (k + 0.5) \tag{10}$$

由此得

$$\theta(x) \approx \eta \phi(2x + 0.5) \tag{11}$$

上式表明,存在一阶近似下的反对称双正交小波函数 $\varphi(x)$ 及其对应的尺度函数。

使用上述小波函数在尺度 2^j 下对任意二维图像函数 $f(x, y)$ 在水平和垂直方向进行卷积运算,得

$$\begin{aligned} W_{2^j}^1 f(x, y) &= f * \varphi_{2^j}^1(x, y) \\ W_{2^j}^2 f(x, y) &= f * \varphi_{2^j}^2(x, y) \end{aligned} \tag{12}$$

其梯度矢量的模和幅角分别为

$$\begin{aligned} M_{2^j} f(x, y) &= \sqrt{|W_{2^j}^1 f(x, y)|^2 + |W_{2^j}^2 f(x, y)|^2} \\ A_{2^j} f(x, y) &= \arg \tan \left(\frac{|W_{2^j}^2 f(x, y)|}{|W_{2^j}^1 f(x, y)|} \right) \end{aligned} \tag{13}$$

通过以上运算后再进行模极大抑制,即可获得彩色图像的边缘点。

2 算法实现

为了减少运算量,文献[1]提出了一种简化的四元数卷积边缘检测算法:将像素点 p_0 进行四元数卷积得到 $\mu p_0 \mu^*$,这个值相当于绕灰度线旋转了 180° ,故 $p_0 + \mu p_0 \mu^*$ 一定落在灰度线上。因此,当两个像素 p_1 和 p_2 比较接近时, $p_1 + \mu p_2 \mu^*$ 值就接近于灰度线;而当 p_1 和 p_2 在 RGB 空间内的距离较远时, $p_1 + \mu p_2 \mu^*$ 值距离灰度线也较远。在本文中,使用上述值在灰度线上投影后的差的幅值作为边缘检测值。设 $p_3 = p_1 + \mu p_2 \mu^* = b_3 i + c_3 j + d_3 k$ 在灰度线上的投影为 $g_0 = xi + xj + xk$,则 p_3 与灰度线上的投影 g_0 的差 q_0 为

$$q_0 = p_3 - g_0 \tag{14}$$

且有

$$|q_0| + |g_0| = |p_3| \tag{15}$$

于是有

$$\begin{aligned} x &= (b_3 + c_3 + d_3)/3 \\ q_0 &= ((2b_3 - c_3 - d_3)i + (-b_3 + 2c_3 - d_3)j + \\ &\quad (-b_3 - c_3 + 2d_3)k)/3 \end{aligned} \tag{16}$$

q_0 的幅值 $|q_0|$ 表征了两个彩色像素经过四元卷积后与灰度线的差值,可认为这是 p_1 与 p_2 间的微分。通过式(14)~(16),当 $|q_0|$ 大于一定的阈值 T 时,即可认为其存在边缘。

为了检测到不同尺度的边缘点,可使用上章所述的反对称双正交小波系数对彩色图像四元卷积后的结果进行加权。由于两个像素经过四元数卷积后已经实现了微分,在小波加权时只需使用其中一半系数即可。在此,使用 $\varphi'(x)$ 来表示反对称双正交小波的正系数, q_i' 表示通过式(14)~(16)后两个像素的微分。因此,在水平和垂直方向上的小波变换可记为

$$\begin{aligned} W_{2^j}^1 f(x, y) &= |q^1| * \varphi_{2^j}^1(x, y) \\ W_{2^j}^2 f(x, y) &= |q^2| * \varphi_{2^j}^2(x, y) \end{aligned} \tag{17}$$

且

$$A' f(x, y) = \arg \tan \left(\frac{W_{2^j}^2 f(x, y)}{W_{2^j}^1 f(x, y)} \right) \tag{18}$$

在式(17)中,可得到 p_0 点经过小波系数加权后在水平和

垂直方向上的两个矢量 $q^{-1} * \varphi_{2j}^1(x, y)$ 和 $q^{-2} * \varphi_{2j}^2(x, y)$, 则 p_0 点的方向如式 (19) 所示:

$$p_0 = q^{-1} * \varphi_{2j}^1(x, y) + q^{-2} * \varphi_{2j}^2(x, y) \quad (19)$$

设 p_0 点的方向为图 1 中圆锥的主轴方向, 圆锥体的角度为 θ_r , 并设 p_1 和 p_2 是使用式 (17) 得到的图像平面方向上的两个点 p_1 和 p_2 的方向, 当 p_0 点与其模值方向的 p_1 和 p_2 的方向进行比较时, 有如下几种情形:

- a) 模极大, 且 p_1 和 p_2 在图 1 所示的圆锥体内;
- b) 模极大, 但 p_1 和 p_2 至少一个不在圆锥体内;
- c) 模不极大, p_1 和 p_2 在圆锥体内;
- d) 模不极大, p_1 和 p_2 至少一个不在圆锥体内。

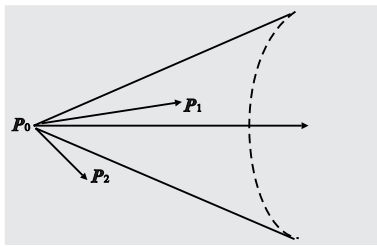


图1 模值方向示意图

分析上述各种情况有: 对于 a) 一定存在边缘; 对于 c) 一定不存在边缘; 对于 b) 和 d), 使用如下规则来确定其是否存在彩色图像边缘: 由于两个矢量 p_1 和 p_2 可以构成一个平面, 将 p_0 投影在这个平面上, 此时, 当 p_0 位于 p_1 与 p_2 之间时, 认为待检测点的色彩是由 p_1 方向通过 p_0 过渡到 p_2 方向, 故此点不是边缘点。当 p_0 不在 p_1 与 p_2 方向之间, 且 p_0 与 p_1 或 p_2 的最小角度超过 θ_r , 才认为其存在边缘, 否则也不是边缘。

最后, 采用 Otsu 方法确定最佳边缘阈值, 并使用式 (18) 的模极大抑制后, 再采用迟滞算法即可得到彩色图像边缘。

3 实验结果及分析

为了验证本文提出的彩色图像边缘检测算法, 笔者使用了常用的 Peppers 图像和岩石节理裂隙图像进行边缘检测实验。本文中设 θ_r 为 45° , 并与 Cumani、Canny 及小波边缘检测算法进行比较。彩色图像及其边缘实验如图 2 所示。从图 2 可以看出, 在图像的很多地方, 如左下角、左上角, 本算法获得了连续的边缘图像。而使用 Canny 法得到的边缘图像, 部分实际边缘已经丢失且存在较多虚假边缘。虽然小波算法在一定程度上抑制了噪声, 但也存在一些边缘丢失的情况。

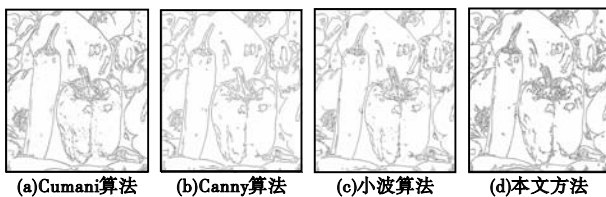


图2 彩色图像及其边缘实验

图 3 和 4 给出了岩石节理裂隙彩色图像边缘检测的实验。其中黑色部分为干燥后的环氧树脂, 且岩体中含有大量噪声及部分切割纹理。实验结果表明, 本算法获得了较为理想的岩石节理裂隙图像。

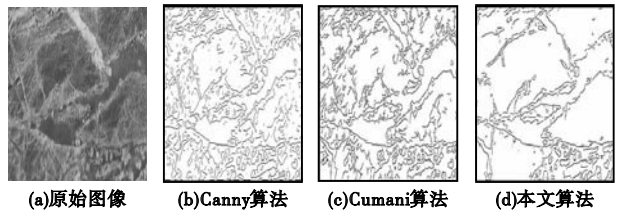


图3 岩石节理裂隙边缘检测1

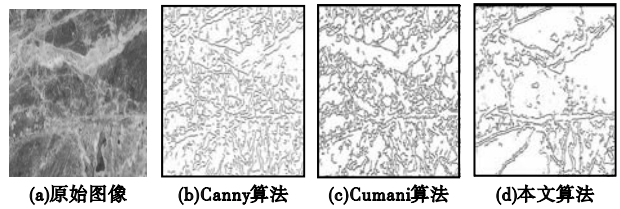


图4 岩石节理裂隙边缘检测2

从其他岩石节理裂隙检测结果也可以看出, 本算法抑制了大量的岩石节理裂隙中的噪声, 勾勒出了岩石裂隙走向, 得到了较连续的岩石节理裂隙边缘图像, 具有较好的边缘检测能力及鲁棒性。

4 结束语

岩石节理裂隙检测在放射性废料掩埋、工程爆破等领域具有重要意义。本文在四元数卷积的基础上, 提出使用反对称双正交小波系数进行加权, 这样既利用了四元数对彩色图像边缘检测的有效性, 也利用了小波变换多尺度的优点。在彩色图像中, 色彩的变化同样可以产生相应的边缘, 本文同时也利用了图像色彩的差值进行边缘检测。与其他算法相比较, 本算法抗噪声性能好, 并能有效地解决噪声抑制与精细边缘定位的矛盾。通过对常用图像和岩石节理裂隙图像的实验结果表明, 本算法是一种有效的彩色图像边缘检测方法。

参考文献:

- [1] JIN Liang-hai, LI De-hua. An efficient color-impulse detector and its application to color images[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2007, 14(6): 397-400.
- [2] SANGWINE S J. Colour image edge detector based on quaternion convolution[J]. Electronics Letters, 1998, 34(10): 969-971.
- [3] KOSCHAN A, ABIDI M. Detection and classification of edges in color images[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2005, 22(1): 64-73.
- [4] EVANS A N, LIU Xu. A morphological gradient approach to color edge detection[J]. IEEE Trans on Image Processing, 2006, 15(6): 1454-1463.
- [5] CUMANI A. Edge detection in multispectral images[J]. Graphical Models and Image Processing, 1991, 53(1): 40-51.
- [6] 魏海, 沈兰荪. 反对称双正交小波应用于多尺度边缘提取的研究[J]. 电子学报, 2002, 30(3): 313-316.
- [7] 王蓉, 高立群, 柴玉华, 等. 综合 Canny 法与小波变换的边缘检测方法[J]. 东北大学学报: 自然科学版, 2005, 26(12): 1131-1133.
- [8] 狄红卫, 张文琴. Canny 准则小波边缘检测在图像融合中的应用[J]. 光电工程, 2005, 32(6): 79-82.
- [9] MALLAT S, ZHONG Si-fen. Characterization of signals from multi-scale edges[J]. IEEE Trans on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1992, 14(7): 710-732.
- [10] 孙慧贤, 张玉华, 罗飞路. 基于 HIS 颜色空间的彩色边缘检测方法研究[J]. 光学技术, 2009, 35(2): 221-225.