

中图分类号: TP391.41 文献标志码: A 文章编号: 1006-8961(2011)12-2145-07

论文索引信息: 刘辉, 张云生, 张印辉, 何自芬. 均匀空间色差度量的矢量形态学图像处理 [J]. 中国图象图形学报, 2011, 16(12): 2145-2151

均匀空间色差度量的矢量形态学图像处理

刘辉¹⁾, 张云生²⁾, 张印辉³⁾, 何自芬³⁾

¹⁾(昆明理工大学冶金与能源工程学院, 昆明 650093) ²⁾(昆明理工大学信息工程与自动化学院, 昆明 650051)

³⁾(昆明理工大学机电工程学院, 昆明 650093)

摘要: 彩色图像矢量形态学处理中, 针对矢量排序准则存在模糊性和片面性等缺点, 提出一种新的矢量排序方法。首先根据在均匀的 Lab 空间中, 颜色之间视觉上的差距与颜色坐标上的欧几里得距离成正比的特点, 将量化后的色差大小作矢量排序准则; 然后利用四元数法建立彩色图像模型和形态学结构元素模型, 在此基础上定义新的彩色形态学基本运算符; 最后研究了矢量形态学图像处理算法, 对比了本文方法和 HSV 矢量排序法的应用效果。实验结果表明, 本文方法能较好地用于提取图像边缘和去除椒盐噪声。

关键词: 均匀颜色空间; 四元数; 彩色图像形态学; 边缘检测; 椒盐噪声

Vector morphology image processing based on difference formula in uniform space

Liu Hui¹⁾, Zhang Yunsheng²⁾, Zhang Yinhui³⁾, He Zifen³⁾

¹⁾(Faculty of Metallurgical and Energy Engineering Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093 China)

²⁾(Faculty of Information Engineering and Automation Kunming University of Science and Technology, Kunming 650051 China)

³⁾(Faculty of Mechanical and Electrical Engineering Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093 China)

Abstract: During the vector morphology processing of color image, the criterion of vector ordering is vague and one-sided. A new method of vector ordering is proposed in this paper. The gap between the visual colors is proportional to the Euclidean distance in the lab uniform color space coordinate system, and this characteristic is used to calculate the color difference, which is used as the criterion of vector ordering. The color image quaternion model and morphology structure element quaternion model are established to delimit the new morphology operators. At last, this method is used in some applications and compared with the HSV method. The experimental results show that it is better to use the proposed method to extract the image edges and reduce the salt & pepper noise.

Keywords: uniform color space; quaternion; color image morphology; edge detection; salt & pepper noise

0 引言

数学形态学(MM)是建立在集合理论、积分几何和网格代数基础上用于分析空间结构的理论。数

学形态学图像处理发展经历了二值形态学、灰度形态学和彩色形态学3个阶段。矢量形态学是彩色形态学处理中一个比较活跃的研究方向,由于彩色图像的像素是用矢量表达的,而矢量不能像数字一样直接比较大小,因此该方法的关键是如何建立合适

收稿日期: 2010-11-10; 修回日期: 2010-12-31

基金项目: 国家自然科学基金项目(60962007)。

第一作者简介: 刘辉(1984—), 男, 昆明理工大学冶金工程控制专业博士研究生, 主要研究方向为实时计算机控制。

E-mail: liuhui93@yahoo.cn。

的矢量排序准则。文献[1]提出经典的HSV矢量排序法,根据亮度、饱和度和色调影响人眼色彩感知的程度,定义了矢量排序的先后次序。该方法取得了较好的彩色图像处理效果,但色彩往往以整体效果影响人眼的感知,很难从理论上对3分量进行排序,因此其处理具有模糊性;文献[2]将色彩信息转换为纯亮度信息,即在灰度空间以亮度大小对原彩色矢量进行排序,该方法简单有效,但丢失了重要的色彩信息;国内外许多学者对此进行了研究,取得了较好的研究成果^[3-6]。

提出一种新的矢量排序准则用于形态学处理。由于人眼对颜色的分辨能力与Lab彩色空间成正比,空间坐标内的等距离意味着等色差,这可以将人眼对颜色的模糊认知进行量化处理,以量化后的色差值为依据对矢量排序,克服了排序的模糊性和片面性。另外,利用四元数建立彩色图像模型和形态学结构元素模型,在此基础上定义了新的形态学基本运算符。最后将该方法应用于彩色图像边缘提取和去除图像椒盐噪声,应用和对比实验表明,本文方法具有较好的图像处理效果。

1 彩色图像的均匀颜色空间转换

1.1 Lab颜色空间

通过照相机采集到的原始彩色图像都建立在RGB色彩空间上,但RGB是不均匀的色彩空间^[7],其几何距离的变化与视差的变化不成比例,因此,不能直接在RGB空间中利用距离来描述人眼对颜色的色差感受。

Lab彩色模型是国际照明委员会(CIE)确定的一个理论上包括了人眼可见的所有色彩的颜色模型。其最大的优点在于颜色之间视觉上的差距与颜色坐标上的欧几里得距离成正比,具有一定距离的两点之间的色彩是均匀分布的。Lab颜色空间由3个通道组成,分别是照度通道 L ,色彩通道 a 和 b 。 L 表示明亮度,其值从0~100; a 通道包含的颜色从深绿(低灰度值)到灰(中亮度值),再到亮彩红色(高亮度值),其值在-128~127之间; b 通道从紫蓝色(低亮度值)到灰(中亮度值),再到焦黄色(高亮度值),其值在-128~127之间。图1为Lab色彩空间的示意图。

从图1的色彩空间中可以看出,在Lab空间中包含了亮度、色调和饱和度的信息,这些信息能完

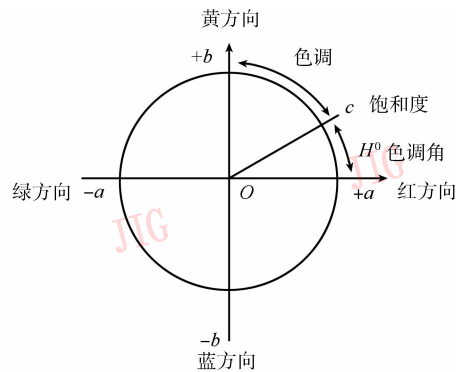


图1 Lab色彩空间的示意图

Fig. 1 The schematic diagram of Lab color space

全表达人眼的色觉感受。因此,可以对颜色视觉感受进行量化标定,以此为标准实现对彩色矢量进行排序,建立起更为精确的彩色图像形态学处理。

1.2 图像由RGB空间转换至Lab空间

颜色从RGB空间到Lab空间需要先转换到XYZ空间,CIE推荐的CIT-XYZ系统有3个基本量,用 X 、 Y 、 Z 表示,通过它们表示任何一种颜色, X 、 Y 、 Z 的值能通过 R 、 G 、 B 线性表示,两者通过式(1)进行转换

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.431 & 0.342 & 0.178 \\ 0.222 & 0.707 & 0.071 \\ 0.020 & 0.130 & 0.939 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \quad (1)$$

再根据CIE1976均匀颜色空间Lab的计算公式如下^[8]

$$L = 116f\left(\frac{Y}{Y_0}\right) - 16 \quad (2)$$

$$a = 500\left[f\left(\frac{X}{X_0}\right) - f\left(\frac{Y}{Y_0}\right)\right] \quad (3)$$

$$b = 200\left[f\left(\frac{Y}{Y_0}\right) - f\left(\frac{Z}{Z_0}\right)\right] \quad (4)$$

$$f(q) = \begin{cases} q^{\frac{1}{3}} & q > 0.008\ 856 \\ 7.787q + \frac{16}{116} & q \leq 0.008\ 856 \end{cases} \quad (5)$$

式中, $q = \frac{X}{X_0}, \frac{Y}{Y_0}, \frac{Z}{Z_0}$ 。

在 CIE1976 Lab 颜色空间中, (L_1, a_1, b_1) 和 (L_2, a_2, b_2) 两颜色之间的色差 Δ 表示为

$$\Delta = \sqrt{(L_1 - L_2)^2 + (a_1 - a_2)^2 + (b_1 - b_2)^2} \quad (6)$$

式中, X_0, Y_0, Z_0 是标准光源的三刺激值, 其值为 $X_0 = 95.045, Y_0 = 100, Z_0 = 108.255$ 。因此, 只需要根据以上公式进行计算就可以将 RGB 空间的颜色值转换到均匀的 Lab 空间。

2 建立彩色图像四元数均匀颜色模型

对彩色数字图像进行处理前, 选择合适的色彩空间和图像表示模型总是要首先考虑的重要步骤, 同时也为下文定义形态学运算符做准备。

四元数最早由 Hamilton 提出, 是复数的扩展, 也称为超复数。设 $q = a + ib + jc + kd$, 其中, $a, b, c, d \in \mathbf{R}, i, j, k$ 为虚数单位, $i^2 = j^2 = k^2 = -1, ij = -ji, jk = -kj, ki = -ik = j$ 则称 q 为四元数, 而称 a 为四元数的实部, 称 $ib + jc + kd$ 为四元数的虚部。

由于一个四元数是用 4 个数组合建立的一个有机整体, 因此可以用一个彩色像素的 3 个通道数值唯一的表示一个纯四元数, 进而建立彩色图像的四元数矩阵模型。该模型把多通道的图像简单地用一个四元数矩阵来表示, 然后利用矩阵运算的方法对模型进行运算, 从而达到对整个彩色图像进行分析和处理的目的。现有的文献基本采用以下的方式建立起彩色图像的数学模型:

将一个四元数的实部置为 0, 只包含虚部, 也就是构成一个纯四元数, 用每个彩色像素点的 R, G, B 值依次作为虚部的实数值, 即

$$f_q(x, y) = 0 + f_R(x, y)i + f_G(x, y)j + f_B(x, y)k \quad (7)$$

式中, $f_R(x, y), f_G(x, y), f_B(x, y)$ 分别表示彩色图像中像素点的 R, G, B 值, x, y 代表像素在图像矩阵中的位置。

采用经过颜色空间转换的亮度和色彩值定义一个新的四元数色彩模型

$$f_q(x, y) = 0 + f_L(x, y)i + f_a(x, y)j + f_b(x, y)k \quad (8)$$

式中, $f_L(x, y), f_a(x, y), f_b(x, y)$ 分别对应每个像素在 Lab 空间中的亮度值 L 和两个色彩值 a, b , 其值按照式(2)—(5)求取, x, y 表示像素在图像矩阵中的位置。对一幅大小为 $M \times N$ 的图像, 在式(8)的基础上建立起来的彩色图像矩阵模型

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} f_q(0,0) & f_q(0,1) & \cdots & f_q(0,N-1) \\ f_q(1,0) & f_q(1,1) & \cdots & f_q(1,N-1) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ f_q(M-1,0) & f_q(M-1,1) & \cdots & f_q(M-1,N-1) \end{bmatrix} \quad (9)$$

建立起的 \mathbf{F} 模型包含了一幅彩色图像的所有信息, 对彩色图像的处理就转换为对单个矩阵 \mathbf{F} 的运算。

3 定义新的彩色形态学运算符

彩色形态学处理中, 需要定义形态学结构元素和腐蚀、膨胀、开、闭运算符。

3.1 四元数彩色形态学结构元素

数学形态学应用于图像处理的基本思想是, 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实现图像的分析 and 识别。因此, 在定义新的形态学运算前, 需要先建立一个结构元素。结构元素的形状一般选取具有中心点对称的凸形结构体。为了保持与二值和灰度形态学结构元素在取值上的统一, 做以下两点规定:

1) 灰度形态学结构元素值为 0, 对应于四元数结构元素值为 $0i + 0j + 0k$;

2) 灰度形态学结构元素值为 1, 对应于四元数结构元素值为 $1i + 1j + 1k$ 。

这样就建立起灰度形态学结构元素和彩色形态学结构元素的对应关系。

3.2 彩色形态学基本运算符

在使用欧几里得距离计算色差前, 首先要选择一个参考颜色点。由于在 RGB 空间中的白色像素点, 其亮度最高且能分解为多种颜色的组合, 因此选择 RGB 空间中的白色为参考点。将 RGB 空间中的白色矢量(255, 255, 255)按公式转换到 Lab 空间中的矢量为(142.478 9, 0.131 7, -0.545 8), 因此参考点 $q_1 = 142.478\ 9i + 0.131\ 7j + (-0.545\ 8)k$ 。

选择的结构元素为 B , 其值为

$$B = \begin{bmatrix} 0i + 0j + 0k & 1i + 1j + 1k & 0i + 0j + 0k \\ 1i + 1j + 1k & 1i + 1j + 1k & 1i + 1j + 1k \\ 0i + 0j + 0k & 1i + 1j + 1k & 0i + 0j + 0k \end{bmatrix} \quad (10)$$

定义 1 膨胀

用结构元素 B 对彩色图像 F 进行形态学膨胀处理表示为 $F \oplus B$, 定义为

$$(F \oplus B)(s, t) = \max \{ d_{\Omega}(F(s - x, t - y) + B(x, y), q_t) \mid (s - x), (t - y) \in D_F; (x, y) \in D_B \} \quad (11)$$

式中, $F(s - x, t - y) + B(x, y)$ 表示用图像中像素的四元数值和结构元素值相加; $d_{\Omega}(F(s - x, t - y) + B(x, y), q_t)$ 表示计算相加的结果与参考点的欧几里得距离, 然后取最大值; D_F, D_B 分别表示图像 F 和结构元素 B 的定义域。四元数加减运算是把四元数的实部和 3 个虚部分别对应相加减。

定义 2 腐蚀

用结构元素 B 对彩色图像 F 进行形态学腐蚀处理表示为 $F \ominus B$, 定义为

$$(F \ominus B)(s, t) = \min \{ d_{\Omega}(F(s - x, t - y) - B(x, y), q_t) \mid (s - x), (t - y) \in D_F; (x, y) \in D_B \} \quad (12)$$

式中, $F(s - x, t - y) - B(x, y)$ 表示用图像中像素的四元数值和结构中值相减; $d_{\Omega}(F(s - x, t - y) - B(x, y), q_t)$ 表示计算相减的结果与参考点的欧几里得距离, 取最小值; D_F, D_B 分别表示图像 F 和结构元素 B 的定义域。

定义 3 开运算

用结构元素 B 对图像 F 进行开运算表示为 $F \circ B$, 定义为

$$F \circ B = (F \ominus B) \oplus B \quad (13)$$

开运算先用 B 对图像 F 进行腐蚀操作, 然后用 B 对得到的结果进行膨胀操作。

定义 4 闭运算

用结构元素 B 对图像 F 进行闭运算表示为 $F \bullet B$, 定义为

$$F \bullet B = (F \oplus B) \ominus B \quad (14)$$

闭运算先用 B 对图像 F 进行膨胀操作, 然后用 B 对得到的结果进行腐蚀操作。

利用所定义的方法对一幅彩色图像进行膨胀和

腐蚀操作, 如图 2 所示。为了能增强膨胀和腐蚀操作的视觉效果, 利用所定义的方法连续对原图像分别做了 3 次膨胀和腐蚀操作。从效果图中的显示结果看, 所定义的方法满足了预期的理想效果, 证明定义的运算符是合理的。

4 矢量形态学图像处理算法

形态学图像处理的应用非常广泛, 例如边界提取、区域填充、图像分割、形态学滤波、图像增强、图像测量等。下面以边界提取和形态学滤波为例进行算法的应用效果研究。

4.1 边界提取

边界提取以得到图像中物体的边界线为目的, 边缘包含着大量图像信息^[9]。利用图像形态学处理得到物体边界的方法描述如下。

设图像 A 中物体的边界表示为 $\beta(A)$, 形态学运算的结构元素表示为 B , 则边界可以通过先由 B 对 A 腐蚀, 然后用 A 减去腐蚀得到, 即

$$\beta(A) = A - (A \ominus B) \quad (15)$$

或者可以先用 B 对 A 进行膨胀, 然后用膨胀的结果减去 A 得到, 即

$$\beta(A) = (A \oplus B) - A \quad (16)$$

4.2 形态学滤波

形态学滤波需要用到开和闭运算, 开运算一般使对象的轮廓变光滑, 断开狭窄的间断和消除细小的突出物。闭运算通常用于消除细小的孔洞, 填补轮廓线中的断裂。常联合使用开和闭运算进行形态学滤波处理。

设被椒盐噪声污染的图像为 A , 形态学结构元素为 B , 经过形态学滤波后的图像为 $f(A)$, 则本文用下式进行形态学滤波操作

$$f(A) = (AB) \circ B = (((A \ominus B) \oplus B) \oplus B) \ominus B \quad (17)$$

5 实验结果与分析

由于 HSV 矢量形态学方法在处理彩色图像中的方法和应用较为典型, 因此, 选用该方法进行对比研究。HSV 矢量形态学首先将图像从 RGB 空间转换到 HSV 空间中, 然后根据式(18)的方法进行计算。

$$(H_1, S_1, V_1) < (H_2, S_2, V_2) \Leftrightarrow$$

$$\begin{cases} V_1 < V_2 \\ V_1 = V_2, S_1 > S_2 \\ V_1 = V_2, S_1 = S_2, H_1 < H_2 \end{cases} \quad (18)$$

从图 3 中可以看出,两种矢量形态学方法用于彩色图像边缘检测的效果相当,均能够清楚地保留房屋建筑的主体轮廓。从图 4 中可以看出,当给原始图像加密度为 10% 的椒盐噪声后,原彩色图像开始变的模糊不清,其对比度也开始下降,利用 HSV

矢量排序法,经过一次开闭运算滤波后达到了滤波效果,但在图像中依然能看到明显的噪声点,且图像的对比度也不佳;利用本文方法滤波后,较 HSV 法在改善噪声图像清晰度和对比度效果上都有所提高。继续将噪声增加至 20%,原图像出现了明显的模糊和对比度下降,利用 HSV 矢量形态学滤波后,其效果不理想,而利用 Lab 色差度量矢量形态学滤波,结果使得被 20% 噪声污染后的图像质量有了较大改善,且效果好于采用 HSV 矢量形态学滤波法。

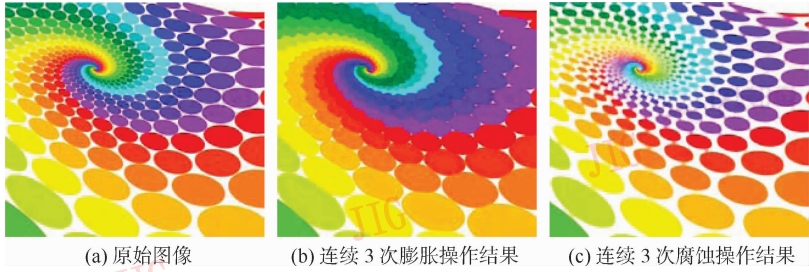


图 2 利用本文方法进行的膨胀和腐蚀操作效果图

Fig. 2 Results of using proposed dilation and erosion operations



图 3 本文方法和 HSV 矢量排序法边界提取对比

Fig. 3 Results comparison of edge detection between proposed method and HSV vector ordering method



图 4 本文方法和 HSV 方法在不同噪声情况下的滤波对比

Fig. 4 Comparison of filter results between proposed method and HSV method in different noise situations

为了进一步说明两种矢量形态学滤波操作的差别,下面利用平均绝对误差来定量描述两者的处理效果,在同等条件下平均绝对误差小的说明其滤波效果较好^[10]。

$$MAE = \frac{1}{3SUM_{x \in D}} ((|R(x) - r(x)| + |G(x) - g(x)| + |B(x) - b(x)|)) \quad (19)$$

式中,MAE 为平均绝对误差,SUM 为单色图像的像素个数, D 是定义域,即整个图像的区域, $R(x)$, $G(x)$, $B(x)$ 为滤波后的图像分量, $r(x)$, $g(x)$, $b(x)$ 为原始图像的 3 分量。选取大小为 512×512 的 Lena 彩色图像为处理对象,依次加入不同密度的噪声干扰,计算出的绝对误差结果如表 1 所示。绘制出的曲线如图 5 所示。

表 1 绝对误差结果比较
Tab. 1 Comparison of MAE

噪声密度/%	MAE	
	HSV	Lab
10	13.945 5	14.166 4
15	18.114 0	17.612 5
20	22.606 9	20.999 7
30	31.081 9	27.847 6
40	38.672 4	35.131 6
50	44.877 2	42.898 8

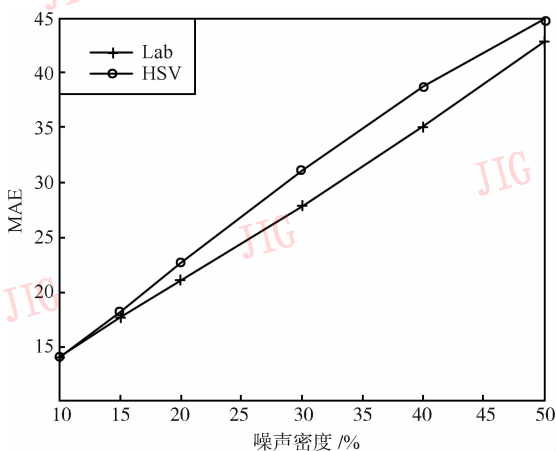


图 5 绝对误差对比曲线

Fig. 5 Comparison of MAE curve

表 1 和图 5 说明随着椒盐噪声密度的增加,两种方法的滤波结果都使绝对误差增大,但 HSV 矢量形态学滤波的增长速度更快,且在同等条件下,其绝对误差大于 Lab 矢量形态学滤波结果。

以上通过实验对比了本文方法和 HSV 矢量形态学方法在图像边缘提取和椒盐噪声滤波中的应用。HSV 矢量形态学方法是按式(18),依次考虑亮度 V 、饱和度 S 、色调 H 的大小进行排序,其特点在于若按某一参数确定了最大矢量后,则其他参数不予考虑,这一特点也使该方法在处理彩色图像时没有完全利用色彩信息。另外,HSV 方法排序的依据和人眼对 H 、 S 、 V 的敏感顺序相一致,但在实际中,眼睛对色彩的感知往往是多参数整体影响的效果,很难对多参数分开探讨。这些都影响了 HSV 矢量排序法在彩色图像处理中的效果。边缘提取方面,由于形态学膨胀操作使图像中比背景亮的部分得到扩展,而腐蚀操作使比背景亮的部分得到收缩,处理后的图像与原始图像相减就可以得到突变边缘,而两种方法都能有效进行彩色图像的膨胀和腐蚀操作,因此在提取图像边界线的视觉效果方面差别不明显。但在滤除椒盐噪声方面,由于 Lab 矢量形态学滤波所考虑的因素更全面,其矢量形态学排序的准则符合人眼对颜色的感知区别,具有计算色差与视觉色差一致的特点,同时综合了亮度和色度信息进行判断,提高了形态学图像滤波的效果,实验结果也证明了该方法的有效性。

6 结 论

将灰度图像形态学处理方法推广至彩色图像,关键在于如何定义合适的矢量排序准则。利用在 Lab 均匀颜色空间中,计算色差与人眼对颜色的视觉差异相一致的特点,提出一种基于均匀空间色差度量的彩色形态学处理算法,主要内容总结为以下几点:

1) 在四元数概念的基础上,建立了均匀颜色空间中的彩色图像模型和形态学结构元素模型,目的是方便后续形态学运算子的定义。

2) 计算 Lab 彩色空间矢量差,以此为彩色形态学图像处理的矢量排序依据。

3) 定义彩色形态学膨胀、腐蚀、开、闭运算。利用实验证明基本运算子的合理性。

4) 对比本文方法和 HSV 矢量形态学在彩色图像边缘检测和滤除椒盐噪声中的处理效果。

均匀空间色差度量的矢量形态学方法具有较好的图像处理效果,为彩色图像形态学处理的

进一步应用做好基础工作。但如何提高彩色图像形态学处理的速度是下一步需要继续研究的问题。

参考文献 (References)

- [1] Louverdis G, Vardavoulia M I, Andreadis I, et al. A new approach to morphological color image processing [J]. Pattern Recognition, 2002, 35(2002): 1733-1741.
- [2] Yin Xingyun, Wang Jun. Improved operators to dilate and erode color images based on morphology [J]. Computer Engineering and Applications, 2008, 44(14): 172-174. [尹星云, 王峻. 基于改进的彩色图像形态学膨胀和腐蚀算子设计[J]. 计算机工程与应用, 2008, 44(14): 172-174.]
- [3] Aptoula E, Lefevre S, On lexicographical ordering in multivariate mathematical morphology [J]. Pattern Recognition Letters, 2008, 29(2008): 109-118.
- [4] Liu Xuefeng, Wang Shitong. Morphology color image processing based on Sugeno fuzzy integral [J]. Computer Engineering, 2009, 35(3): 227-232. [刘学峰, 王士同. 基于 Sugeno 模糊积分的形态学彩色图像处理[J]. 计算机工程, 2009, 35(3): 227-232.]
- [5] Jesus Angulo. Geometric algebra colour image representations and derived total orderings for morphological operators-part I: colour quaternions [J]. J. Vis. Commun. Image R., 2010, 21(2010): 33-48.
- [6] Hao Zhou, Mao K Z. An impulsive noise color image filter using learning-based color morphological operations [J]. Digital Signal Processing, 2008, 18(2008): 406-421.
- [7] Wang Ke, Lu Changde, Yue Wangde, et al. Color harmony system based on Lab perceptual uniform color space [J]. Journal of North Western Polytechnical University, 2004, 22(6): 695-699. [王可, 陆长德, 乐万德, 等. 基于 Lab 均匀色彩空间的色彩调和系统[J]. 西北工业大学学报, 2004, 22(6): 695-699.]
- [8] Zhong Kehong, Ding Mingyue, Zhou Chengping, et al. Color grading method based on perceptually uniform color space [J]. Journal of Image and Graphics, 2004, 9(11): 1277-1283. [钟克洪, 丁明跃, 周成平, 等. 基于均匀空间的颜色分级方法[J]. 中国图象图形学报, 2004, 9(11): 1277-1283.]
- [9] Bai Xiangzhi, Zhou Fugen. A multi-scale edge detection method based on modified morphological transform [J]. Journal of Image and Graphics, 2007, 12(9): 1610-1613. [白相志, 周付根. 基于改进形态学算子的多尺度边缘检测[J]. 中国图象图形学报, 2007, 12(9): 1610-1613.]
- [10] Qian Weixian, Chen Qian, Gu Guohua, et al. A new anisotropic diffusion algorithm for infrared image denoising [J]. Journal of Image and Graphics, 2009, 14(4): 676-680. [钱惟贤, 陈钱, 顾国华, 等. 一种新型图像噪声抑制各向异性扩散算法[J]. 中国图象图形学报, 2009, 14(4): 676-680.]