

图空间上彩色矢量形态学算子

李亚宁, 王俊平, 高艳红

(西安电子科技大学通信工程学院, 陕西西安 710071)

摘要: 针对现有彩色图像形态学矢量排序算法的缺点, 将基于图的二值及灰度形态学扩展到彩色图像, 在具备完备格的图空间上定义一种新的彩色矢量形态学算子. 为使新算子便于实现, 结合图论定义最小生成向量子图函数及相关理论, 并在此基础上提出彩色矢量形态学极值提取算法. 实验结果表明, 该算子在保存彩色信息的完整及关联性方面优于现有的彩色形态学, 避免出现“假色”现象及人为决定主导颜色分量的缺点, 同时有效地保护了原图像的纹理不发生较大的变化, 较好的保存图像的拓扑结构, 有较广的应用前景.

关键词: 矢量排序; 完备格; 图论; 极值提取算法; 拓扑结构

中图分类号: TP391.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2015)03-0424-07

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2015.03.002

Color Vector Morphological Operators on Graph Space

LI Ya-ning, WANG Jun-ping, GAO Yan-hong

(School of Telecommunication Engineering, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China)

Abstract: Since vector sorting algorithms in color image morphology are not mature currently, some new color vector morphological operators on graph space possessing of complete lattice are defined, which are based on the binary and grayscale morphology. The proposed operators can effectively prevent the original image texture from changing and save the topology of the color images. Moreover, combined with graph theory, a minimum spanning vector subgraph function and related theories are defined to implement the operators, and the extremum extraction algorithm suitable for color vector morphology of graph space is presented. Experimental results show that the proposed operators have better performance in preservation of color image information integrity and relevance than the existing methods, and that the operators can overcome the shortcomings of false color and human-decision dominating color components, which have a broad development trend.

Key words: vector sorting; complete lattice; graph theory; extremum extraction algorithm; topology

1 引言

随着图像采集的设备不断发展, 当前采集的图像大都为彩色图像, 针对彩色图像的处理逐步成为主流^[1,2]. 形态学^[3]作为一门以集合论为基础的非线性处理理论是由法国数学家赛拉(J. Serra)和马瑟荣(G. Matheron)于1964年创立. 它建立在完备格^[3,4]数学理论基础上, 以研究图像(或信号)形状、结构为目的, 在计算机视觉、信号处理、图像分析与模式识别等方面应用广泛^[5-11]. 二值及灰度形态学在图像处理方面已较为成熟, 由于彩色图像处理中矢量排序算法^[12,13]的不成熟使得彩色形态学至今没有一套成熟的理论, 因此, 彩色形态学一直为学者们研究的热点^[14-17]. 彩色图像和灰度图像的区别是: 彩色图像的像素值用矢量表示, 而灰度图像的像素值用标量表示. 早期对彩色形态学处理算法主要是对三个分量分别进行处理, 然后进行融合得到

彩色图像^[17]. 这种处理方式不仅破坏了三分量的相互联系且易引入新的颜色. 为了解决该问题, Goutsias 等人^[16]提出了基于矢量排序的彩色形态学. 然而现有的矢量排序规则不统一, 存在多种排序算法, 各排序算法在实验处理中存在不同程度处理偏差^[12,13,16]. 彩色形态学处理的根本是寻求矢量元素的最小值及最大值, 只要建立合适的完备格空间, 就可以定义彩色形态学算子^[18].

近年来, 以图论^[19]为基础的图像处理算法正表现出强大的应用前景, 如图像分割^[20]和计算机视觉^[21]等方面. 以 Jean Cousty、Laurent Najman 和 Jean Serra 等人为代表对基于图的二值及灰度形态学^[22-32]研究颇有成就. 本文将基于图的二值及灰度形态学应用到彩色图像, 将彩色图像以图的存储结构输入, 提出图空间的彩色矢量形态学极值提取算法, 定义彩色形态学基本算子. 以图为基础的彩色形态学较现有彩色形态学的优

势是将像素点作为一个矢量集合来考虑,避免矢量排序的难题,同时将像素点间的邻接关系考虑在内,保存了彩色信息的完整性及关联性.

2 基于图的彩色矢量形态学理论基础

2.1 图及彩色图映射模型

图是一个二元组 $G = (V, E)$. 其中,集合 V 称为顶点集合,集合 E 是 V 中任意两个不同的元素组成的若干个无序对的有穷非空集合的子集,称为边集 $E = \{(u, v) | u \in V, v \in V, u \neq v\}$. 图的顶点集中的元素称为顶点,边集中的元素称为边,记为 $e_{uv} = \{(u, v) \in E | u \in V, v \in V\}$. 若图中任意两点存在 $\{(u, v) = (v, u) | u \in V, v \in V\}$,且存在权重函数 $w: E \rightarrow R$,则称这个图是无向带权图,权重计算方式可以按照欧几里德距离等来计算.若任意两点 $w_{uv} > 0$,则称这两点间存在边 $(u, v) \in E$,记为顶点 u 和 v 存在 e_{uv} ,同时称这两个顶点是通

过边 e_{uv} 连接的邻接点,否则不存在边属于 E .若在图中任意两点间存在路相通,则称此图为连通图.图中顶点的度是和顶点相关联的边的数目,记为 $d_G(v)$,在连通图中 $d_G(v) > 1$ 的点称为割点.任意两个图 G 和 g ,如果存在关系 $V(g) \subseteq V(G)$ 且 $E(g) \subseteq E(G)$,则称两个图 G 和 g 是有序的,记为 $g \subseteq G$,称 g 是 G 的子图或称图 g 小于图 G .无向图 $G = (V, E)$ 中从顶点 v 到顶点 v^* 存在的路径是一个顶点序列 $(v = v_{i,0}, v_{i,1}, \dots, v_{i,m} = v^*)$,其中, $(v_{i,j-1}, v_{i,j}) \in E, 1 \leq j \leq m$.

计算机及大多数捕获或显示图像的硬件设备都使用 RGB 颜色空间,因此本文所选图像均在 RGB 空间上进行处理.以测试图像 caps.bmp 为例,将彩色图像矢量化,图像像素点映射为图的顶点,各像素点间的邻接关系映射为图的边.权值的大小代表相邻像素的紧密度,权值越大紧密度越高,由此建立具备完备格的图空间.其映射模型如图 1.

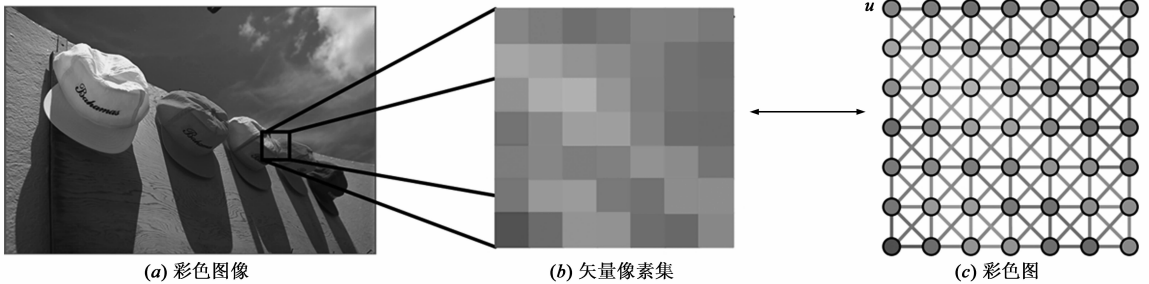


图1 彩色图映射模型

如图 1 所示,彩色矢量像素集被映射为具备完备格的八邻域带权图 $G = (V, E)$,在这个由图所构成的完备格空间结构中,顶点 V 代表彩色图像 f 的矢量像素集合: $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$, n 代表顶点的个数.边集 E 是由彩色图像各像素之间的连接关系组成的边集合: $E = \{e_{uv} | u \in V, v \in V\}$.顶点 v 的矢量值 $v = (v_R, v_G, v_B)$,定义权值函数(按欧几里德距离计算) $w: E \rightarrow R$:

$$w = |u - v| = \text{sqrt}((u_R - v_R)^2, (u_G - v_G)^2, (u_B - v_B)^2) \quad (1)$$

2.2 结构元素

图空间中结构元素通过连接顶点及其邻域顶点构建一个顶点集的邻域子集^[29],顶点 v 处的结构元素是

图的一个子图.

定义 1 任意顶点 v 的邻域顶点集合:

$$N(G, v) = \{u \in V: (u, v) \in E\} \cup \{v\} \quad (2)$$

定义 2 任意顶点 v 的邻域边集合:

$$e(G, v) = \{(u, v) \in E: u \in N(G, v), v \in N(G, v)\} \quad (3)$$

定义 3 结构元素:

$$S(G, v) = \{N(G, v), e(G, v)\} \quad (4)$$

与传统结构元素定义方式不同,图空间结构元素直接用图的拓扑结构来表达.处理中图的拓扑结构不会改变,由此可以更好的标记出可以将其填入的位置来提取结构信息.如图 2 列举几个对称性结构元素.

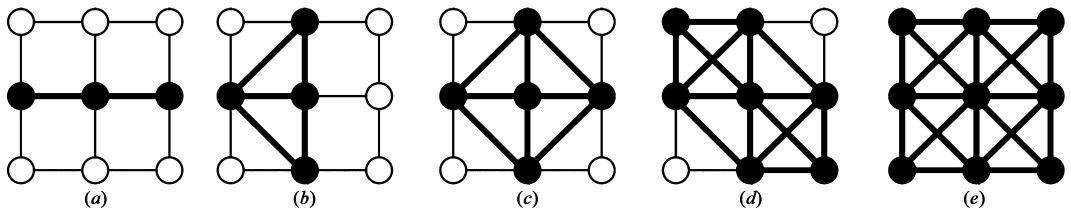


图2 结构元素

图 2(a)~(e)分别为顶点数 3、4、5、7、9 的结构元素,几何中心所在顶点为中间顶点,白点是背景点,无实际意义.当几何中心不在结构图的中心,形态学结果将发生偏移,但形状不变.结构元素的大小及形状并不唯一,在处理中可根据特定需要定义相应的结构元素.

3 彩色矢量形态学极值提取算法

由形态学理论可知,寻找最大值及最小值是处理

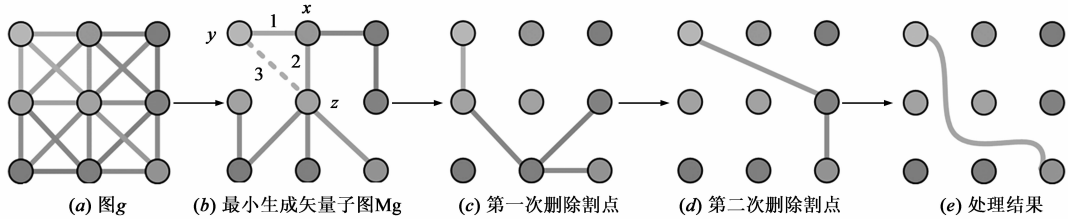


图3 极值提取算法流程

如图 3 所示,图 g 由经典 Kruskal 算法^[11,31]处理得到的最小生成矢量子图 M_g 定义了沿顶点的一条路径,包含图 G 中所有顶点及其若干条边,它是无环连通图形结构,且其权值最小.

理论 1 在无环连通的最小生成矢量子图中,割点不会成为由结点元素组成的三元向量集合的最大值 \wedge 或最小值 \vee .

证明 设由多元向量集合组成的顶点元素 $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$,元素个数为 n .最小生成子图中不存在环路,为证明需要加辅助线处理,以图 3 中任意三角形为例,同时区分图的顶点符号设三点分别为 x, y, z ,三条边为 1,2,3 及权重 w_1, w_2, w_3 .由 M_g 的构成过程知, $w_3 \geq w_1$ 且 $w_3 \geq w_2$,根据式(1)不妨设 x 是最大值,且 $x \geq y \geq z$,则 $w_2 = |x - z|$ 最大,与权重 w_3 最大不相符($x \geq z \geq y$ 时也不相符).则 x 不可能是最大值(最小值同理).以此为基础进行扩展所有割点均不可能为三元向量集合的 \wedge 和 \vee .

总结彩色矢量形态学极值提取算法步骤如下:

Step1 输入彩色图像,映射为八邻域带权彩色图 G ;

Step2 设定相应结构元素 B ;

Step3 将结构元素 B 作用于彩色图 G ,逐点扫描,生成基于每个矢量元素的最小生成子图 M_g ;

Step4 将每个最小生成子图 M_g 的割点去除,判断是否只剩两个矢量元素结点,是转 Step6,否则转 Step5;

Step5 再次生成剩余结点的最小生成子图,继续执行 Step4,直到割点数为 0,转 Step6;

Step6 剩余两个度为 1 的矢量顶点,进行 R 序算法比较得出 \wedge 及 \vee .

经过若干次删除割点处理直到割点数为 0,剩余矢

的关键.为了定义本文的基本算子,首先提出彩色矢量形态学极值提取算法.下面给出相关的定义、理论及证明.

定义 4 最小生成矢量子图函数:

任意无向带权图 G ,若存在图 M_g 为 G 的子图,函数 $T: G \rightarrow M_g$ 且 $M_g = (G_e, G_{e^*})$, $e^* \subseteq e$,同时 M_g 边集上的权值和为最小,则称图 M_g 最小生成子图, T 为最小生成子图函数.

量顶点度均为 1,其过程如图 3(b)~(e).此时只需进行一次 R 序算法,即可提取到 \wedge 及 \vee .

4 图空间的彩色矢量形态学算子

设 G 为彩色图像 f 映射的八邻域彩色图, B 为图空间的彩色矢量形态学中的结构元素, T 表示最小生成子图函数, $r(T)$ 表示重复删除割点 r 次,定义图空间的彩色矢量腐蚀和膨胀算子:

定义 5 彩色矢量腐蚀算子:

$$\begin{aligned} \varepsilon^*(G, v, B) = \\ \{u: \vee_G(r(T_{B_i}(v))) \mid u, v \in N(G, v), i \in N\} \end{aligned} \quad (5)$$

定义 6 彩色矢量膨胀算子:

$$\begin{aligned} \delta^*(G, v, B) = \\ \{u: \wedge_G(r(T_{B_i}(v))) \mid u, v \in N(G, v), i \in N\} \end{aligned} \quad (6)$$

\vee_G 表示对具备完备格的图空间 G 中矢量集合提取最小值, \wedge_G 表示提取最大值.

彩色矢量腐蚀及膨胀算子均满足递增性,且腐蚀算子满足非扩展性,而膨胀算子满足扩展性.基于所定义的彩色矢量腐蚀及膨胀算子,可定义彩色矢量开算子 γ^* 、闭算子 ϕ^* 如下:

$$\gamma^*(G, v, B) = \delta^*(\varepsilon^*(G, v, B)) \quad (7)$$

$$\phi^*(G, v, B) = \varepsilon^*(\delta^*(G, v, B)) \quad (8)$$

5 实验结果及分析

本文均采用结构元素为 9 顶点 3×3 图形,软硬件处理环境:Windows XP 操作系统、Microsoft Visual C++ 6.0-Opencv 1.0、CPU3.20GHz、内存 1.98GB.

首先,将应用广泛的边界序(M序)算法、条件序(C序)算法和本文提出的算子进行比较.

M序算法对矢量集合处理操作是将颜色向量的三

个分量分别按标量排序,然后再把排序后的三个分量按顺序组合在一起.C序算法对矢量集合处理操作首先对彩色图像的某一个颜色分量进行排序.如果该颜色分量

的值相同,则对第二个颜色分量进行排序,依此类推.为了清晰说明各算子处理差异,实验处理如图4所示.

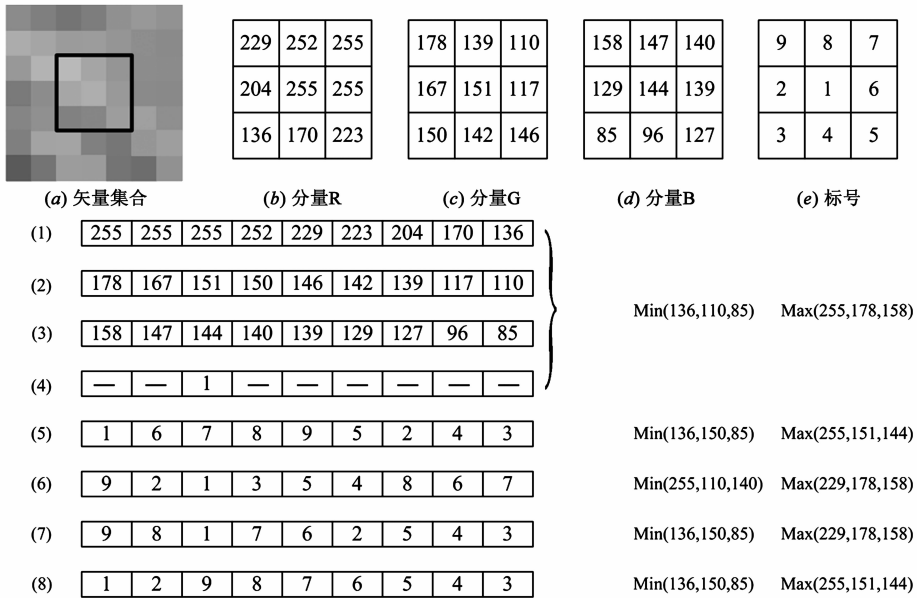


图4 M序算法、C序算法与本文矢量集合处理比较

如图4(a)表示矢量集合,所选取为其中黑框划定部分,图4(b)~(d)依次为矢量集合的R、G、B分量,为了便于处理,设定标号值如图4(e)所示.由M序算法原理,实验中分别由大到小排序R、G及B分量,结果如图4中第(1)组~第(3)组所示,得到膨胀所需的最小值(136, 110, 85)以及腐蚀所需的最大值(255, 178, 158),标号处理结果如图4中第(4)组(“-”表示“无”).可以看出,M序算法在矢量集合处理中没有考虑三个通道之间的相关性,处理的最小值及最大值在原矢量元素集合中并不存在,破坏了彩色图像的拓扑结构,引入不属于原始图像的颜色,造成“假色”现象.

值以及最小值如图4中第(5)组~第(7)组所示.可以看出,C序算法分别以R、G、B为主导分量存在三种排序结果.由此可知,C序算法中颜色向量的三个分量的比较次序没有规律可循,基本上是为人为规定,主导分量的不同对图像处理结果影响很大.图4中第(8)组为本文算子处理结果,本文算子充分考虑矢量集合三通道颜色分量相关性,较为准确地提取出矢量集合的最大值及最小值,处理结果与C序算法以R为主导分量排序结果较为接近.

由C序算法原理,实验中分别以R、G、B为主导分量进行排序,其相应标号处理结果和排序选择的最大

为了进一步说明本文算子在处理中的优点,实验选取包含红、绿、蓝、黄、青及紫六种颜色的真彩色图像,处理结果如图5.

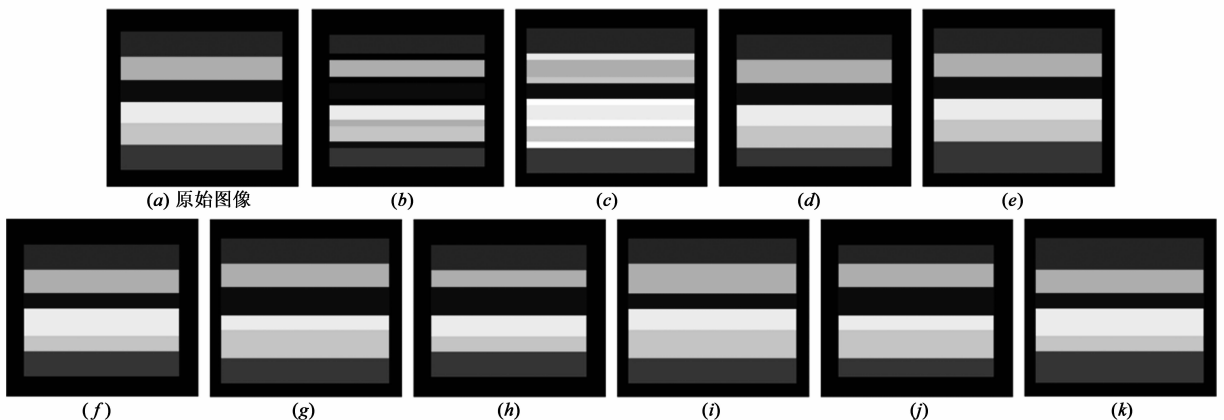


图5 M序、C序和本文算子膨胀、腐蚀效果比较

如图 5(b)所示, M 序算法 4 次腐蚀处理在黄色和青色之间引入了不属于原图的深绿色, 而 4 次膨胀如 (c) 中, 在红色和绿色之间引入不属于原图的浅黄色, 在绿蓝、蓝黄、黄青以及青紫之间均引入不同程度的白色. 由此可见, M 序算法处理输出彩色图像中产生新的色彩成份, 改变了原图像的色彩平衡, 在很多应用中, 如形态学滤波、识别、特征提取等都会产生严重干扰, 这是一个严重缺点.

由 C 序算法处理, 对比经过 4 次腐蚀的图 5(f)、(h) 及 (j), 可以看出, 以 R、G、B 为主导分量彩色条带中红、绿、蓝、黄、青及紫六种颜色均存在不同程度差异, 同样对比经过 4 次膨胀图 5(g)、(i) 及 (k), 同样存在差异. 许多实际应用处理中, 往往无法预知处理哪个彩色分量可以获得较好的效果, 要经过大量实验比对, 耗费大量人力, 而且主要依据人眼比对效果, 缺乏可信度. 图 5(d) 和 (e) 是本文算子分别经过 4 次腐蚀和膨胀处



图6 本文算子应用处理效果

理,观察可发现本文算子没有出现颜色失真,且各颜色分量均衡地进行膨胀和腐蚀,不存在主导分量不同导致处理结果间的差异,实验效果较好.

图 6 选取 Kodak 公司提供的测试图像及缺陷图像进一步验证本文算子对彩色图像的处理效果.

如图 6 所示,图 6(a)列为原始图像,图 6(b)~(e)列为经过本文腐蚀、膨胀、开和闭算子处理效果图.由图 6(b)列,经腐蚀后的图像向参考色靠近(实验以黑色作为参考色),因此彩色图像的亮度变暗.对比图 6(c)列可看出,经膨胀处理后的图像背离参考色,彩色图像的亮度变亮.比较图 6(d)、(b)列和图 6(e)、(c)列,开算子和腐蚀以及闭算子和膨胀在处理效果上较为接近,但是开和闭算子更柔和.同时观察图 6(b)和(c)列,经本文算子处理后的图像没有出现腐蚀后大片黑色区域、膨胀后大片白色区域,即基于本文提出的彩色腐蚀、膨胀算子有效保护了原图像的纹理不发生大的变化,较好的保存了图像的拓扑结构,这一特点在彩色图像滤波、分割中意义重大.

6 结论

本文基于图论提出专门针对彩色图像处理的形态学操作算子(膨胀、腐蚀、开和闭算子).由彩色形态学理论可知,寻找矢量集合的最大值及最小值是处理的关键,本文在给定的结构元素作用下通过具备完备格的图空间中彩色矢量形态学极值提取算法避开矢量排序的难题,间接寻找到彩色矢量集合的最大值及最小值,经验证本文算子效果较好.另外,如何将本文提出的彩色形态学的四种算子推广到彩色图像滤波、边缘检测等图像及视频等处理技术中是我们今后研究的方向.

参考文献

- [1] Fernandez-Maloigne C. Advanced Color Image Processing and Analysis[M]. New York: Springer, 2013. 1 - 18.
- [2] Witte V D, Schulte S, Nachttegael M, et al. Vector morphological operators for colour images[J]. Proceedings of the 2nd International Conference on Image Analysis and Recognition, ICIAR 2005[C]. Heidelberg: Springer Verlag, 2005. 667 - 675.
- [3] Serra J. Image Analysis and Mathematical Morphology[M]. London: Academic Press, 1983. 15 - 24.
- [4] Braga-Neto U, Goutsias J. Connectivity on complete lattices: new results[J]. Comput Vision Image Understanding, 2002, 85(1): 22 - 53.
- [5] Angulo J. Morphological colour operators in totally ordered lattices based on distance: application to image filtering, enhancement and analysis[J]. Comput Vision Image Understanding, 2007, 107(1-2): 56 - 73.
- [6] Luengo-Oraz M A, Faure E, Angulo J. Robust iris segmentation on uncalibrated noisy images using mathematical morphology[J]. Image and Vision Computing, 2010, 28(2): 278 - 284.
- [7] Angulo J. Morphological color processing based on distances. application to color denoising and enhancement by centre and contrast operators[A]. Proceedings of the 5th IASTED International Conference on Visualization, Imaging, and Image Processing, VIIP 2005[C]. Calgary: Acta Press, 2005. 314 - 319.
- [8] Lukac R, Smolka B, Martin K, et al. Vector filtering for color imaging[J]. IEEE Signal Process Mag, 2005, 22(1): 74 - 86.
- [9] Najman L, Talbot H. Mathematical Morphology: From Theory to Applications[OL]. <http://onlinelibrary.wiley.com/book/10.1002/9781118600788>, 2013 - 2 - 13.
- [10] Theoharatos Ch, Economou G, Fotopoulos S. Color edge detection using the minimal spanning tree[J]. Pattern Recogn, 2005, 38(4): 603 - 606.
- [11] Lézoray O, Grady L. Image Processing and Analysis with Graphs: Theory and Practice[M]. Boca Raton: CRC Press, 2012. 141 - 169.
- [12] Aptoula E, Lefèvre S. A comparative study on multivariate mathematical morphology[J]. Pattern Recogn, 2007, 40(11): 2914 - 2929.
- [13] Aptoula E, Lefèvre S. On lexicographical ordering in multivariate mathematical morphology[J]. Pattern Recogn Lett, 2008, 29(2): 109 - 118.
- [14] Louverdis G, Vardavoulia M I, Andreadis I, et al. A new approach to morphological color image processing[J]. Pattern Recogn, 2002, 35(8): 1733 - 1741.
- [15] Angulo J. Geometric algebra color image representations and derived total orderings for morphological operators part I: colour quaternions[J]. J Visual Commun Image Represent, 2010, 21(1): 33 - 48.
- [16] Goutsias J, Heijmans H J A M, Sivakumar K. Morphological operators for image sequences[J]. Comput Vis Image Understanding, 1995, 62(3): 326 - 346.
- [17] 雷涛, 樊养余, 王毅. 基于四元数表达的模糊矢量形态学算子[J]. 中国科学: 信息科学, 2013, 43(7): 853 - 871.
- [18] Lézoray O, Meurie C, Elmoataz A. Mathematical morphology in any color space[A]. Proceedings of the 2007 14th International Conference on Image Analysis Processing Workshops, ICIAP 2007[C]. Piscataway: IEEE, 2007. 174 - 178.
- [19] O' Regan G. Graph theory[A]. Mathematics in Computing[C]. London: Springer, 2013. 267 - 275.
- [20] Felzenszwalb P F, Huttenlocher D P. Efficient graph-based image segmentation[J]. Int J Comput Vision, 2004, 59(2): 167 - 181.
- [21] Felzenszwalb P F, Zabih R. Dynamic programming and graph algorithms in computer vision[J]. IEEE Trans Pattern Anal Mach Intell, 2011, 33(4): 721 - 740.

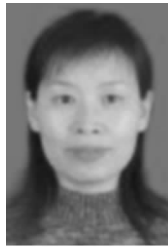
- [22] Cousty J, Najman L, Dias F, Serra J. Morphological filtering on graphs[J]. *Comput Vision Image Understanding*, 2013, 117(4): 370 – 385.
- [23] Dias F, Cousty J, Najman L. Some morphological operators on simplicial complex spaces[A]. *Proceedings of the 16th IAPR International Conference on Discrete Geometry for Computer Imagery, DGCI 2011*[C]. Heidelberg: Springer Verlag, 2011. 441 – 452.
- [24] Bloch I, Bretto A. Mathematical morphology on hypergraphs: preliminary definitions and results[A]. *Proceedings of the 16th IAPR International Conference on Discrete Geometry for Computer Imagery, DGCI 2011*[C]. Heidelberg: Springer Verlag, 2011. 429 – 440.
- [25] Cousty J, Bertrand G, Najman L, Couprie M. Watershed cuts: minimum spanning forests and the drop of water principle[J]. *IEEE Trans Pattern Anal Mach Intell*, 2009, 31(8): 1362 – 1374.
- [26] Cousty J, Bertrand G, Najman L, Couprie M. Watershed cuts: thinnings, shortest path forests, and topological watersheds[J]. *IEEE Trans Pattern Anal Mach Intell*, 2010, 32(5): 925 – 939.
- [27] Cousty J, Najman L, Serra J. Some morphological operators in graph spaces[A]. *Proceedings of the 9th International Symposium on Mathematical Morphology and Its Application to Signal and Image Processing, ISMM 2009* [C]. Heidelberg: Springer Verlag, 2009. 149 – 160.
- [28] Heijmans H, Vincent L. Graph morphology in image analysis [A]. Dougherty E. *Mathematical Morphology in Image Processing*[C]. New York: Marcel-Dekker Inc, 1992. 171 – 203.
- [29] Lezoray O, Charrier C, Elmoataz A. Learning graph neighborhood topological for image and manifold morphological processing[A]. *Proceedings of the 2008 IEEE 8th International Conference on Computer and Information Technology, CIT 2008*[C]. Piscataway: IEEE, 2008. 350 – 355.
- [30] Lezoray O, Meurie C, Elmoataz A. A graph approach to color mathematical morphology[A]. *Proceedings of the Fifth IEEE International Symposium on Signal Processing and Information Technology*[C]. Piscataway: IEEE, 2006. 856 – 861.
- [31] Stawiaski J, Meyer F. Minimum spanning tree adaptive image filtering[A]. *Proceedings of the 2009 16th IEEE International Conference on Image Processing, ICIP 2009*[C]. Piscataway: IEEE, 2009. 2245 – 2248.
- [32] Angulo J. Hypercomplex mathematical morphology[J]. *J Math Imaging Vis*, 2011, 41(1 – 2): 86 – 108.

作者简介



李亚宁 女, 1988 年 11 月出生于河北省沧州市任丘市. 硕士. 主要研究方向为多媒体通信和图像处理.

E-mail: liyaning26@126.com



王俊平 女, 1964 年出生于陕西省渭南市. 现为西安电子科技大学教授, 主要研究方向为多媒体通信、图像/视频处理及应用、DFM 及 SOC 等.

E-mail: jpwang@mail.xidian.edu.cn