

图空间上自适应形态学算子

马塾亮, 王俊平, 邓 晟, 冯玉颖

(西安电子科技大学通信工程学院, 陕西西安 710071)

摘 要: 为了解决现有图空间上形态学应用中固定选取结构元素的问题, 在图空间上提出了相似权的概念, 定义了自适应结构图, 对结构图的性质进行了证明. 在此基础上提出一种图空间上自适应形态学算子, 并从理论上验证了该算子的完备性. 新算子不仅考虑了图像像素点的局部特征, 同时考虑了连续像素的全局特征. 实验结果表明, 新算子不仅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, 而且可以根据图像的特征自适应的选取阈值和结构元素, 在更精细的图像处理方面具有良好的应用前景.

关键词: 自适应形态学; 图空间; 结构元素; 相似权; 极值提取算法; 阈值

中图分类号: TP391.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2018)01-0118-09

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2018.01.017

Adaptive Morphological Operator on Graph Space

MA Shu-liang, WANG Jun-ping, DENG Cheng, FENG Yu-ying

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

Abstract: In order to solve the problem of fixed structure element in traditional mathematical morphology on graph space, the concept of similarity weight on graph space is put forward, and the adaptive structure graph is defined. The property of structure graph is analyzed and proved. The new adaptive morphological operator on graph space is advanced on this basis and the properties of the operator are put forward and analyzed theoretically. The new operator considers not only the local feature of image pixels but also the global features of continuous pixels. The experimental results show that the new operator is superior to existing color morphology in maintaining integrity and correlation of the image information, and can select threshold value and structure element according to the characteristics of the image, thus it has a broad application prospect in more sophisticated image processing aspects.

Key words: adaptive morphology; graph space; structure element; similarity weight; extreme extraction algorithm; threshold value

1 引言

数学形态学 (Mathematical Morphology) 是以强大数学理论为基础的图像处理方法, 可以用来解决医学图像^[1]、抑制噪声^[2]、图像分割^[3]、目标识别^[4,5]及边缘检测^[6]等图像处理问题. 数学形态学是以图像几何特性和结构特性的定量描述与分析为其主要研究内容, 是一种非线性图像处理和理论^[7]. 形态学图像处理已经成为数字图像处理的一个主要研究领域, 数学形态学算法变得越来越简单而高效, 并且已经在各个领域有了成功的应用, 比如遥感图像^[8]、医药医疗^[9,10]、工业质量控制^[11]、信息安全^[12]、目标检测^[13]、生态气

候^[14]、文字识别^[15]、图像分割^[16,17]、人脸识别^[18]等领域.

1988年, Luc Vincent 发表了一篇关于图的数学形态学处理的文章^[19], 其中详细介绍了图形的概念、图像到图的映射、图形形态学的操作以及图形形态学在滤波、颗粒度测量、距离函数、骨架等图像处理方面的应用, 首次将图运用到图像处理上. 1992年, Henk Heijmans 和 Luc Vincent 等人进一步在论文中说明了图像形态学中结构元素和图形形态学中结构图的不同之处^[20], 并将图形形态学的概念再次进行系统的研究及阐述, 将其应用范围扩展到裂缝模拟多孔介质、图像的分层表示及分割、角膜细胞数量等的研究中. 在医学应

用领域中, Bertin Etienne 等人^[21]首次将形态学的处理结合 Voronoi 图和 Delaunay 三角网和数学形态学结合, 但是仅仅适用于灰度图像, 对彩色图像无法进行处理. 2005 到 2008 年, Lezoray O 将图论与形态学结合解决彩色图像处理问题, 提出一种基于图论的确定向量像素排序方法^[22-24]: 结构元素确定的向量像素集 S 中的每一个向量作为顶点, 构造一个完全图, 化简这个完全图构造它的一个汉弥尔顿路径, 根据此路径确定向量像素集 S 的上确界和下确界, 然后定义彩色图像形态学膨胀和腐蚀算子. 2009 年, 王晓峰和黄德双将基于水平集的集群框架^[25]引入了图空间中. 2015 年, 李亚宁将最小生成树应用到彩色形态学中, 定义了图空间上彩色形态学新算子^[26], 这两种方法都可以有效保护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, 但是对于图像细节部分处理的不好, 丢失了原图像细节部分的信息.

无论是普通的形态学还是图空间上的形态学, 结构元素的自动选取成为其研究的主要热点和难点^[27-35]. 在普通形态学自动选取结构元素方面, Serra^[27]是第一个提出用非严格的结构元素处理图像的想法的人, 但这是一种很不规范的自适应结构元素. 随后 Beucher S 和 Blosseville J^[28]提出了第一个自适应结构元素, 其结构元素是根据图像的车辆车辆的垂直坐标位置不同而自适应的改变形状, 并应用于交通摄像机的处理中. Verly 和 Delanoy^[29]以相似的原理提出了一种自适应结构元素, 利用结构元素能调整图像范围内灰度值, 来提取或消除已知的物理尺寸特征. 最近十年间, 自适应结构元素的研究发展迅速, 受到关注比较多的算法包括一般自适应邻域结构元素^[30]和阿米巴自适应形态学^[31], 这两种自适应结构元素的构造原理都是利用邻域像素的相似性, 其根据各自提出的像素间距离和像素灰度值规则所求的综合结果自动调整结构元素. 自适应形态学在二值滤波, 非线性滤波^[32]等图像应用方面表现出色. Santiago Velasco-Forero 和 Jesus Angulo^[33]给出了灰度碎片图像相似的概念, 在此概念的基础上提出了考虑图像全局特征的非局部自适应结构元素. Grazzini J 和 Soille P^[34]提出了一种提取自适应结构元素的标准, 称为地质距离 (Geodesic Distance), 根据地质距离的不同而自适应的选取结构元素. 自适应邻域则是根据连通部分像素的灰度值, 选择满足具体标准 (亮度, 对比度等同质容忍度) 内像素点作为结构元素, 但自适应邻域之前只在灰度图像有研究. Debayle J 和 Pinoli J C^[35]通过应用字典序的全排序关系, 重定义了灰度的自适应邻域, 将其方法扩展到彩色领域形成了彩色自适应邻域 CAN (Color Adaptive Neighborhoods).

为了克服原有图空间上数学形态学算子在图像处

理中细节部分信息丢失的缺点, 将基于图的数学形态学和自适应形态学结合起来, 将图像以图的存储结构进行处理, 提出了图空间上相似权的概念, 建立了阈值自动选取准则, 利用图空间上的彩色矢量形态学极值提取算法, 定义了图空间上彩色自适应形态学新算子, 并用实验结果验证了算子的有效性.

2 图像与图的对应关系

图空间上形态学运算的输入输出都是图, 因此, 为了对彩色图像进行图空间上的处理, 首先必须找到图像与图的对应关系, 如图 1 所示, 其中图 1(a) 是原图, 图像大小为 (135×198) , 图 1(b) 为以图 1(a) 中坐标为 $(157, 100)$ 的像素点为中心点的 $N=7$ 范围内的像素块, 将彩色图像矢量化, 图像像素点映射为图的顶点, 权值的大小用像素点的 RGB 分量来表示, 各像素点间的邻接关系映射为图的边, 权值的大小用像素之间的欧氏距离来表示, 即得到将图 1(b) 映射到图空间上的结果, 如图 1(c) 所示.

如图 1 所示, 将彩色图像 f 映射为带权的无向图 G , 图 G 是一个二元组 $G=(V, E)$. 其中, 集合 V 中的顶点 u 和 v 对应图像的像素, 集合 E 称为边集, 对应图像像素间的邻接关系. 本文中的图的边是由每个像素与其八邻域像素相连构成的. 点的权值对应于像素点的像素值, 边的权值对应于图像中相邻像素的关系, 可以表示相邻两个像素的相似性, 也可以表示相邻两个像素间边的连接强度.

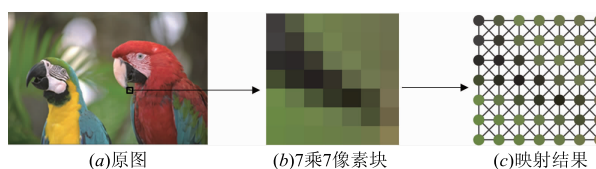


图1 图像与图映射模型示意图

3 自适应结构图的选取

3.1 图空间上相似权的概念

本文根据图空间上的相似权来选取结构图, 将彩色图像映射到图空间上.

定义矢量图空间相似权的概念:

$$W(u, v) = -\lambda \ln \left(1 - \frac{\sqrt{(B_u - B_v)^2 + (G_u - G_v)^2 + (R_u - R_v)^2}}{\lambda} \right) \quad (1)$$

$u \in N(v)$

式(1)中, $W(u, v)$ 为顶点 u 相对于中心点 v 的相似权, B_u, G_u, R_u 为顶点 u 的三个矢量分量, B_v, G_v, R_v 分别为中心点 v 的三个矢量分量, $N(v)$ 表示以中心点 v 为中心的 $N \times N$ (N 为奇数, 保证待处理点位于子图的中心)

子图 D 内的像素区域,我们这里取 λ 为 442,原因是为了保证 $\left(1 - \frac{\sqrt{(B_u - B_v)^2 + (G_u - G_v)^2 + (R_u - R_v)^2}}{\lambda}\right)$ 为正数,则 $\lambda > \sqrt{(B_u - B_v)^2 + (G_u - G_v)^2 + (R_u - R_v)^2}$,且 $\sqrt{(B_u - B_v)^2 + (G_u - G_v)^2 + (R_u - R_v)^2} \leq \sqrt{255^2 + 255^2 + 255^2} \approx 441.67$,所以 $\lambda > 441.67$;并且要保证距离中心点足够远的点相似权值要足够大,则需要 $\left(1 - \frac{\sqrt{(B_u - B_v)^2 + (G_u - G_v)^2 + (R_u - R_v)^2}}{\lambda}\right)$ 的值域范围为 $(0, 1)$,所以 $\left(1 - \frac{\sqrt{(B_u - B_v)^2 + (G_u - G_v)^2 + (R_u - R_v)^2}}{\lambda}\right)$ 的最小值要尽量接近 0,且 $\lambda > 441.67$,所以我们取 λ 为 442.

为了进一步得到式(1)的性质,本文分析了图空间上相似权函数图像,如图 2 所示.其中横坐标为图空间上两点间欧氏距离,即:

$$d(u, v) = \sqrt{(B_u - B_v)^2 + (G_u - G_v)^2 + (R_u - R_v)^2} \quad (2)$$

由图 2 可以知道中心点 v 的相似权最小,图空间上与中心点 v 距离越远的点相似权越大,距离中心点 v 最远的点相似权最大,可以利用这一性质自适应的确定结构图.

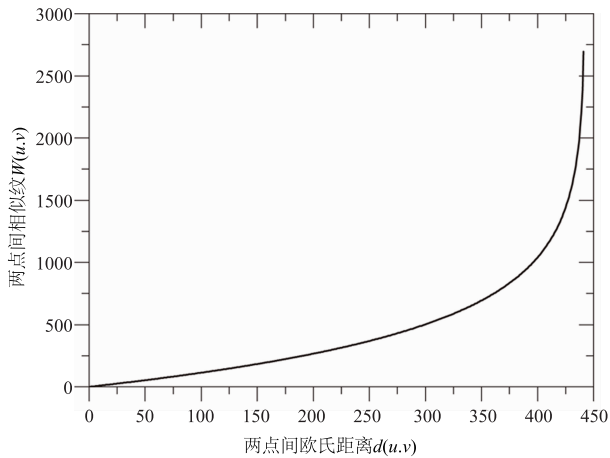


图2 矢量相似权函数示意图

3.2 结构图选取阈值的确定

本文根据其它顶点和中心点(即待处理顶点)的相似性来选取结构图,并且结构图选取的阈值自适应的给定,所以得到的结构图能反映出图的特征信息.本文选取结构图的准则如下:

对于目标顶点 x ,使用 3.1 节中的方法计算出其子图中的所有相似权 $W(u, x)$,使用式(3)计算出相似权阈值 $F_m(x)$.

$$F_m(x) = m \times \frac{W_1 + W_2 + \dots + W_{N \times N}}{N \times N} \quad (3)$$

$F_m(x)$ 为相似权阈值, $W_1 + W_2 + \dots + W_{N \times N}$ 为所选取子图中所有点的相似权值, m 为增长参数(一般取 1.5,此为实验所得),即计算相似权的平均值的 m 倍作为相似权阈值.

经过大量实验,此处建议选取增长参数为 1.5,如果增长参数选取太小,则图像相似权阈值选取过小,选取的结构图过小,会造成图像经膨胀或腐蚀运算后达不到膨胀或腐蚀的效果;如果增长参数选取过大,则图像相似权阈值选取过大,选取的结构图过大,会造成图像经膨胀或腐蚀运算后,图像信息丢失严重,如果有奇异点出现,甚至有可能产生棋盘状区域.

3.3 自适应相似权结构图的定义

图空间中结构图通过连接顶点及其邻域顶点构建一个顶点集的邻域子集,顶点 v 处的结构图是图的一个子图.

定义 1 任意顶点 v 的邻域顶点集合:

$$N_m(G, v) = \{u \in V : (u, v) \in E \cup \{v\}\} \quad (4)$$

定义 2 任意顶点 v 的邻域边集合:

$$e_m(G, v) = \{(u, v) \in E : u \in N(G, v), v \in N(G, v), W(u, v) \leq F_m(x)\} \quad (5)$$

定义 3 结构图:

$$S_m(G, v) = \{N(G, v), e_m(G, v)\} \quad (6)$$

计算完阈值后,以中心点的位置为起点,在 $N \times N$ 子图范围内进行搜索,权值小于等于 $F_m(x)$ 的范围即为结构图的范围.

图 3 为满足式(6)的结构图选取.从图中可以看出结构元素沿着边缘的走向,具有明显的自适应性.

3.4 自适应相似权结构图的性质

自适应相似权结构图满足以下几条性质:

性质 1 自反性

$$\forall v \in D: S_m(v, v) \in S_m(G, v)$$

证明 $\forall v \in D$, 因为 $N_m(G, v) = \{u \in V : (u, v) \in E \cup \{v\}\}$, 所以 $v \in N_m(G, v)$, 又因为 $W(v, v) = 0 \leq F(x)$, 所以 $e_m(v, v) \in e_m(G, v)$, 则可得 $S_m(v, v) \in S_m(G, v)$

性质 2 参数 m 的递增性

取 $(m_1, m_2) \in \mathbf{R} \times \mathbf{R}$, 则 $m_1 \leq m_2 \Rightarrow S_{m_1}(G, v) \subset S_{m_2}(G, v)$

证明 $\forall v \in D$, 因为 $N_{m_1}(G, v) = \{u \in V : (u, v) \in E \cup \{v\}\} = N_{m_2}(G, v)$, 且 $m_1 \leq m_2$, 则 $F_{m_1}(x) \leq F_{m_2}(x)$, 所以 $e_{m_1}(G, v) \subset e_{m_2}(G, v)$, 所以 $S_{m_1}(G, v) \subset S_{m_2}(G, v)$ 自反性和递增性体现了本文提出的自适应相似权结构图的合理性.

4 彩色矢量形态学极值提取算法

本文对文献[26]的彩色矢量形态学极值提取算法进行了改进,如图 4 所示.

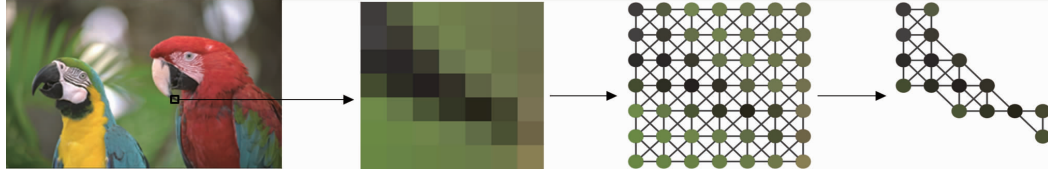


图3 结构图选取示意图

如图 4 所示,子图 g 由经典 Kruskal 算法处理得到的最小生成矢量子图 Mg 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,它是无环连通图形成结构,且其权值最小.

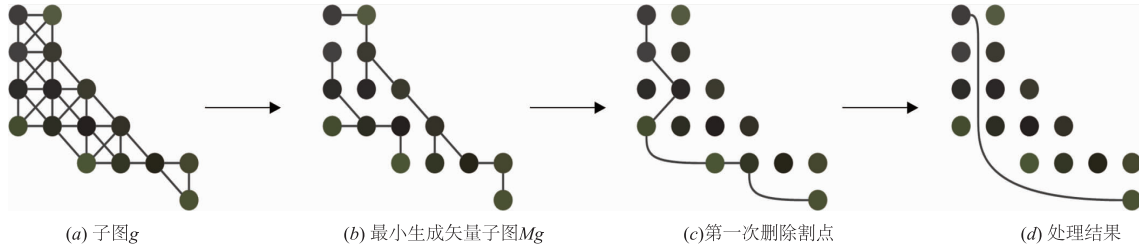


图4 极值提取算法示意图

总结彩色矢量形态学极值提取算法步骤如下:

Step1 输入图像,映射为无向带权图 G ;

Step2 设定相应结构图 S ;

Step3 将结构图 S 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 Mg ;

Step4 将每个最小生成子图 Mg 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,剩余矢量顶点度均为 1,其过程如图 4(b) ~ (d). 此时比较一次权重,即可提取到 \wedge 及 \vee .

5 图空间上自适应形态学新算子

5.1 图空间上自适应形态学新算子定义

设 G 为彩色图像 f 映射的图, S 为结构图, G 表示最小生成树函数, $r(G)$ 表示重复删除割点 r 次,定义图空间上彩色腐蚀和膨胀算子:

定义 4(彩色腐蚀算子)

$$E_m(G, v, B) = \{u: \vee_c(r(G_{B_i}(v))) \mid u, v \in N(G, v), i \in N\} \quad (7)$$

定义 5(彩色膨胀算子)

$$D_m(G, v, B) = \{u: \wedge_c(r(G_{B_i}(v))) \mid u, v \in N(G, v), i \in N\} \quad (8)$$

定义 6(彩色矢量开算子)

$$O_m(G, v, B) = D_m(E(G, v, B)) \quad (9)$$

定义 7(彩色矢量闭算子)

$$O_m(G, v, B) = D_m(E(G, v, B)) \quad (10)$$

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

5.2 图空间上自适应形态学新算子性质

设 f 和 g 为待处理图像, $m \in \mathbf{R}$, 则新算子具有以下性质.

性质 3 递增性

$$f \subset g \Rightarrow \begin{cases} E_m(f, v, B) \subset E_m(g, v, B) \\ D_m(f, v, B) \subset D_m(g, v, B) \\ O_m(f, v, B) \subset O_m(g, v, B) \\ C_m(f, v, B) \subset C_m(g, v, B) \end{cases}$$

性质 4 扩展性

$$O_m(f, v, B) \subset f \subset C_m(f, v, B)$$

性质 5 幂等性

$$\begin{cases} C_m(f, v, B) \circ C_m(f, v, B) = C_m(f, v, B) \\ O_m(f, v, B) \circ O_m(f, v, B) = O_m(f, v, B) \end{cases}$$

性质 6 参数 m 的递增性

$$m_1 \leq m_2 \Rightarrow \begin{cases} D_{m_1}(f, v, B) \subset D_{m_2}(f, v, B) \\ E_{m_1}(f, v, B) \subset E_{m_2}(f, v, B) \end{cases}$$

递增性、扩展性、幂等性以及参数 m 的递增性体现了本文提出的新算子的合理性.

6 实验与结果分析

实验的软硬件处理环境: Windows 7 操作系统, Microsoft Visual C++ 6.0-Opencv 1.0, CPU3.20GHz, 内存 1.98GB.

图 5 为本文算子与其他几种彩色形态学算子的比

较. 我们对 500 幅图像进行了实验, 随机挑选了其中的 4 幅图像. 图 5 是使用不同形态学算子对同图像进行膨胀运算的结果图.

图 5(a) 为原始图像, 图 5(b) 为条件序算法膨胀图像, 图 5(c) 为边界序算法膨胀图像, 图 5(d) 为简约序算法(选取 RGB 的排序方式)膨胀图像, 图 5(e) 为文献 [26] 膨胀图像, 图 5(f) 为本文算法(处理空间 RGB) N

$= 7$ 和 $m = 1.5$ 的膨胀图像. 观察图中砖与砖之间连接处, 可知边界序算法、简约序算法和文献 [26] 算法在细节和纹理处理上效果较好, 但整体泛白, 而条件序算法并没有起到膨胀的效果. 本文算法膨胀运算在图像整体上处理的更好, 颜色既不泛白, 而且起到了膨胀的效果.

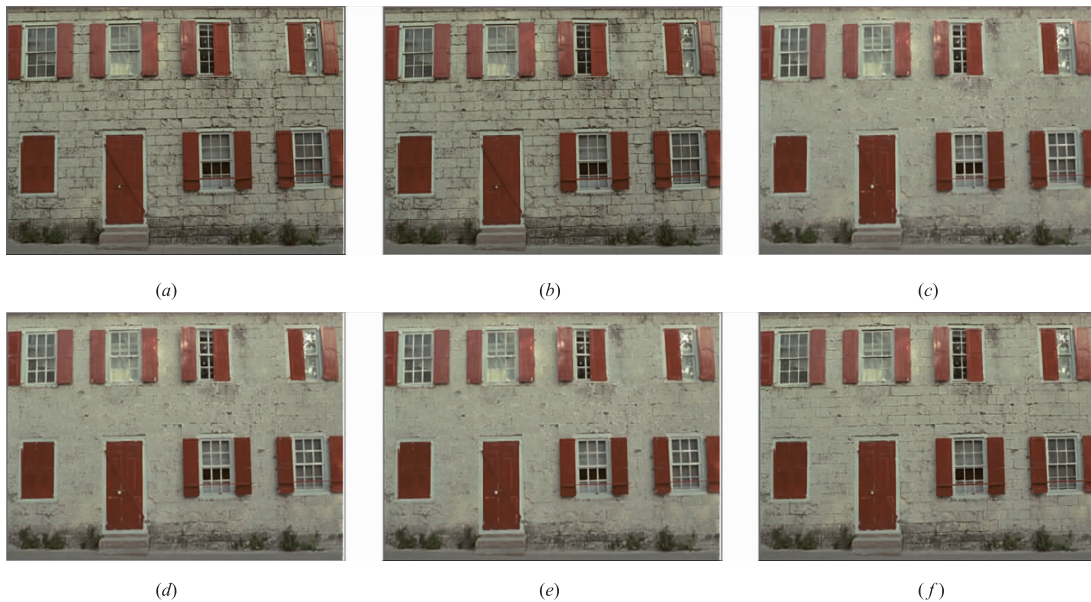


图5 不同彩色形态学算子膨胀结果示意图



图6 不同彩色形态学算子腐蚀结果示意图

图 6 是使用不同形态学算子对同一图像进行腐蚀运算的结果图. 图 6(a) 为原始图像, 图 6(b) 为条件序腐蚀图像, 图 6(c) 为边界序算法腐蚀图像, 图 6(d) 为简约序算法(选取 RGB 的排序方式)腐蚀图像, 图 6(e) 为文献[26]腐蚀图像, 图 6(f) 为本文算法(处理空间 RGB) $N=7$ 和 $m=1.5$ 的腐蚀图像. 观察图中头发部分, 可知条件序算法、边界序算法和文献[26]算法在细节和纹理处理上效果较好, 但整体偏暗, 且出现了棋盘

状区域, 而简约序算法并没有起到腐蚀的效果. 本文算法腐蚀运算在图像整体上处理的更好, 颜色既不偏暗, 而且起到了腐蚀的效果.

图 7 和图 8 是不同形态学算子闭运算和开运算比较结果: 从实验结果可以看出本文的使用本文算子处理的图像比使用其他算子处理的图像在细节和纹理上有更好的表现, 整幅图像也有更好的表现效果. 如图 7 中图像缺陷部分, 图 8 中帽子上的文字.

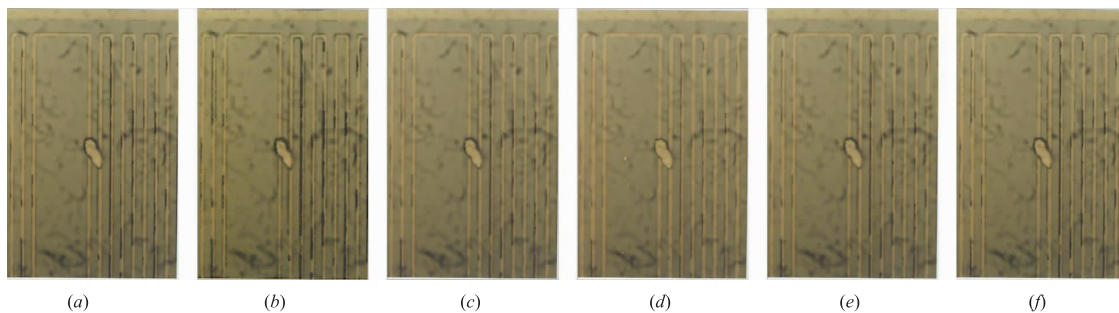


图7 不同彩色形态学算子闭运算结果示意图

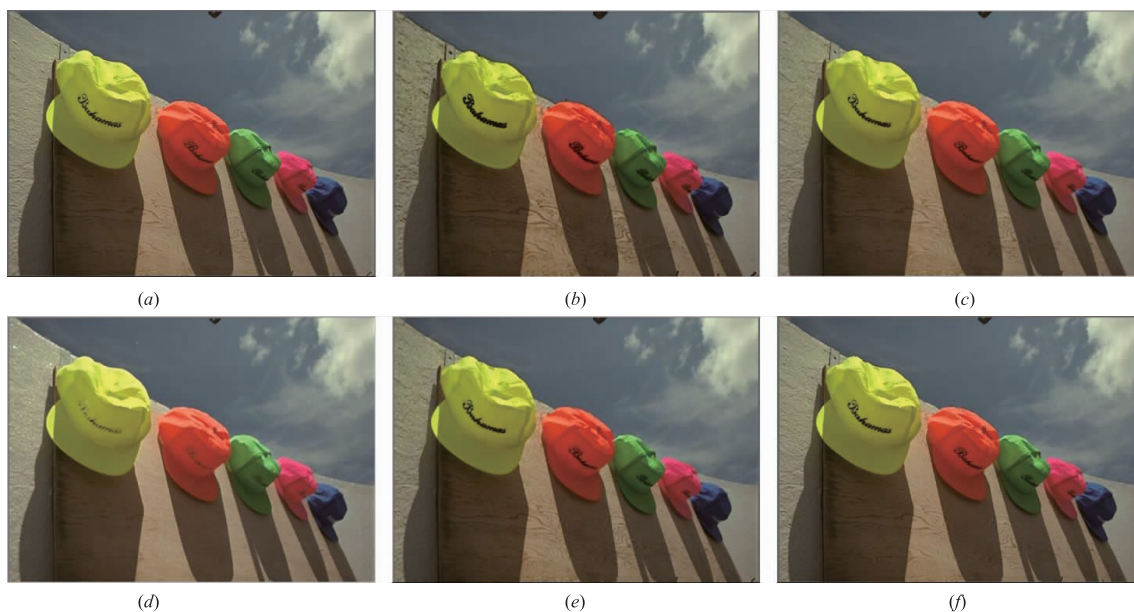


图8 不同彩色形态学算子开运算结果示意图

综上所述, 经过腐蚀之后图像的整体色彩趋于变暗, 膨胀之后图像的整体色彩趋于变白. 其它的算法较好的保留了图像细节, 但是与原图相比细节损失还是很多并且图像整体色彩发生变化. 本文的算法比其它的算法相比, 最大程度的保留了图像中有意义的细节, 画面色彩更加流畅.

为了进一步的说明本算法的特点, 对处理后的图像进行客观的数据分析. 我们取图 6 中以坐标 (83, 315) 的像素点为中心点, 范围为 3 的像素块, 如图 9

所示.

由图 9 中数据可知, 经过腐蚀操作处理后, 条件序和边界序处理方法得到的结果接近, 形成了棋盘状区域(即相似像素点像素差距过小), 简约序(选取 RGB 的排序方式)处理方法改变了原有图像的纹理结构, 文献[26]算法比前三种算法有改进, 但是一定程度上还是改变了原图的纹理结构, 而本文算法在保持原有图像纹理结构的基础上对图像进行了腐蚀操作, 可以得到, 本文算法优于上面所述四种算法.

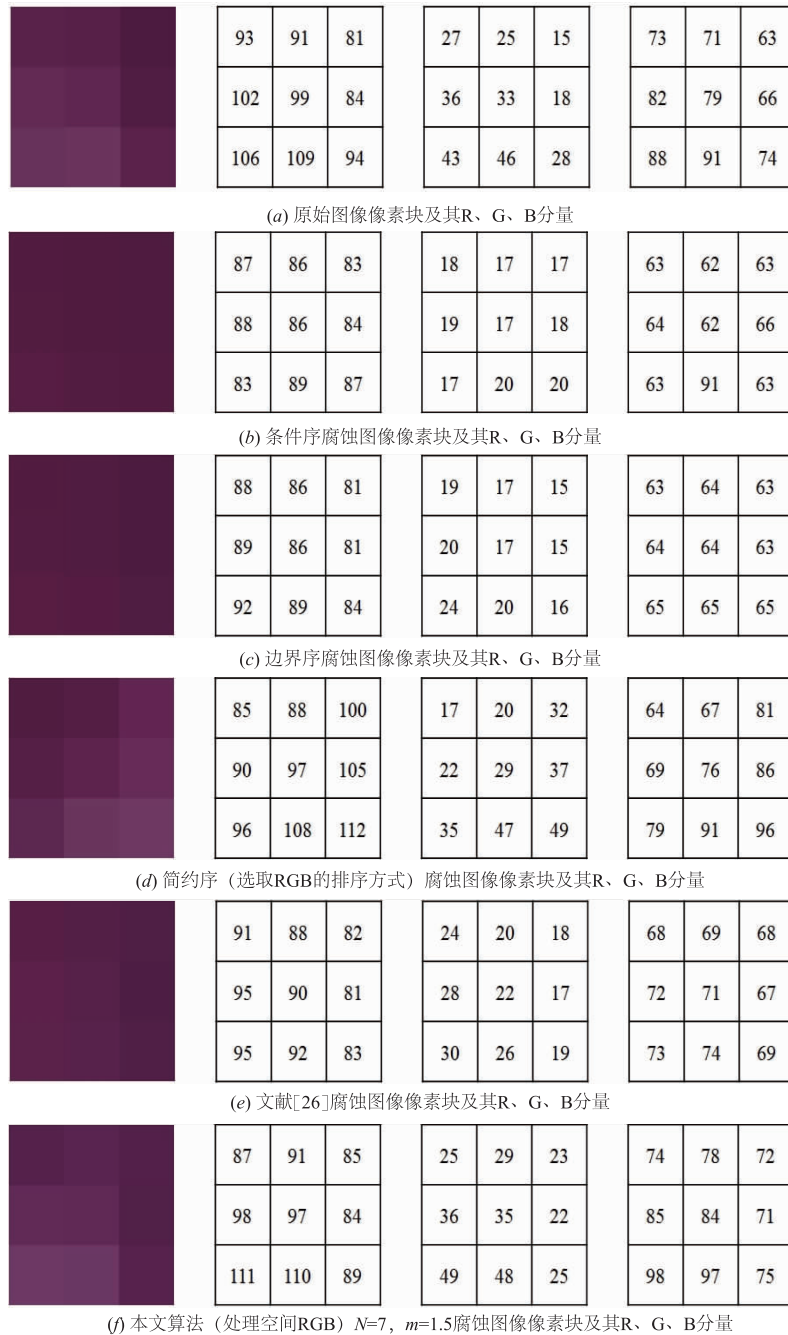


图9 不同彩色形态学算子处理结果比较

7 结论及未来工作

本文将基于图的二值及灰度形态学拓展到彩色图像,将图像以图的存储结构输入,提出了图空间上相似权的概念,建立了阈值自动选取准则,利用图空间的彩色矢量形态学极值提取算法,并且结合自适应形态学,定义了图空间上自适应形态学新算子.实验结果表明,其效果均优于现有图空间上形态学算子,新算子不仅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,保留了图像信息的相关性,而且可以根据图像的特征自适应的选取阈值和结构元素.如何将本文提出的算子应用到图像滤波,图像增强,骨架提取等更加精细的图像处理方面是我们下一步的工作.

参考文献

- [1] SERRA J. Quantification of interstitial chronic renal damage by means of texture analysis[J]. *Kidney International*, 1994,46(6):1721-1727.

- [2] ANGULO J. Morphological colour operators in totally ordered lattices based on distances: Application to image filtering, enhancement and analysis[J]. *Computer Vision and Image Understanding*, 2007, 107(1-2): 56-73.
- [3] LUENGO-OROZ 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.
- [4] KAWAMURA M, TSUJIKO Y. An approach to geographic pattern recognition using a mathematical morphology[A]. *Proceedings of the 1994 International Geoscience and Remote Sensing Symposium*[C]. New York: IEEE, 1994. 872-874.
- [5] XIANG R, YING Y, JIANG H. Tests of a recognition algorithm for clustered tomatoes based on mathematical morphology[A]. *Proceedings of the 2013 6th International Congress on Image and Signal Processing*[C]. Piscataway: IEEE, 2013. 464-468.
- [6] NAJMAN L, TALBOT H. *Mathematical Morphology: From Theory to Applications*[M]. ISTE, Wiley, 2013. 1-33.
- [7] SERRA J. *Image Analysis and Mathematical Morphology*[M]. London: Academic Press, 1982. 23-90.
- [8] AYTEKIN O, ULUSOY I. Automatic segmentation of VHR images using type information of local structures acquired by mathematical morphology[J]. *Pattern Recognition Letters*, 2011, 32(13): 1618-1625.
- [9] BOURAOUI B, RONSE C, BARUTHIO J. 3D segmentation of coronary arteries based on advanced mathematical morphology techniques[J]. *Computerized Medical Imaging and Graphics*, 2010, 34(5): 377-387.
- [10] 徐艳蕾, 赵继印, 李敏, 等. 基于顺序形态学的医学图像插值算法的研究[J]. *电子学报*, 2010, 38(5): 1002-1007.
XU Yan-lei, ZHAO Ji-yin, LI Min, et al. The interpolation arithmetic study of medical image based on the order morphology[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2010, 38(5): 1002-1007. (in Chinese)
- [11] MORATO L M, SIRI P. A novel approach to fabric defect detection using digital image processing[A]. *Proceeding of the 2011 International Conference on Signal Processing, Communication, Computing and Networking Technologies (ICSCCN)*[C]. Piscataway: IEEE, 2011. 228-232.
- [12] 周琳娜, 王东明, 郭云彪, 等. 基于数字图像边缘特性的形态学滤波取证技术[J]. *电子学报*, 2008, 36(6): 1047-1051.
ZHOU Lin-na, WANG Dong-ming, GUO Yun-biao, et al. Exposing digital forgeries by detecting image blurred mathematical morphology edge[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2008, 36(6): 1047-1051. (in Chinese)
- [13] 方义强, 程正东, 樊祥, 等. 一种基于方差标记的形态学红外小目标检测算法[J]. *电子学报*, 2015, 43(2): 338-343.
FANG Yi-qiang, CHENG Zheng-dong, FAN Xiang, et al. A morphology algorithm for ir dim target detection based on variance-mark[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2015, 43(2): 338-343. (in Chinese)
- [14] KOSTIKOVA A, LITSIOS G, BURGYS S, et al. Scale-dependent adaptive evolution and morphological convergence to climatic niche in Californian eriogonoids (Polygonaceae)[J]. *Journal of Biogeography*, 2014, 41(7): 1326-1337.
- [15] KHAYYAT M, LAM L, SUEN C Y, et al. Arabic handwritten text line extraction by applying an adaptive mask to morphological dilation[A]. *Proceedings of the 2012 10th IAPR International Workshop on Document Analysis Systems*[C]. Washington: IEEE, 2012. 100-104.
- [16] WANG X F, HUANG D S, XU H. An efficient local Chan-Vese model for image segmentation[J]. *Pattern Recognition*, 2010, 43(3): 603-618.
- [17] NOMURA S, YAMANAKA K, KATAI O, et al. A novel adaptive morphological approach for degraded character image segmentation[J]. *Pattern Recognition*, 2005, 38(11): 1961-1975.
- [18] LI B, ZHENG C H, HUANG D S. Locally linear discriminant embedding: An efficient method for face recognition[J]. *Pattern Recognition*, 2008, 41(12): 3813-3821.
- [19] HEIJMANS HENK J A M, VINCENT L. Graph morphology in image analysis[J]. *Mathematical Morphology in Image Processing*, 1993, 39(4): 620-622.
- [20] GOUTSIAS J, HEIJMANS HENK J A M, SIVAKUMAR K. Morphological operators for image sequences[J]. *Computer Vision and Image Understanding*, 1995, 62(3): 326-346.
- [21] BERTIN E, BILLIOT J M, DROUILHET R. Existence of delaunay pairwise gibbs point process with superstable component[J]. *Journal of Statistical Physics*, 1999, 95(3): 719-744.
- [22] 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.
- [23] LEZORAY O, CHARRIER C, ELMOATAZ A. Learning graph neighborhood topological order 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.
- [24] 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.
- [25] WANG X F, HUANG D S. A novel density-based clustering framework by using level set method [J]. IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, 2009, 21(11): 1515 – 1531.
- [26] 李亚宁, 王俊平, 高艳红. 图空间上彩色矢量形态学算子[J]. 电子学报, 2015, 43(3): 424 – 430.
LI Ya-ning, WANG Jun-ping, GAO Yan-hong. Color vector morphological operator on graph space[J]. Acta Electronica Sinica, 2015, 43(3): 424 – 430. (in Chinese)
- [27] SERRA J. Image Analysis and Mathematical Morphology [M]. Orlando: Academic Press, 1983.
- [28] BEUCHER S, BLOSSEVILLE J M, HALL E L. Traffic spatial measurements using video image processing [A]. Proceedings of the Intelligent Robots and Computer Vision VI [C]. Cambridge: SPIE, 1988. 848 – 1143.
- [29] VERLY J G, DELANOY R L. Adaptive mathematical morphology for range imagery [J]. IEEE Transactions on Image Processing: A Publication of the IEEE Signal Processing Society, 1993, 2(2): 272 – 275.
- [30] DEBAYLE J, PINOLI J C. General adaptive neighborhood image processing [J]. Journal of Mathematical Imaging and Vision, 2006, 25(2): 245 – 266.
- [31] LERALLU R, ÉTIENNE Decencière, MEYER F. Image filtering using morphological amoebas [J]. Image and Vision Computing, 2007, 25(4): 395 – 404.
- [32] ANGULO J. Morphological bilateral filtering and spatially-variant adaptive structuring functions [A]. Proceedings of the 10th International Conference on Mathematical Morphology and Its Applications to Image and Signal Processing [C]. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2011. 212 – 223.
- [33] SALEMBIER P. Study on nonlocal morphological operators [A]. Proceedings of the 16th IEEE International Conference on Image Processing [C]. Piscataway: IEEE, 2009. 2245 – 2248.
- [34] GRAZZINI J, SOILLE P. Adaptive morphological filtering using similarities based on geodesic time [A]. Proceedings of the 14th IAPR International Conference on Discrete Geometry for Computer Imagery [C]. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2008. 519 – 528.
- [35] CELEBI M E, SMOLKA B. Advances in Low-Level Color Image Processing [M]. Dordrecht: Springer Netherlands, 2014.

作者简介



马塾亮 男, 1991 年 10 月出生于河北省沧州市. 硕士. 主要研究方向为多媒体通信和图像处理.
E-mail: 1412796640@qq.com



王俊平 女, 1964 年 10 月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