



论 文

基于 HSV 彩色空间的矢量形态学算子

雷涛^{①②*}, 樊养余^①, 赵炯^③^① 西北工业大学电子信息工程学院, 西安 710129^② 兰州交通大学电子与信息工程学院, 兰州 730070^③ 空军工程大学电讯工程学院, 西安 710077

* 通信作者. E-mail: leitaoly@163.com

收稿日期: 2010-12-01; 接受日期: 2011-04-18

国家自然科学基金 (批准号: 60872159, 60903127) 资助项目

摘要 在 HSV 彩色空间中, 现有的矢量形态学算子对彩色像素的排序依据 V、S、H 顺序分层进行, 从而违背了彩色图像中三个分量的平等原则, 导致矢量形态学滤波算子难以去除彩色图像中由色调和饱和度分量引起的噪声, 因此滤波算子性能较差. 文中提出了一种基于 HSV 三分量混合运算的矢量形态学排序规则, 并根据该规则定义了新的矢量形态学腐蚀、膨胀算子以及常用的矢量形态学滤波算子. 实验结果表明, 新的矢量形态学滤波算子较现有的矢量形态学滤波算子具有更强的噪声抑制性能, 在保证图像不增加新的彩色像素的同时, 去除了噪声并保留了图像细节, 滤波后的图像具有较高的峰值信噪比和较小的均方根误差.

关键词 HSV 彩色空间 矢量形态学算子 矢量排序 图像细节

1 引言

数学形态学是网格理论在空间结构的应用, 在定义形态学算子前, 必须先完整的网格结构中定义形态学算子总的顺序. 在灰度形态学理论中, 形态学算子在完整的网格内均有确定的顺序关系, 排序规则为灰度值的大小顺序关系^[1]. 然而, 在处理彩色图像时, 由于彩色像素包含红色、绿色和蓝色三个分量, 从而不能直接将灰度形态学理论推广到彩色图像处理中. 如果定义一个完整的网格为 $(M, \leq_{cp})$, $\leq_{cp}$ 表示矢量顺序关系, 即对于彩色像素点 p_i 和 p_j 存在 $p_i \leq_{cp} p_j^{[2,3]}$. 根据该矢量顺序关系可以定义矢量形态学腐蚀、膨胀算子, 从而将矢量形态学应用到彩色图像处理中.

对矢量形态学算子的研究已经积累了一些研究成果, 以 Serra^[4]、Goutsias^[5]、Angulo^[6,7]、Luengo-Oroz^[8,9]、Vardavolia^[10] 和 Louverdis^[11] 等人为代表. Goutsias 认为^[5], 当确定了像素向量之间的排序关系后, 就可以像定义灰度形态学一样定义彩色形态学的腐蚀、膨胀、开和闭算子, 并可以将许多灰度形态学算法直接推广到彩色图像处理中. 然而 Goutsias 并没有给出具体的矢量排序规则和方法, 从而导致学者们在不同的彩色空间提出了不同的矢量排序规则^[9~17]. 基于亮度、饱和度、色度定义的彩色模型 (HSV, HSI) 更符合人眼对颜色的感知. 因此, Vardavolia 和 Louverdis 分别提出了基于 HSV 彩色空间的不同矢量排序规则^[10~13]. Hanbury 在 HLS 彩色空间下提出了一种同时考虑色调和饱和度方法的矢量形态学算子, 并分析了基于 $L^*a^*b^*$ 彩色空间的形态学方法, 利用权重函数和词典编纂顺序在

此空间下定义了总的彩色矢量顺序^[14,15]. Angulo 提出了基于 LSH 的矢量排序规则^[6]. 此外, Peters II 针对彩色图像提出了一种新的矢量形态学方法, 并基于 $L^*u^*v^*$ 彩色空间定义了新的矢量形态学算子^[16]. 然而, 实际中的计算机系统和大多数捕获或显示图像的硬件设备均采用了 RGB 彩色模型, 因此 Witte 提出了基于 RGB 彩色空间的矢量排序方法^[17]. 分析上述的矢量排序规则发现, Vardavolia 和 Louverdis 提出的矢量排序规则在矢量形态学中对彩色图像的处理效果最佳.

然而, 分析 Vardavolia 提出的矢量排序规则可以发现, 该矢量顺序仅涉及 H、S、V 三分量中的亮度和饱和度分量, 由于色调的圆形无序特性, 因此该矢量顺序中没有色调分量的参与, 虽然它满足经典形态学理论的一些性质, 但该矢量排序规则并不符合实际彩色矢量的顺序关系. Louverdis 在此基础上给出了新的矢量排序规则, 该矢量顺序将色调分量加入到排序中, 从而使三个分量均参与到排序规则中. 然而事实并非如此, 实验发现, 基于上述两种矢量排序规则的彩色像素排序结果相近, 原因在于三个分量存在层次等级关系, 依次为亮度、饱和度和色调. 然而由于计算难以达到第三层, 从而导致色调分量在排序过程中几乎不起作用. Hanbury 针对色调的圆形无序性特性提出了关于单位圆的形态学算子^[18], 并基于不同的彩色空间提出了多种矢量形态学算子, 且将其应用于彩色图像处理中, 使色调在矢量排序中起重要作用, 该方法针对色调对比较为强烈的彩色图像处理效果较好^[16~20]. 基于 Hanbury 的研究成果, Aptoula 研究了色调的顺序关系, 由于色调是圆形的, 因此单一的将红色作为参考色在矢量腐蚀和膨胀中是不合理的, Aptoula 将色调范围分为三个区域, 分别以红色、绿色和蓝色作为参考色调, 计算当前色调与参考色调的距离, 根据距离的大小定义色调的顺序关系. 这样的色调顺序更符合自然图像的处理, 具有更好的鲁棒性^[21~23].

针对已有的矢量排序规则没有充分考虑到三个分量之间的相互关系问题, 本文在 HSV 彩色空间内提出了一种新的矢量顺序关系. 由于 HSV 彩色空间中的像素大小由彩色像素对应的矢量模值和角度决定, 而在 HSV 三分量中, 矢量像素的模值由 S 和 V 决定, 角度由 H 决定, 且模值和角度是两个较为独立的分量, 可以进行混合运算比较大小. 基于新的矢量顺序关系定义了矢量形态学腐蚀、膨胀、开启和闭合等算子. 实验结果表明, 与现有的矢量形态学算子相比, 基于新矢量顺序的矢量形态学算子在彩色图像处理中具有更好的效果.

2 相关研究工作

目前, RGB 彩色模型已经被广泛应用在图像的获取和显示中, 因此, 它是一类最具通用性和实用性的彩色模型. RGB 彩色模型可以定义为一个立方体, 任一彩色像素对应立方体内的一个矢量, 立方体采用三维坐标系表示, R、G、B 分别表示三个轴, 其中, 原点 $o(0, 0, 0)$ 表示黑色像素点, $w(1, 1, 1)$ 表示白色像素点, ow 为灰度像素线, 如图 1 所示.

在 RGB 彩色空间中, 具有代表性的矢量排序方法是 Witte 提出的矢量距离法^[17](用 $DRGB$ 表示). 对于任意一彩色像素点 $p(x, y)$, 它与黑色原点和白色点的欧氏距离分别用 d_1 和 d_2 表示.

$$d_1(o, p) = \sqrt{(p_r - 0)^2 + (p_g - 0)^2 + (p_b - 0)^2}, \quad (1)$$

$$d_2(w, p) = \sqrt{(1 - p_r)^2 + (1 - p_g)^2 + (1 - p_b)^2}. \quad (2)$$

定义矢量像素的顺序关系为 ($<_{DRGB}$ 和 $=_{DRGB}$ 分别表示 HSV 彩色空间下的矢量小于和等于):

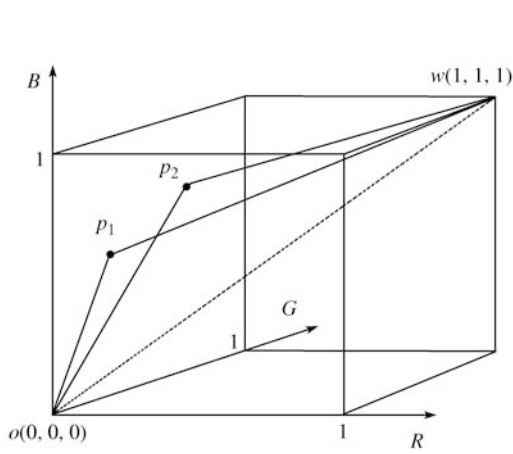


图 1 RGB 彩色模型
Figure 1 RGB color model

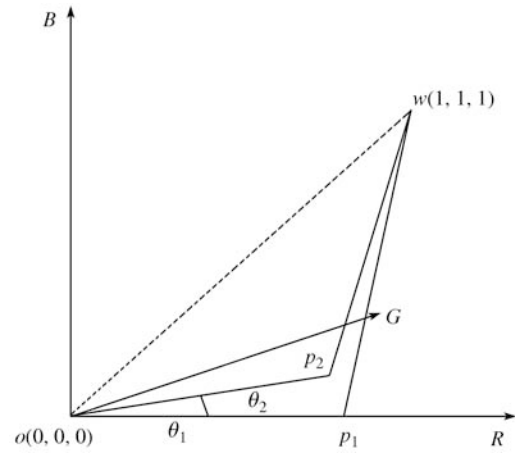


图 2 DRGB 矢量排序
Figure 2 DRGB vector ordering

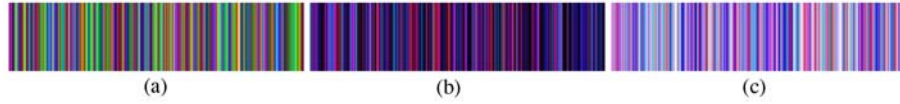


图 3 原彩色条带

Figure 3 Original color bands. (a) Hue dominated color band; (b) brightness dominated color band; (c) saturation dominated color band

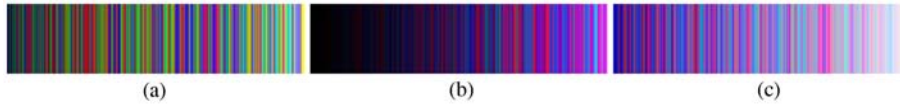


图 4 利用 DRGB 对图 3 的排序结果

Figure 4 Ordering results of Figure 3 using DRGB. (a) Ordering result of Figure 3(a) using DRGB; (b) ordering result of Figure 3(b) using DRGB; (c) ordering result of Figure 3(c) using DRGB.

$$p_1 \underset{\text{DRGB}}{<} p_2 \Leftrightarrow \begin{cases} d_1^{p_1}(o, p_1) < d_1^{p_2}(o, p_2), \\ \text{or} \\ d_1^{p_1}(o, p_1) = d_1^{p_2}(o, p_2) \text{ and } d_2^{p_1}(w, p_1) > d_2^{p_2}(w, p_2), \end{cases} \quad (3)$$

$$p_1 \underset{\text{DRGB}}{=} p_2 \Leftrightarrow d_1^{p_1}(o, p_1) = d_1^{p_2}(o, p_2) \text{ and } d_2^{p_1}(w, p_1) = d_2^{p_2}(w, p_2), \quad (4)$$

从图 1 可以看出, 基于 RGB 彩色空间的矢量排序规则以像素到白色像素点和黑色像素点的距离为依据, 却忽略了矢量像素的角度信息, 从而导致在某些情况下排序规则失效. 当两个矢量像素满足 $d_1(o, p_1) < d_1(o, p_2)$ 、 $\theta_2 < \theta_1$ ($\theta_1 = 0$) 且 $|d_1(o, p_1) - d_1(o, p_2)| < |\theta_1 - \theta_2|$ 时, 根据 DRGB 矢量排序规则, $p_1 <_{\text{DRGB}} p_2$, 如图 2 所示. 然而, 从图中可看出 $|d_1(o, p_1) - d_1(o, p_2)| \approx 0$, 而 $|\theta_1 - \theta_2|$ 较大, 从而可知 p_1 为一纯红色点, 而 p_2 为红绿相间的黄色点. 根据实际情况下人眼对颜色的感知, 亮度相近的黄色像素点大于红色点, 该结果与 DRGB 排序规则的结果相反. 显然, DRGB 排序规则对彩色像素的排序效果较差. 基于 DRGB 矢量排序规则, 对三种彩色条带 (图 3) 进行排序, 结果如图 4 所示.

由于 HSV 彩色空间更接近人眼对颜色的感知, 其三个分量 H、S、V 分别表示色调、饱和度和亮度. 饱和度相当于白色对色调的混合比例, 而亮度则表示黑色混入色调的比例, 如图 5 所示.

由图 5 可以看出, HSV 彩色模型为一六棱锥体, 六棱锥的顶面即为纯彩色面, 其中 $s = v = 1$. 随着 v 的减小而不改变 s , 意味着在纯彩色内混入黑色, 使颜色变暗. 另一方面, 当 v 不变减小 s , 就意味着在纯彩色内混入白色. 在 HSV 彩色空间内, Vardavoulia 定义了一种矢量排序规则 (该矢量顺序用 VS 表示, $<_{VS}$ 和 $=_{VS}$ 分别表示此排序规则下的矢量小于和等于).

$$p_1(h_1, s_1, v_1) \underset{VS}{<} p_2(h_2, s_2, v_2) \Leftrightarrow \begin{cases} v_1 < v_2, \\ \text{or} \\ v_1 = v_2 \text{ and } s_1 > s_2, \end{cases} \quad (5)$$

$$p_1(h_1, s_1, v_1) \underset{VS}{=} p_2(h_2, s_2, v_2) \Leftrightarrow v_1 = v_2 \text{ and } s_1 = s_2. \quad (6)$$

由于 VS 矢量排序规则仅涉及到 HSV 三分量中的亮度分量和饱和度分量, 从而忽略了色调分量, 而色调分量在彩色图像中与亮度和饱和度分量具有同等重要的作用, 显然该矢量排序规则不适合自然图像的处理, 基于 VS 矢量排序规则. 基于该矢量顺序, Louverdis 在 HSV 彩色空间内提出了新的矢量排序规则, 如 (7)、(8) 式所示 (该矢量顺序用 VSH 表示, $<_{VSH}$ 和 $=_{VSH}$ 分别表示此排序规则下的矢量小于和等于).

$$p_1(h_1, s_1, v_1) \underset{VSH}{<} p_2(h_2, s_2, v_2) \Leftrightarrow \begin{cases} v_1 < v_2, \\ \text{or} \\ v_1 = v_2 \text{ and } s_1 > s_2, \\ \text{or} \\ v_1 = v_2 \text{ and } s_1 = s_2 \text{ and } h_1 < h_2, \end{cases} \quad (7)$$

$$p_1(h_1, s_1, v_1) \underset{VSH}{=} p_2(h_2, s_2, v_2) \Leftrightarrow v_1 = v_2 \text{ and } s_1 = s_2 \text{ and } h_1 = h_2. \quad (8)$$

从 VSH 矢量排序规则可以看出, VSH 包含三层, 其顺序关系为 V、S、H. 由于 V 分量是人眼最敏感的分量且具有严格的顺序关系, 因此排第一层; S 分量具有严格的大小顺序关系, 排在第二层; 由于 H 分量是一角度信息, 具有圆形特征, 其顺序关系与参考色的选择有关, 因此排在末层. 基于该矢量顺序关系对彩色像素排序具有较好的效果. 然而, 当图像的亮度分量和饱和度分量对比度较弱, 而色调对比度较强时, 该矢量排序规则具有较大的局限性. 如图 6 所示, 已知 $v_1 < v_2$, $s_1 < s_2$, $|v_2 - v_1| \approx 0$ 且 $|v_2 - v_1| < |s_2 - s_1|$, 则根据 VSH 和 VS 矢量顺序, 都可以得到 $p_1(h_1, s_1, v_1) <_{VSH} p_2(h_2, s_2, v_2)$, 然而从图 6 可以看出, $v_1 \approx v_2$, $|s_1 - s_2|$ 值较大, 因此根据人眼对颜色的实际感知, $p_1(h_1, s_1, v_1) >_{VSH} p_2(h_2, s_2, v_2)$. 显然, VS 和 VSH 两种矢量排序规则在上述情况下都会得到与实际情况完全相反的矢量排序结果. 基于 VS、VSH 矢量排序规则对图 3 进行矢量排序, 结果如图 7(a) 所示.

图 7(a) 表明, VSH 矢量排序仅适合于亮度分量占优的彩色图像处理, 不适合任意彩色图像的处理, 由此推出两种新的矢量排序规则 SVH (依据 VSH 的分层排序原理, 不同的是三个分量的层次顺序为 S 第一层、V 第二层、H 第三层) 和 HVS (三个分量的层次顺序为 H 第一层、V 第二层、S 第三层). 利用 SVH 和 HVS 矢量排序规则对图 3 进行排序, 结果如图 7(b) 和 (c) 所示.

从图 7 中可以看出, VSH、SVH 和 HVS 三种排序规则分别适于亮度分量占优、饱和度分量占优、色调分量占优的彩色条带排序, 即某一彩色分量占优决定该分量在排序规则中排在第一层, 显然三种

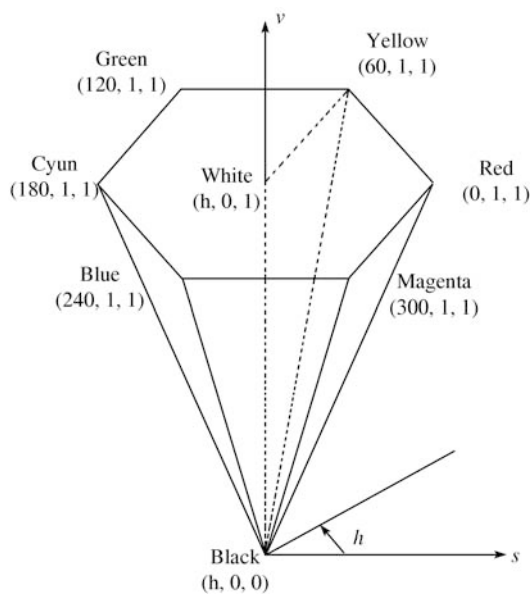


图 5 HSV 彩色模型

Figure 5 HSV color model

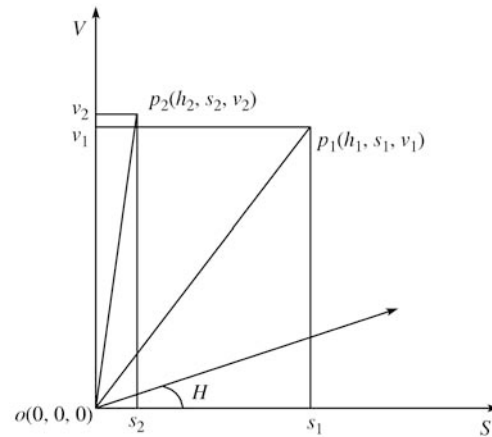


图 6 VSH 矢量排序

Figure 6 VSH vector ordering

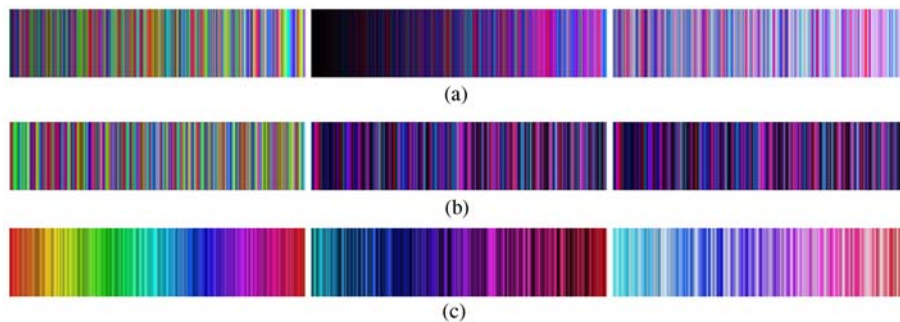


图 7 基于分层矢量排序规则的彩色条带排序结果

Figure 7 Ordering results of color bands based on hierarchical vector ordering. (a) Ordering results of Figure 3 using VSH; (b) ordering results of Figure 3 using SVH; (c) ordering results of Figure 3 using HVS

排序规则均不适应于自然彩色条带的排序. 为了实现各种自然图像中像素矢量的正确排序, 下面给出一种新的矢量排序规则.

3 新的矢量顺序关系

基于现有的矢量排序规则定义的形态学算子在彩色图像处理中通用性和鲁棒性较差, 仅适合具有某一分量对比度较强的特定图像, 因此, 必须解决矢量排序中由分层所引起的三分量不平等, 就必须给出一个能客观描述矢量排序的准则. 在已有的矢量顺序中, HSV 矢量排序在彩色图像处理中效果最好. 基于 VSH 矢量排序规则, 考虑到三分量的平等性和饱和度相对亮度、色调具有反方向性的特点, 给出四层分量排序方法. 将 H、V 两个分量组合成一个新的分量, 且将该分量作为第一排序准则, 从而得到新的排序准则 (该矢量顺序用 HHV (基于亮度和色调分量混合值的矢量排序规则) 表示, $<_{HHV}$ 和

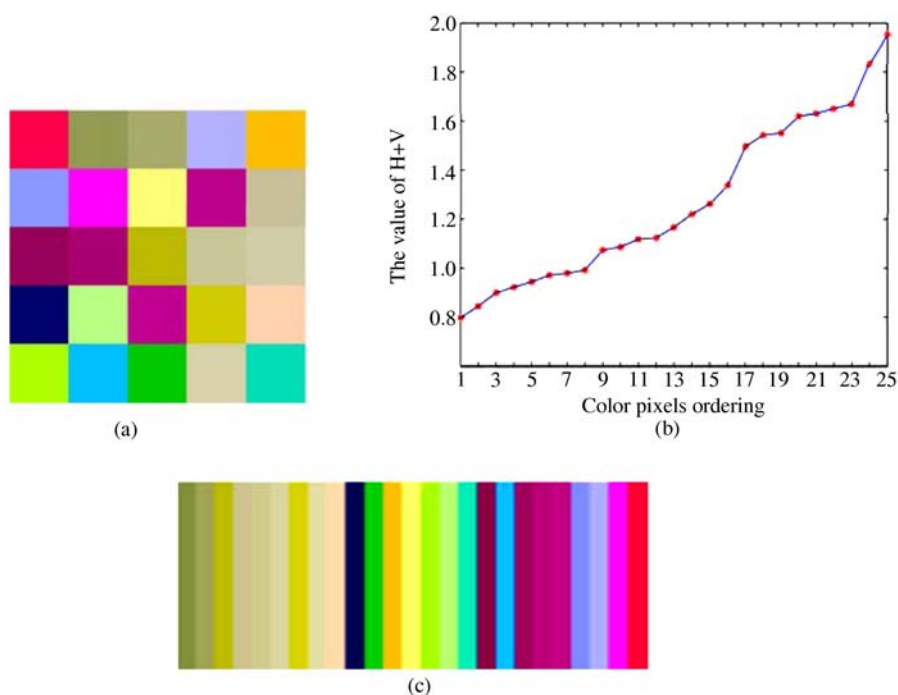


图 8 利用 HHV 第一层组合分量进行彩色像素排序

Figure 8 Ordering result of color pixels using the component of the first hierarchy of HHV. (a) A color block size of 5×5 ; (b) ordering result of the first hierarchy of HHV; (c) ordering result of Figure 8(a)

$=_{\text{HHV}}$ 分别表示此排序规则下的矢量小于和等于):

$$p_1(h_1, s_1, v_1) \underset{\text{HHV}}{<} p_2(h_2, s_2, v_2) \Leftrightarrow \begin{cases} v_1 + h_1 < v_2 + h_2, \\ \text{or} \\ v_1 + h_1 = v_2 + h_2 \text{ and } v_1 < v_2, \\ \text{or} \\ v_1 + h_1 = v_2 + h_2 \text{ and } v_1 = v_2 \text{ and } s_1 > s_2, \\ \text{or} \\ v_1 + h_1 = v_2 + h_2 \text{ and } v_1 = v_2 \text{ and } s_1 = s_2 \text{ and } h_1 > h_2. \end{cases} \quad (9)$$

分析新的排序规则, HHV 仍然采用了分层策略, 不同的是, 在第一层采用了亮度分量和色调分量的组合表达式, 其结果是第一层的排序结果更具唯一性. 然而在实际的计算过程中, 排序计算几乎在第一层就会结束, 程序中仅对少数像素点的排序能计算到第二层, 从而导致后面的计算均属于冗余计算. 图 8(c) 是基于 HHV 矢量排序规则对一实际彩色图像中的一个 5×5 的彩色块 (图 8(a)) 的排序结果, 图 8(b) 是对 HHV 第一层组合分量计算到的数值的排序结果. 从图 8(b) 可以看出, 第一层的组合分量已经实现了 HHV 的唯一排序, 即后面的三层运算均属冗余计算.

基于上述分析, 考虑到排序的实时性问题, 给出简化后的 HHV 排序规则 (用 SHHV 表示)

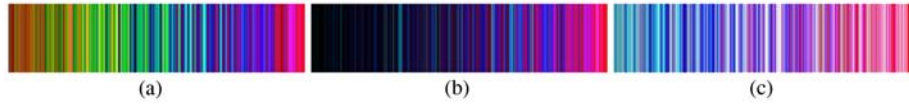


图 9 利用 SHHV 对图 3 的排序结果

Figure 9 Ordering results of Figure 3 using SHHV. (a) Ordering result of Figure 3(a) using SHHV; (b) ordering result of Figure 3(b) using SHHV; (c) ordering result of Figure 3(c) using SHHV

$$p_1 \underset{\text{SHHV}}{<} p_2 \Leftrightarrow \begin{cases} v_1 + h_1 < v_2 + h_2, \\ \text{or} \\ v_1 + h_1 = v_2 + h_2 \text{ and } s_1 > s_2. \end{cases} \quad (10)$$

SHHV 矢量排序仅有两层, 由于亮度和色调分量在第一层已经参与了运算, 因此在 SHHV 中, 在第二层中选中了饱和度的对比作为判定结果. 利用 SHHV 矢量排序规则对图 3 的彩色条带进行排序, 结果如图 9 所示.

从图 9 可以看出, SHHV 对色调和亮度起决定作用的色带均能实现正确排序, 然而, 对于饱和度分量占优的色带无法实现正确排序, 如图 9(c) 所示. 为了解决 SHHV 三分量不在同一层的问题, 需要构造一个函数 $p_i = f(h_i, s_i, v_i)$, 函数能够客观、正确地反映矢量之间的顺序关系. 分析图 5 中的 HSV 彩色模型结合图 6, 可以看出, HSV 彩色空间中的任一矢量可以用极坐标系中的矢量的模值和角度进行表示, 其中, 模值为 $\sqrt{v_i^2 + s_i^2}$, 角度用 $D(h_i, h_0)$ 表示. 根据圆形形态学理论, 定义 $h_1 \leq h_2 \Leftrightarrow D(h_1, h_0) \leq D(h_2, h_0)$, 其中 $\forall h_1, h_2 \in [0, 1]$, 且

$$D(h, h_0) = \begin{cases} |h - h_0|, & |h - h_0| < 0.5, \\ 1 - |h - h_0|, & |h - h_0| \geq 0.5, \end{cases} \quad h, h_0 \in [0, 1]. \quad (11)$$

至此, 我们将三个分量有效转换为两个分量, 然后对这两个分量进行组合, 由于 $\sqrt{v_i^2 + s_i^2}$ 和 $D(h_i, h_0)$ 是两个较为独立的分量, 从而得到 $p_i = \sqrt{v_i^2 + s_i^2} + D(h_i, h_0)$ 为新的判断准则, 则新的矢量排序准则如 (12) 式所示 (该矢量顺序用 HHVSD(基于亮度、饱和度以及色调距离混合数值的矢量排序规则) 表示, $<_{\text{HHVSD}}$ 和 $=_{\text{HHVSD}}$ 分别表示此排序规则下的矢量小于和等于):

$$p_1 \underset{\text{HHVSD}}{<} p_2 \Leftrightarrow \begin{cases} \sqrt{v_1^2 + s_1^2} + D(h_1, h_0) < \sqrt{v_2^2 + s_2^2} + D(h_2, h_0), \\ \text{or} \\ \sqrt{v_1^2 + s_1^2} + D(h_1, h_0) = \sqrt{v_2^2 + s_2^2} + D(h_2, h_0) \text{ and } v_1 < v_2, \\ \text{or} \\ \sqrt{v_1^2 + s_1^2} + D(h_1, h_0) = \sqrt{v_2^2 + s_2^2} + D(h_2, h_0) \text{ and } v_1 = v_2 \text{ and } s_1 > s_2. \end{cases} \quad (12)$$

前面已经证明, 混合矢量排序规则在第一层计算中即可截止, 因此, 对上面的矢量排序进行简化, 从而减提高排序算法的实时性. 给出简化后的 HHVSD 排序规则 (用 SHVSD 表示)

$$p_1 \underset{\text{SHVSD}}{<} p_2 \Leftrightarrow \sqrt{v_1^2 + s_1^2} + D(h_1, h_0) < \sqrt{v_2^2 + s_2^2} + D(h_2, h_0). \quad (13)$$

利用 SHVSD 矢量排序规则对图 3 的彩色条带进行排序, 结果如图 10 所示.

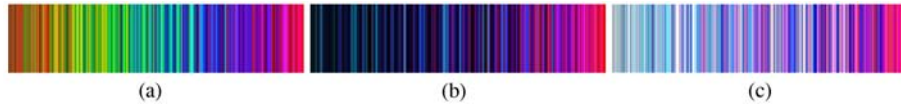


图 10 利用 SHVSD 对图 3 的排序结果

Figure 10 Ordering results of Figure 3 using SHVSD. (a) Ordering result of Figure 3(a) using SHVSD; (b) ordering result of Figure 3(b) using SHVSD; (c) ordering result of Figure 3(c) using SHVSD

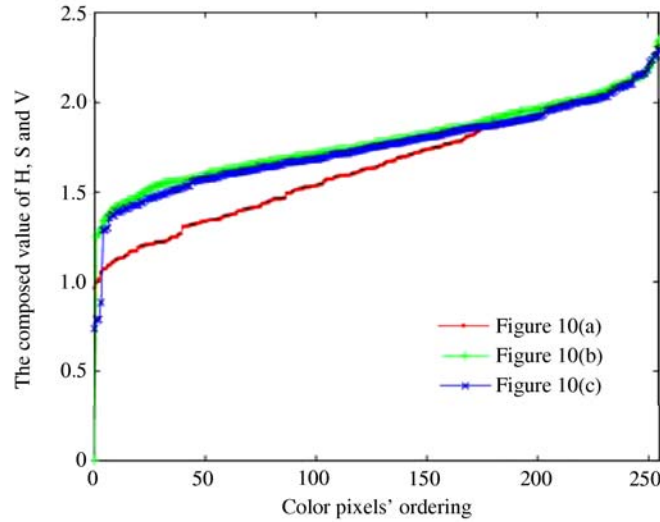


图 11 利用 SHVSD 计算图 10 得到的第一层分量排序结果

Figure 11 Ordering results of the first hierarchical of SHVSD for Figure 10

显然, 从图中可以看出, 新的矢量顺序对各种彩色条带均具有较好的排序结果, 无论是单分量对比度在彩色条带中占优还是自然彩色条带 (各分量对比度比较均匀), 新的矢量排序准则均能得到较为理想的排序结果。

4 矢量形态学算子

设 $f(x, y)$ 为定义在 HSV 彩色空间上 (x, y) 处的彩色像素值, $b(x, y)$ 为结构元素在点 (x, y) 处的值, D_f 为 f 的域, D_b 为 b 的域, 则矢量形态学腐蚀和膨胀分别定义为^[1,2]

$$f \ominus_{cp} b(s, t) = \min\{f(s+x, t+y) - b(x, y) | (s+x), (t+y) \in D_f, (x, y) \in D_b\}, \quad (14)$$

$$f \oplus_{cp} b(s, t) = \max\{f(s-x, t-y) + b(x, y) | (s-x), (t-y) \in D_f, (x, y) \in D_b\}. \quad (15)$$

基于矢量形态学腐蚀和膨胀的定义, 用结构元素 b 对 f 进行矢量形态开和闭运算的定义为

$$f \circ_{cp} b = (f \ominus_{cp} b) \oplus_{cp} b, \quad (16)$$

$$f \bullet_{cp} b = (f \oplus_{cp} b) \ominus_{cp} b. \quad (17)$$

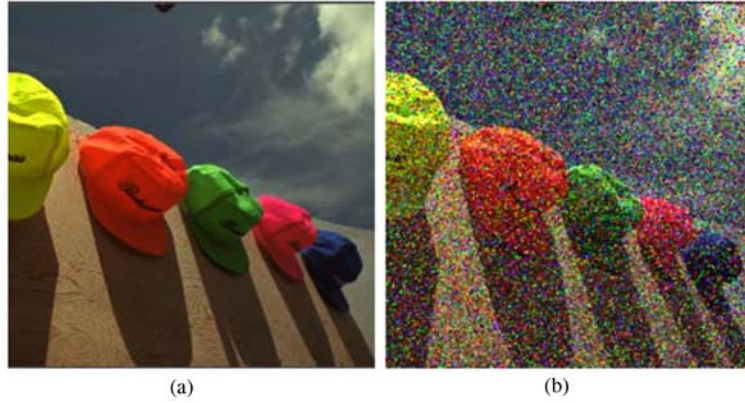


图 12 原图和噪声图像 (椒盐噪声, 密度为 25%)

Figure 12 “Hat” and noisy images corrupted by 25% salt and pepper noise. (a) “Hat”; (b) noisy image

在灰度形态理论中, 形态学开运算能够去除比结构元素小的亮结构, 而形态学闭运算能去除比结构元素小的暗结构 [24]. 与灰度形态学不同的是, 由于彩色图像由三个分量组成, 因此矢量开运算去除了比结构元素小且组合矢量值 (彩色像素值, 根据 (12) 式计算的结果) 较小的图像结构; 矢量闭运算去除了比结构元素小且组合矢量值较大的图像结构.

由于矢量开运算和矢量闭运算在抑制噪声方面的互补特性, 将矢量开、闭运算顺序组合可以组成实用性较强的序列矢量形态学滤波器, 基于矢量开、闭的顺序组合, 常用的序列矢量形态学滤波器为矢量开闭、闭开滤波器 (γ_{VO} 表示矢量开运算, φ_{VO} 表示矢量闭运算, VO 表示矢量顺序).

$$\varphi_{VO}\gamma_{VO}(f, b) = \left(f \underset{cp}{\circ} b \right) \underset{cp}{\bullet} b, \quad (18)$$

$$\gamma_{VO}\varphi_{VO}(f, b) = \left(f \underset{cp}{\bullet} b \right) \underset{cp}{\circ} b. \quad (19)$$

根据灰度交变序列滤波器的定义, 下面给出矢量开闭、闭开交变序列滤波器的定义:

$$\psi_{VO}^i(f, b_1, b_2, \dots, b_i) = \varphi_{VO}(\gamma_{VO}(\dots \varphi_{VO}(\gamma_{VO}(\gamma_{VO}(\varphi_{VO}(\gamma_{VO}(f, b_1), b_1), b_2), b_2) \dots, b_i), b_i), \quad (20)$$

$$\phi_{VO}^i(f, b_1, b_2, \dots, b_i) = \gamma_{VO}(\varphi_{VO}(\dots \gamma_{VO}(\varphi_{VO}(\gamma_{VO}(\varphi_{VO}(f, b_1), b_1), b_2), b_2) \dots, b_i), b_i). \quad (21)$$

i 的取值可以根据图像的尺寸和噪声的强度确定, 结构元素 b_i 满足关系式 $b_2 = b_1 \oplus b_1$, $b_2 = b_1 \oplus b_1, \dots, b_i = b_{i-1} \oplus b_1$.

5 实验结果及分析

为了验证本文所提出的矢量形态学滤波算子性能, 仿真实验选用 “Hat” (512×512, 24 bit, RGB 格式) 作为测试图像, 计算机采用 Pentium(R)Dual 处理器 2.2 GHz, 2 GB 内存. 针对不同等级脉冲噪声污染的彩色图像进行处理, 采用已有的矢量形态学滤波算子和本文提出的矢量形态学算子对噪声图像滤波, 结果如图 13 所示. 图 12(a) 为原图, 图 12(b) 为加入密度为 25% 的脉冲噪声图像, 图 13(a)~(n) 依次为利用 $\varphi_{Lab}\gamma_{Lab}$ 和 ψ_{Lab}^2 (文献 [15])、 $\varphi_{HLS}\gamma_{HLS}$ 和 ψ_{HLS}^2 (文献 [14])、 $\varphi_{RGB}\gamma_{RGB}$ 和 ψ_{RGB}^2 (文献 [17])、 $\varphi_{VS}\gamma_{VS}$ 和 ψ_{VS}^2 (文献 [10])、 $\varphi_{VSH}\gamma_{VSH}$ 和 ψ_{VSH}^2 (文献 [11]) 以及本文提出的矢量形态学算子 $\varphi_{SHHV}\gamma_{SHHV}$ 和 ψ_{SHHV}^2 、 $\varphi_{SHVSD}\gamma_{SHVSD}$ 和 ψ_{SHVSD}^2 的滤波结果 (b_1 是尺寸为 3×3 的方形结构元素,

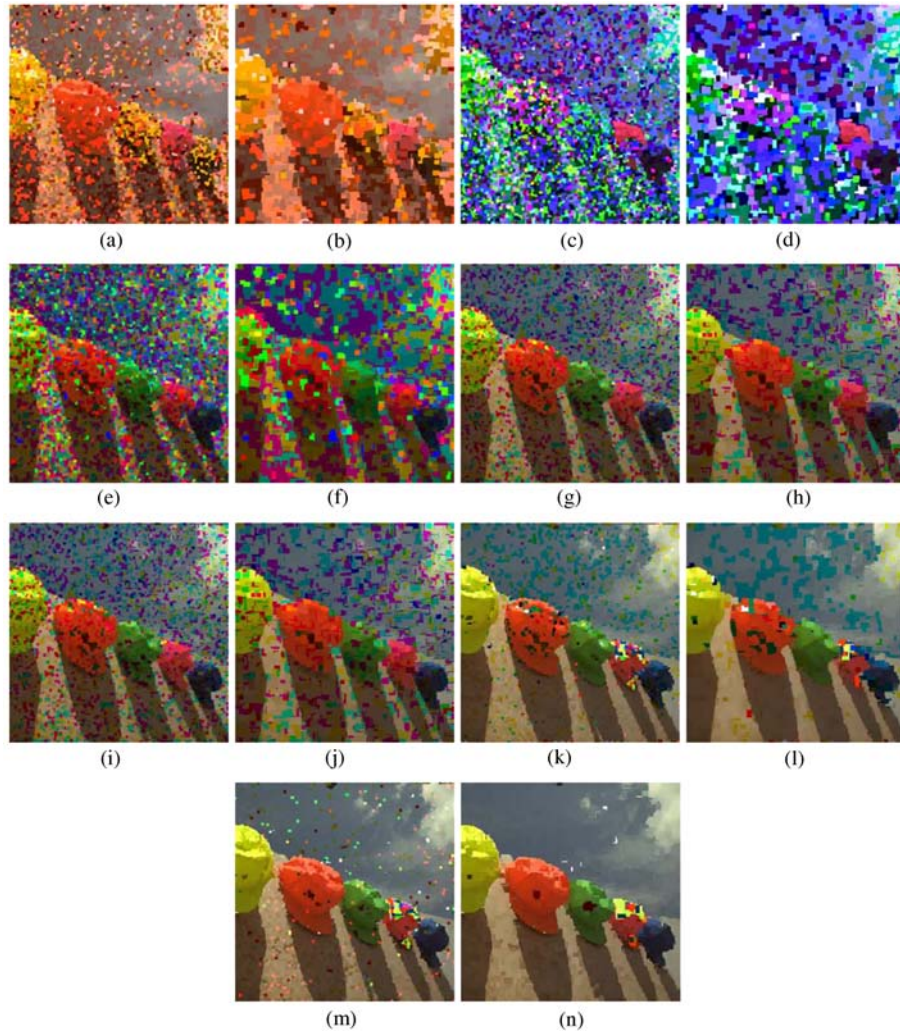


图 13 利用不同的矢量形态学滤波算子对图 12(b) 滤波后的结果对比

Figure 13 Restoration performance comparison on the “Hat” image degraded 25% salt and pepper noise. (a) Using $\varphi_{\text{Lab}}\gamma_{\text{Lab}}$; (b) using ψ_{Lab}^2 ; (c) using $\varphi_{\text{HLS}}\gamma_{\text{HLS}}$; (d) using ψ_{HLS}^2 ; (e) using $\varphi_{\text{RGB}}\gamma_{\text{RGB}}$; (f) using ψ_{RGB}^2 ; (g) using $\varphi_{\text{VS}}\gamma_{\text{VS}}$; (h) using ψ_{VS}^2 ; (i) using $\varphi_{\text{VSH}}\gamma_{\text{VSH}}$; (j) using ψ_{VSH}^2 ; (k) using $\varphi_{\text{SHHV}}\gamma_{\text{SHHV}}$; (l) using ψ_{SHHV}^2 ; (m) using $\varphi_{\text{SHVSD}}\gamma_{\text{SHVSD}}$; (n) using ψ_{SHVSD}^2 SHV SD

b_2 是尺寸为 5×5 的方形结构元素, 参考色调 $h_0 = 0$).

从图 13 可以看出, 在已有的矢量排序规则中, 文献 [14, 15] 提出的矢量排序规则更多地考虑了色调信息而忽略了亮度和饱和度信息, 滤波效果较差, 如图 13(a)~(d) 所示. 文献 [17] 考虑了彩色像素矢量在 RGB 彩色模型中的矢量模值大小关系而忽略了矢量的角度信息, 滤波效果如图 13(e)~(f) 所示, 滤波效果显然优于图 13(a)~(d). 文献 [10,11] 提出的基于 VS 和 VSH 矢量排序规则定义的矢量形态学滤波算子滤波效果较好, 滤波后的图像基本保持了原图像的色度和亮度, 但抑制噪声效果较差, 原因在于采用的矢量排序规则是单分量分层排序规则, 该规则并不符合实际人眼对彩色像素的感知顺序, 如图 13(g)~(j) 所示. 而本文提出的基于 SHHV 和 SHVSD 矢量排序规则的矢量形态学滤波算子能更好地去除彩色噪声且保持原图像的色度、亮度值基本不变, 其性能均超过已有的矢量形态学算子,

表 1 采用不同形态学滤波器对“Hat”滤波后的 MSE 比较

Table 1 Comparative results of MSE of different vector morphological operators for various percentages of impulse noise (salt and pepper) for the image “Hat”

Methods		Noise level						
		5%	10%	15%	20%	25%	30%	35%
Ref. [15]	$\varphi_{\text{Lab}}\gamma_{\text{Lab}}$	615.013	1093.21	1773.49	2471.88	2985.80	3642.34	4239.31
	ψ_{Lab}^2	979.357	1528.35	2165.32	2688.61	3156.77	3521.46	4299.43
Ref. [14]	$\varphi_{\text{HLS}}\gamma_{\text{HLS}}$	579.965	2736.47	5176.78	7008.26	8549.92	9831.06	10777.4
	ψ_{HLS}^2	458.946	3157.61	6205.21	8032.37	10154.7	11114.2	11513.8
Ref. [17]	$\varphi_{\text{RGB}}\gamma_{\text{RGB}}$	245.320	968.562	2285.11	3346.48	3964.92	4564.03	5096.06
	ψ_{RGB}^2	289.932	1093.90	2921.00	3970.52	4287.20	4400.34	4861.61
Ref. [10]	$\varphi_{\text{VS}}\gamma_{\text{VS}}$	383.257	727.608	1085.59	1514.12	1705.26	2101.78	2523.07
	ψ_{VS}^2	449.076	778.113	1141.26	1454.22	1758.30	2129.66	2402.19
Ref. [11]	$\varphi_{\text{VSH}}\gamma_{\text{VSH}}$	383.197	729.284	1068.41	1508.81	1698.68	2064.29	2427.57
	ψ_{VSH}^2	454.934	776.342	1106.83	1455.54	1760.43	2125.13	2350.20
SHHV	$\varphi_{\text{SHHV}}\gamma_{\text{SHHV}}$	155.480	280.525	487.187	682.663	909.616	1184.70	1635.86
	ψ_{SHHV}^2	248.091	348.122	544.930	752.898	930.798	1099.25	1316.73
SHVSD	$\varphi_{\text{SHVSD}}\gamma_{\text{SHVSD}}$	125.714	189.923	244.523	330.486	535.441	988.716	1552.47
	ψ_{SHVSD}^2	220.332	271.558	319.009	403.142	386.037	472.793	991.035

如图 13(k)~(n) 所示. 其中, SHVSD 矢量排序规则效果最好, 具有较强的实用性, 如图 13(m)~(n) 所示.

为了客观评价不同矢量形态学滤波算子对脉冲噪声污染后彩色图像的滤波效果, 下面给出两种已经被广泛应用的评估方法, 均方误差 (MSE, mean square error) 和峰值信噪比 (PSNR, peak, signal-to-noise ratio)^[25,26].

$$\text{MSE} = \frac{1}{3M \times N} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \|f(i, j) - g(i, j)\|^2, \quad (22)$$

$$\text{PSNR} = 10 \log_{10} \frac{3 \times M \times N \times 255^2}{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \|f(i, j) - g(i, j)\|^2}, \quad (23)$$

其中, f 是原图像, g 是滤波后的图像, 图像尺寸为 $M \times N$.

根据 (22)(23) 式, 采用多种矢量形态学滤波算子对不同噪声等级彩色脉冲噪声 (彩色椒盐噪声) 下的 “Hat” 图像滤波, 实验数据如表 1, 2 所示.

通过表 1, 2 和图 14, 15 可以看出, 针对不同等级噪声下不同类型的彩色图像滤波, 本文提出的矢量形态学滤波算子最优, 滤波后图像的 MSE 较已有的矢量形态学滤波算子明显降低、PSNR 提高.

6 结论

本文针对已有的矢量排序规则在形态学彩色图像处理中效果差的问题, 分析了多种彩色空间下的矢量排序规则的优缺点, 基于已有的矢量排序规则, 提出了一种 HSV 彩色空间下的新矢量排序规则.

表 2 采用不同形态学滤波器对“Hat”滤波后的 PSNR 比较

Table 2 Comparative results of PSNR of different vector morphological operators for various percentages of impulse noise (salt and pepper) for the image “Hat”

Methods		Noise level						
		5%	10%	15%	20%	25%	30%	35%
Ref. [15]	$\varphi_{\text{Lab}}\gamma_{\text{Lab}}$	20.2419	17.7437	15.6425	14.2005	13.3801	12.5169	11.8578
	ψ_{Lab}^2	18.2213	16.2885	14.7755	13.8355	13.1383	12.6635	11.7966
Ref. [14]	$\varphi_{\text{HLS}}\gamma_{\text{HLS}}$	20.4967	13.7588	10.9901	9.67469	8.81117	8.20479	7.80564
	ψ_{HLS}^2	21.5131	13.1372	10.2032	9.08236	8.06412	7.67200	7.51858
Ref. [17]	$\varphi_{\text{RGB}}\gamma_{\text{RGB}}$	24.2334	18.2695	14.5417	12.8849	12.1484	11.5373	11.0584
	ψ_{RGB}^2	23.5078	17.7410	13.4754	12.1423	11.8090	11.6959	11.2629
Ref. [10]	$\varphi_{\text{VS}}\gamma_{\text{VS}}$	22.2958	19.5118	17.7741	16.3291	15.8128	14.9049	14.1114
	ψ_{VS}^2	21.6076	19.2203	17.5569	16.5044	15.6798	14.8476	14.3247
Ref. [11]	$\varphi_{\text{VSH}}\gamma_{\text{VSH}}$	22.2965	19.5018	17.8433	16.3444	15.8296	14.9830	14.2790
	ψ_{VSH}^2	21.5513	19.2302	17.6899	16.5005	15.6746	14.8569	14.4197
SHHV	$\varphi_{\text{SHHV}}\gamma_{\text{SHHV}}$	26.2140	23.6510	21.2538	19.7887	18.5422	17.3947	15.9933
	ψ_{SHHV}^2	24.1846	22.7134	20.7673	19.3634	18.4422	17.7198	16.9358
SHVSD	$\varphi_{\text{SHVSD}}\gamma_{\text{SHVSD}}$	27.1369	25.3450	24.2476	22.9392	20.8436	18.1801	16.2206
	ψ_{SHVSD}^2	24.7000	23.7921	23.0927	22.0762	22.2645	21.3840	18.1699

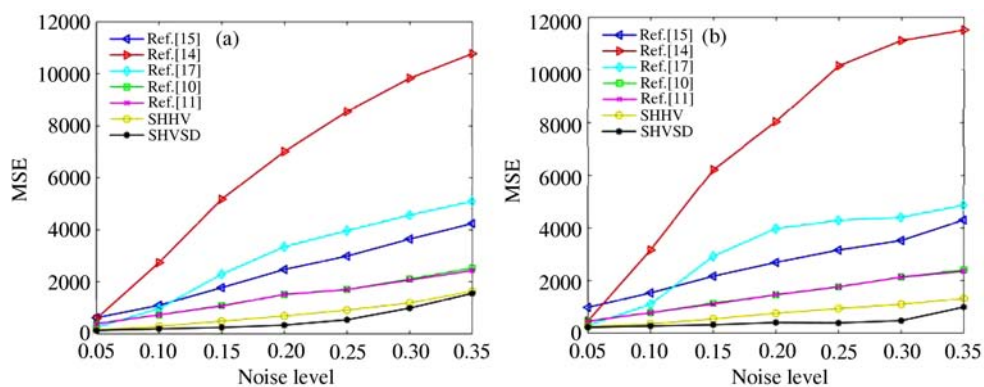


图 14 不同矢量形态学滤波算子对“Hat”图像滤波后的 MSE 比较

Figure 14 Comparative results of MSE of different vector morphological operators for various percentages of impulse noise (salt and pepper) for the image “Hat”. (a) Opening-closing operator; (b) alternative sequential opening-closing operator ($i = 2$)

该排序规则打破了经典矢量排序规则的分层思想, 从而使得 HSV 三个分量可以平等参与到运算中, 新的矢量排序规则将 HSV 三个分量中的 SV 分量组合成一个矢量模值, 将 H 分量看做角度信息, 组合这两个分量以利于矢量排序. 在新的矢量排序规则下, 定义了矢量形态学腐蚀、膨胀算子以及常用的滤波算子, 将新的矢量形态学滤波算子应用到彩色图像去噪中, 滤波效果明显优于经典的矢量形态学

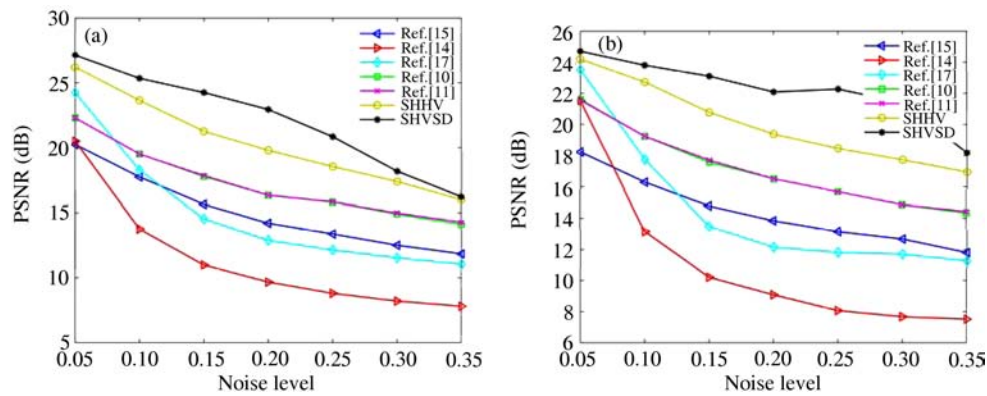


图 15 同矢量形态学滤波算子对“Hat”图像滤波后的 PSNR 比较

Figure 15 Comparative results of PSNR of different vector morphological operators for various percentages of impulse noise (salt and pepper) for the image “hat”. (a) Opening-closing operator; (b) alternative sequential opening-closing operator ($i = 2$)

算子. 实验结果表明, 新的矢量形态学算子在彩色滤波中具有较好的鲁棒性, 适合于各种类型的彩色图像, 滤波效果较好, 且具有较高的 PSNR 和较低 MSE.

致谢 感谢 USC-SIPI 实验室和 Kodak 公司提供的彩色图片.

参考文献

- 1 Soille P. Morphological Image Analysis: Principles and Applications. New York: Springer-Verlag, 2003. 50–220
- 2 Heijmans H J A M. Composing morphological filters. IEEE Trans Image Process, 1997, 6: 713–723
- 3 Serra J. Connectivity on complete lattices. J Math Imag Vision, 1998, 9: 231–251
- 4 Serra J. Colour and multispectral morphological processing. In: ICAPR'09. Kolkata. 2009. 9–13
- 5 Goutsias J, Heijmans H J A M, Sivakumar K. Morphological operators for image sequences. Comput Vision Image Understand, 1995, 62: 326–346
- 6 Angulo J. Morphological colour operators in totally ordered lattices based on distances: application to image filtering, enhancement and analysis. Comput Vision Image Understand, 2007, 107: 56–73
- 7 Angulo J. Polar modelling and segmentation of genomic microarray spots using mathematical morphology. Image Anal Ster, 2008, 27: 107–124
- 8 Luengo-Oraz M A, Faure E, Angulo J. Robust iris segmentation on uncalibrated noisy images using mathematical morphology. Image Vision Comput, 2010, 28: 278–284
- 9 Luengo-Oraz M A, Angulo J. Cyclic mathematical morphology in polar-logarithmic representation. IEEE Trans Image Process, 2009, 18: 1090–1096
- 10 Vardavolia M I, Andreadis I, Tsalides P. Vector ordering and morphological operations for colour image processing: fundamentals and applications. Patt Anal Appl, 2002, 5: 271–287
- 11 Louverdis G, Vardavoulia M I, Andreadis I, et al. A new approach to morphological color image processing. Patt Recog, 2002, 35: 1733–1741
- 12 Louverdis G, Andreadis I, Tsalides P. New fuzzy model for morphological colour image processing. IEE Proc Vision Image Signal Process, 2002, 149: 129–139
- 13 Louverdis G, Andreadis I. Design and implementation of a fuzzy hardware structure for morphological color image processing. IEEE Trans Circ Syst Video Tech, 2003, 13: 277–288

- 14 Hanbury A, Serra J. Mathematical morphology in the HLS colour space. In: Proceedings of the 12th British Machine Vision Conference. Manchester, 2001. 451–460
- 15 Hanbury A, Serra J. Mathematical morphology in the CIELAB space. *Image Anal Ster*, 2002, 21: 201–206
- 16 Peters II R A. Mathematical morphology for angle-valued images. *Proc SPIE Nonlin Image Process*, 1997, 3026: 84–94
- 17 Witte V D, Schulte S, Nachtgael M, et al. Vector morphological operators for colour images. *LNCS*, 2005, 3656: 667–675
- 18 Hanbury A, Serra J. Morphological operators on the unit circle. *IEEE Trans Image Process*, 2001, 10: 1842–1850
- 19 Hanbury A, Serra J. Colour image analysis in 3D-polar coordinates. *LNCS*, 2003, 2781: 124–131
- 20 Hanbury A. Constructing cylindrical coordinate colour models. *Patt Recog Lett*, 2008, 29: 494–500
- 21 Aptoula E, Lefèvre S. On the morphological processing of hue. *Image Vision Comput*, 2009, 27: 1394–1401
- 22 Aptoula E, Lefèvre S. A comparative study on multivariate mathematical morphology. *Patt Recogn*, 2007, 40: 2914–2929
- 23 Aptoula E, Lefèvre S. Morphological description of color images for content-based image retrieval. *IEEE Trans Image Process*, 2009, 18: 2505–2517
- 24 Lei T, Fan Y Y. Noise gradient reduction using dual morphological operators. *IET Image Process*, 2011, 5: 1–17
- 25 Lukac R. Adaptive vector median filtering. *Patt Recog Lett*, 2003, 24: 1889–1899
- 26 Andreas K, Mongi A. *Digital Color Image Processing*. New York: Wiley-Interscience, 2008. 70–160

Vector morphological operators in HSV color space

LEI Tao^{1,2*}, FAN YangYu¹ & ZHAO Jiong³

1 *School of Electronics and Information, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129, China;*

2 *School of Information and Electronics Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China;*

3 *Telecommunication Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China*

*E-mail: leitaoly@163.com

Abstract In HSV color space, the current vector morphological operators have low capability to reduce color noise caused by hue and saturation in color image processing. Because they sort the color pixels according to the hierarchical ordering of V, S, H, which is against the equal principle of the three channels in color image processing. A novel vector ordering based on the combination of H, S and V is proposed in this paper, and the associated vector morphological erosion, dilation and composite filtering operators are defined. Compared with the popular vector morphological operators, experimental results show that the new operators can reduce the color noise effectively without any new color pixels while preserving the image details. And the filtered images have higher peak signal-to-noise ratio (PSNR) and lower mean square error (MSE).

Keywords HSV color space, vector morphological operators, vector ordering, image details



LEI Tao was born in 1981. He received the Ph.D. degree in information and communication engineering from the Northwestern Polytechnical University, Xi'an in 2011. Currently, he is a Lecturer at Lanzhou Jiaotong University. His research interests include image processing, pattern recognition and computer vision. Dr. Lei is a member of CCF and CSS.



FAN YangYu was born in 1960. He received the Ph.D. degree in underwater acoustic signal processing from the Northwestern Polytechnical University, Xi'an in 1999. Currently, he is a Professor at Northwestern Polytechnical University. His research interests include signal processing, optical communication, image processing and virtual reality.



ZHAO Jiong was born in 1978. He received the Ph.D. degree in signal and information processing from the Northwestern Polytechnical University, Xi'an in 2011. Currently, he is a Lecturer at the Telecommunications College of Air Forces Engineering University, Xi'an. His research interests include image processing, pattern recognition and system engineering.