

利用 HSI 空间相似性的彩色形态学图像处理方法

何晓军¹ 徐爱功² 李 玉²

(辽宁工程技术大学创新实践学院 辽宁 阜新 123000)¹

(辽宁工程技术大学测绘与地理科学学院 辽宁 阜新 123000)²

摘要 形态学方法是利用结构单元量度和提取图像中的目标形状,以达到图像分析和处理的目的,已被广泛用于二值及灰度图像处理。为了将灰度形态学扩展到彩色图像,文中在 HSI 彩色空间中定义了彩色相似性,并据此提出彩色形态学的图像处理方法。首先,在 HSI 空间中结合色调、饱和度及亮度定义了一种彩色相似性测度,以刻画彩色矢量间的相似性程度;然后,利用彩色相似性构建了一种新型彩色形态学,包括膨胀、腐蚀、开、闭等基本操作;最后,将结合彩色相似性的形态学基本操作应用于彩色图像边缘提取。通过实验对彩色形态学图像处理方法的性能进行了深入分析和研究,当参数 $k \leq 0.05$ 时,彩色形态学操作效果较优。通过实验对比,验证了该方法对彩色目标的平滑能力及边缘提取性能,同时也说明了其图像处理的实用性和有效性。

关键词 彩色相似性,彩色形态学,HSI 彩色空间,边缘提取

中图分类号 TP391.14 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2019.04.045

Color Morphology Image Processing Method Using Similarity in HSI Space

HE Xiao-jun¹ XU Ai-gong² LI Yu²

(College of Innovation and Practice, Liaoning Technical University, Fuxin, Liaoning 123000, China)¹

(School of Geomatics, Liaoning Technical University, Fuxin, Liaoning 123000, China)²

Abstract Morphological methods use structural units to measure and extract the target shape in the image to achieve the purpose of image analysis and processing, and these methods have been widely used in binary and grayscale image processing. In order to extend the gray morphology to the color image, this paper defined the color similarity in the HSI color space and proposed the color morphological image processing method. Firstly, the color similarity measure is defined by combining hue, saturation and intensity in the HSI space to characterize the similarity degree between color vectors. Then, the new type of color morphology is constructed by using color similarity, including the basic operations such as dilation, erosion, opening and closing. Finally, the morphological basic operations combined with color similarity are applied to extract color image edges. Experiments make in-depth analysis and research on the color morphological image processing performance, and it can be found that the color morphology operation is relatively better when the parameter $k \leq 0.05$. The experimental results show that the proposed method has the ability of smoothing the edge of the color target and the edge extraction performance. At the same time, it also shows the practicability and effectiveness of the image processing.

Keywords Color similarity, Color morphology, HSI color space, Edge extraction

1 引言

数学形态学以结构元素为基本单元来处理图像信息,用以分析和辨识图像目标的几何特征和结构。作为一种非线性图像的处理和分析方法,数学形态学被成功应用于二值和灰度图像,并形成了完备的形态学理论^[1]。其中,二值形态学运

用简单的集合运算探测蕴含在图像中目标的几何结构。由于采用集合运算,因此二值形态学具有原理清晰、计算简单、易于扩展且适合于并行计算等特点,并已被广泛用于去噪、边界检测、骨架化、区域分割等图像处理任务。灰度形态学由二值形态学发展而来,只需将二值形态学中的交、并运算分别换成结构单元内像素灰度的求取最小和最大值运算即可^[2]。

到稿日期:2018-04-11 返修日期:2018-07-04 本文受国家自然科学基金(41271435),国家自然科学基金青年基金(41301479),辽宁省教育厅项目(LJYL012),辽宁省自然科学基金指导计划立项项目(201602357)资助。

何晓军(1975—),男,博士生,副教授,主要研究方向为图像处理,E-mail:lntuhxj@163.com(通信作者);徐爱功(1963—),男,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为地理信息系统理论与应用研究;李 玉(1963—),男,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为遥感数据处理理论与应用基础研究。

近年来,彩色图像已广泛用于人类生产、生活的各个领域。与二值和灰度图像相比,彩色图像除了包含亮度信息还包含人类能够感知的色彩信息,因此彩色图像处理受到越来越多的关注,将数学形态学推广到彩色图像,并由此实现彩色图像边缘提取、滤波、分割、特征提取、图像增强和恢复等,是彩色图像处理领域中的重要研究方向^[3-6]。

目前,对彩色形态学图像处理方法的研究主要集中在 RGB 彩色空间,其中最简单的方式就是将彩色图像看成 3 幅单色图像,利用灰度形态学分别处理,最后综合其处理结果作为彩色形态学操作结果,这种处理策略会丢失或扭曲原彩色图像,也因没有考虑彩色图像中各彩色分量间的相关性,而无法更加有效地利用彩色信息。另一种彩色形态学方法基于多元数据排序准则,如边缘序、条件序、区域序和退化序等,排序结构单元内的彩色,并用类似灰度形态学中的最小值和最大值原则定义基本形态学操作。例如,基于矢量排序的彩色形态学^[7],但对于丰富多彩的彩色图像,由于难以找到合适、通用的彩色矢量排序方法,因此存在较大的偏差;又如基于图的彩色形态学图像处理方法^[8],但因 RGB 彩色空间的不均匀和不直观性,使得这些彩色形态学方法均存在一定的问题及局限性。另外,高丽等^[9]尝试在 HSI 彩色空间利用形态学操作进行彩色图像边缘提取并取得了一些进展。本文结合 HSI 空间彩色矢量的色调、饱和度及亮度等分量,引入相似性测度的概念以刻画 HSI 空间中彩色矢量间的相似性程度,并据此定义一种新型彩色形态学基本操作。这种彩色形态学不但能够平滑彩色目标,而且可以很好地处理同质区域像素不一致性的细节特征,最终达到对彩色图像分析和处理的目的。

2 利用 HSI 空间相似性的彩色形态学

2.1 HSI 彩色空间的矢量相似性

在 HSI 彩色空间中,分别以 H 、 S 和 I 表示色调、饱和度和亮度等基本特征量,其中 I 与图像的彩色信息无关,而 H 和 S 又相互独立,并与人类对色彩的认知紧密相连,这使得 HSI 非常适用于基于人类视觉认知的彩色图像分析算法^[10]。

设 $V = \{v_i, i = 1, \dots, n\}$ 是 HSI 彩色空间 U 中所有彩色矢量的集合,其中, n 为该彩色空间的总彩色数, i 为彩色索引, $v_i = (v_{iH}, v_{iS}, v_{iI})$ 为彩色 i 的彩色矢量, v_{iH} 、 v_{iS} 、 v_{iI} 分别表示彩色矢量 v_i 的色调、饱和度及亮度。由于此彩色空间矢量的 3 个分量相对独立,且仅色调 H 、饱和度 S 与彩色信息有关,亮度 I 体现无色强度概念^[11-13],因此对于此空间给定的两个彩色矢量 $v_i, v_j \in V$, 分别引入 μ_H, μ_S, μ_I 表示色调、饱和度及亮度的相似性测度,以刻画和度量矢量间的相似性程度,其定义如下:

$$\mu_H(v_i, v_j) = e^{-k \times \Delta(v_i, v_j)} \quad (1)$$

$$\mu_S(v_i, v_j) = 1 - |v_{iS} - v_{jS}| \quad (2)$$

$$\Delta(v_i, v_j) = \begin{cases} |v_{iH} - v_{jH}|, & 0 \leq |v_{iH} - v_{jH}| \leq 180 \\ 360 - |v_{iH} - v_{jH}|, & 180 < |v_{iH} - v_{jH}| \leq 360 \end{cases} \quad (4)$$

$$(w, u) = \begin{cases} (v_{ig}, v_{ih}) | v_{igH} - v_{ihH} | = \max_{(v_k, v_d) \in V_i} \{ |v_{kH} - v_{dH}| \} \\ (v_{ig}, v_{ih}) | v_{igH} - v_{ihH} | \text{ 相同,} & |v_{igS} - v_{ihS}| = \max_{(v_k, v_d) \in V_i} \{ |v_{kS} - v_{dS}| \} \\ (v_{ig}, v_{ih}) | v_{igH} - v_{ihH} | \text{ 和 } |v_{igS} - v_{ihS}| \text{ 均相同,} & |v_{igI} - v_{ihI}| = \max_{(v_k, v_d) \in V_i} \{ |v_{kI} - v_{dI}| \} \end{cases} \quad (7)$$

然后,根据彩色矢量 (w, u) 的 3 个分量确定最大和最小

$$\mu_I(v_i, v_j) = 1 - |v_{iI} - v_{jI}| \quad (3)$$

式(1)用两个彩色矢量色调的指数减函数定义色调相似性测度 $\mu_H \in [0, 1]$, 当两个矢量色差较小时,其相似性测度大,即可能属同一目标;当两个矢量色差较大时,相似性降低,即可能属不同目标。其中, $k \in (0, \infty)$ 是控制相似性测度的参数,即针对同样的两个彩色矢量,由于参数 k 的不同,其相似性不同,这符合人类视觉感知模糊性的特征, $\Delta(v_i, v_j)$ 表示两个彩色矢量色调上的不同,表示为:

$$\Delta(v_i, v_j) = \begin{cases} |v_{iH} - v_{jH}|, & 0 \leq |v_{iH} - v_{jH}| \leq 180 \\ 360 - |v_{iH} - v_{jH}|, & 180 < |v_{iH} - v_{jH}| \leq 360 \end{cases} \quad (4)$$

同理,式(2)、式(3)分别用两个矢量的饱和度、亮度差值定义饱和度、亮度的相似性测度 $\mu_S, \mu_S \in [0, 1]$, 差值越大,相似性越低;反之,差值越小,相似性程度越高。在 HSI 彩色空间中,矢量的相似性与色调、饱和度及亮度均有关系,但色调是主要特征分量,用于区分颜色及目标,因此本文将式(1)、式(2)和式(3)加权来共同定义和表示 HSI 彩色空间中两个彩色矢量相似性的测度:

$$\mu(v_i, v_j) = \frac{\mu_H(1 + \mu_S + \mu_I)}{1 + 2\mu_H} \quad (5)$$

其中, $\mu(v_i, v_j) \in [0, 1]$ 为矢量相似性测度,用以表征两个彩色矢量的相似性程度,该值越接近 1,表示两个彩色矢量的相似性程度越高,即两个对应的像素越可能属于同一目标;否则,表示两个矢量的相似性程度越低,即两个对应的像素分属于不同的目标。这为边缘提取、目标识别、图像分割等彩色图像处理奠定了基础。

2.2 彩色形态学

本文提出的彩色形态学以 HSI 空间矢量相似性为基础来进行构建和定义。

给定彩色图像 $z = \{z_i(x_i, y_i), (x_i, y_i) \in P, i \in I\}$ 为定义在图像域 P 上的彩色影像,其中, $I = \{1, 2, \dots, n\}$, (x_i, y_i) 为像素 i 的平面坐标, i 为像素索引, n 为像素个数, P 为图像域, $v_i = (v_{iH}, v_{iS}, v_{iI})$ 为像素 i 在 HSI 中所对应的彩色矢量。则图像的所有彩色矢量构成的集合为 $Vz = \{v_i, i \in I\}$ 。 V_i 表示彩色图像 z 中以像素 i 为中心的结构单元内所有像素构成的彩色矢量集合,即 $V_i = \{v_p, p = 1, \dots, q, i \in I\} \subset Vz$, 其中, p 为集合 V_i 中像素的索引, q 为该集合中的彩色矢量数。根据式(5)计算当前结构单元中任意两个矢量间的相似性测度,并由相似性测度最小的彩色矢量对构成集合 R_i :

$$R_i = \{(v_{ig}, v_{ih}), v_{ig}, v_{ih} \in V_i \text{ 且 } \mu(v_{ig}, v_{ih}) = \min_{(v_k, v_d) \in V_i} \{\mu(v_k, v_d)\}\} \quad (6)$$

针对此彩色矢量对集合,依据其色调、饱和度及亮度等分量确定最不相似彩色矢量对 (w, u) :

彩色矢量 $v_{i \max}$ 和 $v_{i \min}$):

$$v_{i \max} = \begin{cases} \omega, & \text{当 } \omega_l > u_l \\ \omega, & \text{当 } \omega_l = u_l, \omega_s > u_s \\ \omega, & \text{当 } \omega_l = u_l, \omega_s = u_s, \omega_H \geq u_H \end{cases} \quad (8)$$

$$v_{i \min} = \begin{cases} u, & \text{当 } v_{i \max} = \omega \\ \omega, & \text{当 } v_{i \max} = u \end{cases} \quad (9)$$

分别以最大和最小彩色矢量 ($v_{i \max}, v_{i \min}$) 为核心, 将 V_i 中所有彩色矢量分成两类, 记为 CL_{i1} 和 CL_{i2} 。对于任意彩色矢量 $v_{ip} \in V_i$, 如果 v_{ip} 与 $v_{i \min}$ 的相似性测度大于 v_{ip} 与 $v_{i \max}$ 的相似性测度, 则 v_{ip} 属于 CL_{i1} , 否则, v_{ip} 属于 CL_{i2} , 即:

$$CL_{i1} = \{v_{ip}, \mu(v_{ip}, v_{i \min}) \geq \mu(v_{ip}, v_{i \max}), v_{ip} \in V_i\} \quad (10)$$

$$CL_{i2} = \{v_{ip}, \mu(v_{ip}, v_{i \max}) \geq \mu(v_{ip}, v_{i \min}), v_{ip} \in V_i\} \quad (11)$$

则 CL_{i1} 和 CL_{i2} 中最高相似性彩色矢量 v_{icl1} 和 v_{icl2} 可分别定义为:

$$v_{icl1} = \arg \max_{v_{ip} \in CL_{i1}} \left\{ \sum_{v_{ip'} \in CL_{i1}} \mu(v_{ip}, v_{ip'}) \right\} \quad (12)$$

$$v_{icl2} = \arg \max_{v_{ip} \in CL_{i2}} \left\{ \sum_{v_{ip'} \in CL_{i2}} \mu(v_{ip}, v_{ip'}) \right\} \quad (13)$$

由式(12)和式(13)获得的最高相似性彩色矢量即为当前结构单元 V_i 中下确界操作 \wedge 和上确界操作 \vee 的输出:

$$\wedge V_i = \wedge \{v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iq}\} = v_{icl1} \quad (14)$$

$$\vee V_i = \vee \{v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iq}\} = v_{icl2} \quad (15)$$

其中, 下确界操作 \wedge 和上确界操作 \vee 的输出彩色矢量分别为彩色矢量类 CL_{i1} 和 CL_{i2} 中最高相似彩色矢量 v_{icl1} 和 v_{icl2} , 也就是说, v_{icl1} 是与 CL_{i1} 中所有彩色矢量相似性测度之和最大的矢量, 而 v_{icl2} 则是与 CL_{i2} 中所有彩色矢量相似性测度之和最大的矢量。此外, 上确界和下确界操作输出的彩色矢量均为给

定彩色图像中结构单元内的彩色矢量, 即该操作并不会产生新的彩色矢量, 在很大程度上保持了原图像信息。

基于上述定义, 针对给定的彩色图像 z , 其所有彩色矢量构成集合 V_z , 彩色图像的膨胀操作 δ_z 、腐蚀操作 ϵ_z 、闭运算 χ_z 、开运算 ω_z 可分别表示为:

$$\delta_z(V_z) = \{ \vee V_i, i=1, 2, \dots, n \} \quad (16)$$

$$\epsilon_z(V_z) = \{ \wedge V_i, i=1, 2, \dots, n \} \quad (17)$$

$$\chi_z(V_z) = \epsilon_z(\delta_z(V_z)) \quad (18)$$

$$\omega_z(V_z) = \delta_z(\epsilon_z(V_z)) \quad (19)$$

由彩色形态学操作可以看出, 针对彩色图像矢量集合 V_z 的膨胀操作就是在结构单元 V_i 中找出该彩色矢量子集的上确界; 同理, 腐蚀操作就是在结构单元 V_i 中找出该彩色矢量子集的下确界。闭运算则是先膨胀后腐蚀, 而开运算则是先腐蚀后膨胀, 只是每次计算上、下确界的顺序不同而已。这样, 不仅能有效地完成对彩色图像的形态学处理, 而且在很大程度上保留了原图像的基本特征。

3 实验结果与分析

3.1 彩色形态学结构单元中的相关参数说明

结构单元是彩色形态学图像处理的基本单位和区域, 为了进一步分析其最不相似彩色矢量对、最大(最小)彩色矢量、最高相似性彩色矢量以及确定和获取上、下确界。这里假设彩色图像 z 中存在一个结构单元集合 $V_i = \{v_{i1}, v_{i2}, v_{i3}, v_{i4}, v_{i5}, v_{i6}\} \subset V_z$ 。选取参数 $k=0.005$, 利用式(5)来计算这 6 个彩色矢量间的相似性测度, 计算结果如表 1 所列。

表 1 结构单元中彩色的相似性测度

Table 1 Similarity measure among colors in given structural unit

彩色矢量	v_{i1} (330, 0.33, 0.60)	v_{i2} (330, 0.25, 0.80)	v_{i3} (330, 0.50, 0.40)	v_{i4} (314, 0.70, 0.67)	v_{i5} (19, 0.40, 0.67)	v_{i6} (281, 0.63, 0.53)
v_{i1}	1.0000	0.9547	0.9416	0.9079	0.8951	0.9125
v_{i2}	0.9547	1.0000	0.9004	0.8866	0.8734	0.8637
v_{i3}	0.9416	0.9004	1.0000	0.8515	0.8522	0.8249
v_{i4}	0.9079	0.8866	0.8515	1.0000	0.8450	0.8770
v_{i5}	0.8951	0.8734	0.8522	0.8450	1.0000	0.9117
v_{i6}	0.9125	0.8637	0.8249	0.8770	0.9117	1.0000

从表 1 可知, 彩色矢量 v_{i3} 和彩色矢量 v_{i6} 具有最小的模糊相似性测度(0.8249), 根据式(6)可得到相似性最小的彩色矢量对集合 R_i , 其中仅包含唯一的彩色矢量对 $\{v_{i3}, v_{i6}\}$, 因此最不相似的彩色矢量对 (ω, u) 即为 $\{v_{i3}, v_{i6}\}$ 。据式(8)、式(9)可知彩色矢量 v_{i6} (281, 0.63, 0.53) 比彩色矢量 v_{i3} (330, 0.50, 0.40) 的亮度值大, 由此彩色矢量 v_{i6} 和彩色矢量 v_{i3} 分别为最大 $v_{i \max}$ 和最小彩色矢量 $v_{i \min}$ 。比较 V_i 中彩色矢量与最大彩色矢量 (v_{i6}) 和最小彩色矢量 (v_{i3}) 的相似性测度, 可以发现彩色矢量 v_{i1} 和 v_{i2} 与彩色矢量 v_{i3} 的相似性测度比彩色矢量 v_{i6} 的高, 而彩色矢量 v_{i4} 和 v_{i5} 与彩色矢量 v_{i6} 有更高的相似性测度, 则彩色矢量 v_{i1}, v_{i2}, v_{i3} 属于彩色矢量类 CL_{i1} , 彩色矢量 v_{i4}, v_{i5}, v_{i6} 属于彩色矢量类 CL_{i2} 。根据式(12)和式(13)可以计算出彩色矢量类 CL_{i1} 中彩色矢量 v_{i1} 与其他两种彩色矢量相似性测度累加和最大(为 2.8963), 所以该彩色矢量为 CL_{i1} 中最高相似彩色矢量 v_{icl1} , 即结构单元 V_i 的下确界, 也就是当前结构单元彩色形态学的腐蚀输出。同理, 彩色矢量 v_{i6} 是 CL_{i2}

中最高相似彩色矢量 v_{icl2} , 即此结构单元 V_i 的上确界, 同时也是当前结构单元彩色形态学的膨胀输出。

3.2 彩色形态学操作实验

为了验证和分析上述彩色形态学的操作性能, 选取 150×150 像素的彩色图像 Peppers 作为测试图像, 如图 1 所示。



图 1 测试图像

Fig. 1 Test image

计算矢量相似性测度时, 参数 $k=0.005$, 进行形态学操作时结构单元为 3×3 像素的矩形, 经过上述彩色形态学膨胀、腐蚀、闭运算、开运算处理后的结果如图 2 所示。从操作结果可以看出, 彩色图像的目标得到“膨胀”或“收缩”,

图像边缘更加平滑。

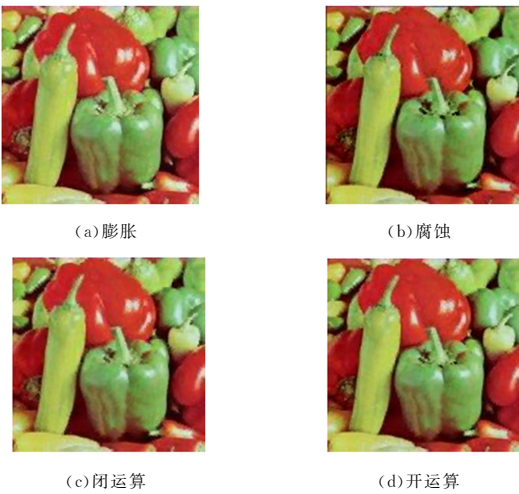


图2 形态学操作结果(1)

Fig. 2 Results (1) of color morphological operations

为了更清晰地观察和分析,选取像素点(60,55)为中心的 15×15 的区域作为形态学操作区域,如图3(a)所示的矩形区域,其中包含红色辣椒、绿色辣椒、黄色辣椒和黑色阴影等4种典型目标对象,对该区域(见图3(b))取样,并将其放大10倍,结果如图3(c)所示。对图3(c)进行腐蚀、膨胀、开、闭等彩色形态学操作,其结果如图4所示。



图3 所取区域及放大图像

Fig. 3 Extracted region from Peppers and enlarged image

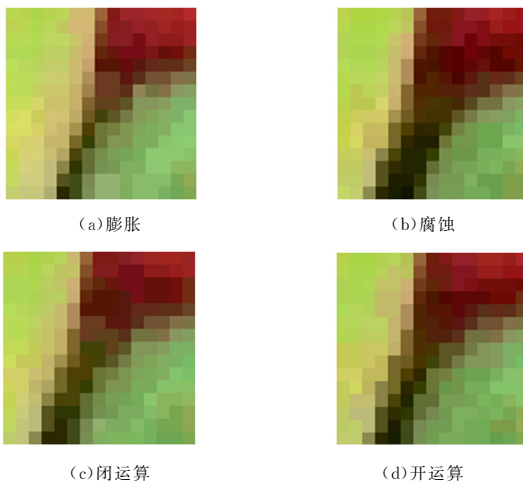


图4 形态学操作结果(2)

Fig. 4 Results (2) of color morphological operations

膨胀操作的结果使原图像的阴影(背景)部分被压缩,其他目标被扩大,即深色被压缩,浅色被扩展,原图像中的毛刺被消除,同样目标的颜色及边缘也变得平滑,如图4(a)所示。腐蚀操作使原图像中的阴影(背景)面积被扩大,其他目标被

压缩,原来的小的间隙被填补,同时每个目标的颜色及边缘变得更加平滑,如图4(b)所示。闭运算与膨胀结果相似,而开运算与腐蚀结果相似,如图4(c)和图4(d)所示。通过上述实验可以看出,提出的彩色形态学操作符合形态学操作的基本原理,且能较好地解决同质区域像素不一致的问题,这将使基于彩色形态学的分割、滤波、目标提取等彩色图像处理成为可能。

3.3 相似性测度的参数影响分析

为了进一步评价式(1)中参数 k 对彩色形态学性能的影响,选取 $k=5, 0.05, 0.005$,结构单元为 3×3 像素的矩形,针对图1实现彩色形态学膨胀、腐蚀、闭运算、开运算等操作,其结果如图5所示。

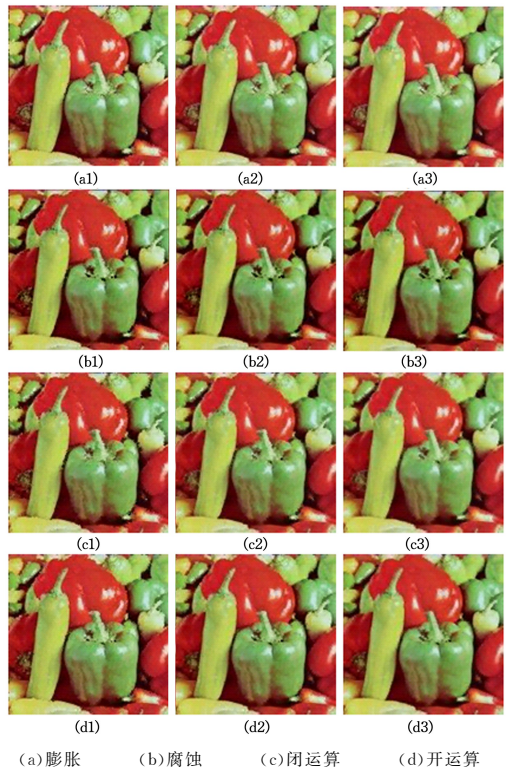


图5 形态学操作结果(3)

Fig. 5 Results (3) of color morphological operations

其中当 $k=5$ 时,图5(a1)、(b1)、(c1)、(d1)分别表示形态学膨胀、腐蚀、闭运算、开运算等操作结果,其中1,2,3分别表示 $k=5, 0.05, 0.005$ 时的结果;同理,当 $k=0.05, 0.005$ 时,操作结果分别由图5(a2)、(b2)、(c2)、(d2)、图5(a3)、(b3)、(c3)、(d3)表示。通过结果可以看出,虽然都采用相同的形态学操作,但由于参数 k 的不同,使得两个彩色矢量的相似性测度不同,从而使操作结果有所不同,这也符合人类视觉感知因人而异的模糊性特征。通过操作结果也可看出,当参数 $k \leq 0.05$ 时,所有的彩色形态学操作对目标平滑和边缘信息保持的效果最优。另外,当参数 k 减小时,膨胀与腐蚀操作结果接近;形态学操作使目标“收缩”或“膨胀”,但最终都使其边缘更加光滑。

3.4 彩色形态学对比实验分析

将本文所提的彩色形态学与由灰度形态学拓展的彩色形态学、基于区域排序的形态学进行对比,仍选择图1作为测试图像。由灰度形态学拓展的彩色形态学就是将彩色影像看成

由红、绿、蓝 3 幅单色图像构成,利用灰度形态学分别处理这 3 幅单色图像,最后用形态学处理结果还原彩色图像。基于区域排序的形态学就是以当前区域(选取 3×3 像素的正方形区域)中矢量的梯度进行排序并将梯度最小、最大的矢量作为形态学输出。本文彩色形态学操作中,参数 $k=0.005$,结构单元为 3×3 像素。图 6—图 9 分别为膨胀、腐蚀、闭运算、开运算后的结果。从结果可知,本文彩色形态学对图像处理更为细致,经过这种形态学操作可以使彩色目标的边缘更加平滑,而且能很好地保留原图像的细节特征,不会使图像失真,如图 6(a)、图 7(a)、图 8(a)、图 9(a)所示;采用拓展灰度形态学方法的彩色形态学处理后图像的某些细节丢失,目标边缘变得模糊,造成影像失真,如图 6(b)、图 7(b)、图 8(b)、图 9(b)所示;基于区域排序的形态学,由于腐蚀操作采用梯度最接近的矢量,所以其效果较好,但其他涉及膨胀的操作,其效果均不理想,如图 6(c)、图 7(c)、图 8(c)、图 9(c)所示。



图 6 膨胀操作结果对比

Fig. 6 Comparison of dilation operation



图 7 腐蚀操作结果对比

Fig. 7 Comparison of erosion operation



图 8 闭运算结果对比

Fig. 8 Comparison of closing operation



图 9 开运算结果对比

Fig. 9 Comparison of opening operation

通过以上对比实验可以清晰地看出本文提出的彩色形态学不但能对彩色图像进行有效处理,而且具有较好的处理效果,这将为彩色影像的边缘提取、滤波、分割等奠定坚实的基础。另外,这种彩色形态学还可以通过改变参数 k 及结构单元的大小得到更加切合实际的处理结果。这也充分说明了所提彩色形态学的有效性和实用性。

4 边缘检测及提取

4.1 彩色图像边缘检测及提取方法

通常在进行灰度图像边缘检测时,若像素亮度不连续则认为其目标边缘,通过传统的边缘检测算子可以很容易地检测出来^[14-17]。但对于彩色图像,边缘的定义就较为复杂,如忽略彩色像素色调、饱和度的不连续性,仅以亮度的不连续性作为彩色影像的边缘判断的依据;也有在边缘检测时综合考虑 3 个主要分量的不连续性来确定其目标边缘;也有如李玉峰等^[18]通过分量加权求梯度值确定目标边缘等方法。这些方法都不能很准确地给出彩色图像的边缘信息,具有一定的局限性。

在灰度图像中,把形态学操作应用于图像边缘提取时,只需对灰度图像分别进行腐蚀、膨胀等对偶操作,然后将图像操作结果的对应像素灰度值求差即可得到灰度图像的边缘。但这种方法不能直接应用于彩色图像,尤其在 HSI 彩色空间中,经过彩色形态学对偶操作后对应像素差值没有任何实际意义。通过上述实验可知,经过对偶形态学操作会使彩色图像的目标边缘信息更加清晰平滑,使其边缘对应像素的相似性程度降低,所以利用这个特点就可以构造一种新型彩色图像边缘提取方法,即通过一对对偶彩色形态学操作实现彩色图像中目标的“膨胀”或“收缩”,人为降低边缘像素的相似性,然后计算两种形态学操作后的图像对应像素的相似性测度并形成灰度图像,最后通过阈值的设定进行灰度图像边缘的提取进而确定彩色图像的边缘信息。

给定彩色图像 z ,在 HSI 彩色空间中对其进行彩色形态学对偶操作,并分别形成两个彩色矢量集 $V_1 = \{v_{11}, v_{12}, \dots, v_{1n}\}$ 和 $V_2 = \{v_{21}, v_{22}, \dots, v_{2n}\} \subset U$ 。则 V_1 和 V_2 对应矢量间的相似性测度可以定义为相似性集合 $M \in [0, 1]$ 。

$$M(V_1, V_2) = \{m_i = \mu(v_{1i}, v_{2i}), i \in I\}, I = \{1, 2, \dots, n\} \quad (20)$$

此相似性测度集合数据可构成一个包含边缘信息的灰度图像,根据实际情况设定一个阈值 $\alpha \in [0, 1]$,当相似性测度小于或等于阈值时,说明此像素经过对偶形态学操作后相似性降低,可能是彩色图像的目标边缘;否则表示经过对偶形态学操作,该像素相似性没有降低,不是图像目标边缘,即其边缘信息二值图像可表示为:

$$BI = \{e_i, e_i = 0, m_i \leq \alpha; e_i = 1, m_i > \alpha, i \in I\} \quad (21)$$

其中, $e_i = 0$ 表示其所对应的像素 i 是彩色图像的目标边缘。通过这种方法就可以方便地提取出彩色图像的边缘信息。

4.2 测试图像的边缘提取实验

实验仍选取图 1 来进行目标边缘的检测和提取。在这里结构单元为 3×3 像素,根据前面的分析,形态学操作及计算两个彩色图像间的相似性测度的参数 k 均取 0.005。首先对彩色图像 Peppers 使用一对对偶(膨胀、腐蚀)彩色形态学操

作并形成两幅彩色图像,然后计算两幅彩色图像对应像素的相似性测度,以此相似性测度为依据形成灰度边缘图像,如图 10 所示,其中包含了彩色图像的边缘信息。当然,设定不同阈值,提取到的边缘细节信息也不同,这里分别将阈值设置为 0.85,0.90 和 0.95,如图 11 所示。从图 11 可以看出,随着阈值的增加,可提取出更多的边缘信息。通过这种基于彩色形态学的边缘提取方法就可以很方便地实现彩色图像边缘检测和提取,为彩色影像的目标识别、智能交通、目标追踪等应用奠定了坚实的基础。

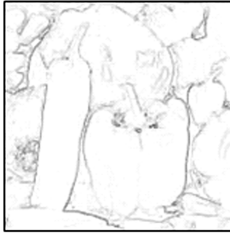


图 10 灰度边缘图像

Fig.10 Grayscale edge image



(a)阈值为 0.85 的图像 (b)阈值为 0.90 的图像 (c)阈值为 0.95 的图像

图 11 不同阈值形成的二值边缘图像

Fig.11 Binary edge images by different thresholds

4.3 遥感图像的边缘提取实验

为了验证此方法对实际遥感影像处理的实用性和有效性,选取 3 幅 150×150 像素的遥感彩色图像进行边缘提取实验,遥感图像如图 12 所示。结构单元选取 3×3 像素,参数 $k=0.005$ 。采用一对对偶形态学操作(膨胀、腐蚀)分别处理 3 幅彩色图像,对应像素的相似性测度形成的灰度图像如图 13 所示。



(a) (b) (c)

图 12 彩色遥感图像

Fig.12 Remote sensing images

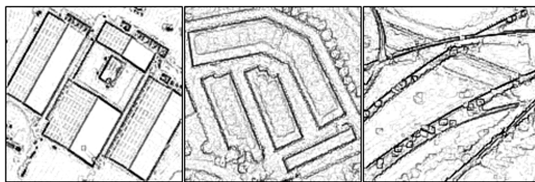


图 13 对应像素间相似性测度形成的灰度图像

Fig.13 Grayscale images of similarity measure between pixels

阈值选取是根据实际图像处理需要而定的,当需要获取更多边缘信息时,阈值取较大值,但处理数据量较大;当仅需要主要边缘信息时,阈值就取较小值^[19-26]。这里为了获取更多的边缘信息,选取阈值为 0.90,则灰度图像所对应的二值边缘图像信息如图 14 所示。

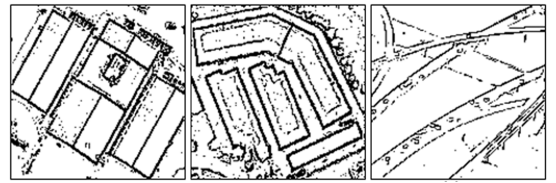


图 14 二值边缘图像

Fig.14 Binary edge images

为了消除二值图像中一些孤立的噪声像素点,采用 3×1 的结构元素对二值边缘图像进行二值形态学膨胀滤波操作,操作后的结果如图 15 所示。这种二值形态学操作能较为有效地去除边缘中的噪声信息,使边缘更加清晰^[24]。

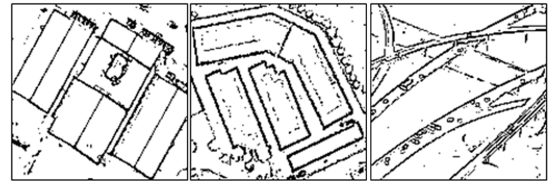
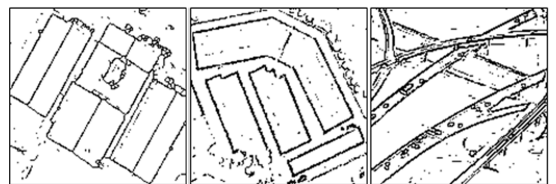


图 15 边缘图像二值形态学膨胀操作

Fig.15 Binary morphological dilation operation of edge images

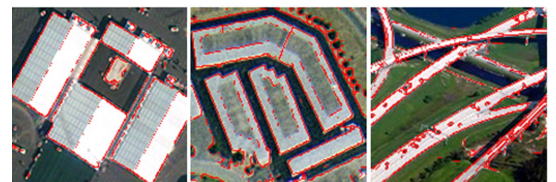
针对图 15,采用边缘细化算法将图像的边缘信息进一步明确和细化,结果如图 16 所示。最后,将获取的边缘信息叠加上原始彩色图像之上,结果如图 17 所示。从图中可以看出,这种边缘提取方法具有很好的边缘检测能力,彩色图像的主要边缘信息均能被有效地检测和提取,图像中微小纹理细节的变化对边缘提取结果的影响也较小。此种方法所提取的边缘信息与人类视觉感知结果的相似程度很高,符合人类视觉对彩色影像边缘的判断和认知。



(a) (b) (c)

图 16 目标边缘提取(细化算法操作后)

Fig.16 Extraction of object edges(after refining operation)



(a) (b) (c)

图 17 边缘信息与原始图像叠加

Fig.17 Overlaying of edge information and original images

结束语 为了将形态学扩展到 HSI 空间并对彩色图像进行有效处理,本文利用 HSI 空间彩色相似性,引入了一种与人类视觉感知相符并能有效刻画彩色矢量间关系的相似性测度;然后以相似性测度、结构单元、上确界、下确界为基础,定义了针对彩色图像的膨胀、腐蚀、闭运算和开运算等彩色形态学操作;最后,通过对彩色形态学操作结果的对比和分析,进一步说明了这些操作不仅能够对彩色图像的目标进行有效的“膨胀”和“收缩”,而且能够平滑目标并保持边缘信息,尤其是当相似性测度参数 $k \leq 0.05$ 时,这种彩色形态学具有较好的图像处理性能。另外,本文据此提出并设计了一种用于彩色图像边缘提取的方法,该方法通过设定阈值可以实现对彩色图像目标边缘的按需提取,从实验效果可以看出,该方法具有较好的实用价值和推广价值。

参考文献

- [1] HU J, BIAN D M, XIE Z D, et al. New approach for narrow band interference detection in satellite communication using morphological filter[J]. Computer Science, 2016, 43(10): 120-124. (in Chinese)
胡婧, 边东明, 谢智东, 等. 应用形态学滤波的卫星通信窄带干扰检测新方法[J]. 计算机科学, 2016, 43(10): 120-124.
- [2] CESAR T H. Fast hardware architecture for grey-level image morphology with flat structuring elements[J]. IET Image Processing, 2014, 8(2): 112-121.
- [3] SGHAIER M O, FOUCHER S, LEPAGE R. River extraction from high-resolution SAR images combining a structural feature set and mathematical morphology[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2017, 10(3): 1025-1038.
- [4] LIU H, ZHANG Y S, ZHANG Y H, et al. Vector morphology image processing based on difference formula in uniform space [J]. Journal of Image and Graphics, 2011, 16(12): 2145-2151. (in Chinese)
刘辉, 张云生, 张印辉, 等. 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.
- [5] SHIN H C, LIU E R. Automatic reference color selection for adaptive mathematical morphology and application in image segmentation[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2016, 25(10): 4665-4676.
- [6] TANG H Z, HUANG H X, GUO X F, et al. New method of morphological color image processing [J]. Journal of Computer Applications, 2010, 30(8): 2101-2104. (in Chinese)
汤红忠, 黄辉先, 郭雪峰, 等. 新型彩色图像形态学处理方法[J]. 计算机应用, 2010, 30(8): 2101-2104.
- [7] AN J. Image enhancement algorithm and the application based on mathematical morphology[D]. Lanzhou: Northwest Normal University, 2016. (in Chinese)
安静. 基于数学形态学的图像增强算法及其应用[D]. 兰州: 西北师范大学, 2016.
- [8] WANG Y, YAN M. Color image segmentation by using global similarity measure [J]. Journal of Signal Processing, 2016, 32(8): 951-959. (in Chinese)
王瑜, 闫沫. 采用全局相似性测量的彩色图像分割[J]. 信号处理, 2016, 32(8): 951-959.
- [9] GAO L, LING X M. Color noise image edge detection based on morphology in HSI space[J]. Journal of Lanzhou Jiaotong University, 2010, 29(6): 96-98, 105. (in Chinese)
高丽, 令晓明. HSI 空间基于形态学的彩色有噪图像边缘检测[J]. 兰州交通大学学报, 2010, 29(6): 96-98, 105.
- [10] WANG Y, LU H Z, SUN G F. Similarity measure between shapes based on spatial fuzzy representation[J]. Systems Engineering and Electronics, 2005, 27(2): 340-342. (in Chinese)
汪洋, 卢焕章, 孙广富. 基于空间模糊化表示的图形相似性测度[J]. 系统工程与电子技术, 2005, 27(2): 340-342.
- [11] KANG S J. HSI-based color error-aware subpixel rendering technique[J]. Journal of Display Technology, 2014, 10(4): 251-254.
- [12] MELO R O, FILHO C F F C, COSTA M G F. Leak detection of natural gas with base on the components of color spaces RGB and HSI using novelty filter[J]. IEEE Latin America Transactions, 2014, 12(8): 1560-1565.
- [13] CHEN X Y, LI J, YANG H M, et al. Adaptive threshold binarization and morphological image processing based on FPGA[J]. Electronic Measurement Technology, 2016, 39(7): 67-71. (in Chinese)
陈鑫元, 李筠, 杨海马, 等. 自适应阈值图像二值化及形态学处理的 FPGA 实现[J]. 电子测量技术, 2016, 39(7): 67-71.
- [14] LI W. Research on edge detection with mathematic morphology [J]. Computer & Digital Engineering, 2008, 11(36): 20-22. (in Chinese)
李伟. 基于数学形态学的边缘检测算法研究[J]. 计算机与数字工程, 2008, 11(36): 20-22.
- [15] FANG Z W, CAO Z G, XIAO Y. Object proposal algorithm for the depth image[J]. Journal of Signal Processing, 2016, 32(2): 193-202. (in Chinese)
方智文, 曹治国, 肖阳. 深度图像的目标潜在区域提取算法[J]. 信号处理, 2016, 32(2): 193-202.
- [16] XU T Z, ZHANG G C, JIA Y. Color image segmentation based on morphology gradients and watershed algorithm[J]. Computer Engineering and Applications, 2016, 52(11): 200-203, 208. (in Chinese)
徐天芝, 张贵仓, 贾园. 基于形态学梯度的分水岭彩色图像分割[J]. 计算机工程与应用, 2016, 52(11): 200-203, 208.
- [17] YU H Y, NIU Q L. Effective application of computer technology in image contour extraction[J]. Modern Electronics Technique, 2016, 39(10): 34-36. (in Chinese)
于海燕, 牛庆丽. 计算机技术在图像轮廓提取中的有效应用[J]. 现代电子技术, 2016, 39(10): 34-36.
- [18] LI Y F, LI G Z, LONG K H. Spatial error concealment algorithm based on adaptive edge thresholding and directional weight[J]. Optics and Precision Engineering, 2016, 24(3): 626-634. (in Chinese)
李玉峰, 李广泽, 龙科慧. 基于自适应边缘阈值及方向加权的空

- 间错误隐藏算法[J]. 光学精密工程, 2016, 24(3): 626-634.
- [19] XIAO H G, WEN J, CHEN L F, et al. New road extraction algorithm of high resolution SAR image[J]. Computer Engineering and Applications, 2016, 52(15): 198-202, 207. (in Chinese)
肖红光, 文俊, 陈立福, 等. 一种新的高分辨率 SAR 图像道路提取算法[J]. 计算机工程与应用, 2016, 52(15): 198-202, 207.
- [20] ZHANG X M, YI Z X, TIAN S, et al. Change detection of SAR images using morphologic attribute profile and support vector machine[J]. Optics and Precision Engineering, 2014, 22(10): 2832-2839. (in Chinese)
张雄美, 易昭湘, 田淞, 等. 结合形态学属性断面与支持向量机的合成孔径雷达图像变化检测[J]. 光学精密工程, 2014, 22(10): 2832-2839.
- [21] WU S H, WU Y Q, ZHOU J J, et al. SAR river image segmentation based on reciprocal gray entropy and improved Chan-Vese model[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2015, 44(11): 1255-1262. (in Chinese)
吴诗嫻, 吴一全, 周建江, 等. 利用倒数灰度熵和改进 Chan-Vese 模型进行 SAR 河流图像分割[J]. 测绘学报, 2015, 44(11): 1255-1262.
- [22] HU Z L. An unsupervised change detection approach base on KI dual thresholds under the generalized gauss model assumption in SAR images[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2013, 42(1): 116-122. (in Chinese)
胡昭玲. 广义高斯模型及 KI 双阈值法的 SAR 图像非监督变化检测[J]. 测绘学报, 2013, 42(1): 116-122.
- [23] CHEN J H, ZHAO Y J, LAI T, et al. Geometric parameters extraction method of ship target in high resolution TerraSAR-X image[J]. Control and Decision, 2015, 30(6): 1135-1138. (in Chinese)
陈建宏, 赵拥军, 赖涛, 等. 高分辨 TerraSAR-X 图像舰船目标几何参数提取方法[J]. 控制与决策, 2015, 30(6): 1135-1138.
- [24] XU Y X, CHEN F. Scene matching algorithm based on CenSurE for SAR/INS integrated navigation system[J]. Control and Decision, 2011, 26(8): 1175-1180. (in Chinese)
许允喜, 陈方. 基于 CenSurE 特征的 SAR/INS 组合导航景象匹配算法[J]. 控制与决策, 2011, 26(8): 1175-1180.
- [25] CHEN Y F. SAR image segmentation based on GLCM of geometric region and Region Map[D]. Xian: Xidian University, 2014. (in Chinese)
陈颖峰. 基于几何区域的灰度共生矩阵和 Region Map 的 SAR 图像分割方法[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2014.
- [26] ZHANG Z J, SHUI P L. SAR image segmentation algorithm using hierarchical region merging with edge penalty[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2015, 37(2): 261-267. (in Chinese)
张泽均, 水鹏朗. 边缘惩罚层次区域合并 SAR 图像分割算法[J]. 电子与信息学报, 2015, 37(2): 261-267.