

文章编号: 1003-501X(2008)02-0090-07

彩色图像的复变函数模型及其边缘检测

王小芳, 闫光荣, 雷 毅

(北京航空航天大学 机械工程及自动化学院, 北京 100083)

摘要: 本文在彩色图像的 HSI 颜色空间中, 根据其分量的不相关特性, 针对 H、S 分量建立了彩色图像的复变函数模型, 并给出其边缘检测方法, 得到 H、S 分量的边缘图像。抽取彩色图像的 I 分量构造灰度图像, 利用当前成熟的灰度边缘检测方法(基于小波的多尺度边缘检测方法)得到 I 分量的边缘图像。最后, 利用信息融合技术, 将上述获得的两幅边缘图像进行信息组合得到最终的边缘检测结果。从试验的结果来看, 本文所采用的方案充分利用了彩色图像所包含的信息, 对图像的彩色边缘比较敏感, 获得了满意的边缘检测结果。

关键词: 彩色图像; 复变函数; HSI 颜色空间; 边缘检测

中图分类号: TN911.73

文献标志码: A

Complex Variable Function Model of Color Image and Its Edge Detection

WANG Xiao-fang, YAN Guang-rong, LEI Yi

(College of Mechanical Eng. & Auto, Beijing University of Aeronautics & Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: Firstly, based on HSI color space, complex variable function model correlative to H and S components is proposed and the correlative edge detection method is presented, and then the edge image of H and S components can be achieved by the method. Secondly, the grey image is acquired by extracting I component from the color image, and processed with current mature grey edge detection method (accurate image edge detection based on wavelet multi-scale analysis) to obtain the edge image of I component. Finally, taking advantage of data fusion technique, the two edge images above mentioned can be combined into an accurate edge image of the color image. The experimental results show that the information of color image is efficiently utilized and the edge images combined are satisfying by applying this framework.

Key words: color image; complex variables function; HSI color space; edge detection

1 引言

数字图像的边缘检测是图像处理的一个重要研究方向。图像理解和分析一般要先进行边缘检测, 所以边缘检测已被视作图像分割、模式识别、机器视觉等图像分析领域的重要基础。

彩色图像是多光谱图像的一种特殊情况。用于彩色图像的彩色空间有多种不同的表示形式, 最常用的有红、绿、蓝(RGB)三基色模型, 对应于人类视觉的三基色即红、绿、蓝三个波段, 是对人眼的光谱量化性质的近似。由于 RGB 是一种不均匀的颜色空间, 所以 RGB 适合于显示系统, 但是不适用于图像边缘检测。通过对 RGB 三基色模型的线性变换或非线性变换, 可以获得其他的颜色空间, 例如: 线性变换空间有: YIQ、YUV、 $I_1I_2I_3$ 等, 它们部分消除了相关性; 非线性变换空间有: HSI(HSB, HSL, HSV 为 HSI 的变形)、归一化 RGB(normalized RGB, Nrgb)、 YT_1T_2 (也属于归一化颜色空间)、均匀颜色空间 CIE($L^*a^*b^*$)及

收稿日期: 2007-04-18; 收到修改稿日期: 2007-09-06

基金项目: 国家 863 计划资助项目(2002AA411010)

作者简介: 王小芳(1971-), 女(汉族), 河北邢台人, 博士研究生, 主要研究工作是 CAD/CAM, 数字图像处理, 计算机视觉。

E-mail: wangxiaofang11@sohu.com

CIE(L*u*v*)等。非线性变换空间消除了 3 个颜色分量之间的相关性，适合于图像处理。

彩色图像与灰度图像的区别，主要表现在对每一个像素描述的不同。后者是在一维亮度空间上，而前者是在三维颜色空间上。彩色图像比灰度图像包含了更多的信息，是对客观世界更为贴合的描述，所以其边缘检测的方法也更为复杂。目前，彩色图像边缘检测算法大致可以划分为以下三类方法：1) 伪灰度图像边缘检测及合成方法：基本原理是首先对彩色图像对应的红、绿、蓝三副伪灰度图像分别做边缘检测，然后合并三副边缘图像作为最后的结果。该方法应用最为普遍；2) 梯度合成方法：首先按灰度图像的求灰度梯度的方法，对像素的颜色空间中的三个分量分别进行卷积计算获得其梯度，然后通过合成三个分量的梯度得到一个梯度矢量，再对梯度矢量进行检测得到彩色图像的边缘检测结果；3) 矢量方法：该方法是将像素的颜色做一个 3 维矢量进行矢量的梯度检测。由于该方法计算复杂，理论欠完备，因此没有广泛采用。

在彩色图像的各种颜色空间中，由色调 H、饱和度 S 和亮度 I 三个颜色分量组成的 HSI 模型对颜色的描述更符合人对颜色的视觉理解。本文提出了基于 HSI 颜色空间的彩色图像复变函数模型，并充分利用已有的复变函数研究成果，给出了适合此模型的彩色图像边缘检测方法。

2 彩色图像边缘检测方案分析

在彩色图像的各种颜色空间中，HSI 模型的三个分量中 I 代表亮度，亦即图像的灰度。提取出 I 分量可以获得彩色图像对应的灰度图像，对 I 分量图像进行边缘检测得到彩色图像的灰度边缘。由于灰度图像的边缘检测方法比较成熟，所以 I 分量图像的边缘检测方法，本文将不作为重要内容进行阐述，只给出其简要过程。

HSI 颜色空间中的 H、S 分量，描述了图像的彩色特征，代表了图像彩色信息。本文针对 H、S 分量建立了基于复变函数的彩色图像模型。对于彩色图像的复变函数模型，充分运用复变函数已有研究成果，能够方便地计算出 H、S 分量的梯度矢量，从而可以对这两个分量进行边缘检测，得到彩色图像的色度边缘。

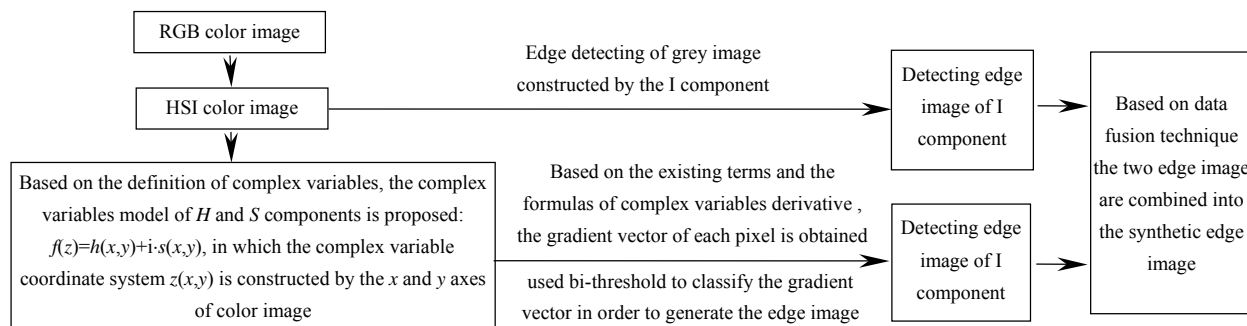


图 1 彩色图像边缘检测方案

Fig.1 Edge detection framework of color image

通过上述图像处理过程，本文得到彩色图像的两个边缘检测结果。如图 1 所示，一个是对 I 分量进行灰度边缘检测得到的彩色图像的灰度边缘；另一个是对 H、S 分量构建彩色图像的复变函数模型，并运用复变函数分析的方法得到的 H、S 分量的边缘检测结果，即彩色图像的色度边缘。最后选择适当的信息融合方法，将这两个图像边缘进行组合，就可以获得最终的彩色图像边缘检测结果。

3 彩色图像边缘检测的具体步骤

通过上述分析，本文中彩色图像的边缘检测步骤如下：

- 1) 图像预处理，采用高斯滤波对 RGB 彩色图像进行去噪声处理；
- 2) 将彩色图像由 RGB 转换到 HSI 颜色空间；
- 3) 提取 HSI 颜色空间中的 I 分量构造的该彩色图像的灰度图像，对此灰度图像进行边缘检测，得到 I 分量的边缘检测结果，即灰度边缘；
- 4) 对 HSI 中的 H、S 分量建立彩色图像的复变函数模型；

- 5) 按照复变函数解析的充分必要条件对图像进行搜索, 不满足该条件像素属于边缘点, 即色度边缘点;
- 6) 在第 5 步骤中, 剔除了彩色图像色度空间的梯度的不连续点, 图像中剩余的点可以看做在复平面上的解析点。利用复变函数的求导方程可以获得各个像素的梯度矢量;
- 7) 对第 6 步骤中获得的梯度矢量采用双阈值方法进行筛选, 得到 H、S 分量的边缘检测结果, 也可以称为色度(色调和饱和度)边缘;
- 8) 采用信息融合技术, 对于在第 3 步骤(得到灰度边缘)和第 5、7 步骤(得到色度边缘)中获得两个边缘检测结果进行融合, 得到最终的彩色图像边缘检测结果。

3.1 图像预处理

噪声在图像处理中被看成一个高频信号, 高斯滤波能有效地滤除掉图像中的细小噪点和边缘形状上细小的曲折, 能有效地提高彩色图像的信噪比。图像去噪可由下面的线性卷积实现:

$$I(x, y) = \int_{\Omega} G(x - \eta, y - \varsigma) I_0(\eta, \varsigma) d\eta d\varsigma \quad (1)$$

其中: Ω 代表整个图像平面, (x, y) 是图像像素坐标, $I_0(\eta, \varsigma)$ 是原图像, $G(x, y)$ 是滤波算子, $I(x, y)$ 是去噪后的图像。高斯滤波算子的表达式为

$$G(x, y, \sigma) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left[\frac{x^2 + y^2}{\sigma^2}\right]\right\} \quad (2)$$

本文采用滤波器窗口大小取为 3×3 , 即采用 8 个邻域像素分别对 R、G、B 三个分量进行平滑滤波。采用的高斯模版为

$$H = \frac{1}{16} \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 2 & 4 & 2 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

3.2 彩色图像转换

此步骤将彩色图像由 RGB 转换到 HSI 颜色空间。目前计算机中的彩色图像多采用 RGB 模式, 所以在图像边缘检测之前, 需要将彩色图像从 RGB 颜色空间转换到 HSI 颜色空间。HSI 颜色空间是对 RGB 三基色的重新编码, 消除了三个分量之间的相关性。但是从 RGB 到 HSI 的转换属于非线性变换, 其计算量比较大。

由 RGB 转换为 HSI 颜色空间的公式如下:

$$\begin{cases} I = \frac{R + G + B}{3} \\ H = \frac{1}{360} [90 - \arctan(F / \sqrt{3}) + \{0, G > B; 180, G < B\}] \\ S = 1 - \frac{\min(R, G, B)}{I} \end{cases} \quad (4)$$

其中 $F = \frac{2R - G - B}{G - B}$ 。

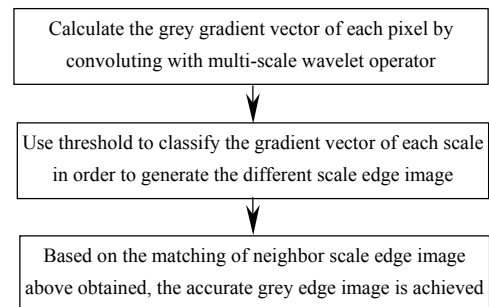


图 2 彩色图像 I 分量的边缘检测算法

Fig.2 Edge detection algorithm of I component in color image

3.3 彩色图像 I 分量的边缘检测(得到彩色图像的灰度边缘)

提取 HSI 颜色空间中 I 分量即可得到该图像对应的灰度图像。目前对灰度图像的边缘检测方法比较成熟, 所以本文对这一部分不再详述, 只给出 I 分量的基于小波多尺度边缘检测的流程图及其说明。

灰度边缘检测的本质是检测图像中的灰度不连续点, 是图像信号的高频分量。如图 2 所示, 灰度边缘检测关键技术包括三点: 1) 边缘检测本质是求图像上灰度不连续点。本文采用小波变换来计算各个尺度下各个像素的灰度梯度; 2) 按照 Canny 的规则中的三个条件, 对不同尺度下的图像梯度矢量进行搜索, 得到各尺度下图像灰度边缘; 3) 大尺度小波变换获得的图像边缘可以很好地降低噪声干扰, 但是边缘点的定位精度低。小尺度小波变换对图像边缘敏感, 定位精度高, 但是容易受到噪声干扰。利用小波变换的多尺度特点, 通过对多尺度小波变换获得的边缘进行匹配, 可以降低噪声干扰, 从而获得定位精度高的灰度边缘。

为便于叙述, 设灰度图像的边缘检测得到边缘图像中, 每个像素的值用 $E_1(x, y)$ 表示, 边缘点 $E_1(x, y)=1$, 非边缘点 $E_1(x, y)=0$ 。

需要说明的是, 在应用小波变换对灰度图像进行边缘检测过程中, 保存尺度 2^j ($j=1$) 时, 图像灰度梯度的模 ($M_1(x, y)$) 和相角 ($\rho_1(x, y)$), 用于后续的信息融合中。另外需要计算该尺度 2^j ($j=1$) 下的阈值:

$$T_1 = A / (j + 4) \quad (5)$$

其中 A 的计算方法是: 搜索在尺度 2^{j+1} 下的小波变换系数模最大值, 设为 A 。

3.4 彩色图像 HSI 颜色空间的 H、S 分量的复变函数模型建立

HSI 颜色空间中的 H、S 分量, 分别代表彩色图像的色度和饱和度, 充分体现了图像的彩色信息。在图像坐标系中, HSI 颜色空间中的 H 分量可以表示成像素坐标 (x, y) 的函数: $h(x, y)$; 同样 S 分量也可以表示成像素坐标 (x, y) 的函数: $s(x, y)$ 。

以图像坐标系中的 x 轴为实轴, 以 y 为虚轴, 建立复平面 z , 复数与复平面上的点一一对应。由于 HSI 颜色空间中 H 分量与 S 分量不相关, 所以可以将 H 分量与 S 分量组合成一个矢量, 即这个矢量的两个分量分别是 HSI 颜色空间中 H 分量与 S 分量。以复变函数来表示这个矢量, 则其表达式为 $f(z)=h(x, y)+i \cdot s(x, y)$ 。本文将包含了 H 分量、S 分量及其与图像平面关系的复变函数 $f(z)=h(x, y)+i \cdot s(x, y)$ 看作是 HSI 颜色空间中 H 分量与 S 分量的复变函数模型。彩色图像的复变函数模型一旦建立, 就可以利用复变函数分析的已有研究成果, 寻求彩色图像边缘检测的新方法。

3.5 利用复变函数解析的充要条件, 粗略筛选彩色图像的边缘

按照已有的复变函数分析的研究成果可以得出: 彩色图像的复变函数模型 $f(z)=h(x, y)+i \cdot s(x, y)$ 在其定义域 D 内解析的充要条件是: $h(x, y)$ 和 $s(x, y)$ 在 D 内任一点可微而且满足柯西-黎曼方程:

$$\frac{\partial h}{\partial x} = \frac{\partial s}{\partial y}, \quad \frac{\partial h}{\partial y} = -\frac{\partial s}{\partial x} \quad (6)$$

那么, 可以推导得到: 对于复变函数 $f(z)$, 在其定义域中不满足柯西-黎曼的点, 就是函数的不可微点, 即表明彩色图像在该点不连续, 该点属于边缘点。

因为图像中无法避免地存在噪声, 所以 $\partial h / \partial x$ 和 $\partial h / \partial y$, $\partial s / \partial x$ 和 $-\partial s / \partial y$ 不可能完全相等, 所以允许它们之间有一定的差值。本文中将其允许差值设为正数 ζ 。

具体算法:

1) 对图像中的每一点求 $\partial h / \partial x$, $\partial h / \partial y$, $\partial s / \partial x$, $-\partial s / \partial y$; 2) 设定合适的正数 ζ , 本文取为 $\zeta=0.1 \times \text{average}(\partial h / \partial x)$, 即图像中所有像素 $\partial h / \partial x$ 的均值的 1/10。对于图像中的每一点, 进行下面两式的判断:

$$\left\| \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{\partial s}{\partial y} \right\| < \zeta, \quad \left\| \frac{\partial h}{\partial y} + \frac{\partial s}{\partial x} \right\| < \zeta \quad (7)$$

任何不能同时满足上述两式的像素点, 都是图像的色度边缘点。

3.6 利用复变函数求导方程, 求彩色图像的梯度矢量

如果复变函数在某点解析, 即在该点的邻域内满足柯西-黎曼方程, 则该函数的导数方程为

$$f'(z) = \frac{\partial h}{\partial x} + i \frac{\partial s}{\partial x} = \frac{1}{i} \frac{\partial h}{\partial y} + \frac{\partial s}{\partial y} \quad (8)$$

将上述方程进行变换, 转变得下面的两个方程:

$$f'(z) = \frac{\partial h}{\partial x} + i \frac{\partial s}{\partial x}, \quad f'(z) = \frac{\partial s}{\partial y} - i \frac{\partial h}{\partial y} \quad (9)$$

对于在该点邻域中解析的复变函数来讲, 上述两个方程是等价的。对于彩色图像的复变函数模型 $f(z)=h(x, y)+i \cdot s(x, y)$ 来说, 由于图像中的噪声或其他的误差的影响, $\partial h / \partial x$ 与 $\partial s / \partial y$, $\partial s / \partial x$ 与 $-\partial h / \partial y$ 可能不完全相等。所以本文采用了均值的方法以降低噪声和其他误差的影响, 即:

$$f'(z) = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial s}{\partial y} \right) + \frac{i}{2} \left(\frac{\partial s}{\partial x} - \frac{\partial h}{\partial y} \right) \quad (10)$$

按照上面的方程,可以求得彩色图像复变函数模型的导数。本文对彩色图像中的每一像素(不包含步骤 3.5 中筛选出来的边缘点)按上式求导,可以获得该点的 H、S 分量的梯度矢量

$$\left(\frac{1}{2} \left(\frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial s}{\partial y} \right), \frac{1}{2} \left(\frac{\partial s}{\partial x} - \frac{\partial h}{\partial y} \right) \right)$$

需要说明的是,本文中 $\partial h / \partial x$, $\partial s / \partial y$, $\partial s / \partial x$, $\partial h / \partial y$ 均采用双三次 B 样条算子计算,尺度取为 $2^j(j=1)$ 。

3.7 彩色图像 H、S 分量的边缘检测过程(得到彩色图像的色度边缘)

对第 3.6 步骤中获得的彩色图像 H、S 分量的梯度矢量,先求各个像素的梯度矢量的模和相角。

$$\text{梯度矢量的模值: } M(f'(z)) = \sqrt{\left(\frac{1}{2} \left(\frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial s}{\partial y} \right) \right)^2 + \left(\frac{1}{2} \left(\frac{\partial s}{\partial x} - \frac{\partial h}{\partial y} \right) \right)^2} \quad (11)$$

$$\text{梯度矢量的相角: } \rho(f'(z)) = \arg \tan \left(\left| \frac{1}{2} \left(\frac{\partial s}{\partial x} - \frac{\partial h}{\partial y} \right) \right| \middle/ \left| \frac{1}{2} \left(\frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial s}{\partial y} \right) \right| \right) \quad (12)$$

参考 Canny 算法,根据 H、S 分量的梯度矢量进行边缘检测,获得色度边缘的步骤是:1) 对梯度相角进行规范化得到梯度方向;2) 采用非最大抑制方法初步剔除非边缘点;3) 双阈值分割及边缘生长。

1) 对梯度相角进行规范化得到梯度方向

对于图像中每个像素,它有 4 个可能的方向与邻点相连: 0° (水平方向)、 90° (垂直方向)、 45° (正对角线) 和 -45° (负对角线)。根据梯度相角 $\rho(f'(z))$ 的值可以将梯度方向规范到这 4 个角度。设规范化后的梯度方向为 $\theta(f'(z))$, 则有:

$$\theta(f'(z)) = \begin{cases} 0^\circ & \rho(f'(z)) \in [-\pi/8, \pi/8] \\ 90^\circ & \rho(f'(z)) \geq 3\pi/8, \text{ 或者 } \rho(f'(z)) \leq -3\pi/8 \\ 45^\circ & \rho(f'(z)) \in (\pi/8, 3\pi/8) \\ -45^\circ & \rho(f'(z)) \in (-3\pi/8, -\pi/8) \end{cases} \quad (13)$$

2) 采用非最大抑制方法初步剔除非边缘点

遍历图像的每个像素,在该像素规范化后方向角 $\theta(f'(z))$ 的方向上,若梯度模值 $M(f'(z))$ 是局部最大值,则该像素信息保持不变;否则将该像素设置为非边缘点,即 $E_{H,S}(x, y)=0$ 。

3) 双阈值分割及边缘生长

设置双阈值,低阈值 Tl 和高阈值 Th , $Tl=0.4 \times Th$, Th 按下式确定(其中, $m \times n$ 是图像的像素数):

$$Th = \frac{1.5}{m \times n} \sum_{x,y} M(f'(z)) \quad (14)$$

对于梯度模值 $M(f'(z)) \geq Th$ 的像素,确定为边缘点,即 $E_{H,S}(x, y)=1$;对于梯度模值 $M(f'(z)) < Tl$ 的像素,确定为非边缘点,即 $E_{H,S}(x, y)=0$;对于梯度模值 $M(f'(z)) \in [Tl, Th]$ 的像素,需要通过边缘生长方法来确定是否是边缘点。

边缘生长方法:对于梯度模值 $M(f'(z)) \in [Tl, Th]$ 的像素,如果其相邻像素存在边缘点(即 $M(f'(z)) \geq Th$ 的点),则确定该像素为边缘点,即 $E_{H,S}(x, y)=1$;否则确定该像素为非边缘点,即 $E_{H,S}(x, y)=0$ 。

将步骤 3.5 中获得的色度边缘点合并进来,得到彩色图像的色度边缘。

3.8 采用信息融合技术,获得最终的彩色图像边缘

上述文中,在第 3.3 步骤和第 3.5、3.7 步骤中分别得到的图像的灰度边缘和色度边缘。采用信息融合技术,对两个边缘检测结果进行组合,得到最终的彩色图像的边缘。

本文采用的信息融合算法:

1) 通过信息融合后得到边缘图像是二值化图像,预设每个像素的值为 0,即 $E_{\text{fusion}}(x, y)=0$;

2) 遍历彩色图像 I 分量(即灰度图像)边缘检测结果(即灰度边缘),如果像素 (i, j) 是边缘点,即 $E_I(i, j)=1$, 则 $E_{\text{fusion}}(i, j)=1$;

3) 遍历彩色图像 H、S 分量的边缘检测结果(即色度边缘)中,对于大于高阈值 Th 的确定的边缘点,即

$M(f'(z)) \geq Th$ 的像素 (i, j) , 设置 $E_{\text{fusion}}(i, j)=1$; 对 3.5 步骤中获得的边缘点同样设置其对应像素的 $E_{\text{fusion}}(i, j)=1$;

4) 对于彩色图像 H、S 分量的边缘检测中, 通过边缘生长获得的边缘点, 不能直接确定融合后边缘图像中相应像素为边缘点, 需要参考其灰度边缘的检测结果。在前面的步骤 3.3 中, 已经保存有 I 分量、尺度 $2^j(j=1)$ 时, 图像灰度梯度的模 $(M_I(x, y))$ 和相 $\rho_I(x, y)$ 角, 以及阈值 T_1 。对于每个通过生长获得的边缘, 首先判断其灰度梯度的模 $M_I(x, y)$ 是否大于阈值 T_1 , 如果 $M_I(i, j) \geq T_1$, 则该像素 $E_{\text{fusion}}(i, j)=1$, 是边缘点; 如果 $M_I(i, j) < T_1$, 则需要计算灰度梯度相角 $\rho_I(x, y)$ 与该像素 H、S 分量的梯度相角 $\rho(f'(z))$ 的夹角, 如果夹角小于等于 $\pi/4$, 则该像素 $E_{\text{fusion}}(i, j)=1$, 是边缘点; 否则 $E_{\text{fusion}}(i, j)=0$, 即为非边缘点。

4 实验结果与分析

实验用三个图像进行边缘检测, 其中图(a)为原图像, 图(b)为灰度(I 分量)检测结果, 图(c)为彩色 H、S 分量的检测结果, 图(d)为最后合成边缘检测图像。

从上面的三个图像的检测结果比较可以看出: 对于普通彩色图像 3, 灰度(I 分量)检测得到了图像的大部分边缘, 彩色 H、S 分量的检测结果补充了图像彩色信息所包含的边缘细节; 对于普通彩色图像 4, 由于灰度变换平缓, 灰度(I 分量)检测基本失效, 而彩色 H、S 分量的检测结果得到了图像的大部分边缘; 对于特殊彩色图像 5, 图像是专门制作的, 大矩形、小矩形、两个椭圆的颜色灰度(I 分量)都是相同的: 102, 但是它们色调和饱和度(H、S 分量)的值各不相同, 所以在灰度中只检测出了大轮廓, 而彩色 H、S 分量检测出各个图形之间的边界。

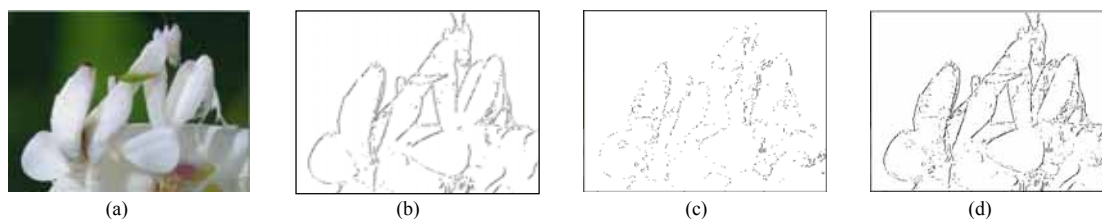


图 3 普通彩色图像边缘检测结果比较

Fig.3 Comparison of edge detection of common color image

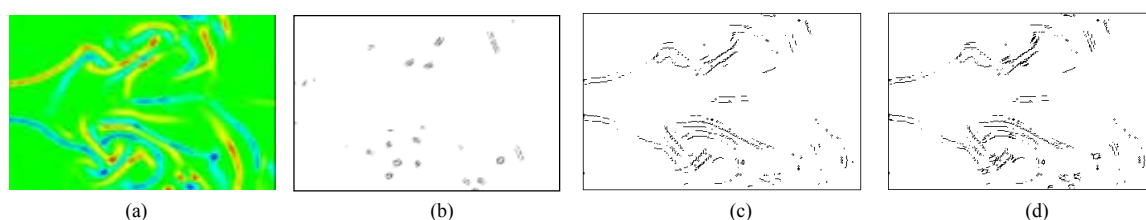


图 4 普通彩色图像边缘检测结果比较

Fig.4 Comparison of edge detection of common color image

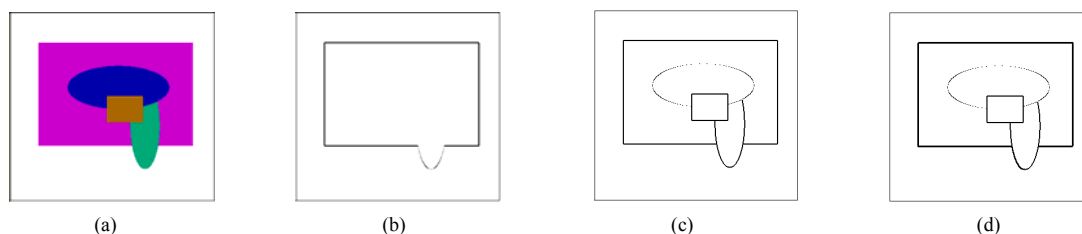


图 5 特殊彩色图像边缘检测结果比较

Fig.5 Comparison of edge detection of special color image

5 结 论

本文提出了彩色图像的基于 H、S 分量的复变函数模型, 并根据复变函数的解析性质, 给出了彩色图

像的边缘检测方案。该方案充分利用了彩色图像携带的信息,甚至在灰度边缘检测失效的情况下,也能给出较好的边缘检测结果。实验中三个图像的边缘检测结果符合本文提出的彩色图像边缘检测方案的预期目标。从实验结果来看,本文提出的方案充分利用了彩色图像所包含的信息,对彩色边缘比较敏感,并获得了满意的边缘检测结果。

6 后续研究重点

本文的复变函数求导时使用的小波变换方法,小波算子和尺度的选择直接影响边缘检测的结果。因此,如何选择合适的的小波算子和合适的尺度,以及如何将小波的多尺度方面的研究成果应用到彩色图像复变函数模型的边缘检测中,有更深一层的研究空间。

参考文献:

- [1] Scheuermann M ,Hagen H. Clifford Pattern Matching for Color Image Edge Detection [EB/OL]. http://www.cipic.ucdavis.edu/~hamann/SchlemmerHagenHotzHamannIRTG_Dagstuhl2006ProcPaperDraft08142006.pdf, 2006-11-6.
- [2] Koschan A ,Abidi M. Detection and Classification of Edges in Color Images[J]. **IEEE Signal Processing** ,2005 ,**22**(1) :64-73.
- [3] Heiberg E , Ebbers T , Wigstrom L , *et al.* Three-Dimensional Flow Characterization Using Vector Pattern Matching[J]. **IEEE Trans. Vis. Comput. Graph** , 2003 , **9**(3) : 313-319.
- [4] Sheikh A , Soraghan J. Fuzzy-based multi scale edge detection [J]. **Electronics Letters** , 2003 , **39**(1) : 30-32.
- [5] Sharifi M , Fathy M , Mahmoudi M T. A classified and comparative study of edge detection algorithms [C]// **Proceedings International Conference on Information Technology: Coding and Computing**. [S.l.] : IEEE , 2002 : 117-120.
- [6] Cheng H D , Jiang X H , Wang J. Color image segmentation based on homogram thresholding and region merging [J]. **Pattern Recognition** , 2002 , **35**(2) : 373-393.
- [7] Wesolkowski S , Jernigan M E , Robert D D. Comparison of color image edge detectors in multiple color spaces [C]// **Proceedings of the International Conference on Image Processin**. Vancouver, BC, Canada : IEEE , 2000 , **2** : 796-799.
- [8] Dony R D , Wesolkowski S. Edge detection on color images using RGB vectorangles [C]// **Proceeding of the 1999 IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering Shaw Conference Center**. Edmonton, Alberta, Canada : IEEE , 1999 , **2** : 687-692.
- [9] Treméau A , Borel N. A region growing and merging algorithm to color segmentation [J]. **Pattern Recognition** , 1997 , **30**(7) : 1191-1203.
- [10] Tao Hai , Huang T S. Color Image Edge Detection Using Cluster Analysis [C]// **IEEE International Conference on Image Processing**. California : IEEE , 1997 : 834-836.
- [11] Weeks A R , Myler H R. Edge Detection of Color Images Using the HSL Color Space [J]. **SPIE** , 1995 , **2424** : 291-301.
- [12] Jahne B. **Digital image processing (third edition)** [M]. Berlin : Springer-Verlag , 1995.
- [13] Deriche R. Using Canny's Criteria to Derive a Recursively Implemented Optimal Edge Detector [J]. **J. Comput. Vision** , 1987 , **1**(2) : 167-187.
- [14] Machuca R , Phillips K. Applications of Vector Fields to Image Processing [J]. **IEEE Trans. on Pattern Anal. Machine Intell** , 1983 , **5**(3) : 316-329.
- [15] 陈泽志,吴成柯,刘 勇. 双三次 B-样条小波算子的研究[J]. 西安电子科技大学学报(自然科学版) ,2002 ,**29**(2) :200-204.
CHEN Ze-zhi , WU Cheng-ke , LIU Yong. Research on the bicubic B-spline smoothing filter operator [J]. **Journal of Xidian University(Natural Science)** , 2002 , **29**(2) : 200-204.
- [16] Robinson G. Color Edge Detection[J]. **Optical Engineering** , 1977 , **16**(5) : 479-484.