

基于视觉感知模型修正的彩色图像边缘检测

雷 涛^{1,2}, 樊养余², 王 毅², 王小鹏¹

(1. 兰州交通大学电子与信息工程学院, 甘肃兰州 730070; 2. 西北工业大学电子信息学院, 陕西西安 710072)

摘要: 在彩色图像边缘检测过程中, 准确检测低照度区域的细节边缘是一个难题. 提出了一种基于视觉感知模型修正的彩色图像边缘检测方法. 由于视觉感知彩色空间中的色调分量具有圆形特性, 导致伪边缘问题, 利用色调距离计算色调图像的梯度以去除伪边缘, 并根据饱和度的非线性函数控制色调分量的梯度, 最后利用修正的视觉感知模型计算矢量梯度以获取彩色图像的边缘. 实验结果表明, 新的彩色边缘检测方法较现有方法能提高彩色图像的边缘检测精度, 尤其对于低照度区域的细节边缘具有较好的响应.

关键词: 边缘检测; 彩色图像处理; 色调分量; 梯度算子

中图分类号: TP391.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2013) 10-1903-08

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2013.10.005

Edge Detection Based on Modified Visual Perceptual Model for Color Image

LEI Tao^{1,2}, FAN Yang-yu², WANG Yi², WANG Xiao-peng¹

(1. School of Electronic and Information Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou, Gansu 730070, China;

2. School of Electronics and Information, Northwestern Polytechnical University, Xi'an, Shaanxi, 710072, China)

Abstract: In the process of color image edge detection, it is very difficult for the extraction of detail edges in the areas with low illumination. A novel method of color image edge detection based on modified visual perception model is proposed in this paper. Because hue component is represented by circular data, it easily leads to the false edges. Firstly, we use hue distance to calculate the gradient of hue component, and then use non-linear function whose variant is saturation to control the change of gradient of hue component. Finally, the edges of color image can be detected by computing vector gradient in modified visual perceptual model. Experimental results show that the proposed method can obtain higher accuracy of edge detection than the existing approaches. Especially, the proposed method has a good response for edge details in areas with low illumination.

Key words: edge detection; color image processing; hue component; gradient operators

1 引言

边缘检测是图像处理和计算机视觉中的关键步骤, 目前已广泛应用在图像分割、目标识别、数据隐藏和图像编码中. 与灰度图像相比, 彩色图像包含更丰富的信息, 因此研究关于彩色图像的边缘检测算法具有更为重要的意义. 早期的彩色图像边缘检测方法通常不考虑彩色图像各通道之间的关系, 将灰度边缘检测方法分别应用于彩色图像的三个通道, 然后组合三个边缘结果, 从而得到最终的彩色图像边缘. 由于该方法忽略了彩色图像各通道之间的关系, 一方面难以检测到部分细节边缘, 另一方面容易导致错误的边缘结果. 由于彩色图像的每一个像素可以看成是一个三维矢量, 因此利用矢量方法检测彩色图像的边缘是一种可行的思路. 最早提出

矢量梯度方法的是 Di Zenzo, 他利用二阶微分算子的原理获取矢量图像的梯度, 并考虑了矢量梯度的方向信息, 得到的彩色图像边缘较传统的单通道合成方法具有更强的梯度, 尤其对弱边缘具有较好的响应^[1].

目前, 基于矢量排序统计理论的彩色边缘检测方法应用最为广泛. Trahanias 和 Venetsanopoulos 首次将矢量排序算法应用到彩色边缘检测中, 并给出了一种最小矢量统计 MVD (Minimum Vector Dispersion) 方法, 该方法利用矢量排序和最小统计改善了边缘检测中的噪声性能^[2]. 在此基础上, Theoharatos 等人提出了一种基于最小生成树的彩色图像边缘检测方法. 该方法利用矢量排序算法得到唯一的矢量顺序, 然后利用最小生成树和聚类思想实现彩色图像的边缘检测, 较传统的方法可以得到更准确的图像边缘^[3]. 将矢量排序算法与数学形态

学梯度算子相结合, Evans 和 Liu 提出了基于数学形态学梯度算子的彩色图像边缘检测算子, 新的算子改善了传统形态学算子对噪声较为敏感的缺陷^[4]. 更多关于矢量顺序的彩色边缘检测方法可参见文献^[5,6].

就矢量排序统计理论而言, 主要问题在于算法的计算复杂性较高, 从而导致基于矢量排序的彩色图像边缘检测方法难以被广泛应用. 由于 PCA 是一种能够去除矢量中各分量之间相关性的一种线性变换, 因此 PCA 可用于彩色图像边缘检测以解决矢量排序方法带来的计算复杂度高的问题^[7]. Cheng 和 Hsia 介绍了一种基于 PCA 主成分分析的彩色像素排序方法, 该方法可用于彩色图像边缘检测及彩色图像压缩^[8]. 为了进一步提高彩色图像边缘检测算子的实时性, Dikbas 等人给出了一种在彩色图像的亮度分量中直接检测图像边缘的方法, 该方法仅计算彩色图像的第一主成分, 并利用经典的边缘检测算子检测第一主成分的边缘信息, 得到较传统方法更优的边缘检测结果, 且具有较低的计算复杂度^[9].

近年来, 随着机器学习^[10,11]、进化算法^[12]、克隆算法^[13]、超复数等理论^[14-17]的发展, 将新的理论应用于彩色图像边缘检测的方法也越来越多. Bouda 提出了一种基于立方体体素和虚拟电场模型 CVVEFM 的彩色边缘检测方法, 该方法克服了传统彩色边缘检测算子较高的计算复杂性问题, 并能检测到弱边缘, 是一种较为新颖的边缘检测方法^[18]. Ren 等人提出了一种融合亮度和内部色差分量的彩色边缘检测方法. 该方法利用色差图像累加组合成一幅灰度图像, 然后利用亮度图像做权重得到一幅新的 R 灰度图像, 边缘由亮度图像 G 和 R 图像决定. 该方法考虑了色差信息, 较传统的方法能检测到更多的细节边缘, 然而对于纯色调的图像几乎失效^[19]. 此外, Gao 提出了一种基于四元数分数阶微分的彩色图像的边缘检测方法^[20]. Ortiz 从基于物理的

角度分析了彩色图像各通道的耦合特性, 并将其应用于彩色边缘检测^[21].

上述的彩色边缘检测方法均不同程度改善了经典方法的性能, 然而存在问题如下: (1) 由于人眼视觉感知的原因, 很多实际的数学计算结果与人眼感知结果不符, 从而导致某些明显的边缘得到较低的梯度, 而较弱的边缘确具有较高的梯度值; (2) 低照度下由色调引起的图像边缘难以被检测. 针对上述问题, 本文从视觉感知出发, 采用符合人眼视觉感知的彩色模型, 研究适合人眼视觉感知模型的彩色边缘检测算子. 提出了一种基于修正视觉感知模型的彩色边缘检测方法, 新的方法能得到符合人眼感知的边缘图像, 对于低照度下的图像边缘具有较好的响应.

2 修正的彩色模型

2.1 基于不同彩色模型的边缘检测对比

目前的彩色空间主要分为四类, RGB 彩色空间、面向硬件的彩色空间、均匀彩色空间以及基于感知的彩色空间. 其中, RGB 彩色空间是计算机技术中使用最为广泛的彩色空间. 面向硬件的彩色空间主要有 CMY、YIQ、YUV 以及 YCbCr 等, 在计算机涉及的数字图像处理中有着重要作用; 缺陷在于将计算机内部的 RGB 彩色空间转换到该空间时计算量较大, 实时性差^[22]. 基于感知的彩色空间 HSV、HIS、IHLS 是直观地基于人类视觉感知的彩色空间, 其优点是便于分离彩色信息和非彩色信息, 且针对 RGB 与 HSV 和 HIS 之间的转换, 目前已有硬件加速支持. 因此, HSV、HIS 和 IHLS 目前已被广泛应用于计算机技术中的彩色图像处理^[23-25].

为了对比不同彩色空间下各种边缘检测方法的性能, 针对彩色空间 RGB、HSV、YUV 和 $L^*a^*b^*$ 给出了基于矢量梯度 VG(Vector Gradient) 方法的彩色图像边缘检测结果对比, 如图 1 所示.

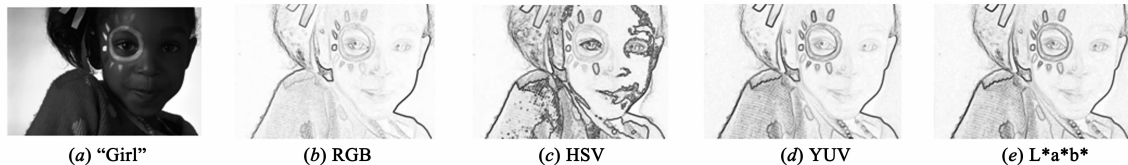


图1 不同彩色空间下利用VG方法得到的图像边缘

从图 1 可以看出, RGB 彩色空间的边缘检测结果最差, 丢失了较多的细节边缘, 原因在于 RGB 三个彩色分量具有强相关性. HSV 彩色空间对低照度区域的边缘较为敏感, 原因在于色调分量不受亮度和饱和度影响, 因此可以得到较为明显的边缘. 然而, 图 1(c) 表明 HSV 空间在增强边缘的同时引入了较多的伪边缘. YUV 和 $L^*a^*b^*$ 优于 RGB, 但从 RGB 彩色空间转换到该彩

色空间的计算复杂度较高. 为了得到较好的图像边缘, 我们选用 HSV 彩色空间.

2.2 色调分量引起的伪边缘

基于视觉感知彩色空间得到的图像边缘包含较多伪边缘. 针对该问题, 首先分析 HSV 彩色空间的三个彩色分量 H、S 和 V 的特性, 如图 2 所示. 从图中可以看出, 亮度和饱和度分量与视觉感知一致, 而色调图像不

符合人眼的视觉感知结果,它是引起伪边缘的主要原因.因此,如何消除由色调图像引起的伪边缘是改善基于 HSV 彩色空间下边缘检测效果的关键.

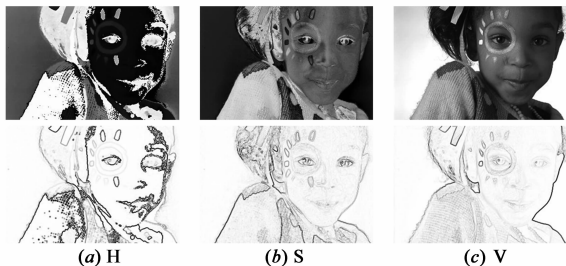


图2 HSV单分量边缘检测结果(第一行是单分量灰度图像,第二行是边缘图像)

色调数据具有圆形特性,就视觉感知而言,0 和 1 表示的是同一种颜色,色差为零.而根据 HSV 彩色空间中的数值计算时,两种颜色的色差为 1.这一结果导致色调单分量图像与人眼视觉不一致.图 2(a)中的跳变边缘是由色调差引起的,因此色差计算是形成伪边缘的主要原因.这也是众多现有的彩色边缘检测方法常常忽略色调分量计算边缘的主要原因.由此我们得到一个结论:在彩色边缘检测过程中,如果我们考虑色调

引起的边缘,则色差计算会导致伪边缘出现;如果忽略色调引起的边缘,则会导致亮度和饱和度不同的不同色调边缘被漏检.对于光照不均匀的彩色图像,物体本身的色调分量具有不受光照影响的特点,因此色调分量可以解决光照不均带来的边缘漏检问题,这在目标提取及识别中具有重要作用.

2.3 修正色调分量

根据 2.2 节的分析结果,如何构建具有完整网格顺序的色调分量是一个需要解决的问题.针对该问题, Hanbury 研究了圆形数学形态学,重点分析了色调分量的排序问题,最后给出了基于多参考色的色调排序结果^[26].色调排序的另一难题是参考色的选择问题. Aptoula 在文献^[27]中利用直方图统计法自动获取图像的多参考色,最后计算色调差对色调进行排序.主要理论根据如式(1).定义色调分量中任一色调 h_i 与参考色 h_0 的距离用 $D_i(h_i, h_0)$ 表示,则

$$D_i(h_i, h_0) = h_i \div h_0 = \begin{cases} |h_i - h_0|, & \text{if } |h_i - h_0| \leq \pi \\ 2\pi - |h_i - h_0|, & \text{if } |h_i - h_0| \geq \pi \end{cases} \quad (1)$$

根据式(1),给出修正后的色调分量,如图 3 所示.

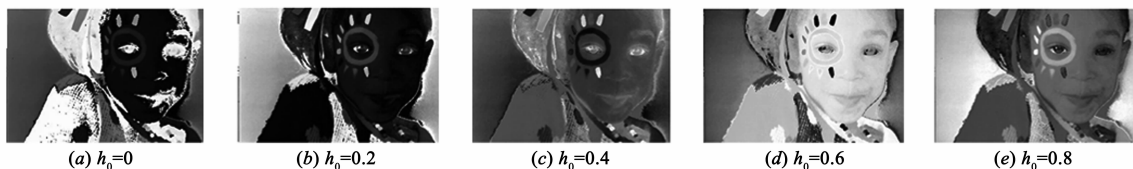


图3 利用式(1)得到修正后的色调分量

在图 3 中,根据参考色的不同,得到修正后的色调分量显示结果不同.虽然 Aptoula 介绍了基于直方图的参考色选择方法,然而,该方法仅适用于图像色调不丰富的情况,对于色调丰富的自然图像,利用直方图的方法难以解决参考色选择问题.即直方图选择参考色仅适用于部分图像^[27].

分析图 3 可以发现,尽管色调数据是无序的,但从视觉感知上存在确定的对比度强弱.根据这一特性我们可以确定圆形数据不存在顺序关系,却存在确定的差值关系.由于图像边缘依赖于梯度计算,而梯度计算主要依赖于邻域像素求差运算,由此可以确定任意两个色调数据 h_1 和 h_2 的色调距离在 $[0, 0.5]$ 范围之内,色调距离公式为:

$$D(h_1, h_2) = h_1 \div h_2 = \begin{cases} |h_1 - h_2|, & \text{if } |h_1 - h_2| \leq \pi \\ 2\pi - |h_1 - h_2|, & \text{if } |h_1 - h_2| \geq \pi \end{cases} \quad (2)$$

由此,我们对任意两个色调的距离可以得到客观的计算结果.以索贝尔算子为例,定义色调分量的梯度计算方法为:

$$MG_x^H = [D(H_{C_{i-1,j-1}}, H_{C_{i+1,j-1}})] + 2[D(H_{C_{i-1,j}}, H_{C_{i+1,j}})] + [D(H_{C_{i-1,j+1}}, H_{C_{i+1,j+1}})] \quad (3)$$

$$MG_y^H = [D(H_{C_{i-1,j+1}}, H_{C_{i-1,j-1}})] + 2[D(H_{C_{i,j+1}}, H_{C_{i,j-1}})] + [D(H_{C_{i+1,j+1}}, H_{C_{i+1,j-1}})] \quad (4)$$

其中, H 表示色调分量,这里的差值运算依赖于式(2).根据式(4),可以得到彩色分量的边缘结果如图 4 所示.从图 4 可以看出,图 4(b)包含有大量的伪边缘,由于直接利用索贝尔算子进行边缘检测,因此错误的色差结果导致了大量的伪边缘出现;而图 4(c)采用修正后的色差公式计算色调分量的梯度,得到了较为理想的结果,大量伪边缘被抑制.

3 彩色边缘检测

3.1 HSV 空间下的矢量梯度

根据 Di Zenzo 提出的矢量梯度计算方法,定义彩色图像函数为 $f(x, y)$,则 f 沿水平和垂直方向的梯度为 G_x 和 G_y ,



(a) 原彩色图像



(b) 利用索贝尔算子直接计算色调分量得到的边缘图像



(c) 利用式(3)和(4)得到的边缘图像

图4 色调分量的边缘检测结果对比

$$G[f(x, y)] = \begin{bmatrix} G_x \\ G_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \partial f / \partial x \\ \partial f / \partial y \end{bmatrix} \quad (5)$$

由此可以得到矢量梯度的幅度值为:

$$\begin{aligned} |G[f(x, y)]| &= (G_x^2 + G_y^2)^{1/2} \\ &= \left\{ \left(\frac{\partial f}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y} \right)^2 \right\}^{1/2} \end{aligned} \quad (6)$$

根据灰度图像的梯度计算方法,将其拓展到彩色图像处理中,定义 \mathbf{h} , \mathbf{s} 和 \mathbf{v} 为单位矢量在 HSV 彩色空间,从而得到矢量 \mathbf{p} 和 \mathbf{q} 的定义为:

$$\mathbf{p} = MG_x^H \mathbf{h} + G_x^S \mathbf{s} + G_x^V \mathbf{v} \quad (7)$$

$$\mathbf{q} = MG_y^H \mathbf{h} + G_y^S \mathbf{s} + G_y^V \mathbf{v} \quad (8)$$

其中, $G_x^H = \frac{\partial H}{\partial x}$, $G_x^S = \frac{\partial S}{\partial x}$, $G_x^V = \frac{\partial V}{\partial x}$, $G_y^H = \frac{\partial H}{\partial y}$, $G_y^S = \frac{\partial S}{\partial y}$,

$$G_y^V = \frac{\partial V}{\partial y}.$$

令 f_{xx} , f_{yy} 和 f_{xy} 是 \mathbf{p} 和 \mathbf{q} 的点积,则:

$$f_{xx} = \mathbf{p} \cdot \mathbf{p} = \mathbf{p}^T \mathbf{p} = (MG_x^H)^2 + (G_x^S)^2 + (G_x^V)^2 \quad (9)$$

$$f_{yy} = \mathbf{q} \cdot \mathbf{q} = \mathbf{q}^T \mathbf{q} = (MG_y^H)^2 + (G_y^S)^2 + (G_y^V)^2 \quad (10)$$

$$f_{xy} = \mathbf{p} \cdot \mathbf{q} = \mathbf{p}^T \mathbf{q} = MG_x^H MG_y^H + G_x^S G_y^S + G_x^V G_y^V \quad (11)$$

根据梯度的定义,最大变化率方向的微分结果,给出了彩色图像 $f(x, y)$ 在 (x, y) 处的最大变化率的方向角度为:

$$\theta(x, y) = \frac{1}{2} \arctan \left(\frac{2f_{xy}}{f_{xx} - f_{yy}} \right) \quad (12)$$

根据 θ ,可以得到修正色调分量后彩色图像 $f(x, y)$ 在 (x, y) 处的最大变化率方向的梯度值为:

$$G_{\theta}^{MH}(x, y) = \left\{ \frac{1}{2} [(f_{xx} + f_{yy}) + (f_{xx} - f_{yy}) \cos 2\theta + 2f_{xy} \sin 2\theta] \right\}^{1/2} \quad (13)$$

根据 MHG (Modified Hue Gradient) 计算彩色图像的矢量梯度,结果如图 5 所示.

从图 5 中可以看出, MHG 较 VG 具有更好的边缘检测效果,尤其是低照度区域的细节边缘被检测到.图 6 给出了梯度图像的单行幅值结果.



图5 VG与MHG的结果对比(第一行为“Bird”图像,第二行为“Girl”图像)

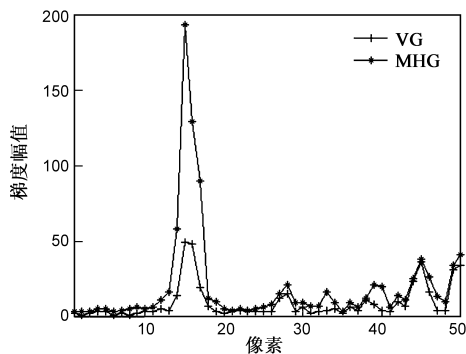
3.2 非线性函数模型

虽然 MHG 增强了图像的梯度幅值,并去掉了由色调分量引起的伪边缘,然而从图 5 可以看出,图像中仍然存在部分伪边缘,如图 7 所示.

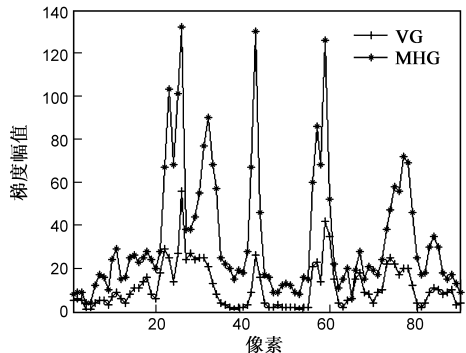
由图 7 可以看出,带有方框标记的三个区域具有较弱的、模糊的边缘.然而, MHG 方法得到的梯度图像与视觉感知结果不符, MHG 在此三个区域得到了较大的梯度值.由于 MHG 中三个分量具有相同的作用,因此当色调具有强对比度,而饱和度较低时,该方法仍然能得到较强的梯度值,这与人眼的视觉感知不相符.如何利用饱和度对色调的影响解决色调分量引起的伪边缘是彩色边缘检测面临的一个问题.最直接的解决方法是权重法,利用饱和度作为色调的权重,如式(14)所示:

$$H' = S \times H \quad (14)$$

其中, H 表示色调分量, S 表示饱和度分量, H' 表示利用饱和度修正后的色调分量.然而利用这种线性的权



(a) 图像“Bird”(为图5(b)第247行,311:360列)



(b) 图像“Girl”(为图5(c)第160行,591:680列)

图6 梯度幅值对比

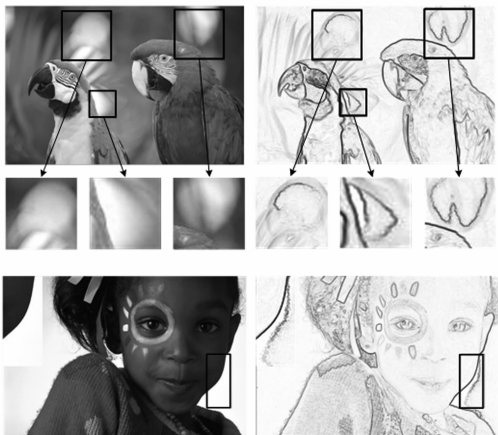


图7 图5中的伪边缘(方框内包含有伪边缘)

重关系难以有效去除伪边缘,且不够灵活.由于非线性函数具有更为灵活的曲线关系,因此可以利用饱和度的非线性函数控制色调分量引起的边缘,常用的非线性函数如式(15)所示:

$$y = \frac{1}{1 + e^{-k(x-x_0)}} \quad (15)$$

式(15)中,利用参数 k, x_0 (一般情况下 $k = 10, x_0 = 0.5$) 可以控制曲线的形状变化, k 增大时曲线更为陡峭, x_0 越大,则被抑制的色调范围越大.在实际处理过程中,可以根据需求调节参数 k, x_0 .

根据上述分析,结合 VG 计算方法与非线性函数模

型,给出了基于视觉感知模型修正的边缘检测方法 VPMM (Visual Perceptual Modified Model),根据式(7)(8)(15),可以得到修正后的矢量:

$$p^M = SWMG_x^H h + \frac{\partial S}{\partial x} s + \frac{\partial V}{\partial x} v \quad (16)$$

$$q^M = SWMG_y^H h + \frac{\partial S}{\partial y} s + \frac{\partial V}{\partial y} v \quad (17)$$

其中, $SWMG_x^H = MG_x^H \times \frac{1}{1 + e^{-k(s-s_0)}} \quad (18)$

$$SWMG_y^H = MG_y^H \times \frac{1}{1 + e^{-k(s-s_0)}} \quad (19)$$

从而得到基于视觉感知模型修正后的 θ^M 和 G_θ^{VPMM} 为:

$$\theta^M(x, y) = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{2f_{xy}^M}{f_{xx}^M - f_{yy}^M}\right) \quad (20)$$

$$G_\theta^{VPMM}(x, y) = \left\{ \frac{1}{2} [(f_{xx}^M + f_{yy}^M) + (f_{xx}^M - f_{yy}^M) \cos 2\theta^M + 2f_{xy}^M \sin 2\theta^M] \right\}^{1/2} \quad (21)$$

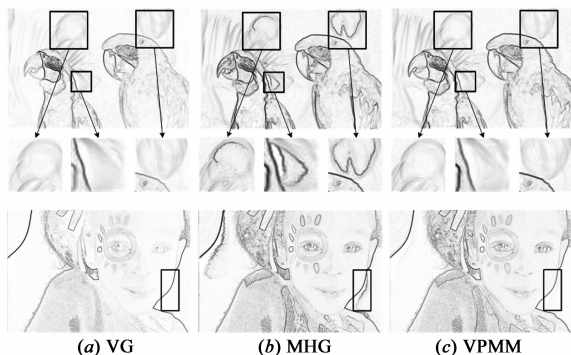
根据新的彩色边缘检测方法 VPMM,对图 5 进行边缘检测,结果如图 8 所示.显然,新的方法 VPMM 综合了 VG 和 MHG 各自的优点,一方面增强了视觉感知中较为明显的梯度值,另一方面降低了视觉感知中并不明显的伪梯度信息值.

在图 8 中, MHG 方框内存在的伪边缘在 VPMM 中被消除,此外, VPMM 还保留了对 VG 梯度增强的效果,图 9 给出了图 8 的单行梯度幅值对比结果.

由图 8,9 可以看出, VPMM 在增强梯度幅值和去除伪边缘之间取得了一个平衡.

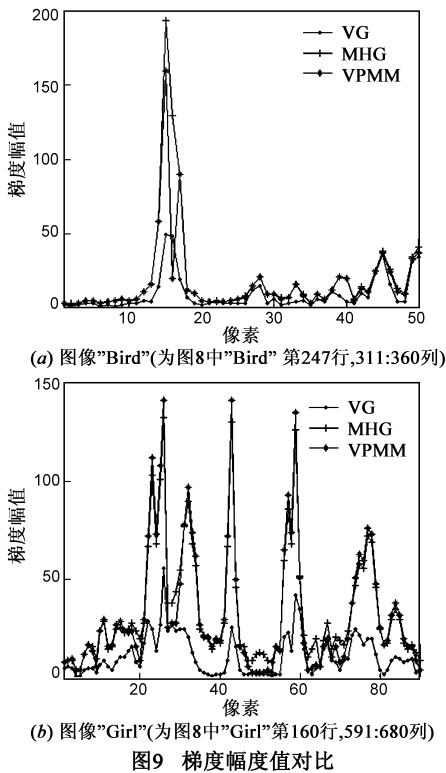
4 实验结果与分析

为了测试本文方法在计算彩色图像边缘方面的有效性和优越性,实验选用了合成图像和自然图像.实验中所用到的边缘检测方法如表 1 所示.计算机选用 Intel (R) Pentium (R) Dual 3.0GHz,内存 4GB 的 PC 机.实验结果分为两组,第一组为人工合成图像边缘检测结果,第二组为自然图像边缘检测结果.



(a) VG (b) MHG (c) VPMM

图8 不同方法得到的图像梯度结果对比



4.1 合成图像

实验数据为人工合成图像,且亮度不均匀,尺寸为 360×500 ,如图 10(a)所示.利用表 1 给出的 5 种方法进行实验,结果如图 10(b)~(f)所示.从实验结果来看,PCA 方法对亮度信息较敏感,丢失了部分目标的边缘;RCMG 和 FICCD 丢失了较多的目标边缘,尤其是亮度较低区域中的目标边缘.VG 和 VPMM 是两种较好的方法,可以得到大部分目标边缘.然而 VG 方法在亮度较低的区域难以检测到完整目标的边缘,部分目标边缘丢失.而 VPMM 较好的解决了该问题,得到了较为完整的目标边缘.

为了客观评价和对比实验中所用方法的优劣性,利用 FOM (Pratt's Figure Of Merit)进行测试,通过计算边缘图像的 FOM,我们可以判断各种方法的优劣,FOM 的表达式如式(22)所示.

$$FOM = \frac{1}{\max\{I_D, I_t\}} \sum_{i=1}^{I_b} \frac{1}{1 + \beta(d_i)^2} \quad (22)$$

其中, I_D 、 I_t 分别为检测到的图像边缘像素和理想的边缘像素数目, $\beta > 0$ 为一常数, d_i 为检测到边缘像素点处与理想边缘图像的误差. $0 < FOM \leq 1$,从 FOM 来看,对于理想的边缘结果, $FOM = 1$,通常 $\beta = 1/9$.要计算 FOM 就必须已知 I_t ,由于图 10(a)为人工合成图像,因此容易得到 ground truth 图,如图 11 所示.

根据式(22)和图 11,得到图 10 中的边缘图像 FOM

如表 2 所示.实验数据表明,本文提出的 VPMM 方法能获得最大的 FOM 值.

表 1 现有的彩色边缘检测方法和本文提出的方法

缩写	全称	文献
VG	(Vector gradient)矢量梯度计算方法	[1]
RCMG	(Raised color morphological gradient)提升的彩色形态学梯度算子	[4]
PCA	(Principle component analysis)基于 PCA 降维的计算方法	[9]
FICCD	(Fusion of intensity and inter-component chromatic difference)融合亮度和内部色差的计算方法	[19]
VPMM	(Visual Perceptual Modified Model)基于视觉感知模型修正的方法	本文方法

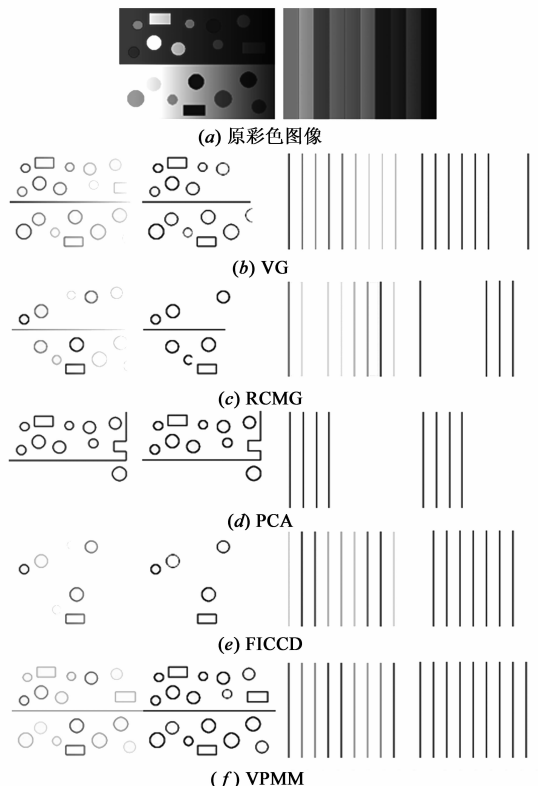


图 10 不同方法对彩色图像的边缘检测结果对比((b)-(f)中第一列和第三列为图像的梯度幅值,第二列和第四列为二值化后的结果,阈值为0.3)

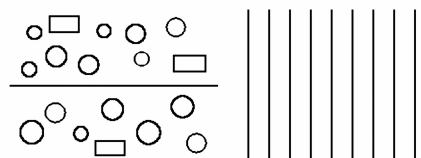


图 11 图 10(a)的 ground truth 图

表 2 不同方法检测到的边缘 FOM 值

	VG	RCMG	PCA	FICCD	VPMM
合成图像 1	0.9739	0.9391	0.9600	0.9207	1
合成图像 2	0.9750	0.9500	0.9375	0.9750	1
平均值	0.97445	0.94455	0.94875	0.94785	1

4.2 自然图像

实验数据选用标准测试图像,三幅图像均为 512×768 的 RGB 彩色图像.利用不同的方法对彩色图像进行边缘检测,结果如图 12 所示.

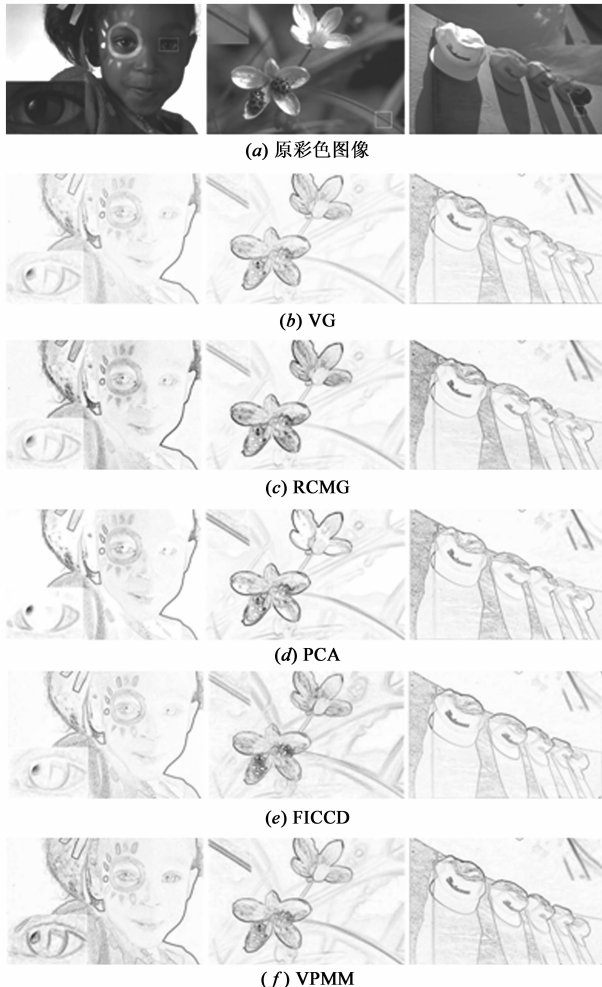


图 12 不同方法对彩色图像的边缘检测结果对比

从实验结果来看,本文提出的 VPMM 方法能检测到更多的图像细节,效果最好. VG 方法对细节边缘存在漏检. RCMG 能检测到图像边缘,但是伪边缘信息较多,且计算复杂度较高. PCA 方法和 FICCD 丢失了较多由色调分量引起的细节边缘.而本文方法在正确检测图像边缘的同时,增强了亮度较低区域的目标边缘.

4.3 计算复杂度分析

在实验中,针对表 1 中的各种不同的彩色边缘检测方法,测试所有方法检测彩色图像边缘的耗时,结果如

表 3 所示.其中, VG 和 PCA 所用时间最短,这是由于两种方法直接对 RGB 图像进行处理,不需要进行彩色空间转换; FICCD 耗时较短,这是由于采用了经典的索贝尔算子,只是预处理多了彩色空间转换; RCMG 所用时间较长,由于 RCMG 计算窗口内的最小平方差,计算复杂度明显较高;本文方法所用时间较 VG 和 PCA 有所增加,与 FICCD 接近,具有较高的实用性.

表 3 不同方法检测彩色图像边缘的耗时
(针对实验中四幅图像的平均耗时)

方法	耗时
VG	0.064360
RCMG	0.462513
PCA	0.064084
FICCD	0.101484
VPMM	0.137786

5 结束语

本文通过分析现有的彩色图像边缘检测方法存在的色调分量边缘漏检、低照度区域目标边缘难以检测的问题,研究了视觉感知模型中 HSV 彩色空间的优越性以及该空间存在的问题.利用色差计算公式解决了色调分量梯度包含大量伪边缘的问题.并分析了饱和度和分量对色调分量的影响,给出了利用饱和度非线性函数模型控制的色调梯度计算方法,实现了新的彩色边缘检测方法.实验结果表明,新的方法在正确检测图像边缘的同时,增强了梯度幅值、并完整检测到了低照度区域的目标边缘.

参考文献

- [1] Di Zenzo S. A note on the gradient of a multi-image[J]. Computer Vision Graphics, and Image Processing, 1986, 33(1): 1-9.
- [2] Trahanias P W, Venetsanopoulos A N. Color edge detection using vector order statistics[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1993, 2(2): 259-264.
- [3] Theoharatos C, Economou G, Fotopoulos S. Color edge detection using the minimal spanning tree[J]. Pattern Recognition, 2005, 38(4): 603-606.
- [4] Evans A N, Liu X U. A morphological gradient approach to color edge detection[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2006, 15(6): 1454-1463.
- [5] Angulo J. Geometric algebra colour image representations and derived total orderings for morphological operators-part I: Colour quaternions[J]. Journal of Vision and Communication Image Representation, 2010, 21(1): 33-48.
- [6] Angulo J. Morphological colour operators in totally ordered lattices based on distance: Application to image filtering, enhance-

- ment and analysis[J]. Computer vision and image understanding, 2007, 107(1-2): 56-73.
- [7] Cheng S C, Wu T L. Sub pixel edge detection of color images by principal axis analysis and moment-preserving principle[J]. Pattern Recognition, 2005, 38(4): 527-537.
- [8] Cheng S C, Hsia S C. Fast algorithms for color image processing by principal component analysis[J]. Journal of Vision and Communication Image Representation, 2003, 14(2): 184-203.
- [9] Dikbas S, et al. Chrominance edge preserving grayscale transformation with approximate first principal component for color edge detection [A]. IEEE Conference on Image Processing (ICIP'07)[C]. San Antonio, TX: [s. n.], 2007. 497-500.
- [10] Scott K, Alan L Y, et al. Statistical edge detection: Learning and evaluating edge cues [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2008, 25(1): 57-74.
- [11] Martin D R, Fowlkes C, Malik J. Learning to detect natural image boundaries using local brightness, color and texture cue [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2004, 26(5): 530-549.
- [12] Bastürk A, Günay E. Efficient edge detection in digital images using a cellular neural network optimized by differential evolution algorithm[J]. Expert Systems with Applications, 2009, 36(2): 2645-2650.
- [13] 张光玉, 等. 基于克隆算法的彩色图像边缘检测新算法 [J]. 电子学报, 2006, 34(4): 702-707.
Zhang Guangyu, et al. A novel method of color image edge detection based on cconing algorithm [J]. Acta Electronica Sinica, 2006, 34(4): 702-707. (in Chinese)
- [14] Sangwine S J. Colour image edge detector based on quaternion convolution[J]. Electronics Letters, 1998, 34(10): 969-971.
- [15] Sangwine S J, Ell T A. Hypercomplex Fourier transforms of color images[A]. IEEE Conference on Image Process (ICIP) [C]. Thessaloniki, Greece: [s. n.], 2001, 1. 137-140.
- [16] Tremblais B, et al. A fast multi-scale edge detection algorithm [J]. Pattern Recognition Letters, 2004, 25(6): 603-618.
- [17] 余旺盛, 等. 基于标记分水岭和区域合并的彩色图像分割 [J]. 电子学报, 2011, 39(5): 1007-1012.
Yu Wang-sheng, et al. Color image segmentation based on marked-watershed and region merger [J]. Acta Electronica Sinica, 2011, 39(5): 1007-1012. (in Chinese)
- [18] Bouda B, Masmoudi L, Aboutajdine D. CVVEFM: Cubical voxels and virtual electric field model for edge detection in color images[J]. Signal Processing, 2008, 88(4): 905-915.
- [19] Ren J, Jiang J, et al. Fusion of intensity and inter-component chromatic difference for effective and robust colour edge detection[J]. IET Image Processing, 2010, 4(4): 294-301.
- [20] Gao C B, Zhou J L, Hu J R, Lang F N. Edge detection of colour image based on quaternion fractional differential[J]. IET Image Processing, 2011, 5(3): 261-272.
- [21] Ortiz A, Oliver G. Analysis of colour channel coupling from a physics-based viewpoint: Application to colour edge detection [J]. Pattern Recognition, 2010, 43(7): 2507-2520.
- [22] Lau C, Heidrich W, Mantiuk R. Cluster-based color space optimizations[A]. IEEE Conference on Computer Vision (ICCV'11)[C]. Barcelona: [s. n.], 2011. 1172-1179.
- [23] Lissner I, Urban P. Toward a unified color space for perception-based image processing[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2012, 21(3): 1153-1168.
- [24] Qazi I U H, Alata O, et al. Choice of a pertinent color space for color texture characterization using parametric spectral analysis[J]. Pattern Recognition, 2011, 44(1): 16-31.
- [25] Louverdis G, Vardavoulia M I, et al. A new approach to morphological color image processing [J]. Pattern Recognition, 2002, 35(8): 1733-1741.
- [26] Hanbury A, Serra J. Morphological operators on the unit circle [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2001, 10(12): 1842-1850.
- [27] Aptoula E, Lefèvre S. On the morphological processing of hue [J]. Image and Vision Computing, 2009, 27(9): 1394-1401.

作者简介



雷涛 男. 1981年11月出生, 陕西大荔人. 2011年获西北工业大学电子信息学院信息与通信工程专业博士学位. 现为西北工业大学电子信息学院电子科学与技术专业博士后, 兰州交通大学电子与信息工程学院副教授, 主要从事图像处理、模式识别、计算机视觉等方面的研究工作.

E-mail: leitaoly@163.com



樊养余 男. 1960年出生, 陕西蓝田人. 1999年获西北工业大学航海学院水下声学信号处理专业博士学位, 现为西北工业大学电子信息学院教授, 博士生导师, 主要从事图像处理、模式识别、虚拟现实等方面的研究工作.

E-mail: fan_yangyu@sina.com