

# 利用双边滤波器和 DoG 算子的人像卡通化新算法

曾冬梅, 陈锻生

(华侨大学 计算机科学与技术学院, 福建 厦门 361021)

**摘要:** 利用双边滤波器在平滑图像的同时又能保持边缘的良好特性, 结合 DoG(高斯差分)算子, 提出人像卡通化的新算法. 该算法首先应用双边滤波器对原始的彩色图像进行平滑, 在获得颜色主要特征的同时, 去除一些不重要的细节信息, 简化了低对比度区域; 然后, 融入用 DoG 算子检测到的边缘曲线来增强高对比度区域; 最后进行软量化以获得卡通图像. 实验结果表明: 相对经典的图像抽象化方法而言, 该算法获得了更好的图像卡通化效果和更快的速度.

**关键词:** 双边滤波器; 高斯差分算子; 图像卡通化; 软量化

**中图分类号:** TP 391

**文献标志码:** A

传统的二维卡通制作需要专业的动画师经过大量复杂的绘制工作才能实现. 虽然现有商业软件的卡通编辑已经得到了简化, 但是它们存在大量复杂的人机交互, 对用户的专业艺术素质要求较高, 未经训练的使用者很难使用它们来生成个性化的卡通<sup>[1]</sup>. 其实, 卡通作品中的很多信息都来源于客观世界, 如果能应用一定的算法, 将现实世界中的有用信息融入卡通作品中, 就能够进一步提高绘制质量, 缩短绘制周期<sup>[2]</sup>, 增强用户的参与性. 近年来, 图像卡通化的方法得到了广泛的关注和研究. 图像卡通化也称为图像风格化渲染或图像抽象, 属于非真实感渲染的研究领域. 与真实感渲染相比, 它更专注于图像的个性化表现和艺术性<sup>[3]</sup>. DeCarlo 等<sup>[4]</sup>在一个多定标系统中, 使用“眼球-追踪”的数据用来引导图像简单化. Santella 等<sup>[5]</sup>发现基于“眼球-追踪-驱动”的简单化能够引导观察者到重要的区域. 他们使用显著性计算代替显著性测量. 文献[6-7]提出若干个视频风格化系统, 主要用于帮助艺术家们做劳动密集型的工作. 这些系统将文献[4]提出的基于均值漂移的风格化方法扩展到计算代价高昂的 3D 视频中. 但是, 其轮廓跟踪仍存在困难, 特别是存在遮挡或相机移动的时候, 需要用户对分割结果进行大量的修正. Gooch 等<sup>[8]</sup>基于 DoG 算子和亮度感知模型自动生成了单色人脸插图, 但没有对彩色图像进行处理. Winnemoller 等<sup>[9]</sup>采用扩展的非线性滤波算法和 DoG 算子对视频图像进行抽象, 获得良好的风格化效果, 但是运行效率还不够高. 因此, 本文提出结合双边滤波器和 DoG 算子的彩色人像卡通化新算法.

## 1 双边滤波器

图像卡通化需要对原始彩色图像进行平滑, 以实现颜色聚类 and 噪声消除, 并保持边缘等重要信息. 可用的平滑方法很多, 如高斯滤波、中值滤波、均值漂移<sup>[3]</sup>等算法. 文中选用了基于双边滤波器<sup>[10]</sup>的图像处理算法, 通过对图像邻域中的像素值做非线性加权平均实现平滑.

双边滤波器定义为

$$J(x) = \frac{1}{K(x)} \sum_{\xi} G(x, \xi) H(I(\xi), I(x)) I(\xi). \quad (1)$$

**收稿日期:** 2013-02-28

**通信作者:** 陈锻生(1959-), 男, 教授, 主要从事计算机视觉与模式识别、机器学习与数据挖掘的研究. E-mail: dschen@hqu.edu.cn.

**基金项目:** 福建省科技计划重点项目(2011H0028); 福建省科技计划重大项目(2011H6016)

双边滤波器由表征空间几何关系的低通滤波器  $G$  和表征像素亮度关系的范围滤波器  $H$  组成. 它用  $\xi$  邻域内邻近的和相似的像素值的平均来取代在  $x$  处的像素值, 能够很好地实现在平滑图像、去除噪声的同时保持边缘的尖锐性.

低通滤波器  $G$  定义为

$$G(x, \xi) = \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{d(\xi, x)}{\sigma_d}\right)^2\right) = \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{\|\xi - x\|}{\sigma_d}\right)^2\right). \quad (2)$$

式(2)中:  $\sigma_d$  为低通滤波器的几何扩散因子;  $\|\xi - x\|$  为  $\xi$  点和当前点  $x$  之间的欧氏距离. 范围滤波器  $H$  定义为

$$H(I(\xi), I(x)) = \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{d(I(\xi), I(x))}{\sigma_r}\right)^2\right) = \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{\|I(\xi) - I(x)\|}{\sigma_r}\right)^2\right). \quad (3)$$

式(3)中:  $\sigma_r$  表示范围滤波器的亮度扩散因子;  $\|I(\xi) - I(x)\|$  用于度量两个亮度值  $I(\xi)$  和  $I(x)$  之间的距离. 在标量场的情形中, 它表示灰度图像中的两个像素点的亮度差的绝对值; 若针对彩色图像, 它表示两个彩色像素点的颜色向量之间的欧式距离.

归一化因子  $K$  定义为

$$K(x) = \sum_{\xi} G(x, \xi) H(I(\xi), I(x)). \quad (4)$$

## 2 高斯差分 (DoG) 算子

添加视觉独特的边缘曲线到高对比度区域以增强该区域的视觉显著性. Marr 等<sup>[11]</sup>基于亮度函数的二阶导数的零交叉, 提出了一种边缘检测机制. 他们假设中心的视网膜细胞受到刺激而它们周围的细胞没有受到刺激, 并将此作为该边缘检测器的实现. DoG 算子是它在计算上的一个简单近似. 为了增加动画片中的时间连贯性, 引用一个轻微平滑过的阈值函数  $D(\cdot)$  来定义 DoG 边缘<sup>[9]</sup>. 阈值函数定义为: 如果  $s_{\sigma_e} - \tau \cdot s_{\sigma_r} > 0$ ,  $D(\bar{x}, \sigma_e, \tau, \varphi_e) = 1$ ; 否则,  $D(\bar{x}, \sigma_e, \tau, \varphi_e) = 1 + \tanh(\varphi_e \cdot (s_{\sigma_e} - \tau \cdot s_{\sigma_r}))$ . 其中: 参数  $\tau$  决定了边缘检测器的敏感程度. 如果  $\tau$  的取值很小, 则检测到的噪声点也会很少, 但实际的边缘会变得不重要. 随着  $\tau \rightarrow 1$ , 边缘检测器会变得越来越不稳定, 其检测到的噪声点会越来越多, 取  $\tau = 0.99$ . 参数  $\varphi_e$  决定了边缘表示的锐利程度. 若  $\varphi_e$  的取值越大, 则检测到的边缘会越清晰, 而噪声点也会越明显; 若  $\varphi_e$  的取值越小, 则检测到的边缘会越模糊, 而噪声点会越不明显. 典型的  $\varphi_e \in [0.75, 5.0]$ , 设  $\varphi_e = 2.0$ .

定义模糊函数  $s(\cdot)$  为

$$s(\bar{x}, \sigma_e) = \frac{1}{2\pi\sigma_e^2} \int f(x) \cdot \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{\|\bar{x} - x\|}{\sigma_e}\right)^2\right) dx. \quad (5)$$

根据式(5)来定义  $s_{\sigma_e} \equiv s(\bar{x}, \sigma_e)$  和  $s_{\sigma_r} \equiv s(\bar{x}, \sqrt{1.6} \cdot \sigma_e)$ . 权值  $\sqrt{1.6}$  与一个细胞及其周围细胞的典型接受域有关<sup>[11]</sup>. 使用权值  $\sqrt{1.6}$  可作为在较精确的近似值和足够的灵敏度之间的一种良好的折中<sup>[12]</sup>.

## 3 软量化

出于创造性的使用, Winnemoller 等<sup>[9]</sup>进一步开放他们提出的框架, 对抽象化的图像进行可选的颜色量化以产生类卡通和类美术的效果. 颜色量化即软量化, 其定义为

$$Q(\bar{x}, q, \varphi_q) = q_{\text{nearest}} + \frac{\Delta q}{2} \cdot \tanh(\varphi_q \cdot (f(\bar{x}) - q_{\text{nearest}})). \quad (6)$$

式(6)中:  $Q(\cdot)$  是软量化的图像;  $\Delta q$  是量化间隔;  $q_{\text{nearest}}$  是距离  $f(\bar{x})$  最近的编码边界; 参数  $\varphi_q$  用于控制从一个量化编码转换到另一个量化编码的锐利程度. 如果它的取值越大, 则图像量化后的色块边界会越清晰; 否则图像量化后的色块边界会越模糊. 式(6)在形式上是一个不连续的函数, 但是对于取值足够大的  $\varphi_q$ , 这些不连续性是不明显的, 如图 1 所示.

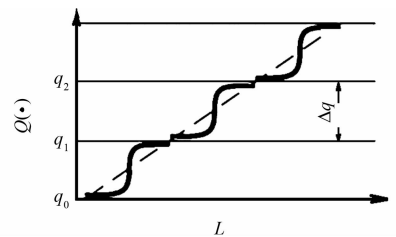


图 1 软量化的函数曲线

Fig. 1 Soft quantization function curve

锐化参数  $\varphi_q$  定义成以双边滤波平滑后图像的亮度梯度为参数的函数. 允许锐利的量化边界只存在

于亮度梯度高的区域. 在亮度梯度低的区域, 量化边界则扩散到更大的范围. 因此, 所取得的图像量化效果为在高梯度区域是锐利的边界, 在低梯度区域是柔和的转变.

## 4 算法设计与实施

分析比较双边滤波器对灰度图像和彩色图像进行平滑去噪<sup>[10]</sup>的效果和速度的差异, 实验结果观察到 Winnemoller 方法<sup>[9]</sup>提取到的轮廓曲线不完整、不连续, 并具有明显的噪声点. 因此, 基于 Winnemoller 和 Olsen 所提出的图像抽象化的框架<sup>[9]</sup>, 将双边滤波器和 DoG 算子进行灵活的调整和有效的组合, 重新设计出彩色人像卡通化的新算法. 新算法按以下 7 个步骤进行.

- 1) 将彩色的人脸图像从 RGB 空间转化到 Lab 空间.
- 2) 对 Lab 空间中的彩色人像进行双边滤波平滑.
- 3) 对平滑后的  $L$  分量图像进行 DoG 边缘检测以获得灰度边缘图像.
- 4) 对灰度边缘图像进行双边滤波平滑以去除噪声和增强边缘的连续性.
- 5) 对经过双边滤波平滑的彩色人像进行一次双边滤波迭代平滑以获得更好的颜色聚类效果, 进一步去除不重要的细节信息, 保留人像中的视觉元素.
- 6) 对迭代平滑后的结果图像进行软量化, 并转化到 RGB 空间.
- 7) 最后融合去噪后的边缘图像和 RGB 彩色量化图像以生成个性化的卡通图像.

对不同信噪比的图像的灰度边缘进行不同的去噪处理. 如果图像的信噪比较小, 则设置较大的双边滤波器的亮度扩散因子的值; 否则设置较小的双边滤波器的亮度扩散因子的值. 通过使用这种方法, 文中算法在对图像的灰度边缘进行噪声滤除的同时能有效地保持边缘曲线的连续性. 对所测试的彩色人像, 针对信噪比的大小将其分成非无穷大和无穷大两类, 分别设置双边滤波器的亮度扩散因子的值为 0.5 和 0.25, 能够获得比较光滑, 比较连续的轮廓曲线.

文中算法设置双边滤波迭代平滑的亮度扩散因子值, 比首次对彩色人像进行双边滤波平滑的亮度扩散因子值大. 因为如果前者的值取得很小, 需要迭代更多次的双边滤波平滑才能获得明显的卡通颜色渲染的效果. 后者的取值不宜设置得过大, 这跟下一环节要进行边缘检测有关. 因为如果该值设置得过大, 则会存在很多相似的像素点参与平均, 那么图像边缘将会变得比较模糊, 最终将影响到所检测的轮廓曲线的完整性. 对所测试的彩色人像, 设置首次双边滤波平滑的亮度扩散因子为当前正在处理的图像亮度标准差的  $3/8$  倍, 设置双边滤波迭代平滑的亮度扩散因子为当前正在处理的图像亮度标准差的  $1/2$  倍, 能够获得比较完整的轮廓曲线和比较明显的卡通颜色渲染的效果.

比较 Winnemoller 方法和文中方法在图像卡通化效果与速度的差异. 其中, Winnemoller 方法是根据文献<sup>[9]</sup>所提出的视频图像抽象化的框架而设计的图像卡通化算法. 其框架的工作流程为

- 1) 对转到 Lab 空间中的彩色图像进行  $n_b$  次双边滤波迭代平滑;
  - 2) 对其中已进行过  $n_c$  ( $n_c < n_b$ ) 次双边滤波迭代平滑的结果图像的  $L$  分量进行 DoG 边缘检测;
  - 3) 对已进行过  $n_b$  次双边滤波迭代平滑的结果图像进行软量化;
  - 4) 将边缘结果图像和量化结果图像进行融合以生成卡通图像. 典型地,  $n_c \in [1, 2]$ ,  $n_b \in [3, 4]$ <sup>[9]</sup>.
- 为了具有更好的比较性, 设计 Winnemoller 方法的具体实现过程分 3 个步骤进行.
- 1) 根据图像信噪比的不同, 对图像进行不同次数的双边滤波迭代平滑才进入到边缘检测的环节. 对于信噪比是无穷大的图像, 使用 Winnemoller 方法对彩色图像进行一次双边滤波平滑.
  - 2) 对其结果图像进行 DoG 边缘检测.
  - 3) 对于信噪比不是无穷大的彩色图像, 使用 Winnemoller 方法对彩色图像进行两次双边滤波迭代平滑, 以更好地去除图像中不重要的细节信息, 有利于光滑轮廓曲线的提取.

## 5 实验结果分析

图像卡通化效果和时间的对比, 分别如图 2, 3 所示. 图 3 中,  $t$  为算法执行的时间. 通过比较图 2 和图 3 可得出: 在卡通颜色渲染效果接近的前提下, 文中方法比 Winnemoller 方法所提取到的轮廓更连续

(比较图 2(c)和图 2(b)的鼻梁部分),更完整(比较图 2(i)和图 2(h)的铁栏杆和正面人脸的头顶部分),具有的噪声点更不明显(比较图 2(f)和图 2(e)的左脸颊部分),而且运行速度更快(图 3). 其原因在于 Winnemoller 方法需要对一幅彩色图像迭代 3~4 次双边滤波才能完成卡通化的全过程,而文中方法只需对一幅彩色图像迭代两次双边滤波和对灰度边缘图像进行一次双边滤波去噪处理就能完成卡通化的全过程.



图 2 图像卡通化效果比较

Fig. 2 Cartoon-like stylization results comparison

增加了对灰度边缘图像的双边滤波去噪处理,既能有效地抑制边缘噪声(比较图 2(f)和图 2(e)可得出),又能保证提取到的轮廓曲线是连续的(比较图 2(c)和图 2(b)可得出). 图 2(h)和图 2(i)存在视觉效果差异的原因是,图 2(g)是属于信噪比低的图像,应用 Winnemoller 方法需要对该图像迭代两次双边滤波平滑才能进入边缘检测的环节;而应用文中方法只需对其进行一次双边滤波平滑就能进入边缘检测的环节. 随着双边滤波迭代次数的增加,平滑后的图像会变得越来越模糊,包括其中的边缘部分. 因此,使用文中方法会比使用 Winnemoller 方法所提取到的轮廓曲线更完整.

6 结论

提出结合双边滤波器与 DoG 算子的人像卡通化新算法,实现了彩色人像的卡通风格化渲染. 对检测到的灰度边缘图像进行双边滤波去噪处理,在去除噪声的同时,增强了边缘的连续性. 通过增加迭代

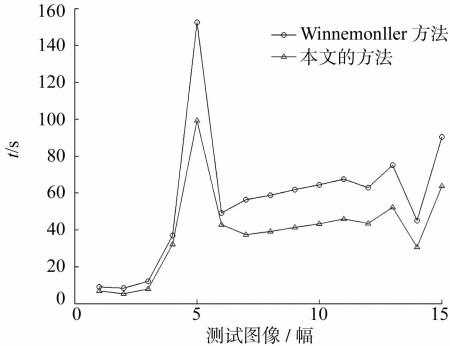


图 3 图像卡通化时间比较

Fig. 3 Cartoon-like stylization time consumption comparison

的双边滤波器的亮度扩散因子的取值从而减少双边滤波迭代次数的方法,在保证卡通颜色渲染效果接近的前提下,显著减少了运行的时间,提高了算法的执行效率.最后选择软量化的方法对彩色人像进行风格化处理,获得了明显的卡通颜色的色块效果.

文中主要研究如何将一幅彩色的真实感图像转换成卡通风格化渲染的图像,未来的工作是要将文中的方法进行推广,应用到视频风格化渲染中.因为视频传输具有实时性的要求,而目前文中的方法所能取得的图像卡通化的速度仍比较有限.因此,进一步提高图像卡通化的速度并将其应用到视频风格化渲染中是今后进一步的工作方向.

#### 参考文献:

- [1] 周科颖. 图像风格化技术研究及平台开发[D]. 浙江:浙江工业大学,2010:2-3.
- [2] 郭纳. 图像的卡通风格渲染技术[D]. 山东:青岛大学,2009:4.
- [3] 樊雅平,黄生学. 基于 Mean-shift 和 DoG 的卡通化图像生成算法[J]. 煤炭技术,2009,28(9):160-161.
- [4] DECARKI D,SANTELLA A. Stylization and abstraction of photographs[J]. ACM Transactions on Graphics,2002,21(3):769-776.
- [5] SANTELLA A,DECARLO D. Visual interest and NPR: An evaluation and manifesto[C]//Proceedings of the 2004 NPAR. New York:ACM Press,2004:71-78.
- [6] WANG Jue,XU Ying-qing,SHUM H Y,et al. Video tooning[J]. ACM Transactions on Graphics,2004,23(3):574-583.
- [7] COLLOMOSSE J P,ROWBTREE D,HALL P M. Stroke surfaces: Temporally coherent artistic animations from video[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics,2005,11(5):540-549.
- [8] GOOCH B,REINHARD E,GOOCH A. Human facial illustrations: Creation and psychophysical evaluation[J]. ACM Transactions on Graphics,2004,23(1):27-44.
- [9] WINNEMOLLER H,OLSEN S C,GOOCH B. Real-time video abstraction[J]. ACM Transactions on Graphics,2006,25(3):1221-1226.
- [10] TOMASI C,MANDUCHI R. Bilateral filtering for gray and color images[C]//Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Computer Vision. Bombay:IEEE Press,1998:839-846.
- [11] MARR D, HILDRETH E C. Theory of edge detection[C]//Proceedings of the Royal Society of London Biological Sciences. London:Defense Technical Information Center,1980:187-217.
- [12] WINNEMOLLER H,KYPRIANIDIS J E,OLSEN S. XDoG: An extended difference-of-Gaussians compendium including advanced image stylization[J]. Computers & Graphics,2012,36(6):740-753.

## A New Approach for Cartoon-Like Stylization of Video Portrait Based on Bilateral Filter and DoG Operator

ZENG Dong-mei, CHEN Duan-sheng

(College of Computer Science and Technology, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

**Abstract:** Using the good characteristic that bilateral filter can also preserve edges while smoothing image, combining with DoG (difference of Gaussians) operator, this paper proposes a new approach for cartoon-like stylization of video portrait. First, the approach applied bilateral filter to smooth the original color image. While getting the dominant features of color, it could removal some trivial details and simplify the low contrast regions. Then, the edge curves detected by DoG operator were integrated to enhance the high contrast regions. At last, the soft quantization was applied to stylize portrait. The experimental results show the approach achieves better effect of image cartoon-like stylization and faster speed relative to classic method of image abstraction.

**Keywords:** bilateral filter; difference of Gaussians operator; image cartoon-like stylization; soft quantization