

基于 kuwahara 滤波的视频风格化框架

李大锦¹, 高文冉², 高俊杰²

(1. 山东师范大学传媒学院, 山东济南 250014; 2. 山东师范大学物理与电子科学学院, 山东济南 250014)

摘要: 保边滤波被广泛应用于图像的艺术化风格转换,但目前的方法大都只能产生类似卡通的绘画风格,对于具有明显笔画形状的绘画风格转换都无能为力. 文章在 kuwahara 滤波的基础上提出了一种尺度可控的各向异性 kuwahara 滤波,可以生成具有明显笔画形状的艺术效果. 为了更好的模拟画家的绘画技法,文章以图像显著性作为控制信息来实时调整滤波核大小,可以产生丰富的笔画尺度. 基于该算法,文章还给出了一个视频的艺术化风格渲染框架. 该渲染框架可以保持良好的帧间一致性,自动的将视频转换为水粉画或油画效果. 同时利用图像的边缘切方向场图、边缘梯度和显著性控制凹凸映射,产生油画和水粉画笔触的厚重感和层次感,能很好的模拟“厚涂技法”的艺术风格.

关键词: 各向异性滤波; 非真实感渲染; 风格转换; 笔画纹理

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2020)03-0538-07

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2020.03.017

Artistic Video Stylization Based on Kuwahara Filter

LI Da-jin¹, GAO Wen-ran², GAO Jun-jie²

(1. College of Communication, Shandong Normal University, Jinan, Shandong 250014, China;

2. College of Physics and Electronics Science, Shandong Normal University, Jinan, Shandong 250014, China)

Abstract: Edge-preserving filters have been extensive used to image artistic stylization, but most of the existing filters can only generate cartoon-like style and can do nothing about the painting styles with clear brush stroke shape. Based on kuwahara filter, the paper proposes a multi-scale anisotropic kuwahara filter to generate some painting styles with obvious brush stroke shape. To simulate the painting techniques, saliency is used to control the size of the filter kernel and can produce strokes with rich geometrical scales. Based on the multi-scale anisotropic kuwahara filter, we also propose an artistic rendering framework for video stylization, which can keep frame-to-frame coherence well and automatically convert video into gouache or oil painting effect. To produce brush strokes a thick and layered feel, bump mapping is used to produce the stroke touch effects. The edge tangent vector field map, edge gradient magnitude and image saliency are combined to control the bump mapping, which can simulate the “impasto technique” well in oil or gouache paintings.

Key words: anisotropic filter, nonphotorealistic rendering, style transfer, strokes texture

1 引言

在一些绘画风格中,画家往往只描绘对象的主要结构特征,再用简化的颜色细节填充物体的内部区域.在非真实感渲染领域,模拟画家的这种艺术简化手法被称为“图像的艺术化抽象”^[1].图像的艺术化抽象一般采用保持边缘特征的滤波方法.然而,大部分滤波方法虽然能够较好的保持图像的语义结构,并对局部区域产生不同程度的颜色平滑和简化,但是不能产生明

显的笔触痕迹.所以目前所有利用滤波来实现风格绘制的方法基本上都是生成类似“卡通”的效果.kuwahara 滤波^[2]是一种保边的非线性滤波器,其输出值为滤波核内部分区域的颜色均值,能产生局部短小的“颜色块”.Kyprianidis^[3]基于圆形核的kuwahara 滤波,提出了一种各向异性的kuwahara 滤波器,形成了具有方向性的“颜色条”.已经具备了手绘的笔触样式,这为使用滤波方法产生手绘效果提供了可能.然而Kyprianidis 等人^[3]的方法是建立在统一尺度的滤波核上,尽管生成

的笔画的形状是可变的,但是笔画的尺度没有产生多少变化.基于笔画的绘制方法^[4]相比,还有很大的缺陷.

像油画和水粉画,采用的颜料具有较高的覆盖力,笔画间的层次感较强.笔刷的运动会在笔触表面产生明显的粗糙感,同时在单个笔画边缘会集聚较多的颜料.边缘颜料的残留更增强了笔画的厚重感和层次感.这种充分利用笔画的厚重感来增强画面的立体感和质感的绘画方法称为“厚涂”技法.在油画中,由于油画颜料具有很高的粘稠性,笔触表面还会产生“流动”状的笔刷痕迹.

我们提出了尺度可变的各向异性 kuwahara 滤波方法,同时给出一个完整的视频风格化渲染框架,可以很好地模拟出油画或水粉画的立体感和层次感,并且能够保持良好的帧间一致性.本文主要创新点有:

(1)目前所有使用滤波方法进行风格转换的研究都只是得到卡通艺术效果.本文首次提出针对具有明显笔触形状的绘画风格采用滤波方法来实现.为艺术化渲染提供了一个新的思路和方法.

(2)引入显著性作为控制信息,在不同的显著区域可产生不同尺度的笔画,更接近画家的绘画技法.

(3)同时考虑图像边缘梯度、方向场图和显著图,给出了一个高度图生成方法.利用该高度图控制凹凸映射不仅可以生成较逼真的笔触纹理,还能使笔画产生较强的厚重感和层次感.

2 相关工作

最常见的图像风格化方法主要有基于笔画的绘制和图像的艺术化抽象方法.

基于笔画的绘制(Stroke-Based Rendering, SBR)^[4,5]从单个笔画的层面研究图像的风格化模型,SBR 要研究的主要问题有笔画的分布、形状、方向、笔画风格等.笔画分布可采用随机采样^[1,6]或建模为一个能量松弛问题^[7],优化的目的是以尽量少的笔画覆盖原图像并在图像特征上最大化的接近原图.笔画的方向场构建采用的方法有颜色梯度^[8]、原始草图^[5]等.为了体现不同层次的艺术抽象,产生更丰富的笔画风格或笔画尺度,可以通过显著图^[9]来引导笔画的分布和绘制.笔画纹理的绘制可分为两类,一种是直接用程序生成笔画纹理^[10-12].程序化纹理一个重要的优势是在视频风格化过程中能较好的保持笔触纹理的帧间一致性.另一类纹理绘制方法是通过手绘的纹理样本来合成特定风格的笔触^[13],或者将手绘笔画直接映射到绘制区域^[5].本文提出的笔画纹理绘制方法是利用凹凸映射的程序化纹理方法,为了增强笔画间的层次感,我们同时考虑了笔画边缘的凹凸控制.SBR 方法在一定程度上模仿了画家的绘画过程,它是目前来说渲染效果最好的一类方

法.但是其计算量也往往较大.此外,视频的风格化中,SBR 方法很难保持笔画的帧间一致性.

图像的艺术化抽象通过保留或增强图像的主要特征,平滑较粗略的图像结构的颜色细节来达到艺术化的简化表现.特征增强可以通过提取图像的特征线绘制轮廓或者边缘^[1],然后对图像进行区域分割并对分割区域的颜色进行量化来减少区域细节.一些经典的滤波方法(如 Sobel, Canny, DOG 等算法)以及后来的机器学习方法^[14]都可被应用于边缘检测.区域分割和颜色简化一般借助保边滤波的方法.常用的滤波方法可分为全局滤波和局部的保边非线性滤波.全局滤波对整个图像采用一个全局优化框架来平滑图像.常用的全局滤波有 LO 梯度最小化^[15],加权最小二乘法(WLS)^[16],全变分最小化^[17]等.可用于图像抽象的局部滤波有双边滤波^[18]、引导滤波^[19]等.虽然这些滤波器被广泛应用图像风格化,但其要解决的主要问题是关键特征提取和区域颜色平滑,不能产生具有明显形状的笔画效果.

各项异性 kuwahara 滤波^[3]也是一种能够保持边缘的滤波器,产生具有方向性的颜色块,具有较明显的笔画形状.本文的滤波方法是对各向异性 kuwahara 滤波^[3]的进一步改进,使之能产生更接近画家绘画技法的具有尺度丰富变化的笔画.

3 渲染框架

我们基于 kuwahara 滤波提出了一个视频的艺术化渲染框架,通过该框架,可以将视频自动地转换为油画或水粉画风格,渲染流程如图 1 所示.渲染过程包括以下几步:

(1)计算当前第 t 帧和前一帧图像进行特征匹配,建立特征匹配点的索引.

(2)对于当前的第 t 帧图像,计算原图像的笔画方向场和显著图.采用线积分卷积的方法生成笔画的方向场图,通过特征匹配点的索引将前一帧的方向场图向当前帧传播,生成具有帧间一致性的方向场图.

(3)将当前帧的显著图和笔画方向场作为滤波核尺度的控制系数.在不同显著性区域采用不同的滤波核直径,生成尺度可变的笔画.

(4)对滤波后的图像进行边缘检测生成边缘梯度图,将边缘梯度、笔画方向场图和显著图同时作为凹凸映射的控制因素.本文将他们融合生成一幅用于凹凸映射的高度图.

(5)利用凹凸映射高度图对笔画图像进行凹凸映射得到最终的带有笔触纹理的图像.

如果仅仅模拟水粉画效果,因为不需要产生“流动”状的笔触纹理,在合成凹凸映射的高度图时可以不

考虑方向场图. 在第(2)步中, 用户可以根据图像分辨率调节笔画的尺度. 在第(3)步中, 可以调节笔画边缘

梯度的混合比来改变笔画边缘的颜料厚度, 产生不同强度的厚重感.

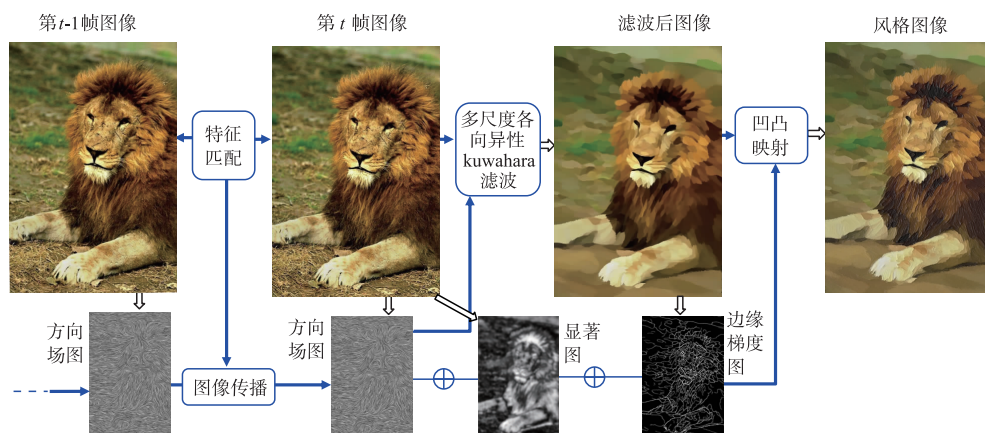


图1 基于kuwahara滤波的视频风格化自动绘制框架

4 基于 kuwahara 滤波的笔画生成

4.1 各向异性 kuwahara 滤波简介

各向异性 kuwahara 滤波采用被划分为若干个扇区的椭圆形滤波核, 椭圆滤波核是将标准的圆形滤波核沿边缘切向量方向和其垂直方向上进行放大和缩小得到, 缩放比例由局部的各向异性程度来决定. 各向异性程度和图像的边缘切向量可以通过图像的结构张量来计算^[3].

椭圆滤波核从标准的圆形滤波核经过旋转和缩放两步变换得到. 设 \mathbb{R}^2 为输入图像, 图像上某个像素点 x_0 处的椭圆形滤波核定义为:

$$\Omega_{x_0} = \{x \in \mathbb{R}^2 : \|S_{\text{aniso}} \cdot R_{-\varphi} \cdot (x - x_0)\| \leq h\} \quad (1)$$

其中 h 为圆形滤波器的半径, $R_{-\varphi}$ 和 S_{aniso} 分别为旋转和缩放矩阵:

$$R_{-\varphi} = \begin{pmatrix} \cos\varphi & \sin\varphi \\ -\sin\varphi & \cos\varphi \end{pmatrix} \quad S_{\text{aniso}} = \begin{pmatrix} \frac{\alpha}{\alpha+A} & 0 \\ 0 & \frac{\alpha+A}{\alpha} \end{pmatrix}$$

其中 φ 为 x_0 点的边缘切向量的方向角, S_{aniso} 中 α 为一个调节椭圆离心率的参数, $\alpha \in (0, \infty)$, α 越小, 各向异性程度越大. A 是 x_0 点的各向异性度量因子, 它由结构张量矩阵的特征值 λ_1 和 λ_2 计算得到: $A = (\lambda_1 - \lambda_2) / (\lambda_1 + \lambda_2)$, 其中 $\lambda_1 > \lambda_2$, λ_1 对应的特征向量即是边缘切向量. 缩放矩阵 S_{aniso} 对角上的两个非零元素的乘积为1, 因此, 式(1)表示的滤波核虽然形状会产生变化, 但是邻域的面积并没有发生改变. 所以这样的滤波器属于尺度不变的滤波器.

标准圆形滤波核的扇区中的权值是对二维高斯分布做进一步平滑后的结果, 定义为:

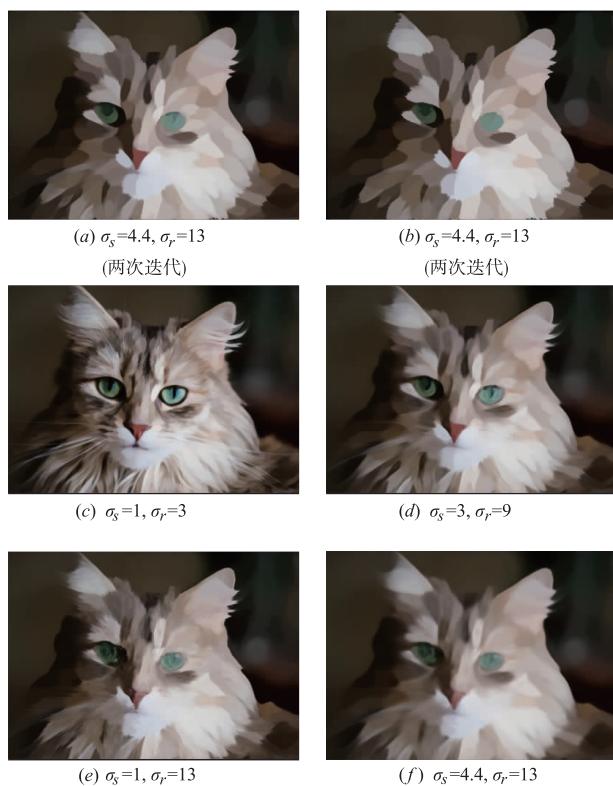
$$K_i = (\chi_i * G_{\sigma_s}) \cdot G_{\sigma_r} \quad (* \text{ 为卷积计算}) \quad (2)$$

其中 χ_i 是第 i 个扇区的权值模板; G_{σ_r} 是扇区滤波核内的权值高斯分布函数; G_{σ_s} 是对权值模板的高斯平滑函数. χ_i 的定义请参阅文献[3]. 由于 G_{σ_s} 的作用, 在不同的扇区之间会产生少量的非零权值的重叠. 滤波器输出是对所有扇区的颜色均值进一步做加权平均, 这样可以有效的减少 Gibbs 现象^[2]. 关于扇区输出权值的确定可参阅文献[2]和文献[3].

4.2 多尺度各向异性 kuwahara 滤波

4.1节中介绍的各向异性 kuwahara 滤波采用固定尺度的圆形滤波核. 因为颜色块的形成来源于 G_{σ_r} 的高斯平滑作用, 因此, 增大式(2)中权值扇区的高斯函数 G_{σ_r} 的标准差 σ_r , 将在更大区域内进行平滑作用, 可产生更大的颜色块. 图2(c)和(d)是我们分别使用 $\sigma_r = 3$ 和9时产生的不同结果. 式(2)中的权值平滑函数 G_{σ_s} 使相邻的扇区形成了少量的非零权值的重叠, 当 σ_s 较大时, 意味着有更多的非零权值重叠区域, 使笔画边缘更趋于平滑. 从图2(e)和(f)可以看出, 在滤波核较大(即 σ_r 较大)而标准差 σ_s 较小时会出现 Gibbs 现象, 但可以保留较多的图像细节; 当 σ_s 增大后(图2(f)), 能产生较完整的大尺度笔画, 但图像也会过于模糊. 我们通过实验发现: $\sigma_s \approx \sigma_r/3$ 可以得到一个折中的理想的结果. 如果笔画过于模糊可以做多次滤波, 如图2中的(a)、(b)分别是经过两次和三次迭代的结果. 一般来说经过两次滤波即可得到较好的结果.

根据以上对各向异性 kuwahara 滤波的实验结果分析, 我们给出了尺度可变的 kuwahara 滤波方法. 画家在绘画过程中, 会对重要区域采用较细小的笔画以便保留更多的结构细节, 而对于不重要的区域采用较大的笔画. 图像的显著性检测是依据人的视觉注意机制, 检测图像中能引人注意的区域^[20,21]. 显著性程度较高的区域往往

图2 滤波迭代次数和标准差 σ_r 、 σ_s 对滤波结果的影响

也是画家仔细刻画的部分. 所以我们利用图像的显著性程度控制笔画的尺度, 显著性较高的区域采用小滤波核, 反之, 则采用较大的滤波核尺寸. 我们在式(1)的基础上加上一个缩放变换来改变滤波核尺寸:

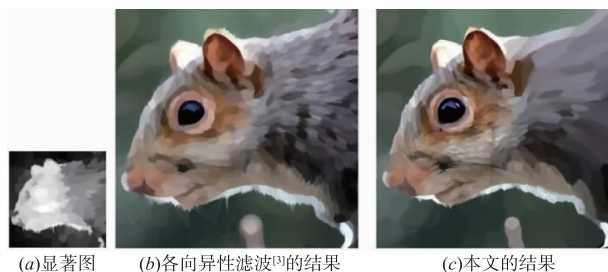
$$\Omega_{x_0} = \{x \in \mathbb{R}^2 : \|S_{\text{aniso}} \cdot R_{-\varphi} \cdot S_{\text{sal}} \cdot (x - x_0)\| \leq h\} \quad (3)$$

S_{sal} 是一个和像素 x_0 处的显著性相关的缩放矩阵:

$$S_{\text{sal}} = \begin{pmatrix} \frac{g+p}{1+g} & 0 \\ 0 & \frac{g+p}{1+g} \end{pmatrix}$$

其中 p 为显著性的值($p \in [0, 1]$), g 是一个调节笔画尺度范围的因子, 可以根据图像分辨率和要达到的细节层次来确定 g 的值. 本文的实验采用 $g = 0.4$. 式(3)相当于对标准差 σ_r 放大 $1 \sim (1+g)/g$ 倍. 图3是本文方法和固定尺度的各向异性kuwahara滤波^[3]的结果比较. 已经有很多算法用于显著性检测, GBMR算法^[22]可以标注出层次分明的局部显著性区域, 但在检测视频的帧序列中很难保持帧间一致性, 而FT算法^[23]可以保持良好的帧间一致性. 在本文的所有实验中, 对于单个图片的处理都采用GBMR算法, 而对视频的处理都采用FT算法.

图3是本文方法和原各向异性滤波方法^[3]的结果比较. 其中显著图的计算采用GBMR算法.

图3 本文的滤波器和各向异性kuwahara滤波^[3]的结果比较

4.3 笔画纹理

凹凸映射是通过光照计算来产生与高度图对应的凹凸感, 为了生成笔画的厚重感和笔画的边缘凸起效果, 需要建立合理的高度图. 因为画家在绘画过程一般是按照由粗到细的顺序. 重要的图像结构会在最后做较细的刻画, 这些区域的颜料厚度往往最大. 而显著性正是对那些重要区域的描述, 所以我们可以将显著图作为构建高度图的一个要素. 为了使笔画边缘产生突起的感觉, 我们对滤波后的图像进行边缘检测, 利用边缘梯度幅值作为控制因素. 对于油画风格, 还需要模拟出笔画运动所产生的颜料“流动”状痕迹. 利用线卷积分^[24]将边缘切向量场进行可视化后生成的方向场图能较好的表示这种“流动”痕迹. 考虑以上三个因素, 我们将显著图、边缘梯度图和方向场图进行融合生成最终的凹凸映射高度图. 融合计算方法如下:

$$H = \text{normalize}(F + \gamma \cdot E^{\frac{1}{3}}) \cdot \frac{\lambda + S}{1 + \lambda} \quad (4)$$

其中 F, E, S 分别为方向场图、边缘梯度图和显著图中的亮度值(值范围都为 $[0, 1]$), H 是最终得到的高度图. γ 是在油画模拟中用于调节边缘梯度图和方向场图混合的比例, 增加 γ 可以提高笔画边缘的厚度感, 但同时会降低笔画表面的笔刷运动痕迹. 经过大量实验, 我们认为 $\gamma = 1 \sim 1.4$ 之间比较合理. 对 E 开三次方的作用是提高边缘图中弱边缘的值. λ 用于调节显著性对高度图的影响程度. 图4示意了图1中的狮子图像的高度图叠加结果, 其中 λ 的值取1.2. 显著性检测采用FT算法^[23]. 对于水粉画风格的模拟, 则只使用显著图和边缘梯度图, 将式(4)中的 F 去掉即可.

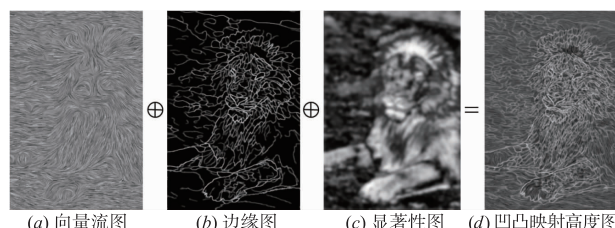


图4 用于凹凸映射的高度图由向量场图、笔画边缘图和显著图叠加而成

生成边缘梯度图时,我们采用 Canny 算法,并将所有边缘点的值设置为该点的梯度幅值. 所以边缘图是一个灰度图,而不是二值图.

5 视频处理

在视频的风格化中,要考虑的一个关键问题是保持风格图像的帧间一致性. 在本文方法中,影响风格化视频帧间一致性的因素有滤波器和凹凸映射的高度图. 各向异性 kuwahara 滤波在处理视频时本身就具有良好的帧间一致性^[3],本文方法对各向异性 kuwahara 滤波核进行缩放变换,缩放比例依据图像的显著性,而 FT 算法^[23]生成的显著图本身就能保持良好的帧间一致性. 因此滤波结果依然可以保持良好的一致性. 凹凸映射的高度图由图像的边缘梯度图、方向场图和显著性图融合而成,因为滤波后图像和 Canny 滤波都具有良好的一致性,所以边缘梯度图一定能保证帧间一致性. 我们唯一需要考虑的就是如何保证方向场图的帧间一致性.

我们采用 Lang 等人^[25]的图像变形方法将前一帧的方向场图传播到下一帧,从而保证方向场图的帧间一致性. 首先,对当前帧利用特征检测算子生成稀疏特征点,利用特征匹配算法生成前后两帧对应特征点的索引;然后根据特征点索引对图像进行分割形成多边形网格区域,对前一帧图像的每个分割区域根据后一帧对应区域的多边形顶点坐标进行变形操作(采用双线性插值方法),将变形后的图像复制到后一帧图像. 在其中一帧被遮挡的区域则直接使用当前帧的方向场图. 利用本文的渲染框架,我们成功的对视频进行了油画风格的转换.

6 实验结果

Semmo. et al^[11]给出的油画纹理渲染方法和本文相似,但他们仅仅使用向量场作为高度图生成笔刷痕

迹,没有考虑不同区域的笔画厚度和单个笔画的边缘颜料残留效果,看起来缺乏层次感. 图 5 是本文方法和 Semmo. et al^[11]方法的结果对比(对比图片来源于^[11]). 我们邀请专业画家来做评价,他们一致认为,本文方法生成的笔画具有更强的层次感和立体感,能更好的体现画家的绘画技法. 总体效果远优于 Semmo 等人的方法.

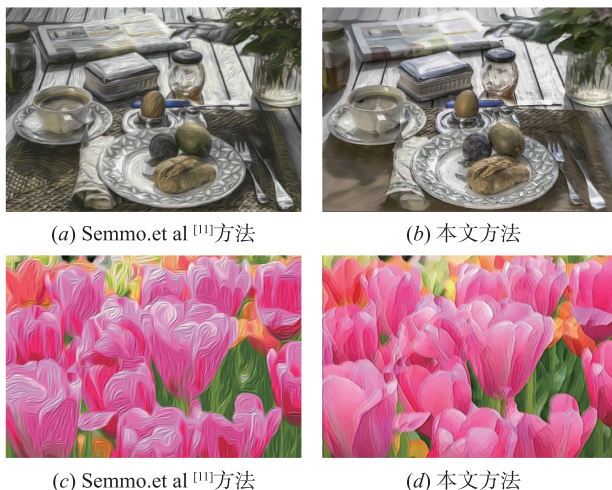


图5 本文和Semmo. et al^[11]方法对油画风格转换的结果对比

正如第 2 节所述,基于笔画的绘制方法是最适合具有明显笔画痕迹的绘画风格的渲染. Zeng et al. ^[5]给出的油画风格渲染模型是一种典型的基于笔画的绘制方法,他们通过采集画家手绘的笔画纹理建立笔画纹理库,因为笔画纹理直接来自真实的手绘,笔纹理效果一般要优于程序化纹理方法. 图 6 是本文方法和 Zeng et al. ^[5]基于笔画的绘制方法的比较(对比图片来源于作者的论文^[5]). 专业画家认为我们的绘制结果和基于笔画的绘制方法效果接近. 但 Zeng et al. ^[5]没有解决帧间一致性问题,而我们的方法则更容易保持帧间一致性.



图6 本文基于滤波方法和基于笔画的方法^[5]对油画风格转换的结果比较

图 7、图 8 是利用本文提出的风格转换方法分别对不同场景进行油画和水粉画风格转换后的结果. 从图中结果可以看出,本文方法对于风景、树木、动

物和人物都可以得到较好的效果.

kuwahara 滤波生成的笔画的质量和图像的频率和边缘方向场有关. 在图像细节较多且方向场变化比较

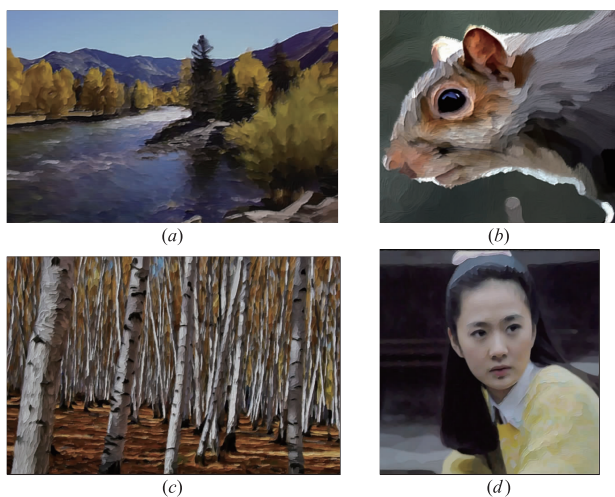


图7 利用本文方法对不同景物图像进行油画风格转换后的结果

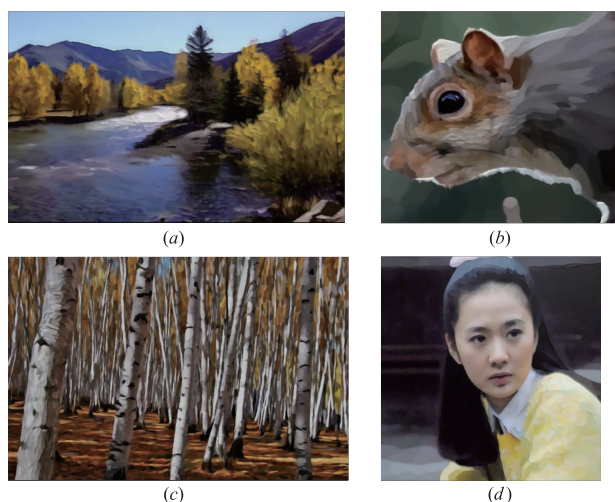


图8 利用本文方法对不同景物图像进行水粉画风格转换后的结果

平缓的区域,生成的颜色块形状呈长条形,具有较好的手绘笔画样式(如图2的猫和图3的松鼠身上的毛)。而在图像的低频区域容易形成不规则的颜色块,不能很好的形成笔画的完整形状(如图7(d)中人的额头部分)。这是本文方法的主要缺陷。

我们利用 OpenGL 的着色语言 GLSL 对算法进行了加速,可达到实时转换。在配置为 Intel i7/2.8GHz, Nvidia Quadro M1200 的笔记本电脑上,对 812×466 分辨率的视频进行水粉画风格转换,帧率可达 18Fps,对于油画风格帧率可达 10Fps 以上。

7 结论

本文提出了一个基于滤波的图像风格转换方案。在各向异性 kuwahara 滤波的基础上引入显著性控制,提出了多尺度的各向异性 kuwahara 滤波。能够生成较丰富的笔画尺度,从不同的细节程度上来刻画对象,从而更接近于画家绘画技法。我们利用方向场图、显著性

图和边缘梯度图等来控制凹凸映射,使生成的笔触纹理具有较逼真的厚度感和层次感。我们的方法简单易实现。实验表明我们的绘制框架能更好的模拟油画或水粉画中笔画的风格,并在视频渲染中更容易保持帧间一致性。

参考文献

- [1] Kang H, Lee S, Chui CK. Flow-based image abstraction [J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2009, 15(1): 62 - 76.
- [2] Campisi P. Artistic edge and corner enhancing Smoothing [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2007, 16(10): 2449 - 2462.
- [3] Kyprianidis J E, Kang H, Döllner D. Image and video abstraction by anisotropic kuwahara filtering [J]. Computer Graphics Forum, 2009, 28(7): 1955 - 1963.
- [4] Hertzmann A. A survey of stroke-based rendering [J]. IEEE Computer Graphics and Applications, 2003, 23(4): 70 - 81.
- [5] Zeng K, Zhao M, Xiong C, Zhu S-C. From image parsing to painterly rendering [J]. ACM Transactions on Graphics, 2009, 29(1): 1 - 11.
- [6] Umenhoffer, Tamás, Szirmay-Kalos, et al. An image-based method for animated stroke rendering [J]. The Visual Computer, 2018, 34(6-8): 817 - 827.
- [7] Hertzmann A. Paint by relaxation [A]. Computer Graphics International [C]. Washington, DC: IEEE Computer Society Press, 2001. 47 - 54.
- [8] Chen J, Guennebaud, Gaël, Barla P, et al. Non-oriented MLS gradient fields [J]. Computer Graphics Forum, 2013, 32(8): 98 - 109.
- [9] 钱文华, 徐丹, 岳昆, 等. 重要度引导的抽象艺术风格绘制 [J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2015, 27(5): 915 - 923.
- [10] Qian W, Xu D, Yue K, et al. Sketch artistic rendering based on significance map [J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphic, 2015, 27(5): 915 - 923. (in Chinese)
- [11] Hertzmann A. Fast paint texture [A]. 2nd International Symposium on Non-photorealistic Animation and Rendering [C]. New York: ACM Press, 2002. 91 - 96.
- [12] Semmo A, Limberger D, Kyprianidis JE, Döllner J. Image stylization by interactive oil paint filtering [J]. Computers & Graphics, 2016, 55(1): 157 - 171.
- [13] Yang L, Du J, Wu E. Easydrawing: generation of artistic chinese flower painting by stroke-based stylization [J]. IEEE Access, 2019, 7(3): 35449 - 35456.
- [14] Yan C R, Chi M T, Lee T Y, et al. Stylized rendering using samples of a painted image [J]. IEEE Transactions

- on Visualization and Computer Graphics, 2008, 14 (2): 468 – 480.
- [14] Dollár P, Zitnick C L. Fast edge detection using structured forests[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 2014, 37(8): 1558 – 1570.
- [15] Ni K, Wu Y. Adaptive patched L0 gradient minimisation model applied on image smoothing[J]. IET Image Processing, 2018, 12(10): 1892 – 1902.
- [16] Min D, Choi S, Lu J, et al. Fast global image smoothing based on weighted least squares[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2014, 23(12): 5638 – 5653.
- [17] Kim Y, Ham B, Do M N, et al. Structure-texture image decomposition using deep variational priors [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2019, 28(6): 2692 – 2704.
- [18] Kyprianidis J E, Döllner J. Image abstraction by structure adaptive filtering [A] EG UK Theory and Practice of Computer Graphics [C]. Hoboken, New Jersey: Eurographics Association, 2008. 051 – 058.
- [19] Zang Y, Huang H, Zhang L. Guided adaptive image smoothing via directional anisotropic structure measurement[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2015, 21(9): 1015 – 1027.
- [20] 丁颖, 刘延伟, 刘金霞, 等. 虚拟现实全景图像显著性检测研究进展综述[J]. 电子学报, 2019, 47(7): 1575 – 1583.
Ding Y, Liu Y W, Liu J X, et al. An overview of research progress on saliency detection of panoramic VR images [J]. Acta Electronica Sinica, 2019, 47(7): 1575 – 1583. (in Chinese)
- [21] Zou B J, Liu Q, Yue K J, et al. Saliency-based segmentation of optic disc in retinal images[J]. Chinese Journal of Electronics, 2019, 28(1): 71 – 75.
- [22] Yang C, Zhang L, Lu H, et al. Saliency detection via graph-based manifold ranking [A]. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition [C]. Washington, DC: IEEE Computer Society Press, 2013. 3166 – 3173.
- [23] Achanta R, Hemami S, Estrada F, Susstrunk S. Frequency-tuned salient region detection [A]. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition [C]. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2009. 1597 – 1604.
- [24] Cabral B, Leedom L C. Imaging vector fields using line integral convolution [A]. ACM SIGGRAPH [C]. New-York: ACM Press, 1993. 263 – 270.
- [25] Lang M, Hornung A, Wang O, et al. Nonlinear disparity mapping for stereoscopic 3D [J]. ACM Transaction on Graphics, 2010, 29(4): Article No. 75.

作者简介



李大锦 男, 1971 年 11 月生于江苏省连云港, 现为山东师范大学传媒学院数字媒体系副教授, 硕士生导师, 研究方向为计算机图形学, 虚拟现实与计算机动画技术。
E-mail: ldjwqc@163.com



高文冉 男, 1996 年 12 月生于山东省济宁市, 现为山东师范大学物理与电子科学学院硕士研究生, 研究方向为数字图像处理、计算机视觉。



高俊杰 男, 1995 年 9 月生于山东省泰安市, 现为山东师范大学物理与电子科学学院硕士研究生, 研究方向为数字图像处理。