

实时图像素描风格化

黄 华 程 威

(西安交通大学电子与信息工程学院 西安 710049)

摘 要 提出了一种实时的图像素描风格化算法. 根据素描以及人眼视觉的特点, 利用人眼对颜色差异的敏感程度来勾勒图像的轮廓, 并依据图像光感强度产生的重要性图来控制渲染素描风格画的阴影纹理, 使得生成的素描风格画具有良好的艺术效果. 与已有方法相比, 该文算法不需要人工交互, 生成的素描视觉效果更好, 在速度上能达到实时.

关键词 图像; 素描; 视知觉; 非真实感绘制; 实时

中图法分类号 TP391 **DOI 号**: 10.3724/SP.J.1016.2009.02023

Real-Time Image Sketch

HUANG Hua CHENG Wei

(School of Electronics and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049)

Abstract A real-time non-photorealistic rendering technique that generates a sketch from a real photograph is presented in this paper. In accordance with the features of sketch and human vision, the authors draw the contours according to the conceptual color difference, and generate the shadow with the importance map which is produced from the intensity of light, and combine them to create the final desired sketch. Compared with current methods, the framework design doesn't demand human-computer interaction, and can get better visual effects as well as allow real-time implementation.

Keywords image; sketch; visual perception; NPR; real-time

1 引 言

随着图像采集设备的不断普及, 普通数码照片已不再能满足人们的需要, 将照片处理成素描、卡通、油画等艺术风格逐渐成为一种娱乐方式. 素描是一种以铅笔、粉笔等为媒介, 用线条来表现物体或景象的艺术, 可分为线条结构画和精细写实素描两种. 手工创作素描画是一项复杂的艺术劳动, 因此, 基于真实图像高效地模拟出具有素描艺术特征的图像, 也就是图像素描风格化, 具有重要的应用价值.

近年来已经提出了一些图像素描风格化算法.

Winkenbach 等^[1]通过计算可控密度阴影来指导纹理的生成, 使得在图像亮度较高的区域或者有较多笔画交汇的区域阴影较少或者阴影消失, 而在亮度较低的区域或者笔画开始分叉的区域阴影较多或者重新生成阴影. Salisbury 等^[2]通过大量的人工交互来定义纹理方向和笔划方式, 生成的钢笔素描画的纹理效果较好. Kang 等^[3]首先使用 Canny 边缘检测提取图像的轮廓图, 然后在滑动窗口内不断手工调整局部 Canny 边缘检测参数, 对轮廓进行修正, 最后对生成的轮廓进行风格化线条渲染, 得到最终的线条画. Son 等^[4]计算图像各像素点属于边缘点的概率大小, 然后对各极大概率像素点使用曲线拟

合,并采用一定的线条风格对曲线轮廓进行渲染,得到最终的线条画. Kang 等^[5]首先对图像的边缘切线场进行双边滤波,然后根据边缘切线场构建动态高斯差分边缘检测窗口,生成线条画.

但这些算法也存在一些问题. Winkenbach 等^[1]的算法只适用于一些能够用参数表示的曲面模拟,对纹理复杂的画面生成效果有限. Salisbury 等^[2]的算法生成的风格化图像效果与用户设置关系很大. Kang 等^[3]的算法生成的线条画效果较好,但是需要大量的人工操作,效率很低. 由于曲线拟合的轮廓连续性较差,因此 Son 等^[4]的算法不利于细节表达. Kang 等^[5]的算法生成的线条画能够将一些不连贯的区域连接起来,画面很连续,但也会增加一些不应存在的线条.

总体来说,目前的图像素描风格化算法或者未遵循素描风格创作的艺术特点,或者需要大量人机交互,同时运算量较大,无法做到实时或者准实时.

本文基于素描风格及人眼视觉特点,提出了一种实时的素描风格化算法,该算法首先计算图像的颜色差异图和阴影重要性图,根据颜色差异图生成素描的轮廓,根据颜色差异图及阴影重要性图生成素描的阴影,最终将两者合成为具有素描艺术风格的图像. 实验结果表明,该算法能够实时生成具有良好素描艺术效果的风格化图像.

2 算法原理与框图

素描是一种表现光线和阴影的艺术手段,就艺术特征而言,其基本语言是形体与色调. 素描形体指画面中形的不同空间状态,也就是轮廓;素描色调是指画面内不同形体区域内外的明暗变化. 形体与色调构成了素描的造型,且两者同时存在^[6-7]. 拿起笔在画面上画下一根线时,由于笔下的痕迹与画面形成色调差,这条线(也就是轮廓)才存在. 同样的,色调也不能单独存在,它必须以某个形体为载体,才能与周围存在的其它色调相区分^[6-7]. 也就是说,在素描艺术创作过程中,素描的两个基本语言是同时存在、同时消失的.

要进行素描创作,必须首先对事物进行视觉感知. 就视觉感知机理而言,人眼是通过多阈值调节来完成对外在事物的观察的. 视觉系统初步设定一个较高的视觉阈值来感受事物的轮廓,然后通过调低视觉阈值来感受事物局部的细节^[8-9]. 一切视觉表象都是由色彩和亮度产生的,不同区域的亮度、色彩让

眼睛感受到物体的外在形体^[10]. 形成形体的重要因素——光线和阴影,与色彩、亮度是相对应的,因此在素描艺术创作过程中,对光线和阴影的表达与对色彩和亮度的表达有本质的联系^[6-7].

基于人眼视觉特点设计的 Lab 颜色空间,具有颜色分量与亮度分量完全独立、能体现视觉感知均匀性的特点.

根据以上所述素描风格及人眼视觉特点,本文在 Lab 颜色空间模拟素描创作过程. 算法基本框架如图 1 所示. 首先对图像做双边滤波预处理;然后计算图像的颜色差异图和阴影重要性图;根据颜色差异图得到素描的轮廓图,根据阴影重要性图和颜色差异图得到素描的阴影图;最后将两者叠加得到素描风格化后的图像.

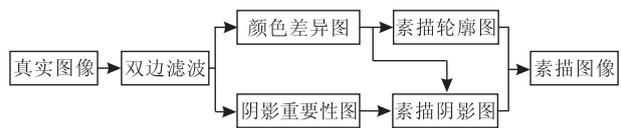


图 1 算法框架图

3 颜色差异图与重要性图

仔细观察素描的艺术特点,素描轮廓突出、细节较少. 因此,图像的素描风格化,首先需要做预处理,以保留大的边缘并去除微小细节. 传统的边缘检测滤波器通常对噪声敏感或者会导致明显的边缘模糊. 双边滤波是一种非线性各向异性的滤波技术,它不仅考虑了图像中两个像素点间的距离信息,同时还考虑了它们的特征差异,从而可以有效保留强边缘,同时去除图像微小细节^[11-12].

记输入图像为 f , 则经双边滤波后输出图像 f_B 为

$$f_B(x_i) = \frac{\int e^{-\frac{|x_j - x_i|^2}{2\sigma_d^2}} \cdot e^{-\frac{(f(x_j) - f(x_i))^2}{2\sigma_r^2}} \cdot f(x_j) dx_j}{\int e^{-\frac{|x_j - x_i|^2}{2\sigma_d^2}} \cdot e^{-\frac{(f(x_j) - f(x_i))^2}{2\sigma_r^2}} dx_j} \quad (1)$$

其中, x_i 和 x_j 是两相邻像素的位置向量; σ_d 是双边滤波器的核半径大小, σ_d 越大, 滤波效果越强烈; σ_r 决定图像上边缘信息被平滑的强烈程度, σ_r 越大, 图像上边缘信息保留得越少.

图 2 给出了图像双边滤波前后的效果对比. 图中可以看出, 双边滤波在保留图像强边缘的同时, 去掉了头发丝、手上的汗毛等微小细节.



(a) 原始图像 (b) 双边滤波后图像

图 2 双边滤波效果图

3.1 颜色差异图

由于不同区域亮度和色彩的差异能够使眼睛感受到事物的外在形体^[10],因此需要计算图像 f_B 上每个像素点与其邻域的颜色差异。

定义像素点 x_i 与其八邻域点 x_j 的颜色距离 $d(x_i, x_j)$ 为

$$d(x_i, x_j) = \sqrt{(l_i - l_j)^2 + (a_i - a_j)^2 + (b_i - b_j)^2} \quad (2)$$

其中, (l_i, a_i, b_i) 和 (l_j, a_j, b_j) 为像素点 x_i 和 x_j 在 Lab 颜色空间中对应的颜色值。

素描创作中阴影只在亮度低的区域生成。为提高素描轮廓及阴影生成的准确度,避免阴影从低亮度区域向高亮度区域扩散,定义像素点的颜色差异值为

$$f_c(x_i) = \max_{j \in \partial_i} \{ \text{sign}(l_j - l_i) d(x_i, x_j) \} \quad (3)$$

其中 ∂_i 表示 x_i 的八邻域点。

进一步对颜色差异值归一化到 $[0, 1]$ 区间。为了使线性映射更加鲁棒,首先计算所有像素点颜色差异值的均值和方差,将落在三倍方差以外的颜色差异值映射到三倍方差处;然后再寻找颜色差异值的最小值和最大值,并将颜色差异值的区间线性映射至 $[0, 1]$ 之间,得到最终的颜色差异图 f_D 如图 3 所示。



图 3 颜色差异图

3.2 阴影重要性图

素描的阴影与描绘对象的场景光感强度有很大的关系,在光感强度高的部分,生成的阴影较少;在光感强度低的区域,生成的阴影较多^[6-7]。为此,引入与原图光感强度相关的阴影重要性图用于指导素描

描阴影的生成。

定义双边滤波后图像 f_B 上像素点 x_i 的光感强度 $I(x_i)$ 为

$$I(x_i) = \sqrt{l_i^2 + a_i^2 + b_i^2} \quad (4)$$

根据素描的基本原理, $I(x_i)$ 越小的地方,生成的阴影越多,因此, $I(x_i)$ 越小对生成阴影的重要性越大。计算图像 f_B 中所有像素光感强度的平均值 I_m ,为了增强像素点间重要性的区分度,定义图像 f_B 上像素点 x_i 的阴影重要性为

$$f_s(x_i) = \begin{cases} \left(1 - \frac{I(x_i)}{I_m}\right)^2, & I(x_i) < I_m \\ 0, & I(x_i) \geq I_m \end{cases} \quad (5)$$

也就是说,光感强度 $I(x_i)$ 大于平均值 I_m 的像素点不具有阴影重要性,光感强度 $I(x_i)$ 越小于平均值 I_m 的像素点具有越大的阴影重要性。计算每个像素点的阴影重要性,得到最终的阴影重要性图如图 4 所示,图中可以看出,颜色越亮的区域绘制的阴影越少。



图 4 阴影重要性图

4 素描生成算法

4.1 轮廓图生成

人眼视觉的感知过程是通过设定颜色差异的阈值来提取观察对象的轮廓信息的。当观察对象局部区域的颜色差异强度超过了人眼自动设定的阈值时,人眼从该处提取轮廓信息,反之被人眼所忽略^[8-9]。因此,在图像素描风格化过程中,可设定一个较高的颜色差异值 $T_L \in (0, 1]$ 作为轮廓阈值,当 $f_c(x_i) \geq T_L$ 时,则该点属于轮廓。

双曲正切函数具有原点对称的 S 形平滑过渡特性。为了使提取出的轮廓连续平滑并具有淡入淡出的效果,避免风格化后的轮廓图像出现尖锐的毛刺感,使用双曲正切函数对颜色差异图 f_D 进行软二值化处理,以增强超过阈值的像素点,弱化小于阈值的像素点。

由于双曲正切函数值在 -3 和 3 时的值近似为 -1 和 $+1$,我们首先将颜色差异图 f_D 中像素值的

取值区间 $[0, T_L]$ 和 $[T_L, 1]$ 分别映射至区间 $[-3, 0]$ 和 $[0, 3]$, 然后应用双曲正切函数进行软二值化处理, 得到素描轮廓图像 g_L .

$$g_L(x_i) = \begin{cases} \frac{1}{2} \left(1 - \tanh \left(\frac{3(f_D(x_i) - T_L)}{T_L} \right) \right), & f_D(x_i) < T_L \\ \frac{1}{2} \left(1 + \tanh \left(\frac{3(f_D(x_i) - T_L)}{1 - T_L} \right) \right), & f_D(x_i) \geq T_L \end{cases} \quad (6)$$

4.2 阴影图像生成

视觉系统通过调低视觉阈值来感受事物局部的细节, 当观察对象局部区域的颜色差异强度低于人眼自动设定的低阈值时, 人眼从该处提取细节信息^[8-9]. 这些细节信息在素描上表现为阴影.

因此, 与轮廓图像的生成类似, 对颜色差异图设定一个较低的阈值, 当某个像素点的颜色差异值小于该阈值时, 确定该点为阴影. 同样, 为了使提取出的阴影连续平滑并具有淡入淡出的效果, 避免风格化后的阴影图像出现尖锐的毛刺感, 使用双曲正切函数对颜色差异图 f_D 进行软二值化处理, 以增强超过阈值的像素点, 弱化小于阈值的像素点.

不同的是, 根据素描的特点, 光感强度越低的区域, 生成的阴影越多. 我们根据阴影生成重要性图来确定动态的阈值, 使得光感强度越低的区域生成越多的阴影. 动态阈值定义为

$$T_S(x_i) = T_{S_0}(1 - f_S(x_i)) \quad (7)$$

其中, T_{S_0} 为阴影阈值. 进一步, 利用双曲正切函数进行软二值化, 即可得到素描阴影图 g_S .

$$g_S(x_i) = \begin{cases} \frac{1}{2} \left(1 - \tanh \left(\frac{3(f_D(x_i) - T_S(x_i))}{T_S(x_i)} \right) \right), & f_D(x_i) < T_S(x_i) \\ \frac{1}{2} \left(1 - \tanh \left(\frac{3(f_D(x_i) - T_S(x_i))}{1 - T_S(x_i)} \right) \right), & f_D(x_i) \geq T_S(x_i) \end{cases} \quad (8)$$

4.3 素描生成

得到素描轮廓图 g_L 和素描阴影图 g_S 后, 即可将两者叠加, 得到最终的素描风格化图像:

$$g(x_i) = \text{int}(255 \times g_L(x_i) \times g_S(x_i)) \quad (9)$$

其中 $\text{int}(\cdot)$ 为取整函数.

5 实验结果及分析

本文算法已经在硬件为 Pentium (R) Dual E2200 @2.20GHz、2.0GB 内存, 软件为 Windows XP 操作系统和 VC++2008 的环境下实现. 实验中, 双边滤波参数取值为 $\sigma_d=3$, $\sigma_r=4.25$, 阈值取值为 $T_L=0.164$, $T_{S_0}=0.039$.

图 5 给出了素描生成过程, 图 5(a) 为对颜色差异图进行软二值化后得到的轮廓图, 图 5(b) 为引入阴影重要性图后得到的素描阴影图, 图 5(c) 为最终得到的素描图像; 图 5(d) 为对颜色差异图直接二值化得到的轮廓图, 图 5(e) 为没有引入阴影重要性图得到的素描阴影图, 图 5(f) 为由图 5(d) 和图 5(e) 合成的素描图像.

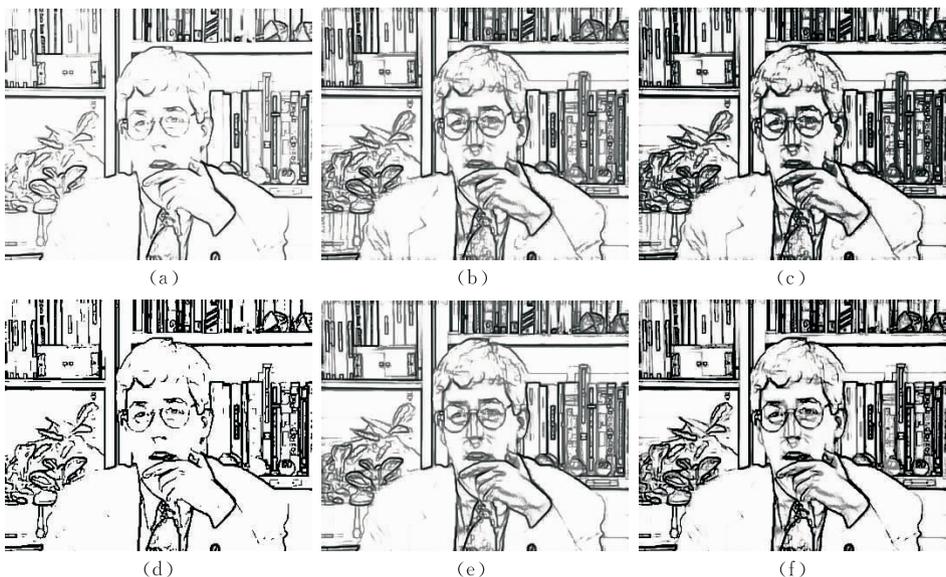


图 5 素描图像生成过程及效果对比

对比图 5(a)与图 5(d)可以看出,直接对颜色差异性图二值化得到的轮廓显得很生硬,而经过软二值化处理后的画面更加平滑、具有素描淡入浅出的效果;对比图 5(b)与图 5(e)可以看出,引入阴影重要性图后,衣服等地的纹理阴影明显增多;对比图 5(c)与图 5(f)可以看出,引入阴影重要性图和软

二值化后,素描视觉效果更好,细节更多.

为了说明本文算法的效果,将本文算法与不需要人工交互的 Kang 算法^[5]进行对比实验.图 6 给出了两种算法的效果对比图.图 6(a)为原始图像,图 6(b)为本文算法结果,图 6(c)为 Kang 算法结果.

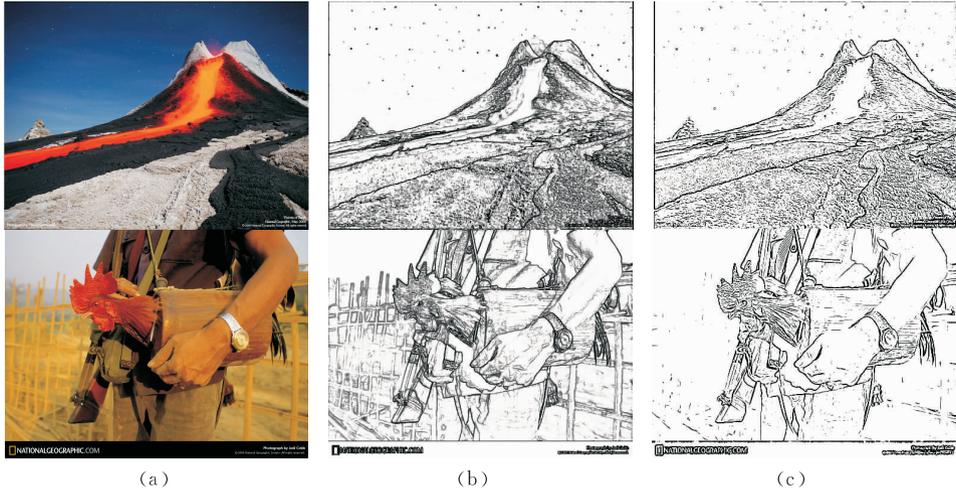


图 6 本文算法与 Kang 算法效果对比图

在视觉效果方面,由于本文算法着重从人眼视觉的角度模拟素描画的艺术创作过程,遵循了素描艺术创作的特点,表现重点突出,且细节深浅保留恰当,如图 6(b)中的若隐若现的火山口、篱笆等,这些效果在图 6(c)的 Kang 算法中没有体现;在阴影表现上,尤其是明暗过渡区域,本文算法生成的素描撕裂艺术感强烈,如图 6(b)中山体上的阴影、人物手臂阴影的撕裂效果,这些也是 Kang 算法未能体现的.

可以看出,随着轮廓阈值的增大,素描的轮廓变淡;随着阴影阈值的增大,素描的细节和阴影减少.一般而言,轮廓阈值与阴影阈值的选取与图像的内容关系密切,当图像边缘细节较多时,应选取较小的轮廓阈值与阴影阈值;当原始图像边缘细节较少时,应选取较大的轮廓阈值与阴影阈值.实验表明,轮廓阈值合适取值区间为 $[0.10, 0.30]$,阴影阈值合适取值区间为 $[0.01, 0.10]$,两个阈值同向变化.通常情况下,可取轮廓阈值为 0.16 左右,阴影阈值为 0.4 左右.

图 7 给出了不同参数条件下的素描效果,从图中

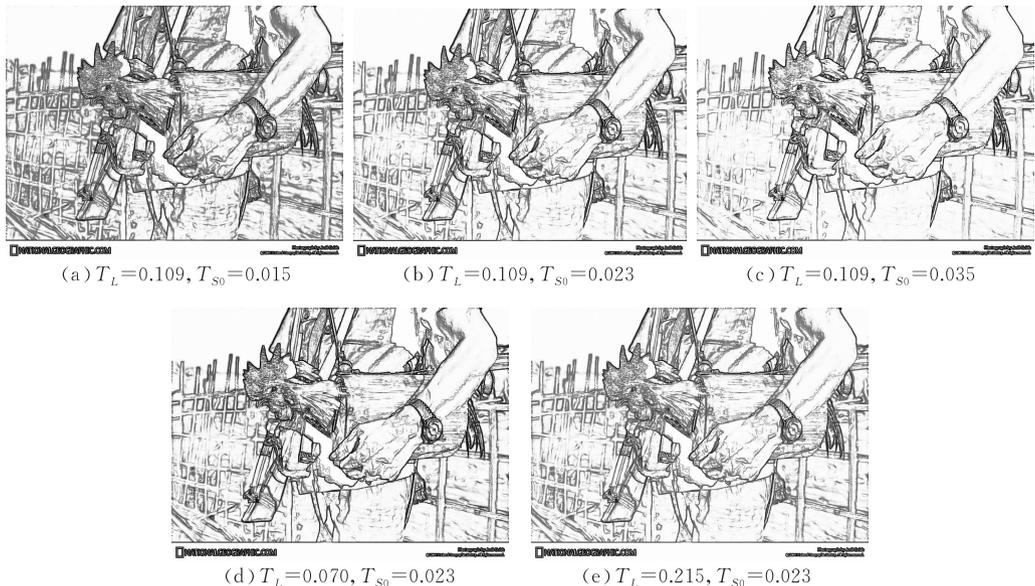


图 7 不同轮廓阈值与阴影阈值时素描效果图

在运行速度上,本文算法也具有明显优势.图6中的图像大小均为 1027×768 像素,Kang算法运行时间为10s左右,而本文算法的运行时间仅0.7s左右.对1幅 352×288 的24位BMP真彩位图,本文算法仅需时90ms左右,能够达到实时处理.虽然是逐帧进行的素描风格化,同时由于本文算法没有破坏原有视频内在的关联性,而且采用的软二值化算法可以减弱帧间闪动,从而可以实时生成帧间连续性较好的视频素描风格化效果.解决帧间连续性更好的方法是进行视频结构分析^[13],利用获得的帧间关联信息生成视频素描效果,但是计算复杂度也会相应增加,达到实时困难.

当然,从这些生成的素描图像也可以看出,与艺术家手工制作的素描相比,本文算法效果仍存在差距.手工素描艺术创作中,素描通过反映画面内不同形体区域内外明暗变化的色调,使画面呈现出种种视觉感受,并能够反映出作者的内心情感世界,这是非真实感绘制所不能达到的.

6 结 论

本文提出了一种基于素描风格及人眼视觉特点、能够实时地生成具有素描风格图像的算法.首先在Lab颜色空间中计算颜色差异图以及阴影重要性图,然后根据这两个图分别生成素描的轮廓图与阴影图,最后将生成的轮廓图与阴影图叠加,得到最终的素描风格化图像.该算法能实时生成具有良好艺术效果的素描风格化图像.后续工作希望可以模拟出能够反映出创作者内心情感世界的素描色调,再叠加现有的轮廓结果,生成艺术感更强烈的素描风格图像.

参 考 文 献

[1] Winkenbach G, Salesin D H. Rendering parametric surfaces

in pen and ink//Proceedings of the ACM SIGGRAPH'96. New Orleans, Louisiana, 1996: 469-476

- [2] Salisbury M P, Wong M T, Hughes J F, Salesin D H. Orientable textures for image-based pen-and-ink illustration//Proceedings of the ACM SIGGRAPH'97. Los Angeles, California, 1997: 401-406
- [3] Kang H W, Chui C K, Chakraborty U K. A unified scheme for adaptive stroke-based rendering. *The Visual Computer*, 2006, 22(9): 814-824
- [4] Son M, Henry K, Lee Y. Abstract line drawing from 2D images//Proceedings of the Pacific Graphics. Maui, Hawaii, 2007: 333-342
- [5] Kang H, Lee S, Chui C, Coherent line drawing//Proceedings of the ACM Symposium on Nonphotorealistic Animation and Rendering. San Diego, CA, 2007: 43-50
- [6] Stanley M. *Drawing Nature*. Cincinnati: North Light Books, 1995
- [7] Harding J D. *On Drawing Trees and Nature*. New York: Dover Publications, 2005
- [8] Robert F. Object-based visual attention for computer vision. *Artificial Intelligence*, 2003, 146(1): 79-123
- [9] Torralba A, Oliva A, Castelhamo M S. Contextual guidance of eye movements and attention in real-world scenes: The role of global features in object search. *Psychological Review*, 2006, 113(4): 766-786
- [10] Arnheim. *Art and Visual Perception: A Psychology of the Creative Eye*. California: University of California Press, 2004
- [11] Holger W, Olsen S C, Bruce G. Real-time video abstraction//Proceedings of the SIGGRAPH'06. Boston, Massachusetts, 2006: 1221-1226
- [12] Pham T Q, Vliet L J V. Separable bilateral filtering for fast video preprocessing//Proceedings of the IEEE ICME'05. Amsterdam, the Netherlands, 2005: 454-457
- [13] Zhang Song-Hai, Zhang Yi-Fei, Chen Tao, Hall P M, Martin R R. Video structure analysis. *Tsinghua Science and Technology*, 2007, 12(6): 714-718



HUANG Hua, born in 1975, Ph. D., associate professor. His main research interests include image and video processing, pattern recognition and machine learning.

CHENG Wei, born in 1985, M. S. candidate. His research interest is image and video processing.

Background

With popularity of the image acquisition devices, ordinary digital images are no longer able to satisfy the needs of the people, processing the photos into different styles such as sketch gradually becomes a way of entertainment in the daily lives. Manual creation of sketch is a complex art work costing the skilled and creative individuals considerable time and resources, so, efficiently imitating a sketch-like image based on real input automatically, has important application background.

The current image sketch-stylization algorithms usually do not follow the artistic features of sketch, or they need for a large number of human-computer interaction as well as a lot of operations, can not be real-time or even quasi real-time.

Based on the features of the sketch and the human visual

system, this paper presents a real-time algorithm for producing a sketch from a real image. The authors first introduce the concepts of color difference map and shadow importance map which are both calculated from the real input in the Lab color space, and then employ the color difference map to produce the outline of the sketch, to generate the shadow of the sketch with the shadow importance map, and combine the two to get the final sketch. The experimental results show that the algorithm in this paper can generate real-time effects with good art style of the sketch image.

This work is supported by the Key Project of Chinese Ministry of Education (No.109142) and Joint Research Grant—MOE-Intel Research Fund (No. MOE-INTEL-09-01).