

一种基于 NPR 的虚拟环境生成方法

肖 甫^{1),2)} 肖 亮³⁾ 吴慧中³⁾

¹⁾(南京邮电大学计算机学院,南京 210003) ²⁾(南京邮电大学计算机技术研究所,南京 210003)

³⁾(南京理工大学计算机科学与技术学院,南京 210094)

摘 要 非真实感绘制(NPR)为传统虚拟现实技术的使用开辟了新的空间。针对传统基于图像的绘制无法满足艺术风格虚拟环境需要的问题,通过将非真实感绘制技术引入虚拟场景构建中,提出了一种基于非真实感绘制的虚拟环境生成方法。该方法首先通过计算结构张量刻画图像局部结构,并采用全变分偏微分方程自适应滤波处理来得到平滑张量场;然后在此基础上采用线积分卷积指导画笔走向来模拟生成线条波动感艺术图像;最后将其融入3维场景来生成可漫游的艺术感虚拟环境。实验结果表明,采用该新算法不仅可以较好地模拟线条波动感艺术图像,而且可实现艺术风格虚拟环境的构建。

关键词 基于图像的绘制 非真实感绘制 结构张量场 线积分

中图法分类号: TP391.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-8961(2009)04-0738-06

A Novel Method for Virtual Environment Generation Based on Non-photorealistic Rendering

XIAO Fu^{1),2)}, XIAO Liang³⁾, WU Hui-zhong³⁾

¹⁾(School of Computer Science and Technology, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003)

²⁾(Institute of Computer Science and Technology, Nanjing University of Post and Telecommunication, Nanjing 210003)

³⁾(School of Computer Science and Technology, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094)

Abstract Aesthetic virtual environment cannot be satisfied if using traditional image based rendering. By introducing non-photorealistic rendering into the Virtual Reality, this paper presents a novel method for aesthetic virtual environment generation. First, structure tensor is calculated to characterize local structure of image. Then, total variation partial difference equation is imposed for smoothing vector field. Based on this we use line integral convolution for guiding the stroke to generate image with fluctuant sense. Last, merging with 3D scene, roam-able aesthetic virtual environment can be generated. Experiment Results show that we can simulate fluctuant sense image, and thus special style of aesthetic virtual environment can be satisfied using our algorithm.

Keywords image-based rendering, non-photorealistic rendering, structure tensor field, line integral convolution

1 引言

虚拟现实(Virtual Reality)是20世纪末兴起的一种崭新的人机交互技术,它是融合了计算机图形学、计算机视觉、信号处理等多种技术分支,通过视

觉、听觉和触觉等多通道进行交互,使用户获得“身临其境”全方位感受的人机交互技术。为使最终的场景获得最大的逼真度,一种全新的绘制方法——基于图像的绘制(IBR)引起了研究者的广泛关注,其是以对环境进行离散采样的图像为基础数据,再通过处理、组织这些图像数据来得到环境的连续

基金项目:国家自然科学基金项目(60672074);江苏省博士后基金项目(0801019C)

收稿日期:2007-06-19;**改回日期:**2007-11-26

第一作者简介:肖 甫(1980~),男,讲师。2007年1月获南京理工大学计算机应用技术专业博士学位,目前在南京邮电大学进行博士后研究。主要方向为虚拟现实、无线自组织网络等。E-mail:xiaof@njupt.edu.cn

描述,而新图像的合成则是通过组合原有的图像得以实现^[1-2]。然而对于带有特定艺术风格的虚拟环境,其不同于用 IBR 方法直接获得的照片,由于现实世界中很难获得此类非真实感的艺术性图片,因此此时单纯的 IBR 方法不再适用。

近年来,非真实感绘制(non-photorealistic rendering)技术得到了广泛研究,其主要是通过计算机模拟画笔来生成艺术风格图像。与传统的虚拟场景绘制追求真实感相比较,非真实感绘制有其独特的优点和应用范围,例如,艺术图像通常采用颜色、笔画、光照等手段生成蕴涵创作者丰富感情的艺术世界,并赋予场景特定的意义^[3];又如,对于虚拟博物馆等包含特定艺术特征的场景,由于人们更多的是追求艺术效果,而非真实性,因而非真实感绘制因通常吸引观察者关注场景的重要艺术特征而使虚拟系统设计者从单纯追求场景的逼真度中解放出来。现有的非真实感绘制中一般是采用基于笔刷模型的绘制方法,即通过建立艺术家绘画时笔画的立笔刷模型来模拟生成对应风格的艺术效果图像^[4]。为了获得高质量艺术图像,用户在绘制过程中由于需要不断尝试设置各种与画笔有关的参数,因而绘制效果带有一定的主观选择性。随后,Hertzmann 等人提出了一种基于类推思想的绘制方法^[5],即通过样本图像来学习图像间的风格转换方式,将样本图像绘画风格传输到新的实例中,使输出图像具有与样本图像类似的整体风格特征。但实验发现,该方法很难模拟出艺术领域中类似梵高风格的具有线条波动感的油画作品。在此基础上,Wang Chung-ming 等人在计算图像切矢量场的基础上,对其进行平滑,并采用线积分卷积(LIC)指导画笔的走向来模拟油画作品,取得了较好的绘制效果^[6-8]。但由于其在切矢量场线性平滑过程中并没有考虑局部结构,从而导致切矢量场整体趋于一致,并且该平滑处理需要大量的重复迭代操作,且次数较多。

本文将非真实感绘制技术引入到虚拟场景中,针对虚拟场景中的特定艺术风格的需要,提出了一种基于非真实感绘制的虚拟环境生成方法。该方法不同于传统的基于图像切矢量线性平滑计算的方法,其是通过结构张量来先计算图像局部结构;然后在此基础上采用全变分偏微分方程对图像结构张量场进行自适应滤波平滑处理,再利用线积分卷积指导画笔走向来模拟生成具有线条波动感的艺术图

像。最后将艺术图像融入场景中来生成艺术感的虚拟环境,并采用画中游(TIP)技术对该艺术场景进行浏览。

2 基于张量场的非真实感绘制

2.1 图像结构张量场计算

图像的结构张量描述了图像的局部结构信息,其在指纹识别、边缘增强等方面得到广泛的应用^[9-10]。记图像结构张量为 S ,则有

$$S = \begin{pmatrix} s_{1,1} & s_{1,2} \\ s_{2,1} & s_{2,2} \end{pmatrix} = g_{\sigma_1} * \begin{pmatrix} I_x^2 & I_x I_y \\ I_x I_y & I_y^2 \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$g_{\sigma_1} = \frac{1}{2\pi\sigma_1^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma_1^2}}$$

式中, g_{σ_1} 是方差为 σ_1^2 的高斯卷积核; I_x, I_y 分别为图像 I 在行、列方向的导数。

图像的结构张量 S 在分析图像局部结构时有着重要的作用:对其进行分解可以得到两个特征值,其对应的两个特征向量则描述了图像的局部结构。其中,特征值大的特征向量对应图像像素点处曲线的垂直方向,而特征值小的特征向量则对应像素点的曲线方向。设与 S 的较小特征值对应的特征向量为 V_2 ,对任意像素点 (i, j) ,设其对应的特征向量为 $V_2 = (v_{1,2}, v_{2,2})^T$,则点 (i, j) 处的局部曲线方向 θ 为

$$\theta = \arctan(v_{2,1}/v_{2,2}) \quad (2)$$

彩色图像一般含有多个通道,但并不需要对其所有通道进行逐一处理,可仅计算亮度分量的张量场。亮度分量 K 一般由源图像 I 中各像素点的 R、G、B 3 个通道的值按照下式进行加权平均得到:

$$K = R \times 0.299 + G \times 0.587 + B \times 0.114$$

对亮度分量图像中任意一点 (i, j) ,可采用式(1)来计算该点的结构张量 S ,并根据对应的特征向量求得点 (i, j) 的局部曲线方向 $\theta(i, j)$ 。由于角度可使用反正切函数计算得到,直接得到的点 (i, j) 的角度为 $\theta(i, j) \in \left[-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right]$,而实际点的局部曲线方向为 $\theta(i, j) \in [0, 2\pi]$,因此此时应根据特征向量 V_2 的分量值的正负关系来对角度所属象限进行调整。

2.2 各向异性扩散平滑处理

根据张量场计算得到的曲线角度场 θ ,由于存在尖锐的不规则跳变,如果直接用其控制笔画走向来进行绘制,则往往使得最终的绘制效果不够平滑,

因此需要对该角度场进行平滑处理。在传统的向量场平滑中,一般是采用邻域线性加权处理,但由于没有考虑向量场的局部结构,因此该平滑操作可能导致整体向量场趋于一致。全变分模型^[11-12]因较好地考虑了图像的局部特性而广泛应用于图像的去噪处理。笔者将其思想引入到本文的角度场平滑操作中,并构建了以下变分方程:

$$\theta = \operatorname{argmin}_s \int_{\Omega} |\nabla \theta| dx dy \quad (3)$$

式中, $|\nabla \theta| = \sqrt{\left(\frac{\partial \theta}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial \theta}{\partial y}\right)^2}$, Ω 为角度场空间。

上式描述的是角度场平滑的连续模型,对于本文所研究的数字图像应建立对应的离散模型。数字图像角度场 θ 可以视为定义在非空结点空间 Ω 上的离散信号集合,对于 θ 上任意一点 $p = (i, j)$, 定义其菱形邻域空间为

$$n_p = \{(i, j-1), (i, j+1), (i-1, j), (i+1, j)\}$$

则点 p 处的变分和离散为

$$|\nabla_p \theta| = \sqrt{\sum_{s \in n_p} (\theta_p - \theta_s)^2}$$

由此可得,与本文图像角度场平滑处理所对应的离散模型为

$$E(\theta) = \sum_{p \in \Omega} |\nabla_p \theta| \quad (4)$$

由直接变分法知,最优化能量泛函应满足欧拉-拉格朗日方程,即与式(4)对应的最优化问题可转化为

$$\operatorname{div}\left(\frac{\nabla \theta}{|\nabla \theta|}\right) = 0$$

利用半点差分格式^[13],即可对 θ 上的任意点 p 建立以下对应的离散格式:

$$\sum_{s \in n_p} w_{p,s} (\theta_p - \theta_s) = 0$$

式中, n_p 为点 p 的邻域,若 $w_{p,s} = \frac{1}{|\nabla_s \theta|}$, 则有

$$\theta_p = \frac{\sum_{s \in n_p} (w_{p,s} \theta_s)}{\sum_{s \in n_p} w_{p,s}} \quad (5)$$

该方法不同于传统的平滑操作,由于其较好地考虑了平滑像素点的方向角度与其邻域各像素点的

方向角度的梯度值,因此平滑后像素点的方向角可由该点周围的初始像素点的方向角各向异性地进行自适应加权计算求得(如式(5)所示)。

2.3 自适应 LIC 积分

线积分卷积^[6]最早用于矢量场的可视化中,它是通过直观的图形界面来反映场的整体运动。传统的 LIC 算法的基本思想是先把图像矢量场和初始纹理图像作为输入,然后沿流线方向通过对输入信号进行卷积运算来得到高精度反映场运动方向的图像。实验表明,由于严格按照曲线角度场方向进行线积分卷积的源图像,其最终绘制的图像中的流体波动感效果与实际的艺术作品显示的画笔兼具走势和随意性的特征并不相符。因此为了更好地模拟艺术作品中画笔的随意性,本文对源图像通过加入一定比例的高斯噪声进行随机扰动,以获得纹理图像 $\hat{I}$ 。并且保证绘制以曲线角度场控制为主,同时又能有一定的随意性,最终即可得到兼有活泼、跳跃艺术效果的模拟艺术图像。

设 x_0 为纹理图像中任意一点, $f(r)$ 是经过点 x_0 且长度为 $2L+1$ 的流线,则点 x_0 的输出值就由流线确定的纹理图像点的像素值和卷积核函数的积分计算确定,即

$$F(x_0) = \frac{\int_{r_0-L}^{r_0+L} k(r) \hat{I}(f(r)) dr}{\int_{r_0-L}^{r_0+L} k(r) dr} \quad (6)$$

$$x_0 = f(r_0)$$

式中, $k(r)$ 是 1 维卷积核函数, $\hat{I}(f(r))$ 是与流线 $f(r)$ 所经过的点对应的纹理图像像素值,离散化得

$$F(x_0) = \frac{\sum_{i=-L}^L k(x_i) \hat{I}(x_i)}{\sum_{i=-L}^L k(x_i)}$$

$$x_i = f(x_0 + i)$$

注意到,如果点 x_i 与点 x_0 之间距离越小,则对应的权重 $k(x_i)$ 应越大。因而可采用 1 维高斯核作为权函数,即

$$k(x_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x_i - x_0)^2}{2\sigma^2}}$$

利用 LIC 算法产生流体艺术图,积分步数 L 是影响算法效率和精度的最主要因素: L 的取值依赖于曲线角度场 θ , 若 L 太大,则最终输出的图像趋于平滑;而 L 太小,则最终得到的图像缺乏艺术线条波

动感。因而本文采用图像的局部细节分布情况^[6]来控制积分步数:若当前点的邻域内的细节越丰富,则积分步数越小;若邻域越平滑,则积分步数越大。由于标准差 $\sigma(\mathbf{x}_0)$ 能较好地描述图像块细节的丰富程度,因此可将亮度分量图像分成若干独立的 $n \times n$ 大小的图像块,设 $L_{\max}$ 和 $L_{\min}$ 分别为全局线积分的最大、最小步数,本文采用下式来确定当前点 $\mathbf{x}_0$ 所需的积分步数为

$$L(\mathbf{x}_0) = L_{\max} - (L_{\max} - L_{\min}) \frac{(\sigma(\mathbf{x}_0) - \sigma_{\min})}{(\sigma_{\max} - \sigma_{\min})}$$

式中, $\sigma_{\max}, \sigma_{\min}$ 对应的所有图像块中的最大、最小标准差; $\sigma(\mathbf{x}_0)$ 是以点 $\mathbf{x}_0$ 为中心的图像块的标准差。 $L(\mathbf{x}_0)$ 是一个随图像块标准差单调递减的函数,若标准差越大,其对应的图像块细节越丰富,则所需积分步数越小;若标准差越小,其对应的图像块越平滑,则积分步数越大。这符合艺术绘制风格的以下特点:①在诸如天空等平滑区域采用大画笔粗略绘制;②在细节变化丰富的区域采用小画笔进行精细绘制。

设当前绘制点为 $\hat{\mathbf{x}}$, 其对应的积分步数为 $L(\hat{\mathbf{x}})$, 则对应的线积分卷积需要的样本数为 $2L(\hat{\mathbf{x}}) + 1$ 。根据曲线角度场数据对这 $2L(\hat{\mathbf{x}}) + 1$ 个点采用式(6)进行线积分卷积(如图 1 所示),即可模拟生成艺术图像。

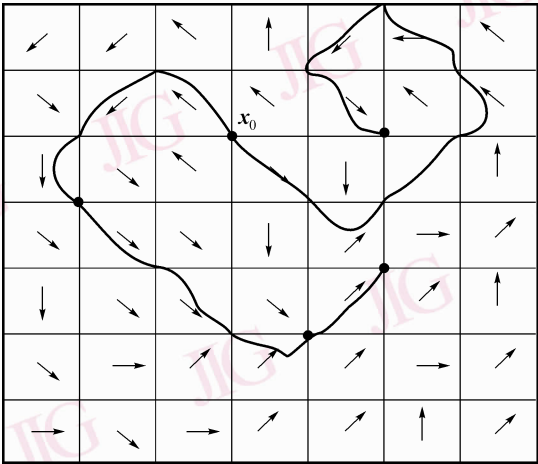


图 1 基于张量场的 1 维线积分卷积 ($L=7$)
Fig. 1 LIC based on tensor vector ($L=7$)

3 基于 TIP 的虚拟场景漫游

生成波动感艺术图像后,再构建一个普通 3 维虚拟场景,并将生成的艺术图像以纹理方式映射至该场景中来得到一个类似博物馆的虚拟艺术场景。

由于艺术图像不包含任何 3 维几何信息,因此可将整个场景视为普通的 2 维图像,采用画中游技术对其进行浏览。TIP 技术是 Horry 在 1997 年首次提出的一种图像浏览技术^[14],与其他基于图像的绘制技术相比,TIP 技术是以透视原理为基础,在给定一幅图像,并且在无需照相机参数的情况下,即可很简便地生成该图像的多角度、多距离的 3 维漫游视图。其基本原理为:通过指定一个视觉灭点和 4 根辐射线将场景建模为包含左墙、右墙、后墙、地面和顶面 5 部分的盒状 3 维模型,并据此来确定场景各部分的透视关系。建模完成后再将相机定位在 TIP 模型的 3 维场景中,最终即可得到以不同距离和角度对虚拟艺术场景图像进行浏览的身临其境的漫游效果。图 2 给出了采用 TIP 技术对场景漫游的具体流程。

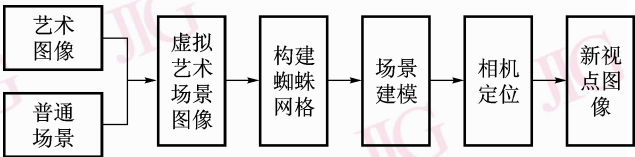


图 2 基于 TIP 技术的场景漫游流程
Fig. 2 The roam process base on TIP

4 实验结果

实验是选取实拍的黄山风景图片作为输入,用来验证本文方法的可行性。图 3(a)为初始输入图像,其对应的随机噪声扰动纹理图像如图 3(b)所示。图 3(c)为与初始图像对应的曲线角度场,对其采用全变分偏微分方程平滑后的结果如图 3(d)所示,其在克服初始角度场随机无序的同时,还能较好地保持其整体流线趋势走向。图 3(e)给出了采用本文方法绘制得到的艺术图像,整个画面表现出强烈的流体感和奔腾的压力,且较好地模拟出了具有线条波动感的梵高风格的艺术作品。图 3(f)为传统的基于切矢量线性平滑绘制的艺术图,由于线性平滑过程中没有考虑图像的局部结构,因而最终用线积分卷积绘制图像时,角度场整体趋于一致,很难模拟出梵高风格的漩涡效果。实验中,为消除尖锐的不规则跳变,本文采用的各向异性平滑操作以及传统的线性平滑操作的迭代次数分别为 40 次和 60 次。图 4(a)为包含艺术风格画的虚拟场景,而采用 TIP 技术对场景进行划分及浏览的效果分别如图 4(b)、图 4(c)所示。

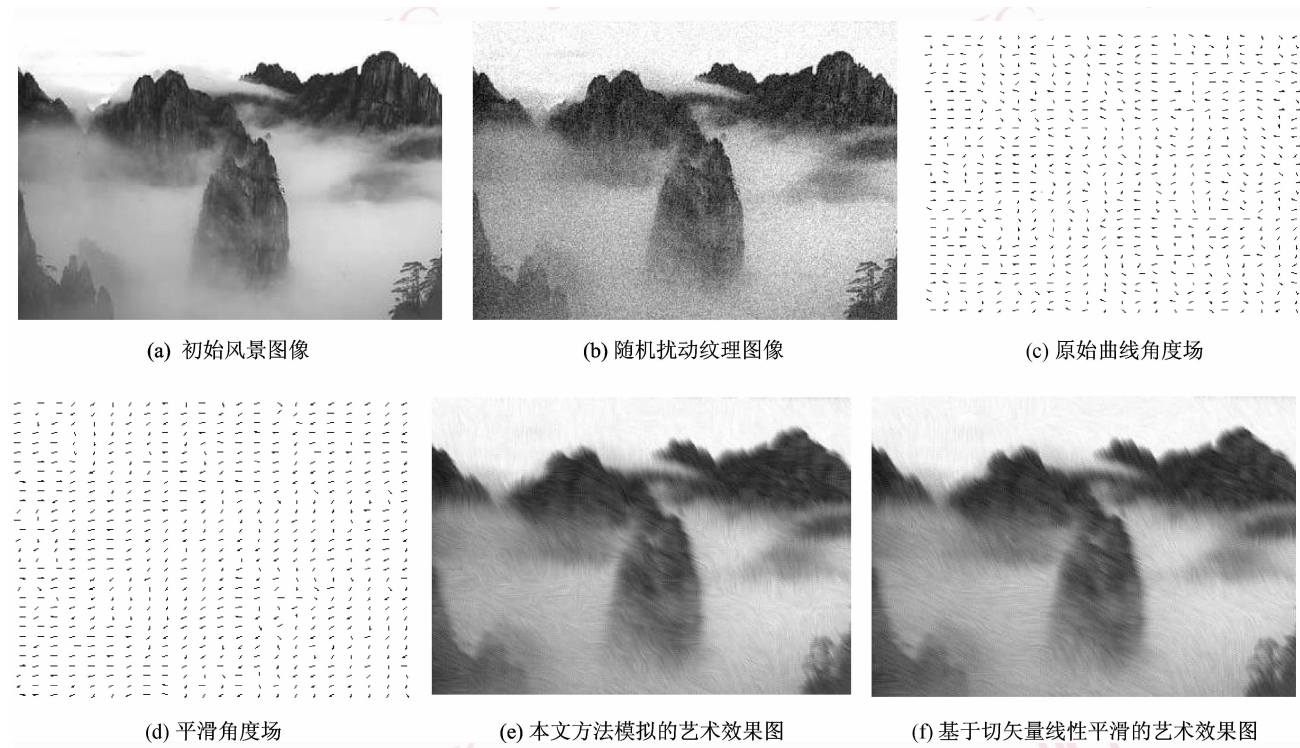


图 3 黄山风景图像和随机扰动纹理图像及其模拟的艺术效果图

Fig. 3 Original Huangshan scene, random disturbance image and fluctuant scene images



图 4 虚拟艺术场景及浏览效果图

Fig. 4 Virtual aesthetic scene and roam result using TIP

5 结 论

本文将非真实感绘制引入到虚拟场景的构建中,并采用基于张量场的 LIC 算法模拟艺术图像来生成艺术感虚拟环境。模拟时,首先通过计算源图像亮度分量的结构张量来得到刻画图像局部结构的曲线角度场;然后采用全变差的偏微分方程对其进行平滑处理,以控制线积分卷积中画笔的走向;接着由随机扰动源图像产生纹理参考图像,使得最终的

绘制图像整体充满活泼的波动感;最后将该艺术图像融入 3 维场景,并采用 TIP 技术来得到可漫游的具有艺术感的虚拟环境。这种非真实感绘制为传统虚拟现实技术的使用开辟了新的空间,由于目前一般仅针对某种风格图像采用特定的绘制方法,因而更通用的艺术图像生成方法是下一步考虑开展的研究工作。

致 谢 感谢南京邮电大学攀登计划项目 (NY207022) 的资助。

参考文献 (References)

1 Shum Heung-yeung, Kang Sing-bing. A review of Image based rendering techniques [A]. In: Proceedings of IEEE/SPIE Conference on Visual Communications and Image Processing [C], Perth, Australia, 2000: 2-13.

2 Peng D, Liu J, Tian J, *et al.* Transformation model estimation of image registration via least square support vector machines [J]. Pattern Recognition Letters, 2006, **27**(12): 1397-1404.

3 Klein Allison W. An Image-based Framework for Animated Non-photorealistic Rendering [D]. Princeton, New Jersey, USA: Princeton University, 2002.

4 Curtis C J, Anderson S E, Seims J E, *et al.* Computer-generated watercolor [A]. In: Proceedings of SIGGRAPH' 97 [C], Los Angeles, CA, USA, 1997: 421-430.

5 Hertzmann A, Jacobs C E, Oliver N, *et al.* Image Analogies [A]. In: Proceedings of ACM SIGGRAPH 2001 Conference Proceedings [C], Los Angeles, California, USA, 2001: 327-340.

6 Wang Chung-ming, Lee Jiunn-shyan. Using ILIC algorithm for an impressionist effect and stylized virtual environments [J]. Journal of Visual Languages and Computing, 2003, **14**(3): 255-274.

7 Brian Cabral, Leith Leedom. Imaging vector fields using line integral convolution [A]. In: Proceedings of ACM SIGGRAPH 1993 [C], Anaheim, California, USA, 1993: 263-272.

8 Wang Chung-ming, Lee Jiunn-shyan. Non-photorealistic rendering for aesthetic virtual environments [J]. Journal of Information Science and Engineering, 2004, **20**(5): 923-948.

9 Ullrich Köthe. Edge and junction detection with an improved structure tensor [A]. In: Proceedings of Deutsche Arbeits Gemein Schaft für Mustererkennung Symposium for Pattern Recognition [C], Magdeburg, Germany, 2003: 25-32.

10 Cheng Jian-gang, Tian Jie, He Yu-liang, *et al.* Fingerprint enhancement algorithm based on nonlinear diffusion filter [J]. Acta Automatica Sinica, 2004, **30**(6): 854-862. [程建刚, 田捷, 何余良等. 基于非线性扩散滤波的指纹增强算法 [J]. 自动化学报, 2004, **30**(6): 854-862]

11 Rudin L, Osher S, Fatemi E. Nonlinear total variation based noise removel algorithms [J]. Physical D: Nonlinear Phenomena, 1992, **10**(60): 259-268.

12 Aly Hussein A, Dubois Eric. Image up-sampling using total-variation regularization with a new observation model [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2005, **14**(10): 1647-1659.

13 Sochen N, Kimmel R, Malladi R. A geometrical framework for low-level vision [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1998, **7**(3): 310-318.

14 Youichi Horry, Kerrichi Anjyo, Kiyoshi Arai. Tour into the picture: Using a spidery mesh interface to make animation from single image [A]. In: Proceedings of the 24th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques [C], New York, USA, 1997: 225-232.