

文章编号:1007-5321(2021)06-0053-06

DOI:10.13190/j.jbupt.2021-097

# 基于感知驱动的纹饰矢量图评价方法

赵海英, 李焕洪, 侯小刚

(北京邮电大学 人工智能学院, 北京 100876)

**摘要:** 针对构建中华文化矢量素材库过程中如何评价矢量图质量优劣的问题,提出精确性、连续性和简单性三大视觉评价指标,并进行了量化分析。首先,对矢量图进行解析,获取矢量图的文档对象模型,遍历文档树得到矢量信息;然后,结合格式塔心理学对矢量图的视觉误差、曲线连续性和纹饰图案的复杂度进行量化;最后,提出一种基于感知驱动的传统纹饰矢量图的评价方法。结合视觉上的启发性规则,所提评价方法可提供 3 个量化指标用于多任务驱动矢量化系统中矢量图的自动评价、排序和筛选。在纹饰矢量图数据集上对算法进行了仿真实验,结果表明,对矢量图的评价结果符合主流设计的视觉审美和期望。

**关键词:** 传统纹样; 视觉感知; 图像矢量化; 评价方法

**中图分类号:** TN911.22

**文献标志码:** A

## Evaluation Method of Traditional Pattern Vector Diagram Based on Perception Drive

ZHAO Hai-ying, LI Huan-hong, HOU Xiao-gang

(School of Artificial Intelligence, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

**Abstract:** Aiming at the question of how to evaluate the quality of vector materials in the construction of the Chinese cultural vector material library, three visual evaluation indicators of accuracy, continuity and simplicity are proposed and quantitatively analyzed. First, the vector diagram is analyzed to obtain the document object model of the vector diagram, and the document tree is traversed to obtain the vector information. Then, by combining the Gestalt psychology, the visual error, curve continuity, and complexity of the decorative pattern of the vector diagram is quantified. Finally, an evaluation method based on perception-driven traditional pattern vector diagrams is proposed. The proposed algorithm provides three quantitative indicators that can be used for automatic evaluation, sorting and screening of vector diagrams in a multitask-driven vectorization system. Simulation results on the texture vector data set show that the evaluation results of the vector graphics meet the visual aesthetics and expectations of mainstream designs.

**Key words:** traditional patterns; visual perception; image vectorization; evaluation method

传统纹饰图案蕴含吉祥的寓意,寄托着人们的美好追求,是中国传统文化的重要组成部分。对

文化遗产进行数字化和再利用是一种有效保护并传承文化的方法,构建素材库,将中华文化元素和

收稿日期: 2021-06-07

基金项目: 国家重点研发计划项目(2020YFF0305304); 北京邮电大学校级课题(2020RC26)

作者简介: 赵海英(1972—),女,副教授。

通信作者: 侯小刚(1984—),男,博士生, E-mail: houxiaogang05@bupt.edu.cn。

标识融入内容创作生产、创意设计,可以让传统纹饰焕发新的生机。矢量格式的图片具有与设备分辨率无关、缩放不失真、用户可编辑和文件存储体积小等优点,广泛应用于设计和出版行业。对纹饰图案的矢量化研究可以为文化资源的数字化和再利用提供强有力的支撑。当前,在构建矢量素材库的过程中仍面临诸多挑战。一方面,大量纹饰图案源自传统的服饰、陶瓷、青铜器和壁画,图像纹理复杂,矢量化效果不佳;另一方面,现有矢量化算法的鲁棒性较差,对纹饰图案进行矢量化后,得到的矢量图质量参差不齐。例如,图1(a)所示图案的线条流畅,曲线居多,图1(b)所示的图案由较多段短曲线构成,拐点较多。因此,在进行图案入库时,需要花费大量的人力对算法自动生成的纹饰图案矢量图进行筛选、排序。笔者提出的基于感知驱动的纹饰矢量图评价方法,可对人眼的视觉偏好进行量化,从纹饰图案的精确性、连续性、简单性三大视觉特征进行量化分析,完成对矢量图的自动评价,从而帮助用户快速甄别高质量的矢量图,也可以对素材库中的矢量图进行排序,为分析不同矢量化算法的优劣提供量化指标。

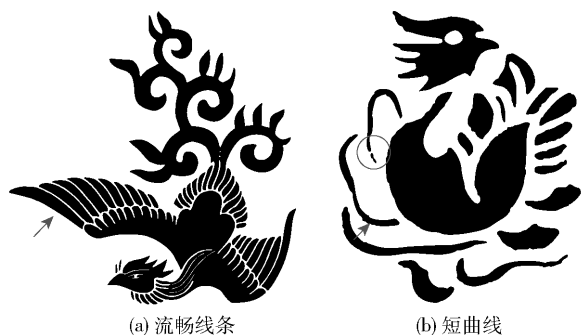


图1 矢量图对比

## 1 相关工作

在计算机图形学领域,矢量图是一种利用几何图元来表达图像的一种方式。在某些研究中将图像矢量化称为图像追踪,将位图转换成矢量图,其核心是选择合适的模型对位图进行重建。根据研究对象主要分成自然图像和非自然图像。自然图像主要是指在自然场景下使用摄像机拍摄的照片,通常带有复杂的纹理细节。这些纹理通常难以进行矢量化表达,这也是目前图像矢量化算法所面临的挑战。在早期,图像矢量化被归结为一种图像的抽象化和风格化形式<sup>[1-2]</sup>,可以实现非真实感的渲染效果,随后

更多复杂而高效的矢量化表达模型应运而生。目前流行的矢量化表达模型主要包括基于三角网格和细分曲面的图像矢量化表达<sup>[3-7]</sup>;基于梯度网格的图像矢量化表达<sup>[8-11]</sup>;基于扩散曲线的图像矢量化表达<sup>[12-13]</sup>等。非自然图像主要包括卡通图像和线稿图,相对自然图像而言更简单,无需考虑复杂的纹理信息。图像中的物体边缘通常会有一些装饰用的线条,装饰线使得图像的轮廓检测更容易,因此,涌现了一批经典的基于区域和分割的矢量化算法。Selinger<sup>[14]</sup>提出了一种名为 Potrace 的算法,可以对二值图像进行轮廓线追踪,将二值图像转成矢量图并较好地保持原有特征。Zhang 等<sup>[15]</sup>提出一种对 2D 卡通动漫进行矢量化的系统,可以实时检测装饰线且可编辑。Kopf 等<sup>[16]</sup>提出了一种低分辨率像素级卡通图像的矢量化算法。2018 年 Hoshyari 等<sup>[17]</sup>提出了感知驱动的半结构化图像矢量化算法。基于这个思路,2020 年 Dominici 等<sup>[18]</sup>又提出了改进的 polyfit 算法。

目前对矢量图的视觉特征进行量化分析的研究较少,大部分对矢量化效果的评价依赖主观评价,一般将算法得到的矢量图与设计师手工描摹的矢量图进行对比,算法得到的矢量图越接近手工描摹的矢量图则说明效果越好,同时也可用这一方法对比其他矢量化算法。感知驱动的思想最早见于文献[17],感知寓意观察者对于矢量图的感知和期望,认为质量好的矢量图应当是符合人眼的视觉感知的。格式塔心理学利用视觉感知的基本原理解释了大脑是如何感知不同视觉组件的。受此启发,笔者利用视觉规则的精确性、连续性、简单性这些特点对矢量图在审美偏好上进行了分析和度量,以完成对矢量图的评价。

## 2 矢量图评价方法

### 2.1 矢量图文档模型

矢量图的格式众多,目前较流行的矢量格式有 Adobe 的 ai 和 eps, AutoCAD 的 dwg 和 dxc, CorelDRAW 的 cdr 等,这些矢量编辑软件都采用了各自的矢量图形格式。为不失一般性,笔者分析的对象是一种基于 W3C 推荐标准的可伸缩矢量图(SVG, scalable vector graphics)。

矢量图使用图元来描述图像,图元包含颜色和位置信息,典型的图元有线、矩形、圆形和路径等。矢量化算法中常使用路径作为图元表达图像。图2

所示为莲花纹及其矢量图元. 莲花纹由 5 片花瓣组成, 每一片花瓣由闭合路径描述, 闭合路径形成的区域可以根据实际需求上色.

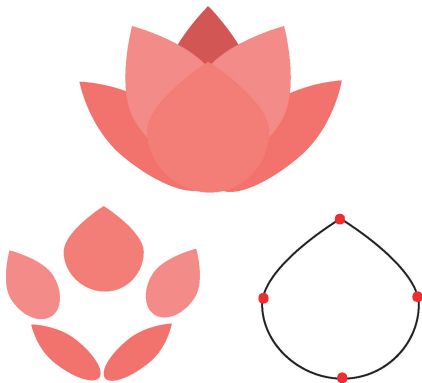


图 2 莲花纹及其矢量图元示意图

SVG 标准与文档对象模型 (DOM, document object model) 兼容, 可以使用解析 XML 文档的方法对 SVG 文件进行解析, 获取矢量图形的闭合区域信息、颜色信息和几何信息. 一般将矢量图表示为一颗树  $T=(V,E)$ , 边  $E$  表示节点之间的层次关系且严格偏序, 节点  $V$  是一个  $n$  元组:

$$(nam, attr_1, \cdots, attr_n)$$

(1)

$n$  元组中的元素是一个  $K-V$  键值对,  $nam$  表示节点的名称, 如 `path`,  $attr$  表示节点的属性, 如 `fill` 设置路径的填充颜色, `stroke` 设置曲线样式, 其中 SVG 节点始终处于根节点. SVG 文件的文档树模型如图 3 所示. 其中  $\langle V_{SVG}, V_{p_1} \rangle$  表示路径  $p_1$  是 SVG 的组成元素之一, 并且位于 SVG 节点的下一层, 且不会再出现  $\langle V_{SVG}, V_{p_1} \rangle$ . 对文档树进行遍历得到矢量图信息, 可作为下一步计算评价指标的输入.

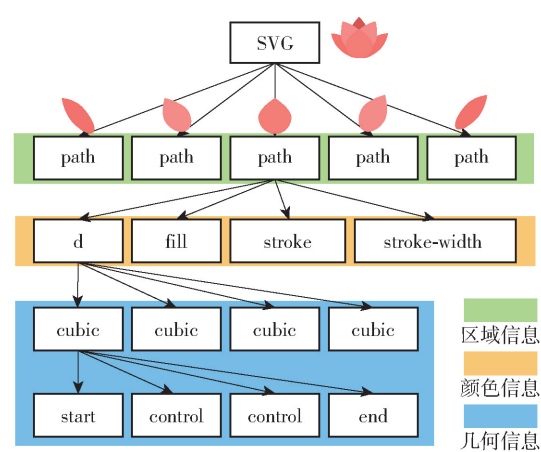


图 3 SVG 文件的文档树模型

2.2 算法框架

矢量图评价流程如图 4 所示, 包括以下步骤: 1) 输入原始的光栅图  $I$ , 光栅图可以是在壁画、瓷器和拓片上经分割提取得到的纹饰图案; 对应的矢量图可以由算法、工具自动生成或由设计师手工描摹; 2) 对矢量图进行光栅化操作, 得到原图的重建光栅图像  $I'$ ; 对矢量图进行解析, 得到矢量图的文档树模型  $T$ ; 3) 计算 3 个视觉指标, 根据原图与重建图的误差计算精确性的度量值, 根据度量公式遍历文档树模型  $T$ , 计算简单性和连续性的度量值; 根据度量公式遍历文档树模型  $T$  的计算简单性和连续性的度量值; 4) 对 3 个分量分配权重得到最终的度量值, 然后对纹饰素材库中的图案进行排序并输出.

2.3 基于感知驱动的矢量图评价方法

传统纹饰素材库中的矢量素材质量参差不齐, 主要有以下 3 个原因: 1) 自动矢量化算法鲁棒性不强, 不同类型的图片效果迥异; 2) 在纹饰图案的采集过程中, 因光照、设备标准不同, 含不同噪声、阴影

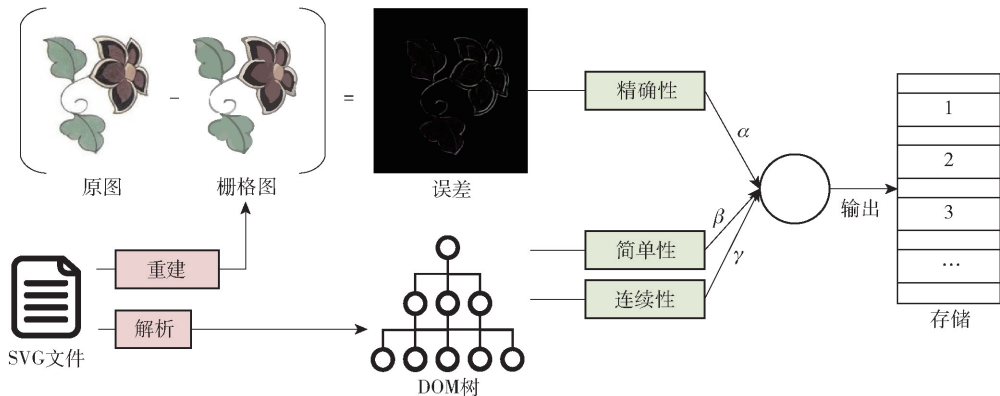


图 4 矢量图评价流程

遮挡的原图对算法的干扰较大;3)纹饰本身的载体复杂,例如服饰上的纹饰纹理复杂,壁画上的纹饰图案残缺,用户需要花费大量时间筛选素材,辨别矢量图的优劣。为此,针对矢量图提出了精确性、简单性和连续性3个视觉指标,并进行量化分析,辅助用户高效地使用素材库。

精确性反映矢量化过程中保留原图信息的能力。通过计算得到矢量图重建后的光栅图像  $I'$  与对应原始光栅图  $I$  之间的误差,计算过程为

$$\Delta(x,y) = \begin{cases} 1, & \|I'(x,y) - I(x,y)\|^2 \leq t^2 \\ 0, & \|I'(x,y) - I(x,y)\|^2 > t^2 \end{cases} \quad (2)$$

$$f_a(I) = 1 - \frac{1}{|I|} \sum_{(x,y) \in \delta} \Delta(x,y) \quad (3)$$

其中  $t$  表示视觉容忍度。计算 RGB 空间中各像素点重建图与原图的误差,对于符合预期的点标记为1;否则标记为0,最后统计满足精确性的像素点。视觉容忍度  $t$  是必须给出的,因为在矢量化过程中使用了一个闭合的,颜色一致的区域表示原图的离散像素点,而原图同一区域上的颜色可能是很多种,视觉容忍度  $t$  可以很好地平衡这一关系。实践中,对于彩色图像,视觉容忍度  $t$  的取值范围为  $[10, 30]$ ;对于二值图像,  $t$  的取值范围为  $[50, 100]$ 。视觉容忍度  $t$  是超参,可以由用户在系统中进行偏好设置,  $t$  的取值越大,与原图的误差越大,矢量图也越简单。

连续性反映矢量化过程中对区域边界的拟合情况,连续性评价函数表示为

$$f_c(T) = \sum_{p \in T} \sum_{C_x, C_y \in \delta} \min \left( 1, \frac{180^\circ - \theta_{C_x, C_y}}{l_1} \right) \quad (4)$$

其中  $C_x, C_y$  为路径  $p$  中首尾连接的曲线,  $\theta_{C_x, C_y}$  为曲线  $C_x$  与曲线  $C_y$  相交处的夹角,  $l_1$  为预设的连续性参数。连续性通过统计矢量图中所有曲线交点处的角度来计算,其中  $l_1 = 135^\circ$ 。通过映射函数  $f(x)$  将由式(4)得到的值映射到  $[0, 1]$ , 连续性度量值越趋向于1,说明曲线直接形成的拐点越多,视觉效果越不好。

$$f(x) = \frac{\pi}{2} \arctan(\partial x), f(x) \in [0, 1] \quad (5)$$

简单性反映的是矢量图组成元素的情况,通过遍历整个矢量图的 DOM 树,统计不同节点的数量并进行计算。为方便比较,同样将简单性度量值映射到  $[0, 1]$ , 得到光栅图  $I$  矢量化的简单度为

$$f_s(I) = \left( \sum_{e \in E} 1 + D(e) \right) + R(r, I) + 3C(c, I) \quad (6)$$

其中:  $e$  为光栅图  $I$  对应矢量图中的曲线单元,  $E$  为光栅图  $I$  对应矢量图中的所有曲线,  $D(e)$  为曲线单元  $e$  的最高项次数,  $R(r, I)$  和  $C(c, I)$  分别为光栅图  $I$  对应树  $T$  的闭合区域数量和闭合区域颜色的数量。根据文献[19], 曲线的复杂性通过曲线的权重体现,直线的权重为1,二次贝塞尔曲线的权重为2,三次贝塞尔曲线的权重为3。区域数的权重为1,颜色数的权重为3,颜色的权重要高于区域的权重。这是因为不同的区域可以有相同的颜色,而且矢量图中的颜色数量较多,会让人感觉到视觉上的杂乱,因此颜色数量越多,简单性的度量值就越大。

基于视觉感知对矢量图进行排序。根据式(3)、式(4)、式(6)可以得到3个视觉感知的量化值,并可从每一个维度进行筛选,也可以根据所提算法进行排序,得到矢量图的质量评价。所提算法基于以下3个启发性原则:1)3个量化指标过高或者过低,视觉效果均较差;2)视觉效果好的矢量图,其简单性与连续性往往正相关;3)视觉效果好的矢量图其简单性与精确性往往负相关。通过式(7)将精确度、连续度和简单度综合加权,得到光栅图  $I$  的矢量化效果评价的综合加权值  $f_p(I)$ 。对所有光栅图  $I$  的矢量化综合加权值进行排序,实现对矢量化效果的评价。光栅图  $I$  的矢量化效果评价综合加权值为

$$f_p(I) = \alpha w(i) + \beta w(j) + \gamma w(k), \quad i, j, k \in N \quad (7)$$

其中:  $i, j$  和  $k$  分别为素材库中光栅图  $I$  矢量化精确度的排序、连续度的排序和简单度的排序,  $w(*)$  为分配函数,  $\alpha, \beta, \gamma$  为3个维度的权重。3个原则说明3个量化指标不是彼此独立的,例如,矢量图越简单,区域数越少,线条越简单,连续性度量值越小,与原图的误差越大。

## 3 实验与分析

### 3.1 精确性、连续性和简单性

图5所示为视觉容忍度  $t = 20$  时矢量化的效果。可以看出,误差过高和过低视觉效果都较差。误差越低,越趋向于原图,在一定程度上说明矢量图区域数多,“碎块”现象明显[见图5(b)];误差越高说明丢失的信息越多,如图5(d)中花瓣的颜色与原图不一致。对大量纹饰进行分析的结果表明,纹饰图案在矢量化之后其像素的误差在20%~50%的范围内,均可接受。一般情况下,手工描摹的图像像素误差大于通过算法计算得到的图像误差。



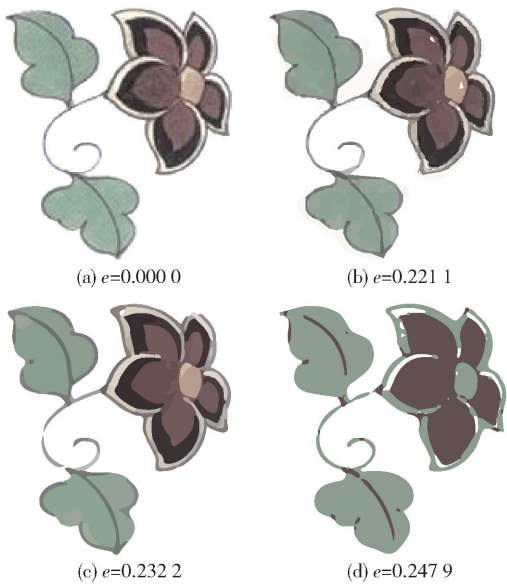


图 5 矢量化精确性评价指标效果图( $t=20$ )

连续性主要体现在矢量图中曲线的形状和曲线交点的曲率. 图 6(a) 所示为以长曲线为主的效果图, 曲线连接处较为平滑, 而图 6(c) 所示的效果图中已经出现了明显的拐点, 让人眼感觉到曲线之间的拼接并不流畅.

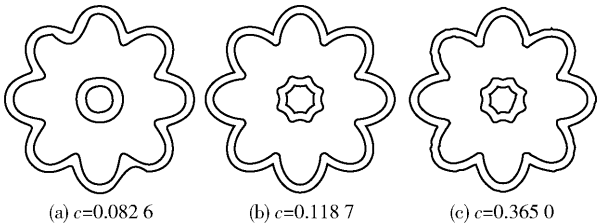


图 6 矢量化连续性评价指标效果图

矢量化评价的简单性反映的是矢量图组成元素的复杂程度, 可通过遍历 DOM 树的节点数量获得. 由图 7 所示的效果图可见, 图案从左到右逐渐变得复杂, 不同的连珠纹在简单性度量上符合视觉上的感知.

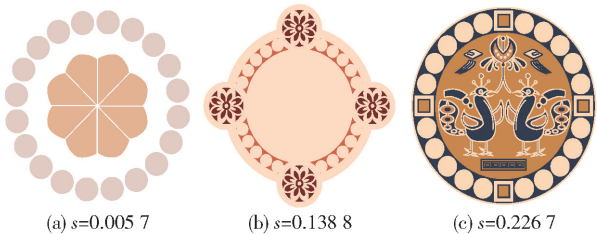


图 7 连珠纹简单性评价指标效果图

3.2 视觉感知排序

根据所提出的 3 个视觉量化指标对素材库中

456 张二值纹饰图像进行了量化计算和排序, 使用 Potrace 工具完成矢量化算法, 视觉感知排序的结果如图 8 所示. 图 8(a) 和图 8(c) 为原图, 图 8(b) 和图 8(d) 分别为视觉感知排序的前 5% 和后 5% 的矢量化结果. 通过放大矢量化结果, 观察图案的边缘可知, 图 8(d) 所示图案的拼接情况较多, 连续性较差, 这说明在二值图案的矢量化中, 人们更关心图案的简单性和连续性, 对这类图案进行排序时可以将误差评价的权重调低.



图 8 二值图案 Potrace 算法矢量化视觉效果图

4 结束语

图像矢量化技术是图像处理领域的重点和难点, 目前矢量化算法工具的鲁棒性不强, 在面对风格迥异的纹饰素材时会产生质量较差的矢量图, 主要表现在算法产生矢量图的曲线连续性差, 拐点多, 区域的碎块化现象明显, 严重影响人们的视觉感官体验效果. 笔者提出了精确性、连续性和简单性 3 个指标, 可用于多任务驱动矢量化系统中矢量图的自动评价、排序和筛选.

参考文献:

[1] Haeberli P. Paint by numbers: abstract image representations[J]. ACM SIGGRAPH Computer Graphics, 1990, 24(4): 207-214.  
[2] DeCarlo D, Santella A. Stylization and abstraction of photographs[J]. ACM Transactions on Graphics, 2002, 21(3): 769-776.

- [3] Adams M D. A flexible content-adaptive mesh-generation strategy for image representation[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2011, 20(9): 2414-2427.
- [4] Li Ping, Adams M D. A tuned mesh-generation strategy for image representation based on data-dependent triangulation[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2013, 22(5): 2004-2018.
- [5] Lu Guojun. Advances in digital image compression techniques[J]. *Computer Communications*, 1993, 16(4): 202-214.
- [6] Liao Zicheng, Hoppe H, Forsyth D, et al. A subdivision-based representation for vector image editing[J]. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2012, 18(11): 1858-1867.
- [7] Zhou Hailing, Zheng Jianmin, Wei Lei. Representing images using curvilinear feature driven subdivision surfaces[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2014, 23(8): 3268-3280.
- [8] Bajaj C, Farin G. Curves and surfaces for computer aided geometric design: a practical guide[J]. *Mathematics of Computation*, 1990, 55(192): 874-884.
- [9] Ferguson J. Multivariable curve interpolation[J]. *Journal of the ACM*, 1964, 11(2): 221-228.
- [10] Sun Jian, Liang Lin, Wen Fang, et al. Image vectorization using optimized gradient meshes[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2007, 26(3): 11-17.
- [11] Lai Yukun, Hu Shimin, Martin R R. Automatic and topology-preserving gradient mesh generation for image vectorization[C] // *ACM SIGGRAPH 2009 Papers on SIGGRAPH'09*. New Orleans: ACM Press, 2009: 85-96.
- [12] Orzan A, Bousseau A, Winnemöller H, et al. Diffusion curves[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2008, 27(3): 1-8.
- [13] Jeschke S, Cline D, Wonka P. Rendering surface details with diffusion curves[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2009, 28(5): 1-8.
- [14] Selinger P. Potrace: a polygon-based tracing algorithm [DB/OL]. (2019-10-17) [2021-04-23]. <http://potrace.sourceforge.net>.
- [15] Zhang Songhai, Chen Tao, Zhang Yifei, et al. Vectorizing cartoon animations[J]. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2009, 15(4): 618-629.
- [16] Kopf J, Lischinski D. Depixelizing pixel art[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2011, 30(4): 1-8.
- [17] Hoshyari S, Dominici E A, Sheffer A, et al. Perception-driven semi-structured boundary vectorization[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2018, 37(4): 1-14.
- [18] Dominici E A, Schertler N, Griffin J, et al. PolyFit: perception-aligned vectorization of raster clip-art via intermediate polygonal fitting[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2020, 39(4): 1-15.
- [19] Favreau J D, Lafarge F, Bousseau A. Fidelity vs simplicity[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2016, 35(4): 1-10.