

风格线条画生成技术综述

刘子奇 刘世光

(天津大学智能与计算学部 天津 300350)

摘要 线条画作为一种简单而有效的视觉传达手段,通过突出主要的细节特征,使得人们可以快速地获得主要信息;同时,风格线条画作为一种艺术形式,让人们能够快速欣赏和理解其艺术特征。文中对线条画的生成方法进行了综述与分析。线条画生成技术可以分为基于 2D 图像的方法与基于 3D 模型的方法。其中,基于 2D 图像的线条画生成技术包括样本学习方法、非样本学习的数据驱动方法与非数据驱动方法;基于 3D 模型线条画生成技术包括图像空间方法、对象空间方法以及两者的混合方法。通过介绍与分析各种方法并对比分析其优缺点,总结了线条画生成技术现阶段存在的问题及其可能的解决方案,并在此基础上对线条画生成的未来发展趋势进行了展望。

关键词 线条画,风格,2D 图像,3D 模型,样本学习,数据驱动

中图分类号 TP391 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2019.07.003

Summary of Stylized Line Drawing Generation

LIU Zi-qi LIU Shi-guang

(College of Intelligence and Computing, Tianjin University, Tianjin 300350, China)

Abstract Line drawing has a great advantage in the transmission of visual information. As a simple and effective means of visual communication, it stresses main features of the details so that people can get the main information quickly. At the same time, stylized line drawing, as an art form, enables people to appreciate and understand their artistic characteristics quickly. Line drawing generation technology can be divided into 2D image-based methods and 3D image-based methods. Line drawing generation technology based on 2D images includes deep learning method and traditional method, which contains data drive method and non-data-driven method. Line drawing generation technology based on 3D model contains image space method, object space method and their blending method. By introducing and analyzing various methods and analyzing the advantages and disadvantages of different methods with comparisons among them, this paper summarized the existing problems of line drawing generation technology and their possible solutions. And on this basis, the future development trend of line painting was prospected.

Keywords Line drawing, Style, 2D image, 3D model, Example-based, Data-driven

1 引言

线条画是一种简单而有效的形状可视化与可视化传达形式,由能够表示物体形状特征的线条组成,可以简单的线条描绘图像的主要特征。图 1 给出 2D 图像的线条画与 3D 模型的线条画的示例,从中可以看出:线条画采用简单的线条形象生动地描绘了图像内容的主要特征,并且在传达主要形状特征的同时具有一定的艺术效果。

线条画由一组简洁的线条组成,在突出主要特征的同时忽略不重要的细节,使得观察者能够快速识别认知图像或 3D 模型的内容;同时,以线条画的形式表示,使得图片或 3D 模型在保留主要特征的同时在存储空间以及时间性能上得到显著的提升。



(a) 2D 图像的线条画

(b) 3D 模型的线条画

图 1 线条画示例^[1-2]

Fig. 1 Examples of line drawing^[1-2]

从艺术形式上讲,线条画对人们来说也是一种艺术作品,线条画的风格属性使其区别于边缘图像。图 2 展示了不同方法生成的线条画效果,其中,图 2(a)—图 2(d)着重于边缘的提取,通过边缘线的提取以及连续性增强等线条优化的方法使其更逼真,并未对风格进行仿真;图 2(e)—图 2(h)专注于线条画风格的模拟,使生成的线条画不仅局限于对边缘的描

到稿日期:2018-08-21 返修日期:2018-12-07 本文受国家自然科学基金(61672375,61170118)资助。

刘子奇(1994—),男,硕士生,主要研究方向为计算机图形学、图像处理;刘世光(1980—),男,博士,教授,博士生导师,CCF 高级会员,主要研究方向为计算机图形学、图像/视频处理、可视化、虚拟现实等,E-mail:lsg@tju.edu.cn(通信作者)。

绘,在传达物体形状特征的同时还表达了一定的艺术效果。



图2 不同风格线条画示例^[3]

Fig. 2 Examples of different styles of line drawing^[3]

2 线条画生成技术概述

如图3所示,线条画生成技术从整体上可以分为基于2D图像的线条画生成与基于3D模型的线条画生成。同时,2D图像的线条画生成包括样本学习方法与非样本学习方法,非样本学习方法又分为基于数据驱动的方法与非数据驱动的方法。样本学习方法与数据驱动的方法专注于线条画风格属性的模拟,通过使用大量数据能够更好地重现线条画的风格;非数据驱动的方法对边缘的检测更准确且易于实现,从Canny边缘检测到高斯差分滤波(DOG),生成的线条画经历了从单纯的边缘到相对光滑且连续的线条的过程;基于流的滤波进一步增强了线条的连续性,减少了断裂、背景线等非期望线条的出现;其他方法提供了不同线条画生成的途径且各有优点。基于3D模型的线条画生成分为图像空间方法、对象空间方法以及两者的混合方法。研究不同方法的优缺点及发展方向对线条画生成技术的发展具有重要意义。

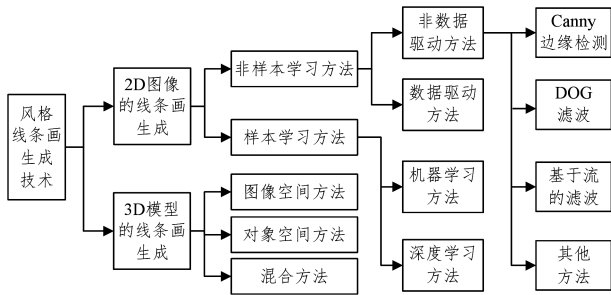


图3 风格化线条画生成方法分类

Fig. 3 Classification of stylized line drawing generation methods

3 2D 图像的线条画生成

3.1 样本学习方法

样本学习方法可以分为机器学习与深度学习。机器学习多应用于人脸线条画的生成,通过对样本数据的学习获得人脸特征的训练模型,并将其应用于测试图像,得到与样本数据风格相似的人脸线条画。而在深度学习方法中,线条画的风格化生成通常作为图像风格迁移的一个特例。

1)机器学习:机器学习方法在线条画生成中具有广泛的

应用。陈洪等^[4]通过训练 Active Shape Mode (ASM)来对人脸特征点进行自动定位,并根据样本计算几何变换,再对给定图像使用训练的 ASM 提取并定位人脸特征点,进行非参数化采样与几何变换后得到期望的线条画。Song 等^[5]提出了一种简单而有效的人脸草图合成方法,其需要对包含照片-素描对的训练数据集进行训练,并且在测试照片和每个训练样本之间执行 K-NN 照片块搜索以用于素描块的选择,并用马尔可夫随机场(MRF)来优化全局素描块选择,将人脸草图合成作为图像去噪问题来解决。Wang 等^[6]在进行块选择时通过组合位置约束与全局约束来进行最近邻搜索,在获得候选图像块后,应用马尔可夫网络生成合成素描,然后利用相同的马尔可夫网络对原始草图和合成草图之间的差进行建模,以补偿高频细节。Liang 等^[7]将输入草图划分为多个块,并对这些局部输入提取边缘描述符,然后基于分割的局部构建全局马尔可夫随机场框架,并基于从一组训练数据中学习的耦合字典为每个局部草图合成一系列候选照片。最后,对 MRF 进行优化,得到每个输入草图块的最终估计的照片块,并以此合成真实的人脸照片。

图4为 Song 等^[5]提出的线条画生成框架,对于测试照片中的每个块,在照片中进行 K-NN 搜索和线性估计,以获得匹配的训练照片块和线性权重(x_1, x_2, \dots, x_k);在素描中使用权重将相应的训练素描块映射到输出块中。

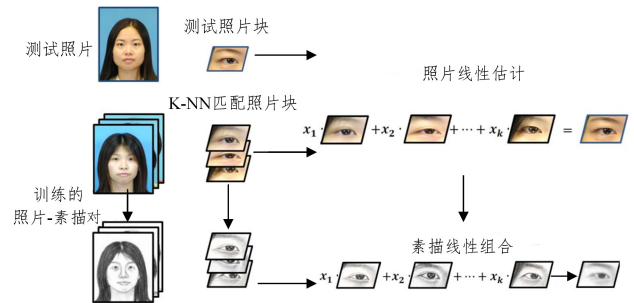


图4 样本学习方法示例^[4]

Fig. 4 Examples of example-based methods^[4]

2)深度学习:基于卷积神经网络(CNN)的深度学习方法通过对大量的样本数据集进行学习来生成与数据集风格对应的线条画。Wang 等^[8]对于风格迁移提出一个多模态卷积神经网络,它考虑了颜色通道和亮度通道的表现,并使用递增的多重损失分层地执行程式化。这种方法不仅可以传递大规模的、明显的风格线索,还可以传递微妙的、精致的风格线索,也就是说可以生成视觉上令人愉悦的结果。由于缺乏显式表示语义信息的图像来将图像内容与样式分离,Gatys 等^[9]使用从优化目标识别的卷积神经网络导出的图像表示,使得高层次的图像信息被显式化;并提出了一种艺术风格的神经网络算法,它可以分离和重组自然图像的图像内容及风格。该算法能够产生高质量的新图像,并将任意照片的内容与众多知名艺术品的外观结合起来。鉴于许多方法集中在艺术风格转移方面,很少限制输出图像的外观,Kaur 等^[10]在不改变原始图像内容的情况下,以真实感的方式将脸部纹理从样式脸部图像转换为内容脸部图像。他们的框架在应用 MRF-CNN

之前增加了预处理工作,采用一种新的脸部语义正则化方法,能够在不改变原始内容的情况下转移面部纹理。

基于样本学习的方法能够生成与训练集风格相似的线条画,对艺术家绘画风格的描绘更加逼真;但其也有一定的局限性,如需要耗费大量时间去训练数据集,训练结果只能用于一类图片、生成一种风格等。

3.2 非样本学习方法

样本学习的方法多用于人脸线条画的生成。相比于样本学习方法,非样本学习方法涉及面广,且更方便快捷。基于非样本学习方法的2D图像线条画的生成通常通过边缘检测等传统滤波方法确定边缘信息,并利用数学方法参数化模拟线条绘制过程以控制线条风格。这类方法可以准确地表示边缘信息,但风格的控制仍显不足;与之相比,数据驱动的方法通过收集艺术家绘画创建艺术家数据库,并通过匹配算法从数据库中选取最匹配的线条,而非参数化地生成线条,能够更好地描绘线条画的风格特征。

3.2.1 非数据驱动方法

图像边缘是像素亮度变化剧烈的区域,即高频区域。非数据驱动的线条画生成通常包含边缘检测与线条生成两个主要步骤,主要包含边缘检测方法、DOG滤波方法、基于流的滤波方法,以及其他方法。

1) Canny边缘检测: Canny算子由于能够准确地检测边缘且具有一定的抗噪性,因此通常被用来进行线条画生成过程中的边缘检测^[11]。Canny边缘检测可以分为4个步骤:高斯模糊,梯度幅值与方向计算,非极大值抑制和滞后边界跟踪。高斯模糊即使用高斯滤波器与图像卷积进行图像去噪。梯度幅值与方向计算为Canny算法的核心,通过每一个点与其相邻点的梯度幅值在其梯度方向上的关系可以进行边缘点的判定,由Sobel算子得出。式(1)和式(2)分别为梯度幅值与方向计算的公式,式(3)和式(4)分别为Sobel算子在 x 与 y 方向上的滤波。非极大值抑制可以剔除局部的非边缘点,并以高低两个阈值分别生成强弱边缘图像。滞后边界跟踪将强弱边缘图像结合生成最终的边缘图像。

$$G = \sqrt{G_x^2 + G_y^2} \quad (1)$$

$$\theta = \arctan(G_y/G_x) \quad (2)$$

$$G_x = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} * I \quad (3)$$

$$G_y = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix} * I \quad (4)$$

其中, G 为梯度幅值, G_x 与 G_y 分别为 x 方向与 y 方向的Sobel梯度幅值, I 为输入图像, θ 为梯度方向与水平方向的夹角。

凌凤彩等^[12]通过设计新的梯度检测算子与非极大值抑制判断条件改进了Canny边缘检测算子,提高了其抗噪性。DeCarlo等^[13]借助Canny算子的鲁棒变异性来进行线条画的生成,他们将图像转化为具有粗边缘和大面积的恒定颜色块的线条图。Kang等^[14]证明了使用改进的Canny边缘检测也能够产生从区域到轮廓的艺术线条图。李瑞龙等^[15]利用

Canny边缘检测提取不封闭的特点对卡通视频进行分割与矢量化,实现了卡通视频的无极缩放。Orzan等^[16]开发了一种基于Canny边缘检测和梯度重建方法的多尺度图像提取系统,该系统能够在不简化形状的前提下删除不必要的细节。Fischer等^[17]使用Canny边缘检测算子与形态学算子在风格化增强现实的工作中获得边缘,并使边缘看起来更连续。梁波等^[18]使用Canny算子检测边缘,并模拟画笔绘制风格化的线条画。

如图5(b)所示,基于Canny边缘检测的方法能够检测到详细的边缘,但其在线条画生成方面存在严重的不足:可能检测到过于详细但不必要的边缘,或某些必要的边缘被忽略。因此,许多研究者选择使用其他的边缘检测器,其中最常用的是DOG滤波器。

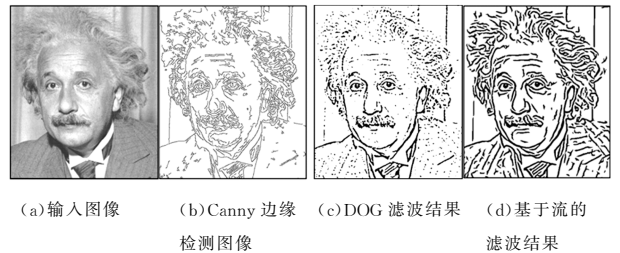


图5 非数据驱动方法的效果比较^[1]

Fig. 5 Comparison among various non-data-driven methods^[1]

2) DOG滤波: DOG滤波图像是两幅高斯图像的差,式(5)和式(6)给出了高斯差分的滤波公式:

$$G(x, u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (5)$$

$$G = G(x, \mu, \sigma_1) - G(x, \mu, \sigma_2) \quad (6)$$

其中, G 为高斯差分滤波器, $G(x, \mu)$ 为高斯函数, σ_1 与 σ_2 分别为两个高斯函数的标准差。

Gooch等^[19]与Marr等^[20]基于DOG滤波提出了一种人脸线图生成方法,其可以从人脸图像中生成具有突出和夸张的面部特征的黑白漫画。Winnemoller等^[21]将DOG滤波应用于线条的绘制,并将其扩展到彩色图像与视频中,通过修改视觉上重要特征(即亮度和颜色)的对比度来抽象图像,并使用各向异性扩散的近似来降低低对比度区域中的对比度,在高对比度区域中人为地增加对比度。Holger等^[22]通过扩展DOG算子实现线条画的生成,并产生多种不同的风格。Rosin等^[23]借助DOG滤波产生由线条和块状区域组成的风格化黑白线图,他们的方法是全自动的,并且可以通过改变一些直观的参数来产生不同的风格特征。

与Canny边缘检测算子相比,基于DOG滤波器的方法能够产生更好的效果。这主要是由于它能更好地捕捉用户感兴趣的区域以产生风格化的线条,并且生成的线条更符合艺术家绘制的钢笔画,能给人留下更为深刻的印象。如图5(c)所示,与Canny边缘检测相比,DOG滤波结果更具有观赏性。当然,DOG滤波也存在很多限制:由于DOG滤波的核是各向同性的,这就导致边缘像素的集合可能不能清楚地揭示出边缘的“方向性”,在某些情况下甚至可能看起来不像线条;除此之外,阈值边缘图可能会存在一些孤立的线条,这些线条构成

了杂乱的输出,尤其是在噪声较强或对比度较弱的区域中。

3)基于流的滤波:针对各向同性滤波器的缺点,Kang等^[21]提出了一种能够从照片中自动生成高质量线条图的基于流的各向异性滤波器。他们从局部图像的特征中自适应地确定滤波器核的形状与方向,以减少线条的断裂并提高线条的连续性;通过输入图像构造边缘流场,称之为边缘切向流(ETF),并以此引导DOG滤波的核,以构建基于流的滤波器。滤波器的形状是由ETF中的局部流来定义的,将其命名为基于流的高斯差分(FDOG)滤波器。FDOG滤波器显著增强了线条的空间连续性,并且有效地抑制了噪声,如图5(d)所示,相比于DOG滤波结果,基于流的滤波结果包含更少的噪声,并且生成的线条更加光滑与连续,因此具有更好的视觉效果。然而,由于FDOG滤波器是建立在DOG基础上的,这种基于流的各向异性滤波器仍存在不足之处,如高对比度的背景会被填充线条,但实际上是不重要的。Kang等^[24]在此基础上进行多次FDOG滤波迭代,进一步加强了线条的连续性。Wang等^[25]在此基础上提出了一种梯度引导的技术,该技术能够检测到具有相似亮度的不同颜色的相邻区域中的视觉显著边缘,并在GPU上实现实时性能。由于FDOG在检测边缘的过程中会产生边缘的误差,导致其检测结果相对于真实边缘总是向外侧偏移。Wang等^[26]提出了一种基于流的滤波方法,其能够得到真实、准确的边缘信息,并且能够提取具有一定宽度的窄线条(具有一定宽度的线条通常检测出两个边缘,窄线条即检测出该线条内的所有像素点而不仅是边缘)。他们针对边缘偏移的问题提出一种边缘定位准确的滤波器来代替DOG滤波器核,使其能够生成具有准确边缘定位的线条;同时,通过在流的方向上应用椭圆掩膜来提取具有一定宽度的线条。之后,Wang等^[27]设计了3种基于流的各向异性滤波器(FGsD,FGaD和FLSM)来提取图像边缘,并将其显示为光滑连续的风格化线条画。

4)其他方法:与基于流的滤波相似,为了提高线条连续性并产生更好的效果,Son等^[28]提出了一种基于局部线拟合的方法来模仿人绘画的过程,其主要思想是提取局部最大可能是真实线条的直线,然后通过似然函数估计的方法找到真实的形状边界。Zhao等^[29]提出了一种基于数学形态学细化的方法,将离散的像素组合成笔画路径,并给出了一种夸张风格线条画的生成方法。罗光蕊等^[30]提出了一种基于小波多分辨率的线条画生成方法,采用小波对灰度图像进行二层小波分解,滤除分解系数中的低频系数进行图像重构,并通过反向、滤波和亮度调整等步骤来模拟手绘风格,其能够有效生成具有一定风格的线条画。Hu等^[31]提出了一种简洁的线条画生成方法,其生成的线条画能够以简单的线条描绘主要特征,他们首先进行灰度图转换和平滑处理,然后通过图像颜色反转、图像混合和最小滤波来增强图像以使边缘更易于提取,最后使用边缘细化和边缘线跟踪来生成线条画。Tsai等^[32]则通过最短路径计算得到用户涂鸦区域所对应的线条画。与基于流的滤波等方法相比,这些方法在保持线条连续性的同时能够描绘更多的风格特征,在艺术表现上更具感染力。

不同的线条画生成方法具有不同的特点,基于边缘检测的方法能够准确地检测出线条但依赖于梯度,生成的线条画可能过于详细或简单;DOG滤波等方法能捕捉用户更感兴趣的线条,但线条可能出现不连续、断裂等问题;基于流的滤波方法产生的线条更连续,但其风格表现单一;其他的方法能取得较好的效果,并且风格更丰富,但其风格仍然不足,只能由参数唯一确定。

图5给出了不同方法在不同方面的比较,其中Canny边缘检测准确,但效果很差;DOG滤波效果较好,但线条非常离散,连续性很差;基于流的滤波生成的线条则更为连续。

表1对各种方法的优缺点进行了归纳分析。从表1中可以看出,Canny边缘检测能够准确地检测边缘,但在风格以及线条的连续性方面表现较差;DOG滤波与基于流的滤波检测到的线条会偏离真实边缘,具有一定的风格特征,线条也相对更连续,其中基于流的滤波方法得到的线条更连续、效果更好。

表1 非数据驱动方法的对比

Table 1 Comparison of non-data-driven methods

方法	边缘精确度	风格	线条连续性	是否检测窄线条	效果
Canny	高	较少	较差	否	较差
DOG滤波	部分偏差较大	简单	较差	否	较好
基于流的滤波	部分偏差较大	简单	较强	部分有	好

3.2.2 数据驱动方法

由于非数据驱动的方法自动或半自动地生成线条画,均使用参数来控制风格,很难灵活、生动地控制风格,只能通过改变参数来改变风格,这使得风格的变化不够丰富。

数据驱动的方法可以很好地解决上述问题,如图6所示,数据驱动的方法通过边缘检测与脸部变形,将数据库中的线条与边缘线匹配,从而得到艺术线条画。Cole等^[33]研究了手工绘画的特点,考虑艺术家对局部性质的描述,并创建了一个公开的数据集。Meredith等^[34]专注于人脸特征的研究,并描述了一个人脸的数据集。Berger等^[3]通过艺术家手绘收集线条并创建数据库,通过研究人脸形变特征检测边缘并改变边缘的位置,之后在线条数据库中搜索与边缘匹配的线条并用其替换原来的边缘,最终生成与艺术家手绘相似的人脸肖像画。Zhang等^[35]提出了一种数据驱动的方法从彩色照片生成风格化的肖像画,得到的结果自然真实,具有一定的吸引力。Bento等^[36]将这种方法推广到视频,提出了一种视频线条画的生成方法。

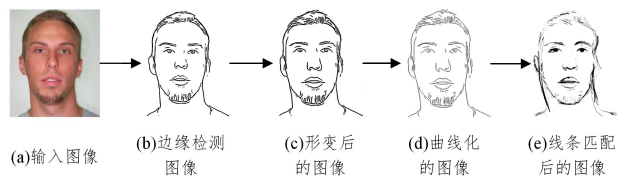


图6 数据驱动方法的流程^[3]

Fig. 6 Flow of data-driven approach^[3]

数据驱动的方法通过收集艺术家的绘画制作笔画库,只需通过图像计算出线条的位置,将库中的笔画进行匹配便能够得到具有艺术家风格的线条画。由于绘制的线条是从库中匹配的,其来源于艺术家的手绘作品,因此天然地表示了艺术家的风格,生成的线条画风格丰富,与真实艺术家的绘画极其相似,甚至能达到以假乱真的效果。如图 7 所示,相比于其他传统方法,数据驱动的方法生成的线条画具有更丰富的风格特征描绘。但其仍存在缺点:需要先进行数据集的收集与制作,这将耗费大量的时间,且具有较高的复杂性。由于风格描绘具有自然逼真的特性,在今后的发展中,该类方法将具有很好的应用前景。在制作线条画时,选择合适的方法,在效率与风格的真实性上取得平衡,是值得考虑的。

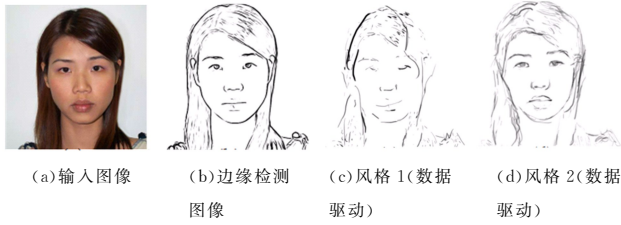


图 7 数据驱动方法与非数据驱动方法的风格对比^[3]

Fig. 7 Comparison of the style between data driven method and non data driven method^[3]

表 2 对比分析了样本学习方法与非样本学习方法中的数据驱动以及非数据驱动方法。从表 2 中可以看出,非数据驱动方法的时间花费与复杂性都很低,边缘检测精度高且应用范围广,然而其风格仍较为简单;而数据驱动与样本学习方法风格表示很丰富,其中数据驱动方法风格表示更为丰富,两者的不足之处在于时间消耗与复杂度均较高,边缘检测精度低且应用场景单一。

表 2 2D 图像线条画生成方法的对比

Table 2 Comparison of various methods for generating line drawing in 2D images

方法	边缘精确度	风格	时间效率	复杂性	应用范围	效果
非数据驱动	很高	简单	很高	较低	应用广泛	较好
数据驱动	较低	很丰富	较低	较高	应用数据单一	很好
样本学习	较低	丰富	较低	较高	应用数据单一	较好

4 3D 模型的线条画生成

3D 物体的形状通常是由低层的几何元素(如表面上的点或顶点)来明确表示的,其坐标是已知的,因此 3D 模型的线条画生成问题可以归结为重要轮廓的识别问题。这里将 3D 模型的线条画生成方法分为 3 类:基于图像空间的方法、基于对象空间的方法,以及将两者进行结合的混合方法。

对于 3D 模型的线条画生成,本文将在 3D 网络的研究方向上探讨线条提取算法。对于 3D 模型轮廓的计算,目前已有各种不同的算法,这些方法可以分为图像空间算法与对象空间算法两大类^[2,37]。同时,这两种方法的混合方法在对象空间中执行一些操作,但线条最终只会出现在帧缓冲区中。本文将重点放在轮廓(如形状、折痕和阴影轮廓等)上,并分别

对其进行介绍与分析。

4.1 图像空间方法

图像空间方法通常渲染诸如深度图或余弦阴影模型之类的事物,然后仅在图像缓冲器上提取线,并将其在像素矩阵中表示为轮廓特征。Saito 等^[38]使用零缓冲器以及 Sobel 等利于检测轮廓线等物体边缘的边缘检测算子来进行线的提取。Hertzmann 等^[39]则通过使用一个正常的缓冲区来改进这一方法。

也有一些方法从轮廓像素中提取曲线,如 Loviscach 提出的使用适合像素的 Bezier 曲线拟合提取轮廓曲线^[40]。对于每个像素,它们存储其基础几何的法线向量的深度和方向。然而,将曲线拟合到轮廓的过程可能会引入新的阴影并且不精确。

Raskar 等^[41]提出了一种新颖的 NPR 相机,它使用多闪光图像检测深度边缘。通过使用阴影邻接深度不连续的位置作为鲁棒的线索,在静态场景和动态场景中创建深度边缘图,可以突出检测到的特征,抑制不必要的细节或从多个图像中组合特征。所得到的图像能够更清晰地传达成像场景的 3D 结构,并且该方法简单、计算效率高。

Lee 等^[42]提出了一种从抽象阴影中提取线的方法,其沿着阴影区域中的薄暗区域或色调边界渲染线条。由此算法生成的线图能够有效地传达形状和材料信息。

图像空间方法相对简单,并且能够快速实现,同时提供了一些与视图相关的细节级别的概念。然而,这种方法难以控制外观,轮廓不能以分析线描述结果的形式获得,且通常不能风格化表示或用于进一步处理。

4.2 对象空间方法

对象空间方法通过在对象空间中执行所有计算,并提供由解析描述表示的结果线条,来满足将风格应用到线条的要求。Buchanan 等^[43]使用一种被称为边缘缓冲器的数据结构来进行轮廓边缘的检测。该算法计算出显著的轮廓,并检查每个边缘是否具有一个相邻的正面和一个相邻的背面。刘军等^[44]针对表面粗糙、富含噪声的文物三维模型,使用基于视觉依赖曲率的估算提取文物模型的视觉轮廓线,在保留更多细节的同时减少了噪声线条。McGuire 等^[45]提出了用于从三维网格中提取轮廓的 GPU 硬件方法,并展示了如何使用硬件来创建由相邻的粗线段表示的厚屏幕空间轮廓。

同时,有大量的研究者在研究加速技术,试图缩短运行时间。Sander 等^[46]提出了一种用于轮廓边缘检测的通用方法,该方法构造了一棵分层搜索树来存储网格的边缘。另一种有效的加速技术涉及 Gooch 等使用的高斯映射^[47],Benichou 等^[48]与 Hertzmann 等^[49]同样研究了这一技术。在这种方法中,每个网格边缘都对应于高斯球上的圆弧,它连接两个相邻多边形的法线投影。最适合于交互式系统的一种加速技术是由 Buchholz 等^[50]提出的,他们使用一个随机算法来获得轮廓,并通过观察得出多边形模型中只有几个边缘是实际的轮廓边缘。

在过去的十几年中出现了对对象空间线的大量不同定义,包括由 DeCarol 等^[51]提出的阴影轮廓、Ohtake 等^[52]提出

的岭谷线、Judd等^[53]提出的明显脊线、RuxunWiCz等^[54]提出的启发性亮点、Xie等^[55]提出的光极值线(PELs),以及Kolomenkin等^[56]提出的标定曲线等。Cole等证明了不同的线条簇应该被组合起来,以有效地描绘各种各样的形状^[57]。基于此,Grabli等^[58]定义了一种新的数据结构,其通过结合几何、拓扑以及特征线上找到的其余属性,使得样式属性模块中的场景属性值便于查询,特征线更便于操作;同时,它们的实现不限于给定的一组线条;并且可以很容易地扩展,以包括新类型的线。

对象空间方法往往更复杂一些,需要更长的时间来计算,并且它们更难以发挥图形硬件的优势。但是它们提供了对风格的良好控制,并且通常能够产生高度精确的可视性信息。

4.3 混合方法

混合方法在对象空间中执行操作,在图像缓冲器中产生线条,它使用零缓冲器以或多或少的渲染修改多边形,这通常需要两个或多个渲染通道。结果与图像空间算法相似,即轮廓在像素矩阵中表示。

混合算法的使用场景较少,并且专门用于等高线等方面。Raskar等^[59]提出了一种绘制轮廓边缘的硬件加速方法,他们沿正面或背面使用传统的零缓冲器来分别自动确定正面和背面的多边形。此外,Raskar等^[60]还提出了一种单通道硬件实现方法,在每个三角形周围添加边界,同时通过使用环境映射达到风格化的效果。

由于缺乏连通性信息,现有的基于多边形的轮廓生成算法大多不能应用于基于点的模型。Xu等^[61]提出了一种新的生成轮廓的方法,其不仅绕过了连通性要求,而且适应具有稀疏非均匀采样和不精确/不正常信息的点模型。这种方法在第一次传递中将点作为放大的不透明区域来获得可视性掩码,而在第二次传递中将点作为常规大小的区域。通过这种方式,轮廓边界可以被自动描绘。

这些算法通常是对结果的更高程度的控制,但是轮廓线是具有像素分辨率的,不利于进一步的风格化,并且由于零缓冲器的分辨率有限,算法可能存在一些数值上的问题。

5 线条画评估方法

线条画生成是非真实感绘制的一种,它不仅描绘了物体的形状等特征,还表达了一定的艺术特征。因此,线条画的评价方法包括技术方面的评估方法和艺术方面的评估方法。

5.1 技术方面的评估方法

线条画中的线条表示物体的轮廓、边缘信息,而线条画本身又是物体的形状特征。因此,在技术方面,线条画的评估可以归结为线条对物体形状特征的表现。

1)边缘检测准确率:线条画通常对应原始图像的边缘信息,因此,边缘检测的准确率是评估线条画的一个量化指标。Tsai等^[30]提出了一种基于用户指导的线条画绘制方法,并通过Precision,Recall,F-measure 3个指标来衡量边缘检测的准确度。Precision是正确率,由提取出的正确边缘的数量与提取出的边缘总数量的比值确定,它表示生成的线条画中准确边缘所占的比例;Recall是召回率,由提取出的正确边缘数量

与图像中的总边缘数量的比值确定,它表示生成的线条画所能检测到图像中边缘的比例;鉴于前两个指标有时会出现矛盾的情况,F-measure综合考虑它们并通过加权调和平均进行计算。

2)物体识别的准确性:线条画作为一种简单有效的形状可视化手段,必须易于识别。Gooch等^[16]针对人脸肖像画和漫画,结合心理学学习方法对用户进行测试,评估用户对真实图像以及肖像画、漫画的识别准确度和速度。通过让用户识别不同的人脸来评估不同人脸表达方法的识别效果。这种方法通过用户对线条画及原图的识别对比来表示线条画对物体形状特征的传达,能够对线条画的形状可视化效果进行可靠的评估。

针对人脸线条画的可识别性,郑海东等^[62]提出了一种基于法向信息和认知的人脸风格线条画客观评估方法。他们通过评估线条画的法向与真实法向之间的差距来确定线条对人脸模型的描述和表达程度,并在人脸表情、正面人脸识别、侧面人脸识别等多个方面结合心理学来评估人脸线条画在认知方面的效果。

5.2 艺术方面的评估方法

线条画作为一种艺术表现形式,人们能够评价其美学属性。然而,人们对艺术的评价各不相同,不同的人有不同的审美观,即使同一个人绘制同一幅图像也不会出现两个完全相同的结果。因此,在艺术方面很难以一个统一的定量指标来评估线条画的艺术性。有学者研究过非真实感图像艺术性的定量评价,并给出了可能的解决方案。下面将从客观与主观两方面来讨论线条画的艺术评估方法。

1)艺术性的主观评估:通常情况下,研究者针对要解决的问题,在某一方面通过对比实验来有针对性地说明其算法在艺术上的突出点。除此之外,最常用的艺术评估方法便是用户调查:选定满足某种条件的参与者参与到实验中,让用户根据自身的主观判断来对线条画的艺术性进行优劣判断和打分,通过问卷调查等方法来证明算法的优势。用户调查的方法能够在一定程度上对线条画的艺术性进行评估,但因调查用户审美的不同也可能存在差异。对于这种情况,可以通过增加调查用户的数量来得到更全面的数据,或者选择具有一定艺术水平的画家或艺术家来作为调查对象。

2)艺术性的客观评价:对非真实感绘制艺术性进行量化的客观评价是一个重大挑战,Salesin等将NPR如何生成与手绘完全一致的结果列为NPR的7个重大挑战之一^[63-64],但仍有学者致力于这一方面的研究。为了探索非真实感图像的客观量化指标,Hertzmann等^[65]从研究艺术家如何创作图像以及观察者如何回应艺术形象这两个方面来阐述NPR的艺术理论,并对当前艺术量化评价的问题进行了分析,指出了量化评估的必要性及其实现的难点。同时,他们将艺术性的量化评估转化为一种优化理论,将图像的创建生成表达为“优化观众的反应”,基本假设可以表述为:艺术家根据艺术媒介的约束创建图像,以在观察者中使期望的视觉响应最大化。可以将人类视觉系统的响应 r 建模为刺激 s 的映射:

$$r=V(s) \quad (7)$$

然后将量化问题优化为刺激 s 的寻找问题,以最小化 $V(s)$ 和期望响应 r_0 之间的差异:

$$\min d(r_0, V(s)) \quad (8)$$

通过这种量化方法,Goodwin 等^[66]将艺术家使用的线条粗细这一量化指标作为刺激,寻找最适应的响应,以量化线条画的艺术性。而最小化差异的寻找依赖于实际经验,如真实的线条画和绘画中线条宽度与图像特征的关系。

这种方法通过对特定刺激(艺术方面)的优化理论转化来进行线条画艺术性的量化评估,但其实际应用依赖于对艺术的经验评价,且没有一种通用的艺术性量化指标。探寻一种通用的线条画客观量化方法,将是一个非常具有意义的挑战。

6 存在的问题与未来发展趋势

目前风格线条画生成方法仍存在诸多问题,本节将对其存在的不足之处和未来发展趋势进行讨论。

1) 现有方法无法从观察者的角度提取用户想要的线条,如背景中的高对比度区域,这些线条可能对于观察者是可以忽略的但没有被舍弃,从而影响观察者对整体的欣赏。这主要是由于整幅图像使用相同的参数或阈值进行处理,这对某些区域来说是合适的,而对另一些区域可能并不合适,以至于产生某些边缘信息缺失或过于详细的问题。该问题可以根据用户的需要智能地选择细节线条的取舍来解决,使线条画传达对用户最有用的信息,对不重要的细节自动舍弃。一种可能的解决方案是探索一种自适应的参数生成方法,根据局部区域自动生成合适的参数和阈值以指导线条的提取;另一种可能的解决方案是通过研究人类的视觉机制,在生成线条画的过程中根据人类视觉的特性突出视觉上重要的区域,对该区域进行详细的描绘,同时,对人类视觉不易观察到的区域进行线条的简化。通过这种方法生成的线条画能够尽可能地迎合观察者的审美,进而使用户能够得到他们想要的线条画。而显著性检测作为一种普遍使用的视觉感兴趣区域的提取方法,可以检测出对观察者有意义的区域。在未来,可以通过在线条画的生成过程中应用显著性检测来确定线条的清晰度、密度、强度等特征,进而使对观察者更有意义的线条更突出,没有意义的线条被舍弃,从而得到视觉上有意义的线条画。

2) 在 2D 图像的非数据驱动方法中,线条画的风格控制仍然不足,其在一定程度上可以具有一定的风格,但难以达到数据驱动方法那样真实而生动的风格。而数据驱动的方法要求先绘制大量的线条画作为数据库元素,这本身就需要繁杂的手绘工作。因此,需要探索一种不需要手绘线条画作为输入数据的线条画生成方法,仅通过参数控制即可迅速生成与真实绘画风格相似的线条画。针对这一问题,一种可能的解决方案是通过研究艺术家绘画的特点,考虑多方面因素(如下笔位置、笔画强度、笔画重叠度等),构建某种风格线条画的生成框架,模拟艺术家绘画的过程来绘制线条画,而不是仅通过滤波的方法处理图像。

3) 通常情况下,一根线条因为具有一定的宽度而被检测出两个边缘,但是其在真实的绘画中是可以一笔画出的。对于具有一定宽度但需要一笔绘出的线条,仅绘制一根线条而

不是在两侧边缘各画一条。目前的方法多是通过阈值来设置提取线条的最大宽度,能够提取阈值内的所有线条,但其灵活性较差,可能在线条中心产生空白区域,并且由于线条粗细不同,可能产生丢失或误判。例如,Wang 等^[26]为了提取这种具有一定宽度的线条,使用一个椭圆掩膜来计算像素点是否在线条内,他们对每一个像素点将椭圆掩膜的短轴对齐于该点流的方向,椭圆中心在该像素点位置,然后计算该点与掩膜内点的相似度的和,通过该和来确定该点是否在线条内部。这种方法能够提取的线条的最大宽度依赖于掩膜的半径,灵活性较差,当图像中存在不同宽度的线条时很难选取一个合适的半径来适用于所有的线条,通常会造有的线条没有提取出来,或两条距离较近的线条被误提取为一条线条的错误。因此,需要一种能够准确提取窄线条的方法,在算法中自适应阈值提取窄线条,或通过交互式操作提取用户满意的线条,均可以作为参考方法。

结束语 风格线条画生成技术通过生成具有一定风格的线条画,使人们能够在识别图像主要信息的同时欣赏风格线条画所表达的艺术风格。目前国内外研究者对风格线条画生成技术进行了广泛的研究,本文对这些技术进行了系统梳理与分析,从 2D 图像与 3D 模型角度分别介绍了风格线条画生成的方法。本文对样本学习与非样本学习、数据驱动与非数据驱动的 2D 图像线条画生成方法分别进行分析与总结,并对比分析了其优缺点。对图像空间方法、对象空间方法以及混合方法的 3D 模型的线条画生成方法进行了研究与讨论。同时,对线条画的技术与艺术方面的评估方法进行了分析与探讨。最后,对目前线条画生成技术存在的问题和未来的发展趋势进行了总结与展望。

参考文献

- [1] KANG H, LEE S, CHUI C K. Coherent Line Drawing[C]// International Symposium on Non-Photorealistic Animation and Rendering. New York, NY, USA: ACM, 2007: 43-50.
- [2] ISENBERG T, FREUDENBERG B, HALPER N, et al. A Developer's Guide to Silhouette Algorithms for Polygonal Models [J]. IEEE Computer Graphics & Applications, 2003, 23(4): 28-37.
- [3] BERGER I, SHAMIR A, MAHLER M, et al. Style and Abstraction in Portrait Sketching[J]. ACM Transactions on Graphics, 2013, 32(4): 1-12.
- [4] CHEN H, ZHENG N N, XU Y Q, et al. Image Line Drawing Generation System Based on Sample Learning[J]. Journal of Software, 2003, 14(2): 202-208. (in Chinese)
陈洪, 郑南宁, 徐迎庆, 等. 基于样本学习的人像线条画生成系统 [J]. 软件学报, 2003, 14(2): 202-208.
- [5] SONG Y B, BAO L C, YANG Q X, et al. Real-Time Exemplar-Based Face Sketch Synthesis [C]// European Conference on Computer Vision. Berlin Heidelberg, Springer, 2014: 800-813.
- [6] WANG N N, ZHANG S C, GAO X B, et al. Unified Framework for Face Sketch Synthesis[J]. Signal Processing, 2017, 130: 1-11.
- [7] LIANG Y, SONG M, XIE L, et al. Face Sketch-to-Photo Syn-

- thesis from Simple Line Drawing[C]// Signal & Information Processing Association Summit and Conference. Washington, DC, USA; IEEE, 2012; 1-5.
- [8] WANG X, OXHOLM G, ZHANG D, et al. Multimodal Transfer: a Hierarchical Deep Convolutional Neural Network for Fast Artistic Style Transfer[C]// Computer Vision and Pattern Recognition. Washington, DC, USA; IEEE, 2017; 7178-7186.
- [9] GATYS L A, ECKER A S, BETHGE M. Image Style Transfer Using Convolutional Neural Networks[C]// Computer Vision and Pattern Recognition. Washington, DC, USA; IEEE, 2016; 2414-2423.
- [10] KAUR P, ZHANG H, DANA K J. Photo-Realistic Facial Texture Transfer[J]. arXiv:1706.04306, 2017.
- [11] CANNY J. A Computational Approach to Edge Detection[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 1986, 8(6): 679-698.
- [12] LINE F C, KANG M, LIN X. Improved Canny Edge Detection Algorithm[J]. Journal of Computer Science, 2016, 43(8): 309-312. (in Chinese)
凌凤彩, 康牧, 林晓. 改进的 Canny 边缘检测算法[J]. 计算机科学, 2016, 43(8): 309-312.
- [13] DECARLO D, SANTELLA A. Stylization and Abstraction of Photographs[J]. ACM Transactions on Graphics, 2002, 21(3): 769-776.
- [14] KANG H W, CHUI C K, CHAKRABORTY U K. A Unified Scheme for Adaptive Stroke-Based Rendering[M]. New York: Springer-Verlag, 2006; 814-824.
- [15] LI R L, LIANG Y, ZHANG S H. Cartoon Video Segmentation and Vectorization Based on Canny Optimization[J]. Journal of Computer Science, 2017, 44(8): 27-30. (in Chinese)
李瑞龙, 梁缘, 张松海. 基于 Canny 优化的卡通视频分割与矢量化[J]. 计算机科学, 2017, 44(8): 27-30.
- [16] ORZAN A, BOUSSEAU A, BARLA P. Structure-Preserving Manipulation of Photographs[C]// International Symposium on Non-Photorealistic Animation and Rendering. New York, NY, USA; ACM, 2007; 103-110.
- [17] FISCHAR J, BARTZ D, STRABER W. Stylized Augmented Reality for Improved Immersion[C]// Virtual Reality. Washington, DC, USA; IEEE, 2005; 195-202.
- [18] LIANG B, DAI F, ZHAO F Q. Images Line Drawings Generation by Edge Tracking Algorithm[J]. Journal of Image & Graphics, 2011, 16(11): 2074-2080. (in Chinese)
梁波, 戴芳, 赵凤群. 边缘跟踪算法的图像线条画生成[J]. 中国图象图形学报, 2011, 16(11): 2074-2080.
- [19] GOOCH B, REINHARD E, GOOCH A. Human Facial Illustrations: Creation and Psychophysical Evaluation[J]. ACM Transactions on Graphics, 2004, 23(1): 27-44.
- [20] MARR D, HILDRESH E. Theory of Edge Detection[J]. Proceedings of the Royal Society of London, 1980, 207(1167): 187-217.
- [21] WINNEMOLLER H, OLSEN S C, GOOCH B. Real-Time Video Abstraction[C]// ACM SIGGRAPH. New York, NY, USA; ACM, 2006; 1221-1226.
- [22] WINNEMOLLER H, KYPRIANIDIS J E, OLSEN S C. XDoG: An Extended Difference-of-Gaussians Compendium Including Advanced Image Stylization[J]. Computers & Graphics, 2012, 36(6): 740-753.
- [23] ROSIN P L, LAI Y K. Artistic Minimal Rendering with Lines and Blocks[J]. Graphical Models, 2013, 75(4): 208-229.
- [24] KANG H, LEE S, CHUI C K. Flow-Based Image Abstraction [J]. IEEE Transactions on Visualization & Computer Graphics, 2009, 15(1): 62-76.
- [25] WANG S D, MA Z Y, LIU X H, et al. Coherence-Enhancing Line Drawing for Color Images[J]. Science China Information Sciences, 2013, 56(11): 1-11.
- [26] WANG S D, WU E, LIU Y Q, et al. Abstract Line Drawings from Photographs Using Flow-Based Filters[J]. Computers & Graphics, 2014, 36(4): 224-231.
- [27] WANG S D, LIU X H, CHEN Y Y, et al. Abstract Line Drawing Generation Based on Characteristic Flow[J]. Journal of Computer Science, 2014, 37(3): 611-620. (in Chinese)
王山东, 刘学慧, 陈彦云, 等. 基于特征流的抽象线条画绘制[J]. 计算机学报, 2014, 37(3): 611-620.
- [28] SON M, KANG H, LEE Y, et al. Abstract Line Drawings from 2D Images[C]// Pacific Conference on Computer Graphics and Applications. Washington, DC, USA; IEEE, 2007; 333-342.
- [29] ZHAO J X, LI X H, CHONG F. Abstract Line Drawings from 2D Images Based on Thinning[C]// Congress on Image and Signal Processing. Washington, DC, USA; IEEE, 2008; 466-470.
- [30] LUO G R, SU H G. Method of Line-Drawing Generation Based on Wavelet Multiresolution Analysis[J]. Computer Engineering & Design, 2010, 31(17): 3848-3851. (in Chinese)
罗光蕊, 苏鸿根. 基于小波多分辨率分析的线条画生成方法[J]. 计算机工程与设计, 2010, 31(17): 3848-3851.
- [31] HU G W, WEI F. Intelligent Clean Line Drawing[C]// International Conference on Robots & Intelligent System. Washington, DC, USA; IEEE, 2016; 217-220.
- [32] TSAI H C, LEE Y H, LEE R R, et al. User-Guided Line Abstraction Using Coherence and Structure Analysis[J]. Computational Visual Media, 2017, 3(2): 1-12.
- [33] COLE F, GOLOVINSKIY A, LIMPAECHER A, et al. Where Do People Draw Lines? [J]. ACM Transactions on Graphics, 2008, 27(3): 1-11.
- [34] MINEAR M, PARK D C. A Lifespan Database of Adult Facial Stimuli[J]. Behavior Research Methods, Instruments, & Computers, 2004, 36(4): 630-633.
- [35] ZHANG Y, DONG W M, MA C, et al. Data-Driven Synthesis of Cartoon Faces Using Different Styles[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2017, 26(1): 464-478.
- [36] BEN-ZVI N, BENTO J, MAHLER M, et al. Line-Drawing Video Stylization[J]. Computer Graphics Forum, 2016, 35(6): 18-32.
- [37] RUSINKIEWICZ S, COLE F, DECAROL D, et al. Line Drawings from 3D Models[C]// ACM SIGGRAPH. New York, NY, USA; ACM, 2008; 1-3.
- [38] SAITO T, TAKAHASHI T. Comprehensible Rendering of 3-D

- Shapes[J]. *Computer Graphics*, 1990, 24(4):197-206.
- [39] HERTAMANN A. Introduction to 3D Non-Photorealistic Rendering: Silhouettes and Outlines[C] // ACM SIGGRAPH. New York, NY, USA; ACM, 1999:1-14.
- [40] LOVISCACH J. Rendering Artistic Line Drawings Using Off-the-Shelf 3-D Software [C] // Eurographics. Washington, DC, USA; IEEE, 2002:125-130.
- [41] RASKAR R, TAN K H, FERIS R, et al. Non-Photorealistic Camera: Depth Edge Detection and Stylized Rendering Using Multi-Flash Imaging[C] // ACM SIGGRAPH. New York, NY, USA; ACM, 2004:679-688.
- [42] LEE Y, LEE S, MARKOSIAN L, et al. Line Drawings via Abstracted Shading [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2007, 26(3):18-23.
- [43] BUCHANAN J W, SOUSA M C. The Edge Buffer: A Data Structure for Easy Silhouette Rendering [C] // International Symposium on Non-Photorealistic Animation and Rendering. New York, NY, USA; ACM, 2000:39-42.
- [44] LIU J, ZHOU M Q, GENG G H, et al. Drawing Method of Cultural Line Map Based on Visual Curvature Estimation[J]. *Journal of Computer Science*, 2017, 44(S2):244-250. (in Chinese)
刘军,周明全,耿国华,等.基于视觉曲率估算的文物线图绘制方法[J]. *计算机科学*, 2017, 44(S2):244-250.
- [45] MCGUIRE M, HUGHES J F. Hardware-Determined Feature Edges[C] // International Symposium on Non-Photorealistic Animation and Rendering. New York, NY, USA; ACM, 2004:35-47.
- [46] SANDER P V, GU X F, HOPPE H, et al. Silhouette Clipping [C] // ACM SIGGRAPH. New York, NY, USA; ACM, 2000:327-334.
- [47] GOOCH B, SLOAN P P J, GOOCH A, et al. Interactive Technical Illustration[C] // ACM SIGGRAPH. New York, NY, USA; ACM, 1999:31-38.
- [48] BENICHOU F, ELBER G. Output Sensitive Extraction of Silhouettes From Polygonal Geometry[C] // Pacific Conference on Computer Graphics and Applications. Washington, DC, USA; IEEE, 1999:60-70.
- [49] HERTZMANN A, ZORIN D. Illustrating Smooth Surfaces [C] // ACM SIGGRAPH. New York, NY, USA; ACM, 2000:517-526.
- [50] BUCHHOLZ H, DOLLNER J, NIENHAUS M, et al. Real-Time Non-Photorealistic Rendering of 3D City Models [C] // ACM SIGGRAPH. New York, NY, USA; ACM, 2005:83-88.
- [51] DECAROL D, FINKELSTEIN A, RUSINKIEWICZ S, et al. Suggestive Contours for Conveying Shape[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2003, 22(3):848-855.
- [52] OHTAKE Y, BELYAEV A, SEIDEL H P. Ridge-Valley Lines on Meshes via Implicit Surface Fitting[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2004, 23(3):609-612.
- [53] JUDD T, DURAND F, ADELSON E. Apparent Ridges for Line Drawing[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2007, 26(3):19-26.
- [54] DECAROL D, RUSINKIEWICZ S. Highlight Lines for Conveying Shape[C] // International Symposium on Non-Photorealistic Animation and Rendering. New York, NY, USA; ACM, 2007:63-70.
- [55] XIE X X, HE Y, TIAN F, et al. An Effective Illustrative Visualization Framework Based on Photic Extremum Lines (PELs) [J]. *IEEE Transactions on Visualization & Computer Graphics*, 2007, 13(6):1328-1335.
- [56] KOLOMENKIN M, SHIMSHONI I, TAL A. Demarcating Curves for Shape Illustration[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2008, 27(5):1-9.
- [57] COLE F, SANIK K, DECAROL D, et al. How Well do Line Drawings Depict Shape? [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2009, 28(3):1-9.
- [58] GRABLI S, TURQUIN E, et al. Programmable Rendering of Line Drawing from 3D Scenes[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2010, 29(2):1-20.
- [59] RASKAR R, COHEN M. Image Precision Silhouette Edges [C] // ACM SIGGRAPH. New York, NY, USA; ACM, 1999:135-140.
- [60] RASKAR R. Hardware Support for Non-Photorealistic Rendering [C] // ACM SIGGRAPH. New York, NY, USA; ACM, 2001:41-47.
- [61] XU H, NGUYEN M X, YUAN X R, et al. Interactive Silhouette Rendering for Point-based Models [C] // Eurographics. Washington, DC, USA; IEEE, 2008:13-18.
- [62] ZHENG H D. Evaluation Method of Face Stylized Rendering [D]. Jinan: Shandong University, 2015. (in Chinese)
郑海东.人脸风格化绘制评估方法[D]. 济南:山东大学, 2015.
- [63] SALSIN D H. Non-Photorealistic Animation & Rendering: 7 Grand Challenges [C] // International Symposium on Non-Photorealistic Animation and Rendering. New York, NY, USA; ACM, 2002.
- [64] GOOCH B S, GOOCH A A, JI L, et al. Viewing Progress in Non-Photorealistic Rendering Through Heinelein's Lens [C] // International Symposium on Non-Photorealistic Animation and Rendering. New York, NY, USA; ACM, 2010:165-171.
- [65] HERTAMANN A. Non-Photorealistic Rendering and the Science of Art [C] // International Symposium on Non-Photorealistic Animation and Rendering. New York, NY, USA; ACM, 2010:147-157.
- [66] GOODWIN T, VOLLIK I, HERTZMANN A. Isophote Distance: A Shading Approach to Artistic Stroke Thickness [C] // International Symposium on Non-Photorealistic Animation and Rendering. New York, NY, USA; ACM, 2007:53-62.