

8-20-2020

Method for Auto-generating Cartoon Based on A Set of Portrait Dictionary

Jingjing Sun

1. School of Film and TV Arts and Technology, Shanghai University, Shanghai 200072, China;;

Jiajun Yu

2. School of Engineering and Computer Science, Shanghai University, Shanghai 200072, China;

Li Bei

1. School of Film and TV Arts and Technology, Shanghai University, Shanghai 200072, China;;

Zhifeng Xie

1. School of Film and TV Arts and Technology, Shanghai University, Shanghai 200072, China;;

See next page for additional authors

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Method for Auto-generating Cartoon Based on A Set of Portrait Dictionary

Abstract

Abstract: An efficient method of auto-generating portrait cartoon based on true portrait pictures was proposed. The first step was to establish a set of portrait dictionary. As a result, the portrait was divided into six components including eyebrows, eyes, nose, mouth, face, hair, so that the material library of cartoon corresponding to each component could be established. The next was to collect some real portrait images and synthesize them using the component material, meanwhile to calculate the facial shape features and the texture features of hair corresponding to each portrait. The second step was to input a real portrait image and auto-generate the corresponding cartoon. In this method, facial components were selected by the matching of shape features, similarly the component of hair was got by the matching of texture features. The method is not only simple with more abstract and more artistic result, but also can be applied to other types of portrait style.

Keywords

cartoon, auto-generating, component, feature matching

Authors

Jingjing Sun, Jiajun Yu, Li Bei, Zhifeng Xie, and Youdong Ding

Recommended Citation

Sun Jingjing, Yu Jiajun, Li Bei, Xie Zhifeng, Ding Youdong. Method for Auto-generating Cartoon Based on A Set of Portrait Dictionary[J]. Journal of System Simulation, 2015, 27(4): 682-688.

基于人像字典集的卡通自动生成方法

孙晶晶¹, 于佳骏², 李贝¹, 谢志峰¹, 丁友东¹

(1. 上海大学影视艺术技术学院, 上海 200072; 2. 上海大学计算机工程与科学学院, 上海 200072)

摘要: 提出了基于人像字典集的卡通自动生成方法。建立人像字典集。将人像分割为 6 种组件——眉毛、眼睛、鼻子、嘴巴、脸型、头发, 建立与每种组件对应的卡通画素材库, 搜集真实人像图片并用组件素材合成相应的卡通画, 并计算五官形状特征和头发纹理特征; 输入一幅真实人像, 通过形状特征匹配得到五官组件, 利用纹理特征匹配得到发型, 将组件合成得到卡通画。我们的方法简单易行, 生成的效果更抽象更具艺术感, 还可以应用到其他类型人像风格化上。

关键词: 卡通; 自动生成; 组件; 特征匹配

中图分类号: TP391.9

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2015) 04-0682-07

Method for Auto-generating Cartoon Based on A Set of Portrait Dictionary

Sun Jingjing¹, Yu Jiajun², Li Bei¹, Xie Zhifeng¹, Ding Youdong¹

(1. School of Film and TV Arts and Technology, Shanghai University, Shanghai 200072, China;

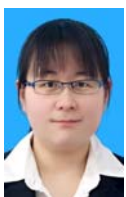
2. School of Engineering and Computer Science, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

Abstract: An efficient method of auto-generating portrait cartoon based on true portrait pictures was proposed. The first step was to *establish a set of portrait dictionary*. As a result, the portrait was divided into six components including eyebrows, eyes, nose, mouth, face, hair, so that the material library of cartoon corresponding to each component could be established. The next was to collect some real portrait images and synthesize them using the component material, meanwhile to calculate the facial shape features and the texture features of hair corresponding to each portrait. The second step was to input a real portrait image and *auto-generate* the corresponding cartoon. In this method, facial components were selected by *the matching of shape features*, similarly the component of hair was got by *the matching of texture features*. The method is not only simple with more abstract and more artistic result, but also can be applied to other types of portrait style.

Keywords: cartoon; auto-generating; component; feature matching

引言

早期的图形图像处理技术专注于真实感处理,



收稿日期: 2013-12-19 修回日期: 2014-05-13;
基金项目: 国家自然科学基金项目(61303093);上海市科委科技攻关项目(13511505002);上海市教育委员会科研创新项目(14YZ023);

作者简介: 孙晶晶(1988-), 女, 山东淄博人, 硕士, 研究方向为数字图像处理等; 于佳骏(1991-), 男, 江苏吴江人, 硕士, 研究方向为计算机图形图像等; 李贝(1989-), 女, 湖南长沙人, 硕士, 研究方向为图像克隆等; 谢志峰(1982-), 男, 江苏如东人, 博士, 讲师, 研究方向为计算机图形图像等; 丁友东(1967-), 男, 福建上杭人, 博士, 教授, 博导, 研究方向为计算机图形学、多媒体展示技术等。

更多的用于真实的反映客观世界, 但是忽略了艺术作品中人们认知世界过程的主观抽象和提炼。而非真实感绘制技术恰好弥补了真实感绘制的缺陷, 它能对事物进行一定程度的抽象, 即忽略一些不必要的细节而加强一些重要的细节, 能更好的体现艺术家和设计者们的创作意图。

自 20 世纪 80 年代起, 非真实感图形学得到了快速的发展, 计算机针对传统绘画的模拟, 主要集中在铅笔画、钢笔画、卡通画、漫画、油画、水彩画、水墨画、剪纸效果。而卡通画以其所包含的丰

富多元的文化信息以及表现形式的灵活性、创作的随意性、应用的广泛性等特点,吸引着越来越多的图形图像研究者,同时由于手工绘制卡通画比较困难,很难被普通人掌握,因而,通过计算机模拟的方式生成卡通风格化效果的图像越来越受到人们的关注,它可以为没有绘画经验的人提供一种工具。

关于卡通画的渲染绘制最初是针对三维图像。Decaudin 最早提出了计算机模拟自动生成具有卡通效果的 3D 场景渲染算法^[1]; Decarlo 等人^[2-3]首先是通过眼动仪跟踪数据指导实现,后来又发现眼睛能引导观众确定重要的区域,并以此区域作为重要度衡量的标准完成卡通画绘制; Raskar 等人^[4]利用多个闪光灯拍摄的图像,通过计算从深度边缘分离出纹理,实现卡通画绘制渲染。后来对于人像卡通画绘制研究主要有 3 种方法:第 1 种是基于模板,文献[5]中, Koshimizu H 等人以中值脸作为模板,计算输入人像与中值脸的差异,再对差异进行夸张;文献[6]中, Che J 等人选择一种风格化的人脸卡通画作为模板,通过人脸特征点定位、纹理映射及线条勾勒相结合的方式生成卡通人像。该类方法生成的效果具有幽默感但缺少艺术感。第 2 种是基于学习,文献[7]中, Zhang C 等人利用马尔可夫网络模型,从训练数据库中搜索最佳匹配卡通块,再把所有块合成为卡通人像;文献[8]中, Liu J 等人通过训练真实人脸及对应的卡通人脸学习得到两者之前的关系;文献[9]中,陈洪等人介绍了一个卡通动画系统,主要包括 3 部分:基于图像的卡通自动生成模块、交互的卡通表情编辑模块和语音驱动的卡通动画模块,卡通自动生成模块采用基于样本学习的方法,卡通表情编辑模块需要一定的用户交互,动画仅限于唇形合成。该类方法需要先建立真实人像与对应的手绘卡通人像的数据库,最终的生成效果依赖于数据库的构建与训练学习的方法。第 3 种是基于图像处理,文献[10]中, Liu J 等人先去掉源图像的细节,再对基于 PCA 特征提取的图像纹理进行简单处理;文献[11]中, Fan Y

等人提出的算法是基于 mean-shift 和 DOG 实现的,使用大的颜色块替换图像中的颜色和纹理信息;文献[12]中, Liu S 等人利用 AAM 算法构建人脸特征点,通过图像分割及梯度处理分别绘制头发、五官及脸部轮廓;文献[13]中,唐棣等人提出了一种基于扫描线的卡通风格渲染方法,能够自动实时地完成渲染过程。胡光琴等人^[14]和葛照君等人^[15]是在 Holger Winnem oller 等人的基础上做了改进,实现自动实时完成绘制。该类方法生成的结果逼近真实图像,但缺少艺术夸张的效果。

虽然近几年大部分研究都可以实现实时自动生成卡通画,但生成的效果过于逼近原始图像,缺乏艺术夸张的效果,不合乎大众的喜好,有的研究加入了艺术夸张效果,但需要一定的用户交互。因此,本文提出了一种基于人像字典集的卡通自动生成方法,即输入一幅真实人像可以自动输出对应的卡通人像,该方法简单易行,所用组件具有一定的夸张形变,最终生成的效果更具艺术夸张性,能更好地表现人像的神韵。其实现过程分为 2 部分:1 是构建人像字典集,2 是所输入人像在字典集中的组件查找与合成。系统框图如图 1 所示:

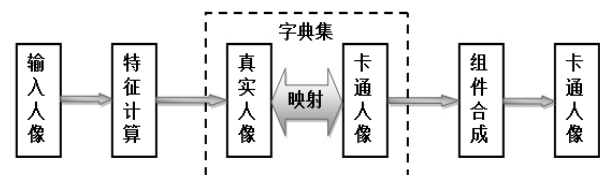


图 1 人像卡通画系统框图

1 人像特征计算

1.1 人脸五官形状特征计算

通过 ASM^[16]人脸定位算法对真实人脸图片进行定位得到 88 个标记点,标注点及标注规则如图 2~9 所示。

参考文献[17]对人脸器官特征的测量指标及卡通画绘制规则,我们对五官形状特征的定义及计算如表 2~6 所示,其中符号定义与说明如表 1 所示。

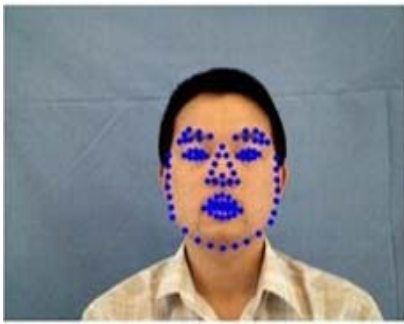


图 2 人脸特征点定位

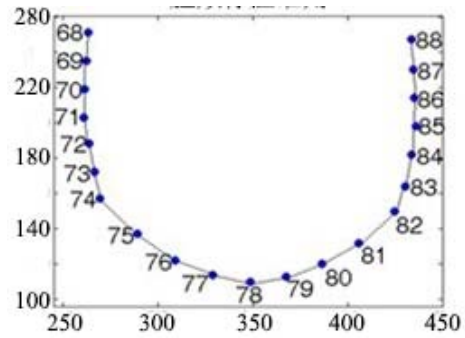


图 3 脸颊标注准则

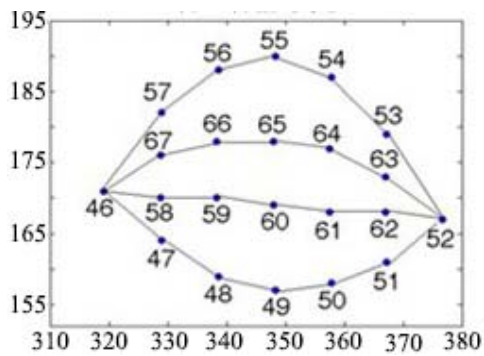


图 4 嘴巴标注准则

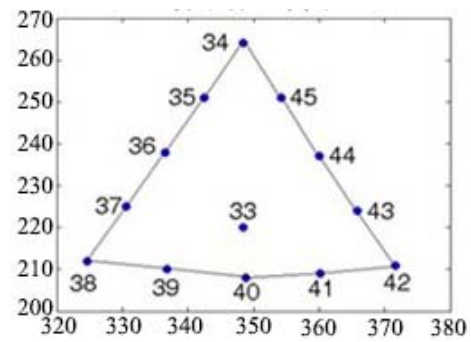


图 5 鼻子标注准则

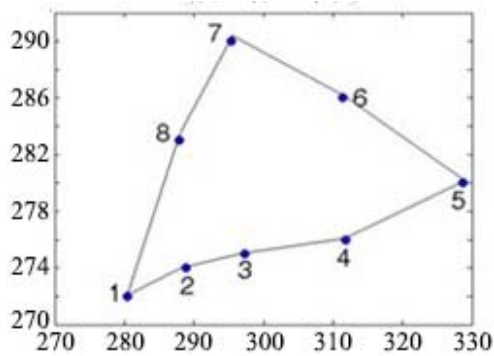


图 6 左眉毛标注准则

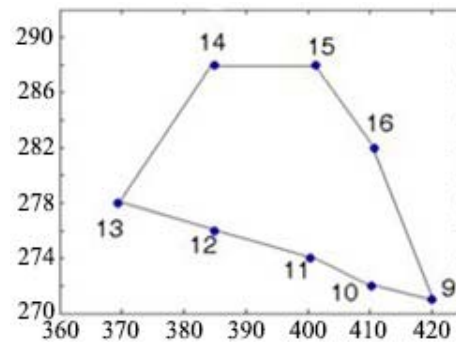


图 7 右眉毛标注准则

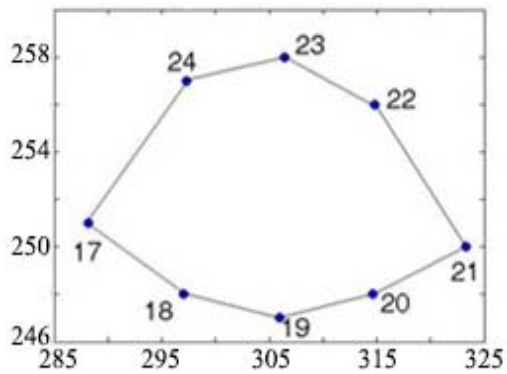


图 8 左眼睛标注准则

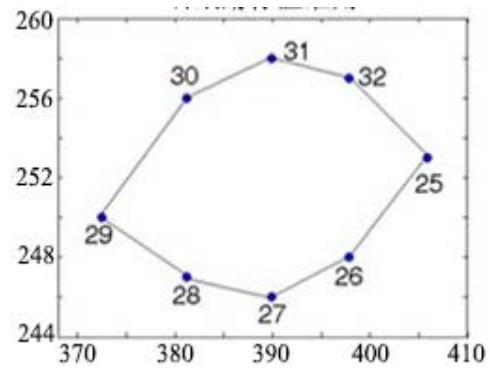


图 9 右眼睛标注准则

表 1 符号及含义说明

符号	d	k	$\min Y$	θ	v	m
含义	两点间的距离	两点连线的斜率	y 坐标的最小值	两向量夹角	向量	两点的连线的中点

表 2 眉毛形状特征定义及计算

特征定义	相对长度	趋势	最高点位置	长宽比	内外哪侧更厚
特征计算	$d(1,5) / d(68,88)$	$k(5,1)$	$\min Y(1,5 - 8)$	$d(3,7) / d(1,5)$	$d(4,6) / d(3,7) / d(2,8) / d(3,7)$

表 3 眼睛形状特征定义及计算

特征定义	相对长度	趋势	长宽比	内外哪侧更宽
特征计算	$d(21,17) / d(68,88)$	$k(17,21)$	$d(19,23) / d(17,21)$	$d(20,22) / d(19,23) / d(18,24) / d(19,23)$

表 4 鼻子形状特征定义及计算

特征定义	相对长度	鼻尖夹角	高宽比
特征计算	$d(38,42) / d(17,25)$	$\theta(v(39,40), v(41,40))$	$d(34,40) / d(17,25)$

表 5 嘴巴形状特征定义及计算

特征定义	相对长度	张嘴程度	嘴型	下唇厚度	嘴走向
特征计算	$d(46,52) / d(74,82)$	$d(46,52) / d(74,82)$	$\theta(v(46,60), v(52,65))$	$d(49,60) / d(46,52)$	$k(46,52)$

表 6 脸型形状特征定义及计算

特征定义	脸颊倾斜度	下巴夹角	脸颊是否突出
特征计算	$d(74, 1(17,78))$	$\theta(v(75,78), v(81,78))$	$\theta(v(68,74), v(78,74))$

1.2 头发纹理特征计算

由于头发的颜色及造型具有多样性,因此我们很难通过颜色识别头发所在区域,也很难定位头发的形状。为了简化发型识别,我们根据人脸定位估计头发所在区域,再采用 LBP(Local binary patterns)^[18-20]的等价模式(uniform patterns)提取头发的纹理特征。

首先,根据人脸定位得到的 88 个点,选取 x 和

y 两个方向的最大最小值($\min x, \min y, \max x, \max y$),以($\min x, \min y$)($\max x, \max y$)分别作为起点与终点可以得到人脸所在矩形区域,用 w 和 h 分别表示该矩形的宽与高。然后,以人脸矩形为中心,左右均扩展 $w/2$,上下分别扩展 h 与 $h/2$,若扩展后的矩形边界超出源图像边界则选取源图像边界作为矩形边界,由此获取头发所在矩形区域。最后,采用 LBP 的等价模式提取头发所在矩形区域的纹理特征,得到一个 59 维的灰度直方图矩阵。

LBP 方法是一个计算机视觉中用于图像特征分类的一个方法。对 LBP 特征向量进行提取的步骤如下:首先将检测窗口划分为 16×16 的小区域(cell),对于每个小区域中的一个像素,将其环形邻域内的 8 个点(也可以是环形邻域多个点)进行顺时针或逆时针的比较,如果中心像素值比该邻点大,则将邻点赋值为 1,否则赋值为 0,这样每个点都会获得一个 8 位二进制数(通常转换为十进制数)。然后计算每个小区域的直方图,即每个数字(假定是十进制数)出现的频率(也就是一个关于每一个像素点是否比邻域内点大的一个二进制序列进行统计),然后对该直方图进行归一化处理。最后将得到的每个小区域的统计直方图进行连接,就得到了整幅图的 LBP 纹理特征,采用等价模式,可以把直方图从原来的 256 维变成 59 维。

2 卡通人像的自动生成

2.1 人像字典集的建立

2.1.1 组件素材库的建立

将真实人像分割为 6 部分:眉毛、眼睛、鼻子、嘴巴、脸型、发型。通过调研确定脸型、眉毛、眼睛、鼻子、嘴巴按照形状分类的种类。目前,根据调研,所得分类如下:

(1) 脸型分为 7 种:蛋形脸(或鹅蛋形)、方形脸、圆形脸、长形脸、倒三角形脸、正三角形脸(或洋梨脸)、钻石形脸(或菱形脸);

(2) 眉毛分为 9 种:标准眉、一字眉、长弧形眉(柳叶眉)、拱形眉、方眉、下斜眉、八字眉、剑

眉、刀眉；

(3) 眼睛分为 7 种：标准眼(杏眼)、丹凤眼、细长眼、眯缝眼、垂眼(下斜眼)、三角眼、桃花眼；

(4) 鼻子分为 4 种：小翘鼻、鹰钩鼻、葱头鼻、朝天鼻；

(5) 嘴巴分为 6 种：上下平均的唇、嘴角向上翘、上薄下厚的唇、嘴角向下垂、上厚下薄的唇、多纹而深的唇。

根据上述分类，借鉴手机 APP 中的 Uface 素材绘制风格，设计相应的脸型、眉毛、眼睛、鼻子、嘴巴组件素材，再选择一些常见的发型组件，作为组件素材库(部分组件素材如图 10 所示)。

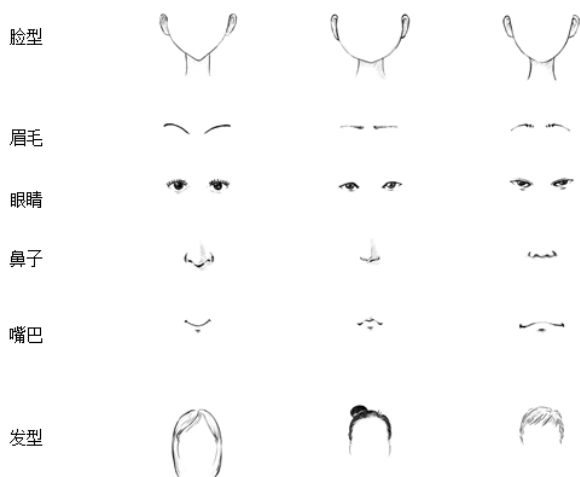


图 10 组件素材

2.1.2 真实人像与卡通人像映射的建立

建立真实人像库作为字典，人脸的每个器官及发型是字典的基本元素，对于每一张人像，用所选卡通画组件素材拼出对应的卡通人像，所用的各个组件作为字典中人像的对应元。

我们初步选择男女真实人像图片各 200 张作为真实人脸库，让艺术生用绘制的组件素材进行手动合成得到这 400 张人像对应的卡通人像(如图 11-12 所示)，并记录每幅人像对应每种组件的编号。然后，按照五官形状特征及头发纹理特征的定义及计算方法，得到每幅人像对应的五官特征值及头发纹理直方图。



图 11 真实人像图片

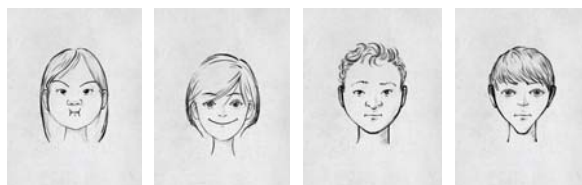


图 12 与真实人像对应的卡通画

2.2 字典集里的查找与组件合成

首先，输入一幅真实人像图片，通过 ASM 人脸定位得到 88 个点，根据所定义的五官形状特征及头发纹理特征计算人像的特征值(具体计算过程如前所述)，然后进入所建立的人像字典集，根据所得五官特征值与头发纹理直方图在字典集的所有人像中查找与之匹配的最佳五官与发型所对应的人像，查找到的这些人像所用的五官及发型组件即为最优组件，将组件合成得到与输入人像对应的卡通人像。该过程主要包括三部分：五官查找、发型查找和组件合成。具体实现过程如图 13 所示。

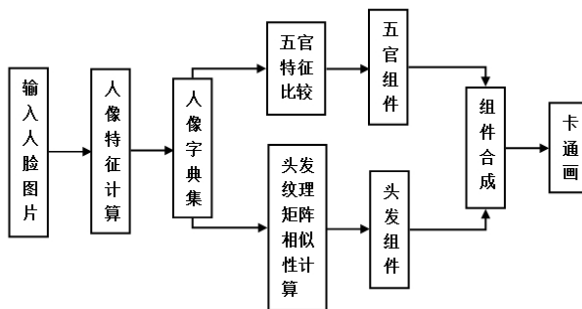


图 13 真实人像卡通画实现流程框图

(1) 五官查找

根据 ASM 人脸定位得到的 88 个点提取真实人像的脸型、眉毛、眼睛、鼻子、嘴巴轮廓，按照前面五官形状的定义可以将每种器官用几个特征值量化。对于每种器官，用所得的特征值矩阵与字典集中的每个人像对应的器官特征值矩阵做差值，

得到一个差值矩阵, 为了能更好突出每个器官的显著特征, 我们为每个特征差值加入一个权值并求加权和, 选择和值最小的人像对应的器官所用组件作为最优组件。

(2) 发型查找

对于所输入的真实人像, 根据人脸定位得到的 88 个点的位置坐标, 得到头发所在的矩形区域, 然后采用 LBP 的等价模式提取头发所在矩形区域的纹理特征, 得到一个 59 维的灰度直方图矩阵。用该矩阵与真实人脸库中各人像头发区域的 LBP 特征矩阵进行相似性比较, 选取相似度值最高的人像对应的发型所用组件作为最优组件。

(3) 组件合成

初始化一个空白的矩形区域, 先把脸型放在矩形的中下部, 以此为参照物, 按照卡通画绘制规则, 计算其他器官及头发的位置, 再将五官查找及发型查找所得到的最优五官及发型组件放在对应的位置, 合成一幅完整的卡通人像。

3 实验结果

本文的方法是在硬件配置为 Intel Xeon 2.79GHz 4GB 内存的 PC 上实现, 通过 MATLAB 编程, 可以对输入的真实人像进行处理自动生成卡通人像效果, 对于 400×600 大小的图像, 该过程一般需要 0.6 s。该方法是通过 ASM 人脸定位把真实人像分割成脸型、眉毛、眼睛、鼻子、嘴巴和发型这 6 种组件, 根据所计算的五官形状特征及头发纹理特征, 在人像字典集中查找选择最优五官及发型卡通素材组件, 再把所得组件合成得到最终的卡通人像。我们所选用的素材组件是经过艺术家的主观提炼, 用简单的线条及阴影勾勒出每种组件的显著特征, 更具抽象性并带有一定的夸张效果, 忽略了真实人像的一些不必要的细节, 能更好得表现真实人像的显著特征及神韵。因此, 本文所生成的效果(如图 14 所示)更加简单抽象化, 并带有一定的夸张色彩。

为了验证该实验结果所具有的艺术特性, 我们找了 10 个艺术系学生对 100 张(男女各 50 张)结果

图进行主观判定是否神似, 评价结果如表 7 所示, 通过平均计算可得结果神似程度为 81.1%, 因而可以得出, 我们所实现的效果既可以抓住人像的主要特征又与真实人像神似, 增加了趣味性和娱乐性, 同时, 经分析可知产生不理想结果的主要原因是素材不全, 即素材库中没有可以抓住人像主特征的组件素材。

表 7 评价结果

学生编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
神似结果数目	88	83	86	78	80	82	75	81	77	81
不理想结果数目	12	17	14	22	20	18	25	19	23	19

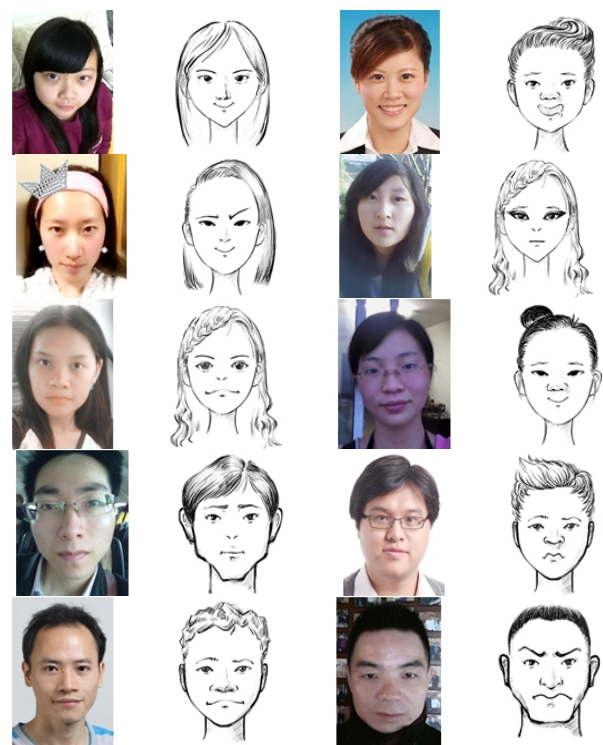


图 14 实验结果

4 结论

本文提出了一种基于人像字典集的卡通自动生成方法, 不同于以往的卡通画绘制风格, 本方法得到的结果更具抽象性与艺术效果, 同时也增加了趣味性与娱乐性, 可以快速实现, 还可以扩展运用到其他类型的人像风格化绘制上。

在以后的工作中, 我们需要针对以下几点进行改进: (1)完善组件素材库, 能够涵盖大部分常见的脸型、眉毛、鼻子、嘴巴和发型; (2)五官形状

特征提取, 希望能够用最少的特征值概括每个组件的显著特征; (3) 权值调整, 保证所选组件最优; (4) 调研新的发型识别算法, 期望可以自动生成更准确的发型; (5) 输入图像预处理, 由于 ASM 算法适合于正面人脸的识别与定位, 因此我们需要对输入的非正面人像进行简单的几何变换。

参考文献:

- [1] Decaudin P. Cartoon-looking rendering of 3D-scenes [J]. Syntim Project Inria 2919, 1996:1-11.
- [2] De Carlo D, Santella A. Stylization and abstraction of photographs [J]. ACM Transactions on Graphics (TOG). ACM (S0730-0301), 2002, 21(3): 769-776.
- [3] Santella A, DeCarlo D. Visual interest and NPR: an evaluation and manifesto [C]// Proceedings of the 3rd International Symposium on Non-photorealistic Animation and Rendering. ACM (S0730-0301). USA: ACM, 2004: 71-150.
- [4] Raskar R, Tan K H, Feris R, *et al.* Non-photorealistic camera: depth edge detection and stylized rendering using multi-flash imaging [J]. ACM Transactions on Graphics (TOG) (S0730-0301), 2004, 23(3): 679-688.
- [5] Koshimizu H, Tominaga M, Fujiwara T, *et al.* On KANSEI facial image processing for computerized facial caricaturing system PICASSO [C]// Systems, Man, and Cybernetics, 1999. IEEE SMC'99 Conference Proceedings. 1999 IEEE International Conference on (S0884-3627). USA: IEEE, 1999, 6: 294-299.
- [6] Che J, Tao J, Wang X, *et al.* Feature-based multi-style cartoon system [C]// Audio Language and Image Processing (ICALIP), 2010 International Conference on (S0884-3627). USA: IEEE, 2010: 1012-1016.
- [7] Zhang C, Liu G, Wang Z. Cartoon face synthesis based on Markov Network [C]// Intelligent Signal Processing and Communication Systems (ISPACS), 2010 International Symposium on (S0884-3627). USA: IEEE, 2010: 1-4.
- [8] Liu J, Chen Y, Gao W. Mapping learning in eigenspace for harmonious caricature generation [C]// Proceedings of the 14th Annual ACM International Conference on Multimedia (S0730-0301). USA: ACM, 2006: 683-686.
- [9] 陈洪, 郑南宁, 梁林, 等. 基于图像的个性化卡通系统 A [J]. Journal of Software, 2002, 13(9): 1813-1822.
- [10] Liu J, Chen Y, Miao C, *et al.* Semi - Supervised Learning in Reconstructed Manifold Space for 3D Caricature Generation [C]// Computer Graphics Forum (S0167-7055). USA: Blackwell Publishing Ltd, 2009, 28(8): 2104-2116.
- [11] Fan Y, Huang S. A New Method for Image Cartoonization Based on Mean-Shift and DOG [J]. Coal Technology, 2009, 28(9): 160-161.
- [12] Liu S, Li H, Xu L. Face Cartoon Synthesis Based on the Active Appearance Model [C]// Computer and Information Technology (CIT), 2012 IEEE 12th International Conference on (S0884-3627). USA: IEEE, 2012: 793-797.
- [13] 唐棣, 阎晓敏, 孙岩. 一种基于扫描线的卡通画仿真新方法 [J]. 辽宁师范大学学报 (自然科学版), 2008, 31(1): 47-50.
- [14] 胡光琴, 唐旭光, 胡矿, 等. 卡通画的非真实感绘制技术 [J]. 实验科学与技术, 2012, 10(5): 39-41.
- [15] 葛照君. 照片和视频的风格化处理技术及系统设计 [D]. 杭州: 浙江工业大学, 2012.
- [16] Cootes T F, Edwards G J, Taylor C J. Comparing Active Shape Models with Active Appearance Models [C]// BMVC (S0167-8655). Nottingham, UK, 1999, 99: 173-182.
- [17] 周仁琴, 周经野, 陈益强, 等. 基于特征发现的卡通人脸肖像生成 [J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2006, 18(9): 1362-1366.
- [18] Ojala T, Pietikainen M, Harwood D. Performance evaluation of texture measures with classification based on Kullback discrimination of distributions [C]// Pattern Recognition, 1994. Vol. 1-Conference A: Computer Vision & Image Processing, Proceedings of the 12th IAPR International Conference on (S0884-3627). USA: IEEE, 1994, 1: 582-585.
- [19] Ojala T, Pietikäinen M, Harwood D. A comparative study of texture measures with classification based on featured distributions [J]. Pattern Recognition, 1996, 29(1): 51-59.
- [20] Wang X, Han T X, Yan S. An HOG-LBP human detector with partial occlusion handling [C]// Computer Vision, 2009 IEEE 12th International Conference on (S0884-3627). USA: IEEE, 2009: 32-39.