

一种基于小波的人脸衰老化合成方法^{*}

刘剑毅⁺, 郑南宁, 游屈波

(西安交通大学 人工智能与机器人研究所, 陕西 西安 710049)

A Wavelet-Based Facial Ageing Synthesis Method

LIU Jian-Yi⁺, ZHENG Nan-Ning, YOU Qu-Bo

(Institute of Artificial Intelligence and Robotics, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

+ Corresponding author: Phn: +86-29-82668802 ext 8002, E-mail: jyliu@aiar.xjtu.edu.cn, <http://www.xjtu.edu.cn>

Liu JY, Zheng NN, You QB. A wavelet-based facial ageing synthesis method. *Journal of Software*, 2007,18(2): 469-476. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/18/469.htm>

Abstract: A facial ageing synthesis (rendering) method based on combination of wavelet transform and texture transplant is proposed in this paper. Firstly, 2D discrete wavelet transform (2D DWT) is performed on ageing templates to extract the high-frequency sub-images and high-pass filtered low-frequency sub-images, which contain the texture characteristic of ageing skin. Then the corresponding sub-images of target facial image are replaced and fused with them, and the transplant of ageing texture towards target face is achieved through wavelet reconstruction. In addition, the average variation of the facial shape between young population and old population is extracted, and imposed onto the target face to enhance the ageing rendering effect. Combining with color rendering technique, an integrated framework for photorealistic facial ageing rendering is designed and implemented. In the experiment, the proposed rendering framework is applied to oriental face, western face and art painting image, and the rendering results show the realistic and impressive effects. Comparing with PCA (principal components analysis)-based method, 3D Morphable model, and ratio image method, this method contributes a solution for the problem of tradeoff between photorealistic effect and easiness to operate for facial ageing rendering.

Key words: wavelet transform; texture transplant; facial ageing synthesis; ageing template; photorealistic

摘要: 提出了一种基于小波变换与纹理移植相结合的人脸衰老化合成(绘制)方法.首先,将衰老模板进行二维离散小波变换(2D discrete wavelet transform,简称 2D DWT),提取出承载衰老皮肤纹理特征的高频子图与高通滤波后的低频子图;然后,将其与目标人脸图像的对应分量进行置换与融合,利用小波重构来完成衰老纹理向目标人脸的移植;同时,提取出年轻人群到老年人群在脸形上的平均变化,将其作用在目标人脸上来增强衰老化合成的效果.结合色彩渲染技术,设计实现了真实感人脸衰老化绘制的完整技术框架.实验部分分别将该方法应用于东西方人脸以及艺术图片,绘制结果显示出了具有真实感和感染力的效果.与基于 PCA(principal components analysis),3D 渐变模型、比例图等方法相比,该方法较好地解决了在人脸衰老化绘制中真实感与易操作性之间难以折衷的问题.

关键词: 小波变换;纹理移植;人脸衰老化合成;衰老模板;真实感

* Supported by the National Natural Science Foundation of China under Grant Nos.60021302, 60205001 (国家自然科学基金); the National High-Tech Research and Development Plan of China under Grant No.2005AA147060 (国家高技术研究发展计划(863))

Received 2004-11-24; Accepted 2006-05-26

中图法分类号: TP391 文献标识码: A

在当前的计算机图形学领域,具有真实感的人脸合成(绘制)技术是一个研究热点.人脸年龄效果的合成作为其中一个分支,由于涉及到复杂的生理、心理因素,并与人物的生活经历、病变等因素密切相关,因此,十分具有挑战性.

基于统计学的方法是解决这类不确定性问题的一个重要思路,并被尝试应用于人脸的年龄模拟^[1],其目的是提高现有人脸识别系统对于年龄变化的鲁棒性.然而,收集一个足够大的包含目标群体所有年龄阶段的照片人脸样本库,往往是困难的,甚至是不现实的.这一点制约了此类方法的发展.

相比之下,非统计的人脸年龄模拟方法^[2-7]则不再依赖于这样一个大时间跨度的人脸数据库,取而代之的是从生理学、心理学或图形学角度进行分析,合成出具有一定真实感的人脸年龄变化效果图像.尽管准确地预测出人脸衰老后的形态迄今为止仍旧是十分困难的,然而,以逼真观感为目标的人脸衰老化绘制技术仍然可以在游戏娱乐、电影制作、虚拟现实等领域得到广泛的应用.

本文发展了非统计的人脸衰老化模拟技术,在人脸图像矢量化表达的框架下,提出了一种基于小波变换与纹理移植技术相结合的人脸衰老化绘制新方法.从频域角度来看,人脸图像的低频分量反映出其固有的脸形与结构特征,而高频分量则承载着纹理上更细节的信息^[8],如皮肤褶皱、斑点等,而这些恰恰是人脸衰老后皮肤所呈现出的典型特征.小波(wavelet)具有天生良好的空域与频域局部特性,并且可以通过 Mallat 分解算法^[9]提供一种多分辨率的层次表示结构.我们的方法是:在小波空间中分解衰老模板图像,再通过子图置换将其中反映衰老纹理信息的高频分量移植到目标年轻人脸的对应小波分量上,在此过程中结合低频分量的高通滤波来增强衰老化的表现效果,最后,通过小波重构实现人像的衰老化合成.基于该思想,并融合脸形与肤色的衰老化模拟技术,本文设计实现了真实感人脸衰老化绘制的完整技术框架,并通过一系列实验展示了所提方法的绘制效果.

本文第 1 节回顾人脸衰老化分析与合成的相关研究进展.第 2 节介绍本文处理人脸图像时所采用的矢量化技术.第 3 节详细介绍本文提出的人脸衰老化合成方法,并给出全面的实现技术框架.第 4 节列出采用本文的方法在众人脸样本上的衰老化实验结果,并与其他年龄合成方法进行对比讨论.第 5 节给出结论.

1 相关工作

与人脸合成的其他分支,诸如表情、姿态、光照合成相比,年龄合成无疑具有最大的不确定性,其难点在于如何理解和表现年龄的变化.不同角度的理解可以带来不同的研究方法.在过去的几十年中,人们分别应用生理学、心理学以及图形学等各种不同的方法展开了许多关于这方面卓有成效的研究.

从人的生理解剖结构出发,Wu 等人^[2]建立了 3 层结构的人脸物理模型,包括肌肉层、脂肪层和表皮层.他们采用线性弹性模型、B-样条等技术来模拟这些生理结构的运作机制,通过一系列参数的调整实现人脸皱纹生成以及衰老的效果.基于该模型,Berg 等人^[3]专注于最能体现人脸衰老的眼部周围肌肉,调整模型参数,实现衰老化的模拟.Mazza 等人^[4]进一步发展了这类方法,他们建立了更为复杂的非线性粘弹性方程来模拟人在衰老过程中各层生理组织的变化机制,并使用有限元方法在 3D 的人脸物理模型上模拟衰老后的脸形变化.

人们对于年龄的感知其实是一个心理的过程.O'Toole 等人^[5]深入研究了差异性(distinctiveness),即刻画特定人脸与“平均”人脸的特征差异程度的指标,在人脸感知以及人脸识别中所起的作用.他们利用人脸图像的漫画生成技术,证实了人脸的差异性增加会使人产生衰老的感觉.然而他们同时也指出:差异性的改变仅仅是衰老变化过程中的一个方面,需要其他技术的共同配合.

Blanz 和 Vetter^[10]建立了一个由 200 个对象组成的 3D 人像库,并提出了渐变模型(morphable model).该 3D 模型通过线性对象建模和像素级的模型匹配,在统一框架下实现对人脸图像的姿态、表情、年龄、光照等属性进行变换,具有很强的真实感.然而,该模型技术复杂,计算量很大,并且依赖于大样本的 3D 扫描人像数据库.

尽管 3D 模型更擅长于模拟实际的人脸物理结构,然而,基于图像(2D)的方法则由于其简单性,并且可以满足大多数场合的需求,因此也同样受到人们的关注. Hill 等人^[11]在文献[1]工作的基础上进一步发展了基于

PCA(principal components analysis)的统计学方法.他们在主元空间中依据性别来区分衰老化的方向,并引入对人脸姿态分量与表情分量的补偿,提出分段衰老化的思路以弥补数据库的不足. Shan 等人^[6]提出了两个完成对准的表面间图像细节移植的技术.将源图像与其高斯平滑后的结果相除,以提取纹理信息,再通过与目标图像的平滑结果相乘实现图像细节的移植. Fu^[7]提出了与之类似的人脸衰老比例图方法,他们将衰老人脸模板与年轻平均人脸的商图(quotient image)称为衰老比例图,衰老化绘制结果即通过比例图与目标人脸的乘积来获得.这类方法的共同特点在于,使用二维的图像操作来实现具有真实感效果的衰老化绘制,这也是本文工作的特点之一.本文使用小波分解来提取衰老模板的纹理特征,并结合脸型、肤色的衰老化模拟,设计实现了一个完整的人脸衰老化绘制框架.

2 人脸图像的矢量化表达

人脸图像之间的对准是后续算法的基础,为此,我们采用了类似于文献[12]的图像矢量化表达方式.假设 2D 人脸图像的形状由 n 个特征点来刻画,这些特征点可以通过 ASM(active shape model)模型^[13]自动标注,也可以手工进行标注.这样,样本人脸 I 与参考人脸 I^R 的形状特征就可以分别用矢量 $U^I=(x_1, y_1, \dots, x_n, y_n)$ 和 $U^R=(x_1^R, y_1^R, \dots, x_n^R, y_n^R)$ 来表示.利用 Field-Based 图像变形(warp)技术^[14],就得到了这两个人脸图像之间对应像素的位移光流场 $S_I=(\Delta x_1, \dots, \Delta x_N, \Delta y_1, \dots, \Delta y_N)=(\Delta x, \Delta y)$,其中 N 为图像中像素的个数,且在对对应点处满足 $(\Delta x_i, \Delta y_i)=(x_i, y_i)-(x_i^R, y_i^R)$, 这里, $1 \leq i \leq N, 1 \leq j \leq n$.我们称 S_I 为 I 关于 I^R 的形状矢量.图像 I 的像素按照 S_I 逐个进行位移后,即完成了样本人脸相对于参考人脸的对准操作,其结果称为纹理矢量 $T_I(x, y)=I(x+\Delta x(x, y), y+\Delta y(x, y))$.样本 I 的矢量化表达即为 (S_I, T_I) ,利用前向 Warp 技术^[14],可以由 (S_I, T_I) 重构出 I .

3 真实感人像衰老化合成

3.1 基于小波的纹理分解

人脸的衰老化在一定程度上是通过出现皱纹、老年斑以及皮肤粗糙化等皮肤纹理特征体现的.从频域角度来看,这些特征主要存在于人脸图像的高频部分中.小波具有优良的空间-频域局部表现特性,且离散小波变换(discrete wavelet transform,简称 DWT)可以利用其快速算法,即 Mallat 分解与重构算法^[6]来实现金字塔式的图像结构表达.对于给定的图像 I ,我们表示其二维离散小波变换(2D DWT)如式(1)所示.

$$(C^J(I), D^J(I), \dots, D^j(I), \dots, D^1(I)) = DWT(I, J) \quad (1)$$

这里: $D^j(\cdot) = (D_h^j(\cdot), D_v^j(\cdot), D_d^j(\cdot)), 1 \leq j \leq J$, 表示第 j 层 Mallat 分解得到的高频子图集,包括水平子图 D_h 、垂直子图 D_v 以及对角线方向子图 D_d ; $C^J(\cdot)$ 则表示 J 层分解后的低频子图.

为了提取衰老纹理特征,我们首先搜集了多张不同年龄阶段的中老年人正面彩色或灰度脸部图像组成衰老模板库 D_{old} ,并针对该库中的 K 个模板 I_1, I_2, \dots, I_K 以及目标人脸 I 进行矢量化的表达,以实现像素级对准.理论上任何一幅人脸图像的特征点分布 U^i 都可以作为这里的参考矢量 U^R ,我们选取所有模板特征点矢量的算术平均作为参考矢量.设 I 和 D_{old} 基于该参考的矢量化表达分别为 (S_I, T_I) 和 $D_{old} = \{(S^1, T^1), (S^2, T^2), \dots, (S^K, T^K)\}$,则这里的纹理矢量分别表示对准后的不同人脸图像.它们消除了各自之间在五官位置、脸型等形状上的差异,但仍保持着与原图相同的灰度及纹理信息.

将上述获得的纹理矢量 T_i 及 $T^i, i=1, 2, \dots, K$, 分别进行层数为 J 的 Mallat 分解,就可以提取出各自的低频及高频子图,完成人脸纹理的小波分解,如式(2)、式(3)所示:

$$(C^J(T_I), D^J(T_I), \dots, D^j(T_I), \dots, D^1(T_I)) = DWT(T_I, J) \quad (2)$$

$$(C^J(T^i), D^J(T^i), \dots, D^j(T^i), \dots, D^1(T^i)) = DWT(T^i, J) \quad (3)$$

3.2 衰老纹理移植

我们实现纹理移植的基本方法是对上述分解得到的 Mallat 金字塔进行子图置换,即用衰老模板 T^i 的高频子图去替代 T_I 的对应高频子图,并保留 T_I 原有的低频子图,得到一个新的金字塔结构 $(C^J(T_I), D^J(T^i), \dots,$

$D^j(T^i), \dots, D^1(T^i)$). 类似的思路曾经应用于卫星遥感影像融合技术^[15]. 我们这里的移植, 则使得目标人脸可以兼具 I 的五官脸形特征以及所选衰老模板 I_i 的皮肤纹理特征.

人的衰老是一个不确定性很强的过程, 这也是该领域研究的主要困难之所在. 一个人的生活形态、健康状况甚至压力指数都是可能造成最终衰老模式扰动的因素^[1]. 我们这里采用各种各样的衰老模板 I_1, I_2, \dots, I_K 去绘制目标人脸, 就是为了模拟这种多模式衰老的可能性.

在上述过程中, 直接舍弃了 T^i 的低频分量意味着放弃衰老模板 I_i 的绝大部分信息. 虽然增加小波分解的层数可以获得 I_i 的更多细节信息, 但这将使得输入图像 I 的五官轮廓保留程度较差, 从而降低合成人脸与原人脸的相像程度. 在卫星遥感影像融合技术中, 小波变换与高通滤波相结合的方法^[16] 曾经被用于解决全色光学图像与多光谱图像的融合问题. 在这一思路的启发下, 基于 1 层的小波分解, 我们采用了高通滤波算子 $HPF(\cdot)$ 来提取 T^i 低频分量 $C^1(T^i)$ 的细节成分, 并把它叠加到 $C^1(T_i)$ 上, 从而金字塔结构就修正为 $(HPF(C^1(T^i)) + C^1(T_i), D^1(T^i))$. 在新的金字塔结构中, 低频分量融合了衰老模板 I_i 低频分量的细节成分, 增强了衰老纹理的细节表现力, 同时又最大程度地保持了原有图像 I 的脸形轮廓信息.

对经过更新后的金字塔结构进行层数为 1 的二维离散小波逆变换, 如式(4)所示

$$\hat{T}_i = IDWT((HPF(C^1(T^i)) + C^1(T_i), D^1(T^i)), 1) \quad (4)$$

由式(4)得到的 \hat{T}_i 即为合成后的新的纹理矢量, 它兼具目标人脸 I 的脸形特征以及所选衰老模板 I_i 的皮肤细节特征, 实现了从模板到目标之间的无缝衰老纹理移植.

3.3 形状矢量的衰老化模拟

人脸衰老的观感并非仅仅来自于纹理特征, 形状的变化也是一个重要方面, 如外侧眉尖下垂、眼睛内陷、鼻子与嘴唇之间距离加大等. 我们提取这些衰老脸形的共性信息, 并对目标人脸的形状矢量进行修正, 实现脸形的衰老化模拟.

在对衰老人脸库 D_{old} 中的 K 个模板 I_1, I_2, \dots, I_K 分别进行特征点标定后, 我们已经获得了特征点矢量集合 $\{U^1, U^2, \dots, U^K\}$. 其算术平均 $\bar{U}_{old} = \frac{1}{K} \sum_{j=1}^K U^j$ 反映了年老人群脸形五官的共有形状特性, 利用相同的方法也可以获得年轻人群的平均特征点矢量 \bar{U}_{young} . 采用第 2 节中介绍的图像变形技术, 可以计算出 \bar{U}_{old} 与 \bar{U}_{young} 之间的位移光流场 $S_D = (\Delta x_1, \dots, \Delta x_N, \Delta y_1, \dots, \Delta y_N)$, 这里 N 为图像中像素的个数. 在输入图像 I 的矢量化表达 (S_I, T_I) 使用与这里相同的参考矢量(如 \bar{U}_{old}) 的前提下, 形状矢量 S_I 与 S_D 将具有相同的坐标系, 对它们进行矢量加法: $\hat{S}_I = S_I + S_D$, \hat{S}_I 即为修正后的形状矢量. 它综合了图像 I 的个体形状信息以及衰老人群脸形变化的共性信息.

这样, 我们就得到了个体 I 衰老变化后的矢量化分解表达 (\hat{S}_I, \hat{T}_I) , I 的衰老化图像 \hat{I} 可以由 (\hat{S}_I, \hat{T}_I) 通过前向 Warp^[14] 技术得到.

3.4 关于色彩

色彩是视觉感知的重要因素, 肤色的变更是人脸衰老的重要表现之一, 因此, 色彩重绘在真实感衰老人脸合成中同样起着重要的作用.

文献[17]在光照重绘的技术中引入了彩色化渲染, 这里采用与之类似的方法来实现肤色的衰老化模拟. 首先对所有彩色图像完成 RGB 空间到 HSV 空间的转换, 则它们的 V 分量就表现为灰度图像, 可以利用上文的算法计算出灰度值衰老图像 \hat{I} . 对于衰老模板 I_i 的 H 与 S 分量, 它们包含着衰老的肤色信息, 我们用其替代输入图像 I 的对应 H 与 S 分量. 对于灰度图像的 I 而言, 该操作实现了衰老肤色移植; 对于彩色图像的 I 而言, 该操作则实现了衰老肤色的重绘. 当然, 人脸的对准仍然是这些操作的前提, 采用第 2 节中介绍的矢量化方法, 设 H' 与 S' 分别为完成对准后的衰老模板 I_i 的 H 与 S 分量, 于是, (H', S', \hat{I}) 就构成了人脸 I 最终的衰老化彩色重绘结果.

综上所述, 我们给出了本文算法的总体框图, 如图 1 所示.

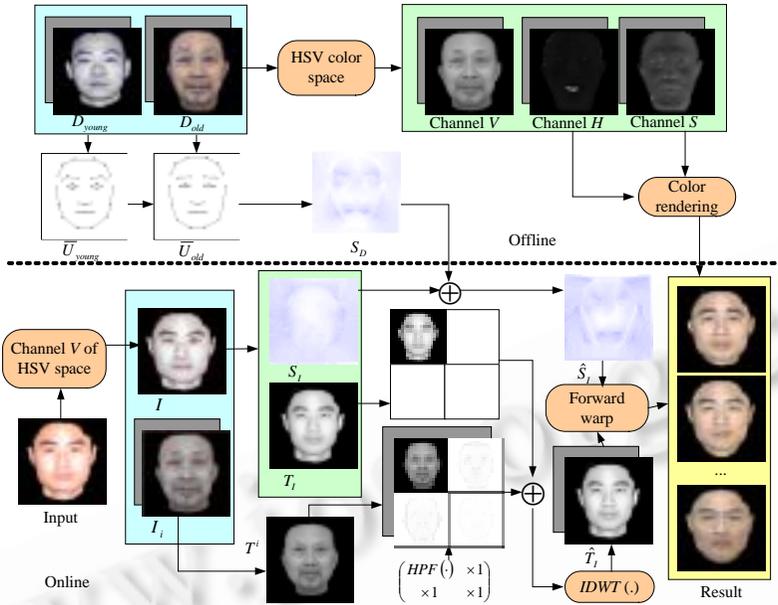


Fig.1 The system framework of facial ageing rendering
图 1 人脸衰老化绘制系统框架

4 实验结果与讨论

不同的小波基具有不同的特性,我们验证了选取不同小波对实验结果的影响.对于图 1 中的在线输入图像,分别采用 3 种不同的正交小波 Daubechies1(DB1),Daubechies2(DB2)和 Daubechies4(DB4)做小波变换,衰老绘制结果如图 2 所示.

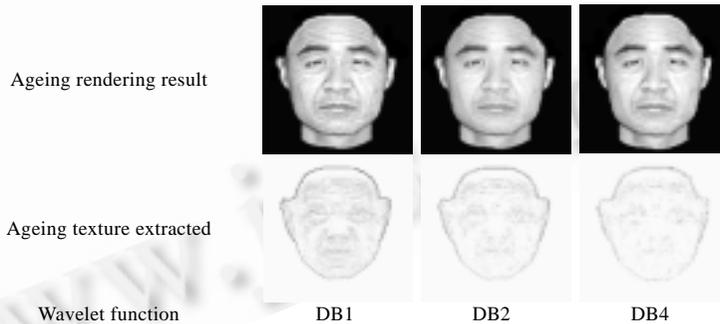


Fig.2 Impact of wavelet function selection for rendering
图 2 小波基的选择对绘制的影响

可以看出:采用 DB1 小波具有最明显的纹理移植效果;随着小波滤波器组系数个数的增加,绘制人脸的皱纹信息越来越模糊.这是因为不同小波的差异主要表现在能量汇聚的特性上,随着系数个数的增加,由于较多系数所带来的平滑作用,分解后的能量更多地集中在低频区,捕捉高频突变(如皮肤褶皱)的能力则随之减弱.图 2 中还给出了分别采用这 3 种不同小波分解得到的高频通道图像.

高通滤波器的选择同样影响着衰老合成的效果,不同的滤波窗口尺寸以及频率特性在提取年老模板纹理时有着不同的表现.图 3 显示了两种不同高通滤波器的尺寸对合成结果的影响:3×3 的滤波器带来了较为明显的高频噪声;相比之下,7×7 的滤波器则较好地实现了提取高频纹理信息和抑制高频噪声之间的折衷.

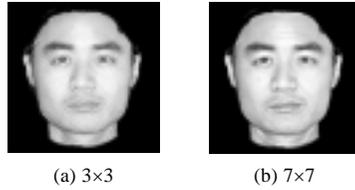


Fig.3 Impact of high pass filter window size for rendering
图 3 高通滤波器窗口尺寸对绘制的影响

下面,我们通过实验来验证本文提出的衰老绘制算法.图 4~图 6 中的所有输入、输出图像都是 256×256 的分辨率,小波变换采用 DB1 正交小波,使用 7×7 系数组的高通滤波器.图 4 中的年轻人脸图像(图 4(d))分别基于衰老模板图 4(a)~图 4(c)的衰老化合成结果如图 4(e)~图 4(g)所示.可以看出,合成结果不仅保留了与原始年轻人脸的相像程度,而且继承不同衰老模板的特征,体现出多样化衰老的特点.图 5 中的年轻人脸图 5(c)来自 MPI (max-planck institute)库^[10],分别采用图 5(a)~图 5(b)中的衰老模板,得到了图 5(d)~图 5(e)的多样化衰老绘制效果.注意到,图 5(e)表现出了衰老模板 4 中爱因斯坦式的皱纹.图 6 中应用图 6(a)中的衰老模板于油画艺术图片图 6(b),其衰老绘制结果图 6(c)同样具有表现力.

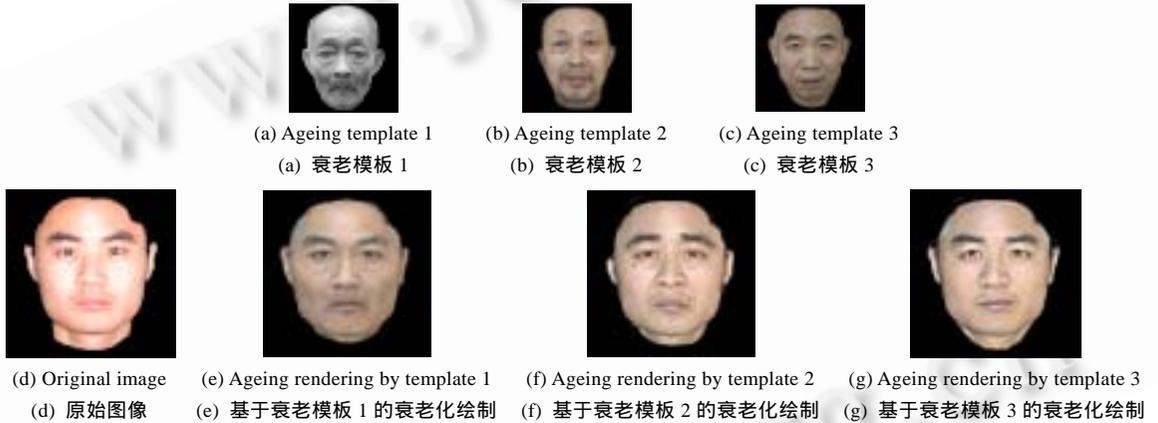


Fig.4 Multiple ageing rendering results for oriental face
图 4 东方人脸的多样化衰老绘制结果

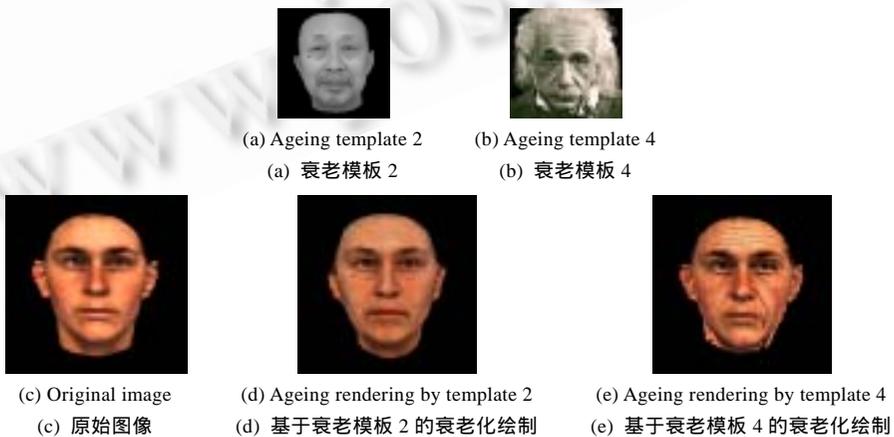


Fig.5 Multiple ageing rendering results for MPI face
图 5 MPI 库人脸的多样化衰老绘制结果

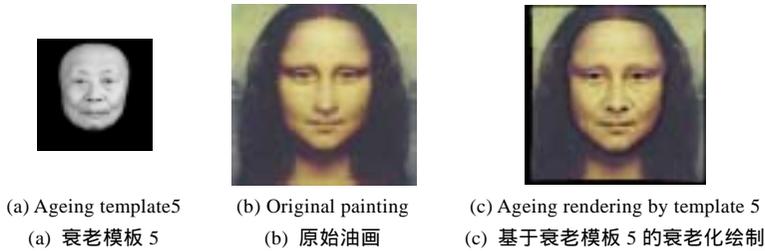


Fig.6 Ageing rendering of Mona Lisa

图 6 蒙娜丽莎的衰老绘制

人脸衰老化合成的效果难以采用量化的手段进行评价,目前,主要还是基于主观感受的方式.我们将本文的方法与当前一些主流方法进行了比较.文献[1,11]将 PCA 的方法引入人脸的年龄模拟,通过调整与年龄相对应的主元的系数,实现衰老化模拟.这一方法能够学习人脸库中年龄变化的共性,所以,提取出的衰老变化特征更具统计意义,但该方法也使得所有样本年龄变化的结果趋向同一,失去个体多样性.另外,对大时间跨度人脸图像库的依赖也增加了该方法实现上的难度.文献[2-4,10]使用 3D 的模型与方法来实现人脸的衰老化绘制,其绘制的效果令人满意,具有很强的真实感.然而,此类方法涉及到复杂的 3D 模型构建、数据配准、参数调整等,计算复杂度比较大.另外,文献[10]中的模型还依赖于大样本 3D 扫描人脸数据库的建立.相比之下,文献[6]所提出的图像细节移植方法和文献[7]所提出的衰老比例图方法在计算复杂度和绘制效果上与本文的方法基本类似,显示出基于图像进行衰老化绘制这种方法的潜力.本文进一步发展了这类方法,探索了小波工具在人脸绘制中的应用价值,基于 2D 的图像操作实现了具有逼真 3D 效果的衰老化合成,较好地折衷了真实感与易操作性之间的矛盾,并探索和对比了人脸多样化衰老绘制的效果.

5 结 论

本文提出了一种小波分解与纹理移植相结合的人脸衰老化绘制方法.在人脸矢量化分离的框架下,衰老模板的纹理矢量通过小波分解完成衰老特征的提取,并通过子图置换与高通滤波实现衰老纹理的移植.同时,提取衰老模板库中的脸型信息和肤色信息,并对目标的形状矢量和色彩通道进行修正,进一步增强了真实感衰老化绘制的效果.基于以上方法,本文设计并实现了完整的技术框架.实验结果表明,本文的方法可以实现从任意期望的衰老模板到目标人脸的衰老化绘制.另外,通过部分模块的替换,本文所提出的绘制框架也可以被扩展到其他更广泛的应用场合,如表情合成、漫画合成等.非统计的年龄绘制方法旨在合成出具有逼真视觉效果的人脸图像,这在游戏娱乐、电影制作等领域有着广泛的用途.然而,准确揭示和预测实际中的人脸衰老过程仍旧是非常困难的,并且依赖于大样本、大时间跨度的人像采集.利用统计学习的方法,从相同个体所有年龄阶段的人像中学习人在衰老过程中的一般统计规律,这应该是我们进一步努力的方向.

致谢 感谢德国 Max-Planck 研究所和 Thomas Vetter 教授提供的 MPI 人脸图像库.感谢西安交通大学人工智能与机器人研究所的老师和同仁们慷慨地同意我们在本文中用他们/她们的照片作为样本和示例.感谢智能人像研究小组的所有成员.

References:

- [1] Lanitis A, Taylor CJ, Cootes TF. Toward automatic simulation of aging effects on face images. *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2002,24(4):442-455.
- [2] Wu Y, Kalra P, Moccozet L, Thalmann NM. Simulating wrinkles and skin ageing. *The Visual Computer*, 1999,15(4):183-198.
- [3] Berg AC, Justo SC. Aging of orbicularis muscle in virtual human faces. In: *Proc. of the Int'l Conf. on Information Visualization*. Washington: IEEE Computer Society, 2003. 164-168.

- [4] Mazza E, Papes O, Rubin MB, Bodner SR, Binur NS. Nonlinear elastic-viscoplastic constitutive equations for aging facial tissues. *Biomechanics and Modeling in Mechanobiology*, 2005,4(2-3):178-189.
- [5] O'Toole AJ, Vetter T, Volz H, Salter EM. As we get older, do we get more distinct? Technical Report, No.49, Tübingen: Max Planck Institute for Biological Cybernetics, 1997.
- [6] Shan Y, Liu Z, Zhang Z. Image-Based surface detail transfer. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 2004,24(3):30-35.
- [7] Fu Y. Merging ratio images based realistic object class re-rendering. In: *Proc. of the 2004 IEEE Int'l Conf. on Image Processing (IEEE ICIP 2004)*, Vol 5. IEEE Signal Processing. Society, 2004. 3523-3526.
- [8] Zhao W, Chellappa R, Rosenfeld A, Phillips PJ. Face recognition: A literature survey. *ACM Computing Surveys*, 2003,35(4): 399-458.
- [9] Mallat S. A Theory for multiresolution signal decomposition: The wavelet representation. *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1989,11(7):674-693.
- [10] Blanz V, Vetter T. A morphable model for the synthesis of 3D faces. In: Rockwood A, ed. *Siggraph 1999, Computer Graphics Proc.* New York: Addison Wesley Longman, 1999. 187-194.
- [11] Hill CM, Solomon CJ, Gibson SJ. Aging the human face—A statistically rigorous approach. In: *Proc. of the IEE Int'l Symp. on Imaging for Crime Detection and Prevention*. IEE Press, 2005. 89-94.
- [12] Beymer D. Vectorizing face images by interleaving shape and texture computation. Technical Report, AIM-1537, MIT Artificial Intelligence Laboratory, 1995.
- [13] Cootes TF, Taylor CJ, Cooper DH, Graham J. Active shape models-their training and application. *Computer Vision and Image Understanding*, 1995,61(1):38-59.
- [14] Beier T, Neely S. Feature-Based image metamorphosis. In: *Proc. of the 19th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*. New York: ACM Press, 1992. 35-42.
- [15] Lemeshevsky GP. Multispectral multisensor image fusion using wavelet transforms. In: Park SK, Juday RD, eds. *Proc. of the Visual Information Processing VIII. SPIE Vol.3716*, 1999. 214-222.
- [16] Li BC, Luo JS. *Wavelet Analysis and Its Application*. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2003. 199-220 (in Chinese).
- [17] Shashua A, Riklin-Raviv T. The quotient image: Class-Based re-rendering and recognition with varying illuminations. *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2001,123(2):129-139.

附中文参考文献:

- [16] 李弼程, 罗建书. 小波分析及其应用. 北京: 电子工业出版社, 2003. 199-220.



刘剑毅(1975 -),男,陕西凤翔人,博士生,讲师,主要研究领域为计算机视觉,图形学.



游屈波(1980 -),男,博士生,主要研究领域为模式识别,计算机视觉.



郑南宁(1952 -),男,博士,教授,博士生导师,主要研究领域为模式识别,计算机视觉,数字视频,信号处理.