基于特征点约束的人脸纹理映射*

王法强，耿国华，李　康，贺毅岳
（西北大学 信息科学与技术学院，西安 710127）

摘　要：人脸纹理映射技术是计算机辅助颅骨面貌复原中一种特殊的真实感处理技术。针对人脸面部器官纹理映射难以准确实现的问题，提出一种基于特征点约束的人脸纹理映射方法。利用最小二乘保角映射参数化时需固定顶点来完成特征点约束。通过对大量单张、正面照片作为纹理进行映射，证实了该方法能够取得良好的映射效果。实验结果表明本方法鲁棒且效率高，降低了算法的复杂性。

关键词：人脸纹理映射；参数化；最小二乘保角映射；特征点
中图分类号：TP391　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1001-3695(2012)09-3509-03
doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2012.09.082

Texture mapping for feature based on points constraint

WANG Fa-qiang, GENG Guo-hua, LI Kang, HE Yi-yue
(*College of Information Science & Technology*, *Northwest University*, *Xi' an* 710127, *China*)

Abstract: Texture mapping for feature is a very special technology of realistic processing in computer-aided craniofacial rehabilitation. To realize the texture mapping for local organs of 3D human face accurately, this paper introduced a texture mapping method for feature based on points constraint. It used least squares conformal maps to realize this constraint. Using front photos for actual texture mapping proved that the method was effective. The experiment results show that this method is robust and efficient, and reduced the complexity of the algorithm.

Key words: texture mapping for feature; parameterization; least squares conformal maps; feature points

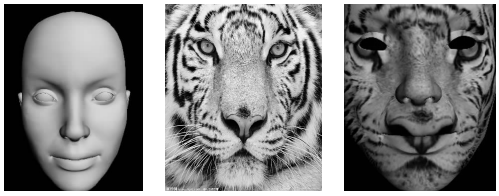
0　引言

具有真实感的三维人脸重建在多个领域具有重要地位，如颅骨面貌复原、影视广告、三维游戏、安全认证等。三维人脸重建过程中，人脸纹理映射是一个关键技术，它决定了人脸重建效果的真实度。如图 1 所示，在颅骨面貌复原中发现，基于颅骨复原出的人脸面皮缺少皮肤纹理，将严重影响复原人脸的真实感效果，为增强复原人脸的真实感效果，人脸纹理映射的研究变得极为重要。

(a)复原前的颅骨　　(b)复原后的人脸

图1　缺乏真实感的人脸模型

在人脸的三维网格表面实现纹理映射，就是建立一个网格上的点与纹理图像上的点的一一映射，即对三维人脸表面进行参数化。但是这种映射并不能完全体现人脸网格上的特定点与纹理图像特定点的准确对应问题。如图 2 所示，将虎的面部照片纹理映射到人脸之后，由于只是实现了整体对应，对于局部（如眼睛、嘴巴）的映射并没有取得应有的效果。



(a)人脸三维模型　　(b)虎面照片　　(c)纹理映射效果

图2　纹理映射效果

近年来，国内外很多研究者提出了约束纹理映射的方法。Levy 等人[1]把用户指定的特征点对应关系作为约束添加到参数化的目标函数中，通过共轭梯度法优化目标函数对应的稀疏矩阵来求解纹理映射的坐标，但这种方法并不能完全保证映射的有效性。Tang 等人[2]通过径向基函数插值非约束点解决特征的对应问题，但该方法依赖于 RBF（radial basis function，基函数）的选取。Kraevoy 等人[3]将模型参数化后的平面网格根据特征点进行剖分，然后对应纹理按照指定的特征点进行三角剖分，从而建立网格模型和纹理空间上点的对应关系，但该算法较为复杂，且是建立在大量迭代的基础上，给出的解不够精确。吴亚东等人[4]提出一种基于调和映射的纹理映射方法，但是该方法不能满足人脸纹理映射局部器官准确对应问题。另外，一些研究者还提出一种基于调和映射的约束纹理映射方法[5~7]，该类方法通过调和映射来参数化三维人脸模型，并通

收稿日期：2011-12-29；**修回日期**：2012-03-07　　**基金项目**：国家自然科学基金重点资助项目（60736008）；陕西省自然科学基金资助项目（2010JQ8011）；西北大学研究生自主创新基金资助项目（10YZZ15）

作者简介：王法强（1986-），男，山东泰安人，硕士研究生，主要研究方向为图形图像、可视化技术（wfq305@126.com）；耿国华（1955-），女，教授，博导，主要研究方向为图形图像、智能信息处理；李康（1980-），男，讲师，博士研究生，主要研究方向为计算机可视化；贺毅岳（1983-），男，博士研究生，主要研究方向为图形图像处理、统计学习.

过用户指定的特征点来进行交互调整,但是该类方法需要进行大量的局部自适应调整,因此增加了算法的复杂性。

本文提出一种基于特征点约束的人脸纹理映射方法,利用最小二乘保角映射(least squares conformal maps,LSCM)参数化时需要固定点来完成人脸特征点的约束。实验结果表明,本文方法在纹理映射过程中不需要局部自适应调整,保证了人脸纹理映射中特定点之间的对应关系,提高了效率。相对于 Levy 等人[1]提出的方法,LSCM 方法对于人脸网格模型参数化时能保证纹理映射的有效性。

1 参数化应用于人脸纹理映射

1.1 参数化

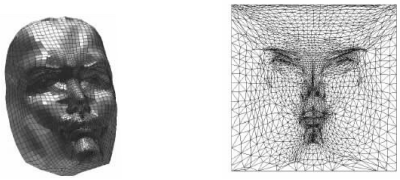
数字几何处理中的参数化主要是研究如何将三维几何模型映射到一个参数域上,即寻找三维几何数据和参数域上点的一一对应关系,并谋求某种与原始网格之间的几何度量形变的最小化。因此从纹理映射角度看,平面参数化极大程度上可以为二维纹理映射服务。可以将平面参数化分为两种类型:a)凸边界方法。基本思想是把网格的边界映射到一个平面的凸集的边界,把网格的内部顶点映射到这个凸集的内点,如调和映射方法,该类方法对于网格边界要求比较严格,参数化时内部网格往往形变较大。b)非凸边界法。即自由边界参数化,该方法在参数化时不需要提前将网格边界映射到一个凸集的边界,边界点的参数值在参数化过程中求得。如 LSCM 方法,该类方法在边界处的优势比较大,内部网格形变较小。

1.2 调和映射实现人脸纹理映射

调和映射应用于人脸纹理映射的过程可描述为:对于给定的三维人脸模型,找到其边界,将网格的边界点映射到一个二维纹理凸区域的边界上;对于非边界点,为了保证模型映射后的拓扑形变最小,采用弹性力学知识,计算调和权重,保证人脸网格的弹性势能最小,然后通过求解线性方程组确定所有内部点的位置。参数化效果如图 3 所示。假设从网格到参数域的映射为 h,则其离散的调和能量定义为

$$E^{\mathrm{harm}}[h]=\frac{1}{2}\sum_{(v_i,v_j)\in \mathrm{edge}(TM)} S_{ij}\,\|h(v_i)-h(v_j)\|^2$$

其中:v_i、v_j 为原始网格的顶点;S_{ij}为(v_i,v_j)的弹性系数。



(a)原始三维模型 (b)参数化效果

图3 调和映射效果

基于调和映射的约束纹理映射方法,是在网格模型和纹理图像之间精确地指定大量对应的约束特征点,通过局部自适应调整来满足纹理特定点的映射。

1.3 最小二乘保角映射

相对调和映射方法,Levy 等人[8]提出一种最小二乘保角映射法,该方法是基于 Cauchy-Riemann 等式的最小二乘逼近保角映射的参数化方法,其本身是一种准保角映射,参数化时无须提前定义边界,是一种自由边界参数化方法。该方法在参数化过程中需要至少固定两个顶点来使得参数化时有唯一非退化解。最小二乘保角映射算法原理描述如下:

a)用 κ 表示拓扑同构于圆盘的三角网格模型

$$\{\{v_i\}_{i=1}^{n},\Gamma=\{(v_{i_1},v_{i_2},v_{i_3})\}_{i=1}^{m}\}$$

其中:$\{v_i\}_{i=1}^{n}$表示 n 个顶点($n\geqslant 3$);Γ 表示由三个顶点组成的三角形。

b)计算局部坐标,为每个三角形构建一个局部正交基(x,y),其法向量与 z 轴同向。

c)本文考虑一个从 κ 到 R^2 光滑的映射 u,对于 Γ 的一个三角面片 T,可以重新定义映射如下:$U(x+iy)=u+iv$,即 $u|_T:(x,y)\rightarrow(u,v)$。根据柯西—黎曼方程可知,映射 u 在 T 上是保角映射当且仅当等式

$$\frac{\delta u}{\delta x}+i\frac{\delta u}{\delta y}=0 \tag{1}$$

在整个 T 上成立。很明显,这种保角条件不可能严格地满足整个三角面片 Γ,因此,对于每一个三角面的映射,该方法构造一个整体最小二乘约束的保角映射:

$$\min_u C(\kappa)=\sum_{T\in\Gamma}\int_T\left|\frac{\delta u}{\delta x}+i\frac{\delta u}{\delta y}\right|^2 dA \tag{2}$$

如果假设映射 u 在每个三角形 T 上都是线性映射,故式(2)可以写成

$$C(\kappa)=\sum_{T\in\Gamma}\left|\frac{\delta u}{\delta x}+\frac{\delta u}{\delta y}\right|^2 A(T) \tag{3}$$

其中:$A(T)$为三角形 T 的面积。假设 $u_i=u_i+iv_i(i=1,\cdots,n)$,然后 $C(\kappa)$可以被写成二次型的形式:

$$C(\kappa)=\boldsymbol{u}\times\boldsymbol{M}\times\boldsymbol{M}\boldsymbol{u} \tag{4}$$

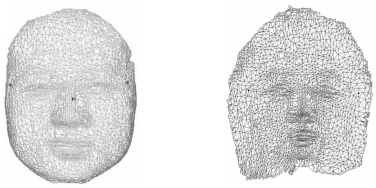
其中:$\boldsymbol{u}=(u^1,u^2,\cdots,u^n)$;$\boldsymbol{M}$ 是 $m\times n$ 的矩阵。

为了最小化式(2),并且使等式有唯一的非退化解,该算法需要至少固定两个点。假设固定 p 个顶点,则重新安排向量 $\boldsymbol{u}=(\boldsymbol{u}_f,\boldsymbol{u}_p)$,$\boldsymbol{u}_f$ 包含 $n-p$ 的自由顶点,$\boldsymbol{u}_p$ 即为 p 个固定点($p\leqslant n$),于是式(4)可以被写成:

$$C(\kappa)=\|\boldsymbol{M}_f\boldsymbol{u}_f+\boldsymbol{M}_p\boldsymbol{u}_p\|^2 \tag{5}$$

其中 $\boldsymbol{M}=(\boldsymbol{M}_f,\boldsymbol{M}_p)$,$\boldsymbol{M}_f$ 是 $m\times(n-p)$的矩阵,$\boldsymbol{M}_p$ 是 $m\times p$ 的矩阵。平方和的最小化式(5)可以通过共轭梯度法求解。

图 4 为固定两点后实现参数化的效果,可以看出,对于三维人脸模型,LSCM 方法相对于调和映射边界优势更明显,形变更小。



(a)原始三维模型 (b)参数化效果

图4 LSCM映射效果

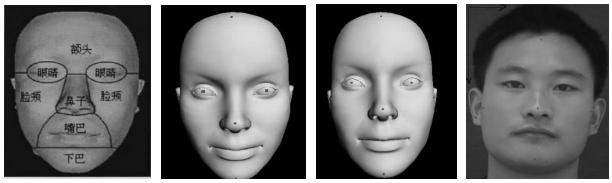
2 特征点约束的人脸映射

人脸纹理映射是一种特殊的纹理映射,它不仅仅是要求简单纹理贴图,更重要的是对于一些局部人脸器官能实现准确对应。基于 LSCM 参数化方法过程中需要提前固定顶点来实现唯一的非退化解,本文提出将参数化时固定的点分别作为约束特征点来解决人脸特定点的准确对应问题。

2.1 人脸特征点定义

在人脸纹理映射过程中,除五官外,面部皮肤材质基本相

同,影响映射效果的不对应关系只局限于面部五官,如眼睛、嘴巴的纹理贴图不对应,因此实验中针对面部五官区域进行处理,重点改善面部器官纹理映射的效果。这要求选取的人脸特征点要具代表性,且能在照片中准确找到相对应的点。基于人脸面部中较为明显的五官几何特征,且在纹理映射中很难实现较为准确的对应这一难题,本文提出一种划分人脸区域的方法,如图 5(a)所示,将三维人脸模型划分为八个区域,在每个区域里分别选取 $N(N\geqslant 1)$ 个顶点作为特征点(如图 5(b)、(c))。LSCM 参数化时需要固定 p 个顶点,即这 p 个顶点是用户交互设定的,基于此本文将所选取的三维人脸模型上的 N 个顶点作为固定点,而与之对应的二维坐标点,在纹理照片中设定坐标系,根据对应特征点的距离和位置来设定二维的 UV 坐标(如图 5(d)是与图 5(c)特征点对应的纹理照片)。这样,三维人脸模型对应二维纹理照片组成一个特征点约束的纹理映射。在实际映射过程中,为保证三维模型边界处能出现较好的映射结果,本文尽量将边界的约束点加入到参数中来。



(a)分区　(b)模型特征点标定　(c)模型特征点标定　(d)照片特征点标定

图5　特征点标定

2.2　算法流程及步骤

算法流程如图 6 所示。基于特征点约束的人脸纹理映射算法大致可分为以下四步:

a)在三维人脸模型与二维纹理照片上分别选取选取 N 个顶点(设定为如图 5(c)(d)所示的 9 个)称之为约束点。将三维人脸模型所选顶点坐标保存。对应图片的约束点的坐标,以图像左上角点为原点,向下为 y 轴正坐标,向右为 x 正坐标进行设定(图 5(d))。

b)读入三维人脸 obj 模型,查找三维人脸模型约束点。参数化开始时,利用 kd-tree 快速查找指定 N 个点坐标的存放位置,根据指定的二维坐标对三维人脸模型进行 LSCM 参数化。这样 N 个顶点作为约束特征点被添加到参数化中,将参数化后的二维 UV 坐标保存。

c)纹理坐标归一化。从所有 UV 坐标 (u',v') 中找到 UV 坐标最大值 $(u_{\max},v_{\max})$ 和最小值 $(u_{\min},v_{\min})$。所有顶点的归一化坐标为

$$\begin{cases} u=\dfrac{u'-u_{\min}}{u_{\max}-u_{\min}} \\ v=\dfrac{v'-v_{\min}}{v_{\max}-v_{\min}} \end{cases}$$

则所有顶点的坐标映射到 $u\in(0,1)$,$v\in(0,1)$,与纹理空间相对应。

d)对于三维人脸模型中的非顶点像素,本文采用插值算法得到其像素值。

3　实验结果及分析

利用工具 VC ++6.0 、OpenGL 在 PC 机上实现了特征点约束的人脸纹理映射。PC 配置为 Intel® Core™ 2 Quad CPU Q9400 2.66 GHz、4 GB 内存、操作系统为 Windows XP。实验中,采用颅面正面数据,利用分割方法将耳朵及后脑面皮分割出去,这样便于照片在映射过程中寻找边界。为验证本方法的有效性,本文选取了多张照片来映射人脸模型,映射效果如图 7 ~9 所示。在人脸映射过程中,在各个分区总共选取 9 个顶点来进行约束,图 7 为作者本人照片映射于三维颅面之后不同角度的绘制效果图;图 8 照片为从网上下载图片应用于人脸纹理映射的效果,并标记为 NWU(Northwest University);图 9 为利用虎头照片映射到人脸效果图。

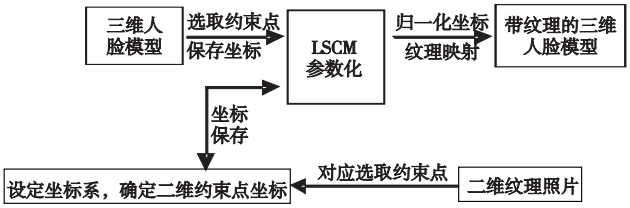
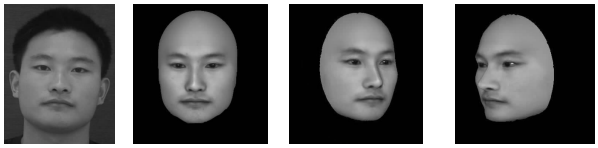


图6　算法流程

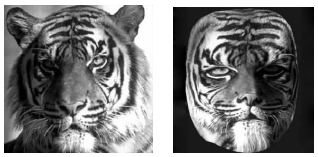


(a)照片　(b)正面映射效果　(c)侧面映射效果左　(d)侧面映射效果右

图7　纹理映射1

(a)照片　(b)正面映射效果

图8　纹理映射2



(a)照片　(b)正面映射效果

图9　纹理映射3

结果分析如下:

a)优点。相对基于调和映射的人脸纹理映射方法,本算法可以提高人脸纹理映射的准确性,能够满足人脸纹理映射的基本要求;对于基于特征点约束的调和映射算法,本文不需要局部自适应调整,明显降低了算法的复杂性,提高了效率。由于调和映射和 LSCM 方法最终都归结为求解大型线性方程组问题,效率与线性方程组的维数相关,故两种参数化方法效率基本相同。通过实验证实,对于同一人脸模型(顶点数为 2 679 个,三角形个数为 4 971 个),分别进行调和映射和 LSCM 参数化(LSCM 方法固定 2 个顶点),两种参数化方法所需时间基本相同(调和映射为 0.471 s,LSCM 参数化方法 0.469 s),但是对于基于特征点约束的调和映射方法,还需要自适应调整,算法复杂度提高,效率下降。

b)缺点。实验中,采用手动选取三维人脸特征点,距离自动人脸纹理映射还有一定差距,特征点选取较为繁琐。另外,本算法纹理映射的有效性是通过固定顶点的方法来完成,为保证纹理映射形变较小,需要精确测量照片上各特征点的距离,以此定义照片上特征点坐标,过程繁琐。

4　结束语

人脸纹理映射是一种特殊的纹理映射,映射时会出现局部器官不对应关系。本文提出了一种基于特征点约束人脸纹理映射的方法,首次提出根据人脸分区定义特征点,并将特征点加入到 LSCM 参数化中作为约束,来保证人脸纹理映射的效果,提高了纹理映射方法的准确性。相对于其(下转第 3527 页)

(上接第 3511 页)他约束纹理映射方法,本算法效率明显提高。

参考文献:

[1] LEVY B. Constrained texture mapping for polygonal meshes[C]// Proc of ACM SIGGRAPH. New York:ACM,2001:417-424.

[2] TANG Ying,WANG Jin,BAO Hu-jun,*et al*. RBF-based constrained texture mapping[J]. Computers and Graphics,2003,27(3):415-422.

[3] KRAEVOY V,SHEFFER A,GOTSMAN C, *et al*. Constructing constrained texture maps[C]//Proc of ACM SIGGRAPH. New York: ACM,2003:326-333.

[4] 吴亚东,韩永国,蔡勇. 基于调和映射的纹理映射方法[J]. 计算机工程与应用,2003,39(17):61-62.

[5] 郭延文. 纹理映射、合成与替换算法研究[D]. 杭州:浙江大学,2005.

[6] GUO Yan-wen,PAN Yong-juan,CUI Xiu-fen,*et al*. Harmonic maps based constrained texture mapping method[J]. Computer Aided Design and Computer Graphics,2005,17(7):1457-1462.

[7] 任文彬,王国胤,龚勋,等. 基于人脸特征点的约束纹理映射[J]. 计算机科学,2010,37(10A):70-72.

[8] LEVY B, PETITJEAN S, RAY N,*et al*. Least squares conformal maps for automatic texture atlas generation[C]//Proc of ACM SIGGRAPH. New York: ACM,2002:362-371.