

基于球面参数化的人脸动画重映射

姚 健 王阳生 丁 宾 李基拓

(中国科学院自动化研究所, 北京 100190)

摘 要 动画重映射是生成真实感人脸动画的重要途径,为了快速地进行人脸动画重映射,提出了一种基于球面参数化的动画重映射算法,该算法先通过引入球面参数化来保证参数域上的三角面不重叠,再利用重心坐标插值,以实现简单、无歧义的重映射。该算法不仅能够保证真实感的基础上显著提升重映射的速度,并可减少需要标记的关键点个数。另外,结合唇线自动分割和区域划分还能修正直接插值产生的错误。实验表明,该新算法可用于 Motion Capture 采集的稀疏关键点的人脸动画数据的重映射。

关键词 球面参数化 动画重映射 人脸动画 Motion Capture 唇线分割

中图法分类号: TP391.41 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2009)07-1406-07

Facial Animation Remapping Based on Spherical Parameterization

YAO Jian, WANG Yang-sheng, DING Bin, LI Ji-tuo

(Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

Abstract Animation remapping is an important way to produce realistic facial animation. We introduce spherical parameterization to prevent overlap and utilize barycentric coordinate as the interpolation weight of motion vectors, which achieves fast remapping of realistic animation and requires fewer key points. Combined with automatic division of lip contact line and lip region division, it can correct errors of the mouth animation. The method is applicable to real-time facial animation remapping for sparse markers in Motion Capture.

Keywords spherical parameterization, animation remapping, facial animation, Motion Capture, lip contact line division

1 引 言

人脸动画是图形学中的重点和难点,由于人对表情的敏感性和脸部生理机构的复杂性,因此用手动编辑来生成具有真实感的人脸动画几乎是不可能的。针对这个问题,MPEG-4 甚至还特别制定了人脸动画标准,并利用脸部定义参数(FDP)和脸部运动参数(FAP)来对人脸对象进行编码,以达到数据压缩的目的。但使用这些理论化的参数仍然不能调整出具有真实感的人脸动画,为此,越来越多的电影和艺术制作者都采用 Motion Capture 作为人脸动画的生成工具,使用该工具只需要先在演员的脸部贴

上标记点,然后在演员做表情动作的同时,就可以捕捉到这些标记点的运动,再进行动画重映射即可生成具有真实感的 3 维人脸动画。但用 Motion Capture 采集人脸动画时,需要在演员的脸上贴大量的标记点,并且随着标记点数量的增加,对处理系统性能的要求也急剧增加。

另外,从 Motion Capture 采集到的数据还需要经过重映射才能够用于不同形状和拓扑结构的人脸模型。动画的重映射也称为形变转移(deformation transfer),其是指将源三角网格的顶点位移迁移到目标模型上。可见,人脸动画的重映射一直是计算机图形学中受到关注的问题,针对这个问题已有多位学者进行过研究,并提出了各种算法。例如表情

收稿日期:2008-01-01; 改回日期:2008-03-04

第一作者简介:姚 健(1979 ~),男。中国科学院自动化研究所模式识别与智能系统专业博士研究生。主要研究方向为计算机图形学、人脸建模和动画、虚拟现实。E-mail: zergb@163.com

克隆^[1]就是利用网格映射关系对顶点运动矢量进行插值,并根据局部形状特征调整目标矢量的方向和大小,这虽能够得到很好的映射效果,但由于该方法是使用简单的圆柱投影来确定顶点的对应关系,因而无法避免网格折叠产生的歧义。Sumner 等人提出了一种较为通用的方法^[2],其虽可以处理任意非线性的变形,但这些方法的前提都是需要源三角网格尽可能的稠密,至少需要和目标三角网格的密度大致相同。

针对这些问题,本文首次在重映射中通过引入球面参数化来作为基础,并使用关键点网格的三角形重心坐标来对运动数据进行插值,从而实现了从稀疏网格向稠密网格的动画重映射。在 Motion Capture 的应用中,只需要手动标记少量的关键点(如图 1 所示),就能实时获得具有真实感的人脸动画效果。这不但缓解了系统精度和处理速度之间的矛盾,还有能够保证演员的舒适度和可表演性等优点。

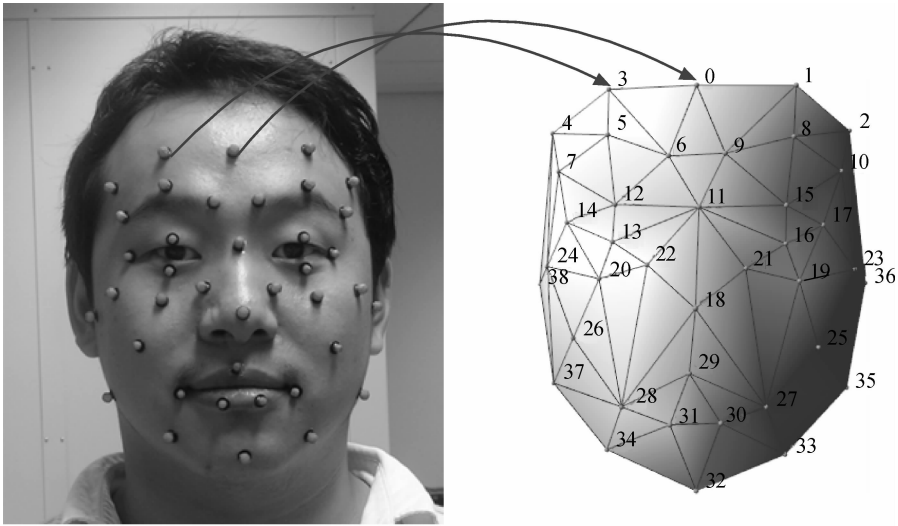


图 1 标记点及关键点网格
Fig. 1 Markers and key point mesh

本文算法的思想是先将目标模型变换到球面参数域中,以确定关键点对普通顶点的插值系数,然后通过插值获得变形网格动画,其整体流程如图 2 所示,主要分为 4 个步骤:(1)对目标模型进行球面参数化,在参数化的过程中保持三角网格的形状比例不变;(2)根据预定义的关键点网格,分割出以关键点为顶点的球面三角形,并通过计算每个普通顶点在球面三角形中的重心坐标来进一步计算运动插值

系数;(3)由于嘴部顶点同时受上、下唇关键点的影响,为了避免直接插值导致嘴无法张开的问题,需要对嘴部顶点进行划分,以便将关键点的影响区域限制在同一侧的嘴部顶点上;(4)根据关键点运动矢量重映射和插值系数,先计算出普通顶点的运动矢量,再通过对运动矢量做平滑来获得具有真实感的人脸动画。

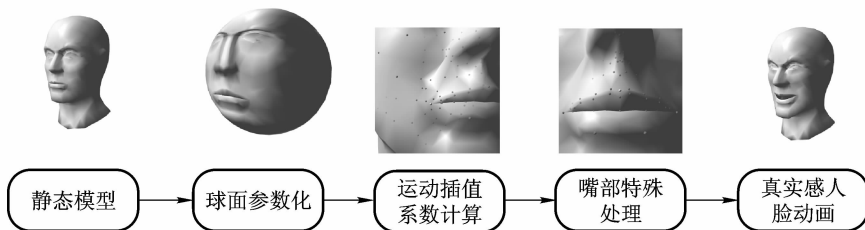


图 2 流程图
Fig. 2 Flow chart

2 球面参数化

网格参数化^[3]是对三角网格进行处理的基础,根据参数域的不同,参数化方法主要分为平面参数化和球面参数化两种。相对来说,球面参数化可以处理封闭的、亏格为零的三角网格,其适用范围明显大于平面参数化,因而近年来受到广泛关注,并出现了很多球面参数化方法^[4-6]。球面参数化的应用范围很广,包括纹理均匀映射、重网格化、多分辨率网格、网格变形等,其主要作用是去除模型上的交叠。在以距离为度量来进行参数插值时,由于球面参数化可以有效地避免由网格交叠引起的歧义,从而可以防止动画中出现交叉的错误。由于球面具有各向同性的特点,因此可以使由网格参数化引起的误差最小,这也是选择球面参数化的原因之一。

本文使用了凸组合球面参数化方法^[7],这是一种类似于松弛法^[6]的方法。这种方法是先以目标模型的中心为球心,沿径向把所有顶点投影到最小包围球面上,并归一化;然后把平面向量凸组合的概念扩展到球面上,再通过线性系统迭代来完成参数化过程。对于任意顶点 P_i ,其邻域点是 P_j ,其参数化迭代公式如下:

$$Q_i = \frac{1}{\sum_j \omega_{i,j}} \cdot \sum_j \omega_{i,j} \cdot P_j \quad (1)$$

其中

$$\omega_{i,j} = \frac{1}{\|P_i - P_j\|}$$

$$\bar{P}_i = \frac{Q_i}{\|Q_i\|} \quad (2)$$

式中权重 $\omega_{i,j}$ 与连接两个顶点的边的长度成反比,可以通过插值来获得中间变量 Q_i 。为了确保顶点始终在球面上,需要归一化中间变量 Q_i ,才能得到新的顶点坐标 \bar{P}_i 。然后遍历所有顶点,并计算新的坐标,直至误差收敛为止,就得到了最终的参数化球面。这种算法的优点是效率较高,且具有保形的性质。图 3 是对人脸模型进行球面参数化的一些结果。

经过球面参数化后的网格,其三角面都变为球面三角形(图 4)。球面三角形是指由球面上的 3 个顶点构成的三角形,由于它的每条边都是球面上某个大圆的圆弧,因此其性质与平面三角形有较大的差别。球面三角形的一个重要性质就是球面角盈

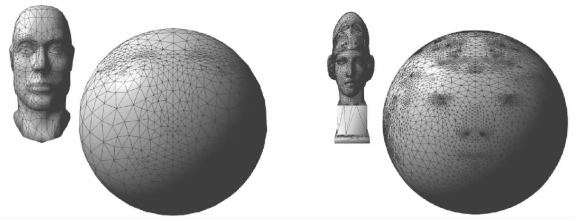


图 3 球面参数化的实例

Fig. 3 Examples of spherical parameterization

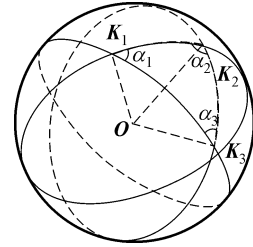


图 4 球面三角形

Fig. 4 Spherical triangle

(即球面面积) $e = \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 - \pi$,当 $e = 0$ 时,则退化成为平面三角形^[8]。球面参数化的结果是归一化的单位球面,此时球面角盈就等于球面三角形的面积,这在后面重心坐标计算中将会用到。

3 根据三角形重心坐标的运动插值

3.1 重心坐标计算

重心坐标是参数化常用的一种局部坐标表示法,即三角形所在平面的任意点的坐标 P ,都能用顶点 K_1, K_2, K_3 坐标的加权平均值表示(式(3)),这 3 个权值所构成的向量 (c_1, c_2, c_3) 就称为点 P 在该三角形上的重心坐标,重心坐标分量的大小与顶点所对应的子三角形面积 s_i 成正比。当点 P 在三角形内部时,则子三角形面积为正,即重心坐标的所有分量都大于零;如果点 P 落在三角形的某条边之外,则相应边上的子三角形的面积为负,此时重心坐标至少有一个分量小于零。

$$P = c_1 \cdot K_1 + c_2 \cdot K_2 + c_3 \cdot K_3 \quad (3)$$

平面三角形重心坐标的计算公式为

$$c_i = \frac{s_i}{s_1 + s_2 + s_3}$$

$$= \frac{e_i}{e_1 + e_2 + e_3} \quad (4)$$

其中, s_i 表示第 i 条边与点 P 所构成的子三角形的

面积, e 为球面三角形的面积。尽管经过球面参数化处理后, 关键点三角形也变形成为球面三角形, 其重心坐标已不满足线性精度^[9], 但在模型网格足够密集的情况下(均匀网格的三角面的个数大于200), 仍可以近似认为三角形重心坐标具有相似不变性。这时, 需要把相应的平面三角形面积替换为球面三角形面积, 即将 s_i 替换为 e_i 。

3.2 顶点运动矢量插值

通过以上计算获得的重心坐标, 就可得到关键点对顶点的影响系数。由于只处理了三角形内部的点, 而落在关键点网格外的顶点其影响系数都为零, 因此会导致运动时出现明显的边界。为此, 本文通过设定一条过渡带来使关键点的影响区域扩展到关键点网格外。对于关键点网格外的顶点, 可搜索距离它最近的关键点三角形, 如果其最短距离小于过渡带宽度, 则顶点就要受这个三角形的影响, 其插值系数的大小与距离大小成反比。

如图5所示, 图中实线所包含的区域为关键点网格, 其边界向外垂直扩展获得的虚线区域就是过渡带。图中颜色的深浅表示该位置顶点的权值之和, 如果越深(蓝色), 则越接近于1; 反之越浅(白色)则越接近于零。顶点与关键点网格间的关系可

图5 顶点权值过渡带
Fig.5 Transition band of vertex weight

分为以下3类:

(1) 顶点在关键点三角形内, 也包括落在三角形的顶点、边上的情况。此时顶点将受到周围3个关键点 K_1 、 K_2 、 K_3 的影响, 其权值之和等于1。

(2) 顶点在过渡区域内, 且落在某条边的端点范围内。此时顶点只受两个端点 K_1 、 K_2 的影响, 其权值之和小于等于1。

(3) 顶点在过渡区域内, 但并不落在任何边的端点范围内。此时顶点只受一个关键点 K_1 的影响, 其权值之和小于等于1。

对于第1类顶点, 插值系数就等于重心坐标。而第2、3两类顶点落在三角网格外, 其处理的方式是先忽略负值的重心坐标分量, 再对余下的分量之和进行归一化, 归一化的值与顶点到网格边界的距离成反比。

假设关键点的运动矢量分别为 m_{K_1} 、 m_{K_2} 、 m_{K_3} , 则上述3个不同类的顶点 A 、 B 、 C 的运动矢量的计算公式如下:

$$\begin{cases} m_A = c_{(K_1,A)} \cdot m_{K_1} + c_{(K_2,A)} \cdot m_{K_2} + c_{(K_3,A)} \cdot m_{K_3} \\ m_B = \frac{c_{(K_1,B)} \cdot m_{K_1} + c_{(K_2,B)} \cdot m_{K_2}}{c_{(K_1,B)} + c_{(K_2,B)}} \cdot \frac{d_{ext} - d_{(B, \overline{K_1K_2})}}{d_{ext}} \\ m_C = m_{K_1} \cdot \frac{d_{ext} - d_{(C,K_1)}}{d_{ext}} \end{cases} \quad (5)$$

其中, d_{ext} 是过渡带的宽度, $c_{(K_i,A)}$ 表示关键点 K_i 对顶点 A 的影响系数, $d_{(B, \overline{K_1K_2})}$ 表示顶点 B 到边 $\overline{K_1K_2}$ 的垂直距离, $d_{(C,K_1)}$ 表示顶点 C 到关键点 K_1 的距离。通过式(5)就可以计算得到由关键点插值的顶点的运动矢量。图6(b)是运动插值后的结果, 其中绿色球表示关键点, 有色线段表示运动矢量, 其中红色表示运动幅度较大, 蓝色表示运动幅度小。

图6 运动矢量插值和平滑

Fig.6 Interpolation and smooth of motion vector

3.3 运动矢量重映射和平滑

用 Motion Capture 采集获得的关键点运动矢量并不能直接应用到目标模型的关键点上。这是因为演员与目标模型的脸部形状并不相同,若要直接驱动,则可能会导致顶点交叉或运动幅度不恰当的动画错误,所以需要调整运动矢量的方向和幅度。本文采用了局部包围盒方法^[6]进行调整。局部包围盒是一个具有方向性的、包括顶点及其邻域点的最小长方体,其方向由局部坐标系所确定。如图 7 所示,顶点 V 的局部坐标系可通过如下方式确定:首先把顶点的法向量方向作为 y 轴,并由此确定顶点的切面;然后取顶点的任意一条相邻边在切面上的投影方向作为 x 轴;最后计算 x 、 y 轴的叉积即可获得 z 轴的方向。计算点 V 及其所有邻域顶点在局部坐标系上的投影就可以获得局部包围盒在局部坐标系 3 个坐标轴上的尺度 a 、 b 、 c 。根据源、目标关键点网格上包围盒的方向和尺度的变化(如图 7 所示)就能够确定两个局部坐标系之间的变换矩阵

$$R = \begin{bmatrix} x_1/a_1 \\ y_1/b_1 \\ z_1/c_1 \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} x/a \\ y/b \\ z/c \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中, x 、 y 、 z 是点 V 的局部坐标轴在世界坐标系下的方向矢量, x_1 、 y_1 、 z_1 则对应于点 V_1 的局部坐标轴。

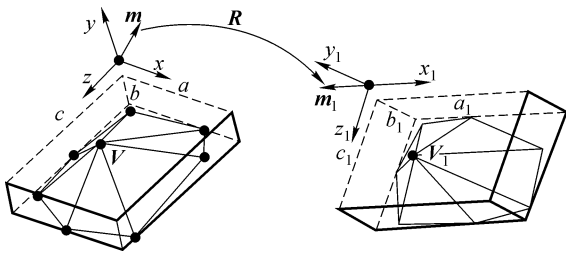


图 7 局部包围盒变换

Fig. 7 Local bounding box transformation

设点 V 和点 V_1 分别是源、目标网格上的对应关键点,已知变量 m 是点 V 的运动矢量,变换矩阵为 R ,则点 V_1 的运动矢量为 $m_1 = R \cdot m$ 。

由于是使用关键点网格来对运动矢量进行插值,因此在网格三角形的交界处必然会产生一定的边界效应;此外,由于局部包围盒是顶点的区域特征,其随网格局部结构的不同而变化很大,因而在

关键点运动矢量的重映射过程中,也不可避免地会引入误差。针对以上两个问题,可利用式(1)对插值获得的顶点运动矢量做加权平滑,并将式中顶点坐标替换为对应的顶点运动矢量。平滑结果如图 6(c) 所示(注意图中下唇的形状变化)。

4 嘴部特殊处理

由于目标模型是 0 亏格的封闭网格,模型的嘴部网格是缝合在一起的,其只是以重心坐标进行插值,因而会导致嘴无法张开。为此需要先沿唇线分割嘴部网格,再把上下唇顶点的插值系数限制在各自的嘴唇范围内。

由于唇线具有谷线的特征,因此在嘴角顶点已知的情况下,搜寻两嘴角之间的最短路径就可以获得唇线。本文使用了 Dijkstra 算法^[10]来计算最短路径,该算法可用于计算一个节点到其他所有节点的最短路径。在网格中,顶点就是节点,其中具有长度的边就是加权路径。通常路径从左嘴角开始向外逐层扩展,直到遇到右嘴角为止,路径上所有顶点就构成了最短路径;然后复制最短路径上除嘴角外的所有顶点,并分别关联到两侧的三角面上就完成了唇线分割。图 8 是唇线分割的实例,由该图可见,分割前后网格阴影有明显变化。需要注意的是,最短路径的光滑程度取决于网格结构,在分割前可以对其进行适当的平滑。

嘴唇接缝处的顶点尽管都是重复的,但它们分别属于上、下嘴唇,为了将关键点的影响限制在各自的范围内,需要判定顶点属于上唇还是下唇。这里同样用到了 Dijkstra 最短路径算法,但只需搜索任意顶点到上唇中点(关键点)的最短路径,并通过判定该路径是否与唇线相交,就可以区分上下唇顶点。如图 9(a) 所示,若顶点 A 、 B 到上唇中点 K 的最短路径与唇线没有产生交叉,则该点为上唇顶点,其只受上唇关键点影响。反之,若顶点 C 、 D 与 K 的最短路径与唇线产生交叉,则该点是下唇点,只受下唇关键点的影响。图 9(b) 和 9(c) 是上下唇区分前后的对比,红色点表示受上唇关键点 K 影响的所有顶点,颜色越浅表示受关键点的影响越小。由图 9(b) 可以看到,处理前,关键点 K 的影响一直延续到下唇的顶点,这显然不是希望获得的结果。而通过上下唇的区分后(图 9(c)),关键点 K 的影响则被准确地限制在上唇范围内。

图8 基于最短路径的唇线分割

Fig. 8 Lip contact line division on shortest path

图9 嘴部顶点权值

Fig. 9 Weight of mouth vertices

5 实验结果和结论

为验证本文算法的效果,采用4个差异较大的人脸网格模型对演员不同表情进行了动画映射实验,映射结果与演员真实影像的对比如图10、图11所示。

实验中,首先在演员的脸上放置了39个球形标记点,并根据这些点手动建立了具有64个三角面的关键点网格(如图1所示)。关键点网格构建标准是网格的规则化,即尽量使每个三角面接近正三角形,以便使重映射产生的误差较小。

实验中对于不同拓扑、形状模型,只需要预先计算运动插值系数,就能实时映射(映射速度大于60 fps)生成具有真实感的人脸动画,且动画符合不同模型的面部特征,其生成的人脸动画效果大大优于手动调节的表情动画,且算法所需的关键点个数较少,这就降低了通常人脸动画需要采集较多标记点的需求。

总的来说,算法具有标记点需求量少、运算简便快速的优点。但从实验结果可以看出,本文算法不能处理表情的细节(皱纹),这主要是由于运动信息

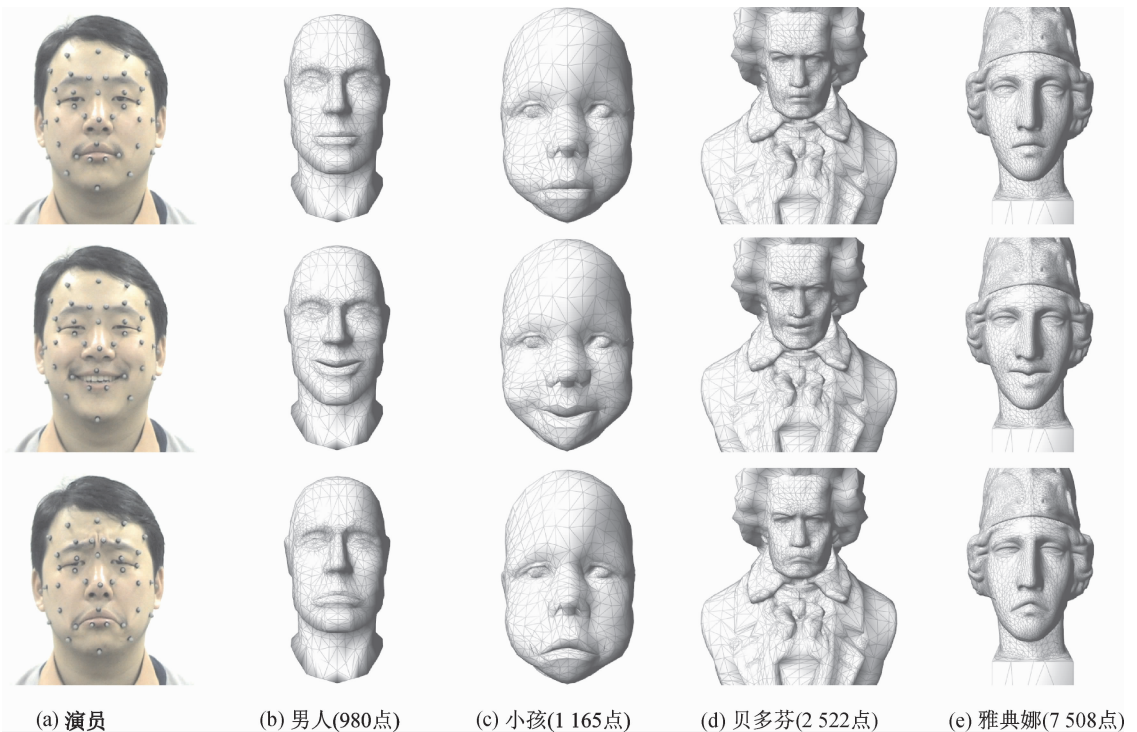


图10 动画重映射结果(I)

Fig. 10 Result the of animation remapping(I)

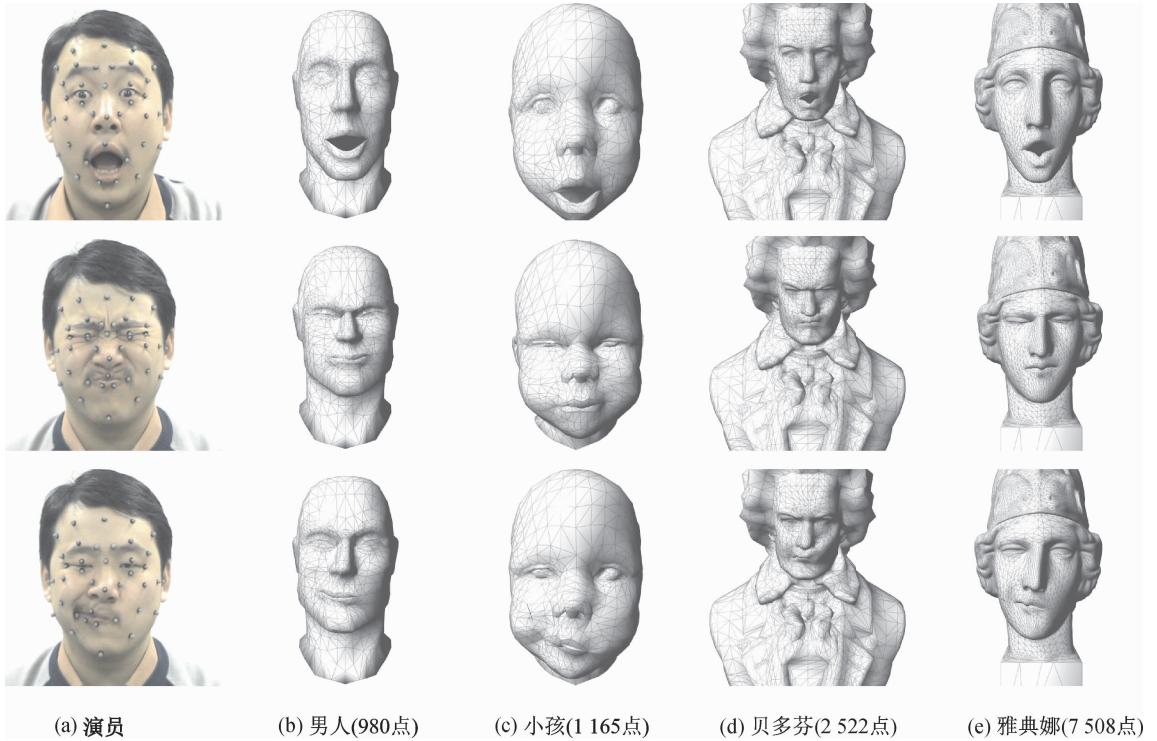


图 11 动画重映射结果(II)

Fig. 11 Result the of animation remapping(II)

来自于稀疏关键点而导致了信息缺失的缘故,可能的解决方法是根据人脸解剖特点建立局部的皱纹模型,用来近似拟合出细节信息。此外,算法的局限性在于,目标模型必须是 0 亏格的封闭网格,或者是近似封闭的可以球面参数化的网格。因此将来的研究重点是扩展算法的适应面,使之可用于包含子网格(眼球、牙齿等)的复杂结构模型上。

参考文献 (References)

- 1 Noh J, Neumann U. Expression cloning [A]. In: Proceedings of ACM SIGGRAPH[C], Los Angeles, CA, USA, 2001: 277-288.
- 2 Sumner R, Popović J. Deformation transfer for triangle meshes[A]. In: Proceedings of ACM SIGGRAPH[C], Los Angeles, CA, USA, 2004: 399-405.
- 3 Sheffer A, Praun E, Rose K. Mesh parameterization methods and their applications[J]. Foundations and Trends in Computer Graphics and Vision, 2006, 2(2): 105-171.
- 4 Gotsman C, Gu X, Sheffer A. Fundamentals of spherical

parameterization for 3D meshes [A]. In: Proceedings of ACM SIGGRAPH[C], San Diego, CA, USA, 2003: 358-363.

- 5 Praun E, Hoppe H. Spherical parametrization and remeshing[A]. In: Proceedings of ACM SIGGRAPH[C], San Diego, CA, USA, 2003: 340-349.
- 6 Alexa M. Merging polyhedral shapes with scattered features[A]. In: Proceedings of International Conference on Shape Modeling and Applications[C], Aizu-Wakamatsu, Japan, 1999: 202-210, 278.
- 7 Hu Guo-fei, Fang Xing, Peng Qun-sheng. Convex combination spherical parameterization[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2004, 16(5): 632-637. [胡国飞,方兴,彭群生.凸组合球面参数化[J].计算机辅助设计与图形学学报, 2004,16(5): 632-637.]
- 8 Wolfram Research. MathWorld [EB/OL]. <http://mathworld.wolfram.com>, 2007-12-8.
- 9 Langer T, Belyaev A, Seidel H. Spherical barycentric coordinates [A]. In: Proceedings of Eurographics Symposium on Geometry Processing[C], Sardinia, Italy, 2006: 81-88.
- 10 Johnson D. A note on Dijkstra's shortest path algorithm[J]. Journal of ACM, 1973, 20(3): 385-388.