

带虚拟边约束的面部表情基生成方法

李韩超 沈成泽 刘新国

(浙江大学计算机辅助设计与图形系统全国重点实验室 杭州 310058)

摘 要 针对网格形变迁移算法在生成面部表情基时可能出现的模型表面穿透问题,本文提出一种带虚拟边约束的面部表情基生成算法.该算法基于一组模板表情基,可以为不同的对象目标生成个性化的人脸表情基.首先,算法依据顶点之间的距离信息检测出人脸模型中可能发生模型表面穿透的区域,在这些区域添加新的顶点连接关系,本文称为虚拟边;然后以这些虚拟边约束网格形变迁移算法,在生成表情基的同时防止模型发生表面穿透现象.在不同人脸模型上的实验结果表明,算法添加虚拟边的精度和效率优于手动操作以及之前提出的相关算法,并且虚拟边约束可以有效防止表情迁移过程中的模型穿透问题.最后,本文实验为不同的人脸网格生成了表情基,并应用生成的表情基进行表情迁移,实验结果验证了本文提出的带虚拟边约束的面部表情基生成方法的有效性.

关键词 表情动画;面部表情基生成;网格形变迁移;面部表情迁移
中图法分类号 TP391 **DOI 号** 10.11897/SP.J.1016.2023.02453

Facial Blendshape Generation Method with Virtual Edge Constraints

LI Han-Chao SHEN Cheng-Ze LIU Xin-Guo

(State Key Lab of CAD&CG, Zhejiang University, Hangzhou 310058)

Abstract There is an increasing need for creating personalized digital avatar as the explosive development of AR and Metaverse applications. Blendshape based facial animation is a de-fact standard technique for expression synthesis of the digital avatars. A facial blendshape consists of a set of models corresponding to the typical semantic expressions. However, the blendshape is traditionally created by experienced artists using professional animation tools, which is time consuming and cost expensive. In this paper, we proposed an automatic facial blendshape generation method, which takes as input a set of template blendshapes and transfer the blendshape template to target subjects. It processes the model in the template blendshape one by one, and takes advantages of the deformation transfer technique to generate the personalized expression model for the target subject. Model penetration is a common problem incurred in the blendshape transfer process. To address this problem, we propose virtual edge constraints to prevent the penetration for the deformation transfer equation. It is noticed that the penetration is the result of self-intersection and usually occurs in the thin parts with two or more layers of surfaces, e.g. mouth, eye, and ear. To automatically detect the parts that are prone to penetration, we examine the geodesic distance and the Euclidean distance between the vertices of the target face model. If a pair of vertices have long geodesic distance but short Euclidean distance, then the corresponding area has high penetrating possibility. For such vertex pair, we create a virtual edge, and add a soft length constraint to preserve the length of the virtual edge with the aim to prevent penetration. The length constraint is implemented as preserving the transformed edge vector. We

收稿日期: 2022-08-19; 在线发布日期: 2023-03-14. 本课题得到国家自然科学基金(No. 61872317)资助. 李韩超, 博士研究生, 中国计算机学会(CCF)会员, 主要研究领域为计算机图形学、计算机视觉. E-mail: hanson_li@zju.edu.cn. 沈成泽, 硕士, 主要研究领域为计算机图形学. 刘新国(通信作者), 博士, 教授, 主要研究领域为计算机图形学、三维视觉、虚拟现实以及图形学与人工智能交叉的应用基础研究.

use two threshold values to control the distribution of the virtual edges. One threshold is on the Euclidian distance, by which we excludes the distant vertex pairs. The other threshold is on the geodesic-Euclidean distance ratio, by which we exclude the vertex pairs that have low geodesic-Euclidean distance ratio. For detailed face models with densely sampled vertices, there will be a large number of virtual edges connecting a given vertex, which maybe redundant for anti-penetration purpose. In this case, we keep 3–5 shortest virtual edges but discard the other longer ones. Once a virtual edge is formed, the other vertices near the edge ends are excluded for later virtual edge selection, in order to further reduce the number of the virtual edges. The modified optimization energy function for facial blendshape generation consists of two parts, one of which is the deformation transfer energy, and the other is virtual edge preservation energy. The virtual edge energy is weighted by a super parameter. In this way, both the inner surface and the outer surface in the multilayer parts are constrained to deform accordingly to avoid penetrate each other. We conduct a number of experiments to demonstrate the validity of the proposed virtual edge constraints in our facial blendshape generation methods. Experiments on different subjects, including scanned and designed models, show that the method can efficiently detect potential penetration areas and properly construct the virtual edge constraints. When generating blendshapes with complex facial expressions, such as cheek contraction and pout, the proposed virtual edge constraints can effectively maintain the inner structural features and avoid the surface penetration. Compared to the previous volumetric deformation methods, the proposed method demonstrated advantages in terms of efficiency and the ability to handle complex meshes. Finally, we show a combination of the virtual edge constraints with the example based facial rigging method, which demonstrates that the application ability of our virtual edge constraint method.

Keywords facial animations; facial blendshape generation; deformation transfer; facial expression transfer

1 引 言

随着计算机技术的发展,在电影和游戏这类艺术作品的创作中,利用计算机动画技术进行人物面部表情和身体动作的描绘已经成为了艺术家们非常熟悉的创作方式.其中,人脸表情动画创作是对于从业者们而言最具有挑战性的课题.而在这一环节通过计算机技术实现创作效率的提升,也就成为了研究者们持续探索的研究方向.目前的从业者们有多种面部动画方法可以采用,例如基于物理的模型对面部的皮肤层、肌肉、脂肪组织、骨骼等进行建模模拟^[1];一些商业软件采用参数化模型^[2]和专有的变形器^[3].此外还有动态捕捉^[4],静态扫描^[5],以及基于主元分析和视频跟踪的面部表情动画生成模型和技术^[6-8].

在人脸表情动画的制作流程中,构建面部模型参数化系统是在影视和游戏制作过程中进行 CG 角色动画创作的一个基本要素.这是因为一个明确的表情参数化系统可以帮助创作者们对角色的表情进行精确的控制,因而可以省去许多不必要的工作.

其中,基于融合表情基(Blendshape)的面部表情参数化技术在创作者群体中的应用最为广泛.相比其他参数化方法,融合表情基技术采用预先定义的不同表情语义下的模型作为参数模型的基础,通过调整各个表情基的权重生成角色动画.其他的线性参数化模型,如采用主成分分析生成可形变模型,其表情系数通常没有显式的表情语义,对于动画师来说没有直观的意义,不利于动画的编辑控制.此外,在某种程度上,融合表情基技术可以限制操作者的编辑范围,保证其对人脸的各种操作不超过模型本身的形变空间,限制了操作者进行不合理的人脸形变.该技术同样可以与物理模拟模块相结合^[9],以提高其应用面.

融合表情基技术的优势让该技术成为了人脸动画渲染领域许多研究者和创作者的普遍选择,而如何为特定的目标人脸生成面部表情基则是一个应用该技术前需要解决的问题.针对不同的情境,有多种方式可以为特定人脸生成表情基——如可以通过多相机矩阵拍摄并重建不同表情语义下的三维模型,随后通过扫描注册的方法生成面部表情基;或

者通过形变迁移算法来基于一套包含标准表情基的模板生成目标人脸的面部表情基;更甚,采用单目人脸重建的相关方法从一段视频中提取生成表情基^[10]。其中,形变迁移算法应用起来简单高效,应用更广泛,但需要注意的是,在针对目标网格进行迁移时,可能会因为模板与对象之间的结构差异而导致模型出现表面穿透现象。

表面穿透通常指的是三维网格在形变以及运动过程中,不同网格结构之间发生面片相交的现象。该现象可能发生在同一网格的不同结构(如人体网格的手和躯干)之间,也可能发生在不同网格之间。对于人脸网格而言,问题往往发生在网格中存在双层结构的部位(如面颊与口腔,鼻腔等),由于两侧面片的距离很近,在网格通过形变表达人的不同表情时,穿透现象就有可能随着某一结构的形变而出现(图1)。

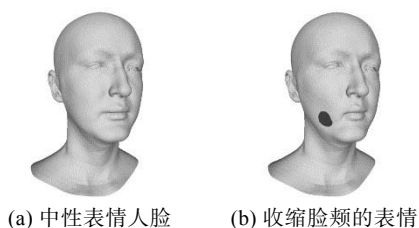


图1 利用形变迁移生成面部表情基时可能产生的模型表面穿透问题

针对这一问题,本文针对现有的网格形变迁移算法存在的缺陷,提出了一种通过在面部网格的局部区域添加新的顶点连接关系(以下称虚拟边)来防止穿透的方法。本文工作分为两部分,本文首先实现了虚拟边的自动添加算法,该算法不需要依赖任何额外用户标注,也不需要对待处理网格进行人工的区域划分,通过比较顶点之间的测地距离和欧氏距离来识别出可能发生穿透的结构,并均匀地添加虚拟边。另一部分是添加了虚拟边约束的形变迁移算法,通过虚拟边约束使得形变迁移过程能够防止双层结构发生表面穿透。通过与其他科研人员常用的抗表面穿透技术进行对比,本文证明了该方法在面部表情基的生成场景下,相比其他形变迁移方法在精度上达到同等水平,并且在效率以及处理问题网格的能力上均具有优势。最后,本文将这一算法整合进了完整的表情序列迁移框架中,该框架通过应用形变迁移算法生成面部表情基,来实现不同人脸之间的表情迁移;作为框架的重要环节,本文提出的面部表情基生成算法解决了框架运行中出现的表面穿透问题,使得框架在目标网格结构与源网

格存在差异的情况下运行时也不发生表面穿透。

2 相关工作

基于多相机矩阵的面部表情基生成:为一个对象构造面部表情基,研究者们可以通过让被拍摄者实际做出种种能够覆盖所需语义的表情,通过多视图重建等方式对其进行三维建模。之后,通过扫描注册算法直接从这些模型扫描结果逐一生成拓扑一致的面部表情基。Lee 等人^[11]提出了基于用户控制的,在两个拓扑一致的三角形网格之间完成网格变形的算法,通过多分辨率思想解决了网格拓扑不一致导致的建模困难。Alle 等人^[12]提出了一种基于三维扫描本来生成全身可形变模型的算法,通过稀疏的 3D 标记将人体的扫描结果注册到高精度的人体模板网格上,该算法同样可以用于人脸可变形网格的生成。Amber 等人^[13]提出了非刚体配准算法(Non-rigid Iterative Closest Point, ICP),通过定义一个最优步长非刚性配准框架,该框架将传统的 ICP 算法^[14]扩展到了非刚性形变算法中,在允许网格进行非刚性形变的同时做到了保留 ICP 算法的收敛性。Yao 等人^[15]提出了一种基于全局平滑鲁棒估计的鲁棒非刚性配准公式,用于数据拟合和正则化。其关键思想是利用 Welsch 函数^[16]的强制稀疏性,而该函数已用于图像^[17]和网格^[18]的稳健处理。

基于形变迁移的面部表情基生成:要生成面部表情基语义集合,完全依赖扫描注册算法是不可行的,因为待生成的对象并不一定都具备拍摄表情语义的条件,甚至可能并不是真实人脸。要为这些面部模型生成面部表情基,就要考虑以已有的面部表情基语义为模板,将其语义迁移到指定的面部网格上。Sumne 等人^[19]提出的三角网格形变迁移算法通过仿射矩阵来刻画源网格的形变,并通过相邻三角网格共享顶点机制,依据用户标注的网格间顶点映射关系来优化仿射矩阵的偏差值,最终将形变信息迁移到目标网格上。Li 等人^[20]在此基础上提出了一种新的面部表情基生成方法,通过引入参考姿态,迭代求解出兼具语义准确度和姿态表达能力的最优解。

空间关系约束的形变迁移:在基于形变迁移的面部表情基生成算法中,为避免模型表面在形变后出现表面穿透等问题,Saito 等人^[21]提出了在眼角和嘴角等部位添加额外的虚拟三角面片并利用拉普拉斯能量函数平滑这些部位的形变。Zhou 等人^[22]分析了源模型和目标模型的顶点分布和表面梯度,在形变迁移的优化过程保持了目标人脸模型的几何结构从而避免了表面穿透等问题。Si^[23]等人提出了一种

自动为几何模型生成四面体体素,通过构建四面体体素约束解决模型表面穿透问题.但完全将几何模型转化为体素表示会极大地增加表情基的求解计算量,影响最终的求解效率.

单目面部表情基生成:除以上传统方法外,在单目相机条件下完成面部表情基的生成也是领域内的重要课题. Weise 等人^[24]将几何和纹理配准与预先记录的动画优先级结合在一起完成了人脸跟踪过程的求解; Cao 等人^[25]基于 RGBD 相机构建了一套编码了不同人脸表情的数据库; Shi 等人^[26]首先在整个单目视频序列中检测和跟踪重要的面部特征,如鼻尖和嘴角,然后使用检测到的面部特征结合非线性面部模型去重建头部姿态. 以这些工作为基础, Garrido 等人^[27]所提出的框架可以在给定一个单目相机采集到的输入视频的情况下构建完全个性化的 3D 人脸可变模型

3 带虚拟边约束的面部表情基生成

三维网格中包含了顶点的位置信息以及顶点之间的连接关系,多个顶点构成面片时,顶点之间的连接关系就构成了网格中的边.当三维网格中存在类似于口腔的双层结构时,这些结构的内外两侧不存在直接连接关系,由于口腔内部的结构通常不参与形变,因此当口腔外部的表面发生形变时,另一侧的面片不会随之形变,由此可能在形变生成夸张表情时出现表面穿透的问题.我们定义这种在形变迁移过程中容易出现模型表面穿透的区域为敏感区域.这一问题可以通过在原本网格的基础上添加新的连接关系,并利用虚拟边约束间接对内部的结构形变,从而有效地避免了表面穿透的问题出现.新添加的原网格所不具有的边结构就是本文所述的虚拟边.

图 2 展示了本文提出的面部表情基生成框架的整体示意图.本文采用的表情序列迁移框架以一组预先定制的面部表情基模板为基础,框架首先通过标准的高精度三维重建流程,逐帧地将待迁移的表情序列重建为三维网格;随后通过面部表情基技术将其表情参数化.此后,通过对表情迁移对象网格执行形变迁移算法,生成其面部表情基,并将参数化表情迁移过去,实现表情迁移过程.

4 虚拟边添加算法

对于人脸网格而言,可能出现表面穿透的结构集中在鼻腔、口腔等部位.本文设计的自动添加算法

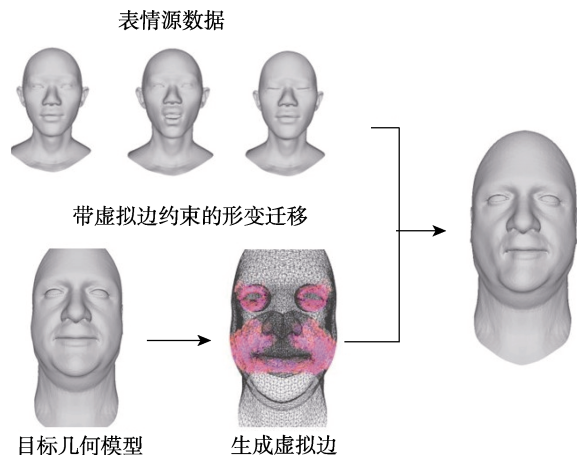


图 2 带虚拟边约束的面部表情基生成算法总体流程

从可能穿透区域的特征入手,这些区域两侧对应顶点/面片的特征可以描述为测地距离长而欧式距离短,如图 3 中框标识的部位所示.由于测地距离大,结构之间无法感知彼此的形变;又因为欧式距离短,所以外表面的形变可能会导致与内表面发生穿透现象.

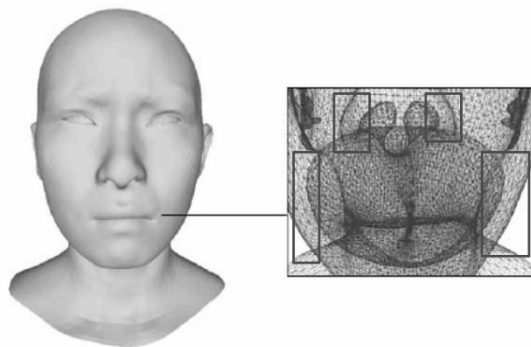


图 3 敏感区域特征示意图

基于这一特征,本文提出了一种自动识别敏感区域并添加虚拟边的算法.算法使用两个参数作为约束条件,分别是欧氏距离阈值 τ_d 和测地距离与欧氏距离比值的阈值 τ_f .

本文以顶点之间通过边相连的最短路径为近似的测地距离.对于网格上的顶点,算法会以该面片为起点计算其与其他顶点之间的测地距离和欧式距离.由于这一环节需要针对网格的所有顶点进行距离检测,如果不进行对象筛选的话其运算开销会很大,因此本文采用了一种网格划分策略进行优化.以网格的几何中心为原点,算法将人脸网格依据卦限进行分割,并在分割后的不同区域内各自独立进行距离计算.对于待处理顶点 v_i ,算法首先筛去与其欧式距离大于阈值 τ_d 的顶点,得到顶点集 F_i :

$$F_i = \{v_j | d_{ij} < \tau_d, v_j \in V\}$$

其中, d_{ij} 为顶点间的欧氏距离, V 为网格顶点集合. 随后, 再根据顶点间测地距离与欧氏距离的比值进行进一步筛选, 使得比值大于阈值 τ_f :

$$\mathcal{G}_i = \left\{ v_j \mid \frac{g_{ij}}{d_{ij}} > \tau_f, v_j \in F_i \right\}.$$

其中, g_{ij} 为顶点间的近似测地距离. 生成虚拟边的伪代码如算法 1 所示. 整体筛选流程如图 4 所示.

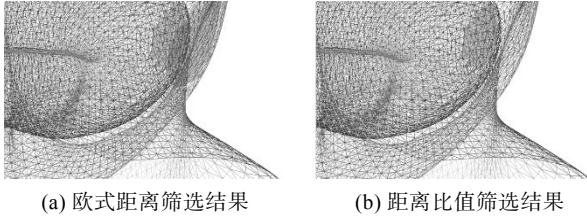


图 4 面颊外侧顶点添加虚拟边时的筛选过程示意图

经过这一过程后, 所有 $\mathcal{G}_i$ 集合内的顶点都与顶点 v_i 有着较小的欧氏距离, 但较大的测地距离, 可以视为易出现模型表面穿透的敏感区域. 作为判定标准的两个阈值可由操作者根据网格本身的面片密度和尺度来手动设定, 在具体流程中, 距离比值阈值可直接指定, 通常不会低于 2; 而对于欧氏距离阈值, 操作者只需选取敏感区域两侧的一对顶点, 算法会将这对顶点间的欧式距离作为阈值. 阈值同样可以由算法自动根据网格的整体尺寸和面片数进行估算, 不过实际使用中通常需要根据运算效果进行调整.

筛选步骤结束后, 如果某一顶点没有满足条件的配对顶点, 说明该顶点不在敏感区域内. 而如果某一顶点有多个满足条件的匹配对象, 算法会依据其欧式距离进行排序, 选取其中距离最近的约 3 到 5 个顶点进行虚拟边的添加.

本文提出的算法可以准确地网格的眼部、鼻腔、口腔等敏感区域添加虚拟边. 不过, 防止模型表面穿透实际上不需要为所有符合条件的顶点都添加虚拟边, 而过多不必要的虚拟边约束条件反而会影响算法求解时的难度. 因此, 本文的算法设计了对虚拟边密度的控制功能, 每为一个顶点添加虚拟边, 一定范围内的其他顶点就不会再被算法添加, 以控制虚拟边的密度. 每次添加后, 算法会选取最近的符合条件的顶点作为下一个添加点. 虚拟边密度控制的效果如图 5 所示.

算法 1. 虚拟边添加算法.

输入: 网格顶点集合 V , 阈值参数 τ_d, τ_f

输出: 虚拟边集合 D

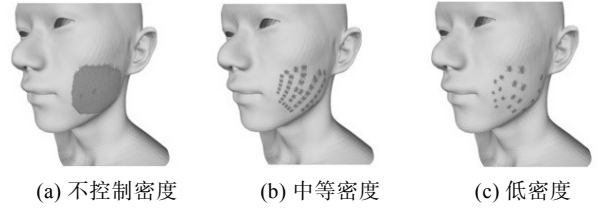


图 5 控制虚拟边的密度以减少计算量

Divide V to $V^{\{1, \dots, 8\}}$ according to octants;

for each V^t do

for each $\{v_i, v_j\} \in V^t$ do

$d_{ij} = \text{EuclideanDistance}(v_i, v_j)$;

$g_{ij} = \text{GeodesicDistance}(v_i, v_j)$;

end

for each $v_i \in V^t$ do

$\mathcal{F}_i = \{v_j \mid d_{ij} < \tau_d, v_j \in V^t\}$;

$\mathcal{G}_i = \left\{ v_j \mid \frac{g_{ij}}{d_{ij}} > \tau_f, v_j \in \mathcal{F}_i \right\}$;

$D \leftarrow \{e = (v_i, v_j)\}, v_j = \min(\mathcal{G}_i)$;

end

end

5 虚拟边约束下的形变迁移

在获得了敏感区域的虚拟边约束后, 本文将这些约束加入表情迁移的求解过程中, 以解决大表情形变时可能出现的模型表面穿透问题. 本文所使用的表情迁移框架采用了三角网格形变迁移算法^[19]作为主算法框架, 该算法将源网格的形变特征表示为源网格每个三角面片的仿射变换集合, 而仿射变换的非平移部分包含了三角面片形变过程中引起的方向、比例和倾斜程度的变化. 算法的目的是将源网格的形变信息迁移到目标网格上, 而这需要操作者在两个网格之间通过标注的方式构建起顶点映射关系的集合 M :

$$M = \{(s_1, t_1), (s_1, t_2), \dots, (s_{|M|}, t_{|M|})\}$$

其中, (s_i, t_i) 表示目标网格的顶点 t_i 与源网格的点 s_i 是对应点对, 它们具有一致的形变变换. 算法以这些映射关系作为形变迁移过程的计算依据, 通过最小化这些顶点处的形变信息之间的误差来控制源网格与目标网格形变一致:

$$\min_{\tilde{v}_1, \dots, \tilde{v}_n} \sum_{i=1}^{|M|} \|S_{s_i} - T_{t_i}\|^2 \quad (1)$$

其中, S 和 T 分别为源网格和目标网格相应顶点的仿射变换. 由于待求解的变换是根据未知的变形目标顶点定义的, 因此最小化能量项的过程基于顶点

本身的信息, 并且隐式地满足连续性约束. 这一过程中, 只需将顶点视为常量而不是自由变量, 顶点的位置约束即可得到满足. 该过程可以表示为一个求解线性系统的过程:

$$\min_{\tilde{v}_1 \dots \tilde{v}_n} \|c - A\tilde{x}\|_2^2$$

其中 $\tilde{x}$ 是未知形变后顶点位置, c 是包含源网格变换项的向量, A 是将与 c 关联起来的大型稀疏矩阵.

为了在原算法的基础上解决模型表面穿透问题, 需要利用虚拟边集合 D 改进求解过程. 修改公式 (1) 添加虚拟边约束:

$$\min_{\tilde{v}_1 \dots \tilde{v}_n} \sum_{i=1}^{|M|} \|S_{s_i} - T_{t_i}\|^2 + \alpha \sum_{i=1}^{|D|} \|e_i - S_i \tilde{e}_i\|^2 \quad (2)$$

其中 e_i 是变形后的虚拟边, $\tilde{e}_i$ 是形变前的虚拟边, α 是超参数, 控制虚拟边约束在求解过程中所占的权重.

本文将此前添加得到的虚拟边约束加入到了形变迁移求解过程中, 使得求解过程同时约束网格之间形变信息不变, 以及形变前后虚拟边信息不变; 从而维护敏感区域结构特征, 防止了模型表面穿透现象. 算法的具体执行效果如图 6 所示:

如图 7 所示, 在同样的语义下, 应用了虚拟边约束项的形变迁移算法可以在生成面部表情基时有效防止表面穿透现象, 而未添加虚拟边约束的原算法则会在脸颊和口腔处发生穿透.

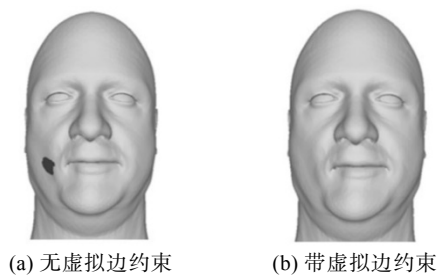


图 6 有无虚拟边约束的算法结果对比

6 实验结果与分析

6.1 实验设置

实验所采用的面部表情基模板具有 23 686 个顶点, 所有的面部表情基语义共计 158 个 (含一个中性表情). 本次实验所使用的计算机为实验室标准机器, 所用 CPU 为 Intel Core i7-12700K, 内存 32G. 本次实验选取了五个差异明显的人脸模型作为算法的测试对象, 包含真实扫描得到的人脸模型和艺术家设计的虚拟卡通类人模型, 如图 7 所示. 我们分别对虚拟边添加算法和带虚拟边约束的面部表情基

生成算法进行了不同角度的测试.

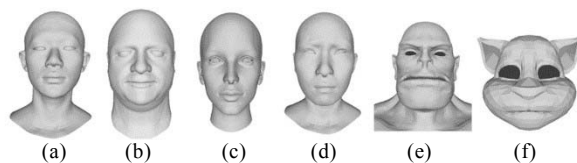


图 7 实验用模型

测试主要关注运算效率以及防表面穿透效果两个指标, 前者以运行耗时为定量评价标准, 后者首先以是否出现表面穿透为定性标准, 其次以敏感区域两侧距离 (由形变前后敏感区域各顶点与另一侧的最近顶点的距离变化情况平均值进行估算) 为定量标准, 来评估算法对敏感区域形状的保持能力.

6.2 虚拟边添加算法测试

针对虚拟边添加算法, 本文在不同的人脸模型上测试了其敏感区域识别效果和虚拟边添加的效果, 如图 8 所示.

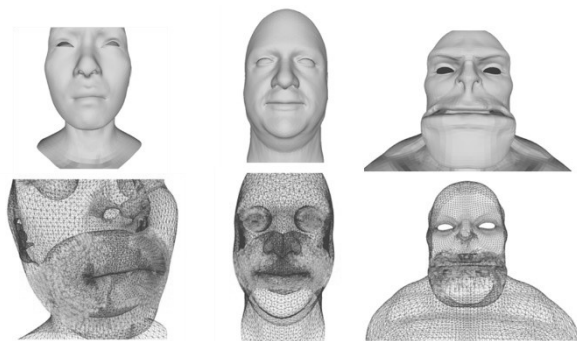


图 8 不同模型的虚拟边添加效果

图中的高亮部分即添加后的虚拟边, 可以看到添加算法能够识别出眼眶、鼻腔以及口腔等敏感区域, 并在区域两侧的顶点间均匀地添加虚拟边. 在不同的脸部模型上, 虚拟边添加算法都可以识别出可能发生穿透的敏感区域. 其中部分网格的鼻腔和眼部没有内部结构, 算法可以正确判断其不具有敏感区域, 不为这些部分添加虚拟边.

在效率方面, 本文将虚拟边添加算法的运行耗时与手动添加虚拟边的方法耗时进行了对比, 其结果如表 1 所示. 自动添加虚拟边算法相比手动标注有着明显的效率优势, 对于不同的测试模型, 自动添加算法的耗时均可控制在 1 分钟内.

表 2 分析了虚拟边的密度变化对运行效率以及敏感区域形状保持能力的影响. 由结果可知, 低密度的虚拟边同样可以保证生成的面部表情基不发生表面穿透, 其形状保持能力受影响不大, 并且相较

表 1 虚拟边添加算法与手动添加方法效率对比

测试模型	本文算法耗时	手动添加耗时
模型 A	44.3 s	约 15 min
模型 B	66.9 s	约 18 min
模型 C	28.6 s	约 12 min
模型 D	43.0 s	约 15 min
模型 E	28.7 s	超过 20 min
模型 F	10.5 s	约 15 min

表 2 不同密度虚拟边的求解效率及形状保持效果对比

虚拟边密度	无间隔	间隔较小	间隔较大
虚拟边数量	20460	1008	456
生成耗时	1632.81s	1240.33s	1198.01s
形状变化	1.93	2.05	2.04
形变百分比	19.3%	20.5%	20.4%

于高密度的虚拟边有着更高的运算效率。为控制变量，表中数据均在模型 A 上统计得到。其中，形状保持效果的指标为模型 A 的口腔-面颊两侧距离变化情况，其形变前距离通过对网格进行整体尺寸调整统一为 10。

6.3 带虚拟边约束的面部表情基生成算法测试

为了测试我们的虚拟边约束在面部表情基生成任务中的性能表现，我们在两种形变迁移算法：三角网格迁移算法^[19]和基于样例的表情基生成(Example Based Facial Rigging, EBFR)算法^[20]加入了虚拟边约束进行测试对比。EBFR 算法的主要思路是，在形变迁移思想的基础上，通过引入不同姿态的网格作为参考，来提升算法所生成的面部表情基的表达力。通过引入具有代表性的姿态作为参考，该算法在生成面部表情基时能够提高表情基对于这些姿态的表达准确度，进而优化算法的效果。该算法将求解步骤分为求解表情基权重以及网格信息两部分，并进行迭代优化；本文将虚拟边信息引入了其中求解面部表情基网格的部分中，并验证了本文所设计的虚拟边约束在不同形变迁移算法下均具有防止表面穿透的能力。

如图 9 所示，当不同的测试模型在眯眼、脸颊内收等语义下在眼部、口腔以及鼻腔等部位产生模型表面穿透问题时，加入虚拟边约束的面部表情基生成算法可以有效保持这些部位的结构特征，避免复杂表情变化时出现模型表面穿透。

图 10 的实验表明，虚拟边约束可以在不同的形变迁移算法中起到保持敏感区域结构的作用，而不特定依赖于某个算法。

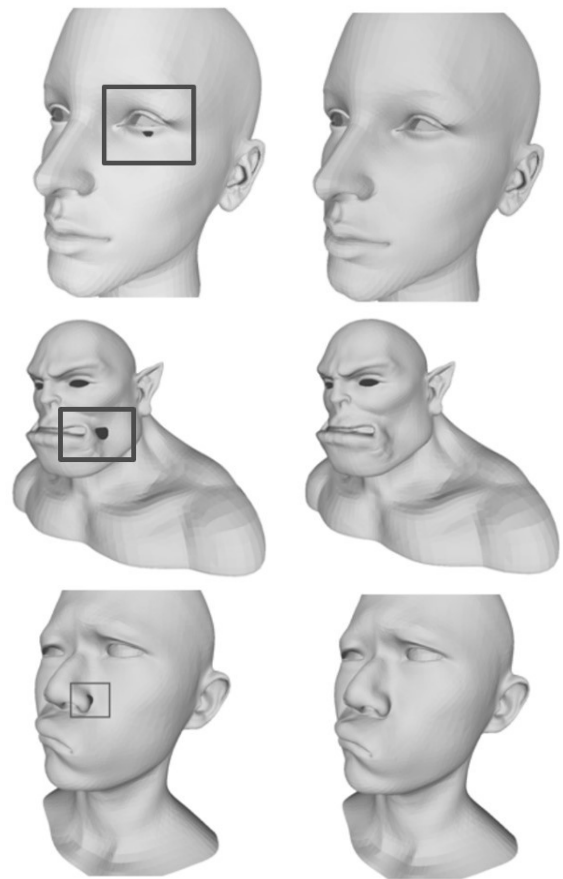


图 9 算法在人脸不同部位的表现效果图(左图为未添加虚拟边约束，右图为添加了虚拟边约束的结果)

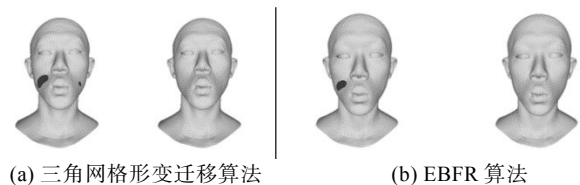


图 10 不同算法加入虚拟边约束前后的结果图

6.4 算法对比实验

除定性分析外，本文还将算法和通过构建四面体体素约束解决模型表面穿透算法^[25]（以下简称 SCAFBT）进行了对比。本文应用四面体网格生成方法 TetGen^[27]处理了实验数据模型，四面体处理结果如图 11 所示，并分析了该方法与本文方法在各方面的差异。首先是形变误差对比，为统一标准，我们将不同测试模型的相同部位的敏感区域间距统一调整为 10，并统计形变前后各模型相同部位的平均形变误差。

如表 3 所示，不带约束的形变迁移算法的误差较为严重，这也符合结果中出现的表面穿透现象。SCAFBT 在相同的求解方法下误差比本文算法稍大，但同样不会出现表面穿透。这与该算法手动标

注虚拟边导致的虚拟边分布不均匀有关.

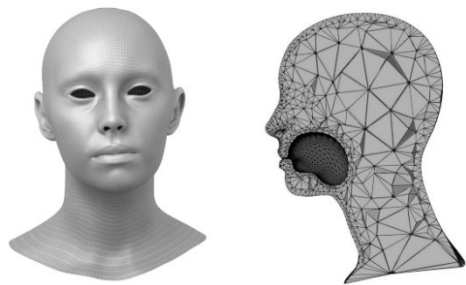


图 11 TenGen 算法的虚拟结构添加效果图

表 3 不同方法的形变误差对比

测试部位	形变迁移	SCAFBT	本文方法
眼部	6.01	1.20	0.7
鼻腔	5.22	1.35	1.32
口腔脸颊	9.57	2.90	1.45

表 4 展示了不同方法的效率对比, 本文算法相比不带约束的网格形变迁移算法, 在处理模型穿透问题上有着显著优势. 而相比同类的采用虚拟边结构处理模型穿透问题的方法, 本文的算法由于设计实现了虚拟边的自动添加, 在整体效率上有着较大优势.

整体对比分析结果如表 5 所示. 生成四面体网格首先需要对象模型封闭(有明确内外侧区分), 但人脸模型在眼部等位置常常会有空洞, 这限制了该

表 4 不同方法效率对比

	形变迁移	SCAFBT	本文方法
模型穿透问题	无法处理	可以处理	可以处理
虚拟边添加	无	手动标注	自动添加
添加过程耗时	无	>10min	<1min
形变误差	大	较小	很小

表 5 同类方法的综合对比

方法	SCAFBT	四面体网格	本文方法
能否解决表面穿透	能	能	能
虚拟结构生成方法	手动	自动	自动
虚拟结构的数量级	低	高	低
能否处理不封闭网格	能处理	不能处理	能处理
生成虚拟结构耗时	>10min	<1s	<1min
生成表情基平均耗时	8.4s	29.6s	10.4s
总体效率	低	中等	高

方法的应用. 此外, 算法生成四面体网格的过程不会分析可能发生表面穿透的区域, 而是会为模型内部所有空间添加四面体结构, 这使得新增的虚拟结构数量级远大于本文的方法. 对于顶点数约 20,000 的模型, 本文方法添加的虚拟边数量小于 1,000, 而四面体结构则会新增约 200,000 个面片. 实验表明, 过多的虚拟结构会使得表情基求解过程更加复杂, 从而降低求解效率. 实验结果最终表明, 本文的方法相比其他处理穿透问题的方法, 在人工操作量和求解效率上都具有优势.

6.5 带虚拟边约束的表情基生成算法结果

在实验的最后, 本文将面部表情基生成算法的结果加入到表情迁移框架的整体运行流程中, 在完整的框架下完成了不同人脸之间表情迁移的过程. 由于表情序列迁移的最终结果是一段动态的表情序列, 不便在论文中展示, 因此本文选取了其中的几帧表情在不同的模型下进行展示. 如图 12 所示, 加入本文算法的表情迁移框架可以为不同的人脸模型实现表情迁移过程. 图中的结果在面部表情语义上和幅度上都能做到与数据源相对应. 图 12 中的结果来自于一组实验者说话数据, 由于该组数据没有较大幅度的表情, 本文还另外收集了一些表情数据进行较大幅度表情的迁移测试, 其结果如图 13 所示.



图 12 为不同模型进行表情迁移的结果图

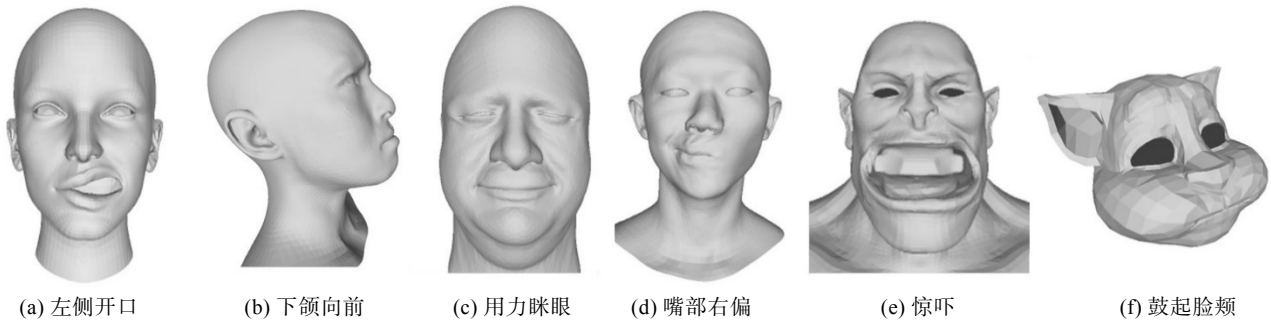


图 13 若干大幅度表情的迁移结果图

实验表明，本文的表情基生成方法能够为不同模型准确生成大幅度表情的表情基。

7 结 语

针对基于网格形变迁移方法的面部表情基生成过程中出现网格表面穿透现象的问题，本文通过设计虚拟边自动添加算法以及将虚拟边约束条件引入形变迁移求解过程这两部分工作，解决了表面穿透问题。虚拟边添加算法能够根据顶点间的测地距离和欧氏距离准确识别出可能发生模型穿透的潜在区域，并按一定的密度均匀地添加虚拟边。相比于同类的处理模型穿透问题的算法，本文的方法通过这一不需要用户标注的虚拟边添加流程显著节约了人工操作量，提高了整体效率。添加后的虚拟边约束可以与不同的形变迁移算法相结合来防止模型穿透现象出现，最终完善了表情迁移框架中的表情基生成模块，提高了框架对不同脸部模型的处理能力。本文的方法能够为顶点数量级在两万左右网格添加虚拟边，不过当顶点数量级达到十万以上时，虚拟边添加算法的运行速率会受到较大影响。后续工作中将考虑通过网格多分辨率技术提高算法处理复杂网格的能力。此外，整体表情迁移框架中对源网格表情的参数化拟合过程仍然存在一些拟合不到位的现象，例如快速眨眼、夸张表情等语义。后续将对表情参数拟合模块进行进一步的优化，以提升框架的整体表现。

参 考 文 献

- [1] Sifakis E, Neverov I, Fedkiw R. Automatic determination of facial muscle activations from sparse motion capture marker data//ACM SIGGRAPH 2005 Papers. Los Angeles, USA, 2005: 417-425
- [2] Parke F I. Control parameterization for facial animation// Computer Animation'91. Geneva, Switzerland, 1991: 3-14
- [3] Tickoo S. Autodesk Maya 2019: A Comprehensive Guide. Cad-cim Technologies, 2018
- [4] Bradley D, Heidrich W, Popa T, et al. High resolution passive facial performance capture//ACMSIGGRAPH 2010 papers. Los Angeles, USA, 2010: 1-10
- [5] Fyffe G, Jones A, Alexander O, et al. Driving high-resolution facial scans with video performance capture. ACM Transactions on Graphics (TOG), 2014, 34(1): 1-14
- [6] Zhang L, Snavely N, Curless B, et al. Spacetime faces: High-resolution capture for~ modeling and animation//Data-Driven 3D Facial Animation. Springer, 2008: 248-276
- [7] Bickel B, Botsch M, Angst R, et al. Multi-scale capture of facial geometry and motion. ACM Transactions on Graphics (TOG), 2007, 26(3): 33-es
- [8] Rhee T, Hwang Y, Kim J D, et al. Real-time facial animation from live video tracking//Proceedings of the 2011 ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation. Vancouver, Canada, 2011: 215-224
- [9] Kozlov Y, Bradley D, Bächer M, et al. Enriching facial blendshape rigs with physical simulation. Computer Graphics Forum, 2017, 36(2): 75-84
- [10] Ma L, Deng Z. Real-time facial expression transformation for monocular RGB video. Computer Graphics Forum, 2019, 38(1): 470-481
- [11] Lee A W, Dobkin D, Sweldens W, et al. Multiresolution mesh morphing//Proceedings of the 26th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques. Los Angeles, USA, 1999: 343-350
- [12] Allen B, Curless B, Popović Z. The space of human body shapes: reconstruction and parameterization from range scans. ACM Transactions on Graphics (TOG), 2003, 22(3): 587-594
- [13] Amberg B, Romdhani S, Vetter T. Optimal step nonrigid ICP algorithms for surface registration// 2007 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Minneapolis, Minnesota, USA, 2007: 1-8
- [14] Besl P J, McKay H D. A method for registration of 3-D shapes. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1992, 14(2): 239-256
- [15] Yao Y, Deng B, Xu W, et al. Quasi-newton solver for robust non-rigid registration//Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2020: 7600-7609
- [16] Holland P W, Welsch R E. Robust regression using iteratively reweighted least-squares. Communications in Statistics-theory and Methods, 1977, 6(9): 813-827
- [17] Ham B, Cho M, Ponce J. Robust image filtering using joint static

- and dynamic guidance//Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Boston, USA, 2015: 4823-4831
- [18] Zhang J, Deng B, Hong Y, et al. Static/Dynamic filtering for mesh geometry. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2018, 25(4): 1774-1787
- [19] Sumner R W, Popović J. Deformation transfer for triangle meshes. *ACM Transactions on Graphics*, 2004, 23(3): 399-405
- [20] Li H, Weise T, Pauly M. Example-based facial rigging. *ACM Transactions on Graphics*, 2010, 29(4): 1-6
- [21] Saito J. Smooth contact-aware facial blendshapes transfer// Proceedings of the Symposium on Digital Production. 2013: 7-12
- [22] Zhou K, Huang J, Snyder J, et al. Large mesh deformation using the volumetric graph laplacian//ACM SIGGRAPH 2005 Papers. Los Angeles, USA, 2005: 496-503
- [23] Si H. TetGen, a Delaunay-based quality tetrahedral mesh generator. *ACM Transactions on Mathematical Software*, 2015, 41(2): 1-36
- [24] Weise T, Bouaziz S, Li H, et al. Realtime performance-based facial animation. *ACM Transactions on Graphics*, 2011, 30(4): 1-10
- [25] Cao C, Weng Y, Zhou S, et al. Facewarehouse: A 3d facial expression database for visual computing. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2013, 20(3): 413-425
- [26] Shi F, Wu H T, Tong X, et al. Automatic acquisition of high-fidelity facial performances using monocular videos. *ACM Transactions on Graphics*, 2014, 33(6): 1-13
- [27] Garrido P, Zollhöfer M, Casas D, et al. Reconstruction of personalized 3D face rigs from monocular video. *ACM Transactions on Graphics*, 2016, 35(3): 1-15



LI Han-Chao, Ph.D. candidate. His major research interests are computer graphic and computer vision.

SHEN Cheng-Ze, master. His major research interests are computer

graphic and computer vision.

LIU Xin-Guo, Ph.D., professor. His major research interests are CAD, computer graphics, 3D vision and virtual reality.

Background

This paper focuses on addressing the problem of model penetration in deformation transfer-based methods for generating facial blendshapes. Deformation transfer involves copying the deformations exhibited by a template mesh in different expressions to a target mesh to create a personalized expression model. To prevent model penetration during this process, extra constraints are necessary. Previous approaches have involved constructing tetrahedron structures and using volumetric Laplacian solvers, but these methods are computationally expensive and require the mesh to be in a closed form.

The proposed solution in this paper is a simple and efficient virtual edge constraint that prevents model penetration during deformation transfer. Virtual edge connections are added between vertices that exhibit long geodesic dis-

tance and short Euclidean distance, specifically in thin parts with two or more layers of the surfaces, such as the mouth, eyes, and ears. An extra virtual edge regularization is also added to the optimization system to preserve the inner structure.

Experiments show that the virtual edge constraint is effective in preventing model penetration and generating blendshapes with complex expressions. This work is part of a larger project on high-precision facial expression capturing and reconstruction, which aims to parse facial expressions into coefficients of blendshapes and transfer these expressions to different faces, enabling users to drive virtual characters with their own expressions.

This work is funded by the National Natural Science Foundation of China (No. 61872317).