

文章编号 1004-924X(2015)04-1138-08

形状空间下的 3D 面貌相似性比较

赵俊莉^{1,2}, 武仲科^{2*}, 刘翠婷², 段福庆², 周明全², 曹嘉谊³

(1. 青岛大学 软件技术学院, 山东 青岛 266071 ;

2. 北京师范大学 信息科学与技术学院 虚拟现实应用教育部工程研究中心, 北京 100875;

3. 天津中医药大学 中药学院 天津 300193)

摘要:开展了利用计算机自动比较两个 3D 面貌相似程度的研究。提出了一种在形状空间下基于测地线的 3D 面貌相似性比较的方法。该方法使用测地线近似表示 3D 面貌模型, 然后将其变换到形状空间下, 以对应测地线的平均测地距离作为两个 3D 面貌的相似性比较的依据。在公开的 GAVADB 三维面貌库上对 14 个人的 28 个 3D 面貌模型进行了实验, 识别率达到 92.86% 以上, 说明本方法可以将同一个人的不同模型与不同人的模型区分开。另外, 使用提出的方法对不同人的 3D 面貌模型进行了相似性比较实验, 结果表明使用本方法得出的相似程度的判断与人的主观判断相一致, 说明本方法能够较好地反应 3D 面貌的相似程度。

关键词:计算机图形学; 计算机视觉; 3D 面貌相似性; 测地线; 形状空间; 平方根速度函数(SRVF)

中图分类号: TP391.41 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20152304.1138

3D facial similarity comparison in shape space

ZHAO Jun-li^{1,2}, WU Zhong-ke^{2*}, LIU Cui-ting², DUAN Fu-qing², ZHOU Ming-quan², CAO Jia-yi³

(1. College of Software and Technology, Qingdao University, Qingdao 266071, China;

2. Engineering Research Center of Virtual Reality and Applications of the Ministry of Education, College of Information Science and Technology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

3. College of Traditional Chinese Medicine, Tianjin University of Traditional Chinese Medicine, Tianjin 300193, China)

* Corresponding author, E-mail: zwu@bnu.edu.cn

Abstract: This paper focuses on the 3D facial similarity comparison by using a computer automatically. A new 3D facial similarity comparison method based on a geodesics in a shape space was proposed. In this method, 3D facial surface was approximately represented by a set of geodesics and the corresponding geodesics between two facial models were compared by a elastic metric in the shape space, in which the similarity between two faces could be measured by the average geodesic distance of all corresponding geodesics. 3D facial similarity experiments were performed on 28 facial models of 14 persons in Gavadb database and the recognition rate is above 92.86%, which indicates that this method recognizes the facial models of the same person from different person's facial models.

收稿日期: 2014-11-28; **修订日期:** 2015-01-20.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 61170170, No. 61272363); 国家科技支撑计划资助项目(No. 2012BAH33F04); 教育部新世纪优秀人才支持计划资助项目(No. NCET-13-0051); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(No. 2013YB13, No. 2013YB70); 北京市自然科学基金资助项目(No. 4152028)

In addition, 3D facial similarity experiments on different person's facial models were implemented. The experimental results show that the similarity values computed by proposed method consist with that of people's subjective judgment. These results reflect that the proposed method can measure the similarity of 3D faces well.

Key words: computer graphics; computer vision; 3D facial similarity; geodesic; shape space; Square-root Velocity Function (SRVF)

1 引言

公安刑侦领域经常会用各种技术辅助破案,如根据素描画像追捕犯罪嫌疑人^[1]等。遇到受害者仅剩颅骨而没有其他证据时,利用计算机辅助技术从颅骨复原出颅面对辅助破案就会起到非常大的作用,目前已有许多利用颅面复原技术辅助破案的成功案例。利用该技术时,颅面复原结果的好坏会直接影响破案成功率,其中如何评价颅面复原结果是该项技术的难点,因此评价复原面貌与真实面貌的相似程度,即评价三维面貌的相似度就成为一个非常有意义的研究课题。

相似性比较是一个普遍存在的问题,判断两个人面貌是否相似也是人们经常讨论的话题。3D面貌的相似性比较在人脸识别、面貌复原、3D人脸动画、生物测量及刑侦等领域都有重要的应用。人类的视觉系统可以快速地在大脑中形成对两个物体或两个人的相似度的判断,但要让计算机自动地判断出两个物体的相似程度还是比较困难的,尤其是要判断两个面貌是否相似,就更为困难,因为他们的大体形状相差不大,即使仅仅识别人脸都比较困难。因此,3D面貌的相似性比较是一个具有挑战性的研究课题。

3D面貌的相似性比较是通过一定的方法对由计算机表示的3D面貌模型进行相似程度的比较和分析来得出它们的相似性度量值。目前关于3D面貌的相似性比较的研究比较少,Stephan等人^[2]和Quatrehomme等人^[3]采用主观的方法进行面貌相似性比较,这种方法费时费力,而且受被试者的主观影响较大。最近,一些学者开始研究采用客观方法进行面貌的相似度比较研究。Moorthy等人^[4]针对深度图人脸数据,从自动检测的特征点中提取Gabor特征进行相似性比较,并证明结果与人的主观评价一致。Feng等人^[5]

利用相对角直方图方法对两个颅面进行比较,定义相对角的概率密度分布函数,统计 n 个相对角落入不同区间内的个数。Zhu等人^[6]针对相对角直方图算法计算结果不稳定以及计算时间长的问题,提出了半径-相对角直方图算法,通过定义一组同心球壳,将三维颅面的点划分在不同的球壳区间内,分区计算点的相对角,进行颅面相似度比较。另外,朱新懿等人还提出了针对颅面不同特征点计算不同距离^[7]及利用Principal warps^[8]等方法来衡量颅面的相似性。上述研究是针对没有表情变化的3D面貌模型进行的相似性研究,而没有考虑表情变化的情况。李红艳^[9]等人基于测地距离在3D面貌模型上提取等测地带进而比较等测地带中空间分布向量的关系,以进行3D面貌相似性度量。该方法适用于表情变化不大的等距变形情况。对于存在拉伸或压缩变形的表情变化大的非等距情况,由于测地距离不能保持不变,因而不能很好地进行相似性度量。本文力求研究可适用于大的表情变化的下的3D面貌相似性度量。

本文在提取3D面貌模型上测地线的基础上,将这些测地线变换到形状空间,使用弹性度量对曲线形状进行分析与比较。形状空间是指将连续曲线的形状作为有限维的Riemannian流形元素的空间,Younes^[10]首先定义了平面曲线的形状空间,并提出了其上的Riemannian度量。Drirah等人^[11-12]将弹性度量引入到人脸识别中,用于分析从面部提取的径向曲线,从而建立了分析完整面部曲面的Riemannian框架。在形状空间中,使用弹性的方法比较三维人脸曲线,可以通过对曲线的重新参数化达到两条曲线在几何标准下的匹配,从而更好地匹配生理意义上的对应点,因而能够适用于面部表情变化较大的情况。

本文将3D面貌曲面看作 R^3 空间中的流形,基于测地线是一个内蕴量而且对表情变化不敏感的特点,将测地线引入到3D面貌的相似性比较

中,提出了一种在形状空间下基于测地线的 3D 面貌相似性比较的新方法。本方法首先将 3D 面貌模型用一组测地线近似表示,然后将该组测地线变换到形状空间下,使用弹性度量比较两条测地线,将形状空间下 3D 面貌模型上一组对应测地线之间的平均测地距离作为他们相似性比较的依据。本方法将测地线的内蕴属性及对表情变化不敏感的优点与弹性形状分析适用于大的面部表情变化的优点相结合,可以将同一个人不同表情的面貌模型与不同人的模型区分开,能够很好地反应 3D 面貌的相似程度。

2 测地线提取

在进行两个 3D 面貌模型的相似性比较前,首先要对待比较的 3D 面貌模型进行补洞裁剪、修复不完整部分等预处理操作,使其可以看作是 R^3 空间中一张连通的流形曲面。然后进行归一化处理、建立统一的坐标系,并使用迭代的 TPS 算法^[13-14]进行配准,以消除三维模型平移、旋转等带来的影响。接着就可以使用下面的方法提取测地线,继而用提取的测地线近似地表征 3D 面貌模型进行相似性比较。

在 3D 面貌模型上提取测地线时,以鼻尖点为源点,分别找到边界上的等分点,并将其作为目标点,以相同的初始方向和相等的角度间隔计算测地线,具体算法如下:

(1) 找鼻尖点作为源点

在计算测地线时,首先要找到鼻尖点。鼻尖点是整个人脸中最高的点,因此对处于标准姿态下的 3D 面貌模型,可以通过找出整个 3D 面貌模型中 y 值最大的点作为鼻尖点(O),并将其作为测地线的源点。

(2) 找边界等分点作为目标点

对于上面描述的 3D 面貌模型,可以使用半边结构来存储,这样,网格内部的边都被两个三角形共享,而边界边只被一个三角形共享,因此可以通过判断只属于一个三角形的边,即为模型的边界。提取出 3D 面貌模型的边界后,以边界上同鼻尖点 x 坐标相同的点作为第一个边界等分点,以鼻尖点和该点的连线作为初始方向,计算第一

条测地线。然后将边界投影到鼻尖点的切平面上,对投影到二维平面的边界按相等的角度间隔 α 进行划分,将得到 m 个等分点再投影回原来的 3D 面貌模型的边界上,得到 3D 模型边界上的角度等分点,用 $B = \{b_\alpha | \alpha \in A\}$, $A = \{0, \frac{2\pi}{m}, \frac{4\pi}{m}, \dots, \frac{2\pi(n-1)}{m}\}$ 表示,这些等分点将被作为测地线的目标点。

(3) 计算鼻尖至各个边界角度等分点的测地线
分别以鼻尖点为源点,以 m 个边界角度等分点作为目标点,计算出鼻尖点至各个等分点的测地线,用 $G = \{g_\alpha | \alpha \in A\}$, $A = \{0, \frac{2\pi}{m}, \frac{4\pi}{m}, \dots, \frac{2\pi(n-1)}{m}\}$ 表示。这可以通过求解两点之间测地线的 MMP 算法^[15]或 ICH^[16]算法、PCH^[17]算法、SVG^[18]算法来实现。MMP 算法通过基于点光源光线直线传播原理求解三角网格曲面上的测地线。2005 年, Surazhsky^[19] 等人给出了该算法的一种实现方法:首先定义一个窗口函数,然后生成窗口,根据窗口计算出伪源点的位置。这样,对于模型上任意一点,计算出其经过窗口到达源点的最短路径长度,即为测地距离。测地线通过回溯可以求出,目标点所在面的 3 个边上的所有窗口中,测地距离最短的点即是最短路径上的点,接着依次找出其所有相邻窗口中最短路径上的点,将这些点依次连接起来就组成了测地线。详细过程可参考^[20]。

在 3D 面貌模型上提取的一组测地线 G 可以用来近似表征该 3D 面貌曲面 $S \approx G = \{g_\alpha | \alpha \in A\}$ 。角度间隔 α 越小,这些测地线捕获的三维人脸曲面的信息就越多。设待比较的两个三维人脸模型 S_1 和 S_2 都采用相同的初始方向和相等的角

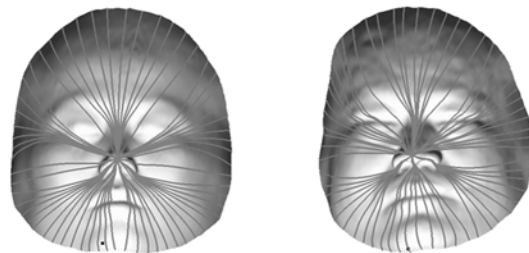


图 1 三维人脸模型上提取的测地线

Fig. 1 Geodesics extracted from 3D facial model

度间隔提取 m 条测地线,则在 S_1 和 S_2 上提取的测地线的集合可以表示为 $G_1 = \{g_\alpha^1 | \alpha \in A\}$ 和 $G_2 = \{g_\alpha^2 | \alpha \in A\}$,两个面部曲面可以近似地表示为 $S_1 \approx \{g_\alpha^1 | \alpha \in A\}$ 和 $S_2 \approx \{g_\alpha^2 | \alpha \in A\}$ (如图 1 所示为在两个 3D 面貌模型上提取的 60 条测地线),角度索引提供了整个面貌模型上曲线之间的对应关系。这样两个 3D 面貌曲面 S_1 和 S_2 的相似性比较问题就转化为对其上对应的测地线 g_α^1 和 g_α^2 的相似性比较问题,即 R^3 空间中曲线的相似性比较问题。

3 形状表示

针对上述提取的 R^3 空间中的测地线,为了分析表情变化下的 3D 面貌模型上测地线的相似度,引入参考文献[12]中的平方根速度函数(Square Root Velocity Function, SRVF)来表示曲线,使两条曲线在几何标准下实现匹配,也就是说波峰与波峰匹配,波谷和波谷匹配。SRVF 的定义如下:

设 $\beta: I \rightarrow R^3$ 表示一个参数化的曲线,其中 $I = [0, 1]$ 。定义平方根速度函数 $q: I \rightarrow R^3$ 表示曲线形状:

$$q(t) \doteq \frac{\dot{\beta}(t)}{\sqrt{|\dot{\beta}(t)|}}, \quad (1)$$

其中: $t \in I$ 是一个参数, $|\cdot|$ 是 R^3 中的欧氏范数。这里将平方根速度函数表示曲线用于表情变化下的人脸分析,原因如下:(1)使用平方根速度函数表示 $q(t)$ 能够捕获曲线 β 的形状,允许在弹性变形的情况下对比曲线形状,因而适用于表情变化下的面貌上提取的曲线形状分析。(2)它将用于对比曲线的弹性度量在 SRVF 函数表示下简化为 L^2 -度量,而且 q 的 L^2 -范数的平方 $\|q\|^2 = \int_I \langle q(t), q(t) \rangle dt = \int_I |\dot{\beta}(t)| dt$ 可以表示曲线 β 的长度。如果设 $\|q(t)\|=1$,意味着所有曲线都缩放到单位长度,那么通过这个曲线的数学表示就消除了平移、缩放变化。(3)SRVF 表示允许重新参数化群以等距的方式作用在 SRVF 表示的流

形上,从而使曲线匹配可以在重新参数化之后进行,以减少曲线拉伸的影响。在重新参数化后,曲线的弹性匹配可以更好地匹配生理意义上的对应点。

4 形状空间下 3D 面貌的相似性度量

4.1 预形状空间与形状空间

参考文献[17-18]将预形状空间(Preshape Space)定义为上述所有单位长度的弹性曲线空间,即 $C = \{q: I \rightarrow R^3, |q|=1\} \subset L^2(I, R^3)$ 。在 C 中的度量为连接 C 中两点的测地线的长度。由于 C 是 Hilbert 空间 $L^2(I, R^3)$ 的一个超球,因此 C 中任意两点 $q_1, q_2 \in C$ 的测地线是连接球中这两点的大圆的一段弧,测地路径的长度可由式(2)计算:

$$d_c(q_1, q_2) = \arccos(\langle q_1, q_2 \rangle). \quad (2)$$

曲线在经过旋转和重新参数化后,它的 SRVF 表示发生了变化,但它所表示的曲线形状是相同的,因此,需要定义所有的旋转群 $SO(3)$ 和重新参数化群 Γ ,并将它们作为 C 的等价类。这里, Γ 是所有给定的与 I 保持微分同胚的集合,它的元素可以看作是重新参数化函数。例如,对一条曲线 $\beta: I \rightarrow R^3$ 和一个函数 $\gamma \in \Gamma$,曲线 $\beta \circ \gamma$ 是曲线 β 的一个重新参数化,则对应的 SRVF 相应地变为 $q(t) \rightarrow \sqrt{\dot{\gamma}(t)} q(\gamma(t))$ 。参考文献[11]定义包含 q 的等价类为 $[q] = \{\sqrt{\dot{\gamma}(t)} O q(\gamma(t)) | O \in SO(3), \gamma \in \Gamma\}$ 。这样的等价类的集合称为 R^3 空间中开曲线的形状空间(Shape Space),由 $S \doteq C / (SO(3) \times \Gamma)$ 表示。由于用 SRVF 表示群 $\Gamma \times SO(3)$ 由等距算子作用在 SRVF 表示的流形上,从而具备了熵空间 S 继承来自预形状空间 C 的 Riemannian 度量的必要条件,因此 S 中的度量从 C 继承而来。形状空间 S 上元素之间的测地线和测地距离与预形状空间 C 中的计算方法相同,但需要在找到最优的旋转和重新参数化后进行计算。因此,首先要求解公式(3)所示的一个优化问题:

$$(O^*, \gamma^*) = \underset{(O, \gamma) \in SO(3) \times \Gamma}{\operatorname{argmin}} d_c(q_1, \sqrt{\dot{\gamma}} O(q_2 \circ \gamma)). \quad (3)$$

对于在 $SO(3)$ 中一个固定的 O ,其上的优化过程使用动态规划算法完成,同时,对于一个固定的 $\gamma \in \Gamma$,在 $SO(3)$ 上的优化使用 SVD 进行。通

过上述两步迭代,可以求得联合优化问题的解。设求得的第二条曲线的最优旋转和重新参数化分别是的 O^* 和 γ^* , $q_2^*(t) = \sqrt{\gamma^*(t)} O^* q_2(\gamma^*(t))$ 是 $[q_2]$ 的优化元素,那么 $[q_1]$ 和 $[q_2]$ 之间在 S 上的测地距离可以通过 q_1 和 q_2^* 之间的测地距离来求解,即:

$$d_s([q_1], [q_2]) \doteq d_s(q_1, q_2^*). \quad (4)$$

4.2 形状空间下的 3D 面貌相似性度量

将第 2 节中在 3D 面貌模型上提取的测地线用第 3 节中的平方根速度函数表示,再转换到形状空间下进行比较。这样两个 3D 面貌模型 S_1 和 S_2 上角度为 α 的测地线在形状空间下的测地距离即为 $d_s([q_\alpha^1], [q_\alpha^2])$ 。测地距离越小说明这两条测地线越相似,测地距离越大说明越不相似。综合平均两个 3D 面貌模型上所有对应测地线的相似程度,即可反映这 2 个 3D 面貌模型的相似程度。因此,用 2 个 3D 面貌模型 S_1 和 S_2 上所有对应测地线在形状空间下的平均测地距离来度量他们的相似性,即:

$$d_s(S^1, S^2) = \frac{1}{n} \sum_{\alpha \in \Lambda} d_s([q_\alpha^1], [q_\alpha^2]), \quad (5)$$

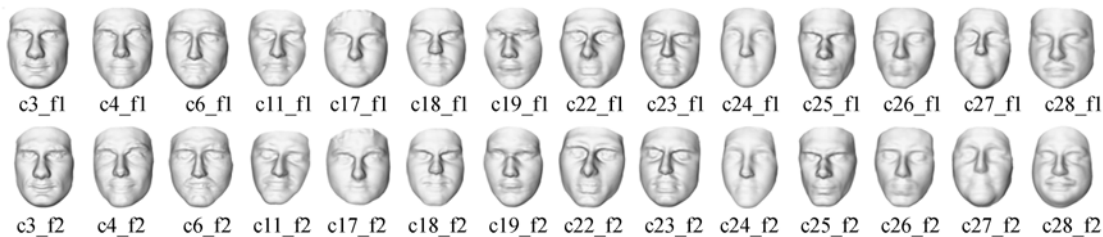


图 2 GAVADB 人脸库中的 3D 面貌模型

Fig. 2 3D facial models in GAVADB Dataset

由表 1 可知,对角线上的平均测地距离 d_s 值比非对角线上的值小,即同一个人的 2 个不同 3D 面貌模型的平均测地距离值小于不同人的 3D 面貌模型之间的值,这说明同一个人的 2 个面貌模型的相似度高,而不同人的面貌模型之间的相似度低。在表 1 中,除了 c26_f1 与 c26_f2 的比较结果在该列中不是最小值但在所在行是最小值,以及 c23_f1 与 c23_f2 的比较结果在所在列是最小值但在所在行不是最小值外,其余对角线上的比

其中: q_α^i 表示在第 i 个曲面上的测地线 g_α^i 的 SRVF 表示。距离 d_s 由公式(4)来计算。

5 实验结果

5.1 对同一个人的不同 3D 面貌模型相似性比较

首先选取同一个人的多个模型进行相似性度量,验证本方法是否可以有效区分同一个人的 3D 面貌模型和不同人的 3D 面貌模型。GAVADB 数据库是一个公开的 3D 人脸库,包括 45 名男性和 16 名女性共 61 个人的 3D 面貌模型,每个人有 9 种不同表情或姿态的数据,包括 6 个中性表情和 3 个非中性表情(微笑、大笑和任意表情)。每种 3D 人脸数据由 Minolta Vi-700 激光扫描仪获取,以三角网格形式存储。由于该库中同一个人的 3D 模型有多个,对每个人选择 2 个模型,按第 2 节的方法进行预处理后,计算图 2 所示的 14 个人的 28 个 3D 面貌模型提取的 30 条测地线在形状空间中的平均测地距离 d_s ,结果如表 1 所示。

较结果都比所在行或列的所有值要小,说明在形状空间下使用本文方法计算出的同一个人的 2 个面貌模型的相似度高,而不同人的面貌模型之间的相似度低。由于曲线重新参数化是对第二条曲线进行重新参数化,因此算出的距离值与模型的顺序有关,因而表 1 会出现行列比较结果不同的现象。如果选择按行(或按列)进行识别,则 14 个人的 3D 面貌模型至少可以识别对 13 个,即可以找到同一个人的模型,识别率达到 92.86% 以上。

表 1 GAVADB 三维人脸模型库相似度比较结果

Tab.1 Similarity comparison of 3D facial models on GAVADB





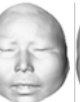

d_s	c3_f2	c4_f2	c6_f2	c11_f2	c17_f2	c18_f2	c19_f2	c22_f2	c23_f2	c24_f2	c25_f2	c26_f2	c27_f2	c28_f2
c3_fl	0.118 2	0.187 4	0.195 9	0.234 6	0.196 2	0.234 0	0.195 3	0.218 0	0.227 5	0.192 6	0.211 7	0.202 0	0.213 8	0.204 5
c4_fl	0.187 8	0.098 5	0.195 2	0.187 9	0.168 8	0.183 7	0.195 9	0.160 8	0.201 8	0.182 6	0.184 4	0.165 4	0.207 3	0.2135
c6_fl	0.186 6	0.188 2	0.130 0	0.219 0	0.200 6	0.220 9	0.193 5	0.239 5	0.199 1	0.180 4	0.210 7	0.208 6	0.189 5	0.203 7
c11_fl	0.236 2	0.188 8	0.188 6	0.126 3	0.197 3	0.200 3	0.223 8	0.180 6	0.232 0	0.192 5	0.226 9	0.190 1	0.224 7	0.236 3
c17_f1	0.192 8	0.148 4	0.190 3	0.201 3	0.106 9	0.175 9	0.205 8	0.168 0	0.207 8	0.180 9	0.201 4	0.182 0	0.195 0	0.219 1
c18_fl	0.225 2	0.189 8	0.213 2	0.211 1	0.186 1	0.082 4	0.197 1	0.219 9	0.181 0	0.164 1	0.205 9	0.190 0	0.211 7	0.212 3
c19_fl	0.255 9	0.235 9	0.242 3	0.265 1	0.244 9	0.237 8	0.132 0	0.257 2	0.251 7	0.209 7	0.219 3	0.219 3	0.256 7	0.257 1
c22_fl	0.209 2	0.177 9	0.220 1	0.211 8	0.176 7	0.194 2	0.207 3	0.140 0	0.212 0	0.194 3	0.195 6	0.172 1	0.219 4	0.232 7
c23_f1	0.214 1	0.170 5	0.178 9	0.199 8	0.193 3	0.202 2	0.218 4	0.214 7	0.177 7	0.211 5	0.220 0	0.201 4	0.219 3	0.223 4
c24_fl	0.230 6	0.195 0	0.186 4	0.208 1	0.169 5	0.221 7	0.216 5	0.219 7	0.236 4	0.154 9	0.248 9	0.199 1	0.202 3	0.214 3
c25_fl	0.194 9	0.174 8	0.202 8	0.210 9	0.190 6	0.212 6	0.171 5	0.182 1	0.210 9	0.199 1	0.090 4	0.157 6	0.232 2	0.258 7
c26_fl	0.277 3	0.235 4	0.258 2	0.271 0	0.226 9	0.226 7	0.241 2	0.235 9	0.265 2	0.224 4	0.254 5	0.216 1	0.226 4	0.227 3
c27_fl	0.212 6	0.189 1	0.219 0	0.202 6	0.192 9	0.189 3	0.201 7	0.209 3	0.186 3	0.188 1	0.200 3	0.189 1	0.144 1	0.208 2
c28_fl	0.227 8	0.199 4	0.220 1	0.226 9	0.199 8	0.197 6	0.195 5	0.234 1	0.218 8	0.179 5	0.216 6	0.167 6	0.189 1	0.146 3






5.2 对不同人的 3D 面貌模型的相似性比较

3D 面貌的相似性比较不仅要区分同一个人的面貌模型和不同人的面貌模型,还要能够正确给出不同人 3D 面貌模型之间的相似度。北京师范大学 VRVT 实验室采用 CT 设备扫描了 208 个成人活体的三维颅骨和人脸数据,该数据库包括从 19~75 岁的成人个体的数据,并已从原始的 CT 图像重构出了 3D 面貌模型。采用第 2 节中的方法对重构出的 3D 面貌模型进行预处理后,计算其每对 3D 面貌模型提取的测地线在形状空间中的平均测地距离 d_s 。

表 2 不同人的三维人脸模型相似度比较结果

Tab.2 Similarity comparison of 3D facial models of different persons

编号	1829	2604	4302	1643	4157	5904
三维人脸						
d_s	0.000 0	0.097 2	0.171 2	0.183 2	0.185 4	0.199 9

编号	1829	4344	3921	0109	2354
三维人脸					
d_s	0.0000	0.203 0	0.205 4	0.205 9	0.215 9

以编号为 1829 的模型为例,其他 9 个模型与

它比较的结果如表 2 所示。其中,编号为 2604 的模型与编号为 1829 模型的测地距离最小,说明这 2 个三维模型的相似度最高,人的主观评价这两张人脸也最相像。而且表 2 上部分中的 3D 人脸模型与编号为 1829 模型的测地距离都小于表 2 下部分中的 3D 人脸模型与编号为 1829 模型的测地距离,这说明表 2 上部分中的人脸比表 2 下部分中的人脸更像模型 1829,这也与人的主观评价相吻合。

6 结 论

本文提出了一种在形状空间下基于测地线的 3D 面貌相似性比较的新方法。首先对经过补洞、裁剪、修复不完整部分等预处理操作的 3D 面貌模型进行归一化、建立统一的坐标系并使用 TPS 算法进行配准;然后从鼻尖出发按相同的初始方向和相等的角度间隔提取一组测地线,使用平方根速度函数表示将其变换到形状空间下,使用弹性度量比较对应测地线的相似程度,从而将 3D 面貌曲面比较的问题转化为 3D 曲线的比较。在形状空间下,对比曲线的弹性度量在 SRVF 函数表示下简化为了 L^2 -度量,因此形状空间中 2 条曲线的相似性比较可以通过他们之间的测地距离来度量,即 2 个 3D 面貌的相似性比较可以用这 2 个模型上所有对应的测地线的平均测地距离作为

相似性度量的依据,其值越小说明越相似。由于测地线的内蕴属性及对表情变化的不敏感的特点,弹性形状分析又适用于面部表情变化大的情况,因而本方法可以将同一个人的不同模型与不同人的模型区分开。在公开的 GAVADB 三维面

貌库上对 14 个人的 28 个 3D 面貌模型进行了实验,识别率达到 92.86% 以上。另外,还使用本方法对不同人的 3D 面貌模型进行了相似性比较实验,结果表明使用本方法得出的相似程度的判断与人的主观判断相一致。

参考文献:

- [1] 李伟红,朱宪宇,龚卫国. 基于人脸画像的伪照片合成及修正[J]. 光学精密工程, 2014, 22(5): 1371-1378.
LI W H, ZHU X Y, GONG W G, Pseudophoto synthesis based on face sketch and its amendment [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(5): 1371-1378.
- [2] STEPHAN C N, ARTHUR R S. Assessing facial approximation accuracy: how do resemblance ratings of disparate faces compare to recognition tests[J]. *Forensic Science International*, 2006, 159 (supp.): 159-163.
- [3] QUATREHOMME G, BALAGUER T, STACCINI P, et al.. Assessment of the accuracy of three-dimensional manual craniofacial reconstruction: a series of 25 controlled cases [J]. *International Journal of Legal Medicine*, 2007, 121(6): 469-475.
- [4] MOORTHY A K, MITTAL A, JAHANBIN S, et al.. 3D facial similarity: automatic assessment versus perceptual judgments [C]. *Proceedings of the 4th IEEE International Conference on Biometrics: Theory, Applications and Systems (BTAS '10)*, 2010: 1-7.
- [5] FENG J, IP H H S, LAI L Y, et al.. Robust point correspondence matching and similarity measuring for 3D models by relative angle-context distributions [J]. *Image and Vision Computing*, 2008, 26(6): 761-775.
- [6] ZHU X Y, GENG G H, WEN C. Craniofacial similarity measuring based on BRACD [C]. *Proceedings of the 4th International Conference on Biomedical Engineering and Informatics (BMEI '11)*, Shanghai, China, 2011, 2: 942-945.
- [7] 朱新懿,耿国华. 颅面重构中颅面相似度比较[J]. 计算机应用, 2010, 27(8): 3153-3155.
ZHU X Y, GENG G H. Craniofacial similarity comparison in craniofacial reconstruction [J]. *Application Research of Computers*, 2010, 27(8): 3153-3155. (in Chinese)
- [8] 朱新懿,耿国华,温超. 利用 Principal Warps 评估颅面几何相似度[J]. 中国图象图形学报, 2012, 17(4): 568-574.
ZHU X Y, GENG G H, WEN CH. Estimate of craniofacial geometry shape similarity based on principal Warps [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2012, 17(4): 568-574.
- [9] LI H, WU Z, ZHOU M. A Iso-Geodesic Stripes based similarity measure method for 3D face [C]. *Proceedings of the 4th IEEE International Conference on Biomedical Engineering and Informatics (BMEI '11)*, 2011, 4: 2114-2118.
- [10] YOUNES L. Computable elastic distances between shapes [J]. *SIAM Journal on Applied Mathematics*, 1998, 58(2): 565-586.
- [11] DRIRA H, BEN AMOR B, SRIVASTAVA A, et al.. 3D face recognition under expressions, occlusions, and pose variations [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2013, 35(9): 2270-2283.
- [12] DAOUDI M, SRIVASTAVA A, VELTKAMP R. *3D Face Modeling, Analysis and Recognition* [M]. John Wiley & Sons, 2013.
- [13] HU Y, ZHOU M, WU Z. A dense point-to-point alignment method for realistic 3D face morphing and animation [J]. *International Journal of Computer Games Technology*, 2009: 3.
- [14] 王欣,张明明,于晓,等. 应用改进迭代最近点方法的点云数据配准[J]. 光学精密工程, 2012, 20(9): 2068-2077.
WANG X, ZHANG M M, YU X, et al.. Point cloud registration based on improved iterative closest point method [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(9): 2068-2077.
- [15] MITCHELL J S B, MOUNT D M, PAPADIMITRIOU C H. The discrete geodesic problem [J]. *SIAM Journal on Computing*, 1987, 16(4): 647-668.
- [16] XIN S Q, WANG G J. Improving Chen and Han's algorithm on the discrete geodesic problem [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2009, 28(4): 1-8.

- [17] YING X, XIN S Q, HE Y. Parallel Chen-Han (PCH) algorithm for discrete geodesics[J]. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 2014, 33(1):9.
- [18] YING X, WANG X, HE Y. Saddle Vertex Graph (SVG): a novel solution to the discrete geodesic problem [J]. *ACM Transactions on Graphics (SIGGRAPH ASIA 2013)*, 2013,32(6).
- [19] SURAZHISKY V, SURAZHISKY T, KIRSANOV D, *et al.*. Fast exact and approximate geodesics on meshes [J]. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 2005,24(3): 553-560.
- [20] ZHAO J, LIU C, WU Z, ET AL. 3D facial similarity measure based on geodesic network and curvatures [J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2014, 2014 (2014), Article ID 832837, 17 pages, doi:10.1155/2014/832837.

作者简介:



赵俊莉(1977—),女,山西新绛人,讲师,博士研究生,1999年于山西师范大学获得学士学位,2006年于首都师范大学获得硕士学位,主要从事计算机图形学、虚拟现实、数字媒体方面的研究。
E-mail: zhaojl@yeah.net

导师简介:



武仲科(1965—),男,辽宁海城人,教授,博士生导师,1988年于北京大学获得学士学位,1991年、1995年于北京航空航天大学分别获得硕士、博士学位,曾在新加坡国家高性能计算研究所(IHPC),法国国家信息与自动化研究所(INRIA),新加坡南洋理工大学(NTU)计算机工程系等从事科研工作,现为北京师范大学信息科学与技术学院教授、博士生导师,教育部高等学校动画、数字媒体专业教学指导委员会委员,北京图形图像学会常务理事,主要从事计算机图形学、计算机辅助几何设计、计算机动画、虚拟现实、医学图象处理方面的研究。E-mail: zwu@bnu.edu.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)