

分区变形与多重约束结合的面皮层次点对应方法

贺毅岳¹, 周蓬勃², 耿国华¹, 周明全¹

(1. 西北大学信息科学与技术学院, 710069, 西安; 2. 北京师范大学艺术与传媒学院, 100875, 北京)

摘要: 针对颅面统计复原中基于面貌形态几何特征建立三维面皮间生理点对应关系的难题, 提出几何模板分区变形与多重约束结合的三维面皮层次点对应方法(HCRDM). 该方法根据人脸生理结构特征点定义一套五官分区几何模板, 以实现面皮分区半自动化; 根据特征点的严格对应关系, 利用径向基函数对样本面皮各分区变形; 为近似重合的各分区建立体素模型, 逐次选取特征显著的模板顶点作为待对应点, 利用模板顶点间局部相对位置几何约束确定样本分区中对应点候选集; 根据局部几何特征加权距离确定最优对应点; 结合几何约束与微分特征距离约束实现边界区域点对应. 实验结果表明, HCRDM 较已有的三维面皮点对应算法准确率提高了 10% 以上.

关键词: 颅面统计复原; 点对应; 分区变形; 多重约束

中图分类号: TP391 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2012)06-0066-08

A Hierarchical 3D Facial Correspondence Method Based on Regional Deformation and Multi-Constraint

HE Yiyue¹, ZHOU Pengbo², GENG Guohua¹, ZHOU Mingquan¹

(1. School of Information Science and Technology, Northwest University, Xi'an 710069, China;

2. School of Art and Communication, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: A new hierarchical 3D facial correspondence method based on regional deformation and multi-constraint (HCRDM) is proposed to deal with the problem how to establish physiological consistent correspondence between 3D face samples according to morphological geometric characteristics in craniofacial statistical reconstruction. A set of regional geometrical template of facial organs is defined based on physiological structural landmarks so that a semi-automatic partition of face can be achieved. Then, each region in the sample is deformed based on radial basis function (RBF) according to the strict correspondence of landmarks. Voxel models are built for those approximately coincided corresponding regions, the current under-corresponding vertex (CUV) with largest curvature in the template is successively selected and a candidate set of corresponding vertexes on sample face is determined by the local geometrical constraint of CUV, which is generated from relative positions between those corresponded template vertexes and CUV. Then, the optimal corresponding vertex on the sample can be determined according to the weighted distances of local geometric features between CUV and each candidate vertex. The correspondences of border regions are finally established by the geometrical constraint and the distance-constraint of differential characteristics. Experimental results show that the accuracy of 3D facial correspondence established by HCRDM is 10% higher than that of existing algorithms.

Keywords: statistical craniofacial reconstruction; correspondence; regional deformation; multi-constraint

收稿日期: 2011-11-23. 作者简介: 贺毅岳(1983—), 男, 博士生; 耿国华(通信作者), 女, 教授, 博士生导师. 基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(60736008); 国家重点基础研究发展计划前期专项资助项目(2011CB311801); 国家自然科学基金资助项目(F010402).

网络出版时间: 2012-03-12

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20120312.1028.005.html>

颅面复原是以人的颅骨为基础,以法医人类学和解剖学中颅骨与面皮之间形态关系为客观依据,对未知人的面貌科学预测和复原的技术,在身份认证、法医鉴定以及医学手术计划和结果预测等方面有广泛的应用需求. 基于统计模型的复原方法将所有颅面样本作为先验知识指导面皮复原过程,有效避免了参考样本单一性对复原结果的影响;此外,统计变形将模型变形约束在样本集确定的形状空间,使复原出的结果面皮形状更合理. 统计复原方法对样本数据(面皮和颅骨)有如下要求:①以点分布模型表示且顶点数目必须相等;②需配准到同一位置,以消除仿射变换的影响;③微观上相同序号的顶点具有解剖学上的生理位置一致性. 然而,面皮表面生理形态具有多样性、复杂性和精细性特征,数据表示存在精度和噪声等问题,因此采用基于欧氏距离和基于局部微分特征匹配的传统方法^[1]建立面皮点对应关系往往误差较大,难以保证点对应的准确度. 如何建立三维面皮间生理位置一致的点对应关系,是基于统计模型的颅面复原研究中亟待解决的问题.

1 已有相关方法的分析

1.1 曲面配准

曲面的配准与点对应紧密相关,配准结果可作为点对应关系建立的基础. 曲面配准包括刚性配准和非刚性配准两类,已有的曲面配准研究集中于刚性配准问题.

在基于欧式距离的曲面刚体配准算法中,迭代最近点算法(Iterated Closest Point, ICP)^[1]通过迭代优化矩阵,在每次迭代过程中对参考点集上的每个点在目标点集中寻找最近点,并利用点对应关系计算相应的刚体变换矩阵,应用于参考点集获得新的参考点集后进入新的迭代过程,最终获得最优变换矩阵来实现曲面配准. 基于局部微分特征的刚体配准典型方法有 Spin Image, Principal Curvature 等^[2],主要步骤为:①定义一种局部几何特征及计算方法;②计算出所有顶点的特征值,再根据每个顶点的特征值在待配准曲面上搜索显著特征顶点;③根据顶点的特征值建立特征点对应关系,再计算刚体变换矩阵. 一般地,低维特征计算速度快,但蕴含信息量少、区分度差且对噪声敏感;高维特征包含顶点及邻域的多维信息,但计算复杂度过高. 面皮具有精细性与多样性特征,直接采用刚性配准算法建立面皮生理点对应关系是不合适的.

1.2 曲面点对应

典型的曲面点对应方法有很多. Brett 等^[3]提出以最大限度保留特征的算法简化待对应曲面原始三角网格,产生曲面的近似简化网格,利用 ICP 算法得到匹配的简化曲面,再通过面片递归插值获得曲面的稠密点对应关系. Davies 等^[4]提出以向量值函数的形状图像表示方法将拓扑非平凡的模型网格对应到规则网格,降低了计算复杂度. Mian 等^[5]对已有的多视点云数据和深度图像的自动点对应方法进行了全面的综述,深入分析了各种对应算法的精度、效率以及健壮性,及其与曲面采样、噪声和重叠的关系.

1.3 三维人脸点对应

国内外关于三维人脸点对应这一具体问题的研究相对较少,已有的点对应方法无法满足面皮统计样本的准确度要求. 采用文献^[6]的光流算法及其改进算法建立三维人脸的稠密对应,但柱面展开方法损失了许多三维人脸的复杂几何形状信息,而且人脸图像本身差别较大,故对应效果并不理想. Feng 等^[7]提出了相对角直方图(Relative Angle Context Distribution, RACD)点对应算法,它实际上只能将对应点限定到目标点邻域内,无法保证对应点的准确度. Hu 等^[6]提出了基于网格均匀重采样的三维人脸对应方法,该方法在较低精度需求情况下是合适的,但对于整体形态差异较大的三维面皮而言,重复均匀采样过程累计的误差会导致远离初始对应点的顶点对应存在较大误差.

2 三维面皮层次点对应方法

本文在已有研究成果^[8-9]的基础上,将三维面皮视为非刚体曲面,考虑面皮形态复杂性、多样性和局部相关性,在分区变形基础上以欧氏距离、点间相对位置约束以及局部几何特征加权距离作为点对应的局部生理形态一致性的度量要素,提出一种几何模板分区变形与多重约束结合的三维面皮层次点对应方法(HCRDM),其基本流程如图 1 所示:①根据面皮生理结构特征定义分区几何模板,并将其应用于面皮半自动化分区处理;②根据特征点对应关系,利用径向基函数(RBF)对样本面皮各分区局部变形,使其与模板面皮对应分区近似重合;③建立分区体素模型,逐次选取模板面皮的待对应点,利用模板中顶点的局部相对位置约束关系确定样本分区的对应点候选集;④根据顶点局部几何特征加权距离确定最优对应点;⑤结合局部相对位置约束关系与微分特

征距离约束建立各分区交界处的点对应关系。

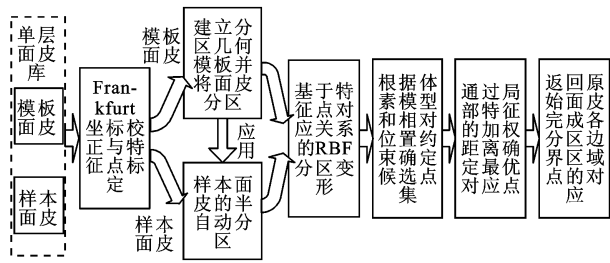


图1 HCRDM的基本流程图

2.1 Frankfurt坐标统一与特征点标定

基于 Snake 模型和射线法的边缘提取算法获得头部 CT 图像序列的边缘,再应用基于轮廓线的模型重建算法获得如图 2 所示的单层面皮模型(去掉耳朵). 为了消除面皮模型所处坐标系的不同对点对应结果准确性的影响,将面皮统一变换到人类学研究领域采用的 Frankfurt 坐标系,在该坐标系下的面皮相当于活体直立两眼平视前方时头部所处的位置. 如图 3 所示, Frankfurt 坐标是通过交互标定左右双耳孔中点、左眼框下缘点和眉心点(L、R、M、V)确定的:①以向量 $\overrightarrow{LR}$ 为法向量且过眉心点 V 的平面与直线 LR 的交点作为 Frankfurt 坐标系的原点;②过原点且方向为 $\mathbf{N}=\overrightarrow{MR}\times\overrightarrow{ML}$ 的射线作为新的 Z 轴;③LR 直线为新 X 轴,其正向从 L 指向 R;④定义过原点且垂直于 X、Z 轴的直线为 Y 轴,其正向由 X 轴和 Z 轴按右手法确定。

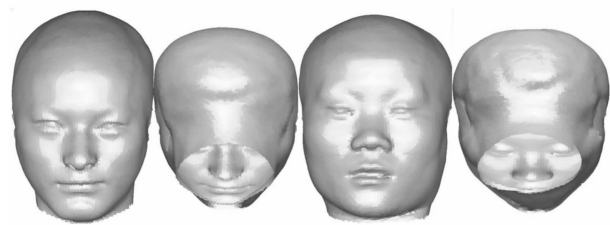


图2 单层面皮模型

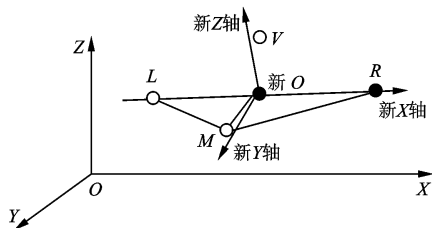


图3 Frankfurt坐标系的定义示意图^[8]

参考 MPEG-4 中人脸定义参数并结合面皮解剖学知识定义了覆盖整个面皮的 103 个特征点,采用基于支持向量机的半自动方法^[10]进行标定,效果

如图 4 所示。

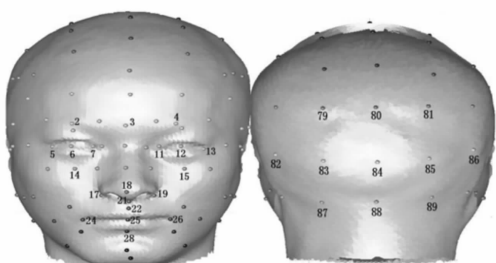


图4 面皮特征点

2.2 面皮分区几何模板

根据面皮的生理结构及形态局部相关性定义一套基于特征点的五官分区几何模板,以半自动化方式对样本面皮进行分区,获得具有局部形状相似性的器官分区,为分区变形及点对应处理奠定基础。

2.2.1 几何模板的建立 五官分区几何模板由 4 个形状近似的几何体构成,其中眼睛和嘴巴以椭球体近似,鼻子以四面体近似. 表 1 给出了五官分区几何模板及相关特征点。

表1 分区几何模板与特征点对应关系

分区名称	近似几何体类型	相关的特征点
嘴巴	椭球体	22、24、25、26、28
鼻子	四面体	3、17、18、19、21
左眼	椭球体	2、5、6、7、14
右眼	椭球体	4、11、12、13、15

椭球体的数学表达式为

$$\frac{(x-x_0)^2}{a^2} + \frac{(y-y_0)^2}{b^2} + \frac{(z-z_0)^2}{c^2} = 1 \quad (1)$$

式中: (x_0, y_0, z_0) 为球心坐标; a, b, c 为 3 个轴长参数. 本文设定左眼椭球体以图 4 所示 6 号特征点为球心,且椭球体参数与特征点坐标之间满足

$$(x_0, y_0, z_0) = (\mathbf{M}(6, x), \mathbf{M}(6, y), \mathbf{M}(6, z))$$
$$a = d(5, 6); \quad b = c = d(2, 6) \quad (2)$$

式中: $\mathbf{M}$ 是包含面皮 103 个特征点的向量; $d(i, j)$ 表示第 i 和 j 个特征点间的欧式距离。

对应于鼻子的四面体的数学表达式为

$$\begin{cases} A_1(x-x_1) + B_1(y-y_1) + C_1(z-z_1) = 0 \\ A_2(x-x_2) + B_2(y-y_2) + C_2(z-z_2) = 0 \\ A_3(x-x_3) + B_3(y-y_3) + C_3(z-z_3) = 0 \\ A_4(x-x_4) + B_4(y-y_4) + C_4(z-z_4) = 0 \end{cases} \quad (3)$$

式(3)中第 1 个平面由第 3、17、18 号特征点确定,法向量 $\mathbf{N}=(A_1, B_1, C_1)$ 的计算公式如下

$$\mathbf{N} = (\mathbf{M}(17) - \mathbf{M}(3)) \times (\mathbf{M}(17) - \mathbf{M}(3)) \quad (4)$$

类似地,分别由 3、18、19;17、18、19 和 3、17、19 这 3 组特征点可确定后 3 个平面的参数。

2.2.2 基于几何模板的面皮分区 对于所建立的分区分模板中每一个几何分割体,循环判断面皮的每一个顶点是否处于该分割体内部,若顶点处于几何体内部,则该顶点属于对应分区;否则,不属于该分区。分区结束时同一几何体的所有顶点构成一个生理分区。算法过程如下:

```
for 遍历分区模板中的几何体  $s_i$ 
    将对应分区顶点集置为空  $r_i = \{\}$ 
    for 遍历尚未分区的面皮顶点集  $V = \{v_j\}$ 
        if ( $v_j$  处于  $s_i$  内)
             $r_i = r_i + v_j$ 
             $V = V - v_j$ 
        end
    end // 完成第  $i$  个分区  $r_i$  划分
end
```

判断上述过程中顶点 v_j 是否属于 s_i ,可以根据 s_i 的几何体类型分以下两种情况处理。

第 1 种情况判断顶点是否在四面体内。设四面体 $T = \{F_1, F_2, F_3, F_4\}$ 的法向量指向几何体外,待判断顶点 $P = \{x_p, y_p, z_p\}$ 。对于平面 F_i ,由式(3)知其表达式为

$$A_i(x - x_i) + B_i(y - y_i) + C_i(z - z_i) = 0 \quad (5)$$

将顶点 P 代入式(5)左端得到

$$d_i = A_i(x_p - x_i) + B_i(y_p - y_i) + C_i(z_p - z_i) \quad (6)$$

根据 $d_i, i=1,2,3,4$ 的取值判断 P 与四面体的位置关系为:①如果 d_1, d_2, d_3, d_4 均小于 0, P 在四面体内侧;②如果 d_1, d_2, d_3, d_4 之一等于 0, P 在四面体表面上;③否则, P 在四面体的外部。当满足位置关系①和②时,将 P 划分到 s_i 对应的分区。

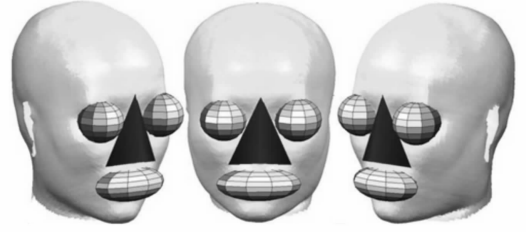
第 2 种情况判断顶点是否在椭球体内。设椭球体球心坐标为 (x_0, y_0, z_0) ,将当前待判断顶点 $P = \{x_p, y_p, z_p\}$ 代入式(1)左端可得

$$D_p = \frac{(x_p - x_0)^2}{a^2} + \frac{(y_p - y_0)^2}{b^2} + \frac{(z_p - z_0)^2}{c^2} \quad (7)$$

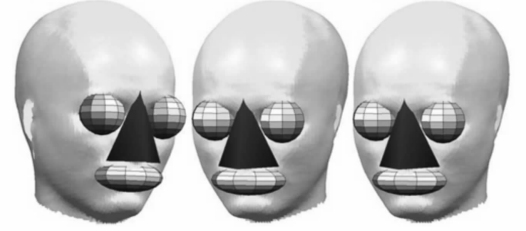
如果 $D_p \leq 1$, P 在椭球体内;否则, P 在椭球体外。

2.2.3 面皮分割效果及分析 图 5 所示为在模板面皮(见图 5a)和某一个样本面皮(见图 5b)上建立的五官分割几何体的多视效果。在建立好图 5 所示的基于模板面皮的分区几何模板后,按照 2.2.2 节阐述的分割方法,可自动将每个面皮分割成左眼、右眼、鼻子、嘴巴以及剩余部分(基础面皮)共计 5 个分

区。图 6 所示为某一样本面皮的分割效果及分割得到的五官模型(右眼、鼻子和嘴巴)。



(a) 模板面皮



(b) 样本面皮

图 5 面皮五官几何分割体

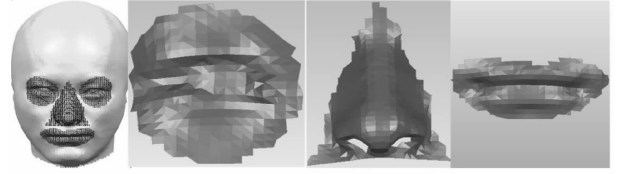


图 6 样本面皮分割效果与部分器官分区图

2.3 基于 RBF 的分区变形

三维面皮的变形实质上属于三维空间曲面的变形,且以特征点严格对应关系为约束条件。

2.3.1 三维空间中的 RBF 给定一个点集 $X = \{x_i\}_{i=1}^N \subset R^3$ 和函数值 $\{s_i\}_{i=1}^N$, 插值函数 $f: R^3 \rightarrow R$ 应满足

$$f(x_i) = s_i \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (8)$$

并使得在 Beppo-Levi 空间 $BL^{(2)}(R^3)$ 中 f 的能量

$$\int_{R^3} \left(\frac{\partial^2 f}{\partial x^2} \right)^2 + \left(\frac{\partial^2 f}{\partial y^2} \right)^2 + \left(\frac{\partial^2 f}{\partial z^2} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial^2 f}{\partial x \partial y} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial^2 f}{\partial y \partial z} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial^2 f}{\partial z \partial x} \right)^2 dx dy dz$$

最小,满足该条件的光滑插值函数 f 为径向基函数

$$f(x) = \sum_{i=1}^N \lambda_i \varphi(\|x - x_i\|) + p(x) \quad (9)$$

式中: $\|\cdot\|$ 表示欧拉范数; $\varphi: R^3 \times R^3 \rightarrow [0, \infty]$ 上的对称实值基函数; $\{x_i\}_{i=1}^N$ 为 RBF 中心; λ_i 为权重参数; $p(x)$ 表示仿射变换线性多项式。

2.3.2 面皮分区的变形 假设待对应面皮 X_{face} 与模板面皮 E_{face} 对应分区的特征点集分别为 $\{q_i\}$ 和

$\{p_i\}$, 下标 $i=1, 2, \dots, N$ 为序号. 由于变形过程中特征点严格对应, 因此可获得从 X_{face} 到 E_{face} 的特征点位移行向量

$$s_i = p_i - q_i \quad (10)$$

从 X_{face} 到 E_{face} 的变形对应于由 X_{face} 特征点位移量插值形成的曲面 Ψ , 其中特征点 q_i 的偏移量 s_i 是 Ψ 上已知的型值点 $\{(q_i, s_i)\}_{i=1}^N$, 满足

$$f(q_i) = s_i \quad (11)$$

对偏移向量曲面上任意一点 q_x , 其变形后的偏移量可以通过插值曲面 Ψ 得到, 插值函数采用式(9)所示的径向基函数, 并且取 $p(x) = x\mathbf{M} + \mathbf{T}$ 表示仿射变换, $\mathbf{M}$ 为 3×3 的旋转矩阵, $\mathbf{T}$ 为三维位移行向量. 基函数 $\varphi(r) = \varphi(|q_x - q_i|)$ 有多种选择方式, 本文经过反复试验选用高斯函数 $\varphi(r) = \exp(-cr^2)$, 其中 $c=1/64$. 将 N 个特征点坐标代入式(9)可得

$$f(q_x) = \sum_{i=1}^N \lambda_i \varphi(|q_x - q_i|) + q_x \mathbf{M} + \mathbf{T} \quad (12)$$

为确定式(9)中系数 λ_i , 需引入约束条件

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^N \lambda_i &= 0; \\ \sum_{i=1}^N \lambda_i q_i^T &= 0 \end{aligned} \quad (13)$$

联立以上3式, 并令 $\delta_{ij} = \varphi(|q_i - q_j|)$, $1 \leq i, j \leq N$, 可得如下的线性方程组

$$\begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{Q} \\ \mathbf{Q}^T & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{\lambda} \\ \mathbf{C} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{S} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$\text{式中: } \mathbf{A} = \begin{bmatrix} \delta_{11} & \cdots & \delta_{1N} \\ \vdots & & \vdots \\ \delta_{N1} & \cdots & \delta_{NN} \end{bmatrix}; \mathbf{Q} = \begin{bmatrix} q_1 & 1 \\ \vdots & \vdots \\ q_N & 1 \end{bmatrix};$$

$$\boldsymbol{\lambda} = \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \vdots \\ \lambda_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda_{11} & \lambda_{12} & \lambda_{13} \\ \lambda_{21} & \lambda_{22} & \lambda_{23} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \lambda_{N1} & \lambda_{N2} & \lambda_{N3} \end{bmatrix}; \mathbf{S} = \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \\ \vdots \\ s_N \end{bmatrix}; \mathbf{C} = \begin{bmatrix} \mathbf{M} \\ \mathbf{T} \end{bmatrix}.$$

利用 Fast Multiple Method 算法求解方程组可得 $\boldsymbol{\lambda}$ 、 $\mathbf{M}$ 和 $\mathbf{T}$, 从而可确定式(12)的插值函数. 按以上方法, 根据 E_{face} 和 X_{face} 对应分区所包含的特征点对应关系, 可计算出变形过程中特征点位移曲面的参数, 再利用径向基插值函数可得到面皮上任一点 $q_x \in X_{\text{face}}$ 在形变过程中的近似偏移向量 $f(q_x)$, 从而根据式(15)可计算出 q_x 变形后的空间坐标 $\bar{q}_x$, 即

$$\bar{q}_x = q_x + f(q_x) \quad (15)$$

$X_{\text{face}}^{\text{def}}$ 表示经 RBF 分区变形处理后的 X_{face} .

2.3.3 面皮分区变形效果及分析 对面皮的各个分区进行局部变形, 以使 $X_{\text{face}}^{\text{def}}$ 和 E_{face} 各个对应分

区近似重合. 图7给出了部分分区, 包括左眼、鼻子和嘴巴3个分区的变形效果(第2列), 以及变形前后各分区的重合情况(第4、5列). 可以看出, RBF分区变形在消除对应分区间仿射变换的同时, 通过局部变形使得各分区达到近似重合的状态, 有利于缩小对应点搜索的范围.

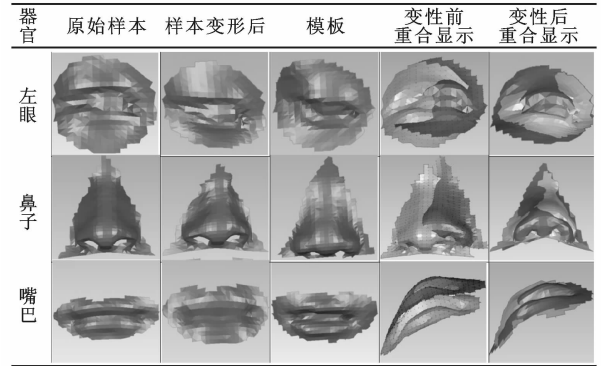


图7 基于RBF的分区变形及效果图

2.4 基于多重约束的层次点对应

在分区变形基础上, 本文提出基于多重约束的层次点对应方法, 包括两部分: ①分区点对应, 建立分区体素模型, 结合相对位置几何约束关系确定有效候选点集, 根据局部几何特征的加权距离确定分区的最优对应点; ②边界区域点对应, 返回至原始面皮 X_{face} , 基于几何约束与微分特征距离约束建立边界区域点的对应关系.

2.4.1 网格顶点法向与曲率的计算 采用一阶邻接三角形的单位法向量关于面积的加权平均来计算顶点 v 的法向量

$$\mathbf{N}_v = \sum_{i=1}^n \mathbf{a}_i \cdot \mathbf{n}_i / \sum_{i=1}^n \mathbf{a}_i \quad (16)$$

式中: $\mathbf{a}_i$ 和 $\mathbf{n}_i$ 是以 v 为顶点的第 i 个三角形的面积及其所在平面的单位法向量.

基于 Voronoi 图的曲率计算方法是最成功的顶点曲率估计方法. 其原理是将光滑曲面视为网格的极限或线性逼近, 而网格顶点的几何度量性质可看作该空间网格在顶点邻域的平均度量. 网格顶点 p_i 的高斯曲率 $K_G(p_i)$ 计算公式为

$$K_G(p_i) = \frac{1}{A_M} \left(2\pi - \sum_{j \in N(i)} \theta_j \right) \quad (17)$$

式中: A_M 是由 p_i 的一阶邻接三角形的外心构成的 Voronoi 多边形的面积; $\sum_{j \in N(i)} \theta_j$ 是网格上 p_i 的一阶邻接三角形中以 p_i 为顶点的所有角度之和.

2.4.2 面皮分区点对应的具体方法 对于 $X_{\text{face}}^{\text{def}}$ 和 E_{face} 中已基本重合的各对应分区, 首先分别建立各

分区的体素模型,逐次选取 E_{face} 中特征显著顶点 v 作为待对应点,并根据面皮(人脸)局部生理结构的相对稳定性,利用 E_{face} 中已对应顶点集与待对应顶点的局部相对几何位置约束关系集,在待对应面皮 $X_{\text{face}}^{\text{def}}$ 上构建未知对应点的几何约束多面体,结合体素模型中对应点之间的距离约束确定 $X_{\text{face}}^{\text{def}}$ 上对应点的候选集;最后,根据 v 与候选点的局部微分特征加权距离建立面皮点对应关系.具体步骤如下.

步骤1 根据原始面皮网格数据,采用距离场和距离变换方法为 E_{face} 和 $X_{\text{face}}^{\text{def}}$ 建立相应的 26-邻接体素模型 L_m 和 L_x ,其中保存了顶点的一阶邻接关系,用于提高局部几何特征(曲率、法向)的计算速度.显然, L_m 和 L_x 整体处于相交(重合)状态.

步骤2 利用体素模型 L_x 提供的顶点一阶邻接关系,根据式(16)、(17)计算第 i 个面皮分区网格上顶点的法向和局部曲率,并按曲率将顶点排序.同时,将该分区中的特征点标识为已对应点.

步骤3 按照曲率从大到小的顺序选择顶点 $v \in E_{\text{face}}$,采用体素的 26-邻域搜索方法获得 v 的 k 阶(本文取 $k=3$)邻域内已完成对应的顶点,以集合 $V_M = \{v_k | k=1, 2, \dots, n\}$ 表示.若 V_M 非空,过点 v_k

以向量 $\vec{v} v_k$ 为法向建立切割平面 $\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_n$,由此 n 个切割平面构成 v 的约束集 C_v ,定义为 $C_v = \{c_k | k=1, 2, \dots, n; c_k: v \text{ 处于 } \pi_k \text{ 内侧}\}$.图8所示为 $k=1$ 时 C_v 的示意图,显然 C_v 可有效表达 v 与其 k 阶邻接顶点的相对位置关系.

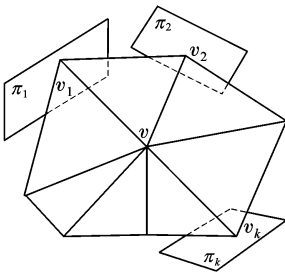


图8 模板面皮中 C_v 的示意图

步骤4 以 L_M 中包含 v 的体素为中心,采用 26-邻域搜索方法获得可能包含 v 的对应点的体素集,其最外层表面构成封闭凸多面体 Ω_1 ,同时获得包含于 Ω_1 的 $X_{\text{face}}^{\text{def}}$ 的部分网格 T_1 .根据人脸面皮局部生理结构与形态的相对稳定性,将 E_{face} 中 v 与已对应顶点 V_M 的相对位置关系 C_v 作为在 L_x 中搜索 v 的对应点的约束条件.通过遍历 T_1 每一顶点,获得 T_1 中与 $v_k \in V_M$ 存在对应关系的顶点集 $V_X = \{v_l^k | l=$

$1, 2, \dots, n; v_l^k$ 是与 $v_k \in V_M$ 对应的顶点},显然 $n_1 < n$.过点 v_l^k 以向量 $\vec{v} v_k$ 为法向建立约束平面 $\pi_1^c, \pi_2^c, \dots, \pi_{n_1}^c$,将 Ω_1 与此 n_1 个平面的小于 0 一侧的空间求交,获得约束凸多面体 Ω_2 及其内部网格 T_2 ,将 T_2 中所有顶点作为对应点候选集 $C(v)$.

步骤5 计算 $\forall v_x \in C(v)$ 与模板顶点 v 的曲率和法向特征的加权距离

$$D(v_x, v) = \alpha \frac{\|C(v_x), C(v)\|}{C(v)} + (1 - \alpha) \sin(\hat{\theta}(\mathbf{N}(v_x), \mathbf{N}(v))) \quad (18)$$

式中: α 为曲率权重(本文取为 0.75); $\|\cdot\|$ 为欧式距离; $C(v)$ 为顶点曲率; $\mathbf{N}(v)$ 为顶点法向; $\hat{\theta}(\mathbf{N}(v_x), \mathbf{N}(v))$ 表示法向 $\mathbf{N}(v_x)$ 和 $\mathbf{N}(v)$ 的夹角.按与 v 的距离排序,可获得 $C(v)$ 的顶点递增序列 ℓ_{n_1} .

步骤6 (1)若 ℓ_{n_1} 非空,取 ℓ_{n_1} 首个顶点 v_x^1 为 v 的对应点,根据距离 $D(v_x^1, v)$ 的取值作进一步处理:①若 $D(v_x^1, v) \leq \xi_1$,将 v_x^1 作为 v 的最优对应点, ξ_1 为距离阈值,本文取网格面片边长的均值;②若 $D(v_x^1, v) > \xi_1$,则从 ℓ_{n_1} 中选取 v_x^1 的下一个顶点 v_x^2 (若 ℓ_{n_1} 只含一个顶点,则 v_x^2 取为以 v_x^1 为起点的边与约束凸多面体 Ω_2 的最近交点),以这两个顶点作为端点构成线段 $l_{1,2}$,通过曲率与法向的线性内插获得使 $D(p, v)$ 最小化的点 $p \in l_{1,2}$,取 p 为 v 的最优对应点.

(2)若 ℓ_{n_1} 为空集,表示 v 在对应分区中不存在合理对应点,这种情况在 2.4.3 节予以讨论.

2.4.3 分区边界区域点对应 经过上述分区对应处理后,模板面皮中绝大多数顶点已实现点的对应,但由于分区边界线的非严格对应性,导致各分区的边界区域中尚有少量点无法找到对应点.对于分区对应过程中未完成点对应的 E_{face} 顶点,采用如下方法实现点对应.

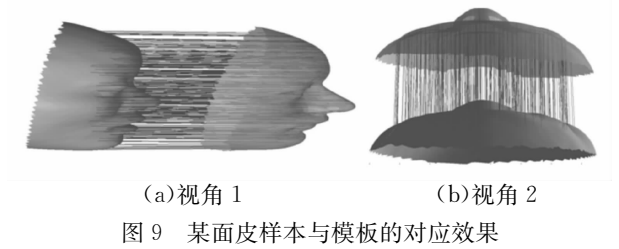
步骤1 根据 $X_{\text{face}}^{\text{def}}$ (含 2.4.2 节中步骤6情况(1)插值生成的对应点)与 E_{face} 对应分区间的点对应关系,建立 E_{face} 与未变形面皮 $X_{\text{face}}^{\text{expa}}$ (含 X_{face} 和经 RBF 逆变换的点集)中多数点的对应关系.

步骤2 按曲率特征值从大到小的次序选取 E_{face} 中未对应的顶点,将与该点欧式距离小于阈值 d (取为 $3\xi_1$) 的 $X_{\text{face}}^{\text{expa}}$ 顶点作为初步候选点.

步骤3 类似 2.4.2 节,通过引入相对位置几何约束进一步缩小候选点集,最后以局部几何特征的加权距离为约束,采用直接选取或线性插值方法确定最优对应点.

与模板面皮建立了点对应关系后的 X_{face}^{expa} 由原有顶点以及插值生成的顶点两类顶点构成,并且 X_{face}^{expa} 中顶点拓扑关系与模板拓扑保持一致. 颅面统计复原以面皮样本数据 X_{face}^{expa} 为基础展开.

2.4.4 点对应实例效果及分析 图9从两个视角给出了应用 HCRDM 建立的某一个样本面皮与模板面皮的复杂区域(五官)点对应结果,图9a中左侧模型是模板面皮,对应顶点以线段连接. 整个模板中每一个顶点在样本面皮中都有唯一的生理位置一致的顶点与之对应,故 HCRDM 可建立颅面统计复原所需的样本生理点对应关系.



3 实验与分析

根据 HCRDM 方法设计并实现了三维面皮点对应系统 3D FaceRigister. 从颅面单层数据库中随机抽取 30 套三维面皮作为测试数据(样本面皮顶点数约为 4×10^4),建立与模板面皮的点对应关系.

3.1 器官分区内点对应效果比较与分析

图10给出了某样本中眼睛、鼻子和嘴巴3个分区采用不同点对应方法的结果:第1列在 Frankfurt 坐标系下采用欧式距离对应的方法(方法①),线段交错情况即错配点对较多;第2列采用 RBF 变形和欧式距离对应的方法(方法②),错配大大减少;第3列采用 2.4.2 节所述层次对应方法(方法③),基本上消除了错配. 表2给出了在测试数据集上分别采用上述方法进行分区点对应的平均准确率

$$\eta_i = \sum_j^k N_{i,j}^c / kN_i \tag{19}$$

式中: η_i 为第 i 分区平均准确率; N_i 为第 i 模板分区顶点总数; $N_{i,j}^c$ 为第 i 模板分区与第 j 个测试数据对应分区正确对应的顶点数; k 为测试数据个数,本实验取 $k=30$. 对比表2中数据可知,由于器官形状的复杂性与多样性,方法①无法建立可靠的点对应关系;方法②中基于特征点的变形可显著提高对应的准确度,但由于特征点标定误差和数目的限制,在几何特征较精细的区域仍存在一些错配现象;方法③基本上实现了器官分区内点的精确对应,表明在变

形基础上采用顶点相对位置几何约束多面体筛选候选顶点的方法可进一步提高点对应准确度. 表2中的嘴巴分区对应准确度较低,是由嘴巴的形状多样性与其涉及的复杂表情包含大量的非线性变形导致的.

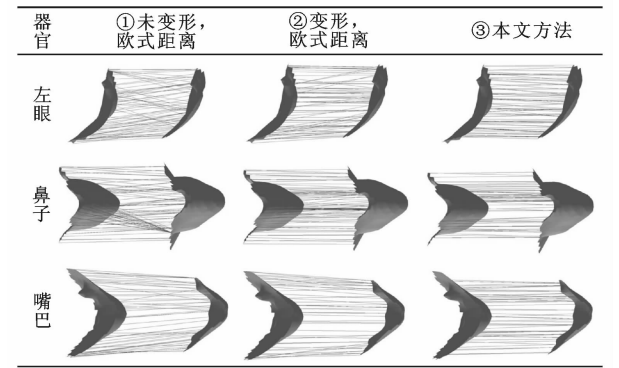


图10 部分分区点对应效果比较

表2 不同方法下各分区对应的准确率 %

	准确率				
	左眼	鼻子	右眼	嘴巴	基础面皮
方法①	41.2	46.7	42.5	52.5	61.8
方法②	71.9	75.2	70.7	73.6	81.8
方法③	92.1	93.8	91.6	87.3	98.1

3.2 与已有方法整体对应效果比较与分析

为检验 HCRDM 方法的有效性和准确性,设计了与已有方法的对比实验. 分别采用以下4种方法建立测试数据集间的点对应关系:①文献[5]的曲率与法向加权特征匹配方法;②文献[6]的网格重采样方法;③文献[7]的相对角直方图匹配方法;④本文方法. 图11从两个不同视角给出了同一样本与模板面皮采用上述4种不同方法时的对应结果,为了便于观察只显示鼻子区域对应情况. 表3给出了实验中采用不同方法时的顶点对应准确率

$$\eta_{all} = \sum_j^k N_j^c / kN \tag{20}$$

式中: η_{all} 为整个面皮点对应的平均准确率; N 为模板面皮顶点总数; N_j^c 为模板面皮与第 j 个测试数据正确对应的顶点数. 结合图11和表3中数据可知,上述4种对应方法的准确率逐步提高. 由于噪声原因,仅根据曲率与法向来选择对应点效果较差;网格重采样从对应特征点开始,通过加密采样来实现对应,准确率显著提高,但远离特征点的顶点是根据其与邻近控制点的欧式距离来确定对应关系的,而人

脸是一个精细曲面,故误差相对也较大;文献[7]方法准确率较高,但因数据在几何特征表示精度上的限制及单纯几何特征匹配存在的抗噪性问题,导致部分点未精确对应;本文方法结合变形与相对位置几何约束,将点对应准确率提高了 10%以上。

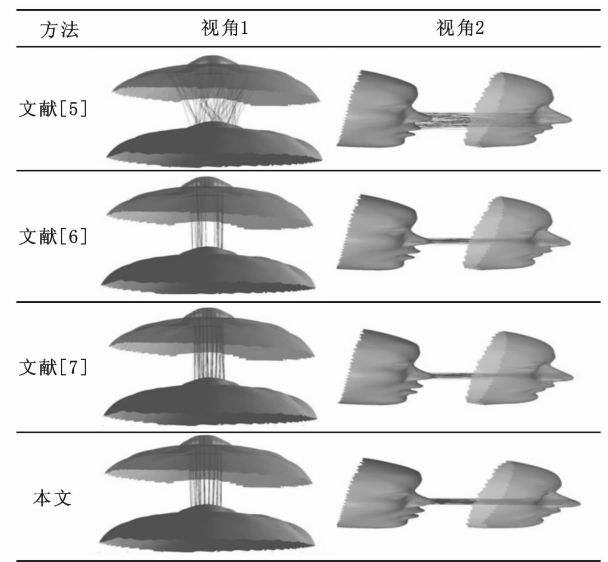


图 11 分区边界点的对应效果图

表 3 不同方法下分区点对应的准确率

	文献[5]	文献[6]	文献[7]	本文
准确率/%	51.2	76.7	84.3	94.3

3.3 方法效率分析

HCRDM 的计算时间主要耗费于 RBF 变形和网格顶点曲率估算. 分区方法避免了变形过程中大型线性方程组的求解,且 Fast Multiple Method 算法提高了变形效率,实验中分区变形一般在 3~5 s 内完成. 基于 Voronoi 的曲率计算方法运算量较大,但本文通过建立保存顶点一阶邻接关系的体素模型,实现了顶点拓扑关系的快速查找,减少了网格顶点法向和曲率的计算时间,实验中样本面皮的曲率计算时间约为 30 s,PC 配置为 P4 双核主频 2.4 GHz,内存 2 GB.

4 结 论

本文根据人脸五官形态的局部相似性,提出了 HCRDM 方法. 该方法根据几何模板对面皮进行自动分区,降低了对应的计算复杂度;对各面皮进行 RBF 分区变形,使对应分区近似重合,为提高点对应精度奠定了基础;创新性地引入顶点相对位置约

束,结合体素模型构建样本对应顶点的几何约束多面体,大大减少了候选点的数目,再根据局部微分特征加权距离确定最优对应点;返回到扩充的原始待对应来完成边界区域点的对应. 实验结果表明,本文方法提高了对应的准确率可建立具有局部生理形态几何特征一致性的三维面皮点对应关系。

参考文献:

[1] BESL P J, MCKAY N D. A method for registration of 3D shapes [J]. IEEE Transactions on PAMI, 1992, 14(2): 239-256.

[2] SALVI J, MATABOSCH C, FOFI D, et al. A review of recent range image registration methods with accuracy evaluation [J]. Image and Vision Computing, 2007, 25(5): 578-596.

[3] BRETT A D, HILL A, TAYLOR C J. A method of 3D surface correspondence and interpolation for merging shape examples [J]. Image and Vision Computing, 1999, 17(8): 635-642.

[4] DAVIES R H, TWINING C J, TAYLOR C. Group-wise surface correspondence by optimization: representation and regularization [J]. Medical Image Analysis, 2008, 12 (6):787-796.

[5] MIAN A S, BENNAMOUN M, OWENS R A, et al. Automatic correspondence for 3D modeling: an extensive review [J]. International Journal of Shape Modeling, 2005, 11(2): 253-292.

[6] HU Yongli, YIN Baocai, GU Chunliang, et al. 3D face reconstruction based on the improved morphable model [J]. Chinese Journal of Computer, 2005, 28 (10): 1671-1679.

[7] FENG Jun, IP H H S, LAI Lap Yi, 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.

[8] 李康. 基于颅骨的人脸建模技术研究及在法医面貌复原中的应用[D]. 西安:西北大学, 2006.

[9] 张彦飞. 基于分区的颅面统计重建算法研究与实现 [D]. 西安: 西北大学, 2010.

[10] MA Hongjing, FENG Jun. Three-dimensional facial feature points matching based on a combined support vector machine [C]// Proceedings of The First International Conference on Internet Multimedia Computing and Service. New York, NY, USA: ACM, 2009: 153 -158.

(编辑 武红江)