

奇和洞古人类头骨面貌的三维虚拟复原

税午阳^{1*}, 吴秀杰²

1. 北京师范大学信息科学与技术学院, 文化遗产数字化保护与虚拟现实北京市重点实验室, 北京 100875;

2. 中国科学院古脊椎动物与古人类研究所, 中国科学院脊椎动物进化与人类演化重点实验室, 北京 100044

* 联系人, E-mail: sissun@126.com

2017-12-11 收稿, 2018-01-21 修回, 2018-01-22 接受, 2018-03-13 网络版发表

中国科学院交叉创新团队(2016)、国家自然科学基金(61402042, 41630102, 41672020)和中国科学院战略性先导科技专项(XDPB05)资助

摘要 2011年福建漳平发现的距今1万年左右保存完整的“奇和洞人”头骨(附下颌骨)化石, 因兼有更新世晚期人类和全新世南、北方居民的混合体质特点而备受关注, 为探讨华南地区新石器早期人类的体质特征和人群的迁徙、扩散提供了重要的研究材料. 采用高分辨率CT对奇和洞人的头骨及下颌骨进行了扫描和三维重建, 根据其不同于现生人的超长的脑颅、较大的颅容量、高而狭窄的面部、宽阔而低矮的鼻部和长而低矮的眼眶, 提出了一种基于最小二乘回归和面貌统计形状模型约束的颅面交互复原方法, 实现了奇和洞人生前面貌的三维虚拟复原. 依据三维复原面貌并结合美工绘画技巧, 生动形象地再现新石器早期人类的脑颅及面部的形态特征. 此项技术为古人类颅面复原的研究提供了技术支持和参考资料.

关键词 奇和洞人头骨, 古人类化石, 颅面复原, 最小二乘回归, 面貌统计形状模型

颅骨面貌复原是根据人体头面部软组织分布以及颅骨与面貌五官间的形态关系, 在颅骨或颅骨的石膏模型上用可塑物质(橡皮泥、黏土、塑像蜡等)生成颅骨生前面貌的技术, 该技术已经被广泛应用于历史名人、古人类、刑事案件中受害人等面貌的复原. 传统手工颅面复原方法主要包括以软组织厚度为基础的美国方法、以肌肉结构为基础的俄罗斯方法和两者相结合的曼彻斯特方法三类^[1]. 近年来, 随着计算机断层扫描(computed tomography, CT)和磁共振成像(magnetic resonance imaging, MRI)等医学影像技术的发展, 活体人群已经被用于面部软组织的测量和分析, 为计算机辅助颅面复原技术的发展和應用提供了大量基础数据^[2~5]. 计算机图形学、机器学习等信息技术的应用为发现颅面形态关系和计算机辅助颅面复原提供了技术支持. 目前, 基于特征点的软组织厚度均值^[6]、面部稠密点的软组织厚度均值^[7]、颅骨

配准^[8]、软组织厚度均值和肌肉模型^[9]等计算机辅助颅面复原方法均已被应用于现生人的面貌复原.

我们的祖先长什么样? 如何应用颅面复原技术进行古人类头骨的面貌复原是人类学家关注的热点问题之一. 手工复原方法长期以来是古人类头骨化石颅面复原的主要技术, 我国人类学家采用此方法相继手工复原了北京猿人、蓝田猿人、马坝人、金牛山人、大荔人等古老型人类, 以及柳江人、扎赉诺尔人、丽江人等早期现代人的三维面貌, 满足了人们认识和感受远古人类面貌的需求^[10]. 然而, 手工复原方法存在复原周期长、复原结果易受复原人员主观因素和经验影响等局限. 例如, 针对周口店北京猿人的面貌复原问题, 历史上先后出现了3种面貌形态相差较大的复原头像, 包括王存义复原的中国类型面貌、魏敦瑞复原的美国类型面貌、前苏联格拉西莫夫复原的俄国人类类型面貌. 自2006年Berar等人^[11]将颅骨和

引用格式: 税午阳, 吴秀杰. 奇和洞古人类头骨面貌的三维虚拟复原. 科学通报, 2018, 63: 745–754

Shui W Y, Wu X J. Three-dimensional craniofacial reconstruction of an ancient Qihe human skull (in Chinese). Chin Sci Bull, 2018, 63: 745–754, doi: 10.1360/N972017-01295

面貌模型看作稠密对应点云开展颅面复原技术研究以来,基于机器学习的颅面复原技术逐渐成为研究热点.该方法主要是基于现生人的颅面数据库和颅面形态关系,实现现生人颅骨的面貌复原.由于古人类头骨的体质特征和现生人存在很多差异,现生人的颅面形态关系与古人颅面形态关系虽然相似但并不完全一致,使得古人类头骨的颅面复原较为困难,目前尚未出现适合古人类的计算机辅助颅面复原软件.

本文以福建漳平奇和洞出土的新石器早期头骨(附下颌骨)——“奇和洞III”号为例,根据其体质特点,提出一种基于机器学习和面貌统计形状模型约束的颅面交互复原方法,将现生人颅面形态间的定量关系用于奇和洞头骨的三维面貌复原.为了克服现生人的颅面形态与奇和洞人的颅面形态不一致的问题,本文提供了一种交互编辑工具,人类学家可以根据经验交互地修改面貌复原结果,最大程度再现奇和洞人生前的容貌,为重塑人类进化过程中面部形态特征的演化提供参考资料.

1 材料

1.1 奇和洞III号头骨三维模型

本文研究材料为2011年在福建漳平发现的较为完整的奇和洞III号头骨,距今9500年左右,来自龙岩市博物馆.标本呈黄褐色,略石化,除两侧颞骨、两侧颧突、左侧上颌体及部分基底部缺失外,其他部位保存完整.奇和洞人的年龄为35岁左右、男性,兼有新石器南、北方居民及更新世晚期人类的混合体质特征.与近代人不同的形态特征表现为:头骨较长(颅长193.6 mm)、脑量大(1650 cm^3)、面部高而狭窄、眼眶低矮、鼻部宽阔^[12].

本文使用中国科学院古脊椎动物与古人类研究所的高分辨率工业CT设备对奇和洞III号头骨进行CT扫描,扫描参数为:电压450 kV、管电流1.5 mA、扫描层间间距0.5 mm、像素间距0.2 mm.然后,采用中国科学院高能物理研究所开发的重建软件将扫描信息转换成二维影像,并应用Mimics 16.0(Leuven: Materialise NV)影像重建软件对二维CT图像进行处理和头骨3D重建,最后将重建的奇和洞III号头骨三维模型存储为.STL格式.

由于奇和洞III号头骨和下颌骨分离,颅面复原前我们首先将头骨和下颌骨三维模型导入项目组开

发的三维模型处理软件,实现奇和洞III号头骨的位置校正.其步骤是固定上颌骨三维模型的位置,交互地调整下颌骨三维模型,确保头骨处于牙齿自然咬合状态.将装配好的头骨模型调整至法兰克福坐标系,即头骨处于由左耳孔、右耳孔、左眼眶下缘点和眉心点建立的正交坐标系^[13].CT影像重建获得的头骨模型包含内部结构,会影响头骨配准的准确性,因此本文采用文献[14]中射线和三维模型求交方法计算头骨的外表面点云,并采用基于最短对角线的三角剖分算法实现外表面的三维建模.

1.2 现生人规格化颅面三维模型库

现生人颅骨和面貌间的形态关系是计算机辅助颅面复原的依据.本文在前期研究中已经基于CT影像数据建立了现生人颅骨和面貌三维模型数据库^[15].我们利用陕西中医药大学附属医院提供的多排探测器螺旋CT采集西安地区汉族成年人的头部影像数据,数据采集采用统一标准,重建厚度0.75 mm,切片层内分辨率为 512×512 ,颜色深度为16位.通过图像分割、边缘提取和轮廓跟踪、点云三角剖分等技术获得颅骨和面貌的外表面模型^[16].采用项目组研制的计算机软件在每个颅骨模型的外表面标定78个特征点,用于计算面部软组织厚度和颅面数据配准^[7,15].为了确保特征点位置的一致性和准确性,采用项目组研制的计算机软件交互地调整特征点的位置^[17].采用同样方法在颅面数据库中每个面貌模型的外表面标定特征点.

依据颅骨(面貌)特征点,采用带有尺度的最近点迭代算法和薄板样条函数实现颅骨(面貌)模型的非刚性配准^[7],采用最近点搜索算法建立颅骨(面貌)模型顶点间的稠密对应,使得颅骨(面貌)模型具有相同的顶点个数且相同序号的顶点具有近似的位置,从而建立规格化的颅面三维模型库.模型库中每个颅骨表示为 $\text{Skull} = \{p_i, i = 1, 2, 3, \dots, n\}$, $p_i = (x_i, y_i, z_i) \in \mathbb{R}^3$,对应的面貌表示为 $\text{Face} = \{q_i, i = 1, 2, 3, \dots, m\}$, $q_i = (x_i, y_i, z_i) \in \mathbb{R}^3$,其中 n 和 m 分别表示颅骨模型和面貌模型的顶点数量.

2 方法

本文提出一种基于最小二乘回归和面貌统计形状模型约束的颅面交互复原方法,实现了奇和洞III号头骨的三维面貌复原.该方法将现生人颅面数据

库中的稠密点云作为研究对象,采用最小二乘回归方法计算和表示颅面形态关系,进而将该关系应用到奇和洞头骨实现面貌的初步复原.为了克服奇和洞人的颅面形态和颅面数据库中现生人颅面形态不一致的问题,提出了一种基于面貌统计形状模型约束的面貌形状交互编辑方法,人类学家依据经验交互地修改面貌主成分的系数从而实现复原面貌形状的编辑.与仅依靠现生人的面部软组织平均厚度的复原方法相比,本文方法能将人类学家的体质人类学知识融入面貌复原,复原结果更合理.

2.1 基于最小二乘回归的颅面形态关系表示

本文首先采用文献[18]的方法将颅面数据库中的颅骨模型和面貌模型归一化,并将其以向量形式表示为 $\mathbf{SkullVector} = \{[x_{i,1}^{\text{skull}}, y_{i,1}^{\text{skull}}, z_{i,1}^{\text{skull}}, \dots, x_{i,n}^{\text{skull}}, y_{i,n}^{\text{skull}}, z_{i,n}^{\text{skull}}]^T, i=1,2,3,\dots,N\}$ 和 $\mathbf{FaceVector} = \{[x_{i,1}^{\text{Face}}, y_{i,1}^{\text{Face}}, z_{i,1}^{\text{Face}}, \dots, x_{i,m}^{\text{Face}}, y_{i,m}^{\text{Face}}, z_{i,m}^{\text{Face}}]^T, i=1,2,3,\dots,N\}$, N 表示样本个数.然后,采用文献[19]的方法用主成分系数 $\alpha = [\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_d]$ 表示每个颅骨模型,用主成分系数 $b = [b_1, b_2, \dots, b_f]$ 表示每个面貌模型,则颅面数据库中的颅骨和面貌可分别表示为 $\mathbf{SkullCoeff} = [\alpha_{1,d}, \alpha_{2,d}, \dots, \alpha_{N,d}]$ 和 $\mathbf{FaceCoeff} = [b_{1,f}, b_{2,f}, \dots, b_{N,f}]$.则颅骨和面貌间的形态关系 M 为

$$M = \arg \min \|\mathbf{SkullCoeff} \times M - \mathbf{FaceCoeff}\|^2 + \lambda^2 \|M\|^2. \quad (1)$$

采用最小二乘回归方法计算颅面形态关系 M :

$$M = (\mathbf{SkullCoeff}^T \times \mathbf{SkullCoeff} + \lambda I)^{-1} \times \mathbf{SkullCoeff}^T \times \mathbf{FaceCoeff}, \quad (2)$$

其中 I 为单位矩阵.

2.2 奇和洞III号的面貌复原

定义奇和洞III号头骨的特征点为 $\mathbf{targetMarks} = \{\mathbf{targetMark}_i, i=1,2,3,\dots,k\}$, 颅面数据库中颅骨平均模型的特征点为 $\mathbf{averMarks} = \{\mathbf{averMark}_i, i=1,2,3,\dots,k\}$, 采用文献[7]的方法建立两个颅骨模型顶点间的稠密对应,则经归一化的奇和洞III号头骨可表示为 $\mathbf{QSkullVector} = [x_1^{\text{skull}}, y_1^{\text{skull}}, z_1^{\text{skull}}, \dots, x_n^{\text{skull}}, y_n^{\text{skull}}, z_n^{\text{skull}}]^T$, 采用文献[19]的主成分分析方法计算奇和洞III号头骨的主成分系数 $\mathbf{Qskull}\alpha$. 则奇和洞III号头骨对应面貌模型的主成分系数 $\mathbf{Qfaceb}$ 为

$$\mathbf{Qfaceb} = \mathbf{Qskull}\alpha \times M, \quad (3)$$

其中, $\mathbf{Qfaceb} = [\mathbf{Qfaceb}_1, \mathbf{Qfaceb}_2, \dots, \mathbf{Qfaceb}_f]$.

奇和洞III号头骨的面貌复原结果 $\mathbf{FaceVector}$ 为

$$\mathbf{FaceVector}(\mathbf{Qfaceb}) = \overline{\mathbf{FaceVector}} + \sum_{i=1}^f \mathbf{Qfaceb}_i \mathbf{w}_i, \quad (4)$$

其中, $\overline{\mathbf{FaceVector}}$ 表示平均面貌模型, $\mathbf{w} = [\mathbf{w}_1, \mathbf{w}_2, \dots, \mathbf{w}_f] \in \mathbb{R}^{3 \times m \times f}$ 表示颅面数据库中面貌模型组成的协方差矩阵对应的特征向量, f 表示主成分个数,其值将由贡献率决定.

2.3 复原面貌形状编辑

统计形状模型(statistical shape model)能够从大样本数据中发现样本间的共性和差异,已被用于三维人脸模型的形状分析^[20].因此,本文针对归一化的面貌稠密点云,采用文献[19]的方法建立现生人男性面貌的统计形状模型,分析主成分与面貌几何形状间的关系.依据人类学家的经验并结合主成分与面貌几何形状间的关系,通过修改主成分对应的系数 $\varphi = [\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_f]$, 实现奇和洞III号头骨复原面貌的交互编辑:

$$\mathbf{FaceNew}(\varphi) = \overline{\mathbf{FaceVector}} + \sum_{i=1}^f \varphi_i \mathbf{w}_i. \quad (5)$$

3 结果

3.1 奇和洞III号头骨模型处理

基于CT影像重建获得奇和洞III号头骨的三维模型(图1(a)).重新装配头骨三维模型并将其调整至法兰克福坐标系下(图1(b)).采用射线与三角片求交算法计算头骨的外表面点云,经过点云三角剖分重建头骨的三维模型(图1(c)),该模型将用于颅面复原.由于奇和洞III号头骨化石两侧的牙齿不全,在该区域难以标定特征点,因此本文结合文献[15]给出的颅骨特征点的定义标准,共标定69个特征点(图1(d)).

3.2 奇和洞III号头骨的面貌复原

将奇和洞III号头骨模型与现生人颅面数据库中平均颅骨模型配准,建立奇和洞III号头骨和现生人颅骨点云之间的稠密对应关系.配准点集对应的准确性将影响颅骨模型配准的质量和点云稠密对应的精确度,因此在文献[21]将颅骨特征点和采样点作为配准点的基础上,本文计算了配准后的奇和洞III号头骨和平均颅骨模型间的距离差,并在误差较大的

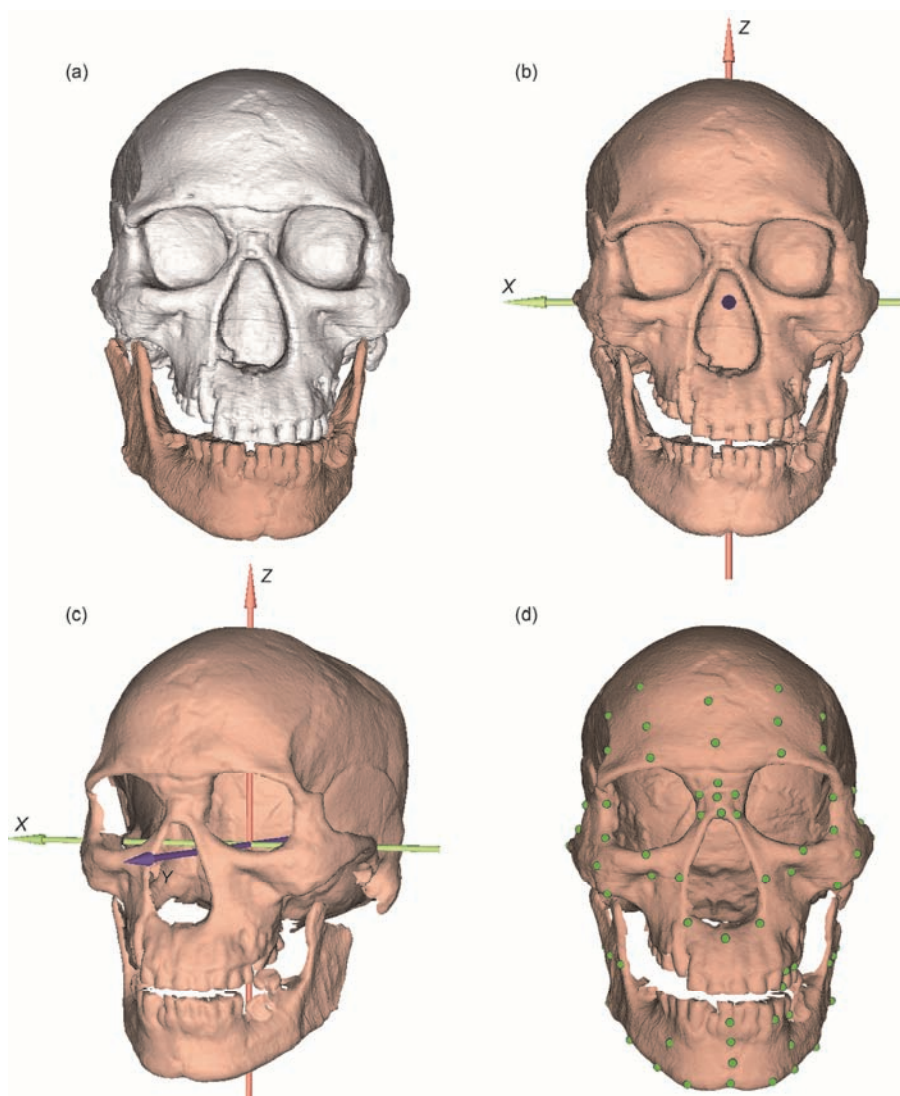


图1 (网络版彩色)奇和洞III号头骨模型处理。(a) CT重建头骨模型;(b) 下颌骨模型的位置调整和法兰克福坐标校正;(c) 头骨外表面三维模型;(d) 69个特征点

Figure 1 (Color online) Digital model processing of the Qihe skull. (a) Digital model reconstruction by CT images; (b) the mandible was interactively transformed and located in the Frankfurt coordinate system; (c) the outlayer model extraction; (d) a total of 69 landmarks

区域重采样,使得配准点集分布尽可能均匀且能够覆盖形状差异大的区域,提高颅骨模型配准的准确性。将奇和洞III号头骨模型和平均颅骨模型放置在统一的坐标系(图2(a));依据奇和洞III号头骨模型和现生人平均颅骨模型标定的69个特征点,实现两个颅骨的刚性配准(图2(b))和非刚性配准(图2(c))。由于奇和洞III号头骨两侧的茶齿不完整,使得在牙齿及周围区域的配准误差较大(图2(d))。

针对现生人颅面数据库中的颅骨和面貌模型,采用最小二乘回归定量计算颅骨主成分系数和面貌主成分系数间的关系 M ,依据该关系计算复原面貌

每个主成分的系数,实现奇和洞III号头骨面貌的初步复原(图3(a))。将奇和洞III号头骨及其初步复原面貌进行了比较(图3(b))。图3(c)为采用文献[21]的方法将颅面数据库中20~30岁年龄段男性的平均软组织厚度用于奇和洞III号头骨的面貌复原,图3(d)为将30~40岁年龄段男性的平均软组织厚度用于奇和洞III号头骨的面貌复原。

3.3 面貌复原结果交互编辑

针对归一化的男性面貌稠密点云建立统计形状模型,采用文献[19]的方法分析其主成分与面貌几何

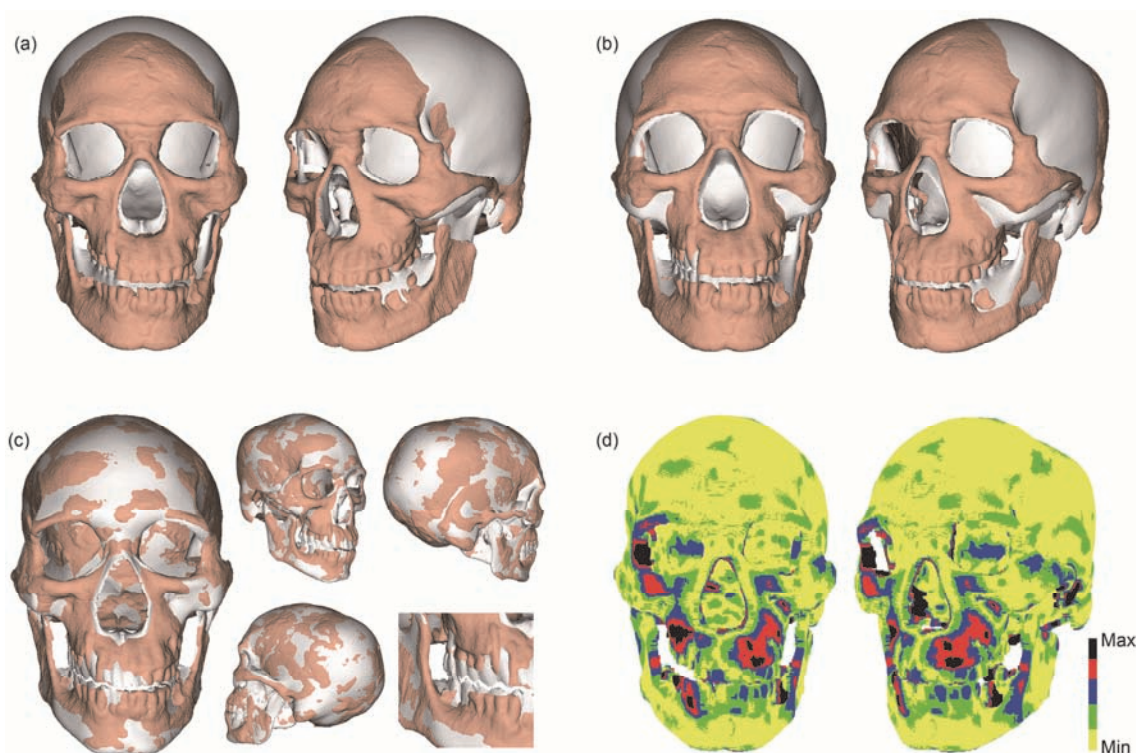


图2 奇和洞III号头骨与平均颅骨模型的配准。(a) 奇和洞III号头骨模型和平均颅骨模型初始位置;(b) 两个颅骨刚性配准结果;(c) 两个颅骨非刚性配准结果;(d) 两个颅骨的配准误差

Figure 2 Registration between Qihe skull and the average skull of recent human. (a) Two skulls located in the common system; (b) rigid registration between two skulls; (c) non-rigid registration between two skulls; (d) registration errors between two skulls

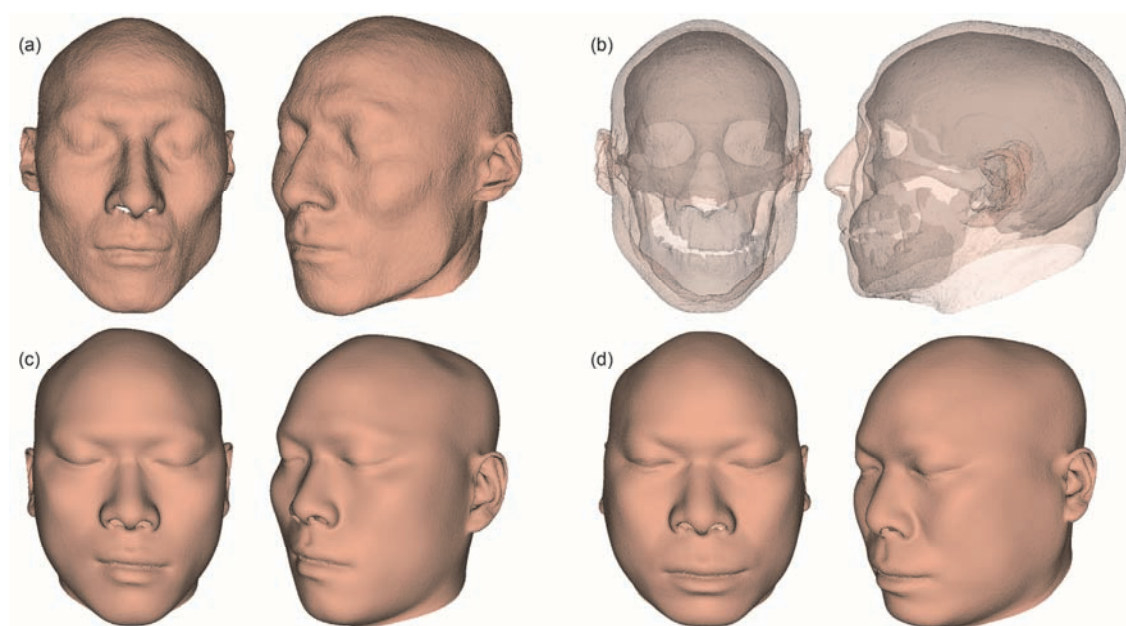


图3 奇和洞III号头骨的面貌复原。(a) 基于最小二乘回归的面貌复原结果;(b) 头骨和面貌复原模型在同一坐标系中显示;(c) 基于现生人20~30岁的平均软组织厚度的面貌复原结果;(d) 基于现生人30~40岁的平均软组织厚度的面貌复原结果

Figure 3 Three-dimensional craniofacial reconstruction of the Qihe skull. (a) Craniofacial reconstruction using least square regression; (b) the estimated facial appearance and Qihe skull located in the common system; (c) craniofacial reconstruction using the average facial soft-tissue thickness aging 20–30 years; (d) craniofacial reconstruction using the average facial soft-tissue thickness aging 30–40 years

表 1 男性面貌统计形状模型的主成分与面貌模型几何形状的关系

Table 1 The relationship between geometric shape of facial appearance and principal component of male facial statistical shape model

主成分	贡献率(%)	面貌几何模型
PC1	35.6	嘴、脸颊变宽; 鼻变宽、变短; 额头变窄; 下颌变宽、变短; 脖子变粗
PC2	14.6	嘴、鼻、眼睛变宽; 脸颊变宽、变短; 下颌变宽、变短; 额头变宽、变长
PC3	11.7	嘴、下颌变宽; 下颌变宽; 鼻前凸、变宽; 额头变窄、变长; 脸颊变长、变宽
PC4	6.6	嘴变窄; 眼睛高度变窄、长度变宽; 鼻变短; 额头变宽、变长; 脸颊变窄; 下颌变宽、变短
PC5	4.8	嘴、鼻、额头变窄; 眼睛高度变长、宽度变窄; 额头变短、变宽; 脸颊变窄; 下巴变长、变窄
PC6	3.5	嘴变窄、变凹; 眼睛收缩变凹; 鼻变短、变凹; 额头、脸颊、下颌变宽
PC7	3.3	嘴变宽; 鼻变短; 眼睛高度变短、宽度变长; 面部中间1/3和下部1/3变短
PC8	2.6	嘴、鼻、脸颊变宽; 面貌中间1/3和下部1/3变宽、变长
PC9	2.0	嘴、鼻、下颌变宽; 额头变长、变窄; 下颌变短
PC10	1.6	嘴、鼻变窄; 额头变宽
PC11	1.4	面部收缩变凹, 特别是鼻、嘴、下颌
PC12	1.2	面部向外变凸, 特别是鼻、嘴、下颌

形状的关系. 表1给出了男性面貌统计形状模型中每个主成分的贡献率及其随权值增加时主成分与面貌几何形状的关系. 通过修改主成分对应的系数, 实现面貌复原结果的交互编辑. 图4(a)给出了初步复原面

貌 **FaceVector(Qfaceb)** (第1行)和交互编辑复原面貌 **FaceNew(ϕ)** 的几何差异(第2和3行), 即分别修改前12个主成分的系数实现复原结果的交互编辑, 其中第*i*个主成分的系数为 $\phi_i = Qfaceb_i + 3 \times \delta_i$ (δ_i 表示第*i*

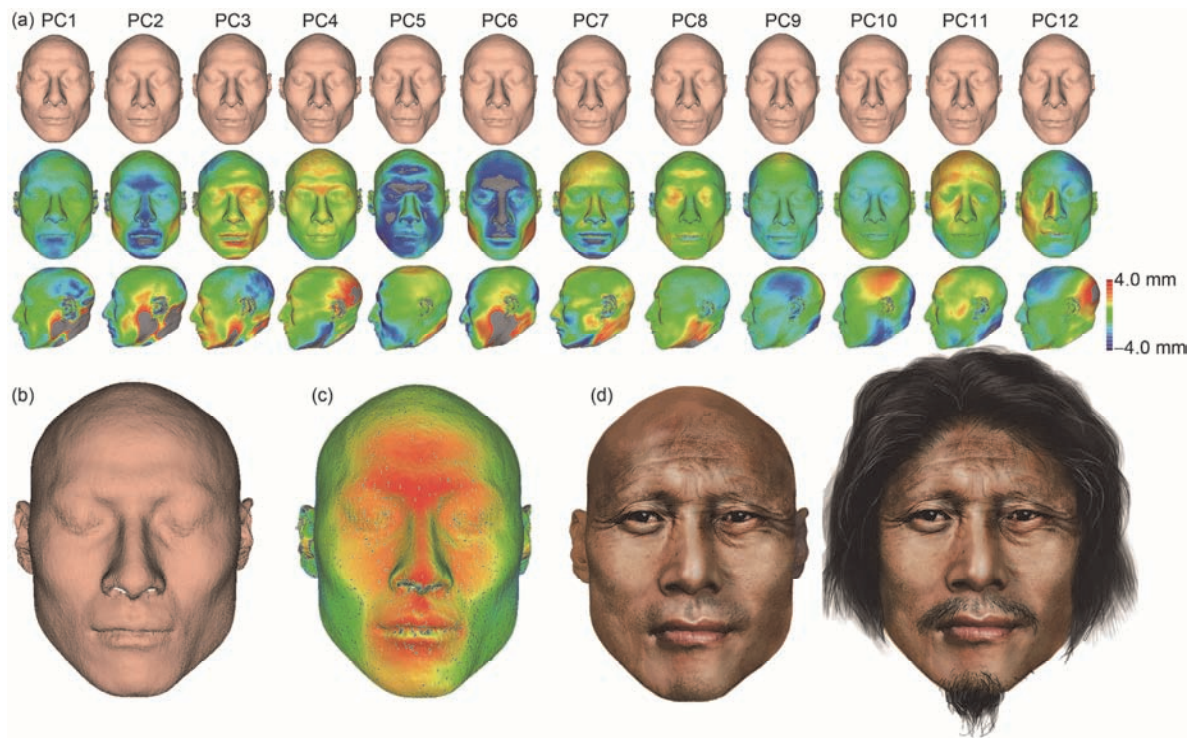


图 4 奇和洞III号头骨的面貌交互复原结果. (a) 基于面貌统计形状模型的复原面貌的交互编辑; (b) 修改第 2、5 和 6 主成分的系数实现三维面貌编辑; (c) 初始复原面貌和交互编辑的复原面貌间的几何形状差异; (d) 复原面貌的真实感处理结果

Figure 4 Interactive craniofacial reconstruction of Qihe skull. (a) Facial shape interactive edit based on facial statistical shape model. Top row images show the geometric shape of estimated facial appearance by adjusting the coefficient of each principal component. The second and third row image show the geometric shape errors between initial estimated facial appearance and interactive result. (b) The interactively estimated facial appearance by adjusting coefficients of the second, fifth and sixth principal component. (c) Geometric shape difference between initial estimated appearance and appearance after interactive edit. (d) The final estimated appearance of Qihe skull after realistic processing

个主成分的标准差), 且其余11个主成分的系数不变。

人类学家根据经验修改复原面貌每个主成分的系数, 从而将体质人类学和计算机获得的面貌形状融入颅面复原。图4(b)为人类学家修改第2、5和6主成分的系数, 实现颅面模型在额头、面颊、嘴、下巴等区域的形状编辑。图4(c)为奇和洞头骨的初步面貌复原结果与交互编辑的复原结果的几何差异, 平均误差为1.5 mm, 标准差为0.89 mm。图4(d)为根据三维复原面貌, 经过手工绘画方式添加头发、胡须、眉毛、眼睛等真实感处理后, 获得奇和洞III号头骨最终的面貌复原结果。与现生人的面貌相比较, 奇和洞III号头骨的复原面貌在矢状面方向偏长、面部颧骨区域大而突出、上面部扁平、脸颊瘦而窄、头部偏大。

4 讨论

奇和洞人生活在新石器时代的早期, 其头骨具有晚更新世晚期向全新世过渡阶段的特点, 以往用于现生人的颅面复原方法并不能完全照搬应用在古人类头骨的面貌复原。因此文本提出一种基于最小二乘回归和面貌统计形状模型约束的颅面交互复原方法。

4.1 手工复原和计算机辅助颅面复原

长期以来手工雕塑复原一直是古人类头骨化石颅面复原的主要技术, 复原人员需要具备人类学知识和雕塑技艺, 而目前我国仅有少数专家能够完成, 制约了该技术在古人类领域的推广和应用。此外, 由于缺乏古人类的软组织厚度和肌肉结构等数据, 使得古人类头骨复原中仅能依靠复原人员的经验和人类学知识, 复原过程周期长、复原结果主观性强。计算机辅助颅面复原技术具有复原速度快、复原结果客观等优势。本文通过计算机软件将现生人的颅面形态关系应用于奇和洞头骨三维面貌的初步复原, 保证复原结果的客观性; 虽然奇和洞人颅面形态关系和现生人的颅面形态关系近似, 但并不一致, 本文提供了一种针对初步复原面貌的交互编辑工具, 人类学家可以根据经验和人类学知识快速生成多个三维复原面貌, 并从中选出最合适的面貌作为颅面复原结果。最终, 结合美工绘画技巧生动形象地再现了奇和洞头骨的生前容貌。

4.2 奇和洞III号头骨的面貌复原方法分析

目前国外学者已经利用计算机辅助颅面貌复原

技术开展了历史名人的面貌复原研究, 其大多仍采用三维建模软件和解剖学知识进行复原^[22,23]。该方法主要步骤如下: (1) 将待复原颅骨三维模型导入虚拟雕刻建模软件; (2) 在颅骨特征点处放置虚拟的小柱子模拟软组织厚度; (3) 从肌肉模型库中选择肌肉模型并调整其位置和尺寸; (4) 从眼睛、耳朵、鼻子模型库中选择合适的五官模型并放置在相应位置; (5) 在肌肉模型表面添加皮肤并进一步对细节特征进行雕刻从而完成面貌复原^[9]。然而, 该方法需要预先提供五官模型、肌肉模型、软组织厚度等基础数据, 同时要求复原人员具备熟练的三维建模技术和人类学知识。

基于软组织分布的颅面复原方法是将参考数据的面部软组织分布作为待复原颅骨的软组织分布从而实现面貌^[5,6,15,24]。该方法首先统计不同年龄、性别、种族的少量面部特征点处的软组织厚度均值, 然后将其作为待复原颅骨对应特征点处的软组织厚度, 从而通过插值或蒙皮技术实现颅面复原, 其局限性在于定义的特征点数量有限且缺乏统一标准。为了克服该问题, 国内外学者提出了基于颅骨配准的颅面复原技术^[8,16,21,25]。该方法首先从颅面三维数据库中选择合适的颅骨和面貌模型作为参考颅骨和参考面貌, 然后依据颅骨特征点或脊线等信息采用非刚性变形方法将参考颅骨向待复原颅骨进行几何变形, 最后将该变换应用于参考面貌模型实现颅面复原。参考面貌的选择将影响复原结果, 图3给出了采用不同软组织分布获得的复原结果。由于面部软组织厚度分布受到年龄、性别、营养、种族、地域等多种因素的影响^[7,26], 因此很难选择合适的软组织均值用于奇和洞III号头骨的面貌复原。

由于能够从大样本的颅骨模型和面貌模型中学习颅骨和面貌几何形态间的相互关系, 基于机器学习的颅面复原方法能够获得更准确的面貌复原结果。颅骨和面貌模型由数十万个点云表示, 增加了计算的复杂度。因此主成分分析方法被用于数据降维, 降维后的主成分系数被用于表示颅骨和面貌。随后, 线性回归^[27]、特征根回归^[28]、偏最小二乘回归^[29,30]等机器学习方法用于定量表示颅面形态关系。本文采用最小二乘回归方法计算了男性颅骨和面貌间的形态关系, 最终实现面貌的初步复原。从复原结果可以发现复原面貌的基本形状与奇和洞III号头骨的几何形状基本一致。

4.3 复原面貌的交互编辑

奇和洞头骨与现生人颅骨几何形状存在差异, 奇和洞人的颅面形态与现生人的颅面形态关系并不完全一致, 因此由人类学家依据经验对复原面貌进行交互编辑, 将提高颅面复原结果的准确性. 虽然自由变形^[31]、样条^[32]、保刚性变形^[33]等编辑方法已被用于交互编辑, 但并未考虑面貌形状分布的约束. 近年来, 主成分分析方法已被用于面貌形状分析, 文献[34,35]针对56个面貌特征点采用主成分分析方法分析主成分和面貌几何形状的关系, 然而该方法仅用到少量特征点描述面貌几何形状, 难以精确描述几何形状的变化. 文献[19]针对非归一化的头部稠密点云建立了统计形状模型, 分析了每个主成分与面貌几何形状的关系.

本文针对归一化的男性头部稠密点云建立了统计形状模型, 分析了每个主成分与面貌几何形状的关系. 针对最小二乘回归获得的面貌初步复原结果, 分析了主成分对复原结果的影响, 使得面貌统计形状模型的主成分具有了几何意义, 在面貌形状的约束下通过修改主成分系数将人类学家的经验映射到面貌模型的形状变化, 获得了更符合人类学经验的面貌复原结果. 与文献[31~33]相比较, 本文方法将交互编辑和面貌统计形状模型相结合, 编辑结果更

符合人脸形状分布. 此外, 也可以建立古人类面貌的五官模型数据库, 从而采用文献[7,21]中五官的配准和融合方法提高古人类头骨面貌复原的准确性.

5 结语

本文标本(奇和洞III号头骨)从数据上看是一例尺寸很大的男性个体, 尤其是上面高、鼻高等值呈现出很极端的性质, 其体质特征虽然未必具有群体的代表性, 但却可以显示出新旧石器过渡阶段人类头骨的变异程度非常大. 本文针对奇和洞III号头骨的面貌复原问题, 提出一种基于机器学习的颅面复原和面貌统计形状模型约束的交互编辑方法. 从面貌复原结果可知, 复原面貌在矢状面方向偏长、面部颧骨区域大而突出、上面部扁平、脸颊瘦而窄、头部偏大, 与奇和洞头骨的形状基本一致. 依据三维复原面貌并结合美工绘画技巧, 本文生动形象地再现了新石器早期人类的脑颅及面部的形态特征, 为古人类颅面复原的研究提供了技术支持和参考资料. 本文方法可推广应用于其他古人类头骨的面貌复原, 但对于猿人等早期人类的头骨化石, 由于其颅面形态与现生人的颅面形态关系差异非常大, 本文方法仍需根据实际情况进一步改进.

致谢 本文研究过程中与北京师范大学周明全教授和邓擎琼博士、中国科学院古脊椎动物与古人类研究所刘武研究员进行了有益的讨论, 中国科学院古脊椎动物与古人类研究所侯叶茂在奇和洞头骨的三维建模中提供了帮助, 作者表示衷心感谢.

参考文献

- 1 Wilkinson C M. Forensic Facial Reconstruction. Cambridge: Cambridge University Press, 2004
- 2 Shui W Y, Zhou M Q, Chen S, et al. The production of digital and printed resources from multiple modalities using visualization and three-dimensional printing techniques. *Int J Comput Ass Rad*, 2017, 12: 13–23
- 3 Lee W J, Wilkinson C M, Hwang H S. An accuracy assessment of forensic computerized facial reconstruction employing cone-beam computed tomography from live subjects. *J Forensic Sci*, 2012, 57: 318–327
- 4 Sipahioglu S, Ulubay H, Diren H B. Midline facial soft tissue thickness database of Turkish population: MRI study. *Forensic Sci Int*, 2012, 219: 282.e1–282.e8
- 5 Guyomarc'h P, Santos F, Dutailly B, et al. Facial soft tissue depths in French adults: Variability, specificity and estimation. *Forensic Sci Int*, 2013, 231: 411.e1–411.e10
- 6 Archer K M. Craniofacial reconstruction using hierarchical B-spline interpolation. Master Dissertation. Vancouver: University of British Columbia, 1997
- 7 Shui W Y, Zhou M Q, Deng Q Q, et al. Densely calculated facial soft tissue thickness for craniofacial reconstruction in Chinese adults. *Forensic Sci Int*, 2016, 266: 573.e1–573.e12
- 8 Turner W, Brown R, Kelliher T, et al. A novel method of automated skull registration for forensic facial approximation. *Forensic Sci Int*, 2005, 154: 149–158

- 9 Wilkinson C M, Rynn C, Peters H, et al. A blind accuracy assessment of computer-modeled forensic facial reconstruction using computed tomography data from live subjects. *Forensic Sci Med Pat*, 2006, 2: 179–187
- 10 Zhang J J. Craniofacial reconstruction for Ancient skull of China (in Chinese). *China Nat*, 2011, 1: 24–26 [张建军. 谈谈我国古人类化石面貌复原像. *大自然*, 2011, 1: 24–26]
- 11 Berar M, Desvignes M, Bailly G, et al. 3D semi-landmarks based statistical face reconstruction. *J Comput Inform Tech*, 2006, 14: 31–43
- 12 Wu X J, Fan X C, Li S M, et al. The early Neolithic human skull from the Qihe Cave, Zhangping, Fujian (in Chinese). *Acta Anthropol Sin*, 2014, 33: 448–459 [吴秀杰, 范雪春, 李史明, 等. 福建漳平奇和洞发现的新石器时代早期人类头骨. *人类学学报*, 2014, 33: 448–459]
- 13 Decker S, Ford J, Davy-Jow S, et al. Who is this person? A comparison study of current three-dimensional facial approximation methods. *Forensic Sci Int*, 2013, 229: 161.e1–161.e8
- 14 Shui W Y. Craniofacial reconstruction and its application (in Chinese). Doctor Dissertation. Beijing: Beijing Normal University, 2011 [税午阳. 颅面形态研究及应用. 博士学位论文. 北京: 北京师范大学, 2011]
- 15 Shui W Y, Zhou M Q, Ji Y, et al. Facial soft tissue thickness measurement and its application in craniofacial reconstruction (in Chinese). *Acta Anthropol Sin*, 2013, 32: 345–353 [税午阳, 周明全, 纪元, 等. 面部软组织厚度测量及其在面貌复原中的应用. *人类学学报*, 2013, 32: 345–353]
- 16 Deng Q Q, Zhou M Q, Shui W Y, et al. A novel skull registration based on global and local deformations for craniofacial reconstruction. *Forensic Sci Int*, 2011, 208: 95–102
- 17 Shui W Y, Zhou M Q, Wu Z K, et al. An improved algorithm for craniofacial reconstruction based on landmarks registration. In: *Proceedings of the International Conference on Computer Application and System Modeling*. Piscataway: IEEE Computer Society, 2010. 498–502
- 18 Patel A, Smith W A P. 3D morphable face models revisited. In: *Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition workshops*. Piscataway: IEEE Computer Society, 2009. 1327–1334
- 19 Shui W Y, Zhou M Q, Maddock S, et al. A PCA-based method for determining craniofacial relationship and sexual dimorphism of facial shapes. *Comput Biol Med*, 2017, 90: 33–49
- 20 Brunton A, Salazar A, Bolkart T, et al. Review of statistical shape spaces for 3D data with comparative analysis for human faces. *Comput Vis Image Und*, 2014, 128: 1–17
- 21 Shui W Y, Zhou M Q, Wu Z K, et al. An approach of craniofacial reconstruction based on registration (in Chinese). *J Comput-Aid Design Comput Graph*, 2011, 23: 607–614 [税午阳, 周明全, 武仲科, 等. 数据配准的颅骨面貌复原方法. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2011, 23: 607–614]
- 22 Wilkinson C M. Facial reconstruction—Anatomical art or artistic anatomy? *J Anat*, 2010, 216: 235–250
- 23 Lee W J, Yoon A Y, Mi K S, et al. The archaeological contribution of forensic craniofacial reconstruction to a portrait drawing of a Korean historical figure. *J Archaeol Sci*, 2014, 49: 228–236
- 24 Vanezis P, Blowes R, Linney A, et al. Application of 3D computer graphics for facial reconstruction and comparison with sculpting techniques. *Forensic Sci Int*, 1989, 42: 69–84
- 25 Quatrehomme G, Cotin S, Subsol G, et al. A fully three-dimensional method for facial reconstruction based on deformable models. *J Forensic Sci*, 1997, 42: 649–652
- 26 Dong Y, Huang L, Feng Z, et al. Influence of sex and body mass index on facial soft tissue thickness measurements of the northern Chinese adult population. *Forensic Sci Int*, 2012, 2223: 396.e1–396.e7
- 27 Paysan P, Lüthi M, Albrecht T, et al. Face Reconstruction from Skull Shapes and Physical Attributes. *Lecture Notes in Computer Science, Pattern Recognition*. Berlin: Springer Verlag, 2009. 232–241
- 28 Berar M, Tilotta F M, Glaunès J A, et al. Craniofacial reconstruction as a prediction problem using a Latent Root Regression model. *Forensic Sci Int*, 2011, 210: 228–236
- 29 Duan F Q, Huang D H, Tian Y, et al. 3D face reconstruction from skull by regression modeling in shape parameter spaces. *Neurocomputing*, 2015, 151: 674–682
- 30 Deng Q Q, Zhou M Q, Wu Z K, et al. A regional method for craniofacial reconstruction based on coordinate adjustments and a new fusion strategy. *Forensic Sci Int*, 2016, 259: 19–31
- 31 Sederberg T W, Parry S R. Free-form deformation of solid geometric models. In: *Proceedings of the 13th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*. New York: Association for Computing Machinery, 1986. 151–160
- 32 Cui Y, Feng J. Real-time B-spline free-form deformation via GPU acceleration. *Comput Graph-UK*, 2013, 37: 1–11
- 33 Igarashi T, Moscovich T, Hughes J F. As-rigid-as-possible shape manipulation. *ACM T Graphic*, 2006, 24: 1134–1141
- 34 Chakravarty M M, Aleong R, Leonard G, et al. Automated analysis of craniofacial morphology using magnetic resonance images. *PLoS One*, 2011, 6: e20241
- 35 Marečková K, Chakravarty M M, Huang M, et al. Does skull shape mediate the relationship between objective features and subjective impressions about the face? *Neuroimage*, 2013, 79: 234–240

Summary for “奇和洞古人类头骨面貌的三维虚拟复原”

Three-dimensional craniofacial reconstruction of an ancient Qihe human skull

Wuyang Shui^{1*} & Xiujie Wu²

¹Beijing Key Laboratory of Digital Preservation and Virtual Reality for Cultural Heritage, College of Information Science and Technology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

²Key Laboratory of Vertebrate Evolution and Human Origins, Institute of Vertebrate Paleontology and Paleoanthropology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100044, China

* Corresponding author, E-mail: sissun@126.com

In 2011, a Qihe human skull with the mandible, dating to about 10000 years ago, was found in Zhangping, Fujian Province. The skull exhibits mixed physical characteristics of both Neolithic Southern and Neolithic Northern populations, together with some primitive traits of Late Pleistocene human fossils; therefore, it has become one of the most important materials to investigate Neolithic southern human physical characteristics and migration in the Late Pleistocene to Holocene transition. There are significant morphological differences between the Qihe and recent humans; for example, the Qihe skull has a long cranial vault, a larger cranial cavity, a higher and narrower face, a wider and shorter nose bone, and lower orbits. In this paper, we propose a novel method to generate the 3D facial appearance of the Qihe human skull based on the craniofacial morphology relationship of recent human and anthropologist's findings. Our method consisted of three steps. (1) High-resolution computed tomography (CT) was used to acquire series of images, and commercial software Mimics 16.0 was used to create the digital model of the Qihe skull. Because Qihe skull had been divided into the maxilla and mandible, we interactively reassembled these two parts and transformed the whole skull into a standardized Frankfurt Horizontal coordinate system. After exterior point clouds of Qihe skull were extracted, the Iterative Closest Point (ICP) algorithm and generic thin-plate spline (TPS) non-rigid algorithm were used to alignment the Qihe skull with one average skull from the recent human database. The dense corresponding point clouds of the Qihe skull were used to perform the craniofacial reconstruction. (2) We then applied principal component analysis (PCA) to reduce data dimensions and to calculate parameters of the skull and face of each sample in the recent human database. Least square regression was used to quantitatively represent the craniofacial morphology of the recent human. Then, the parameters of Qihe skull were input to predict three-dimensional facial appearance. Facial generation face of this step was found to be consistent and objective. (3) Because craniofacial morphology of the Qihe and recent human was similar but inconsistent, we developed an easy-to-use interactive tool to edit the facial appearance based on statistical shape model and an anthropologist's findings. PCA was again used to construct a facial statistical shape model based on the dense corresponding point clouds. Variations in these point clouds, which were captured in every principal component (PC), were analyzed to observe shape variability. We changed the coefficients of corresponding PCs to produce multiple facial appearances and choose the best three-dimensional facial appearance. Finally, the geometric shape of the neurocranium and facial morphological characters of the Neolithic human were vividly shown in a handmade drawing. In comparison to manual craniofacial reconstruction, our method is faster, easier, and more efficient for producing facial appearance of Qihe skull via craniofacial morphology and anthropologist's finds. Using the proposed method, the facial appearance of Qihe skull is displayed. Furthermore, our method provides efficient technical support and references for craniofacial reconstruction of ancient human skulls, which may further be applicable for other fossils and skeletons.

Qihe skull, human fossil, craniofacial reconstruction, least square regression, facial statistical shape model

doi: 10.1360/N972017-01295