

基于分区和凸包的3维相貌复原

李一波 刘敏 王庆军 姬晓飞

(沈阳航空工业学院, 沈阳 110034)

摘要 依据残缺不全的受害人颅骨来实现受害人3维相貌复原是刑事侦察的关键的第1步。为了真实重现受害人的3维容颜,提出了一种基于螺旋CT的3维颅骨重建影像的3维凸包软组织厚度计算方法。该方法首先通过做实验人螺旋CT,建立分民族、年龄段的统计意义上的中性人软组织厚度数据库;最后提出了基于分区和凸包的3维相貌复原重建方案。经有关部门试用和实际重建效果分析,证明该方案和软组织获取方案是有效和可行的,并达到了预期效果。该方法与已有方法相比,具有客观、快速的优点。

关键词 颅像 复原 3维重建 分区 凸包

中图分类号: TP391.41 **文献标识码**: A **文章编号**: 1006-8961(2005)07-0862-05

3D Facial Reconstruction Based on Subarea and Convhull

LI Yi-bo, LIU Min, WANG Qing-jun, JI Xiao-fei

(Shenyang Institute of Aeronautical Engineering, Shenyang 110034)

Abstract Based on the half-baked skull of the victim, it is most important for criminal reconnaissance to reconstruct the victim's 3D appearance. In order to reconstruct 3D appearance truly, a new method of calculating parenchyma thickness is put forward in this paper. It is mainly based on convhull method with spire CT. We can establish a statistical neutral parenchyma thickness database by nation, age phase and so on. At last, we bring forward a proposal of the 3D facial reconstruction relying on subarea and convhull. Testing by the correlative department and the analysis of the reconstructing effect, it is proved to be effective and feasible, and we have acquired the anticipative effect. This method is more objective and faster than the other existing methods.

Keyword cranialface, 3D reconstruction, subarea, convhull

1 引言

CT技术可以对不同密度的材料进行更好的识别,因此能提供软组织和骨骼的大量信息。自从20世纪80年代中期以来,由于计算机技术的新发展,使计算机能显示出3维空间的纵向CT图像。这项产生于医学临床应用,在帮助制定外科手术计划上飞速发展的新技术,很快被推广至木乃伊检测和颅骨成像的领域。在最近几年,螺旋CT技术显著提高了临床图像清晰度。这项新技术的使用与广泛普及,为受害人寻找、尸源鉴定提供了新的技术手段。

受害人寻找、识别是刑事侦察的第1步,也是至关重要的一步。由于尸体的高度易腐烂性,通常情况下,受害人被发现时,只能找到其部分或残缺的骨骼,如何有效地开展刑事侦察,受害人寻找和尸源鉴定已成为侦察工作能否顺利开展的前提和条件。从发现受害人颅骨开始就标志着刑事侦察程序的启动,其第1步就是由受害人颅骨重建复原3维容颜,先进行多角度2维投影,以形成多角度受害人图片,再通过多种媒介寻找可能受害人,最后通过2维鉴定技术确定受害人,因此,3维相貌复原重建技术研究得到了广泛的重视。

所谓相貌复原法,是在一个没有任何生前资料

收稿日期:2004-10-14;改回日期:2004-12-13

第一作者简介:李一波(1963~),男,沈阳航空工业学院自动控制系主任,教授,2003年获东北大学信息学院控制理论与控制工程专业工学博士学位,现在上海交通大学管理学院管理科学与工程博士后流动站从事博士后研究工作。研究方向为人工智能、模式识别、颅像鉴定、供应链管理、协同商务和计算机应用等。E-mail:lyb20040612@yahoo.com.cn

的无名颅骨上,根据颅骨与颜面软组织的解剖关系的实测值,直接用石膏、粘土、塑泥等可塑性物质,填塑出近似于该人的相貌。随着图形技术的发展,基于计算机 3 维图形技术的相貌复原技术研究得到了广泛的重视。基于受害人遗骨来实现 3 维相貌复原主要有基于计算机辅助技术的重构法^[1-3]、基于特征点的网格插值重建法^[4]和骨变形法^[5]。但无论哪种方法,其重建中都要涉及到软组织厚度数据时获取问题。软组织厚度数据的获取方法主要有表面针刺探测法、癩病患者扫描法^[6]和基于 CT 的软组织测量法,而基于颅骨变形法的 3 维相貌复原则是 3 维相貌复原的最新进展,该方法是用一个标准中性人做基准,然后将该人的颅骨进行逐步变形,变换成受害人的颅骨形状,与此同时其软组织做同步变换。

基于 2 维凸包和 CT 重建技术的 3 维相貌复原技术是西北大学在国家“九五”科技攻关项目研究中提出的相貌复原重建算法。该算法存在着需要人为地反复调整每层凸包点,导致效率极低、重建容颜有时有较大局部突起等问题;颅骨变形算法虽然很有前途,但目前还存在着计算量过于巨大、效率太低等问题;基于特征点的网格插值重建法是一种基于交互的方法,即它需要有经验的专家操作。根据人类学的基本理论,人的相貌存在着不同的区域,基于此,本文首先提出了基于螺旋 CT 的 3 维重建像的 3 维凸包软组织厚度计算方法。该方法是通过做实验人的螺旋 CT 来建立分民族、分年龄段的统计意义上的中性人软组织厚度数据库;然后在此基础上提出了基于分区和 3 维凸包的 3 维相貌复原方法。该方法是先将由 CT 法获取的统计意义上的分类软组织厚度分区数据与颅骨相应分区进行叠合来自动完成 3 维相貌复原工作,然后再采用单点约束变形技术实现对重建容颜的修饰^[7,8]。该方法效率高、交互少,而且相似度也较好,现已经实验验证了其可行性和有效性。

2 3 维相貌重建方案

3 维相貌重建方案如图 1 所示,该方案由缺省分区信息和中性软组织厚度数据库、颅骨修复、颅骨 CT 扫描、CT 扫描颅骨重建、颅骨像校正和分区、加软组织、3 维相貌复原、变形修整等几个部分构成。其工作步骤为:① 对受害人颅骨进行清理、修复,并

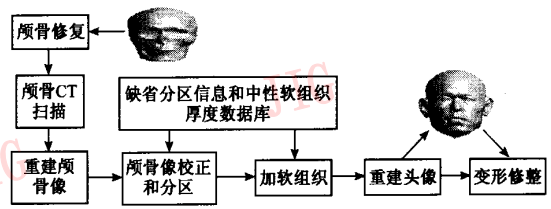


图 1 基于分区和凸包的 3 维相貌复原方案

Fig. 1 3D craniofacial reconstruction blueprint based on subarea and convex closure

用 CT 对颅骨进行扫描,首先在计算机上重建受害人的 3 维颅骨像;② 对 3 维颅骨像进行校正,使其面向前,无俯仰,并计算确立新坐标系,同时将 3 维颅骨移动到新坐标系下;③ 根据人类学原理进行分区,同时对每个分区进行网格化分割,并计算每个分区每个网格点相对于 z 轴的距离数据;④ 请专家对颅骨的性别、年龄、种族进行判断,并根据判断结果,从中性软组织厚度数据库中提取出相应性别、年龄、种族的中性软组织厚度数据,再将该中性人软组织厚度数据与对应分区颅骨网格数据相加来得到有软组织的受害人颅像数据,最后根据有软组织的受害人颅像数据重建 3 维相貌;⑤ 对重建的 3 维相貌进行五官及视觉变形修整。重建结果如图 2 所示,其中图 2(a)为受害人颅骨;图 2(b)为受害人真实照片;图 2(c)为将中性软组织加于该颅骨的 3 维复原像,该图为了对照,因而加上了头发和眼睛;图 2(d)为将中性软组织加于另一受害人颅骨的 3 维复原像。从图 2(b)和图 2(c)可见,重建结果与该受害人的真实照片有一定的相似度;而从图 2(b)和图 2(d)可见,当将中性软组织加于另一受害人颅骨时,重建结果差距还是比较明显的,因为相似与否是一个主观评价指标,其评价受五官形状的影响最重。由于本投影对五官并没有进行很好修饰,因此效果自然有一定差距,即使这样,公安系统的专家已经认为取得了很好的效果与很大的进步。



(a) 受害人颅骨像 (b) 受害人照片 (c) 复原像 (d) 另一颅骨复原像

图 2 颅骨、照片及重建 3 维相貌复原像

Fig. 2 The skull, the photo and the image of reconstructed face

3 分区及参考坐标的确定

3.1 变换到参考坐标系

基于 CT 扫描的重建 3 维相貌都在坐标系的第 1 象限,为了计算的需要,应该采用统一的有意义的参考坐标系。根据人类学原理,人的相貌参考坐标系应该是以颅骨的两耳中点为参考原点的坐标系,参考坐标系的获取及 3 维相貌重建像的校正过程为

① 手工找到两耳耳孔点,其连线的中点即为参考原点。

② 找到双眼眼眶上边缘点,其与参考原点一起形成一个平面,再将此平面校正成水平面,即得到参考坐标系的 xOy 平面。

③ 找到眉心点、鼻下点,将其与参考原点一起形成一个平面,再将此平面校正成垂直屏幕平面,得到参考坐标系的 yOz 平面,也称法面。

④ 过参考原点并平行于 xOy 平面的直线为 x 轴,过参考原点并垂直于 xOy 平面的直线为 z 轴,过参考原点并平行于 yOz 平面的直线为 y 轴。

⑤ 将 3 维相貌复原像坐标变换到新参考坐标系。

3.2 分区

由于眼、耳、鼻、嘴、眉骨、颧骨等区域是人相貌的特征区域,即人的相貌主要由这些区域的特征形成,所以由这些自然区域(直线)边界形成的相貌区域就成为复原的基础^[9,10]。本文用颅骨(像)上由这些自然区域切线形成的直线作为划分边界线来将颅骨分割成 78 个分区,分区方法为:先从颅顶线到下颌分为 9 个大区,这 9 个区再据复杂程度进行纵向分区,形成 78 个分区;最后再根据每个分区的复杂程度,采用不同的栅格分割策略,将其分割为 $m \times n$ 个栅格,即完成分区和栅格化(见图 3)。例如颅顶区就分为一个大分区,眼部分区则采用较密的栅格进行栅格划分等。

不同的人,颅骨具有不同的大小,因此各分区面积、形状也有差别,即使颅骨大小基本一样,但由于人具有不同的相貌,所以各分区大小自然也不会一样。为了实现任意颅骨和中性人软组织厚度数据的组合以及为了获取 100 个人的软组织厚度数据的需要,本文采用对应分区组合法,自动实现了大小伸缩和匹配的过程。同时,该方法也可将各类计算变换为矩阵运算,从而简化了计算,并提高了运算效率

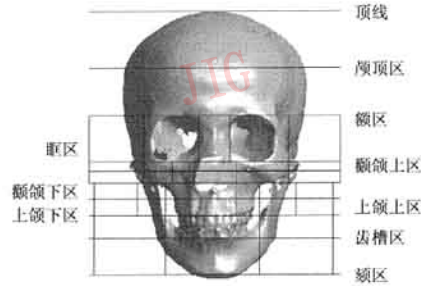


图 3 颅骨分区图示

Fig. 3 The skull's subarea

(计算见第 4 节)。

需要说明的是,分区是 3 维的,图 3 将其显示为 2 维的。

4 中性软组织厚度数据的获取

4.1 软组织厚度数据的获取方法

根据人类学的理论,不同种族、年龄段、性别,其头部软组织厚度有不同的特征,为此为了使重建相貌更接近真正的受害人,本文将年龄分为 5 个年龄段,其对应于幼年、童年、青年、中年和老年,并首先建立了汉族的男性 and 女性 5 个年龄段的软组织数据库,其他民族软组织数据库将根据应用的需要陆续建立。

本文将中性软组织定义为 100 个某民族、某性别、某年龄段软组织厚度数据的数学均值。软组织厚度数据获取方案如图 4 所示。

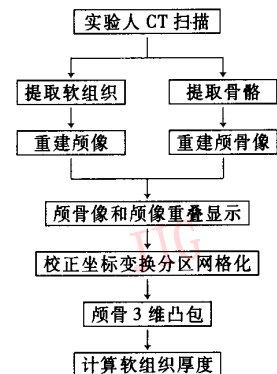


图 4 软组织厚度数据提取方案

Fig. 4 The blueprint of obtaining the soft tissue thickness data

为了获取软组织厚度数据,需要首先做实验人的 CT 扫描,而后采用图像处理技术提取每个 CT 层图片的软组织数据,同时提取相应层图片颅骨骨骼,然后用各层颅骨来重建得到实验人 3 维颅骨像,接

着用各层软组织来重建实验人的 3 维相貌,并采用半透明技术将实验人的 3 维颅骨像和实验人重建 3 维相貌像重叠显示,再对实验人 3 维颅骨像进行校正、坐标变换、分区和对各分区进行网格化。在对颅骨像进行校正、坐标变换等操作时,实验人的 3 维相貌像要与其同步变换,最后通过求实验人 3 维颅骨像的 3 维凸包来计算实验人 3 维相貌每个分区的每个网格点相对于 3 维颅骨凸包的距离,此距离就是实验人的软组织厚度。100 个实验人的对应分区软组织厚度数据的数学平均值即是该年龄段中性人软组织的厚度数据。

设实验人 CT 重建的 3 维颅骨像左眼分区是第 j 个分区,其栅格点到 z 轴的距离矩阵记为 d_j ,同理,将实验人 CT 重建的 3 维相貌像左眼分区各栅格点到 z 轴的距离矩阵记为 d_j^s (上角 s 代表 soft),则左眼分区软组织厚度矩阵为

$$s_j = d_j^s - d_j \quad (1)$$

其中, d_j, d_j^s 和 s_j 都为 $m \times n$ 维矩阵。本文只以 d_j 为例说明,其他类推, d_j 为

$$d_j = \begin{pmatrix} d_{1,1} & \cdots & d_{1,n} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ d_{m,1} & \cdots & d_{m,n} \end{pmatrix}_{m \times n} \quad (2)$$

其中, $d_{1,1}$ 为 3 维颅骨像第 j 个分区的第 1 行第 1 列相应的凸包栅格点到 z 轴的距离,则某民族、某年龄段的中性人 3 维相貌第 j 个分区(即左眼分区)的软组织平均厚度为

$$\bar{s}_j = \frac{1}{100} \sum_{j=1}^{100} s_j \quad (3)$$

在进行 2 维鉴定时,因为软组织厚度的数学方差是回归方程中一个重要参数,所以需要计算软组织厚度数据的数学方差。软组织厚度的方差可按下列式计算

$$\sigma = \frac{1}{100} \sum_{j=1}^{100} (s_j - \bar{s}_j)^2 \quad (4)$$

受害人颅骨经修复、CT 扫描、重建,并校正移动到参考坐标系下进行分区。记颅骨的第 j 个分区,即待重建颅骨左眼分区各栅格点到 z 轴的距离矩阵为 d_j^b 。为了与 3 维相貌像的分区区别,颅骨的分区用上标 b 表示,颅骨分区数据加上相应的中性软组织厚度数据即可得到皮肤到 z 轴的距离矩阵,即

$$p_j = d_j^b + \bar{s}_j \quad (5)$$

依此类推,对全部分区执行上述运算,就可以得到皮肤的全部栅格点数据,再进行 3 维显示即得到

重建颅像。

4.2 软组织和骨骼提取

由于本文采用的是新型的螺旋 CT,该设备允许调整 CT 扫描图像的密度,致使用于重建的 CT 图片的软组织、骨骼和背景具有良好的区域分割性(如图 5(a)所示),所以本文采用基于直方图的双阈值法,这样一次处理就可以将背景、软组织和骨骼分离出来。其所提取出的软组织(含骨骼)和骨骼图像如图 5(b)和 5(c)所示。



(a) CT 原图 (b) 提取出的软组织 (c) 提取出的骨骼

图 5 软组织和骨骼提取

Fig. 5 The extraction of soft tissue and bone

完成一个头颅全部 CT 图片的提取后,就可以重建人头 3 维相貌像和 3 维颅骨像。

5 基于点约束的五官及视觉变形修整

变形修整的目的有两个:一为根据专家经验对重建人头 3 维相貌像进行视觉修整;另一是对由平均所造成的五官等模糊缺陷进行修整。一个简单且实用的变形修整是单点约束变形^[7],它是先在头颅 3 维图像区域上指定一关键点 P_1 ,然后再指定另一点 Q_1 ,并使 P_1 变到 Q_1 。这时

$$Q_1 = P_1 + M_1 \cdot B\left(\frac{\|P - P_1\|}{R_1}\right) \quad (6)$$

其中, M_1 为偏移量, R_1 为影响半径, $B(\cdot)$ 为基函数,偏移量 M_1 为

$$M_1 = Q_1 - P_1 \quad (7)$$

显然,变形函数(式 6)由关键点 P_1 、影响半径 R_1 、偏移量 M_1 和基函数 $B(\cdot)$ 决定。 P_1 和 R_1 可通过界面由用户用鼠标选择一个区域来指定。该区域的中心点即 P_1 ,半径即为 R_1 。

为了计算简单,可选择多项式作为基函数,再根据 C^2 连续的要求得到的下式就是唯一的基函数^[7]:

$$B(t) = (1 - t^2)^3 \quad (8)$$

在实际应用中,为了更好地控制影响区域,可将影响半径扩展为两个数 R_x 和 R_y ,用于分别控制水平方向和垂直方向的影响范围,这时的变形函数就

变为

$$Q_1 = P_1 + (Q_1 - P_1) \cdot \left(1 - \frac{(x-x_1)^2}{R_x} - \frac{(y-y_1)^2}{R_y} \right)^3 \quad (9)$$

图 6 为对图 2 的 3 维相貌重建像进行单点约束变形的修整结果。通过选择适合的基函数,就可用单点约束变形方法来完成五官等修整工作。



图 6 相貌像变形

Fig. 6 The deformation of 3D face

需要说明的是,修饰的执行与否,要由重建效果决定,而且大多数情况下,都不需进行修饰。

6 结 论

采用本文方案重建的 3 维相貌像是一种统计意义上的相貌复原,其基本不含有人的主观因素。而用人工复原,则不论多么有经验的专家,若由其对受害人进行复原,则总会或多或少地带有其经验和主观的烙印。本方法采用 100 人为统计对象,数量偏少,当样本数足够多时,就可以认为这样的复原重建,将基本能真实重现受害人的相貌,这必将加快受害人的寻找过程。

从图 2(b) 和图 6 可见,本方法重建的 3 维相貌像效果还是比较理想的,但也存在一些需要进一步研究的问题,比如没有肌肤纹理,导致因皮肤过于平滑而质感不好;没有眉毛、睫毛、头发和胡子等,致使视觉效果受到很大影响等。

本文所提方案的实现是一个快速的基本自动的相貌复原过程,由于其不需以往类似系统的大量的交互过程,从而不仅避免了人为因素,而且还保证了重建的客观性和快速性。

参考文献 (References)

- 1 Jones Mark W. Facial reconstruction using volumetric data [Ph. D. thesis] [D]. University of Glasgow, Glasgow, Scotland, UK, 1998.
- 2 Quatrehomme C, Cotin S, Subsol C, *et al.* A fully three-dimensional method for facial reconstruction based on deformable models [J]. *Journal of Forensic Science*, 1997, 42(4): 649 ~ 652.
- 3 Nelson L A, Michael S D. The application of volume deformation to three dimensional facial reconstruction: A comparison with previous techniques [J]. *Forensic Science International*, 2002, 94(3): 167 ~ 181.
- 4 Attardi G, Betro M, Forte M, *et al.* 3D facial reconstruction and visualization of ancient Egyptian mummies using spiral CT data Soft tissues reconstruction and textures application [EB/OL]. <http://medialab.di.unipi.it/Project/Mummi/SIGGRAPH99/>
- 5 Lynnerup N, Neave R, Vanezis M, *et al.* Skull reconstruction by stereolithography [A]. In: *Proceedings of the 7 Scientific Meeting of the International Association For Cranofacial Identification* [C], Melbourne, Australia, 1997: 11 ~ 14.
- 6 Phillips V M, Smuts N A. Facial reconstruction: Utilization of computerized tomography to measure facial tissue thickness in a mixed racial population [J]. *Forensic Science International*, 1996, 83(1): 51 ~ 59.
- 7 Pan Jian-jiang, Zheng Jian-min, Yang Xun-nian. Locally constrained deformation for digital images [J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2002, 14(5): 385 ~ 388. [潘建江, 郑建民, 杨勋年. 图像的局部约束变形技术 [J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2002, 14(5): 385 ~ 388.]
- 8 Zhang Hui, Sun Jia-Guang. Patch constrained deformation technique [J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2003, 15(4): 389 ~ 392. [张慧, 孙家广. 一种面片约束的变形技术 [J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2003, 15(4): 389 ~ 392.]
- 9 Lan Yu-Wen. The research on superposition method between skull and photo as well as its application [M]. Beijing: The Crowd Publishing Company, 1999. [兰玉文. 颅像重合法研究与应用 [M]. 北京: 群众出版社, 1999.]
- 10 Helmer R P, Rohricht S, Petersen D, *et al.* Assessment of the reliability of facial reconstruction: Forensic analysis of the skull [M]. New York: Wiley-Liss Inc., U. S. A., 1993.