

8-13-2020

3D Skull Surface Completion Method Based on Multi-exemplars

Reziwanguli Xiamixiding

1. School of Information and Technology, Northwest University, Xi'an, 710069, China;;2. College of Computer Science and Technology, Xinjiang Normal University, Urumchi 830054, China;;

Guohua Geng

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

Gulisong Nasierding

2. College of Computer Science and Technology, Xinjiang Normal University, Urumchi 830054, China;;

Qingqiong Deng

3. College of Information Science and Technology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;;

See next page for additional authors

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

3D Skull Surface Completion Method Based on Multi-exemplars

Abstract

Abstract: In order to repair the damaged skulls, a skull completion method based on *multiple exemplars* was proposed. A 3D skull model database was constructed, and all the exemplars within the database were registered with a standard skull model. Each exemplar was then divided into a missing part and a remaining part according to the given damaged skull. After that, the relationship between the missing part and the remaining part was obtained by a regression algorithm. This relationship was used to calculate the missing part of the given skull, and a complete skull could be obtained by merging the two parts. Experimental results demonstrate that the proposed method can repair small and large damages well while keep the original model unchanged. In addition, it can improve the completion accuracy compared with the existing example-based methods.

Keywords

3D model completion, multi-exemplar, skull, regression

Authors

Reziwanguli Xiamixiding, Guohua Geng, Gulisong Nasierding, Qingqiong Deng, Dilinuer Keyimu, Zulipiya Maimaitiming, Wanrong Zhao, and Zheng Lei

Recommended Citation

Reziwanguli Xiamixiding, Geng Guohua, Gulisong Nasierding, Deng Qingqiong, Dilinuer Keyimu, Zulipiya Maimaitiming, Zhao Wanrong, Zheng Lei. 3D Skull Surface Completion Method Based on Multi-exemplars[J]. Journal of System Simulation, 2016, 28(10): 2335-2341.

一种基于多样例的三维颅骨缺失修补方法

热孜万古丽·夏米西丁^{1,2}, 耿国华^{1*}, 古丽松·那斯尔丁², 邓擎琼³, 迪丽努尔·克依木²,
祖丽皮亚·买买提明², 赵万荣⁴, 郑磊⁴

(1.西北大学信息科学与技术学院, 西安 710069; 2.新疆师范大学计算机科学技术学院, 乌鲁木齐 830054; 3.北京师范大学信息科学与技术学院, 北京 100875; 4.托克逊县人民医院 放射科, 新疆 吐鲁番 838100)

摘要: 针对刑侦及考古中的遗骨经常存在缺损的问题, 提出一种基于多样例的三维颅骨缺失修补方法。构建三维颅骨样本库, 并通过配准算法对所有样本进行规格化处理; 利用同样的配准算法根据待修补颅骨的缺失情况把样本库中的每个样本对应地分为存留和缺失两部分数据; 通过回归算法获得两部分数据之间的函数关系; 利用该函数关系计算待修补颅骨的缺失数据, 并通过拼接融合得到最终的结果。实验结果表明, 该方法能有效修补大、小缺失, 同时保留原模型的所有特征; 此外, 避免了现有基于样例方法带个性特征的缺陷, 修补误差更小。

关键词: 三维模型修补; 多样例; 颅骨; 回归

中图分类号: TP399 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2016) 10-2335-07

3D Skull Surface Completion Method Based on Multi-exemplars

Reziwanguli Xiamixiding^{1,2}, Geng Guohua¹, Gulisong Nasierding², Deng Qingqiong³, Dilinuer Keyimu²,
Zulipiya Maimaitiming², Zhao Wanrong⁴, Zheng Lei⁴

(1. School of Information and Technology, Northwest University, Xi'an, 710069, China; 2. College of Computer Science and Technology, Xinjiang Normal University, Urumchi 830054, China; 3. College of Information Science and Technology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 4. Department of Radiology, Peoples Hospital of Toksun, Turpan Xinjiang 838100, China)

Abstract: In order to repair the damaged skulls, a skull completion method based on *multiple exemplars* was proposed. A 3D skull model database was constructed, and all the exemplars within the database were registered with a standard skull model. Each exemplar was then divided into a missing part and a remaining part according to the given damaged skull. After that, the relationship between the missing part and the remaining part was obtained by a regression algorithm. This relationship was used to calculate the missing part of the given skull, and a complete skull could be obtained by merging the two parts. Experimental results demonstrate that the proposed method can repair small and large damages well while keep the original model unchanged. In addition, it can improve the completion accuracy compared with the existing example-based methods.

Keywords: 3D model completion; multi-exemplar; skull; regression

引言

颅面复原技术是根据颅骨和面貌形态学规律,



收稿日期: 2016-05-20 修回日期: 2016-07-14;
基金项目: 国家自然科学基金(61363065, 61262065);
北京市自然科学基金(4152028);
作者简介: 热孜万古丽·夏米西丁(1968-), 女, 维吾尔族, 新疆托克逊县, 博士生, 讲师, 研究方向为颅面形态学。

从颅骨出发实现其未知面貌的预测和复原, 它在刑事侦查、考古人类学等领域有重要的应用。例如在有些刑侦案件中, 由于时间或人为破坏等因素, 造成受害者被发现时仅剩一堆白骨, 同时受害者周边缺乏证明其身份的证据。在此情况下, 刑侦工作人员就需要借助颅面复原技术复原受害者面貌, 进而确认受害者身份。但遗骨经常存在缺损。此外,

由于下颌骨与颅骨其他骨头没有连接，容易遗失。该现象在考古中尤为常见，很多发掘的远古人类的遗骨都没有下颌骨。而要对这样的遗骨进行面貌复原，首先就需要对缺失部分进行修补。

目前有很多孔洞修补算法，包括基于体的补洞算法和基于网格的补洞算法，这些算法可以很好地修补小孔洞，但对大的缺失，例如缺失的下颌骨，这些方法则无能为力。基于样例的方法可以修补大的缺失。这些方法一般在数据库中选择一个或几个与待修补三维模型类似的完整三维模型作为样例，然后对样例进行变形使其与待修补三维模型匹配上，最终通过分割、拼接融合得到修补结果。这种方法不可避免地把样例上的一些个性特征迁移到待修补三维模型上。而对于颅骨，我们通过 CT 螺旋扫描仪或三维扫描仪容易获得大量样本，从而为缺失颅骨提供足够多的样例，避免单个或几个样例带来的偏差。

基于此，本文提出了一种基于多样例的三维颅骨缺失修补方法。根据待修补颅骨的缺失情况，从多个完整三维颅骨样例中通过学习方法获得缺失数据和存留数据的函数关系，并依此关系计算待修补颅骨的缺失数据，最后对缺失数据和存留数据拼接融合得到完整颅骨。

1 相关工作

国内外许多学者对三维模型的孔洞修补方法进行了深入的研究，提出了很多有效的方法^[1]，这些方法大致分为基于网格的孔洞修补方法^[2-4]和基于体的孔洞修补方法^[5-6]。基于网格的修补方法首先搜索孔洞的周边区域，再根据周边区域的特征进行网格的填充。基于体表达的方法首先将输入模型转换为一种中间的体网格，在进行修补之后，再根据不同的等值面抽取方法，将其还原为三角网格模型。无论是基于体的还是基于网格的孔洞修补方法，都可以较好地修补较平坦区域的简单孔洞，但对于特征丰富的区域以及大的缺失区域，因无法根据相邻

区域的特征推断出缺失区域，通常这些方法只能得到最大程度的光滑曲面，而无法得到正确的结果。

为修补大的缺失，有人提出基于上下文的方法^[7-9]从待修补模型中找到和缺失区域相像的区域，然后把该区域通过变形从而完成缺失孔洞的填补。但如果待修补模型中不存在与缺失区域相像的区域，则该方法无法修复。基于样例的方法可以处理这类问题。例如 Pauly 等人^[10]首先在数据库中检索出和待修补模型相近的三维模型作为样例，然后对每个样例模型进行非刚性配准使其与待修补三维模型匹配上，并对匹配结果做定量的评价，从而挑选出匹配最好的结果，进一步通过分割得到相应的缺失区域，最后对缺失区域和待修补模型进行融合得到完整的三维模型。杨荣等人^[11]采用了类似的方法。首先构建三维源模型库，将现有模型经过选取特征点等处理作为模型库中的源模型；然后选取待修复模型的特征点，并通过比较源模型和待修复模型特征点的一致程度，选择出合适的源模型；最后，通过不均匀缩放迭代最近点配准和合并等步骤自动修复不完整模型，得到完整的三维扫描模型。Sahay 等人^[12]同样从数据库中选择多个模型作为样例，然后对每个样例模型采用迭代最近点算法与待修补模型进行匹配，之后从缺失的孔洞边缘出发采用张量投票算法从变形后的样例中选取得票最高的结果，逐步实现大孔洞的修补。由于多样例难以获得，Sahay 等人^[13]又提出一种基于单样例以及在线深度图数据库的方法对大孔洞进行修补。首先采用一致点漂移算法实现样例和待修补模型的匹配，然后根据变形后的样例采用字典学习方法从网上深度图数据库中逐步计算出缺失区域。

上述基于样例的方法中，文献[10-11]的方法可用于任意缺失的修补，文献[12-13]的方法可用于大孔洞的修补，并且它们可适用于一般模型。但是也可看出，虽然它们也采用了多个样例，但实质上是通过一种评价规则从中选择一种样例进行孔洞修复，因此修复结果将带有所选样例的个性特征，从

而出现偏差。本文中, 我们采用回归方法利用多样例学习缺失数据和存留数据的关系, 避免了现有方法的缺陷。

2 模型库构建和预处理

可通过三维扫描仪扫描颅骨样本获得三维颅骨模型, 从而构建颅骨模型库。但这仅限于已经白骨化的遗骨。为了获得更多完整样本数据, 通过和医院合作, 我们采用 CT 螺旋扫描仪获得了 100 位蒙古人种汉族成年志愿者的完整头部 CT 图像数据, 其中男性 52 位, 女性 48 位。所有样本均未做过影响颅骨形状的手术。扫描时样本采用卧位姿势, 但颅骨是刚性的, 因此和人脸不一样, 形状不受姿态影响。CT 数据采用 DICOM 3.0 标准。每张 CT 图像大小为 512×512 个像素, 扫描间隔为 1 毫米, 每个样本约有 250 张 CT 图像。之后对于每个样本的 CT 图像数据, 我们采用文献[14]中的方法重构出三维颅骨模型, 该模型包含约 169 000 个顶点, 336 000 个三角形。

进一步, 为消除样本在姿态和位置上的不一致, 我们采用人类学中常用的法兰克福坐标系对库中的所有三维颅骨模型的姿态进行了校正。该坐标系由四个手动标定的特征点(颅骨左耳孔中点 L_p 、右耳孔中点 R_p 、左眼眶下缘点 M_p 、眉心 V_p)确定, 确定方法如下:

- 1、 $\overline{L_p R_p}$ 为法向量且过眉心点 V_p 的平面, 与直线 $L_p R_p$ 的交点 O_p 为坐标系的原点;
- 2、原点 O_p 且以向量 $\overline{M_p L_p} \times \overline{M_p R_p}$ 为方向的射线为 Z 轴正向;
- 3、左耳孔中心 L_p 到右耳孔中心 R_p 的直线为 X 轴正向;
- 4、原点 O_p 采用右手法则根据 X 轴、Z 轴的直线确定 Y 轴。

图 1 显示了经法兰克福坐标校正后的三维颅骨模型示例。

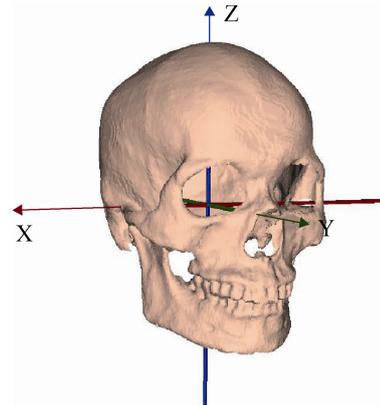


图 1 法兰克福坐标校正后的颅骨模型

此外, 为了后续利用模型库中的所有样本进行回归分析, 还需采用配准算法对所有样本进行规格化处理, 建立它们的统一的表示, 即所有模型都由相同数量的顶点构成, 并且顶点一一对应。我们同样采用了文献[14]中提出的一种全局和局部相结合的非刚性配准算法。首先选择一个完整同时顶点分布均匀的三维颅骨模型样本作为标准模型, 并在上面手动标定 78 个特征点; 然后对模型库中的每个待配准颅骨模型, 同样标定 78 个特征点, 之后采用薄板样条函数(Thin Plate Spline, TPS)进行两个模型的全局配准, 即把标准模型通过 TPS 变形到待配准模型上; 经全局配准后, 两个颅骨大部分区域能匹配上, 但在一些局部区域还存在错配现象, 因此进一步采用具有紧支撑的径向基函数(Compact Support Radial Basis Functions, CSRBF)对标准模型配准误差大的局部区域进行变形, 直到两个模型的配准误差小于设定的阈值。通常两个颅骨模型经过 5 次 CSRBF 局部配准就能达到很好的配准结果。经过配准后, 对标准模型上的每一个顶点, 求其在待配准网格模型上的最近点作为对应点, 从而建立所有颅骨模型稠密顶点的对应关系。

图 2 显示了一个颅骨配准示例, 黑色显示的为标准颅骨模型, 灰色显示的是待配准颅骨模型。其中左边显示的是配准前的两个颅骨, 中间显示的是经过全局配准后的两个颅骨, 右边显示的是最终的配准结果。

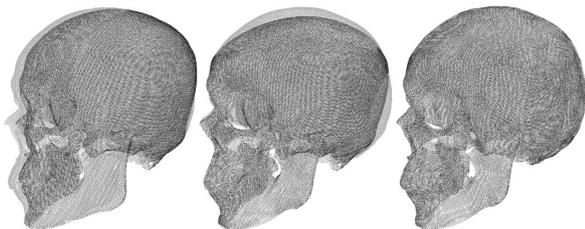


图 2 三维颅骨稠密点云配准

3 不完整模型修复

利用模型库中的所有样本对缺失模型进行修复,修复过程包括缺失和留存数据样本获取,缺失数据和留存数据关系获取、缺失数据计算及融合三个步骤。

3.1 缺失和留存数据样本获取

当给定一个不完整颅骨时,首先采用上节中的全局和局部相结合的配准算法建立它和标准模型的顶点对应关系。然后对不完整颅骨上的每一个顶点求其在变形后的标准颅骨上的最近点。所有最近点(记作 R)在标准模型中的顶点索引组成一个集合,记作 $index_S$,表示不完整颅骨模型在标准颅骨上的对应点的索引序列,即留存数据的索引序列。根据 $index_S$,就可从模型库中每一个颅骨样本中得到一组顶点数据,即该样本对应的留存数据。而标准颅骨除去 $index_S$ 之外的其他的顶点索引组成另一个集合,记作 $index_H$,即为缺失数据的顶点索引。同样地,根据 $index_H$,可从模型库中每一个颅骨样本中得到一组顶点数据,即该样本对应的缺失数据。

同时,对 R 中的每一个顶点,计算它在不完整颅骨上的最近点,然后对这些最近点以及不完整颅骨模型进行法兰克福坐标系校正,经过坐标校正后的最近点集合即为不完整颅骨模型规格化表示。此外,用于校正的坐标系由变形后的标准颅骨上的四个特征点确定,这是因为不完整颅骨模型可能因为缺失而不能标定这四个用于坐标校正的特征点,这也是对不完整颅骨先进行配准后进行坐标校正的原因。

3.2 缺失数据和留存数据关系获取

对模型库中的每一个样本 i ,根据 $index_S$ 和 $index_H$ 得到留存数据 S_i 和缺失数据 H_i 后,可构建训练样本集合 $\{(S_i, H_i) | i=1, 2, \dots, N\}$,其中 N 是训练样本数量, S_i 和 H_i 是由其顶点序列组成的向量,即 $S_i = (x_1, y_1, z_1, \dots, x_m, y_m, z_m)$, $H_i = (x_1, y_1, z_1, \dots, x_n, y_n, z_n)$, m 和 n 分别为留存区域和缺失区域的顶点个数。采用回归学习方法可从训练样本集合中得到缺失数据 H 和留存数据 S 之间的函数关系。

但由于三维颅骨采集精度高, m 和 n 的值远远大于样本数量,会因此引起维数灾难(curse of dimensionality)。因此在回归之前,我们采用主成分分析(principle components analysis, PCA)对留存数据集 $\{S_i | i=1, 2, \dots, N\}$ 以及缺失数据集 $\{H_i | i=1, 2, \dots, N\}$ 分别进行降维处理,构建它们的 PCA 统计模型,降维后每个留存数据 S_i 和缺失数据 H_i 可分别表示成两组维数不高的 PC 系数: U_i 和 V_i 。

之后对降维后的训练数据集 $\{(U_i, V_i) | i=1, 2, \dots, N\}$,再采用回归方法获得缺失数据对应的 PC 系数 V 和留存数据对应的 PC 系数 U 之间的函数关系: $U = f(V)$ 。本文实验了两种回归方法:偏最小二乘回归和经典的最小二乘回归。偏最小二乘回归是一种新型的多元统计数据分析方法,相比于经典的最小二乘回归,它能处理各变量内部高度线性相关、以及样本个数少于变量个数等问题。但本文中训练数据经过了 PCA 降维,不存在上述问题,因此两种方法得到的函数 f 基本是一致的。

3.3 缺失数据计算及融合

为计算不完整颅骨模型的缺失数据,首先把 3.1 节中得到的不完整颅骨模型规格化表示通过留存数据的 PCA 模型获得对应的 PC 系数;然后根据 3.2 节中得到的缺失数据与留存数据之间的函数关系计算出缺失数据的 PC 系数,并通过缺失数据

的 PCA 模型得到相应的三维点云模型; 进一步根据标准模型对应点云的三角形连接关系可得到缺失区域的三角网格模型。

最后, 对缺失区域网格模型和经坐标校正后的不完整三维颅骨网格模型进行融合得到完整三维颅骨。融合时, 首先分别计算待修补网格模型和缺失区域网格模型上的所有边缘顶点, 分别记作 $Bound_S$ 和 $Bound_H$, 然后对 $Bound_S$ 中的每一个顶点 p , 求其在 $Bound_H$ 中的最近点 q , 如果两者之间的距离大于一个设定的很小的阈值, 则认为这两个点是不相邻的, 否则把缺失区域网格模型中的点 p 替换成 q 。这样, 两个模型的共有边缘连接在一起, 使它们合并成一个整体, 并且修复后的模型保留了原始模型的所有特征。

3 实验结果及分析

我们采用 C++、Matlab 和 OpenGL 实现了本文方法。为了验证本文方法, 我们从 100 个样本中随机选择了 3 个样本作为测试样本, 其余 97 个样本作为训练样本。首先对测试样本人为地去除下颌骨, 然后用本文方法对缺失下颌骨进行预测和修复。图 3 分别显示这 3 个测试样本的修补结果。其中第二列为去除下颌骨之后的待修补模型; 第三列是修补结果, 第四列是修补结果(青色点云)和真实完整模型(灰色面片)的对比情况; 第五列是修补误差, 其中修补模型上每一个顶点的误差定义为该点到原始完整模型上最近点之间的欧式距离。我们还对 3 个测试样本上的所有下巴区域的顶点误差进行了统计, 计算该区域所有顶点的平均误差, 以及误差的标准差, 统计结果见表 1 中的第二行和第三行。

为了跟目前常用的基于样例的方法, 如 Pauly 等人^[10]的方法进行对比, 对于每个测试样本, 我们把 97 个样本作为样例, 并从中选出和待修补模型匹配最好的样例进行分割和融合操作, 得到修补结果, 见图 4。同样, 我们对 3 个测试样本下巴区

域上的所有顶点误差进行了统计, 统计结果见表 1 中第四行和第五行。通过比较图 3 和图 4, 以及表 1 中两种方法的结果, 可看出本文方法可以得到跟真实模型更接近的修补结果, 修补误差明显小于 Pauly 等人^[10]的方法。

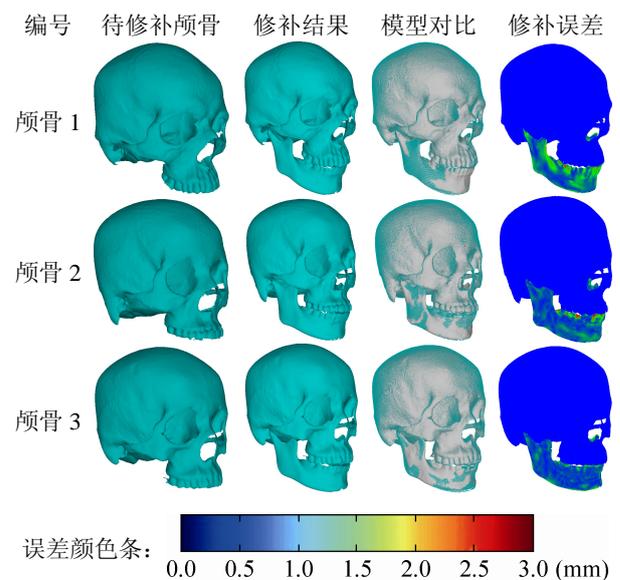


图 3 采用本文方法对 3 个测试颅骨的修补结果

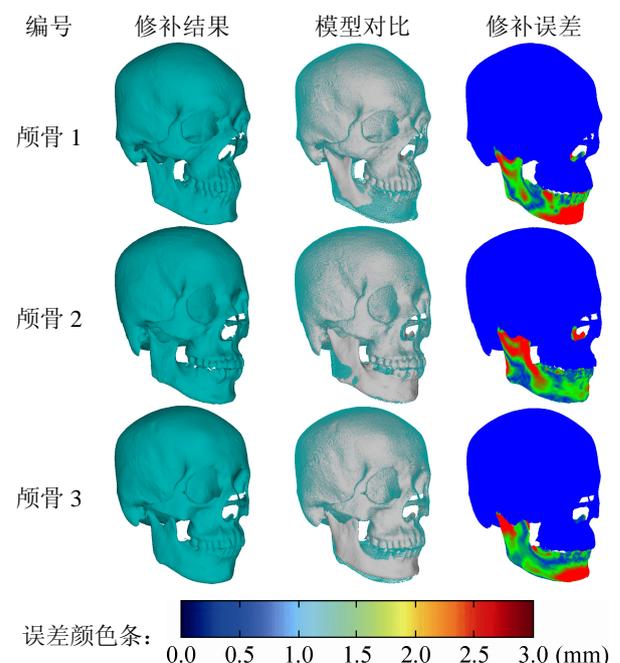


图 4 采用方法[10]对 3 个测试颅骨的修补结果

我们还实验了只采用一个样例的情况。把标准颅骨模型作为样例，然后采用上述类似的方法分别对 3 个测试样本进行了修补，修补结果及误差见图 5，修补误差的统计结果见表 1 中第六行和第七行。通过与本文方法的结果比较可知，本文方法的修补误差更小；而通过与 Pauly 等人^[10]的方法的结果对比表明，对于这种非孔洞的缺失，存留数据匹配更好并不能保证依此获得的缺失数据就更准确。

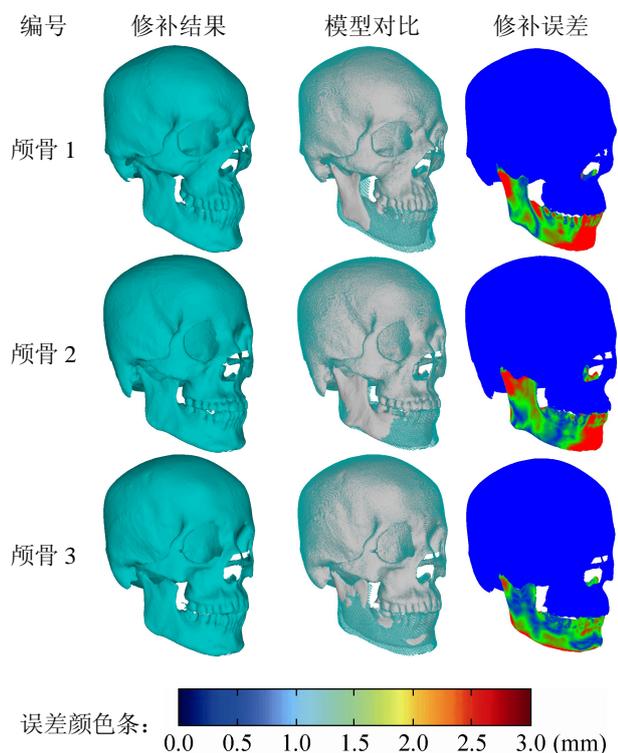


图 5 采用单样例方法对 3 个测试颅骨的修补结果

表 1 三种方法对 3 个测试颅骨的平均误差和标准差/mm

	颅骨 1	颅骨 2	颅骨 3
本文方法平均误差	0.869 1	0.633 7	0.616 9
本文方法误差标准差	0.475 0	0.474 6	0.391 3
文献[10]方法平均误差	2.452 6	1.735 1	1.568 9
文献[10]方法误差标准差	1.825 6	1.146 4	1.119 8
单样例方法平均误差	2.238 3	1.782 4	1.257 7
单样例方法误差标准差	1.753 4	1.184 7	0.869 0

图 6 显示了采用本文方法对一个古代遗骨的修复结果，该遗骨下巴、颧弓、牙齿等多处缺失。其中左图是修复前的遗骨；中间显示了拼接融合前

的缺失数据(灰色)和存留数据(青色)；右图显示了最终的结果。可看出本文方法对大小缺失都能得到很好的修补结果。



图 6 出土的古代遗骨虚拟修补结果

4 结论

缺失颅骨修补是颅骨面貌复原的前提，本文提出了一种基于多样例的三维颅骨缺失修补算法，可对大、小缺失颅骨进行修复，并且在修复中因使用了多样例的缺失数据和存留数据之间的统计信息，避免了现有基于样例方法的缺陷，因此能得到误差更小的修补结果。

但本文方法在颅骨配准过程中还需手工标定特征点，因此如何去除枯燥的手工操作，实现三维缺失颅骨的自动配准和修补是下一步工作需要解决的重点问题。对此，可借鉴现有的三维模型自动配准方法，如文献[15-16]中的方法。此外，本文方法对每一个待修补的三维颅骨，都需要计算对应的存留数据样本和缺失数据样本，然后分别构建 PCA 模型，并采用回归方法得到缺失数据和存留数据的关系，之后才能进行修复，因此修补效率较低。并且修复时间受数据库规模影响，样本越多，时间越长。目前在 100 个样本的情况下，不算特征点手工标定时间，修补一个颅骨大约 3 min。因此，在下一步工作中，如何提高效率也是一个需要研究的问题。对此，可参考文献[17]中的方法，对颅骨模型进行稀疏表示，然后对待修补的颅骨模型，通过利用训练样本数据最小化其留存部分的误差得到对应的稀疏表示，从而获得完整模型。

参考文献:

- [1] Attene M, Campen M, Kobbelt L. Polygon Mesh Repairing: an Application Perspective [J]. ACM Comput. Surv. (S0360-0300), 2013, 45 (2): 15.
- [2] Liepa P. Filling Holes in Meshes [C]// Proceedings of the 2003Eurographics/ACM SIGGRAPH symposium on Geometry processing. Switzerland: Eurographics Association, 2003: 200-205.
- [3] Pernot J P, Moraru G, Véron P. Filling Holes in Meshes using a Mechanical Model to Simulate the Curvature Variation Minimization [J]. Computers & Graphics (S0097-8493), 2006, 30(6): 892-902.
- [4] 刘咏梅, 李凤霞, 雷正朝, 等. 基于边界特征增长的孔洞修补算法 [J]. 系统仿真学报, 2014, 26(9): 1916-1921.
- [5] Davis J, Marschner S R, Garr M, et al. Filling Holes in complex Surfaces using Volumetric Diffusion [C]// Proceedings, First International Symposium on 3D Data Processing Visualization and Transmission. USA: IEEE, 2002: 428-441.
- [6] Hétry F, Rey S, Andújar C, et al. Mesh Repair with user-friendly Topology Control [J]. Computer-Aided Design (S0010-4485), 2011, 43(1): 101-113.
- [7] Harary G, Tal A, Grinspun E. Context-based Coherent Surface Completion [J]. ACM Trans. Graph (S0730-0301), 2014, 33(1): 5.
- [8] Sharf A, Alexa M, Cohen-Or D. Context-based Surface Completion [J]. ACM Trans. Graph (S0730-0301), 2004, 23(3): 878-887.
- [9] Park S, Guo X, Shin H, et al. Shape and Appearance Repair for Incomplete Point Surfaces [C]// Tenth IEEE International Conference on Computer Vision, vol.2. Beijing, USA. USA: IEEE, 2005:1260-1267.
- [10] Pauly M, Mitra N J, Giesen J, et al. Example-based 3d Scan Completion [C]// Proc. Third Eurographics symposium on Geometry processing, SGP '05, Switzerland: Eurographics Association, 2005, Article No. 23.
- [11] 杨荣, 冯有前, 袁修久. 利用现有模型修复不完整三维模型 [J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2015, 27(1): 98-105.
- [12] Sahay P, Rajagopalan A N. Harnessing Self-similarity for Reconstruction of Large Missing Regions in 3d Models [C]// Processing ICPR, Tsukuba, Japan. USA: IEEE, 2012: 101-104.
- [13] Sahay P, Rajagopalan A N. Geometric Inpainting of 3D Structures [C]// Proc. 2015 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW), Boston, MA, USA. USA: IEEE, 2015: 1-7.
- [14] Q Deng, M Zhou, W Shui, et al. A Novel Skull Registration based on Global and Local Deformations for Craniofacial Reconstruction [J]. Forensic Science International (S0379-0738). 2011, 208(1-3): 95-102.
- [15] Sahillioglu Y, Yemez Y. Coarse-to-Fine Combinatorial Matching for Dense Isometric Shape Correspondence [J]. Computer Graphics Forum (S1467-8659). 2011, 30(5): 1461-1470.
- [16] Kovnatsky A, Bronstein M M, Bresson X, et al. Functional Correspondence by Matrix Completion [C]// 2015 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), Boston, MA, USA. USA: IEEE, 2015: 905-914.
- [17] Zhang S, Zhan Y, Metaxas D N. Deformable Segmentation via Sparse Representation and Dictionary Learning [J]. Medical Image Analysis (S1361-8415). 2012, 16(7): 1385-96.
- [11] 袁小翠, 吴禄慎, 陈华伟. 特征保持点云数据精简 [J]. 光学精密工程, 2015, 23(9): 2666-2676.
- [12] Stanford University. The Stanford 3D Scanning Repository [DB/OL]. (2014-08-19)[2016-07-08]. <http://graphics.stanford.edu/data/3Dscanrep>.
- [13] Shi B Q, Liang J, Liu Q. Adaptive simplification of point cloud using k-means clustering [J]. Computer-Aided Design (S0010-4485), 2011, 43(8): 910-922.

(上接第 2334 页)

- [9] 马骊溟, 徐毅, 李泽湘. 基于高斯曲率极值点的散乱点云数据特征点提取 [J]. 系统仿真学报, 2008, 20(9): 2341-2344.(Ma L M, Xu Y, Li Z X. Extracting Feature Points for Scattered Points Based on Gauss Curvature Extreme Point [J]. Journal of System Simulation, 2008, 20(9): 2341-2344.)
- [10] 王茹, 周明全, 邢毓华. 基于聚类平面特征的三维点云数据精简算法 [J]. 计算机工程, 2011, 37(10): 249-251.