

• 专题研究:数智口腔 •

# “刚性配准”与“非刚性配准”在数字化口腔医学三维点云数据中的应用

温奥楠<sup>1</sup>, 赵一姣<sup>1,2</sup>, 王 勇<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>北京大学口腔医学院·口腔医院, 数字化研究中心/口腔修复教研室, 国家口腔医学中心, 国家口腔疾病临床医学研究中心, 口腔生物材料和数字诊疗装备国家工程研究中心, 国家卫生健康委口腔数字医学重点实验室, 口腔数字医学北京市重点实验室, 北京 100081; <sup>2</sup>北京大学医学部医学技术研究院, 北京 100191

**[摘要]** 随着数字化技术的发展, 三维点云数据在口腔临床数字化诊疗中的应用越来越广泛, 涉及到三维形态对比分析、虚拟患者构建、缺损形态重建等多个方面。目前, “刚性配准”与“非刚性配准”技术在口腔三维点云数据的临床应用中发挥了重要作用, 2种技术的异同点及其背后的算法原理值得深入探讨与挖掘, 从而使其更好地服务于口腔医学的临床实践与科学研究。笔者团队对于“刚性配准”与“非刚性配准”技术的应用和研究有一定工作基础, 文章对2种技术的概念、算法原理及其在口腔医学领域中的应用进行阐述、总结和展望, 为口腔临床和科研对两种技术的应用提供借鉴和参考。

**[关键词]** 三维点云数据; 刚性配准; 非刚性配准; 数字化口腔医学

**[中图分类号]** R783

**[文献标志码]** A

**[文章编号]** 1007-4368(2025)12-1698-11

**doi:** 10.7655/NYDXBNSN250638

## Application of “rigid registration” and “non-rigid registration” in digital stomatology three-dimensional point cloud data

WEN Aonan<sup>1</sup>, ZHAO Yijiao<sup>1,2</sup>, WANG Yong<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>Center of Digital Dentistry/Department of Prosthodontics, Peking University School and Hospital of Stomatology & National Center for Stomatology & National Clinical Research Center for Oral Diseases & National Engineering Research Center of Oral Biomaterials and Digital Medical Devices & NHC Key Laboratory of Digital Stomatology & Beijing Key Laboratory of Digital Stomatology, Beijing 100081; <sup>2</sup>Institute of Medical Technology, Peking University Health Science Center, Beijing 100191, China

**[Abstract]** With the development of digital technology, three-dimensional (3D) point cloud data is becoming more and more widely used in oral clinical digital diagnosis and treatment, involving many aspects such as 3D morphological comparison analysis, virtual patient construction, and defect morphological reconstruction. At present, “rigid registration” and “non-rigid registration” technologies have played important roles in the clinical application of oral 3D point cloud data. The similarities and differences between the two technologies and the algorithm principles behind them are worth in-depth discussion and exploration, so that they can better serve the clinical practice and scientific research of stomatology. The author’s team has a certain working basis for the application and research of “rigid registration” and “non-rigid registration” technologies. This article will explain the concepts, algorithm principles and their application in the field of stomatology, and summarize and prospect them to provide reference for the application of oral clinical and scientific research to the two technologies.

**[Key words]** three-dimensional point cloud data; rigid registration; non-rigid registration; digital stomatology

[J Nanjing Med Univ, 2025, 45(12): 1698-1708]

**[基金项目]** 国家自然科学基金(82271039, 82071171); 国家重点研发计划(2022YFC2405401); 北京市自然科学基金(1.232100, 1.242132); 北京大学口腔医院实验室开放课题(PKUSS20230201)

\*通信作者(Corresponding author), E-mail: kqcadc@bjmu.edu.cn (ORCID: 0000-0001-9696-2754)

数字化技术的发展及其在口腔医学领域中的应用丰富了口腔临床的医学数据类型,以稠密点集形式表达人体组织三维形态的三维点云数据逐渐成为了一种新的主流数据类型。基于三维点云数据,口腔医师可为患者进行诊断和治疗方案的数字化设计,并进行可视化展示,便于医患沟通;亦可对患者治疗前后的颌面和牙列形态进行三维对比分析,评价临床疗效;或建立数字化虚拟患者,开展口腔医学教育与培训等。三维点云数据的获取手段主要包括三维光学扫描和三维重建,不同来源的数据间存在着数据精度、三维空间位置、三角网格拓扑关系等方面的差异。因此,针对三维点云数据的数据处理是口腔临床基于其进行数字化诊疗分析的重要环节,也是口腔临床医师和科研学者关注的重点内容<sup>[1-2]</sup>。

目前,“刚性配准”技术,即2个三维点云数据进行某种最优匹配(重叠、对齐),最常见的是逆向工程软件 Geomagic 中的“最佳拟合对齐”功能,其在三维点云数据处理分析中的应用已较为成熟,已成为口腔临床应用三维点云数据的主要技术手段<sup>[1]</sup>。而近年来,有学者将“非刚性配准”技术引入到口腔三维点云数据的处理分析中,该技术亦展现出一定的应用潜力和研究前景。“刚性配准”和“非刚性配准”技术既有区别、亦有联系,笔者团队基于2种技术进行了多年的研究工作,本文将对其概念和算法原理进行介绍,并梳理其在口腔医学领域的临床应用,从而为口腔医学领域的临床医师和科研学者提供借鉴和参考。笔者还对2种技术的后续发展进行探讨与展望,为今后的相关研究提供相应参考。

## 1 “刚性配准”与“非刚性配准”的概念及算法原理

针对三维点云数据,“刚性配准”与“非刚性配准”均能通过坐标变换将不同的三维点云数据统一到相同的空间坐标系下。两者最主要的区别在于,数据配准过程中,“刚性配准”不会改变“浮动数据”(配准中三维空间位置发生改变的数据)的三维形态,而“非刚性配准”会令“浮动数据”发生趋近于“固定数据”(配准中三维空间位置不变的数据)三维形态的三维形变。目前,“刚性配准”与“非刚性配准”已有多种不同的算法实现方式。

### 1.1 “刚性配准”的概念及算法实现

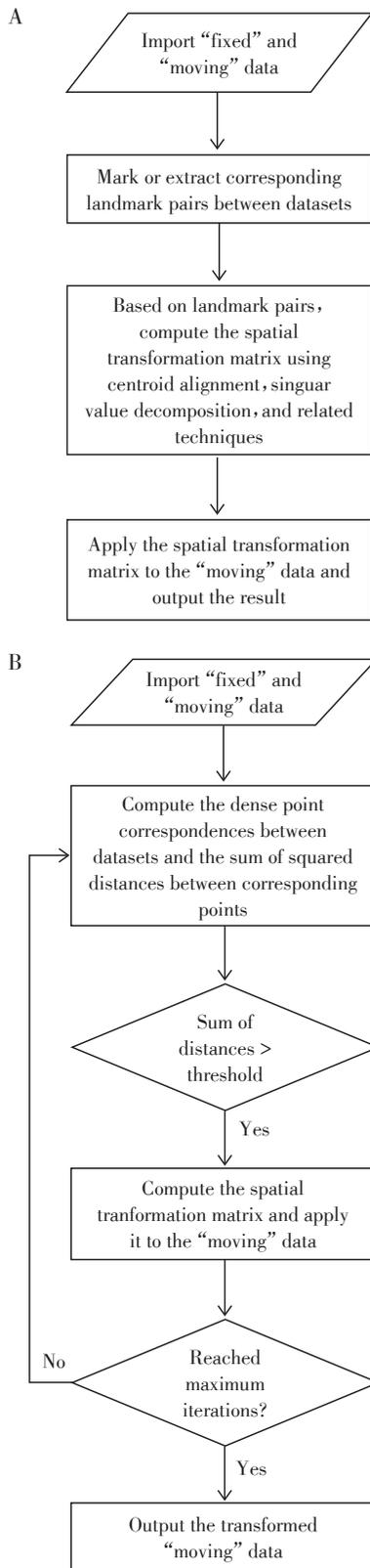
三维点云数据的“刚性配准”是指通过计算一个空间变换矩阵(包含平移与旋转),将处于不同空间位置的2个或多个数据以某种“最优”形式叠加匹

配在一起的过程。在此过程中,“浮动数据”的三维形态不变,仅改变空间位姿。三维点云数据“刚性配准”的核心算法包括普氏分析(Procrustes analysis, PA)算法<sup>[3]</sup>和迭代最近点(iterative closest point, ICP)算法<sup>[4]</sup>。PA算法基于不同数据集上具有一一对应关系的标志点对(由人为手动标记或特征提取和匹配等方式建立),计算空间变换矩阵,通过对“浮动数据”进行平移、旋转和整体缩放,最小化标志点对间的平方距离和(最小二乘法原理),从而实现“浮动数据”与“固定数据”间的尺寸归一化和对齐(图1A)。ICP算法则通过计算不同数据间的密集点对应关系(以数据间距离最近的点对作为此次计算的对应关系),计算空间变换矩阵,通过对“浮动数据”进行平移和旋转,最小化对应点间的平方距离和,实现“浮动数据”与“固定数据”间的配准。不断重复前述过程(每次迭代中,ICP算法都会基于当前的对应点重新计算空间变换矩阵,并更新“浮动数据”的位置),直到达到最大迭代次数或对应点间的平方距离和小于其设定阈值,获得最终的配准结果(图1B)。

### 1.2 “非刚性配准”的概念及算法实现

三维点云数据的“非刚性配准”是指通过计算2个三维数据集之间的密集点对应关系,进而为“浮动数据”(通常为一个结构化的三维点云模板数据)上的每个顶点施加不同的空间变换矩阵,将“浮动数据”变形匹配至“固定数据”的过程(图2)。在此过程中,“浮动数据”不仅改变了空间位姿,其三维形态也发生了趋近于“固定数据”三维形态的三维形变。针对三维点云数据,“非刚性配准”需要解决2个问题:①计算三维数据集之间的密集点对应关系;②求解对应点之间的坐标变换矩阵。

目前,针对问题①主要有两种解决方式:一种以ICP算法为代表,通过计算三维点云数据间距离最近的点对作为对应关系,进而求解数据间的坐标变换矩阵,例如非刚性迭代最近点(non-rigid iterative closest point, NICP)算法<sup>[5-6]</sup>;另一种则通过计算三维点云数据间点对的对应概率,建立概率矩阵作为对应关系,再求解数据间的坐标变换矩阵,例如一致性点漂移(coherent point drift, CPD)算法<sup>[7]</sup>。针对问题②有多种变换模型,局部仿射变换<sup>[5]</sup>:通过对“浮动数据”上的每个顶点施加不同的仿射变换矩阵(包含线性变换和平移向量),导致“浮动数据”发生局部三维形变,实现数据间的变形匹配;薄板样条(thin plate spline, TPS)函数<sup>[8]</sup>:TPS函数通常由仿



A: Flowchart of PA algorithm for "rigid registration" of 3D point cloud data. B: Flowchart of ICP algorithm for "rigid registration" of 3D point cloud data.

图1 三维点云数据“刚性配准”的流程示意图  
Figure 1 Flowchart of "rigid registration" for 3D point cloud data

射变换和非仿射变换两部分组成,基于物理模型中的薄板形变原理,通过最小化薄板的弯曲能量实现数据间的变形匹配;拉普拉斯变形(Laplace deformation)<sup>[9]</sup>:通过调整数据的微分坐标实现数据的变形效果,数据变形的同时仍保持局部细节特征;此外还有基于变形图、基于网格等的变换模型<sup>[10]</sup>。采用不同密集点对应关系的计算方式,结合不同的坐标变换模型,并进行不同的目标函数约束,都可实现“非刚性配准”效果。

## 2 “刚性配准”在口腔医学中的应用

“刚性配准”在口腔医学领域中已有广泛应用,是目前处理和分析口腔医学三维点云数据的主要技术手段。“刚性配准”在三维点云数据的对比分

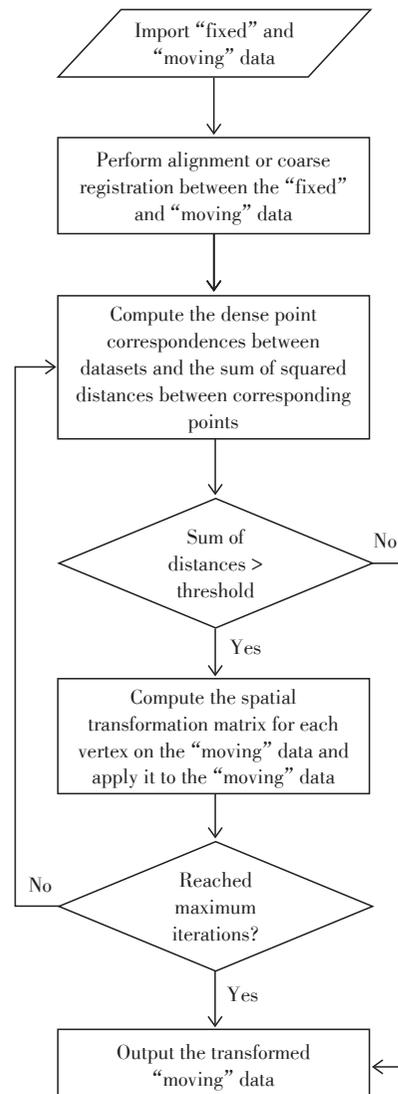
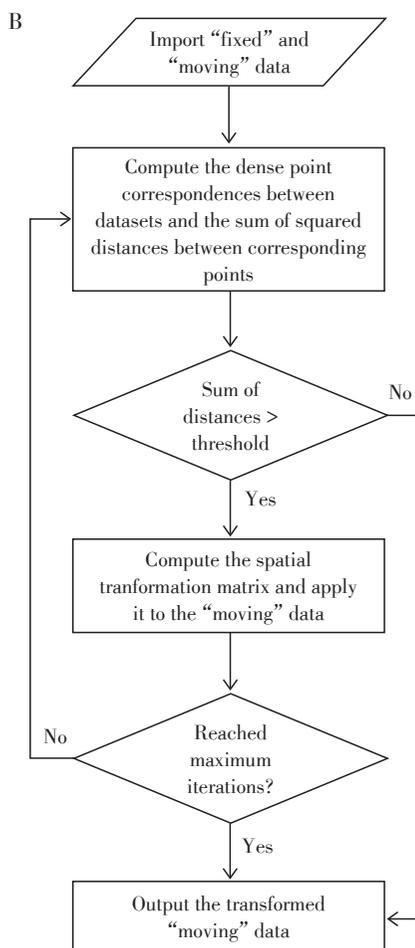


图2 三维点云数据“非刚性配准”的流程示意图  
Figure 2 Flowchart of "non - rigid registration" for 3D point cloud data

析、虚拟患者的构建、颅颌面正中矢状平面的构建以及颅颌面缺损修复的数字化设计等方面发挥了重要作用,具体如下。

### 2.1 三维点云数据的对比分析

三维点云数据的对比分析是指比较不同三维点云数据间的三维形状,从而分析不同数据间的三维形态差异,此过程需要不同数据间具有统一的空间坐标系。在口腔临床实践中,往往会涉及到采用不同设备、手段或在不同治疗阶段中获取患者的三维点云数据,这些数据通常处于不同的空间坐标系下,因此基于“刚性配准”统一不同数据间的坐标系是三维点云数据对比分析的重要前置环节。针对同一患者,通过对比不同三维扫描设备(颜面扫描设备、口内扫描设备、口外植体扫描设备等)获取的同类三维点云数据,可以评价扫描设备的扫描精度,为临床应用提供参考<sup>[11-13]</sup>;通过对比不同治疗阶段中获取的同类三维点云数据,可以对治疗方案、治疗效果进行可视化分析与数字化评价等<sup>[14-16]</sup>。此外通过三维点云数据的对比分析亦可对不同配准方法、不同三维打印设备等进行精度评价研究<sup>[17-19]</sup>。笔者团队针对同一名患者,以固定式三维颜面扫描设备采集的三维点云数据作为参考数据,以5种便携式三维颜面扫描设备(Space Spider、LEO、EVA、DS-FScan和iPhone X)采集的三维点云数据作为测试数据,基于“刚性配准”统一参考数据与测试数据间的空间坐标系后,对数据间进行整体和分区的对比分析。结果显示,参考数据与测试数据间的平均整体三维偏差均方根(root mean square, RMS)值分别为,Space Spider: 0.345 mm; LEO: 0.391 mm; EVA: 0.383 mm; DS-FScan: 0.334 mm; iPhone X: 0.483 mm,平均分区三维偏差RMS值分别为,Space Spider: 0.346 mm; LEO: 0.390 mm; EVA: 0.374 mm; DS-FScan: 0.329 mm; iPhone X: 0.497 mm<sup>[11]</sup>。研究评价了5种便携式三维颜面扫描设备获取三维点云数据的正确度,为便携式三维颜面扫描设备的临床应用提供了一定的指导意义。笔者团队针对建立的结构化类牙颌模型数据,采用多个三维打印设备(Objet30 Pro、Projet 3510 HD Plus、Perfactory DDP、DLP 800d、Form2和Form3)获取实体模型,以专用的类牙颌模型的数字化设计数据作为参考数据,以不同打印设备打印的实体模型的光学扫描数据作为测试数据,分析显示参考数据与测试数据间的整体三维偏差RMS值分别为,Objet30 Pro: 45  $\mu\text{m}$ ; Projet 3510 HD Plus: 64  $\mu\text{m}$ ; Perfactory DDP: 95  $\mu\text{m}$ ; DLP

800 d: 85  $\mu\text{m}$ ; Form2: 91  $\mu\text{m}$ ; Form3: 80  $\mu\text{m}$ <sup>[19]</sup>。研究评价了不同三维打印设备打印类牙颌模型的精度,为其临床应用提供了一定的参考。

### 2.2 虚拟患者的构建

在口腔医学领域中,虚拟患者通常由颌面部软硬组织的三维点云数据(颜面、颌骨、牙列等)构成,能够准确反映颌面部软硬组织的形态结构和空间位置关系,其在口腔医学领域的临床诊疗与教育教学中发挥了重要作用。基于口腔颌面锥形束CT(cone beam computer tomography, CBCT)设备获取的DICOM(digital imaging and communications in medicine)数据,通过三维重建技术可以获得颌面部软硬组织的三维点云数据,且这些数据具有统一的空间坐标系,能够反映软硬组织间的位置关系。但受限于设备扫描精度以及数据重建精度,不能精确反映软组织和牙列硬组织的三维形态结构,同时还缺乏纹理信息。基于三维光学扫描设备获取的三维点云数据(颜面数据、牙列数据等)能够较为真实地还原患者的三维形态结构,是构建虚拟患者的重要数据基础,但三维光学扫描设备获取的数据间缺乏统一的坐标系。因此,目前口腔医学领域在构建虚拟患者时通常以数字成像和通信(digital imaging and communications in medicine, DICOM)数据重建出的三维点云数据为媒介,基于“刚性配准”将光学扫描获取的数据分别重叠匹配到重建数据的相应区域,从而构建出高度仿真的虚拟患者<sup>[20-22]</sup>。此外,在三维虚拟患者的基础上,通过引入时间维度,结合动态咬合数据或动态颜面数据,还可构建出四维虚拟患者,进而助力于以美学和功能为导向的精准修复<sup>[20]</sup>。虚拟患者为口腔临床的精准诊断、治疗方案设计、治疗效果预测以及口腔医学生的虚拟仿真教学等提供了重要数据模型,其在口腔医学领域的应用具有巨大潜力,随着数字化技术的进一步发展,虚拟患者将成为口腔医学领域不可或缺的重要工具之一。

### 2.3 颅颌面正中矢状平面的构建

颅颌面正中矢状平面的构建是分析颅颌面对称性的前提和基础,也是数字化口腔美学修复设计、颅颌面外科手术设计和正畸矫治设计的重要参考依据,其构建精度直接影响着诊疗效果的准确性与可靠性。针对颅颌面三维点云数据,正中矢状平面通常基于数据上人工标记的重要解剖标志点构建,此过程的操作和实现相对简单,但对医生的主观经验有较高依赖性,构建正中矢状平面的可重复性欠佳。有学者提出基于“刚性配准”对三维颜面

点云数据和其左右镜像数据进行重叠,重叠后的联合数据在理论上具有完全的对称性,通过计算联合数据的正中矢状平面,从而确定原始三维颜面数据的正中矢状平面,该方法称为“本体-镜像关联法”。根据采用的“刚性配准”算法,“本体-镜像关联法”分为基于迭代最近点算法的ICP关联法<sup>[23-25]</sup>和基于普氏分析算法的PA关联法<sup>[26-27]</sup>。ICP关联法与PA关联法最大的区别在于前者通过迭代计算数据间的点对应关系进行数据重叠,后者则基于数据间具有明确对应关系的标志点进行数据重叠,两者的优缺点如表1所示。笔者团队通过在Matlab软件实现的专用PA算法程序,评价了PA关联法为三维颜面数据构建正中矢状平面的效果,验证了PA关联法具有良好的可行性和临床适用性<sup>[26-27]</sup>。后续笔者团

队基于权重分配策略提出了赋权普氏分析(weighted procrustes analysis, WPA)算法,并探索了多种赋权方式与赋权函数,优化了PA关联法为三维颜面点云数据构建正中矢状平面的效果,在一定程度上实现了对口腔临床专家诊断策略的“模拟”<sup>[28-31]</sup>。此外,笔者团队基于多视图堆叠沙漏神经网络实现了三维颜面解剖标志点的自动确定,基于自动确定的标志点和WPA算法为三维颜面点云数据构建正中矢状平面,提高了PA关联法的自动化程度,进一步提升了PA关联法的临床适用性<sup>[32]</sup>。上述研究中,基于WPA算法构建的正中矢状平面与真值平面(专家构建的正中矢状平面)间的角度误差均在2°以内,初步达到了口腔临床专家级诊断策略的效果。

表1 ICP关联法与PA关联法的优缺点

Table 1 Advantages and disadvantages of ICP-based and PA-based methods

Method	Advantages	Disadvantages
ICP-based method	Able to leverage the overall or local 3D morphological information of the data No manual landmark annotation required, low reliance on experience, and high degree of automation	Processes facial 3D morphological information uniformly, exhibiting limited adaptability to regions with deformities Depends on the initial alignment of the data and is susceptible to convergence to local minima
PA-based method	Able to leverage key landmark information Expert experience is introduced through manual landmark annotation, and excluding unreliable landmark points enhances clinical suitability	Disregards the local 3D morphological information surrounding the landmarks Highly reliant on expert experience, with limited reproducibility and decreased automation

#### 2.4 颅颌面缺损修复的数字化设计

在口腔临床诊疗中,因先天缺损、肿瘤切除、外伤等原因均可造成患者颅颌面部三维形态的缺损,针对此类患者的三维颅颌面点云数据,补全或重建出其缺损的三维形态对于患者的修复治疗设计与康复治疗效果具有重要临床意义。根据不同的颅颌面缺损类型,目前主要采用“镜像法”<sup>[33-35]</sup>和“数据库法”<sup>[36-38]</sup>进行三维颅颌面点云数据缺损形态的数字化设计。“镜像法”主要用于患者颅颌面部的单侧缺损,基于颅颌面部的天然对称性,通过正中矢状平面将患者健侧的三维形态镜像翻转至患侧,结合“刚性配准”进一步调整患者数据与镜像数据间的空间位置,从而基于健侧数据设计出患侧缺损的三维形态。当患者颅颌面部的缺损跨面中线时,无法采用“镜像法”进行缺损形态的数字化设计。通过大量采集或重建正常人的三维颅颌面点云数据,建立相应的三维点云数据库,并在数据库中基于参数或配准技术选取最接近患者颅颌面三维形态的数

据作为参考数据,使用“刚性配准”统一患者数据与参考数据间的空间坐标系后,再对参考数据的尺寸和形态进行一定的手动调整,从而基于此参考数据设计出患处缺损的三维形态。“镜像法”和“数据库法”在颅颌面缺损患者的数字化修复设计与治疗中发挥了重要作用,已成为口腔临床中的一种重要技术手段。

#### 3 “非刚性配准”在口腔医学中的应用

随着三维颅颌面点云数据在口腔医学领域的广泛应用,口腔医生对临床三维数据的处理分析要求越来越高,某些情况下(数据间的三维形态结构差异较大)“刚性配准”已无法充分满足数据的处理分析需求。近年来,有学者将“非刚性配准”应用于口腔医学领域,其在三维颅颌面点云数据的结构化处理、形态学分析、标志点特征构建和形态补全等方面展现出了一定的应用潜力,具有良好的应用前景,具体如下。

### 3.1 三维点云数据的结构化处理

三维颅颌面点云数据具有丰富的三维形态信息,可以较为真实地还原患者的颅颌面形态。但通过光学扫描或由CBCT数据三维重建出的不同三维点云数据之间,不仅缺乏统一的空间坐标系,还缺乏统一的数据结构,即其顶点数、网格数、网格拓扑关系等均不同,因此无法在不同数据之间建立起对应关系,导致不能充分利用不同三维点云数据间的三维形态信息。而通过“非刚性配准”对三维模板数据(结构化的三维点云数据,即有序点云数据)的变形匹配,可在不同三维点云数据间建立起密集的对对应关系,获得由相同数据结构表达不同三维形态的同源数据集,进而充分分析和利用三维颅颌面点云数据的形态信息。有学者通过建立健康婴儿三维颅骨点云数据的同源数据集,对婴儿的颅骨形态进行主成分分析,分析了影响婴儿颅骨形态的主要因素<sup>[39]</sup>;通过建立不同三维颜面点云数据的同源数据集,构建了三维可变形人脸模型,对人脸三维形态进行参数化表达,通过不同的参数组合可生成随机的三维人脸形态<sup>[40-42]</sup>;通过建立不同面部表情下(中性表情、笑、张口等)三维颜面数据的同源数据,实现不同面部表情间的形态过渡,辅助鼻膈复体形态的数字化设计等<sup>[43]</sup>。笔者团队通过建立不同三维颜面点云数据的同源数据集,基于图卷积神经网络和变分自动编码器建立适用于颜面缺损点云数据形态补全的深度学习模型FMGen-Net,为颜面缺损形态的数字化设计提供了新的解决方案<sup>[44]</sup>。

### 3.2 基于结构化三维点云数据的形态学分析

如前所述,统一不同三维点云数据间的空间坐标系是进行数据间形态学分析的重要前提和基础。同一患者在治疗前后或不同患者的三维颅颌面点云数据间的形态差异较大时,不仅会影响“刚性配准”的数据重叠效果,同时数据重叠后,在形态差异较大的区域还缺乏具有解剖学意义的准确对应关系。而“非刚性配准”可基于模板数据在不同三维形态间建立起准确的、具有解剖学意义的密集点对应关系,从而对数据间的形态差异进行更有临床意义的分析。有学者通过将同一模板数据变形匹配到患者的颅颌面数据上,基于模板变形后数据及其镜像数据间的密集点对应关系,分析颅颌面部的不对称性<sup>[45-47]</sup>;通过将同一模板数据分别变形匹配到健康受试者和患者的颜面数据上,分析两者间的形态差异,辅助临床疾病诊断<sup>[48]</sup>;通过将同一模板数据分别变形匹配到

同一患者治疗前后的颜面数据上,从而对治疗效果进行评价分析<sup>[49]</sup>;通过将同一模板数据分别变形匹配到父亲与子女的颜面数据上,探究亲子间面部遗传性的特点<sup>[50]</sup>。“非刚性配准”技术在三维颅颌面点云数据形态学分析方面的应用有助于提高口腔临床数字化诊疗的准确性,实现更具个性化的治疗规划与疗效评估。

### 3.3 基于结构化三维点云数据的特征构建

基于三维解剖标志点测量颅颌面的特征尺寸与角度、分析颅颌面的对称性、构建颅颌面的正中矢状平面等,是口腔医学领域进行数字化诊疗分析的重要基础。目前在三维颅颌面点云数据上确定解剖标志点特征仍以专家手动标记为主,虽然人工标记易于实现,但对医生的诊疗经验有一定依赖性,可重复性欠佳,不利于基层临床的普及推广,因此解剖标志点特征的自动构建具有重要意义。借助“非刚性配准”的变形匹配效果,通过在三维模板数据上标记解剖标志点或选取其上具有解剖意义的顶点,将模板数据变形匹配至目标数据后,通过对模板变形后数据上的标志点进行转移或对模板变形后数据上的相应顶点进行三维坐标提取,即可实现三维颅颌面点云数据解剖标志点特征的自动构建<sup>[51-56]</sup>。笔者团队通过采集无显著畸形患者的三维颅颌面点云数据,构建了具有国人三维解剖形态特征的模板数据(包括人脸模板、下颌骨模板、上颌骨模板),并在相应模板数据上选取、记录了能代表解剖特征的顶点及其索引信息。基于模板数据和文献报道的非刚性配准程序MeshMonk,笔者团队提出了“模板法”用于三维颅颌面点云数据解剖标志点特征的自动构建,同时以人工标记的标志点为金标准,通过计算“模板法”自动定点与金标准间的距离作为定点误差,评价了“模板法”的定点精度<sup>[53, 55-56]</sup>。初步结果显示,“模板法”针对无显著畸形的三维颜面数据、三维下颌骨数据和三维上颌骨数据的平均定点误差均在2 mm以内。此外,笔者团队还自主研发了非刚性配准算法TH-OCR,并对比评价了TH-OCR算法和MeshMonk程序通过“模板法”为20例三维颜面数据进行自动定点的精度。结果显示,针对32个三维颜面解剖标志点,TH-OCR算法的平均定点误差为(2.34±1.76)mm,MeshMonk程序的平均定点误差为(2.16±1.97)mm,两者的定点精度均可初步满足口腔临床的应用需求,表明“模板法”在口腔临床的数字化诊疗分析中具有一定的可行性和临床适合性<sup>[54]</sup>。

### 3.4 三维点云数据的形态补全

#### 3.4.1 基于非结构化处理数据的形态补全

针对颅颌面缺损患者的三维点云数据,使用“镜像法”和“数据库法”可在一定程度上满足缺损形态的数字化设计需求,但需辅助一定的人工手动调整才能获得较为满意的形态设计效果。前述过程的自动化程度和效率较低,且需要医生具有足够的软件操作能力与技巧,无法充分满足临床应用需求。为提升数据调整的自动化程度,优化“镜像法”和“数据库法”的缺损补全效果,可将“镜像法”和“数据库法”与“非刚性配准”相结合,将镜像数据或数据库检出的数据变形匹配至缺损数据上,从而进行形态补全。有学者在为鼻缺损患者设计赝复形态时,先从数据库中检索出合适的颜面数据,将其与鼻缺损数据进行全局“刚性配准”后,应用“非刚性配准”将其匹配至鼻缺损数据上,实现对数据库检出数据的调整<sup>[57]</sup>。结果表明,结合“数据库法”与“非刚性配准”,可获得边缘适合、符合美学要求的鼻缺损补全数据。前述方法不仅降低了“数据库法”对医生经验的依赖性,也体现了“刚性配准”和“非刚性配准”结合应用、优势互补的价值。

#### 3.4.2 基于结构化处理数据的形态补全

通过构建具有一定形态代表性的模板数据,使用“非刚性配准”将其变形匹配至颅颌面缺损数据上,模板变形后数据与缺损数据间具有统一的空间坐标系。同时,与缺损数据非缺损区对应的部分,模板变形后数据具有接近缺损数据的三维形态;与缺损数据缺损区对应的部分,模板变形后数据仍保留了原始模板数据的三维形态,因此可以基于模板变形后数据完成颅颌面缺损数据的形态补全,实现颅颌面缺损形态的数字化设计<sup>[9,58-59]</sup>。笔者团队基于构建的三维人脸模板和文献报道的 MeshMonk 程序,提出了一种针对外鼻缺损的三维形态补全方法,采用此方法为20例人工构建的外鼻缺损三维颜面数据进行了形态补全,并通过角度、线距比例、修复边缘曲线偏差以及关键标志点距离等指标评价了该方法的效果。结果显示,补全数据的鼻面角和鼻唇角与原始数据无显著差异,鼻面比例关系接近理想鼻面比值,补全数据的边缘曲线偏差平均为 $(0.37\pm 0.09)$ mm,关键标志点与原始数据间的距离平均在2 mm左右,初步证明该方法具有较好的可行性<sup>[59]</sup>。笔者团队还自主研发了非刚性配准算法 PA-NICP,并对比分析了 PA-NICP 算法和 MeshMonk 程序为30例人工构建的全鼻缺损数据构建鼻

赝复形态的效果。结果显示,在“形态偏差”(鼻赝复形态与原始数据鼻部形态间的三维偏差 RMS 值)方面,PA-NICP 算法为 $(1.51\pm 0.45)$ mm,MeshMonk 程序为 $(1.34\pm 0.31)$ mm;在“边缘密合性”(鼻赝复形态边缘与鼻缺损数据缺损边缘间的曲线偏差 RMS 值)方面,PA-NICP 算法为 $(0.22\pm 0.05)$ mm,MeshMonk 程序为 $(0.38\pm 0.09)$ mm;在“移行”(鼻赝复形态边缘两侧相邻曲面的相切连续曲面百分比)方面,PA-NICP 算法为95.47%,MeshMonk 程序为92.20%,证明 PA-NICP 算法和 MeshMonk 程序均能实现鼻赝复形态的快速构建,并具有良好的临床适用性<sup>[60]</sup>。此外,笔者团队还构建了具有不同鼻形态的三维人脸模板数据库,能为鼻赝复形态的构建提供多种鼻形态选择,进一步满足了鼻缺损患者的个性化赝复需求<sup>[61]</sup>。前述研究表明,通过“非刚性配准”的变形匹配,可实现模板数据与缺损数据间空间位置和三维形态的自动调整,在一定程度上避免了人工手动调整“移行”,有望实现颅颌面缺损形态的自动、高效数字化设计。

## 4 总结与展望

综上,“刚性配准”和“非刚性配准”技术在三维颅颌面点云数据的处理、分析中发挥重要作用,为口腔医学的数字化精准诊断、个性化治疗方案设计与疗效的精确量化分析提供了关键技术手段,越来越受到口腔临床医师的关注。针对三维颅颌面点云数据的处理分析,“刚性配准”和“非刚性配准”的优势、局限性及应用场景如表2所示。

总的来说,“刚性配准”适用于形态稳定或形变较小的数据,其配准效率高,在口腔临床中应用广泛。但其也具有以下局限性:对于颅颌面畸形、缺损患者的三维点云数据,“刚性配准”将其与形态正常、完整的数据进行配准的效果欠佳;对于不同设备来源的多模态数据,“刚性配准”进行数据融合构建虚拟患者的效果受数据精度差异影响较大;对于形态差异明显的数据,“刚性配准”可能会导致数据间解剖形态的错误匹配等。针对前述问题,需要提高“刚性配准”在不同类型数据中应用的普适性与鲁棒性,增强其对噪声、畸形、缺损数据等的适应能力,以满足更多临床场景的需求。同时,人工智能(artificial intelligence, AI)技术在口腔医学领域中的应用也取得了显著进展, AI 技术能通过深度特征学习实现数据特征的自动提取、筛选与匹配,提高“刚性配准”的自动化程度;亦能通过端到端模

表2 “刚性配准”与“非刚性配准”的对比  
Table 2 Comparison between “rigid registration” and “non-rigid registration”

Registration	Advantages	Limitations	Application Scenarios
Rigid registration	Offers high computational efficiency, features a simple algorithm, and is easy to implement. Requires few parameters, produces stable outcomes, and is suitable for datasets with minor deformations, such as the mandible.	The registration performance is susceptible to factors such as deformities, defects, and the precision of the data. Unable to accommodate tissue deformation.	Data comparison and analysis Construct virtual patient Establishment of symmetry plane Defect repair design
Non-rigid registration	The algorithm is flexible and offers a high degree of freedom. Able to accommodate deformations of anatomical structures, making it suitable for soft tissue datasets.	The method is computationally intensive and time-consuming, and it requires an adequate initial spatial alignment between the datasets. Lacks sufficient personalization in the completion of missing data.	Construct structured data Morphological analysis of data Build data features Completion of missing data

型直接输出数据间的变换矩阵,避免多次迭代优化等,助力于“刚性配准”在口腔临床的应用。此外,通过数据采集设备的创新研发,数据重建与“刚性配准”技术的优化完善,未来或可实现数据的超分辨率重建与全自动配准,从而突破虚拟患者构建面临的难题。

“非刚性配准”可用于处理形变复杂的数据,其在口腔临床三维点云数据的处理分析中具有良好的应用潜力与前景,但其也具有一定局限性。对于顶点数量庞大、结构复杂的数据,“非刚性配准”的计算量大幅增加,导致配准效率有限;对于颅颌面缺损数据,“非刚性配准”形态补全效果的个性化程度不足<sup>[59]</sup>,如将同一三维人脸模板变形匹配到不同的鼻缺损数据上,获得的鼻膈复形态主要继承于模板的鼻部形态;针对形变较大或畸形患者的三维点云数据,“非刚性配准”过程中存在着密集点对应关系计算不精确的问题,导致后续变形匹配不到位,可能会影响口腔临床数字化诊疗设计的效果等。针对前述问题,需要优化“非刚性配准”的算法结构和算法策略,缩短计算时间,提高配准效率;优化点对应关系的寻找逻辑,提升配准的准确性;构建新的算法约束项,提升配准的个性化程度等。此外,还可结合AI技术提升“非刚性配准”的临床应用效果。AI技术能有效分析数据的拓扑结构,预测顶点的位移变化,从而处理复杂形变,有助于提升“非刚性配准”的精度和效率。

随着数字化技术的进一步发展及普及,三维颅颌面点云数据在口腔医学领域的应用也会愈加广泛,“刚性配准”和“非刚性配准”技术的应用需求也

会相应增加。相信“刚性配准”和“非刚性配准”技术在进一步的拓展和深化下,能更好的应用于口腔医学领域的临床实践与科学研究。

#### 利益冲突声明:

所有作者声明无利益冲突。

#### Conflict of Interests:

All authors declare no conflict of interest.

#### 作者贡献声明:

温奥楠负责文献收集与整理、初稿撰写;赵一姣负责文献查阅、指导文章撰写;王勇负责研究设计、文章撰写、对文章知识性内容进行审阅。

#### Author's Contributions:

WEN Aonan was responsible for literature collection and arrangement, drafting the manuscript; ZHAO Yijiao was responsible for literature review, guiding manuscript writing; WANG Yong was responsible for study design, manuscript writing, and review of the intellectual content of the manuscript.

#### [参考文献]

- [1] 赵一姣,王 勇. 口腔医学三维数据分析相关术语再谈[J]. 中国实用口腔科杂志, 2024, 17(4): 401-405  
ZHAO Y J, WANG Y. Further discussion on terminologies related to three-dimensional data analysis in oral medicine [J]. Chinese Journal of Practical Stomatology, 2024, 17(4): 401-405
- [2] 赵一姣,王 勇. 数字化技术在口腔医学的临床应用现状与分析[J]. 四川大学学报(医学版), 2024, 55(1): 101-110  
ZHAO Y J, WANG Y. Current status and analysis of the clinical application of digital technology in oral medicine [J]. Journal of Sichuan University (Medical Sciences), 2024, 55(1): 101-110

- [3] GOWER J G. Procrustes analysis[M]//International Encyclopedia of the Social & Behavioral Sciences. Amsterdam: Elsevier, 2001: 12141-12143
- [4] BESL P J, MCKAY N D. A method for registration of 3-D shapes[J]. IEEE Trans Pattern Anal Mach Intell, 1992, 14(2): 239-256
- [5] AMBERG B, ROMDHANI S, VETTER T. Optimal step nonrigid ICP algorithms for surface registration[C]//2007 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Minneapolis, MN, USA. IEEE, 2007: 1-8
- [6] LIANG L M, WEI M Q, SZYMCAK A, et al. Nonrigid iterative closest points for registration of 3D biomedical surfaces[J]. Opt Lasers Eng, 2018, 100: 141-154
- [7] MYRONENKO A, SONG X B. Point set registration: coherent point drift[J]. IEEE Trans Pattern Anal Mach Intell, 2010, 32(12): 2262-2275
- [8] CHUI H L, RANGARAJAN A. A new point matching algorithm for non-rigid registration[J]. Comput Vis Image Underst, 2003, 89(2/3): 114-141
- [9] XIE S D, LEOW W K, LIM T C. Laplacian deformation with symmetry constraints for reconstruction of defective skulls[C]//Computer Analysis of Images and Patterns. Cham: Springer, 2017: 24-35
- [10] DENG B L, YAO Y X, DYKE R M, et al. A survey of non-rigid 3D registration[J]. Comput Graph Forum, 2022, 41(2): 559-589
- [11] 温奥楠, 刘 微, 柳大为, 等. 5种椅旁三维颜面扫描技术正确度的初步评价[J]. 北京大学学报(医学版), 2023, 55(2): 343-350
- WEN A N, LIU W, LIU D W, et al. Preliminary evaluation of the trueness of 5 chairside 3D facial scanning techniques[J]. Journal of Peking University (Health Sciences), 2023, 55(2): 343-350
- [12] POZZI A, CAROSI P, GALLUCCI G O, et al. Accuracy of complete - arch digital implant impression with intraoral optical scanning and stereophotogrammetry: an *in vivo* prospective comparative study [J]. Clin Oral Implants Res, 2023, 34(10): 1106-1117
- [13] CHENG J, ZHANG H D, LIU H L, et al. Accuracy of edentulous full-arch implant impression: an *in vitro* comparison between conventional impression, intraoral scan with and without splinting, and photogrammetry[J]. Clin Oral Implants Res, 2024, 35(5): 560-572
- [14] FAN Y, HUANG M W, ZHAO Y J, et al. Radioactive seed migration following parotid gland interstitial brachytherapy [J]. Brachytherapy, 2017, 16(6): 1219-1224
- [15] 侯瑜琳, 赵一姣, 王 勇, 等. 基于数字化技术的正畸诊断性排牙中牙根位置初探[J]. 中华口腔医学杂志, 2015, 50(10): 631-635
- HOU Y L, ZHAO Y J, WANG Y, et al. A pilot study of root position in orthodontic diagnosis model set-up [J]. Chinese Journal of Stomatology, 2015(10): 631-635
- [16] 游 浪, 邓珂慧, 李伟伟, 等. 无牙颌患者鼻唇角变化侧面观的视觉敏感阈值[J]. 北京大学学报(医学版), 2020, 52(1): 107-112
- YOU L, DENG K H, LI W W, et al. Visual sensitivity threshold of lateral view of nasolabial Angle changes in edentulous jaw patients[J]. Journal of Peking University (Health Sciences), 2020, 52(1): 107-112
- [17] 刘明丽, 黎小桐, 王建敏, 等. 无牙颌印模不同配准方法的对比研究[J]. 口腔医学研究, 2022, 38(12): 1171-1176
- LIU M L, LI X T, WANG J M, et al. Comparison of Different Registration Methods for Impressions of Edentulous Jaw[J]. Journal of Oral Science Research, 2022, 38(12): 1171-1176
- [18] 国丹妮, 潘韶霞, 衡墨笛, 等. 应用于无牙颌种植修复设计的三维面部扫描配准方法的对比[J]. 北京大学学报(医学版), 2021, 53(1): 83-87
- GUO D N, PAN S X, HENG M D, et al. Comparison of the registration methods for the three - dimensional facial scans applied to the design of full-arch implant supported restoration [J]. Journal of Peking University (Health Sciences), 2021, 53(1): 83-87
- [19] WEN A N, XIAO N, ZHU Y J, et al. Spatial trueness evaluation of 3D-printed dental model made of photopolymer resin: use of special structurized dental model [J]. Polymers, 2024, 16(8): 1083
- [20] 沈颀飞. 口腔修复诊疗中构建虚拟患者的机遇与挑战[J]. 华西口腔医学杂志, 2024, 42(1): 1-11
- SHEN J F. The chance and challenge of creating virtual patients in prosthodontics [J]. West China Journal of Stomatology, 2024, 42(1): 1-11
- [21] 陈金妍, 张 筠, 吴轶群, 等. 虚拟患者构建在口腔种植中应用的现状[J]. 中国口腔种植学杂志, 2023, 28(6): 473-477
- CHEN J Y, ZHANG Y, WU Y Q, et al. Current status of virtual patient construction in implant dentistry [J]. Chinese Journal of Oral Implantology, 2023, 28(6): 473-477
- [22] MANGANO C, LUONGO F, MIGLIARIO M, et al. Combining intraoral scans, cone beam computed tomography and face scans: the virtual patient [J]. J Craniofac Surg, 2018, 29(8): 2241-2246
- [23] ALQATTAN M, DJORDJEVIC J, ZHUROV A I, et al. Comparison between landmark and surface-based three-dimensional analyses of facial asymmetry in adults [J]. Eur J Orthod, 2015, 37(1): 1-12
- [24] 刘筱菁, 李倩倩, 王晓霞, 等. 基于本体-镜像关联的三

- 维头颅正中矢状面自动构建法[J]. 中华口腔正畸学杂志, 2014, 21(3): 148-150
- LIU X J, LI Q Q, WANG X X, et al. Automatic constructed MSP of 3D skull based on original-mirror alignment [J]. Chinese Journal of Orthodontics, 2014, 21(3): 148-150
- [25] WILLING R T, ROUMELIOTIS G, JENKYN T R, et al. Development and evaluation of a semi-automatic technique for determining the bilateral symmetry plane of the facial skeleton[J]. Med Eng Phys, 2013, 35(12): 1843-1849
- [26] XIONG Y X, ZHAO Y J, YANG H F, et al. Comparison between interactive closest point and Procrustes analysis for determining the Median sagittal plane of three-dimensional facial data[J]. J Craniofac Surg, 2016, 27(2): 441-444
- [27] 熊玉雪, 杨慧芳, 赵一姣, 等. 两种评价面部三维表面数据不对称度方法的比较[J]. 北京大学学报(医学版), 2015, 47(2): 340-343
- XIONG Y X, YANG H F, ZHAO Y J, et al. Comparison of two kinds of methods evaluating the degree of facial asymmetry by three-dimensional data [J]. Journal of Peking University(Health Sciences), 2015, 47(2): 340-343
- [28] ZHU Y J, FU X L, ZHANG L, et al. A mathematical algorithm of the facial symmetry plane: Application to mandibular deformity 3D facial data[J]. J Anat, 2022, 240(3): 556-566
- [29] ZHU Y J, ZHENG S W, YANG G S, et al. A novel method for 3D face symmetry reference plane based on weighted Procrustes analysis algorithm [J]. BMC Oral Health, 2020, 20(1): 319
- [30] ZHU Y J, WEN A N, XIAO N, et al. Automatic extraction of facial Median sagittal plane for patients with asymmetry based on the EDMA alignment algorithm [J]. Head Face Med, 2024, 20(1): 34
- [31] 朱玉佳, 赵一姣, 郑盛文, 等. 基于赋权形态学分析的三维面部对称参考平面构建方法[J]. 北京大学学报(医学版), 2021, 53(1): 220-226
- ZHU Y J, ZHAO Y J, ZHENG S W, et al. A method for constructing three-dimensional face symmetry reference plane based on weighted shape analysis algorithm [J]. Journal of Peking University(Health Sciences), 2021, 53(1): 220-226
- [32] 朱玉佳, 许 晴, 赵一姣, 等. 深度学习算法辅助构建三维颜面正中矢状平面[J]. 北京大学学报(医学版), 2022, 54(1): 134-139
- ZHU Y J, XU Q, ZHAO Y J, et al. Deep learning-assisted construction of three-dimensional facial midsagittal plane [J]. Journal of Peking University(Health Sciences), 2022, 54(1): 134-139
- [33] YOU P, LIU Y C, SILVA R C. Fabrication of 3D models for Microtia Reconstruction using smartphone-based technology [J]. Ann Otol Rhinol Laryngol, 2022, 131(4): 373-378
- [34] BOCKEY S, BERSSENBRÜGGE P, DIRKSEN D, et al. Computer-aided design of facial prostheses by means of 3D-data acquisition and following symmetry analysis [J]. J Craniofac Surg, 2018, 46(8): 1320-1328
- [35] BALLO A M, NGUYEN C T, LEE V S K. Digital workflow of auricular rehabilitation: a technical report using an intraoral scanner[J]. J Prosthodont, 2019, 28(5): 596-600
- [36] PALOUSEK D, ROSICKY J, KOUTNY D. Use of digital technologies for nasal prosthesis manufacturing [J]. Prosthet Orthot Int, 2014, 38(2): 171-175
- [37] REITEMEIER B, GÖTZEL B, SCHÖNE C, et al. Creation and utilization of a digital database for nasal prosthesis models[J]. Onkologie, 2013, 36(1/2): 7-11
- [38] FANTINI M, DE CRESCENZIO F, CIOCCA L. Design and Rapid Manufacturing of anatomical prosthesis for facial rehabilitation [J]. Int J Interact Des Manuf Ijidem, 2013, 7(1): 51-62
- [39] KUWAHARA K, HIKOSAKA M, KANEKO T, et al. Analysis of cranial morphology of healthy infants using homologous modeling[J]. J Craniofac Surg, 2019, 30(1): 33-38
- [40] PAYSAN P, KNOTHE R, AMBERG B, et al. A 3D face model for pose and illumination invariant face recognition [C]//2009 Sixth IEEE International Conference on Advanced Video and Signal Based Surveillance. Genova, Italy. IEEE, 2009: 296-301
- [41] JABLONSKI R Y, MALHOTRA T, COWARD T J, et al. Digital database for nasal prosthesis design with a 3D morphable face model approach [J]. J Prosthet Dent, 2024, 131(6): 1271-1275
- [42] JABLONSKI R Y, MALHOTRA T, SHAW D, et al. Comparison of trueness and repeatability of facial prosthesis design using a 3D morphable model approach, traditional computer-aided design methods, and conventional manual sculpting techniques [J]. J Prosthet Dent, 2025, 133(2): 598-607
- [43] MATSUOKA A, YOSHIOKA F, OZAWA S, et al. Development of three-dimensional facial expression models using morphing methods for fabricating facial prostheses [J]. J Prosthodont Res, 2019, 63(1): 66-72
- [44] QIN Q Z, LI Y L, WEN A N, et al. Three-dimensional virtual reconstruction of external nasal defects based on facial mesh generation network [J]. Diagnostics, 2024, 14(6): 603
- [45] EKRAMI O, CLAES P, WHITE J D, et al. Measuring asymmetry from high-density 3D surface scans: an appli-

- cation to human faces [J]. *PLoS One*, 2018, 13 (12) : e0207895
- [46] FAN Y, ZHANG Y G, CHEN G, et al. Automated assessment of mandibular shape asymmetry in 3-dimensions[J]. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*, 2022, 161 (5) : 698-707
- [47] FAN Y, HE W, CHEN G, et al. Facial asymmetry assessment in skeletal Class III patients with spatially-dense geometric morphometrics[J]. *Eur J Orthod*, 2022, 44(2) : 155-162
- [48] KUNG S, WALTERS M, CLAES P, et al. A dysmorphic analysis to investigate facial phenotypic signatures as a foundation for non-invasive monitoring of lysosomal storage disorders[M]//*JIMD Reports - Case and Research Reports*, 2012/5. Berlin, Heidelberg; Springer, 2012: 31-39
- [49] CLAES P, WALTERS M, CLEMENT J. Improved facial outcome assessment using a 3D anthropometric mask[J]. *Int J Oral Maxillofac Surg*, 2012, 41(3) : 324-330
- [50] HOSKENS H, LI J R, INDENCLEEF K, et al. Spatially dense 3D facial heritability and modules of co-heritability in a father-offspring design[J]. *Front Genet*, 2018, 9: 554
- [51] WHITE J D, ORTEGA - CASTRILLÓN A, MATTHEWS H, et al. MeshMonk: Open-source large-scale intensive 3D phenotyping[J]. *Sci Rep*, 2019, 9(1) : 6085
- [52] BERMEJO E, TANIGUCHI K, OGAWA Y, et al. Automatic landmark annotation in 3D surface scans of skulls: Methodological proposal and reliability study[J]. *Comput Meth Programs Biomed*, 2021, 210: 106380
- [53] 温奥楠, 朱玉佳, 郑盛文, 等. 基于三维人脸模板的颜面解剖标志点自动定点方法初探[J]. *中华口腔医学杂志*, 2022, 57(4) : 358-365
- WEN A N, ZHU Y J, ZHENG S W, et al. Preliminary study on the method of automatically determining facial landmarks based on three-dimensional face template[J]. *Chinese Journal of Stomatology*, 2022, 57(4) : 358-365
- [54] WEN A N, ZHU Y J, XIAO N, et al. Comparison study of extraction accuracy of 3D facial anatomical landmarks based on non-rigid registration of face template[J]. *Diagnosics(Basel)*, 2023, 13(6) : 1086
- [55] 高梓翔, 王 勇, 温奥楠, 等. 基于三维下颌骨平均模型的颌骨标志点自动确定方法[J]. *北京大学学报(医学版)*, 2023, 55(1) : 174-180
- GAO Z X, WANG Y, WEN A N, et al. Automatic determination of mandibular landmarks based on three-dimensional mandibular average model [J]. *Journal of Peking University(Health Sciences)*, 2023, 55(1) : 174-180
- [56] 高梓翔, 王 晶, 温奥楠, 等. 基于非刚性配准算法的上颌骨复合体三维数据自动定点研究[J]. *中华口腔医学杂志*, 2023, 58(6) : 554-560
- GAO Z X, WANG J, WEN A N, et al. Study on the method of automatically determining maxillary complex landmarks based on non-rigid registration algorithms[J]. *Chinese Journal of Stomatology*, 2023, 58(6) : 554-560
- [57] SUN J, CHEN X B, LIAO H H, et al. Template-based framework for nasal prosthesis fabrication[J]. *Rapid Prototyp J*, 2013, 19(2) : 68-76
- [58] XIE S D, LEOW W K, LEE H J, et al. Flip-avoiding interpolating surface registration for skull reconstruction [J]. *Int J Med Robot*, 2018, 14(4) : e1906
- [59] 温奥楠, 王 勇, 叶红强, 等. 基于三维人脸模板的外鼻缺损三维形态补全方法初探[J]. *中华口腔医学杂志*, 2023, 58(5) : 414-421
- WEN A N, WANG Y, YE H Q, et al. Preliminary study on three-dimensional morphological reconstruction method for external nose defect based on three-dimensional face template [J]. *Chinese Journal of Stomatology*, 2023, 58(5) : 414-421
- [60] WEN A N, ZHANG X H, WANG Y J, et al. Constructing nasal prosthesis morphological data based on a nonrigid registration algorithm [J]. *J Prosthet Dent*, 2025, 134(3) : 864e1-864e8
- [61] WEN A N, ZHANG X H, ZHU Y J, et al. Establishment of a three-dimensional face template dataset with different nasal morphologies and its application in fabricating nasal defect prostheses[J]. *J Dent*, 2025, 159: 105834

[收稿日期] 2025-06-09

(本文编辑: 戴王娟)