

分类号: TP391.9

密 级: 公开

学校代码: 10363

学 号: 2210920109



安徽工程大学

Anhui Polytechnic University

硕士学位论文

题目 基于结构光的困难气道三维建
模与评估系统设计

论 文 作 者 黄天齐

校 内 导 师 严楠 教授

校 外 导 师 姚卫东 副教授

专业学位类别 计算机技术

研究方向(领域) 智能数据分析和知识提取

论文提交日期: 2024 年 5 月 23 日

分类号: TP391.9
密 级: 公开

单位代码: 10363
学 号: 2210920109

题 目 基于结构光的困难气道三维建模与评估系统设计

英文并列

题 目 DESIGN OF 3D MODELING AND EVALUATION SYSTEM FOR
DIFFICULT AIRWAY BASED ON STRUCTURED LIGHT

学 生 姓 名: 黄天齐

校 内 教 师: 严楠(教授)

校 外 教 师: 姚卫东(副教授)

专业 学位 类别: 计算机技术

研究方向 (领域): 智能数据分析和知识提取

论文答辩日期: 2024 年 5 月 24 日

安徽工程大学学位论文原创性声明

本人郑重声明：我恪守学术道德，崇尚严谨学风。所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除文中已明确注明和引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品及成果的内容。论文为本人亲自撰写，我对所写的内容负责，并完全意识到本声明的法律后果由本人承担。

学位论文作者签名：黄天齐

日期：2024年5月24日

安徽工程大学学位论文版权使用授权书

学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，同意学校保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅或借阅。本人授权安徽工程大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。

保密 ☐，在_____年解密后适用本版权书。

本学位论文属于

不保密 ☒。

学位论文作者签名：黄天齐

日期：2024年5月24日

指导教师签名：张东

日期：2024年5月24日

基于结构光的困难气道三维建模与评估系统设计

摘 要

困难气道是指在进行气道管理或维持通气时遇到困难或无法顺利通过气道的情况，精确的术前评估可有效减少未预料的困难气道，以及其引发的一系列潜在风险和挑战。现有困难气道的评估方案是麻醉医生通过对患者的病史询问和体格检查进行人工判定气道的困难程度，存在的缺点是主观，缺乏准确性和可靠性，严重依赖于麻醉医生的主观经验和技能。

该文在无法直接观测患者气道的前提下，为了提高困难气道评估的准确率，减少对麻醉医生经验的依赖，设计了一套通过对面颈部进行精准建模，进而测量气道评估参数，从而实现困难气道评估的系统。在评估困难气道的同时，还可提示出现困难气道的潜在原因，实现了评估困难气道的标准化流程，降低了评估的主观性。该文的研究内容和创新点主要包括以下方面：

- 1.搭建点云采集平台。该文针对术前评估困难气道的环境，设计患者面颈部点云采集方案，然后根据术前评估患者的姿态，设计相机的固定支架以及采集方案。该文首先对应用场景分析，选用了基于双目红外结构光的 RGB-D 深度相机。然后结合面颈部的特征，设计点云采集方式为相机分别对准头部右下颌角、左下颌角和鼻梁三个位置。最后设计了便于移动和固定的相机支架。

2.设计面颈部三维重建算法。在面颈部的三维重建中，提出了一种先用点云分割算法将图像分割出感兴趣区域，再使用改进刚性配准算法对目标区域进行配准，最后应用配准矩阵在点云上的三维重建算法模型。基于采集出来点云的重叠率低、低权重部分形变较大的问题，构造了一种面颈部点云滤波算法。该算法通过使用色彩信息定位嘴唇，以此滤除低权重形变部分。然后针对分割后的点云，使用改进的随机一致性粗配准算法融合 ICP 精配准算法进行配准。最后使用得到的配准矩阵应用到分割前的点云上，实现面颈部的三维重建。实验表明使用 3DSC 优化的 RANSAC 粗配准与 ICP 精配准融合算法的面颈部精度最高，符合本文的系统评估要求。

3.设计术前困难气道评估系统。该系统能够在输出评估结果的同时，输出可能导致困难气道的原因，给予麻醉医生制定通气方案提供参考。该文首先对医学上评估困难气道的方案进行梳理和总结，筛选出准确度较高的评估指标，系统归纳了常规的面罩通气、喉管通气、插管通气困难气道的禁忌症。然后根据筛选的评估指标和患者病史，逐条分析可能导致困难气道原因，并设计了一套可以高效且直观的患者信息录入方式和流程。最后根据系统的功能和输入需求，设计了人机交互界面，分为信息录入与评估界面，设备连接与三维重建界面和模型测量界面。其中信息录入界面包括所有的评估指标及评估信息的输出，方便医生快速掌握关键信息。其他两个界面分别用来可视化和辅助信息获取，操作界面简洁，提高系统使用的便捷性和效率。

该系统可以辅助麻醉医生进行困难气道评估。它通过使用标准化

流程评估的方法，降低了对医生经验的依赖，提高了测量指标的精度和困难气道评估的准确率。

关键词：双目结构光，点云采集，点云配准，面颈部重建，困难气道评估

DESIGN OF 3D MODELING AND EVALUATION SYSTEM FOR DIFFICULT AIRWAY BASED ON STRUCTURED LIGHT

ABSTRACT

Difficult airway is a situation in which difficulty or inability to pass the airway smoothly is encountered during airway management or maintenance of ventilation. Accurate preoperative assessment can effectively minimize unanticipated difficult airways, as well as a series of potential risks and challenges arising from them. Existing assessment protocols for difficult airways involve manual determination of the degree of airway difficulty by the anesthesiologist through history questioning and physical examination of the patient, which has the disadvantage of being subjective, lacking in accuracy and reliability, and relying heavily on the subjective experience and skills of the anesthesiologist.

In this dissertation, under the premise of not being able to directly observe the patient's airway, in order to improve the accuracy of difficult airway assessment and reduce the dependence on the anesthesiologist's experience, a system was designed to achieve difficult airway assessment by accurately modeling the opposite side of the face and neck, and then measuring the airway assessment parameters. While assessing a difficult

airway, it can also suggest potential reasons for the emergence of a difficult airway, achieving a standardized process for assessing a difficult airway and reducing the subjectivity of the assessment. The research content and innovations of the paper include the following:

1. Building a point cloud acquisition platform. The dissertation designs a point cloud acquisition scheme for the patient's face and neck for the preoperative assessment of the environment of the difficult airway, and then designs the fixed bracket of the camera as well as the acquisition scheme according to the preoperative assessment of the patient's posture. The paper first analyzes the application scenario and selects an RGB-D depth camera based on binocular infrared structured light. Then combined with the features of the face and neck, the point cloud acquisition method was designed as the camera was aimed at three positions of the head: the right mandibular angle, the left mandibular angle, and the bridge of the nose, respectively. Finally, a camera mount was designed for easy movement and fixation.

2. Design of 3D reconstruction algorithm for face and neck. In the 3D reconstruction of the face and neck, a 3D reconstruction algorithm model is proposed to segment the image into regions of interest using a point cloud segmentation algorithm, then align the target region using an improved rigid alignment algorithm, and finally apply the alignment matrix on the original point cloud. Based on the problem of low overlap rate and

large deformation of low weight part of the collected point cloud, a face and neck point cloud filtering algorithm is constructed. The algorithm filters out the low-weighted deformation by using color information to locate the lips. The segmented point cloud is then aligned using an improved stochastic consistent coarse alignment algorithm fused with the ICP fine alignment algorithm. Finally, the resulting alignment matrix is applied to the pre-segmented point cloud to realize the 3D reconstruction of the face and neck. Experiments show that the face and neck using 3DSC optimized RANSAC coarse alignment and ICP fine alignment fusion algorithm has the highest accuracy and meets the system evaluation requirements of this paper.

3. Design of a preoperative difficult airway assessment system. The system is able to output the assessment results along with the possible causes of difficult airway, giving anesthesiologists a reference to formulate the ventilation plan. The paper firstly combed and summarized the medical schemes for assessing difficult airway, screened the assessment indexes with higher accuracy, and systematically summarized the contraindications to conventional mask ventilation, laryngeal tube ventilation, and intubation ventilation for difficult airway. Then, based on the screened assessment indicators and the patient's medical history, the possible causes of difficult airway were analyzed one by one, and a set of patient information entry methods and processes that could be efficient and intuitive were designed.

Finally, according to the function and input requirements of the system, the human-computer interaction interface was designed, which was divided into the information entry and evaluation interface, the equipment connection and 3D reconstruction interface and the model measurement interface. Among them, the information entry interface includes all the evaluation indexes and the output of evaluation information, which is convenient for doctors to grasp the key information quickly. The other two interfaces are used for visualization and auxiliary information acquisition, and the operation interface is simple to improve the convenience and efficiency of the system.

This system assists anesthesiologists in difficult airway assessment. It reduces the dependence on physician experience by using a standardized process assessment method, and improves the precision of measurement indicators and the accuracy of difficult airway assessment.

KEY WORDS: binocular structured light, point cloud acquisition, point cloud registration, face and neck reconstruction, difficult airway assessment

目录

第 1 章 绪论.....	1
1.1 研究背景及意义.....	1
1.2 困难气道评估现状.....	1
1.3 三维重建相关的研究现状.....	3
1.4 三维重建在医学领域的应用.....	4
1.5 本文研究内容.....	5
1.6 本文章节安排.....	6
第 2 章 系统分析与设计.....	8
2.1 系统整体方案设计.....	8
2.2 困难气道评估指标.....	8
2.2.1 传统评估方法和指标.....	9
2.2.2 评估指标归纳.....	12
2.2.3 病史影响.....	13
2.2.4 需要获取的患者信息.....	14
2.3 面颈部点云采集.....	14
2.3.1 点云采集设备介绍.....	14
2.3.2 确定点云采集设备.....	15
2.3.3 RGB-D 相机原始配套算法问题	16
2.4 点云配准.....	17
2.4.1 点云配准算法介绍.....	17
2.4.2 点云配准算法设计.....	17
2.5 硬件系统设计.....	18
2.6 软件系统设计.....	20
2.6.1 信息录入界面.....	20
2.6.2 点云采集界面.....	21
2.6.3 参数提取界面.....	22
2.7 本章小结.....	23

第 3 章 面颈部三维重建.....	24
3.1 深度图像生成原理.....	24
3.2 点云采集.....	25
3.2.1 点云采集方式.....	25
3.2.2 点云预处理.....	27
3.3 面部滤波算法.....	28
3.3.1 定位嘴唇.....	30
3.3.2 面部滤波.....	31
3.4 点云配准.....	33
3.4.1 局部粗配准.....	33
3.4.2 局部精配准.....	35
3.4.3 全局配准.....	37
3.5 算法总体流程.....	37
3.6 本章小结.....	38
第 4 章 困难气道评估.....	40
4.1 评估指标获取.....	40
4.1.1 病史询问、体格外观和动作测试.....	40
4.1.2 测量甲颏距离.....	40
4.1.3 测量张口度.....	42
4.1.4 测量头颈部活动度.....	43
4.2 气道评估.....	44
4.2.1 面罩通气困难气道评估.....	44
4.2.2 喉罩通气困难气道评估.....	45
4.2.3 插管通气困难气道评估.....	45
4.2.4 病史影响评估.....	46
4.3 本章小结.....	47
第 5 章 实验与分析.....	48
5.1 不同配准算法的对比实验.....	48
5.1.1 误差与鲁棒性分析.....	51

5.1.2 结果分析.....	53
5.2 测量评估指标的误差分析.....	53
5.2.1 甲颏距离、张口度测量误差分析.....	53
5.2.2 头颈活动度测量误差分析.....	54
5.2.3 结果分析.....	55
5.3 困难气道评估系统测试.....	55
5.3.1 真实数据测试.....	55
5.3.2 模拟数据测试.....	56
5.3.3 结果分析.....	57
5.4 本章小结.....	57
第 6 章 总结与展望.....	58
6.1 本文工作总结.....	58
6.2 未来展望.....	59
6.3 本章小结.....	59
参考文献.....	60
攻读学位期间获得的成果.....	66
致 谢.....	67

第1章 绪论

1.1 研究背景及意义

在我国社会经济迅速发展的同时,人民群众对医疗健康的需求也在不断的增长。在医疗资源的总量和质量方面,东部和中西部地区以及不同城市之间的差距较大,优质医疗资源多集中于经济较发达的地区,而欠发达地区医疗资源紧缺^[1]。尤其是有经验的麻醉医生的缺口极大,他们需要负责术前评估和处理、术中的麻醉与支持,以及术后的镇痛监护等工作,在手术中扮演着至关重要的角色,需要全程监控患者的生命体征,确保手术的安全进行^[2-3]。因此许多麻醉医生大部分时间都在手术室里度过,频繁值班更是常态。

困难气道(Difficult airway)是指受过规范化培训的麻醉医师,遇到可预料到和未预料到的一种临床状态,包括但不限于困难面罩通气、困难喉镜暴露、困难声门上气道、困难插管、困难拔管和困难有创气道^[4]。未预料的困难气道是无法进行人工通气的关键因素,这种状况可能引发患者缺氧性脑损伤而危及生命。充分的术前评估在识别困难气道方面起着至关重要的作用,能够帮助医生提前预测并准备应对潜在的风险和挑战。然而,困难气道的评估在很大程度上依赖于麻醉医生的专业经验和技能,这使得评估过程受到医生个体能力差异的影响。当前,中国面临具有经验的临床麻醉科医生人才短缺的问题,这导致许多经验不足的医生可能会进行不标准的术前困难气道评估^[5]。这种情况会增加把困难气道误判为正常气道的可能性,进而增加手术过程中的风险。

1.2 困难气道评估现状

困难气道评估在临床医学中占据着举足轻重的地位,它关乎到患者在手术或治疗过程中气道管理的安全性与顺畅性。传统的困难气道评估主要依赖于医生的主观经验和一系列评估方法,以下是困难气道评估的一些现状和相关内容:

病史询问:病史询问是至关重要的一步。通过仔细询问患者的病史,医生可以获取关于患者气道状况的重要信息,从而更准确地评估气道困难的风险。病史询问的内容应包括患者是否有气道疾病史、手术史等,以及是否有气道狭窄、气道畸形等潜在的气道问题^[6-7]。这些信息有助于医生制定个性化的麻醉方案和气

道管理策略，确保患者在手术过程中的安全。

体格检查：体格检查^[8]是最基本的困难气道评估方法之一。医生通过观察患者的面部结构、颌面部形态、牙齿状况以及颈部的活动度等，来初步评估气道的通畅程度和可能存在的困难。

Mallampati 分级：Mallampati 分级^[9]是一种常用的困难气道评估工具，通过观察患者张口时口腔内可见的结构来评估气道的通畅程度。Mallampati 分级通常分为四个级别，从 Mallampati I（能看到软腭、腭弓和腭扁桃体）到 Mallampati IV（只能看到硬腭）。

预测评分系统：有多种预测评分系统可用于评估困难气道。其中，最常用的是 Cormack-Lehane 分级系统和 Wilson 评分系统。Cormack-Lehane 分级系统根据气管插管时观察到的声门结构可见度将困难气道分为四个级别^[10]。Wilson 评分系统^[11]则综合考虑了多个因素，如颌部活动度、颈部活动度、牙齿状态等，给出一个评分来判断困难气道的风险程度。

口腔喉镜检查：口腔喉镜检查是通过使用喉镜来直接观察和评估气道结构的方法。这种方法可以提供详细的声门和气道解剖信息，帮助医生判断是否存在气道管理困难，并指导进一步的处理措施^[12]。

除去这些评估方式，还有非常多的其他评估指标，虽然方法很多但性能较低，没有一种办法能够完全准确的进行困难气道的评估^[13-14]。临床上评估困难气道会因医生的经验水平的不同，对评估指标的选择和指标的检查测量也会不同，进而导致评估结果产生差异。所以困难气道评估严重依赖于临床麻醉医生的经验。

随着医疗影像学的发展，为了对具有特殊情况的患者，比如对有解剖学异常的患者进行准确评估，医院可以对其进行影像学辅助检查，用以提供更直观和详细的气道结构信息。例如，使用 X 线检查^[15]、计算机断层扫描^[16]、超声扫描^[17]和磁共振成像^[18]等方式评估气道的解剖结构、颈椎病变、肿瘤等情况，从而判断是否存在气道管理的困难。但是上述所提到的影像学评估困难气道的方法都有不同程度的局限性。相较于传统预测困难气道的方法准确性提高有限，有依赖设备、增加患者医疗费用、存在辐射风险等不足。而且会增加麻醉医生的工作量，更加增大了对麻醉医生的需求。所以临床上除非患者有特殊情况，一般使用传统的困难气道评估方法即可。

1.3 三维重建相关的研究现状

三维重建是一项关键技术，通过采集多个视角的图像或传感器数据，并使用计算方法将其转换为三维场景或对象。它在计算机视觉、计算机图形学、医学影像等领域具有广泛的应用。过去几十年来，研究人员在算法、传感器技术和应用方面取得了显著的进展。然而，仍然存在一些挑战，如准确性、鲁棒性、处理大规模数据和实时性等方面^[19]。

建立三维物体模型的方法主要分为以下三种：表面重建方法：表面重建方法是从采集物体的离散点云数据或体素数据中生成连续的表面模型，一般通过插值、曲面拟合、网格重建等技术来生成，可以应用于各种几何形状和复杂度的物体^[20]。多视图几何方法：多视图几何方法使用多个图像或视频帧来进行三维重建^[21]。通过从不同视角观察物体并匹配对应的特征点或特征描述符恢复物体的几何信息，通常基于三角测量或立体视觉技术，在静态场景和运动场景中都有应用。深度学习方法：深度学习方法利用神经网络模型来学习从图像或传感器数据到三维模型的映射关系^[22]。通过大规模的训练数据集和复杂的神经网络结构，可以直接从输入数据中预测物体的三维结构，其重建能力与数据集的大小和数据集的质量有关。

面部三维重建是计算机视觉领域备受关注的研究方向之一^[24]。其目标是从图像或传感器数据中获取人脸的三维几何结构和外观信息。通过以利用不同的算法可以用不同的方式对人脸进行建模，从而在众多应用领域中发挥重要作用。传统的面部三维重建技术主要依赖于立体视觉原理，它通过分析从多个不同角度拍摄的图像，或者利用结构光扫描等手段，来估算面部的三维形态^[25]。然而，随着深度学习技术的蓬勃发展，基于神经网络的方法在面部三维重建领域取得了显著的进步。特别是卷积神经网络的应用，极大地推动了面部三维重建技术的发展。这些方法通过训练大量的人脸数据，能够从单一或少数几张图片中直接预测出人脸的三维结构^[26-27]。它们强大的学习和泛化能力使得面部三维重建更加快速和准确。此外，一些前沿的研究正在探索如何将传感器数据，如 RGB-D 相机或深度传感器，与深度学习相结合，以期进一步提高面部三维重建的精确度和鲁棒性。这些传感器能够提供更为丰富的面部信息，如深度信息，从而帮助神经网络更好地理解面部的三维结构^[28]。然而目前针对于面颈部的三维重建研究却较少，很多是头颈部的 CT 三维重建^[29-30]，用来观察和分析患者头颈部的解剖结构，帮助诊

断各种疾病和异常情况。

1.4 三维重建在医学领域的应用

近年来,影像学技术在医学领域的应用愈发广泛,其中,通过观察二维 CT 图像来诊断患者病情已成为医生的主要诊断手段之一。然而,二维断层图像存在着走样、噪音、伪影和采样点等问题,这些问题限制了测量指示点的选择,使得评估只能局限于单一层面,且图像清晰度受到影响。更为关键的是,二维图像无法全面展示病灶区域的三维空间结构^[31],这无疑增加了医生评估病情的难度。随着三维重建技术的不断进步,三维重建技术克服了这一壁垒,将二维图像转化为直观的三维模型,使医生不仅能够更清晰地看到病灶的形态和特征,还能在多个角度和层面上进行观察和分析,从而提高诊断的准确性和效率。

在医疗美容领域,通过 CT 三维重建病人的颌面^[32],可以获取更详细清晰的颌面骨骼信息,可用于分析和评估面部结构的不对称性、骨骼畸形、骨折等问题。此外,通过结构光三维重建^[33-34]还可以用于模拟和预测整形手术后的效果,让患者更好地了解可能的结果。

在外科手术规划中,三维重建技术也发挥着至关重要的作用。通过多层螺旋 CT 采集的腹腔图像数据经过三维重建^[35],从而将医学图像数据转化为三维模型,使得可以在术前对手术区域进行详细的分析,再由手术经验丰富的医师确定手术路径和手术步骤。这有助于避免在手术过程中出现意外情况,减少手术所用的时间^[36]。同时,医生还可以评估手术风险,预测可能出现的并发症,并制定相应的应对措施。

在医学教育和培训领域,三维模型同样展现出了巨大的潜力。通过人体的部分模型可视化展示,医学生和医生能够更直观地了解解剖结构和疾病特征,从而加深对医学知识的理解 and 应用,比如利用三维模型的胸科椎弓根螺钉置入实践训练^[37],使用计算机三维模型进行解剖学教学^[38]。这种直观的教学方式不仅提高了学习效率,也为培养新一代医学人才提供了有力支持。因此,医学图像的三维重建和可视化技术在医疗诊断和教育中具有广泛的应用前景和重要的实用价值。

目前三维重建在困难气道评估上也有所应用,比如通过分析 CT 或 MRI 成像技术三维重建头颈内部解剖结构模型来预测困难气道^[39-40],医生可以利用三维重建图像来更全面地了解气道的结构和病变情况,但目前这种评估方式受限于设

备，医疗成本更高，而且仅在小样本的患者中进行研究，证据不足，尚不能推广作为常规筛查手段。随着这些技术的不断发展和进步，这些技术将在医疗领域为医生提供更加准确、全面的诊断信息，为患者带来更好的治疗效果和生活质量。

1.5 本文研究内容

为降低困难气道评估对麻醉医生经验的依赖性，提高测量指标的精确度，本文将传统的术前困难气道评估与三维重建技术相结合，设计了一个术前困难气道评估系统，对评估流程进行标准化，以减少评估的主观性。该系统借助结构光对患者面颈部进行三维重建，以获取患者信息，使普通麻醉医生经过简单培训后，便能够精确测量评估指标，顺利完成困难气道评估。

此评估系统主要由患者信息录入、患者面颈部点云三维重建、三维模型评估指标几何信息测量、困难气道综合评估这四个部分构成。其主要研究内容可分为六个关键研究任务，具体为：评估困难气道指标的归纳整理、面颈部点云采集方式的设计、面颈部点云三维重建算法的设计、三维模型几何信息的提取、结合病史与评估指标进行患者困难气道评估、系统操作界面与逻辑设计。整体可划分为三大块，详情如下：

(1) 系统设计

对困难气道评估系统的整体运作流程进行分析，总结所需的功能模块，包括信息录入、点云采集、配准重建、指标测量、困难气道评估五个部分。接着，根据系统各模块的功能，设计硬件框架以及软件操作页面和交互方式。

(2) 面颈部三维重建

在传统的术前困难气道评估体格检查中，一些需要测量的评估指标，如头颈活动度、甲颏距离、张口度等，由于医生手动操作，精度较低，且测量不便。为解决这些问题，本系统通过对患者的面颈部进行三维建模，实现了在模型上测量指标。此外，三维建模和系统信息记录也为患者医疗记录的留存以及医生之间的交流提供了便利。

在人脸识别技术广泛应用的当下，人脸的三维重建研究已较为常见，但有关面颈部三维重建的研究却甚少。且相较于面部，面颈部结构更为复杂，需多次采集点云并进行配准。而多次采集过程中，患者的小幅晃动不可避免地会导致变形；切换采集视角时，光线等环境因素也会使采集到的点云噪点更加复杂。故本文针

对气道评估系统的应用场景，重新设计采集方法，选用双目红外结构光 RGB-D 深度相机进行多次拍摄。其中，为保证后续配准精度和评估效率，采集方案在确保面颈部完整性的基础上，尽量减少拍摄次数。完成点云信息采集后，下一步即对多片点云进行配准

在对有形变物体进行三维重建时，主流方法是采用非刚性配准算法。然而，目前非刚性重建在面颈部上尚无较好的重建模型，重建过程中很容易产生影响测量的形变。因此，本文设计了一种适用于面颈部的刚性配准算法。传统的刚性配准算法在处理形变物体时，往往会因为无法找到正确的匹配点而失败。为了解决这个问题，本文设计了以下方法：第一步，根据面颈部的特点，将每片点云分成多个局部区域，忽略不重要的复杂形变局部，对微小形变的重要局部区域进行配准。此时，通过设置合理的参数，可以将点云配准的误差控制在合理范围内。最后，根据局部配准结果信息，应用于原始点云，使其合并为全局配准信息。实验表明，这样可以更有效地解决传统刚性配准算法在面颈部点云上无法找到正确匹配点的问题，而且忽略的复杂局部不会影响相关评估指标参数的提取。

(3) 困难气道评估

目前，术前困难气道评估方法的研究在敏感度和特异度方面都存在问题。对患者进行全部的上百种检查，对于麻醉医生和患者来说都是繁重的负担。因此，医院的麻醉医生通常会选择几种常用的方法进行术前困难气道评估，如 Wilson 风险评分、上唇咬合试验、甲颏距离、张口度等。首先，根据这些评估困难气道的指标，在保证正确评估的前提下，以防止过度检查和减少工作量为原则，筛选出几种证据等级较高的方法进行综合评估。其次，结合患者病史，分析筛选出评估所需的具体数据类型，如身高、体重、张口度、甲颏距离、病史等。根据这些数据的具体特征，设计获取数据的方法和流程，主要是通过面颈部模型测量患者的评估指标。最后，根据筛选出的评估指标和患者的病史，逐条分析可能导致困难气道的原因，评估面罩通气、喉罩通气和插管通气三种方式是否属于困难气道

1.6 本文章节安排

第一章绪论。介绍了困难气道评估现状、三维重建技术和三维重建在医学领域的应用的背景，通过这些背景信息，引出了本文需要解决的问题，继而介绍了本文的研究内容和具体所需要的工作，最后对本文章节安排展开介绍。

第二章系统分析与设计。从系统功能出发，分析并设计了系统的整体架构和运作流程。按照评估系统流程的关键节点，逐步分析了困难气道评估指标的确定、采集点云设备的选用、点云配准算法类型的选择，最后介绍了硬件框架的设计以及系统界面的软件设计。

第三章面颈部三维重建。在确定采集点云设备和点云配准算法类型的基础上，进一步完善了整个重建算法流程。具体包括采集点云方案的设计、点云的预处理以及配准算法的设计。

第四章困难气道评估。在确定困难气道评估指标和完成面颈部三维重建模型的基础上，设计了指标获取的流程方案，包括病史问询、对患者进行评估评级测试、在模型上测量评估指标。获取数据后，分析了这些指标对不同通气方式的影响。

第五章实验与分析。首先设计了不同配准算法的对比实验，来验证本文配准算法的准确性。然后使用真实数据进行测试系统，测试系统运行，为了完善实验测试，又进行了模拟数据的补充实验。

第六章总结与展望。对全文研究内容进行总结，并对未来评估系统的工作进行了展望。

第 2 章 系统分析与设计

本文设计的一个困难气道评估系统，不但能够对病人进行术前困难气道评估，还具有可视化患者面颈部的功能。为了减少麻醉医生经验的依赖，应尽量保证评估的标准化、系统化。为了提高评估的准确度应保证评估指标测量的准确。为了减少医生的工作量，尽量的简化医生的操作。

2.1 系统整体方案设计

困难气道评估第一步是由医生询问患者病史。第二步，由医生检查患者的体格外观，并进行一些动作测试。第三步，对患者的面颈部进行三维重建。第四步，从三维模型中测量要评估的指标。第五步，系统对获取的患者指标及病史信息进行分析评估困难气道。系统设计方案如图 2-1 所示：

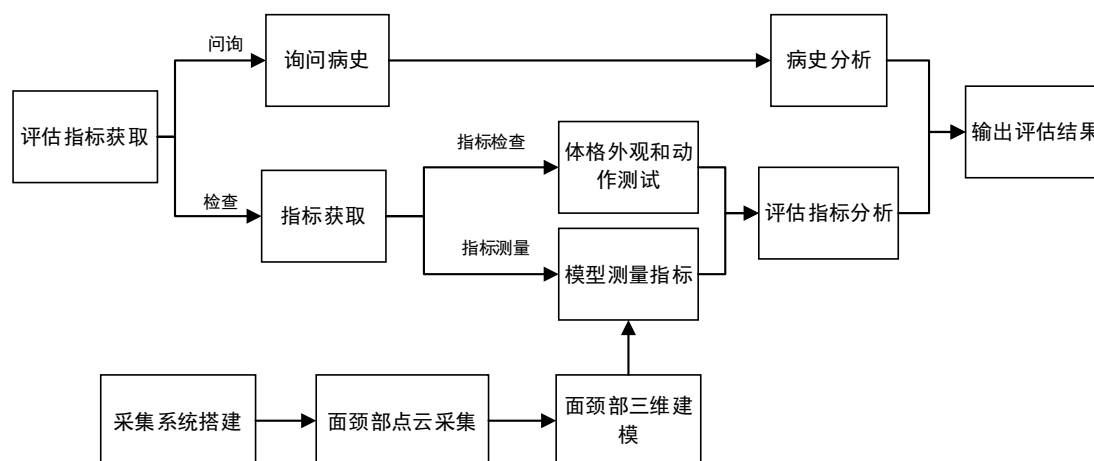


图 2-1 评估系统设计方案图

Figure 2-1 Evaluation system design scheme diagram

根据设计的流程，该系统主要分为四个关键点：一个关键点是确定评估困难气道需要哪些指标；哪些指标需要用到三维模型测量；哪些病史与困难气道相关。另一个关键点是如何对面颈部进行三维重建，应包括点云的采集方式和重建算法的设计。最后两个关键点是软件和硬件的设计。

2.2 困难气道评估指标

困难气道评估是麻醉医生在为患者实施麻醉前进行的一项重要评估，目的是识别可能存在气管插管困难或面罩通气困难的患者，从而制定合适的气道管理方案，降低围术期的风险和并发症。术前困难气道评估包括询问病史、体格检查、

辅助检查等多个方面。目前临床上气道评估最主要的手段仍然是病史询问和体格检查，常用的评估方法有：**Mallampati 分级**、**Cormack-Lehane 分级**、上下唇咬合实验、甲颏间距、胸颏间距、下颌骨长度、颈围、身高-甲颏间距比例、颈部活动度等等^[41]。但目前上述所研究的床边体格检查的敏感度和特异度均存在较大异质性，没有一个单一的指标能够完全准确地预测困难气道，因此需要结合多个指标进行综合评估困难气道。但对于患者和麻醉医生来说一次性完成所有的体格检查有点过度筛查，广泛的检查对麻醉医生和患者来说也可能是繁重的。有经验的麻醉医生会根据不同的患者，对其进行不同方式的体格检查手段，不会每一种方法都使用，另外特殊情况的患者还会采取影像学检查，比如有外伤、口咽部肿瘤、感染性病变等采取 X 线、CT 影像学检查来进一步分析气道结构^[42]。

因此，为了避免过度检测，节省评估时间，同时进行准确的困难气道评估。本文参考目前临床广泛使用的评估指标，选择具有较高评估准确度的指标作为系统分析指标。

2.2.1 传统评估方法和指标

用于困难气道的工具和方法有百余种之多，麻醉科医师应遵循先无创后有创的原则，常用传统气道通气包括面罩通气（**Bag-mask ventilation, BMV**）、喉罩通气（**Laryngeal mask airway, LMA**）、气管插管通气（**Endotracheal intubation, ETI**），当患者出现既不能插管又不能氧合的情况时，应建立紧急有创气道通气^[43]。本文仅对非紧急患者进行上述三种无创的气道通气方式进行困难气道评估。

面罩通气需要做到严密地覆盖口鼻并且打开气道，如图 2-2 所示。常见的与面罩通气困难有关的因素有：年龄大于 55 岁、**BMI（体重指数）>26kg/m²**、络腮胡子、牙齿缺损、打鼾史均可能会造成面罩通气时无法严密地覆盖口鼻^[44]。当同时满足以上两项就有大于 70%的敏感性和特异性。除此之外，颌面部异常、下颌后缩或前突等也有可能造成面罩通气困难。



图 2-2 面罩通气

Figure 2-2 Mask ventilation

喉罩通气需要在患者口腔内部严密地覆盖喉部入口，一种声门上的通气技术，如图 2-3 所示。常见的与喉罩通气困难有关的因素有：喉罩放置困难或无法保持良好的密封：张口度小于 20mm、病态肥胖等。有反流误吸风险：妊娠、有上消化道问题。需要高压通气：声门下气道或肺内气流阻力过大的患者^[45]。

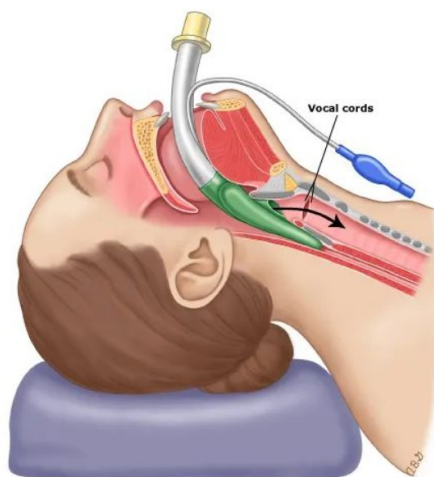


图 2-3 喉罩通气

Figure 2-3 Laryngeal mask ventilation

插管通气需要将气管插管插入患者的气道，然后将通气气体送入肺部，如图 2-4 所示。由于气道不能够被直接看到，本身就具有较大的置入难度，因此引起插管通气难以成功的因素会较多，评估起来也较为复杂。目前在临床上常用 Wilson 风险评分、Mallampati 分级、咬上唇分级，甲颏距离、张口度等预测插管通气困难气道等^[46]。

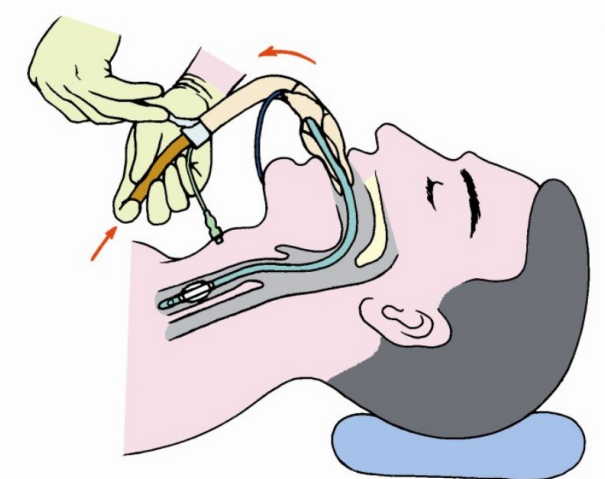


图 2-4 插管通气

Figure 2-4 Intubation ventilation

Wilson 风险评分是一种用于预测困难气管插管的评分系统，参考数据大多来自国外患者，它包括五个危险因素：体重、下颌活动度、头颈部活动度、下颌退缩、门齿前突。每个预测因子都占 0、1 或者 2 分，总分为 0~10 分，每个因素的分数相加，得到的分数大于等于 2 分时，提示可能出现困难气道^[47]，如表 2-1 所示，其中 IG 表示最大张口时上下切牙间距，Slu 表示下切牙前移超过上切牙的最大距离。对于其中的下颌活动度指标来说，有研究^[48]表明张口度在中国其预测困难插管的标准为小于 3.8cm。头颈部活动度：患者保持身体不动头部最大限度屈颈到伸颈的活动的角度，正常值大于 90°，当下颌不能接触胸骨或不能伸颈，提示插管有困难。从正常中立位到最大后仰位可达 35°~80°，当小于 35°时提示插管有困难^[49]。

表 2-1 Wilson 风险评分
Table 2-1 Wilson Risk Score

评估指标	无风险	中等风险	高风险
体重	<90kg	90-110kg	>110kg
张口度	IG≥5cm 或 Slu>0	IG<5 cm 或 Slu=0	IG<5 cm 或 Slu<0
头颈部活动度	>90°	=90°	<90°
下颌退缩	正常	中度	严重
门齿前突	正常	中度	严重

Mallampati 分级：要求患者坐直并张开嘴巴，然后观察口腔和咽喉的结构进行评级。一级：可以看到口腔内的软腭、咽根和两侧扁桃体。二级：可以看到软腭、咽根和一部分扁桃体。三级：只能看到软腭的基部和咽根，无法看到扁桃体。四级：只能看到软腭的硬腭部分或者无法看到软腭。当患者的 Mallampati 分级为

三级或四级，通常意味着气道管理可能具有挑战性。其准确性受到患者的合作程度、头颈部位置、舌体大小等因素的影响，敏感性和特异性较低。

咬上唇分级：指患者用下切牙咬上嘴唇的能力，用下切牙咬上嘴唇，分为三级，超过上唇线为 1 级；下切牙低于上唇线为 2 级；不能咬住上唇为 3 级，分级越高，困难气道的风险越大。这是一种较为简单评估方法，通常和其他方法一起去评估患者的气道。

甲颏距离：指患者尽量后仰头时，甲状软骨切迹与颏下缘的最大距离，下颌骨颏突到甲状软骨切迹的距离，过短表示喉头过高，大于或等于 6.5cm 时插管没有困难，小于 6.5cm 视为可能是困难气道的预测因子。这是一种客观、无创的评估方法，但其准确性受到颏下脂肪、甲状软骨位置等因素的影响，敏感性和特异性较低。

张口度：指患者尽量张口时，上下切牙间的距离，张口度小于 3.8cm 时，提示困难气道的可能性增加。这是一种客观、无创的评估方法，但其准确性受到下颌活动度、牙齿缺失等因素的影响。

2.2.2 评估指标归纳

对于预测困难面罩通气来说，根据常规的评估方案可以总结如表 2-2 所示，有风险的项目越多说明越有可能出现困难面罩通气。牙齿缺损严重的，下颌后缩或前突明显的才作为有风险的提示因素，轻微少量作为无风险。当出现两个及以上的符合有风险的标准时，面罩困难气道的概率会明显提高。

表 2-2 面罩困难气道的评估指标
Table 2-2 Evaluation index of mask difficult airway

评估指标	无风险	有风险
年龄	<55	≥55
BMI	<26kg/m ²	>26kg/m ²
络腮胡子	否	是
牙齿缺损	否	是
打鼾	无	有
下颌后缩或前突	否	是

对于预测困难喉罩通气来说，根据常规的评估方案可以总结如表 2-3 所示，每种指标都提示有较大风险为困难气道，项目越多说明出现困难喉罩通气的概率越大。

表 2-3 喉罩困难气道的评估指标

Table 2-2 Evaluation index of difficult airway of laryngeal mask

评估指标	无风险	有风险
张口度	<20mm	≥20 mm
BMI	≤40kg/m ²	>40kg/m ²
妊娠	≤10 周	>10 周

对于预测困难气管插管来说，有研究表明^[47]Wilson 风险评分的 AUC（Area under curve，受试者工作特征曲线下的面积）0.91，这意味着它具有较高的准确性。AUC 越接近 1，说明评分工具越能区分困难气管插管和正常气管插管的患者，当 AUC 小于 0.8 时，意味着分类器在区分正例和负例上的准确性较低，可以认为评分工具的性能中等偏下或一般。其他的，Mallampati 分级的 AUC 为 0.65，甲颏距离的 AUC 为 0.81，张口度的 AUC 为 0.87。其中 Wilson 风险评分的准确度最高，Mallampati 分级的准确度最低，为了减少工作量，排除 AUC 小于 0.8 的评估指标的同时，采用 AUC 高于 0.8 的指标进行联合评估，筛选出评估指标包括：体重、张口度、甲颏距离、头颈部活动度、下颏接触胸骨情况、咬上唇分级、下颌退缩、门齿前突。各个指标的风险评估如表 2-4 所示。

表 2-4 插管困难气道的评估指标

Table 2-4 Evaluation indexes of difficult airway intubation

评估指标	无风险	中等风险	高风险
体重	<90kg	90-110kg	>110kg
张口度	>38mm	=38mm	<38mm
甲颏距离	>65mm	60mm~65mm	<65mm
头颈部活动度	>35°	=35°	<35°
咬上唇分级	超过上唇线	低于上唇线	不能咬住上唇
下颏能否接触胸骨	能		否
下颌退缩	正常	中度	严重
门齿前突	正常	中度	严重

2.2.3 病史影响

详细询问气道方面的病史也是术前困难气道评估的首要工作，因为了解患者以前进行过哪种类型的气道管理，如喉罩通气、气管插管等，可以提供有关患者的气道反应和困难的信息。而且某些疾病或病史会直接或间接的造成气道狭窄、咽喉或气道的结构性变化等，可能会增加气道管理的困难程度。

许多疾病对于人工气道通气都有影响，部分慢性疾病会让气管通气变得困难，给气道管理带来挑战，例如慢性阻塞性肺疾病、哮喘等。部分外伤可能导致通气结构发生改变，可能会在气道管理的过程中发生二次伤害，例如面部骨折、颈椎

损伤、颈椎手术等。部分于通气相关的癌症也会给气道管理带来挑战。如咽喉癌、颈部长放疗等。其他的，例如鼾症、睡眠呼吸暂停综合征史、胃食管反流病、气管软化、强直性脊柱炎对气道通气都有着不同程度的影响。患者的相关病史与上文的体格评估指标综合在一起，才能准确的对困难气道进行评估。

2.2.4 需要获取的患者信息

总结上文需要获取的患者体格信息包括：姓名、年龄、身高、体重、张口度、下颌退缩、门齿前突、络腮胡子、牙齿缺损、打鼾、下颏能否接触胸骨、妊娠、咬上唇分级、甲颏距离、头颈部活动度。需要询问的病史信息包括：是否有困难气管插管的病史、慢性阻塞性肺疾病、哮喘、面部骨折、颈椎损伤、颈椎手术、咽喉癌、颈部长放疗、鼾症、睡眠呼吸暂停综合征史、胃食管反流病、气管软化。其中由医生测量的体格信息为甲颏距离、张口度和头颈活动度，这三个指标在面颈部模型中测量较为简单准确。

2.3 面颈部点云采集

2.3.1 点云采集设备介绍

在困难气道评估系统中，选取点云采集设备是获取患者面颈部表面形状和结构的首要步骤。点云采集是一种将物体或场景表面的几何形状和细节转化为三维坐标点集的技术，点云是由大量离散的三维坐标点构成的数据集，可以用于进行三维建模和分析。根据扫描原理的不同，通常使用结构光扫描、激光扫描、立体视觉、RGB-D 相机来获取数据^[50]。不同的数据采集方式具有各自的优点和缺点。以下是这几种数据采集方案的优缺点：

结构光扫描仪：结构光扫描仪通过投射结构光图案并测量其在物体表面上的形变来获取点云数据。优点：结构光传感器是一种相对经济实惠且易于使用的点云采集设备。它适用于小范围的快速采集，并且在室内环境中效果良好。缺点：大型物体或需要扫描大范围的场景可能不太适用。此外，结构光扫描仪对于光照条件下和对反射率较低的表面容易产生测量误差。

激光扫描仪：激光扫描仪通过发射激光束并测量其反射或散射来获取点云数据。优点：激光扫描仪可以提供高精度的点云数据，适用于需要高精度测量和建模的应用。它们能够在较大范围内获取点云数据，并具有较高的测量精度和强大的抗干扰能力。缺点：激光扫描仪设备通常较昂贵，且数据采集速度相对较慢。此

外，激光扫描仪对于透明或反射率较高的表面可能存在困难。

立体视觉：立体视觉利用多个相机或摄像头来观察物体，通过计算视差（两个视点之间的像素偏移）来推导出物体表面的深度信息。优点：使用普通相机或摄像头，无需额外的传感器或设备，因此相对成本较低。可以实时地获取并处理图像，适用于需要即时反馈或实时应用的场景。缺点：受到视角的限制，不适用于对于远距离或视角变化较大的场景。算法复杂度较高，需要强大的计算能力。此外，对于低纹理、重复或遮挡的区域，特征匹配容易出现错误。

RGB-D 相机：RGB-D 相机是一种能够同时获取彩色图像（RGB）和深度信息（Depth map, D）的设备。它结合了传统彩色相机和深度传感器的功能，深度图像使用红外或结构光技术来测量物体表面的深度信息，然后与彩色图像进行对齐，生成点云数据。优点：相比于其他点云采集的方案，RGB-D 相机使用起来相对简单，只需连接设备并获取彩色图像和深度图像，无需额外的校准或处理步骤。在室内环境中表现良好，尤其在较短距离范围内，可以提供较高的深度精度。除了深度图像，还能够获取彩色图像，这对于一些需要同时获取颜色和深度信息的应用非常有用。缺点：深度测量范围有限，不适用较大场景或需要远距离感知的应用。对于低纹理、反射性或透明物体的深度测量能力较差。强烈的外部光照或光照变化会对深度测量产生干扰。

2.3.2 确定点云采集设备

在医院室内对患者面颈部的三维重建，具有采集距离较短、精度要求较高，能够获取颜色信息。由上述分析可以考虑使用 RGB-D 相机采集点云。

RGB-D 深度相机通常由彩色相机、深度传感器和控制单元组成。其中深度传感器的不同会使得深度相机的工作原理有所不同，应用场景也有所不同。常用的两种技术方案^[51]介绍如下：

结构光：深度相机通过投射结构化光（通常是点阵或光栅）到物体上，并使用相机来捕捉光的形变。根据光的形变，可以计算出物体表面的深度信息。结构光法的优点是可以获得较高精度和较高分辨率的深度数据，但也有一些缺点，例如受环境光干扰、无法处理透明或反光表面、需要较大的基线距离等。

飞行时间（Time of flight, TOF）：深度相机发射短脉冲的激光光束，并测量光束从发射到返回所需的时间。根据光在空气中的速度，可以计算出光的飞行时

间，从而得到物体表面的深度。飞行时间法的优点是可以测量较远的距离，而且抗干扰能力强，适合测量距离要求比较远的场合，比如无人驾驶、AR 等。飞行时间法的缺点是功耗大、分辨率低、深度图质量差。

由上述分析可得 RGB-D 相机的深度传感器采用结构光技术，比较符合面颈部三维重建的工作环境和精度要求，飞行时间技术不适用近距离的采集需要。所以本文采用使用结构光技术的 RGB-D 相机进行点云采集。

结构光传感器包括单目结构光和双目结构光两种类型。单目结构光系统通过向场景投射特定的结构光图案（例如条纹或格点），然后利用相机捕获的结构光图案和对应的畸变图像来计算物体的深度信息。而双目结构光系统则是使用两个相机捕获投射的结构光图案，并通过视差计算深度，因此具有更高的精度。所以本文确定采用双目红外结构光 RGB-D 相机。

2.3.3 RGB-D 相机原始配套算法问题

选用的商用 RGB-D 相机配有扫描重建软件，开始扫描时，需要保持物体不发生形变，扫描仪对准物体停留 3s，之后移动扫描仪开始扫描，为了提高扫描效率，扫描时要连续均匀的移动 RGB-D 相机。对于人的面颈部来说，不可能完全静止，在相机扫描的时间段内，会有形变的产生。因此在使用配套软件扫描的过程中不但较难操作，容易出现跟踪丢失，花费时间较长，且容易导致面颈部扭曲、细节模糊和无法扫描完成等问题，如图 2-5 所示。因此不能使用原始配套连续扫描的重建方案，需要重新设计面颈部的三维重建方案，基础思路是定点采集多片点云之后进行配准。定点采集多片点云，这样既能减少采集点云的操作难度，也能解决跟踪丢失的问题。根据面颈部特点重新设计配准算法，能够解决面颈部扭曲，细节丢失的问题。



图 2-5 深度相机原始配套算法问题

Figure 2-5 The original matching algorithm problem of depth camera

2.4 点云配准

点云配准是指将不同视角或不同时间采集得到的点云数据进行对齐和重叠，以得到一个整体一致的点云模型。是对三维重建的关键。

2.4.1 点云配准算法介绍

点云配准算法可以分为刚性配准算法和非刚性（弹性）配准算法^[52]。

刚性配准算法：刚性配准算法通常假设点云之间存在刚体变换关系，使用刚体变换（平移和旋转）来建模点云之间的关系。这些算法通过寻找最优的变换矩阵来最小化点云之间的距离或匹配度量指标，代表性方法是迭代最近点（Iterative Closest Point, ICP）算法^[53]，它通过迭代的方式，将一个点云对齐到另一个点云。ICP 算法通过寻找最近邻点对、计算最优的旋转和平移变换，不断迭代优化来实现配准。这种算法适用于点云之间的刚体运动，例如在相机视角变化较小或者没有形变的情况下。

非刚性配准算法：非刚性配准算法考虑了点云之间更复杂的变形关系，可以捕捉到点云的弯曲、拉伸和局部形变等。这意味着在配准过程中，点云的形状和结构可以发生局部的弹性变形。代表性方法是薄板样条插值（Thin Plate Spline, TPS）算法^[54]，它通过定义一个弹性形变函数和一组控制点来估计点云之间的非刚性变换。TPS 算法能够捕捉到点云的局部形变，并通过最小化形变能量函数来实现非刚性配准。这种算法适用于处理需要考虑非刚体形变的情况。例如变形物体的三维重建或者医学图像中的组织形变分析。非刚性配准算法通常需要更复杂的数学模型和计算方法来估计点云之间的非刚性变换。

2.4.2 点云配准算法设计

在对患者面颈部采集点云时，由于一次采集不能够完全覆盖整个面颈部，所以不可避免的会使用配准算法。多次采集时虽然要求患者保持尽量不动，但也可能会产生微小晃动或者眨眼。除此之外，多次拍摄时，由于机位的改变，还会因为环境光线、拍摄距离等原因，产生额外的数据噪声。由于面颈部局部存在较大的形变，所以不能够直接使用刚性配准算法。

对于处理有形变的物体，一般是选用非刚性配准算法。它可以直接将两个有形变的点云对齐，使它们在空间中尽可能地重合。配准的原理是将一个点云变形或弯曲，以与另一个点云相匹配。但对于面颈部来说，眨眼作为局部形变较为复

杂，非刚性配准算法无法收敛。虽然刚性配准算法也不好处理，但眼睛部分并不是评估困难气道的关键部分，可以忽略此局部，对其他高权重部分进行配准即可，而且相较于非刚性配准的计算复杂度高、对计算机资源要求较高，刚性配准较为简单，处理速度较快。故本文采用刚性配准算法进行面颈部点云的配准。

2.5 硬件系统设计

硬件系统是气道评估系统设计中最底层的部分。它包括用于收集和处理数据的深度相机以及支持系统的基础架构和硬件组件。气道评估系统的硬件框架如图 2-6 所示。

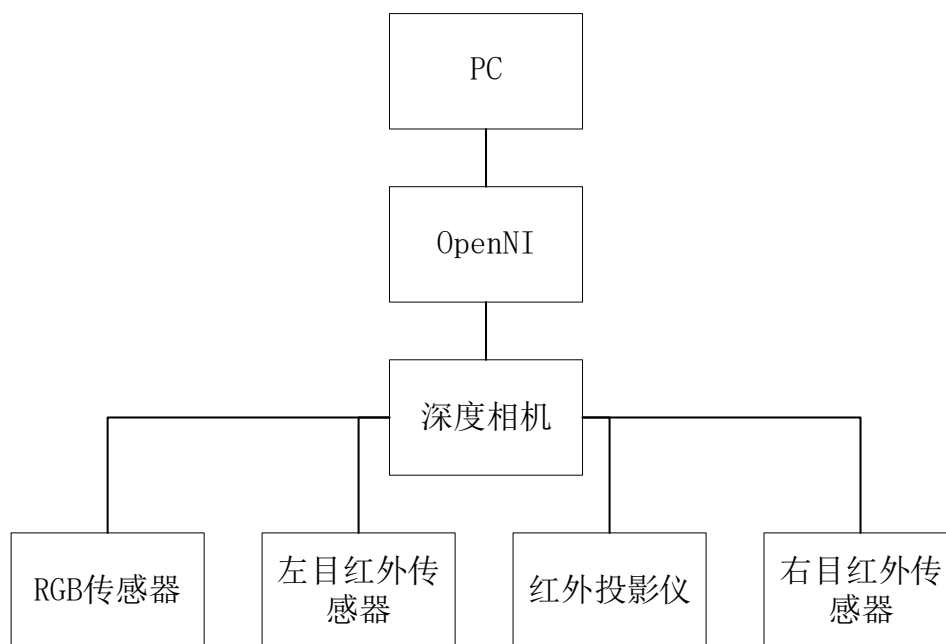


图 2-6 气道评估系统的硬件框架

Figure 2-6 The hardware framework of the airway evaluation system

整个硬件系统由 PC 通过 USB 接口控制深度相机，并使相机获取到的数据通过 USB 传输给 PC。深度相机内分为四个部分，RGB 传感器、左目红外传感器、右目红外传感器、红外投影仪。RGB 传感器感知可见光，并将图像转换为 RGB 格式。这个步骤主要用于获取场景的纹理和颜色信息。红外投影仪负责发射结构化的红外光纹到场景中。这些结构化光纹会投射到物体表面上，形成形变或位移。左目红外传感器和右目红外传感器分别捕获场景的红外图像。通过对左右红外图像之间的视差进行计算深度图。深度图像表示每个像素点距离相机的距离或深度值。视差是指左右图像中对应物体点的偏移量，通过匹配左右图像中的特征点或纹理来计算视差。最后利用视差计算的结果，结合相机的内部参数和基

线长度，可以生成场景的深度图像。

由于采集点云时需要把相机固定在不同的点位，所以为了更好的固定以及方便移动深度相机。本文对深度相机固定支架进行了设计，如图 2-7 所示，该支架由固定圆盘底座和三节金属杆以及固定相机的底座组成，各部分之间通过一字手拧螺丝紧固万向金属球两侧连接，能够实现 6 个自由度的活动，每节金属杆长度为 19cm，全长 82cm，使用 1/4-3/8 转接螺丝适配相机接口。设计的支架以及选用的 Reeyee MiniStar 深度相机如图 2-7 所示，深度相机性能参数如表 2-5 所示。

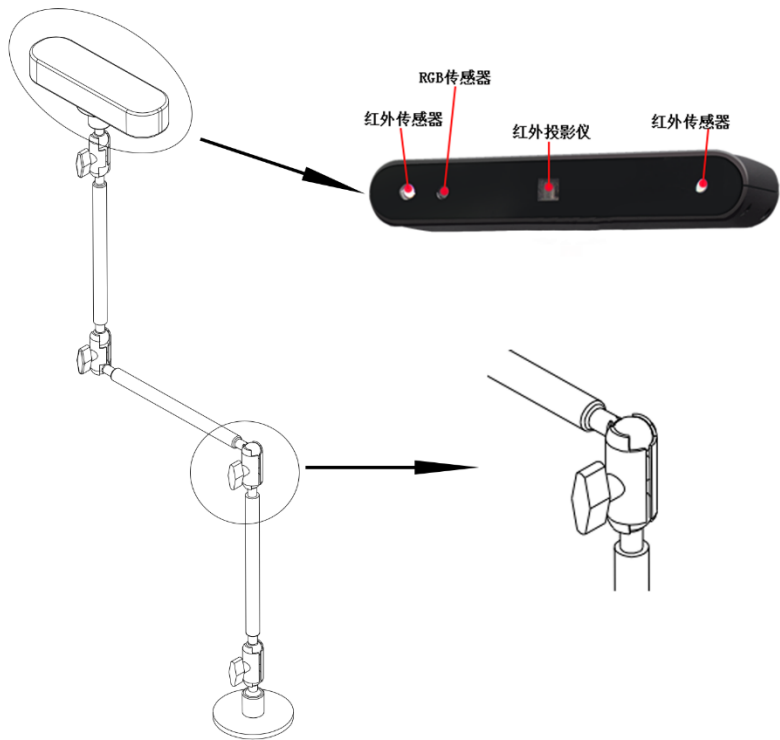


图 2-7 支架和深度相机
Figure 2-7 Bracket and depth camera

表 2-5 深度相机的性能参数

Table 2-5 Performance parameters of depth camera

性能名称	性能参数
光源	红外
体积精度	0.5mm/m
单幅扫描范围	210*130（mm）
工作中心距离	270mm±100mm
景深	±100mm
扫描速度	5 帧/秒
本体重量	<100g
最小扫描尺寸	50*50*50（mm）
外观尺寸	15.46*3.82*2.56cm
彩色纹理扫描	支持

2.6 软件系统设计

本系统软件部分分为两块，一部分为面颈部三维重建的算法，它是在 3D 点云处理开源 C++ 编程库 PCL（Point Cloud Library）的基础上编写的。其基于以下第三方库：Boost、Eigen、FLANN、VTK、CUDA、OpenNI、QHull，用于点云相关的获取、滤波、分割、配准、检索、特征提取、识别、追踪、曲面重建、可视化等。具有可扩展性和灵活性，使开发者能够进行高效的点云数据处理和分析，并实现点云数据的可视化和交互。如图 2-8 是软件系统的各个模块依赖关系图。

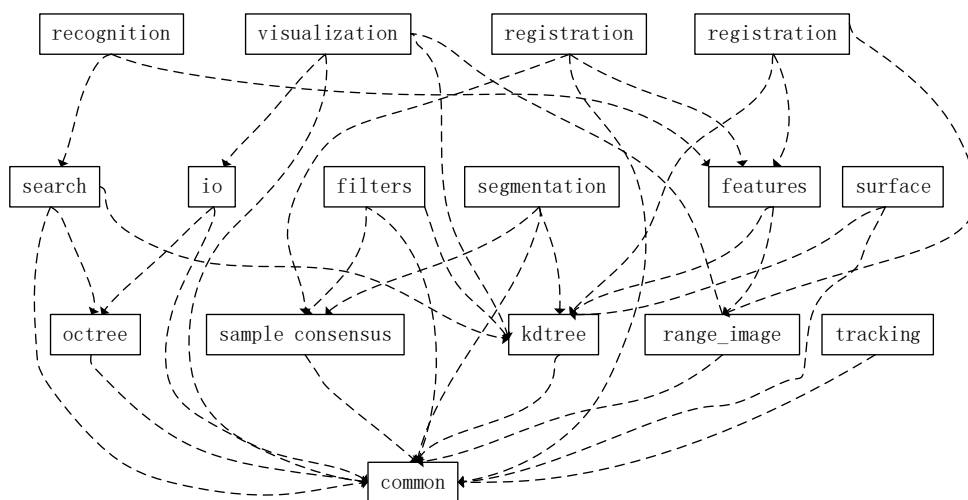


图 2-8 软件系统的各个模块依赖关系图

Figure 2-8 The dependence diagram of each module of the software system

另一部分是开发图形用户界面（Graphics User Interface, GUI）应用程序，是使用跨平台的应用程序开发框架 Qt。Qt 提供了一套用于创建丰富、交互式 and 现代化 GUI 应用程序的工具和组件。它包括各种预定义的 UI 控件（如按钮、文本框、列表等），允许开发者设计和布局用户界面。如何让困难气道评估系统易于操作使用，是减少医生学习成本，提高处理数据效率的关键。本文按照信息的种类和功能去设计界面，能使其结构清晰、易于浏览。所设计的操作交互界面主要分为录入信息界面、点云采集建模界面、评估指标参数提取界面。

2.6.1 信息录入界面

对于术前困难气道评估，对患者的评估信息进行记录是必要的，评估信息分为三部分，一部分是体格外观和动作测试，一部分是体格测量参数，还有一部分是病史信息。需要医生询问患者，然后录入的信息包括，姓名、年龄、以及是否

有困难气道相关病史，包括：困难气管插管的病史、颈椎手术史、糖尿病、颈椎损伤史、鼾症、咽喉肿瘤、颈部放疗史、强直性脊柱炎、气道扭曲。需要医生对患者观察和对患者进行动作测试，然后录入的信息包括：身高、体重、咬上唇分级、是否是下颌退缩、门齿前突、络腮胡、牙齿缺损。需要医生对患者进行面颈部三位建模后对模型测量录入的信息包括：头颈部活动度、张口度和甲颏距离。在完成点云采集和评估指标参数提取之后，点击获取，即可自动填入信息。当所有的信息全都录入后，点击评估即可输出困难气道评估结果和可能困难气道的原因。信息录入界面如图 2-9 所示。

气道评估

气道评估 点云采集 指标提取

姓名:

年龄:

身高(cm):

体重(kg):

下颌退缩 ☐ 是 ☐ 否

门齿前突 ☐ 是 ☐ 否

络腮胡子 ☐ 是 ☐ 否

牙齿缺损 ☐ 是 ☐ 否

打鼾 ☐ 是 ☐ 否

下颌能否接触胸骨 ☐ 是 ☐ 否

妊娠 ☐ 是 ☐ 否

咬上唇分级 ☐ 一级 ☐ 二级 ☐ 三级

甲颏距离(mm): 获取

张口度(mm): 获取

头颈部活动度(°) 获取

评估

病史:

☐ 是 慢性阻塞性肺疾病 ☐ 是 颈椎手术史 ☐ 是 哮喘 ☐ 是 睡眠呼吸暂停综合征史

☐ 是 颈椎损伤史 ☐ 是 强直性脊柱炎 ☐ 是 气管软化 ☐ 是 胃食管反流

☐ 是 颈部长期放疗史 ☐ 是 咽喉癌 ☐ 是 鼾症 ☐ 是 面部骨折

☐ 是 困难气管通气史

备注:

图 2-9 信息录入界面

Figure 2-9 information Input interface

2.6.2 点云采集界面

对患者面颈部进行三维重建，第一步就是对面颈部点云的采集，采集时先对采集设备进行连接，然后采用三个点位采集后配准的重建策略，需要测量患者仰头闭口和张口两个姿态的点云，当每个姿态的各个视角点云均采集完成后，才能进行配准重建。配准重建完成后点击保存即可把重建后的面颈部模型传到对应参数测量界面。具体采集界面如图 2-10 所示。

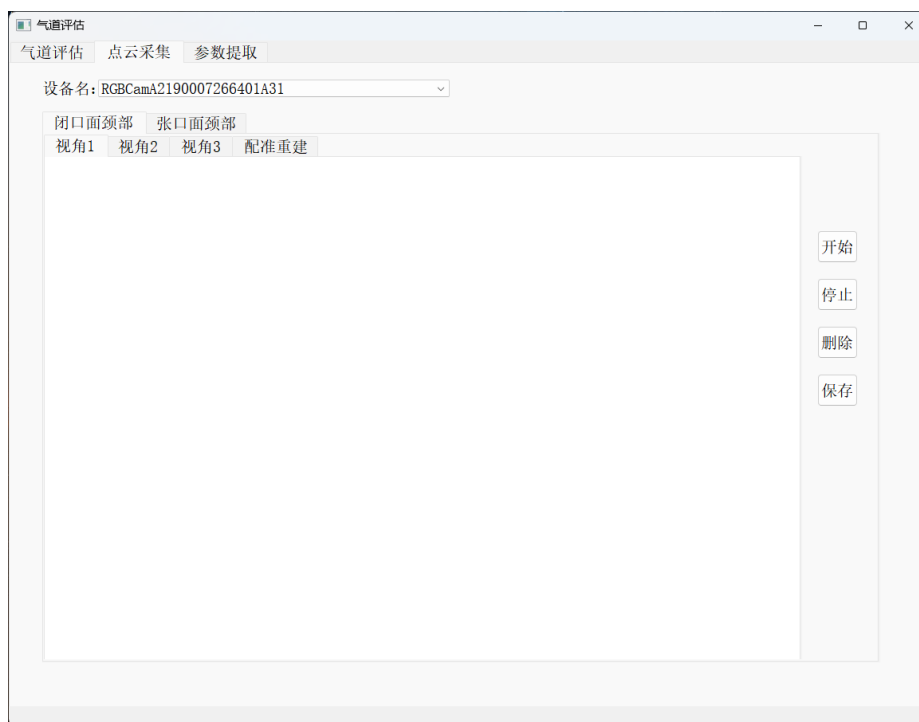


图 2-10 点云采集界面

Figure 2-10 Point Cloud Acquisition Interface

2.6.3 参数提取界面

在采集界面传来建模之后，即可在此界面测量甲颏距离、张口度和头颈活动度。甲颏距离和张口度均是在模型上手动选中两个测量位置后，由系统计算距离。头颈活动度是在需要测量角度的位置手动绘制两条直线后，点击两个直线之间的夹角，由系统计算两条直线的角度。测量完成之后点击保存后即可把需要的数据保存下来，然后再在气道评估界面的相应位置分别点击获取，即可把甲颏距离、张口度和头颈活动度数据录入。指标参数提取界面如图 2-11 所示。



图 2-11 评估指标测量界面

Figure 2-11 Evaluation index measurement interface

2.7 本章小结

本章首先对术前困难气道评估系统的功能进行分析，设计了系统的整体架构与运作流程。然后根据系统流程，对其中的关键点进行了细致的分析和整理，确定了相应的设计方案。此外，还详细阐述了系统所需的硬件设备、软件基础和技术路线，最后展示系统的交互界面，并对操作流程做出说明。

第 3 章 面颈部三维重建

在对困难气道方案进行评估时, 甲颏距离和头颈活动度这两个指标通过手动测量不够准确, 为了能更准确且更简便地进行测量, 计划在患者的面颈部三维模型上利用软件进行测量, 同时面颈部的可视化也能够为医生和患者提供更为直观的认知。三维重建指的是运用计算机技术对三维空间中的物体进行建模并呈现的过程, 接下来首先要介绍的是在获取深度信息过程中所涉及到的关键设备——RGB-D 深度相机及其独特的工作原理。

3.1 深度图像生成原理

本文选用的 RGB-D 深度相机采用双目结构光获取深度图像, 深度相机结构光使用点结构光模式, 通过利用散斑现象和编码技术将结构光信息嵌入到散斑图案中, 像物体表面投射这些散斑图案, 然后通过散斑图案的变化来实现对物体表面的深度信息获取。如图 3-1 是发射模组示意图, 发射光从 VCSEL 激光器发射出来经过准直镜和衍射光学元件 (Diffractive Optical Elements, DOE) 进而转换成 3 万个散斑点发射出去。

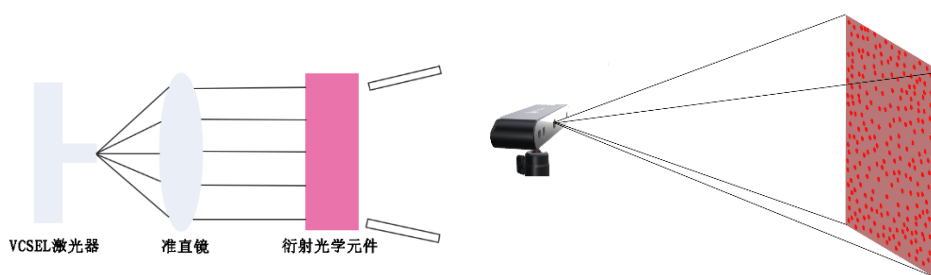


图 3-1 发射模组示意图

Figure 3-1 Emission module schematic diagram

深度计算流程是相机标定、深度标定、场景采集、视差匹配、视差转深度、深度转点云。相机标定是为了获取相机的内参、外参、与畸变参数。深度标定是为了获取参考距离处的平面散斑图, 视差匹配是为了在参考图中寻找场景散斑图的同名点从而计算视差。本文选用的商用深度相机在出厂时已经进行了预先标定, 内置了相机的内部参数和外部参数, 以及 RGB 图像和深度图像之间的对齐关系。因此, 用户可以直接使用这些相机来获取对齐的 RGB 和深度数据, 而无需进行额外的相机标定步骤。双目结构光获取物体深度信息是利用三角关系来求的, 数

学几何模型如图 3-2 所示， f 为相机的焦距，两个相机光轴中心的距离为 B ，空间里的目标点 P ，分别在坐标 x_1 和 x_2 形成两个像点，将 $(x_1 - x_2)$ 定义为视差，使用公式 (3-1) 求深度值。

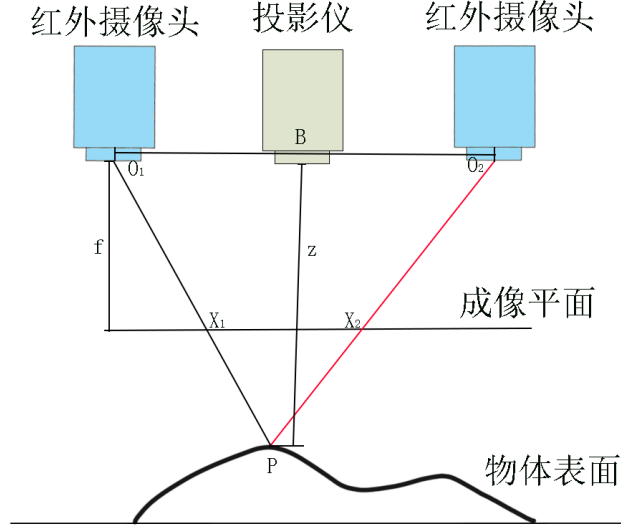


图 3-2 深度相机求视差的数学几何模型

Figure 3-2 The mathematical geometric model of the parallax of the depth camera

$$\begin{aligned} \frac{B}{Z} &= \frac{B - (x_1 - x_2)}{Z - f} \\ Z &= \frac{fB}{(x_1 - x_2)} \end{aligned} \quad (3-1)$$

由公式 (3-1) 可以看出只要求出视差，即可计算出深度值。因此在双目视觉系统中，核心任务是寻找左右图像中的对应点，建立对应关系，从而计算出视差。结构光双目使用的固定的光源模式，投射出人眼不可见的散斑红外光点到物体上，每个散斑光点和它周围窗口内的点集在空间分布中的每个位置都是唯一且已知的，提高了双目匹配的准确性和稳定性。

3.2 点云采集

根据上文分析，本文采用双目红外结构光 RGB-D 相机，在市场上筛选，最终选用 Willboox-MiniStar 型号的相机当作采集设备。本节鉴于中国人面颈部的特点，对面颈部点云的采集和进行了讨论和设计。

3.2.1 点云采集方式

对于面颈部点云的采集来说，由于摄像头拍摄的角度范围以及面颈部部结构

的复杂性，一次采集不会完全采集到全部，因此，为了获得完整的面颈部点云，必须进行多次拍摄，然后再对采集到的点云进行配准。对面颈部结构进行分析，发现面部呈半球形，脖子呈圆柱形，鼻子形似三棱锥。为了采集整个面颈部的点云数据，需要对不同部位进行多次拍摄。具体来说，鼻子至少需要三次拍摄点云才能全面覆盖，脖子需两次拍摄，脸颊两边各需一次拍摄，下巴部位需要一次拍摄。因此，面颈部点云的采集至少需要三次拍摄。经过实验分析，以鼻子和下颌为核心点，相机分别对准左下颌角、右下颌角和鼻梁位置时，可以覆盖全部面颈部。如图 3-3 所示，展示了采集点云的角度和不同角度下的拍摄效果。

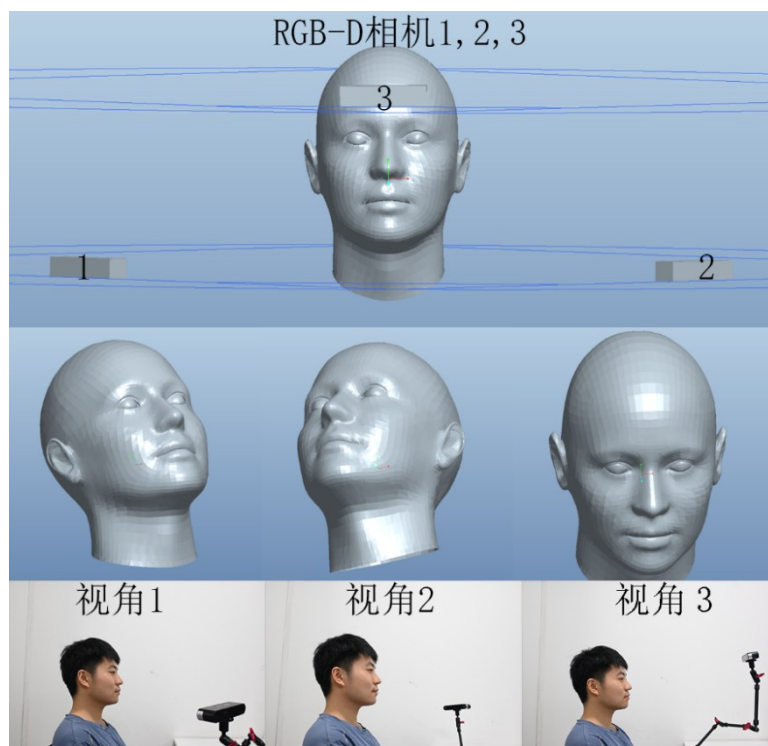


图 3-3 相机位置和拍摄的效果

Figure 3-3 Camera position and shooting effect

对于采集到的点云，目标只有人体部分，主体之后的背景会影响面颈部的三维重建，因此需要对采集到的点云过滤掉无关的背景信息。在拍摄场景中，背景均在主体后面较远的位置，可以通过一个距离阈值，将点云中与传感器位置距离过远的点过滤掉。距离阈值根据目标主体点云的尺度，设置为采集点云中最近点的距离加 40cm。超过该阈值的点被认为是背景点。

如图 3-4 是过滤掉背景的点云结果。对于采集的数据来说，点云 A1 覆盖左半边脸、左中脖子和左下鼻子，点云 A2 覆盖右半边脸、右中脖子和右下鼻子，点云 A3 覆盖额头和鼻梁位置。



图 3-4 三个角度采集的点云

Figure 3-4 Point clouds collected from three angles

3.2.2 点云预处理

尽管采集到了全脸的点云数据，但是由于面颈部结构的复杂性和采集条件的不稳定性，如环境光线、拍摄距离等因素，采集到的点云数据可能存在以下几种噪声问题，这些噪声数据会对后续的配准精度和效果产生负面影响。在 Wiiboox 深度相机的实验中，主要面临以下几种噪声情况：①需要去除边缘的离群点；离群点是指与周围点距离较远的异常点，可能是由于传感器误差或环境干扰造成的。离群点会影响点云的几何特征和拓扑结构，降低配准的精度和稳定性。②密度不均匀，需要对点云数据进行平滑处理以调整密度的不规则性；密度不均匀是指点云中的点分布不均匀，有的区域点过密，有的区域点过稀。这可能是由于采集角度和距离的不同造成的。密度不均匀会导致点云的表面细节丢失或过度平滑，影响配准的效果和效率。③大量数据，会影响点云处理的速度。大量数据是指点云中的点数过多，严重影响了计算机的处理能力。这可能是由于采集分辨率过高或采集范围过大造成的。大量数据会增加点云的存储和传输的开销，也会增加点云的处理和配准的时间和复杂度。

为了解决上述的噪声问题，本文中提出了以下几种处理方法：

移除离群点的方法是通过邻域点统计分析的形式，找出点云中的离群点，并将其滤除。具体的方法是计算每个点到其邻域点的距离，然后根据距离的平均值和标准差来判断是否为离群点。对邻域点分析第一步是计算任意点 $P_n(X_n, Y_n, Z_n)$ 到邻域点 $P_m(X_m, Y_m, Z_m)$ 的距离，如式(3-2)所示：

$$S_i = \sqrt{(X_n - X_m)^2 + (Y_n - Y_m)^2 + (Z_n - Z_m)^2} \quad (3-2)$$

再根据式(3-3)和式(3-4)求得平均值和标准差即可筛选出离群点。

$$\mu = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_i \quad (3-3)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (S_i - \mu)^2} \quad (3-4)$$

筛选离群点时只需给定阈值 K 和标准差倍数 n ，对于每个数据点，考虑其与 K 个最近邻点的平均距离是否在范围 $(\mu - \sigma n, \mu + \sigma n)$ 内，不在该范围内的，则将其视为离群点删除。

均匀点云密度的方法是通过点云体素化网格的形式，对点云进行下采样和平滑处理。具体的方法是在点云上创建一个三维体素网格，每个体素中计算一个重心作为替代点。通过调整体素的大小，可以在不改变点云形状的同时，实现点云密度的均匀化。重心使用式(3-5)计算：

$$\mathbf{c} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \mathbf{p}_i \quad (3-5)$$

其中， c 是重心坐标， n 是体素中的点数， P_i 是体素网格内第 i 个点的坐标。

3.3 面部滤波算法

为了减少采集次数，通过上文采集方法得到的面颈部点云具有重合率低，存在空洞，不闭合，非刚性等特点。重合率是指两个点云之间的重叠区域占总区域的比例。重合率低会导致点云之间的匹配点难以找到，影响配准的准确性和稳定性。空洞是指点云中缺少数据的区域，可能是由于采集角度或遮挡造成的。空洞会导致点云的表面不连续，影响配准的效果和质量。不闭合是指点云的边缘不完整，可能是由于采集范围或分辨率造成的。不闭合会导致点云的形状不完整，影响配准的完整性和一致性。非刚性是指点云中的点在采集过程中发生了形变，可能是由于人体的晃动或眨眼造成的。非刚性会导致点云的几何特征和拓扑结构发生变化，影响配准的对应性和相似性。其中重合率低和非刚性会极大影响刚性点云配准算法的分析和处理。

为了解决上述的配准问题，本文中提出了面部滤波算法：对点云数据进行区块分割，既能提两片点云间的重合率，又能去除头发、眼睛等不重要的复杂形变区域。能够提点云的特征性和配准的精度。

如果两个点云之间的重叠区域低于 60%，那么在计算变换矩阵时，非重叠部

分的点可能会被错误地加权,从而导致不准确的结果^[55]。这些误差会在后续的配准步骤中累加,并最终影响整个点云模型的精度和鲁棒性。对于呈对称结构的面颈部来说,点云重叠率低还会导致特征重复,从而导致特征匹配混乱,进而增加匹配时间。由此可见提高点云的重叠率是提高点云配准鲁棒性的关键之一。

上文的采集方式决定了点云重叠区域在中间,所有面颈部点云的横轴方向为 X 轴。对于左下和右下采集的点云 A1、A2,在 X 轴上对点云数目进行平均分成两份,滤掉外部的一半后,留下靠中间的部分,即为重叠部分。对于中上采集的点云 A3,在 X 轴上对点云数目进行平均四份分割,留下中间的两份点云,即为中间重叠部分。分割坐标如式(3-6)和式(3-7)所示:

$$\mathbf{a} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \mathbf{p}_x \quad x_{min} < x < x_{max} \quad (3-6)$$

$$\mathbf{b} = \begin{cases} \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^{n/2} \mathbf{p}_x & (x_{min} < x < x_a) \\ \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^{n/2} \mathbf{p}_x & (x_a < x < x_{max}) \end{cases} \quad (3-7)$$

其中 a 为二等分 X 的坐标值, b 为四等分 X 的坐标值、 P_x 为各个点的 X 坐标值,对点云 A1、A2、A3 滤波后的点云 C1、C2、C3 如图 3-5 所示。

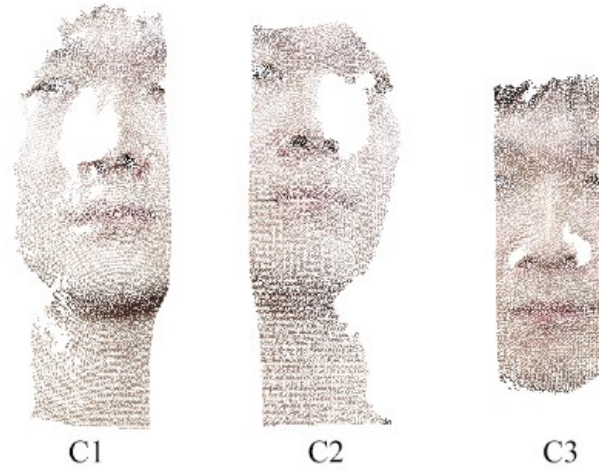


图 3-5 高重叠率的点云

Figure 3-5 High overlap rate point cloud

对于面颈部来说,形变的主要来源是毛发、眼睛和脖子。面部在没有表情变化时,不会有大幅形变。眼睛在眨眼的时候会产生形变。黑色的头发与眉毛虽然不会动,但他们能吸收光线,因此在采集过程中会出现摄像头接收不到光反射的情况,导致采集的毛发形态不同,而且形变方式十分复杂,这会极大地影响配准

效果。脖子只有在晃动时会产生形变。由于头发和眼睛是面颈部的不重要元素，所以只需保证脖子和面部的配准精度即可，但面部的结构较为精细复杂，而脖子结构较为简单，轻微晃动对全局配准效果影响不大，所以本文把面部配准精度放在首位。虽然脖子的轻微晃动产生的形变小，但是区域较大，如果把脖子和面部放在一起配准，合并误差比较影响面部局部精细部分的配准。因而设计面部滤波把眼睛及以上和下巴以下滤波去除，只留下鼻子等面部明显特征，进行局部精确配准。

3.3.1 定位嘴唇

要把面颈部进行分割，必须找到一个基准点。中国人的面颈部，颜色特征主要在皮肤、眼睛，嘴唇和毛发。一般来说，头发是黑色的；眼睛是白色的，瞳孔是黑色的；嘴唇为粉红色。结构光扫描在处理黑色物体时识别效果会变低，因为黑色物体对光的反射很低，难以准确捕捉到，所以不适合使用头发。白色的眼白面积较小，容易误检，嘴唇的粉红色虽有偏差但都在一定范围内，因此可以使用嘴唇作为基点，以此找到头发和脖子的位置，再进行过滤分割。

在对颜色进行过滤时，由于 RGB (Red, Green, Blue) 是一种加法颜色模型，是通过调节红色、绿色和蓝色三个基本颜色的混合比例来得到其他颜色的，不太适合算法过滤，相比较而言 HSV (Hue, Saturation, Value) 是通过色相、饱和度和亮度三个参数来描述颜色的模型。更加符合人类对颜色的感知，因为它能够更好地描述颜色的色调、鲜艳程度和明暗程度。较为适合用于颜色过滤。转换滤波点云 C1, C2, C3 的 RGB 信息为 HSV，转换过程如下：

首先，将 RGB 值转换为范围在 0 到 1 之间的数值，如式(3-8)。

$$\begin{cases} R' = R / 255 \\ G' = G / 255 \\ B' = B / 255 \end{cases} \quad (3-8)$$

然后，计算最大值和最小值，如式(3-9)。

$$\begin{cases} C_{\max} = \max(R', G', B') \\ C_{\min} = \min(R', G', B') \\ \Delta = C_{\max} - C_{\min} \end{cases} \quad (3-9)$$

计算色相 (Hue)，如式(3-10)。

$$H = \begin{cases} 0^\circ & \Delta = 0 \\ 60^\circ \times \left(\frac{G' - B'}{\Delta} \bmod 6 \right) & , C_{\max} = R' \\ 60^\circ \times \left(\frac{B' - R'}{\Delta} + 2 \right) & , C_{\max} = G' \\ 60^\circ \times \left(\frac{R' - G'}{\Delta} + 4 \right) & , C_{\max} = B' \end{cases} \quad (3-10)$$

计算饱和度 (Saturation), 如式(3-11)。

$$S = \begin{cases} 0 & , C_{\max} = 0 \\ \frac{\Delta}{C_{\max}} & , C_{\max} \neq 0 \end{cases} \quad (3-11)$$

由亮度 (Value) 为 $C_{\max}$ 。即可成功转化如式(3-12)。

$$C(X, Y, X, R, G, B) \rightarrow C(X, Y, X, H, S, V) \quad (3-12)$$

虽然实际采集的点云中包含颜色信息, 但是由于环境光等的存在, 颜色会与实际略有偏差, 如果仅仅识别粉红色, 则会在非嘴唇部分也能找到部分点。因此需要在颜色信息的基础上增加邻域点限制, 在其邻域半径 1mm 内有均为粉红色点, 则判定该点为嘴唇上的点。为了进一步保证算法的稳定性, 去除最大的和最小的各 5 个 y 坐标值后求平均, 即可得到嘴唇代表点的 y 坐标。

对 HSV 信息过滤, 寻找符合式(3-13)的点 P_j 。

$$P_j(X, Y, X, H, S, V) \quad (145 < H < 180; 80 < S < 255; 30 < V < 255) \quad (3-13)$$

对目标点 $35^\circ \sim 80^\circ$ 寻找半径 1mm 内的领域点 $P_k(X_k, Y_k, Z_k)$ 如式(3-14)所示。

$$1 = \sqrt{(X_j - X_k)^2 + (Y_j - Y_k)^2 + (Z_j - Z_k)^2} \quad (3-14)$$

再对 P_k 进行判断, 若 HSV 值均在式(3-14)的范围内, 则判定 P_j 为嘴唇上的点。为了进一步保证算法的稳定性, 去除最大的和最小的各 5 个 P_j 的 Y 坐标后, 求 P_j 的 Y 坐标值平均值, 即可得到代表嘴唇点的 y 坐标。

3.3.2 面部滤波

由论文^[56]知成年人的脸长约为 16-22 厘米, 鼻子高 34-62 厘米。当闭口时, 考虑人中和嘴唇高度的情况下, 过滤头发和眼睛时仅过滤嘴唇上 55mm 以上的

部分, 这 55mm 会包括鼻子的部分, 而又不会留下眼睛和头发。过滤脖子时仅过滤嘴唇 25mm 以下的部分, 确定把嘴唇留下而不留脖子。切割完头发和脖子点云 D_s 的 Y 坐标取值范围在嘴唇 y 坐标值的上 55mm 和下 25mm 之间, 如式(3-15)所示。闭口时, 过滤后的点云如图 3-6 所示。

$$D_s(X,Y,Z); Y \in (y-25, y+55) \quad (3-15)$$

其中 y 为代表嘴唇点的 Y 坐标值。

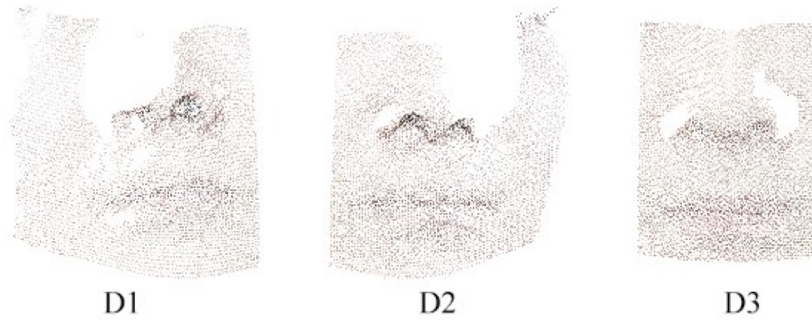


图 3-6 闭口时过滤后的点云效果图

Figure 3-6 Point cloud effect diagram after filtering when closed

当张口时, 由于张口度的存在, 而且口腔内由于遮挡, 光线不足, 导致口腔内的颜色变黑, 直接采集会出现缺陷。在采集三个位置的一段时间内, 患者的下颌会由于肌肉紧张产生微小活动, 所以对张口面颈部采集的点云应把下颌包括下唇进行分割滤除, 所以本文设计张口时过滤后的点云 D_o 的 Y 坐标取值范围在嘴唇 y 坐标值的上 65mm 到 y 之间, 如式(3-16)所示。张口时, 过滤后的点云如图 3-7 所示。

$$D_o(X,Y,Z); Y \in (y, y+65) \quad (3-16)$$



图 3-7 张口时过滤后的点云效果图

Figure 3-7 Point cloud effect diagram after filtering when opening mouth

3.4 点云配准

在滤波算法处理之后, 剩余部分就可以利用刚性配准算法进行配准了。完整的配准可以采用局部配准再还原全局方案。局部配准再还原全局是指先对点云的局部无形变区域进行粗配准和精配准, 以得到局部的变换矩阵, 再将变换矩阵应用到原始点云上, 以得到全局的配准结果。局部配准再还原全局可以提高点云的对齐性和效率, 以及忽略由眨眼和轻微晃动导致的形变, 而且也不会影响整体的配准效果。

3.4.1 局部粗配准

采集点云的质量决定着配准的质量。由于面部特征较为复杂和精细, 配准时应优先保证面部的精度。配准时先对点云 $D1$ 、 $D2$ 进行配准, 收敛后得到点云 $D12$ 和变换矩阵 $T1$, 再对 $D12$ 和 $D3$ 进行配准, 结果收敛, 得到 $D123$ 和变换矩阵 $T2$, 即可表明, 面部没有发生形变。此时把 $T1$ 和 $T2$ 应用到原始点云 $A1$ 、 $A2$ 、 $A3$ 上得到点云 $A123$ 后, 观察脖子部位为重叠状态即配准成功。否则说明三次的采集数据中, 受采者发生了大幅晃动, 采集数据失效, 需要重新采集。

对于 ICP 精配准来说, 如果初始变换矩阵不够准确, 那么 ICP 算法会收敛到错误的局部极小值点, 从而导致配准失败或配准结果不够精确。因此, 为了使精配准算法能够得到较好的配准结果, 需要提供一个准确的初始变换矩阵, 例如使用点云粗配准来提供一个较好的初始估计。本文粗配准算法使用改进的随机采样一致性算法 (Random Sample Consensus, RANSAC)^[57] 筛选出正确的匹配点对。

RANSAC 算法的基本原理是随机采样。其在对应点集中随机选取 3 个对应点对, 并求解刚体变换矩阵, 如图 3-8 所示。然后计算对应点集中剩余点对在此刚性变换矩阵下的距离误差, 如果其中一对点的距离误差小于预设的阈值误差, 那么该点对被认为是样本内点; 否则, 被视为样本外点。

重复上述步骤直达到达到设定的迭代次数上限。在每次迭代中, 统计不同刚性变换模型下的样本内点数量。选择样本内点数量最多的模型作为最佳数学模型。然后, 将剔除外点后的对应点对作为正确的点对, 用于进行点云配准操作。本文使用了三维形状上下文特征 3DSC^[58] 特征匹配点对进行筛选, 进一步增加了匹配的速度和准确率。

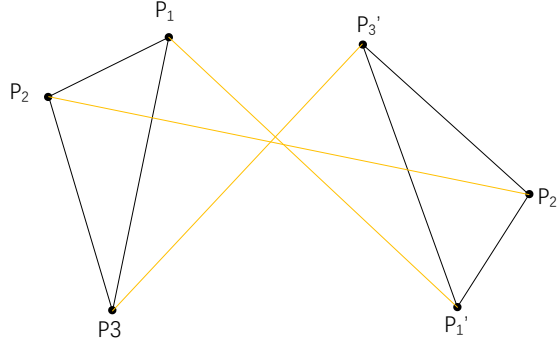


图 3-8 RANSAC 点对关系图

Figure 3-8 RANSAC point pair relationship diagram

为了提高粗配准的稳定性, 本文使用改进的随机采样一致性算法进行粗配准, 先用 3DSC 描述每个点的局部形状特征, 再使用 RANSAC 算法筛选出正确的匹配点对。使用 3DSC 对点云的特征进行描述时, 建立一个表示局部区域点分布的立体球状形式如图 3-9 所示, 该球体以任意点为球心, 以该点的法线来确定球的方向, 用半径、方向角和俯仰角三个参数划分网格, 取得 $J+1$, $K+1$ 和 $L+1$ 个分段。计算网格里的点的数目, 并构造相对应的向量, 以此来作为描述子。半径和权重如式(3-17)和式(3-18)所示:

$$r_j = \exp \left\{ \ln r_{\min} + \frac{j}{J} \ln \left(\frac{r_{\max}}{r_{\min}} \right) \right\} \quad (3-17)$$

$$w(p_i) = \frac{1}{\rho_i \sqrt[3]{V(j, k, l)}} \quad (3-18)$$

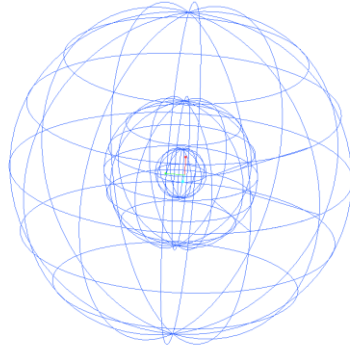


图 3-9 3DSC 球空间

Figure 3-9 3DSC sphere space

其中 $r_{\max}$ 和 $r_{\min}$ 是球形空间半径的边界。 $V(j, k, l)$ 对应的是每个区域的体积, ρ_i 对应的是局部的点密度, p_i 为在 p 定义的球空间内的点。 ρ_i 基于区域点数与 p_i 对应的半径来估计得到。

3.4.2 局部精配准

在粗配准优化两片点云初始位置之后,需要使用 ICP 算法进行精配准,实现高精度的配准效果。ICP 通过最小二乘法来优化两片点云之间的刚体变换,不断采用 Gauss-Newton 算法迭代,直到回归出最优的线性模型。设源点云为 $A(x_a, y_a, z_a)$ 和目标点云为 $B(x_b, y_b, z_b)$, 则有配准的空间变换模型公式(3-19)。

$$\begin{bmatrix} x_a \\ y_a \\ z_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{bmatrix} + m \cdot R(\varphi, \omega, \kappa) \cdot \begin{bmatrix} x_b \\ y_b \\ z_b \end{bmatrix} \quad (3-19)$$

其中, x_a, y_a, z_a 是源点云 A 的坐标值, x_b, y_b, z_b 是目标点云 B 的坐标值, m 是用于两个三维坐标系之间的比例转换系数, t_x, t_y, t_z 分别表示沿 X, Y, Z 轴方向的平移分量, φ, ω, κ 是绕 X, Y, Z 轴旋转的角度参数^[58]。

由于有噪声的存在,不可能所有点都完全重合,因此所求得的变化矩阵不完全相同,为了评估配准的效果,一般会计算点对之间的欧氏距离平方和($DIST$)作为评估标准,距离越大,说明配准效果越差,反之,则越好。在配准算法中,当计算的旋转矩阵 R 和平移矩阵 T 使得 $DIST$ 小于某一给定的阈值或者大于预设的最大迭代次数时,就会停止迭代计算。 $DIST$ 计算方式如式(3-20)所示。

$$DIST = (x_a - x_b)^2 + (y_a - y_b)^2 + (z_a - z_b)^2 \quad (3-20)$$

计算的旋转矩阵 R 和平移矩阵 T 时,记目标函数为式(3-21)

$$J = \sum_{i=0}^k \|b_i - (Ra_i + T)\|^2 \quad (3-21)$$

其中, k 是匹配点的个数。则有源点云质心 $\bar{A}$, 在变换后的点云质心 A' 与目标点云 $\bar{B}$ 的质心相同即有式(3-22):

$$\begin{aligned} \bar{A} &= \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k a_i, \bar{A}' = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k a'_i \\ \bar{B} &= \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k b_i \\ d_{Ai} &= a_i - \bar{A}, d_{Bi} = b_i - \bar{B} \end{aligned} \quad (3-22)$$

可将目标函数改写为式(3-23):

$$J = \sum_{i=1}^k \|d_{Bi} - Rd_{Ai}\|^2 \quad (3-23)$$

分解(3-23)得式(3-24):

$$\begin{aligned} J &= \sum_{i=0}^k (d_{Bi} - Rd_{Ai})^T (d_{Bi} - Rd_{Ai}) \\ &= \sum_{i=0}^k (d_{Bi}^T d_{Bi} Rd_{Ai} - d_{Ai}^T R^T d_{Bi} + d_{Ai}^T R^T Rd_{Ai}) \\ &= \sum_{i=0}^k (d_{Bi}^T d_{Bi} + d_{Ai}^T d_{Bi} - 2d_{Bi}^T Rd_{Ai}) \end{aligned} \quad (3-24)$$

要使得 J 最小，需要对其求导值最大，则有式(3-25):

$$J' = \sum_{i=0}^k d_{Ai}^T Rd_{Bi} = \text{tr}(\sum_{i=0}^k Rd_{Bi} d_{Ai}^T) = \text{tr}(RH) \quad (3-25)$$

H 为三阶方阵，有式(3-26):

$$H = \sum_{i=0}^k d_{Ai} d_{Bi}^T \quad (3-26)$$

用 SVD 分解 H 矩阵，并令 $X = VU^T$ 则有式(3-27):

$$XH = VU^T U \wedge V^T = V \wedge V^T \quad (3-27)$$

可得旋转矩阵 $R = X$ ，和平移矩阵 T ，如式(3-28):

$$T = \bar{B} - R \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k A_i \quad (3-28)$$

对点云 D1、D2、D3 分别进行局部粗配准和精配准后得到点云 D12 和点云 D123 如图 3-10 所示。

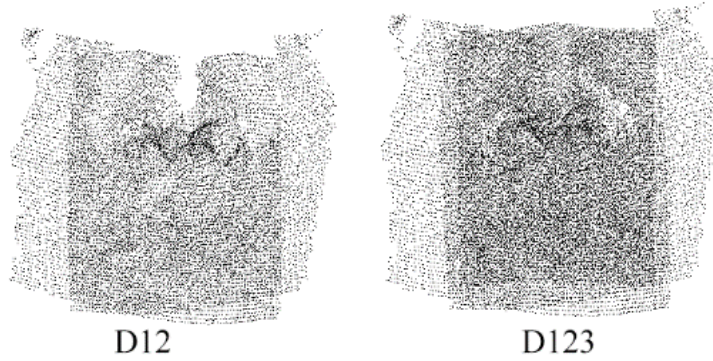


图 3-10 局部配准结果（左 D12、右 D123）

Figure 3-10 Local registration results (left D12, right D123)

3.4.3 全局配准

把粗配准和精配准求得的两组变换矩阵，依次应用在原始点云 A1、A2、A3 上得到点云 A12 和点云 A123，如图 3-11 所示，再把配准完成的离散点云数据使用 Delaunay 三角剖分算法转换为平滑的曲面模型。使用 Bowyer-Watson 算法可确保生成 Delaunay 三角网^[59]，Watson 算法的基本步骤是：创建一个包含所有点集的超级三角形，然后对点集中的散点逐点插入已有的有效 Delaunay 三角剖分中。在每次插入新点后，需要删除任何外接圆包含该新点的三角形，以保持 Delaunay 三角网的性质。这样做可以形成一个星形多边形洞。然后，使用新点重新进行三角剖分，将其插入到合适的位置。这个过程会不断重复，直到所有离散点都被插入完毕，从而得到最终的三角网格模型。使用平滑算法对网格进行平滑操作即可完成面颈部的三维重建，如图 3-12 所示。



图 3-11 全局配准结果（左 A12、右 A123）

Figure 3-11 Global registration results (left A12, right A123)



图 3-12 面颈部的三维模型

Figure 3-12 Three-dimensional model of face and neck

3.5 算法总体流程

设计的面颈部配准总体流程如图 3-13 所示。首先，使用深度相机在设计位置上采集 3 个角度的面颈部点云，得到初始点云 A1、A2、A3。随后，对采集的

图像进行面部滤波处理，得到鼻子及附近的点云 $D1$ 、 $D2$ 、 $D3$ ，对 $D1$ 、 $D2$ 配准得到点云 $D12$ 和变换矩阵 $T1$ ，再对 $D12$ 、 $D3$ 配准得到点云 $D123$ 和变换矩阵 $T2$ ，对初始点云应用 $T1$ 、 $T2$ ，得到配准成功的面颈部点云 $A123$ 。这样就完成了整个面颈部三维模型的重建。

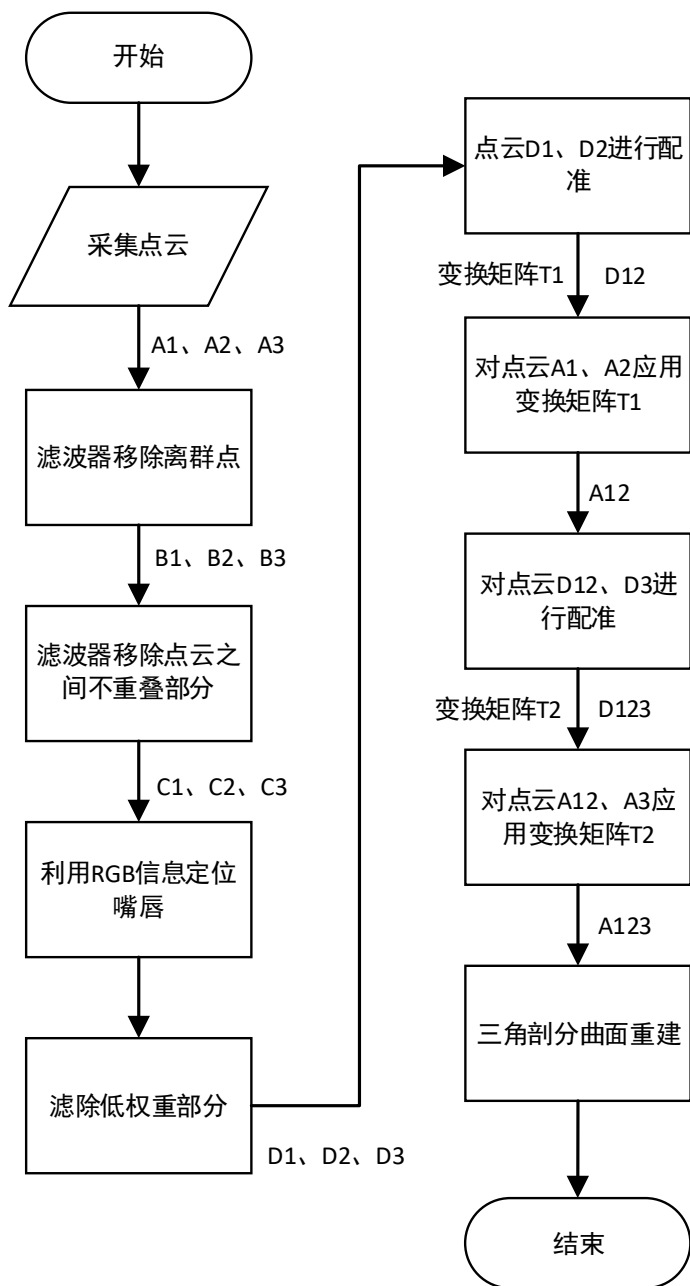


图 3-13 面颈部重建总体流程

Figure 3-13 Overall process of face and neck reconstruction

3.6 本章小结

本章首先介绍了深度相机的工作原理，设计了使用深度相机采集面颈部点云的方式，并提出了一种与采集方法相适应的面部滤波算法，然后使用 3DSC 改进

的 RANSAC 与 ICP 的融合算法完成点云的局部配准，再通过把局部配准的变换矩阵应用在原始点云实现点云配准。最后对整个重建流程进行总结和展示。

第4章 困难气道评估

当所有需要的患者信息全部录入后，系统才能对气道进行评估。录入部分包括病史询问、患者的体格外观和动作测试、模型上测量的评估指标。

4.1 评估指标获取

4.1.1 病史询问、体格外观和动作测试

医生首先对患者的基本信息进行问询：姓名、年龄、是否有困难气管插管史；是否有慢性阻塞性肺疾病、哮喘、咽喉癌、打鼾、睡眠呼吸暂停综合征史、胃食管反流病、气管软化；是否出有过面部骨折、颈椎损伤、颈椎手术、颈部长期待放。问询结果及时记录到系统中。

然后观察患者体格外观特征，对是否有下颌退缩、门齿前突、络腮胡、牙齿缺损进行记录。下颌退缩在外观上主要表现为下颌颏部短小，面下 1/3 部分显得较短，从侧面看可能呈现出“鸟嘴”样的外观，与其他面部特征不协调。门齿前突的患者常表现为门齿明显向前突出，超出了正常的位置。在自然放松的状态下，嘴唇无法完全闭合，导致门齿暴露在外，面下部的轮廓线条不自然。

然后再对患者做一些动作测试检查。让患者用下切牙尽量往上咬上嘴唇，查看下切牙接触的位置，进行咬上唇分级测试。让患者用下巴尽量靠近胸骨，测试下颏能否接触胸骨。使用身高体重秤测量身高和体重。

最后剩余的甲颏距离、张口度和头颈部活动度指标，需要从面颈部三维模型上测量。

4.1.2 测量甲颏距离

甲颏间距是指患者头部后仰至最大限度时，甲状软骨切迹至下颌骨前突间的距离。为了能够在模型上获取到甲颏距离，应该采集患者最大后仰位闭口的点云数据，使用上文重建方法进行面颈部建模，得到下面图 4-1 模型。由医生在参数提取-甲颏距离界面中选中两个点，分别为甲状软骨切迹和下颏尖端的中心，系统即可以自动获取两点之间的欧氏距离，即甲颏距离。选点操作通过监听鼠标点击可视化的点云获取所点击的点云索引和坐标，获取坐标后利用 `viewer.addLine` 函数来绘制这两个点连成的直线，利用距离公式即可计算两点间的距离。模型中

所求的甲颞距离为 78.6mm，如图 4-2 所示。

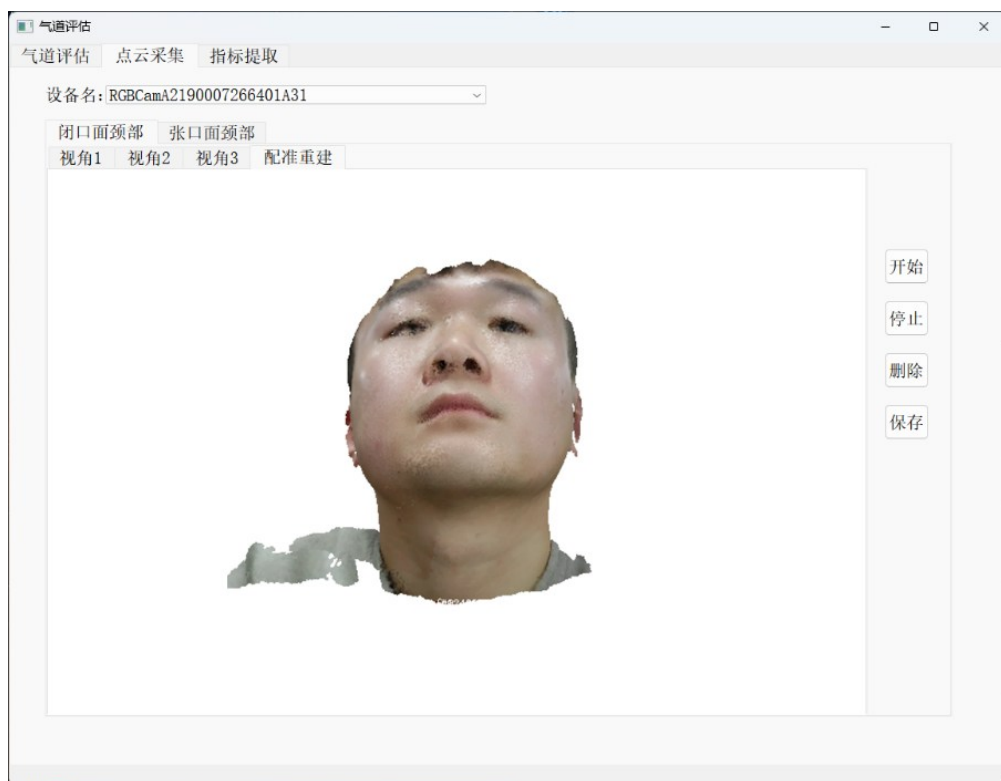


图 4-1 最大后仰位闭口面颈部模型

Figure 4-1 Max-backward closed-mouth face and neck model



图 4-2 甲颞距离测量

Figure 4-2 Thyromental distance measurement

4.1.3 测量张口度

张口度测量是指患者尽量张口时，上下切牙间的距离。使用面颈部模型测量时，也需要在采集点云时，患者尽可能张口，而且尽量要把牙齿露出来，使用上文重建方法进行面颈部建模，得到下面图 4-3 模型。在建模之后如果，露出牙齿则在上下门齿边缘选点绘制线段，并求出距离，如果不露牙齿，则选择在上下唇中点的边缘进行求距。选点与求距方式与甲颏距离测量相同。模型中所求的张口度为 44.2mm，如图 4-4 所示。



图 4-3 张口面颈部模型

Figure 4-3 Mouth-face-neck model



图 4-4 张口度距离测量

Figure 4-4 Mouth opening distance measurement

4.1.4 测量头颈部活动度

正常头颈伸屈范围在 $90^{\circ} \sim 165^{\circ}$ ，从中立位到最大后仰位位置，正常值 $35^{\circ} \sim 80^{\circ}$ 。本文为了简化测量方式，测量从中立位到最大后仰活动角度和测试下颏能否接触胸骨，这样只需进行一个姿势的三维重建即可。

测量从中立位到最大后仰活动角度，中立位是患者的下巴水平面与地面平行，即下巴与颈部垂直，所以头颈部活动度为测出的最大后仰位下巴与颈部的夹角后减去 90° 。在建模之后，由医生在参数提取-头颈部活动度界面调整模型为侧视图，然后使用直线工具绘出下巴边缘和颈部边缘两条直线。点击获取角度按钮后，单击在所测角的空白部分，即可显示角度。直线工具绘制采用两点绘制一条直线，绘制完成可以拖动和旋转，不与点云上的点绑定，完成两条直线绘制之后，通过设置直线的交点为坐标原点，可以得到四个向量，选中任意一个夹角可以通过两个向量的内积来计算。角度计算公式如(4-1)。操作完成后的模型如图 4-5 所示，测出中立位到最大后仰位头颈部活动度为 $140^{\circ} - 90^{\circ} = 50^{\circ}$ 。

$$\theta = \arccos((A \cdot B) / (|A| |B|))(180 / \pi) \quad (4-1)$$



图 4-5 头颈部活动度测量

Figure 4-5 Head and neck mobility measurement

4.2 气道评估

把患者所有的信息都录入完毕之后,就可以根据这些信息对患者进行气道评估了,评估主要针对临床上常用的面罩通气、喉罩通气和插管通气,这三种通气适用病人和评估指标均有所不同,下面分成面罩通气困难气道分析、喉罩通气困难气道和插管通气困难气道分析。

4.2.1 面罩通气困难气道评估

面罩通气是一种常见的简便麻醉术后通气方法,它通过将面罩与患者的面部密合,提供氧气和呼气道正压来维持患者的通气,适用于大多数患者,但依然会有患者因为无法确保面罩与面部密合接触,而导致通气效果不佳,甚至无法进行通气。因此在进行面罩通气前需要进行困难气道评估,有关面罩通气的主要评估指标有:年龄、BMI、络腮胡子、牙齿缺损、打鼾史共五种指标。其中如果两种及以上不符合指标标准,就有 70%以上的可能面罩通气困难。不符合指标的项目越多,可能性越高,另外严重的颌面部异常、下颌后缩或前突也会导致面罩通气困难^[60]。所以本文建议,当上述七种指标无异常时,可以正常对患者采用面罩通气。如果出现其中一种异常,说明有可能为面罩困难气道,在准备患者采用面罩

通气的时候，需要注意可能出现的风险。如果出现两种及其以上异常，说明大概率为困难气道，建议谨慎使用面罩气道通气方式。各项评估指标影响如图 4-6 所示。

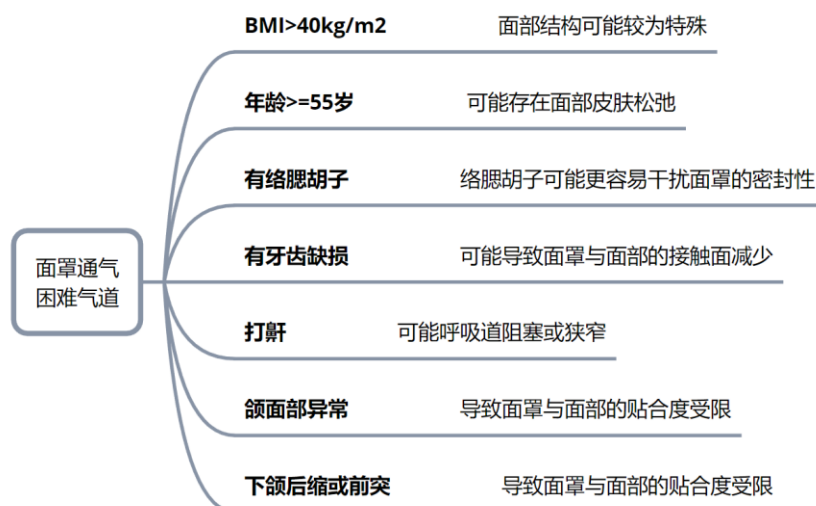


图 4-6 面罩通气困难气道指标影响

Figure 4-6 Effect of mask ventilation difficulty airway index

4.2.2 喉罩通气困难气道评估

喉罩通气是一种通过喉罩建立气道通路，是介于气管插管与面罩之间的通气工具。喉罩是一种软性的装置，类似于面罩，可以插入患者的口腔，覆盖喉部入口，形成气道通路，以便进行通气。喉罩置入操作简便、快速，损伤小，医护人员容易掌握，应优先于插管通气使用^[61]。根据所选的指标，当患者的张口度较小，会导致难以放入喉罩。当患者出现病态肥胖时，会使喉罩的密封性难以保证，当患者处在妊娠期时，患者会有反流误吸的风险。如果出现其中一种异常，就说明有大概率为困难气道，建议谨慎使用喉罩气道通气方式。各项评估指标影响如图 4-7 所示。

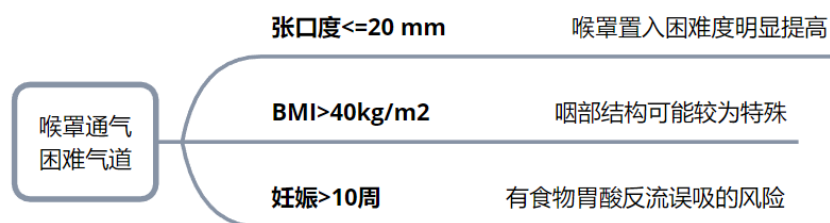


图 4-7 喉罩通气困难气道指标影响

Figure 4-7 Effect of laryngeal mask airway ventilation difficult airway index

4.2.3 插管通气困难气道评估

插管通气是一种通过将气管导管插入患者气道，建立人工气道并进行通气的

方法。这也是一种常见的麻醉术后通气方法，适用于需要机械通气或无法通过其他通气方法维持气道通畅的患者^[62]。插管通气是一种较为侵入性的通气方法，需要经过专业培训和经验才能进行。它可以提供更好的通气控制和保护气道，适用于需要长期机械通气或无法通过其他通气方法维持气道通畅的患者。进行插管前，需要对患者进行气道评估，以确定最佳插管方法和设备选择。有关插管通气的评估指标有：体重、张口度、甲颏距离、头颈部活动度、咬上唇分级、下颌退缩、门齿前突。每一个指标的标准都分为无风险、中等风险、高风险，不符合标准的项目越多，说明插管困难气道的风险越大。如果出现其中一种异常，说明有可能为插管困难气道，在准备患者采用插管通气的同时，需要注意对应可能出现的风险。如果出现两种及其以上异常，说明大概率为困难气道，建议谨慎使用插管气道通气方式。各项评估指标影响如图 4-8 所示。



图 4-8 插管通气困难气道指标影响

Figure 4-8 Effect of intubation ventilation difficulty airway index

4.2.4 病史影响评估

对于评估困难气道来说，知晓患者的病史至关重要。如果患者有困难气道通气史应详细记录处理原因和处理方式，以便给麻醉医生指定通气方案提供参考。如果患者有慢性阻塞性肺疾病、哮喘、颈椎损伤、颈椎手术、强直性脊柱炎、咽喉癌、颈部长期放疗、鼾症、睡眠呼吸暂停综合征史、气管软化，就会有可能会导致气道不通畅问题，使所有的气道通气方式变得困难^[63]。如果患者出现面部骨折，则会因为面罩通气的密闭性无法保障，而导致面罩通气困难。如果患者有胃食管反流病，则当喉罩置入时，会增大食物反流的风险，进而导致堵塞气道，使喉罩

通气困难。把患者的上述病史与上文的体格评估指标综合在一起，能在一定程度上弥补体格评估无法观测体内气道的缺点，提高对困难气道进行评估的敏感度。各项评估指标影响如图 4-9 所示。

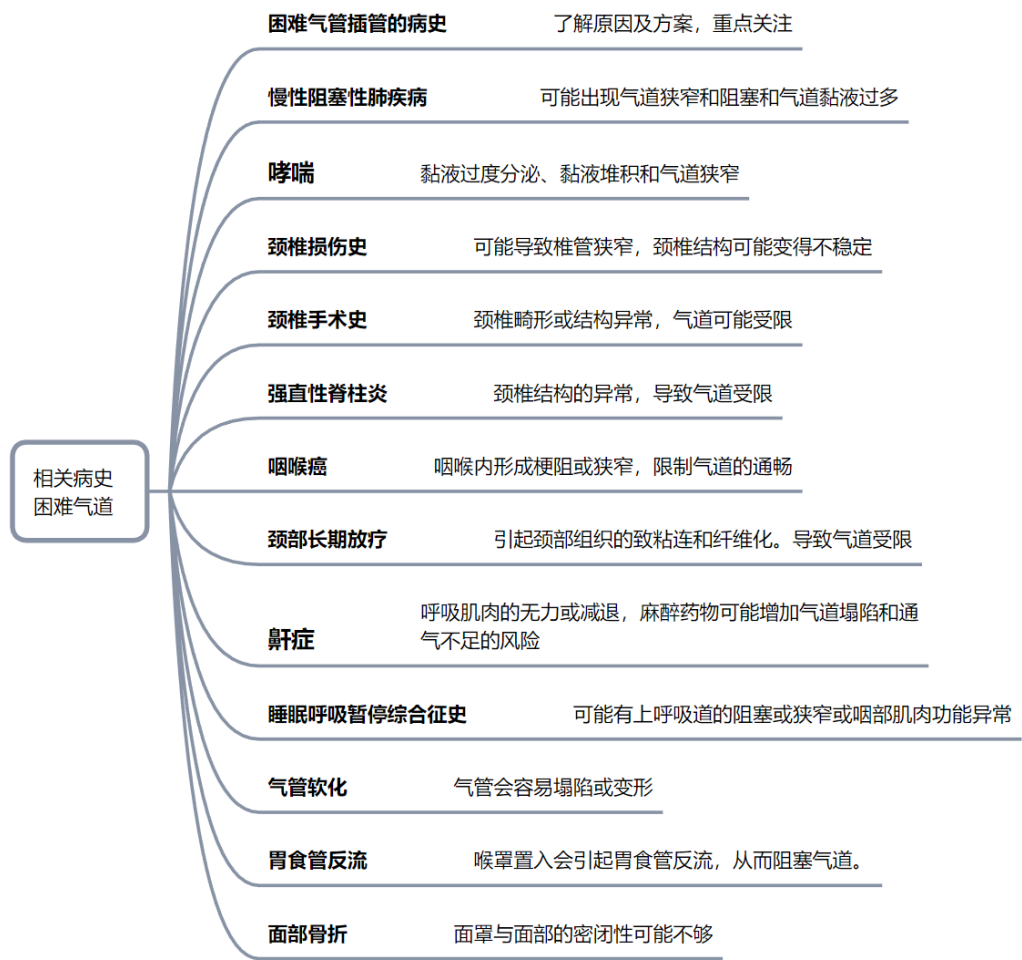


图 4-9 病史对气道的影响
Figure 4-9 The effect of medical history on airway

4.3 本章小结

本章详细介绍了如何进行困难气道的评估。首先是介绍如何获取患者的评估指标，然后介绍了评估指标对不同通气方式的影响，最后是介绍不同的病史对困难气道的影响。

第5章 实验与分析

为了保证从面颈部模型上测量的头颈部活动度、张口度和甲颏距离的精度以及保证面颈部三维模型可视化的还原度，必须要进行较高精度的面颈部三维建模。所以本文在进行建模时，进行了不同配准算法的对比实验，并把最佳的实验方案结果得出的模型与真实人脸数据予以对比。同时为了验证算法的鲁棒性，另外采集了十九个人的面颈部点云进行实验验证，实验过程是由 wiiboox 深度相机采集数据，在 Windows 11 上，用 Visual Studio 2022 使用 C++代码进行的实验，处理器为 AMD5700x，显卡为 3060ti。

5.1 不同配准算法的对比实验

点云数据的配准方式包括粗配准与精配准。粗配准主要是通过特定的方法和技术，为精配准确定一个相对适宜的初始位置，比如利用一些特征点或大致的几何形状进行粗略的匹配定位。在本文所采用的三维重建系统的重建过程中，所拍摄的不同片点云不在同一个世界坐标系下，因此不同片点云的公共区域相距较远，必须对其进行粗配准，把不同片点云置入同一个世界坐标系中。但由于粗配准会不可避免地存在一定的偏差。所以，在完成粗配准之后，接着需要采用精配准的方式，进一步减少可能存在的误差。

若要获得一个较高精度的配准效果，通常会考虑采用 ICP 算法，其优点在于初值较好情况下，精度和收敛性较为优秀。所以在此之前必须使用先进行粗配准。在传统点云粗配准的变换过程中，基于的 RANSAC^[64] (Random Sample Consensus) 粗配准算法通过从源点云和目标点云各自选取三个点，使其组成对应点对，通过三组对应点对求取变换的参数，再对其不断迭代，找出配准变换最优解。四点全等集合^[65] (4-points congruent sets, 4PCS) 算法。该算法利用刚体变换的性质，在源点云上随机选取共面的四个点作为一组基，在目标点云上寻找所有与其近似全等的共面四点集合，然后选择集合中的每一个元素与基对应，进而求解变换参数，求取配准误差，选择配准误差最小的刚体变换作为最终的解。另外，还可根据两片点云表面局部几何特征查找点对点的对应关系，如三维形状上下文特征 3DSC、点特征直方图^[66] (Point Feature Histogram, PFH)、快速点特征直方图^[67] (Fast Point

Feature Histogram, FPFH) 等表面局部几何特征描述子。还有一种方式是通过 3D 点云统计模型的标准最优化技术来确定两个点云可能的配准。这种方式跟初值相关不大, 初值误差大时, 也能很好的纠正过来。如正态分布变换^[68] (Normal Distributions Transform, NDT), 将点云转换成栅格地图, 计算每个栅格内点的正态分布, 从而将目标点云转换为一个个栅格表示的分段连续可导的概率密度函数, 使用正态分布概率密度函数描述点云的局部性质。随后将源点云投影至栅格地图中, 计算出源点云在栅格地图中的概率, 通过牛顿法找到最佳匹配位姿, 使得源点云投影至栅格地图后概率最大化, 最终实现点云配准。

对于本文待粗配准的面部点云数据, 本文对比使用正态分布变换、四点全等集合粗配准算法与使用不同局部特征描述子改进的随机采样一致性粗配准算法进行对比, 如 3DSC、点特征直方图、快速点特征直方图结合随机采样一致性的粗配准算法。粗配准完成之后再使用 ICP 精配准算法进行配准。每种配准算法处理前, 首先都要进行四步处理, 第一步过滤离群点, 第二步滤除非重叠部分, 第三步定位嘴唇坐标, 第四步面部分割。第三章点云滤波算法算法示例模型的实验数据如表 4-1 所示。接着, 分别使用与特征描述子 3DSC、点特征直方图 (Point Feature Histogram, PFH)、快速点特征直方图 (Fast Point Feature Histogram, FPFH) 结合随机采样一致性的粗配准算法, 和分别使用正态分布变换 (Normal Distributions Transform, NDT)、四点全等集合 (4-points congruent sets, 4PCS) 和 ICP 的精配准算法进行配准, 使用的数据为第三章中示例的数据。实验的算法对比流程图如图 5-1 所示。实验结果如表 4-2 所示。结果显示 3DSC+RANSAC+ICP 配准算法精度最高, 但时间最长。FPFH+RANSAC+ICP 算法时间最短, 配准精度较差。PFH+RANSAC+NDT+ICP 算法不但增加了配准时间, 配准效果也不如前者。NDT+ICP、PFH+RANSAC+ICP 和 4PCS+ICP 均配准失败, 失败的缘由在于粗配准阶段无法将两片初始位置极差的点云很好地变换至适宜的位置, 从而使得 ICP 精配准阶段陷入了局部最优解, 进而导致配准失败。本文出于优先保证精度的考量, 因而采用了第一种算法。

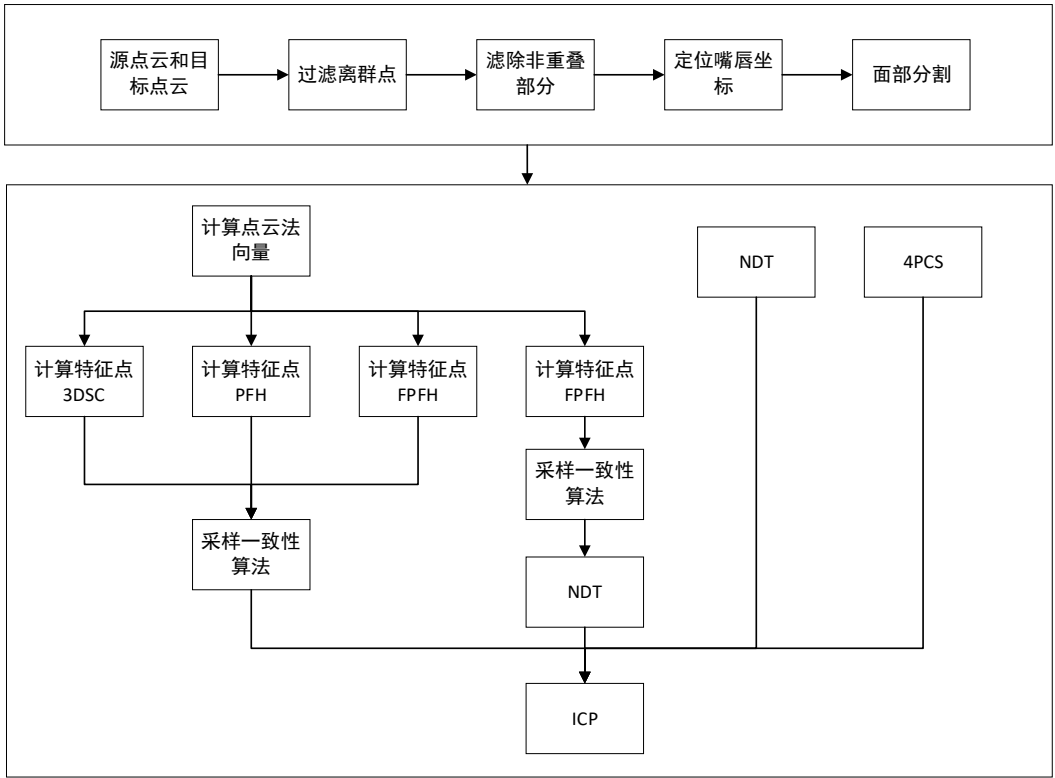


图 5-1 对比试验算法流程图
Figure 5-1 Flow chart of comparative test algorithm

表 5-1 面颈部点云滤波算法
Table 5-1 Neck point cloud filtering algorithm

算法过程	点云数量（点云 1，点云 2，点云 3）	三片点云处理时间（s）
拍摄初始点云	43842，38643，38428	约 60
过滤离群点	42247，37186，37077	0.573，0.467，0.446
提高重叠率	21047，18662，19318	0.005，0.006，0.010
定位嘴唇坐标	21047，18662，19318	0.157，0.173，0.239
面部分割	7630，7648，8725	0.007，0.006，0.006

表 5-2 滤波后不同的点云配准算法
Table 5-2 Different point cloud registration algorithms after filtering

点云配准算法	3DSC+RAN	FPFH+RAN	FPFH+RAN	NDT	PFH+RAN	4PCS
	SAC+ICP	SAC+ICP	SAC+NDT+ICP	+ICP	SAC+ICP	+ICP
D1、D2 预处理时间	0.063s	0.058s	0.058s			
D1、D2 配准适应度分数	36.945	47.073	51.659			
D1、D2 配准时间	60.252s	10.082s	13.715s			
A1、A2 配准时间	0.055s	0.055s	0.056s			
D12、D3 预处理时间	0.069s	0.069s	0.069s			
D12、D3 配准适应度分数	46.473	55.474	58.543			
D12、D3 配准时间	71.274s	14.76 s	19.546s			
A12、A3 配准时间	0.102s	0.104s	0.103s			
总用时	131.815s	25.128s	33.457s		配准失败	

5.1.1 误差与鲁棒性分析

为了验证本文配准算法的准确性，本文对 3DSC+RANSAC+ICP 配准算法得到的模型与真实人脸进行了对比实验验证。实验内容为在脸上设定标记点，分别在真实面颈部和三维模型上进行测量，标记点包括眉心、鼻尖、鼻翼两侧、喉结以及脖子两侧，测量的 4 个距离如图 5-2 所示，这些距离具有中间无明显凹陷和突起，能够直接使用尺子对真实人脸测量，这样会尽量减少因空间上对不齐产生的误差，出现的主要误差来源于标记点的误差，和面颈部重建误差。对比测量结果如表 4-3 所示。结果显示：本算法重建模型与真实人脸的误差在 2mm 以内。

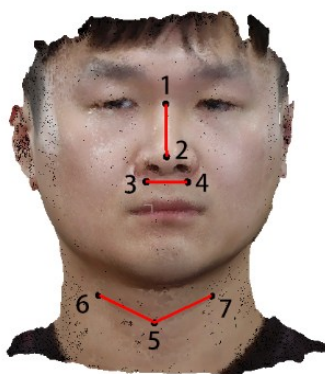


图 5-2 面颈部标志点

Figure 5-2 Face and neck landmarks

为了验证本算法的鲁棒性，使用本文设计的采集方式，分别对 20 个人各进行非连续的 10 次采集实验（同人不同次采集会因相机对焦，光照，人物活动等使得采集数据不同，因此配准结果也会有不同），使用 3DSC+RANSAC+ICP 配准算法共进行 200 次实验验证。配准后的 20 个不同人脸如图 5-3 所示，对配准结果的 4 个标志点距离进行误差分析，模型与真实人脸测量的最小误差和最大误差列于图 5-4 中。结果显示：最大误差不超过 2.2mm。表明本文算法在处理面颈部数据时表现出了一定的鲁棒性。

表 5-3 3DSC+RANSAC+ICP 误差分析

Table 5-3 3DSC+RANSAC+ICP error analysis

标记点编号	本文模型标记 点间距/mm	真实人脸标记 点间距/mm	本文模型与真 实人脸误差/mm
1-2	43.77	42.12	1.65
3-4	30.99	31.55	0.56
5-6	45.98	45.01	0.97
5-7	48.29	47.18	1.11

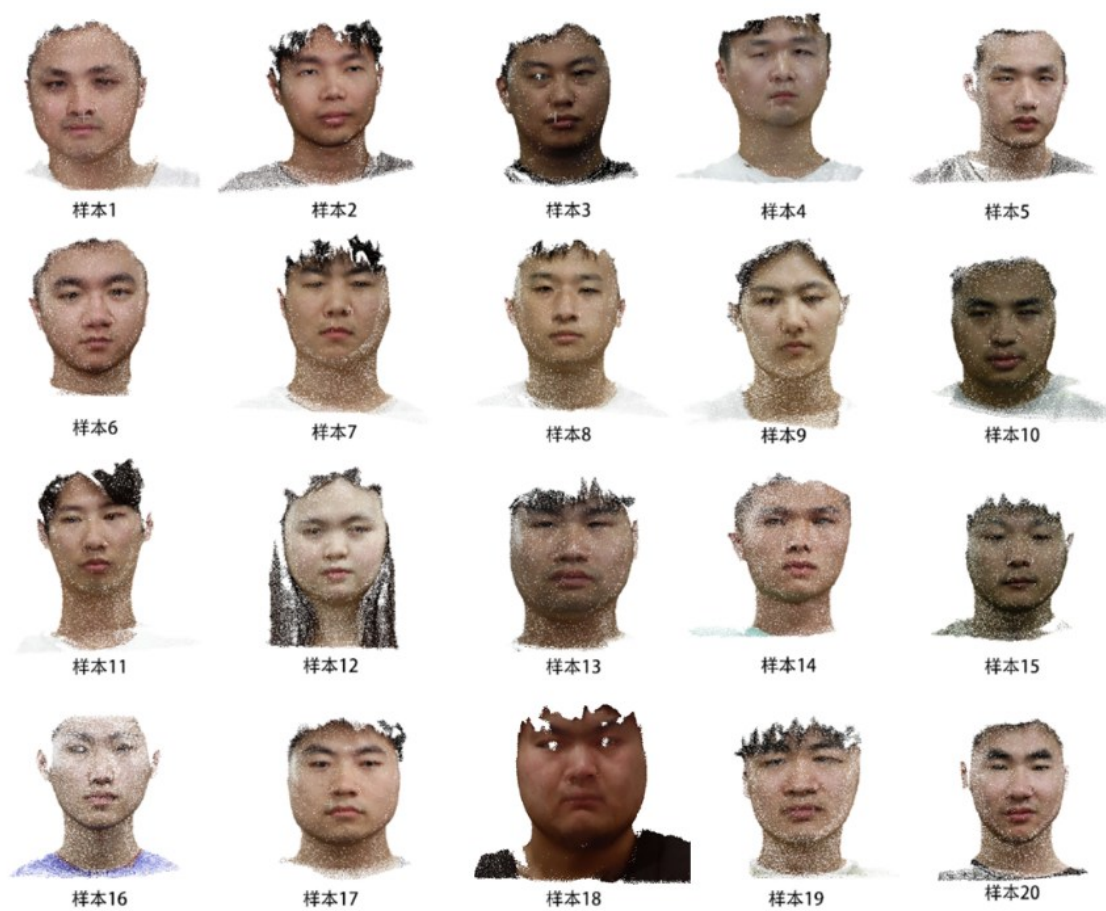


图 5-3 不同人面颈部点云配准结果

Figure 5-3 Different face and neck point cloud registration results

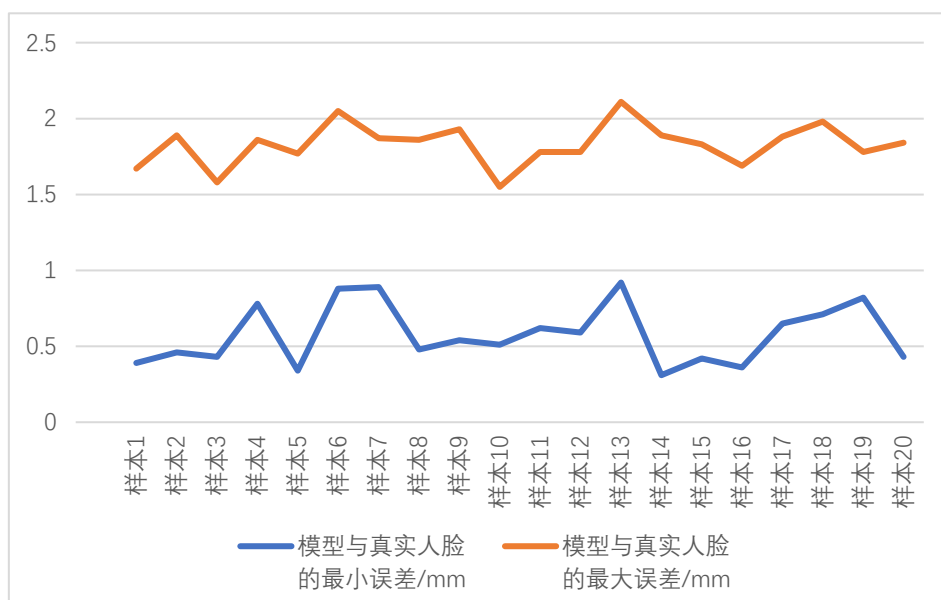


图 5-4 不同人面颈部的 10 次配准误差结果

Figure 5-4 Ten registration error results of different people's face and neck

5.1.2 结果分析

针对面颈部的三维重建，本文设计了一种面颈部点云的采集方案，以及一种相适应的局部配准再还原全局的配准策略，使用了多种配准算法进行对比，找到了适合面颈部模型的改进配准算法。最后设计了模型与真实人脸的对比实验和不同人脸的算法验证实验，并对实验结果进行了分析，结论如下：

（1）所设计的面颈部配准算法能够实现有效建模，且与真实人脸测量的误差小于 2.2 毫米。

（2）在设计三个位置上，使用深度相机采集点云，可完全覆盖面部和颈部。

（3）在几种配准算法中，3DSC+RANSAC+ICP 配准算法与本设计的面颈部采集方式最为适配。

5.2 测量评估指标的误差分析

5.2.1 甲颏距离、张口度测量误差分析

目前临床上常用的对甲颏距离、张口度的测量方法分为两种，一种是使用手指的指宽进行测量，一种是使用直尺测量。

对于经验丰富的医生来说，他们对自己的手指宽度有准确的认知，可以使用手指宽度去测量甲颏距离和张口度，测量方式如图 5-5 所示。测量出来的结果与医生的经验有关，对于普通的医生来说，测量的误差远远大于模型测量。



图 5-5 指测甲颏距离和张口度

Figure 5-5 Measure the thyromental distance and mouth opening.

医生为了增加测量准确度时，会使用直尺测量，直尺测法比手指测法更能量化指标，测量方式如图 5-6 所示。由于直尺在测量甲颏距离时不能够完全贴合测

量位置表面，较难测量，10 次测量的中的最大值和最小值之间误差为 4.6mm，误差明显大于模型测量误差。对于测量张口度来说，由于不能贴近牙齿，只能测量投影平面的距离，5 次测量的误差为 2.5mm，直接尺测误差大于模型测量误差。



图 5-6 尺测甲颏距离和张口度

Figure 5-6 Ruler to measure thyromental distance and mouth opening

5.2.2 头颈活动度测量误差分析

临床上测量头颈活动度是采用量角器进行测量，如图 5-7 所示。量角器在量头颈活动度时，由于头颈活动生成的二维平面角度，无法直接测量，需要对其活动投影角度进行测量，测量时量角器是由医生手动固定的，所以量角器投影角度平面很难在同一平面，而且由于手腕的晃动，测量也会出现误差，测量难度也较高。由分析可得量角器测量误差会明显高于模型测量。



图 5-7 尺测头颈活动度

Figure 5-7 Protractor measuring head and neck mobility

5.2.3 结果分析

针对传统的甲颏距离、张口度和头颈活动度测量方式，需要一定的方法和熟练度进行测量。使用重建模型测量评估指标参数，只需在建模之后选点，系统自动测量，在一定程度上简化了测量的操作，减少了尺子与患者的接触，测量的精度也有所提高。

5.3 困难气道评估系统测试

当患者的信息收集完毕后，就可以由系统评估是否是困难气道了。评估结果会根据录入的患者信息，按照上文的评估要求进行总结，并输出是否为困难气道，具体到哪一种通气方式会出现通气困难，并列出哪一项指标导致的困难气道，以及为什么会导致困难气道。

5.3.1 真实数据测试

对于配准算法对比试验的 20 个样本，采集完成他们的数据后，对其 26 个评估指标进行评估，只有一人有一个指标不符合。如图 5-8 是其中一个正常的评估结果界面。如图 5-9 是其中不正常的评估结果界面。

气道评估

气道评估 点云采集 指标提取

姓名: 样本4

年龄: 27

身高(cm): 172

体重(kg): 75

下颌退缩 ☐ 是 ☒ 否

门齿前突 ☐ 是 ☒ 否

络腮胡子 ☐ 是 ☒ 否

牙齿缺损 ☐ 是 ☒ 否

打鼾 ☐ 是 ☒ 否

下颌能否接触胸骨 ☒ 是 ☐ 否

妊娠 ☐ 是 ☒ 否

咬上唇分级 ☒ 一级 ☐ 二级 ☐ 三级

甲颏距离(mm): 78.6 获取

张口度(mm): 44.2 获取

头颈部活动度(°) 50 获取

病史:

☐ 是 慢性阻塞性肺疾病 ☐ 是 颈椎手术史 ☐ 是 哮喘 ☐ 是 睡眠呼吸暂停综合征史

☐ 是 颈椎损伤史 ☐ 是 强直性脊柱炎 ☐ 是 气管软化 ☐ 是 胃食管反流

☐ 是 颈部长期放疗史 ☐ 是 咽喉癌 ☐ 是 肝症 ☐ 是 面部骨折

☐ 是 困难气管通气史

备注:

评估

样本4: 评估结果

该患者:
不符合指标数: 0项

面罩通气: 正常
喉罩通气: 正常
插管通气: 正常

备注: 无

图 5-8 真实数据正常气道的评估结果图

Figure 5-8 The evaluation results of normal airway in real data

气道评估

气道评估点云采集指标提取

姓名: 样本18

年龄: 20

身高(cm): 175

体重(kg): 102

下颌退缩 ☐ 是 ☒ 否

门齿前突 ☐ 是 ☒ 否

络腮胡子 ☐ 是 ☒ 否

牙齿缺损 ☐ 是 ☒ 否

打鼾 ☐ 是 ☒ 否

下颏能否接触胸骨 ☒ 是 ☐ 否

妊娠 ☐ 是 ☒ 否

咬上唇分级 ☒ 一级 ☐ 二级 ☐ 三级

甲颏距离(mm): 72.2 获取

张口度(mm): 42.0 获取

头颈部活动度(°) 47.8 获取

病史:

☐ 是 慢性阻塞性肺疾病

☐ 是 颈椎手术史

☐ 是 哮喘

☐ 是 睡眠呼吸暂停综合征史

☐ 是 颈椎损伤史

☐ 是 强直性脊柱炎

☐ 是 气管软化

☐ 是 胃食管反流

☐ 是 颈部长期放疗史

☐ 是 咽喉癌

☐ 是 鼾症

☐ 是 面部骨折

☐ 是 困难气管通气史

备注:

评估

样本18: 评估结果

该患者: 体重大于90kg、
不符合指标数: 1项

体重超重: 可能气道结构的可视性受限、可能气道的解剖结构变异。

面罩通气: 正常
喉罩通气: 正常
插管通气: 可能为困难气道

备注: 无

图 5-9 真实数据困难气道的评估结果图

Figure 5-9 Evaluation results of difficult airway with real data

5.3.2 模拟数据测试

为了进行更完整的评估测试，需要有更多不符合评估指标的数据进行实验。所以本文增加了模拟实验，虚拟四十个患者的信息，省略面颈部的可视化部分，直接对患者的气道进行评估。

虚拟患者的信息以真实病例情况为基础，去按照评估信息的种类数目去设计患者信息，共分为四类，每类十个患者：有一项评估标准不符合、有多项评估标准不符合、有相关病史不符合、有相关病史和有评估标准不符合。模拟实验可以顺利按照上文分析输出评估结果。如图 5-10 是其中一个模拟的评估结果界面。

气道评估

气道评估点云采集指标提取

姓名: 17

年龄: 52

身高(cm): 167

体重(kg): 72

下颌退缩 ☐ 是 ☒ 否

门齿前突 ☒ 是 ☐ 否

络腮胡子 ☐ 是 ☒ 否

牙齿缺损 ☒ 是 ☐ 否

打鼾 ☒ 是 ☐ 否

下颌能否接触胸骨 ☐ 是 ☒ 否

妊娠 ☐ 是 ☒ 否

咬上唇分级 ☒ 一级 ☐ 二级 ☐ 三级

甲颏距离(mm): 70.3 获取

张口度(mm): 40 获取

头颈部活动度(°) 38.9 获取

评估

17:评估结果

该患者:门齿前突、牙齿缺损、打鼾、下颌不能接触胸骨。
不符合指数:4项

门齿前突:咬合力不稳定可能会影响插管定位。
牙齿缺损:可能导致面罩与面部的接触面减少。
打鼾:可能出现呼吸道阻塞或狭窄。
下颌不能接触胸骨:可能影响插管视野,也可能影响插管角度和范围。

面罩通气:大概率为困难气道
喉罩通气:正常
插管通气:大概率为困难气道

备注:无

病史:

☐ 是 慢性阻塞性肺疾病

☐ 是 颈椎手术史

☐ 是 哮喘

☐ 是 睡眠呼吸暂停综合征史

☐ 是 颈椎损伤史

☐ 是 强直性脊柱炎

☐ 是 气管软化

☐ 是 胃食管反流

☐ 是 颈部长期放疗史

☐ 是 咽喉癌

☐ 是 肝症

☐ 是 面部骨折

☐ 是 困难气管通气史

备注:

图 5-10 模拟数据困难气道的评估结果图

Figure 5-10 Evaluation results of difficult airways with simulated data

5.3.3 结果分析

对气道评估系统进行测试，无论是实际数据还是模拟数据，都能够结合录入的患者信息，对患者的气道进行预测评估，输出困难气道类型，并列出是由什么指标引起的困难气道，以及为什么会困难，达到了预估效果。

5.4 本章小结

本章首先使用不同方法改进的随机采样一致性粗配准算法去融合不同的精配准算法来说明了面颈部三维重建的精度。然后对传统指标的检测方法进行误差分析，误差均大于模型测量误差。最后进行了真实数据和模拟数据的实验测试，实验结果符合评估预期。

第6章 总结与展望

6.1 本文工作总结

针对术前困难气道评估流程不规范、依赖经验丰富的麻醉医生以及部分评估参数难以测量、测量精度低的问题，本文设计并实现了一个困难气道评估系统。该系统结合面颈部三维重建来测量评估指标，不仅规范了困难气道评估流程，提高了指标测量精度，还减少了评估的主观性，使得普通麻醉医生经过简单培训就能使用此评估系统进行困难气道评估。具体的工作包括以下内容：

(1)在困难气道的评估方案设计中。本文首先总结了医学上评估面罩通气、喉管通气、插管通气困难气道的常用方案。然后按照方案准确度进行筛选，结合气道通气的禁忌症，设计了程序化的术前评估指标列表，包括患者体格信息和病史信息。为了使评估流程标准化，设计了获取患者信息指标的方式和流程。首先是病史信息询问，体格外观和动作测试，然后是对患者的面颈部的重建和从重建模型中测量评估指标。当所有信息录入完毕后，分析总结了当患者符合困难气道情形时可能出现困难气道的原因。

(2)在面颈部的采集中。首先本文针对在医院麻醉室内对患者面颈部三维重建的应用场景，对选用采集点云的硬件以及技术路线进行了归纳和分析，设计了适合的硬件设备框架，选用了基于双目红外结构光的 RGB-D 深度相机，并设计了便于相机移动和固定的支架。根据面颈部的特征，以尽可能少的采集次数，完全覆盖拍摄整个面颈部。设计方案为相机分别对准头部右下颌角、左下颌角和鼻梁三个位置进行采集。

(3)在面颈部的三维重建中。根据采集出来点云的特点，设计了一种面颈部点云分割算法，能够在增大不同点云之间重叠率的同时，分割掉不重要的有相对较大形变的部分。最后针对分割后的点云设计了一种先配准后还原全局的算法流程，使用改进的随机一致性粗配准算法融合 ICP 精配准算法。实验表明结合使用 3DSC 优化的 RANSAC 粗配准与 ICP 精配准算法的面颈部精度最高。

(4)在困难气道评估中。根据系统的功能和输入需求，设计了如何从面颈部模型测量评估参数和具体的评估流程，并设计了系统的界面，包括信息录入与

评估界面，设备连接与三维重建界面，模型测量界面。其中信息录入界面包括所有的评估指标信息和评估输出信息，使医生一目了然。其他两个界面用来可视化三维模型和辅助评估信息获取。交互设计符合使用逻辑，提高了系统的使用效率。最后经过测试实验，本系统实现了评估困难气道的预期效果，解决了困难气道评估流程不标准、依赖有经验的麻醉医生、以及部分参数不好测量，测量精度低的问题。并且可视化面颈部可作为医疗记录的一部分，可用于医生之间的沟通和交流。

6.2 未来展望

未来的研究可以进一步验证本系统在真实临床环境中的效果。通过与临床麻醉医生和专家的密切合作，收集更多的反馈和建议，并将其应用于系统的优化和升级，以确保系统在实际应用中的可靠性和有效性。

在模型上测量评估参数，虽然比医生手动测量患者简单，但仍需医生在模型上手动选点。未来可简化模型上的测量流程，增加在模型上可获取的评估指标数量，从而减少评估时间。

对于本文的面颈部重建，使用的是单一采集设备，拍摄方案采用多次拍摄，这增大了患者的晃动风险，降低了建模的精度，因此未来可以更换成多机位同时拍摄，以进一步提高精度并减少采集点云的时间。

由于困难气道评估的复杂性，目前尚无一种完美的评估方案，对医生经验的依赖程度较高。本文为了提高准确度，联合了多种评估方案，未来可以对患者的面颈部模型标记，然后利用机器学习进行训练和分析，以寻找内在指标参数的联系，从而减少参数获取的复杂度，提高预测患者困难气道的准确性。

6.3 本章小结

本章对全文的工作进行了归纳总结，涵盖了研究内容以及系统的应用效果。此外，还剖析了本系统的不足之处，提出了相应的改进方向，同时对未来的研究工作进行了展望。

参考文献

- [1] 赵宏扬,郑秋莹.2012-2021 年中国省级医疗卫生机构资源配置效率评价——基于超效率 DEA-Malmquist 模型[J].卫生软科学,2023,37(12):58-63.
- [2] 王古岩.从麻醉学走向围手术期医学: 我们准备好了吗[J].中国现代医学杂志,2021,31(17):1-4.
- [3] 杜英杰,张新庆,王古岩等.麻醉科医生过度疲劳现状及诱因分析——基于对 626 名麻醉科主任的调查[J].卫生职业教育,2020,38(02):128-131.
- [4] Apfelbaum J L, Hagberg C A, Connis R T, et al. 2022 American Society of Anesthesiologists practice guidelines for management of the difficult airway[J]. Anesthesiology, 2022, 136(1): 31-81.
- [5] 马武华,王勇,钟鸣等.中国医疗机构困难气道的调查与分析[J].临床麻醉学杂志,2020,36(04):376-380.
- [6] Gajree S, O'Hare K J. Identification of the difficult airway[J]. Anaesthesia & Intensive Care Medicine, 2017, 18(9): 447-450.
- [7] 王玮荻,刘洪娟,张春瑾等.颈椎手术后气道梗阻危险因素及风险管理研究进展 [J].护理研究,2021,35(12):2172-2175.
- [8] Heidegger T. Management of the difficult airway[J]. New England Journal of Medicine, 2021, 384(19): 1836-1847.
- [9] Harjai M, Alam S, Bhaskar P, et al. Clinical relevance of Mallampati grading in predicting difficult intubation in the era of various new clinical predictors[J]. Cureus, 2021, 13(7): e16396.
- [10] Tkaczyszyn M, Drozd M, Węgrzynowska - Teodorczyk K, et al. Depleted iron stores are associated with inspiratory muscle weakness independently of skeletal muscle mass in men with systolic chronic heart failure[J]. Journal of cachexia, sarcopenia and muscle, 2018, 9(3): 547-556.
- [11] Srivilaithon W, Muengtawepong S, Sittichanbuncha Y, et al. Predicting difficult intubation in emergency department by intubation assessment score[J]. Journal of clinical medicine research, 2018, 10(3): 247.

- [12] T. B R , Martina M , H. A K , et al. A Comparison of Direct versus Video Laryngoscopy for Difficult Airway Patients in the Emergency Department: A National Emergency Airway Registry (NEAR) Study[J]. Journal of Emergency Medicine, 2020, 59(5): 769-770.
- [13] Ellard L, Wong D T. Preoperative airway evaluation[J]. Current Anesthesiology Reports, 2020, 10: 19-27.
- [14] Apfelbaum J L, Hagberg C A, Connis R T, et al. 2022 American Society of Anesthesiologists practice guidelines for management of the difficult airway[J]. Anesthesiology, 2022, 136(1): 31-81.
- [15] Zhou Y, Han Y, Li Z, et al. Preoperative X-ray C2C6AR is applicable for prediction of difficult laryngoscopy in patients with cervical spondylosis[J]. BMC anesthesiology, 2021, 21(1): 1-7.
- [16] Ji C, Ni Q, Chen W. Diagnostic accuracy of radiology (CT, X-ray, US) for predicting difficult intubation in adults: A meta-analysis[J]. Journal of Clinical Anesthesia, 2018, 45: 79-87.
- [17] Gottlieb M, Holladay D, Burns K M, et al. Ultrasound for airway management: an evidence-based review for the emergency clinician[J]. The American journal of emergency medicine, 2020, 38(5): 1007-1013.
- [18] Han Y, Fang J, Zhang H, et al. Anterior neck soft tissue thickness for airway evaluation measured by MRI in patients with cervical spondylosis: prospective cohort study[J]. BMJ open, 2019, 9(5): e029987.
- [19] 刘志海,代振锐,田绍鲁等.非接触式三维重建技术综述[J].科学技术与工程,2022,22(23):9897-9908.
- [20] Remondino F. From point cloud to surface: the modeling and visualization problem[J]. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2003, 34.
- [21] 蔡麟,郭玉东,张举勇.基于多视角的高精度三维人脸重建[J].计算机辅助设计与图形学学报, 2020, 32(02): 305-314.
- [22] 李明阳,陈伟,王珊珊等.视觉深度学习的三维重建方法综述[J]. 计算机科学与

- 探索, 2023, 17(02): 279-302.
- [23] Vanezis P, Vanezis M, McCombe G, et al. Facial reconstruction using 3-D computer graphics[J]. Forensic science international, 2000, 108(2): 81-95.
- [24] Wang C W, Peng C C. 3D face point cloud reconstruction and recognition using depth sensor[J]. Sensors, 2021, 21(8): 2587.
- [25] Chen H, Cui W. A comparative analysis between active structured light and multi-view stereo vision technique for 3D reconstruction of face model surface[J]. Optik, 2020, 206: 164190.
- [26] Deng Y, Yang J, Xu S, et al. Accurate 3d face reconstruction with weakly-supervised learning: From single image to image set[C]//Proceedings of the IEEE/CVF conference on computer vision and pattern recognition workshops. 2019: 0-0.
- [27] Marinescu A I, Darabant A S, Ileni T A. A Fast and Robust, Forehead-Augmented 3D Face Reconstruction from Multiple Images using Geometrical Methods[C]//2020 International Conference on Software, Telecommunications and Computer Networks (SoftCOM). IEEE, 2020: 1-6.
- [28] Herrera R, Pozo-Espín D, Herrera M. 3D face reconstruction with RGB-D camera: A practical approach[C]//2021 Second International Conference on Information Systems and Software Technologies (ICI2ST). IEEE, 2021: 25-30.
- [29] 安凤杨,王玉辉,孙健斌等.头颈部 CT 血管造影的三维重建视神经与鼻窦的关系[J].解剖学报,2020,51(05):644-652.
- [30] Suchyta M, Mardini S. Innovations and future directions in head and neck microsurgical reconstruction[J]. Clinics in plastic surgery, 2020, 47(4): 573-593.
- [31] 沈红雷,冯德宏,许宏俊等.CT 三维重建技术判断骨盆骨折 Tile 分型与二维 CT 及 X 线的对比研究[J].河北医学,2019,25(06):982-986.、
- [32] 常虹.颌面部整形修复中 CT 三维重建测量的应用分析[J].中国继续医学教育,2016,8(20):44-45.
- [33] 杨涵,颜青龙,袁希等.基于面部三维重建模型设计个性化外壳在面部下颏填充整形术中的应用[J].中国美容整形外科杂志,2020,31(03):175-178.
- [34] Rao Z, Sun S, Li M, et al. 3D Facial Plastic Surgery Simulation: Based on the

- Structured Light[J]. Applied Sciences, 2023, 13(1): 659.
- [35] 覃茂,崔庆敖,张伟阳等.CT 三维重建技术在 PPGL 腹腔镜手术规划中的应用研究[J].重庆医学,2022,51(18):3132-3136.
- [36] Yeo T C ,MacDonald A ,Ungi T , et al.Utility of 3D Reconstruction of 2D Liver Computed Tomography/Magnetic Resonance Images as a Surgical Planning Tool for Residents in Liver Resection Surgery[J].Journal of Surgical Education,2018,75(3):792-797.
- [37] 于鹏辉,李俏,鞠晓军等.基于 CT/MRI 三维模型在局部解剖学实验教学中的应用[J].中国医药导报,2020,17(25):80-82+91.
- [38] 范敏,戴培山.计算机三维模型在解剖教育中的应用[J].中国医学物理学杂志,2012,29(06):3822-3826.
- [39] 宋巧,严佳,周韧等.基于气道三维 CT 重建筛选颌面部间隙感染患者困难气道的预测指标[J].上海交通大学学报(医学版),2020,40(09):1264-1269+1263.
- [40] Ahmad I ,Millhoff B ,John M , et al.Virtual endoscopy—a new assessment tool in difficult airway management[J].Journal of Clinical Anesthesia,2015, 27(6):508-513.
- [41] 胡胜红,李元海,陈珂等.困难气道评估方法临床相关性的研究[J].临床麻醉学杂志,2009,25(05):447-448.
- [42] Xia M, Ma W, Zuo M, et al. Expert consensus on difficult airway assessment[J]. Hepatobiliary Surgery and Nutrition, 2023, 12(4): 54566-54566.
- [43] 左明章.《CSA2017 版困难气道管理指南》解读[C].中国医师协会麻醉学医师分会 2018 年年会、第二十次全军麻醉与复苏学学术年会、2018 年云南省医师协会麻醉学医师分会年会论文集.2018:184-222.
- [44] 耿擎天,康芳,方才.困难面罩通气的评估及其处理[J].安徽医药,2011,15(08):1032-1034.
- [45] 钟日胜.喉罩的应用研究进展[J].医学理论与实践,2018,31(03):343-345.
- [46] Heidegger T. Management of the difficult airway[J]. New England Journal of Medicine, 2021, 384(19): 1836-1847.
- [47] 王茗芳. 超声成像与 Wilson 评分预测困难气道的对比研究[D].皖南医学

- 院,2019.
- [48] 姚卫东, 李元海, 吴昊, 等. 张口度的实测方法与手指估测方法在预测困难气道中的价值比较[J]. 皖南医学院学报, 2015(5):489-492.
- [49] SHIGA T, WAJIMA Z, INOUE T, et al. Predicting difficult intubation in apparently normal patients: a meta-analysis of bedside screening test performance [J]. *Anesthesiology*, 2005, 103(2): 429-37.
- [50] Petrides G, Clark J A R, Low H, et al. Three-dimensional scanners for soft-tissue facial assessment in clinical practice[J]. *Journal of Plastic, Reconstructive & Aesthetic Surgery*, 2021, 74(3): 605-614.
- [51] 吴一全, 陈慧娴, 张耀. 基于深度学习的三维点云处理方法研究进展[J]. 中国激光, 2024, 51(5):0509001.
- [52] Huang X, Mei G, Zhang J, et al. A comprehensive survey on point cloud registration[J]. *arXiv preprint arXiv:2103.02690*, 2021.
- [53] P. J. B, H. D. M. A method for registration of 3-D shapes[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1992, 14(2). 239-256.
- [54] Keller W, Borkowski A. Thin plate spline interpolation[J]. *Journal of Geodesy*, 2019, 93: 1251-1269.
- [55] Li L, Wang R, Zhang X. A tutorial review on point cloud registrations: principle, classification, comparison, and technology challenges[J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2021, 2021: 1-32.
- [56] 杜利利. 中国汉族人体头面测量及分析[D]. 武汉: 华中科技大学, 2008.
- [57] Derpanis K G. Overview of the RANSAC Algorithm[J]. *Image Rochester NY*, 2010, 4(1): 2-3.
- [58] 李庆玲, 翟凯, 郭鸿锐, 等. 一种基于 NDT 和 ICP 融合的点云配准算法[J]. 实验技术与管理, 2022, 39(11):23-28.
- [59] Rebay S. Efficient unstructured mesh generation by means of Delaunay triangulation and Bowyer-Watson algorithm[J]. *Journal of computational physics*, 1993, 106(1): 125-138.
- [60] 姜虹. 困难气道识别与处理[J]. 中国实用口腔科杂志, 2009, 2(06):323-328.

-
- [61] 陆学芬.不同类型喉罩在老年困难气道患者麻醉气道管理中的比较研究[J].当代医学,2021,27(24):132-133.
 - [62] 龙平,曾平海,施金兴等.喉罩与气管插管在呼吸衰竭患者院前和急诊急救中的应用效果比较[J].现代生物学进展,2018,18(24):4719-4722.
 - [63] 郭广生. Hc 可视喉镜与 Macintosh 喉镜应用于模拟困难气道的临床研究[D]. 广州中医药大学,2015.
 - [64] Horn B K P. Closed-form solution of absolute orientation using unit quaternions[J]. Josa a, 1987, 4(4): 629-642.
 - [65] Aiger D, Mitra N J, Cohen-Or D. 4-points congruent sets for robust pairwise surface registration[M]//ACM SIGGRAPH 2008 papers. 2008: 1-10.
 - [66] Rusu R B, Marton Z C, Blodow N, et al. Persistent point feature histograms for 3D point clouds[C]// tenth International Conference on Intelligent Autonomous Systems (IAS-10), Baden-Baden, Germany. 2008: 119-128.
 - [67] Rusu R B, Blodow N, Beetz M. Fast point feature histograms (FPFH) for 3D registration[C]//2009 IEEE international conference on robotics and automation. IEEE, 2009: 3212-3217.
 - [68] Biber P, Strasser W. The normal distributions transform: A new approach to laser scan matching[C]//Proceedings 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2003)(Cat. No. 03CH37453). IEEE, 2003, 3: 2743-2748.

攻读学位期间获得的成果

- [1] 黄天齐,严楠,戴家树,等.基于多视角的面颈部点云配准算法研究[J/OL].重庆工商大学学报(自然科学版):1-10.<http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1155.N.20230912.1216.002.html>.

攻读学位期间参与的科研项目

- [1] 参与产学研项目：困难气道筛查系统。项目编号：KH10002119

致 谢

本觉来日方长，然而三年的硕士生涯在不觉之间便已物走星移。回首过去点滴，发觉一路走来，早已经收获良多，感激之情亦涌上心头。

感谢我的导师严楠教授，是您带领我从机械专业跨入了计算机专业的大门，您耐心的指导和支持让我在跨专业的路上稳步前行。您的言传身教，让我在学习态度上更加的认真、科研思维上更有体系。在您的引领下，我不仅拓宽了学术视野，也获得了全新的研究视角。您不仅在科研思路、研究设计上给予了我耐心的指导，还教会了我如何深入分析实验数据、如何精准把握论文的写作要点。在您的引领下，我逐渐从科研的门外汉成长为能够独立承担研究任务的学者。感谢您三年来的悉心指导和无私帮助，您的教诲和关怀下，我不仅取得了现在的成绩，更收获了宝贵的人生经验和成长。

感谢 MVIC 实验室全体老师们的帮助，尤其要特别感谢戴家树老师、汪军院长。因为有您们的支持，我的论文才得以顺利的完成撰写。

感谢我所有的同学，谢谢你们在我论文实验数据、论文写作技巧上提供的帮助。

最后，感谢我的父母、弟弟，你们始终是最坚实的后盾，让我深刻体会到了亲情的伟大与温暖。

尚德敦学 唯实惟新

