

口腔颌面部混合现实动态追踪技术数字化模型的应用基础研究

赵双元 李成焱 张壮

口腔疾病防治全国重点实验室 国家口腔医学中心 国家口腔疾病临床医学研究中心
四川大学华西口腔医院头颈肿瘤外科, 成都 610041

[摘要] **目的** 探讨混合现实技术在口腔颌面外科中的应用价值, 开展体外模型混合现实动态追踪技术基础研究。**方法** 通过采集患者术前增强CT数据, 重建三维数字化模型, 结合3D打印技术, 在体外模型上对病变动态追踪, 然后对比不同配准方式的效率。**结果** 通过术前增强CT数据的三维重建及多解剖模型组合获得了三维可视化的头颈部模型, 并完成体外动态追踪, 其中面部标志识别法追踪过程中, 半侧位动态追踪平均时间(T45°)为3.67帧, 侧位动态追踪平均时间(T90°)为10.67帧, 全程动态追踪平均时间(T总)为12秒28帧(30帧/秒); QR码识别法追踪过程中, T45°为1.67帧, T90°为2.33帧, T总为11秒13帧(30帧/秒)。**结论** MR技术与3D打印技术相结合可实现体外模型病变动态追踪, 为临床运用MR技术实施精准个性化手术方案打下基础。

[关键词] 肿瘤; 混合现实; 动态追踪; 3D打印; 三维重建

[中图分类号] R782 **[文献标志码]** A **[doi]** 10.7518/hxkq.2024.2024101



本文链接 开放科学标识码

Application of digital model of mixed reality dynamic tracking technique in oral and maxillofacial surgery: a basic research

Zhao Shuangyuan, Li Chengyan, Zhang Zhuang

State Key Laboratory of Oral Diseases & National Center for Stomatology & National Clinical Research Center for Oral Diseases & Dept. of Head and Neck Oncology, West China Hospital of Stomatology, Sichuan University, Chengdu 610041, China

Supported by: Natural Science Foundation of Sichuan Province (2022NSFSC1525)

Correspondence: Zhang Zhuang, E-mail: Zhangzhuang1949@163.com

[Abstract] **Objective** This paper aims to explore the application value of mixed reality in oral and maxillofacial surgery and to conduct dynamic tracking using an *in vitro* model. **Methods** By collecting preoperative enhanced CT data of patients, rebuilding 3D digital model, combined with 3D printing technology, dynamic tracking of lesions was realized in the *in vitro* model, and the efficiency of different registration methods was compared. **Results** The 3D visualized head and neck model was obtained by combining multiple anatomical models, and dynamic tracking was completed *in vitro*. The average tracking time of the facial mark recognition method was T45°=3.67 frames, T90°=10.67 frames, and T total=12 seconds 28 frames (30 frames per second). The average tracking time of QR code recognition method was T45°=1.67 frames, T90°=2.33 frames, and T total=11 seconds 13 frames (30 frames per second). **Conclusion** The combination of MR technology and 3D printing technology can realize the dynamic tracking of lesions *in vitro*, which lays a foundation for the clinical application of MR technology to implement precise, personalized surgical programs.

[收稿日期] 2024-03-21; **[修回日期]** 2024-08-29

[基金项目] 四川省自然科学基金 (2022NSFSC1525)

[作者简介] 赵双元, 硕士, E-mail: zhaoshuangyuan1999@163.com

[通信作者] 张壮, 副教授, 博士, E-mail: zhangzhuang1949@163.com

com

[Key words] neoplasm; mixed reality; dynamic tracking; three-dimensional printing; three-dimensio-

nal reconstruction

混合现实 (mixed reality, MR) 技术是现实与虚拟世界的对象共存并与真实环境实时交互的新兴技术,是虚拟现实 (virtual reality, VR) 技术与增强现实 (augmented reality, AR) 技术结合产物。该技术基于术前影像数据,如计算机断层扫描 (computed tomography, CT)、磁共振成像 (magnetic resonance imaging, MRI) 等获得的高分辨率影像数据,将其导入专业影像处理软件后,呈现术区的3D影像,重建出完整的三维立体模型,从而实现现实与虚拟图像的交互^[1]。目前,MR技术主要应用于外科手术的风险评估、方案设计、术中导航、皮瓣穿支定位以及教学模拟训练等^[2-4]。

为了探究MR技术在口腔颌面外科中的临床应用价值,本研究利用3D打印技术模拟真实患者,重建三维虚拟图像,整合HoloLens头戴显示器,并进行两者叠加,对比两种不同配准方式效率及实现实时图像动态追踪。

1 材料和方法

1.1 临床资料

患者,女性,28岁,右腮腺多形性腺瘤术后4年,发现右腮腺区复发1年。临床检查:右腮腺区可扪及直径约5 cm包块,呈结节状,质中,无压痛,活动度可。入院诊断为右腮腺多形性腺瘤术后复发,术后病理得到证实。

1.2 数据采集

患者行增强CT检查,获得DICOM格式影像数据,导入三维重建软件(安徽紫薇帝星数字科技有限公司)。对原始数据进行分期,分为平扫期、动脉期、静脉期,同时进行数据预处理,得到重建软件兼容格式,准备下一步重建。

1.3 CT数据三维重建

将预处理数据导入软件,在数据管理器的窗口,打开右键菜单,1) 选定区域:利用软件组织识别模块,选定“兴趣”重建区域,对图像噪声进行高斯平滑处理;2) 阈值分析:采用软件内含的阈值算法,对拟重建部分选取理想的阈值范围,然后运用分割算法分割感兴趣区域;3) 图像优化:对分割数据调用中指平滑算法进行优化,去除重建图像锯齿边缘。同时用一键导航按钮定位二维和三维,查看分割的效果是否准确,利用画笔或者画刷工具修改部分错误的层面;4) 重建:经软件集成的重建算法对所有分割优化后区域进行三维重建,形成各个模块。

以动脉为例,打开软件,导入DICOM分期数据并预处理。在动脉区域内使用阈值分析算法,点取种子点,调整阈值,计算并有效分割,获得感兴趣区域,对图像进行优化,动脉表面平滑数据处理并镂空,完成动脉重建,形成动脉模块的三维影像(图1)。

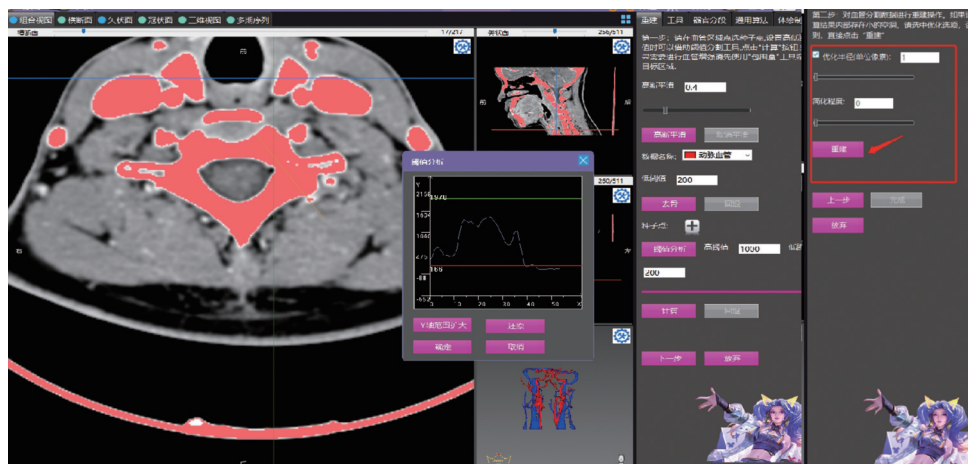


图 1 CT数据重建动脉三维影像

Fig 1 CT data reconstruction of 3D arterial images

采取类似方法,重建静脉、低密度影、骨骼、腮腺、皮肤、甲状腺等重要组织,形成各器官三维影像模块,对不同的模块标识不同颜色及不同

透明度设定。将多个三维影像模块转换至阅片端,整合不同颜色的模块,组合并形成完整的头颈部三维重建模型。

1.4 数字化体外模型建立

1.4.1 3D打印

使用SolidWorks-3D建模软件构建模型,处理未封闭的开放边,完成三维模型建立。转换模型格式为光固化成型(STL)格式。利用Materialise Magics (Version 21.0)软件编辑STL文件,包括数据分析、缩放、测量和修复。对校正的模型进

行数据分层,选用高精进口树脂及工业用3D打印机,把切片和模型导入3D打印机,对数据切片逐层打印,层层堆积成型。打印时针对镂空或者悬空处加入支撑,打印完成后对模型进行去支撑处理,95%乙醇清洗模型,600目砂纸进行表面处理,光滑模型表面。具体3D打印制备体外模型步骤见图2。



图 2 3D打印制作体外模型流程图

Fig 2 Create *in vitro* model flow chart of 3D printing

1.4.2 模型配准基准建立

1) 肿瘤体表投影勾画: 在三维重建软件中打开完整三维模型,多角度判断病变(低密度影)与各种解剖结构之间的空间位置关系。选取三维影像矢状面,将重建影像中的病变体表投影标记到皮肤上,勾画病变的二维形态、大小、分布。病变在皮肤的体表投影中心由前后线及上下垂线的交叉来确定,在3D打印时将于皮肤生成带颜色的体表投影标记(图3)。

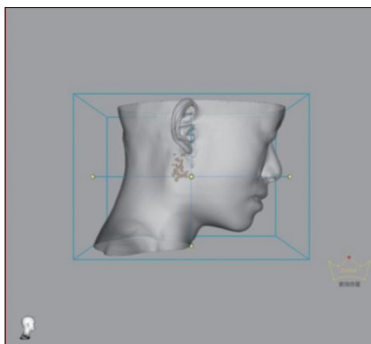


图 3 体表投影勾画

Fig 3 Body surface projection sketching

2) 快速响应矩阵码(quick response code, QR code)制作: 在重建的三维模型中皮肤组织上选取一个标记点(病变同侧任意一点),3D打印时将在标记点形成孔,以QR码的方式记忆标记点的空间位置,并制作树脂二维码固定于3D打印模型的标记点孔。

3) MR动态追踪: 将完整三维重建数据导入头戴式全息显示器HoloLens(微软公司,美国),操作者佩戴HoloLens眼镜,通过双指并拢、单指点击、滑动等手势和语音无接触式命令HoloLens

操作,实时浏览三维重建影像,通过影像配准将虚拟模型叠加于真实环境中的3D模型上。

4) 体外配准采用两种配准方式进行动态追踪录像。①体表标志点配准法: 选取易于分辨且较稳定的解剖结构(鼻尖、内外眦、下颌角点、面部轮廓)进行自动识别配准。将模型置于仰卧位,将三维重建模型投射于3D头模的冠状面上,HoloLens眼镜自动识别3D模型的面部特征点,进行静态配准,操作者以肿瘤体表投影与三维影像的匹配判断配准是否成功。模拟患者偏头位,暴露患侧,HoloLens眼镜对准3D头模,偏头运动过程中进行动态追踪。待头模停止转动后,HoloLens眼镜对准头模半侧位或侧位,保持稳定的静态配准状态。②QR码配准法: 通过识别QR码进行空间定位而实现体外配准。将带有提前固定好的QR码的头模置于仰卧位,将三维重建模型投射于3D头模的冠状面上,HoloLens眼镜将自动识别3D模型上的QR码,以此定位头模与三维重建模型间的相对位置,进行静态配准。动态配准追踪过程同前。

2 结果

本研究将患者术前增强CT数据三维重建后,形成包括低密度影、双侧腮腺、头颈部动脉、静脉、骨骼、皮肤、淋巴结、胸锁乳突肌、咬肌、甲状腺等的三维立体结构,进行多解剖模型组合获得三维可视化的头颈部模型(图4)。通过重建后的三维模型能够确定病变的范围和边界,定位于腮腺实质内的病灶,并直观显示病变的位置关系及其内部的分布、大小、深度、形态。除了

直观的展示，三维重建软件也计算了病变实际体积0.56 mL、表面积10.21 cm²，帮助判断病变的大小。通过MR系统不同透明度的调节，快速定位病变位置，利用测量分析功能，对不同解剖层次的病变与周围组织距离测量，实现病变的分层可视化。

此外，建立带有体表投影标记及QR码的三维模型，利用3D打印技术打印出模拟真实患者的体外模型。该3D模型不仅模拟了患者的外形轮廓，而且在皮肤层面对颌面部的解剖标志点进行了精确的再现（图5、6）。

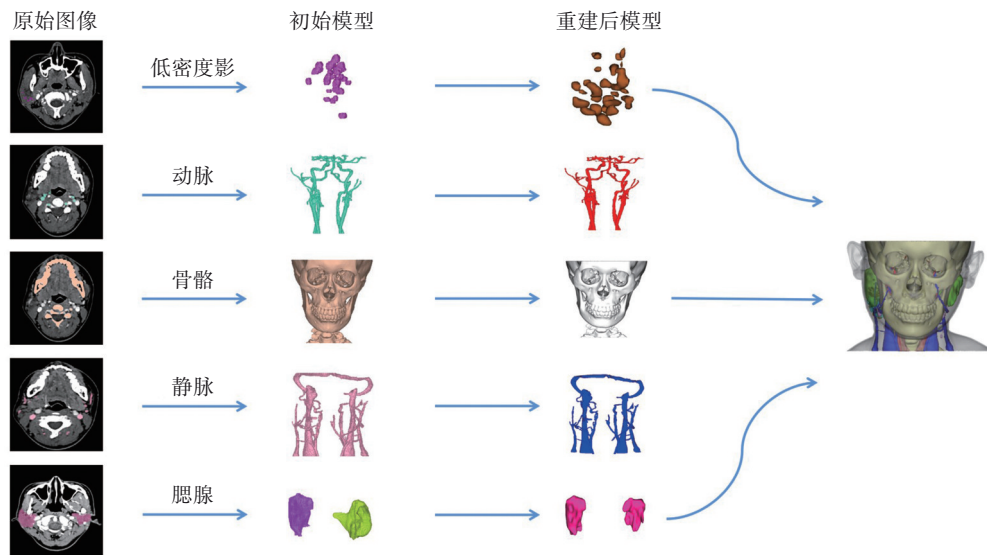


图 4 三维重建多解剖模型

Fig 4 Three-dimensional reconstruction of multiple anatomical models

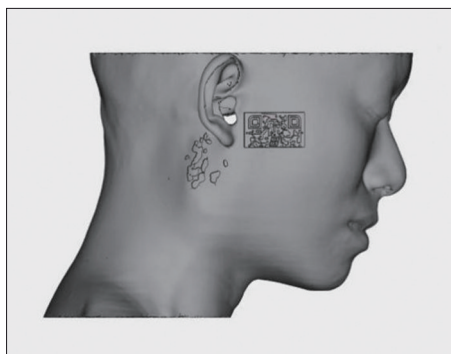


图 5 3D打印模型平面图

Fig 5 3D printed model plan



图 6 3D打印体外模型图

Fig 6 3D printed *in vitro* model

在此基础上，利用MR技术对3D模型进行了动态追踪，利用HoloLens视频录制功能记录动态追踪过程。采用Adobe Premiere Pro 2020视频软件对动态追踪过程进行分析，多次重复追踪过程，对比两种方式的三维全息图像配准时间（图7）。面部标志识别冠状位至侧位动态追踪过程中，半侧位动态追踪平均时间（T45°）为3.67帧，侧位动态追踪平均时间（T90°）为10.67帧，全程动态追踪平均时间（T总）为12秒28帧（30帧/秒）；QR码识别动态追踪过程中，T45°为1.67帧，T90°为2.33帧，T总为11秒13帧（30帧/秒）。结果显示MR动态追踪过程QR码识别较面部标志识别更迅速（表1）。

三维重建过程中误差分析，采用Adobe Photoshop CC 2019计算CT某一平面低密度影的面积、高度及宽度与三维重建后对应病变进行对比（图8、表2）。平均面积差值1.742 mm²、平均高度差值0.235 mm、平均宽度差值1.296 mm。

3 讨论

目前，MR在口腔领域的应用见于颞下颌关节强直手术、颞成形手术、种植牙等临床操作，在

头颈肿瘤中应用较为少见,尤其是软组织肿瘤相关手术^[5-9]。MR技术相比VR和AR技术具有一定的优势,主要有3个特点:真实与虚拟对象结合、实时交互性、配准精确性^[10-11]。通过该技术可以实现术前手术设计及风险评估,此外通过虚拟三维影像与真实术区叠加及精确配准,与真实环境实

时交互,术者可以清晰地看到病灶所在边界和位置,避开重要器官与结构,完整切除病灶。但是MR技术的临床适用性和安全性也会受多种因素影响,如软组织移动性、图像配准精确性以及时效性等^[12]。因此,本研究着重对图像配准这一技术进行应用的临床前期研究。

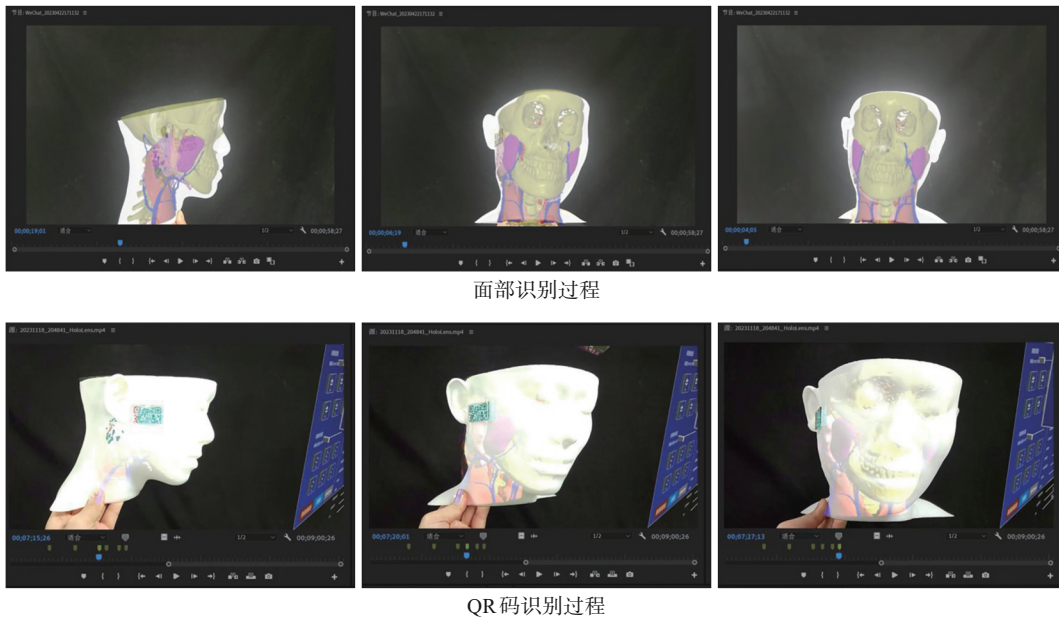


图7 动态追踪过程

Fig 7 Dynamic tracking process

表1 动态追踪时间对比

Tab 1 Comparison of dynamic tracking time

项目	体表标志点配准法			QR码配准法		
	第一次	第二次	第三次	第一次	第二次	第三次
T45°/帧	2	4	5	2	1	2
T90°/帧	18	10	4	1	2	4
T总	14秒26帧	10秒12帧	13秒15帧	11秒17帧	10秒13帧	12秒10帧

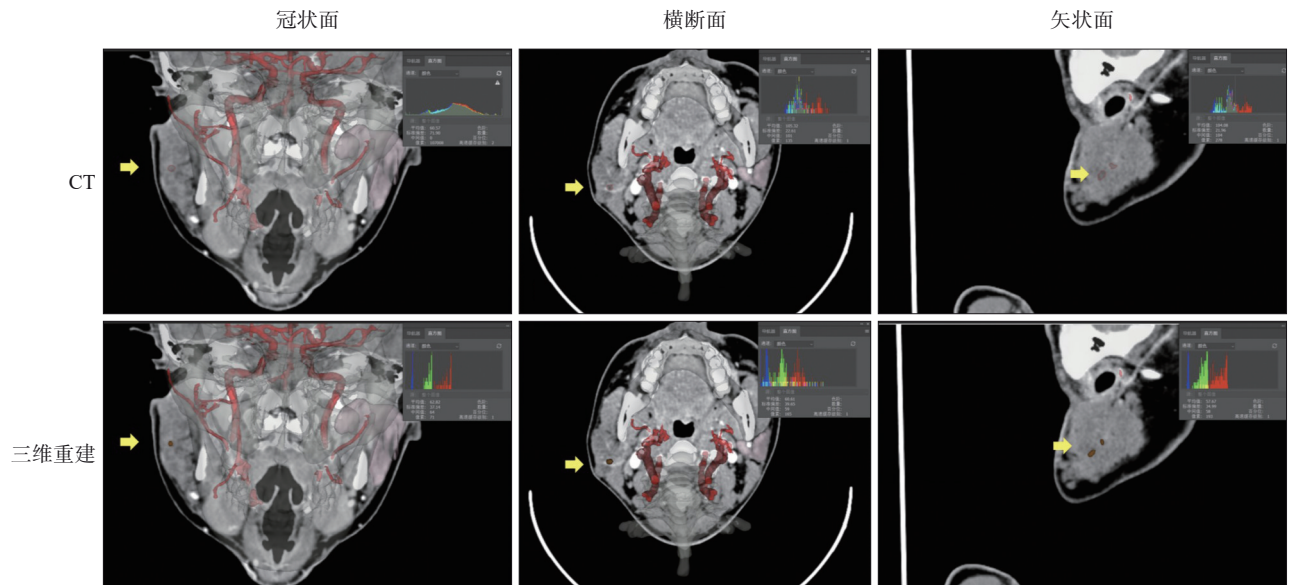
首先采用三维重建软件系统,获得患者的数字化模型。该模型十分直观地显示病灶的大小、位置、形态,并且展示出病变与周围组织的毗邻关系,尤其是重要的动静脉、淋巴结、腮腺的空间位置关系。在视图中,以不同的颜色分别重建不同的组织,通过多角度旋转,不同透明度的观察,三维立体地洞悉病变与周围组织的关系。此外,术前可以在三维重建模型中测量和计算病变的体积及与血管距离,辅助术前切口设计,更好地定位病灶,保障了在术中与重要血管安全距离,减少术区范围,提供足够的视野,为术者提供更多的术前方案设计信息。

目前,临床上对于疾病的诊断和术前评估主要依据影像学资料,包括锥形束CT、螺旋CT、增强CT等,但是这些资料仅仅局限于二维平面,在

一些复杂疾病的诊治中,尤其是头颈肿瘤手术中,需要精确定位病灶与周围组织的三维关系,这些影像学检查的局限性更加凸显^[13]。如多发或复发的肿瘤,包括常见的复发多形性腺瘤(recurrent pleomorphic adenoma, RPA),常见临床上2个及以上的多个病灶,其复发次数增加与后续复发的风险密切相关,因此该疾病治疗关键的是手术彻底切除以减少复发次数^[14]。但是在RPA等复发多灶肿瘤手术中,肿瘤缺乏完整包膜,边界不清,增加了手术彻底切除的难度,也对手术中病灶的位置边界的判断提出了更高的要求。本研究中,选取了典型的RPA患者,通过三维可视化重建病灶,可以清晰地判断病变的分布及范围,与周围组织的关系等,尤其与重要血管的关系及累及程度,为手术根治病变提供了很好的参考。对于三

维可视化重建的临床意义，前期研究中有深刻体会，尤其针对临床不能触诊的肿瘤，手术方案

的制订具有重要参考价值^[15-16]。



箭头示病变所在位置。

图 8 病变在CT与三维重建平面对比

Fig 8 Comparison of the lesion in the CT plane and the three-dimensional plane

表 2 病变重建前后面积、宽度及高度对比

Tab 2 Comparison of area, width, and height before and after lesion reconstruction

项目	重建前			重建后		
	冠状面	横断面	矢状面	冠状面	横断面	矢状面
面积/mm ²	3.794	4.199	8.710	2.208	5.132	6.003
高度/mm	2.116	2.293	5.644	1.764	2.293	5.996
宽度/mm	2.469	2.293	6.526	0.159	2.822	5.467

其次，为了进行MR的临床应用研究，采用了3D打印技术重建了患者的体外模型。该技术是利用三维影像数据生成三维物理模型的方法，其本质是快速成型技术，是在三维重建模型分割为层状基础上利用3D打印材料逐层堆积来重建三维物理模型。这个过程主要包括3D打印机从三维重建软件中读取数据，然后将液体、粉末或其他材料对应于三维重建模型的虚拟横截面，层层堆塑，创建最终个性化定制模型^[17-18]。目前3D打印技术是一种相对成熟的技术，其在口腔颌面外科主要运用于颌骨重建相关手术、正颌手术等^[19-20]。因此，本研究也应用了3D打印技术建立体外模型，提供接近人体的安全实验条件。

在三维重建及3D打印的基础上，前期研究了MR手术系统的临床应用。目前该项技术已经少量应用到手术中，通过MR技术将三维结构叠加于真实术区，并采用不同的颜色和不同的透明度展示

各组织，可以更加直观地判断肿瘤与血管、淋巴结、正常组织间的毗邻关系，术中辅助医生精准定位肿瘤及受侵动脉，真正达到彻底清除目标病灶及颈部淋巴结，减少出血，提高手术的成功率，减少手术并发症的发生，切实促进了手术高效化、精准化，作为术中导航的安全性和有效性也得到了验证^[21]。

但是，这些研究也存在一个共性的问题，MR图像配准是基于静态状态下进行的。在该技术临床应用过程中，患者体位的改变不可避免，也就是图像要进行多次配准，费时费力，因此在本研究中，提出能否对图像进行动态配准，实现图像的实时跟踪，来解决反复人工配准的问题。因此采用了HoloLens 2代眼镜，具有轻便、无接触、多人共享、易操作等特点，通过眼球及语音追踪实现设备命令和控制，不转移手术视野，不接触设备操作下同时看到真实术野与三维重建结构^[22-23]。

本实验中，采用了面部识别及QR码识别两种自动配准方式。这两种配准方式已经有过研究进行了误差评价。Pepe等^[24]研究证实面部识别自动配准的效率，与有标记的配准方式相比较，误差平均多出3 mm；Bussink等^[25]的研究中运用了AR技术与QR码结合进行髁突手术，平均误差为1 mm以内。但是在本研究中并没有测量其误差，因为

HoloLens 2代具有微调整功能,可手动校准三维空间坐标系数,根据虚拟按钮和滑动条控制微小数据的移动和旋转调整误差。此外,HoloLens配置自动跟踪图像识别定位软件平台V1.0,其自带校正机制能在0.5 mm精度内自动校正误差。在静态状态下通过肿瘤体表投影能够精确配准,辅助面部识别及QR码图像识别,有效控制误差^[26-27]。在动态条件下两种配准方式都可以进行动态配准,实现影像实时跟踪。其中树脂制作QR码固定于面部作为标记识别的配准方式较面部标志识别更高效、便捷、客观,但也需要更多的研究来验证其精确性。此外,本研究计算了三维重建过程中由于图像的平滑、减噪、优化等操作导致图像转化的误差,随机选取某处病变并计算其病变大小误差,平均面积误差在2 mm²内。已有研究^[8]将MR应用于腮腺肿瘤手术,实现术中腮腺肿瘤边界定位及切口设计。而本研究首次实现了在虚拟环境下动态追踪病变,在模拟患者偏头过程中对病变进行配准,更加贴近临床手术实际操作,为操作者提供更多手术可能性。

尽管MR技术显示出具有一定优势,但在实际临床应用中仍存在局限性^[28-29]。如软组织移动性影响其精度,MR实时动态追踪在患者体位改变的软组织移动研究方面有一定的优势,但在实际术中更加细微的软组织移动对精度也有影响。此外,在进行配准识别的过程中也发现了MR设备部分缺点,如HoloLens初次操作者需进行培训,配准时会受环境光线影响,长时间使用会出现设备发热等。随着MR技术的不断研究与应用,在临床实践中会有更多的完善和适应。

总之,在体外模型中将MR技术与3D打印技术相结合,将3D重建后的虚拟医学影像模型叠加在模拟患者的相应部位,实现了类似“透视”的效果,并对比了两种方式的配准及动态追踪效果,为MR技术实施精准个性化手术打下基础。未来需要更多研究探索其体外模型上及真实手术中运用的安全性、准确性及高效性。

利益冲突声明:作者声明本文无利益冲突。

[参考文献]

- [1] Blanchard J, Koshal S, Morley S, et al. The use of mixed reality in dentistry[J]. *Br Dent J*, 2022, 233(4): 261-265.
- [2] Heredero S, Falguera MI, Marín A, et al. Virtual planning and mixed reality for the thin anterolateral thigh perforator flap[J]. *Plast Reconstr Surg Glob Open*, 2022, 10(10): e4567.
- [3] Han JJ, Sodnom-Ish B, Eo MY, et al. Accurate mandible reconstruction by mixed reality, 3D printing, and robotic-assisted navigation integration[J]. *J Craniofac Surg*, 2022, 33(6): e701-e706.
- [4] Karnatz N, Möllmann HL, Wilkat M, et al. Advances and innovations in ablative head and neck oncologic surgery using mixed reality technologies in personalized medicine[J]. *J Clin Med*, 2022, 11(16): 4767.
- [5] Sasaki T, Dehari H, Ogi K, et al. Application of a mixed reality device to oral surgery[J]. *Adv Oral Maxillofac Surg*, 2022, 8: 100331.
- [6] Liu L, Wang X, Guan M, et al. A mixed reality-based navigation method for dental implant navigation method: a pilot study[J]. *Comput Biol Med*, 2023, 154: 106568.
- [7] Koyachi M, Sugahara K, Tachizawa K, et al. Enhanced precision in genioplasty: a novel intraoperative spatial repositioning using computer-aided design and manufacturing technology and a holographic mixed reality application[J]. *J Clin Med*, 2023, 12(23): 7408.
- [8] Tang Z, Hu L, Yu Y, et al. Mixed reality combined with surgical navigation in resection of micro- and mini-tumors of the parotid gland: a pilot study[J]. *Laryngoscope*, 2024, 134(4): 1670-1678.
- [9] Sugahara K, Koyachi M, Koyama Y, et al. Mixed reality and three dimensional printed models for resection of maxillary tumor: a case report[J]. *Quant Imaging Med Surg*, 2021, 11(5): 2187-2194.
- [10] Bartella AK, Kamal M, Kuhnt T, et al. Mixed reality in oral and maxillofacial surgery: a symbiosis of virtual and augmented reality or a pointless technological gadget[J]. *Int J Comput Dent*, 2021, 24(1): 65-76.
- [11] Sun Q, Mai Y, Yang R, et al. Fast and accurate online calibration of optical see-through head-mounted display for AR-based surgical navigation using Microsoft HoloLens[J]. *Int J Comput Assist Radiol Surg*, 2020, 15(11): 1907-1919.
- [12] Sauer IM, Queisner M, Tang P, et al. Mixed reality in visceral surgery: development of a suitable workflow and evaluation of intraoperative use-cases[J]. *Ann Surg*, 2017, 266(5): 706-712.
- [13] Schlueter B, Kim KB, Oliver D, et al. Cone beam computed tomography 3D reconstruction of the mandibular condyle[J]. *Angle Orthod*, 2008, 78(5): 880-888.

- [14] Nicholas SE, Fu W, Liang AL, et al. Radiation therapy after surgical resection improves outcomes for patients with recurrent pleomorphic adenoma[J]. *Adv Radiat Oncol*, 2021, 6(3): 100674.
- [15] 郭陟永, 丁张帆, 苗诚, 等. 混合现实技术在口腔颌面-头颈肿瘤手术中应用的初步探索[J]. *华西口腔医学杂志*, 2020, 38(4): 470-474.
Guo ZY, Ding ZF, Miao C, et al. Application of mixed reality in oromaxillofacial head and neck oncology surgery: a preliminary study[J]. *West China J Stomatol*, 2020, 38(4): 470-474.
- [16] 丁张帆, 郭陟永, 苗诚, 等. 基于锥形束CT的三维可视化技术在颌骨囊性病变更手术中的应用[J]. *国际口腔医学杂志*, 2021, 48(2): 180-186.
Ding ZF, Guo ZY, Miao C, et al. Application of the cone-beam computed tomography-based three-dimensional visualization technology in the surgery of the jaw cystic lesion[J]. *Int J Stomatol*, 2021, 48(2): 180-186.
- [17] Sun Z, Wong YH, Yeong CH. Patient-specific 3D-printed low-cost models in medical education and clinical practice[J]. *Micromachines (Basel)*, 2023, 14(2): 464.
- [18] Lei PF, Su SL, Kong LY, et al. Mixed reality combined with three-dimensional printing technology in total hip arthroplasty: an updated review with a preliminary case presentation[J]. *Orthop Surg*, 2019, 11(5): 914-920.
- [19] Pabst A, Goetze E, Thiem DGE, et al. 3D printing in oral and maxillofacial surgery: a nationwide survey among university and non-university hospitals and private practices in Germany[J]. *Clin Oral Investig*, 2022, 26(1): 911-919.
- [20] García-Sevilla M, Moreta-Martínez R, García-Mato D, et al. Surgical navigation, augmented reality, and 3D printing for hard palate adenoid cystic carcinoma en-bloc resection: case report and literature review[J]. *Front Oncol*, 2022, 11: 741191.
- [21] Tang ZN, Hu LH, Soh HY, et al. Accuracy of mixed reality combined with surgical navigation assisted oral and maxillofacial tumor resection[J]. *Front Oncol*, 2022, 11: 715484.
- [22] Galati R, Simone M, Barile G, et al. Experimental setup employed in the operating room based on virtual and mixed reality: analysis of pros and cons in open abdomen surgery[J]. *J Healthc Eng*, 2020, 2020: 8851964.
- [23] Grubert J, Itoh Y, Moser K, et al. A survey of calibration methods for optical see-through head-mounted displays [J]. *IEEE Trans Vis Comput Graph*, 2018, 24(9): 2649-2662.
- [24] Pepe A, Trotta GF, Mohr-Ziak P, et al. A marker-less registration approach for mixed reality-aided maxillofacial surgery: a pilot evaluation[J]. *J Digit Imaging*, 2019, 32(6): 1008-1018.
- [25] Bussink T, Maal T, Meulstee J, et al. Augmented reality guided condylectomy[J]. *Br J Oral Maxillofac Surg*, 2022, 60(7): 991-993.
- [26] Incekara F, Smits M, Dirven C, et al. Clinical feasibility of a wearable mixed-reality device in neurosurgery[J]. *World Neurosurg*, 2018, 118: e422-e427.
- [27] Mitsuno D, Ueda K, Hirota Y, et al. Effective application of mixed reality device hololens: simple manual alignment of surgical field and holograms[J]. *Plast Reconstr Surg*, 2019, 143(2): 647-651.
- [28] Yang R, Li C, Tu P, et al. Development and application of digital maxillofacial surgery system based on mixed reality technology[J]. *Front Surg*, 2022, 8: 719985.
- [29] Marcus HJ, Pratt P, Hughes-Hallett A, et al. Comparative effectiveness and safety of image guidance systems in surgery: a preclinical randomised study[J]. *Lancet*, 2015, 385(Suppl 1): S64.

(本文编辑 杜冰)