

基于混合现实与人工智能算法在股前外穿支血管定位中的前瞻性研究

刘一秀¹ 汤喜¹ 吴剑¹ 周莲¹ 吴双江^{2,3} 瞿杨⁴ 吴小月¹

1. 重庆大学附属肿瘤医院头颈肿瘤科 肿瘤转移与个体化诊治转化研究

重庆市重点实验室, 重庆 400000;

2. 西南医科大学附属口腔医院口腔颌面外科 口腔颌面修复重建和

再生泸州市重点实验室, 泸州 646000;

3. 西南医科大学附属医院口腔颌面外科, 泸州 646000; 4. 瞿杨口腔诊所, 重庆 400000

[摘要] **目的** 构建混合现实技术与人工智能算法的系统, 评估其在股前外穿支皮瓣手术中定位血管的效果, 为临床实践提供新的思路。**方法** 选取20例行股前外穿支皮瓣修复的患者, 在下肢黏贴定位装置后行CT血管造影(CTA)扫描, 将所得二维数据制成定位装置与血管等的三维模型, 并通过混合现实技术实现穿支血管三维可视化。在HoloLens 2中开发人工算法, 术中使用人工智能算法自动匹配定位装置与其三维模型以实现穿支血管与其三维模型的重叠。记录制取皮瓣区域内定位的穿支血管数量及术中探查的实际数量, 以此计算基于CTA数据重建的血管识别正确率; 测量系统定位的穿支血管穿出点与实际血管穿出点之间的距离, 计算误差值; 记录系统辅助下制取股前外穿支皮瓣的手术时间, 并与常规方法制取皮瓣的手术时间进行对比分析。探讨该系统的临床实用性。**结果** CTA数据重建的穿支血管30个, 手术中探查发现实际存在32个, 识别正确率为93.75%; 系统定位的穿支血管穿出点与实际穿出点的平均距离为(1.65±0.52) mm, 系统定位下制取皮瓣的平均手术时间为(43.45±4.6) min, 常规方法制取皮瓣的手术时间为(57.6±7.9) min。所有穿支皮瓣均成活, 1例皮瓣术后7 d出现感染, 1例皮瓣局部坏死, 经对症治疗后延迟愈合。**结论** 本研究搭建的系统可以通过混合现实技术实现穿支血管三维可视化, 利用人工智能算法提高穿支血管定位精度, 在穿支皮瓣制取手术中具有应用潜力。

[关键词] 混合现实; 人工智能算法; 股前外穿支皮瓣; 穿支血管

[中图分类号] R782.05 **[文献标志码]** A **[doi]** 10.7518/hxkq.2024.2024129



本文链接 开放科学标识码

Prospective study on the localization of anterolateral thigh perforator vessel based on mixed reality and artificial algorithm

Liu Yixiu¹, Tang Xi¹, Wu Jian¹, Zhou Lian¹, Wu Shuangjiang^{2,3}, Qu Yang⁴, Wu Xiaoyue¹

1. Dept. of Head and Neck Oncology, Chongqing University Cancer Hospital, Chongqing Key Laboratory of Translational Research for Cancer Metastasis and Individualized Treatment, Chongqing 400000, China; 2. Dept. of Oral and Maxillofacial Surgery, The Affiliated Stomatological Hospital of Southwest Medical University, Luzhou Key Laboratory of Oral & Maxillofacial Reconstruction and Regeneration, Luzhou 646000, China; 3. Dept. of Oral and Maxillofacial Sur-

gery, The Affiliated Hospital of Southwest Medical University, Luzhou 646000, China; 4. Quyang Dental Clinic, Chongqing 400000, China

Supported by: Scientific and Technological Research Program of Chongqing Municipal Education Commission (KJQN202300124, KJQN202400105); Open Fund Project of the Key Laboratory, Chongqing University Cancer

[收稿日期] 2024-04-08; **[修回日期]** 2024-08-29

[基金项目] 重庆市教委科学技术研究项目(KJQN202300124, KJQN202400105); 重庆大学附属肿瘤医院重点实验室开放基金项目(cqchkhj005)

[作者简介] 刘一秀, 副主任医师, 博士, E-mail: 380887688@qq.com

[通信作者] 吴小月, 学士, E-mail: 75987795@qq.com

Hospital (cqchkfj005)

Correspondence: Wu Xiaoyue, E-mail: 75987795@qq.com

[Abstract] Objective This paper aims to construct a system integrating mixed reality technology with artificial algorithm and to evaluate its effectiveness in vascular localization during anterolateral thigh perforator flap surgery to provide new insights for clinical practice. **Methods** Twenty patients undergoing anterolateral thigh perforator flap repair were selected. After attaching positioning devices on the lower limb, CT angiography (CTA) scans were performed. The 2D data obtained were converted into a 3D model of the positioning device and vessels. Mixed reality technology was utilized to achieve 3D visualization of perforator vessels. An artificial algorithm was developed in HoloLens 2 to match the positioning device automatically with its 3D model intraoperatively to overlap the perforator vessels with their 3D models. The number of perforator vessels identified within the flap harvesting area and the actual number detected during surgery were recorded to calculate the accuracy rate of vessel identification based on CTA data reconstruction. The distance between the perforator vessel exit points located by the system and the actual exit points was measured, and the error values were calculated. The surgical time required for the system to harvest the anterolateral thigh perforator flap was documented and compared with the surgical time required by conventional methods. The clinical applicability of the system was discussed. **Results** The CTA data reconstruction identified 30 perforator vessels, while the actual number found during surgery was 32, resulting in an identification accuracy rate of 93.75%. The average distance between the perforator vessel exit points located by the system and the actual exit points was (1.65±0.52) mm. The average surgical time for flap harvesting with the assistance of the system was (43.45±4.6) min compared with (57.6±7.9) min required by conventional methods. All perforator flaps survived the procedure. One case of flap infection occurred seven days postoperatively, and one case of partial flap necrosis was treated with symptomatic therapy, resulting in delayed healing. **Conclusion** The system constructed in this paper can achieve 3D visualization of perforator vessels through mixed reality technology and improve the accuracy of perforator vessel localization using artificial algorithms, hence demonstrating potential application in anterolateral thigh perforator flap harvesting surgeries.

[Key words] mixed reality; artificial algorithm; anterolateral thigh perforator flap; perforator vessel

在组织缺损修复重建手术中，股前外穿支皮瓣因具有易于制取、血供丰富、血管蒂长等优势而被誉为“万能皮瓣”^[1]，已广泛应用于整形、创伤和肿瘤等医学领域^[2-3]。然而，由于股前外穿支血管的变异及个体差异，血管的位置、管径大小、起源、在皮下组织和肌肉内的走行等差异性不仅表现在不同个体之间，而且在同一个体的不同侧也会出现差异，从而影响到最终的修复效果^[4]。因此，在术前精准地定位穿支血管，进而合理设计穿支皮瓣是临床中需要探讨的问题^[5]。

目前穿支血管的定位方法主要包括CT血管造影(CT angiography, CTA)、彩色多普勒超声(color doppler ultrasound, CDU)、磁共振血管造影(magnetic resonance angiography, MRA)等，其中，CTA定位血管的优越性已得到证实，被誉为血管定位的金标准^[6]。前期研究^[7]也证实了CTA定位穿支血管的性能优于CDU，但CTA图像需要术者在手术过程中根据自己的经验将重建后的影像与真实术区进行重叠，虚拟图像与现实的匹配往往浪费大量的时间与精力^[8]。因此，保留现有技术

的优点并引入三维可视化影像是提高皮瓣制取效率的途径，并将对医学技术的发展起到促进作用。

近年来，混合现实(mixed reality, MR)已成为医学领域多个学科普遍采用的技术手段^[9-10]。在股前外穿支皮瓣手术中，利用MR能够将制取的皮瓣区域三维模型进行投放，实现三维可视化，有可能解决目前定位存在的诸多问题。然而，在实际应用中，由于下肢平坦光滑且缺乏明确解剖标志，MR传统手动配准方法面临挑战。基于此，本研究研发一种简便、无创的定位装置，并设计人工智能算法将定位装置与其三维模型自动对齐，最终实现穿支血管与其三维模型的对齐，为临床提供新思路及实验依据。

1 材料和方法

1.1 一般资料

纳入20例重庆大学附属肿瘤医院头颈外科行下肢股前外穿支皮瓣修复重建的患者，所有患者均知情并签署同意书。回顾并随机选取重庆大学

附属肿瘤医院2018—2020年采用常规方法制取股前外穿支皮瓣的患者20例,记录每例患者皮瓣制取的时间。本研究经重庆大学附属肿瘤医院伦理委员会审批通过(伦理审批号:CZLS2021177-A)。

纳入标准:1)头颈颌面部恶性肿瘤患者;2)原发灶扩大切除后组织缺损范围大,术前评估游离前臂皮瓣无法修复术区缺损;3)可耐受全麻手术。

排除标准:1)预计术区组织缺损范围小于

5.0 cm×4.0 cm;2)双下肢既往有手术或者外伤史;3)其他基础疾病无法承受全麻者。

1.2 设备、材料及流程

HoloLens 2 (Microsoft公司,美国),西门子双源CT (Siemens公司,德国), Simplant 软件 (Materialise公司,比利时),聚醚醚酮 (polyetheretherketone, PEEK) (吉林中研高分子材料股份有限公司)。

系统工作流程见图1。

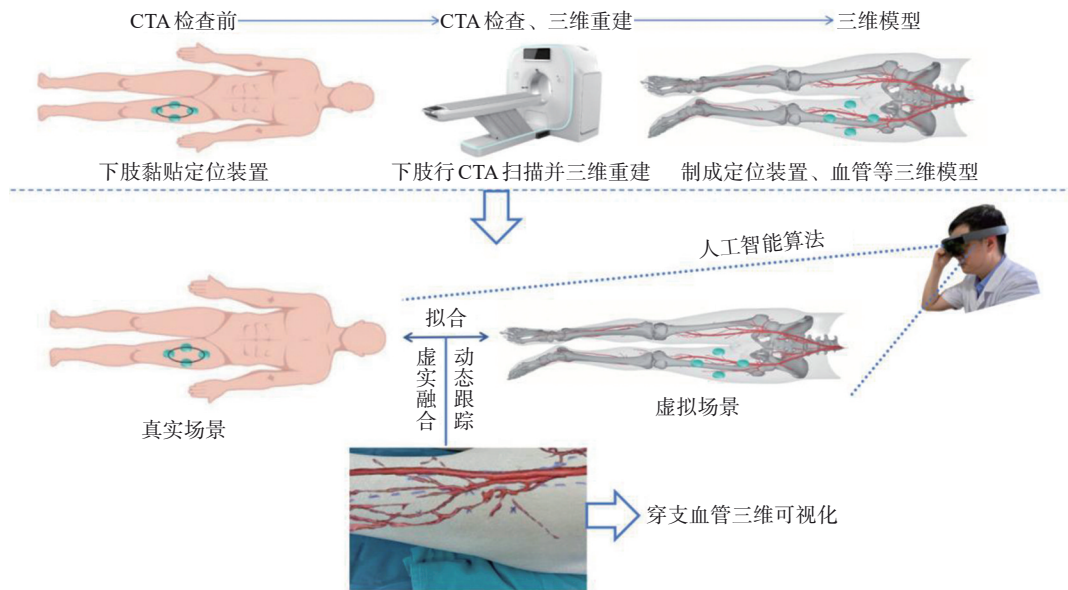


图1 系统工作流程

Fig 1 System workflow

1.3 术前准备

1.3.1 在体表标记股前外皮瓣

患者体位与手术时一致,在髌前上棘外缘到髌骨外缘作一连线,从该线中点O点向腹股沟韧带中点作第二连线即为旋股外侧动脉降支的体表投影。O点为第一肌皮动脉降支的浅出点。皮瓣设计应使浅出点落在皮瓣的上半部靠中点附近。标记后皮瓣见图2。

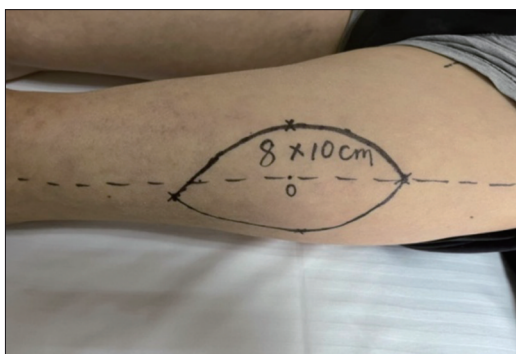
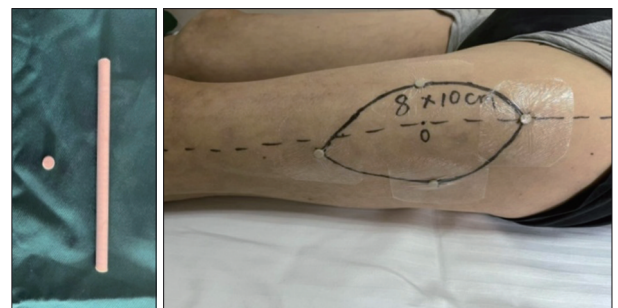


图2 在患者下肢标记皮瓣拟制取区域

Fig 2 Marking the proposed flap area on the patient's lower limb

1.3.2 制作并安装定位装置

将影像学可显影、伪影小的PEEK材料制作成直径6 mm、厚度3 mm的硬币形状,黏贴在设计皮瓣外形高点处(图3)。



左:制作的PEEK材料;右:将PEEK材料黏贴于皮瓣标记处外形高点。

图3 制作定位装置并黏贴于皮瓣标记处外形高点

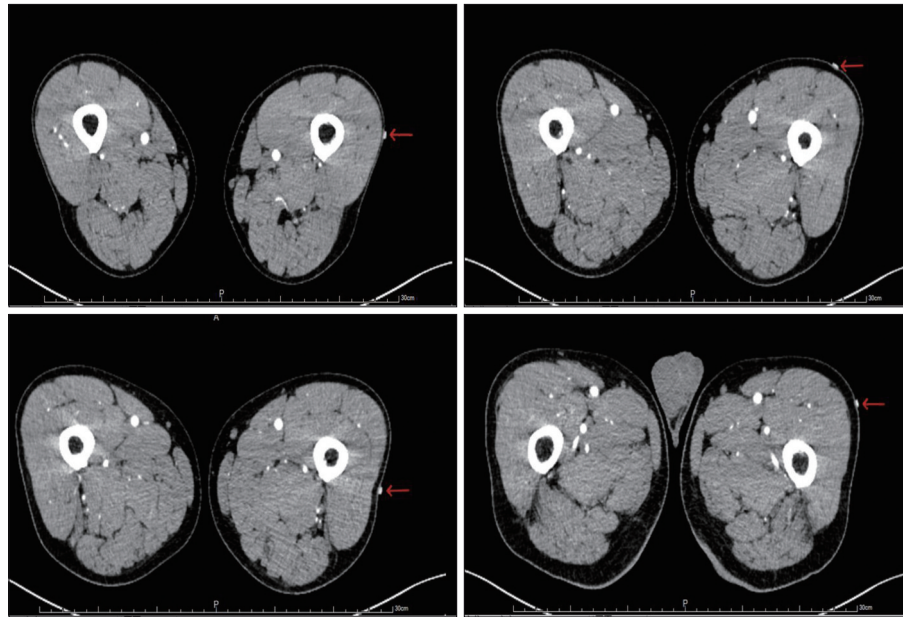
Fig 3 Fabricating a positioning device and attaching it to the outermost point of the marked flap area

1.3.3 下肢CTA扫描

使用西门子双源CT进行扫描。患者取与手术

相同的平卧体位，足先进，手臂上举至头顶。对比剂使用碘普罗胺 370，以 4.0 mL/s 的速率推注 90 mL；动脉期采用股动脉监测触发，触发阈值为 100 HU，同时设置延迟扫描时间 10 s。扫描完毕

后，将扫描所得 1 mm 层厚无间距横轴位原始图像数据传输至工作站，采用多平面重建、最大密度投影以及容积再现、曲面重建等技术对图像进行后处理（图 4）。



红色箭头处为 PEEK 材料二维影像。

图 4 CTA 扫描生成下肢与 PEEK 材料的二维影像

Fig 4 CTA scanning to generate two-dimensional images of the lower limb and PEEK material

1.3.4 CTA 数据进行三维重建

将获得的 CTA 二维数据导入 Simplant 软件，利用工作站中组织识别板块分割及重建软组织、血管、骨组织和肿瘤以获得网格模型，使用工作站的场景编辑板块对网格模型进行优化三角、打磨凸起、镂空血管、调整边界轮廓等平滑处理，使用不同颜色区分显示模型中的软组织、血管、骨组织以及肿瘤，最终制成下肢与 PEEK 材料的三维模型（图 5）。

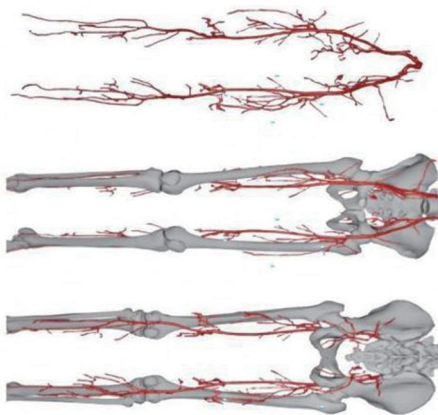


图 5 制成下肢血管、PEEK 材料等的三维模型

Fig 5 Creating three-dimensional models of lower limb vasculature, PEEK material, and other relevant structures

1.3.5 设计人工智能算法

采用 UNETR 分割技术处理 PEEK 材料，UNETR 模型融合了 U-Net 的结构和 Transformer 的自注意力机制，优化了图像分割中的全局信息整合与细节保留。在此模型中，编码器通过 Transformer 的自注意力机制处理图像，有效捕获全局信息；解码器则将这些特征转换为精确的分割图像。

将三维模型作为输入并记为 X ，将其输入到 UNETR 中。 $X \in R^{H \times W \times D \times C}$ ， H 、 W 、 D 分别为输入的三维模型的长、宽和深度信息， C 则作为输入的通道数。将 X 分为一序列不重叠的补丁 $x_i \in R^{N \times (P^3 \cdot C)}$ ， P 、 P 、 P 代表每个补丁的分辨率， $N = (H \times W \times D) / P^3$ 代表序列的长度。使用线性层将补丁投影到 K 维嵌入空间中，该空间在整个 Transformer 层中保持不变。保留提取补丁的空间信息，根据公式 (1) 向投影的补丁嵌入 $E \in R^{(P^3 \cdot C)}$ ，添加了一个可学习的一维位置嵌入 $E_{pos} \in R^{N \times K}$ 。

$$z_{\{0\}} = [x_1^T E; [x_2^T E; \dots; x_N^T E] + E_{pos} \quad (1)$$

在嵌入层后，利用包含多头注意力 (MSA) 和多层感知器 (MLP) 子层的 Transformer 块，根据公式 (2、3) 计算。

$$Z_l = \text{MSA}(\text{LN}(Z_{l-1})) + Z_{l-1} \quad (2)$$

$$Z'_i = \text{MLP}(\text{LN}(Z'_i)) + (Z'_i) \quad (3)$$

其中, LN代表归一化层, MLP由2个具有激活函数的线性层组成, l 是中间块标识符。MSA块是一个参数化的函数, 通过学习序列中 query 和对应的 key、value 进行映射。注意力权重 α_{ij} 是通过测量 query 和 key 之间相似度计算的。

$$\alpha_{ij} = \frac{\exp(q_i \cdot k_j / \sqrt{d_k})}{\sum_{j=1}^N \exp(q_i \cdot k_j / \sqrt{d_k})}$$

使用计算出的注意力权重, 序列中 value 的输出为:

$$O_i = \sum_{j=1}^N \alpha_{ij} v_j$$

此外, MSA 的输出为:

$$Z'_i = \text{MSA}(\text{LN}(Z_{i-1})) + Z_{i-1}$$

在训练过程中, 采用Dice损失函数进行训练, 并将输出通道设置为2。通过UNETR输出, 获得4块PEEK材料的位置, 保存位置用作术中定位。使用YOLOv8算法对患者体表4个PEEK材料的关键点进行检测, 分别计算出材料对应的长轴和短轴长度, 以长轴第一个PEEK材料为基点, 按照比例对三维模型进行x轴和轴上的放大, 具体公式为:

$$\text{Scale}(x) = \frac{x}{x_{\text{seg}}}$$

$$\text{Scale}(y) = \frac{y}{y_{\text{seg}}}$$

$\text{Scale}(x)$ 、 $\text{Scale}(y)$ 分别是三维模型在x轴和y轴上的放大比例, x 、 y 为患者肢体上4个PEEK材料的长轴和短轴, x_{seg} 、 y_{seg} 则为三维模型中的4个材料的长轴和短轴。通过对三维模型的比例变化, 可将三维模型与患者肢体对应。

创建HoloLens 2的应用程序开发环境, 在Unity中创建一个新的项目, 并配置为HoloLens 2开发, 导入HoloLens 2开发工具包, 设置项目的配置选项。对应用程序进行设计, 将患者下肢的4个PEEK材料进行关键点检测、三维模型与患者肢体相匹配等操作集成到应用程序中。

1.4 手术

1.4.1 定位穿支血管

手术时, 患者取与检查相同平卧体位, 麻醉诱导时仅给予插管剂量的短效肌肉松弛剂, 定位与取皮瓣完成前不再给予肌肉松弛剂。术者佩戴HoloLens 2, 导入患者的三维模型, 根据设计的人工智能算法, 使用手势及语音指令, 先将定位装置的三维模型与患者体表的定位装置进行自动

对齐, 术者再通过多角度、多维度调整模型的位置和方向。定位装置对齐后, 穿支血管与其三维模型则对齐, 选取穿支血管穿出点标记于体表(图6)。

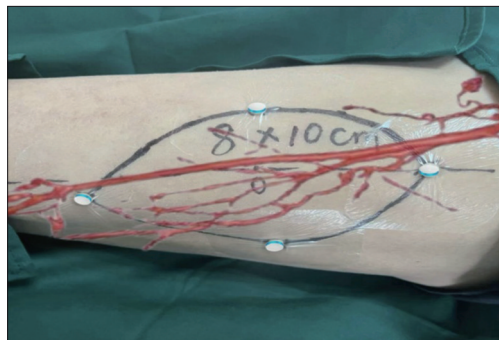


图6 利用人工算法将定位装置与其三维模型配准以实现穿支血管与其三维模型的配准

Fig 6 Utilizing artificial algorithms to align the positioning device with its three-dimensional model to achieve registration of the perforating vessels with their 3D representation

1.4.2 寻找实际穿支血管

沿皮瓣标记处切开皮肤、皮下组织, 在阔筋膜表面下从前向后直视下寻找穿支血管(图7)。

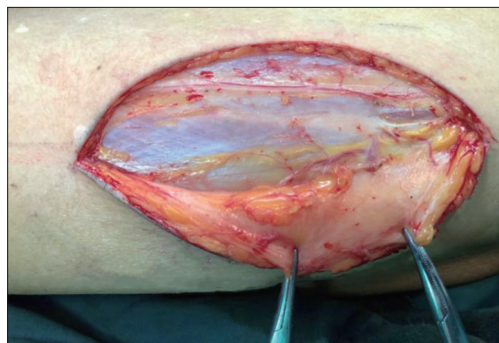


图7 术中寻找穿支血管

Fig 7 Locating the perforating vessels intraoperatively

1.5 测量指标

记录皮瓣区域内系统定位的穿支血管数量及实际穿支血管数量, 计算CTA数据重建后穿支血管识别正确率, 识别正确率=定位血管数量/实际穿支血管数量。测量穿支血管穿出点与实际血管穿出点间的距离, 记录每例患者皮瓣制取的时间。

2 结果

2.1 临床观察

20例穿支皮瓣均成活, 1例皮瓣术后7d出现感染, 给予抗感染等对症治疗后控制; 1例皮瓣术后10d出现局部坏死, 经换药等局部治疗后延迟

愈合。

2.2 CTA 数据重建的血管识别正确率

20 例患者 CTA 重建后的穿支血管共 30 个，手术中探查发现实际存在 32 个（表 1）。血管识别正确率为 93.75%（30/32）。

表 1 数据统计

Tab 1 Data statistics

| 患者编号 | 定位的血管与实际的距离/mm | 识别的血管数量/支 | 实际血管数量/支 | 制取皮瓣时间/min |
|------|----------------|-----------|----------|------------|
| 1 | 1.5 | 1 | 1 | 40 |
| 2 | 2.5 | 2 | 2 | 51 |
| 3 | 1 | 1 | 1 | 47 |
| 4 | 2 | 2 | 3 | 52 |
| 5 | 1.5 | 2 | 2 | 45 |
| 6 | 1.5 | 1 | 1 | 38 |
| 7 | 2 | 1 | 1 | 51 |
| 8 | 2.5 | 2 | 2 | 45 |
| 9 | 2 | 1 | 1 | 39 |
| 10 | 1.5 | 2 | 2 | 40 |
| 11 | 1 | 1 | 1 | 38 |
| 12 | 2 | 1 | 1 | 41 |
| 13 | 1.5 | 1 | 1 | 40 |
| 14 | 1.5 | 2 | 2 | 42 |
| 15 | 2 | 1 | 1 | 48 |
| 16 | 1.5 | 2 | 2 | 38 |
| 17 | 2.5 | 1 | 1 | 42 |
| 18 | 1 | 2 | 2 | 44 |
| 19 | 1 | 2 | 2 | 41 |
| 20 | 1 | 2 | 3 | 47 |
| 合计 | 33 | 30 | 32 | 869 |

2.3 系统定位穿支血管穿出点的误差值

系统定位下 20 例患者的下肢股前外穿支血管穿出点与实际血管穿出点的总距离为 33 mm（表 1），平均距离为（1.65±0.52）mm。

2.4 手术时间

系统定位下 20 例患者制取皮瓣的总手术时间 869 min，平均手术时间为（43.45±4.6）min。常规方法制取皮瓣的总手术时间 1 152 min，平均手术时间为（57.6±7.9）min。

3 讨论

3.1 MR 技术中定位装置的现状

影像数据结合 MR 技术在临床中得到了广泛的研究，但主要集中在具有固定解剖标志的骨科或颅颌面外科中^[11]，骨、眼、耳、鼻等结构的固定性和辨识度可作为基准参照物。操作者使用头戴式

全息显示器，通过调整三维模型的位置、角度和比例，先将人体固定解剖标志与其三维模型物理对齐，再实现整体三维模型与人体手动配准。然而，在股前外穿支皮瓣手术应用中，由于下肢平坦光滑且缺乏明确解剖标志，手动配准方法面临挑战。

为了解决这一难题，学者们通常会在手术区域周围放置特定的定位装置以辅助手动配准。莫勇军等^[12]在髂前上棘和髌骨外上缘黏贴电极片作为参照，术中使用 MR 将基于 CTA 数据的三维皮瓣信息叠加到患者供区体表以获取穿支血管位置，术后皮瓣全部成活，无并发症，血运良好。Pratt 等^[13]使用 HoloLens 在踝骨、膝关节处建立全息坐标作为基准，术中将基于 CTA 的三维模型匹配到腓骨皮瓣，结果显示，MR 可以实现穿支血管的三维可视化，起到透视的作用。在配准过程中，定位装置的对齐起到关键作用。现有的黏贴式定位装置虽然简便易行，但存在单一视角、依靠术者经验、CT 扫描出现伪影等缺陷，而针插入^[14-15]、螺钉插入^[16-17]、导管插入^[18-19]等植入式定位装置可能引起感染、免疫排斥、断裂等风险。目前国内文献对于穿支皮瓣专用定位装置研究较少。在本研究中，笔者采用 PEEK 材料制作定位装置，PEEK 材料具有影像显影而无伪影特点^[20]。经多次扫描后，认为直径 6 mm、厚度 3 mm 的圆形 PEEK 材料制成的三维模型最优，能在人工算法中实现准确地识别与定位，同时确保了患者的舒适度。

3.2 MR 与人工算法结合的现状与临床效果分析

手动配准的过程通常需要依靠外科医生的经验进行模型与解剖结构的重叠，虽然直观，但由于缺乏自动化支持，存在一定的主观误差。同时，定位装置的单个角度对齐并不准确，必须从多个角度检查虚拟物体与真实物体之间的空间相对位置差异^[21]，这又增加了手动配准的复杂性和配准所需时间。Berger 等^[22]对 10 例患者的穿支皮瓣与其三维模型进行手动配准，结果显示 MR 技术可以精准地定位穿支血管，但配准总耗时 173 min。

随着人工智能在医学领域的广泛应用，临床已开始尝试人工智能算法与 MR 技术结合进行应用^[23]。现有的结合研究主要集中在依托光学定位系统等辅助工具以提高手术精确度，研究者利用光学定位系统算法建立空间坐标，通过磁性定位技术识别人体表面的参考标记，实现血管丛的虚拟图像与人体的对齐^[24]。光学定位系统定位精度较高，多项研究^[25-26]报道小于 2 mm 的误差。然而，

基于光学定位系统等辅助工具的算法存在成本高、算法复杂、超出术者认知范畴等缺点,临床推广困难^[27]。本研究在HoloLens 2中开发了一种人工智能算法,利用UNETR处理背景复杂的图像分割任务的出色性能,通过结合U-Net的细节传递能力和Transformer的全局感知能力,显著提升了分割的精度与准确度。同时,摒弃外部辅助设备,通过HoloLens 2虚拟轴的指向和智能交互精确,迅速地完成PEEK材料与其三维模型多角度、多维度地对齐,进而实现穿支血管与其三维模型的重叠。配准平均时间为5 min以内,不仅提升了原有手动定位的效率,也简化了光学定位系统操作的复杂性,有效地减少了手术时间,降低了并发症。

在皮瓣手术中,精确识别及定位穿支血管是手术成功的关键因素,可以提升手术的精准度,降低手术风险和创伤^[28]。在本研究中,误差主要受以下几方面影响:1)人工智能算法误差,点配准算法的误差一般小于0.5 mm;2)二维图像制作三维模型过程中的误差,如图像分辨率、噪声及伪影等干扰因素的影响;3)定位装置的微小移动、术者的主观因素也会影响精度。本研究结果显示系统辅助定位的平均误差为1.65 mm,与Sun等^[29]报道的(1.30±0.39) mm和Tu等^[30]报道的(1.61±0.44) mm相近,手术的精确性和患者安全性均得到提高。20例穿支皮瓣均成活,未出现皮瓣坏死等并发症,本研究认为使用新技术定位穿支血管的误差在实际操作过程中并未对皮瓣的成活产生影响。同时,基于CTA数据重建的血管数量为30个,实际探查血管32个,血管识别正确率为93.75%,正确率较高,未找到的穿支血管考虑为重建时阈值选择不正确所遗漏。

在手术时间方面,系统辅助定位制取皮瓣的时间为(43.45±4.6) min,常规方法制取皮瓣的时间为(57.6±7.9) min。分析原因,笔者认为,HoloLens辅助下手术时间减少的原因主要与以下3个方面相关。1)传统的CDU定位血管方式存在不足:CDU定位穿支血管假阳性率、假阴性率较高,且定位准确性与操作者熟练程度密切相关^[31]。术中可能出现穿支血管定位不准确,甚至设计皮瓣处无血管等可能性,重新寻找穿支血管并制取皮瓣,不仅增加了手术时间,还会导致术区创伤和手术风险的提高。2)基于CTA数据的系统定位穿支血管的优势:CTA利用X射线和计算机技术生成高分辨率的血管图像和全面的血管解剖学信息,包括血管蒂的直径、长度、肌肉方向以及潜

在的皮瓣穿支。其空间分辨率高,能够探测到口径0.3 mm的穿支血管^[32]。本研究基于CTA数据,对穿支血管进行三维重建,使用HoloLens将穿支血管三维模型投放于人体,可以在术前多方位、立体观察穿支血管起源、分布和穿出点位置,针对患者个体化差异制定皮瓣制取计划,减少了因个体差异、CDU误差导致的皮瓣设计不准确,有效地减少了手术时间。3)探索新的皮瓣制取方式,提高手术效率。将传统的皮瓣制取方式由“设计-切开-寻找血管-制取皮瓣”更改为“定位血管-设计皮瓣-切开-制取皮瓣”,有效地提高了制取皮瓣效率,增加皮瓣成活率,缩短了手术时间,减少了非必要创伤。本研究结果与Masterton等^[26]使用MR实现穿支血管可视化,加速精确解剖并减少误差的结果相同。

本研究在HoloLens中开发人工智能算法,摒弃外部辅助设备,单纯使用HoloLens进行穿支血管的定位与匹配,与目前国内外其他学者使用光学定位系统辅助下的HoloLens定位穿支血管研究相比具有一定的前瞻性和先进性。在应用中发现:三维模型与人体的实际配准时间为5~10 min,虽然致使手术时间增加,并在一定程度上导致手术流程相对复杂,但实现了穿支血管三维可视化,可直观地了解穿支血管的走形、分布、穿出点的位置,利于手术前对皮瓣进行设计、术中对穿支血管及穿出点进行保护,配准后减少了实际制取皮瓣的时间,降低了皮瓣危象的可能性。基于此,笔者认为,在股前外穿支皮瓣手术中使用混合现实技术有利有弊,优点在于实现了穿支血管三维可视化,有利于术前皮瓣设计,降低了皮瓣危象可能性,并减少了实际制取皮瓣时间。但缺点在于流程相对复杂化,增加了工作量。

在CTA数据三维重建过程中,可以采取以下方法确保精确。1)高分辨率的影像数据:使用高分辨率的CTA影像数据可以提供更多的穿支血管细节信息,同时,通过合适的参数设置以获取高质量的影像,并在技术层面优化数据质量,如伪影、造影时间抓取等,从而进行更精确的分割和重建。2)使用多模态数据:除了CTA数据外,结合其他模态的影像数据,如MRI或数字血管造影等进行多模态的数据融合,可以获得更多数字信息以识别和分割穿支血管结构。3)采用先进的分割算法:使用图像分割算法,如基于深度学习的方法处理穿支血管的复杂结构和背景噪音,可以提高分割的准确性。同时,图像分割算法可以

实时显示边界对齐的指示线，帮助标注者准确定位结构的边界，其自动捕捉功能，可以根据图像特征吸附标注点或轮廓，减少标注者的手动操作，自动修正标注中的错误或不准确之处，使得标注线或轮廓更加平滑和连续。4) 手动校正和调整：在人工智能算法生成初步结果后，技术人员可以通过观察CTA、MRI、DSA等影像数据和结合临床经验，对分割结果进行手动修正和微调，保证血管结构的准确重建。5) 质量和反馈机制：通过建立临床的反馈，持续监测分割和重建过程中的准确性和稳定性，并及时与专业技术人员沟通调整，确保最终重建结果的精确性。

3.3 本研究的局限性

本研究具有以下局限性：1) 人工智能算法辅助下的PEEK材料与其三维模型的对齐是面的对齐，而无法直接达到多角度多维度对齐，仍需术者根据定位装置的角度进行微小调整，严格来说，设计的人工算法实现了半自动化。2) 黏贴式定位装置受到患者组织位移因素影响，为减少误差，需尽快对患者进行血管定位标记。3) 术中需去除定位装置以避免消毒不彻底，导致无法实现实时导航，后续仍需继续设计新型定位装置。4) 本研究目的是探讨混合现实与人工智能算法结合的可行性，存在样本量偏少的局限，并且未与彩超引导技术定位穿支血管进行效果对比。

综上所述，混合现实结合人工智能算法为股前外穿支皮瓣手术提供了更少的误差，可以减少手术时间，提高手术安全性和效率。尽管目前基于混合现实技术的手术导航系统存在不足，但仍值得深入研究。

利益冲突声明：作者声明本文无利益冲突。

【参考文献】

- [1] Kushida-Contreras BH, Manrique OJ, Gaxiola-García MA. Head and neck reconstruction of the vessel-depleted neck: a systematic review of the literature[J]. *Ann Surg Oncol*, 2021, 28(5): 2882-2895.
- [2] 梁再卿, 吴宁. 股前外侧穿支皮瓣的临床应用研究进展[J]. *中华骨与关节外科杂志*, 2019, 12(12): 1020-1024.
Liang ZQ, Wu N. Review on clinical application of anterolateral thigh perforator flap[J]. *Chin J Bone Joint Surg*, 2019, 12(12): 1020-1024.
- [3] Kozusko SD, Liu X, Riccio CA, et al. Selecting a free flap for soft tissue coverage in lower extremity reconstruction[J]. *Injury*, 2019, 50 (Suppl 5): S32-S39.
- [4] Geddes CR, Morris SF, Neligan PC. Perforator flaps: evolution, classification, and applications[J]. *Ann Plast Surg*, 2003, 50(1): 90-99.
- [5] 唐举玉, 卿黎明, 贺继强, 等. 数字化技术辅助旋股外侧动脉降支分叶穿支皮瓣设计的初步应用[J]. *中华显微外科杂志*, 2016, 39(2): 123-126.
Tang JY, Qing LM, He JQ, et al. Application of computer assisted technique to design polyfoliate perforator flappedicled on the descending branch of the circumflex femoral lateral artery[J]. *Chin J Microsurg*, 2016, 39(2): 123-126.
- [6] Zhan Y, Zhu H, Geng P, et al. Revisiting the blood supply of the rectus femoris: a case report and computed tomography angiography study[J]. *Ann Plast Surg*, 2020, 85(4): 419-423.
- [7] 吴双江, 王雷, 刘一秀, 等. CT血管成像及三维重建辅助设计与彩色多普勒超声在口腔癌术后缺损股前外侧皮瓣修复重建中的应用比较[J]. *中华整形外科杂志*, 2022, 38(10): 1102-1110.
Wu SJ, Wang L, Liu YX, et al. Comparative study on anterolateral thigh flap by three-dimensional CT angiography assisted design and color Doppler ultrasound in reconstruction after oral cancer[J]. *Chin J Plast Surg*, 2022, 38(10): 1102-1110.
- [8] Pelanis E, Kumar RP, Aghayan DL, et al. Use of mixed reality for improved spatial understanding of liver anatomy[J]. *Minim Invasive Ther Allied Technol*, 2020, 29(3): 154-160.
- [9] Pereira N, Kufeke M, Parada L, et al. Augmented reality microsurgical planning with a smartphone (ARM-PS): a dissection route map in your pocket[J]. *J Plast Reconstr Aesthet Surg*, 2021, 72(5): 759-762.
- [10] Ramalhinho J, Yoo S, Dowrick T, et al. The value of Augmented Reality in surgery—A usability study on laparoscopic liver surgery[J]. *Med Image Anal*, 2023, 90: 102943.
- [11] Eckert M, Volmerg JS, Friedrich CM. Augmented reality in medicine: systematic and bibliographic review[J]. *JM-IR Mhealth Uhealth*, 2019, 7(4): e10967.
- [12] 莫勇军, 许林, 程志琳, 等. 增强现实技术联合数字化设计在股前外侧穿支皮瓣的应用[J]. *中华显微外科杂志*, 2019, 42(2): 189-192.
Mo YJ, Xu L, Cheng ZL, et al. Application of augmented reality technology combined with digital design in

- the anterolateral thigh perforator flap[J]. *Chin J Microsurg*, 2019, 42(2): 189-192.
- [13] Pratt P, Ives M, Lawton G, et al. Through the HoloLens™ looking glass: augmented reality for extremity reconstruction surgery using 3D vascular models with perforating vessels[J]. *Eur Radiol Exp*, 2018, 2(1): 2.
- [14] Zhou Z, Yang Z, Jiang S, et al. Surgical navigation system for low-dose-rate brachytherapy based on mixed reality[J]. *IEEE Comput Graph Appl*, 2021, 41(3): 113-123.
- [15] Heinrich F, Schwenderling L, Becker M, et al. Holo-injection: augmented reality support for CT-guided spinal needle injections[J]. *Health Technol Lett*, 2019, 6(6): 165-171.
- [16] Liebmann F, Roner S, von Atzigen M, et al. Pedicle screw navigation using surface digitization on the Microsoft HoloLens[J]. *Int J Comput Assist Radiol Surg*, 2019, 14(7): 1157-1165.
- [17] Gibby JT, Swenson SA, Cvetko S, et al. Head-mounted display augmented reality to guide pedicle screw placement utilizing computed tomography[J]. *Int J Comput Assist Radiol Surg*, 2019, 14(3): 525-535.
- [18] Al Janabi HF, Aydin A, Palaneer S, et al. Effectiveness of the HoloLens mixed-reality headset in minimally invasive surgery: a simulation-based feasibility study[J]. *Surg Endosc*, 2020, 34(3): 1143-1149.
- [19] Fotouhi J, Unberath M, Song T, et al. Interactive Flying Frustums (IFFs): spatially aware surgical data visualization[J]. *Int J Comput Assist Radiol Surg*, 2019, 14(6): 913-922.
- [20] Assem Y, Mobbs RJ, Pelletier MH, et al. Radiological and clinical outcomes of novel Ti/PEEK combined spinal fusion cages: a systematic review and preclinical evaluation[J]. *Eur Spine J*, 2017, 26(3): 593-605.
- [21] Mavioso C, Araújo RJ, Oliveira HP, et al. Automatic detection of perforators for microsurgical reconstruction[J]. *Breast*, 2020, 50: 19-24.
- [22] Berger MF, Winter R, Tuca AC, et al. Workflow assessment of an augmented reality application for planning of perforator flaps in plastic reconstructive surgery: game or game changer[J]. *Digit Health*, 2023, 9: 20552076231173554.
- [23] Javidan AP, Li A, Lee MH, et al. A systematic review and bibliometric analysis of applications of artificial intelligence and machine learning in vascular surgery[J]. *Ann Vasc Surg*, 2022, 85: 395-405.
- [24] Li R, Si W, Liao X, et al. Mixed reality based respiratory liver tumor puncture navigation[J]. *Comput Vis Media*, 2019, 5: 363-374.
- [25] 林承重, 张勇, 董韶, 等. 基于混合现实的手术导航系统在颅颌面创伤骨整复中的应用研究[J]. *华西口腔医学杂志*, 2022, 40(6): 676-684.
- Lin CZ, Zhang Y, Dong S, et al. Application of mixed reality-based surgical navigation system in craniomaxillofacial trauma bone reconstruction[J]. *West China J Stomatol*, 2022, 40(6): 676-684.
- [26] Masterton G, Miller R, Patel J, et al. HoloLens in breast reconstruction: what is the future[J]. *Plast Reconstr Surg*, 2023, 151(6): 915e-917e.
- [27] Meulstee JW, Nijsink J, Schreurs R, et al. Toward holographic-guided surgery[J]. *Surg Innov*, 2019, 26(1): 86-94.
- [28] Thimmappa ND. MRA for preoperative planning and postoperative management of perforator flap surgeries: a review[J]. *J Magn Reson Imaging*, 2024, 59(3): 797-811.
- [29] 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.
- [30] Tu P, Gao Y, Lungu AJ, et al. Augmented reality based navigation for distal interlocking of intramedullary nails utilizing Microsoft HoloLens 2[J]. *Comput Biol Med*, 2021, 133: 104402.
- [31] 陆浩, 薛明宇, 强力, 等. CTA联合彩色多普勒超声技术在尺动脉腕上皮支皮瓣穿支血管定位中的临床应用[J]. *中华手外科杂志*, 2022, 38(4): 315-318.
- Lu H, Xue MY, Qiang L, et al. Clinical application of CTA combined with color Doppler ultrasound in the localization of perforating vessels of flap based on above wrist cutaneous branch of the ulnar artery[J]. *Chin J Hand Surg*, 2022, 38(4): 315-318.
- [32] Moore R, Mullner D, Nichols G, et al. Color Doppler Ultrasound versus computed tomography angiography for preoperative anterolateral thigh flap perforator imaging: a systematic review and meta-analysis[J]. *J Reconstr Microsurg*, 2022, 38(7): 563-570.