arXiv:2601.19303v1 [cs.HC] 27 Jan 2026

面向三维手术规划与可视化的协作式扩展现实原型

Shi Qiu、Ruiyang Li、Qixuan Liu、Yuqi Tong、Yue Qiu、Yinqiao Wang、Yan Li、Chi-Wing Fu、Pheng-Ann Heng 香港中文大学计算机科学与工程学系，香港中文大学医疗智能与XR研究所{shiqiu, liry,qxliu, yqtong, yqiu23, yqwang, yanli, cwfu, pheng}@cse.cuhk.edu.hk

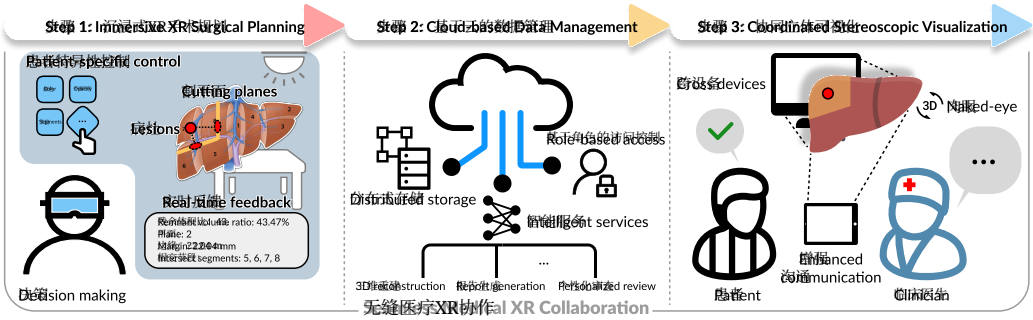

图 1：系统工作流程概览，以肝切除术手术规划为例进行说明。

摘要

我们提出了一种用于三维手术规划与可视化的协作式扩展现实（XR）原型系统。系统由三个核心模块构成：基于XR的沉浸式手术规划、基于云的数据管理，以及用于交互式可视化的协同立体三维显示器。我们介绍了整体工作流程、核心功能、实现方式和配置。通过针对肝切除术手术规划案例开展用户研究，我们展示了该原型系统的有效性，并提供了实践见解，以启发医疗XR协作的未来发展。

索引词： 扩展现实、医疗协作、三维可视化。

1 引言

医学成像技术的进步改变了医疗操作，但日常临床实践仍主要依赖二维显示器查看计算机断层扫描（CT）和MRI扫描图像。要从堆叠切片中解读复杂的解剖结构，需要丰富的专业知识并在脑中进行重建，这可能导致人们忽略对手术规划至关重要的细微空间关系。扩展现实（XR）提供了一种颇具前景的替代方案，可实现对三维医学数据的沉浸式交互探索，并支持在可视化过程中更直观地理解空间关系 [4]。然而，由于数据管线分散、互操作性有限、缺乏实时协同，以及可访问可视化方案在实践中受到限制 [3]，将XR融入实际临床工作流程仍面临挑战。大多数现有解决方案只处理工作流程中的个别环节，缺乏有效集成，无法实现无缝的XR协作。

我们提出了一种用于沉浸式 3D 手术规划与可视化的协作式 XR 原型。我们的系统由三个紧密集成的模块组成：(1) 基于 XR 的沉浸式规划环境，使临床医生能够直观地探索患者特定的三维模型；（2）一个基于云的数据管理平台，用于安全存储、同步和共享手术计划及相关数据；以及（3）协同工作的立体三维显示器，可在多台设备上提供交互式可视化，无需专用眼镜。总体而言，我们的系统支持有效的医疗协作，为临床决策提供依据，并加强临床医生与患者之间的沟通。

2 系统详情

本系统的整体工作流程（图1）始于基于扩展现实的手术规划，临床医生可在沉浸式三维环境中直观地探索患者数据。随后，已确定的手术计划及相关数据会通过云平台安全地存储和管理，从而实现无缝访问与共享。最后，通过协调一致的立体可视化，用户可在多个三维显示器上查看和交互数据，便于跨设备、跨地点开展协作审阅与讨论。

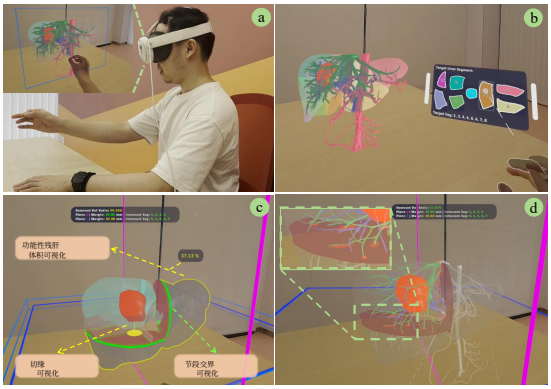

图 2：基于扩展现实的肝切除术手术规划。(a) 使用混合现实头显的设置概览。(b) 患者解剖结构的基于网格的可视化及用户界面面板。(c) 确定手术计划期间实时计算手术安全指标。(d) 血管与切除平面交叉区域的可视化。

手术规划。 我们开发了一种可在混合现实头显上运行的虚拟手术规划环境。该系统支持对三维医学数据（如计算机断层扫描和

MRI体积数据）进行基于网格的解剖结构可视化，为临床医生提供直观、细致的患者特异性解剖结构视图。我们实现了用于实时规划和模拟的徒手交互，使用户能够操控切除平面并查看预测切除指标，如图 2所示。借助混合现实设备高质量的透视和投射能力，多名用户和观察者可以在同一环境中协作与交流，从而促进高效的团队协作和及时决策。

数据管理。我们采用云平台，安全、高效地管理患者数据及相关手术计划。该平台基于 ThinkPHP 应用框架构建，并结合基于用户角色的访问控制，包含数据存储、处理和共享等关键组件，确保敏感医学数据得到安全维护、经过高效优化以提升可用性，并能由不同设备上的授权用户无缝访问。这种数据管理方式支持对手术计划进行实时协作探索，同时确保数据安全性和完整性。

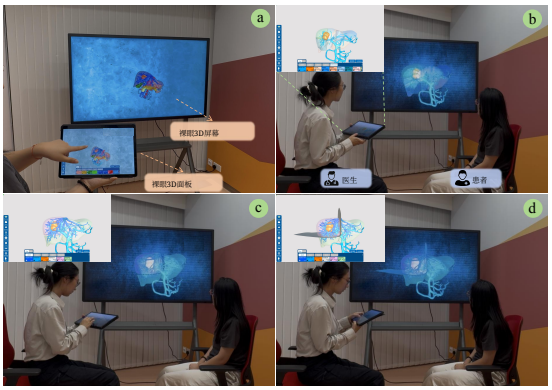

图3：裸眼光场3D显示平台。(a) 多种立体显示设备之间的协同可视化与交互。(b) 肝脏解剖结构及其八个功能分段的三维渲染。(c) 勾画计划切除体积和肝脏残余。(d) 手术切除平面的模拟。

立体可视化。我们搭建了一个裸眼光场3D显示平台，由立体显示面板和3D立式屏幕组成，如图所示。3。立体显示面板具备视点跟踪功能，可为单个观察者提供高分辨率图像和宽广的视野。立式屏幕可呈现双眼视差和运动视差，让多位观看者能够同时体验沉浸式3D可视化。通过Unity应用程序，面板与立式屏幕之间可实现同步显示和交互。该3D显示平台不仅便于临床医生协作，还能以清晰、生动的方式呈现手术计划，从而加强医患沟通。

3 用户体验

我们开展了用户体验研究，以评估所提出的协作式 XR 原型的有效性。在手术规划方面，我们还使用 3D Slicer 实现了一个桌面基线 [2], ，这是一款广受欢迎的开源图像分析和科学可视化软件包。我们共邀请了八名肝脏外科医生（$n = 8$）评估他们使用不同系统进行肝切除术手术规划的体验。如表 1所示，参与者使用我们的 XR 系统时报告的系统可用性量表（SUS）[1] 得分更高（76.25±13.43），而桌面版本为（38.44±16.90），相当于提高了 +98.36%。此外，参与者对 XR 系统整体使用体验的平均评分为 4.75±0.46（满分 5 分的

表1：沉浸式XR手术规划的用户体验研究。该研究（$n = 8$）共纳入7名男性和1名女性参与者，平均年龄为27.88岁。所有参与者均为XR经验有限的肝脏外科医生。

指标	桌面基线	沉浸式XR系统	改进
系统可用性量表 (SUS)	38.44±16.90	**76.25±13.43**	**+98.36%**

表 2：协同立体可视化平台的用户体验研究。该研究（$n = 10$）包括 5 名男性和 5 名女性参与者，平均年龄为 27.50 岁。所有参与者均为工程院校的研究生。

指标	桌面基线	仅三维面板	协同平台
系统可用性量表 (SUS)	63.60±20.70	72.20±14.50	**81.00±13.80**
用户满意度（五点李克特量表）	3.40±1.08	3.80±0.92	**4.20±0.92**

李克特量表，表明满意度较高。

对于立体可视化研究，参与者为工程学研究生（$n = 10$），且医学知识有限。在用户研究期间，一名医生演示者使用这些设备展示并讲解一例肝癌病例的三维扫描和手术规划数据。随后，参与者被要求使用三种不同设置协作式地对医学数据进行可视化和探索：桌面基线、裸眼3D面板（如图 3 所示），以及协同平台（即，将裸眼3D面板与三维屏幕结合）。结果如表 2 所示。单因素重复测量方差分析显示，SUS 存在显著差异（$F(2,18) = 4.119$，$p = 0.034$）。事后配对 t 检验进一步表明，协同平台的 SUS 显著高于桌面平台（$p = 0.036$）。结果表明，协同平台能够提供更加有效且直观的医疗协作体验。

4 结论

我们的协作式 XR 原型在临床和教育应用方面展现出巨大潜力，可在各种扩展现实设备上实现实时手术规划、多用户协作和交互式可视化。未来的改进将着重于优化用户体验、扩展设备兼容性，以及集成人工智能辅助规划工具。从长远来看，我们预计该设计能够整合先进的人工智能和扩展现实技术，提升临床协作和工作流程效率，从而造福医学界。

致谢

本研究得到中国香港特别行政区研究资助局资助（项目编号：T45-401/22-N）。

参考文献

[1] J. Brooke 等。SUS：一种快速简便的可用性量表。行业可用性评估，189 194 4 7, 1996 2 ( ): – . A. Fedorov, R. Beichel, J.

[2] Kalpathy-Cramer, J. Finet, J.-C. Fillion- Robin, S. Pujol, C. Bauer, D. Jennings, F. Fennessy, M. Sonka 等。3D Slicer：定量成像网络的图像计算平台。磁共振成像，30 9 1323 1341, 2012 2 ( ): – . Q. Liu, S. Qiu, Y. Wang, X. Wu, K. Chok, C.-W. Fu 和 P.-A. Heng。在扩展现实中通过多模态交互实现医学体数据的协同二维—三维可视化。*IEEE VIS*，2025 1 。Y. Qiu, Y. Tong, Y. Zhang, Q.

[3] Liu, J. Pei, S. Qiu, P.-A. Heng 和 C.-W. Fu。CVHSlicer 2.0：在扩展现实环境中对中国可视化人体数据进行沉浸式交互可视化。载于*IEEEVRW*，2025。1

[4]