

## • 实验研究 Experimental research •

基于 Vuforia 的卵圆孔穿刺增强现实导航系统  
可行性研究

雷宝铭, 张东友

**【摘要】目的** 基于 Vuforia 开发一套颅底卵圆孔增强现实穿刺导航系统, 初步探索该系统的可行性。**方法** 获取一组薄层头颅 CT 图像数据, 将图像以 DICOM 格式导入 3D Slicer5.2.1 软件中分割出皮肤、骨骼等三维可视化模型, 并设计穿刺路径, 建立穿刺针模型。将分割好的模型导入 Unity3D 软件中进行增强现实导航功能以及人机交互开发。再将三维重建的皮肤模型导入 Vuforia 三维模型目标构建工具中转换为 Model Target。最后使用 3D 打印机打印皮肤轮廓及颅骨模型制作穿刺模具, 由 4 名有卵圆孔穿刺经验的医生和 10 名无经验的医生分别独立进行 5 次 AR 引导穿刺, 统计两组医生穿刺花费的时间及 5 min 内穿刺成功率。**结果** 该穿刺导航系统成功识别了 3D 打印模具, 并将虚拟模型精准稳定地融合在模具表面, 医生可以通过屏幕直接观察到颅内骨骼、血管等解剖结构以及穿刺针的位置和角度。人机交互功能可以改变虚拟三维结构的透明度、颜色等属性。两组医生穿刺花费的时间为  $(3.52 \pm 2.78)$  min, 5 min 穿刺成功率为 86%; 其中有经验组穿刺时间  $(3.27 \pm 1.98)$  min, 5 min 成功率为 95%; 无经验组穿刺时间  $(3.77 \pm 2.57)$  min, 5 min 穿刺成功率为 82%。**结论** 基于 Vuforia 开发的穿刺导航系统可以实现颅底卵圆孔的定位及穿刺导航, 借助该系统医生可以更快、更直观地学习和实施颅底卵圆孔穿刺。

**【关键词】** Vuforia; 增强现实; 卵圆孔穿刺; 3D 打印

中图分类号: R651.3 文献标志码: A 文章编号: 1008-794X(2023)-10-0980-05

**The augmented reality navigation system for foramen ovale puncture based on Vuforia: a feasibility study** LEI Baoming, ZHANG Dongyou. Department of Interventional Radiology, Wuhan Municipal No.1 Hospital, Wuhan, Hubei Province 430022, China

Corresponding author: ZHANG Dongyou, E-mail: dyzhang1178@126.com

**【Abstract】Objective** To develop a Vuforia-based augmented reality puncture navigation system used for skull foramen ovale puncture, and to make a preliminary exploration of the feasibility of the system. **Methods** A set of thin-slice head CT image data was obtained, which was input into 3D Slicer5.2.1 software in the DICOM format to segment the three-dimensional visualization models of skin and bones, to design the puncture path, and to establish the puncture needle model. The segmented model was input into Unity3D software for augmented reality navigation function and human-computer interaction development. Then the 3D reconstructed skin model was input into the Vuforia 3D model target construction tool and it was converted into Model Target. Finally, a 3D printer was used to print the skin contour and skull model to make a puncture mold. Four doctors with experience in foramen ovale puncture and 10 inexperienced doctors independently performed AR-guided puncture for 5 times. The time spent by two groups of doctors on puncturing and the success rate of puncture within 5 minutes were calculated. **Results** The puncture navigation system successfully recognized the 3D printed mold and fused the virtual model onto the surface of the mold accurately and stably. Doctors could directly observe the anatomical structures such as intracranial bones and blood vessels as well as the position and angle of the puncture needle on the screen. The human-computer interaction function could change the transparency, color and other attributes of the virtual three-dimensional structure. The time spent by the doctors of two groups on puncturing was  $(3.52 \pm 2.78)$  min, and the success rate of puncture within 5 minutes was 86%, the doctors of two groups which in the experienced

doctor group were (3.27±1.98) min and 95% respectively, in the inexperienced doctor group were (3.77±2.53) min and 82% respectively. **Conclusion** The Vuforia-based augmented reality puncture navigation system can realize the positioning and puncture guidance of the skull base foramen ovale. With the help of this system, doctors can learn and implement the skull base foramen ovale puncture more quickly and intuitively. (J Intervent Radiol, 2023, 32: 980-984)

**【Key words】** Vuforia; augmented reality; foramen ovale puncture; 3D printing

三叉神经痛(trigeminal neuralgia,TN)又称为痛性痉挛,是一种比较常见的头面部疼痛,年发生率为 4.3/10 万~27/10 万,且女性发病率较高<sup>[1]</sup>。TN 首选药物治疗,外科疗法见效迅速,但创伤大、术后并发症多、复发率及致死率均较高<sup>[2]</sup>。对于不耐受外科手术或术后再发的 TN 患者,常采用射频消融(radio frequency ablation,RFA)、经皮微球囊压迫术(percutaneous microballoon compression,PMC)等微创介入疗法<sup>[3]</sup>。在微创介入治疗过程中,最关键的就是精准定位穿刺卵圆孔以达到半月神经节<sup>[4]</sup>。常见的穿刺定位通常在 X 线辅助引导下进行,此外还有神经导航<sup>[5]</sup>、3D 打印穿刺导板<sup>[6]</sup>、混合现实(mixed reality,MR)<sup>[7]</sup>等辅助穿刺技术,本研究旨在探索一种创新性增强现实穿刺导航方法的可行性。

1 材料与方法

1.1 一般资料

实验设计:个体样本重复实验。

1.1.1 实验对象 经 PACS 系统获取 DICOM 格式头颈 CTA 扫描图像,脱敏处理后作为建模对象。

1.1.2 设备及软件 本研究所用主要设备及软件见表 1。

1.2 方法

1.2.1 CT 扫描方法 志愿者仰卧于检查床上,头部固定,听眈线垂直于床面。扫描参数见表 2。扫描完成后通过 PACS 系统导出 DICOM 格式图像。

1.2.2 医学影像三维重建及穿刺模拟 将 CT 扫描重建的薄层数据导入 3D Slicer(v5.2.1)软件 Segment Editor 模块进行三维重建,使用平扫、动脉期及静脉期数据分别重建皮肤、颅骨、头颈部动脉、头颈部静脉等解剖结构。测量得到卵圆孔尺寸 5.84 mm×3.30 mm。

使用 Curve Maker 模块设计穿刺针入路并建立穿刺针模型。确定进针点、靶点并测距:使用测量工具选取口角外侧 25 mm 处为进针点(A 点)<sup>[8]</sup>以及卵圆孔(P 点)两点连线,测得两点距离约为 86 mm,再向外侧延伸至 115 mm 创建穿刺针模型。外耳道前 30 mm(B 点)、瞳孔(C 点)两点分别为穿刺针尖在体表正侧位投影位置,见图 1。

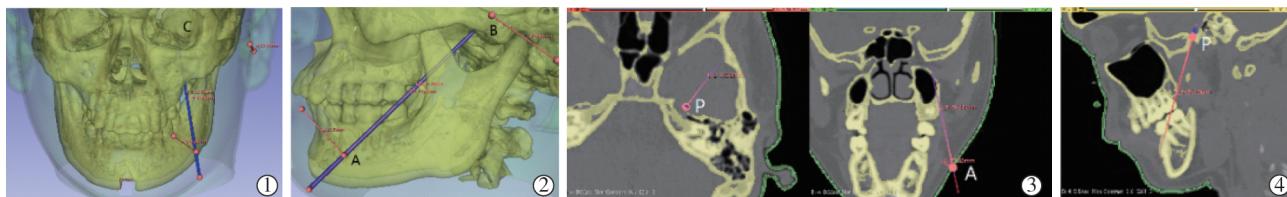
将分割好的三维可视化颅底结构模型以及穿刺针模型(见图 2)导出为标准 STL(stereolithography)格式,由于标准 STL 格式模型没有材质信息,还要将 STL 格式模型导入 Blender 3.4 软件中进行优化和贴图上色导出为 FBX(filmbox)格式。

表 1 主要应用的软硬件

主要设备及软件	型号及版本	来源
CT 扫描仪	SOMATOMDEFINITION FLASH 双源 CT	西门子
医学影像建模软件	3DSlicer5.2.1	National Institutes of Health
三维建模软件	Blender3.4	Blender 基金会
增强现实功能实现	Vuforia Engine10.4	PTC
三维目标生成器	Vuforia Model Target Generator	PTC
3D 打印机	极光尔沃 A5S	极光尔沃
人机交互开发及软件封装	Unity 3D 2021.3.20f1c1	Unity
PC 电脑	Intel i7 12700KF 处理器;32G 内存;AMDRX6700XT 显卡	自行组装
测试平台	华硕 ROG 幻 X 笔记本电脑 Intel I5 12500H 处理器;16G 内存,Intel Inis(R) Xe 核心显卡,外接 USB 单摄影机	华硕

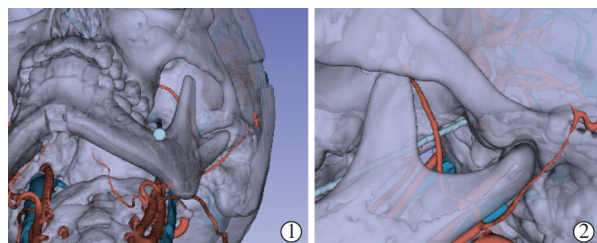
表 2 CTA 扫描参数

KV	MA	扫描层厚	重建层厚	FOV	图像矩阵
120	400	5 mm	0.625 mm	20 cm	512×512
扫描螺距	对比剂	对比剂流速	对比剂总量		
0.984	350 mgI/mL 碘海醇	5 mL/s	80 mL		



口角外侧 25 mm 处为进针点(A 点)以及卵圆孔(P 点)两点连线,测得两点距离约为 86 mm,再向外侧延伸至 115 mm 创建穿刺针模型。外耳道前 30 mm(B 点)、瞳孔(C 点)两点分别为穿刺针尖在体表正侧位投影位置

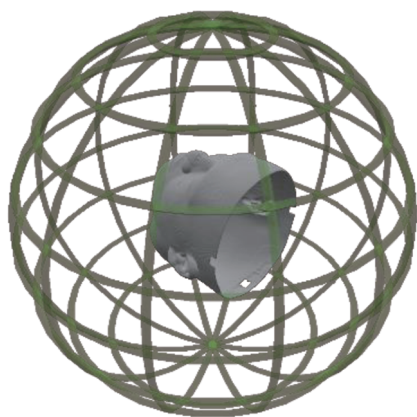
图 1 模拟穿刺路径规划及穿刺针模型建立



利用 CTA 图像进行三维可视化建模,可以清晰观察到卵圆孔穿刺路径与周围解剖结构的关系,优化穿刺路径,避免穿刺过程中损伤相关血管,增加穿刺安全性

图 2 穿刺针及颅底卵圆孔解剖结构三维可视化

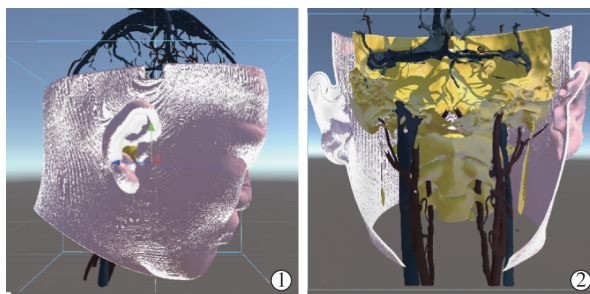
1.2.3 创建 Model Target 基于 Vuforia 的增强现实应用可以通过摄像头识别三维 Model Target 轮廓进行定位,本研究使用 PTC 官方提供的三维目标生成器(vuforia model target generator, MTG)创建 Model Target;将前文分割的皮肤模型导入 MTG 软件中,设置模型尺寸、颜色、识别范围等属性后,软件将自动创建 Model Target,图 3 为创建 Model Target 的过程。



绿色球面网格线表示摄像头可识别皮肤轮廓模型的范围,摄像头可以从任意角度识别模型轮廓,继而进行自动配准和导航

图 3 使用 MTG 工具创建的 Model Target 以及识别角度

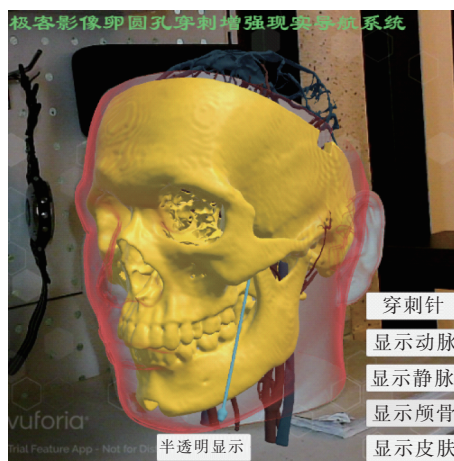
1.2.4 虚拟现实目标配准 将 Model Target 和 FBX 格式三维模型导入 Unity 3D 中,同时导入 Vuforia Engine 增强现实开发模块。在 Unity 虚拟视窗中手动将 FBX 格式皮肤模型与 Model Target 进行配准,见图 4。



①3D 景深视角下配准,白色轮廓为 Model Target,红色为虚拟三维模型,手动调整使其尽可能重合;②2D 视角下配准

图 4 Unity 3D 软件中的可视化配准过程

1.2.5 交互系统开发 使用 Unity 3D 引擎开发系统交互功能,主要功能有解剖结构的显示与隐藏,穿刺针的显示隐藏等功能。可以通过鼠标点击或手指触控进行交互,见图 5。



目前实现的功能主要有穿刺针及解剖结构的显示隐藏以及透明度调节

图 5 交互界面截图

1.2.6 3D 打印穿刺模拟器 将上文中 3D Slicer 软件分割建模的皮肤及颅骨模型以 STL 格式保存,导入 3D 打印切片软件自动生成支撑,切片后将 3D 打印机专用 G 代码(G-code)文件拷贝至极光尔沃 A5S 打印机进行打印,打印材料为直径为 1.75 mm 的聚乳酸(poly lactic acid, PLA)材料,打印参数见表 3。打印完成后,使用液态硅胶灌注皮肤与颅骨之间的空

表 3 3D 打印机设置参数

打印温度	打印速度	单层厚度	顶部/底部 厚度	壁厚	水平拓展
200 ℃	40 mm/s	0.3 mm	0.8 mm	1.2 mm	0

隙,液态硅胶固化后可模拟人体肌肉组织。

1.2.7 增强现实功能测试 使用华硕 ROG 幻 X 笔记本电脑 (Intel I5 12500H 处理器;16 G 内存, Intel Inis(R)Xe 核心显卡,外接 USB 单摄像头)进行测试。

操作步骤:①将 3D 打印穿刺模拟器平放于操作台上,要求周围环境无遮挡,光照良好;②打开导航软件,使用三脚架固定摄像头对准穿刺模拟器;③当虚拟 3D 模型出现在电脑屏幕时,缓慢移动摄像头,分别对准模拟器正位和侧位观察虚拟模型与穿刺模拟器的配准情况;④自动配准后,测试交互功能,依次点击(手指触控)各个虚拟按钮,检查按钮功能是否正常;⑤移动摄像头确定卵圆孔最佳观察角度和穿刺角度。

1.2.8 卵圆孔穿刺实验 由 10 名没有卵圆孔穿刺经验的医生和 4 名有卵圆孔穿刺经验的医生借助该导航系统分别随机独立进行 5 次模拟穿刺,操作过程见图 6,记录穿刺成功花费的时间以及 5 min 内穿刺成功的次数。使用 SPSS 23 软件进行统计。

## 2 结果

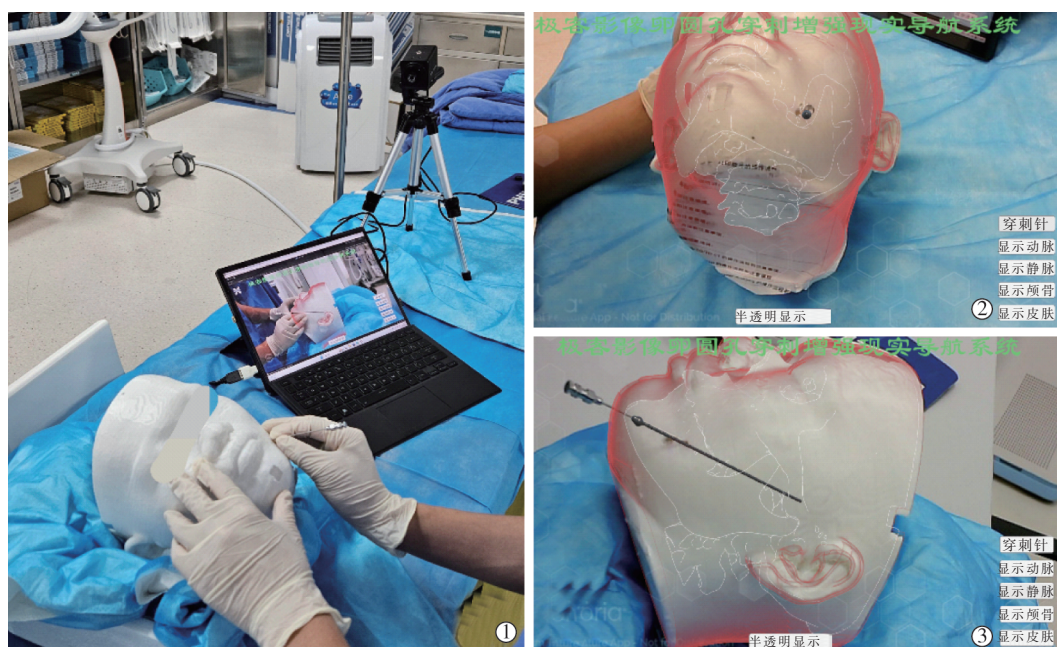
基于 Vuforia 开发的增强现实导航系统成功实现了颅底卵圆孔增强现实显示功能。虚拟 3D 模型与现实世界中的 3D 打印穿刺模拟器贴合精度较高(误差小于 3 mm);可以清晰观察到颅底解剖结构以及穿刺针位置、角度和深度;软件交互功能正常,可以改变皮肤、颅骨等结构的透明度或使其隐藏,满足了模拟穿刺导航需求。

两组医生借助增强现实导航软件穿刺花费的时间为 $(3.52\pm 2.78)$  min,5 min 穿刺成功率为 86%;其中有经验组穿刺时间 $(3.27\pm 1.98)$  min,5 min 成功率为 95%;无经验组穿刺时间 $(3.77\pm 2.57)$  min,5 min 穿刺成功率为 82%。两组穿刺时间对比统计见图 7。

## 3 讨论

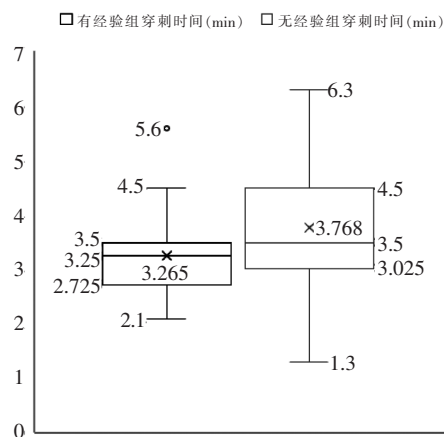
PMC 是 1983 年由 Mullan 等<sup>[9]</sup>提出的一种治疗 TN 的手术方式,由于其操作简单、手术时间短、成本低、患者耐受好,且安全性高,受到越来越多的关注<sup>[10]</sup>。但是由于卵圆孔解剖复杂且个体差异较大,卵圆孔穿刺要求术者必须具有良好的穿刺技术,并熟练掌握颅底海绵窦区的解剖知识<sup>[11]</sup>。

研究表明,X 线引导下卵圆孔穿刺精确度可靠,安全性高,疗效显著<sup>[12]</sup>,但是在诊疗过程中 X 线对



①测试电脑打开导航软件,摄像头分别从正位和侧位聚焦 3D 打印模型,触控交互系统调整虚拟穿刺针和解剖结构属性;②正位确定穿刺针进针点,穿刺针尾部与虚拟穿刺针位置重合;③侧位确定进针方向和深度,穿刺针角度和长度与虚拟穿刺针重合一致

图 6 增强现实导航穿刺操作过程



有经验组平均穿刺时间为 3.265 min, 最长时间为 5.6 min, 最短时间 2.1 min, 中位数时间 3.25 min; 无经验组平均穿刺时间为 3.768 min, 最长时间为 6.3 min, 最短时间 1.3 min, 中位数时间 3.5 min

图 7 两组穿刺时间对比

人体的伤害是不可忽视的。神经导航和 3D 打印导板辅助穿刺可以显著缩短穿刺时间, 有较高的精确度, 并且安全无辐射<sup>[5-6]</sup>, 但其缺点是神经导航设备昂贵, 基层医院普遍没有配置。混合现实导航辅助穿刺是近年出现的新技术之一, 术者通过佩戴 MR 眼镜穿刺, 可以做到模拟实时引导穿刺, 缩短穿刺时间, 穿刺成功率达到 90.6%<sup>[13]</sup>, 并且混合现实技术可以降低图像引导治疗 (image-guided surgery, IGS) 过程中的注意力转移问题<sup>[14]</sup>, 但是混合现实技术必须要佩戴专用 MR 眼镜, 如微软 HoloLens 等, 术者佩戴过程中可能会有不适感, 甚至会产生眩晕感。

本文论述的增强现实卵圆孔穿刺导航方法基于 Vuforia Model Target 开发, 调用系统摄像机即可自动识别三维对象, 并且自动进行配准, 无需在体表粘贴识别标记物<sup>[15]</sup>, 也无需手动校准, 缩短了术中操作时间, 减少了人工操作误差。该技术辅助模拟穿刺在 5 min 内的成功率达到了 86%, 无卵圆孔穿刺经验的医生进行首次模拟穿刺时效率也接近有经验的医生, 说明该导航方法可以帮助没有经验的医生快速掌握卵圆孔穿刺技术。此外, 该方法只需患者术前进行 1 次 CT 扫描, 术中无需 X 线引导, 减少了患者和术者在穿刺过程中的辐射暴露。Vuforia 兼容 Windows、Android、IOS 等各大操作系统以及微软 HoloLens 眼镜等混合现实设备, 具有很高的通用性。

本研究只使用 3D 打印的模具进行了穿刺实验验证可行性, 没有开展临床人体试验, 所以该技术能否运用于临床手术尚需进一步研究; 只在单样本上进行重复实验, 未能验证不同卵圆孔解剖结构下的穿刺精确度, 有待在后续的研究中扩大研究样本进行验证。

总而言之, 基于 Vuforia 可以实现颅底卵圆孔增强现实导航穿刺, 无需 X 线引导, 在该技术实时可视化引导下可以显著缩短穿刺时间, 可以帮助没有经验的医生直观快速地掌握卵圆孔穿刺技术, 是一项应用潜力巨大的技术。

#### [参考文献]

- [1] Maarbjerg S, di Stefano G, Bendtsen L, et al. Trigeminal neuralgia: diagnosis and treatment[J]. Cephalalgia, 2017, 37: 648-657.
- [2] 中华医学会神经外科学分会功能神经外科学组, 中国医师协会神经外科医师分会功能神经外科专家委员会, 上海交通大学颅神经疾病诊治中心. 三叉神经痛诊疗中国专家共识[J]. 中华外科杂志, 2015, 53:657-664.
- [3] 殷世武, 李茂全. 微创介入治疗三叉神经痛临床操作指南 (第 1 版)[J]. 中国介入影像与治疗学, 2020, 17:385-388.
- [4] Pan XQ, Wang R, Zhang YX, et al. Research progress of percutaneous skull base foramen ovale semilunar ganglion puncture guidance technique for trigeminal neuralgia[J]. J Clin Neurosurg, 2022, 19: 236-240.
- [5] 荣道建, 张海波, 姜雪, 等. 神经导航下经皮选择性半月神经节射频热凝治疗三叉神经痛[J]. 中国疼痛医学杂志, 2020, 26: 612-615.
- [6] 顾铁保, 张泽锋, 王彭. 3D 技术打印个体化手术导航计划系统治疗原发性三叉神经痛[J]. 中国医疗设备, 2015, 30:22-25.
- [7] 周亮, 白书平, 刘洪玉, 等. 混合现实技术辅助半月神经节射频治疗原发性三叉神经痛[J]. 中国疼痛医学杂志, 2020, 26: 859-862.
- [8] 王衍, 陈玲, 任国山, 等. 颅底卵圆孔穿刺路径三维可视化数字模型构建[J]. 中国组织工程研究, 2015, 19:691-696.
- [9] Mullan S, Lichtor T. Percutaneous microcompression of the trigeminal ganglion for trigeminal neuralgia[J]. J Neurosurg, 1983, 59: 1007-1012.
- [10] Li MW, Jiang XF, Niu CS. Efficacy of and risk factors for percutaneous balloon compression for trigeminal neuralgia in elderly patients[J]. Br J Neurosurg, 2021, 35: 280-284.
- [11] 靳子娟, 王晶晶, 李云, 等. 经皮穿刺微球囊压迫术相关的解剖研究及其临床意义[J]. 中国疼痛医学杂志, 2023, 29:20-23.
- [12] 闫如虎, 张万高, 陈大庆, 等. X 线引导下经卵圆孔内侧壁进针精准射频消融治疗原发性三叉神经痛[J]. 介入放射学杂志, 2017, 26:1139-1142.
- [13] Rau A, Roelz R, Urbach H, et al. Application of augmented reality in percutaneous procedures - rhizotomy of the gasserian ganglion[J]. Oper Neurosurg(Hagerstown), 2021, 21: 160-164.
- [14] Leger E, Drouin S, Collins DL, et al. Quantifying attention shifts in augmented reality image-guided neurosurgery[J]. Healthc Technol Lett, 2017, 4: 188-192.
- [15] Yavas G, Caliskan KE, Cagli MS. Three - dimensional - printed marker-based augmented reality neuronavigation: a new neuro-navigation technique[J]. Neurosurg Focus, 2021, 51: E20.

(收稿日期:2023-04-10)

(本文编辑:茹实)