·协和麻醉毕业后教育探索专栏·

3D打印结合混合现实技术在超声引导下椎管内穿刺教学中的应用研究

袁青　夏迪　崔旭蕾　谭刚
中国医学科学院　北京协和医学院　北京协和医院麻醉科，北京　100730
通信作者：崔旭蕾，Email：cuixulei10685@pumch.cn

【摘要】 目的　研究3D打印与MR技术在超声引导下脊柱侧弯椎管穿刺教学中的应用效果，旨在为提高该领域的教学效果提供新思路。**方法**　在北京协和医院麻醉科选择没有脊柱超声相关经验的麻醉医师20人，于2024年3月接受超声引导下椎管内穿刺的培训。这些医师被分为两组：MR眼镜+3D打印组和3D打印组，每组各10名学员。在MR眼镜+3D打印组中，学员首先佩戴HoloLens 2眼镜学习脊柱模型，随后在3D打印的脊柱实体模型上进行超声引导下椎管内穿刺的实践。而3D打印组的学员则直接在3D打印的脊柱实体模型上进行超声引导下椎管内穿刺的实践。教学效果通过客观穿刺指标（包括穿刺成功率和穿刺时间）及问卷调查方法进行评价。数据采用SPSS 27.0软件进行独立样本t检验和卡方检验分析。**结果**　MR眼镜+3D打印组的穿刺时间[（165.90 ± 69.91）s]相较于3D打印组[（239.30 ± 80.30）s]更短（t=2.18，P=0.043）。MR眼镜+3D打印组的穿刺成功率为90.00%（9/10），而3D打印组的穿刺成功率为80.00%（8/10），两组之间的差异没有统计学意义（P>0.999）。在培训的满意度和推荐度方面，MR眼镜+3D打印组的学员分别为（4.70 ± 0.48）和（4.80 ± 0.42），而3D打印组的学员则分别为（4.80 ± 0.42）和（4.90 ± 0.32）。经统计检验，两组在满意度上的差异无统计学意义（t=0.49，P=0.628），在推荐度上的差异也无统计学意义（t=0.60，P=0.556）。**结论**　3D打印与MR技术相结合，可以为初学者提供安全、可重复训练的高仿真超声引导下椎管内穿刺培训系统。该系统能够提升学员对超声引导下椎管内穿刺技术的信心，并增强培训的趣味性，提高培训效率。在脊柱超声及超声引导下椎管内穿刺技术的培训方面，这一结合展示出了明显的优势与潜力。

【关键词】 3D打印；　混合现实；　椎管内穿刺；　超声引导；　医学教育
【中图分类号】 R614.4
基金项目：北京协和医学院研究生教学改革项目（2024yjsjg015）；国家高水平医院临床研究基金（2022-PUMCH-B-007）
DOI: 10.3760/cma.j.cn116021-20240401-01916

Study on the application of 3D printing and mixed reality technology in teaching ultrasound-guided spinal puncture

Yuan Qing, Xia Di, Cui Xulei, Tan Gang
Department of Anesthesiology, Peking Union Medical College Hospital, Chinese Academy of Medical Sciences & Peking Union Medical College, Beijing 100730, China
Corresponding author: Cui Xulei, Email: cuixulei10685@pumch.cn

【Abstract】 Objective　To evaluate the effects of 3D printing and mixed reality (MR) in teaching ultrasound-guided spinal puncture for scoliosis and to provide new approaches for enhancing educational outcomes in this field. **Methods**　Twenty anesthesiologists with no experience of spine ultrasound were selected from the Department of Anesthesiology at Peking Union Medical College Hospital and received training in ultrasound-guided spinal puncture in March 2024. They were assigned to the MR glasses+3D printing group or 3D printing group, with 10 participants in each group. The trainees in the MR glasses+3D printing group observed the spine model with the HoloLens 2 glasses and then conducted ultrasound-guided spinal puncture on the 3D-printed spine model. The trainees in the 3D printing group directly conducted ultrasound-guided spinal puncture on the 3D-printed spine model. The teaching effects were evaluated with

objective puncture indicators (success rate and puncture time) and questionnaire survey. Data were analyzed using the independent samples *t*-test or chi-square test in SPSS 27.0. **Results** The puncture time was shorter in the MR glasses+3D printing group compared with the 3D printing group [(165.90 ± 69.91) s vs. (239.30 ± 80.30) s, t=2.18, P=0.043]. The success rate of spinal puncture was 90.00% (9/10) in the MR glasses+3D printing group and 80.00% (8/10) in the 3D printing group, with no statistically significant difference (P>0.999). The satisfaction [(4.70 ± 0.48) vs. (4.80 ± 0.42), t=0.49, P=0.628] and recommendation [(4.80 ± 0.42) vs. (4.90 ± 0.32), t=0.60, P=0.556] of the training method showed insignificant differences between the MR glasses+3D printing group and the 3D printing group. **Conclusions** The combination of 3D printing with MR technology can provide trainees with a safe and repeatable high-fidelity simulation training system for ultrasound-guided spinal puncture. The system can improve the confidence and interest of trainees in ultrasound-guided spinal puncture techniques and enhance training efficiency. This combination demonstrates advantages and potential in training for spinal ultrasound and ultrasound-guided spinal puncture.

【**Key words**】 3D printing; Mixed reality; Spinal puncture; Ultrasound guidance; Medical education

Fund program: Peking Union Medical College Graduate Education Innovation Fund (2024yjsjg015); National High-Level Hospital Clinical Research Fund (2022-PUMCH-B-007)

DOI: 10.3760/cma.j.cn116021-20240401-01916

传统的椎管内穿刺一般是通过解剖标志和徒手定位来确定穿刺进针点，穿刺过程全程依靠软组织及韧带的手感来判断是否到达硬膜外间隙。大部分患者可通过这一方法成功实现穿刺及椎管内麻醉，但对于肥胖、脊柱侧弯、孕妇及老年人等体表定位困难或存在解剖变异的患者而言，徒手定位和盲法穿刺往往无法成功实施椎管内穿刺。超声作为麻醉医师的“第三只眼睛”，可以获取很多与椎管内穿刺相关的重要信息，包括定位中线和腰椎穿刺节段、预测进针角度及测量硬膜外腔深度。研究证实，穿刺前进行超声预扫查可以减少穿刺次数、降低椎管内穿刺相关并发症的发生率[1]。因此，超声引导下椎管内穿刺对于麻醉医师而言是一项非常有用的必备技能。然而，由于脊柱结构的复杂性，掌握超声引导下椎管内穿刺的相关技能确实比较困难。

在超声引导下椎管内穿刺的教学中，虚拟脊柱模型能够提高学生对于脊柱超声知识的掌握程度[2]。然而，常规的虚拟脊柱模型无法模拟脊柱侧弯等复杂病例，而这类复杂病例的椎管内穿刺往往更加需要超声辅助。3D 打印技术能够根据实际需求制作出脊柱侧弯患者的脊柱实体模型。目前，已有众多研究成功地将 3D 打印模型应用于解剖学与手术相关的教学之中[3-5]。混合现实（mixed reality，MR）作为一项前景广阔的技术，融合了虚拟现实与增强现实的元素，使数字信息与物理环境得以集成，为培训者提供了更为身临其境的逼真体验，从而有效缩小了理论与实践之间的鸿沟[6]。本研究借助 3D 打印技术和 MR 技术，构建了针对脊柱侧弯患者的椎管内穿刺模型，并将其应用于超声引导下椎管内穿刺的教学中，旨在提升学员的学习体验和学习效率。

1 对象和方法

1.1 研究对象

在北京协和医院麻醉科选择没有脊柱超声相关经验的 20 名麻醉医师作为研究对象，他们于 2024 年 3 月接受了超声引导下椎管内穿刺的培训，并签署知情同意书。学员被分为两组：MR 眼镜+3D 打印组和 3D 打印组，每组各 10 名学员。分组依据是参与本研究的时间顺序，具体而言，在培训第一天参与本研究的麻醉医师被分配至 MR 眼镜+3D 打印组，而之后参与的医师则被分配至 3D 打印组。

1.2 研究方法

1.2.1 教学模型的构建

1.2.1.1 利用 3D 打印技术构建超声引导下椎管内穿刺实体模型

采集 1 例脊柱侧弯患者的脊柱高分辨率 CT 扫描图像，经三维重建和图像处理后，获得脊柱的三维重建模型。该三维模型包含了患者脊柱解剖结构的精确信息，这是对患者实际脊柱结构进行高保真模拟的基础，从而为后续步骤提供关键支持（图 1）。三维重建的脊柱模型涵盖了从胸椎到骶骨的脊柱部分，但为了确保与脊柱穿刺培训的相关性，3D 打印的范围仅限于 T12 至 S1 的椎骨。

在获取数字模型的基础上，使用选择性激光烧结技术（selective laser melting，SLM）高精度地三维打印出脊柱的实体模型（图 2）。SLM 是一种以精度

而著称的3D打印技术，它通过使用光敏树脂和激光逐层选择性固化树脂层，以1∶1的比例生成与脊柱侧弯模型极为相似的高精度模型，且重建误差范围小于0.02 mm[7]。之后，为了模拟椎管内穿刺的真实体验，采用明胶浇筑法在脊柱模型周围模拟软组织。由于明胶的触感和穿刺体验接近人体皮肤和肌肉组织，且其超声透声性与脊柱3D打印模型有明显区别。这使得明胶模型的超声成像效果与真实脊柱的成像效果非常接近，从而大大提高了穿刺过程中的仿真度和真实性。

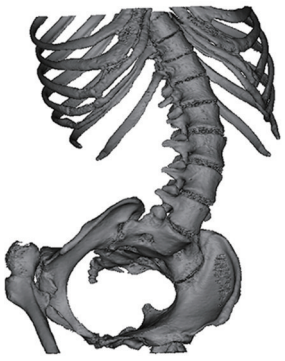


图1　脊柱侧弯患者的脊柱三维重建影像



图2　3D打印的脊柱侧弯模型

1.2.1.2　将数字脊柱模型导入HoloLens 2构建虚拟脊柱模型

本研究中超声引导下椎管内穿刺模拟教学的一个关键组成部分就是HoloLens 2的MR技术的应用。HoloLens 2是一种MR头戴式显示设备，它采用了轻量化、舒适的设计，并配备了更大的视场和更高的分辨率，使学员能够更真实地与虚拟世界进行互动。该设备采用了先进的深度感知技术，能够实时追踪手势和眼动，以及环境中的物体和表面。这使得学员能够通过手势和语音命令与虚拟对象进行交互，并将虚拟内容与现实世界进行融合。

具体而言，通过集成开发环境与Unity引擎相结合的方式，实现了将三维脊柱畸形模型纳入HoloLens 2眼镜中的功能。学员通过佩戴HoloLens 2，可以学习高度逼真的脊柱侧弯患者的脊柱模型，能够360度围绕脊柱模型进行观察，并且可以根据需要旋转、移动、放大或缩小脊柱模型，从而帮助学员充分了解其解剖结构。

1.2.2　教学方法

两组学员均先接受30 min的脊柱超声相关知识的视频教学（其中包括正常脊柱的二维及三维解剖结构教学），并在真人志愿者身上实践脊柱超声扫查，分别获取棘突水平、椎间隙水平的横扫切面，以及椎板水平、关节突水平、横突水平的纵扫切面。

MR眼镜+3D打印组的学员先佩戴HoloLens 2眼镜学习1例脊柱侧弯患者的脊柱模型，深入了解患者的脊柱结构，并提前规划易于椎管内穿刺的节段和角度（图3）。学习结束后，学员在3D打印的脊柱实体模型上实践超声引导下椎管内穿刺，选择合适的脊柱节段，获取相应节段的椎间隙横扫切面，采用平面外进针法进行超声引导下的椎管内穿刺。

相比之下，3D打印组的学员没有佩戴HoloLens 2眼镜提前学习脊柱侧弯患者的脊柱结构，也没有使用患者相关影像学资料进行预习，而是直接使用3D打印的脊柱实体模型进行超声引导下椎管内穿刺的实践（图4）。



图3　学员佩戴HoloLens 2眼镜学习脊柱结构



图4　学员使用3D打印模型实践超声引导下椎管内穿刺

1.2.3　评估指标

客观穿刺指标包括学员的穿刺时间和穿刺成功率。穿刺时间的定义为从超声探头接触明胶模型至穿刺针到达椎管内所需的时间，如果穿刺时间大于5 min则认为穿刺失败。

在学员完成超声引导下椎管内穿刺之后，需填写对教学方法的意见反馈。问卷采用Likert 5点评分法，调查的内容包括：对本次培训的满意度，是否

会将这种培训方式推荐给他人，对MR眼镜的学习体验评价（包括学习趣味性、真实性、使用便捷性及是否可以提升培训效果），对3D打印脊柱模型的学习体验评价（包括学习趣味性、真实性、使用便捷性及是否提升培训效果）。

1.3 统计学方法

数据采用SPSS 27.0软件进行统计分析。计量资料用（均数 ± 标准差）表示，验证正态分布和方差齐性后，组间比较采用独立样本 t 检验；计数资料以率（%）表示，组间比较采用Fisher确切概率法，检验水准双侧 α=0.05。

本研究样本量基于比较两组穿刺成功时间进行计算，计算中采用双侧 α 为0.05。假设3D打印组穿刺时间平均为4 min（240 s），标准差为1 min（60 s），并假设MR眼镜+3D打印组能将该时间缩短至2 min 30 s（即150 s）。在此假设下，每组10人（共计20人）可提供88.70%的统计学把握度，以探测组间时间差异是否有统计学意义。

2 结果

2.1 两组学员的一般资料

两组学员的一般资料，包括年龄、性别比例和工作年限，经过比较后发现，组间差异无统计学意义（P>0.05），因此具有可比性（表1）。

表1 两组学员的一般资料

组别	年龄 [($\bar{x}\pm s$)，岁]	性别比例（男/女）	工作年限 [($\bar{x}\pm s$)，年]
MR眼镜+3D打印组	30.80 ± 3.71	8/2	4.60 ± 2.50
3D打印组	28.40 ± 3.89	8/2	4.50 ± 2.22
t值	1.41	–	0.09
P值	0.175	1.000	0.926

2.2 两组学员穿刺时间与穿刺成功率的比较

MR眼镜+3D打印组的穿刺时间比3D打印组更短（–73.40 s，95%CI=–144.13~–2.67，P=0.043）。MR眼镜+3D打印组的穿刺成功率为90.00%（9/10），而3D打印组的穿刺成功率为80.00%（8/10），两组之间在穿刺成功率上差异无统计学意义（P>0.999）（表2）。

2.3 两组学员对本次培训的满意度和推荐度比较

MR眼镜+3D打印组和3D打印组的学员对培训的满意度和推荐度差异无统计学意义（表2）。

2.4 两组学员对MR眼镜和3D打印模型的学习体验评价比较

结果显示，MR眼镜+3D打印组和3D打印组的学员对于培训手段的学习趣味性、真实性、使用便捷性及培训效果提升性的主观评价，两组差异无统计学意义（表3）。

3 讨论

椎管内穿刺是麻醉医师必须掌握的技能，脊柱超声是辅助椎管内穿刺的有效工具。目前已有研究证实，使用虚拟现实脊柱模型教学有助于提升学生对于脊柱超声理论知识的掌握程度。然而，对于脊柱超声的教学而言，掌握脊柱超声的经典切面只是简单的第一步，如何让学员掌握超声引导下椎管内穿刺的技术，则是一个更具挑战性的任务。

3.1 MR技术的引入可以提升学员对脊柱结构的认知，提升超声引导下椎管内穿刺的效率

本研究将MR技术引入超声引导下椎管内穿刺的教学中。研究结果表明，提前使用MR眼镜熟悉脊柱的解剖结构可以缩短超声引导下椎管内穿刺的时间。MR技术能够将虚拟世界与真实世界融合，使数字对象与真实对象能够同时存在并进行交互[8-9]。

目前，已有一些研究将MR技术应用于外科手术切除及解剖相关知识的教学中，这些研究提高了学员对解剖知识和手术操作的理解，同时也使得手

表2 两组学员的穿刺时间、穿刺成功率和对培训的满意度和推荐度比较

组别	穿刺时间 [($\bar{x}\pm s$)，s]	穿刺成功率[例（%）]	满意度 [($\bar{x}\pm s$)，分]	推荐度 [($\bar{x}\pm s$)，分]
MR眼镜+3D打印组	165.90 ± 69.91	9（90.00）	4.70 ± 0.48	4.80 ± 0.42
3D打印组	239.30 ± 80.30	8（80.00）	4.80 ± 0.42	4.90 ± 0.32
t值	2.18	–	0.49	0.60
P值	0.043	>0.999	0.628	0.556

表3 两组学员对MR眼镜和3D打印模型的学习体验评价比较[($\bar{x}\pm s$)，分]

组别	学习趣味性	真实性	使用便捷性	提升培训效果
MR眼镜+3D打印组	4.80 ± 0.42	4.80 ± 0.42	4.60 ± 0.70	4.50 ± 0.71
3D打印组	5.00 ± 0.00	4.50 ± 0.71	4.90 ± 0.32	4.90 ± 0.32
t值	1.50	1.15	1.24	1.64
P值	0.151	0.264	0.232	0.120

术操作更为精准和个性化[10-12]。超声引导下椎管内穿刺作为一项需要丰富解剖知识储备的有创操作，显然也非常适合采用MR技术进行教学。

本研究将脊柱三维重建数字模型导入HoloLens 2眼镜，学员可以佩戴眼镜进行360度沉浸式观察，逼真地看到脊柱结构。在实践超声引导下椎管内穿刺之前，学员可以熟悉侧弯患者的脊柱结构，观察患者的侧弯和旋转角度，从而提前规划椎管内穿刺的进针路径和进针角度，因此能够缩短学员实际进行超声引导下穿刺的时间。

在评价MR眼镜教学手段的满意度、推荐度、趣味性、真实性、便捷性和对培训效果的提升性方面，两组学员差异并没有统计学意义。其中的原因可能有两点：一是学员对于这两种超声引导下椎管内穿刺的教学手段都非常满意；二是3D打印组的学员并不知道另一组学员接受了MR眼镜的培训。

3.2 3D打印技术可以制作高仿真的超声引导下椎管内穿刺模型，为学员提供练习机会

本研究利用3D打印技术，成功制作出高仿真度的3D打印脊柱实体模型。该模型精确重现了脊柱侧弯患者的实际三维解剖结构。本研究的结果显示，学员对于3D打印脊柱模型练习的满意度、推荐度，学习的趣味性、真实性、使用便捷性，以及对培训效果的提升都给出了非常满意的评价。原因可能在于，对于新手而言，在患者身上实践超声引导下椎管内穿刺技术是不现实的。因为椎管内穿刺是一项具有一定风险的有创操作，反复穿刺可能会增加患者操作后发生硬膜外血肿、硬脊膜穿破后头痛及感觉异常的发生率。而本研究的3D打印脊柱模型可以让学员在更具挑战性的椎管内穿刺模型上练习超声引导下椎管内穿刺技术，为学员提供了一个安全、可重复的练习环境，从而提升了学员的培训效率。另外，本模型采用明胶来模拟皮肤、肌肉等软组织结构，明胶的超声成像特点与软组织没有显著差异，这也大大提升了脊柱超声扫查的成像效果和培训的真实感。

4　结语

3D打印与MR技术相结合，可以为初学者提供一个安全、可重复训练的高仿真超声引导下椎管内穿刺培训系统。此系统能够提升学员对超声引导下椎管内穿刺技术的信心，并增强培训的趣味性及培训效率，在脊柱超声及超声引导下椎管内穿刺技术的培训方面展现出一定的优势与潜力。本研究也存在一定的局限性，例如学生样本量偏小、明胶模型的使用寿命有限等。未来，可以考虑利用MR的注册技术，将虚拟模型固定在特定位置，从而将MR眼镜中显示的数字模型与3D打印模型进行锚定。这样一来，学员在超声引导下进行穿刺的过程中，可以实时观察到脊柱的三维结构，进一步提高穿刺的效率和成功率，并提升学员的学习效率与临床胜任力。

利益冲突　所有作者声明无利益冲突

作者贡献声明　袁青：项目设计、撰写论文；夏迪：模型建立、项目实施、数据收集；崔旭蕾：项目设计、项目指导；谭刚：项目指导

参考文献

[1] Perlas A, Chaparro LE, Chin KJ. Lumbar neuraxial ultrasound for spinal and epidural anesthesia: a systematic review and meta-analysis [J]. Reg Anesth Pain Med, 2016, 41(2): 251-260. DOI: 10.1097/AAP.0000000000000184.

[2] Ramlogan R, Niazi AU, Jin R, et al. A virtual reality simulation model of spinal ultrasound: role in teaching spinal sonoanatomy [J]. Reg Anesth Pain Med, 2017, 42(2): 217-222. DOI: 10.1097/AAP.0000000000000537.

[3] Brumpt E, Bertin E, Tatu L, et al. 3D printing as a pedagogical tool for teaching normal human anatomy: a systematic review [J]. BMC Med Educ, 2023, 23(1): 783. DOI: 10.1186/s12909-023-04744-w.

[4] Hojo D, Murono K, Nozawa H, et al. Utility of a three-dimensional printed pelvic model for lateral pelvic lymph node dissection education: a randomized controlled trial [J]. J Am Coll Surg, 2019, 229(6): 552-559.e3. DOI: 10.1016/j.jamcollsurg.2019.08.1443.

[5] Li A, Tang R, Rong Z, et al. The use of three-dimensional printing model in the training of choledochoscopy techniques [J]. World J Surg, 2018, 42(12): 4033-4038. DOI: 10.1007/s00268-018-4731-6.

[6] Moro C, Štromberga Z, Raikos A, et al. The effectiveness of virtual and augmented reality in health sciences and medical anatomy [J]. Anat Sci Educ, 2017, 10(6): 549-559. DOI: 10.1002/ase.1696.

[7] Gao B, Zhao H, Peng L, et al. A review of research progress in selective laser melting (SLM) [J]. Micromachines, 2022, 14(1): 57. DOI: 10.3390/mi14010057.

[8] Maresky HS, Oikonomou A, Ali I, et al. Virtual reality and cardiac anatomy: exploring immersive three-dimensional cardiac imaging, a pilot study in undergraduate medical anatomy education [J]. Clin Anat, 2019, 32(2): 238-243. DOI: 10.1002/ca.23292.

[9] 马胜铃，杨文博，叶哲伟，等. 混合现实技术在医学教育中的应用进展[J]. 中华医学教育探索杂志，2021，20(3)：254-259. DOI: 10.3760/cma.j.cn116021-20191222-00417.

[10] 朱刘洋，杨龙，侯建存，等. 混合现实技术辅助原发性肝癌肝切除术研究进展[J]. 中华肝胆外科杂志，2021，27(12)：950-953. DOI: 10.3760/cma.j.cn113884-20210225-00072.

[11] 杨子桧，李欢，许立志，等. 混合现实技术在口腔颌面-头颈肿瘤规范化培训教学中的应用[J]. 中华医学教育探索杂志，2023, 22(7)：1042-1046. DOI: 10.3760/cma.j.cn116021-20210425-01351.

[12] 吴若兰，李润昌，叶霖，等. 混合现实技术在支气管镜下气道解剖教学中的应用[J]. 中华医学教育探索杂志，2022，21(8)：1038-1041. DOI: 10.3760/cma.j.cn116021-20200320-00961.

（收稿日期：2024-04-01）
（本文编辑：邬小梅）