

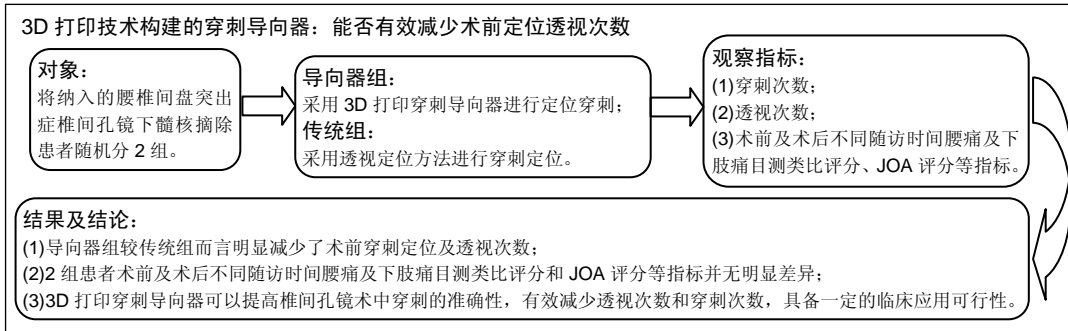
基于3D打印技术构建个体化椎间孔镜穿刺导向器的设计与应用

杨 军, 杨 群, 王 博, 刘 阳, 张 锐, 姜 畅(大连医科大学附属第一医院脊柱外科, 辽宁省大连市 116011)

DOI:10.3969/j.issn.2095-4344.0791

ORCID: 0000-0002-3013-5411(杨军)

文章快速阅读:



杨军, 男, 1984 年生, 河南省信阳市人, 汉族, 2014 年北京大学医学部毕业, 博士, 主治医师, 研究方向为 3D 打印技术在骨科的应用。

中图分类号:R318

文献标识码:B

稿件接受: 2018-01-25



文题释义:

椎间孔镜技术: 椎间孔镜于 1999 年由美国 Anthony Yeung 教授首创(杨氏技术), 并在 2002 年德国脊柱外科学会 Thomas Hoog Land 教授在杨氏技术基础上予以发展, 其操作的基本原理: 通过在椎间孔的安全三角区、在椎间盘纤维环之外, 彻底清除突出或脱垂的髓核和增生的骨质来解除对神经根的压力, 消除对神经压迫造成的疼痛。

3D 打印技术: 即快速成型技术的一种, 它是一种以数字模型文件为基础, 运用粉末状金属或塑料等可黏合材料, 通过逐层打印的方式来构造物体的技术。

摘要

背景: 椎间孔镜手术频繁的术前透视定位对于医患而言都是有害的, 因此应尽量减少或避免术前透视次数。
目的: 利用 3D 打印技术构建出一种新型个体化椎间孔镜技术穿刺定位导向器, 初步探索其临床应用的可行性, 以及其对椎间孔镜手术穿刺准确性、手术时间、透视次数的影响。

方法: 根据患者术前 CT 扫描数据, 利用 Mimics 软件建模, 模拟手术时工作通道的方向和位置, 测量出工作通道的角度, 旁开距离等数据, 根据这些数据利用建模软件构建出个体化的穿刺定位导向器, 之后采用 3D 打印技术打印出导向器。回顾性分析接受椎间孔镜下髓核摘除术的患者 45 例, 其中导向器组 22 例使用导向器定位穿刺, 传统组 23 例采用传统方法穿刺。记录并比较 2 组患者手术时间、穿刺次数、透视次数、目测类比分和日本骨科协会评分的差异。

结果与结论: ①穿刺次数方面, 导向器组(1.27±0.63)次, 传统组(3.69±0.70)次, 2 组间差异有显著性意义 ($P < 0.001$); ②透视次数方面, 导向器组(11.59±2.04)次, 传统组(20.39±1.80)次, 2 组间差异有显著性意义 ($P < 0.001$); ③手术时间方面, 导向器组(75.44±11.89) min, 传统组(87.39±12.51) min, 2 组间差异有显著性意义($P=0.001$)。④在临床疗效方面, 术前、术后 1 d、3 个月、6 个月腰痛及下肢痛目测类比分和日本骨科协会评分差异并无显著性意义; ⑤结果提示, 利用 3D 打印技术可以根据患者的影像学资料构建出个体化的椎间孔镜穿刺定位导向器, 此种导向器可以提高椎间孔镜术中穿刺的准确性, 有效减少透视次数和穿刺次数, 具备一定的临床应用可行性。

关键词:

3D 打印; 椎间孔镜; 术前模拟; 导向器; 数字化骨科; 骨科植入物

主题词:

腰椎; 椎间盘移位; 脊椎穿刺; 组织工程

Design and application of an individual puncture guide device fabricated by three-dimensional printing technology

Yang Jun, Yang Qun, Wang Bo, Liu Yang, Zhang Rui, Jiang Chang (Department of Spinal Surgery, the First Affiliated Hospital of Dalian Medical University, Dalian 116011, Liaoning Province, China)

Abstract

BACKGROUND: Frequent preoperative fluoroscopic localization of transforaminal endoscopic surgery is harmful to both doctors and patients, so it is necessary to minimize or avoid preoperative fluoroscopy.

OBJECTIVE: To design and built an individual transforaminal endoscopic puncture positioning device using three-dimensional (3D) printing technology and to explore its feasibility of clinical application, the accuracy of the puncture, operation time and the fluoroscopy times.

Yang Jun, M.D., Attending physician, Department of Spinal Surgery, the First Affiliated Hospital of Dalian Medical University, Dalian 116011, Liaoning Province, China

METHODS: We used Mimics 19.0 to build lumbar model based on the preoperative CT scan data. We simulated the direction and position of the working channel and measured the angle of the working channel, and then puncture guide device was built by 3D printing technology. Forty-five patients undergoing percutaneous endoscopic lumbar discectomy were included in this retrospective study. These patients were divided into two groups. Those received individual puncture guide device were regarded as guide device group ($n=22$), and those undergoing conventional method were considered as traditional group ($n=23$). The operation time, puncture times, fluoroscopy times, Visual Analogue Scale scores and Japanese Orthopaedic Association scores were recorded and compared.

RESULTS AND CONCLUSION: (1) The average puncture times was 1.27 ± 0.63 in guide device group and 3.69 ± 0.70 in traditional group, and there were significant differences between two groups ($P < 0.001$). (2) The fluoroscopy times was 11.59 ± 2.04 in guide device group and 20.39 ± 1.80 in traditional group, and there were significant differences between two groups ($P < 0.001$). (3) The operation time was 75.44 ± 11.89 minutes in guide device group and 87.39 ± 12.51 minutes in traditional group; there were significant differences between the two groups ($P=0.001$). (4) Regarding curative effect, there was no significant difference in low back pain and lower extremity pain Visual Analogue Scale and Japanese Orthopaedic Association scores between two groups. (5) The transforaminal endoscopic individual puncture guide device can be constructed by 3D printing technology according to preoperative imaging data. The guiding device can improve the accuracy of puncture during surgery, and effectively reduce the fluoroscopy and puncture times. Thus, it has certain clinical application feasibility.

Subject headings: Lumbar Vertebrae; Intervertebral Disk Displacement; Spinal Puncture; Tissue Engineering

0 引言 Introduction

腰椎间盘突出症是目前脊柱外科最常见的腰椎退行性疾病之一, 随着生活习惯的改变和人口老龄化的加快, 其发病人群呈现年轻化趋势。手术是治疗腰椎间盘突出症的有效手段, 其手术方式也在不断更新, 从最初的开放手术发展到内镜和微创手术。微创内镜手术也由显微内窥镜髓核摘除术发展到经皮内镜技术^[1-2], 经皮内镜技术是在Yeung^[3]发明的YESS(yeung endoscopic spine system)脊柱内镜系统及其技术基础上逐步发展完善的。Ruetten和Hoogland等^[4-5]提出了完全内镜技术和TESSYS(transforaminal endoscopic surgical system)概念。完全内镜下腰椎间盘摘除术按照入路不同可分为椎板间入路和椎间孔入路两种^[6-7], 对于不同节段的腰椎间盘突出症的治疗可选择不同的手术入路。

完全内镜技术较传统开放手术而言学习曲线明显陡峭, 而且需要精准的术中穿刺定位^[8-9], 否则反复的穿刺操作不仅会延长手术时间, 而且会增加患者的痛苦, 甚至伤及其他组织, 因此需要在术前制定详细的手术计划, 术中进行反复的定位才可确保手术安全^[10]。但反复的透视定位会增加医护人员和患者的X射线暴露时间, 而过量的辐射暴露会明显增加肿瘤、心血管疾病等的发病率^[11-12]。因此, 精准快速的穿刺定位可以起到减少辐射暴露、缩短手术时间的作用。

近年来, 3D打印技术的相关研究不断升温, 其个体化定制的特点也越来越受到临床工作者的重视并成为研究的热点^[13-15]。作者根据患者术前影像学检查测量结果结合3D打印技术构建出个体化的椎间孔镜穿刺导向器, 并验证了其临床应用的可行性, 现报道如下。

1 对象和方法 Subjects and methods

1.1 设计 随机对照试验。

1.2 时间及地点 于2016年1至12月在大连医科大学附属第一医院脊柱外科完成。

1.3 材料

个体化椎间孔镜穿刺导向器的设计与构建: 导向器分

为定位块、穿刺套筒和连接部分3个组成部分(图1)。术前需常规行腰椎CT扫描以确认患者是否具备椎间孔镜手术指征。由于患者术中均采用俯卧位, 为保证导向器构建准确, 因此术前患者CT扫描时均采用俯卧位扫描, 并且扫描时患者均俯卧于手术时使用的软垫之上, 以最大限度减小误差。首先收集患者的腰椎CT原始Dicom格式数据, 导入Mimics19.0软件, 将患者腰椎数据提取并重建出腰椎模型, 构建出一个圆柱体以模拟椎间孔镜工作通道(图2), 调整其位置至最佳穿刺位置后测量穿刺角度, 包括与棘突夹角及头倾角度等(图3), 与棘突夹角为工作通道与棘突所在平面夹角, 头倾角度为工作通道与手术椎间隙水平线夹角。结合术前CT测量的穿刺旁开距离等数据利用建模软件构建出穿刺导向器并利用3D打印机(美国, MakerBot Replicator Z18, 打印材料为PLA材质)打印出导向器(图4)。定位块部分边长为50 mm, 穿刺套筒外径为15 mm, 内径2.5 mm, 套筒长度50 mm。

1.4 对象 选择2016年1至12月在大连医科大学附属第一医院脊柱外科接受椎间孔镜髓核摘除术的患者共45例纳入该研究。

纳入标准: ①单纯L_{4/5}单节段的腰椎间盘突出; ②腰痛或下肢疼痛麻木等神经症状明显; ③影像学检查与临床症状及体征相符; ④保守治疗6个月无效或症状改善不明显者。

排除标准: ①多节段腰椎间盘突出; ②腰椎管明显狭窄; ③明显腰椎不稳或滑脱; ④腰椎感染、结核、肿瘤或明显的侧弯等畸形; ⑤手术后同节段间盘突出复发。

将45例患者按随机数字表法分为2组, 导向器组22例, 其中男12例, 女10例, 采用穿刺导向器进行辅助穿刺; 传统组23例, 其中男10例, 女13例, 不采用导向器辅助穿刺。主要统计穿刺次数、透视次数及手术时间, 并随访患者术前后临床症状改善情况。

1.5 手术方法 导向器组患者俯卧于手术台, 透视定位L_{4/5}间隙及棘突连线后常规消毒铺单, 将导向器置于患者腰背部, 将定位块横轴中线置于L_{4/5}间隙水平, 中心点置于L_{4/5}间隙水平与棘突连线交点(以2枚注射器针头或克氏针置于

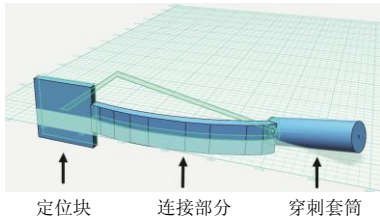


图1 导向器示意图
Figure 1 Puncture guide device diagram



图4 打印成功的导向器
Figure 4 Puncture guide device product

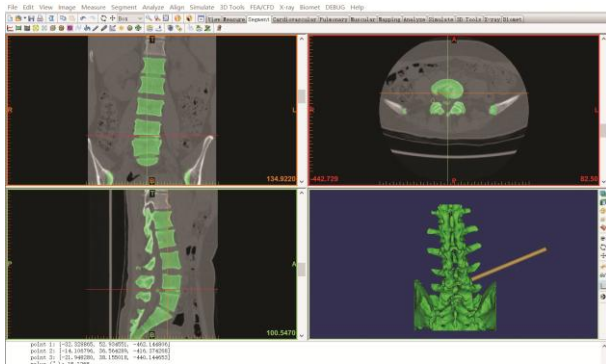


图2 提取患者腰椎数据并重建, 构建虚拟工作通道进行穿刺模拟
Figure 2 Extraction and reconstruction of data of lumbar spine, construction of virtual working channel for puncture simulation

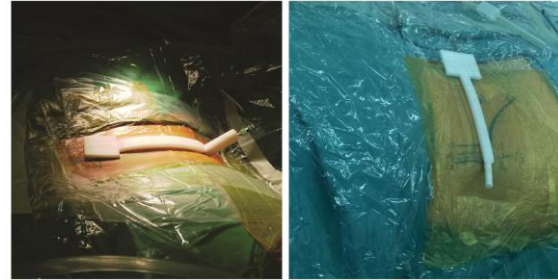


图5 术中应用穿刺导向器
Figure 5 Puncture guide device used during surgery

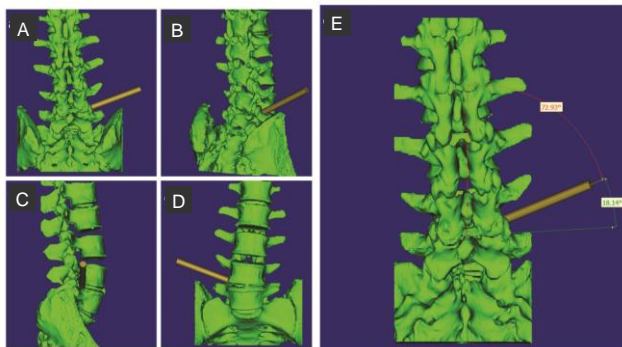


图3 模拟穿刺并测量工作通道角度
Figure 3 Puncture simulation and working channel angle measurement

图注: 图A-D 示模拟工作通道的置入, 观察各方向角度是否合适; E 为测量与棘突旁开角度及头倾角度。

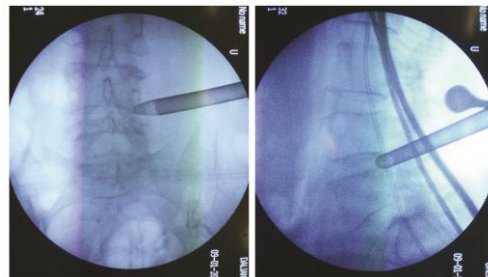


图7 在导向器辅助下穿刺置管成功
Figure 7 Puncture success under the assistance of the puncture guide device

表1 两组患者临床疗效比较

Table 1 Comparison of clinical efficacy between the two groups

参数	导向器组 (n=22)	传统组 (n=23)	P 值
年龄($\bar{x}\pm s$, 岁)	38.09±6.51	37.35±5.43	0.34
男/女(n)	12/10	10/13	> 0.05
穿刺次数($\bar{x}\pm s$, 次)	1.27±0.63	3.69±0.70	< 0.001
透视次数($\bar{x}\pm s$, 次)	11.59±2.04	20.39±1.80	< 0.001
手术时间($\bar{x}\pm s$, min)	75.44±11.89	87.39±12.51	0.001
腰痛目测类比分($\bar{x}\pm s$, 分)			
术前	3.66±0.42	3.49±0.28	0.11
术后 1 d	1.32±0.24	1.39±0.31	0.40
术后 3 个月	0.61±0.32	0.67±0.28	0.51
术后 6 个月	0.51±0.22	0.56±0.24	0.47
下肢痛目测类比分($\bar{x}\pm s$, 分)			
术前	7.45±0.48	7.69±0.51	0.11
术后 1 d	1.04±0.31	1.25±0.43	0.07
术后 3 个月	0.69±0.41	0.63±0.39	0.62
术后 6 个月	0.55±0.32	0.57±0.40	0.85
JOA 评分($\bar{x}\pm s$, 分)			
术前	6.14±1.08	6.00±1.24	0.70
术后 3 个月	25.09±1.06	25.13±1.17	0.91
术后 6 个月	25.61±1.22	25.33±1.31	0.88

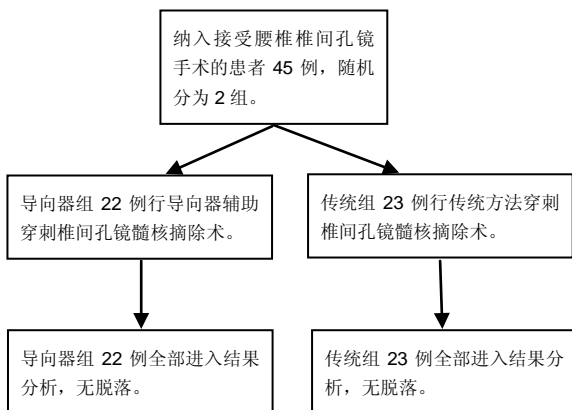
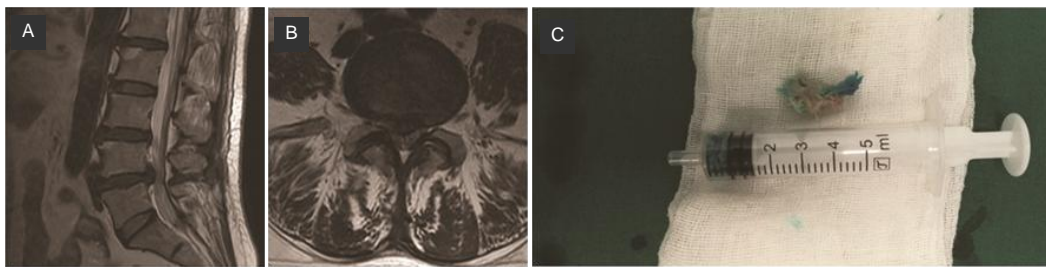


图6 两组患者分组流程图
Figure 6 Flow chart of patient assignment



图注: 图 A, B 为术前 MR, 显示 L_{4/5} 间盘右后方突出, 神经根受压; C 为摘除的间盘组织。

图 8 女性 54 岁腰椎间盘突出症患者行导向器辅助穿刺椎间孔镜髓核摘除术的相关图片

Figure 8 A 54-year-old female patient with lumbar disc herniation undergoing percutaneous endoscopic lumbar discectomy with the aid of guide device

定位块内辅助透视定位), 由助手辅助固定导向器, 确定导向器不发生移动, 之后将穿刺针沿套管刺入(图5), 透视确认穿刺针穿刺位置, 去除导向器, 之后的椎间孔镜操作如常。

传统组患者俯卧于手术台后, 透视定位L_{4/5}间隙, 按照术前测量的旁开距离画出标记线, 常规消毒铺单, 在C臂透视下反复穿刺定位, 直至穿刺位置准确, 之后的椎间孔镜操作如常。2组患者的手术由同一组手术人员完成。

1.6 主要观察指标 所有患者记录穿刺次数、透视次数及手术时间; 对比术前、术后1 d、3个月、6个月腰痛及下肢痛目测类比评分和日本骨科协会(Japanese Orthopaedic Association, JOA)评分变化。

目测类比评分为在纸上面划一条10 cm的横线, 横线的一端为0, 表示无痛; 另一端为10, 表示剧痛; 中间部分表示不同程度的疼痛。让患者根据自我感觉在横线上划一记号, 表示疼痛的程度。

JOA总评分最高为29分, 最低0分, 分数越低表明功能障碍越明显。

1.7 统计学分析 采用SPSS 18.0统计学软件(SPSS, IBM, 美国)对所得数据进行统计学分析, 所有的计量资料均使用 $\bar{x} \pm s$ 表示, 计量资料使用独立样本 t 检验, $P < 0.05$ 为差异有显著性意义。

2 结果 Results

2.1 参与者数量分析 按意向性处理, 研究共纳入45例接受椎间孔镜手术的患者, 导向器组22例, 传统组23例, 全部进入结果分析, 无脱落。试验流程图见图6。

2.2 基线资料比较 2组患者平均年龄及性别等基线资料具有可比性, 见表1。

2.3 穿刺次数、透视次数、目测类比评分及JOA评分比较 导向器组平均穿刺次数及透视次数均较传统组少($P < 0.05$), 22例有17例1针穿刺成功(图7), 2例调整了2次后穿刺成功, 3例调整了1次后穿刺成功。导向器组在手术时间、总穿刺次数和总透视次数方面少于传统组($P < 0.05$), 见表1。2组患者术后随访下肢痛及腰痛症状均明显缓解, 但由于手术方式相同, 因此在症状缓解方面差异并无显著性意义。2组患者均无其他不良事件发生。

2.4 典型病例 女性患者, 54岁, 腰痛伴右下肢疼痛半个月。入院诊断为腰椎间盘突出症, 行穿刺导向器辅助穿刺椎间孔镜手术, 随访时间半年, 患者右下肢疼痛症状明显缓解, 见图8。

3 讨论 Discussion

在腰椎椎间孔镜髓核摘除术中, 准确的穿刺定位无疑是手术成功的关键, 而且能起到降低射线辐射, 一定程度上保护医务人员和患者健康的作用^[16-19]。同时, 由于椎间孔镜技术学习曲线长, 对于初学者而言穿刺定位难度大^[20], 反复的穿刺定位不仅会延长手术时间, 增加射线辐射危害, 而且会增加脊柱组织的损伤, 同时影响学习者的信心。传统的椎间孔镜穿刺定位多需要术者的反复透视确认完成, 这依靠术者丰富的经验和术中感觉实现, 随之而来的是术者和患者多次暴露在辐射危害中。有研究显示, 30例椎间孔镜手术中, 平均每台手术术者颈部辐射剂量为0.086 3 mSv, 胸部为0.189 0 mSv, 上臂0.050 6 mSv, 左手0.805 0 mSv, 右手0.736 3 mSv^[21]。而根据辐射年限值计算, 一名外科医生每年最多能完成683台椎间孔镜手术^[12]。因此, 如果能有辅助穿刺定位器的帮助, 不仅能起到培养年轻医生成长的作用, 更重要的是可以减少术者和患者射线暴露的次数, 从而保护医患双方的身体健康。

国内已有学者对穿刺定位器进行了相关研究, 范国鑫等^[22]研发了一种新型椎间孔镜定位器, 设计原理主要是利用穿刺目标点始终落在直角圆弧圆心的特点实现导向穿刺, 其使用这种定位器进行了27例椎间孔镜手术, 其中23例1针穿刺成功, 但其对C臂的摆放位置要求比较严格, 否则容易出现误差。李正宇^[23]设计了一套椎间孔穿刺定位系统并进行了临床研究, 但其需要术前准确地测量各种CT参数, 应用比较繁琐。陈天良^[24]设计的定位器也需要测量许多参数, 且定位器为固定于手术台上, 灵活性较差。

以上各种定位器虽然都能做到较准确的定位, 但仍存在一些缺陷, 比如比较笨重, 操作也比较复杂。近年来, 3D打印技术不断被应用于临床, 从辅助手术到内植物研发都得到了广泛的研究^[25-27]。Chen等^[28]利用3D打印技术构建出腰椎椎弓根螺钉置钉导向器, 证明使用导向器可显著减少出血量, 缩短手术时间及减少透视次数。Kaneyama

等^[29]构建出3D打印颈椎弓根螺钉导向器,证明导向器的使用可以显著提高置钉的安全性,避免术中副损伤。Ma等^[30]利用3D打印截骨导板进行了股骨骨肉瘤截骨术,达到了精确截骨的目的和良好的手术效果。不仅在骨科领域,在临床其他专业,比如肝胆外科、心血管外科等,3D打印技术也得到了广泛的应用^[31-34]。

3D打印技术构建的椎间孔镜穿刺导向器最大的优势是可以实现个体化导向,对于不同体型的患者可以实现精准穿刺,只要术前结合建模软件进行详细测量和规划,术中基本可以做到无需过多调整,一针穿刺成功。而且相较于其他穿刺定位器而言,一名熟练的操作者在半小时内即可完成导向器的建模,二至三小时内即可完成打印,导向器可使用环氧乙烷消毒,且体积小巧,便于术中操作。

一般来说,射线防护主要可分为距离防护、屏蔽防护以及控源防护等^[35-37]。此外,使用术中核磁导航或O臂机也可以做到减少辐射和暴露^[38-40],但无论何种防护都不能做到百分之百抵御射线辐射,只有尽量减少透视次数才能真正保护医患双方的健康。该穿刺导向器在术中可以起到一定程度减少射线暴露的作用,这取决于术中精准穿刺,但精准的穿刺定位依赖于术前详细的规划,这对于数据测量的准确度要求就比较高。作者术前利用建模软件模拟穿刺和置管,可以直观地观察工作通道在体内的位置,继而测量穿刺角度,因此可以确保穿刺的安全性。

当然,在术中作者也遇到无法1针穿刺成功的病例,对于无法1针穿刺成功的病例,作者将导向器沿棘突上下移动微调,借助透视确定调整效果。针对导向器穿刺失败病例分析认为主要有以下几点原因:第一,在初期设计导向器的过程中,对于套管内径的设计考虑不周,以至于穿刺针在套管内晃动,造成穿刺误差,这一点作者根据穿刺针尺寸进行了调整,使得穿刺针可以与套管内径匹配,减少穿刺针晃动;第二,导向器连接部分的弧度取决于患者皮缘的弧度,只有导向器尽量贴服于体表,才能提高穿刺准确度,因此,需要根据患者皮缘弧度设计导向器弧度;第三,导向器放置位置决定于穿刺前体表定位,准确的体表定位以及导向器放置的稳定性也十分重要。

该研究将3D打印技术、影像学和数字医学结合起来,可以预先进行详细的手术设计,可以根据患者体型、髂棘高度、横突大小等构建出个体化的椎间孔镜穿刺导向器,该导向器设计简单,能够快速构建,具有一定的准确性,能够在一定程度上减少射线辐射次数,缩短手术时间。同时该导向器小巧灵活,无需占用过多的空间,操作简便。

但该导向器的设计也存在一些缺陷,比如缺少稳定装置,术中操作稳定性较差,在之后的研究中将围绕这一问题进行改进,此外,在今后的导向器改进方面作者拟在定位块部分加入沟槽设计,可放入克氏针等,有助于透视调整定位。在此次研究中仅设计了L_{4/5}节段的穿刺导向器,目的在于探讨3D打印技术构建穿刺导向器的可行性,为复杂

的、难度较高的穿刺定位提供一些参考,在今后的研究中作者将设计其他节段的穿刺导向器并进行临床应用,更重要的是进行大样本量的应用分析,进一步提高穿刺精度。由研究可见,该型穿刺导向器的特点在于可以根据不同患者体型和腰椎特点构建出个体化导向器,该研究也证实此导向器可以减少透视次数和辐射暴露,提高穿刺精度,具有一定的临床应用前景。

致谢: 感谢大连医科大学附属第一医院脊柱外科全体医师对课题的支持与帮助。

作者贡献: 试验设计、实施为第一作者和通讯作者,资料分析、文章撰写为第一作者,数据测量、随访为第三、四、五、六作者。

经费支持: 该文章没有接受任何经费支持。

利益冲突: 文章的全部作者声明,在课题研究和文章撰写过程,不存在利益冲突。

伦理问题: 临床试验研究的实施符合《赫尔辛基宣言》和医院对人体研究的相关伦理要求。文章的撰写与编辑修改后文章遵守了《随机对照临床试验研究报告指南》(CONSORT指南)。参与试验的患病个体及其家属为自愿参加,对试验过程完全知情同意,在充分了解本治疗方案的前提下签署“知情同意书”。实施手术的主刀医师手术经验丰富;大连医科大学附属第一医院具有开展椎间孔镜髓核摘除术的资质。

文章查重: 文章出版前已经过CNKI反剽窃文献检测系统进行3次查重。

文章外审: 文章经国内小同行外审专家双盲外审,符合本刊发稿宗旨。

作者声明: 第一作者对研究和撰写的论文中出现的不端行为承担责任。论文中涉及的原始图片、数据(包括计算机数据库)记录及样本已按照有关规定保存、分享和销毁,可接受核查。

文章版权: 文章出版前杂志已与全体作者授权人签署了版权相关协议。

开放获取声明: 这是一篇开放获取文章,根据《知识共享许可协议》“署名-非商业性使用-相同方式共享3.0”条款,在合理引用的情况下,允许他人以非商业性目的基于原文内容编辑、调整和扩展,同时允许任何用户阅读、下载、拷贝、传递、打印、检索、超级链接该文献,并为之建立索引,用作软件的输入数据或其它任何合法用途。

4 参考文献 References

- [1] Khoo LT, Fessler RG. Microendoscopic decompressive laminotomy for the treatment of lumbar stenosis. *Neurosurgery*. 2002;51 (5 Suppl):146-154.
- [2] Hou TY, Zhou Q, Dai F, et al. Repeated microendoscopic discectomy for recurrent lumbar disk herniation. *Clinics (Sao Paulo)*. 2015;70(2):120-125.
- [3] Yeung AT. Minimally invasive disc surgery with the Yeung Endoscopic Spine System (YESS). *Surg Technol Int*. 1999;8: 267-277.
- [4] Ruetten S, Komp M, Merk H, et al. Use of newly developed instruments and endoscopes: full-endoscopic resection of lumbar disc herniations via the interlaminar and lateral transforaminal approach. *J Neurosurg Spine*. 2007;6(6): 521-530.
- [5] Hoogland T, Schubert M, Miklitz B, et al. Transforaminal posterolateral endoscopic discectomy with or without the combination of a lowdose chymopapain: a prospective randomized study in 280 consecutive cases. *Spine*. 2006; 31(24): E890-897.

- [6] Tonosu J, Oshima Y, Shiboi R, et al. Consideration of proper operative route for interlaminar approach for percutaneous endoscopic lumbar discectomy. *J Spine Surg.* 2016;2(4): 281-288.
- [7] Gore S, Yeung A. The "inside out" transforaminal technique to treat lumbar spinal pain in an awake and aware patient under local anesthesia: results and a review of the literature. *Int J Spine Surg.* 2014; 8: 28.
- [8] 周旭,贺石生,张海龙,等.新型腰椎经皮椎弓根螺钉植入定位方法及其对放射暴露剂量的影响[J].中华骨科杂志, 2014,34(3): 265-272.
- [9] Hsu HT, Chang SJ, Yang SS, et al. Learning curve of full-endoscopic lumbar discectomy. *Eur Spine J.* 2013;22(4): 727-733.
- [10] Yue JJ, Long W. Full endoscopic spinal surgery techniques: advancements, indications, and outcomes. *Int J Spine Surg.* 2015; 9:17.
- [11] 范国鑫,扶青松,顾广飞,等.脊柱微创手术的辐射危害及其防护进展[J].中国脊柱脊髓杂志,2014,24(3): 275-278.
- [12] Yu E, Khan SN. Does less invasive spine surgery result in increased radiation exposure? A systematic review. *Clin Orthop Relat Res.* 2014; 472(6): 1738-1748.
- [13] Yang J, Cai H, Lv J, et al. In vivo study of a self-stabilizing artificial vertebral body fabricated by electron beam melting. *Spine.* 2014;39 (8): E486-E492.
- [14] Hoang D, Perrault D, Stevanovic M, et al. Surgical applications of three-dimensional printing: a review of the current literature & how to get started. *Ann Transl Med.* 2016;4(23): 456.
- [15] AlAli AB, Griffin MF, Butler PE. Three-Dimensional Printing Surgical Applications. *Eplasty.* 2015; 15: e37.
- [16] 白一冰,徐岭,赵文亮,等.经皮腰椎间孔镜手术的穿刺定位策略[J].中国微创外科杂志,2012,12(6): 540-543.
- [17] Pa Z, Ha Y, Yi S, et al. Efficacy of transforaminal endoscopic spine system (TESSYS) technique in treating lumbar disc herniation. *Med Sci Monit.* 2016; 22: 530-539.
- [18] Zeng Y, Bao J, Su J, et al. Novel targeted puncture technique for percutaneous transforaminal endoscopic lumbar discectomy reduces X-ray exposure. *Exp Ther Med.* 2017; 14(4): 2960-2968.
- [19] 曹正霖,棚天航,于淼,等.自制辅助定位穿刺装置在经皮椎间孔镜下髓核摘除术中的应用效果[J].广西医学, 2017,39(9): 1320-1324.
- [20] 顾昕,贺石生,张海龙,等.经皮后外侧腰椎间孔入路椎间盘工作区域的解剖学研究[J].中华骨科杂志, 2011, 31(10): 1033-1037.
- [21] Fan G, He S, Chen Z. Musculoskeletal pain and cancer risk of staff working with fluoroscopically guided procedures. *J Am Coll Cardiol.* 2015;66(6): 759-760.
- [22] 范国鑫,吴信波,管晓菲,等.经椎间孔内镜技术穿刺路径辅助定位器的设计与临床应用[J].中国脊柱脊髓杂志, 2016,26(3): 218-224.
- [23] 李正宇.经皮腰椎椎间孔穿刺定位系统及临床应用研究[D].泸州医学院, 2012.
- [24] 陈天良.经皮腰椎椎间孔镜定位穿刺器研制及临床应用[D].广州中医药大学, 2014.
- [25] Wu AM, Shao ZX, Wang JS, et al. The accuracy of a method for printing three-dimensional spinal models. *PLoS One.* 2015; 10(4): e0124291.
- [26] Wang YT, Yang XJ, Yan B, et al. Clinical application of three-dimensional printing in the personalized treatment of complex spinal disorders. *Chin J Traumatol.* 2016;19(1): 31-34.
- [27] Yang L, Shang XW, Fan JN, et al. Application of 3D printing in the surgical planning of trimalleolar fracture and doctor-patient communication. *Biomed Res Int.* 2016; 2016: 2482086.
- [28] Chen H, Wu D, Yang H, et al. Clinical use of 3D printing guide plate in posterior lumbar pedicle screw fixation. *Med Sci Monit.* 2015;21: 3948-3954.
- [29] Kaneyama S, Sugawara T, Sumi M. Safe and accurate midcervical pedicle screw insertion procedure with the patient-specific screw guide template system. *Spine (Phila Pa 1976).* 2015;40(6): E341-348.
- [30] Ma L, Zhou Y, Zhu Y, et al. 3D-printed guiding templates for improved osteosarcoma resection. *Sci Rep.* 2016; 6: 23335.
- [31] Zein NN, Hanouneh IA, Bishop PD, et al. Three dimensional print of a liver for preoperative planning in living donor liver transplantation. *Liver Transpl.* 2013; 19: 1304-1310.
- [32] Tam MD, Laycock SD, Bell D, et al. 3-D printout of a DICOM file to aid surgical planning in a 6 year old patient with a large scapular osteochondroma complicating congenital diaphyseal aclasia. *J Radiol Case Rep.* 2012; 6: 31-37.
- [33] Bernhard JC, Isotani S, Matsugasumi T, et al. Personalized 3D printed model of kidney and tumor anatomy: a useful tool for patient education. *World J Urol.* 2016; 34: 337-345.
- [34] Engel M, Hoffmann J, Castrillon-Oberndorfer G, et al. The value of three-dimensional printing modelling for surgical correction of orbital hypertelorism. *Oral Maxillofac Surg.* 2015;19:91-95.
- [35] Fan G, Fu Q, Zhang H, et al. Direct-beam radiation exposure to surgeons during pinning of supracondylar humerus fractures. *J Pediatr Orthop.* 2015;35 (4): e37.
- [36] Narain AS, Hijji FY, Yom KH, et al. Radiation exposure and reduction in the operating room: Perspectives and future directions in spine surgery. *World J Orthop.* 2017;8(7): 524-530.
- [37] Tatsumi RL. Radiation exposure during the lateral lumbar interbody fusion procedure and techniques to reduce radiation dosage. *Int J Spine Surg.* 2012; 6:195-199.
- [38] Moses ZB, Mayer RR, Strickland BA, et al. Neuronavigation in minimally invasive spine surgery. *Neurosurg Focus.* 2013; 35(2): E12.
- [39] Torres J, James AR, Alimi M, et al. Screw Placement Accuracy for Minimally Invasive Transforaminal Lumbar Interbody Fusion Surgery: A Study on 3-D Neuronavigation-Guided Surgery. *Global Spine J.* 2012;2(3):143-152.
- [40] Abdullah KG, Bishop FS, Lubelski D, et al. Radiation exposure to the spine surgeon in lumbar and thoracolumbar fusions with the use of an intraoperative computed tomographic 3-dimensional imaging system. *Spine.* 2012; 37(17): E1074-1078.