文章编号:1000-5404(2012)15-1543-05

论著

Mimics及颈椎模型用于下颈椎椎弓根个体化置钉的应用研究

王远政[1],田晓滨[1],刘 洋[2],李 波[1],孙 立[1],张 一[1],王楠筑[1] (550002 贵阳,贵州省人民医院骨科[1];400010 重庆,重庆医科大学附属第二医院骨科[2])

[摘要] **目的** 利用快速成型技术及Mimics软件设计一种新的下颈椎椎弓根钉个体化置入技术,并探讨其临床应用意义。**方法** 对16例成人下颈椎标本行CT扫描收集数据,导入Mimics软件对标本进行三维重建。利用Mimics相关功能在三维重建图像上寻找下颈椎椎弓根最佳轴线并测量椎弓根相关参数,制定椎弓根螺钉个体化置入方案。然后将三维重建图像以STL格式导入三维打印机,制作出下颈椎的实体模型,根据个体化置钉角度置入导向针。依照制定的个体化指定参数,并配合实体模型的直观指导,在标本上进行置钉。置钉后标本行CT扫描,判断置入准确性。利用上述方法对2例患者进行个体化置钉,术后通过CT扫描验证螺钉位置准确性。**结果** 成功建立了与标本相似度极高的下颈椎三维重建图像和实物模型,通过测量结果设计了每个椎弓根的置钉参数。共在标本上置入148枚椎弓根螺钉,140枚位于椎弓根骨皮质之内,8枚稍穿破椎弓根骨皮质。对患者置入10枚椎弓根螺钉,CT示螺钉位置满意。**结论** 用Mimics软件对下颈椎进行三维重建,制定个体化置钉参数,同时配合实物模型的直观指导,提供了一种下颈椎椎弓根钉个体化置钉的方法,利用该法能提高置钉安全性。

[关键词] 颈椎;椎弓根螺钉;Mimics软件;快速成型;三维重建
[中图法分类号] R319; R323.1; R687.1 [文献标志码] A

Individualization of lower cervical pedicle screw fixation with rapid prototyping and MIMICS software

Wang Yuanzheng[1], Tian Xiaobin[1], Liu Yang[2], Li Bo[1], Sun Li[1], Zhang Yi[1], Wang Nanzhu[1] ([1]Department of Orthopaedics, Guizhou Provincial People's Hospital, Guiyang, Guizhou Province, 550002; [2]Department of Orthopaedics, Xinqiao Hospital, Chongqing Medical University, Chongqing, 400010, China)

[**Abstract**] **Objective** To design a new lower cervical pedicle screw placement based on Mimics software and rapid prototyping technology and evaluate its clinical value. **Methods** CT scanning was performed on 16 adult cadaveric cervical specimens (C_3 to C_7). The obtained CT data were imported into a workstation running MIMICS software to generate cervical three dimensional (3D) reconstruction images which saved as STL files. Then these STL files were used to produce cervical physical models using rapid prototyping technique. The optimal trajectory pedicle was explored and marked on 3D images using computer assistant design module of Mimics, and the related parameters of cervical pedicle were measured using measurement tools of Mimics. So the individualized surgery plan of pedicle screw fixation was determined according to the location of pedicle trajectory and parameters. The trajectory pins were drilled into physical model to supervise the entry point and orientation of pedicle screw. With the visualized guidance of physical model, pedicle screws were inserted in cadaveric specimens in strict accordance with individualized surgery plan determined previously. Pedicle screw fixation was performed in 2 patients with cervical disorders requiring instrumentation using this individualized surgery method as mentioned above. **Results** The cervical 3D image and physical model were found to be anatomically similar with each other and of great assistance in designing individualized surgery plan and supervising placement of pedicle screw. There were 148 pedicle screws inserted in the 16 cervical specimens. Among them, 140 were inserted in the pedicle cortical, and the left 8 breached the pedicle cortical mildly. CT scanning indicated that the 10 pedicle screws were satisfyingly inserted in the 2 patients. **Conclusion** Combination of 3D image by Mimics and intuitive guidance of physical model by rapid prototyping

[基金项目] 贵州省社会发展科技攻关项目(黔科合SY[2010]3115号)
[通信作者] 田晓滨,电话:(0851)5600978, E-mail:txb6@vip.163.com

technique improve the accuracy and safety of lower cervical stereotaxy.

[**Key words**] cervical vertebra; pedicle screw; Mimics; rapid prototyping; three-dimensional reconstruction

Supported by the Tackling Project of Scientific and Technology for Social Development of Guizhou Province ([2010]3115). Correspond author: Tian Xiaobin Tel: 86-851-5600978, E-mail:txb6@vip.163.com

下颈椎(C_3～C_7)伤病严重影响着人类健康,对下颈椎伤病的外科治疗,其目的可归结为:恢复颈椎的解剖序列、神经根或脊髓减压和重建颈椎稳定性。颈椎内固定是实现这些目的的有效手段。其中,颈椎椎弓根螺钉内固定系统在临床上应用越来越广泛,该内固定系统能够提供其他固定方式无法比拟的三维立体稳定性[1-3],更有利于颈椎术后的稳定和骨性融合。但是,考虑到下颈椎解剖关系复杂,且与血管及神经等重要组织相毗邻,置钉失误可能导致严重后果,因此寻求一种安全的个体化置钉方法一直是临床应用十分关注的问题。本研究利用快速成型(rapid prototyping,RP)技术制作的颈椎实体模型和 Mimics 软件的三维重建、计算机辅助设计(computer assistant design,MeCAD)功能相结合,探索了一种新的下颈椎椎弓根钉个体化置钉方法。

1 资料与方法

1.1 标本制备

成人尸体标本16例(重庆医科大学解剖教研室与贵阳医学院解剖教研室提供),从C_2/C_3及C_7/T_1水平离断,收集C_3～C_7节段颈椎标本。排除颈椎不稳、畸形及外伤标本。

1.2 颈椎三维重建图像的建立

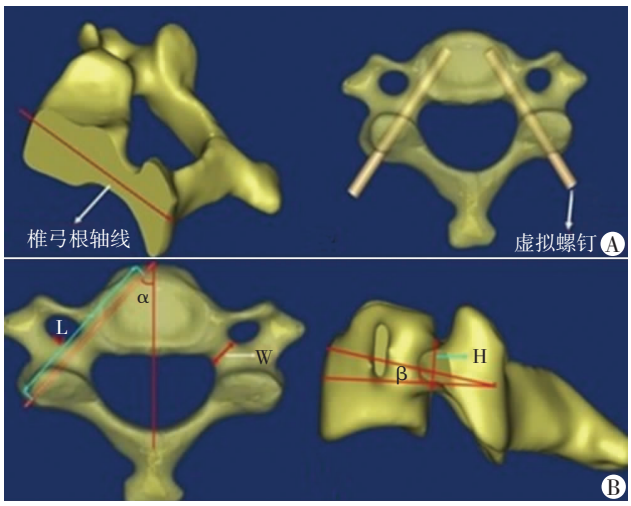
对标本以层厚0.65 mm进行CT(美国GE-LightSpeed)扫描获取影像数据,以Dicom格式保存。在计算机上运行Mimics 10.01软件(比利时Materialise公司),将数据导入软件。运用阈值选取技术(Thresholding),获得颈椎原始蒙罩(Mask)后,在运用三维区域增长技术(3D Region Growing)对原始蒙罩进行修改,得到新蒙罩。随后采用Calculate 3D功能,以软件默认的最佳重建质量对所选取的实体结构区域进行三维重建。最后进入Magics9.9界面,对三维重建图像进行平滑处理。将重建图像以STL格式导出。

1.3 下颈椎实体模型的制作

将颈椎的STL文件导入Dimension三维打印机(成都泰捷系统工程公司),运用熔融堆积成型技术,采用丙烯腈-丁二烯-苯乙烯共聚物为材料对下颈椎实体模型进行快速成型制作。

1.4 个体化手术参数的制定及虚拟置钉

在Mimics中调整三维重建图像的透明度,全面观察椎弓根走形。利用软件的CAD功能,在透明化处理的重建图像中标记出椎弓根轴线。标记后以过该轴线的平面对椎弓根进行切割,了解并调整轴线的位置,使之处于椎弓根正中(图1A)。利用软件的测量工具测量椎弓根轴线长度L、椎弓根最窄处截面上下皮质骨高度H、椎弓根最窄处截面两侧皮质骨宽度W、椎弓根轴线在横断面上投影与椎体冠状面垂线成的内倾角α、椎弓根轴线在矢状面投影与椎体冠状面垂线所成的头/尾倾角β(图1B)。根据L决定椎弓根螺钉个体化长度、H和W中较小者决定螺钉直径、α和β决定螺钉置入的个体化角度(头倾角为正数角,尾倾角为负数角)。椎弓根轴线投射到侧块骨皮质表面的交点即为个体化进钉点。根据以上测量结果选取适当规格的虚拟螺钉,按照轴线置入椎弓根。置入后将重建图像实体化,观察虚拟螺钉是否穿破椎弓根(图1A)。如无穿破,即可确定个体化置钉方案的准确性。

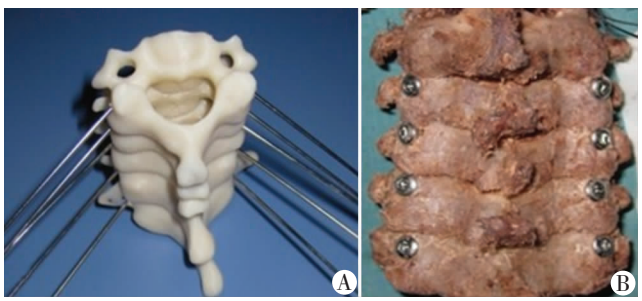


A:椎弓根轴线的标记及虚拟置钉;B:椎弓根径线及角度 L:椎弓根长度;W:椎弓根宽度;H:椎弓根高度;α:椎弓根内倾角;β:椎弓根头/尾倾角

图1 下颈椎三维重建图像

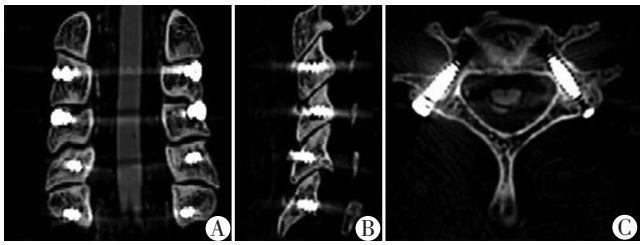
1.5 颈椎椎弓根螺钉的定向置入

通过比对颈椎的三维重建图像和实体模型,在实体模型上标记出进钉点,用电钻将克式针按照个体化置钉角度从进钉点钻入模型椎弓根,对置钉提供直观的指导(图2A)。将颈椎标本固定在操作台上,暴露侧块后缘骨皮质,通过比对标本和已实体模型确定标本进钉点。在进钉点开孔,按照术前制定的个体化置钉参数和在实物模型的直观指导下置入螺钉(图2B)。置钉后行CT扫描,评价置入准确性(图3)。



A:标本模型预置椎弓根钉道;B:标本置钉术后

图2 下颈椎标本置钉图像

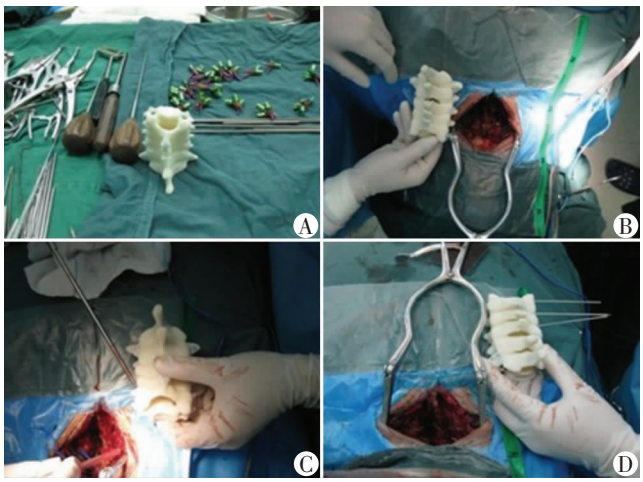


A:冠状位;B:矢状位;C:横断面

图 3 下颈椎标本置钉术后 CT 重建图像

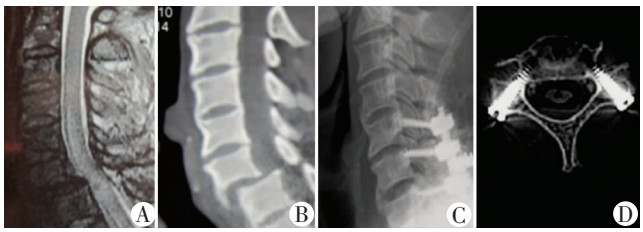
1.6 临床应用

本组为贵州省人民医院骨科于 2011 年 8 – 11 月收治的 2 例患者,均为男性;其中 1 例 45 岁,外伤后致颈 6 椎体骨折脱位并脊髓损伤(图 4、5);另 1 例患者 51 岁,外伤引起颈 5 椎体前脱位。2 例患者术前均行 CT 扫描,收集 Dicom 数据。将数据导入 Mimics 对患者颈椎进行三维重建并设计个体化置钉参数;将三维重建图像以 STL 格式导入三维打印机,运用 RP 技术制作出患者颈椎的实体模型。术中根据个体化置钉参数决定螺钉直径、长度和进钉角度,同时配合实体模型的直观指导置入椎弓根螺钉(图 4)。术后随访均行 X 线片及 CT 扫描,评估螺钉置入的准确性(图 5)。



A、B:患者下颈椎模型在术中与实体比对;C、D:术中模型预置最佳椎弓根钉道

图 4 下颈椎脊柱模型在外伤后颈椎脱位手术中的运用



A:术前 MRI 表现;B:术前 CT 表现;C:术后 X 线侧位片;D:术后 CT 横断面

图 5 外伤后颈椎脱位患者手术前后影像学表现

2 结果

2.1 下颈椎三维重建和快速成型结果

利用 Mimics 软件和快速成型技术对 16 例下颈椎标本进行了三维重建和实体模型的制作(图 3)。三维重建图像形态逼真,在 Mimics 中可以任意旋转,从不同角度和平面观察椎弓根的形态和走形。通过直接观察,下颈椎实体模型与三维重建图像解剖形态几乎完全一致,并能提供比重建图像更加形象和直观的椎弓根解剖学信息。将实体模型与已暴露侧块后缘骨皮质的标本相比较,二者的后部的尺寸和形态亦完全一致。在快速成型模型的指导下进行手术操作,能保证椎弓根螺钉置入更加直观和准确。

2.2 重建图像测量及个体化置钉参数制定结果

三维重建图像的椎弓根径线及角度测量结果见表 1 ~ 2。根据以上测量结果,各节段下颈椎的椎弓根高度均大于宽度,因此椎弓根螺钉的直径主要取决于宽度的大小。将每侧椎弓根的宽度值减去约 1.5 mm 即为个体化螺钉直径参考值;椎弓根轴线长度减去该轴线在椎体内长度的 1/2 即为螺钉长度参考值;椎弓根轴线的 α 和 β 角即为个体化置钉角度。

表 1 颈椎三维重建图像椎弓根径线测量结果(mm, $n=16, \bar{x} \pm s$)

节段	椎弓根长度 L		椎弓根宽度 W		椎弓根高度 H	
	左侧	右侧	左侧	右侧	左侧	右侧
C_3	31.98 ±2.15	32.31 ±1.67	4.94 ±1.18	5.01 ±0.87	7.37 ±0.69	7.25 ±1.02
C_4	32.58 ±1.93	32.08 ±2.01	5.17 ±1.09	5.09 ±1.14	7.31 ±0.84	7.19 ±0.95
C_5	33.64 ±1.92	32.42 ±1.72	5.83 ±1.42	5.69 ±1.31	7.29 ±1.17	7.38 ±1.13
C_6	33.25 ±1.83	34.08 ±1.78	6.01 ±0.94	6.38 ±1.05	7.32 ±1.04	7.27 ±1.09
C_7	34.01 ±1.46	33.81 ±1.31	7.03 ±1.15	7.11 ±0.92	7.24 ±1.16	7.42 ±0.99

表 2 颈椎三维重建图像椎弓根角度测量结果(°, $n=16, \bar{x} \pm s$)

节段	椎弓根内倾角 α		椎弓根头/尾倾角 β	
	左侧	右侧	左侧	右侧
C_3	46.1 ±4.3	46.7 ±3.6	11.8 ±3.2	10.7 ±2.8
C_4	47.3 ±3.9	46.9 ±4.1	6.7 ±2.5	6.9 ±2.1
C_5	48.6 ±5.7	48.9 ±4.3	–(2.1 ±1.9)	–(1.8 ±1.6)
C_6	40.2 ±5.1	39.7 ±3.5	–(7.1 ±2.9)	–(6.4 ±2.6)
C_7	37.7 ±4.8	36.4 ±4.2	–(10.5 ±3.5)	–(11.1 ±3.3)

2.3 标本置钉结果

16 具下颈椎标本,按照上述方法设计的个体化参数和在实物模型的指导下,共置入 148 枚椎弓根螺钉(少部分标本节段骨质腐化,无法置钉)。置钉后标本行 CT 扫描(图 4)显示:140 枚椎弓根螺钉完全位于椎弓根内,8 枚稍胀破椎弓根外侧骨皮质。

2.4 临床应用结果

本组 2 例患者,置入颈椎椎弓根螺钉 10 枚,所有螺钉置入过程顺利,术中和术后均未出现血管和神经并发症。术后早期随访 X 线及 CT 扫描显示螺钉进钉部位和方向准确,在椎弓根内的位置良好,螺钉长度和直径选择合适(图 5)。

3 讨论

在下颈椎内固定方法中,后路手术较前路手术显露简单,便于安置内固定及植骨块,是临床上应用较多的手术方式。后路手术内固定方式主要有:棘突钢丝或椎板夹固定、Luque 棒或环固定及颈椎侧块螺钉固定等,但其均存在生物力学稳定性差的缺点。自 1994 年颈椎椎弓根螺钉内固定技术的应用被报道以来[4],它以其独特的三维立体稳定优势,在临床应用越来越广泛。

3.1 下颈椎椎弓根置钉技术

下颈椎椎弓根螺钉内固定技术由于相关解剖结构复杂,椎弓根毗邻重要神经血管,技术难度相对较高,容易引起多种并发症[5-6]。目前常用的置钉方法主要有 Abumi 法[4]、解剖标志定位法、椎板开窗法和导航引导法等。对于上述方法的置钉准确性,不同的学者得出的结论不同。Miller 等[7]研究发现,Abumi 法的准确性高于解剖标志定位法。一些学者[8-9]利用计算机三维导航法对患者进行了置钉,结果显示置钉准确性令人满意。Ludwig 等[10]分别利用解剖标志定位法、椎板开窗法和计算机导航法对尸体颈椎标本进行了置钉比较,结果显示导航法的准确性较前两种方法要高。Liu 等[11]还使用 Abumi 法与计算机导航法作对比研究,结果显示两种方法的准确性分别为 88% 和 82%,二者无统计学差异,他们得出计算机导航法并不比 Abumi 手法置钉的准确率高的结论。但是,其他的临床应用均报道导航技术降低了置钉过程中椎弓根壁的损伤率[12-13],验证了该技术的有效性。计算机导航技术可以根据椎弓根形态选择螺钉型号和置入角度,使置钉过程变得直观,降低螺钉置入的危险性,但是该技术也存在一些缺点:术前采集的影像资料要求较高,并且与术中实际情况可能存在差异,导致置钉失败;术中设备一旦出现故障将不能继续使用;设备昂贵,不易大规模推广。由于解剖学上的个体差异,要求在置钉点和置钉方向的选择上不能千篇一律,而应考虑置钉的个体化。本研究利用 Mimics 软件和脊柱模型进行个体化置钉,为下颈椎椎弓根螺钉的置入提供了一种新方法。该方法与前述方法不同之处在于它既不过分依赖术中对于解剖标志的显露,不需作不必要的椎体后方软组织及骨性稳定结构的破坏;也不依赖术中对于昂贵的影像学设备的运用,在中小型医院也能开展。对于手术医生而言只需要在术前仔细测量置钉参数并制作个体化脊柱模型,因此临床应用方便可靠、定位准确、费用低廉、缩短了手术时间,同时真正做到了个体化,而不是依靠个人经验。利用该方法,我们在标本上置钉 148 枚,140 枚完全在椎弓根内,8 枚稍胀破外侧皮质,无直接穿破皮质进入椎管或椎动脉孔的情况出现,成功率达 94%,可以看出其准确率明显高于以往置钉方法。2 位临床患者置钉 10 枚,术后影像学结果显示位置均良好,螺钉长度、直径合适。当然,该手术方法在临床上还处于探索阶段,临床运用的病例数少,随访时间短,目前还不足以充分证明其优点。随着运用的深入、范围的扩大、时间的延长,可能会遇到一问题 ,我们将对患者长期追踪、总结、适时调整。

3.2 Mimics 在个体化置钉方案设计中的应用

下颈椎解剖结构独特,椎弓根变异性大且毗邻椎动脉和脊髓等重要组织,尤其是 C_3 椎弓根最为细小,导致置钉危险性增高。因此,临床上必须强调对患者进行术前测量,做到手术设计的个体化,提高置钉准确性。成功的椎弓根螺钉置入由 3 个方面决定:进钉点定位、适当的置入角度以及适当的螺钉直径与长度。在本研究中,利用 Mimics 软件对椎体进行三维重建并通过椎弓根相关指标的测量能快速准确地设计个体化置钉参数。考虑到 CT 机性能、扫描参数、Mimics 软件的重建精度等因素均可能影响三维重建的质量,而个体化置钉参数都源自于对重建图像的测量结果,所以必须保证三维重建图像的精确性。在我们先前的研究中[14],已经证实了利用 Mimics 建立的三维重建图像与实际标本间的椎弓根数据并无统计学差异。因此,利用 Mimics 对椎体进行三维重建,可以准确地反映标本的实际解剖结构,用其来设计个体化置钉方案是完全可靠的。在 Mimics 中能对三维重建图像进行任意角度地旋转和透明化处理,便于更好地观察椎弓根走行。在软件的 CAD 模块中能标记出三维图像的椎弓根轴线,再通过模拟手术功能沿轴线对椎弓根进行切割,可观察到轴线在椎弓根中的具体位置,最后通过调整使其处于最佳位置。该轴线与侧块后方骨皮质的交点即为个体化进钉点。笔者通过测量发现,$C_3 \sim C_7$ 的椎弓根宽度均小于椎弓根高度,因此螺钉的直径必须小于椎弓根宽度的测量结果。研究[15]显示,$C_3 \sim C_7$ 椎弓根最窄处内侧骨皮质厚度(1.65 mm)大于外侧骨皮质厚度(0.65 mm),因此将椎弓根宽度测量值减去约 1.5 mm 定为螺钉直径参考值可保证置钉时螺钉能够进入椎弓根骨皮质,以获得最佳的生物力学稳定性。而为了进一步保证置钉安全性,最终选取稍小于该参考值的螺钉规格作为个体化螺钉直径。在确定螺钉长度时,将椎弓根轴线的总长度减去轴线在椎体内长度的 1/2 即为螺钉长度。该长度可以避免螺钉过长穿出椎体损伤周围重要组织,且不会影响螺钉的强度,因为椎弓根螺钉的稳定性主要依赖于椎弓根部分骨质[16]。其次,通过测量轴线的内倾角和头/尾倾角即可确定螺钉的个体化置入角度。因为椎弓根的内侧骨皮质较外侧骨质厚,导致置钉时容易穿破椎弓根外侧,所以实际置钉时一定要注意内倾角宁大勿小。此外,利用 Mimics 的相关功能在重建图像上进行虚拟置钉还可进一步提高个体化置钉参数的准确性。

3.3 脊柱模型在个体化置钉中的辅助作用

利用基于离散、堆积成型原理的快速成型(RP)技术,能在计算机控制下根据 CT/MRI 影像学资料制作出患者的脊柱实体三维模型。Guarino 等[17]的研究表明脊柱实体模型对于术前规划和术中操作,十分有用。目前,脊柱模型在脊柱外科中,已广泛应用于术前规

划、手术操作以及内固定装置的制定[18-19]。脊柱手术中,实体模型能够提供比 CT 和 X 线平片等医学影像资料更详细的解剖学信息[13]。虽然 CT 三维重建图像能展示椎体的各个部位,但最终还是以二维图像的形式呈现,缺乏实体模型的直观感、可触摸性和可视性。在本研究中,因下颈椎三维重建图像和实物模型均能准确反映椎弓根解剖形态[14],故可在重建图像的进钉点设计完成后,通过二者的比对直接将进钉点标记在实体模型上。实际置钉时,仅需暴露椎体后缘的相应部分,通过与实物模型比对,即可方便地确定进钉点。并且,术前还可以通过测量进钉点到侧块外缘和下缘的距离,对其进行定位,以进一步确保进钉点的准确性。D'Urso 等[20]利用脊柱实体模型进行了椎弓根螺钉置入手术,认为术中通过比较手术椎体和模型的解剖结构,能容易地确定进钉点。作者认为利用本法置钉较目前的其他置钉方法有明显优势,首先,手术暴露范围较小,不需借助其他解剖结构定位,从而减少术中出血,降低手术难度和风险;其次,对于部分失去了正常颈椎解剖结构的特殊病例,如颈椎畸形、骨折脱位、骨质病理损害等,无法用传统方法确定进钉点,置钉角度很难掌握,此时脊柱实体模型的直观效果能让术者在术前就作好充分准备,制定不同的应对方案,且在术中也能给术者实际操作提供巨大帮助;再次,利用本方法术前即能在脊柱模型上确定进钉点并根据椎弓根个体化角度置入导向针,术中将已置入导向针的脊柱模型放置于与椎体相同的方向,通过术者术中即时的比对,能够对置钉角度提供直观和可视性的指导。此外,相比于仅依靠根据术前测量结果进行个体化置钉的方法,带导向针的实体模型还能提供参照平面,确保置钉能够按照个体化方案进行。

本研究应用 Mimics 软件和脊柱模型探讨了一种新的下颈椎椎弓根钉个体化置入方法,该方法在术前和术中能准确地指导个体化置钉,提高了置钉成功率,但它目前尚处于临床运用的初步阶段,其实用性尚需进一步验证。

参考文献:

[1] 罗飞, 许建中, 王序全, 等. 三种颈椎前路内固定装置对术后脊柱稳定性的作用[J]. 中国临床康复, 2003, 7(20): 2830-2831.

[2] Liu G Y, Xu R M, Ma W H, *et al*. Biomechanical comparison of cervical transfacet pedicle screws versus pedicle screws[J]. Chin Med J (Engl), 2008, 121(15): 1390-1393.

[3] Abumi K, Ito M, Sudo H. Reconstruction of the subaxial cervical spine using pedicle screw instrumentation[J]. Spine (Phila Pa 1976), 2012, 37(5): E349-E356.

[4] Abumi K, Itoh H, Taneichi H, *et al*. Transpedicular screw fixation for traumatic lesions of the middle and lower cervical spine: description of the techniques and preliminary report[J]. J Spinal Disord, 1994, 7(1): 19-28.

[5] Gautschi O P, Schatlo B, Schaller K, *et al*. Clinically relevant complications related to pedicle screw placement in thoracolumbar surgery and their management: a literature review of 35, 630 pedicle screws[J]. Neurosurg Focus, 2011, 31(4): E8.

[6] Nakashima H, Yukama Y, Imagama S, *et al*. Complication of cervical pedicle screw fixation for nontraumatic lesion: a multicenter study of 84 patients[J]. J Neurosurg Spine, 2012, 16(3): 238-247.

[7] Miller R M, Ebraheim N A, Xu R, *et al*. Anatomic consideration of transpedicular screw placement in the cervical spine. An analysis of two approaches[J]. Spine (Phila Pa 1976), 1996, 21(20): 2317-2322.

[8] 田伟, 刘亚军, 刘波, 等. 计算机导航系统和 C 臂机透视引导颈椎椎弓根螺钉内固定技术的临床对比研究[J]. 中华外科杂志, 2006, 44(20): 1399-1402.

[9] Ito Y, Sugimoto Y, Tomioka M, *et al*. Clinical accuracy of 3D fluoroscopy-assisted cervical pedicle screw insertion[J]. J Neurosurg Spine, 2008, 9(5): 450-453.

[10] Ludwig S C, Kramer D L, Balderston R A, *et al*. Placement of pedicle screws in the human cadaveric cervical spine: comparative accuracy of three techniques[J]. Spine (Phila Pa 1976), 2000, 25(13): 1655-1667.

[11] Liu Y J, Tian W, Liu B, *et al*. Comparison of the clinical accuracy of cervical (C2-C7) pedicle screw insertion assisted by fluoroscopy, computed tomography-based navigation, and intraoperative three-dimensional C-arm navigation[J]. Chin Med J (Engl), 2010, 123(21): 2995-2998.

[12] Zhang H L, Zhou D S, Jiang Z S. Analysis of accuracy of computer-assisted navigation in cervical pedicle screw installation[J]. Orthop Surg, 2011, 3(1): 52-56.

[13] Gelalis I D, Paschos N K, Pakos E E, *et al*. Accuracy of pedicle screw placement: a systematic review of prospective *in vivo* studies comparing free hand, fluoroscopy guidance and navigation technique[J]. Eur Spine J, 2012, 21(2): 247-255.

[14] 刘洋, 权正学, 覃炜, 等. Mimics 及快速成型技术在寰枢椎椎弓根个体化置钉中的应用[J]. 中华创伤杂志, 2010, 26(9): 817-821.

[15] 解京明, 张漾杰, 鲁宁, 等. 下颈椎经椎弓根螺钉内固定相关解剖学观察[J]. 脊柱外科杂志, 2006, 4(6): 354-358.

[16] Ito Z, Higashino K, Kato S, *et al*. Pedicle screws can be 4 times stronger than lateral mass screws for insertion in the midcervical spine: a biomechanical study on strength of fixation[J]. J Spinal Disord Tech, 2012, [Epud ahead of print].

[17] Guarino J, Tennyson S, McCain G, *et al*. Rapid prototyping technology for surgeries of the pediatric spine and pelvis: benefits analysis[J]. J Pediatr Orthop, 2007, 27(8): 955-960.

[18] Mizutani J, Matsubara T, Fukuoka M, *et al*. Application of full-scale three-dimensional models in patients with rheumatoid cervical spine[J]. Eur Spine J, 2008, 17(5): 644-649.

[19] Yamazaki M, Okawa A, Akazawa T, *et al*. Usefulness of 3-dimensional full-scale modeling for preoperative simulation of surgery in a patient with old unilateral cervical fracture-dislocation[J]. Spine (Phila Pa 1976), 2007, 32(18): E532-E536.

[20] D'Urso P S, Williamson O D, Thompson R G. Biomodeling as an aid to spinal instrumentation[J]. Spine (Phila Pa 1976), 2005, 30(24): 2841-2845.

(**收稿**:2012-03-05;**修回**:2012-04-09)

(编辑 王 红)