

综述

三维可视化技术在腰骶神经根成像中应用的进展

Advances in the application of 3D visualization technique in lumbosacral nerve root imaging

李小龙, 尹 飞

(吉林大学中日联谊医院骨科 130033 吉林省长春市)

doi: 10.3969/j.issn.1004-406X.2019.11.13

中图分类号: R455 文献标识码: A 文章编号: 1004-406X(2019)-11-1038-04

正常成人的腰神经根从硬膜囊穿出后在神经通道里向外下斜向走行一段距离,最后紧贴上半椎间孔出孔,神经根与硬膜囊之间的夹角(根囊角)逐渐减小,从 L1~L5 的腰神经根在其通道中的行程从上至下逐渐变长,且直径逐渐增粗,下腰神经根更靠近其上上位椎弓根的下缘,因此 L4~S1 神经根容易在脊神经通道内受到卡压,脊神经通道上发生任何改变,比如椎间盘突出、侧隐窝狭窄、硬脊膜粘连、骨质增生、神经根血供障碍等,都会引起脊神经通道结构的变化,从而导致直接或间接的脊神经压迫并引起腰部疼痛和/或下肢放射痛等临床表现^[1]。由于腰骶神经根自身的复杂解剖,以及周围血管、淋巴等的干扰,常规检查不能清晰且直观地显示其形态及受压后的变化^[2]。大多数的影像学检查虽能很好地显示椎管内部神经或能全部显示神经根的形态,但神经通道内神经根的某些细小结构及其相关变化还是不能被很好地显示,或只能局部显示其节后段的一般形态^[3]。因此,怎样才能使腰骶神经根的成像效果更好,是近年来研究的热点。腰骶神经根三维可视化的研究不仅有利于腰椎间盘突出症、腰椎管狭窄症诊疗理念的更新,而且有利于腰骶神经根病变诊疗手段的完善,还对相关学科的研究与教学新方法等具有重要价值。以前,大多数关于人体器官三维可视化的研究主要集中在头部和颈部^[4],而对周围神经、血管、小肌肉等研究相对较少。近年来,周围神经的三维重建及可视化技术进入了一个崭新的研究阶段,在疾病的诊疗过程中取得了一些进展,与其他的相比更能反映神经的真实情况,其研究对象广,整合分析信息比较简单,可以对神经进行“全方位”的展示,为影像诊断、治疗方案和手术方式的选择提供依据。现将目前腰骶神经根在 CT、MRI 中三维重建成像主要方式的有关文献综述如下。

1 腰骶神经根在 CT 中的三维成像

利用 CT 的原始数据导入计算机,应用三维重建软件

建立三维可视化模型,重建的解剖结构清晰逼真,可以任意组合显示,并可随意放大、缩小、旋转等,从而能从多角度、多视野观察、理解和测量人体各解剖结构及数据^[5]。陆声等^[6]使用“虚拟中国人”1 号女性数据集,在三维重建软件的帮助下,对腰丛及周围组织进行了三维可视化模型的重建,该模型清晰、完整地显示了腰丛神经及其主要分支与腰大肌、椎体、主要血管之间的关系,为腰丛的解剖学位置和腰椎手术提供了良好的形态学基础。于鹏辉等^[7]对 30 例健康成人腰骶部进行 CT 连续断层扫描,将扫描数据集通过相应平台导入 Mimics 软件并进行三维重建,可以清楚展示腰骶神经根及主要毗邻结构的形态和空间位置关系,为临床腰椎间盘手术提供了主要数据参考。李林宏等^[8]对 1 例正常男性志愿者的腰段进行连续 CT 薄层扫描,应用 Mimics 软件对扫描数据进行三维重建,重建的模型中,解剖结构清晰,骨性结构与相关软组织形态逼真,容易辨认圆盘状的椎间盘、“V”型的黄韧带和从椎间孔上分穿出的神经根,为定性观察和定量观测相关形态结构以及虚拟仿真手术奠定了基础。杨波等^[9]通过 Photoshop 软件将处理过的 L4 椎体至 L5 椎体的连续断层图像导入 Mimics 软件中,重建了腰椎三维模型,清晰真实地显示了 L4~L5 椎体与附近脊髓和神经根、腹主动脉、腰大肌等组织的关系。但在 CT 三维条件下重建的周围神经仍有不足之处,如成像参数较单一,对软组织分辨率较低,对建好的三维图像空间整体感较差,对微小血管的显示效果不好等,但是基本上可以排除软组织对成像的影响,可使腰骶神经的组织结构较清晰,整体效果较好,可为临床医师提供更好的可视化解剖学资料,有较为广泛的应用前景^[8,10,11]。

2 腰骶神经根在 MRI 中的三维成像

由于腰骶神经根复杂的三维表面结构及毗邻关系,CT 脊髓造影对判断神经根病变的价值是有限的,不能准确地检测到整个神经根^[12];单纯 CT 尽管在鉴别骨刺或椎间孔的侵犯程度或后纵韧带骨化程度方面是有用的,但成像参数单一,且对软组织的对比分辨率欠佳,从而在神经成像上有很大的限制并且难以在单一平面内完美显示^[13]。

第一作者简介:男(1990-),硕士研究生,研究方向:脊柱外科

电话:(0431)89876922 E-mail:502063316@qq.com

通讯作者:尹飞 E-mail:yinfei999@jlu.edu.cn

MRI在这方面就有较好的优势,如非侵入性,无电离辐射,软组织分辨率高以及多平面、多参数成像等,是神经根病患者的首选检查方法^[14],但尚无明确的神经根检测指南,且各医院对神经根的 MRI 显像也不尽相同。传统的脊柱 MRI 序列对于在腰神经通道内的精细结构仍不能良好显示,缺乏直观性,且显示的神经根形态学改变与其损伤的程度、临床症状和特征并不完全相符^[15],故仅行常规 MRI 序列扫描对腰骶神经根变异的观察是不够的,缺乏客观定量的评估,需要结合更好的方法来完成成像,具体有如下方法。

2.1 重 T2 加权脂肪抑制成像技术

神经纤维内外各种微结构含水量的差异是重 T2 加权脂肪抑制成像技术的基础。由于神经纤维束内膜中的液体和神经外部及内部神经束间的脂肪均可在 T2WI 上显示且都表现为高信号,必须通过脂肪抑制技术去掉这些多余的脂肪信号才可得到神经纤维束的 T2 加权像^[16]。近年来,随着短时间反转恢复序列(STIR)脂肪抑制技术、敏感编码并行采集(SENSE)技术、三维高分辨率成像技术等的发展和运用以及 MRI 设备的不断更新换代,使得该类序列的分辨率、显示评分及信噪比都有较好的表现^[17,18]。孙莉华等^[19]分别将 10 例健康志愿者和 40 例腰腿痛患者设为对照组和观察组,两组成员接受具有 8 通道全脊柱相控阵靶线圈的 Discovery MR750 3.0T 磁共振设备对腰骶神经根迭代最小二乘估算法水脂分离(IDEAL)序列冠状位薄层和常规序列(矢状位的 T1WI 和 T2WI 及横轴位的 T2WI)扫描,再将获得的图像在 ADW4.5 工作站中进行最大信号强度投影(MIP)及曲面重建(CPR),对重建的腰骶神经根仔细观察,显示其走向全程及形态结构,认为 IDEAL 序列不仅可以显示腰骶神经根与邻近结构之间的关系和受压特点,而且可以准确定位压缩的神经根并评估压缩程度(图 1)。他们通过研究,总结归纳了在 IDEAL 序列中神经根受压的主要影像学表现是局部受压缺损样压迹和局部脑脊髓间隙的变窄或消失,除此之外,还有神经根的抬高、移位等走行的改变,神经根局部肿胀、增粗等形



图 1 患者 34 岁,IDEAL 序列腰骶神经冠状位成像结合三维 MIP 重建能在同一层面清晰显示 L1~S1 水平腰骶神经全程走行

态的改变以及神经根局部粘连、边缘模糊等与周围组织分界不清。IDEAL 序列对受压神经根的成像具有一定的临床诊断价值,可为临床早期治疗提供正确的方案。

2.2 磁共振神经成像技术

磁共振弥散张量成像(DTI)是在磁共振弥散加权成像(DWI)的基础上发展起来的一种新型的磁共振功能成像技术,不仅可以非侵入性地检测活体神经组织的微观结构,而且可以实现神经纤维的定量分析和功能成像。DTI 是以三维立体角度分解、量化弥散各向异性信号数据,至少需要 6 个方向上的弥散敏感梯度,方向越多,感受到的扩散运动方向就越多。DTI 的量化参数有很多,但临床上使用较多的量化参数是部分各向异性系数值(FA 值)与表观弥散系数值(ADC 值)。FA 值是水分子的各向异性分量与总弥散张量的比值,范围从 0 到 1,当 FA 值接近 0 时,如脑脊液,各向异性最小,意味着弥散运动不受限;而当 FA 值趋于 1 时,如神经纤维等按方向高度排列组织,各向异性最大,弥散运动受到限制。将 DTI 原始数据拟合 FA 值作为图像信号强度来获得 FA 图,其能直接反映水分子弥散各向异性的程度,如在 FA 图中,脑脊液具有最低程度的各向异性,它们的信号是低信号;脑白质具有最高程度的各向异性,它们的信号是高信号。ADC 值是指在 MR 成像体素中水分子所有方向上的扩散强度的平均值,它代表了成像体素内弥散的程度或大小,反映了单位时间内水分子的弥散范围,其值越大,意味着水分子具有较强的扩散能力。通过使用 ADC 值作为图像信号强度可获得 ADC 图,其可以直接反映水分子在组织中的扩散速率,速率越快,ADC 值越大,ADC 图信号就越强。如在 ADC 图中,脑脊液是高信号,而脑白质是低信号,正好与 FA 图信号相反^[20]。通过计算机软件重建 DTI 图像以获得多平面重建图(MPR),其中沿神经根走行的冠状位可显示出最佳的神经根形态学效果,它可清楚地显示硬膜囊及神经根形状,以及不同平面的正常腰骶神经根的解剖结构^[21]。

Budzic 等^[22]的研究证明,卡压神经组织水肿后,其组织弥散张量图像中的弥散系数显示出更高的各向同性,这降低了 FA 值并增加了 ADC 值。Balbi 等^[23]将 DTI 技术应用于腰骶神经根检查,发现神经根在受压与不受压情况下弥散参数的差异具有统计学意义,认为 DTI 在活体腰骶神经根中的应用是可行的,并提出了 DTI 可用作定量评估神经根受压的指标。肖文丰等^[24]分别对 10 名健康志愿者和 32 名腰骶丛神经病变患者进行常规扫描序列、三维快速自旋回波短时反转恢复序列成像(3D SPACE STIR 序列)和 DTI 序列扫描,在所有志愿者中,L1~S1 腰骶神经根 3D SPACE STIR 序列均得到清晰显示,其具有较好的组织对比,且图像可用来作为测量 DTI 数据的 FA 值及 ADC 值的高分辨率蒙片(与普通平片图像完全相同,而密度相反的图像),两种序列的结合使用,可以更好地评估神经压迫位置及其神经受侵犯的程度。

神经纤维束示踪成像(DTT)是在 DTI 的基础上发展

起来的,是一种新型的神经纤维磁共振弥散成像技术,是当前显示活体纤维束最有效的方法。在神经根损伤后的早期,可能神经根的大体形态还未发生明显变化,它可基于神经纤维束内水分子弥散的各向异性特征,并通过计算机软件重建获得神经纤维束的三维图像,获得相关参数的变化,为神经根病变的早期诊断、早期治疗带来方便^[25]。

Eguchi 等^[26]利用 DTT 成像技术分别对 8 名健康志愿者和 8 例因腰椎间盘突出压迫腰骶神经根的患者进行三维立体成像并获得 FA 值,结果表明,病变神经根的 FA 值明显低于正常神经根,提出 DTT 可作为神经根受压的量化指标。李丽艳等^[27]对 20 例正常成人志愿者腰部进行 3.0T 多元磁共振检查,并使用 DTI 融合图像及选择性激励技术(PROSET),分别在 L4、L5、S1 神经根左右两侧三个不同水平(节前神经根鞘硬膜囊出行处、神经节和节后脊神经前支椎间孔外口处)测量 FA 值和 ADC 值,同时进行神经根 DTT,成功获得了 DTI 和 DTT, L4、L5、S1 神经根被清晰显示(图 2),通过观察分析,他们得到了同一神经根三个不同水平的 FA 值、ADC 值差异有统计学意义,且 FA 值从节前到节后呈升高的趋势,ADC 值变化趋势相反;另外,各神经根 ADC 值除节前水平差异无统计学意义外,其他水平神经根之间的 FA 值、ADC 值有统计学意义,且 FA 值变化呈 L4>L5>S1,ADC 值与之相反。说明运用磁共振进行腰骶神经根 DTI 及 DTT 成像是可行的,与 PROSET 融合,能够清晰显示神经根的走行,还能进行准确解剖定位和量化分析,为病变神经根的研究提供了良好的形态学信息。然而,由于神经根周围组织的影响且弥散张量成像对磁场不均匀性比较敏感,最终所得的图像在质量上与神经根三维重建成像结果不太理想,需要进一步研究。总的来说,随着 MR 技术的不断进步,DTI 成像技术的应用前景将会更加广阔。

2.3 腰骶神经根三维 MRI/CT 融合成像

近年来,随着三维融合技术的发展,Mimics 技术因具有交互式查看和分离 CT 图像、MRI 图像及三维透视图像

的功能,可以从多角度观察,对不同组织进行着色,为临床医师提供直观清晰的三维立体图,从而可以更确切定位病变部位,提高诊疗水平^[28]。脊髓神经根三维 MRI/CT 融合图像的制作一般需要 5 步:(1)CT 数据与 MR 数据的配准;(2)三维 CT 图像中椎体的分离;(3)对脊髓神经根在三维 MR 图像上的映射;(4)对三维 MR 图像中不使用造影剂和使用造影剂的椎静脉丛(VVPs)进行识别;(5)使用计算机工作站进行最终叠加。Kamogawa 等^[29]在 2009 年首次报道了颅-椎交界处的三维 MRI/CT 融合图像;随后将该技术运用到颈椎和腰椎,如应用三维 MRI/CT 融合成像技术对 3 例因受压变扁或扭曲的颈神经根进行三维重建与可视化,从而可得到清晰细致的颈神经根三维图像。Yamanaka 等^[30]用三维 MRI/CT 融合成像技术将骨的三维 CT 与马尾和神经根的三维 MRI 相结合,明确了神经根的病理性态和黄韧带的增厚以及背根神经节的位置、形式和数量;除此之外,椎间盘、骨刺和神经根之间的位置关系也可以被描绘出来,他们利用三维 MRI/CT 融合成像技术对腰椎区域进行三维成像,成功地展示了骨排列与神经结构的关系。Mimics 三统融合技术可以对 CT 和 MRI 图像进行全方位融合,较单纯的 CT、MRI 图像具有立体化、多色彩显示病变组织及周围关系的优点,可以为手术提供空间信息的可视化,从而对病变组织精确量化,方便临床诊疗。

3 小结与展望

数字化虚拟腰骶神经根研究的一个重要部分是三维重建和可视化,即在 Mimics 等三维重建软件的应用中,建立一个具有三维立体空间的腰骶神经根模型,这种模型可在各个方向上旋转,并且能够从多角度观察,并可实现实时三维测量和多重显示等功能,为全面准确地了解神经根形态变化、空间位置及其在临床诊疗中的应用提供直观可靠的形态学基础。总结归纳相关研究,与常规的影像学检查相比,神经根的三维可视化技术有以下优点:(1)可以准确识别神经根及其神经干的延续,并可克服传统 CT 和 MRI 仅在神经横截面或斜截面上显示而引起的认定困难;(2)不仅可以显示神经的整体形态和位置关系,还可以观察到诸如神经的开始、结束及走行等形态学表现,比单一的横截面或斜截面所涵盖的信息量大,因此显得真实、具体、可靠等;(3)可以扩延神经根及其神经干和分支的延续,以便更多更好地了解其路径,提高手术成功率,降低手术并发症和手术风险;(4)能更好地显示神经的路径解剖,也就是说,神经周围存在一些特征性的解剖学结构,并且它们在一定程度的重建中看起来是恒定的,这种特征性的解剖形式被称为“道路标志”,这种“标志”不仅有利于在重建过程中找到理想的解剖水平,还可以检测神经病变的异常表现,从而为早期诊断提供依据。(5)可在三维可视化中量化分析神经根或干的粗细、长短、走行、角度以及与周围组织的距离,以指导实际的手术过程。三维可视化技术经历了从平面到立体、从静态到动态的解剖模式,今后会有

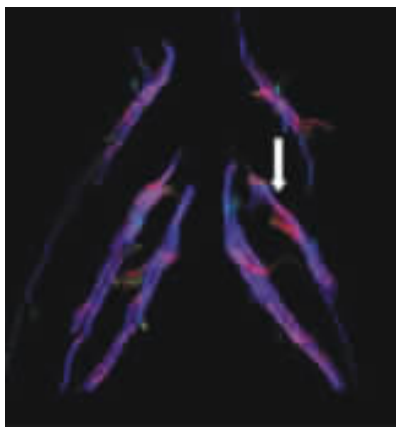


图 2 患者 41 岁,L4/5 椎间盘左后突出,L5/S1 椎间盘后正中突出,前后位左侧 L5 纤维束示踪可见左侧 L5 神经根出现局部缺失,呈“压迹”改变

更多的其他结构的可视化三维模型的建立,这对帮助临床教学训练、改进与创新脊柱外科手术方案、提高脊柱外科手术水平与临床诊疗水平等方面具有重要作用。目前,腰骶神经根的三维可视化技术仍在发展之中,许多方面还不成熟,与真实的人体结构仍有很大差距,还需进一步完善。

4 参考文献

- 李丽艳,周顺科,郭云志,等. 正常成人腰神经根解剖结构的 MR 研究[J]. 中国医学计算机成像杂志, 2014, 20: 161-164.
- Chhabra A, Zhao L, Carrino JA, et al. MR neurography: advances[J]. Radiol Res Pract, 2013, 2013: 809568.
- 王青云,谭琦瑄,陶仪德,等. 3D FS-nSSFP 和 PROSET 序列腰骶脊神经根成像对比分析[J]. 实用放射学杂志, 2013, 29(4): 638-640, 657.
- 李琛,穆志纯,张锋,等. 基于三维人耳形变模型的三维人耳重建[J]. 工程科学学报, 2013, 35(5): 694-702.
- 王娇,刘洋,张晓玲,等. Mimics 软件在医学图像三维重建中的应用[J]. 医疗卫生装备, 2015, 36(2): 115-118.
- 陆声,徐永清,张元智,等. 腰丛神经的数字化解剖及临床意义[J]. 解剖与临床, 2007, 12(8): 233-235.
- 于鹏辉,伍修宇,李俏,等. 腰神经根及主要毗邻结构的 CT 解剖学研究及三维构建[J]. 局解手术学杂志, 2017, 26(8): 564-567.
- 李林宏,钱学华,周庭永,等. 1 例脊柱腰段的三维重建可视化及有限元研究[J]. 中国急救医学, 2017, 37(z1): 295-296.
- 杨波,方世兵,唐雷,等. 数字化虚拟腰椎的三维重建及可视化研究[J]. 中华骨科杂志, 2013, 33(1): 71-75.
- 李光,王冰,吕国华,等. 成人下腰椎神经根与椎板骨窗之间 CT 容积再现技术成像特点与意义[J]. 中国脊柱脊髓杂志, 2013, 23(1): 42-46.
- 彭建鸿,王磊,黄自立,等. 第 5 腰神经病变 HRCT 重建同层显示的初步探讨[J]. 武警医学, 2014, 25(11): 1135-1138.
- 宋海峰,邱贵兴,吴志宏,等. 脊髓造影与 CT 脊髓造影对退行性腰椎侧凸性椎管狭窄的诊断价值 [J]. 中国组织工程研究, 2008, 12(13): 2455-2458.
- Jia L, Yu Y, Khan K, et al. Superior facet joint violations during single level minimally invasive transforaminal lumbar interbody fusion: a preliminary retrospective clinical study[J]. BioMed Res Inter, 2018, 2018: 1-7.
- Pfarrmann CWA, Dora C, Schmid MR, et al. MR image-based grading of lumbar nerve root compromise due to disk herniation: reliability study with surgical correlation[J]. Radiology, 2004, 230(2): 583-588.
- Wu W, Liang J, Chen Y, et al. Microstructural changes are coincident with the improvement of clinical symptoms in surgically treated compressed nerve roots[J]. Sci Rep, 2017, 7: 44678.
- Viallon M, Vargas MI, Jlassi H, et al. High-resolution and functional magnetic resonance imaging of the brachial plexus using an isotropic 3D T2 STIR(short term inversion recovery) SPACE sequence and diffusion tensor imaging[J]. Eur Radiol, 2008, 18(5): 1018-1023.
- Faridian-Aragh N, Chalian M, Soldato T, et al. High-resolution 3T MR neurography of radial nerography[J]. J Neuroradiol, 2011, 38(5): 265-274.
- Vargas MI, Viallon M, Nguyen D, et al. New approaches in imaging of the brachial plexus[J]. Eur J Radiol, 2010, 74(2): 403-410.
- 孙莉华,宋云龙,毕永民,等. 3.0T MR IDEAL 序列成像应用于腰骶神经根受压的初步临床研究 [J]. 临床军医杂志, 2015, 43(3): 285-289.
- 王红,马景旭,贾文霄,等. 弥散张量成像 FA 值和 ADC 值在颅内肿瘤病变中的应用[J]. 磁共振成像, 2012, 3(2): 136-140.
- Shiraishi A, Miyabe S, Nakano T, et al. The combination therapy with alfacalcidol and risedronate improves the mechanical property in lumbar spine by affecting the material properties in an ovariectomized rat model of osteoporosis [J]. BMC Musculoskeletal Disorders, 2009, 10: 66.
- Budzik JF, Vercllyte S, Lefebvre G, et al. Assessment of reduced field of view in diffusion tensor imaging of the lumbar nerve roots at 3T[J]. Eur Radiol, 2013, 23(5): 1361-1366.
- Balbi V, Budzik JF, Duhamel A, et al. Tractography of lumbar nerve roots: initial results[J]. Eur Radiol, 2011, 21(6): 1153-1159.
- 肖文丰,黄莹,许蕾,等. 3D SPACE STIR 结合 DTI 显示腰骶神经根病变的研究[J]. 医学影像学杂志, 2015, 25(9): 1537-1540.
- Dallaudiere B, Lincot J, Hess A, et al. Clinical relevance of diffusion tensor imaging parameters in lumbar disco-radicular conflict[J]. Diagn Interv Imaging, 2014, 95(1): 63-68.
- Eguchi Y, Ohtori S, Orita S, et al. Quantitative evaluation and visualization of lumbar foraminal nerveroot entrapment by using diffusion tensor imaging: preliminary results[J]. Am J Neuroradiol, 2011, 32(10): 1824-1829.
- 李丽艳,赵伟,褚丽娟,等. 正常成人腰骶段神经根的磁共振弥散张量成像定量分析 [J]. 中国医学计算机成像杂志, 2018, 24(1): 63-67.
- 王财,瞿述根,王晓莉,等. MRI 与 CT 图像融合技术在前列腺癌调强放疗中的应用[J]. 实用临床医学, 2015, 16(7): 82-84.
- Kamogawa J, Kato O, Morizane T, et al. Virtual pathology of cervical radiculopathy based on 3D MR/CT fusion images: impingement, flattening or twisted condition of the compressed nerve root in three cases[J]. Springerplus, 2015, 4: 123.
- Yamanaka Y, Kamogawa J, Katagi R, et al. 3-D MRI/CT fusion imaging of the lumbar spine[J]. Skeletal Radiol, 2010, 39(3): 285-288.

(收稿日期:2019-05-22 末次修回日期:2019-09-09)

(本文编辑 卢庆霞)