

· 临床研究 ·

基于CT/MRI融合医学影像数据的全腰椎三维解剖计算机辅助建模

蒋 琥¹, 凌 辰¹, 王宇丰^{1,2}, 张 珀^{1,2}, 顾 越¹, 张惠康², 徐 燕³, 王黎明^{1,2,3}, 姚庆强^{1,2,3*}¹南京医科大学附属南京医院骨科, ²江苏省数字医学与3D打印临床工程研究中心, ³南京医科大学数字医学研究所, 江苏南京 210006

[摘要] 目的:采用CAD技术拟合三维CT扫描数据、薄层MR数据,以重建包括椎体、椎间盘纤维环、髓核等重要软硬组织解剖结构信息的全腰椎三维解剖计算机模型。方法:采集1例中国男性志愿者三维CT扫描数据、薄层MR数据。扫描范围:L1~S5全节段。MRI:Spce及Stir序列,层厚0.5 mm;CT:120 kV,层厚0.75 mm,FOV矩阵512×512。CT、MR均保存为DICOM格式。将MR、CT数据分别导入Midivi医学图像处理软件,重建软、硬组织三维结构;并在其中测量椎间盘髓核、纤维环的数据。根据所得数据在Midivi中刻画髓核、纤维环的分布,并依据椎体、椎间盘解剖标志点进行配准。从而得到融合椎体、椎间盘纤维环、髓核的全腰椎三维解剖建模。结果:MR获得Spce序列470幅、Stir序列240幅,CT获得断层图像738幅。生成的椎体与骶骨的体积按顺序分别为47.49、50.92、58.95、62.86、62.60、218.85 cm³;椎间盘的体积按顺序分别为11.08、12.30、13.12、13.89、13.55 cm³;全腰椎三维模型STL数据文件238 M。结论:通过MR、CT扫描,能够分别获得高精度椎间盘(髓核、纤维环)、椎体的三维解剖数据,通过基于解剖标志点的三维MR、CT配准融合合法,能够精确地建立高精度全腰椎三维解剖模型。

[关键词] CT;MRI;计算机辅助设计;融合影像**[中图分类号]** R814.42**[文献标志码]** A**[文章编号]** 1007-4368(2022)12-1710-06

doi:10.7655/NYDXBNS20221211

Computerized modeling of 3D anatomy of total lumbar based on CT/MRI fusion medical image data

JIANG Xiaohu¹, LING Chen¹, WANG Yufeng^{1,2}, ZHANG Po^{1,2}, GU Yue¹, ZHANG Huikang², XU Yan³, WANG Liming^{1,2,3}, YAO Qingqiang^{1,2,3*}¹Department of Orthopedic, Nanjing Hospital Affiliated to Nanjing Medical University, ²Jiangsu Digital Medicine and 3D Printing Clinical Engineering Research Center, ³Digital Medicine Institute, Nanjing Medical University

[Abstract] **Objective:** To reconstruct the 3D model of the whole lumbar spine, including vertebral body, annulus fibrosus and nucleus pulposus of intervertebral disc, CAD technique was used to fit CT and thin layer of MR data. **Methods:** In this study, 3D CT scan data and thin-layer MR data were collected from a Chinese male volunteer. Scanning range: L1-S5. MRI was performed using SPCE and STIR sequences with the slice thickness of 0.5 mm. A high-resolution CT spiral scan was acquired with 120 kV radiogenic tube voltage, 0.75 mm slice thickness and 512×512 matrix. CT and MR data were stored in DICOM format and imported into MIDIVI to reconstruct the 3D structure of soft and hard tissues respectively. The data of nucleus pulposus and annulus fibrosus of intervertebral disc were measured in Midivi. According to the obtained data, the distribution of nucleus pulposus and annulus fibrosus was depicted in MIDIVI, and registration was performed according to the anatomical marks. Thus, the anatomical model of the whole lumbar spine with the fusion of vertebral body, intervertebral disc annulus and nucleus pulposus was obtained. **Results:** MR obtained 470 SPCE and 240 STIR images, and CT obtained 738 images. The volumes of the generated vertebral body and sacrum were 47.49, 50.92, 58.95, 62.86, 62.60, 218.85 cm³ respectively. The intervertebral disc volumes of L1 - S1 were 11.08, 12.30, 13.12, 13.89, 13.55 cm³ respectively. The STL data file of the full lumbar 3D model was 238 M. **Conclusion:** High - precision 3D anatomical data of

[基金项目] 国家自然科学基金(82072400);江苏省自然科学基金(BK20200001, BE2019736, BE2019679)

*通信作者(Corresponding author), E-mail:yaoqingqiang@126.com

intervertebral disc and vertebral body can be obtained by thin-layer MR and CT scanning respectively. These models can be accurately established by the fusion image based on anatomical marks.

[Key words] CT;MRI;computerized modeling;fusion image

[J Nanjing Med Univ, 2022, 42(12): 1710-1715]

随着人口老龄化、居民生活方式、习惯和环境改变,腰痛的发病率在不断上升^[1]。虽然腰椎疾病涵盖了腰椎滑脱、侧凸、退变等一系列异常,大多起始病理改变主要是腰椎间盘的退变。因此,如何在早期精准地分析腰椎间盘髓核、纤维环的变性,及评估在外力因素作用下是否导致椎间盘纤维环破裂、炎症物质释放、髓核组织脱出压迫神经,对于腰椎疾病的早期预防、评估、精准治疗都有相当重要的指导意义。

腰椎解剖的影像学检查方法众多,由于X线、椎间盘造影仅为二维成像,且提供的信息有限,目前临床主要通过计算机断层扫描(computed tomography, CT)、核磁共振(magnetic resonance, MR)成像来进行腰椎疾病的诊断^[2]。CT扫描能够提供具有较高空间分辨率的解剖数据,但其密度分辨率较低,难以对精细的软组织成分进行分析;而MR扫描能够获得较为丰富的软组织成分信息,但其空间分辨率较低,很难基于MR数据实现精细的三维解剖判断^[3-4]。因此,如何有效获得腰椎精细的三维影像解剖数据,实现对椎体、椎间盘纤维环、髓核病理状态的有效判断,成为腰椎疾病诊断、治疗的重点与难点。

本研究拟采用计算机辅助设计(computer aided design, CAD)技术,通过计算机断层扫描数据、核磁共振图像(magnetic resonance imaging, MRI)数据的有效重建与拟合,实现能够精细、完整显示包括椎体、椎间盘纤维环、髓核等重要解剖结构信息的全腰椎三维解剖计算机辅助建模。

1 材料和方法

1.1 材料

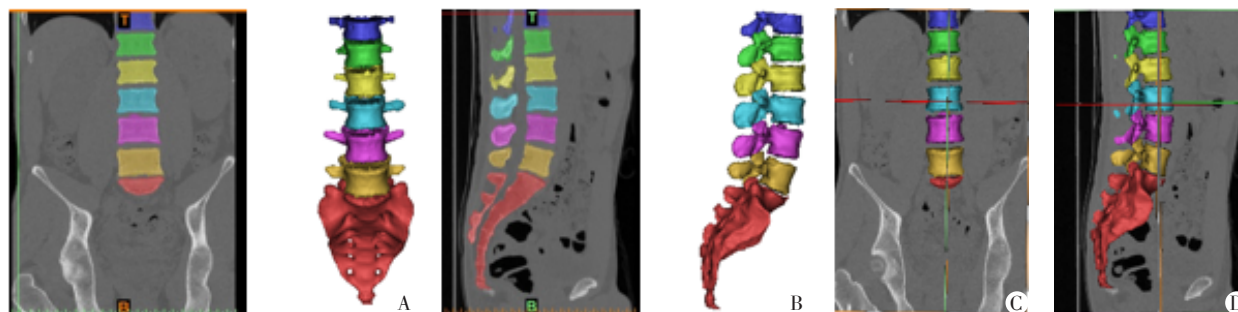
3.0 T核磁共振、双源CT(Siemens公司,德国)、医学图像处理软件(Midivi, 锦瑟, 中国)。

扫描时,采俯卧位,在保持扫描体位基本一致的情况下分别对其脊柱L1~S5节段进行扫描: MRI脉冲重复时间230 ms,回波时间225 ms,序列Spce及Stir,翻转时间220 ms,视野大小350 mm,矩阵320×320,层厚0.5 mm; CT电压120 kV,电流200mAS,矩阵512×512,层厚0.75 mm的扫描;扫描范围:由第一腰椎椎体上缘平面至骶尾骨下缘平面,共获得738幅CT图像,710幅MRI图像。生成的横断面文件保存为DICOM格式。

1.2 方法

1.2.1 CT图像模型

将CT数据图像导入Midivi中,使用profile line工具在信号强度变化较大的椎骨与软组织之间连线。使用shresholding调节强度截取的阈值,调整至合适范围。此例的阈值为135~1 624。运用region growing等工具二次选取所需区域。然后可对区域降噪和光滑处理,同时将覆盖区域根据志愿者的真实情况进行修补,此措施可以有效减少生成模型中的孔隙,同时最大限度地还原志愿者当前生理或病理情况下的腰椎节段形态。将覆盖区域调整至真实情况之后使用calculate part工具运算得到三维模型(图1)。完成后以“STL”格式导出保存。



A、B:进行光滑处理后生成的模型与图像对比;C、D:模型在图像上的对应位置。

图1 影像数据选取处理以及生成对应模型在软件中的演示

Figure 1 Image data selection, processing and generation of the corresponding model in the software

1.2.2 CT与MRI图像融合

打开CT图像数据。在image选项中的image registration中选取MRI数据导入。在CT、MRI图像中选择add point将相同生理位置的点进行标记。可以选用有特征点,并在两图中一一对应标记。完成多个点的标记后开始进行图像的配准融合。最后可以得到融合完成的CT、MRI图像。此举的目的在于统一CT、MRI数据的坐标系,使得后续配准操作成为可能。

1.2.3 融合图像的分割与建模

在融合图像中,通过edit masks、multiple slice edit等工具将椎间盘与其他组织分隔开。使之符合生理结构(图2)。然后进行区域增强、光滑等优化操作。最后同样使用calculate part工具运算得到三维模型。将完成的椎间盘三维图像以“STL”格式导出^[5]。

1.2.4 测量数据

在Midivi中导入MRI中的T2加权(T2WI)序列并测量髓核以及纤维环的各项数据,并将所得数据制成表1。在软件中通过测量数据定义髓核与纤维环的分布并将所得数据标注在模型上(图3)。

1.2.5 腰椎椎体与椎间盘模型配准

参照CT与MRI的融合图像,将保存椎间盘的

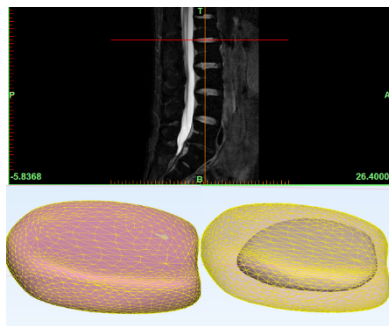


图2 L1~2椎间盘制作髓核前后的图像

Figure 2 Image of one of the discs before and after making the nucleus pulposus

表1 所得椎间盘髓核与纤维环的前后径以及左右径数据
Table 1 Anteroposterior and lateral diameters of the nucleus pulposus and annulus fibrosus of the required intervertebral discs (mm)

椎间盘	髓核		椎间盘	
	前后径	左右径	前后径	左右径
L1~2	25.9	38.0	31.4	44.3
L2~3	25.7	34.0	35.0	44.1
L3~4	27.7	34.4	35.3	46.4
L4~5	26.5	35.1	34.7	49.4
L5~S1	27.9	35.8	33.3	50.1

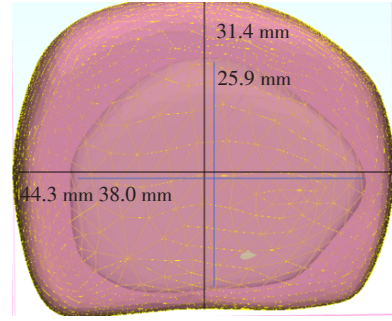


图3 医学建模软件测量图像数据所得L1~2椎间盘参数

Figure 3 L1~2 intervertebral disc parameters obtained from image data measured by medical modeling software

STL文件导入已经打开的CT图像数据的STL文件。使用align菜单中的point registration工具,选取生理情况下同一层面对应解剖标志点(图4)。

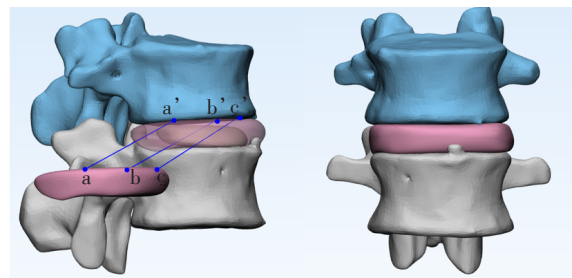


图4 椎体、椎间盘配准示意图与配准后效果

Figure 4 Vertebral body and disc registration schematic diagram and post-registration effect

同时对更多的标志点进行选取,随后进行运算,将相对应的标志点重合,通过运算得到更为精准的腰椎活动节段的三维模型。若运算后所得的三维模型仍然有误差,可以对比之前融合的图片,通过move、rotate指令进行微调,使之更加符合CT、MRI图像。

完成单个的椎间盘模型配准后重复上述步骤,可迅速完成全部所需椎间盘的配准工作(图5、图6)。最后将得到的文件导入Midivi中进行优化得到最终的精准模型^[11]。

2 结果

本研究通过Midivi软件联合使用CT与MRI的图像数据进行重建、配准、融合之后,可以得到研究所需的精度更高的数字化三维模型(图7)。

完成后可在Midivi软件中调取髓核、椎间盘体积、三角体数量,求出髓核的体积占比(表2)。同样调取椎体体积、表面积与三角体面积(表3)。

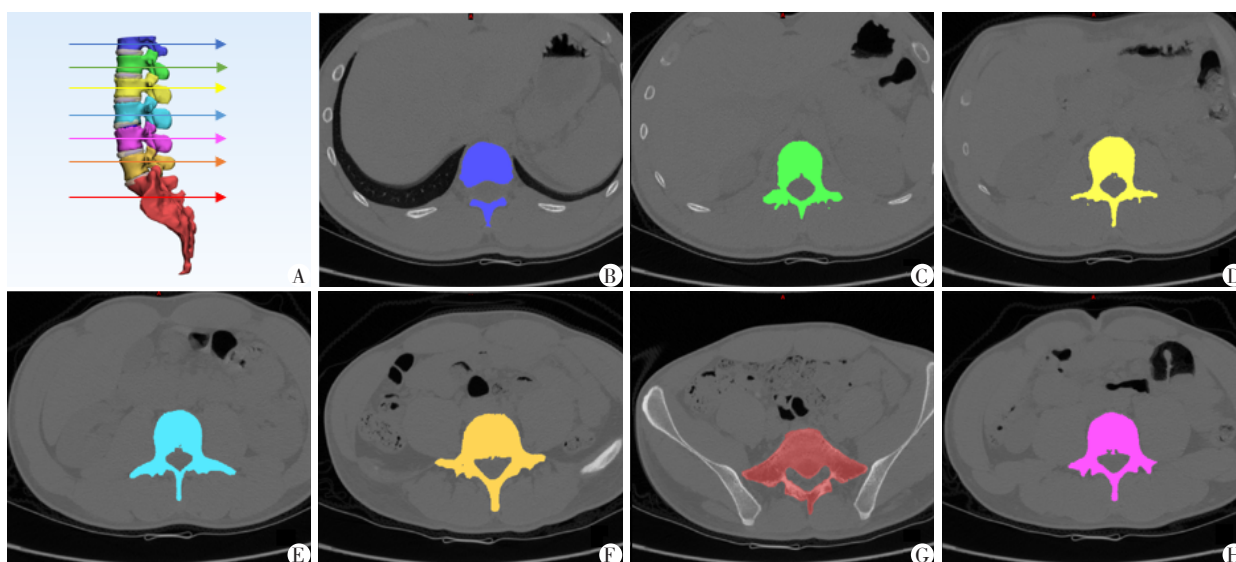


图5 数据模型(A)与Midivi软件中箭头所对应的横截面(B~H)

Figure 5 Data model(A)and the cross section corresponding to the arrows in Midivi(B~H)

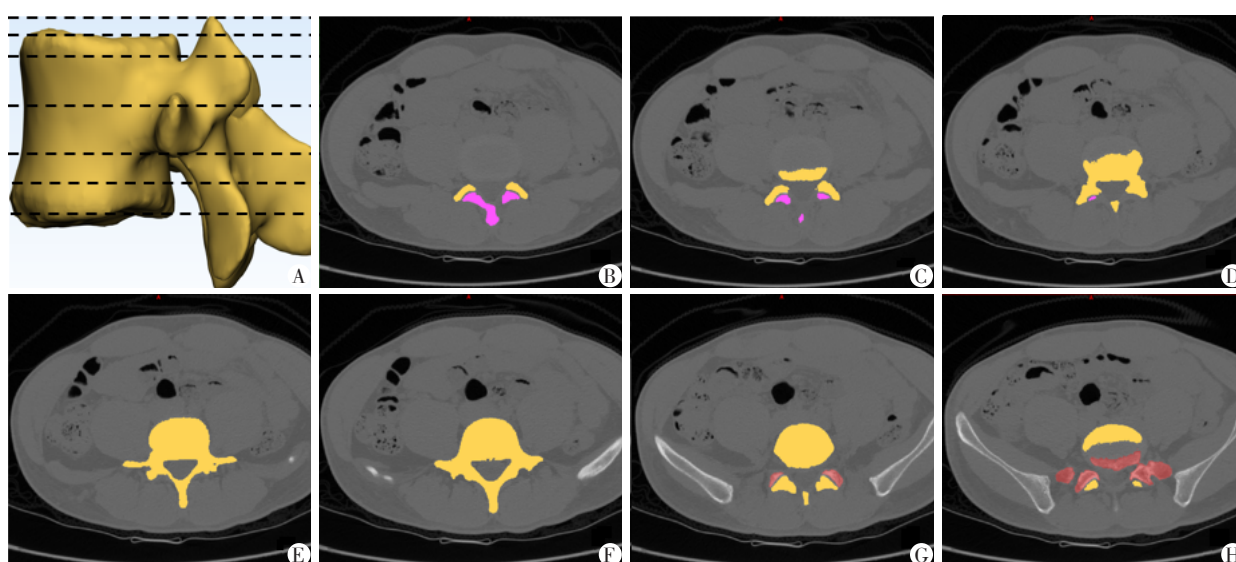


图6 数据模型(A)与Midivi软件中虚线所对应的横截面(B~H)

Figure 6 Data model(A)and the cross section corresponding to the dotted line in Midivi(B~H)

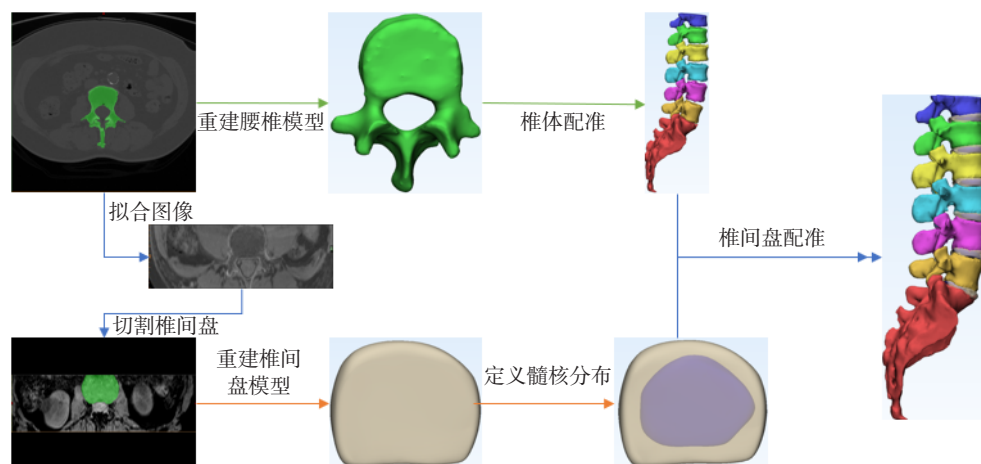


图7 腰椎完整节段设计流程图

Figure 7 Flow chart of designing whole lumbar spine

表2 各椎间盘髓核、椎间盘的体积与髓核占比

Table 2 The ratio of nucleus pulposus and intervertebral disc volume to nucleus pulposus

椎间盘	髓核体 积(cm ³)	髓核三角 体数(个)	椎间盘体 积(cm ³)	髓核占 比(%)
L1~2	4.36	1 304	11.08	39.3
L2~3	4.87	1 398	12.30	39.6
L3~4	4.85	1 423	13.12	37.0
L4~5	5.72	1 612	13.89	41.2
L5~S1	5.22	1 479	13.55	38.5

表3 各椎体体积、表面积、三角体个数

Table 3 Volume, surface area and number of triangles of each vertebral body

指标	L1	L2	L3	L4	L5	S1-5
体积(cm ³)	47.49	50.92	58.95	62.86	62.60	218.85
表面积(cm ²)	10.96	12.08	13.73	13.96	13.59	45.64
三角体(个)	81 484	107 114	116 524	116 442	109 306	340 862

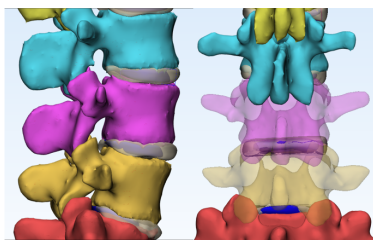


图8 病变部位的数据模型透明视图

Figure 8 Transparent view of the lesion site

别是腰椎髓核、纤维环组织的变性、纤维环破裂、椎体旋转、侧弯畸形均会导致多种腰部疾患。因此如何精准地观察腰椎椎体、椎间盘的病理变化,对于腰椎疾病的诊断与治疗方案判断具有重要意义。

目前,医学影像方法包括有X线、B超、CT与MRI,其中X线仅能够提供二维医学图像,B超三维空间分辨率较低,均难以提供精细的解剖数据。MRI扫描的优势是无电离辐射损伤、软组织信息丰富,但是传统MR扫描的空间分辨率较低,一般仅为1 mm^[6]。而CT扫描虽然可以提供空间分辨率相对高的硬组织扫描数据,但是其对于密度差异相对低的软组织,很难提供准确的解剖信息,导致软组织间的灰度值相似,因此难以实现精准的软组织分割、显像与三维重建^[7]。因此,常规影像方法尚无法重建高精度三维软/硬组织融合影像,这也导致了目前腰椎建模基本只能实现对椎体的建模。

现阶段国内外常用的腰椎椎体建模与本文方式相类似,基于不同的医学建模软件会产生一些步骤上的不同。而在椎间盘的建模方法上差异较大,目前还没有统一的步骤流程。比较常见的是提取

最终可在得到的数据模型中进行操作,方便对患者病变节段观察(图8),同时还可以与正常阶段进行比较,判断病因以及严重程度。

3 讨论

脊柱是人体运动系统的重要组成部分,发挥着支撑体重、维系运动、缓解冲力等重要生理功能。不同于其他运动系统疾病,脊柱疾病的病理改变往往包括椎体、椎间盘髓核、纤维环等软、硬组织。特

一节椎间盘上椎体的下表面以及下椎体的上表面,而后使用填充指令。这种方法优势是操作简单,缺点是有时与患者实际情况相差较大。而本研究所采用的椎间盘重建方式,首先对MR扫描进行了优化,实现了层厚0.5 mm的薄层扫描,获得了精度相对较高的软组织解剖数据,并在三维医学影像软件中,实现了精确到毫米的椎间盘三维重建。其次通过使用建模软件中测量所得数据进一步细分椎间盘结构,成功获得了高精度椎间盘数据模型。数据模型精确显示出髓核在椎间盘中的分布以及髓核与纤维环的相对改变。最终获得的CT/MR融合影像三维解剖模型将非常有希望实现腰椎病理改变的精确诊断^[8]。

此外,常规模型配准过程中会选取正方位的点作为配准点。但是这样的选取方式较为粗糙,操作过程存在一定误差。因此,本研究对配准点的选取方式稍作改进,采用了方位配准和生理解剖标志点配准相结合的方式。在模型上选取存在一定解剖特征点作为配准标记,这些配准点在不同平面,且更容易被定位。因此配准时相较于单纯的依照方位配准更加合理。

虽然单个样本的腰椎建模步骤较为复杂,但是考虑到样本之间的操作流程与仪器的参数相同,且医学建模软件中的Script选项支持导入脚本,可将多数重复操作通过脚本省略。因此当扩展样本库进行多样本的图像、数据分析时,其可重复性及对临床的指导价值仍然存在。

通过三维(three dimensions, 3D)打印技术,数据

模型可以进一步转化为3D模型。且随着3D打印技术的发展与普遍运用,越来越多临床工作者开始选择3D打印腰椎模型来设计手术方案^[9-10]。而本研究所设计的高精度融合图像,则打破了传统图像只能用于腰椎椎体重建的局限,可以完成包括软/硬组织在内的完整腰椎重建。使得临床医师可以在模型上直接观测椎间盘与椎体、纤维环与髓核的状态。这为疾病的诊断与治疗提供了更加精确且可视的依据。与此同时,有研究也证实了精准3D打印的患者脊柱模型可以明显提高手术效果^[12-14]。此外,本研究的数据模型还可以运用于有限元分析,来深入探究在不同状态中,椎体与椎间盘之间、纤维环与髓核之间复杂相互作用以及病理的组织形态改变。这将进一步推动腰椎间盘疾病如何产生以及进展的研究。

虽然此方法具有诸多优势,但是对于数据采集的仪器具有较高要求^[15],且耗时较长。而在图像融合的步骤中,特征点的选取有一定主观因素,配准点不能完全排除误差^[16-17]。除此之外对于数据的格式也有一定要求。

总之,融合图像可以用来构建高精度的全腰椎活动节段数字模型,相比于其他建模方式,精度更高且包含更多组织信息,拓展了三维影像的重建方式。而不足之处在于操作者需要具备一定的专业知识,同时对于软件功能、仪器性能、扫描参数也有一定的掌握要求。

[参考文献]

[1] 陈 琦,史宗坡,王 刚. 年龄因素对腰椎融合术后邻近节段退变的影响[J]. 南京医科大学学报(自然科学版),2020,40(4):596-599

[2] 唐 成,李旭祥,凌 辰,等. 3D打印个性化多孔钛金属支架重建髌臼骨缺损的中期疗效评估[J]. 南京医科大学学报(自然科学版),2019,(12):1774-1778

[3] SILVAN B, LAZAROS V, LUKAS J, et al. Contralateral MRI scan can be used reliably for three-dimensional meniscus sizing-retrospective analysis of 160 healthy menisci [J]. *Knee*,2019,26(5):954-961

[4] VIBHOR W, VIDUR M, YIN X, et al. Bone and joint modeling from 3D knee MRI: feasibility and comparison with radiographs and 2D MRI [J]. *Clin Imag*,2016,40(4):765-768

[5] 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,(2):115-118

[6] 李亚英,张文媛,李青松,等. 腰椎间盘突出MRI与CT的诊断价值分析[J]. 影像研究与医学应用,2020,09(4):144-145

[7] 赵胜祥,费 佳. CT与MRI在腰椎间盘突出症诊断中的应用价值对比[J]. 影像研究与医学应用,2020,4(12):229-230

[8] GHEZELBASH F, ESKANDARI A H, SHIRAZI-ADL A, et al. Modeling of human intervertebral disc annulus fibrosus with complex multi-fiber networks [J]. *Acta Biomater*,2021,03(15):123

[9] WEN X P, GAO S, FENG J T, et al. Chest-wall reconstruction with a customized titanium-alloy prosthesis fabricated by 3D printing and rapid prototyping [J]. *J Cardiothorac Surg*,2018,13(1):4

[10] 李昕迪,王云龙,李建宇. 基于3D打印的膝关节软骨模型重建[J]. 临床骨科杂,2018,(6):753-754

[11] WAKE N, CHANDARANA H, HUANG W C, et al. Application of anatomically accurate, patient-specific 3D printed models from MRI data in urological oncology [J]. *Clin Radiol*,2016,1(6):610-614

[12] BANASZEWSKI J, PABISZCZAK M, PASTUSIAK T, et al. 3D printed models in mandibular reconstruction with bony free flaps [J]. *J Mater Sci-Mater M*,2018,29(3):23

[13] XU W, ZHANG X, KE T, et al. 3D printing assisted pre-operative plan of pedicle screw placement for middle upper thoracic trauma: a cohort study [J]. *BMC Musculoskelet Dis*,2017,18(1):348

[14] TAN L A, YERNENI K, TUCHMAN A, et al. Utilization of the 3D printed spine model for freehand pedicle screw placement in complex spinal deformity correction [J]. *J Spine Surg*,2018,4(2):319-327

[15] LALIT M, TARUN V, AMIT S, et al. Evaluation of accuracy of virtual surgical planning for patient-specific pre-contoured plate in acetabular fracture fixation [J]. *Arch Orthop Trauma Surg*,2018,138(4):495-504

[16] ZITA M J, AYESHA A, MATTHEW D G, et al. 3D bio-printing for reconstructive surgery: principles, applications and challenges [J]. *J Plast Reconstr Aesthet Surg*,2017,70(9):1155-1170

[17] GIASEMI K, BEHROOZ N, MONIKA D, et al. Correction to: performance of a feature-based algorithm for 3D-3D registration of ct angiography to cone-beam CT for endovascular repair of complex abdominal aortic aneurysms [J]. *BMC Med Imaging*,2019,19(1):37

[收稿日期] 2021-10-30

(本文编辑:唐 震)