

基于 CT/MRI 融合建立的 Kambin 三角三维模型与标本测量的对比研究

王 敏¹, 赵庆豪¹, 苏志海¹, 黎庆初¹, 丁自海², 吕 海¹

(1 南方医科大学第三附属医院脊柱二区 510000 广州市; 2 南方医科大学微创外科解剖学研究所 510515 广州市)

【摘要】目的:对比基于 CT/MRI 融合图像建立的 Kambin 三角三维(3D)模型与标本测量结果之间的差异,探讨其临床意义。**方法:**取 10 例新鲜成人腰椎标本,女 6 具,男 4 具,年龄 39~76 岁,平均 59.5±13.0 岁。先进行 3D 模型数据测量;将标本分别进行 CT 和 MRI 扫描,获取腰椎标本的 CT 及 MRI 影像数据并对腰椎 Kambin 三角行 3D 融合重建,在 3D 模型上测量腰椎神经根出口处直径(d)、神经节最大直径(D)、神经根与硬脊膜之间的夹角(A)、上关节突与椎弓根交界外侧缘点与神经根发出点之间的距离(l1)以及上关节突与椎弓根交界外侧缘点与硬脊膜的水平距离(l2)。再进行解剖数据测量:暴露硬脊膜和神经根,且在神经根和椎体之间留有少量软组织以确保神经根和椎体之间的解剖关系,用游标卡尺以及量角器测量与 3D 模型相同的测量参数并比较两者之间的差异。采用组内相关系数(ICC)和 Bland-Altman 图对标本测量数据与 Kambin 三角模型测量数据进行一致性分析。**结果:**基于 CT/MRI 融合图像建立的 Kamin 三角三维模型可清晰展现行走神经根与椎间孔区域之间的空间关系。两组间各测量指标(d、D、A、l1、l2)的平均绝对误差分别为 0.41±0.24mm、0.43±0.22mm、3.54°±1.72°、1.56±0.81mm 和 1.56±1.03mm;两组各测量指标的配对 t 检验差异无统计学意义[d(t=-1.03, P=0.31), D(t=-1.26, P=0.21), A(t=-1.54, P=0.13), l1(t=-1.26, P=0.50)和 l2(t=-1.22, P=0.23)];两组各测量指标的组内相关系数(ICC)表明了标本测量数据与 Kambin 三角模型测量数据之间具有极强的相关性:d(r=0.87), D(r=0.92), A(r=0.87), l1(r=0.98), l2(r=0.97);Bland-Altman 图显示代表差值的点几乎在差值平均线附近波动,几乎所有的差值点都落在 95%的一致性区间内。**结论:**基于 CT/MRI 图像融合的 3D 模型可以较为准确地展现出腰椎 Kambin 三角内行走神经根与椎间孔区域的空间关系,对经皮椎间孔镜的手术风险评估提供了一定的可靠依据,有助于外科医生减少术中行走神经根的损伤引起并发症的发生,实现精准、微创和个体化治疗。

【关键词】三维重建;解剖;个体化治疗;Kambin 三角

doi: 10.3969/j.issn.1004-406X.2019.01.11

中图分类号:R445.2, TP391.41 文献标识码 A 文章编号:1004-406X(2019)-01-0067-07

Comparative study of Kambin's triangle measurements between the three-dimensional reconstruction based on CT/MRI image fusion and cadaver/WANG Min, ZHAO Qinghao, SU Zhihai, et al//Chinese Journal of Spine and Spinal Cord, 2019, 29(1): 67-73

【Abstract】 Objectives: To identify the deviation between the real data and the three-dimensional(3D) reconstruction of Kambin's triangle based on CT/MRI image fusion, and to determine its clinical significance.

Methods: Ten fresh lumbar cadavers were harvested, 6 females and 4 males, aged 39-76 years (average, 59.5±13.0 years). CT and MRI image data of lumbar spine specimens were obtained and fused to form a 3D reconstruction model. The measurement data included the diameter of the exportation of nerve root (d), the maximum diameter of ganglion(D), the angle between nerve root and spinal dura mater(A), the distance between the lateral border of the junction of upper articular process and the pedicle of vertebral arch and the exit point of the nerve root in the dura(l1), and the horizontal distance from the lateral border of the junction of the upper articular process and the pedicle of the vertebral arch to the dura(l2) on the 3D lumbar model. Anatomic data measurements were performed: completely exposing the dura mater and nerve roots, retaining a small amount of soft tissue between the nerve root and the vertebral body to ensure the true anatomical rela-

第一作者简介:男(1994-),在读硕士,研究方向:脊柱外科

电话:(020)62784309 E-mail:1090453697@qq.com

通讯作者:吕海 E-mail:18665000036@qq.com

tion of the root and vertebral nerve. The same measurement parameters in the 3D reconstructed Kambin's triangle model were assessed with the millimeter caliper and protractor on the cadavers and the differences were compared. Intra-group correlation coefficient(ICC) and Bland-Altman plot were used to analyze the consistency between sample measurement data and Kambin triangulation model measurement data. **Results:** The 3D reconstruction of Kambin's triangle based on CT/MRI image fusion provided clear the spatial relationship between the nerve root and the intervertebral foramen. The average absolute error of d, D, A, L1 and L2 was $0.41\pm0.24\text{mm}$, $0.43\pm0.22\text{mm}$, $3.54^\circ\pm1.72^\circ$, $1.56\pm0.81\text{mm}$ and $1.56\pm1.03\text{mm}$, respectively. There was no significant difference in paired *t* test data in each group[d($t=-1.03$, $P=0.31$), D($t=-1.26$, $P=0.21$), A($t=-1.54$, $P=0.13$), L1($t=-1.26$, $P=0.50$) and L2($t=-1.22$, $P=0.23$)]. The intra-group correlation coefficient(ICC) of the measured data indicated that there was a strong correlation between the 3D-reconstructed model of Kambin's triangle and the cadaveric lumbar[d($r=0.87$), D($r=0.92$), A($r=0.87$), L1($r=0.98$), L2($r=0.97$)]. Bland-Altman plot showed the points representing the D-value fluctuate close to the D-value mean line, and almost all of the D-value points falling within the 95% consistency interval. **Conclusions:** The 3D reconstruction of Kambin's triangle based on CT/MRI image fusion can accurately and realistically show the Kambin's triangle of lumbar spine. It may better assist surgeons to reduce the complications of injury of walking nerve root during operation and provides a reliable basis for risk assessment of percutaneous endoscopic lumbar discectomy (PELD), and achieve accurate, minimally invasive, individualized treatment.

[Key words] Three-dimensional reconstruction; Anatomy; Individualized treatment; Kambin's triangle

[Author's address] The Third Affiliated Hospital of Southern Medical University, Guangzhou, 510000, China

近年来,由于生活方式、人口老龄化等因素的影响,腰痛的发病率逐年上升^[1-3],而腰椎间盘突出是引起腰痛的重要因素之一^[4-6]。经皮椎间孔镜椎间盘切除术(percutaneous transforaminal endoscopic discectomy, PTED)是经“Kambin 三角”进行的椎间盘切除术,已经成为最具发展潜力的脊柱微创术式。据国内外研究报道,目前该类术式的优良率均在 80%以上^[7,8],然而该类术式最主要的并发症是神经根损伤^[9-11]。为了避免这一并发症的出现,了解神经根和周围结构之间的关系是很有必要的。目前,腰椎间盘突出症的诊断和术前计划主要依赖于 CT 和 MRI^[12,13],但是二维成像数据不能直观地显示神经根与周围结构之间的关系。在腰椎解剖学研究中^[14,15]对腰神经根周围组织结构的研究已经很全面了,然而,标本研究仅能为手术提供参考,不能准确显示患者神经根的解剖位置。因此,单纯的解剖学研究已经不能满足精准外科治疗的需要。

在过去的研究中已经将三维重建(three dimensions reconstructure, 3D)技术应用于脊柱解剖学研究中^[16,17]。Senoo 等^[16]通过对 59 名无症状志愿者的腰椎 CT 数据三维重建,根据性别、年龄和腰椎水平对椎间孔高度和宽度进行比较,得出年龄相关的椎间孔高度下降在男性和下腰椎较为明显,这些信息可为椎间孔狭窄的诊断和治疗提供

帮助。3D 技术是利用计算机对生物组织结构进行扫描得到二维图像的数据后构造出直观立体的三维模型,从而为临床医生展现一个立体的空间解剖结构。目前主流的 3D 技术主要使用 CT 或者 MRI 影像数据进行三维重建,CT 对骨等密度较高的组织形态显示较清晰但对软组织结构显示欠佳,而 MRI 在成像原理上弥补了 CT 的不足,所以 CT/MRI 的影像融合已经成为一种发展趋势。在 Yamanaka 等^[18]的研究中指出了三维 CT/MRI 腰椎区域融合成像可清楚显示骨组织与神经之间的关系,然而他们并没有提供人体实际测量数据与 CT/MRI 图像融合的 3D 模型测量数据之间的偏差。

本研究的目的是验证神经根和椎体在 Kambin 三角区域的 3D 数据与尸体解剖测量数据之间的差异,观察 3D 模型是否可以真实、有效地反映标本的真实解剖结构。

1 材料与方法

1.1 研究对象

取 10 具新鲜冷冻尸体(女 6 具和男 4 具,年龄 39~76 岁,平均 59.5 ± 13.0 岁),在肉眼以及手术显微镜下观察排除腰骶部畸形、病变或腰骶椎手术者。

1.2 CT/MRI 图像融合 3D 模型的测量

每个标本均取仰卧位进行 CT (Volume Zoom; Siemens, Malvern, PA) 扫描, 以获得轴状位的 CT 影像学数据 (层厚 1mm)。然后, 在 3-T MRI (Philips, Koninklijke Philips N.V., Amsterdam, the Netherlands) 上利用 3D-WATSC 序列 (TE=6.2ms, TR=20ms, 矩阵=456×455, 层厚=1.0mm) 扫描标本 (每个标本保持与 CT 扫描时相同的体位), 以获得轴状位的影像学资料。获得的图像数据以 DICOM 格式保存。

CT 和 MRI 图像数据利用 3D 仿射配准一致后将配准好的影像学数据导入 Mimics 软件中, 分别勾勒出腰椎的椎体以及神经根。所获得的数据都保存为 STL 格式并导入 Autodesk Meshmixer 软件中, 以获得 CT/MRI 融合后的 3D 图像, 并将数据以 STL 格式保存。

将所获得的 3D 腰椎模型导入 Geomagic 中, 测量神经根出口处直径 (d)、神经节最大直径 (D)、上关节突与椎弓根交界外侧缘点与神经根发出点之间的距离 (l1) 以及上关节突与椎弓根交界外侧缘点与硬脊膜的水平距离 (l2) (准确度 0.01mm), 同时将所得的 3D 腰椎模型后面观截图保存, 导入 Image J 中测出神经根与硬脊膜之间的夹角 (A) (准确度 0.1°) [各组测量由同一个医生 (医生 1) 重复测量 3 次, 取平均值]。

1.3 解剖观察与测量

仔细剔除腰椎周围的软组织以暴露椎间孔和神经根。首先切除肌肉、椎板, 并保留部分的上关

节突及椎弓根, 然后在手术显微镜下小心剔除神经根周围的血管和脂肪组织, 使得硬脊膜和神经根完全暴露, 并在神经根和椎体之间留有少量软组织, 以确保神经根和椎体的解剖关系。注意要向硬脊膜中注射水以维持其解剖形态。在标本上用游标卡尺以及量角器测量与 3D 腰椎模型中测量相同的参数 (精确到 0.01mm、0.1°) [各组测量由另一名医生 (医生 2) 重复测量 3 次, 取平均值], 并拍照记录神经根与椎体之间的关系。

1.4 统计分析

使用 SPSS 20.0 软件进行分析, 测量数据以 “ $\bar{x} \pm s$ ” 的形式表示, 并使用绝对误差以及配对 t 检验来检验标本测量数据与 Kambin 模型测量数据之间的差异。采用组内相关系数 (ICC) 和 Bland-Altman 图对标本测量数据与 Kambin 三角模型测量数据进行一致性分析。

2 结果

成功获取 10 具标本的 CT 和 MRI 原始影像学数据, 并成功构建了腰椎 Kambin 三角区域的 3D 模型 (图 1、2); 可以看出三维模型可清晰展现行走神经根与椎间孔之间的空间关系。

2.1 标本测量数据与 Kambin 三角模型测量数据之间的差异

所有测量数据如表 1、表 2 所示。标本测量数据与 Kambin 三角 3D 模型测量数据的配对 t 检验结果如下: 神经根出口处直径 (d) ($t=-1.03$, $P=$

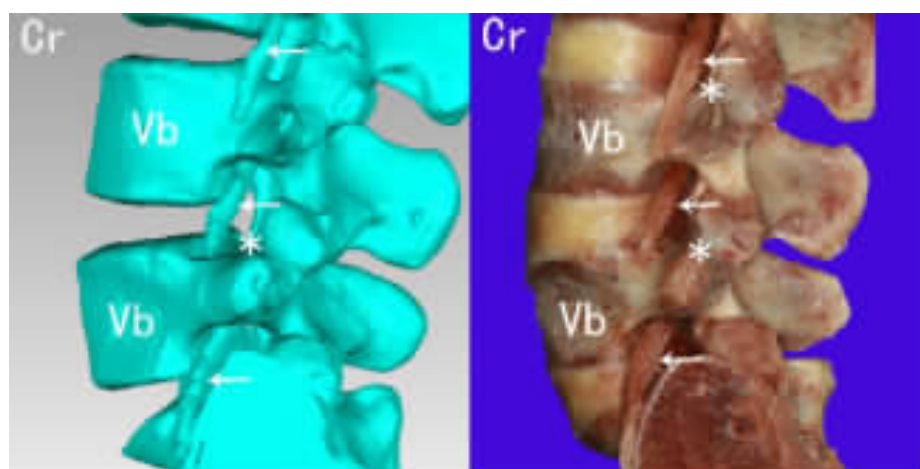


图 1 标本与 3D 模型矢状位比较。Cr, 头侧; 箭头, 神经根; Vb, 椎体; *, 上关节突与椎弓根交界外侧缘点

Figure 1 A comparison of sagittal images between three-dimensionally reconstructed lumbar and cadaver. Cr, cranial; arrow, nerve root; Vb, the vertebral body; *, the lateral border of the junction of the upper articular process and the pedicle of the vertebral arch

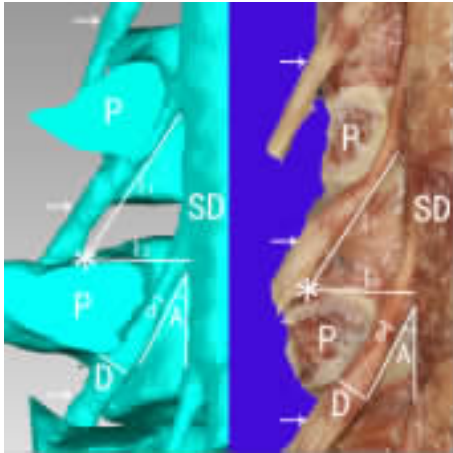


图2 标本与3D模型后面观比较。箭头,神经根;P,椎弓根;* ,上关节突与椎弓根交界外侧缘点;SD,硬脊膜;d,神经根出口处直径;D,神经节最大直径;A,神经根与硬脊膜之间的夹角;l1,上关节突与椎弓根交界外侧缘点与神经根发出点之间的距离;l2,上关节突与椎弓根交界外侧缘点与硬脊膜的水平距离

Figure 2 A comparison of the rear view between three-dimensionally reconstructed lumbar and cadaver. arrow, nerve root; P, pedicle; *, the lateral border of the junction of the upper articular process and the pedicle of the vertebral arch; SD, spinal dural; d, the diameter of the exportation of the nerve root; D, the maximum diameter of the ganglion; A, the angle between nerve root and spinal dura mater, l1, the distance between the lateral border of the junction of the upper articular process and the pedicle of the vertebral arch and the exit point of the nerve root in the dura; l2, the horizontal distance from the lateral border of the junction of the upper articular process and the pedicle of the vertebral arch to the dura

表1 各节段标本与3D模型的l1与l2的测量数据 $[\bar{x} \pm s (\min - \max)]$
Table 1 The measurements of l1 and l2 at each spinal level determined from cadavers or 3D-reconstructed images

节段(n=20) Level	l1			l2		
	标本 Cadaver	三维模型 3D	平均绝对误差 Average absolute error	标本 Cadaver	三维模型 3D	平均绝对误差 Average absolute error
L1-L2	19.74±2.56 (18.59-25.39)	19.72±2.43 (19.01-25.46)	1.34±0.50 (0.62-2.51)	8.36±1.30 (6.89-11.03)	8.80±1.07 (6.47-10.48)	0.89±0.49 (0.40-2.56)
L2-L3	22.40±2.09 (18.25-26.59)	22.55±2.57 (18.48-29.41)	1.26±0.86 (0.18-4.04)	8.92±0.84 (7.36-10.68)	9.68±1.51 (6.57-12.31)	1.28±0.79 (0.19-2.90)
L3-L4	27.28±2.43 (22.35-33.49)	27.62±2.42 (22.67-32.87)	1.40±0.93 (0.30-3.90)	11.50±1.78 (7.33-14.35)	12.55±1.68 (9.51-15.67)	1.91±1.19 (0.20-4.51)
L4-L5	33.95±2.95 (27.36-39.67)	34.06±2.63 (29.14-38.17)	1.79±0.53 (0.59-2.70)	20.84±3.10 (15.69-26.37)	20.13±3.44 (16.01-28.17)	1.90±1.18 (0.02-4.89)
L5-S1	39.59±3.16 (32.17-45.69)	39.61±3.67 (30.98-45.61)	1.99±0.95 (0.71-4.61)	26.15±4.22 (20.07-35.39)	25.73±4.20 (20.67-37.34)	1.84±1.00 (0.08-0.95)

注:l1,上关节突与椎弓根交界外侧缘点与神经根发出点之间的距离;l2,上关节突与椎弓根交界外侧缘点与硬脊膜的水平距离
Note: l1, the distance between the lateral border of the junction of the upper articular process and the pedicle of the vertebral arch and the exit point of the nerve root in the dura; l2, the horizontal distance from the lateral border of the junction of the upper articular process and the pedicle of the vertebral arch to the dura

表2 各节段标本与3D模型的d与D的测量数据 $[\bar{x} \pm s (\min - \max)]$
Table 2 The measurements of d, and D at each spinal level determined from cadavers or 3D-reconstructed images

节段 Level	d(n=20)			D(n=20)			A(n=20)		
	标本 Cadaver	三维模型 3D	平均绝对误差 Average absolute error	标本 Cadaver	三维模型 3D	平均绝对误差 Average absolute error	标本 Cadaver	三维模型 3D	平均绝对误差 Average absolute error
L1	2.37±0.77 (1.53-4.35)	2.56±0.61 (1.65-3.97)	0.38±0.25 (0.07-0.90)	3.90±0.82 (2.78-5.40)	4.09±0.76 (2.90-5.34)	0.36±0.19 (0-0.70)	34.39±8.08 (21.4-50.3)	33.74±8.30 (21.3-55.4)	3.31±1.67 (0-8)
L2	2.88±0.64 (1.41-4.31)	2.89±0.61 (1.58-4.14)	0.36±0.16 (0.10-0.77)	4.56±1.13 (2.88-6.69)	4.63±1.04 (3.14-6.54)	0.46±0.23 (0.06-0.79)	28.79±6.52 (16-39.4)	28.51±6.67 (16.6-44.3)	4.20±1.45 (1.8-6.4)
L3	3.69±0.57 (2.14-4.69)	3.52±0.83 (1.98-5.14)	0.57±0.27 (0.15-1.11)	5.43±1.27 (3.25-8.04)	5.19±1.09 (3.59-7.35)	0.46±0.28 (0.09-1.40)	25.59±4.45 (16.8-34.6)	26.62±6.35 (16.4-37.1)	3.32±1.95 (0.4-8.5)
L4	3.84±0.62 (2.97-5.14)	3.95±0.64 (2.62-5.67)	0.38±0.24 (0.03-0.99)	5.43±0.68 (4.01-6.59)	5.64±0.75 (3.97-6.83)	0.41±0.22 (0.04-0.89)	19.38±4.54 (12.1-30.7)	20.72±5.24 (13.4-33.7)	3.25±1.60 (0.8-7.8)
L5	4.27±0.61 (3.25-5.54)	4.39±0.81 (2.93-6.07)	0.39±0.23 (0.08-0.95)	6.16±0.79 (4.51-7.51)	6.14±1.00 (4.35-7.82)	0.49±0.31 (0.07-1.16)	18.98±3.23 (14-24.6)	20.55±5.45 (12.1-30.9)	3.95±1.98 (0.1-8.1)

注:d,神经根出口处直径;D,神经节最大直径;A,神经根与硬脊膜之间的夹角
Note: d, the diameter of the exportation of the nerve root; D, the maximum diameter of the ganglion; A, the angle between nerve root and spinal dura mater

0.31), 神经节最大直径(D) ($t=-1.26, P=0.21$), 神经根与硬脊膜之间的夹角(A) ($t=-1.54, P=0.13$), 上关节突与椎弓根交界外侧缘点与神经根发出点之间的距离(I1) ($t=-1.26, P=0.50$) 和上关节突与椎弓根交界外侧缘点与硬脊膜的水平距离(I2) ($t=-1.22, P=0.23$)。平均绝对误差分别为 $0.41 \pm 0.24\text{mm}$ 、 $0.43 \pm 0.22\text{mm}$ 、 $3.54^\circ \pm 1.72^\circ$ 、 $1.56 \pm 0.81\text{mm}$ 和 $1.56 \pm 1.03\text{mm}$, 绝对误差范围分别为 $0.03 \sim 1.11\text{mm}$ 、 $0 \sim 1.16\text{mm}$ 、 $0 \sim 8.5^\circ$ 、 $0.17 \sim 4.61\text{mm}$ 和 $0.02 \sim 4.89\text{mm}$ 。因此, 可以得出标本测量数据与 Kambin 三角 3D 模型测量数据差异无统计学意义, 两组数据间无明显差异 ($P>0.05$)。

2.2 标本测量数据与 Kambin 三角模型测量数据的一致性分析

对标本测量数据与 Kambin 三角 3D 模型测量数据进行了一致性分析(表 3), 两组各测量指标组内相关系数结果如下: 神经根出口处直径(d) ($r=0.87$), 神经节最大直径(D) ($r=0.92$), 神经根与硬脊膜之间的夹角(A) ($r=0.87$) 上关节突与椎弓根交界外侧缘点与神经根发出点之间的距离(I1) ($r=0.98$) 和上关节突与椎弓根交界外侧缘点与硬脊膜的水平距离(I2) ($r=0.97$); 这表明了标本测量

数据与 Kambin 三角模型测量数据之间具有极强的相关性。每个组的差值对应于绘制平均散点图(Bland Altman 图)见图 3。可以看出, 代表差值的点几乎在差值平均线附近波动, 几乎所有的差值点都落在 95% 的一致性区间内。ICC 和 Bland-Altman 图显示, 基于标本的测量参数与 3D 模型的测量数据之间具有高度一致性。

3 讨论

3D 技术已被广泛应用于脊柱外科中, 在疾病的诊断和治疗中起着非常重要的作用^[19,20]。

表 3 标本与 3D 模型各组测量数据的配对 t 检验与 ICC 结果

Table 3 The t test results and ICCs between cadavers and 3D-reconstructed images

	t test			ICC		
	t	95%CI	P	ICC	95%CI	P
d	-1.03	-0.14~0.05	0.31	0.87	0.82~0.91	0.00
I1	-1.26	-0.47~0.23	0.50	0.98	0.96~0.98	0.00
I2	-1.22	-0.60~0.14	0.23	0.97	0.95~0.98	0.00
D	-1.26	-0.16~0.03	0.21	0.92	0.88~0.95	0.00
A	-1.54	-1.44~0.18	0.13	0.87	0.82~0.91	0.00

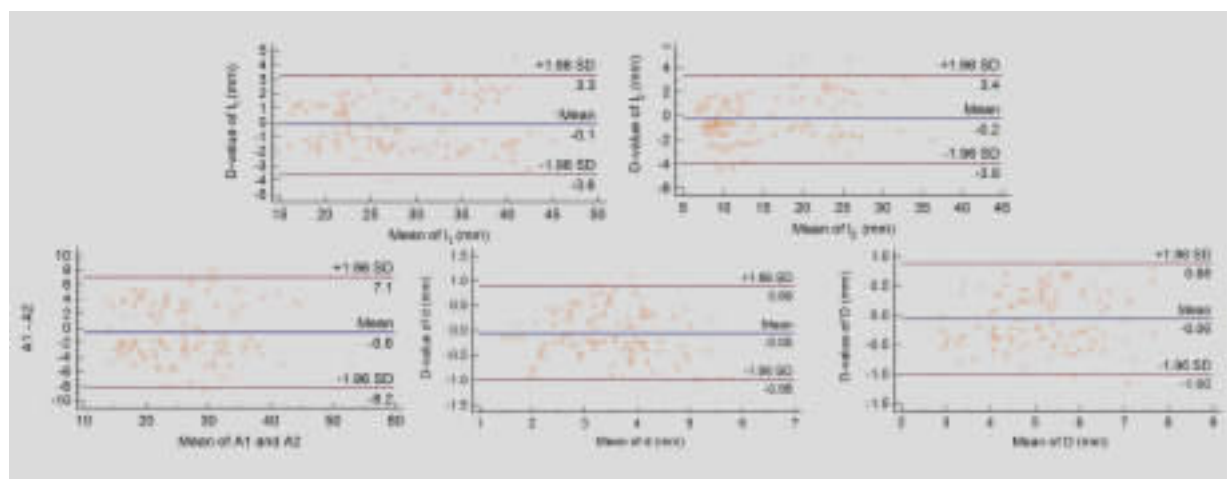


图 3 各组标本与 3D 模型测量数据的 Bland-Altman 图。d, 神经根出口处直径; D, 神经节最大直径; A, 神经根与硬脊膜的夹角; I1, 上关节突与椎弓根交界外侧缘点与神经根发出点之间的距离; I2, 上关节突与椎弓根交界外侧缘点与硬脊膜的水平距离

Figure 3 Bland-Altman plots of differences between cadaveric measures and 3D-reconstructed measures (with standard deviation $\times 1.96$). h, the vertebral height; d, the diameter of the exportation of the nerve root; D, the maximum diameter of the ganglion; A, the angle between nerve root and spinal dura mater; I1, the distance between the lateral border of the junction of the upper articular process and the pedicle of the vertebral arch and the exit point of the nerve root in the dura; I2, the horizontal distance from the lateral border of the junction of the upper articular process and the pedicle of the vertebral arch to the dura

Schroder 等^[19]报道了外伤性脊柱骨折的 3D 图像可以显著提高诊断的结果,尤其是旋转骨折的可视化和分类的精细化。Su 等^[20]认为,在严重脊柱侧凸的手术治疗中,由 CT 重建模型所确定的进入点引导个体螺钉放置可以提高手术准确性和降低手术的操作难度。然而,过去研究主要集中在基于单一的 CT 或 MRI 的三维重建,而很少有学者提到基于 CT/MRI 融合的三维脊柱模型。Yamanaka 等^[18]证明 3D CT/MRI 融合成像在腰椎区域的成功应用,成功地揭示了在三维图像中骨与神经结构(马尾神经和神经根)之间的关系。但是,在 CT/MRI 融合后 3D 模型的准确性还没有被研究证实。

在解剖研究中,人们对腰椎神经根周围的组织结构已经有了详细的认知。随着精准医学这一概念的不断兴起,传统医学模式发生了巨大的变化,传统的解剖学研究已不能满足现代医学技术发展的需要。Collins 等^[21]指出,精准医学不是一个全新的概念,其本质上是“个性化医学”。近年来,随着手术导航系统的兴起,脊柱外科手术也逐渐发生了改变^[22-24]。外科医生通过术前 3D 模型来规划手术路线,在手术过程中进行导航,对患者进行个性化治疗。Holly 等^[25]指出,术中对手术区域的 3D 成像技术可以帮助外科医生将未暴露或部分暴露的手术区域进行可视化,因此,适当的 3D 模型可以为操作者提供指导,减少对患者不必要的伤害。目前主流的 3D 技术主要使用 CT 或者 MRI 影像数据进行三维重建,然而 CT 对骨等密度较高的组织形态显示较清晰但对软组织结构显示欠佳,而 MRI 对软组织的成像具有较高的分辨率,但对骨性结构不敏感。这可能对 3D 技术的应用产生了一定的限制,故而将 CT、MRI 的数据进行融合三维重建已经成为一种发展趋势;但这种融合的腰椎 3D 图像的精确度尚未得到证实,所以我们展开了这项研究。

在本项研究中,基于 CT/MRI 图像融合的 Kambin 三角的 3D 模型提供了清晰的解剖结构及真实、可靠的形态。我们利用 ICC 和 Bland-Altman 图来评估标本测量数据与 3D 模型测量数据之间的差异。结果表明,Kambin 三角的 3D 模型与标本之间有很强的相关性,几乎所有的差值点都在 95%的一致性区间之内。因此,Kambin 三角 3D 模型数据与实际标本数据之间有很强的一

致性。同时,配对 t 检验的结果表明 Kambin 三角 3D 模型数据与标本数据之间在统计学上是没有差异的。与单纯 CT 或 MRI 重建的三维脊柱模型相比,CT 和 MRI 融合重建的三维脊柱模型可以更好地反映腰椎神经根与周围结构之间的结构关系,使图像更加丰满。因此,这有助于外科医生进行个性化的术前规划,并实现精确、微创、个性化的治疗。

在解剖过程中,我们保留了少量神经根与椎体之间的软组织,尽量保持神经根与椎体之间解剖学关系,同时在打开椎管后向硬脊膜内注入生理盐水,以保持硬脊膜的形态来确保测量数值的准确度,但这仍可能造成了一定程度上的测量误差。并由于标本影像学信号的改变,腰椎周围的血管和韧带结构无法清晰地显示出来,因此不能获得相关的 3D 结构。在未来,我们计划将构建出完整的腰椎 3D 模型(包括神经、椎体、血管、韧带等),以满足现代精密医学的需要,这可能会给患者带来更大的益处。

总之,基于 CT/MRI 图像融合的 3D 模型可以较为准确地展现出腰椎 Kambin 三角内行走神经根与椎间孔区域的空间关系,为经皮椎间孔镜的手术风险评估提供了一定的可靠依据,有助于外科医生减少术中对行走神经根的损伤引起并发症的发生,实现精准、微创和个体化治疗。

4 参考文献

1. Jørgensen MB, Holtermann A, Gynzelberg F, et al. Physical fitness as a predictor of herniated lumbar disc disease—a 33-year follow-up in the Copenhagen male study[J]. BMC Musculoskelet Disord, 2013, 14: 86.
2. Martin BI, Deyo RA, Mirza SK, et al. Expenditures and health status among adults with back and neck problems [J]. JAMA, 2008, 299(6): 656–664.
3. [No authors listed]. Relieving Pain in America: A Blueprint for Transforming Prevention, Care, Education, and Research[J]. Mil Med, 2016, 181(5): 397–399.
4. Verrills P, Nowesenitz G, Barnard A. Prevalence and characteristics of discogenic pain in tertiary practice: 223 consecutive cases utilizing lumbar discography[J]. Pain Med, 2015, 16 (8): 1490–1499.
5. Andrews DW, Lavyne MH. Retrospective analysis of microsurgical and standard lumbar discectomy[J]. Spine (Phila Pa 1976), 1990, 15(4): 329–335.
6. Balderston RA, Gilyard GG, Jones AA, et al. The treatment of lumbar disc herniation: simple fragment excision versus

- disc space curettage[J]. *J Spinal Disord*, 1991, 4(1): 22–25.
7. Gadjradj PS, van Tulder MW, Dirven CM, et al. Clinical outcomes after percutaneous transforaminal endoscopic discectomy for lumbar disc herniation: a prospective case series [J]. *Neurosurg Focus*, 2016, 40(2): 1–7.
 8. Kim CH, Chung CK, Sohn S, et al. The surgical outcome and the surgical strategy of percutaneous endoscopic discectomy for recurrent disk herniation[J]. *J Spinal Disord Tech*, 2014, 27(8): 415–422.
 9. Ahn Y, Lee SH, Park WM, et al. Percutaneous endoscopic lumbar discectomy for recurrent disc herniation: surgical technique, outcome, and prognostic factors of 43 consecutive cases[J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 2004, 29(16): E326–332.
 10. Cho JY, Lee SH, Lee HY. Prevention of development of postoperative dysesthesia in transforaminal percutaneous endoscopic lumbar discectomy for intracanalicular lumbar disc herniation: floating retraction technique [J]. *Minim Invasive Neurosurg*, 2011, 54(5–6): 214–218.
 11. Ruetten S, Komp M, Merk H, Godolias G. Fullendoscopic interlaminar and transforaminal lumbar discectomy versus conventional microsurgical technique: a prospective, randomized, controlled study[J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 2008, 33(9): 931–939.
 12. Kanna RM, Shetty AP, Rajasekaran S. Patterns of lumbar disc degeneration are different in degenerative disc disease and disc prolapse magnetic resonance imaging analysis of 224 patients[J]. *Spine J*, 2014, 14(2): 300–307.
 13. Zhang YG, Sun Z, Zhang Z, et al. Risk factors for lumbar intervertebral disc herniation in Chinese population: a case-control study[J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 2009, 34(25): E918–922.
 14. Ebraheim NA, Xu R, Darwich M, et al. Anatomic relations between the lumbar pedicle and the adjacent neural structures[J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 1997, 22(20): 2338–2341.
 15. Ali A, Baraliakos X, Kanawati B, et al. Microsurgical nerve root decompression in scoliotic lumbar spines—the relationship between important anatomical structures in correlation to imaging and implications for daily practice: anatomic cadaveric study[J]. *J Neurosurg Spine*, 2010, 13(1): 123–132.
 16. Senoo I, Espinoza Orías AA, An HS, et al. In vivo 3-dimensional morphometric analysis of the lumbar foramen in healthy subjects[J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 2014, 39(16): E929–935.
 17. Ilharreborde B, Steffen JS, Nectoux E, et al. Angle measurement reproducibility using EOS three-dimensional reconstructions in adolescent idiopathic scoliosis treated by posterior instrumentation [J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 2011, 36(20): E1306–1313.
 18. 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.
 19. Schroder RJ, Albus M, Kandziora F, et al. Diagnostic value of three-dimensional reconstruction in CT of traumatic spinal fractures[J]. *Rofo*, 2003, 175(11): 1500–1507.
 20. Su P, Zhang W, Peng Y, et al. Use of computed tomographic reconstruction to establish the ideal entry point for pedicle screws in idiopathic scoliosis[J]. *Eur Spine J*, 2012, 21(1): 23–30.
 21. Collins FS, Varmus H. A new initiative on precision medicine[J]. *N Engl J Med*, 2015, 372(9): 793–795.
 22. Joseph JR, Smith BW, Patel RD, et al. Use of 3D CT-based navigation in minimally invasive lateral lumbar interbody fusion[J]. *J Neurosurg Spine*, 2016, 25(3): 339–344.
 23. Reinshagen C, Ruess D, Walcott BP, et al. A novel minimally invasive technique for lumbar decompression, realignment, and navigated interbody fusion [J]. *J Clin Neurosci*, 2015, 22(9): 1484–1490.
 24. Bourgeois AC, Faulkner AR, Bradley YC, et al. Improved accuracy of minimally invasive transpedicular screw placement in the lumbar spine with 3-dimensional stereotactic image guidance: a comparative Meta-analysis [J]. *J Spinal Disord Tech*, 2015, 28(9): 324–329.
 25. Holly LT, Foley KT. Intraoperative spinal navigation[J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 2003, 28(15 Suppl): S54–61.

(收稿日期: 2018-06-13 修回日期: 2018-12-07)

(英文编审 郑国权/贾丹彤)

(本文编辑 彭向峰)