doi:10.11659/jjssx.05E017011

·基础研究·

学龄前期儿童寰枢椎椎弓根形态特征发育的临床解剖学研究

吴春立[1],王 敏[1],尤壮志[1],史 君[2],张少杰[3],李志军[3],于静红[1],王 星[3] (1.内蒙古医科大学第二附属医院影像科,内蒙古 呼和浩特 010030;2.内蒙古医科大学基础医学院人体生理学教研室,内蒙古 呼和浩特 010059;3.内蒙古医科大学基础医学院人体解剖学教研室,内蒙古 呼和浩特 010059)

[摘 要] **目的** 分析总结学龄前期儿童寰枢椎椎弓根形态特点及生长发育规律,为临床应用椎弓根螺钉技术治疗学龄前期儿童寰枢椎疾病该年龄段患儿椎弓根螺钉置入手术操作、螺钉的设计和生产等提供基础理论依据。**方法** 收集3~6岁学龄前期儿童行颈椎寰枢椎的临床CT扫描资料,排除有寰枢椎骨折、畸形、结核、肿瘤等疾患的病例,保留60例寰枢椎单椎结构正常的病例资料(如寰枢椎半脱位);将所获取的CT原始图像以DICOM格式导入Mimics软件进行重建,观察对象按年龄分组进行寰枢椎椎弓根相关指标的测量与分析。**结果** 椎弓根宽(PW)、椎弓根高(PH)和椎弓根骨通道全长(PL)总体随年龄增长呈递增趋势;寰椎(C_1)的PW/PH比值均大于1.0,即C_1椎弓根的宽度值大于高度值;枢椎(C_2)的PW/PH比值均小于1.0,即C_2椎弓根的宽度值小于高度值。**结论** 学龄前期儿童脊柱生长发育较快,不同年龄段寰枢椎椎弓根具有不同发育特征,3~6岁学龄前期儿童寰枢椎椎弓根各径线总体随年龄增长呈递增趋势;寰枢椎椎弓根理论上可置入直径最小为3.5 mm的椎弓根螺钉。

[关键词] 寰椎;枢椎;椎弓根;数字化测量;学龄前期儿童

[中图分类号] R323.1 [文献标识码] A [收稿日期] 2017-05-13

Clinical anatomical study on the development of pedicle of atlantoaxial pedicle in preschool children

WU Chun-li[1], WANG Min[1], YOU Zhuang-zhi[1], SHI Jun[2], ZHANG Shao-jie[3], LI Zhi-jun[3], YU Jing-hong[1], WANG Xing[3] (1. Department of Imaging, Second Affiliated Hospital of Inner Mongolia Medical University, Inner Mongolia Hohhot 010030, China; 2. Department of Human Physiology, School of Basic Medical Sciences, Inner Mongolia Medical University, Inner Mongolia Hohhot 010059, China; 3. Department of Human Anatomy, School of Basic Medical Sciences, Inner Mongolia Medical University, Inner Mongolia Hohhot 010059 China)

Abstract: Objective To discuss the characteristics, growth and development of atlantoaxial pedicle in preschool children, and to provide the basic theoretical basis for the design, production and clinical application of pedicle screw technique in the treatment of atlantoaxial disease in preschool children. **Methods** Excluded patients with atlantoaxial fractures, deformities, tuberculosis and tumor, the clinical data of 60 children aged from 3 to 6 years old with cervical spondylolisthesis were collected. The original CT images were reconstructed in DICOM format and the subjects were reconstructed with Mimics software. The subjects were grouped by age to measure and analyze the atlantoaxial pedicle correlation. **Results** The pedicle width(PW), pedicle height(PH) and total length of pedicle bone channel (PL) increased gradually with age. The PW/PH ratio of the vertebrae(C_1) is greater than 1.0, and that is, the width of the pedicle of the C_1 pedicle is greater than the height. The PW/PH ratio of the vertebral (C_2) is less than 1.0, which means the width of the pedicle of the C_1 pedicle is less than the height. **Conclusion** The growth and development of spine in preschool children are fast, and the pedicle of atlantoaxial calculus in different age groups has different developmental characteristics. In this study, the diameter of the pedicle of the atlantoaxial pedicle in the 3 to 6 year old children is increasing with age. The pedicle screw with the smallest diameter of 3.5 mm can be implanted into the atlantoaxial pedicle with feasibility in theory.

Keywords: atlas; dentata; pedicle; pedicle; digital measurement; preschool children

椎弓根螺钉内固定术是目前临床治疗寰枢椎骨折、脱位等疾病最常用的手术方式之一[1-4]。在上颈椎手术治疗中,经寰、枢椎椎弓根螺钉内固定手术方式较经侧块螺钉固定的手术方式具有多方面优点,如植入螺钉钉道长、内固定稳定性好和手术区域出血量小等,因此,经椎弓根螺钉内固定技术在脊柱手术中得到广泛应用[5-7]。尽管国内外关于寰椎、枢椎椎弓根的探讨研究在不断突破、取得新进展,而且以往的研究也给我们留下了大量重要的科学数据[8-12]。但由于寰椎和枢椎椎弓根的结构复杂、变异率较高、周围毗邻关系较复杂,在骨科临床手术应用中有椎弓根螺钉置钉失败,误

[基金项目] 国家自然科学基金(81260269,81560348,81660358);内蒙古自治区高等学校科学研究(NJZC16108);内蒙古医科大学科技百万项目(2015YKDKJBW03);内蒙古医科大学青年创新基金课题(YKD2014QNCX011)

[通信作者] 王 星,E-mail:wangxing197911@163.com

入椎管或横突孔导致颈髓或椎动脉损伤的风险。因此,有关寰、枢椎椎弓根的基础与临床研究仍在持续进行着,其研究的技术、方法也在不断发展中。

学龄前期儿童寰枢椎发育尚未成熟,椎弓根较细小、骨骺未完全闭合且个体差异大,具有相对特殊的解剖学特点,再加上周围毗邻延髓、椎动脉、神经根等重要结构,行椎弓根螺钉内固定的难度和风险较成人大很多。为了提高椎弓根螺钉置入的准确度,术前准确掌握寰枢椎椎弓根的形态特征对准确置钉有很重要意义。本研究通过对 60 例 3 ~ 6 周岁儿童寰枢椎椎弓根进行三维重建与测量,获得不同年龄组正常儿童寰枢椎椎弓根及螺钉置入的基本参数,为寰枢椎椎弓根螺钉置入、设计等提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 临床资料

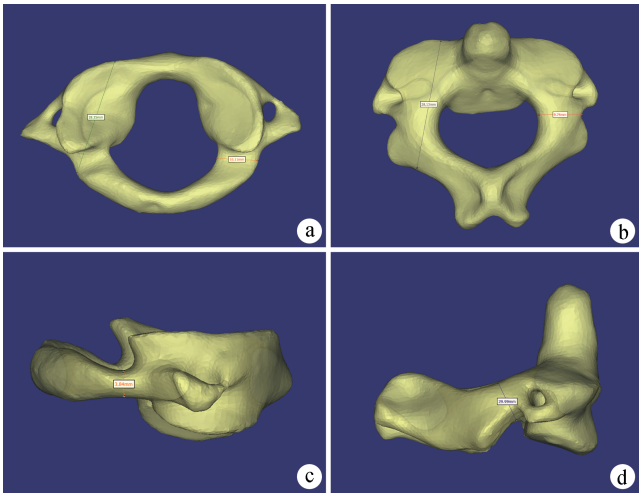
收集 2013 年 1 月至 2015 年 12 月在内蒙古医科大学第二附属医院影像中心 CT 室行寰枢椎 CT 检查(包括全颈椎扫描、单独行寰枢椎扫描及头颅 CT 检查包含的颅颈段扫描)的儿童的影像学资料,保留寰、枢椎单椎椎弓根形态正常,排除有寰枢椎骨折、畸形、寰枢椎结核、肿瘤等疾患致寰枢椎椎弓根形态异常的病例。选取年龄为 3 ~ 6 岁共 60 例(120 侧),按性别、年龄分组,分别为 3 ~ 4 岁组、4 ~ 5 岁组和 5 ~ 6 岁组,每组男女各 10 例(20 侧)。

1.2 测量方式

参照参考文献有关颈椎相关参数的测量方法进行测量[13-15]。为提高测量指标的准确性,每一项指标重复测量 3 次,取其平均值。

1.3 测量指标

测量指标参照图 1。①椎弓根宽(pediele width,PW):寰椎不存在严格意义上的椎弓根与峡部,临床上常将椎动脉沟处的后弓看作是寰椎的椎弓根,将枢椎上下关节突之间的连接区域看作是枢椎的椎弓根,即峡部。C_1 的 PW 为椎动脉沟处内外侧皮质外缘间的最短距离;C_2 的 PW 为在椎弓根最狭处,内外侧皮质外缘间的最短直线距离。②椎弓根高(pedicle height,PH):寰椎的椎弓根高为椎动脉沟处上、下骨皮质外缘间的最短距离;枢椎的椎弓根高为峡部上、下骨皮质外缘间的最短直线距离。③椎弓根通道全长(the entire length of pedicle osseous channel,PL):沿椎弓根轴线从椎体前缘骨皮质到椎板后缘骨皮质间的最短直线距离。



a:C_1 的 PW 和 PL 测量;b:C_2 的 PW 和 PL 测量;c:C_1 的 PH 测量;d:C_2 的 PH 测量

图 1 测量指标示意图

1.4 统计学方法

将所测平均值导入 SPSS 13.0 统计软件进行统计学分析,数据采用均数 ± 标准差($\bar{x} \pm s$)的形式表示,性别、侧别间的比较应用配对 t 检验;同一个指标不同年龄组变化的比较应用多样本均数比较的单因素方差分析(One-way ANOVA);确立检验水准为 $\alpha = 0.05$,$P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

2 结果

经过对 3 ~ 6 岁儿童寰枢椎椎弓根相关测量指标进行分析,发现所测数据在性别、左右侧别间差异均无统计学意义($P > 0.05$),故合并处理。

2.1 不同年龄组椎弓根宽(PW)测量及统计结果

学龄前期儿童寰、枢椎 PW 随年龄的增长呈递增趋势,即 5 ~ 6 岁组最大,3 ~ 4 岁组最小。与 C_1 的 PW 值比较,各组 C_2 的 PW 值均小于 C_1,差异均有统计学意义($P < 0.05$);与 4 ~ 5 岁组比较,其余 2 组 PW 值差异均有统计学意义($P < 0.05$),见表 1。

2.2 不同年龄组椎弓根高(PH)测量及统计结果

PH 总体随年龄增长呈递增趋势,即 5 ~ 6 岁组最大,而 3 ~ 4 岁组最小。3 个年龄组在 C_1、C_2 间比较,差异均有统计学意义($P < 0.05$),与 4 ~ 5 岁组比较,3 ~ 4 岁组和 5 ~ 6 岁组的 PH 值差异均有统计学意义($P < 0.05$)。PH 值在各组内部也表现为递增趋势,各组内 C_2 的 PH 值均较 C_1 大,差异均有统计学意义($P < 0.05$)。3 组中 C_1 中 PW/PH 的大于 1.0,说明椎弓根宽大于椎弓根高,在 C_2 中 PW/PH 的小于 1.0,说明椎弓根高大于椎弓根宽(表 1)。

表 1 不同年龄组 PW 测量值($\bar{x} \pm s$,mm)

椎序	PW		PH		PW/PH	
	C_1	C_2	C_1	C_2	C_1	C_2
3~4 岁组	4.96±0.32	4.13±0.63*	4.06±0.41	5.54±0.47*	1.22	0.75
min~max	(3.97~5.41)	(2.94~4.96)	(3.48~5.01)	(4.85~6.36)		
4~5 岁组	6.10±1.19#	5.05±0.82*#	4.72±0.34#	6.33±0.65*#	1.29	0.80
min~max	(4.53~7.58)	(3.95~7.71)	(3.98~5.26)	(5.48~8.03)		
5~6 岁组	7.33±0.73#△	5.95±1.04*#△	5.74±0.69#△	7.28±0.70*#△	1.28	0.82
min~max	(6.21~8.88)	(4.30~7.24)	(4.98~8.01)	(5.97~9.01)		

*:与 C_1 比较,$P<0.05$;#:与 3~4 岁组比较,$P<0.05$;△:与 4~5 岁组比较,$P<0.05$

2.3 不同年龄组椎弓根骨通道全长(PL)测量结果及统计结果

PL 在 C_1、C_2 总体随年龄增长呈递增趋势,即 5~6 岁组最大,3~4 岁组最小。与 3~4 岁组比较,4~5 岁组和 5~6 岁组均有差异,且差异均有统计学意义($P<0.05$),且 C_2 在各组中均比 C_1 短,这种差异在 3~4岁组和 5~6 岁组有统计学意义($P<0.05$),见表2。

表 2 不同年龄组 PL 测量值($\bar{x} \pm s$,mm,min~max)

椎序	C_1	C_2
3~4 岁组	22.94±1.89(19.90~26.12)	20.92±2.18(17.89~29.45)*
4~5 岁组	23.97±1.79(20.18~27.08)#	23.01±1.56(20.36~26.01)#
5~6 岁组	26.11±1.93(22.22~29.21)#△	24.46±1.65(21.99~27.68)*#

*:与 C_1 比较,$P<0.05$;#:与 3~4 岁组比较,$P<0.05$;△:与 4~5岁组比较 $P<0.05$

3 讨论

人类一生存在两个生长发育的高峰期,即幼儿期至学龄前期和青春期。不同发育年龄段的寰、枢椎在形态学与生物力学等方面存在较大的差异。有学者研究发现儿童脊柱损伤约 60% 以上发生于颈椎[16-18]。学龄前期儿童的颈椎发育和活动与成人相比较存在较大差异,该年龄段因颈部韧带松弛,关节突关节间发育不完全,关节突关节面浅且各关节突间夹角小,活动范围较大,同时因头颅所占身体比例相对较大,导致颈椎运动支撑点较成人位置要高,可达 C_3 以上,因此临床损伤多集中于上颈椎。幼儿期至学龄前期儿童对危险的识别和自我保护能力有限,经常因为意外伤害从而导致寰枢椎严重损伤。目前,椎弓根螺钉内固定技术仍是临床上治疗寰枢椎骨折、脱位等疾病常用手段之一,因此,对学龄前期儿童寰枢椎椎弓根相关数据的测量是非常有必要的。现有的研究多集中于青少年以上群体,而关于学龄前期儿童以下寰枢椎椎弓根内部通道特征的解剖学与形态学研究相关报道则较少。

随着椎弓根螺钉内固定技术的不断成熟与发展,已被广泛应用于成人的脊柱内固定术中,其具有多点固定、把持力大、稳定牢固、力学合理等优点,并成功应用于儿童颈椎椎弓根内固定治疗,但就学龄前期儿童寰枢椎椎弓根内固定的手术适应证及手术方式依然存在着一定争议[19]。目前已有国内外学者将椎弓根螺钉技术应用在儿童脊柱疾病手术中,Ruf 等[20-21]报道了 28 例 1~6 岁发育性脊椎侧弯患者,先行半椎体切除手术,然后行后路椎弓根螺钉内固定,都取得了满意效果;对 19 例 1~2 岁患儿胸、腰椎进行了椎弓根螺钉内固定手术,同样取得了满意的效果,结果证明椎弓根螺钉技术治疗儿童脊柱疾病是安全可行的。有研究报道对 10 例 1~3 岁幼儿下胸椎及腰椎、对 19 例 10 岁以下的儿童胸、腰椎、对 6~8 岁寰枢椎都实施了椎弓根螺钉内固定手术,并取得了满意的疗效[22-24]。因此认为个体化置钉原则对于学龄前儿童显得尤为重要,术前周密的准备、准确的测量、合适的术式及螺钉的选取,再配合精湛的外科技术,是保证小儿脊柱椎弓根螺钉内固定术成功的必要条件。

寰椎的解剖结构较为特殊,与枢椎及 C_3~C_7 完全不同。寰椎的解剖结构不存在椎体及椎弓,仅由寰椎前、后弓通过侧块连接组成的环状结构。寰椎的前弓较后弓短,约占整个寰椎的 20%。寰椎前弓短平呈板状与侧块的前方相连接,前弓的后面有齿突凹与枢椎的齿突相关节;寰椎后弓明显比前弓长,约占寰椎的 40%,在两侧块的后方与两侧块相连接,寰椎后弓变异比前弓多。寰椎前、后弓骨性结构都比较细,紧靠侧块后方的后弓上面偏前各有一斜行的深沟,即椎动脉沟,通向横突孔,此处骨质薄弱,最易发生骨折。寰椎的椎弓根和峡部在传统的解剖学定义中是不存在的。谭明生等[25]认为:寰椎后弓椎动脉沟处的骨质最为薄弱,也是寰椎椎弓根螺钉内固定手术的必经路径,因此临床医师经常将椎动脉沟处的后弓定义为寰椎的椎弓根。寰椎椎弓根螺钉内固定手术,也称为经寰椎后弓、侧块螺钉内固定术,即寰椎椎弓根螺钉的置入路径是经过寰椎后弓、寰椎后弓狭部到寰椎侧块内,置钉的角

度也各不相同,需要依据影像学进行个体置钉。当然,寰椎后弓的椎动脉沟处是置钉路径中最狭窄部分,也是置钉的最关键部位。

本课题测量了椎弓根的宽和高以及模拟椎弓根螺钉置入钉道的相关指标。儿童的颈椎骨性结构尚未发育完全,寰椎椎弓根更加细小,随着年龄增长,其宽度和高度均有所增加,但其宽度与高度的比值均大于1.0,即宽度比高度数值大,因此,寰椎椎弓根的高度决定置入螺钉的直径。马向阳等[26]通过多次实验证明:当寰椎椎弓根的高度值小于4.0 mm时,不适合置入3.5 mm直径的椎弓根螺钉。本次实验测得学龄前期儿童的寰椎PH数值均数都大于4.0 mm,理论上3~6岁儿童寰椎椎弓根可以置入直径为3.5 mm螺钉。基于学龄前期儿童处于生长发育较快时期,因年龄差异其寰椎的解剖变异较大,且寰椎椎弓根上方有椎动脉通过,因此在临床手术前对患者的寰椎椎弓根进行详细地设计及测量,是非常有必要的。寰椎椎弓根的PL随年龄的增长其长度呈增加的趋势,螺钉置入设计为钉道长度的80%,螺钉生物力学已经比较坚固,因此,学龄前期儿童的寰椎椎弓根在理论上可置入的螺钉长度为18~21 mm。

枢椎也是特殊颈椎,它的椎体较小,由椎体向上伸出一指状突起,称为齿突,与寰椎前弓的齿突凹构成关节。在齿突基底区的两侧各存在近圆形的关节面,分别与寰椎两侧块下缘的关节面组成关节。齿突被认为是寰椎的椎体,在发育过程中脱离寰椎而与枢椎的椎体相融合。寰枢区在胚胎期及婴幼儿期发育过程中变异率较下颈椎高,可引起寰枢椎结构不稳,甚至发生寰枢关节脱位致延髓受压,产生明显临床症状[27]。枢椎的椎弓根及峡部的定义存在着争议[28]。Ebraheim等[29]认为枢椎椎弓根是上关节突的下方和横突孔前内侧的狭长区域;峡部是位于上下关节突之间的狭窄部分。Naderi等[30]认为枢椎椎弓根和峡部是独立存在的解剖结构,枢椎的椎弓根与下颈椎的椎弓根不同,仅从下面观可见,其上方被峡部和上关节突遮盖,并与峡部融合,被称为“枢椎椎弓根峡部复合体”。Yarbroush等[31]提出枢椎上、下关节突之间的结构是椎弓根,即峡部。枢椎椎弓根螺钉的置入路径是经过下关节突、峡部,最后固定在椎体内,枢椎的椎弓根峡部是置入椎弓根螺钉的必经区域,也是最狭细的解剖结构。

本课题通过测量狭部的相关指标,以论证椎弓根螺钉置入的可行性,学龄前期儿童枢椎PW和PH均随着年龄增长而逐渐增长,而椎弓根宽和高的比值在学龄前期各年龄组均小于1.0,即宽度小于高度值,因此枢椎椎弓根的宽度决定椎弓根螺钉的直径选择。陈立言等[23]通过实验提出椎弓根螺钉直径相当于拟固定枢椎椎弓根宽度的80%~90%比较安全、稳定,而Suk等[32]则提出儿童的颈椎骨质结构具有的韧性和延性,能够置入椎弓根螺钉的直径是拟固定椎弓根宽度值的115%,即使是椎弓根的一部分皮质被螺钉螺纹突破,也不会出现明显不良后果。本课题测得3~6岁学龄前期枢椎椎弓根PW均数均大于4.0 mm,故认为在3~6岁学龄前期儿童枢椎椎弓根内置入最小直径为3.5 mm的螺钉是安全可行性。枢椎椎弓根内、外两侧有脊髓和椎动脉存在,较为安全的进钉方向是偏上内侧,由于学龄前期儿童生长发育较快,个体差异大,术前行影像检查并进行仔细分析是非常关键的。学龄前期儿童枢椎的PL在各个年龄组中均呈递增趋势,均值在23 mm左右,有学者通过实验证实,椎弓根螺钉置入钉道长度的80%,螺钉的稳定性已经比较强大[33],选择18 mm左右长度的螺钉行学龄前期儿童枢椎椎弓根螺钉固定是比较安全的。

学龄前期儿童寰枢椎椎弓根发育尚未完全成熟,与成人椎弓根比较,学龄前期儿童寰枢椎椎弓根十分细小,各个年龄段椎弓根的内外径,高度均小于成人。对于生长发育十分快的学龄前期儿童进行寰枢椎椎弓根螺钉固定时,必须根据不同年龄不同节段椎弓根各种参数变,结合CT二维及三维重建图像,选择相应的螺钉直径、长度、进钉方向。

综上所述,应用CT重建技术可以获得清晰的寰枢椎二维及三维图像,利用数字化技术测量学龄前期儿童寰枢椎椎弓根螺钉置入的相关参数,可以获得更为准确、真实的数据资料,为学龄前期儿童寰枢椎椎弓根螺钉技术提供指导。寰枢椎行椎弓根螺钉内固定术应用于3~6岁学龄前期儿童存在理论上可行性,由于寰枢椎椎弓根细小、寰枢区结构变异率高、椎弓根通道走行复杂,对手术的精准性要求极高,术前精准设计椎弓根通道是十分有必要的;利用3D打印技术可以在三维模型上观测、设计椎弓根钉道、模拟椎弓根螺钉置入等,设计个体化的置入螺钉方式,可极大提高学龄前期儿童椎弓根螺钉置入精确性和安全性。

[参考文献]

[1] Resnick DK, Benzel EC. C_1-C_2 pedicle screw fixation with rigid cantilever beam construct: case report and technical note[J]. Neurosurgery, 2002,50(2):426-428.

[2] Stulik J, Vyskocil T, Sebesta P, et al. Atlantoaxial fixation using the polyaxial screw-rod system[J]. Eur Spine J, 2007,16(4):479-484. doi: 10.1007/s00586-006-0241-6.

[3] Lapsiwala SB, Anderson PA, Oza A, et al. Biomechanical comparison of four C_1 to C_2 rigid fixative techniques: anterior transarticular, posterior transarticular, C_1 to C_2 pedicle, and C_1 to C_2 intralaminar screws[J]. Neurosurgery, 2006, 58(3): 516 - 521. doi: 10.1227/01.NEU.0000197222.05299.31.

[4] Savage JG, Fulkerson DH, Sen AN, et al. Fixation with C_2 laminar screws in occipitocervical or C_1-$_2$ constructs in children 5 years of age or younger: a series of 18 patients[J]. J Neurosurg Pediatr, 2014, 14(1): 87 - 93. doi: 10.3171/2014.3.PEDS13626.

[5] 任绍东,马邦兴,屠永刚,等. 寰椎的应用解剖及对寰椎椎弓根钉置钉方法的探讨[J]. 解剖学研究,2011,33(1):44 - 48.

[6] Richter M, Schmidt R, Claes L, et al. Posterior atlantoaxial fixation: biomechanical in vitro comparison of six different techniques[J]. Spine (Phila Pa 1976), 2002, 27(16): 1724 - 1732.

[7] 张 沛,刘 斌,常志强,等. 经寰枢椎椎弓根螺钉技术治疗寰枢不稳症[J]. 中国骨与关节损伤杂志,2011,26(5):430 - 432.

[8] 张跃辉,邵 将,宋 佳,等. 椎弓根螺钉技术在学龄前儿童寰枢椎脱位治疗中的应用[J]. 脊柱外科杂志,2016,14(4):211 - 215.

[9] 何宏伟,隋 桐,赵慧毅,等. 寰椎椎弓根螺钉置入相关参数的三维CT分析[J]. 中国组织工程研究,2012,16(9):1526 - 1529. doi:10.3969/j.issn.1673 - 8225.2012.09.002.

[10] 庞小平,于海龙,李小龙,等. 以CT三维重建技术测量颈椎椎弓根螺钉的置入参数[J]. 中国组织工程研究与临床康复,2010,14(9):1955 - 1958. doi: 10.3969/j.issn.1673 - 8225.2010.09.008.

[11] 于永涛,张少杰,刘 颖,等. 学龄期儿童寰枢椎数字化三维形态测量研究[J]. 中国脊柱脊髓杂志,2017,27(1):69 - 74.

[12] 方先来,张 德,孟志华,等. 螺旋CT三维测量在腰椎椎弓根置钉中的应用研究[J]. 中国脊柱脊髓杂志,2004,14(2):96 - 98.

[13] 席焕久,陈 昭. 人体测量方法[M]. 第2版. 北京:科学出版社,2010:87 - 89.

[14] 于建华,阿扎提,刘向峰,等. CT三维重建与颈椎椎弓根测量[J]. 中国组织工程研究,2012,16(13):2415 - 2418. doi: 10.3969/j.issn.1673 - 8225.2012.13.031.

[15] 贾卫斗,郑铁钢,杨博贵,等. 寰枢椎椎弓根影像学测量及临床应用[J]. 中国矫形外科杂志,2010,16(16):1221 - 1223.

[16] Platzer P, Jaindl M, Thalhammer G, et al. Cervical spine injuries in pediatric patients[J]. J Trauma, 2007, 62(2): 389 - 396. doi: 10.1097/01.ta.0000221802.83549.46.

[17] Klimo P Jr, Ware ML, Gupta N, et al. Cervical spine trauma in the pediatric patient[J]. Neurosurg Clin N Am, 2007, 18(4): 599 - 620.

[18] 刘世敬,钟世镇,李佛保. 儿童颈椎及脊髓损伤的研究进展[J]. 中国脊柱脊髓杂志,2007,17(11):875 - 877.

[19] Kothe R, Rüther W, Schneider E, et al. Biomechanical analysis of transpedicular screw fixation in the subaxial cervical spine[J]. Spine (Phila Pa 1976), 2004, 29(17): 1869 - 1875.

[20] Ruf M, Harms J. Posterior hemivertebra resection with transpedicular instrumentation: early correction in children aged 1 to 6 years [J]. Spine (Phila Pa 1976), 2003, 28(18): 2132 - 2138. doi: 10.1097/01.BRS.0000084627.57308.4A.

[21] Ruf M, Harms J. Pedicle screws in 1- and 2-year-old children: technique, complications, and effect on further growth[J]. Spine (Phila Pa 1976), 2002, 27(21): E460 - E466.

[22] 李 晶,吕国华,王 冰. 幼儿胸腰椎置入椎弓根螺钉可行性临床研究[J]. 中华骨科杂志,2009,29(11):1005 - 1008.

[23] 陈立言,彭新生,李佛保,等. 椎弓根钉固定在10岁以下小儿胸腰椎疾患治疗中的应用[J]. 中国脊柱脊髓杂志,2006,16(4):263 - 266.

[24] 林 斌,邓雄伟,刘 晖,等. 儿童寰枢椎后路椎弓根螺钉固定的解剖与影像学研究[J]. 中国临床解剖学杂志,2008,26(4):359 - 362.

[25] 谭明生,张光铂. 浅谈寰枢椎脱位的治疗选择与手术适应证[J]. 中国脊椎脊髓杂志,2006,16(5):330 - 331.

[26] 马向阳,钟世镇,刘景发,等. 寰椎后路椎弓根螺钉固定的解剖可行性研究[J]. 中国临床解剖学杂志,2003,21(6):554 - 555.

[27] 兰永树,李登维,黄新文,等. 寰枢椎病变术前多层螺旋CT成像椎弓根钉道设计的价值[J]. 实用放射学杂志,2008,24(3):384 - 386.

[28] 王建华,尹庆水,夏 虹,等. 数字骨科技术在寰枢椎个体化置钉手术中的应用[J]. 脊柱外科杂志,2011,9(3):165 - 168. doi:10.3969/j.issn.1672 - 2957.2011.03.010.

[29] Ebraheim NA, Fow J, Xu R, et al. The location of the pedicle and pars interarticularis in the axis[J]. Spine (Phila Pa 1976), 2001, 26(4): E34 - E37.

[30] Naderi S, Arman C, Guvencer M, et al. An anatomical study of the C_2 pedicle[J]. J Neurosurg Spine, 2004, 1(3): 306 - 310. doi: 10.3171/spi.2004.1.3.0306.

[31] Yarbroush BE, Hendey GW. Hangman's fracture resulting from improper seat belt use[J]. South Med J, 1990, 83(7): 843 - 845.

[32] Suk SI, Kim WJ, Lee SM, et al. Thoracic pedicle screw fixation in spinal deformities: are they really safe? [J]. Spine (Phila Pa 1976), 2001, 26(18): 2049 - 2057.

[33] Brantley AG, Mayfield JK, Koeneman JB, et al. The effects of pedicle screw fit. An in vitro study[J]. Spine (Phila Pa 1976), 1994, 19(15): 1752 - 1758.

(编辑:左艳芳)