

3D 机器人系统锥形束计算机断层成像在颈椎成像中的应用价值

邢俊, 孙炎冰, 朱子奇, 李刚, 焦静, 倪其鸣, 于红

【摘要】 目的:通过与常规 X 线摄影和 CT 进行比较,探讨 Siemens 双悬吊 3D 机器人系统(Multitom RAX)锥形束计算机断层成像(CBCT)在颈椎检查中的临床应用价值。**方法:**回顾性将在本院骨科就诊且因疑似颈椎疾病而分别行正侧位 X 线摄影(A 组)、颈椎 CT(B 组)或 3D RAX CBCT(C 组)检查的 60 例患者纳入本研究。基于 3 组图像,测量每例患者颈椎解剖学参数,包括枕颈角(OC_2A)、第 1 胸椎倾斜角(T_1SA)、 C_2 与 C_7 矢状面轴向距离(cSVA)及颈椎前凸角(CL),并采用 4 级评分法评估图像质量。计算各组的辐射剂量,包括容积剂量指数(CTDI)、剂量长度乘积(DLP)和剂量面积乘积(DAP)。对 3 组的各项解剖学参数的测量结果、图像质量及辐射剂量指标进行比较。**结果:**A、C 两组的 OC_2A 、CL 及 cSVA 分别为 $18.29^\circ \pm 6.73^\circ$ 、 $10.52^\circ \pm 12.53^\circ$ 、 $(26.77 \pm 10.33)mm$ 及 $18.14^\circ \pm 7.23^\circ$ 、 $10.54^\circ \pm 11.08^\circ$ 、 $(27.07 \pm 9.26)mm$,两组间差异均无统计学意义($P > 0.05$);B 组的 OC_2A 、CL 及 cSVA 分别为 $14.78^\circ \pm 6.98^\circ$ 、 $3.32^\circ \pm 13.70^\circ$ 和 $(21.92 \pm 8.85)mm$,与 A、C 两组间的差异均有统计学意义($P < 0.05$)。三组之间图像质量主观评分(A 组: 2.5 ± 0.65 、B 组: 3.72 ± 0.45 、C 组: 3.52 ± 0.62)的差异有统计学意义($P < 0.05$)。C 组的剂量长度乘积(DLP)较 B 组降低了 54.6%,较 A 组 DAP 增大了 86.9%,差异均有统计学意义($P < 0.001$)。**结论:**颈椎检查时,采用 3D 机器人系统 CBCT 较常规 X 线能提供质量更高的图像且相比 CT 有更精准的站立位测量数据及更低的辐射剂量,能为临床提供更精准、更有价值的测量参数。

【关键词】 颈椎;3D 机器人系统;锥形束计算机断层成像;体层摄影术,X 线计算机;辐射剂量;图像质量

【中图分类号】 R814.41;R814.42;R681.5 **【文献标志码】** A

【文章编号】 1000-0313(2023)04-0503-05

DOI:10.13609/j.cnki.1000-0313.2023.04.022

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Application value of 3D robot system cone beam computed tomography in cervical spine imaging XING Jun, SUN Yan-bing, ZHU Zi-qi, et al. Department of Radiology, the Affiliated Chest Hospital, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200092, China

【Abstract】 Objective: By comparing with conventional radiography and CT, to investigate the clinical application and value of cone beam computed tomography (CBCT) scan by a Siemens double suspended 3D robot system (Multitom RAX) in cervical spine. **Methods:** 60 patients with suspected cervical spine disease in the orthopedic department of our hospital were collected. The cervical spine of all patients was examined with frontal and lateral radiography (group A), CT (group B) and CBCT by a RAX 3D shoot (group C). The cervical anatomic parameters were measured, including pillow cervical angle (OC_2A), T_1 -slope angle (T_1SA), sagittal axial distance of C_2 to C_7 (cSVA) and cervical vertebrae angle (CL). Image quality of the three groups were evaluated on a scale of 1 to 4. The radiation dose indexes in the three groups were calculated, including volume CT dose index (CTDIvol), dose length product (DLP) and (dose area product, DAP). The cervical anatomic parameters, image quality score and radiation dose indexes of the three groups were compared statistically. **Results:** The OC_2A , CL and cSVA of groups A and C were $18.29^\circ \pm 6.73^\circ$, $18.14^\circ \pm 7.23^\circ$, $10.52^\circ \pm 12.53^\circ$, $10.54^\circ \pm 11.08^\circ$, (26.77 ± 10.33) and $(27.07 \pm 9.26)mm$, respectively, and there was no significant difference between

作者单位: 200092 上海,上海交通大学附属胸科医院放射科(邢俊、孙炎冰、焦静、倪其鸣、于红); 200120 上海,上海东方医院放射科(朱子奇、李刚)

作者简介: 邢俊(1989—),男,浙江奉化人,技师,主要从事 CT 及 X 线新技术研究和应用工作。

通讯作者: 于红, E-mail: yuhongphd@163.com

the two groups (all $P > 0.05$). The OC_2A , CL and $cSVA$ of group B were $14.78^\circ \pm 6.98^\circ$, $3.32^\circ \pm 13.70^\circ$ and (21.92 ± 8.85) mm respectively, which were statistically different from those of group A and C (all $P < 0.05$). There were statistically significant difference in the subjective scores of image quality among the three groups (Group A: 2.5 ± 0.65 , Group B: 3.72 ± 0.45 , Group C: 3.52 ± 0.62 ; $P < 0.05$). The DLP of group C decreased by 54.6% compared with group B, and the DAP of group C increased by 86.9% compared with group A, the difference was statistically significant (both $P < 0.001$). **Conclusion:** In cervical spine examination, the 3D robotic system CBCT can provide higher quality images than conventional X-rays, and has more accurate standing measurement data and lower radiation dose than CT, which can provide more accurate and valuable measurement parameters for clinical practice.

【Key words】 Cervical spine; 3D robot system; Cone beam computed tomography; Tomography; X-ray computed; Radiation dose; Image quality

脊髓型颈椎疾病(cervical spondylotic myelopathy, CSM)是引起颈部脊髓功能损害的常见病因^[1]。其中颈椎矢状位平衡(cervical sagittal balance, CSB)状态对于脊髓型颈椎病患者手术方式的选择和术后评估有重要指导意义^[2-3]。颈椎矢状位平衡是对站立位颈椎位置的一种描述,通过相应的矢状位参数可以对其进行评估^[4]。其中第一胸椎倾斜角、枕颈角、 $C_2 \sim C_7$ 矢状面轴向距离以及颈椎前凸角都是评估矢状方向上颈椎平衡的重要参数。站立位 X 线平片是临床测量各种脊柱矢状位平衡相关角度的金标准,但由于拍摄时常存在椎体边缘显示不清或双肩关节遮挡致使颈-胸交界处显示模糊等情况^[5]。颈椎 CT 扫描结合矢状面图像重建常因患者扫描时为卧位(非生理自然状态)而导致对某些解剖角度的测量相较于自然站立时的生理曲度缺乏足够的精准度^[6]。而锥形束计算机断层成像(cone beam computed tomography, CBCT)具有站立位容积成像功能,因此本研究中采用 3D 机器人系统 CBCT 进行颈椎扫描和图像重建,并与普通 X 线平片及常规 CT 扫描的重组图像进行比较,旨在探讨 CBCT 在评估 CSM 中的临床应用价值。

材料与方法

1. 临床资料

回顾性选取 2021 年 2 月—2022 年 1 月在本院骨科收治的 60 例颈椎疾病患者。其中,男 24 例,女 36 例;年龄 19~54 岁,平均 (36 ± 10) 岁;体质指数为 $17.6 \sim 28.8 \text{ kg/m}^2$, 平均 $(23.01 \pm 3.03) \text{ kg/m}^2$ 。纳入标准:①确诊为脊髓型颈椎病且临床资料完整。②有完整的 X 线平片、CT 及颈椎 CBCT 检查资料。③所有患者及家属知情同意并签署知情同意书。排除标准:①站立困难患者;②患有帕金森或精神疾病等配合度较差患者。

2. 检查方法

所有患者行常规颈椎正侧位 X 线摄影(A 组)、颈

椎 MSCT 扫描(B 组)和 CBCT 扫描(C 组)。MSCT 检查使用佳能第三代 Aquilion ONE PureVISION 320 排 CT 机。扫描参数:120 kV,自动管电流技术,螺距 0.8,准直器宽度 $64 \times 0.5 \text{ mm}$, 0.75 s/r , 矩阵 512×512 ,视野 $320 \text{ mm} \times 320 \text{ mm}$,扫描范围自鞍上约 20 mm 处至第三胸椎椎体水平,重建层厚 1.0 mm、层间距 1.0 mm。扫描完成后采用 2.0 mm 层厚进行图像重建,获得矢状面图像。A 组和 C 组图像的采集均使用本院双悬吊 3D 机器人系统(Multitom Rax),C 组使用该系统的 CBCT 功能进行数字化容积体层摄影(以下简称 3D-RAX)。该系统拥有两条悬臂、一条连接球管,一条连接 0.148 mm 像素点、大小为 $43 \text{ cm} \times 43 \text{ cm}$ 的动态平板,通过两条悬臂以患者为轴心相对旋转,X 线发生器以极低的射线量围绕患者做环形 DR(数字式投照),并按一定间隔进行序列曝光。3D 机器人实际扫描角度为 200° ,扫描时间为 20 s,共获 298 帧原始图像,3D 图像的体素分辨率为 0.3 mm,足以支持对感兴趣区域进行准确重建^[7]。扫描完成后可进行图像重建得到冠状面、矢状面和横轴面图像。

3. 各指标的测量方法

在 A 组的侧位片、B 组及 C 组的矢状面重建图像上进行颈椎解剖学参数的测量(图 1)。①枕颈角($occipital-C_2$ angle, OC_2A):定义为 McGregor 线(硬腭后缘至枕骨鳞部最低点的连线)与第 2 颈椎(C_2)下终板延长线之间的夹角;②颈椎前凸角(cervical lordosis, CL):又称为 $C_2 \sim C_7$ 的 Cobb 角,定义为 C_2 椎体下缘延长线与 C_7 椎体下缘延长线之间的夹角;③ $C_2 \sim C_7$ 矢状面轴向距离(cervical sagittal vertical axis, $cSVA$):定义为经 C_2 椎体中心的垂线至 C_7 椎体背侧上缘的垂直距离;④ T_1 倾斜角(T_1 -slope angle, T_1SA):定义为第一胸椎椎体上缘与水平面的夹角。

4. 图像质量评估

将 A 组及 C 组图像数据传输至 Siemens Syngo.via 后台工作站;B 组传输至佳能 Aquilion ONE Pure



图 1 患者,女,36 岁,颈椎反弓。a)颈椎 X 线侧位片,第一胸椎由于影像重叠效应而显示欠佳,影响 T₁SA 的测量;b)颈椎 CT 矢状面重组图像,反弓生理曲度相较于站立位时的幅度偏小;c)颈椎 3D-RAX 矢状面重组图像,显示 CL 角(1)、OC₂A 角(2)、T₁SA(3)和 cSVA(4)的测量方法。

ViSION 320 排 CT 机的后台工作站(Vitreia 处理器)中,由两位经验丰富的放射科医师及一位骨科医师采用双盲法独立阅片及测量。通过 4 级评分法对图像质量进行评估。1 分(图像质量差):无法看清 C₇ 和 T₁ 等椎体的边界,图像因重叠伪影导致椎体结构模糊不清,无法进行各种解剖线条的勾画和角度的测量;2 分(图像质量中等):无法清晰分辨 C₇ 和 T₁ 等椎体的边界,妨碍各种解剖线条的勾画和角度的测量;3 分(良好)显示 C₇ 和 T₁ 等椎体,能显示椎体边界,不影响角度测量;4 分(优秀)清晰显示 C₇ 和 T₁ 等椎体及其分界,能显示解剖细节,通过丰富的影像信息完成角度测量。当评分结果不同时,经协商后达成一致意见。

5. 辐射剂量

对检查过程中辐射剂量的评估,B 组采用 CT 容积剂量指数(volume CT dose index,CTDIvol)和剂量长度乘积(dose length product,DLP),A 组和 C 组采用 X 射线束横截面积与所致平均剂量的乘积(dose-area product,DAP)。然后,采用公式(1)和(2)进行换算:

DLP=DAP×k (1)

CTDI=DLP/27.18cm (2)

其中,k 为转换因子,其值为 0.329 mGy·cm/(μGy·m²)。从而能对 3 组的辐射剂量进行比较。

6. 统计学方法

使用 SPSS 26.0 统计软件进行统计学分析。对 3 组中各项定量指标的比较采用单因素方差分析;对组间差异有统计学意义的指标,进一步采用最小显著性差异(LSD)*t* 检验进行事后分析(组间两两比较),主观评分的比较采用 Kruskal-Wallis *H* 检验。对 3 组的辐射剂量指标值的比较采用独立样本 *t* 检验。以 *P*<0.05 为差异有统计学意义。

结 果

1. 图像质量

B、C 两组通过图像重建成功完成颈椎矢状面 4 项解剖学指标的测量;A 组中有 7 例患者因增生或颈椎侧弯等因素而无法准确测量 CL 及 cSVA,有 43 例患者由于肩关节遮挡而无法测量 T₁SA。三组图像上各项解剖学参数值及图像质量评分的比较见表 1。三组之间,OC₂A、CL、cSVA 及主观评分的差异均有统计学意义(*P*<0.05),仅 T₁SA 的差异无统计学意义(*P*>0.05)。

表 1 三组的颈椎解剖学参数及图像质量主观评分的比较

指标	A 组 ^a	B 组	C 组	统计量	<i>P</i> 值
OC ₂ A	18.29°±6.73°	14.78°±6.98°	18.14°±7.23°	4.841 ^a	0.002
CL	10.52°±12.53°	3.32°±13.70°	10.54°±11.08°	6.541 ^a	0.009
T ₁ SA	27.89°±10.79°	27.69°±8.95°	25.56°±8.23°	1.045 ^a	0.354
cSVA/mm	26.77±10.33	21.92±8.85	27.07±9.26	5.508 ^a	0.002
主观评分	2.5±0.65	3.72±0.45	3.52±0.62	82.083 ^b	<0.001

注:^a A 组中测量 CL 和 cSVA 时,样本量为 53 例,测量 T₁S 时样本量为 27 例,其它各指标测量时在各组中的样本量均为 60 例。^a 为 *F* 值;^b 为 *H* 值。

进一步组间两两比较结果见表 2。统计分析结果显示,B 组的 OC₂A、CL 及 cSVA 与 A、C 两组间的差异均有统计学意义($P<0.05$);A 组的主观评分低于 B、C 两组,差异均有统计学意义($P<0.001$)。

2. 辐射剂量

三组辐射剂量指标的比较见表 3。C 组较 B 组的 CTDI 和 DLP 分别降低了 51.3% 和 54.6%,C 组较 A 组的 DAP 增高了 86.9%,差异均有统计学意义($P<0.05$)。

表 2 三组间解剖学参数和主观评分的多重比较的检验结果

参数	LSD- <i>t</i> 检验的 <i>P</i> 值		
	A 组 vs. B 组	A 组 vs. C 组	B 组 vs. C 组
OC ₂ A	0.007	0.910	0.009
CL	0.003	0.995	0.002
cSVA/mm	0.007	0.869	0.003
主观评分	<0.001	<0.001	0.395

讨 论

近年来,随着人们对颈椎矢状面平衡性研究的深入,已将其视为导致颈部疼痛、颈椎功能障碍及截骨手术后疗效差的重要原因之一^[7]。通过观察矢状面参数的变化,能够判断生理曲度情况、指导术前手术方案的制订及预测术后神经功能的恢复情况,因此精准有效地测量颈椎矢状面各种解剖学指标就显得尤为重要^[8]。

本研究采用 3 种方法进行颈椎扫描,在 3 种图像上对 4 个颈椎矢状面参数进行测量,结果显示在卧位和站立位采集的图像上,OC₂A、CL 及 cSVA 测量值的差异均有显著统计学意义($P<0.05$)。其中,站立位拍摄的 A、C 两组图像上 OC2A 和 CL 均大于 B 组(卧位采集)的测量值;而图像采集时的体位对 T₁SA 的测量结果无显著影响($P>0.05$)。

采集 X 线平片(A 组图像)时,当颈椎有骨赘增生时可产生明显伪影而导致 CL 及 cSVA 无法测量;且由于双肩关节的遮挡,致使颈-胸交界部位显示不清^[5],仅有 45% 的病例能获得 T₁SA 的测量值。而 CT 和 3D-RAX 都可以通过容积再现(VR)及最大密度投影(MIP)等技术进行图像重建和精准测量。图像质量主观评分结果显示 CT 的图像质量略高于 3D-RAX,两组通过后期重建 VR 及 MIP 图相较于 X 线都可以得到更多和更丰富的影像信息。在总体图像质

量及得到的影像信息方面,X 线平片远不及 CT 及 3D-RAX。由于人们在日常生活中是站立姿态,以致于在脊柱手术的矫形中需要以患者站立位的矢状面解剖学参数为指导^[9],尤其是对于需要截骨的手术^[10-11];如椎间盘切除椎间植骨融合术及人工颈椎间盘置换术前 CT 检查虽获得丰富的影像信息,但因卧位采集,使得其矢状面重建图像上测量的 OC₂A、CL 及 cSVA 值与站立位采集图像上的测量值相比有一定差异,从而导致在指导临床进行术前评估及术中操作时缺乏精准度^[12-13]。而 3D-RAX 可以与 X 线摄影时一样在站立位进行图像采集,且优化了 X 线在测量时可能出现的缺陷,如患者骨赘增生、颈椎侧弯等因素导致测量椎体边缘显示欠佳或肥胖人群中 T₁ 椎体、胸骨柄和 C₇ 下终板显示不清等情况。3D-RAX 也可以与 CT 一样拥有丰富的影像信息、进行多方位图像重建,弥补 CT 卧位测量的缺陷。

随着人们健康意识提高,对电离辐射致癌风险认识深入,低剂量已成为研究热点^[14-16]。既往研究已经表明,CBCT 扫描通过 X 线发生器以较低的射线量围绕患者做环形 DR(数字式投照),可以用低于 MSCT 扫描的辐射剂量获得令人满意的图像质量^[17]。3D-RAX 首先在平板探测器方面,通过配备 0.148 像素点尺寸的 43 cm×43 cm 动态平板探测,相对于 0.5~0.6 mm 的 CT 线形探测器,其尺寸更小,具有更高的空间分辨率,同时由于探测器的面阵排列,3D-RAX 拥有更高的 X 线利用率,能显著提高图像的清晰度。其次 3D-RAX 机器人使用极低剂量的脉冲透视技术和控制技术,确定旋转中心位置,通过两条悬臂将球管和平板相对,以患者为轴心按一定间隔进行序列曝光,每次曝光都基于自动曝光控制,既保持了运动的精度及稳定性又显著降低了辐射剂量^[18]。本研究中对 3 组数据的统计分析结果显示,3D-RAX 的辐射剂量虽高于 X 线摄影,但明显低于 CT 扫描。相较于以往临床在椎间盘切除椎间植骨融合术及人工颈椎间盘置换术前需行 CT 及 X 线联合检查^[19-20],3D-RAX 完全可替代两者,既降低了患者的时间成本,同时相较于 2 次检查,能显著降低患者所接受的辐射剂量。

当然,3D-RAX 也有不足之处:①因受到动态平板探测器的限制,扫描范围不及 CT 广;②图像质量方面,虽然能清晰显示骨骼图像,但无法像 CT 或 MRI

表 3 三组辐射剂量指标值的比较

剂量指标	A 组	B 组	C 组	<i>t</i> 值	<i>P</i> 值
CTDI/mGy	—	10.9±1.62	5.31±1.12	21.968	<0.001
DLP/mGy·cm	—	318.09±62.96	144.42±30.54	19.225	<0.001
DAP/μGy·m ²	57.66±10.56	—	438.96±92.83	-31.613	<0.001

一样,能获得满意的软组织图像,无法精确诊断椎间盘突出疾病。③为了避免产生运动伪影,需要提前训练患者配合制动站立 20 s 左右。

综上所述,使用 3D 机器人系统 CBCT 功能扫描颈椎,相比常规 X 线,可以更好、更丰富地显示颈椎的信息,而相较于卧位 CT 扫描,能更精准地获得站立位的各项解剖学参数且辐射剂量更低,从而能更好、更全面地帮助临床进行术前测量及术后评估。

参考文献:

[1] 邵晨兰,廖振洪,覃波.扩散张量成像在评估脊髓型颈椎病患者术后功能预后中的研究[J].实用放射学杂志,2020,36(6):876-879.

[2] 李祖昌,蒋继乐,何达,等.颈椎矢状面平衡参数与颈椎手术关系研究进展[J].中华骨科杂志,2021,41(8):532-540.

[3] 徐野夫,王锋,吴小涛.颈椎矢状位平衡参数的研究进展[J].中国矫形外科杂志,2020,28(5):425-429.

[4] 鲁新垒,张静,郭海龙,等.颈椎矢状位参数在颈椎疾病诊治中的应用进展[J].中华脊柱脊髓杂志,2019,29(11):1033-1037.

[5] 马胜彪,送瑞鹏,蔡一鸣,等.脊髓型颈椎病患者与正常人颈椎侧位 X 线断层融合图像上颈椎矢状位参数对比分析[J].河南医学研究,2019,28(6):965-968.

[6] 王权.颈椎扫描中多层螺旋 CT 图像后处理的应用价值[J].中国医药指南,2020,18(31):66-67.

[7] Noo F,Defrise M,Kudo H,et al.Image reconstruction from fan-beam projections on less than a short scan[J].Phys Med Biol,2002,47(14):2525-2546.

[8] 欧阳森,鲁世保,孔超,等.退行性脊柱矢状面失衡患者腰椎椎旁肌的特点及其与失平衡程度之间的关系[J].中国脊柱脊髓杂志,2021,31(6):488-496.

[9] 张奎渤,詹鸿锐,于兵,等.X 线与 CT 影像学测量成人颈椎矢状面参数的差异[J].第三军医大学学报,2015,37(19):1997-2000.

[10] 柳杰,滕清华,张忠杰,等.零切迹椎间融合器与传统钛板笼架治疗退行性颈椎病[J].中国矫形外科杂志,2019,27(15):1395-

1399.

[11] 刘盾,史本龙,朱泽章,等.脊柱侧后凸/后凸畸形 SRS-Schwab 四级截骨术后近端交界性后凸的危险因素分析[J].中国脊柱脊髓杂志,2021,31(7):579-585.

[12] 潘宇波,冯皓宇,陈晨,等.颈椎后路单开门椎管扩大椎板成形术对颈椎矢状面平衡的影响[J].实用骨科杂志,2020,26(7):577-582.

[13] Lee HD,Jeon CH,Chung NS,et al.Comparative analysis of three imaging modalities for evaluation of cervical sagittal alignment parameters:a validity and reliability study[J].Spine,2017,42(24):1901-1907.

[14] 刘小焕,岳军艳,谷世立,等.不同体型特异性剂量估算在成人头部 CT 扫描中差异比较[J].放射学实践,2021,36(10):1294-1297.

[15] 王晓瑜,祁荣兴.低剂量冠状动脉 CTA 支架成像研究[J].放射学实践,2019,34(6):698-702.

[16] 陈迢,张照喜,彭伟,等.扫描中心对体型特异性辐射剂量及图像噪声影响的体模实验研究[J].实用放射学杂志,2020,36(3):479-482.

[17] Koivisto J,Kiljunen T,Shi XQ,et al.Effective radiation dose of a MSCT,two CBCT and one conventional radiography device in the ankle region[J/OL].Foot Ankle Res,2015,8(1):e8.DOI:10.1186/s13047-015-0067-8.

[18] Koivisto J,Shi XQ,Wolff J,et al.Effective radiation dose in the wrist resulting from a radiographic device,two CBCT devices and one MSCT device;a comparative study[J].Radiat Prot Dosimetry,2018,179(1):58-68.

[19] 王晓斐,刘浩,孟阳,等.单节段 Prestige LP 人工颈椎间盘置换术后高等级异位骨化的危险因素[J].中国脊柱脊髓杂志,2021,31(1):8-15.

[20] 黄康康,刘浩,丁琛,等.颈椎前路 Hybrid 手术不同组合方式治疗连续三节段颈椎病的疗效对比[J].中国脊柱脊髓杂志,2021,31(9):771-782.

(收稿日期:2022-07-31 修回日期:2023-01-17)