

O型臂导航系统在脊柱外科手术中的应用进展

Application progress of the O-arm based-navigation system in spine surgery

刘亚明, 童 通, 申 勇

(河北医科大学第三医院脊柱外科 050051 石家庄)

doi: 10.3969/j.issn.1004-406X.2016.07.13

中图分类号: R681.5, R816.8 文献标识码: A 文章编号: 1004-406X(2016)-07-0635-05

近些年, 随着脊柱外科手术技术及内置物的不断更新进步, 脊柱外科得到了很大的发展, 但脊柱解剖结构复杂, 毗邻重要血管神经, 手术的复杂性、高风险性也越来越明显。计算机辅助导航系统应运而生, 其主要作用是提高术野的可视度, 使手术操作更加微创、安全、精准^[1]。O型臂导航系统可短时间内获得较高质量的三维 CT 图像, 直接输入到导航计算机中自动匹配、注册, 使术者能够近乎“直视下”精准的完成手术操作, 被公认为是目前脊柱外科领域最先进的导航技术^[2]。笔者就 O 型臂导航系统在脊柱外科中的应用进展综述如下。

1 O型臂导航辅助下的手术设计

O 型臂术中导航技术出现以前, 术者往往单纯依靠术前 X 线、CT、MRI 等影像资料来进行手术设计, 但临床工作中常发现患者经过体位摆放后脊柱形态会发生变化或手术过程中发现手术设计会有不合理之处, 需重新进行

手术设计, 尤其是复杂畸形矫正类手术。O 型臂导航的出现使得术者可以快速获得手术体位下的第一手影像资料, 根据术中扫描不断调整手术方案, 选择最佳置钉位置和数量。Larson 等^[3]曾在 O 型臂引导下手术治疗 14 例先天性脊柱侧凸畸形患儿, 术前计划置入螺钉 173 枚, 最终基于术中 CT 扫描结果 31 枚螺钉因各种解剖变异或经钉道模拟发现没有合适大小的螺钉而放弃置入, 他认为这样可以避免对因合并有复杂畸形而不具备置钉条件的部位进行不必要的骚扰, 降低手术风险。Mengran 等^[4]在一项针对 I 型神经纤维瘤病伴营养不良型脊柱侧凸畸形的手术治疗的研究中发现, 与徒手置钉组相比, O 型臂导航组顶椎区域置钉密度显著提高(58% VS 42%, $P < 0.001$), 此类患者由于侧凸节段短而弧度锐利, 顶椎区域常伴有半椎体、椎体旋转、椎弓根畸形等复杂情况, 但已有文献^[5]指出顶椎区域置钉密度会影响最终矫形效果的好坏, 提高顶椎区域置钉密度可以改善矫形效果。Guppy 等^[6]曾在 O 型臂导航下完成了 4 例复杂上颈椎畸形矫正手术, 他指出术前的影像资料无法满足手术设计需求, 必须根据术中 O 型臂导航扫描结果引导准确置钉, 还可以达到精准减压、精确截骨的目的。

第一作者简介: 男(1988-), 硕士在读, 研究方向: 脊柱外科
电话: (0311)88602316 E-mail: liuyamingspine@163.com
通讯作者: 申勇 E-mail: spineshenyong@163.com

- models of congenital and idiopathic scoliosis implicate dysregulated Wnt signalling in disease [J]. Nat Commun, 2014, 5: 4777.
30. Fei Q, Wu Z, Wang H, et al. The association analysis of TBX6 polymorphism with susceptibility to congenital scoliosis in a Chinese Han population[J]. Spine, 2010, 35(9): 983-988.
31. Wu N, Yuan S, Liu J, et al. Association of LMX1A genetic polymorphisms with susceptibility to congenital scoliosis in Chinese Han population [J]. Spine, 2014, 39(21): 1785-1791.
32. 原所茂, 邱贵兴. HES7 基因多态性与先天性脊柱侧凸的关联性分析[J]. 中国脊柱脊髓杂志, 2009, 19(3): 222-226.
33. Gu Z, Qiu G, Zhang Y. Genetic association analysis between polymorphisms of HAIRY-AND-ENHANCER-OF SPLIT-7 and congenital scoliosis[J]. Int J Clin Exp Med, 2015, 8(9): 16714-16718.
34. 沈岩. 致病基因的定位候选克隆[J]. 生命科学, 1999, 11(5): 205-208.
35. Cirulli ET, Goldstein DB. Uncovering the roles of rare variants in common disease through whole-genome sequencing [J]. Nat Rev Genet, 2010, 11(6): 415-425.
36. Bobyn JD, Little DG, Gray R, et al. Animal models of scoliosis[J]. J Orthop Res, 2015, 33(4): 458-467.
37. Gomez C, Özbudak EM, Wunderlich J, et al. Control of segment number in vertebrate embryos[J]. Nature, 2008, 454(7202): 335-339.
- (收稿日期: 2016-04-14 修回日期: 2016-06-12)
(本文编辑 李伟霞)

2 O 型臂导航引导下的术中置钉

由于椎弓根螺钉可以在脊柱三柱生物力学方面起到坚强固定的作用,它的应用越发普遍。但椎弓根的解剖常存在变异并且毗邻重要的神经、血管等组织,因此椎弓根螺钉置入技术也被称作“一项古老而最富有挑战性的技术”。据文献报道^[7],即使经验丰富的术者,传统 C 型臂 X 线机引导下螺钉误置率约为 1.7%~15.7%。

2.1 脊柱侧凸矫形内固定

椎弓根螺钉内固定系统以其坚强、可靠的三柱稳定性和强大的撑开、加压、去旋转能力,成为治疗脊柱侧凸最有效的内固定方式^[8]。Toshiaki^[9]等曾对 61 例行手术治疗的脊柱侧凸畸形患者进行回顾性研究,根据 Neo 螺钉分级法基于术前 CT 扫描的三维导航系统组(术前 CT 导航组)中 11 枚(5.0%)螺钉评估为 2 级,无 3 级螺钉,术中 O 型臂导航组中 13 枚(3.1%)螺钉评估为 2 级,同样没有 3 级螺钉出现,经对比两组螺钉误置率之间无统计学差异($P>0.05$)。说明 O 型臂导航系统在脊柱侧凸手术置钉优良率方面能获得与术前 CT 导航一样的良好效果。但两组在置钉时间上 O 型臂导航组显著短于术前 CT 组,两组相比有统计学差异($P<0.05$),分析原因主要是 O 型臂导航系统自动注册,省去了术前 CT 系统所需的复杂注册过程,为手术节省了大量时间。Larson 等^[9]在 O 型臂导航下手术治疗 14 例先天性脊柱侧凸患者,共置入 142 枚椎弓根螺钉,置钉优良率 99.3%,术中仅 1 枚螺钉进行了位置调整。近期一项关于侧凸畸形手术时长影响因素的研究^[10]显示,术中使用 O 型臂导航并不会对总体手术时间产生影响。

2.2 颈椎椎弓根螺钉内固定

由于颈椎解剖关系复杂,毗邻椎动脉、脊髓等重要血管和神经,椎弓根细小且变异性较大,各种徒手置钉法潜在风险较高,椎弓根螺钉皮质穿透率高达 6.7%~24%,因此其临床应用受到一定程度的限制^[11]。随着导航技术的出现,一些学者开始尝试在各种辅助手段下置入颈椎椎弓根螺钉,有国外学者^[12]曾对 21 例因颈椎疾患需行颈后路椎弓根螺钉内固定术的患者进行研究,在 O 型臂导航下共置入椎弓根螺钉 108 枚,其中有 3 枚(2.8%)螺钉评估为 2 级(突破范围 $<4\text{mm}$),但均未产生神经血管损伤等严重并发症。在合并有后凸畸形颈椎病的矫形手术中 O 型臂导航的优势更加明显。Theologis 等^[13]在 O 型臂系统的导航下对 21 例合并有颈胸段后凸畸形的颈椎病患者行后路椎弓根螺钉矫形内固定术,共置入 121 枚颈椎椎弓根螺钉,准确率达到 99%,术后 CT 扫描发现只有 1 枚螺钉破椎弓根内壁导致了 C5 神经根麻痹,平均随访 29.8 个月,所有患者效果良好,认为 O 臂导航应用于合并有复杂畸形的患者安全、有效。Mattei^[14]报道 O 型臂导航下手术治疗 1 例合并有严重颈椎退变和后凸畸形的 Hajdu-Cheney 综合征的 65 岁女性骨质疏松患者,他认为对于此类复杂畸形手术,普通透视下神经损伤风险很大,O 型臂导航下置钉准确,尤其对合并有严重骨质疏松患者防止了螺钉调整所带来的

把持力下降的问题。

2.3 腰椎椎弓根螺钉内固定

Silbermann 等^[15]将 67 例因腰椎滑脱症或腰痛而行后路椎体间融合术 (posterior lumbar interbody fusion, PLIF)、经椎间孔入路腰椎体间融合术 (transforaminal lumbar interbody fusion, TLIF) 治疗的患者分为徒手置钉组和 O 型臂导航组,其中 O 型臂导航组 37 例患者置入 187 枚椎弓根(L1~S1)螺钉,置钉优良率达到 99%,显著高于徒手置钉组的 94.1%。但也有学者^[16]提出在单节段腰椎滑脱症手术中,O 型臂导航系统与徒手置钉准确率没有差异,C 型臂引导下的徒手置钉已经可以较好地完成任务,且节省手术时间。

3 O 型臂导航系统引导下的精准切除和减压

O 型臂术中扫描时对组织结构的清晰显示,可以协助术者进行精准的切除或减压。很多脊柱手术的主要目的是解除神经压迫,同时重建脊柱稳定性,并且致压物或肿物切除彻底与否直接影响最终的手术效果,但盲目的扩大减压会导致脊柱生物力学稳定性的丧失,所以如何精准减压成为保证术后疗效的关键所在^[17]。Sami^[18]报道了 1 例 O 型臂导航联合术中电生理监测下的骶骨尤文氏肉瘤的前后路联合整块切除术,O 型臂的辅助可以保证术中病灶切除彻底,降低复发率,且不损伤周围组织,内固定位置良好。Yuan 等^[19]曾报道了对 14 例伴有黄韧带骨化的胸椎管狭窄症患者 O 型臂导航辅助下后路微创精准减压的临床结果,术后平均随访 3.9 年,脊髓 JOA 评分从术前 6.1 分增加至末次随访的 8.6 分,术中导航辅助下可以对致压的黄韧带精准切除,避免了术中并发症的发生,实现了安全有效的精准减压。为了到达精准减压的目的,有研究者^[20]以 O 型臂导航系统为依托对 9 例神经根型颈椎病实施了改良颈前路微创减压髓核摘除术,在 O 型臂导航下结合术前 MRI 等影像资料,确定责任节段后建立工作通道,于椎体下缘开 $4\times 5\text{mm}$ 小孔进行精准减压,摘除突出的椎间盘,术后随访发现所有患者 VAS 评分明显改善,此法尤其适合于髓核向上、下游离的患者。Del Curto^[21]则是结合内镜技术在 O 型臂导航下经后路椎板减压治疗了 14 例神经根性颈椎病患者,术中有 3 例在 O 型臂扫描后发现减压不彻底行二次减压,术后所有患者根性症状消失。Westmaier^[22]近期一项研究指出,将 O 型臂导航系统与术中脊髓造影结合可以有效指导术中精确减压,确定减压范围,检验减压是否彻底。

4 O 型臂导航系统应用的技术创新

4.1 O 型臂导航系统与内镜技术有机结合

近些年微创理念在脊柱外科中备受关注,脊柱内镜技术日趋成熟,然而微创就意味着无法直视下根据传统的骨性解剖标志定位、操作空间狭小、手术器械细长,操作风险相应增高,伴随着透视次数的增多患者及术者所承受的

辐射剂量增加。因此,微创手术医师除具备传统手术能力外还必须熟练掌握解剖等基础知识,并在先进的透视、成像设备的辅助下才能最小化手术风险^[29]。计算机导航技术尤其是 O 臂导航系统的出现就像给医生戴上了一副“透视眼镜”,既可以达到经皮微创的目的,又可以精准减压、准确置钉,并且明显减少术者受到的辐射。孙涛等^[24]回顾性分析了 77 例 O 型臂导航辅助下采用侧入路椎间孔镜技术治疗腰椎间盘突出症患者的临床资料,术后随访 6 个月患者 VAS、ODI 评分显著改善,他认为 O 型臂导航系统的出现,使得椎间孔镜手术操作更加精准、安全。朱晓龙等^[25]基于 O-arm 导航技术在显微内窥镜下放置椎板螺钉直接修复 11 例腰椎峡部裂患者,得出同样的结论,他认为 O 臂导航可以提高椎板螺钉置入的准确性,保证了峡部融合率。Bajj 等^[26]在 O 型臂导航下对 14 例腰椎退行性病变或创伤患者行经皮微创手术治疗,术中置入 68 枚椎弓根螺钉中有 6 枚穿破皮质,但均未引起任何不良并发症,这与 Paul 等^[27]研究结果相似,因此他提出 O 型臂导航技术可以提高经皮置钉的准确性。O 型臂导航不仅可以提高置钉安全性、进行精确减压,还能降低术者受到的辐射剂量,Grelat 等^[28]的一项研究显示,在 O 型臂导航下行微创腰椎椎间孔椎体间融合术(transforaminal lumbar interbody fusion with a minimally invasive approach, MIS TLIF)的患者不会受到任何辐射,因为普通 X 线引导下术中需反复透视,但 O 型臂导航术中只需扫描一次且术者可以移至安全距离。O 型臂导航系统的出现,极大地推进了脊柱微创外科的发展,一定程度上扩大了适应证,保障了手术经皮置钉的准确性以及内窥镜下减压的安全性。

4.2 O 型臂导航系统应用于椎体成形术

微创脊柱外科发展的另一重要标志性技术是针对骨质疏松性椎体压缩性骨折的经皮球囊扩张椎体后凸成形术,传统经皮球囊扩张椎体后凸成形术(percutaneous kyphoplasty, PKP)需要在两台 C 型臂或一台 G 型臂引导下透视定位、穿刺、进针、注入骨水泥,术中要进行很多次透视来确保穿刺针准确经椎弓根到达椎体最佳位置,对术者以及患者辐射剂量较大。2011 年 Schils 等^[29-31]尝试在 O 型臂导航下行 PKP 治疗骨质疏松性椎体压缩骨折(osteoporotic vertebral compression fracture, OVCF),他在 3D 导航模式下穿刺建立通道,2D 引导模式下扩张球囊注入水泥,结果发现 O 型臂导航与传统 C 型臂引导下的 PKP 相比手术时间、透视时间降低 40%,因此他认为 O 臂导航可以在缩短手术透视时间的同时大幅降低辐射剂量,减少并发症的发生。2 年后该学者又提出了将 O 型臂导航与一种新型水泥注入装置 CDS(The Cement Delivery System)结合起来进行 PKP 手术,进一步降低了辐射剂量,该装置是长 1.2m 的水泥注射枪,可以使术者尽量保持与 O 型臂在安全距离的同时完成手术。由于 O 型臂导航需要额外切口固定参考架,一定程度上违背了微创的理念,因此 O 型臂在 PKP 中的应用受到限制。但已有些学者^[32,33]尝

试使用各种新型固定于皮肤表面的参考架来解决额外切口的问题,但此项技术还未广泛应用,有效性有待考证。

4.3 O 型臂导航系统应用于脊柱创伤手术

上颈椎骨折一直被脊柱外科医生视为最具有挑战性的手术,为了降低上颈椎手术风险性,国外学者^[34]曾尝试 O 型臂导航下手术治疗不稳定型 Hangman 骨折,共置入 20 枚 C2 椎弓根螺钉,32 枚侧块螺钉,仅有 1 枚椎弓根螺钉位置不良,术后随访发现所有患者骨折均愈合,C1-2 关节活动度保留良好。Yoshida 等^[35]报道了 1 例 O 型臂导航下经皮 C2 椎弓根拉力螺钉治疗 II 型 Hangman 骨折,他提出 O 型臂辅助下此类手术的经皮微创置钉技术安全有效值得大力推广。Castro^[36]和 Costa^[37]两位学者均报道了 O 型臂导航下齿状突骨折空心螺钉内固定术的成功案例,术后 CT 扫描骨折对位良好,均未发生内固定失败等并发症。一项双向队列研究^[38]对 27 例急性脊柱损伤患者在 O 型臂导航下行手术治疗,与同期 C 型臂引导下手术的急性脊柱损伤临床资料对比,C 型臂引导术后翻修率 1.2%,然而 O 型臂组无一例需要翻修手术,同样证实了 O 型臂导航下不仅能够保证置钉的准确性,而且降低因神经损伤并发症导致的翻修手术。

5 总结与展望

综上所述,O 型臂导航系统的出现使得脊柱外科的发展进入“快车道”,使脊柱外科的手术更加精准、安全、微创。O 型臂导航系统优点主要有:①实时追踪手术器械,显示其与解剖结构的位置对应关系,指导精确置入各种螺钉,并在置钉结束后进行术中 CT 扫描,及时调整位置不良的螺钉,降低误置风险,避免相关并发症;②结合各种内镜技术、经皮置钉技术使脊柱外科走向微创化的同时,保证手术安全,降低有害辐射;③术中可进行三维 CT 扫描,观察各种致压物如骨化的韧带、椎间盘、椎管狭窄等的减压是否彻底,保证手术神经减压效果,降低二次手术率;④术中三维 CT 扫描还可清晰观察各种复杂骨折的情况,允许术中制定合适的手术方案,提高脊柱创伤手术的安全性;⑤对于各种复杂脊柱畸形手术,O 型臂导航优势更加明显,避免因解剖变异带来的各种风险;⑥在 O 型臂导航技术的保驾护航下使得很多低年资的医生有了操作机会。

但 O 型臂导航系统临床应用中也出现了一些问题,一定程度限制了其发展:①设备引进费用较高,国内医院较少配备。但近期国外一项^[39]以患者立场进行的成本效益分析指出:在具有一定规模的医学中心,引进 O 型臂导航的费用以及每年的维护费虽然高昂,但可以降低患者因再手术而产生的费用,节省医疗成本,产生社会效益,因此 O 型臂导航技术经济合理,值得推广引进;②O 型臂导航虽然可以避免术前、术中体位变化带来的影响,但术中脊柱移位、变形、参考架位置变化均会造成一定的误差。Ammirati^[40]曾指出导航工具注册完毕后一定要进行准确性验证,如若发现导航位置有误,立即重新牢靠固定参考架

再次扫描,防止在有误差的情况下置钉;③O 臂导航技术有效地减少了术者所接受的辐射,但对患者而言辐射剂量较大。对此有学者^[41]研究发现选择 O 型臂的儿科透视剂量即可满足导航下置钉的图像需求,而且不影响置钉效果的同时辐射剂量降低到一般情况下的 1/4。Eric 等^[42]提出的根据患者身高体重指数选择合理的透视模式(如遇到体型较肥胖的患者时才使用高清模式),满足导航要求的同时可有效降低辐射。Kassis 等^[43]研究指出联合经椎弓根螺钉电诱发电位技术可以代替置钉结束后的 CT 扫描来判断螺钉的位置,降低患者受到的辐射。

总之,O 型臂导航系统作为计算机辅助骨科中的最先进的技术为骨科各类手术提供了安全有效的保障,在脊柱外科中的应用也越发广泛,但外科医生切不可完全依赖于导航技术,而是在扎实理论功底、熟练外科操作、熟悉解剖知识的基础上借助 O 型臂导航才能“如虎添翼”。O 型臂作为一个新兴领域,临床应用有待进一步总结、研究。相信随着现代科技的发展,O 型臂导航系统必将对脊柱外科的发展产生深远的影响。

6 参考文献

1. Tjardes T, Shafizadeh S, Rixen D, et al. Image-guided spine surgery: state of the art and future directions[J]. *Eur Spine J*, 2010, 9(1): 25-45.
2. Shin MH, Hur JW, Ryu KS, et al. Prospective comparison study between the fluoroscopy guided and navigation coupled with O-arm guided pedicle screw placement in the thoracic and lumbosacral spines[J]. *J spinal dsord Tech*, 2015, 28(6): 347-351.
3. Larson AN, Polly DW, Guidera KJ, et al. The accuracy of navigation and 3D image-guided placement for the placement of pedicle screws in congenital spine deformity[J]. *J Pediatr Orthop*, 2012, 32(6): e23-29.
4. Mengran Jin, Zhen Liu, Xingyong Liu, et al. Does intraoperative navigation improve the accuracy of pedicle screw placement in the apical region of dystrophic scoliosis secondary to neurofibromatosis type I: comparison between O-arm navigation and free-hand technique [J]. *Eur Spine J*, 2015, DOI 10.1007/s00586-015-4012-0.
5. Clements DH, Betz RR, Newton PO, et al. Correlation of scoliosis curve correction with the number and type of fixation anchors[J]. *Spine*, 2009, 34(20): 2147-2150.
6. Guppy KH, Chakrabarti I, Banerjee A. The use of intraoperative navigation for complex upper cervical spine surgery [J]. *Neurosurg Focus*, 2014, 36(3): E5.
7. Devito DP, Kaplan L, Dietl R, et al. Clinical acceptance and accuracy assessment of spinal implants guided with Spine Assist surgical robot: retrospective study[J]. *Spine*, 2010, 35(24): 2109-2115.
8. Lenke LG, Kuklo TR, Ondra S, et al. Rationale behind the current state-of-the-art treatment of scoliosis (in the pedicle screw era) [J]. *Spine*, 2008, 33(10): 1051-1054.
9. Toshiaki K, Tsutomu A, Tsuyoshi S, et al. Accuracy of pedicle screw placement in scoliosis surgery: a comparison between conventional computed tomography-based and O-arm-based navigation techniques[J]. *Asian Spine J*, 2014, 8(3): 331-338.
10. Heller A, Melvani R, Thome A, et al. Predictors of variability in the length of surgery of posterior instrumented arthrodesis in patients with adolescent idiopathic scoliosis[J]. *J Pediatr Orthop B*, 2016 Feb 4. [Epub ahead of print].
11. Bozbuga M, Ozturk A, Ari Z, et al. Morphometric evaluation of subaxial cervical vertebrae for surgical application of transpedicular screw fixation[J]. *Spine*, 2004, 29(17): 1876-1880.
12. Ishikawa Y, Kanemura T, Yoshida G, et al. Intraoperative, full-rotation, three-dimensional image (O-arm)-based navigation system for cervical pedicle screw insertion [J]. *J Neurosurg Spine*, 2011, 15(5): 472-478.
13. Theologis AA, Burch S. Safety and Efficacy of Reconstruction of Complex Cervical Spine Pathology Using Pedicle Screws Inserted with Stealth Navigation and 3D Image-Guided (O-Arm) Technology[J]. *Spine*, 2015, 40(18): 1397-1406.
14. Mattei TA, Rehman AA, Issawi A, et al. Surgical challenges in the management of cervical kyphotic deformity in patients with severe osteoporosis: an illustrative case of a patient with Hajdu-cheney syndrome[J]. *Eur Spine J*, 2015, 24(12): 2746-2753.
15. Silbermann J, Riese F, Allam Y, et al. Computer tomography assessment of pedicle screw placement in lumbar and sacral spine: comparison between free-hand and O-arm based navigation techniques[J]. *Eur Spine J*, 2011, 20(6): 875-881.
16. Boon Tow BP, Yue WM, Srivastava A, et al. Does navigation improve accuracy of placement of pedicle screws in single-level lumbar degenerative spondylolisthesis: a comparison between free-hand and three-dimensional O-arm navigation techniques[J]. *J Spinal Disord Tech*, 2015, 28(8): E472-477.
17. Rohde V, Mielke D, Ryang Y, et al. The immediately failed lumbar disc surgery: incidence, aetiologies, imaging and management[J]. *Neurosurg Rev*, 2015, 38(1): 191-195.
18. Al Eissa S, Al Habib AF, Jahangiri FR. Computer-assisted navigation during an anterior-posterior en bloc resection of a sacral tumor[J]. *Cureus*, 2015, 7(11): e373.
19. Yuan Q, Zheng S, Tian W. Computer-assisted minimally invasive spine surgery for resection of ossification of the ligamentum flavum in the thoracic spine [J]. *Chin Med J (Engl)*, 2014, 127(11): 2043-2047.
20. Kim JS, Eun SS, Prada N, et al. Modified transcorporeal anterior cervical microforaminotomy assisted by O-arm-based navigation: a technical case report[J]. *Eur Spine J*, 2011, 20(Suppl 2): S147-152.
21. Del CD, Kim JS, Lee SH. Minimally invasive posterior cervical

- ca-l microforaminotomy in the lower cervical spine and C-T junction assisted by O-arm-based navigation [J]. *Comput Aided Surg*, 2013, 18(3-4): 76-83.
22. Westermaier T, Koehler S, Linsenmann T, et al. Intraoperative myelo-graphy in cervical multilevel stenosis using 3D rotational fluoroscopy: assessment of feasibility and image quality[J]. *Radiol Res Pract*, 2015, doi:10.1155/2015/498936.
23. Gregory G, David GA. Complications of minimally invasive lumbar spine surgery[J]. *Seminars in Spine Surgery*, 2011, 23(2): 114-122.
24. 孙涛, 卢光, 陶蔚, 等. O 型臂引导下经椎间孔镜治疗腰椎间盘突出症[J]. *现代生物医学进展*, 2015, 20(15): 3966-3929.
25. 朱晓龙, 王建, 周跃, 等. 导航引导下腰椎峡部裂的微创外科修复[J]. *中国修复重建外科杂志*, 2015, 10(29): 1244-1248.
26. Baaj AA, Beckman J, Smith DA. O-arm-based image guidance in minimally invasive spine surgery: technical note [J]. *Clin Neurol Neurosurg*, 2013, 115(3): 342-345.
27. Park P, Foley KT, Cowan JA, et al. Minimally invasive pedicle screw fixation utilizing O-arm fluoroscopy with computer-assisted navigation: feasibility, technique, and preliminary results[J]. *Surg Neurol Int*, 2010, 1(8): 44.
28. Grelat M, Zairi F, Quidet M, et al. Assessment of the surgeon radiation exposure during a minimally invasive TLIF: Comparison between fluoroscopy and O-arm system [J]. *Neurochirurgie*, 2015, 61(4): 255-259.
29. Schils F. O-arm-guided balloon kyphoplasty: prospective single-center case series of 54 consecutive patients[J]. *Neurosurgery*, 2011, 68(2 Suppl Operative): 250-256.
30. Schils F. O-arm guided balloon kyphoplasty: preliminary experience of 16 consecutive patients [J]. *Acta Neurochir Suppl*, 2011, 109: 175-178.
31. Schils F, Schoojans W, Struelens L. The surgeon's real dose exposure during balloon kyphoplasty procedure and evaluation of the cement delivery system: a prospective study [J]. *Eur Spine J*, 2013, 22(8): 1758-1764.
32. Jang SH, Cho JY, Choi WC, et al. Novel method for setting up 3D navigation system with skin-fixed dynamic reference frame in anterior cervical surgery [J]. *Comput Aided Surg*, 2015, 20(1): 24-28.
33. Ohnsorge JA, Salem KH, Ladenburger A, et al. Computer-assisted fluoroscopic navigation of percutaneous spinal interventions[J]. *Eur Spine J*, 2013, 22(3): 642-647.
34. Singh PK, Garg K, Sawarkar D, et al. Computed tomography-guided C2 pedicle screw placement for treatment of unstable hangman fractures[J]. *Spine*, 2014, 39(18): E1058-1065.
35. Yoshida G, Kanemura T, Ishikawa Y. Percutaneous pedicle screw fixation of a Hangman's fracture using intraoperative, full rotation, three-dimensional image(O-arm)-based navigation: a technical case report[J]. *Asian Spine J*, 2012, 6(3): 194-198.
36. Castro-Castro J. Anterior odontoid screw fixation using intraoperative cone-beam computed tomography and navigation[J]. *Neurocirugia (Astur)*, 2014, 25(6): 261-267.
37. Costa F, Ortolina A, Attuati L, et al. Management of C1-2? traumatic fractures using an intraoperative 3D imaging-based navigation system[J]. *J Neurosurg Spine*, 2015, 22(2): 128-133.
38. Schouten R, Lee R, Boyd M, et al. Intra-operative cone-beam CT (O-arm) and stereotactic navigation in acute spinal trauma surgery[J]. *J Clin Neurosci*, 2012, 19(8): 1137-1143.
39. Dea N, Fisher CG, Batke J, et al. Economic evaluation comparing intraoperative cone beam CT-based navigation and conventional fluoroscopy for the placement of spinal pedicle screws: a patient-level data cost-effectiveness analysis [J]. *Spine J*, 2016, 16(1): 23-31.
40. Ammirati M, Salma A. Placement of thoracolumbar pedicle screws using O-arm-based navigation: technical note on controlling the operational accuracy of the navigation system [J]. *Neurosurg Rev*, 2013, 36(1): 157-162.
41. Su AW, Luo TD, McIntosh AL, et al. Switching to a pediatric dose O-arm protocol in spine surgery significantly reduced patient radiation exposure[J]. *J Pediatr Orthop*, 2015, [Epub ahead of print].
42. Eric WN, Stephen MP, Steven E, et al. Operating room radiation exposure in cone beam computed tomography-based, image-guided spinal surgery [J]. *J Neurosurg Spine*, 2013, 19(8): 226-231.
43. Kassis SZ, Abukwedat LK, Msaddi AK, et al. Combining pedicle screw stimulation with spinal navigation, a protocol to maximize the safety of neural elements and minimize radiation exposure in thoracolumbar spine instrumentation[J]. *Eur Spine J*, 2015, 25(6): 1724-1728.

(收稿日期:2016-01-11 修回日期:2016-04-06)

(本文编辑 彭向峰)