

DOI: 10.16781/j.0258-879x.2019.12.1356

· 综述 ·

## 计算机 3D 导航技术在脊柱肿瘤外科治疗中的应用

孙海涛, 何韶辉, 周振华, 肖建如\*

海军军医大学(第二军医大学)长征医院骨肿瘤科, 上海 200003

**[摘要]** 脊柱肿瘤外科治疗在过去几十年经历了诸多科技变革, 包括手术方式、内植入物、生物制剂及计算机辅助下导航技术应用等, 特别是实时影像引导和 3D 影像重建为脊柱肿瘤精准定位和切除提供了理论与技术支持。术中计算机辅助导航技术已被广泛应用于脊柱疾病的外科治疗中, 如椎弓根螺钉置入、骨盆骨折固定等, 并取得较好的疗效。导航技术平台的应用也极大提高了脊柱肿瘤微创治疗和精准切除效果, 同时降低了术中辐射暴露损伤。本文综述了计算机辅助导航技术在脊柱肿瘤手术切除中的有效性、安全性及发展前景。

**[关键词]** 脊柱肿瘤; 导航; 计算机辅助设计; 有效性; 安全性

**[中图分类号]** R 738.1 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 0258-879X(2019)12-1356-08

### Application of computer-assisted 3D navigation in surgical treatment of spine tumors: an update

SUN Hai-tao, HE Shao-hui, ZHOU Zhen-hua, XIAO Jian-ru\*

Department of Orthopedic Oncology, Changzheng Hospital, Naval Medical University (Second Military Medical University), Shanghai 200003, China

**[Abstract]** Over the past few decades, surgical treatment for spinal tumors has experienced many technological innovations, including surgical methods, implantations, biological agents, computer-assisted navigation equipment and so on. The real-time intraoperative imaging guidance and 3D imaging reconstruction provide theoretical and technical support for accurate location and resection of spinal tumors. The intraoperative navigation has been widely introduced into the surgical treatment of orthopaedic diseases, such as pedicle screw placement, pelvic fracture fixation, etc., and achieved satisfactory effectiveness. The application of navigation technology platform has greatly improved the minimally invasive treatment and precise resection of spinal tumors, and reduced the radiation exposure injury during operation. In this review, we sum up the effectiveness, safety and development prospects of navigation technology for spinal tumor treatment.

**[Key words]** spinal neoplasms; navigation; computer-assisted design; effectiveness; safety

[Acad J Sec Mil Med Univ, 2019, 40(12): 1356-1363]

脊柱肿瘤是一类包括椎管内肿瘤和脊柱骨组织的原发性、继发性(转移性)肿瘤。由于脊柱部位的特殊性, 脊柱肿瘤可直接侵蚀椎骨力学结构导致脊柱稳定性破坏, 并常累及脊髓、神经根等重要结构, 影响神经功能。早在 20 世纪 90 年代初原发性脊柱肿瘤的年发病率就已达 2.5/10 万~8.5/10 万<sup>[1]</sup>, 2017 年流行病学调查数据显示我国原发性脊柱肿瘤占原发性全身骨肿瘤的 6%~10%<sup>[2]</sup>, 根治性外科治疗可以实现肿瘤病灶局部控制。97% 的脊柱肿瘤为转移性骨肿瘤, 其中 10% 可采取手术治疗<sup>[3]</sup>。

脊柱肿瘤外科治疗的个案报道最早可追溯到 20 世纪 60—70 年代, 直到 20 世纪 90 年代才开始出现有关彻底性切除及相关治疗的系统性研究。在过去短短的十几年中, 脊柱肿瘤治疗历经诸多科技变革, 包括手术方式、内植入物、生物制剂及计算机辅助导航技术(以下简称导航技术)应用等。导航技术目前已被广泛应用于脊柱疾病的外科治疗中, 如椎弓根螺钉置入、骨盆骨折固定等。脊柱肿瘤因解剖结构的特殊性, 且为了尽可能减少术后并发症, 手术操作通常需要在狭小的手术视野中完成肿瘤组织

**[收稿日期]** 2019-04-19 **[接受日期]** 2019-08-26

**[基金项目]** 上海市脊柱转移癌诊治的多中心临床研究项目(17411950300)。Supported by Multicenter Clinical Study Project for Diagnosis and Treatment of Spinal Metastatic Carcinoma in Shanghai (17411950300)。

**[作者简介]** 孙海涛, 硕士生。E-mail: ironman\_sun@outlook.com

\*通信作者(Corresponding author)。Tel: 021-81886843, E-mail: xiaojianruvip@163.com

的最大切除。实时影像导航和 3D 影像重建为脊柱肿瘤精准切除提供了技术支撑,大大提高了全脊柱肿瘤整块切除水平及术后效果。由于脊柱肿瘤手术切除的精细化水平要求高,持续时间长,容易造成术者身心疲惫。导航技术平台的应用极大提高了脊柱肿瘤微创治疗和精准切除的效率,减少了手术出血和术者的疲惫感,同时降低了术中辐射暴露损伤。本文综述了导航技术在脊柱肿瘤切除手术中的安全性、有效性及发展前景。

### 1 3D 导航技术平台

手术导航系统是通过术前与术中影像采集重建配准与术中医学影像、术区解剖结构、手术器械之间的配准关系,经过相应的坐标转换,控制手术器械达到相应的手术区域完成手术操作。当前,主要的导航方式有基于计算机断层扫描 (computed tomography, CT)/磁共振成像 (magnetic resonance imaging, MRI)/正电子发射断层显像 (positron emission tomography, PET) 多模态数据计算机辅助导航和基于医学图像信息导航;已有多种导航技术平台被应用于临床,如德国博伊来公司的 CT 成像脊柱导航仪 (Brainlab<sup>®</sup>)、美国史赛克公司的配有示踪仪 (SpineMask<sup>®</sup>) 和相关导

航软件的脊柱导航仪 (Stryker<sup>®</sup>)、美国美敦力公司的 O 形臂脊柱手术成像导航仪 (Medtronic<sup>®</sup>) 及美国奇目成像医疗器材集团的三维成像仪 (Ziehm Imaging<sup>®</sup>)。脊柱导航多采用脊柱骨性标志进行注册配准。博伊来导航仪在术中影像导航前,需要在非手术区棘突上固定参考架以完成图像配准,空间定位探头需要通过 3 个参考点校准定位其工具位置。配准过程中,奇目公司、美敦力公司、博伊来公司的导航仪参考支架位置移动会影响虚拟器械的相对位置,需要重新进行图像配准才能实现精准导航。不同脊柱节段椎体间的移动也是导航准确性的干扰因素,特别是在颈椎椎体手术及椎体病理性骨折滑脱中尤为明显。史赛克公司的导航仪不需要参考支架,利用矩形示踪器直接作用于手术区达到图像配准的要求,但必须保证示踪器镜头内至少有 5 个发光二极管 (light emitting diode, LED) 聚焦于术区才能实现上述功能。史赛克公司的导航仪不能保证大切口深部手术的精确度,因此这类导航仪更适用于经皮微创手术。总体而言,应用椎体注册较体表标志点注册的导航精确度更高。计算机辅助导航误差低于 0.5 mm 可以充分满足脊柱肿瘤定位切除及内植入物固定,常见导航仪应用于不同脊柱节段的注册误差见表 1。

表 1 各导航仪应用于不同脊柱节段的注册误差

Tab 1 Registration errors of each navigator at different spinal segments

Literature	Study type	Navigator	Segment	Registration error <i>d</i> /mm
Cho et al <sup>[4]</sup>	Case report	Stryker	Sacrum	<1
Han et al <sup>[5]</sup>	Case report	Stealth station	S <sub>3</sub> -coccyx	<1
Ieguchi et al <sup>[6]</sup>	Clinical study	Stealth station	Ilium (R)	0.9
			Ilium (L)	0.8
			Ilium (L), S <sub>2</sub> -S <sub>3</sub>	0.8
			Ilium (L), S <sub>3</sub> -S <sub>4</sub>	1.0
			Sacrum	0.6
Neo et al <sup>[7]</sup>	Surgical technical note	Stealth station	C <sub>2</sub>	<1
			C <sub>2</sub> (recurrence)	<1
			Skull base-C <sub>3</sub>	<1
Nijkamp et al <sup>[8]</sup>	Pilot study	Surface electromagnetic tracking	Ilium (L), S <sub>3</sub> -S <sub>4</sub>	1.0
Roessler et al <sup>[9]</sup>	Retrospective analysis	Diode indicator	-	0.6
Smitherman et al <sup>[10]</sup>	Case report	BrainLab	Ilium (L), S <sub>2</sub> -S <sub>3</sub>	0.8
Wong et al <sup>[11]</sup>	Retrospective analysis	Stryker	Sacrum	0.37
			Peri-acetabulum (L)	0.36
			Peri-acetabulum (R)	0.4
			Ischial tuberosity (L)	0.37
Yang et al <sup>[12]</sup>	Retrospective analysis	Stryker	S <sub>3</sub>	1.7

R: Right side; L: Left side. - refers to not reported in the literature

尽管多种脊柱手术导航仪已被应用于临床,但是目前在脊柱肿瘤切除手术中尚未普及,可能与没有匹配的针对性导航软件有关。Zoccali等<sup>[13]</sup>将脊柱创伤治疗的导航软件应用于脊柱肿瘤切除,术中采用置入螺钉作为参考点,注册精确度与置入螺钉数成正比。但限于该研究纳入病例数少,尚不能确定其可行性,且置入的螺钉必要时需行二次手术取出。目前脊柱导航仪仅能通过内置的规划方案实现外科操作。Kosterhon等<sup>[14]</sup>通过软件将受累脊柱节段的CT及MRI信息整合构建虚拟模型。通过数字化构建或CT三维重建,将手术器械、内植入物等与手术路径进一步融合形成医学数字成像和通信(digital imaging and communications in medicine, DICOM)序列,后者包括术前所有信息。同时,该序列可导入任何导航仪中实现术中导航操作。但该项目目前正处在研发阶段,一旦成功可提高导航技术在脊柱肿瘤切除的兼容性、灵活性和广泛性。Neo等<sup>[17]</sup>认为枕颈融合术后,上颈椎可被视为颅底的一部分,因此采用神经导航技术也可实现导航下手术治疗。

## 2 导航下脊柱肿瘤切除重建的安全性及准确性

目前,多项临床研究报道了导航技术在脊柱肿瘤切除治疗中的应用,其中大多数研究都报道了导航技术在脊柱肿瘤切除手术中的安全性和准确性。椎弓根螺钉对于维持脊柱肿瘤切除力学稳定性具有重要意义。椎弓根因其解剖结构限制、肿瘤骨质破坏或肿瘤压迫减小安全空间等均可能导致螺钉置入失败,而导航技术显示了其在任何脊柱节段均可达到精准螺钉置入的技术优越性。一项关于原发侵袭性脊柱肿瘤治疗的回顾性研究中,导航下椎弓根螺钉完全置入无透壁发生的准确度明显高于直视下徒手置入螺钉(97.4% vs 92.4%)<sup>[15]</sup>。一篇纳入23项研究的meta分析显示,导航下93.3%的椎弓根螺钉可以按照术前既定的轨迹准确置入,而直视下仅为84.7%;但临床神经、血管并发症的发生率无显著差异。这可能是由于直视下椎弓根螺钉置入透壁<6 mm时不会出现神经系统症状<sup>[16]</sup>。但有学者在严格纳入标准后研究发现,导航下螺钉置入具

有更高准确度的同时,螺钉相关并发症的发生率也显著低于直视下螺钉置入<sup>[17]</sup>。

既往研究数据表明,即使置入螺钉错位率高达20%~40%,也仅有部分患者发生神经、血管并发症<sup>[18]</sup>。因不同脊柱节段的解剖结构差异较大,螺钉错位相关危险事件发生率的差异也较明显。腰骶椎活动度大,可操作范围大。但是颈椎与胸椎操作风险相对较大,导航技术的应用显著提高了颈椎或胸椎螺钉置入的安全性和准确性。2003年,Kotani等<sup>[19]</sup>研究表明导航下颈椎螺钉置入相关危险事件的发生率低于直视下操作,直视下操作导致2枚螺钉错位应力断裂进行翻修手术,而导航下螺钉错位并没有发生任何危险事件。一项关于胸椎螺钉置入的前瞻性研究结果显示,直视下置入螺钉84枚,共14枚发生骨皮质侵犯,其中2枚螺钉因断裂进行翻修手术;而在导航下安全准确置入的螺钉92枚均没有出现任何并发症<sup>[20]</sup>。Allam等<sup>[21]</sup>的研究也表明导航下置入胸椎螺钉错位率低,翻修手术率低。2015年一项关于螺钉直径、螺钉/椎弓根直径比及翻修手术率的研究显示,导航引导下可以实现安全准确地置入直径更大的螺钉,增加螺钉/椎弓根直径比而获得更强的内固定,降低翻修手术率<sup>[22]</sup>。

累及多节段椎体、上颈椎、胸椎等复杂性脊柱肿瘤周围血管神经结构密集,难以定位肿瘤以确定切除水平。术中导航系统不仅可以精准地定位肿瘤并描述周围毗邻关系,确定手术路径,而且可以实现脊柱肿瘤切除实时监测,减少肌肉剥离和周围软组织牵拉,避免正常组织的医源性破坏。此外,术中导航系统的应用还可降低骨不连、活动度丧失及术后翻修等脊柱融合相关危险事件,缩短住院时间。由于病患人群组成异质性大及肿瘤位置、肿瘤大小、肿瘤类型等原因,目前尚无关于导航下脊柱肿瘤切除术中出血量的系统性研究,但是通过导航确认术中解剖结构实现精准切除可以减少术中出血量。据报道,传统的4节段后路脊柱融合术平均出血量为284 mL<sup>[23]</sup>,但是应用导航技术进行微创手术失血量<25 mL<sup>[24]</sup>。常见的几种导航仪引导不同脊柱术式中的出血情况见表2。

表 2 不同脊柱手术导航下术中失血量

Tab 2 Intraoperative blood loss under different spinal surgical guidances

Literature	Study type	Disease profile	Operation	Navigator	Blood loss V/mL
Cho et al <sup>[4]</sup>	Case report	Sacrum: chondrosarcomas	(L) L <sub>5</sub> -S <sub>1</sub> vertebral facetectomy + (R) S <sub>1</sub> -S <sub>2</sub> hemilaminectomy + iliectomy	Stryker	2 100
Fujibayashi et al <sup>[25]</sup>	Case series	T <sub>12</sub> : hepatic metastases	<i>En bloc</i> resection + bone grafting	Stealth station	1 620
		L <sub>4</sub> : osteochondroma	<i>En bloc</i> resection + bone grafting		7 000
		T <sub>6</sub> , L <sub>4</sub> : fibrosarcomas	T <sub>4</sub> -T <sub>6</sub> vertebrectomy + bone grafting		1 640
Honstad et al <sup>[26]</sup>	Case report	C <sub>6</sub> : osteoblastoma	Curettage + bone grafting	-	25
Kadhim et al <sup>[27]</sup>	Retrospective cohort study	(R) C <sub>3</sub> : osteoidosteoma	Lateral mass resection + laminectomy + bone grafting	Medtronic	50
		(L) C <sub>2</sub> : osteoidosteoma	Laminectomy		25
		(R) C <sub>3</sub> : osteoidosteoma	Laminectomy + curettage		150
		(R) C <sub>7</sub> : osteoidosteoma	Laminectomy		50
		C <sub>2</sub> : osteoidosteoma	Curettage		25
		(L) T <sub>6</sub> : osteoidosteoma	Laminectomy + partial vertebrectomy		500
		(L) C <sub>5</sub> : osteoidosteoma	Laminectomy + curettage		25
		(R) L <sub>5</sub> : osteoidosteoma	Laminectomy		25
		(R) L <sub>5</sub> : osteoidosteoma	Laminectomy + partial vertebrectomy		25
		(R) L <sub>3</sub> : osteoidosteoma	Curettage		25
		(R) T <sub>9</sub> : osteoblastoma	Laminectomy + T <sub>8</sub> , T <sub>10</sub> partial laminectomy		200
		(L) L <sub>5</sub> : osteoblastoma	Facet sparing laminectomy		200
		(L) T <sub>10</sub> : osteoblastoma	Partial vertebrectomy		2 600
		T <sub>7</sub> : osteoblastoma	Laminectomy + partial vertebrectomy		400
		(R) C <sub>3</sub> : osteoblastoma	Laminectomy + partial vertebrectomy		50
		(R) L <sub>3</sub> : osteoblastoma	Laminectomy + partial vertebrectomy		150
Kobayashi et al <sup>[28]</sup>	Retrospective analysis	L <sub>3</sub> : osteoblastoma	Laminectomy + vertebrectomy		2 200
		Ilium: phosphaturia mesenchymal tumor	Segmental spondylectomy	Stealth station	745
		L <sub>1</sub> : phosphaturia mesenchymal tumor	Curettage + segmental spondylectomy + posterior fusion		2 105
Nasser et al <sup>[29]</sup>	Multicenter retrospective analysis	Metastatic spinal tumor	Biospy/spinal tumor resection	Stealth station	1 061 ± 1 410 (25-7 000)
		Primary spinal tumor			703.4 ± 925.9 (5-3 000)
Ould-Slimane et al <sup>[30]</sup>	Retrospective analysis	Pelvis: sarcomatoid carcinoma	Tumor resection + joint reconstruction	Medtronic	1 900
		Ilium: synovial chondrosarcoma	-		150
		S <sub>3</sub> -coccyx: chorodoma	-		700
		Sacrum: low grade sarcoma	Hemipelvectomy		3 000
		Ilium: giant cell tumor	-		4 500
		Sacrum: low grade sarcoma	Hemipelvectomy		3 000
		Ilium: giant cell tumor	-		4 500
Yang et al <sup>[12]</sup>	Retrospective analysis	Sarum: chordoma	Tumor resection + pelvic ring fixation	Stryker	3 065 (300-8 500)

R: Right side; L: Left side. - refers to not reported in the literature

Rajasekaran 等<sup>[31]</sup>和 Van Royen 等<sup>[32]</sup>分别报道了 3D 导航技术在颈椎和胸椎骨样骨瘤切除术中的应用。Rajasekaran 等<sup>[31]</sup>认为 3D 导航技术不仅可以实现微创条件下的肿瘤切除,而且避免了脊柱融合和螺钉置入,降低了出血事件及螺钉相关事件的发生率。Van Royen 等<sup>[32]</sup>的研究结果也证明了这一观点,且患者术后恢复良好。表明在骨样骨瘤治疗中应用 3D 导航技术可极大提高治疗效果,降低术后并发症的发生率。另有一项关于骶骨肿瘤切除的研究显示,术后感染、延迟愈合与手术时间、术中出血量及导航手术没有显著关系,术后患者均未出现下肢功能障碍,仅 1 例患者因局部复发进行偏侧骨盆切除术而出现骨骼肌运动社会评分下降<sup>[12]</sup>。一项纳入 50 例患者的多中心回顾性研究结果也显示,导航下脊柱肿瘤切除术后有 4% 的患者死亡,8% 出现神经根病表现,但未描述术后发生并发症的原因<sup>[29]</sup>,可能与手术路径改变有关。另外,术中椎体移动、呼吸运动、参考点变动也都可能改变椎体位置而导致术后并发症,因此术中尽可能减少周围骨组织和软组织的移动,从而减小注册误差。

脊柱肿瘤切除手术与透视应用密切相关。传统开放性肿瘤切除+脊柱融合手术依赖于荧光透视进行肿瘤定位和内固定置入。脊柱肿瘤切除手术中,手术组成员和患者的辐射暴露剂量显著高于其他手术。研究表明,脊柱外科医师平均辐射暴露量是创伤科医师的 50 倍<sup>[33]</sup>。一项关于经椎间孔腰椎椎体间融合术中职业暴露的研究表明,术者进行 194 次操作即超过职业暴露的最低剂量<sup>[34]</sup>。Rampersaud 等<sup>[35]</sup>研究发现,在开放性腰椎后路融合术中,即使每例患者的透视时间短于 2 min,手术人员仅操作 300 例即超过最低职业暴露剂量。2008 年, Kim 等<sup>[36]</sup>的研究结果显示,即使应用荧光透视作为术中注册手段,导航技术也可降低大约 100 s 的暴露时间。但是,该研究尚不能明确说明注册期间手术医师的暴露剂量。在此基础上, Kraus 等<sup>[37]</sup>进一步研究表明, O 形臂导航下椎弓根螺钉置入术辐射暴露剂量为 0.4 mSv,而传统手术的辐射暴露量为 5.03 mSv (单次腹部+盆部 CT 增强检查的辐射剂量低于 2 400 mGy/cm<sup>[30]</sup>),他们认为导航技术应尽可能应用于外科治疗中,该技术可同时降低手术组成员和患者的辐射暴露。Ould-Slimane 等<sup>[30]</sup>测定的复杂脊柱肿瘤手术中的辐射剂量 (450~

1 125 mGy/cm) 显著低于影像诊断辐射水平。但也有研究指出,相比传统的脊柱肿瘤切开融合术,导航下微创治疗的辐射剂量明显升高<sup>[26]</sup>。1 次 O 形臂导航仪扫描等同于 40 s 荧光透视的辐射剂量。因此在采用考虑导航下微创治疗时应综合考虑其辐射影响与治疗效果。

### 3 导航下脊柱肿瘤切除的有效性

3.1 导航系统在不同脊柱节段肿瘤外科治疗中的应用 脊柱肿瘤整块切除是减少局部复发的重要方案,但因受技术限制还没有得到普及。另外,深部肿瘤、颈椎肿瘤或多节段脊柱肿瘤由于其解剖位置难以进行整块切除而无法实现术后无瘤生存。2009 年, Neo 等<sup>[7]</sup>利用神经外科导航软件对上颈椎脊索瘤进行整块切除。导航系统对术中重要血管、骨性标志、手术器械定位及手术路径设定有重要指导意义,术后 1 例患者出现复发(2 次手术均采用导航技术),复发的原因可能是因为第 1 次没有进行椎动脉血管造影,未对血管周围进行彻底切除。2010 年, Smitherman 等<sup>[10]</sup>在导航下成功施行了累及 4 节段巨细胞瘤整块切除术。术者通过术中 3D 导航实时监测,从后路进行多节段偏侧椎体切除术,避开重要神经血管和胸腔组织,保证肿瘤包膜完整取出。颈椎脊索瘤通常发生于重要血管组织结构周围,常破坏周围骨性结构,难以整块切除。Guppy 等<sup>[38]</sup>采用导航技术识别骨性标志,确认 C<sub>2</sub> 脊索瘤周围重要组织结构,达到肿瘤整块切除的目的。Fujibayashi 等<sup>[25]</sup>也报道了导航技术在胸椎肿瘤切除术中的应用,1 例 T<sub>4</sub> 肝转移癌进行整块切除,1 例脊柱纤维肉瘤进行 T<sub>4</sub>~T<sub>6</sub> 切除术,术后效果良好且均未复发,认为使用计算机辅助导航系统有助于保证复杂 3D 脊柱截骨术的安全性和有效性。即使采用分块切除手术,导航系统的应用也可以达到术后无瘤状态。2018 年, Ying 等<sup>[24]</sup>报道了首例成功实施的导航下经皮内镜颈椎椎间孔神经鞘瘤切除手术,术中导航下采用内镜钻头切除椎骨周围部分骨质以扩大手术操作空间,最后对肿瘤进行分块切除;术后症状迅速缓解,术后 3 d 出院,术后 1 年随访未出现任何复发。

导航系统在其他脊柱节段肿瘤切除中的效果也很显著。2008 年, Cho 等<sup>[4]</sup>对导航系统在骶骨肿瘤切除中的应用进行了可行性评价,认为应用导航

技术较传统骶骨切除术可以提高骶骨肿瘤切除有效率, 减少功能损害。在此基础上, Yang 等<sup>[12]</sup>研究显示, 骶骨肿瘤导航下切除还可以进行广泛性切除、边缘性切除从而达到无瘤状态; 同时导航技术也可以安全有效地用于骶骨肿瘤切除, 完成术前既定方案而达到治疗目标, 取得较好的治疗效果。骶骨肿瘤整块切除是开展难度较大的手术, Al Eissa 等<sup>[39]</sup>联合术中神经生理监测系统导航下骶骨肿瘤整块切除。导航系统在保护神经功能和减少复发的同时, 提高了骶骨肿瘤整体切除手术的准确性。骨盆关节外肿瘤手术常因技术限制使 R0 切除率保持在 25%~82%<sup>[30]</sup>, 但是导航系统的应用促进了肿瘤个体化切除、移植骨或假体的准确植入, 降低了局部复发率, 提高了功能恢复水平。

**3.2 导航系统应用对手术时间的影响** 导航技术的应用在实现肿瘤精准切除、螺钉定点置入的同时, 也缩短了手术时间。2010 年一项前瞻性研究显示, 计算机辅助导航下每枚胸椎螺钉置入平均消耗的时间为 2.54 min, 比传统导航模式下消耗的时间 (4.5 min) 明显缩短<sup>[20]</sup>。Stefini 等<sup>[40]</sup>进一步对 O 形臂导航和 C 形臂导航下手术时间进行了对比, 结合脊柱肿瘤节段性差异, C 形臂导航组手术时间长于 O 形臂导航组。Wong 等<sup>[11]</sup>提出导航系统的应用在开展手术前期可能会消耗更多的时间, 但是随着技术改进、术者技术水平提升, 手术时间逐渐缩短。Schwab 等<sup>[41]</sup>的研究显示, 一旦克服导航下肿瘤切除手术学习曲线, 微创脊柱手术的时间短于传统标准手术时间。传统的骶骨肿瘤切除手术平均周期为 5~10 h, 术中出血量为 3 900~5 200 mL<sup>[42-43]</sup>。但 Yang 等<sup>[12]</sup>的研究表明应用计算机导航技术后, 骶骨肿瘤切除的手术时间缩短, 术中出血量减少, 手术有效性提高。目前, 术中导航系统在不同类型的脊柱疾病治疗中也得到了普及, 如在转移性病灶中开展的广泛减压手术、精准螺钉置入等, 以及在原发性脊柱肿瘤治疗中开展的活组织检查、椎板切开、肿瘤切除、重建脊柱稳定性。结合导航系统的射频消融技术应用是新兴的转移性脊柱肿瘤微创姑息治疗, 该技术现在也逐渐应用到其他脊柱肿瘤的治疗中。

#### 4 导航技术在脊柱肿瘤治疗中的发展

科技的进步极大地促进了导航技术的发展, 未来将逐步取代传统开放性脊柱肿瘤外科治疗。但

是导航精度也受限于导航器材自身的局限性、术者经验及环境湿度、温度等因素。早在 2003 年就提出了基于导航平台直接依附骨性标志的微小机器人系统的概念, 该系统精准度更高, 工作周期长, 可再现性强。此后, 脊柱肿瘤机器人手术治疗的研究迅速推进。2007 年尸体解剖研究显示, 机器人系统螺钉置入的平均偏移率 $<1\text{ mm}$ <sup>[44]</sup>。不久之后的临床试验也显示了导航技术在螺钉安全准确置入方面的技术优越性。Roser 等<sup>[45]</sup>的研究显示机器人导航平台腰骶椎螺钉置入的精准度可达到 99%。Schizas 等<sup>[46]</sup>研究也显示机器人导航技术腰骶椎螺钉置入的准确度可达 95%, 该研究也记录了传统荧光透视导航下该数据仅为 92%。近年达芬奇手术机器人被广泛应用于腰椎间盘融合术, 可以预见未来其在脊柱肿瘤治疗方面也将得到长足发展。CT/MRI 融合成像导航可以实现骨组织、软组织和神经血管组织的综合可视化, 此外单纯利用 MRI 导航在评估肿瘤切除边界方面具有显著优势<sup>[47]</sup>。未来如果在导航成像中可以呈现神经组织结构, 将进一步促进脊柱肿瘤的治疗水平。

#### 5 小结和展望

外科治疗是脊柱肿瘤的首选治疗方式。外科技术的发展可以提高脊柱肿瘤的切除效果并降低复发率, 提高患者的生活质量和改善预后。脊柱因其结构特殊, 周围毗邻结构复杂、手术难度大, 导航下手术可实现术中实时精确成像, 减小创口, 降低疼痛感, 并减少并发症。但综合目前的研究现状, 导航技术在脊柱肿瘤外科治疗中的应用还不充分。未来可进一步扩大导航技术的临床使用率, 以降低其成本并提高效益比。因技术瓶颈问题, 导致目前导航仪的注册时间较长, 相信未来随着软件的研发、技术的改进、术者经验的增加, 注册时间将进一步缩短。

#### [参考文献]

- [1] DREGHORN C R, NEWMAN R J, HARDY G J, DICKSON R A. Primary tumors of the axial skeleton. Experience of the Leeds Regional Bone Tumor Registry[J]. Spine (Phila Pa 1976), 1990, 15: 137-140.
- [2] ZHOU Z, WANG X, WU Z, HUANG W, XIAO J. Epidemiological characteristics of primary spinal osseous tumors in Eastern China[J/OL]. World J Surg Oncol,

- 2017, 15: 73. doi: 10.1186/s12957-017-1136-1.
- [3] CIFTDEMIR M, KAYA M, SELCUK E, YALNIZ E. Tumors of the spine[J]. World J Orthop, 2016, 7: 109-116.
- [4] CHO H S, KANG H G, KIM H S, HAN I. Computer-assisted sacral tumor resection. A case report[J]. J Bone Joint Surg Am, 2008, 90: 1561-1566.
- [5] HAN I H, SEO Y J, CHO W H, CHOI B K. Computer-assisted modified mid-sacrectomy for *en bloc* resection of chordoma and preservation of bladder function[J]. J Korean Neurosurg Soc, 2011, 50: 523-527.
- [6] IEGUCHI M, HOSHI M, TAKADA J, HIDAKA N, NAKAMURA H. Navigation-assisted surgery for bone and soft tissue tumors with bony extension[J]. Clin Orthop Relat Res, 2012, 470: 275-283.
- [7] NEO M, ASATO R, FUJIBAYASHI S, ITO H, TAKEMOTO M, NAKAMURA T. Navigated anterior approach to the upper cervical spine after occipitocervical fusion[J/OL]. Spine (Phila Pa 1976), 2009, 34: E800-E805. doi: 10.1097/BRS.0b013e3181ab3ce8.
- [8] NIJKAMP J, KUHLMANN K, SONKE J J, RUERS T. Image-guided navigation surgery for pelvic malignancies using electromagnetic tracking[C/OL]// Conference: SPIE medical imaging. 2016: 97862L. doi: 10.1117/12.2216213.
- [9] ROESSLER K, UNGERSBOECK K, AICHHOLZER M, DIETRICH W, CZECH T, HEIMBERGER K, et al. Image-guided neurosurgery comparing a pointer device system with a navigating microscope: a retrospective analysis of 208 cases[J]. Minim Invasive Neurosurg, 1998, 41: 53-57.
- [10] SMITHERMAN S M, TATSUI C E, RAO G, WALSH G, RHINES L D. Image-guided multilevel vertebral osteotomies for *en bloc* resection of giant cell tumor of the thoracic spine: case report and description of operative technique[J]. Eur Spine J, 2010, 19: 1021-1028.
- [11] WONG K C, KUMTA S M, CHIU K H, ANTONIO G E, UNWIN P, LEUNG K S. Precision tumour resection and reconstruction using image-guided computer navigation[J]. J Bone Joint Surg Br, 2007, 89: 943-947.
- [12] YANG Y K, CHAN C M, ZHANG Q, XU H R, NIU X H. Computer navigation-aided resection of sacral chordomas[J]. Chin Med J (Engl), 2016, 129: 162-168.
- [13] ZOCCALI C, WALTER C M, FAVALE L, DI FRANCESCO A, ROSSI B. A computer-assisted navigation technique to perform bone tumor resection without dedicated software[J]. Comput Assist Surg (Abingdon), 2016, 21: 166-171.
- [14] KOSTERHON M, GUTENBERG A, KANTELHARDT S R, CONRAD J, NIMER AMR A, GAWEHN J, et al. Three-dimensional cross-platform planning for complex spinal procedures: a new method adaptive to different navigation systems[J/OL]. Clin Spine Surg, 2017, 30: E1000-E1009. doi: 10.1097/BSD.0000000000000477.
- [15] JIN B, SU Y B, ZHAO J Z. Three-dimensional fluoroscopy-based navigation for the pedicle screw placement in patients with primary invasive spinal tumors[J]. Chin Med J (Engl), 2016, 129: 2552-2558.
- [16] SCHULZE C J, MUNZINGER E, WEBER U. Clinical relevance of accuracy of pedicle screw placement. A computed tomographic-supported analysis[J]. Spine (Phila Pa 1976), 1998, 23: 2215-2221.
- [17] SHIN B J, JAMES A R, NJOKU I U, HÄRTL R. Pedicle screw navigation: a systematic review and meta-analysis of perforation risk for computer-navigated versus freehand insertion[J]. J Neurosurg Spine, 2012, 17: 113-122.
- [18] LAINE T, MÄKITALO K, SCHLENZKA D, TALLROTH K, POUSSA M, ALHO A. Accuracy of pedicle screw insertion: a prospective CT study in 30 low back patients[J]. Eur Spine J, 1997, 6: 402-405.
- [19] KOTANI Y, ABUMI K, ITO M, MINAMI A. Improved accuracy of computer-assisted cervical pedicle screw insertion[J]. J Neurosurg, 2003, 99(3 Suppl): 257-263.
- [20] HAN W, GAO Z L, WANG J C, LI Y P, PENG X, RUI J, et al. Pedicle screw placement in the thoracic spine: a comparison study of computer-assisted navigation and conventional techniques[J/OL]. Orthopedics, 2010, 33. doi: 10.3928/01477447-20100625-14.
- [21] ALLAM Y, SILBERMANN J, RIESE F, GREINER-PERTH R. Computer tomography assessment of pedicle screw placement in thoracic spine: comparison between free hand and a generic 3D-based navigation techniques[J]. Eur Spine J, 2013, 22: 648-653.
- [22] LLUTHER N, IORGULESCU J B, GEANNETTE C, GEBHARD H, SALEH T, TSIOURIS A J, et al. Comparison of navigated versus non-navigated pedicle screw placement in 260 patients and 1 434 screws: screw accuracy, screw size, and the complexity of surgery[J/OL]. J Spinal Disord Tech, 2015, 28: E298-E303. doi: 10.1097/BSD.0b013e31828af33e.
- [23] LIN D, ZHAI W, LIAN K, KANG L, DING Z. Anterior versus posterior approach for four-level cervical spondylotic myelopathy[J/OL]. Orthopedics, 2013, 36: e1431-e1436. doi: 10.3928/01477447-20131021-28.
- [24] YING G Y, YAO Y, SHEN F, WU Z Y, CHEN C M, ZHU Y J. Percutaneous endoscopic removal of cervical foraminal schwannoma via interlaminar approach: a case report[J]. Oper Neurosurg (Hagerstown), 2018, 14: 1-5.
- [25] FUJIBAYASHI S, NEO M, TAKEMOTO M, OTA M, NAKAYAMA T, TOGUCHIDA J, et al. Computer-assisted spinal osteotomy: a technical note and report of four cases[J/OL]. Spine (Phila Pa 1976), 2010, 35: E895-E903. doi: 10.1097/brs.0b013e3181dc5ed1.
- [26] HONSTAD A, POLLY D W Jr, HUNT M A. A Novel, minimally invasive resection of a pediatric cervical spine osteoblastoma: a case report[J/OL]. JBJS Case Connect,

- 2015, 5: e108. doi: 10.2106/JBJS.CC.O.00088.
- [27] KADHIM M, BINITIE O, O'TOOLE P, GRIGORIOU E, DE MATTOS C B, DORMANS J P. Surgical resection of osteoid osteoma and osteoblastoma of the spine[J]. *J Pediatr Orthop B*, 2017, 26: 362-369.
- [28] KOBAYASHI H, AKIYAMA T, OKUMA T, SHINODA Y, OKA H, ITO N, et al. Three-dimensional fluoroscopic navigation-assisted surgery for tumors in patients with tumor-induced osteomalacia in the bones[J]. *Comput Assist Surg (Abingdon)*, 2017, 22: 14-19.
- [29] NASSER R, DRAZIN D, NAKHLA J, AL-KHOUSA L, BRIEN E, BARON E M, et al. Resection of spinal column tumors utilizing image-guided navigation: a multicenter analysis[J/OL]. *Neurosurg Focus*, 2016, 41: E15. doi: 10.3171/2016.5.FOCUS16136.
- [30] OULD-SLIMANE M, THONG P, PEREZ A, ROUSSIGNOL X, DUJARDIN F H. The role of Intraoperative 3D navigation for pelvic bone tumor resection[J]. *Orthop Traumatol Surg Res*, 2016, 102: 807-811.
- [31] RAJASEKARAN S, KANNA P R, SHETTY A P. Safety of cervical pedicle screw insertion in children: a clinicoradiological evaluation of computer-assisted insertion of 51 cervical pedicle screws including 28 subaxial pedicle screws in 16 children[J/OL]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 2012, 37: E216-E223. doi: 10.1097/BRS.0b013e318231bb81.
- [32] VAN ROYEN B J, BAAYEN J C, PIJERS R, NOSKE D P, SCHAKENRAAD D, WUISMAN P I. Osteoid osteoma of the spine: a novel technique using combined computer-assisted and gamma probe-guided high-speed intralaminar drill excision[J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 2005, 30: 369-373.
- [33] THEOCHAROPOULOS N, PERISINAKIS K, DAMILAKIS J, PAPADOKOSTAKIS G, HADJIPAVLOU A, GOURTZOYIANNIS N. Occupational exposure from common fluoroscopic projections used in orthopaedic surgery[J]. *J Bone Joint Surg Am*, 2003, 85: 1698-1703.
- [34] BINDAL R K, GLAZE S, OGNOSKIE M, TUNNER V, MALONE R, GHOSH S. Surgeon and patient radiation exposure in minimally invasive transforaminal lumbar interbody fusion[J]. *J Neurosurg Spine*, 2008, 9: 570-573.
- [35] RAMPERSAUD Y R, FOLEY K T, SHEN A C, WILLIAMS S, SOLOMITO M. Radiation exposure to the spine surgeon during fluoroscopically assisted pedicle screw insertion[J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 2000, 25: 2637-2645.
- [36] KIM C W, LEE Y P, TAYLOR W, OYGAR A, KIM W K. Use of navigation-assisted fluoroscopy to decrease radiation exposure during minimally invasive spine surgery[J]. *Spine J*, 2008, 8: 584-590.
- [37] KRAUS M D, KRISCHAK G, KEPPLER P, GEBHARD F T, SCHUETZ U H. Can computer-assisted surgery reduce the effective dose for spinal fusion and sacroiliac screw insertion?[J]. *Clin Orthop Relat Res*, 2010, 468: 2419-2429.
- [38] GUPPY K H, CHAKRABARTI I, BANERJEE A. The use of intraoperative navigation for complex upper cervical spine surgery[J/OL]. *Neurosurg Focus*, 2014, 36: E5. doi: 10.3171/2014.1.FOCUS13514.
- [39] AL EISSA S, AL-HABIB A F, JAHANGIRI F R. Computer-assisted navigation during an anterior-posterior *en bloc* resection of a sacral tumor[J/OL]. *Cureus*, 2015, 7: e373. doi: 10.7759/cureus.373.
- [40] STEFINI R, PERON S, MANDELLI J, BIANCHINI E, ROCCUCCI P. Intraoperative spinal navigation for the removal of intradural tumors: technical notes[J]. *Oper Neurosurg (Hagerstown)*, 2018, 15: 54-59.
- [41] SCHWAB J H, GASBARRINI A, CAPPUCCIO M, BORIANI L, DE IURE F, COLANGELI S, et al. Minimally invasive posterior stabilization improved ambulation and pain scores in patients with plasmacytomas and/or metastases of the spine[J/OL]. *Int J Surg Oncol*, 2011, 2011: 239230. doi: 10.1155/2011/239230.
- [42] ASAVAMONGKOLKUL A, WAIKAKUL S. Wide resection of sacral chordoma via a posterior approach[J]. *Int Orthop*, 2012, 36: 607-612.
- [43] HOUSARI G, GONZÁLEZ M, CALERO P, BENI R, LOBO E. Sacral chordoma: management of a rare disease in a tertiary hospital[J]. *Clin Transl Oncol*, 2013, 15: 327-330.
- [44] TOGAWA D, KAYANJA M M, REINHARDT M K, SHOHAM M, BALTER A, FRIEDLANDER A, et al. Bone-mounted miniature robotic guidance for pedicle screw and translaminar facet screw placement: part 2—evaluation of system accuracy[J/OL]. *Neurosurgery*, 2007, 60(2 Suppl 1): ONS129-ONS139. doi: 10.1227/01.NEU.0000249257.16912.AA.
- [45] ROSER F, TATAGIBA M, MAIER G. Spinal robotics: current applications and future perspectives[J]. *Neurosurgery*, 2013, 72(Suppl 1): 12-18.
- [46] SCHIZAS C, THEIN E, KWIATKOWSKI B, KULIK G. Pedicle screw insertion: robotic assistance versus conventional C-arm fluoroscopy[J]. *Acta Orthop Belg*, 2012, 78: 240-245.
- [47] GIORDANO M, GERGANOV V M, METWALI H, FAHLBUSCH R, SAMII A, SAMII M, et al. Feasibility of cervical intramedullary diffuse glioma resection using intraoperative magnetic resonance imaging[J/OL]. *Neurosurg Rev*, 2013 Nov 15. doi: 10.1007/s10143-013-0510-x.