

## 计算机辅助技术在骨科手术中的应用进展

翟志凯<sup>1</sup>, 张国梁<sup>2</sup>

(1. 内蒙古医科大学第一临床医学院 内蒙古 呼和浩特 010050; 2. 内蒙古医科大学附属医院骨科 内蒙古 呼和浩特 010050)

**摘要** 随着近十年来人工智能技术的飞速发展, 计算机辅助骨科手术 (Computer assisted orthopedic surgery, CAOS) 在临床手术中的应用已经较为成熟, 但是相对于发达国家, 其在国内的发展还处于初级阶段; CAOS 最早应用于脊柱手术中, 现已经逐步完善了在关节、创伤、运动医学及骨肿瘤等方面的应用。CAOS 在骨科手术中的应用具有手术时间短、辐射量少、定位准确等优势, 目前已经是骨科发展的重要方向。推动 CAOS 和自主研发的骨科手术机器人的发展, 优化计算机导航技术将是骨科技术程序化、智能化和个体化的关键所在。本文针对 CAOS 的发展进程及未来的应用前景做一综述。

**关键词** 机器人; 骨科手术; 人工智能; 计算机导航

**中图分类号** R687.3 **文献标识码** A **文章编号** 2096-7721 (2021) 06-0485-07

## Advances of computer-assisted technology in orthopedic surgery

ZHAI Zhikai<sup>1</sup>, ZHANG Guoliang<sup>2</sup>

(1. The First Clinical College of Inner Mongolia Medical University, Hohhot 010050, China; 2. Department of Orthopaedics, the Affiliated Hospital of Inner Mongolia Medical University, Hohhot 010050, China)

**Abstract** With the rapid development of artificial intelligence technology in the past decade, the application of computer-assisted orthopedic surgery (CAOS) in clinical practice has become more and more mature. However, compared with developed countries, CAOS in China is still in its primary stage. Despite CAOS was used in spinal surgery firstly, it now has been gradually applied to joint, trauma, sports medicine, and bone tumor. CAOS has the advantages such as shorter operation time, less radiation, more accurate positioning and so on. To promote the development of CAOS and self-developed orthopedic

收稿日期: 2021-03-02 录用日期: 2021-04-08

Received Date: 2021-03-02 Accepted Date: 2021-04-08

基金项目: 内蒙古自治区自然科学基金新项目资助 (2021MS08080)

Foundation Item: New Projects of Natural Science Foundation of Inner Mongolia Autonomous Region(2021MS08080)

通讯作者: 张国梁, Email: 13848106597@163.com

Corresponding Author: ZHANG Guoliang, Email: 13848106597@163.com

引用格式: 翟志凯, 张国梁. 计算机辅助技术在骨科手术中的应用进展 [J]. 机器人外科学杂志 (中英文), 2021, 2(6): 485-491.

Citation: ZHAI Z K, ZHANG G L. Advances of computer-assisted technology in orthopedic surgery [J]. Chinese Journal of Robotic Surgery, 2021, 2(6): 485-491.

robot, and optimize the computer navigation technology are keys to the programing, intellectualization and individualization of orthopedic technology. In this paper, the application status and prospects of CAOS are reviewed.

**Key words** Robotics; Orthopedic surgery; Artificial intelligence; Computer navigation

计算机辅助骨科手术 (Computer assisted orthopedic surgery, CAOS) 目前已应用于临床骨科中, 并进入了快速发展及成果涌现的阶段。骨科手术属于人体硬组织操作手术范畴, 其操作的对象是人体硬组织, 相对于其他外科手术, 骨骼的刚性结构更有利于手术机器人的操作和导航定位。且骨科手术具有术式多、临床需求量大和准确性高等特点, 更适合计算机辅助系统的运用。CAOS 目前已经成为推动骨科手术精准化、微创化发展的核心技术, 伴随着科学技术的发展与应用, 如计算机图像处理技术与骨科手术在临床骨科中的融合应用, CAOS 技术也越来越成熟。

## 1 计算机辅助骨科手术技术的起源

计算机辅助导航的概念是在 20 世纪 90 年代初提出来的, 并开始应用于各种骨科手术。第 1 批关于 CAOS 导航系统在临床骨科手术中运用的报道是 Lavallée S 等<sup>[1]</sup> 和 Nolte L P 等<sup>[2]</sup> 在脊柱椎弓根螺钉植入手术中的尝试。它和随后出现的许多其他产品一样, 术前计划和术中可视化是以 CT 扫描椎骨 3D 表面模型为基础, 实现了实时光学跟踪技术。这些系统大大提高了椎弓根螺钉置入的准确性和安全性, 特别是在椎体畸形和脊柱侧凸的情况下。基于透视和无影像导航系统后来被开发用于全髋关节和全膝关节置换术、骨折手术<sup>[3]</sup> 和前交叉韧带 (Anterior cruciate ligament, ACL) 重建手术。

骨科的第 1 个机器人系统是 RoboDoc<sup>[4]</sup>, 它是一款定制的工业主动式机器人, 专为全髋关节置换 (Total hip replacement, THR) 而设

计, 通过加工种植体腔来优化骨 / 种植体界面。20 世纪 80 年代末, RoboDoc 在 IBM T.J. 沃森 (T.J. Watson) 研究中心和宾夕法尼亚大学加州戴维斯分校被开发出来。1992 年, RoboDoc 第一次应用于人体手术, 并成为一种商业产品。该系统包括一个术前计划模块, 允许外科医生选择髋臼杯的大小、位置及基于手术前的 CT 扫描结果自动构建的 3D 股骨柄、骨盆和髋关节的表面模型。根据这个计划, 该系统会自动生成特定的加工程序为股骨干腔做平面图, 然后再基于机械臂的位置在手术期间执行术前的规划。

## 2 计算机辅助骨科手术技术的原理

CAOS 的核心技术是图像引导手术 (Image guided surgery, IGS), 具体是以 X 线和 CT 影像作为主要数据载体, 结合定位导航技术对患者部位位置信息及手术工具位置信息进行跟踪, 可实现高精度术中导航。而机器人与图像引导手术的结合与应用, 进一步推动了机器人辅助骨科手术的发展, 机器人根据医学影像信息直接进行手术操作规划、定位及控制, 从而实现机器人辅助或自主手术操作。CAOS 依赖于一些成熟的技术, 其中包括各种成像方式 (X 线、MRI、CT、US、视频)、实时跟踪 (光学、电磁、机械)、3D 加法印刷及各种机器人技术 (如智能仪器)。CAOS 是多种尖端科学技术的集成, 所以大多数商业系统将成熟的技术与新的技术结合起来。

CAOS 系统根据计算机与医生之间的关系可分为被动系统、半主动系统和主动系统。被动系统不会对患者执行任何操作, 它们在手术前制定

计划、手术期间协助外科医生模拟或术中指导(手术导航)；半主动系统执行部分操作,例如移动钻头导向套或切割夹具,但是半主动系统不参与外科手术操作;主动系统包括 RoboDoc (Integrated surgical systems, CA, USA) 和 Caspar (URS Ortho GmbH, Rastatt, Germany) 等,这些系统可以执行一些术前编程的手术操作。

CAOS 系统通常由影像系统、手术规划导航系统和机械臂操作系统三部分组成。影像系统由 X 线机或 CT 等医学影像设备构成,可实现对手术部位和空间位置信息的透视,并通过定位坐标信息完成由图像坐标系到机器人坐标系的转换。这种转换也被称为空间配准,为机器人系统操作提供基础位置信息。因此,图像分辨率和影像坐标转换系统的精度对机器人手术操作精度具有重要影响。手术规划导航系统依据医学影像信息进行手术操作规划,这个过程根据术式的不同由医生规划或机器人自主完成,依据手术规划信息引导机器人完成手术操作。机械臂操作系统作为机器人的控制与执行部分,可依据手术规划信息对机器人进行运动规划,实现运动控制等手术操作。

空间配准是指在一个空间内的坐标转换或变换成另一个空间中的坐标,以实现两个不同空间中的两个坐标之间的对应。并且映射虚拟和真实坐标系的两个空间,使得虚拟空间中的解剖结构对应于真实空间中的结构。骨科手术导航系统必须在手术过程中实时跟踪手术工具。这种跟踪的目的是持续地将手术器械定向到患者的目标区域。

在实时跟踪的基础上,外科医生根据术前数据重建的三维表面模型可以可视化和同步手术操作。因此,各种外部跟踪器被开发出来<sup>[5]</sup>。外部跟踪设备通常由控制单元、感应体发生器和传感器(如线圈或反射标记球)组成,传感器

通常固定在手术器械上。控制单元和感应体发生器协同工作,以估计传感器的位置。在传感器之间进行校准之后,外科医生可以在传感器连续测量的基础上成功地自动导航手术工具<sup>[6]</sup>。手术导航系统的导航器是一个空间位置跟踪装置,它决定了手术工具的位置和方向,并以 3D 坐标形式提供这些术前数据。空间配准有许多跟踪方法,基于各种物理介质,例如声的、磁的、光学和机械方法在早期都已被使用。

导航系统为操作员提供了必要的手术期间的信息,但不执行任何活动。该系统的关键部件包括三维定位跟踪器、图像、计算机和外围设备。导航系统采用光学传感器或磁传感器作为一种三维位置传感器。光学系统使用光学传感器,具有精度高、速度快的特点,多个发光二极管(Light-emitting diode, LED)可以在没有视线的情况下同时跟踪,但是会出现摄像头和动态参考帧之间的遮挡问题。相反,磁传感器容易受到电机、手术台或金属工具的影响,但没有视线问题。但是,今天的大多数外科导航产品都依赖于使用兼容手术室(Operation room, OR)的光学跟踪主动或被动发射的红外线,跟踪器通过被跟踪的物体反射的红外线来追踪外科操作部位。目前,已经有人提出了通过视频图像来确定已知几何图形的方法作为红外线光学跟踪器的廉价替代品<sup>[7-8]</sup>。

## 3 计算机辅助技术在骨科中的应用

### 3.1 计算机辅助技术在关节矫形手术中的应用

在关节置换手术中,关节假体摆放的位置和截骨的量对术后假体的寿命以及患肢的预后具有重要影响。在全膝关节置换术(Total knee arthroplasty, TKA)和 THR 中植入物的错位可以

在短期内导致植入物的撞击以及患者出现一些临床并发症,从长远来看会导致衬里的冲击磨损、破损及假体稳定性的破坏。根据亚洲人的生活习惯和运动方式,假体安放的准确性对预后至关重要<sup>[9]</sup>。基于CT的导航最早是由Jaramaz B等<sup>[10]</sup>和DiGioia A M等<sup>[11]</sup>在THR中引入的,如今已成为外科手术导航的黄金标准。多种计算机辅助导航系统的准确性已经得到较为充分的验证<sup>[12]</sup>。在体外研究中,Jolles B M等<sup>[13]</sup>通过对假体模型的效果对比,证实了计算机辅助系统在THR中定位髌臼位置相较于传统的关节置换术(徒手或机械引导)在准确性和重现性方面的重要性。Sugano N等<sup>[14]</sup>在研究中报道了在CT导航下完成全髋关节置换术(Total hip arthroplasty, THA)后至少十年的远期预后,证实了计算机辅助技术在减少脱位和撞击相关机械并发症方面的优越性。Nashikkar P S等<sup>[15]</sup>通过病例对照分析的方法,观察50例肩关节成型术患者的螺钉置入长度和中心笼穿孔情况,研究发现计算机导航系统有助于手术结果准确性的提高。

### 3.2 计算机辅助技术在脊柱手术中的应用

在现代外科临床实践中,为了保护脊髓和神经根,通常采用机械稳定技术治疗脊柱不稳。这些技术包括在固定的椎弓根区,特别是椎弓根处放置螺钉,因为椎弓根区可以找到最强壮的骨骼。外科医生在脊柱手术中面临的挑战是如何准确地放置螺钉,以获得良好的机械把持,并避免对周围重要的解剖结构造成损害。这在颈部尤其重要,由于颈椎椎体的目标骨量较小,脊髓、神经根和椎动脉毗邻椎弓根,更容易受到损害。计算机辅助系统可使外科医生精确地将植入物放置到椎骨中,这将会提高手术安全性,并有可能改善手术结果。

目前,术中成像、导航系统和机器人引导技术已经被开发出来,以帮助外科医生在脊柱

手术中正确放置螺钉。YAO J等<sup>[16]</sup>通过对比40个腰椎节段和32个椎间盘进行CT扫描得到的数据与游标卡尺测量得到的数据,证实了基于CT扫描的脊柱计算机辅助解剖测量具有高精度性和可靠性,为改进脊柱外科手术提供了方向。然而,Kraus M等<sup>[17]</sup>通过对一级创伤中心2 003枚椎弓根螺钉的回顾性分析发现,计算机导航和常规方法均为胸腰椎创伤椎弓根螺钉置入的安全方法,但是基于三维的导航并不能显著提高定位精度。Hlubek R J等<sup>[18]</sup>通过比较自由手技术与立体定向导航技术在C<sub>2</sub>椎弓根和部分螺钉置放方面的安全性和准确性发现在C<sub>2</sub>椎弓根或椎弓根螺钉置入术中,徒手技术比CT导航更准确,两种技术辅助下的脊柱手术并发症发生率并无差别。YU Z等<sup>[19]</sup>通过人体模型进行研究发现,应用快速成型技术置入颈椎椎弓根螺钉基于3D模型的钻孔模板在技术上是可行的,并且可以在不需要额外辐射的情况下精确放置椎弓根螺钉,这对患者是安全的,值得在临床上进一步研究。SUN J C等<sup>[20]</sup>通过探讨计算机辅助虚拟手术计划在后纵韧带骨化(Ossification of posterior longitudinal ligament, OPLL)前路可控前移融合(Anterior controllable antedisplacement and fusion, ACAF)手术中的作用证实了虚拟ACAF手术治疗OPLL在临床上可行的,对外科医生制定合适的手术方案有一定的参考价值。目前,机器人辅助技术被广泛用于脊柱手术,关于机器人辅助脊柱手术的初步临床研究表明,与传统的透视辅助徒手手术相比,在椎弓根螺钉内固定和其他脊柱手术中,机器人辅助脊柱手术可能更准确、更有效和更安全,并且可以缩减手术时间及术中X线照射次数。尽管限制机器人推广的主要问题是相关的成本问题,但是机器人辅助手术在患者及术者获益方面仍然有巨大潜力<sup>[21-22]</sup>。

### 3.3 计算机辅助技术在创伤骨科中的应用

在创伤骨科手术中，骨折复位的准确性和稳定性是患者预后的关键，骨折内固定的牢靠性及准确性是维持骨折良好复位的关键，但是良好的内固定置入给手术带来了极大的困难。在常规徒手手术中，外科医生需要丰富的经验，并且需要通过在透视下多次复位骨折部位和内固定的位置。研究表明，近些年来使用导航技术可以提供准确的内固定放置位置，同时减少手术医生辐射暴露和手术时间<sup>[23]</sup>。

Farah K 等<sup>[24]</sup>使用 CirqR 机器人辅助结合信息技术（Information and communication technology, ICT）导航系统的 C<sub>1</sub>~C<sub>2</sub> 后路经皮固定微创治疗颈椎齿状突骨折，不但可以提高上颈椎椎弓根螺钉定位的准确性，减少了患者和术者的辐射暴露、手术时间和患者术中失血量，特别是椎周静脉丛剥离时的失血量，而且可以精确地定位螺钉，并且接受这种手术的患者所需的住院时间较短，术后并发症较少。HE M 等<sup>[25]</sup>通过对 60 例股骨颈骨折患者分别使用双平面机器人导航系统辅助的经皮空心螺钉治疗（机器人组）和常规徒手手术（徒手手术组），发现机器人组可明显减少术中透视时间、钻孔次数和手术时间，机器人放置的螺钉在平行度和分散度方面均优于徒手放置的螺钉。

### 3.4 计算机辅助技术在肿瘤骨科中的应用

骨肿瘤的手术治疗，尤其是关于脊柱和骨盆的恶性肿瘤的切除涉及复杂的器官以及生物力学的解剖关系。自 2004 年首次报道以来<sup>[26]</sup>，骨科肿瘤手术中外科导航技术的应用已经取得了极大的进展。越来越多的文献从肿瘤切除的准确性、生物力学的恢复和手术疗效等多方面证明了计算机辅助技术在骨肿瘤外科治疗中的优越性<sup>[25-31]</sup>。Tiware A 等<sup>[32]</sup>回顾性分析了

行计算机导航辅助半盆腔内切除术的患者临床资料，研究显示，通过利用计算机导航技术能够更加完整准确的切除肿瘤组织，并且达到了负切缘的肿瘤学目的。YANG Y 等<sup>[33]</sup>通过病例分析对照研究了 25 例患者在计算机导航下完成骶脊索瘤的手术切除，计算机导航相对于传统手术具有良好的安全性，并且提高了肿瘤切除的准确性，使更多患者获得了安全的手术切缘，缩短了手术时间，并减少了术后出血量。

### 3.5 计算机辅助技术在运动医学中的应用

股骨隧道定位虽然是 ACL 重建成功的重要因素，但是其难度大。计算机导航除了可以改善隧道布置程序外，还可以改进解剖规划程序。在解剖上的双束重建中，前内侧束和后外侧束的放置很关键，可使患者获得更佳生物力学优势<sup>[34-37]</sup>。Luites J W 等<sup>[38]</sup>通过对 12 例膝关节的前内侧束和后外侧束运用计算机辅助股骨隧道定位法重建股骨隧道，为前交叉韧带的双束韧带重建确立了模板。结果显示，计算机辅助系统确立的隧道相较于传统的人工确定的隧道更加符合人体解剖和生物力学。在临床应用阶段，Barrett I 等<sup>[39]</sup>对比了传统透视制导技术与计算机导航技术，研究显示，计算机辅助下的导航虽然获得了更加准确的位置，但是延长了手术时间，并且具有更高的辐射剂量。因此，计算机辅助下的导航能否改善临床效果尚不清楚。

## 4 总结与展望

伴随着人工智能以及互联网技术的飞速发展，计算机辅助骨科手术也得到了极大的改进，计算机辅助技术的精准性以及稳定性已经得到了临床验证。但是目前计算机辅助技术还存在着一些限制计算机辅助骨科技术推广的局限性。作为大型的精准手术器械，计算机辅助器械费

用高昂,其购买、使用及维护需要较大的经济成本。且计算机辅助技术的设备往往较为庞大,需要占据较大的手术空间,设备的摆放往往需要大型的手术室。同时,实时导航的计算机辅助技术的跟踪器和被跟踪点之间不能存在遮挡,这往往延长手术时间,影响手术的进程。将几种导航定位方法相互融合,可以使从扫描图像坐标系到机器人坐标系的注册更加准确,导航定位的准备过程更加便捷。基于多模态图像的导航系统将成为导航手术的主流,但是此项技术尚不成熟。计算机辅助骨科手术技术还处于初级阶段,关于计算机辅助骨科技术与传统的骨科手术在改善患者远期预后方面具有差异性的报道较少。在未来计算机辅助技术的设备小型化、简单化将是计算机辅助技术的主要发展方向,并且随着5G技术的发展,远程操作也将是未来计算机辅助技术发展的新方向。

## 参考文献

- [1] Lavallée S, Sautot P, Troccaz J, et al. Computer-assisted spine surgery: a technique for accurate transpedicular screw fixation using CT data and a 3-D optical localizer[J]. *J Image Guid Surg*, 1995, 1(1): 65-73.
- [2] Nolte L P, Visarius H, Arm E, et al. Computer-aided fixation of spinal implants[J]. *J Image Guid Surg*, 1995, 1(2): 88-93.
- [3] Joskowicz L, Milgrom C, Simkin A, et al. FRACAS: a system for computer-aided image-guided long bone fracture surgery[J]. *Comput Aided Surg*, 1998, 3(6): 271-288.
- [4] Russell T, Patrick J, Louis W, et al. A steady-hand robotic system for microsurgical augmentation[J]. *Lecture Notes in Computer Science*, 1999, 1679(1): 1031-1041.
- [5] Luo X, Mori K, Peters T M. Advanced endoscopic navigation: surgical big data, Methodology and Applications[J]. *Annu Rev Biomed Eng*, 2018. DOI: 10.1146/annurev-bioeng-062117-120917
- [6] Ewurum C H, Guo Y, Pagnha S, et al. Surgical navigation in orthopedics: workflow and system review[J]. *Adv Exp Med Biol*, 2018, 1093: 47-63. DOI: 10.1007/978-981-13-1396-7\_4.
- [7] de Siebenthal J, Grützner P A, Zimolong A, et al. Assessment of video tracking usability for training simulators[J]. *Comput Aided Surg*, 2004, 9(3): 59-69.
- [8] Clarke J V, Deakin A H, Nicol A C, et al. Measuring the positional accuracy of computer assisted surgical tracking systems[J]. *Comput Aided Surg*, 2010, 15(1-3): 13-18.
- [9] Song S J, Park C H, Bae D K. What to know for selecting cruciate-retaining or posterior-stabilized total knee arthroplasty[J]. *Clinics in Orthopedic Surgery*, 2019, 11(2):142.
- [10] Jaramaz B, DiGioia A M 3rd, Blackwell M, et al. Computer assisted measurement of cup placement in total hip replacement[J]. *Clin Orthop Relat Res*, 1998. DOI: 10.1097/00003086-199809000-00010.
- [11] DiGioia A M, Jaramaz B, Blackwell M, et al. The Otto Aufranc Award. Image guided navigation system to measure intraoperatively acetabular implant alignment[J]. *Clin Orthop Relat Res*, 1998. DOI: 10.1097/00003086-199810000-00003.
- [12] Ulivi M, Orlandini L C, Meroni V, et al. Intraoperative validation of bone cut accuracy of a pinless smart touch-screen navigation system device in total knee arthroplasty[J]. *Int J Med Robot*, 2019, 15(5): e2030.
- [13] Jolles B M, Genoud P, Hoffmeyer P. Computer-assisted cup placement techniques in total hip arthroplasty improve accuracy of placement[J]. *Clin Orthop Relat Res*, 2004. DOI: 10.1097/01.blo.0000141903.08075.83
- [14] Sugano N, Takao M, Sakai T, et al. Does CT-based navigation improve the long-term survival in ceramic-on-ceramic THA? [J]. *Clin Orthop Relat Res*, 2012, 470(11): 3054-3059.
- [15] Nashikkar P S, Scholes C J, Haber M D. Role of intraoperative navigation in the fixation of the glenoid component in reverse total shoulder arthroplasty: a clinical case-control study[J]. *J Shoulder Elbow Surg*, 2019, 28(9): 1685-1691.
- [16] YAO J, DONG B, SUN J, et al. Accuracy and reliability of computer-aided anatomical measurements for vertebral body and disc based on computed tomography scans[J]. *Orthop Surg*, 2020, 12(4): 1182-1189.
- [17] Kraus M, Weiskopf J, Dreyhaupt J, et al. Computer-aided surgery does not increase the accuracy of dorsal pedicle screw placement in the thoracic and lumbar

- spine: a retrospective analysis of 2, 003 pedicle screws in a level I trauma center[J]. *Global Spine J*, 2015, 5(2): 93–101.
- [18] Hlubek R J, Bohl M A, Cole T S, et al. Safety and accuracy of freehand versus navigated C2 pars or pedicle screw placement[J]. *Spine J*, 2018, 18(8): 1374–1381.
- [19] YU Z, ZHANG G, CHEN X, et al. Application of a novel 3D drill template for cervical pedicle screw tunnel design: a cadaveric study[J]. *Eur Spine J*, 2017, 26(9): 2348–2356.
- [20] SUN J C, SUN K Q, SUN S X, et al. Computer-assisted virtual operation planning in anterior controllable anterior-displacement and fusion surgery for ossification of the posterior longitudinal ligament based on actual computed tomography data[J]. *Clin Neurol Neurosurg*, 2019. DOI: 10.1016/j.clineuro.2018.12.019.
- [21] Walker C T, Kakarla U K, Chang S W, et al. History and advances in spinal neurosurgery[J]. *J Neurosurg Spine*, 2019, 31(6): 775–785.
- [22] D’Souza M, Gendreau J, Feng A, et al. Robotic-assisted spine surgery: history, efficacy, cost, and future trends[J]. *Robot Surg*, 2019. DOI: 10.2147/RSRR.S190720.
- [23] Hamelinck H K, Haagmans M, Snoeren M M, et al. Safety of computer-assisted surgery for cannulated hip screws[J]. *Clin Orthop Relat Res*, 2007. DOI: 10.1097/01.blo.0000238815.40777.d2.
- [24] Farah K, Meyer M, Prost S, et al. Cirq® robotic assistance for minimally invasive C1–C2 posterior instrumentation: report on feasibility and safety[J]. *Oper Neurosurg(Hagerstown)*, 2020. DOI: 10.1093/ons/opa208.
- [25] HE M, HAN W, ZHAO C P, et al. Evaluation of a Bi-planar robot navigation system for insertion of cannulated screws in femoral Neck fractures[J]. *Orthop Surg*, 2019, 11(3): 373–379.
- [26] Krettek C, Geerling J, Bastian L, et al. Computer aided tumor resection in the pelvis[J]. *Injury*, 2004. DOI: 10.1016/j.injury.2004.05.014.
- [27] Wong K C, Kumta S M. Computer-assisted tumor surgery in malignant bone tumors[J]. *Clin Orthop Relat Res*, 2013, 471(3): 750–761.
- [28] Gerbers J G, Stevens M, Ploegmakers J J, et al. Computer-assisted surgery in orthopedic oncology [J]. *Acta Orthop*, 2014, 85(6): 663–669.
- [29] Ritacco L E, Milano F E, Farfalli G L, et al. Accuracy of 3–D planning and navigation in bone tumor resection[J]. *Orthopedics*, 2013, 36(7): e942–e950.
- [30] Aponte-Tinao L, Ritacco L E, Ayerza M A, et al. Does intraoperative navigation assistance improve bone tumor resection and allograft reconstruction results?[J]. *Clin Orthop Relat Res*, 2015, 473(3): 796–804.
- [31] Young P S, Bell S W, Mahendra A. The evolving role of computer-assisted navigation in musculoskeletal oncology[J]. *Bone Joint J*, 2015, 97–B(2): 258–264.
- [32] Tiwari A, Yadlapalli A, Verma V. Computer navigation assisted tumor surgery for internal hemipelvectomy—Early experience[J]. *J Clin Orthop Trauma*, 2020. DOI: 10.1016/j.jcot.2020.08.016.
- [33] YANG Y, LI Y, ZHANG Q, et al. A case-control study of computer navigation assisted resection of primary sacral chordoma above sacrum 3 level[J]. *J Bone Oncol*, 2020. DOI: 10.1016/j.jbo.2020.100303.
- [34] Musahl V, Burkart A, Debski R E, et al. Accuracy of anterior cruciate ligament tunnel placement with an active robotic system: a cadaveric study[J]. *Arthroscopy*, 2002, 18(9): 968–973.
- [35] Picard F, DiGioia A M, Moody J, et al. Accuracy in tunnel placement for ACL reconstruction. comparison of traditional arthroscopic and computer-assisted navigation techniques[J]. *Comput Aided Surg*, 2001, 6(5): 279–289.
- [36] Burkart A, Debski R E, McMahon P J, et al. Precision of ACL tunnel placement using traditional and robotic techniques[J]. *Comput Aided Surg*, 2001, 6(5): 270–278.
- [37] Klos T V, Habets R J, Banks A Z, et al. Computer assistance in arthroscopic anterior cruciate ligament reconstruction[J]. *Clin Orthop Relat Res*, 1998. DOI: 10.1097/00003086-199809000-00009.
- [38] Luites J W, Wymenga A B, Blankevoort L, et al. Accuracy of a computer-assisted planning and placement system for anatomical femoral tunnel positioning in anterior cruciate ligament reconstruction[J]. *Int J Med Robot*, 2014, 10(4): 438–446.
- [39] Barrett I, Ramakrishnan A, Cheung E. Safety and efficacy of intraoperative computer-navigated versus non-navigated shoulder arthroplasty at a tertiary referral[J]. *Orthop Clin North Am*, 2019. DOI: 10.1016/j.jocl.2018.08.004.