

# 机器人辅助技术在创伤骨科的发展与临床应用



朱振中<sup>1</sup>, 郑国焱<sup>2</sup>, 张长青<sup>1</sup>

1. 上海交通大学附属第六人民医院骨科(上海 200233)

2. 上海交通大学医疗机器人研究院(上海 200030)



张长青, 教授, 主任医师, 博士生导师。现任上海交通大学附属第六人民医院副院长, 上海市创伤骨科临床医学中心主任; 中华医学会显微外科学分会前任主任委员、中国医师协会骨科医师分会副会长、中华医学会骨科分会常委、上海市医学会骨科学分会主任委员。致力于骨科疑难疾病诊疗及临床新技术转化, 主持国家级课题十余项, 包括国家重点研发计划 1 项、国家自然科学基金国际合作重点项目 1 项、卫生部行业专项基金 1 项、国家自然科学基金面上项目 3 项等。发表 SCI 论文 173 篇, 他引 4 330 次; 研究成果先后获中华医学科技奖一等奖、教育部科技进步一等奖、上海科技进步一等奖。

**【摘要】** 目的 对骨科机器人辅助技术的基本原理及优势、在创伤骨科领域尤其是骨折复位手术机器人的研究进展、临床应用及局限性进行综述和评价。方法 广泛查阅国内外关于骨科机器人辅助技术原理、骨折复位手术机器人相关研究文献, 分析技术优势及临床疗效和不足, 探讨该领域未来发展趋势。结果 骨科机器人可辅助医生进行直观的术前规划、术中精准控制及微创操作, 极大地拓展了医生对骨科创伤的评估和治疗能力; 创伤骨科手术机器人已经实现从基础研究到临床应用的突破, 初步结果显示该技术可显著提高手术精度、降低手术创伤, 但仍存在有效性评价不足、技术实现手段单一、临床适应证窄等问题。结论 骨科机器人辅助技术在创伤骨科有广阔应用前景, 但目前尚处于起步阶段, 需要加强医工合作研究、医生交流平台建设、规范化培训及数据共享, 才能不断推进骨科机器人辅助技术在创伤骨科的发展, 更好地发挥其临床应用价值。

**【关键词】** 机器人辅助技术; 创伤骨科; 骨折复位; 术中导航

## Development and clinical application of robot-assisted technology in traumatic orthopedics

ZHU Zhenzhong<sup>1</sup>, ZHENG Guoyan<sup>2</sup>, ZHANG Changqing<sup>1</sup>

1. Department of Orthopedic Surgery, Shanghai Jiao Tong University Affiliated Shanghai Sixth People's Hospital, Shanghai, 200233, P. R. China

2. Institute of Medical Robotics, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, 200030, P. R. China

Corresponding author: ZHANG Changqing, Email: Zhangcq@sjtu.edu.cn

**【Abstract】 Objective** To review and evaluate the basic principles and advantages of orthopedic robot-assisted technology, research progress, clinical applications, and limitations in the field of traumatic orthopedics, especially in fracture reduction robots. **Methods** An extensive review of research literature on the principles of robot-assisted technology and fracture reduction robots was conducted to analyze the technical advantages and clinical efficacy and shortcomings, and to discuss the future development trends in this field. **Results** Orthopedic surgical robots can assist orthopedists in intuitive preoperative planning, precise intraoperative control, and minimally invasive operations. It greatly expands the ability of doctors to evaluate and treat orthopedic trauma. Trauma orthopedic surgery robot has achieved a breakthrough from basic research to clinical application, and the preliminary results show that the technology can significantly improve surgical precision and reduce surgical trauma. However, there are still problems such as insufficient evaluation of effectiveness, limited means of technology realization, and narrow clinical indications that

DOI: 10.7507/1002-1892.202206097

基金项目: 上海市“科技创新行动计划”生物医药科技支撑专项(21S31901000)

通信作者: 张长青, Email: Zhangcq@sjtu.edu.cn

need to be solved. **Conclusion** Robot-assisted technology has a broad application prospect in traumatic orthopedics, but the current development is still in the initial stage. It is necessary to strengthen the cooperative medical-industrial research, the construction of doctors' communication platform, standardized training and data sharing in order to continuously promote the development of robot-assisted technology in traumatic orthopedics and better play its clinical application value.

**【Key words】** Robot-assisted technology; traumatic orthopedics; fracture reduction; intraoperative navigation

**Foundation item:** Shanghai "Science and Technology Innovation Action Plan" Biomedical Science and Technology Support Special Project (21S31901000)

随着我国社会、经济的快速发展以及人民生活水平的不断提高,人们对于健康的要求也到达了新高度。临床上治疗疾病的新技术手段不断被提出,骨科治疗理念也随着技术进步而不断革新。精准、微创、加速康复理念是当前骨科发展的主要方向。骨科机器人可辅助医生进行精准控制、微创操作,自问世以来便在医疗领域显示出了巨大潜力<sup>[1]</sup>。

骨组织独有的刚性结构使其便于精准定位及操作,是机器人技术最早进入的临床医学领域之一。为提高全髋关节置换术中股骨近端的扩锉精度,1986年美国加州大学戴维斯分校 Paul 等与 IBM 公司合作,从航空间定位技术中获取灵感,共同设计研发了 Robodoc 骨科机器人及导航系统,将手术精度提高至 0.1 mm<sup>[2]</sup>,实现了骨科手术精度的巨大飞跃。同期,瑞士伯尔尼大学 Nolte 等<sup>[3]</sup>研发了脊柱椎弓根钉植入术中实时导航系统。以上工作不仅确立了计算机辅助导航骨科手术以及骨科机器人操作系统的基本架构,也拉开了相关技术在临床应用的新篇章。骨科机器人技术也迅速由原先单一形态、简单功能逐渐向多元化、精细化发展,应用范围也拓展至膝关节、脊柱、足踝、运动医学、创伤骨科等多个领域。本文将对骨科机器人辅助技术的优势、创伤骨科机器人的研究进展以及临床应用情况、目前仍存在的局限性以及可能的发展趋势作简要综述。

## 1 骨科机器人对骨科医生的赋能作用

骨科机器人涉及临床医学、机器人学、人工智能、控制学、工程学等多个学科。临床常见的骨科机器人主要功能模块有术前规划、导航定位、术中实现与评估等。借助于全面直观的影像学评估规划手术路径,通过高自由度、高稳定性的机械臂操作完成路径实现,并在术中实时评估完成度及重要力学参数,实现骨科手术的精准化、合理化,提高手术成功率,降低并发症发生率及减少医源性辐射。

### 1.1 直观的规划及术中操作

既往骨科术前计划大多基于 X 线片,由于放大率及透视角度等多方面因素限制,很难做到精准规划。机器人辅助手术中,基于 CT 的三维图像分析及术前规划,可直观显示个体解剖特点,帮助医生进行准确操作,减少冗余步骤,更加准确快速地选择内植物。如全髋关节置换术中,术前规划不仅可以全面了解髋臼大小、外展角、前倾角及偏心距等重要参数,还能提前判断复杂畸形,实现术中操作“有的放矢”;对于畸形严重的股骨近端,在术前即可了解髓腔的特殊形态,相应制定直接有效的磨锉计划,选择适配假体。与传统的反复试模相比,合理的术前规划可以使手术操作更加精准,大幅减少手术关键环节的操作步骤,减轻软组织干扰并缩短手术时间,将手术创伤及相关并发症发生风险降至最低<sup>[4-5]</sup>。

术前采集的手术部位空间特征及手术规划路径在术中与实际场景精确配准后,术中导航便赋予了医生一双可以“透视的眼睛”。常用的术中导航根据原理可分为红外光学导航、电磁定位导航<sup>[6]</sup>、光学与惯性混合导航定位系统<sup>[7]</sup>。近年来也出现了基于透视的光学导航和增强现实技术<sup>[8]</sup>、基于深度相机的无参考系导航以及基于机器视觉连续追踪的计算机导航系统<sup>[9]</sup>。目前骨科机器人多使用光学导航,医生可以借助导航系统直观地观察操作实时变化情况及内植物与解剖结构的相对关系<sup>[10]</sup>(例如椎弓根螺钉植入方向与椎管的关系),髋臼安放的位置、深度及角度;踝关节置换时可获得更准确的胫骨截骨角度<sup>[11-12]</sup>,甚至更精准的关节腔注射<sup>[13]</sup>。

随着图像分析及人工智能技术的不断进步,术前规划已拓展至软组织、重要血管及神经组织,通过相应的图像技术也可以进行三维重建或多模态融合显示,规避危险区域,从而大幅降低手术风险及减少手术并发症。

### 1.2 精准稳定的手术控制

骨科机器人除了能辅助术前周密详细的手术

规划及术中实时透视导航外,另一个核心系统是机械臂控制系统,它具有高精度、力柔顺性好及重复性高等特点,可极大地拓展医生的手术操作能力,协助医生完成高难度、高精度、长时间的作业。

从结构学角度,骨科机器人根据机械臂结构可分为串联式与并联式。串联式手术机器人是由一系列连杆通过转动关节或移动关节串联形成的,采用驱动器驱动各个关节的运动,从而带动连杆的相对运动,具有自由度高、通过空间小、运动范围大等优势,是目前多数骨科机器人的架构模式,如 Mako Rio 关节置换手术机器人(史赛克公司,美国)、天玑骨科机器人(北京天智航医疗科技股份有限公司)等。并联式手术机器人是指动平台与基底间至少由 2 个独立的运动单元以并联方式连接并协同驱动的一种闭环机器人,具有稳定性高、重复性好、响应迅速、体积小等优点,其中具有代表性的是脊柱手术机器人 Spine Assist (Mazor Robotics 公司,以色列)。现有骨科机器人中也有将两种控制方式结合以发挥各自优势,例如达芬奇手术机器人系统(Intuitive Surgical 公司,美国),其前端是线传动并联方式,末端采用串联方式,可以突破常规手术的局限。Bozkurt 等<sup>[14]</sup>报道使用 4 臂达芬奇手术机器人系统可完成沙滩椅位和侧卧体位下肩部关节镜手术的各种操作,可作为骨科镜下微创手术的有效工具。

从与医生的交互方式角度,骨科机器人可分为主动式、半主动式和被动式。主动式手术机器人能够在没有医生的操控下,通过使用预先编程的算法和指定方法独立完成任务。骨科使用的第一个主动式手术机器人系统是 Robodoc 手术系统(Think Surgical 公司,美国)<sup>[15-16]</sup>。被动式手术机器人必须由外科医生掌握来完成。例如 ROSA 膝关节机器人系统(Zimmer Biomet 公司,美国)<sup>[17]</sup>、OMNIBotics (Corin Group 公司,英国)和达芬奇手术机器人系统,通常用于腹腔镜或关节镜手术<sup>[18]</sup>。半主动式手术机器人结合了前两者的优点,通过术前规划与术中配准,机器人系统首先划定安全范围,在安全范围内机械臂协同医生自由操作;一旦操作越过安全范围,机器人便会通过某种约束手段阻止危险操作。采用该系统的有 Mako Rio 关节置换手术机器人<sup>[19]</sup>。

作为手术机器人系统的核心部件,机械臂系统正向着更灵敏、更精准、更智能的方向迈进。多家公司目前已推出 7 自由度机械臂,具有代表性的是 LBR MED (KUKA 公司,德国)。另外,国外研

究机构及公司也在针对临床需求开发更符合应用场景的新构型机器人,从传统的齿轮传动变成线传动,甚至更多的特异构型,如达芬奇 S-HD 机器人系统(Intuitive Surgical 公司,美国)。同时,机械臂的力反馈响应速度以及应答能力也得到巨大提升<sup>[20]</sup>。这些技术的改进,其最终目标是让医生的操作变得更快、更准、更稳。

### 1.3 实时评估与远程控制

由于病情的个体化因素,术前周密计划及术中精准实现并非意味着手术的绝对成功,手术精准不一定等于正确。因此需要在手术过程中根据患者具体情况,通过科学评估手段结合医生经验,才能达到最佳治疗效果。术中实时评估是对术前计划中难以预估的重要参数进行测量、分析并调整的过程。传统手术中,医生仅凭经验判断并调整,主观性强,不同医生间的手术质量异质性大;同时,由于关键指标缺乏直观呈现并反馈,理论交流缺乏必要的技术支撑及数据积累,导致医生学习曲线较长。而机器人辅助手术可通过特殊的传感装置及算法,直观显示关键参数的细微变化,帮助医生进行更加科学的调整。全膝关节置换术中,对于力线、组织张力和间隙的平衡是手术难点<sup>[21]</sup>。现有的手术机器人辅助系统可以通过精准截骨为组织力学平衡建立初始基点<sup>[22]</sup>,术中实时测得应力状态下关节间隙的变化,为医生实施平衡调整提供量化指标,同时也可辅助数字化压力传感器进行功能性张力及对线调整,减少额外的组织松解创伤,有望进一步提高手术疗效,提升患者满意度<sup>[23]</sup>。

随着网络通信技术尤其是 5G 技术的迅速发展,骨科机器人远程操作及力反馈实时响应性得到了巨大提升,使得骨科机器人远程手术成为可能。2020 年,北京积水潭医院率先进行了首例基于 5G 网络的远程骨科手术,以及远程导航经皮骨盆通道螺钉固定骨盆和髌臼骨折手术<sup>[24]</sup>;2021 年,上海交通大学附属第六人民医院开展了远程机器人髌膝关节置换手术。该系列临床突破对于促进医疗同质化,提升边远地区的医疗水平有着重要意义。

## 2 骨科机器人在创伤领域的研究及应用进展

骨科创伤领域机器人与其他亚专业机器人研究同期起步<sup>[25]</sup>,但临床应用尚处于初步阶段,主要集中在微创骨折复位与经皮微创骨折固定两个方向。

### 2.1 微创骨折复位机器人研究进展

复位与固定是骨折治疗的关键,为了实现这一目标,术前首先需要获取骨折部位影像,通过 CT

或者多平面 X 线三维重建得到骨折端立体构型,初步规划复位路径;术中通过导航与配准获取机械控制装置与骨折块间的相对坐标信息,通过机械控制实现目标矩阵变换,完成骨折复位后采用外固定或经皮微创内固定的方式实现力学稳定。其中可靠的复位控制以及合理的人机交互是骨折复位机器人的关键技术。

**2.1.1 复位控制系统** 准确复位是骨折手术治疗的关键,早期复位系统起源于临床常规外固定技术,按固定方式可分为环形支架以及单边外固定支架。通过在铰链处增设电机,通过每一级电机正向和反向运动组合控制外固定支架构型变化,从而实现牵引及骨折复位。复位控制系统不断发展,功能逐渐丰富,至今已经历了计算机控制的外固定器、传统手术机械臂到智能化复合系统 3 种形态。

基于单边外固定支架术中医生的复位操作逻辑,2004 年 Kim 等<sup>[26]</sup>提出了简单骨折复位的三维模拟方案,探讨了该方法的理论可行性。Koo 等<sup>[27]</sup>基于此开发出了具有 7 个自由度的单边 Dynafix<sup>®</sup>骨折复位机器人,医生可手动遥控进行精确复位,模型骨测试显示其对长干骨复位精度可达成角 $<2^\circ$ 、侧方移位 $<1\text{ mm}$ 。此单边外固定支架继续衍生出了术中导航以及自动复位控制系统,实验研究也达到了良好的复位精度。基于相似思路,Viceconti 等<sup>[28]</sup>基于 Ilizarov 外固定支架原理,开发出用于模拟骨折复位的软件 SERF (simulation environment of a robotic fixator),通过相应的图形显示界面,能够从立体空间多角度、可视化整个还原轨迹,并允许医生之间对计划进行交流。随后的研究中,他们将电机增设于环形支架间的连杆上,在获取相应的影像定位后,该装置便可自动完成医生的预设复位轨迹<sup>[29]</sup>。以上技术由骨科常规外固定技术衍生而来,虽能进行骨折端的控制和复位,但无法进行术中精确调整,严格意义上来说只能算作“自动化”的外固定装置。但其在术前规划、复位轨迹规划及图形界面显示等功能构架下,已经有了现代骨折复位机器人的雏形。

随着工业技术的进步,1965 年飞机工程师 Stewart 设计出了具有 6 个自由度的模拟飞行器,后由 Gough 和 White 共同研发出著名的全动性驱动系统——Stewart-Gough 平台,其具有灵活度高、稳定性好等特点,是后续并联式手术机器人发展的重要基础。Seide 等<sup>[30-31]</sup>基于 Stewart-Gough 平台架构,在并联的 6 根线性可伸缩连杆上添加了马达及控制部件,实现所有 6 个空间自由度的运动控制,

建立了 Precision Hexapod<sup>®</sup>骨折复位机器人。该机器人可以通过正、反向控制每根连杆的长度,实现初始姿势和目标姿势的调整,从而使医生只需点击鼠标就能完成各自由度的灵活调整;对 16 例胫骨骨折的临床治疗结果显示其具有良好复位效果,正侧位成角畸形 $<1^\circ$ ,侧方移位可控制在 3.5 mm 以内。后续研究进一步丰富了该系统的功能,如骨折复位时可实时测得力学参数<sup>[32]</sup>,并具有更强的系统鲁棒性<sup>[33]</sup>。2012 年中国人民解放军总医院唐佩福团队报道了基于 Stewart-Gough 平台的新型骨折复位机器人系统<sup>[34]</sup>,该系统通过术前高精度 CT 三维重建,分析长干骨骨折后的空间构型,将健侧作为镜像参考进行复位轨迹规划,并引入了一种特殊的间接定位结构以提高复位精度。以上基于 Stewart-Gough 平台发展出来的骨科手术复位机器人都属于并联式手术机器人,具有定位精度高、复位扭矩大、稳定性好等优点;但同时也存在功能单一、运动范围受限等局限性,需要进行新的结构设计和临床布局。

随着串联式工业机器人技术的发展,陆续有基于串联式机械臂开发的骨折复位机器人,如基于 Stäubli 平台的单纯复位机械臂<sup>[35]</sup>以及复合术中透视及导航功能的骨折复位机器人<sup>[36]</sup>。这种串联式复位机器人具有运动空间大、灵活性好的优点;然而其操作空间大,末端承载力及精度相对较差,近年来少有深入研究。目前趋向于将并联和串联混合应用,发挥各自优势,并同时向轻便化、智能化、精细化发展。香港大学陈永华团队在 2009 年研发了第一台 6 自由度串并联混合式骨折复位机器人<sup>[37]</sup>,它通过成对的笛卡尔坐标机器人的线性联动获得末端效应器运动,可以完成简单骨折复位,与 Stewart-Gough 平台相比,该机器人的工作空间范围更大,复位运动解决方案更简单。Dagnino 等<sup>[38]</sup>在串联机械臂 UR (Universal Robots 公司,丹麦)末端安装 Stewart-Gough 平台,开发了一种用于关节骨折的复位机器人,其可以发挥串联式机械臂活动空间大与并联式机器人控制稳定的特点,实现骨折精确复位,减少对软组织、神经血管等的损伤。2014 年,唐佩福团队开发了一种可拆卸的混合机器人系统,将可拆卸的串并联机构与电机双缸驱动模式相结合,便于术中调整,动物实验结果显示其具有较高的复位精度<sup>[39]</sup>。除了复合平台自身特点,通过增设不同传感装置也可以使机械臂更加智能和精准,例如带有力学传感器的 FRAC-Robo 系统<sup>[40]</sup>以及带有复位扭

力保护装置、可控制复位操作速度和力的复位机器人<sup>[41-42]</sup>。

除上述 4 种类型外,还有一些其他类型复位机器人,例如基于牵引床改造的辅助牵引机器人<sup>[43]</sup>,基于软囊的套筒式骨折段复位器<sup>[44]</sup>,以及基于对侧镜像的“降落伞”原理的骨折复位机器人<sup>[45]</sup>等。骨折复位机器人机械控制部分也由原来的单纯动力控制,朝向临床实际的安全、微创、便捷需求发展。

**2.1.2 人机交互** 骨科机器人在关节置换与脊柱手术领域应用已相对成熟,此类手术操作对象较为稳定,并且术前有充分时间调整,机器人的介入更多地是发挥精准作用。但在骨折复位手术中,机器人操作对象为不稳定的骨折块,骨折块在复位过程中空间位置多变,需要多次调整才能完成复位。因此,良好的人机交互设计是骨折复位机器人的关键。

早期骨折复位机器人采用经典图形用户界面(GUI)实现人机模拟交互系统,术前设置复位轨迹,术中通过自动控制复位骨折,但该自动复位系统并不能很好地应对实际手术中的复杂情况,安全性亦难以保证。为了提高医生的操作速度及精度,Bouazza-Marouf 等<sup>[46]</sup>首次使用操纵杆帮助医生控制机械臂进行骨折手术的定位和钻孔操作,但其属于二维控制方法,只能在单图像平面移动物体。Westphal 等<sup>[36]</sup>则采用力反馈操纵杆控制骨折块平移和旋转运动。随着数字虚拟技术的发展,体感交互<sup>[47]</sup>、增强现实、远程控制技术<sup>[48]</sup>等也陆续加入骨折复位机器人的人机交互中<sup>[49]</sup>。通过超现实的视觉呈现,到真实的触觉感受及力学反馈,这些技术的加入让使用机器人进行骨折复位的学习曲线更短,有望赋能医生更加安全精准地进行手术。

## 2.2 骨科机器人辅助下微创骨折内固定的临床应用

与其他亚专业相比,骨科机器人辅助手术在骨科创伤领域的临床应用相对较少,仅有少数研发产品进入临床试验,其安全性、有效性尚未得到深入验证。但随着我国对手术机器人行业的高度重视,相关技术从研发到临床转化的效率及广度都得到飞速发展。2017 年,国家骨科手术机器人应用中心的建立以及同期我国自主研发的天玑骨科机器人系统注册并上市,可应用于骨盆、髌臼、四肢等部位的创伤手术、全节段脊柱外科手术,开启了机器人辅助微创手术在创伤骨科临床应用的新篇章。

**2.2.1 骨盆骨折的微创治疗** 骨盆骨折是最严重的骨科创伤之一,常规开放手术创伤大,术中风险高。微创经皮内固定是目前主要治疗方法之一,但

对术者技术要求高,术中需反复透视定位,操作繁杂,医生及患者接受辐射剂量大。2016 年北京积水潭医院率先采用自主研发的天玑骨科机器人系统,开展了机器人辅助经皮微创骨盆内固定术<sup>[50]</sup>。一项纳入 30 例患者的前瞻性随机对照研究显示,机器人辅助手术组与传统徒手操作组相比,髋髌关节螺钉植钉精度更高,并可大幅度降低术中 X 线辐射暴露;另外,机器人辅助手术组可一次性精准置入空心螺钉导针,与传统手术组平均置入 7 次相比具有明显优势。该研究首次系统性地将骨科机器人应用于创伤骨科临床实践,并验证了其可行性及安全性。济南市第三人民医院刘华水等报道了该系统应用于骨盆后环及前环骨折的微创治疗,结果显示机器人辅助可显著减少术中出血,术后随访 3~6 个月大部分患者获得良好愈合;文中也报道了可能发生的并发症,如螺钉穿出损伤血管(1 例)、固定失效(2 例)等<sup>[51-52]</sup>。成都大学附属医院龙涛等进行了骨盆后环髋髌关节螺钉固定的徒手和机器人辅助对比研究,结果显示机器人辅助组在术中透视次数及总时长、手术时间、切口大小、麻醉时间方面均优于传统手术组,术后随访 8~32 个月显示骨折愈合时间、骨折复位及功能指标两组间差异无统计学意义<sup>[53]</sup>。

采用天玑骨科机器人辅助手术,常规是术中以 C 臂 X 线机定位并进行轨迹规划,对于复杂骨折仍需要多次定位。本期“机器人辅助技术在创伤骨科的应用”专栏中,上海市第十人民医院郑龙坡团队采用 O 臂导航系统联合天玑骨科机器人进行经皮微创治疗骨盆后环损伤,具有直观、快捷等优势。广西医科大学第四附属医院胡居正团队将该系统应用至骨盆后环损伤合并髌骨变异经皮内固定治疗中,取得了满意临床疗效。

**2.2.2 股骨近端骨折** 既往有学者研究股骨髓内钉辅助植钉系统,可更精准地定位进针点<sup>[54]</sup>及更快捷地完成远端锁定<sup>[55]</sup>,但仍停留在实验研究阶段。成都大学附属医院李开南团队采用骨科机器人辅助髓内钉手术治疗股骨转子间骨折,与传统手工植钉相比,机器人辅助手术组在手术时间、术中出血量、透视次数等方面均优于对照组,单次导针置入成功率达 100%,与传统平均 2.5 次相比具有明显优势,可有效减少术中组织损伤,降低手术风险<sup>[56]</sup>。北京积水潭医院王军强团队<sup>[57]</sup>、济南市第三人民医院段升军团队<sup>[58]</sup>以及本期专栏报道的烟台市烟台山医院荆玉龙团队将该系统应用于股骨颈骨折微创治疗中,取得了满意临床疗效,与传统手术组相

比,可缩短手术时间,提高空心螺钉植钉精度,空心螺钉的平行度及分散度更佳。

**2.2.3 腕舟骨及后足骨折的微创治疗** 对于稳定无明显移位或是经复位后可维持的四肢骨折,骨科机器人也可发挥较好的辅助作用。北京积水潭医院手外科团队将最新的术中成像系统——西门子 ISO-C<sup>3D</sup> 移动式三维 C 臂 CT 系统与天玑骨科机器人结合,实现了腕舟骨术中快速三维重建,精度达 1 mm。腕舟骨体积较小,且形态不规则,既往多平面 X 线切面显示不够直观,医生需要具备丰富经验才能准确定位。而术中三维即时重建可帮助医生术中快速、直观地进行手术规划、实施和验证。对 10 例患者的回顾性研究显示,所有患者导针置入均一次性完成,手术时间平均 22 min,患者均得到了良好的骨折愈合及功能恢复<sup>[59]</sup>。本期专栏中,西安交通大学附属红会医院创伤骨科团队的回顾性研究结果显示,天玑骨科机器人联合 O 臂导航系统辅助经皮空心螺钉治疗后足(跟骨或距骨)骨折,具有手术创伤小、精确度高、并发症少等优点,为后足骨折的微创精准治疗提供了新的方法。

另外,本期专栏中报道了上海交通大学附属第六人民医院骨科将计算机辅助技术、手术机器人与智能影像采集分析系统相结合,建立了集快速术前诊断、急诊手术与监护一体化的复合手术室。采用德国 Artis Zeego 影像机器人系统或术中 CT 快速获取骨折空间形态,一次性大范围成像,减少了术中透视次数和总辐射量;不同部位的多枚通道螺钉一次性规划,避免了反复数据传送和多次规划,可明显缩短手术时间。目前已完成骨盆和髌臼、脊柱、四肢创伤手术 300 余例,定位精度为 1.5 ~ 2.0 mm,该技术可在确保手术精度的同时,明显提高复杂创伤尤其是多部位骨折的治疗效率。

### 3 创伤骨科机器人展望

骨科机器人自诞生至今,支撑技术体系取得了快速发展,对于特定疾病治疗初显优势,但从行业发展到临床应用来说尚处于起步阶段。创伤骨科病种涵盖内容广,个体化因素强,病情复杂多变,对骨科机器人辅助技术有更高的要求。需要客观认识当前存在的不足,进一步进行共性技术难点攻关、临床疗效评价及规范化应用研究,才能真正满足临床实际需求。

在技术实现层面,目前机器人辅助复位技术只能处理一些模型化、理想化的情况,用类似“堆积木”的方式进行骨性硬组织的复位轨迹规划及控

制。但临床骨折的实际处理比实验模拟情况复杂且多变,不仅仅是恢复骨组织的连续性和完整性,还需在保护软组织的同时排除其力学干扰并完成复位。术前重要软组织的形态及应力下的变化与骨块复位轨迹的遮挡关系,应成为复位轨迹规划及实现时需要考虑的内容;对于多节段或粉碎性骨折,判断骨折块位置及形态,并对其进行有效控制是手术关键。目前的术中 X 线片、快速 CT 三维重建以及基于骨性特征点、点云或者曲面的配准算法,多为单组织一次性静态刚性配准,一旦空间构型发生变化便可能造成配准及导航失效,尚不能满足骨折手术操作的实际需要;对于骨折的控制及固定是基于导针连接或穿刺技术实现,存在强度不足、软组织干扰、形变造成微偏移等问题。近年来,多模态影像采集及分析手段不断成熟,与计算机仿真技术结合,在重现解剖形态基础上还可模拟不同组织的力学应变特性及功能变化;新型导航技术的同步频率及追踪性能不断提高<sup>[7-8]</sup>,软组织定位能力也得到较大提升。基于深度学习的新型图像分割、配准技术的分析速度,准确度实现了质的飞跃<sup>[60-62]</sup>。以上技术的进步有望为解决临床具体问题提供新的思路。在临床应用层面,现有的创伤骨科机器人主要应用于无移位或有轻度移位骨折的微创植钉领域,适应范围较窄,多以单中心、小样本回顾性研究为主,需要进行大样本、多中心、随机对照的高质量临床研究对其疗效进行深入评价,并借助现有的机器人应用网络,加强医生的培训和交流,以提高机器人手术的规范性及普适性。

随着加速康复外科理念在骨科临床中的深入,创伤骨科机器人的概念已经突破传统手术模式,从急诊救治到诊断治疗、护理及术后康复都是骨科机器人可能拓展的领域。需要加强医工合作研究、医生间的便捷交流、临床数据的汇总与分享,才能不断攻克技术难点,优化临床适应证,规范临床操作,切实地将骨科机器人微创精准的理念和技术服务于患者。

**利益冲突** 在课题研究和文章撰写过程中不存在利益冲突;经费支持没有影响文章观点

**作者贡献声明** 张长青:综述构思及设计;郑国焱:观点形成;朱振中:资料收集及文章撰写

#### 参考文献

- 1 Kwoh YS, Hou J, Jonckheere EA, et al. A robot with improved absolute positioning accuracy for CT guided stereotactic brain surgery. *IEEE Trans Biomed Eng*. 1988, 35(2): 153-160.

- 2 Goldsmith MF. For better hip replacement results, surgeon's best friend may be a robot. *JAMA*, 1992, 267(5): 613-614.
- 3 Nolte LP, Zamorano LJ, Jiang Z, *et al*. Image-guided insertion of transpedicular screws. A laboratory set-up. *Spine (Phila Pa 1976)*, 1995, 20(4): 497-500.
- 4 Domb BG, El Bitar YF, Sadik AY, *et al*. Comparison of robotic-assisted and conventional acetabular cup placement in THA: a matched-pair controlled study. *Clin Orthop Relat Res*, 2014, 472(1): 329-336.
- 5 Redmond JM, Gupta A, Hammarstedt JE, *et al*. Accuracy of component placement in robotic-assisted total hip arthroplasty. *Orthopedics*, 2016, 39(3): 193-199.
- 6 Mezger U, Jendrewski C, Bartels M. Navigation in surgery. *Langenbecks Arch Surg*, 2013, 398(4): 501-514.
- 7 Pflugi S, Liu L, Ecker TM, *et al*. A cost-effective surgical navigation solution for periacetabular osteotomy (PAO) surgery. *Int J Comput Assist Radiol Surg*, 2016, 11(2): 271-280.
- 8 Hofstetter R, Slomczykowski M, Sati M, *et al*. Fluoroscopy as an imaging means for computer-assisted surgical navigation. *Comput Aided Surg*, 1999, 4(2): 65-76.
- 9 Malham GM, Munday NR. Comparison of novel machine vision spinal image guidance system with existing 3D fluoroscopy-based navigation system: a randomized prospective study. *Spine J*, 2022, 22(4): 561-569.
- 10 Bargar WL, Parise CA, Hankins A, *et al*. Fourteen year follow-up of randomized clinical trials of active robotic-assisted total hip arthroplasty. *J Arthroplasty*, 2018, 33(3): 810-814.
- 11 Adams SB, Spritzer CE, Hofstaetter SG, *et al*. Computer-assisted tibia preparation for total ankle arthroplasty: a cadaveric study. *Int J Med Robot*, 2007, 3(4): 336-340.
- 12 Reb CW, Berlet GC. Experience with navigation in total ankle arthroplasty. Is it worth the cost? *Foot Ankle Clin*, 2017, 22(2): 455-463.
- 13 Wiewiorski M, Valderrabano V, Kretschmar M, *et al*. CT-guided robotically-assisted infiltration of foot and ankle joints. *Minim Invasive Ther Allied Technol*, 2009, 18(5): 291-296.
- 14 Bozkurt M, Apaydin N, İşik C, *et al*. Robotic arthroscopic surgery: a new challenge in arthroscopic surgery Part- I : Robotic shoulder arthroscopy; a cadaveric feasibility study. *Int J Med Robot*, 2011, 7(4): 496-500.
- 15 Bargar WL. Robots in orthopaedic surgery: past, present, and future. *Clin Orthop Relat Res*, 2007, 463: 31-36.
- 16 Lang JE, Mannava S, Floyd AJ, *et al*. Robotic systems in orthopaedic surgery. *J Bone Joint Surg (Br)*, 2011, 93(10): 1296-1299.
- 17 Boylan M, Suchman K, Vigdorichik J, *et al*. Technology-assisted hip and knee arthroplasties: An analysis of utilization trends. *J Arthroplasty*, 2018, 33(4): 1019-1023.
- 18 Morelli L, Guadagni S, Di Franco G, *et al*. Da Vinci single site© surgical platform in clinical practice: a systematic review. *Int J Med Robot*, 2016, 12(4): 724-734.
- 19 Chun YS, Kim KI, Cho YJ, *et al*. Causes and patterns of aborting a robot-assisted arthroplasty. *J Arthroplasty*, 2011, 26(4): 621-625.
- 20 Du Z, Wang W, Yan Z, *et al*. Variable admittance control based on fuzzy reinforcement learning for minimally invasive surgery manipulator. *Sensors (Basel)*, 2017, 17(4): 844. doi: 10.3390/s17040844.
- 21 Winemaker MJ. Perfect balance in total knee arthroplasty: the elusive compromise. *J Arthroplasty*, 2002, 17(1): 2-10.
- 22 Kayani B, Konan S, Pietrzak JRT, *et al*. Iatrogenic bone and soft tissue trauma in robotic-arm assisted total knee arthroplasty compared with conventional jig-based total knee arthroplasty: A prospective cohort study and validation of a new classification system. *J Arthroplasty*, 2018, 33(8): 2496-2501.
- 23 Chang JS, Kayani B, Wallace C, *et al*. Functional alignment achieves soft-tissue balance in total knee arthroplasty as measured with quantitative sensor-guided technology. *Bone Joint J*, 2021, 103-B(3): 507-514.
- 24 Tian W, Fan M, Zeng C, *et al*. Telerobotic spinal surgery based on 5G network: The first 12 cases. *Neurospine*, 2020, 17(1): 114-120.
- 25 Westphal R, Winkelbach S, Wahl F, *et al*. Robot-assisted long bone fracture reduction. *Int J Robot Res*, 2009, 28(10): 1259-1278.
- 26 Kim YH, Lee SG. Computer and robotic model of external fixation system for fracture treatment. *Computational Science-Iccs 2004 Proceedings*, 2004, 3039: 1081-1087.
- 27 Koo TK, Chao EY, Mak AF. Development and validation of a new approach for computer-aided long bone fracture reduction using unilateral external fixator. *J Biomech*, 2006, 39(11): 2104-2112.
- 28 Viceconti M, Sudanese A, Toni A, *et al*. A software simulation of tibial fracture reduction with external fixator. *Comput Methods Programs Biomed*, 1993, 40(2): 89-94.
- 29 Viceconti M, Andrisano AO, Toni A, *et al*. Automatic fracture reduction with a computer-controlled external fixator. *Med Eng Phys*, 1994, 16(2): 143-149.
- 30 Seide K, Wolter D. Corrections using the hexapod. *Orthopade*, 2000, 29(1): 39-46.
- 31 Seide K, Wolter D, Kortmann HR. Fracture reduction and deformity correction with the hexapod Ilizarov fixator. *Clin Orthop Relat Res*, 1999, (363): 186-195.
- 32 Seide K, Weinrich N, Wenzl ME, *et al*. Three-dimensional load measurements in an external fixator. *J Biomech*, 2004, 37(9): 1361-1369.
- 33 Faschingbauer M, Heuer HJ, Seide K, *et al*. Accuracy of a hexapod parallel robot kinematics based external fixator. *Int J Med Robot*, 2015, 11(4): 424-435.
- 34 Tang PF, Hu L, Du HL, *et al*. Novel 3D hexapod computer-assisted orthopaedic surgery system for closed diaphyseal fracture reduction. *Int J Med Robot*, 2012, 8(1): 17-24.
- 35 Führtmeier B, Egersdoerfer S, Mai R, *et al*. Reduction of femoral shaft fractures *in vitro* by a new developed reduction robot system 'RepoRobo'. *Injury*, 2004, 35 Suppl 1: S-A113S-119S. doi: 10.1016/j.injury.2004.05.019.
- 36 Westphal R, Winkelbach S, Gösling T, *et al*. A surgical telemanipulator for femur shaft fracture reduction. *Int J Med Robot*, 2006, 2(3): 238-250.
- 37 Ye R, Chen Y, Ieee. Development of a six degree of freedom (DOF) hybrid robot for femur shaft fracture reduction. *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)*, Bangkok, 2009: 306-311.
- 38 Dagnino G, Georgilas I, Tarassoli P, *et al*. Vision-based real-time position control of a semi-automated system for robot-assisted joint fracture surgery. *Int J Comput Assist Radiol Surg*, 2016, 11(3): 437-455.
- 39 Wang T, Li C, Hu L, *et al*. A removable hybrid robot system for long bone fracture reduction. *Biomed Mater Eng*, 2014, 24(1): 501-509.

- 40 Maeda Y, Sugano N, Saito M, *et al.* Robot-assisted femoral fracture reduction: preliminary study in patients and healthy volunteers. *Comput Aided Surg*, 2008, 13(3): 148-156.
- 41 Joung S, Kamon H, Liao H, *et al.* A robot assisted hip fracture reduction with a navigation system. *Med Image Comput Comput Assist Interv*, 2008, 11(Pt 2): 501-508.
- 42 Joung S, Liao H, Kobayashi E, *et al.* Hazard analysis of fracture-reduction robot and its application to safety design of fracture-reduction assisting robotic system. 2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2010: 1554-1561.
- 43 Hung SS, Lee MY. Functional assessment of a surgical robot for reduction of lower limb fractures. *Int J Med Robot*, 2010, 6(4): 413-421.
- 44 Sun XG, Zhu Q, Wang XS, *et al.* A remote control robotic surgical system for femur shaft fracture reduction. 2015 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO), 2015: 1649-1653.
- 45 Du D, Liu Z, Omori S, *et al.* Computer-aided parachute guiding system for closed reduction of diaphyseal fractures. *Int J Med Robot*, 2014, 10(3): 325-331.
- 46 Bouazza-Marouf K, Browbank I, Hewit JR. Robotic-assisted internal fixation of femoral fractures. *Proc Inst Mech Eng H*, 1995, 209(1): 51-58.
- 47 苏永刚, 孙志彬, 朱罡, 等. 基于体感交互的骨折复位机器人控制方法实验研究. *中国生物医学工程学报*, 2016, 35(3): 380-384.
- 48 Li C, Wang T, Hu L, *et al.* A visual servo-based teleoperation robot system for closed diaphyseal fracture reduction. *Proc Inst Mech Eng H*, 2015, 229(9): 629-637.
- 49 Cutolo F, Carli S, Parchi PD, *et al.* AR interaction paradigm for closed reduction of long-bone fractures via external fixation. 22nd ACM Conference on Virtual Reality Software and Technology (VRST) Munich, Germany, 2016: 305-306.
- 50 Wang JQ, Wang Y, Feng Y, *et al.* Percutaneous sacroiliac screw placement: A prospective randomized comparison of robot-assisted navigation procedures with a conventional technique. *Chin Med J (Engl)*, 2017, 130(21): 2527-2534.
- 51 Liu HS, Duan SJ, Liu SD, *et al.* Robot-assisted percutaneous screw placement combined with pelvic internal fixator for minimally invasive treatment of unstable pelvic ring fractures. *Int J Med Robot*, 2018, 14(5): e1927. doi: 10.1002/rcs.1927.
- 52 Liu HS, Duan SJ, Xin FZ, *et al.* Robot-assisted minimally-invasive internal fixation of pelvic ring injuries: A single-center experience. *Orthop Surg*, 2019, 11(1): 42-51.
- 53 Long T, Li KN, Gao JH, *et al.* Comparative study of percutaneous sacroiliac screw with or without tirobot assistance for treating pelvic posterior ring fractures. *Orthop Surg*, 2019, 11(3): 386-396.
- 54 Suero EM, Westphal R, Citak M, *et al.* Robotic technique improves entry point alignment for intramedullary nailing of femur fractures compared to the conventional technique: a cadaveric study. *J Robot Surg*, 2018, 12(2): 311-315.
- 55 Panzica M, Suero EM, Westphal R, *et al.* Robotic distal locking of intramedullary nailing: Technical description and cadaveric testing. *Int J Med Robot*, 2017, 13(4). doi: 10.1002/rcs.1831.
- 56 Lan H, Tan Z, Li KN, *et al.* Intramedullary nail fixation assisted by orthopaedic robot navigation for intertrochanteric fractures in elderly patients. *Orthop Surg*, 2019, 11(2): 255-262.
- 57 He M, Han W, Zhao CP, *et al.* Evaluation of a Bi-planar robot navigation system for insertion of cannulated screws in femoral neck fractures. *Orthop Surg*, 2019, 11(3): 373-379.
- 58 Duan SJ, Liu HS, Wu WC, *et al.* Robot-assisted percutaneous cannulated screw fixation of femoral neck fractures: Preliminary clinical results. *Orthop Surg*, 2019, 11(1): 34-41.
- 59 Liu B, Wu F, Chen S, *et al.* Robot-assisted percutaneous scaphoid fracture fixation: a report of ten patients. *J Hand Surg (Eur Vol)*, 2019, 44(7): 685-691.
- 60 Leow A, Huang SC, Geng A, *et al.* Inverse consistent mapping in 3D deformable image registration: its construction and statistical properties. *Inf Process Med Imaging*, 2005, 19: 493-503.
- 61 Liu R, Li Z, Fan X, *et al.* Learning deformable image registration from optimization: Perspective, modules, bilevel training and beyond. *IEEE Trans Pattern Anal Mach Intell*, 2021. doi: 10.1109/TPAMI.2021.3115825.
- 62 Lei Y, Fu Y, Wang T, *et al.* 4D-CT deformable image registration using multiscale unsupervised deep learning. *Phys Med Biol*, 2020, 65(8): 085003. doi: 10.1088/1361-6560/ab79c4.

收稿日期: 2022-06-29 修回日期: 2022-07-10

本文编辑: 王雁