

机器人辅助技术在骨伤科的应用及展望

麻鹏¹, 魏峥², 崔孔蛟³

(上海交通大学瑞金医院古北分院·民航上海医院 1. 口腔科; 2. 康复科; 3. 骨科 上海 200010)

摘要 机器人辅助技术在外科领域已获得广泛应用, 在骨伤科的应用及发展却较缓慢, 这是由骨创伤的临床特点决定的。本综述主要对骨科手术机器人及康复机器人的研究进展和临床现状进行总结, 提出现今机器人系统在骨伤科的优势和不足, 并对其未来的发展做出展望。

关键词 骨伤科; 康复治疗; 机器人辅助手术

中图分类号 R608 **文献标识码** A **文章编号** 2096-7721 (2024) 05-0757-08

Application and prospect of robot-assisted technology in orthopedics and traumatology

MA Peng¹, WEI Zheng², CUI Kongjiao³

(1.Department of Stomatology; 2.Department of Rehabilitation; 3.Department of Orthopedics, Civil Aviation Shanghai Hospital, Ruijin Hospital, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200010, China)

Abstract Robot-assisted technology has been widely used in surgery, but its application and development in orthopedics and traumatology is slow. This is determined by the clinical features of bone trauma. In this paper, the advantages and disadvantages of current orthopedic robots are put forward by collecting information on the research process and application status of orthopedic surgical robots and rehabilitation robots, and the future development is prospected.

Key words Orthopedics and Traumatology; Rehabilitation; Robot-assisted Surgery

机器人辅助手术在外科领域的应用由来已久。自 1985 年 PUMA 200 作为第 1 个参与临床, 并应用于神经外科活检手术机器人以来, 机器人手术系统经过约 40 年的发展已更新至第 4 代^[1]。现今应用最广泛的手术机器人是达芬奇手术机器人 (如图 1A)^[2], 其已广泛应用于胸外科、神经外科、妇产科及骨科等外科手术^[3]。在各门类手术机器人中, 骨科手术机器人近些年也获得了迅猛的发展, 如美国 Mako 公司生产的 RIO 手术机器人 (如图 1B)、上海微创医疗机器人 (集团)

股份有限公司研发的鸿鹄[®] 骨科手术机器人 (如图 1C)、美国 Mazor Robotics 公司推出的 Mazor X 手术机器人 (如图 1D)、北京天智航医疗科技股份有限公司研发的天玑[®] II 骨科手术机器人 (如图 1E) 等^[4]。然而作为骨科重要分支的骨伤科应用机器人的场景较少, 相关综合报道亦少有见刊。本研究就机器人在骨伤科领域相关手术和康复的研究过程和使用现状进行总结分析, 并对未来发展方向做出展望, 以期对骨伤科及手术机器人专业研究学者能够提供借鉴和帮助。

收稿日期: 2024-01-24 录用日期: 2024-02-01

Received Date: 2024-01-24 Accepted Date: 2024-02-01

基金项目: 上海市社会办医能力提升项目 (长宁区康复网络体系建设)

Foundation Item: Shanghai Social Medical Capacity Improvement Project (Construction of Rehabilitation Network System in Changning District)

通讯作者: 魏峥, Email: 18016071023@163.com

Corresponding Author: WEI Zheng, Email: 18016071023@163.com

引用格式: 麻鹏, 魏峥, 崔孔蛟. 机器人辅助技术在骨伤科的应用及展望 [J]. 机器人外科学杂志 (中英文), 2024, 5 (5): 757-764.

Citation: MA P, WEI Z, CUI K J. Application and prospect of robot-assisted technology in orthopedics and traumatology [J]. Chinese Journal of Robotic Surgery, 2024, 5(5): 757-764.



图 1 国内主要外科及骨科手术机器人
 Figure 1 Major surgical and orthopedic surgical robots in China
 注: A. 达芬奇手术机器人; B. RIO 手术机器人; C. 鸿鹄® 骨科手术机器人; D. Mazor X 手术机器人; E. 天玑® II 骨科手术机器人

1 骨伤科手术机器人研究应用的发展历程

骨科机器人按照应用场景可细分为脊柱手术机器人、关节手术机器人和创伤骨科手术机器人^[5]。1992年第1台关节手术机器人ROBODOC(Curexo Technology, Fremont, 美国)辅助临床医生完成了全髋关节置换术^[6]。2004年以色列Mazor Robotics公司的第1代脊柱手术机器人Spineassist获得FDA认证^[7]。虽然最初骨科手术机器人因不够成熟导致过各种差错和事故^[8],但随着手术机器人技术、信息科学和AI技术的不断发展,脊柱外科领域和关节外科领域的手术机器人已取得长足的进步,临床上也获得了广泛使用。然而手术机器人在骨伤科领域的发展相对较慢,这与其临床特点有很大关系:①骨折的部位和形态各不相同,图像的自动分割识别比较困难;②骨折导致的缺损大小各不相同,成品模拟膺复体的规格也不同,需要大量的数据支持;③骨损伤常伴随肌肉的损伤和变形,难以复位到初始状态,需要更多的人工参与分割设计确定阈值边界;④由于肌肉和骨骼的损伤,很难获得完全稳定的固位。尽管面临诸多困难,多学科学者们从21世纪初已经开始了关于骨伤科手术机器人的实验设计工作。骨伤科手术机器人按用途可分为具有导航定位功能的复位机器人和固定手术机器人。

1.1 骨伤科手术复位机器人

1.1.1 传统手法复位 复位是骨伤科手术的先决步骤,良好的复位是恢复解剖关系和功能的前提,也决定手术的预后。传统骨伤科治疗以人工手法复位为主,又称正骨或整骨。基本手法包括拔伸、旋转、端提、挤按、纵压、折顶、分骨等。传统复位方法通过非侵入性手法分离骨折断端,解除畸形,呈适当角度移动整复,从而恢复其解剖形态。因具有创伤小、疗程短、恢复快、费用低等优点,手法复位在临床上长期占据主导地位。但手法复位也有其明显缺陷:①对施治医师要求较高,普通医生需要较长的学习曲线才能掌握;②非直视操作可能导致二次意外损伤;③很多复位结果为功能性复位而非解剖复位;④对医师身体素质要求较高,一

些复位患者甚至需要多名医师配合完成。

伴随着现代工业技术的发展，为了弥补手法复位的不足，模仿拔伸手法的牵引复位器械应运而生，并逐渐发展成为骨损伤复位机器人。各种损伤的复杂性决定了复位机器人的研制难度。复位机器人按结构分类分为串联复位机器人、并联复位机器人和联合复位机器人。

1.1.2 串联复位机器人 串联复位机器人是由工业机器人改进而来，主要使用工业机械臂、不进行复位操作的单侧固定器或者针对负载类型进行特殊设计的构型进行固位。1985年 PUMA 560 作为首个固位机器人被用来固定患者的头部，辅助医生完成神经外科手术^[9]。尽管 PUMA 系列后来因为安全原因被弃用，但其开拓性意义不容忽视。1995年 Hewit J R 等人^[10]研发了用于髓内钉钻孔和定位的遥控操作的机器人系统，机械臂有 5 自由度。2004年 Füchtmeier B 等人^[11]研制了一套根据 Staubli RX 130 工业机器人改进的复位机器人 RepoRobo，可以 6 自由度的操作对患者的断端进行牵引和复位。Warisawa S 等人^[12]研制了用于股骨骨折的复位机器人 FRAC-Robo。该机器人系统集成了术前 CT 的 3D 重建、术中导航跟踪和机器人辅助骨折复位功能，能够在患肢远端（足部）提供 6 自由度的移动和旋转操作，帮助医生完成股骨的牵引复位。但是该系统仅依靠在患肢远端施加作用力来完成股骨和股骨颈的牵引复位，是一种间接的复位操作，实际临床效果不太理想。2006年 Koo T K K 等人^[13]设计了一种单侧外固定器具有 7 自由度的机器人，但其存在旋转关节精度不准确的问题。在其进一步的研究中对软件进行了升级改进，提高了量化精度，平均平移误差和平均旋转误差为 1.73 mm 和 2.57°。串联形式构建的复位机器人工作空间较大，同时机械臂也较为灵活，然而这会占据较大的空间，同时容易发生危险，造成严重的医源性损伤。针对串联复位机器人的研究主要在机器人辅助治疗的早期，因其结构系统比较简单，辅助复位精度较低，实际应用价值较低，2012 年之后针对串联复位机器人研究几乎停止。

1.1.3 并联复位机器人 并联复位机器人以

Stewart 模型及其分支模型为基础，该模型可实现 2 个平面 6 自由度的精准运动控制。早期的并联复位机器人集中于骨折断端的外固定支架设计，其中最著名的是 Ilizarov 空间支架和 Taylor 空间支架^[14]。后续的衍生外固定器有 TL-HEX、Ortho-SUV 等^[15]。美国罗文大学的 Abedinnasab M 等人^[16]提出了基于 3 支路 6 自由度并联结构的复位机器人，术中采用穿戴方式实施手术。支路数量的减少可减轻复位机器人的重量，也可减少术中 X 线检查的遮挡。该团队后续研究改进了复位机器人支链的布置方式，增大了工作空间，优化了负载能力。复位机器人设计最大扭矩为 145.85 Nm，设计最大负载为 4559 N。该样机已经完成尸体试验，但是并未给出尸体试验的复位精度结果。Graham A E 等人^[17]研制出一款 6 自由度并联复位机器人，但因其与患者骨骼之间无法获得固定连接，所以无法进入临床实践。

几乎在同一时期国内许多团队也开始了并联复位机器人的研究。唐佩福等人^[18]在 3D 建模中增加了定位珠做参考，并以对侧为参考进行复位，在动物股骨干上进行了骨折复位实验，最终复位结果证明可以满足临床应用要求。2002 年哈尔滨工业大学技术团队研制出一种基于 Stewart 平台的正骨机器人，将 3D 建模和医学导航影像学结合在一起，实时指导骨折复位操作，这为骨伤科的手术治疗提供了很大帮助。基于动物模型的后期实验也验证了其实用性^[19]。解放军总医院和北京航空航天大学团队联合研制出了基于 Stewart-Gough 构型的新型骨伤科并联复位机器人^[20]，该方案为混联形式，前端为 Stewart 构型的 6 自由度并联复位机器人实施复位操作，后端布置有调节复位机器人位置的移动控制平台，方便复位机器人进行布置。另外该复位机器人还建立了即时检测反馈机制，保证手术过程的流畅性。后期的动物实验结果显示，该复位机器人可以达到较高的复位精度。积水潭医院团队将牵引床结合到 Stewart 构型中研制出了一种新型骨伤科复位机器人，该复位机器人由 2 个圆环平台和 1 张牵引床组成，其中圆环平台与感受器连接，用映射的方法控制机械臂。并联复位

机器人通过影像学工具进行实时导航,以患者对侧股骨作为手术复位的参考标,通过平台运动来实现断骨的复位。经尸体试验证明效果良好^[21]。2022年 Terence 等人提出了 3-RPSP 构型,该构型为只有 3 条支链的三脚架构型,避免了并联复位机器人各个支链之间的干涉碰撞,拥有了更大的工作空间。

并联复位机器人的运动范围受到结构限制,因此需要详细的结构化设计和临床配置。环形固定器这种外部固定框架的结构模式大大降低了制造成本,而且易于操作。但是临床上骨伤科的复位手术操作非常复杂,单纯连接外固定架就可能造成额外的损伤。后期随着技术的发展,很多应用于临床的并联外固定框架也引入了自动化技术,研发出了很多可穿戴形式的复位机器人,但因其较小的尺寸以及重量限制了可穿戴形式的复位机器人的负载以及相关运动能力,因此相关研究进展相对缓慢。

1.1.4 联合复位机器人 联合复位机器人融合了串联复位机器人和并联复位机器人各自的优势。联合复位机器人的串联部分主要用来提供大范围移动,并联部分作为机械手进行精准复位。联合复位机器人的串联部分承载能力较弱,而并联部分工作空间较小。2009 年香港大学研究团队研制出的联合复位机器人有 6 自由度,主机由牵引端和断端复位端组成,其特点是可允许骨折端一定程度的旋转和移动。牵引端的主要功能是用于对抗骨折复位过程中肌肉的收缩,骨折复位工作由断端复位端完成。其固位方式具有康复机器人的特点,骨折近端固定,远端连接复位机构,牵引机与患者脚部相连接,共同完成牵引骨折复位工作^[22]。2016 年 Dagnino G 等人^[23]研制开发了基于 Stewart 模型的联合复位机器人,并在尸体试验和动物骨折复位实验中取得了良好的效果。该联合复位机器人大大减少了对软组织的损伤,但因其负载过小无法进入临床实践。2021 年北京罗森博特科技公司^[24]生产了第 1 个智能化联合复位机器人,临床实践中盆骨闭合复位率和预后效果皆高于传统的人工手术操作。伴随着骨伤科手术机器人的研究转向更多细

化分型的骨折复位问题,串、并联联合结构因其优越性逐渐成为该领域研究的主流。

1.2 骨伤科手术固定机器人 在患者获得良好复位的前提下,精确的定位和置入固位钉是手术机器人比较擅长的工作,在这方面固位手术机器人和其他骨科手术机器人几乎是可以通用的。2010 年 Oszwald M 等人^[25]报道了机器人辅助股骨髓内钉固位的研究。2018 年北京积水潭医院的研究团队^[26]开发了一套骨科手术机器人系统,该系统主要负责在骨科手术过程中进行椎弓根钉植入通道规划,并由机械臂辅助外科医生进行定位,该系统还集成了光学跟踪系统可以检测机械臂及人体的运动变化,利用双平面定位技术实现螺钉置入的路径规划。现今国内应用最广泛的是由北航团队和北京天智航医疗科技股份有限公司生产研发的天玑[®]骨科手术机器人(TiRobot Recon),该手术机器人是国内第一个通过 CFDA 认证并获得医疗器械产品注册证的骨科手术机器人。该机器人系统能够辅助开展脊柱外科和创伤骨科手术,由光学跟踪系统、操作平台、机械臂 3 部分构成。光学跟踪系统负责实时采集患者手术部位的影像并进行空间位置信息处理,操作平台帮助执行手术的医生利用获得的影像信息规划手术路径,机械臂可按照术前或术中规划的位置进行精确的空间定位,执行手术器械或植入物(如空心螺钉、髓内钉等)置入^[27]。该手术机器人系统已广泛应用于临床,与传统手术相比手术时间、切口及出血量大为减少,但高昂的造价成为其大规模推广的限制因素^[28]。

虽然骨伤科手术机器人的研究近年来已取得较大的成就,并已逐步应用于临床,但仍然有很多因素掣肘其发展:①生物力学数据不够丰富,现代生活的复杂性使传统的解剖学和病理学数据只能满足普通的骨伤科治疗,对于复杂病例和后续的 AI 深度学习是远远不够的;②价格高昂;③机器人辅助复位效果有待改善,骨伤科临床表现具有复杂性,很多完整的复位,尤其对于长骨骨干的复位,机器人辅助效果欠佳;④体积庞大,调试和安装复杂且需要通过一定的学习曲线才能熟练掌握;⑤反馈系统有待改善。

2 骨伤科康复机器人的研究应用

2.1 传统骨伤科康复治疗 传统的骨伤科康复治疗遵循四大原则：筋骨并重、动静相合、内外共治、医患配合。主要治疗方法有沿循经络穴位的手法推拿按摩、药物内服外用及熏洗、针刺治疗等。以松解组织粘连、缓解肌肉痉挛、促进局部血液循环、调节活动能力、减轻疼痛等为主要作用。传统康复治疗具有简单价廉、内外兼治的特点，但也有不足之处：①多以患者被动接受治疗为主，患者对治疗效果没有明确预期；②对治疗医生的要求较高，很多按摩手法难以推广；③治疗方法缺乏统一的标准理论指导；④对于患者的早期康复运动和心理健康指导比较模糊。

术后早期的康复运动是加快患者功能恢复的关键因素。患者对于安全有效康复量的掌握比医生更为明确。让患者主动开始早期功能运动，并对运动有具体的“量化控制”，不但可以促进其恢复，还可以增加其治疗信心和积极性。基于此类考虑，康复运动辅助设备——康复机器人应运而生。

骨伤科康复机器人的研究要早于骨伤科手术机器人，因其结构相对简单，应用更加广泛^[29]。康复机器人的使用范围包括各种康复训练和治疗，如物理治疗、运动训练、语言康复、神经康复等。近年来，康复机器人在骨伤科的应用逐年增加，帮助患者进行神经和肌肉的训练恢复，减少患者的疲劳度，并提高患者康复的效率^[30]。第1台外骨骼康复机器人于20世纪70年代被应用于脑损伤患者，它帮助患者带动踝关节和髌关节的运动^[31]。此后各类康复机器人层出不穷，应用也愈发广泛。康复机器人分为末端牵引式康复机器人、可穿戴式康复机器人和外骨骼式康复机器人。

2.2 末端牵引式康复机器人 末端牵引式康复机器人研发时间比较早，使用也比较简单。将肢体远端固定，便可通过牵引引导肢体进行康复运动。不过因为无法控制肢体的近端关节，在训练过程中可能会部分引起肌肉和关节运动受限甚至损伤，这也进而限制了适用范围。目

前临床应用最广泛的末端牵引上肢康复机器人为 Inmotion 系列（如图 2A），开发者为美国麻省理工学院研究团队。该机器人具有 3 自由度，可以全方位训练上肢，还包括肩、肘和腕关节的康复运动。该系统还带有人机互动反馈功能，计算机屏幕上预先设定好的游戏或奖励程序可以匹配患者运动，提供实时反馈，可以极大地增加患者的运动兴趣^[32]，进而促进上肢运动功能恢复。Amadeo 系列（如图 2B）末端牵引机器人是手功能辅助康复设备的代表，在辅助临床脑卒中患者的手功能康复方面有较好作用^[33]。瑞士 Reha 公司推出的 G-EO 康复机器人系统（如图 2C）是骨伤科下肢康复辅助设备的代表，主要包括 1 个支撑系统和 2 个具有遥感反馈功能的踏板，具备原地走、平地走、后退及上下楼等多种下肢运动训练模式。有研究证明患者在实行 G-EO 系统辅助下肢康复运动训练后，整体运动能力、平衡协调能力、肌肉力量等方面获得了显著的提升^[34]。

2.3 外骨骼式康复机器人 由苏黎世联邦理工大学和 Balgrist 医院基于 ARMin 技术联合开发的上肢外骨骼康复机器人 Armeo Power（如图 2D）是第 1 个商业化的上肢外骨骼康复机器人。具有 7 个驱动轴，可以使上肢做大范围的立体运动，包括肩关节、腕关节各个方向的运动，以及肘部和腕部的旋转。虽然其面对的是早期康复患者，但有研究证明可以显著提高中度至重度卒中患者上肢的运动康复^[35]。

瑞士 Hocoma 公司在拥有 Armeo Power 品牌的同时，也几乎靠 Lokmat（如图 2E）占领了大部分下肢外骨骼康复机器人的市场。和 Armeo Power 出自同一研发团队的 Lokmat 主要包括跑步机、动态支持系统、步态矫形器及光学反馈系统，临床上常用于下肢运动障碍的步行康复训练和骨损伤早期的康复训练。该康复机器人有 2 个动力装置，可带动患者髌关节和膝关节运动完成步态康复训练，两个驱动臂拥有 4 自由度，并通过被动推动器辅助患者额关节、踝关节运动。虽然 Lokmat 可明显提高患者肌功能恢复，但对下肢运动功能的恢复作用尚存争议^[36]。

2.4 可穿戴式康复机器人 Myomo 是美国的一家新兴的可穿戴医疗机器人公司，基于麻省理工学院、哈佛医学院和公司开发的专利技术推出了 Myopro，也是唯一获得美国联邦医疗保险的机器人康复治疗产品。其最新推出的 Motion-G（如图 2F）是一种个性化定制可穿戴外骨骼康复设备，也是现今国际上的主流产品。其拥有的 4 个非侵入性 EMG 信号传感器安装在支架上，可及时捕捉到患者运动过程中肱骨肌群及

前臂屈伸肌群的肌电信号，并自动通过外骨骼驱动设备推动患者肘和手腕运动。有研究表明 Motion-G 可促进患者手的灵活度和功能运动的提升^[37]。

2015 年美国 Esko Bionics 公司推出 GT 康复套装 Esko GT（如图 2G），用以帮助卒中、脊髓损伤等患者重新行走，是第 1 款 FDA 批准的用于中风康复的可穿戴下肢外骨骼设备。虽然有临床试验证明其可很好地增强皮质脊髓兴奋



图 2 骨伤科主要康复机器人

Figure 2 Main rehabilitation robots in orthopedics and traumatology

注: A.Inmotion 机器人; B.Amadeo 机器人; C.G-EO 机器人; D.Armeo Power 机器人; E.Lokmat 机器人; F.Motion-G 机器人; G.Esko GT 机器人

度、促进感觉运动的整合增强并提高大脑神经的连接传导，但因样本量太小，还有待进一步观察^[38]。

2.5 基于传统医学理论的康复机器人研究进展

在现今骨伤科康复临床治疗中，手法推拿按摩与针灸治疗仍占据主要地位。中西医结合康复治疗已被证明效果好于单纯的西医治疗。在国务院办公厅印发的《“十四五”中医药发展规划》中着重提出“鼓励围绕中医养生保健、诊疗与康复，研制便于操作及自我保健、功能康复等器械”作为主要任务。在外科机器人大规模进入市场的今天，限于柔顺控制转换的困难，推拿及针灸机器人仍处于实验研究阶段。2022年奥佳华智能科技立项“基于中医穴位理论的智能推拿机器人”成为行业第1个中医推拿医疗器械科技计划项目^[39]。张竞心等人^[40]研发的数字经络智能针灸机器人首创了自动定穴功能。徐天成等人^[41]研发的智能针灸机器人系统兼有智能穴位配伍功能，突破了针灸机器人的研发难点。尽管各方面的进步很明显，传统医学康复机器人转化的难点仍在于手感的转化，即传感器的快速识别传导和软体机器人技术的应用，这需要材料学、信息技术及智能化技术的融合发展才能跨越。总体而言，传统医学康复机器人潜力更大，研发难度也更大。

3 展望

随着人类文明的不断推进，自然情况的骨损伤已大为减少，但随着工业化生产和交通行业快速发展不可避免地会增加骨损伤的概率。传统的手工整复精度亟待加强，在此背景下骨伤科对于医用辅助机器人的需求也越来越大，现有的骨伤科手术机器人需要进一步升级。骨伤科手术机器人和康复机器人作为序列使用的医疗器械，其使用特点和发展过程截然不同。对骨伤科手术机器人未来有以下几点展望^[42]：

①功能强化，各下级学科的骨科手术机器人有待兼容统一，以提高使用率；②降低成本，许多患者难以承受使用机器人辅助手术的费用；③智能化和全自动化，AI深度学习需要大量

的数据积累和算法升级，是获得突破的方向；④工作端的仿生学改进，骨伤科手术机器人的研究难点在于充分的复位和触觉的精细模拟，需要更多的仿生学研究应用；⑤设备小型化，提高使用便捷性。

对于骨伤科康复机器人，因其独有的个性化配置，其发展方向与手术机器人有所不同^[43]：

①综合化，康复患者需要的康复治疗常常不止一个方面，多功能、多感官、多模式的同时刺激会帮助患者更快地康复，其中对于经络穴位手法按摩的程式化模仿将是极具中国特色的发展路径；②多学科协同，康复机器人更倾向使用仿生学和机械力学的研究成果，这需要多学科研究人员共同研发；③降低成本，新型康复机器人极大地提高了残疾患者的生活质量，但其个性化制作的高昂成本也限制了更广泛地推广和使用；④智能化，除了AI功能的使用，未来脑机链接功能的实现也是外骨骼康复机器人获得突破的可期亮点。

4 总结

骨伤科机器人作为外科机器人下的二级分支，其研究和应用的发展速度相对缓慢。这是由其临床的复杂性所决定的。21世纪初全球迎来了数字化的大发展，算法模型的不断升级进而推动了智能化的快速发展。由人工智能引领的第四次工业革命即将到来，AI合并机器人将是人工智能的未来。未来医疗领域更多的操作将被机器人代替，这需要更多的基础学科建设，也需要交叉学科学者的共同努力。相信智能化的不断升级会使机器人的发展得到快速提升，也会在未来改变医疗行业的服务内容和医生的学习方向。

利益冲突声明：本文不存在任何利益冲突。

作者贡献声明：麻鹏负责设计论文框架，起草论文，拟定写作思路，指导撰写文章并最后定稿；魏峥、崔孔蛟负责数据收集，图片搜集及论文修改。

参考文献

- [1] Leal Ghezzi T, Campos Corleta O. 30 Years of Robotic Surgery[J]. *World J Surg*. 2016, 40(10): 2550-2557.
- [2] 安芳芳, 荆朝侠, 彭燕, 等. 达芬奇机器人的“前世、今生、来世”[J]. *中国医疗设备*, 2020, 35(7): 148-151, 168.

- [3] Peters B S, Armijo P R, Krause C, et al. Review of emerging surgical robotic technology[J]. *Surg Endosc*, 2018, 32(4): 1636–1655.
- [4] 李川, 阮默, 苏踊跃, 等. 手术机器人在骨科领域中的应用及发展[J]. *中华创伤骨科杂志*, 2021, 23(3): 272–276.
- [5] 张新星, 赵英杰, 陈超. 计算机辅助骨科手术机器人技术发展及应用综述[J]. *计算机测量与控制*, 2022, 30(4): 1–7, 13.
- [6] Spencer E H. The ROBODOC clinical trial: a robotic assistant for total hip arthroplasty[J]. *Orthop Nurs*, 1996, 15(1): 9–14.
- [7] Togawa D, Kayanja M M, Reinhardt M K, et al. Bone-mounted miniature robotic guidance for pedicle screw and translamina facet screw placement: part 2—Evaluation of system accuracy[J]. *Neurosurgery*, 2007, 60(2 Suppl 1): 129–139.
- [8] Perets I, Mu B H, Mont M A, et al. Current topics in robotic-assisted total hip arthroplasty: a review[J]. *Hip Int*, 2020, 30(2): 118–124.
- [9] Azarfar A. Self-tuning Fuzzy Task space controller for puma 560 robot[J]. *Journal of Electrical Engineering & Technology*, 2018, 7(4): 579–589.
- [10] Bouazza-Marouf K, Browbank I, Hewit J R. Robotic-assisted internal fixation of femoral fractures[J]. *Proc Inst Mech Eng H*, 1995, 209(1): 51–58.
- [11] Führtmeier B, Egersdoerfer S, Mai R, et al. Reduction of femoral shaft fractures in vitro by a new developed reduction robot system “RepoRobo” [J]. *Injury*, 2004, 35(Suppl 1): 113–119.
- [12] Warisawa S, Ishizuka T, Mitsuishi M, et al. Development of a femur fracture reduction robot[C]. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2004, 4: 3999–4004.
- [13] Koo T K K, Mak A F T. A knowledge-based computer-aided system for closed diaphyseal fracture reduction[J]. *Clin Biomech*, 2007, 22(8): 884–893.
- [14] Seide K, Faschingbauer M, Wenzl M E, et al. A hexapod robot external fixator for computer assisted fracture reduction and deformity correction[J]. *Int J Med Robot*, 2004(1): 64–69.
- [15] Skomoroshko P V, Vilensky V, Hammouda A, et al. Determination of the maximal corrective ability and optimal placement of the ortho-SUV frame for femoral deformity with respect to the soft tissue envelope, a biomechanical modelling study[J]. *Advances in Orthopedics*, 2014. DOI: 10.1155/2014/268567.
- [16] Abedinnasab M, Farahmand F, Gallardo-Alvarado J. The wide-open three-legged parallel robot for long-bone fracture reduction[J]. *Journal of Mechanisms and Robotics*, 2017, 9(1): 15.
- [17] Graham A E, Xie S, Aw K, et al. Design of a parallel long bone fracture reduction robot with planning treatment tool[C]. *2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, October 9–15, 2006, Beijing, China. DOI: 10.1109/IROS.2006.281885.
- [18] DU H L, HU L, LI C S, et al. Advancing computer-assisted orthopaedic surgery using a hexapod device for closed diaphyseal fracture reduction[J]. *Int J Med Robot*, 2015, 11(3): 348–359.
- [19] 朱振中, 郑国焱, 张长青. 机器人辅助技术在创伤骨科的发展与临床应用[J]. *中国修复重建外科杂志*, 2022, 36(8): 915–922.
- [20] TANG P F, HU L, DU H L, et al. Novel 3D hexapod computer-assisted orthopaedic surgery system for closed diaphyseal fracture reduction[J]. *Int J Med Robot*, 2012, 8(1): 17–24.
- [21] LIN H, WANG J Q, HAN W. Parallel manipulator robot assisted femoral fracture reduction on traction table. [J]. *Annu Int Conf IEEE Eng Med Biol Soc*, 2013. DOI: 10.1109/EMBC.2013.6610633.
- [22] YE R H, CHEN Y H. Path planning for robot assisted femur shaft fracture reduction: a preliminary investigation[C]. *Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Virtual Environments, Human-Computer Interfaces and Measurements Systems*, May 11–13, 2009, Hong Kong, China. DOI: 10.1109/VECIMS.2009.5068876.
- [23] 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[J]. *Int J Comput Assist Radiol Surg*, 2016, 11(3): 437–455.
- [24] GE Y F, ZHAO C P, WANG Y, et al. Robot-assisted autonomous reduction of a displaced pelvic fracture: a case report and brief literature review[J]. *J Clin Med*, 2022, 11(6): 1598.
- [25] Oszwald M, Westphal R, Klepzig D, et al. Robotized access to the medullary cavity for intramedullary nailing of the femur[J]. *Technol Health Care*, 2010, 18(3): 173–180.
- [26] 何猛, 张腾, 韩巍, 等. 双平面骨科机器人辅助股骨颈骨折空心钉内固定[J]. *骨科临床与研究杂志*, 2018, 3(4): 195–199.
- [27] 聂涛, 曾昭勋, 黄胜, 等. TiRobot 机器人辅助治疗髋髌关节骨折脱位[J]. *中国矫形外科杂志*, 2020, 28(20): 1897–1900.
- [28] 王永成, 刘士懂, 王超. “天玑”骨科手术机器人应用于骨盆骨折费用研究[J]. *现代医院管理*, 2018, 16(3): 35–37.
- [29] 薛建明. 医疗外骨骼康复机器人的发展[J]. *医学信息*, 2019, 32(9): 11–13.
- [30] Feingold P R, Barzel O, Levy T S. A robot goes to rehab: a novel gamified system for long-term stroke rehabilitation using a socially assistive robot-methodology and usability testing[J]. *J Neuroeng Rehabil*, 2021, 18(1): 122–125.
- [31] Vukobratovic M, Hristic D, Stojiljkovic Z. Development of active anthropomorphic exoskeletons[J]. *Med Biol Eng*, 1974, 12(1): 66–80.
- [32] Veerbeek J M, Langbroek-Amersfoort A C, van Wegen E E, et al. Effects of robot-assisted therapy for the upper limb after stroke[J]. *Neurorehabil Neural Repair*, 2017, 31(2): 107–121.
- [33] Orihuela-Espina F, Roldán G F, Sánchez-Villavicencio I, et al. Robot training for hand motor recovery in subacute stroke patients: a randomized controlled trial[J]. *J Hand Ther*, 2016, 29(1): 51–57.
- [34] Bishop L, Omofuma I, Stein J, et al. Treadmill-based locomotor training with robotic pelvic assist and visual feedback: a feasibility study[J]. *J Neurol Phys Ther*, 2020, 44(3): 205–213.
- [35] Klamroth M V, Blanco J, Campen K, et al. Three-dimensional, task-specific robot therapy of the arm after stroke: a multicentre, parallel-group randomised trial[J]. *Lancet Neurol*, 2014, 13(2): 159–166.
- [36] Hidler J, Nichols D, Pelliccio M, et al. Multicenter randomized clinical trial evaluating the effectiveness of the Lokomat in subacute stroke[J]. *Neurorehabil Neural Repair*, 2009, 23(1): 5–13.
- [37] Peters H T, Page S J, Persch A. Giving them a hand: wearing a myoelectric elbow-wrist-hand orthosis reduces upper extremity impairment in chronic stroke[J]. *Arch Phys Med Rehabil*, 2017, 98(9): 1821–1827.
- [38] Caliendo P, Molteni F, Simbolotti C, et al. Exoskeleton-assisted gait in chronic stroke: an EMG and functional near-infrared spectroscopy study of muscle activation patterns and prefrontal cortex activity[J]. *Clin Neurophysiol*, 2020, 131(8): 1775–1781.
- [39] 张云龙, 马学思, 吴锐, 等. 中医推拿智能化开发技术路线探讨与应用[J]. *中医药通报*, 2023, 22(3): 51–54.
- [40] 张竞心, 孙琦, 林祺, 等. 数字经络智能针灸机器人的研发思路探讨[J]. *中医药导报*, 2018, 24(19): 66–68.
- [41] 徐天成, 王雪军, 卢东东, 等. 智能针灸机器人关键技术及发展趋势[J]. *智能科学与技术学报*, 2019, 1(3): 305–310.
- [42] 李金泉, 王九龙, 罗杨宇. 骨科手术机器人的研究进展及发展展望[J]. *医疗卫生装备*, 2023, 44(6): 101–110.
- [43] 刘志良, 张坤, 魏彦龙, 等. 康复机器人系统的研究现状与展望[J]. *机器人外科学杂志(中英文)*, 2023, 4(6): 497–506.

编辑: 赵敏