

# 机器人辅助技术在全髋关节置换术中的应用现状

张帅<sup>1,2,3</sup> 孔祥朋<sup>2,3</sup> 柴伟<sup>2,3</sup>

**【摘要】** 全髋关节置换术(total hip arthroplasty, THA)是现代外科最成功的手术之一,精准的假体位置是手术成功的关键,机器人辅助THA进入临床已近30年。有研究表明,机器人辅助THA在假体位置、下肢长度控制、并发症以及短期功能预后等方面有一定优势,但因其操作技术复杂、手术时间延长、学习曲线陡峭、费用昂贵等原因,目前仍存在争议。手术机器人可依据准确的数据进行操作、精准实施手术,但是其仍然是“死板”的,应由有一定临床资历的医师去掌握、实施机器人手术,才能着实为病人带来益处,但仍需长期、高质量的随访研究进行验证。目前我国主流仍然使用进口机器人,未来应着手研制国产机器人,而软组织张力评估、柔性控制、微型化、非影像依赖是未来关节机器人的研发重点。

**【关键词】** 机器人;全髋关节置换术;预后

全髋关节置换术(total hip arthroplasty, THA)是保守治疗无效的髋部疼痛或髋部功能障碍的有效治疗方法,被认为是现代医学史上最成功的手术之一。然而,假体位置不佳导致的脱位、磨损仍是手术失败的重要原因<sup>[1]</sup>。近年来,机器人辅助手术的应用为解决以上问题提供了可能。本文旨在通过回顾分析国内外髋关节机器人的发展历程、性能特点与临床结果等相关研究,客观、全面地评价其在髋关节置换中的临床价值及应用前景。

## 一、文献检索策略

本文通过英文检索词“robotics”“total hip arthroplasty”“prognosis”,中文检索词“机器人”“全髋关节置换术”“预后”在PubMed、Web of Science、中国知网、万方数据库等进行检索,共检索到文献237篇。文献纳入标准为:①已正式发表的期刊文献;②文献内容与机器人辅助THA研究密切相关;③同类研究中高证据质量高的文献。排除标准为:①非英文的外文文献以及无法获得全文的文献;②学位论文、述评、讲座、会议文献、回复信件等非论著文献。最终依据纳入及排除标准纳入文献41篇(图1)。

## 二、机器人介绍

按照人机工作模式,外科机器人分为被动式、半主动式、主动式三种。被动式机器人手术是在外科医生的控制下连续进行,没有反馈回路,只能被动执行医生的指令。达芬奇机器人是目前外科领域应用最广泛的被动式机器人系统,它由外科医生控制台、床旁机械臂系统、成像系统组成,其被动

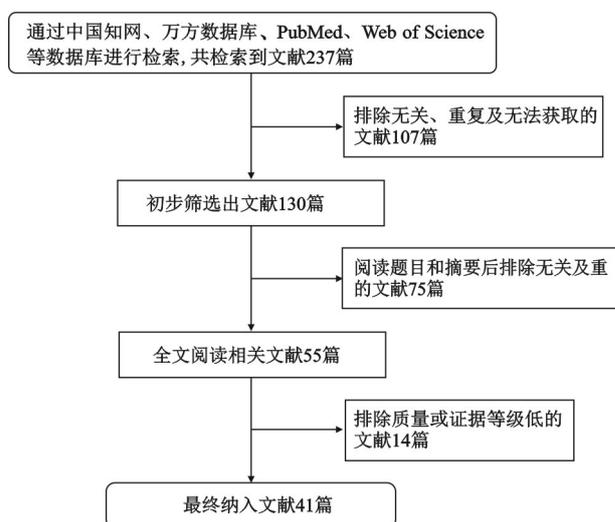


图1 文献纳入流程图

式远程操作机械臂可以辅助医生的眼和手,以更清晰的视野和更高的灵活度进行手术操作。在关节外科领域,各种导航工具可以感知肢体位置及骨性标志,但并非传统意义上的被动式机器人,故本文不作介绍。半主动式机器人需要外科医生参与,并具有触觉反馈回路,即它能够与外科医生实时通信,在手术过程中,如果术者动作偏离手术计划的范围,机械臂则会提供触觉阻力,进一步的偏离将触发声音警报并关闭机械臂,有限的操作空间有助于更精准的实施手术计划,从而增加手术的安全性。主动式机器人髋关节手术系统可根据预定的程序为假体植入做准备,无需术者的干预,自动执行术前规划完成手术操作。

根据平台的兼容性,机器人系统可分为开放平台和封闭平台。开放平台可以与不同厂家的假体和设计兼容,具有普适性。医生能够根据病人的解剖结构来选择合适的假体,然而,由于开放式平台能够整合多种类型的假体,故缺乏设计特异性和生物力学数据来预测最佳假体位置<sup>[2]</sup>。封闭平台

DOI: 10.3969/j.issn.1674-8573.2022.01.021

基金项目:国家自然科学基金(81772320)

作者单位:1. 解放军医学院,北京 100853;2. 中国人民解放军总医院第四医学中心骨科医学部,北京 100048;3. 国家骨科与运动康复临床医学研究中心,北京 100853

通信作者:柴伟, E-mail: chawei301@163.com

张帅、孔祥朋为本文共同第一作者

只能与特定厂家的特定假体相匹配,外科医生无法对假体类型进行选择,需要外科医生决定使用这种机器人系统的风险和收益是否超过与假体选择相关的风险和好处<sup>[3,4]</sup>。

目前国内外主要有 4 种可用于辅助髋关节置换的机器人手术系统,包括 ROBODOC (Think Surgical Inc., Fremont, CA, USA), CASPAR (Universal Robot Systems Ortho, Germany), ACROBOT (The Acrobot Co. Ltd, London, UK) 和 MAKO (Stryker Corporation, Kalamazoo, MI, USA)。这其中,只有 ROBODOC 和 MAKO 机器人还在临床广泛应用<sup>[5]</sup>。

### (一)ROBODOC

1992 年,世界上第一例机器人辅助髋关节置换手术正是由 ROBODOC 机器人完成,是机器人辅助的外科手术中最早实例之一,ROBODOC 公司后期被 Curexo Technology Corporation (现称为 THINK Surgical) 收购。现在,新一代主动式 ROBODOC 系统 T Solution one 已获得美国食品药品监督管理局 (FDA) 的批准,并且也扩展到全膝关节置换术 (total knee arthroplasty, TKA) 中<sup>[6]</sup>。

ROBODOC 机器人属于主动式开放平台系统,其设计初衷是为了在非骨水泥型 THA 中,对股骨假体所匹配的髓腔进行精确化机械磨削,从而实现假体-股骨之间更紧密的压配,促进内生长,延长假体寿命,减少手术翻修率<sup>[7-8]</sup>。其由术前规划计算机工作站 (ORTHODOC)、五轴机械臂和高速铣削设备作为末端执行器组成<sup>[9-10]</sup>,可帮助外科医生在术前设计股骨假体的类型,对股骨髓腔进行机械扩髓以适配选定的非骨水泥假体。该系统在美国和德国进行了许多临床试验,证明它是安全、有效的,可以在影像学上实现更好的假体定位及适配,并可明显减少骨折的发生率<sup>[9,11-12]</sup>。

该公司新一代主动式手术机器人 T Solution one 系统,结合了为 ROBODOC 开发的技术,包含 TPLAN 和 TCAT 两个子系统。TPLAN 主要用于术前规划,TACT 系统由一系列传感器、全自动机械臂及相应的截骨工具共同组成。该系统的优势在于能积极地进行股骨的准备,还可以引导髋臼磨控和机械臂辅助杯植入,并利用病人的 CT 结果另行制作假骨模型,在假骨上进行操作,验证术前规划的可行性。但由于应用时间短、缺乏高质量的研究,该机器人系统的有效性仍有待确定<sup>[5,6,13]</sup>。

### (二)CASPAR

另一个具有主动式开放平台的手术机器人是 CASPAR。该系统由基于 CT 图像的交互式规划工作站和改进型工业机器人 (Staubli RX90 工业机器人) 组成,可应用于 THA、前交叉韧带修复术和 TKA<sup>[14]</sup>。CASPAR 的应用报道主要限于德国。Siebel 等<sup>[15]</sup> 一项研究发现,与对照组的徒手 THA 病人相比,CASPAR 组病人的髋关节 Harris 评分没有显著优势,并且 CASPAR 的平均手术时间更长,失血量更多,虽然这些差异没有统计学意义,但 CASPAR 组的并发症、翻修率和异位骨化率较高。现临床上已不再使用 CASPAR 机器人系统<sup>[16]</sup>。

主动系统的不可靠性是另一个重要问题,多达 18% 的情

况下需要转为人工完成<sup>[12]</sup>。在一些比较研究中,与人工 THA 相比,采用全主动系统的并发症发生率更高,这凸显了使用机器人技术的风险<sup>[15]</sup>。目前来看,虽然主动系统已相对边缘化,但随着科学技术的发展,主动机器人系统可能在未来某个时间节点获得新生。

### (三)MAKO

目前,机器人辅助 THA 领域的主流是基于半主动式封闭平台的 MAKO 机器人手术系统,该系统不但可以在髋臼磨控和臼杯放置方面保持精度优势,还可以计算术中髋关节长度、偏心距和联合前倾角,以及做出相应的假体调整的能力<sup>[17-18]</sup>。2008 年 FDA 批准了 MAKO 用于 TKA,并在 2010 年批准其应用于 THA<sup>[5]</sup>。目前国内应用的 MAKO 机器人系统为 3.0 版本,而国外已上线 4.0 MAKO THA 版本,新增站立位与平卧位的骨盆倾斜角的换算,引入脊柱-骨盆-髋关节联动下的功能安全区概念,在术前计划时即可显示股骨柄前倾角,进行术后动态撞击模拟,并可辅助进行翻修手术。

MAKO 机器人由机械臂、摄像立架以及操作平台三部分组成,病人在术前接受 CT 扫描以生成骨盆和股骨近端的 3D 模型,然后医生对截骨量、假体型号及类型进行术前规划,并在虚拟条件下将假体模板放置在最佳位置。手术中使用一系列术中注册点注册髋臼。建立一个实时模型,指导髋臼磨控,并引导髋臼杯的植入<sup>[17]</sup>。

根据是否辅助股骨侧假体植入,MAKO 机器人可分为 Enhance 模式和 Express 模式。Enhance 模式可进行髋臼侧与股骨侧手术,但需要额外的步骤,通过一系列注册点进行股骨的注册。医生可以通过该模式引导股骨颈截骨、扩髓、调整股骨前倾角、纠正下肢长度差异、恢复联合偏心距等。当然,采用 Express 模式术中同样可以测量下肢长度及偏心距,只是不能指导股骨颈截骨并获悉实际的股骨柄前倾角。另外,Enhance 模式不适用于直接前入路。由此可见,半主动式 MAKO 机器人系统是人机协作,而不是自动执行手术计划<sup>[19]</sup>。这也是半主动式机器人相比其他模式机器人更具有安全性以及优势的一点。

### 三、机器人辅助 THA 的临床应用

#### (一)假体位置

根据 Gwam 等<sup>[1]</sup> 的研究,最常见的 THA 并发症包括机械松动和假体脱位,占 THA 翻修的 1/3 以上,精确的髋臼杯、股骨柄放置是 THA 后减少假体松动、脱位以及取得良好预后的关键,随着机器人技术的进步和相关的研究进展,有越来越多的证据显示机器人辅助手术可以提高 THA 假体位置的精度。

由 Bargar 等<sup>[20]</sup> 发表的随机临床试验 14 年的随访结果显示使用 ROBODOC 主动机器人系统可以改善股骨柄的充填及力线,在平均 14 年的随访中,机器人组的假体柄没有发生松动,在临床结果上有微小但潜在重要的改善。此外,一项使用非骨水泥股骨柄的前瞻性随机对照试验<sup>[21]</sup> 得出的结论是,与徒手 THA 相比,使用 ROBODOC 系统辅助的 THA 可以改善股骨柄的位置和下肢长度的准确性,同时还降低了术中

髌骨骨折的风险。Nishihara 等<sup>[22]</sup>评估了手术后的 X 线片和 CT, 认为相比于人工植入技术, 使用 ROBODOC 可以实现出色的假体匹配。Kamara 等<sup>[18]</sup>进行了一项回顾性队列研究, 比较了 3 组病人: 100 例病人接受了透视辅助的前路 THA, 100 例 MAKO 机器人辅助 THA 以及对对照组中的 100 例徒手 THA。结果表明, 徒手 THA 中 76% 的假体位置在目标区域中, 透视辅助前入路中达到了 84%, 机器人辅助 THA 中达到了 97%, 得出的结论是 MAKO 机器人技术显著提高了髌臼假体位置和角度的精准度。Domb 等<sup>[23]</sup>进行了一项 100 例的匹配配对对照研究设计, 发现由 MAKO 机器人植入的髌臼杯更有可能落在 Lewinnek 和 Callanan 安全区内, 分别为 100% 和 92%。Illgen 等<sup>[24]</sup>进行的一项研究随访两年, 结果显示与徒手 THA 相比, 机器人辅助 THA 提高了髌臼假体位置及角度的准确性, 并且减少了脱位率。但还需要长期多中心对照研究来验证假体位置的准确性。Kong 等<sup>[25]</sup>的一项研究认为 MAKO 机器人辅助 THA 手术假体位置明显优于传统手术。

尽管这些证据表明机器人在假体定位方面具有更高的准确性和更少的异常值, 但目前尚不清楚这些影像学上的好处是否转化为临床结果的改善, 需要更长的随访时间来确定机器人的远期临床结果, 重点关注病人报告结果和其他功能评估。

#### (二) 下肢长度及偏心距

下肢不等长是关节外科医生被诉讼的首要原因。临床研究表明机器人在平衡下肢腿长方面具有一定优势。Honl 等<sup>[12]</sup>对 ROBODOC 进行的一项前瞻性研究发现, 与人工植入相比, 机器人辅助的腿长差异显著降低。Domb 等<sup>[23]</sup>进行的一项研究指出, 机器人辅助 THA 可以准确平衡下肢腿长差异。Hsieh 等<sup>[26]</sup>的一项关于机器人辅助 THA 后股骨前倾、股骨偏心距和垂直偏心距的研究中, 结果显示至少 95% 的病人股骨前倾处于临床理想目标内, 至少 99% 的病人股骨偏心距处于临床理想目标内, 以 7 mm 为目标, 至少 95% 的病人髌关节垂直偏心距在目标范围内, 机器人辅助 THA 可能会改善临床结果。Cozzi 等<sup>[27]</sup>的一项前瞻性研究表明, 使用机器人辅助技术和简化的快速股骨工作流程获得的术中值对于测量 THA 中的下肢腿长和垂直偏心距是精准的。Emara 等<sup>[28]</sup>对 20 篇报道 4 140 例病人机器人辅助 THA 的文章进行系统回顾发现, 机器人辅助 THA 在 Lewinnek 和 Callanan 安全区域显示了更高的杯位率, 改善了股骨柄对齐, 降低了整体偏心距和肢体长度差异。

综上, 机器人辅助 THA 在平衡下肢腿长和恢复偏心距时是准确的, 但是机器人系统测量腿长时只是参考髌关节局部解剖关系, 并未评估脊柱柔韧性、骨盆倾斜及胫骨绝对长度对下肢长度的影响, 未来机器人的研究应当注意本局限性, 若不从全局考量双下肢长度, 双下肢不等长依然是关节外科医生面临的难题。

#### (三) 学习曲线与手术时间

当新技术开始应用到临床中, 由于学习曲线的原因, 手术时间自然是增加的。Nakamura 等<sup>[29]</sup>计算了连续 RO-

BODOC 手术时间的皮尔逊乘积矩相关系数, 发现从最初的 140 min 开始, 每个病例的时间减少了 17 s ( $r^2=0.054$ ), 表明学习曲线显著参与。Bargar 等<sup>[9]</sup>的临床试验发现, ROBODOC 组 THA 的平均手术时间为 258 min, 而对照组为 134 min, 而且 ROBODOC 组失血量更大。在 Honl 等<sup>[12]</sup>的研究中, ROBODOC 组的平均手术时间为 107 min, 而对照组仅为 82 min。Domb 等<sup>[23]</sup>发现 MAKO 组的平均手术时间为 110 min, 而对照组为 102 min。Redmond 等<sup>[30]</sup>分析了由单名外科医生进行的 105 个 MAKO 机器人辅助 THA 的手术时间, 发现随着经验的积累, 不适当的髌臼杯植入和手术时间都会减少。Kong 等<sup>[31]</sup>进行的一项回顾性队列研究比较了在人工 THA 和 MAKO 机器人辅助 THA 后的学习曲线, 机器人辅助 THA 手术时间为  $(95.92 \pm 15.64)$  min, 机器人辅助的 THA 与 14 例病人手术时间的学习曲线相关。在 1~14 例和 15~100 例两个阶段之间, 髌臼定位和白杯植入的持续时间存在显著差异, 表明在这个外科医生的系列中, 需要 14 个病例的学习曲线才能熟练掌握机器人辅助 THA, 在熟练阶段, 机器人在白杯定位方面比徒手有优势。

手术时间的延长与机器人辅助 THA 陡峭的学习曲线相关, 手术时间的延长会导致假体周围感染、失血量及麻醉等风险增加, 但随着外科医生对机器人系统熟练程度的提高, 这些问题都将解决。

#### (四) 预后

由于机器人辅助 THA 近年来才兴起, 中长期随访研究相对较少。Bargar 等<sup>[20]</sup>发表了一项平均随访 14 年的队列研究。他们发现, 尽管 Western Ontario 和 McMaster University 指数低, 但使用 ROBODOC 辅助进行 THA 的病患者的髌关节 Harris 评分和健康状况问卷得分明显高于徒手 THA。Hananouchi 等<sup>[32]</sup>进行了双能 X 线骨密度吸收仪研究, 将 ROBODOC 与徒手 THA 进行了比较, 结果表明, 机器人扩髓可有效促进近端负荷转移, 并最大程度地减少非骨水泥假体的骨质流失。Perets 等<sup>[33]</sup>发表了 162 例 MAKO 辅助 THA 的短期随访研究, 他们报告的髌关节 Harris 评分平均为 91.1, 关节遗忘评分平均为 83.1, 术中并发症发生率为 3.7%, 术后并发症发生率为 3.7%, 结论是短期预后良好且没有并发症发生率增加。THA 围术期主要并发症包括深静脉血栓形成、肺栓塞、呼吸并发症、急性肾功能衰竭、脑卒中、心肌梗死、术中出血、肺炎、败血症、休克、切口并发症、假体并发症(脱位、松动); 轻微并发症包括输血、浅静脉血栓性静脉炎、尿路感染、周围神经损伤和手术浅表部位感染等。Kirchner 等<sup>[34]</sup>通过多因素 Logistic 回归分析得出机器人手术病人与徒手手术病人的围术期并发症风险相似。

机器人辅助 THA 的短期预后显示出令人鼓舞的结果, 并且未显示出并发症增加, 但是作为一项新技术, 仍需长期、高质量的随访研究及相关技术的验证。

#### 四、国内机器人辅助 THA 的研究进展

现阶段, 国内尚无通过中国国家食品药品监督管理总局认证的国产髌关节置换手术机器人<sup>[35]</sup>。国内关节外科应用

最多的机器人是 MAKO 机器人,中国人民解放军总医院、上海交通大学附属第六人民医院、北京积水潭医院等多家医院均引入了该机器人,并开展了全髌、全膝、单髌关节置换手术。据报道,2016 年中国人民解放军总医院、北京协和医院、河南省人民医院在国内率先引入 T-solution one 主动式机器人,但并未检索到该机器人在中国的大宗应用报道<sup>[13]</sup>。国产骨科手术机器人的研发始于 20 世纪 90 年代中期,而 THA 骨科机器人的研究尚处于探索、试验阶段<sup>[36]</sup>。

### 五、机器人辅助手术的不足及展望

在正常人体活动中,脊柱及骨盆矢状位角度是随着身体姿势的变化而变化的,而髌臼位置的变化与脊柱骨盆的位移直接相关。脊柱-骨盆-髌关节的联动机制受站立位以及坐立位姿势的调节,站立位时,病人骨盆前倾,腰椎前凸,髌臼近乎完全覆盖股骨头,由站立位到坐位的变化过程中,骨盆变为后倾,脊柱相对变直,这种情况下出现髌臼前倾加大,以往的安全区概念可能不再安全。当前机器人系统辅助手术使用的是单纯冠状面安全区定义,并不能进行矢状位平衡,所以功能安全区的概念也是将来的发展趋势之一。

对于复杂病例,特别是髌关节周围有较多骨赘时,进行术前计划时需要耗费人工对 CT 图像进行阅片及处理并进行三维重建,在手术时,可能会出现数据转换和机械等误差使操作出现相对误差。其解决有赖于精细化编程、影像设备研发的推进,也有赖于将来机器人系统与人工智能相结合,自动生成三维重建图像、减少术前计划时所消耗的人力、物力,做到真正的精准化、个体化、智能化。

在医疗费用方面,应用机器人完成手术的成本包括机器人系统、操作成本、一次性用品、术前成像和假体等,这势必导致费用增加。在美国,ROBODOC 系统的价格在 63.5 万美元左右,MAKO 机器人价格在 79.3 万美元,大多数机器人系统的年维护费在 4 万到 15 万美元之间<sup>[37]</sup>。如果不考虑机器人技术的额外费用,假体的成本约占手术成本的 15% 至 87%,开放平台和封闭平台之间也可能存在差异,封闭平台由于缺乏竞争可能会提高定价<sup>[38]</sup>。这些高昂的费用将是限制其广泛使用的重要因素,然而,机器人手术的支持者认为,尽管初始安装成本相对较高,但如果能减少翻修率的预测是正确的,那么可能会为医疗经济节约总体成本<sup>[39]</sup>。目前封闭平台机器人较为流行,这其中有厂家推动的原因,开放平台可能因其多样化的假体选择在将来重获新生。用计算机精准度逐步替代外科医生的肌肉记忆或感觉,有可能将人为因素的影响降到最低,例如假体位置不良或过量截骨,并且可能对病人的预后带来长远的好处。然而在评估机器人辅助 THA 的有效性时,必须权衡医保支出,手术时间以及远期临床结果<sup>[40]</sup>。

目前机器人设备复杂,体积及质量较大,对手术室要求高;机械臂使用笨重、柔韧性反馈系统的确容易造成医源性损伤;应用范围局限,在手术过程中某一阶段使用,并且都是针对骨组织,术中需要对术野进行更好的软组织暴露;术前 CT 扫描,会增加病人额外辐射,故软组织张力评估、柔性

控制、微型化、非影像依赖是未来关节机器人的研发重点。

### 六、讨论

成功的 THA 大致可分为 3 个因素,包括病人因素、外科医生因素和假体因素<sup>[41]</sup>。

目前来看,随着假体材料的不断优化,影响预后的最大因素是人为因素,其中包括人为错误。每一个病人的解剖以及病理方面都不同,个性化、精准手术似乎只能通过机器人来实现。正如 Redmond 等<sup>[30]</sup>在研究中指出,尽管外科医生可以依靠计算机生成有关髌关节测量的信息,但医生仍应密切注意解剖标志,以确保机器人系统提供准确的信息。

手术机器人可依据准确的数据进行操作、精准实施手术。但是,目前的机器人依然是“死板”的,它本身不会人脑的思考,对于突发的特殊情况无法进行处理,所以,人为因素中医师的思维、认知、判断、经验也尤为重要,尤其是较为复杂的病例。此外,应由有一定临床资历的医师去掌握、实施机器人手术,做到真正的“人机合一”,利用机器人的优势,发挥临床医师的经验,切实为病人带来益处。

总之,在一项新技术应用于临床时,一方面,我们应该尊重新事物的发生发展规律、勇于接受、宽容对待、积极探索;另一方面,我们更要严格限制新技术应用门槛、仔细客观理性评估该技术是否有利于病人治疗及预后,避免盲目跟风。

### 参 考 文 献

- [1] Gwam CU, Mistry JB, Mohamed NS, et al. Current epidemiology of revision total hip arthroplasty in the United States: national inpatient sample 2009 to 2013 [J]. *J Arthroplasty*, 2017, 32(7): 2088-2092.
- [2] Banerjee S, Cherian JJ, Elmallah RK, et al. Robot-assisted total hip arthroplasty [J]. *Expert Rev Med Devices*, 2016, 13(1): 47-56.
- [3] Sousa PL, Sculco PK, Mayman DJ, et al. Robots in the operating room during hip and knee arthroplasty [J]. *Curr Rev Musculoskel-et Med*, 2020, 13(3): 309-317.
- [4] Lang JE, Mannava S, Floyd AJ, et al. Robotic systems in orthopaedic surgery [J]. *J Bone Joint Surg Br*, 2011, 93(10): 1296-1299.
- [5] Subramanian P, Wainwright TW, Bahadori S, et al. A review of the evolution of robotic-assisted total hip arthroplasty [J]. *Hip Int*, 2019, 29(3): 232-238.
- [6] Wasterlain AS, Buza JA 3rd, Thakkar SC, et al. Navigation and robotics in total hip arthroplasty [J]. *JBJS Rev*, 2017, 5(3): e2.
- [7] Pransky J. ROBODOC-surgical robot success story [J]. *Industrial Robot*, 1997, 24(3): 231-233.
- [8] Paul HA, Bargar WL, Mittlestadt B, et al. Development of a surgical robot for cementless total hip arthroplasty [J]. *Clin Orthop Relat Res*, 1992(285): 57-66.
- [9] Bargar WL, Bauer A, Börner M. Primary and revision total hip replacement using the Robodoc system [J]. *Clin Orthop Relat Res*, 1998(354): 82-91.
- [10] Sugano N. Computer-assisted orthopaedic surgery and robotic surgery in total hip arthroplasty [J]. *Clin Orthop Surg*, 2013, 5(1): 1-9.
- [11] Spencer EH. The ROBODOC clinical trial: a robotic assistant for total hip arthroplasty [J]. 1996, 15(1): 9-14.
- [12] Honl M, Dierk O, Gauck C, et al. Comparison of robotic-assisted and manual implantation of a primary total hip replacement. A pro-

- spective study[J]. *J Bone Joint Surg Am*, 2003, 85(8): 1470-1478.
- [13] 侯毅, 刘珂, 高宗炎. 主动机器人系统在人工全髋关节置换术中的应用[J]. *中华关节外科杂志(电子版)*, 2017, 11(06): 641-645.
- [14] Petermann J, Kober R, Heinze R, et al. Computer-assisted planning and robot-assisted surgery in anterior cruciate ligament reconstruction[J]. *Oper Tech Orthop*, 2000, 10(1): 50-55.
- [15] Siebel T, Käfer W. [Clinical outcome following robotic assisted versus conventional total hip arthroplasty: a controlled and prospective study of seventy-one patients][J]. *Z Orthop Ihre Grenzgeb*, 2005, 143(4): 391-398.
- [16] Jacofsky DJ, Allen M. Robotics in arthroplasty: a comprehensive review[J]. *J Arthroplasty*, 2016, 31(10): 2353-2363.
- [17] Tarwala R, Dorr LD. Robotic assisted total hip arthroplasty using the MAKO platform[J]. *Curr Rev Musculoskelet Med*, 2011, 4(3): 151-156.
- [18] Kamara E, Robinson J, Bas MA, et al. Adoption of robotic vs. fluoroscopic guidance in total hip arthroplasty: is acetabular positioning improved in the learning curve?[J]. *J Arthroplasty*, 2017, 32(1): 125-130.
- [19] Perets I, Mu BH, Mont MA, et al. Current topics in robotic-assisted total hip arthroplasty: a review [J]. *Hip Int*, 2020, 30(2): 118-124.
- [20] Bargar WL, Parise CA, Hankins A, et al. Fourteen year follow-up of randomized clinical trials of active robotic-assisted total hip arthroplasty[J]. *J Arthroplasty*, 2018, 33(3): 810-814.
- [21] Lim SJ, Ko KR, Park CW, et al. Robot-assisted primary cementless total hip arthroplasty with a short femoral stem: a prospective randomized short-term outcome study[J]. *Comput Aided Surg*, 2015, 20(1): 41-46.
- [22] Nishihara S, Sugano N, Nishii T, et al. Comparison between hand rasping and robotic milling for stem implantation in cementless total hip arthroplasty[J]. *J Arthroplasty*, 2006, 21(7): 957-966.
- [23] 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[J]. *Clin Orthop Relat Res*, 2014, 472(1): 329-336.
- [24] Illgen RLN, Bukowski BR, Abiola R, et al. Robotic-assisted total hip arthroplasty: outcomes at minimum two-year follow-up [J]. *Surg Technol Int*, 2017, 25(30): 365-372.
- [25] Kong X, Yang M, Li X, et al. Impact of surgeon handedness in manual and robot-assisted total hip arthroplasty [J]. *J Orthop Surg Res*, 2020, 15(1): 159.
- [26] Hsieh CM, Howell SM, Hull ML. Errors in femoral anteversion, femoral offset, and vertical offset following robot-assisted total hip arthroplasty[J]. *Int J Med Robot*, 2020, 16(4): e2104.
- [27] Cozzi Lepri A, Villano M, Innocenti M, et al. Precision and accuracy of robot-assisted technology with simplified express femoral workflow in measuring leg length and offset in total hip arthroplasty [J]. *Int J Med Robot*, 2020, 16(5): 1-6.
- [28] Emara AK, Samuel LT, Acuña AJ, et al. Robotic-Arm assisted versus manual total hip arthroplasty: systematic review and meta-analysis of radiographic accuracy [J]. *Int J Med Robot*, 2021, 17(6): e2332.
- [29] Nakamura N, Sugano N, Nishii T, et al. A comparison between robotic-assisted and manual implantation of cementless total hip arthroplasty [J]. *Clin Orthop Relat Res*, 2010, 468(4): 1072-1081.
- [30] Redmond JM, Gupta A, Hammarstedt JE, et al. The learning curve associated with robotic-assisted total hip arthroplasty [J]. *J Arthroplasty*, 2015, 30(1): 50-54.
- [31] Kong X, Yang M, Jerabek S, et al. A retrospective study comparing a single surgeon's experience on manual versus robot-assisted total hip arthroplasty after the learning curve of the latter procedure - A cohort study[J]. *Int J Surg*, 2020, 77: 174-180.
- [32] Hananouchi T, Sugano N, Nishii T, et al. Effect of robotic milling on periprosthetic bone remodeling[J]. *J Orthop Res*, 2007, 25(8): 1062-1069.
- [33] Perets I, Walsh JP, Close MR, et al. Robot-assisted total hip arthroplasty: clinical outcomes and complication rate [J]. *Int J Med Robot*, 2018, 14(4): e1912.
- [34] Kirchner GJ, Lieber AM, Haislup B, et al. The cost of robot-assisted total hip arthroplasty: comparing safety and hospital charges to conventional total hip arthroplasty [J]. *J Am Acad Orthop Surg*, 2021, 29(14): 609-615.
- [35] 吴国梁, 郑志博, 翁习生. 手术机器人系统在关节置换术中的应用研究进展[J]. *中华骨科杂志*, 2017, 37(23): 1498-1504.
- [36] 韩晓光, 刘亚军, 范明星. 骨科手术机器人技术发展及临床应用[J]. *科技导报*, 2017, 35(10): 19-25.
- [37] Bargar WL. Robots in orthopaedic surgery: past, present, and future[J]. *Clin Orthop Relat Res*, 2007, 463: 31-36.
- [38] Robinson JC, Pozen A, Tseng S, et al. Variability in costs associated with total hip and knee replacement implants[J]. 2012, 94(18): 1693-1698.
- [39] Barrack RL, Krempec JA, Clohisy JC, et al. Accuracy of acetabular component position in hip arthroplasty [J]. *J Bone Joint Surg Am*, 2013, 95(19): 1760-1768.
- [40] Dorr LD, Jones RE, Padgett DE, et al. Robotic guidance in total hip arthroplasty: the shape of things to come [J]. *Orthopedics*, 2011, 34(9): e652-655.
- [41] D'Lima DD, Urquhart AG, Buehler KO, et al. The effect of the orientation of the acetabular and femoral components on the range of motion of the hip at different head-neck ratios[J]. *J Bone Joint Surg Am*, 2000, 82(3): 315-321.

(收稿日期: 2021-04-16)

(本文编辑: 龚哲妮)

## 引用格式

张帅, 孔祥朋, 柴伟. 机器人辅助技术在全髋关节置换术中的应用现状[J]. *骨科*, 2022, 13(1): 92-96. DOI: 10.3969/j.issn.1674-8573.2022.01.021.