

# 机器人辅助下单髁置换术的研究现状

王旭 刘彦群 (通讯作者)

(延边大学附属医院 吉林延边 133000)

**【摘要】**目的:总结手术机器人在单髁置换手术方面的应用及研究进展,包括术前规划、手术流程、术后临床功能结果、学习曲线及未来发展趋势。方法:通过检索万方、知网、Pubmed等国内外数据库,检索词包括"机器人""单髁置换术""robot""unicompartmental knee arthroplasty",可得到200篇文献,通过摘要挑选及全文浏览筛选后最终纳入文章24篇。结果:机器人辅助下单髁置换术相比于传统手术方式,通过术前规划及术中机械臂辅助手术,术后膝关节社会评分(Knee Society Score, KSS)和膝关节社会功能评分(Knee Society Function Score, KSFS)两方面均表现出显着提高;机器人截骨更加精准,可以得到良好的假体位置及术后假体生存率,对于临床医生易于接受,手术时间更短;但目前治疗费用对比传统手术方式更昂贵,未来发展趋向于平民化。结论:机器人辅助下单髁置换术较传统手术技术在临床效果、手术时间等方面有优势,但手术流程复杂、治疗费用较高,未来仍需进一步研究发展。

**【关键词】**机器人, 机器人辅助手术, 单髁置换术

Current status of robot-assisted single condylar replacement

Wang Xu, Liu Yanqun (corresponding author)

(Affiliated Hospital of Yanbian University, Jilin Yanbian 133000)

**[Abstract]** Objective: To summarize the application and research progress of surgical robot in monocondylar replacement surgery, including preoperative planning, surgical process, postoperative clinical functional results, learning curve and future development trend. Methods: By searching databases such as Wanfang, CNKI, Pubmed and China, the search terms included "robot", "monocondylar replacement", "robot" and "unicompartmental knee arthroplasty". 200 articles could be obtained, and 24 articles were included after abstract selection and full text reading. Results: Robot-assisted single condylar replacement, Through preoperative planning and intraoperative robotic arm-assisted surgery, Postoperative knee social score (Knee Society Score, KSS) and knee social function score (Knee Society Function Score, KSFS) both aspects showed significant improvement; Robot osteotomy is more accurate, Good prosthesis position and postoperative prosthesis survival rate can be obtained, For clinicians to easily accept it, The operation time is even shorter; But the current treatment cost is more expensive than traditional surgery, Future developments tend to be civilian. Conclusion: Robotic-assisted single condyle replacement has advantages over traditional surgical techniques in clinical effect and surgical time, but the surgical process is complicated and the treatment cost is high, so further research and development are still needed in the future.

**[Key words]** Robot, robot-assisted surgery, monocondyle replacement

## 一、膝关节单髁置换术中手术机器人的发展背景

膝关节单髁置换术(unicompartmental knee arthroplasty, UKA)是膝关节骨性关节炎的手术治疗方式之一,历经七十余年假体与手术技术的不断创新,不断为大众接受,目前在膝关节置换术中占比约10%[1, 2]。然而,与全膝关节置换术相比,UKA的翻修率更高。假体定位的准确性和重复性对UKA的寿命很重要,因此,提高精确度的技术可能会提高存活率。近年来,机器人辅助下的单髁置换术(Robotic-assisted unicompartmental knee arthroplasty, RA-UKA)为临床医生提供了新的手术方式选择,一篇纳入了15项研究系统评价表明,机器人组患者的关节功能恢复满意,活动范围良好,术后翻修率<2%,且无术后无输血,可见机器人辅助下单髁置换术较传统手术能获得更好的假体位置[3]。

## 二、手术机器人的分类及组成

自Saragaglia[4]于1997年首次将机器人应用于人工膝关节置换术以来,历经二十余年不断发展,目前骨科主流的手术机器人包括Robodoc机器人系统、MAKOplasty机器人系统、Acrobot机器人系统、Spine Assist机器人系统等,而MAKOplasty机器人系统是近年来实施UKA时最受青睐的机器人系统[5, 6]。由于机器人自主性的不同,将其划分成以下三类:

被动机器人、半自动机器人和全自动机器人[7]。被动机器人系统仅为围手术期定位提供参考,但手术必须由医生直接执行,没有真正的机器人辅助,如OMNIBotics系统;半自动机器人系统为术者在机器人术中辅助定位下完成手术,如Mako系统;全自动机器人系统为机器人遵循术前规划的借故参数完成手术,术者只需要在紧急情况下触发关闭按钮即可,如RoboDoc系统。根据功能模块的不同,可分为光学摄像及显示系统、计算机术前规划与导航系统、机器人手术操作平台。

## 三、术前规划

(1)患者在手术前常规行患侧下肢三维CT,扫描髌关节、膝关节、踝关节踝关节(层厚5mm,其中膝关节层厚1mm)。并将得到患侧下肢骨骼3D的数据输入计算机,得到关键信息:膝关节冠状位及矢状位力线、下肢整体力线、解剖畸形、伸膝时的假体对齐、股骨假体内翻/外翻与胫骨植入物内翻的几何对齐、胫骨假体相对于胫骨后壁的定位。结合手术医生的指导,确定术中的截骨厚度、安全范围及最佳假体安放位置,术后的下肢对线及运动力学,得到良好的远期假体生存率[8, 9]。

(2)磨钻系统:磨钻系统由一个转速为75000rpm的钻头组成,由脚踏板控制。术中可用到三种规格的钻头:6mm球形钻头用于快速去除主要骨组织及股骨后髁截骨、2mm钻头用于精细修正边缘骨组织、1.2mm钻头用于股骨假体内柱凹槽的深部研磨。

#### 四、骨准备

骨准备为机器人在单髁置换术中的关键步骤,设置和手术机器人的定位是在患者到达手术室之前进行的。定位基于患肢的膝盖和外科医生的手术习惯(右手还是左手)。光学传感器和光学相机之间的定位在手术前进行。一旦系统定位完毕,机械臂就会制动以防止任何运动。在对患者腿部进行常规定位和无菌铺巾后,对机器人进行注册。外科医生通过规划的3D运动来移动机械臂。这可以校准机械臂的运动并设置截骨中心点。在皮肤切口之前记录解剖表面标志,外科医生通过在关节上施加适当的外翻负荷来牵引患者的腿部进行全方位的运动。将定位销钉固定在胫骨和股骨上,并记录2个骨表面。然后在继续之前验证膝盖解剖结构与数字化CT模型的配准。此时,外科医生可以基于对之前收集的范围内运动的假体重叠的分析来改变假体位置。机器人在安全范围内辅助医生进行胫骨及股骨截骨。它允许控制钻头的深度和宽度,并在铣削骨头的导航监视器上提供图形反馈。建议在股骨之前准备胫骨截骨,以允许股骨假体位置发生任何变化;然而,外科医生可以选择任何切除顺序。用6毫米球形钻头粗修两个腔体(包括股骨柱孔)后,用2毫米球形钻头进行精铣。超出安全范围的截骨机器人会立即终止,并且发出警报,防止不必要的截骨及软组织损伤。

#### 五、临床疗效

##### (1) 术后膝关节功能

与传统单髁置换术比较,机器人辅助下单髁置换术在术后功能恢复方面有明显优势,一项为期3年的短期临床队列研究表明[10],机器人辅助单室膝关节置换术在止痛方面比传统单室膝关节置换术有降低的趋势( $p<0.000$ )。另一项包含了13项关于机器人辅助下单髁置换术的Meta分析(3项队列研究、4项回溯性研究、6项随机对照试验)显示:机器人辅助下单髁置换术与传统单髁置换术在术后膝盖关节活动度方面没有统计学差异。与传统的UKA相比,机器人辅助UKA在膝关节社会评分(Knee Society Score, KSS)和膝关节社会功能评分(Knee Society Function Score, KSFS)两方面均表现出显著提高的分数[11]。

##### (2) 术后假体生存率

在单髁置换术中假体生存率被认为和假体的准确对线密切相关,Stuart W. Bell在一项前瞻性研究中发现:机器人辅助单髁置换术提高了假体定位的准确性,所有假体参数的均方根误差和中值误差均显著降低( $p<0.01$ )。与传统手术方式相比,假体误差在 $2^\circ$ 内的患者比例在机器人辅助下手术组更高。接受机器人辅助单室膝关节成形术的患者在股骨假体矢状位(57%比26%, $p=0.0008$ )、股骨假体冠状位置(70%比28%, $p=0.0001$ )、股骨假体轴向位置(53%比31%, $p=0.0163$ )、胫骨假体矢状位(80%比22%, $p=0.0001$ )和胫骨假体轴向位置(48%比19%, $p=0.0009$ )方面准确性显著增加[12]。Cécile Batailler通过对接受机器人辅助下单髁置换术与传统单髁置换术两组患者为期平均2年的术后随访(包括临床功能及影像学结果)表明:与传统技术相比,机器人辅助单髁置换术后肢体对齐异常率较低分别为16%和32%( $p=0.038$ ),翻修率也较低:机器人组5%( $n=4/80$ ),传统手术的修订率为9%( $n=7/80$ )。该机器人辅助系统提高了假体定位的准确性[13]。此外,机器人相比于传统手术方式能够更好地恢复膝关节线位置,传统手术中为了追求更好的股骨假体生存率,往往将假体固定于更坚固的软骨下骨,股骨远端截骨量较少,导致股骨远端关节线下移,并

增加了胫骨侧截骨量,增加了胫骨侧应力及假体沉降风险[14, 15]。Yannick Herry在一项病例对照研究中发现,机器人辅助单髁置换术相较于传统技术,术后关节线下移改变更小( $+1.4\text{ mm} \pm 2.6$  vs  $+4.7\text{ mm} \pm 2.4$   $p<0.05$ ) [16]。良好的假体对位能够带来更好的韧带平衡,Riyaz H. Jinnah在一项前瞻性研究中通过对比52名接受机器人辅助下单髁置换术患者手术前后膝关节韧带的张力发现:在屈曲 $0^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $110^\circ$ 时,83%的患者韧带平衡精度达到 $0.53\text{ mm}$ ,机器人辅助的人工关节置换术能够准确地复制术中计划好的韧带平衡。结合高精度的假体放置,机器人辅助系统可能会改善UKA患者的功能结果和生存[17]。

#### 六、学习曲线及手术时间

机器人辅助下单髁置换术作为一种新兴技术,其学习曲线一直被人们所关注,B. Kayani在一项前瞻性队列研究中发现,机器人辅助下单髁置换术的学习曲线在6例手术后出现拐点,骨骼准备时间有显著改善,在初始学习阶段后减少了40%以上,其整体手术时间开始与传统手术时间相当[18]。Marcovigi在对73名接受机器人辅助下单髁置换术患者平均随访17.2(3-37)月后得出结论:前36名患者与后37名患者在总体手术时间、机器人使用时间两方面均有差异,总体手术时间为83.2分钟(标准差=13.0)和70.0分钟(标准差=10.9),机器人时间分别为41.9分钟(标准差=8.2)和35.2分钟(标准差=6.3) [19]。Matthias Luger在2023年的一项前瞻性研究中分别对3名不同年资医生实施的机器人辅助下单髁置换术的手术时间、学习曲线进行调查后发现:在机器人辅助的膝关节置换术中,经验丰富的外科医生的出现可以使以往在机器人辅助系统方面缺乏经验的外科团队的学习曲线变平坦,这或许可以为具有丰富传统单髁置换术手术经验的医生开展机器人辅助下单髁置换术提供参考[20]。不同类型的手术机器人在手术时间方面也有差异,Savov在一项2021年的病例对照研究中发现:无图像手持式机器人组的平均手术时间( $55 \pm 13$ 分钟)显著低于图像机械臂机器人组( $68 \pm 14$ 分钟, $P$ 值 $<0.001$ ),作者认为无图像手持式机器人在软件操作步骤及骨准备方面花费时间更少[21]。但两组手术医生均为手术经验较少的低容量医生完成,这可能是影响手术时间的因素。

#### 七、局限性及未来发展趋势

机器人辅助下单髁置换术作为一种新兴技术,必然有其优缺点。首先,RA-UKA的成本较高,除了昂贵的机器人系统本身,后续的维修费用及医务人员的培训费用、一次性耗材的使用费用、及术前对患侧下肢的CT扫描均可能增加患者的医疗负担,Daniel S. Hayes在一项2022年的回顾性研究中发现:机械臂辅助膝关节置换术的成本高于传统技术,RA-UKA在住院天数范围、手术费用、麻醉费用均高于传统组,但术后复查康复费用低于传统组[22];其次,相较于传统手术方式,RA-UKA术前规划的全下肢CT增加患者辐射量,Danielle Y. Ponzio在一项回顾性研究中调查了佛罗里达州2家医疗机构在3年内使用MAKO手术机器人患者的CT辐射量后得出结论:机器人辅助膝关节置换术术前CT相关的平均有效辐射量(Effective dose, ED)为 $4.8 \pm 3.0\text{ mSv}$ ,相当于48张胸部X光片的剂量,同时发现两个医疗机构ED值存在3倍的差异[23]。尽管RA-UKA在发展过程中有其自身局限性,手术机器人的未来发展仍然可期,研究已经证明RA-UKA可以降低术后假体翻修率及术后功能,未来对该

技术的研究应致力于简化流程、缩短手术前计划及手术时间,以期更好的临床疗效。RA-UKA的另一发展趋势为平民化,目前大约80%机器人手术主要在教学医院开展,主要

培训对象为专科临床医生,未来对手术机器人的培训应在医学教材及基层医院中普及[24]。

#### 参考文献:

- [1]Hernandez D, Garimella R, Eltorai AEM, Daniels AH. Computer-assisted orthopaedic surgery. *Orthop Surg* 2017; 9 ( 02 ): 152 - 158
- [2]Zheng G, Nolte LP. Computer-assisted orthopedic surgery: current state and future perspective. *Front Surg* 2015; 2: 66
- [3]Are L, De Mauro D, Rovere G, Fresta L, Tartarone M, Illuminati A, Smakaj A, Maccauro G, Liuzza F. Robotic-assisted unicompartmental knee arthroplasty performed with Navio system; a systematic review. *Eur Rev Med Pharmacol Sci*. 2023 Mar; 27( 6 ): 2624-2633. doi: 10.26355/eurev\_202303\_31799. PMID: 37013780.
- [4]Saragaglia D. Prothèse totale du genou assistée par ordinateur: douze ans d'expérience grenobloise [Computer-assisted total knee arthroplasty: 12 years experience in Grenoble]. *Bull Acad Natl Med*. 2009; 193 ( 1 ): 91-105.
- [5]张军良, 周幸, 吴苏稼.手术机器人系统在骨科的应用[J].中国矫形外科杂志, 2015, 23 ( 22 ): 2079-2082.
- [6]蔡显义, 丁秋月, 刘先哲等.计算机导航系统在膝关节单髁置换中应用的研究进展[J].中国骨与关节杂志, 2018, 7 ( 04 ): 283-288.
- [7]Watanabe T, Abbasi AZ, Conditt MA, et al. In vivo kinematics of a robot-assisted uni- and multi-compartmental knee arthroplasty. *J Orthop Sci*. 2014; 19 ( 4 ): 552-557. doi: 10.1007/s00776-014-0578-3
- [8]Pearle AD, O'Loughlin PF, Kendoff DO. Robot-assisted unicompartmental knee arthroplasty. *J Arthroplasty*. 2010; 25( 2 ): 230-237. doi: 10.1016/j.arth.2008.09.024
- [9]刘晓东, et al."计算机辅助导航下的微创膝关节单髁置换." 中国组织工程研究与临床康复 15.35 ( 2011 ): 6504-6508.
- [10]Negrín R, Duboy J, Iñiguez M, et al. Robotic-assisted vs conventional surgery in medial unicompartmental knee arthroplasty: a clinical and radiological study. *Knee Surg Relat Res*. 2021; 33 ( 1 ): 5. Published 2021 Feb 12. doi: 10.1186/s43019-021-00087-2
- [11]Chin BZ, Tan SSH, Chua KCX, Budiono GR, Syn NL, O'Neill GK. Robot-Assisted versus Conventional Total and Unicompartmental Knee Arthroplasty: A Meta-analysis of Radiological and Functional Outcomes. *J Knee Surg*. 2021; 34 ( 10 ): 1064-1075. doi: 10.1055/s-0040-1701440
- [12]Bell SW, Anthony I, Jones B, MacLean A, Rowe P, Blyth M. Improved Accuracy of Component Positioning with Robotic-Assisted Unicompartmental Knee Arthroplasty: Data from a Prospective, Randomized Controlled Study. *J Bone Joint Surg Am*. 2016; 98 ( 8 ): 627-635. doi: 10.2106/JBJS.15.00664
- [13]Batailler C, White N, Ranaldi FM, Neyret P, Servien E, Lustig S. Improved implant position and lower revision rate with robotic-assisted unicompartmental knee arthroplasty. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*. 2019; 27 ( 4 ): 1232-1240. doi: 10.1007/s00167-018-5081-5
- [14]Lustig S, Lording T, Frank F, Debette C, Servien E, Neyret P. Progression of medial osteoarthritis and long term results of lateral unicompartmental arthroplasty: 10 to 18 year follow-up of 54 consecutive implants. *Knee*. 2014; 21 Suppl 1: S26-S32. doi: 10.1016/S0968-0160 ( 14 ) 50006-3
- [15]Small SR, Berend ME, Rogge RD, Archer DB, Kingman AL, Ritter MA. Tibial loading after UKA: evaluation of tibial slope, resection depth, medial shift and component rotation. *J Arthroplasty*. 2013; 28 ( 9 Suppl ): 179-183. doi: 10.1016/j.arth.2013.01.004
- [16]Herry Y, Batailler C, Lording T, Servien E, Neyret P, Lustig S.Improved joint-line restitution in unicompartmental knee arthroplasty using a robotic-assisted surgical technique. *Int Orthop*.2017; 41 ( 11 ): 2265-2271. doi: 10.1007/s00264-017-3633-9
- [17]Plate, Johannes F et al. "Achieving accurate ligament balancing using robotic-assisted unicompartmental knee arthroplasty." *Advances in orthopedics* vol. 2013 ( 2013 ): 837167. doi: 10.1155/2013/837167
- [18]Kayani B, Konan S, Pietrzak JRT, Huq SS, Tahmassebi J, Haddad FS. The learning curve associated with robotic-arm assisted unicompartmental knee arthroplasty: a prospective cohort study. *Bone Joint J*. 2018; 100-B ( 8 ): 1033-1042. doi: 10.1302/0301-620X.100B8.BJJ-2018-0040.R1
- [19]Marcovigi, Andrea et al. "Robotic-arm assisted partial knee arthroplasty: a single centre experience." *Acta bio-medica: Atenei Parmensis* vol. 88, 2S 54-59. 7 Jun. 2017, doi: 10.23750/abm.v88i2-S.6514
- [20]Schopper C, Proier P, Luger M, Gotterbarm T, Klasan A. The learning curve in robotic assisted knee arthroplasty is flattened by the presence of a surgeon experienced with robotic assisted surgery. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*. 2023; 31 ( 3 ): 760-767. doi: 10.1007/s00167-022-07048-6
- [21]Savov, Peter et al. "Robotics improves alignment accuracy and reduces early revision rates for UKA in the hands of low-volume UKA surgeons." *Archives of orthopaedic and trauma surgery* vol. 141, 12 ( 2021 ): 2139-2146. doi: 10.1007/s00402-021-04114-5
- [22]Kolessar DJ, Hayes DS, Harding JL, Rudraraju RT, Graham JH. Robotic-Arm Assisted Technology's Impact on Knee Arthroplasty and Associated Healthcare Costs. *J Health Econ Outcomes Res*. 2022; 9( 2 ): 57-66. Published 2022 Aug 23. doi: 10.36469/001c.37024
- [23]Ponzio DY, Lonner JH.Preoperative Mapping in Unicompartmental Knee Arthroplasty Using Computed Tomography Scans Is Associated with Radiation Exposure and Carries High Cost. *J Arthroplasty*.2015; 30 ( 6 ): 964-967. doi: 10.1016/j.arth.2014.10.039
- [24]Kwon HM, Yang IH, Lee WS, Yu ARL, Oh SY, Park KK. Reliability of Intraoperative Knee Range of Motion Measurements by Goniometer Compared with Robot-Assisted Arthroplasty. *J Knee Surg*. 2019; 32 ( 3 ): 233-238. doi: 10.1055/s-0038-1641140