

机器人辅助膝关节置换系统的研究进展

王 璠^{1,2}, 孙 水^{2,3*}

¹山东大学齐鲁医学院, 山东 济南

²山东省立医院骨关节科, 山东 济南

³山东第一医科大学附属省立医院骨关节科, 山东 济南

收稿日期: 2023年3月21日; 录用日期: 2023年4月17日; 发布日期: 2023年4月25日

摘 要

重症膝关节炎患者的最终治疗通常会选择全膝关节置换术, 随着我国人口老龄化加重, 全膝关节置换术手术量将在未来一段时间持续增加。尽管全膝关节置换术已是一项很成熟的手术, 但临床医生始终在追求着更准确的假体位置和更高的患者满意度, 并从各方面改进手术的准确性与稳定性。机器人辅助手术系统是一种新兴人工智能技术, 目前已有多个类型的机器人辅助系统被应用于临床中, 研究表明均可有效帮助临床医生改善假体位置的准确性以及术后下肢力线, 但目前缺乏关于长期预后指标的研究。目前, 机器人辅助膝关节置换术尚处于发展阶段, 机器人系统及其相关手术流程仍存在着巨大的改进和提升空间。

关键词

全膝关节置换术, 机器人辅助手术, 假体位置, 短期预后

Research Progress of Robot-Assisted Knee Arthroplasty System

Fan Wang^{1,2}, Shui Sun^{2,3*}

¹Cheeloo College of Medicine, Shandong University, Jinan Shandong

²Department of Joint Surgery, Shandong Provincial Hospital, Jinan Shandong

³Department of Joint Surgery, Shandong Provincial Hospital Affiliated to Shandong First Medical University, Jinan Shandong

Received: Mar. 21st, 2023; accepted: Apr. 17th, 2023; published: Apr. 25th, 2023

Abstract

Total knee arthroplasty is usually the final choice of patients with severe knee arthritis. With the

*通讯作者。

aging of our population, the number of total knee arthroplasty operations will continue to increase in the future. Although total knee arthroplasty is a mature operation, clinicians have always been pursuing more accurate prosthesis position and higher patient satisfaction, and improving the accuracy and stability of the operation from all aspects. The robot-assisted surgery system is a new artificial intelligence technology. At present, many types of robot-assisted systems have been applied in clinical surgery. Research shows that they can effectively help clinicians improve the accuracy of the prosthesis position and the lower limb alignment after surgery, but there are few studies on long-term prognostic indicators. At present, robot-assisted knee arthroplasty is still in the development stage, and there is still huge room for improvement in the robot system and related surgical procedures.

Keywords

Total Knee Arthroplasty, Robot-Assisted Surgery, Position of Prosthesis, Short-Term Prognosis

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

全膝关节置换术(TKA, total knee arthroplasty)是外科最常见的手术之一, 随着我国人口老龄化加重, TKA 手术量也将会在未来一段时间内持续增长。因此, TKA 术后功能结果、满意度、远期疗效的提高对老年膝关节炎患者和整个医疗系统将愈发重要。经过几十年的发展, TKA 手术在假体植入位置、手术技术和术后康复锻炼计划方面已经取得了显著的进步, 但目前多项研究表明, 仍有近 20% 的患者在 TKA 术后对整体手术效果不满意[1] [2] [3]。

为提高假体植入准确性和患者术后满意度, 骨科医生在不断寻求技术创新。随着科技水平提高, 人工智能技术已在手术领域崭露头角, 计算机导航技术(CAN, Computer-assisted navigation)、个性化截骨导板(PSI, Patient-specific instrumentation)以及机器人辅助手术系统的应用可以帮助手术医生改善截骨准确性以及术后下肢力线。目前, 机器人辅助全膝关节置换术(RA-TKA, Robot-assisted total knee arthroplasty)已成为研究热点, 与其相关的各类报道层出不穷[4] [5] [6]。本文介绍了当前主流的膝关节置换手术机器人系统, 并简述了其近期相关研究进展, 可帮助临床医生了解膝关节置换手术机器人系统, 对其开展机器人辅助膝关节置换手术也具有提示意义。

2. 当前主流机器人辅助膝关节置换系统及相关研究

2.1. ROBODOC[®]/TSolution-One[®]系统

ROBODOC[®] (Curexo Technology, Fremont, CA, USA)机器人辅助系统是最早用于关节置换术的主动机器人系统, 也是美国 FDA 批准的第一个用于骨科手术的机器人系统。2014 年, THINK Surgical 公司收购了 Curexo Technology 公司, 并在 ROBODOC[®]机器人系统的基础上推出了新一代开放式机器人系统 TSolution-One[®]system, 该系统于 2019 年成功获得 FDA 批准。TSolution-One[®]机器人系统也是一种基于 CT 图像进行术前规划的主动机器人系统。

在截骨准确性方面, 在一项 25 例患者的研究[7]中, ROBODOC[®]系统在执行术前计划方面的准确性较高, 该研究报道的假体冠状面截骨角度的平均偏差为 $-0.4^{\circ} \pm 1.7^{\circ}$, 术中计划植入假体型号准确率为

100%。在一项 4 年的随访中, Park 和 Lee [8] 报告了 ROBODOC[®] 系统辅助组术后冠状位股骨假体角(97.7° vs 95.6°, $P < 0.01$)、矢状位股骨假体角(0.2° vs 4.2°, $P < 0.01$)、矢状位胫骨假体角(85.5° vs 89.7°, $P < 0.01$) 与传统 TKA 手术组相比存在统计学差异。在一项平均 13 年的随访研究[9]中, ROBODOC[®] 系统辅助 TKA 与传统 TKA 手术之间术后股骨胫骨角、股骨假体位置、胫骨假体位置、下肢力线、股骨髁后偏移量无统计学差异($P > 0.05$)。

在临床预后方面, Yang 等人[10]的 10 年随访研究报告了 ROBODOC[®] 系统辅助 TKA 与传统 TKA 手术之间术后 HSS 评分(88.7 vs 87.2, $P = 0.79$), WOMAC 评分(7.6 vs 11.5, $P = 0.12$), VAS 评分(1.1 vs 1.2, $P = 0.51$) 和活动度(132.6° vs 131.0°, $P = 0.92$) 无统计学差异。Cho 等人[11] 得出了相似结论, 他们报告了 155 例 ROBODOC[®] 系统辅助 TKA 和 196 例传统 TKA 手术的至少 10 年的随访结果, 两组患者术后 WOMAC 评分、牛津膝关节评分、KSS 评分以及 SF-12 评分无统计学差异。同样, 在一项平均 13 年的随访中, Kim 等人[9] 发现 ROBODOC[®] 系统辅助 TKA 组和传统 TKA 组之间患者 KSS 评分、WOMAC 评分、活动度、UCLA 活动评分均无统计学差异。而 Liow 等人[12] 在 2 年的随访中报告了 31 例 ROBODOC[®] 系统辅助 TKA 手术的 SF-36 评分高于 29 例传统 TKA 手术。

在临床并发症方面, Park 和 Lee [8] 报告了他们最初的 32 例 ROBODOC[®] 系统辅助 TKA 手术中有 6 例出现了短期并发症, 包括浅表感染、髌腱韧带断裂、髌骨脱位、股骨髁上骨折、髌骨骨折以及常见的腓骨损伤, 而 30 例传统 TKA 手术组未出现短期并发症。

2.2. Mako[®] 系统

Mako[®] (Stryker, Mahwah, NJ) 机器人辅助系统是一种基于 CT 图像的半主动机器人系统, 广泛应用于机器人辅助单髁置换术(UKA)、全髋关节置换术(THA)以及全膝关节置换术(TKA)。Mako[®] 膝关节置换系统于 2015 年获得 FDA 批准。该系统通过术前 CT 图像构造出患者膝关节 3D 模型, 用以进行术前规划假体大小和位置。Mako[®] 机器人辅助系统作为目前全球应用范围最广的机器人辅助关节置换手术系统, 有大量研究报道了其准确性、临床结果、患者满意度及临床并发症。

在截骨准确性方面, 已有多项研究表明 Mako[®] 系统在规划假体位置、控制截骨量、间隙平衡、恢复下肢力线方面具有更高的准确性和可重复性[13] [14] [15] [16]。Marchand 等人[17] 的研究报道, 在存在较严重畸形的膝关节置换手术中, 从冠状位测量角度, Mako 系统在矫正 9°~15° 的膝关节内翻或外翻时具有较高准确性。Sultan 等人[18] 比较了 43 例 Mako[®] 系统辅助 TKA 手术和 39 例传统 TKA 手术术后 4~6 周的后髌偏移比(PCOR)和 ISI 指数, 与传统 TKA 手术组相比, 机器人辅助手术组的 PCOR 平均差异较小(0.49 vs 0.53, $P = 0.024$), 与该研究中机器人手术组术后 1 年的活动度更好相呼应。在机器人手术组中, ISI 指数超出正常范围的患者数量也较低(4 vs 12), 也就是说, 机器人组的患者出现屈曲挛缩或膝关节过伸可能较小。此外, 有研究[19] 表明, 使用 Mako[®] 系统辅助手术, 术前计划中的截骨设计和假体定位与实际操作的误差较小。

在临床预后方面, 在一项 6 个月的随访中, Marchand 等人[20] 比较了 20 例 Mako[®] 系统辅助 TKA 和 20 例传统 TKA 手术在疼痛评分、功能评分和患者满意度方面的结果, 机器人手术组的疼痛评分显著降低(3 ± 3 vs 5 ± 3 , $P < 0.05$) 和患者满意度较高(14 ± 8 vs 7 ± 8 , $P < 0.05$)。在一项对 150 例 Mako[®] 系统辅助 TKA 和 102 个传统 TKA 手术的前瞻性研究[21] 中, 术后 3 个月随访时, 机器人手术组在 KSS 评分的 10 个组成部分中有 9 个方面有相同或更高的分数, 包括功能活动评分、总症状评分、满意度和期望评分等。

2.3. Navio[®] 系统

Navio[®] (Smith & Nephew, London, UK) 是一种手持式半主动机器人系统, 该系统结合了术前规划、导

航和术中可视化于一身, 该系统于 2012 年获得 FDA 批准用于 UKA 和髌股关节置换术(PFA), 于 2017 年获得批准用于 TKA 手术。Navio 系统无需术前图像, 依靠术中采集构建 3D 图像创建膝关节骨性模型, 同时做出手术规划。

在截骨准确性方面, Casper 等人[22]进行了一项 18 例的尸体研究, 报告了 Navio[®]系统辅助 TKA 手术在冠状位股骨内外翻角度的总体误差为 $-0.1^{\circ} \pm 0.9^{\circ}$, 胫骨平台内外翻角度误差为 $-0.2^{\circ} \pm 0.9^{\circ}$, 胫骨后倾角度误差为 $-0.2^{\circ} \pm 1.3^{\circ}$ 。然而, 股骨假体屈曲角度的误差较大, 达到 $-2.0^{\circ} \pm 2.2^{\circ}$ 。Thiengwittayaporn 等人[23]进行了一项 75 例 Navio[®]系统辅助 TKA 与 77 例传统 TKA 手术的随机对照试验, Navio[®]系统手术组中有 94.7% 的患者实现了与中性机械轴 3° 以内的整体机械对齐。

在临床预后方面, Held 等人[24]报道了一项有关 111 例 Navio[®]系统辅助 TKA 手术与 110 例传统 TKA 手术的回溯性研究, 两组患者进行了术后 3 个月、12 个月和 24 个月的随访, 在术后并发症、活动度、住院时间、KSS 评分、WOMAC 评分和 SF-12 评分方面无显著差异。Savov 等人[25]对同一位手术医生进行的前 70 例 Navio[®]系统辅助 TKA 手术进行了统计分析, 通过累计求和(CUSUM, Cumulative Summation)法得到 Navio[®]系统的学习曲线为 11 例。

2.4. ROSA[®]系统

ROSA[®]系统(Zimmer Biomet, Warsaw, IN)于 2019 年 1 月获得 FDA 批准。该系统可以选择有图像或无图像模式, 有图像模式中, ROSA[®]系统可以从下肢正侧位 x 线照片中分析生成 3D 模型, 用于术中规划。无图像模式中, 术前无需采集图像, ROSA[®]系统可根据术中定位注册点分析生成 3D 模型进行手术规划。

在截骨准确性方面, Parratte 等人[26]在一项 30 例尸体膝关节的研究中, 对 ROSA[®]系统截骨厚度与截骨角度进行了研究, 发现使用 ROSA[®]系统截骨中实际截骨角度与计划截骨角度的差值均在 $1^{\circ} \pm 1^{\circ}$ 之内; 除了股骨假体屈曲角($-0.95^{\circ} \pm 0.88^{\circ}$)外, 其余 5 项截骨角度的实际截骨角度与计划截骨角度均无统计学差异; 在截骨厚度方面, 除股骨远端内侧(0.35 ± 0.84 mm)和胫骨平台内侧(0.66 ± 0.64 mm) 2 个位置外, 其余截骨位置的实际截骨厚度与计划截骨厚度无统计学差异。此外, Seidenstein 等人[27]在 14 例 ROSA[®]系统辅助 TKA (7 例尸体标本)和 20 例传统 TKA 手术(10 个尸体标本)的研究中比较了 ROSA[®]系统截骨的准确性和稳定性, ROSA[®]系统辅助手术组与传统手术组对比, 下肢 HKA 角为 $0.8^{\circ} \pm 0.6^{\circ}$ vs $2.0^{\circ} \pm 1.6^{\circ}$, HKA 角在 3° 以内为 100% vs 75%, 在 2° 以内为 93% vs 60%, ROSA[®]系统辅助手术组更准确也更稳定地实现了下肢力线中性对齐, 异常值也更少($P < 0.05$)。机器人辅助手术组中, 除股骨假体屈曲角($1.3^{\circ} \pm 1.0^{\circ}$)外, 其余各项实际截骨角度与计划截骨角度的差值均小于 0.6° , 标准差均小于 0.4° , 实际截骨厚度与计划截骨厚度的差值均小于 0.7 mm, 标准差均小于 0.7 mm, 表明 ROSA[®]系统截骨的准确性与稳定性较高。但是, Shin 等人[28]的研究表明, 虽然 ROSA 系统似乎可以准确规划 TKA 的冠状面切除, 但在矢状面切除角度方面却不太准确。

在临床预后方面, Mancino 等人[29]的研究分析了 50 例无图像模式 ROSA[®]系统辅助 TKA 与 47 例传统 TKA 手术, 无图像模式 ROSA[®]系统辅助 TKA 在 12 个月随访时 KOOS 评分的疼痛部分(85 vs 79.1, $P = 0.0283$)评分高于传统 TKA 手术, 此外, ROSA[®]系统辅助 TKA 手术组术后患者膝关节活动度更大(119.4° vs 107.1° , $P < 0.0001$), 而 KOOS 的其他亚组、KSS、FJS-12、并发症以及下肢力线方面两组无显著差异。

2.5. HURWA 关节手术机器人系统

HURWA 关节手术机器人系统由北京和华瑞博医疗科技有限公司自主研发制造, 于 2022 年 1 月获我国国家药品监督管理局(NMPA, National Medical Products Administration)批准上市, 是首款获我国 NMPA 认证的国产膝关节手术机器人系统, 该系统需对患者术前 CT 图像进行分析完成术前规划。目前其相关

研究报道较少, Li 等人[30]报道了一篇多中心随机对照临床试验, 包括 73 例 HURWA 关节手术机器人辅助 TKA 组和 77 例传统 TKA 手术组, 结果显示 HURWA 机器人辅助 TKA 组术后平均 HKA 角为内翻 $1.801^{\circ} \pm 1.608^{\circ}$ 而传统 TKA 组为内翻 $3.017^{\circ} \pm 2.735^{\circ}$, 差值具有统计学意义; 机器人辅助 TKA 组和传统 TKA 组术后下肢力线处于中性对齐 3° 以内的比例分别为 81.2% 和 63.5%; 两组术后 WOMAC 评分、HSS 评分、SF-36 评分和 KSS 评分无显著差异。

2.6. 鸿鹄®骨科手术机器人系统

鸿鹄®(Skywalker)骨科手术机器人由上海微创医疗机器人(集团)股份有限公司研发, 是首款获 FDA 认证的国产辅助全膝关节置换手术机器人, 其术前规划系统需根据患者术前 CT 扫描数据建立膝关节三维模型, 进而形成手术方案。其相关研究报道较少, Xia 等人[31]报道了一篇 31 例的前瞻性研究, 测量了鸿鹄®机器人系统中实际截骨厚度与计划截骨厚度的差值以及术后下肢对齐情况, 股骨远端内侧髁、股骨远端外侧髁、股骨内后髁、股骨外后髁、胫骨平台内侧、胫骨平台外侧截骨差值分别为 0.87 ± 0.63 mm、 1.02 ± 0.67 mm、 0.74 ± 0.46 mm、 0.98 ± 0.81 mm、 0.92 ± 0.66 mm、 1.04 ± 0.84 mm, 所有患者术后下肢力线均处于中性对齐 3° 以内, 所有患者均无术后并发症发生。

3. 讨论与展望

在本文列举出的机器人辅助膝关节置换系统中, 尽管存在一定程度的差异, 但各系统均在患者下肢力线恢复、截骨误差方面表现出了较高的准确性与稳定性。多数报道证明了机器人辅助膝关节置换术的手术结果、短期预后与传统膝关节置换术无显著性差异, 而目前多数机器人系统缺乏长期的随访研究来评估患者长期假体存活率和并发症。机器人辅助系统同样存在一定的局限性, 大多数机器人辅助系统的术前计划是基于患者膝关节的骨性结构, 而术中各项操作对于膝关节内部软组织平衡的影响将会处于机器人系统的规划之外, 这将一定程度上的影响手术结果。多数机器人系统需借助患者术前 CT 图像进行术前规划, 而传统膝关节置换手术无需此项检查, 在该方面 Navio®系统和 ROSA®系统存在一定的优势, 可以在无术前图像的情况下依靠术中定位注册进行手术规划。目前, 机器人辅助膝关节置换术尚处于发展阶段, 机器人系统及其相关手术流程仍存在着巨大的改进和提升空间。

参考文献

- [1] Bryan, S., Goldsmith, L.J., Davis, J.C., Hejazi, S., MacDonald, V., McAllister, P., Randall, E., Suryaprakash, N., Wu, A.D. and Sawatzky, R. (2018) Revisiting Patient Satisfaction Following Total Knee Arthroplasty: A Longitudinal Observational Study. *BMC Musculoskeletal Disorders*, **19**, Article No. 423. <https://doi.org/10.1186/s12891-018-2340-z>
- [2] Choi, Y.-J. and Ra, H.-J. (2016) Patient Satisfaction after Total Knee Arthroplasty. *Knee Surgery & Related Research*, **28**, 1-15. <https://doi.org/10.5792/ksr.2016.28.1.1>
- [3] Neogi, T. (2013) The Epidemiology and Impact of Pain in Osteoarthritis. *Osteoarthritis and Cartilage*, **21**, 1145-1153. <https://doi.org/10.1016/j.joca.2013.03.018>
- [4] Onggo, J.R., Onggo, J.D., De Steiger, R. and Hau, R. (2020) Robotic-Assisted Total Knee Arthroplasty Is Comparable to Conventional Total Knee Arthroplasty: A Meta-Analysis and Systematic Review. *Archives of Orthopaedic and Trauma Surgery*, **140**, 1533-1549. <https://doi.org/10.1007/s00402-020-03512-5>
- [5] Agarwal, N., To, K., McDonnell, S. and Khan, W. (2020) Clinical and Radiological Outcomes in Robotic-Assisted Total Knee Arthroplasty: A Systematic Review and Meta-Analysis. *The Journal of Arthroplasty*, **35**, 3393-3409. <https://doi.org/10.1016/j.arth.2020.03.005>
- [6] Mullaji, A.B. and Khalifa, A.A. (2022) Is It Prime Time for Robotic-Assisted TKAs? A Systematic Review of Current Studies. *Journal of Orthopaedics*, **34**, 31-39. <https://doi.org/10.1016/j.jor.2022.07.016>
- [7] Liow, M.H., Chin, P.L., Tay, K.J., Chia, S.L., Lo, N.N. and Yeo, S J. (2014) Early Experiences with Robot-Assisted Total Knee Arthroplasty Using the DigiMatch™ ROBODOC® Surgical System. *Singapore Medical Journal*, **55**, 529-534. <https://doi.org/10.11622/smedj.2014136>

- [8] Park, S.E. and Lee, C.T. (2007) Comparison of Robotic-Assisted and Conventional Manual Implantation of a Primary Total Knee Arthroplasty. *The Journal of Arthroplasty*, **22**, 1054-1059. <https://doi.org/10.1016/j.arth.2007.05.036>
- [9] Kim, Y.-H., Yoon, S.-H. and Park, J.-W. (2020) Does Robotic-Assisted TKA Result in Better Outcome Scores or Long-Term Survivorship than Conventional TKA? A Randomized, Controlled Trial. *Clinical Orthopaedics and Related Research*, **478**, 266-275. <https://doi.org/10.1097/CORR.0000000000000916>
- [10] Yang, H.Y., Seon, J.K., Shin, Y.J., Lim, H.A. and Song, E.K. (2017) Robotic Total Knee Arthroplasty with a Cruciate-Retaining Implant: A 10-Year Follow-up Study. *Clinics in Orthopedic surgery*, **9**, 169-176. <https://doi.org/10.4055/cios.2017.9.2.169>
- [11] Cho, K.-J., Seon, J.-K., Jang, W.-Y., Park, C.-G. and Song, E.-K. (2019) Robotic versus Conventional Primary Total Knee Arthroplasty: Clinical and Radiological Long-Term Results with a Minimum Follow-up of Ten Years. *International Orthopaedics*, **43**, 1345-1354. <https://doi.org/10.1007/s00264-018-4231-1>
- [12] Liow, M.H.L., Goh, G.S., Wong, M.K., Chin, P.L., Tay, D.K. and Yeo, S.J. (2017) Robotic-Assisted Total Knee Arthroplasty May Lead to Improvement in Quality-of-Life Measures: A 2-Year Follow-up of a Prospective Randomized Trial. *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy*, **25**, 2942-2951. <https://doi.org/10.1007/s00167-016-4076-3>
- [13] Sires, J.D., Craik, J.D. and Wilson, C.J. (2021) Accuracy of Bone Resection in MAKO Total Knee Robotic-Assisted Surgery. *The Journal of Knee Surgery*, **34**, 745-748. <https://doi.org/10.1055/s-0039-1700570>
- [14] Sires, J.D. and Wilson, C.J. (2021) CT Validation of Intraoperative Implant Position and Knee Alignment as Determined by the MAKO Total Knee Arthroplasty System. *The Journal of Knee Surgery*, **34**, 1133-1137. <https://doi.org/10.1055/s-0040-1701447>
- [15] Kayani, B., Tahmassebi, J., Ayuob, A., Konan, S., Oussedik, S. and Haddad, F.S. (2021) A Prospective Randomized Controlled Trial Comparing the Systemic Inflammatory Response in Conventional Jig-Based Total Knee Arthroplasty Versus Robotic-Arm Assisted Total Knee Arthroplasty. *The Bone & Joint Journal*, **103-B**, 113-122. <https://doi.org/10.1302/0301-620X.103B1.BJJ-2020-0602.R2>
- [16] Wan, X., Su, Q., Wang, D., Yuan, M., Lai, Y., Xu, H. and Zhou, Z. (2021) Robotic Arm-Assisted Total Knee Arthroplasty Improves Preoperative Planning and Intraoperative Decision-Making. *Journal of Orthopaedic Surgery and Research*, **16**, Article No. 670. <https://doi.org/10.1186/s13018-021-02815-6>
- [17] Marchand, R.C., Khlopas, A., Sodhi, N., Condrey, C., Piuze, N.S., Patel, R., Delanois, R.E. and Mont, M.A. (2018) Difficult Cases in Robotic Arm-Assisted Total Knee Arthroplasty: A Case Series. *The Journal of Knee Surgery*, **31**, 27-37. <https://doi.org/10.1055/s-0037-1608839>
- [18] Sultan, A.A., Samuel, L.T., Khlopas, A., Sodhi, N., Bhowmik-Stoker, M., Chen, A., Orozco, F., Kolisek, F., Mahoney, O., Smith, L., Malkani, A., Molloy, R.M. and Mont, M.A. (2019) Robotic-Arm Assisted Total Knee Arthroplasty More Accurately Restored the Posterior Condylar Offset Ratio and the Insall-Salvati Index Compared to the Manual Technique; A Cohort-Matched Study. *Surgical Technology International*, **34**, 409-413.
- [19] Hampf, E.L., Chughtai, M., Scholl, L.Y., Sodhi, N., Bhowmik-Stoker, M., Jacofsky, D.J. and Mont, M.A. (2019) Robotic-Arm Assisted Total Knee Arthroplasty Demonstrated Greater Accuracy and Precision to Plan Compared with Manual Techniques. *The Journal of Knee Surgery*, **32**, 239-250. <https://doi.org/10.1055/s-0038-1641729>
- [20] Marchand, R.C., Sodhi, N., Khlopas, A., Sultan, A.A., Harwin, S.F., Malkani, A.L. and Mont, M.A. (2017) Patient Satisfaction Outcomes after Robotic Arm-Assisted Total Knee Arthroplasty: A Short-Term Evaluation. *The Journal of Knee Surgery*, **30**, 849-853. <https://doi.org/10.1055/s-0037-1607450>
- [21] Khlopas, A., Sodhi, N., Hozack, W.J., Chen, A.F., Mahoney, O.M., Kinsey, T., Orozco, F. and Mont, M.A. (2020) Patient-Reported Functional and Satisfaction Outcomes after Robotic-Arm-Assisted Total Knee Arthroplasty: Early Results of a Prospective Multicenter Investigation. *The Journal of Knee Surgery*, **33**, 685-690. <https://doi.org/10.1055/s-0039-1684014>
- [22] Casper, M., Mitra, R., Khare, R., Jaramaz, B., Hamlin, B., McGinley, B., Mayman, D., Headrick, J., Urish, K., Gittins, M., Incavo, S. and Neginhal, V. (2018) Accuracy Assessment of a Novel Image-Free Handheld Robot for Total Knee Arthroplasty in a Cadaveric Study. *Computer Assisted Surgery*, **23**, 14-20. <https://doi.org/10.1080/24699322.2018.1519038>
- [23] Thiengwittayaporn, S., Uthaitas, P., Senwiruch, C., Hongku, N. and Tunyasuwankul, R. (2021) Imageless Robotic-Assisted Total Knee Arthroplasty Accurately Restores the Radiological Alignment with a Short Learning Curve: A Randomized Controlled Trial. *International Orthopaedics*, **45**, 2851-2858. <https://doi.org/10.1007/s00264-021-05179-y>
- [24] Held, M.B., Gazgalis, A., Neuwirth, A.L., Shah, R.P., Cooper, H.J. and Geller, J.A. (2022) Imageless Robotic-Assisted Total Knee Arthroplasty Leads to Similar 24-Month WOMAC Scores as Compared to Conventional Total Knee Arthroplasty: A Retrospective Cohort Study. *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy*, **30**, 2631-2638. <https://doi.org/10.1007/s00167-021-06599-4>
- [25] Savov, P., Tuecking, L.-R., Windhagen, H., Ehmig, J. and Ettinger, M. (2021) Imageless Robotic Handpiece-Assisted

-
- Total Knee Arthroplasty: A Learning Curve Analysis of Surgical Time and Alignment Accuracy. *Archives of Orthopaedic and Trauma Surgery*, **141**, 2119-2128. <https://doi.org/10.1007/s00402-021-04036-2>
- [26] Parratte, S., Price, A.J., Jeys, L.M., Jackson, W.F. and Clarke, H.D. (2019) Accuracy of a New Robotically Assisted Technique for Total Knee Arthroplasty: A Cadaveric Study. *The Journal of Arthroplasty*, **34**, 2799-2803. <https://doi.org/10.1016/j.arth.2019.06.040>
- [27] Seidenstein, A., Birmingham, M., Foran, J. and Ogden, S. (2021) Better Accuracy and Reproducibility of a New Robotically-Assisted System for Total Knee Arthroplasty Compared to Conventional Instrumentation: A Cadaveric Study. *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy*, **29**, 859-866. <https://doi.org/10.1007/s00167-020-06038-w>
- [28] Shin, C., Crovetti, C., Huo, E. and Lionberger, D. (2022) Unsatisfactory Accuracy of Recent Robotic Assisting System ROSA for Total Knee Arthroplasty. *Journal of Experimental Orthopaedics*, **9**, Article No. 82. <https://doi.org/10.1186/s40634-022-00522-7>
- [29] Mancino, F., Rossi, S.M.P., Sangaletti, R., Lucenti, L., Terragnoli, F. and Benazzo, F. (2023) A New Robotically Assisted Technique Can Improve Outcomes of Total Knee Arthroplasty Comparing to an Imageless Navigation System. *Archives of Orthopaedic and Trauma Surgery*, **143**, 2701-2711. <https://doi.org/10.1007/s00402-022-04560-9>
- [30] Li, Z., Chen, X., Wang, X., Zhang, B., Wang, W., Fan, Y., Yan, J., Zhang, X., Zhao, Y., Lin, Y., Liu, J. and Lin, J. (2022) HURWA Robotic-Assisted Total Knee Arthroplasty Improves Component Positioning and Alignment—A Prospective Randomized and Multicenter Study. *Journal of Orthopaedic Translation*, **33**, 31-40. <https://doi.org/10.1016/j.jot.2021.12.004>
- [31] Xia, R., Zhai, Z., Zhang, J., Yu, D., Wang, L., Mao, Y., Zhu, Z., Wu, H., Dai, K., Yan, M. and Li, H. (2021) Verification and Clinical Translation of a Newly Designed “Skywalker” Robot for Total Knee Arthroplasty: A Prospective Clinical Study. *Journal of Orthopaedic Translation*, **29**, 143-151. <https://doi.org/10.1016/j.jot.2021.05.006>