

# 机器人辅助膝关节单髁置换可以获得良好的术后软组织平衡:一项单间室压力传感器研究

南少奎<sup>1,2</sup> 李铁键<sup>1,2</sup> 肖龙涛<sup>3</sup> 曹正<sup>1,2,4</sup> 李想<sup>1,2</sup> 李海峰<sup>1,2</sup> 柴伟<sup>1,2</sup>

**【摘要】目的** 使用一种新型单间室压力传感器测量术中膝关节内侧间室软组织张力,验证机器人软组织动态预平衡功能的有效性,为进一步探索更加智能且精准的手术方式提供临床经验和理论指导。**方法** 本研究前瞻性纳入中国人民解放军总医院第四医学中心骨科医学部2018年1月至2023年6月收治的35例(35膝)MAKO机器人辅助内侧单髁置换手术病人,男8例,女27例,年龄为( $66.3\pm7.7$ )岁,身体质量指数为( $24.5\pm6.3$ )kg/m<sup>2</sup>。所有手术均由同一位经验丰富的外科医生完成。手术中使用机器人的软组织动态平衡功能对屈伸间隙进行预评估,并对假体的计划进行调整,使伸直和屈曲的软组织张力平衡,截骨完成后使用单髁压力传感器对内侧间室软组织张力评估,记录屈膝10°、45°、90°时内侧间室股骨和胫骨假体之间的压力。比较病人术前及术后末次随访时的疼痛视觉模拟量表(visual analogue scale, VAS)、牛津膝关节评分(Oxford knee score, OKS)、关节活动度(range of motion, ROM)以评估手术效果。**结果** 病人均获得规律随访,随访时间为( $31.8\pm14.2$ )个月。术中记录压力在屈膝10°时为( $47.3\pm20.8$ )N,屈膝45°时为( $40.1\pm18.2$ )N,屈膝90°时为( $42.7\pm19.8$ )N。病人术后OKS评分、VAS评分及ROM较术前均有明显改善,差异均有统计学意义( $P<0.05$ )。**结论** 本研究使用的新型单间室压力传感器对机器人辅助膝关节单髁置换软组织张力有着准确的评估效果。机器人软组织动态预平衡功能可以在膝关节单髁置换术截骨前对软组织张力进行准确评估并精准调整假体规划,帮助膝关节获得良好的术后软组织平衡。

**【关键词】** 机器人辅助手术;膝单髁置换术;压力传感器;软组织平衡;临床结果

**Robotic Assisted Unicompartmental Knee Arthroplasty Results in Good Postoperative Soft Tissue Balance: A Unicompartmental Pressure Sensor Study.** Nan Shaokui<sup>1,2</sup>, Li Tiejian<sup>1,2</sup>, Xiao Longtao<sup>3</sup>, Cao Zheng<sup>1,2,4</sup>, Li Xiang<sup>1,2</sup>, Li Haifeng<sup>1,2</sup>, Chai Wei<sup>1,2</sup>. <sup>1</sup>Senior Department of Orthopedics, the Fourth Medical Center of People's Liberation Army General Hospital, Beijing 100048, China; <sup>2</sup>National Clinical Research Center for Orthopedics, Sports Medicine and Rehabilitation, Beijing 100853, China; <sup>3</sup>Department of Orthopaedics, Wenshang County People's Hospital, Jining 272500, China; <sup>4</sup>School of Medicine, Nankai University, Tianjin 300071, China

Corresponding author: Chai Wei, E-mail: chaiwei301@163.com

**[Abstract]** **Objective** A novel unicompartmental pressure sensor was used to measure the intraoperative soft tissue tension in the medial compartment of the knee to validate the effectiveness of the robot's dynamic joint pre-balancing function and to provide clinical experience and theoretical guidance for exploring smarter and more precise surgical methods. **Methods** Totally, 35 patients with MAKO robot-assisted medial unicompartmental knee arthroplasty (UKA) admitted to our hospital between January 2018 and June 2023 were prospectively included in this study, including 8 males and 27 females, for a total of 35 cases and 35 knees. The age was ( $66.3\pm7.7$ ) years old, and the body mass index was ( $24.5\pm6.3$ ) kg/m<sup>2</sup>. All procedures were performed by the same experienced surgeon. The flexion and extension gaps were pre-assessed during surgery using the robot's soft tissue balancing technique and the surgical plan was adjusted to balance the soft tissue tensions in extension and flexion, and after completion of the osteotomy the soft tissue tensions in the medial compartment between the femoral and tibial component were assessed using a pressure sensor and the pressures were

DOI:10.3969/j.issn.1674-8573.2024.05.002

基金项目:国家杰出青年科学基金项目(82425036);北京市科技计划(Z221100003522014)

作者单位:1. 中国人民解放军总医院第四医学中心骨科医学部,北京 100048;2. 国家骨科与运动康复临床研究中心,北京 100853;3. 山东省汶上县人民医院骨科,山东济宁 272500;4. 南开大学医学院,天津 300071

通信作者:柴伟,E-mail:chaiwei301@163.com

recorded at 10°, 45°, and 90° of knee flexion. The patients' visual analogue scores (VAS), Oxford Knee Score (OKS), and joint range of motion (ROM) were compared preoperatively and at the final postoperative follow-up to assess the surgical outcome. **Results** Patients were regularly followed up for (38.1±14.2) months. Intraoperative recorded pressures were (47.3±20.8) N at 10° of knee flexion, (40.1±18.2) N at 45° and (42.7±19.8) N at 90°. The patients' postoperative OKS scores, VAS scores and ROM were significantly improved as compared with the preoperative period, and the differences were statistically significant ( $P<0.05$ ). **Conclusion** This novel unicompartmental pressure sensor we used has an accurate assessment of soft tissue tension in UKA. The robotic soft tissue pre-balancing function can accurately assess the soft tissue tension before osteotomy and accurately adjust the surgical planning, which can help to obtain a good soft tissue balance of the knee.

**【Key words】** Robot-assisted surgery; Unicompartmental knee arthroplasty; Pressure sensor; Soft-tissue balancing; Clinical outcomes

膝关节单髁置换术(unicompartmental knee arthroplasty, UKA)包括活动平台UKA和固定平台UKA,目前已广泛应用于治疗前内侧骨关节炎与特发性骨坏死<sup>[1-4]</sup>。与全膝关节置换术(total knee arthroplasty, TKA)相比,UKA术中创伤小、术后并发症发生率低、恢复更快、术后活动度更大等<sup>[5-9]</sup>。但是,UKA的成功高度依赖正确的截骨和平衡的软组织张力,以获得正确的假体对线和平衡且松紧合适的屈伸间隙<sup>[10]</sup>。在UKA术中实现合适的软组织张力平衡、恢复合适的软组织张力难度较大,目前仍然依赖于外科医生的主观感受和经验,无法做到量化统一。

近年来,越来越多的新技术如机器人辅助手术技术被应用于UKA以改善临床效果。机器人可以通过动态软组织平衡技术重建自然的膝关节软组织张力,同时准确地植入假体和恢复UKA的膝关节运动学来实现解剖学修复<sup>[11-14]</sup>。多项研究表明,与传统的UKA相比,机器人辅助内侧UKA假体植入更加精确<sup>[12,14-15]</sup>。因此,随着机器人辅助技术的使用,存活率和病人满意度有望得到提高<sup>[16]</sup>。Kleebald等<sup>[14]</sup>的研究显示,随访2.5年后的存活率为98.8%。很多研究聚焦于机器人辅助UKA术后假体植入精度和术后临床结果,但是我们认为良好的软组织平衡是影响UKA术后临床结果的重要因素,但是由于缺乏对软组织张力进行量化评估的方法,目前并没有评价机器人软组织平衡效果的研究。

近年来压力传感器在TKA中得到广泛应用<sup>[17-21]</sup>,其可以定量测量膝关节软组织张力,辅助术者精准实现软组织平衡。在UKA中使用压力传感器的报道极少,且仅是体外或尸体研究<sup>[22-23]</sup>,尚无临床应用的相关研究。我们团队设计了一种新型的单间室压力传感器,可以对UKA术中软组织张力定量测量。本研究的目的是使用该新型压力传感器应用于机器人辅助UKA手术,对机器人软组织平衡效果进行定

量评价,为进一步探索更加智能且精准的手术方式提供理论指导。

## 资料与方法

### 一、纳入标准与排除标准

入选标准:①明确诊断为膝前内侧间室骨关节炎或内侧间室特发性骨坏死;②膝关节内翻小于15°,膝屈曲挛缩小于15°;③接受初次单侧UKA。

排除标准:①炎症性关节病;②合并外侧间室负重区域软骨缺失或前交叉韧带功能缺失;③髌股关节向外侧半脱位或髌股关节外侧出现沟槽样改变。

### 二、一般资料

本研究纳入中国人民解放军总医院第四医学中心骨科医学部2018年1月至2023年6月收治的连续35例MAKO机器人辅助内侧UKA病人,其中男8例,女27例,年龄为(66.3±7.7)岁,身体质量指数为(24.5±6.3)kg/m<sup>2</sup>;左侧19例,右侧16例;术中均使用压力传感器进行软组织张力测量。所有手术均由同一名经验丰富的外科医生完成,术者每年进行约50例机器人辅助UKA手术,各类UKA手术量约为300台。本研究为前瞻性单中心的临床试验研究,研究方案经我院伦理委员会批准(S2018-018-01),所有病人都签署书面的知情同意书。

### 三、单间室压力传感器

单间室压力传感器是由电子测量垫片和电脑终端软件组成。其中核心部分为电子测量垫片。在术中,股骨髁试模与电子试模上表面接触,并产生一定的压力,压力值可通过电子试模中高精度压力传感器采集并通过模数转换芯片将压力值转换为数字信号。再将数据实时经蓝牙无线传输到电脑客户端中,并通过客户端软件以数字形式显示。医生在术中将垫片插入膝关节间室内,测量膝关节各屈曲角

度接触压力。通过传感器内的模数转换芯片将模拟压力值(mV)转换为数字值(N),并传输到计算机进行分析。该压力传感器工作部分厚度为6 mm,本研究使用的胫骨假体加垫片厚度最少为8 mm,我们可以根据需求使用2 mm、3 mm等不同厚度金属薄片叠加于传感器下方进行测量(图1)。

#### 四、手术技术

##### (一)手术准备

所有病人都采用全身麻醉,使用MAKO机器人(史赛克公司,美国)辅助手术。病人平卧位,患肢大腿根部上止血带,放置股骨与胫骨参考架,在屈膝90°位安装股骨参考架以避免固定钉固定股四头肌影响术中屈膝活动。手术切口均采用髌旁内侧入路。切口显露后首先确认前交叉韧带功能完整及外侧间室负重区域是否为全层软骨,之后进行股骨与胫骨的注册,注册完毕后去除骨赘。

##### (二)软组织动态平衡

使用机器人软组织动态平衡技术进行软组织张力预平衡,术者对膝关节施加外翻应力拉紧内侧副韧带,打开内侧间室关节间隙,同时在屈膝10°、45°、90°、120°由机器人捕捉股骨胫骨之间的相对位置。

此时术前规划的虚拟股骨假体与胫骨假体之间存在一个虚拟的间隙,该间隙越大表明术后软组织张力越松弛。该间隙在机器人系统内显示为间隙柱状图(图2 a)。我们通过精细调整股骨假体和胫骨假体的位置,使柱状图均为1.5 mm左右(图2 b)。

##### (三)骨面准备及软组织张力初步评估植入

假体计划调整完毕后即可开始使用机器人进行股骨和胫骨骨面准备,并钻入股骨固定孔和胫骨固定孔,植入试模后再次使用机器人对软组织平衡进行评估,确认关节软组织张力是否合适。

##### (四)内侧间室压力测量

术者对所有角度的软组织平衡均满意后,再使用压力传感器测量关节内应力情况(图3)。传感器数据记录时,将下肢保持在中立位置,每个角度测量三次并记录数据。为避免后关节囊对伸直张力的影响,伸膝间隙软组织评估在屈膝10°下测试。因此我们记录屈膝10°、45°、90°时内侧间室股骨和胫骨假体试模之间的压力。

##### 五、术后随访

所有病人术前和术后随访时进行疼痛视觉模拟量表(visual analogue scale, VAS)评分、牛津膝关节

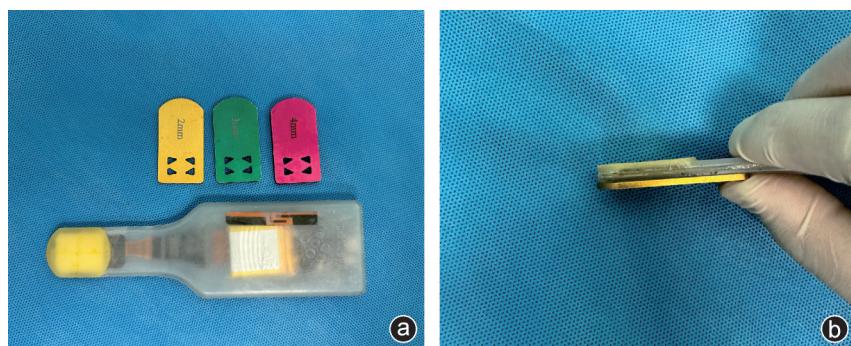


图1 新型单间室压力传感器 a:压力传感器与不同厚度金属薄片;b:将不同厚度的金属薄片叠加于传感器下方,以模拟不同厚度的胫骨试模进行压力测量

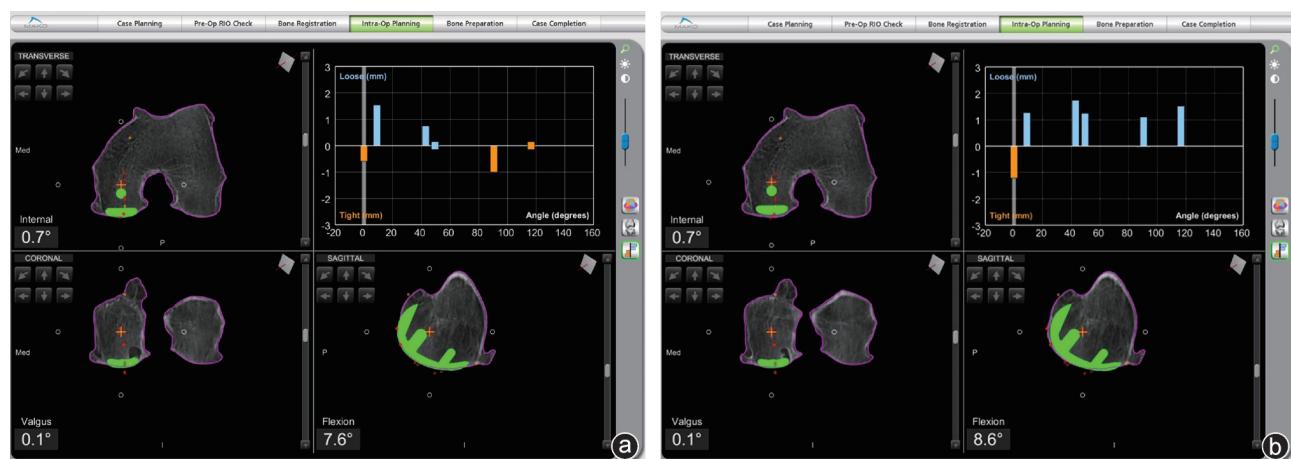
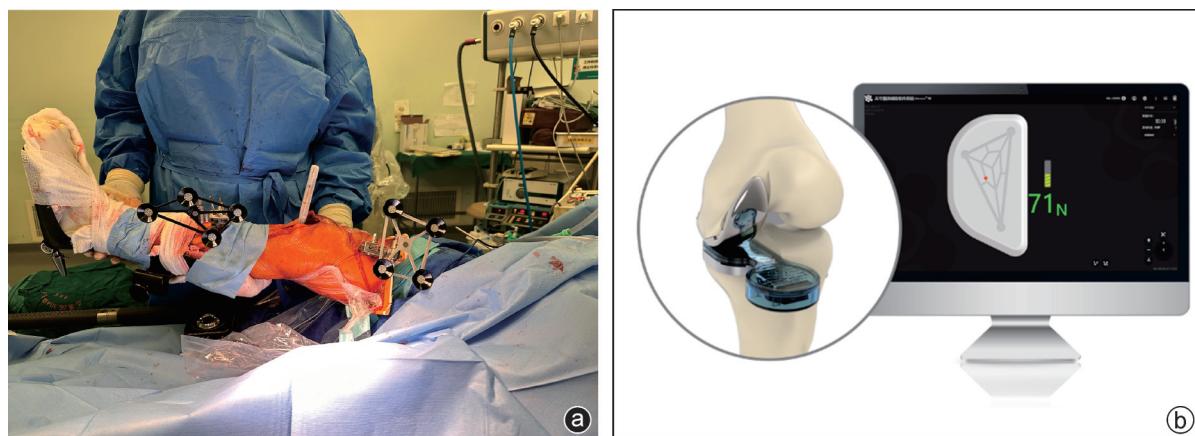


图2 机器人动态软组织平衡过程 a:采集屈膝10°、45°、90°、120°等多个角度的外翻应力下的内侧间室假体间隙,形成柱状图;b:通过调换假体位置使各柱形图均位于0~1.5 mm,即为软组织张力平衡



**图3** 单间室压力传感器测量方法 a:将压力传感器电子垫片部分插入关节间隙,同时双手托起大腿与踝关节避免重力和外力干扰进行压力测量;b:压力传感器测量及数据采集模式图

评分(Oxford knee score, OKS)、关节活动度(range of motion, ROM)测量,对术前术后的评分及ROM测量结果进行对比分析,评估手术的临床结果。

#### 六、统计学分析

所有统计分析均使用 SPSS 22.0 软件(IBM 公司,美国)进行。计量资料使用 Kolmogorov-Smirnov 检验评估数据分布的正态性,服从正态分布的数据以均值±标准差表示。使用组内相关系数(ICC)分析压力传感器三次测量数据的一致性。对病人屈膝 10°、45°与 90°压力测量数据分别进行配对 t 检验,对比同一病人各屈膝角度压力数据是否存在差异;以  $P < 0.05$  为差异有统计学意义。

#### 结 果

病人每个屈膝角度三次测量数据之间的 ICC 值为 0.835,大于 0.8,显示该传感器具有良好的可靠性。术中记录压力在屈膝 10°时为(47.3±20.8) N,屈膝 45°时为(40.1±18.2) N,屈膝 90°时为(42.7±19.8) N,三组压力数据分别对比,差异无统计学意义( $P > 0.05$ )。

病人随访时间为(31.8±14.2)个月(12~78 个月)。与术前比较,术后 ROM、OKS 评分和 VAS 评分有明显改善,其差异均有统计学意义( $P < 0.05$ ,表 1)。治疗期间未发生严重的术中及术后并发症。

**表1** 病人 ROM、VAS 评分、OKS 评分术前术后比较( $\bar{x} \pm s$ )

时间	ROM(°)	VAS 评分(分)	OKS 评分(分)
术前	127.3±10.0	6.5±1.0	26.4±7.1
末次随访	132.4±7.6	1.4±1.1	1.7±2.1
t 值	-3.164	11.886	14.239
P 值	0.003	<0.001	<0.001

#### 讨 论

我们的研究获取了机器人 UKA 病人术中内侧间室在屈膝 10°、45°、90°时的压力,并对不同屈膝角度压力分别进行配对比较,结果显示各角度压力之间均无显著性差异。这提示机器人辅助 UKA 可以使病人术后不同的屈膝角度均获得相近的软组织张力大小,达到了良好的内侧间室软组织张力平衡。病人术后均获得满意的临床效果,大多数病人 OKS 评分恢复至 0 分,这也充分体现了良好软组织平衡的优势。

良好的假体位置和软组织张力平衡是影响 UKA 病人预后的重要因素;而 UKA 对假体位置有着较高的容忍度<sup>[24]</sup>,所以良好的屈伸软组织张力平衡可能是影响预后的最重要步骤。不适合的软组织张力及垫片型号会增加术后关节松弛或外侧间室退变加速的风险,造成严重的并发症。较小的术野对于手术操作有较高的要求,尤其是评估软组织状态。软组织状态在不同病人间存在差异,甚至麻醉及肌肉松弛程度也对其有影响,这给术中判断带来了挑战。

机器人辅助技术有助于实现关节置換术中精准截骨,其搭载的软组织平衡和评估功能可以对软组织张力进行预评估。通过假体位置的调整对屈伸间隙进行调整使内侧间室屈伸间隙相等,从而使膝关节屈膝全程均获得合适且均一的术后软组织张力<sup>[25]</sup>。但是机器人对于软组织张力的评估仍然是基于骨性结构距离的测量,并不能获取直接的软组织张力数据<sup>[26]</sup>,因此也无法对机器人软组织平衡效果进行直接评价。

为了对机器人 UKA 术中软组织张力进行直接

定量测量,从而直接验证机器人软组织平衡的效果,我们设计并制作的这种新型压力传感器,可以在UKA术中对膝关节软组织张力进行定量测量。不同于Sun等<sup>[23]</sup>的研究,我们的传感器直接模拟了垫片形状与厚度并替代插入,而不是在垫片试模下额外插入传感器。本团队既往的研究结果<sup>[27]</sup>显示这种单间室压力传感器性能稳定,可以精准测量关节内应力。该工具能够数字化监测和记录UKA过程中内侧或外侧间室胫股关节软组织张力,将术者感觉“合适”的软组织张力进行量化,使UKA手术更加精准和统一。据我们所知,目前尚无报道类似的设备应用于临床。该工具有望为初学者或经验较少的UKA手术医生提供一种辅助工具。

压力传感器在膝关节手术中已有应用,主要集中在TKA。Gordon等<sup>[26]</sup>的研究证实了压力传感器辅助下可以获得很好的关节平衡。Gustke等<sup>[28]</sup>的研究通过对压力传感器辅助平衡的TKA病人进行随访,结果显示平衡的TKA病人术后满意度更高。但MacDessi等<sup>[29]</sup>的研究发现通过压力传感器获得的平衡膝并未显示出更好的短期随访结果。新技术的应用初期往往存在争议,但这并不会阻止研究的推进与技术的进步。对于对软组织平衡要求更高的UKA,压力传感器的研究更会逐渐开展。不同于TKA手术需要通过压力传感器测定膝关节内外侧间室屈伸的压力,UKA中的压力传感器只需要获取单侧间室在不同角度下的压力值。

本研究第一次对机器人UKA软组织张力进行了定量测量,对机器人辅助软组织平衡的结果进行了直接评价,未见类似研究报道。结果显示机器人动态软组织平衡技术是有效的,可以辅助UKA获得全程的均一软组织张力,这也为病人恢复自然膝关节运动学提供了力学基础。随着研究的进一步深入,在未来,将传感器与机器人技术相结合是可行的研究方向,以提供更为精确的术中软组织平衡方式。

本研究存在一些局限性。第一,我们获取了UKA术中内侧间室压力数据,但是UKA手术内侧间室的目标压力目前尚未可知,无法对压力测量数据进行进一步评价;第二,以单一术者手术结果作为金标准,手术完成过程可能产生误差,造成偏倚;第三,硬件设计的限制导致了传感器后部较大的体积和重量,可能会在测量过程中影响操作或造成误差。后续我们会对该传感器进行进一步优化以获取更为精准的测试结果。

本研究中使用的这种新型单间室压力传感器对

机器人辅助UKA软组织张力有着准确的评估效果。测量结果提示屈膝各角度测量的内侧间室压力均无明显差异,提示机器人软组织动态预平衡功能可以在UKA截骨前对软组织张力进行准确评估并精准调整假体规划,帮助膝关节获得良好的术后软组织平衡。

## 参 考 文 献

- [1] Hamilton TW, Pandit HG, Maurer DG, et al. Anterior knee pain and evidence of osteoarthritis of the patellofemoral joint should not be considered contraindications to mobile-bearing unicompartmental knee arthroplasty: a 15-year follow-up [J]. Bone Joint J, 2017, 99-B(5): 632-639.
- [2] Mohammad HR, Kennedy JA, Mellon SJ, et al. Ten-year clinical and radiographic results of 1 000 cementless Oxford unicompartmental knee replacements [J]. Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc, 2020, 28(5): 1479-1487.
- [3] Cao Z, Niu C, Gong C, et al. Comparison of fixed-bearing and mobile-bearing unicompartmental knee arthroplasty: a systematic review and Meta-analysis [J]. J Arthroplasty, 2019, 34(12): 3114-3123.e3.
- [4] Kim MS, Koh IJ, Kim CK, et al. Comparison of implant position and joint awareness between fixed- and mobile-bearing unicompartmental knee arthroplasty: a minimum of five year follow - up study [J]. Int Orthop, 2020, 44(11): 2329-2336.
- [5] Brown NM, Sheth NP, Davis K, et al. Total knee arthroplasty has higher postoperative morbidity than unicompartmental knee arthroplasty: a multicenter analysis [J]. J Arthroplasty, 2012, 27(8 Suppl): 86-90.
- [6] Lum ZC, Lombardi AV, Hurst JM, et al. Early outcomes of twin-peg mobile-bearing unicompartmental knee arthroplasty compared with primary total knee arthroplasty [J]. Bone Joint J, 2016, 98-B (10 Supple B): 28-33.
- [7] Mohammad HR, Liddle AD, Judge A, et al. A matched comparison of long-term outcomes of total and unicompartmental knee replacements in different ages based on national databases: analysis of data from the National Joint Registry for England, Wales, Northern Ireland, and the Isle of Man [J]. J Arthroplasty, 2022, 37(2): 243-251.
- [8] Jensen CB, Petersen PB, Jorgensen CC, et al. Length of stay and 90-day readmission/complication rates in unicompartmental versus total knee arthroplasty: a propensity - score - matched study of 10, 494 procedures performed in a fast-track setup [J]. J Bone Joint Surg Am, 2021, 103(12): 1063-1071.
- [9] Strickland LH, Rahman A, Jenkinson C, et al. Early recovery following total and unicompartmental knee arthroplasty assessed using novel patient-reported measures [J]. J Arthroplasty, 2021, 36(10): 3413-3420.
- [10] 张启栋,王卫国,郭万首.如何实现Oxford单髁置换的准确截骨和术后稳定[J].生物骨科材料与临床研究,2022,19(1): 1-5.
- [11] Zhang J, Ng N, Scott CEH, et al. Robotic arm-assisted versus manual unicompartmental knee arthroplasty: a systematic review and meta-analysis of the MAKO robotic system [J]. Bone Joint J, 2022, 104-B(5): 541-548.
- [12] Banger M, Doonan J, Rowe P, et al. Robotic arm-assisted versus conventional medial unicompartmental knee arthroplasty: five-year clinical outcomes of a randomized controlled trial [J]. Bone Joint J, 2021, 103-B(6): 1088-1095.

- [13] Zambianchi F, Franceschi G, Rivi E, et al. Clinical results and short-term survivorship of robotic-arm-assisted medial and lateral unicompartmental knee arthroplasty[J]. Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc, 2020, 28(5): 1551-1559.
- [14] Kleebald LJ, Borus TA, Coon TM, et al. Midterm survivorship and patient satisfaction of robotic-arm-assisted medial unicompartmental knee arthroplasty: a multicenter study[J]. J Arthroplasty, 2018, 33(6): 1719-1726.
- [15] Gilmour A, MacLean AD, Rowe PJ, et al. Robotic-arm-assisted vs conventional unicompartmental knee arthroplasty. The 2-year clinical outcomes of a randomized controlled trial [J]. J Arthroplasty, 2018, 33(7S): S109-S115.
- [16] Ruderman LV, Bayoumi T, Ten Noever de Brauw GV, et al. Robotic-arm-assisted lateral unicompartmental knee arthroplasty leads to high implant survival and patient satisfaction at mean 10-year follow-up [J]. Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc, 2024, 32(9): 2297-2308.
- [17] Chow J, Law TY, Roche M. Sensor-based soft tissue balancing in total knee arthroplasty[J]. Adv Exp Med Biol, 2018, 1093: 327-334.
- [18] 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[J]. Bone Joint J, 2021, 103-B(3): 507-514.
- [19] Zhao R, Liu Y, Tian H. Accuracy of soft tissue balancing in total knee arthroplasty using surgeon-defined assessment versus a gap-balancer or electronic sensor[J]. J Orthop Surg Res, 2021, 16(1): 305.
- [20] Thompson K, Griffiths-Jones W, Frendin L, et al. Interobserver agreement of sensor-derived compartmental pressure measurements in computer-assisted total knee arthroplasty [J]. Knee, 2020, 27(3): 717-722.
- [21] Manning W, Ghosh M, Wilson I, et al. Improved mediolateral load distribution without adverse laxity pattern in robot-assisted knee arthroplasty compared to a standard manual measured resection technique[J]. Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc, 2020, 28(9): 2835-2845.
- [22] Mentink MJA, Van Duren BH, Murray DW, et al. A novel flexible capacitive load sensor for use in a mobile unicompartmental knee replacement bearing: an *in vitro* proof of concept study [J]. Med Eng Phys, 2017, 46: 44-53.
- [23] Sun X, Hernigou P, Zhang Q, et al. Sensor and machine learning-based assessment of gap balancing in cadaveric unicompartmental knee arthroplasty surgical training [J]. Int Orthop, 2021, 45(11): 2843-2849.
- [24] Kang KT, Koh YG, Son J, et al. Comparison of kinematics in cruciate retaining and posterior stabilized for fixed and rotating platform mobile-bearing total knee arthroplasty with respect to different posterior tibial slope[J]. Biomed Res Int, 2018, 2018: 5139074.
- [25] Klasan A, Carter M, Holland S, et al. Low femoral component prominence negatively influences early revision rate in robotic unicompartmental knee arthroplasty[J]. Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc, 2020, 28(12): 3906-3911.
- [26] Gordon AC, Conditt MA, Verstraete MA. Achieving a balanced knee in robotic TKA[J]. Sensors (Basel), 2021, 21(2): 535.
- [27] Nan S, Cao Z, Song Y, et al. Can mobile-bearing unicompartmental knee arthroplasty achieve natural gap-balancing? An observational study with a novel pressure sensor[J]. J Orthop Surg Res, 2022, 17(1): 407.
- [28] Gustke KA, Golladay GJ, Roche MW, et al. Increased satisfaction after total knee replacement using sensor-guided technology [J]. Bone Joint J, 2014, 96-B(10): 1333-1338.
- [29] MacDessi SJ, Cohen DA, Wood JA, et al. Does the use of intraoperative pressure sensors for knee balancing in total knee arthroplasty improve clinical outcomes? A comparative study with a minimum two-year follow-up[J]. J Arthroplasty, 2021, 36(2): 514-519.

(收稿日期: 2024-08-27)

(本文编辑:龚哲妮)

#### 引用格式

南少奎,李铁键,肖龙涛,等.机器人辅助膝关节单髁置换可以获得良好的术后软组织平衡:一项单间室压力传感器研究[J].骨科,2024,15(5): 388-393. DOI:10.3969/j.issn.1674-8573.2024.05.002.