

# 计算机导航技术在关节镜手术中的应用进展\*

王宇桐<sup>①</sup> 综述 徐永胜\*\* 齐岩松\*\* 审校

(内蒙古自治区人民医院骨科中心, 呼和浩特 010017)

文献标识: A 文章编号: 1009-6604(2023)10-0788-06

doi: 10.3969/j.issn.1009-6604.2023.10.013

关节镜手术存在镜下可操作空间小、可视化和触觉反馈差等局限性。为追求更小的侵袭性, 同时实现更高的精确性, 计算机导航技术被引入到关节镜手术中。导航作为一种可视化系统, 通过对手术器械、植入物、患者解剖等三维立体定位, 以及相关影像学数据的处理分析和可视化技术, 从而辅助术中实现实时动态追踪<sup>[1]</sup>。理论上, 计算机导航技术凭借自身优势可应对视觉复杂的关节镜下环境, 但在实际应用中却存较大差距。目前, 导航在关节镜手术中的应用主要集中在前交叉韧带 (anterior cruciate ligament, ACL) 重建中骨隧道的定位和股骨髁臼撞击 (femoroacetabular impingement, FAI) 中对病变骨组织的切割, 相较于骨科其他亚专科, 还处于起步阶段。本文对计算机导航技术在关节镜手术中的应用与进展进行文献总结。

## 1 关节镜手术中的计算机导航技术

21 世纪以来, 伴随着数字化技术与临床的紧密结合, 成像技术的进步使手术视野和患者解剖的三维可视化成为可能, 计算机技术的进步实现了器械和植入物的实时跟踪, 这些创新技术的叠加, 共同催生了计算机导航技术<sup>[2]</sup>。根据传统定义, 导航可分为两大类: ①基于透视、CT、MRI 等图像导航; ②无图像导航。最新研发的基于加速度计原理的便携式导航, 精度水平可靠, 且成本更低, 便携性更高, 已应用于人工关节置换中, 具有广阔的应用前景<sup>[3,4]</sup>。

目前, 应用最广泛的是基于大型控制台的光学计算机导航<sup>[5]</sup>, 通过计算机将手术与三维立体定位、图像处理、可视化技术等相结合, 动态显示植入物与解剖结构的实时位置信息。在关节镜手术中, 常用的导航系统也均是基于上述基本原理, 新兴导航如电磁导航、超声导航、便携式导航等在关节镜手术中鲜有应用。

## 2 计算机导航技术在各类关节镜手术中的应用

### 2.1 膝关节镜

计算机导航技术最早应用于膝关节镜手术, 并且主要集中于 ACL 重建中。目前, 主要在以下 2 个方面: ①骨隧道的定位; ②ACL 重建中的运动学评估。

#### 2.1.1 骨隧道的定位

尽管 ACL 重建是骨科中最常见的手术之一, 但仍有 1.8% ~ 12.3% 的失败率<sup>[6]</sup>, 其中 70% ~ 80% 的原因是由骨隧道的非解剖定位引起的<sup>[7]</sup>。在 ACL 重建中, 影响骨隧道定位的因素很多, 如医生的经验、镜下的视野以及和解剖标志相关的正确隧道规划, 即使在有经验的外科医生中, 隧道位置也存在合理的变异性<sup>[8]</sup>。Tampere 等<sup>[9]</sup>的生物力学研究表明, 解剖重建更有利于恢复膝关节的稳定性, 且比等距重建效果更好, 因此, 准确的获得骨隧道解剖位置成为影响手术成功的关键。计算机导航技术在诸多研究中证明其准确性。1995 年 Dessenne 等<sup>[10]</sup>进

\* 基金项目: 国家自然科学基金项目 (81960399); 内蒙古自治区科技计划项目 (2023YFSH0020); 内蒙古自治区自然科学基金项目 (2018BS08002)

\*\* 通讯作者, E-mail: dlxyf@163.com (徐永胜), malaqinfu@126.com (齐岩松)

① (内蒙古医科大学研究生院, 呼和浩特 010110)

行了首次计算机辅助 ACL 重建的临床试验,他们使用一台工作站和三维光学定位器构建的系统,在 8 具尸体试验中测得的误差均  $< 2$  mm,同时测量 12 例患者的股骨隧道位置,误差范围 1.5 ~ 6.8 mm,平均 3.0 mm。这些初步结果增强了人们对计算机辅助技术的兴趣。Kawakami 等<sup>[11]</sup>比较 19 例导航辅助与 18 例传统手术在术后矢状位平片上胫骨和股骨隧道的位置,导航组骨隧道位置明显更接近于术前规划的位置,提高了骨隧道放置的准确性和可重复性。在提高胫骨隧道准确性方面,在一项 60 例的随机对照研究中,Plaweski 等<sup>[12]</sup>比较国际膝关节文献委员会(International Knee Documentation Committee, IKDC)评分、胫骨隧道位置的影像学数据(ATB 值):导航组膝关节松弛度的变异性明显小于常规组,且常规组中平均 ATB 值为  $-0.2$ ,导航组为  $0.4$  (ATB 负值提示移植物的髁间撞击),即传统的隧道放置有更大的错位风险从而导致更高的失败率。Mauch 等<sup>[13]</sup>验证导航为正确放置胫骨隧道提供良好的支持。Hart 等<sup>[14]</sup>的一项前瞻性随机对照研究导航组(40 例)和传统手术组(40 例)术后骨隧道放射学数据显示,导航组股骨侧隧道中心位置更精确( $P < 0.01$ )。邱洪九等<sup>[15]</sup>也得出相似的结果。相比胫骨隧道,股骨隧道定位不准更容易导致手术失败,因此,准确获得股骨隧道位置十分重要<sup>[16]</sup>。

随着一期 ACL 重建数量的增加,翻修 ACL 重建术随之增加<sup>[17]</sup>,导航技术在 ACL 翻修中也有令人满意的表现。Nakagawa 等<sup>[18,19]</sup>使用三维透视导航,凭借其能够增强术中可视化的优势,先后在翻修 ACL 胫骨隧道和股骨隧道中,提高隧道定位准确性和可重复性。Plaweski 等<sup>[20]</sup>在 52 例失败的 ACL 重建中使用导航辅助翻修 ACL 重建并对新、旧隧道的位置、手术前后松弛度变化以及生物力学进行评估,结果显示基于传统放射学标准的骨隧道位置中,36 例移植物测量结果不佳,胫骨、股骨隧道位置正确率分别是 64% 和 48%,严重低估了移植物的生物力学;新移植物在导航辅助下进行了最佳定位,等距( $3.2 \pm 0.7$ )mm,术前、术后整体旋转松弛度分别为  $37^\circ \pm 7^\circ$  ( $28^\circ \sim 52^\circ$ ) 和  $24^\circ \pm 5^\circ$  ( $18^\circ \sim 30^\circ$ ),差异有统计学意义( $P < 0.001$ )。

虽然在诸多研究中导航的加入提高了隧道位置的准确性,但对于能否获得更佳的术后效果仍存争

议。Eggerding 等<sup>[21]</sup>的荟萃分析纳入 5 项随机对照研究(366 例),主要指标为 IKDC 评分、Lysholm 评分、膝关节功能相关指标等,次要指标为膝关节稳定性、隧道位置等,结果显示导航辅助与传统 ACL 重建的结果无差异。Margier 等<sup>[22]</sup>的一项多中心队列研究显示,导航用于 ACL 重建的可行性和潜在利益,从医院的角度来看,目前尚不具有成本效益。当然上述研究存在样本量较少,随访时间较短等局限性。同时,不同研究基于不同的导航系统和理论方法,在尸体标本、模型或患者膝关节上进行,使结果和结论的可比性变得复杂。

## 2.1.2 ACL 重建中的运动学评估

即使导航技术在骨隧道定位中的实际临床效果存在争议,但因其能提供对膝关节松弛程度进行多维度的定量评估,被更多地用于评估 ACL 重建中的运动学和不同手术方法获得的稳定性。Nakamae 等<sup>[23]</sup>使用导航评估 ACL 残留物对膝关节松弛度的影响,并提出保留残存的 ACL 重建可能有利于生物力学的稳定。在一项回顾性研究中,Signorelli 等<sup>[24]</sup>纳入 100 例导航 ACL 重建,并对膝关节松弛情况进行分析,结果显示即使 ACL 重建很成功,术前如果呈现高松弛度的患者术后仍保持较高的松弛程度。Yamamoto 等<sup>[25]</sup>使用导航量化轴移试验中的胫骨后复位(posterior tibial reduction, PTR)和拉赫曼实验中的胫骨前移(anterior tibial translation, ATT),以评估膝关节松弛程度,100 例 ACL 重建,术前松弛程度越高,术后越容易发生轴移(术后发生轴移患者术前 PTR、ATT 均值分别为 9.8、15.8 mm,未发生术后轴移患者分别为 5.0、11.9 mm)。

除评估膝关节的稳定性外,用导航来量化双束 ACL 重建中的生物力学是另一重要方向,且对于双束重建是否优于单束重建存在争议。Koga 等<sup>[26]</sup>纳入 11 例双束 ACL 重建,术中将前内侧束和后外侧束暂时固定在移植物张力系统上,在不同移植物固定角度中,20°固定前内侧束,20°或 45°固定后外侧束,比单独重建前内侧束或后外侧束的膝关节稳定性更好。Nakamae 等<sup>[27]</sup>测量 15 例双束 ACL 重建前内侧束和后外侧束在被固定前、后的膝关节前后和旋转松弛度,结果显示在控制胫骨旋转方面,前内侧束固定与后外侧束固定在运动范围内无显著差异(膝关节屈曲角度 20° ~ 60°,  $P > 0.05$ )。双束重建

仅在膝关节屈曲角度为  $20^{\circ}$  和  $25^{\circ}$  时能够显著控制胫骨旋转(手术前后胫骨内旋角度均值分别为  $11.3^{\circ}$  vs.  $21.3^{\circ}$  和  $15.2^{\circ}$  vs.  $22.3^{\circ}$ ,  $P < 0.05$ )。在一项前瞻性随机对照研究中, Ikuta 等<sup>[28]</sup> 比较 17 例单束和双束重建的运动学数据, 二者在膝关节屈曲  $20^{\circ} \sim 50^{\circ}$  的胫骨前移和胫骨总旋转角度差异无统计学意义, 认为单束重建在生物力学和膝关节旋转稳定性方面与双束重建具有可比性。可见, 计算机导航技术凭借其技术优势, 能够实时获取所需的运动学参数, 正逐渐成为量化膝关节稳定性和更好地了解复合损伤对膝关节运动学影响的重要工具, 对提高 ACL 重建效果和了解生物力学带来很大帮助。

## 2.2 髌关节镜

髌关节镜手术是治疗 FAI 的有效方法。由于髌关节周围有较大的软组织包裹, 使其可视化和空间意识很差, 导致关节镜下的手术区域受到限制。在矫正 FAI 时, 评估 FAI 的原因及骨切除的区域范围和充分性十分重要, 切除不足症状会复发, 过度切除可能导致股骨颈骨折、股骨头缺血性坏死或是因髌关节吸力密封环境被破坏引起生物力学改变<sup>[29]</sup>。计算机导航技术因能在术前规划及术中动态显示个体患者的病理解剖结构, 在近些年成为辅助髌关节镜下治疗 FAI 的潜在可能。

Brunner 等<sup>[30]</sup> 的前瞻性研究比较导航组 (25 例) 和传统手术组 (25 例) 治疗凸轮型 FAI 患者的手术前后 Alpha 角的改善情况、疼痛视觉模拟评分、髌关节活动范围等, 结果显示: Alpha 角由平均  $76.5^{\circ}$  ( $57^{\circ} \sim 110^{\circ}$ ) 改善至  $54.2^{\circ}$  ( $40^{\circ} \sim 84^{\circ}$ )。2 组均有 6 例 (24%) 矫正不充分, 导航组也未能改善 Alpha 角矫正不足的比率, 这可能是因为未进行术前计划, 没有详细了解撞击区域和切除的骨量。Almoussa 等<sup>[31]</sup> 使用相同的导航系统, 利用术前 CT 和导航生成术前计划, 由外科医生使用带有标记序列的指针来绘制矫正区域, 以确保按照术前计划进行切除, 在模型试验中, 导航组 Alpha 角中位数大于传统手术组 ( $71.0^{\circ}$  vs.  $58.6^{\circ}$ ,  $P = 0.05$ ), 明显改善了 Alpha 角, 同时让新手医生可以同专家一样实现相同的股骨成形精度, 从而能够降低学习曲线。在一项随机对照研究中, Van Houcke 等<sup>[32]</sup> 比较导航 (15 例) 和传统手术 (14 例) 治疗凸轮型 FAI 骨切除的精确度, 与常规组相比, 导航组平均最大  $\alpha$  角明显改善 ( $55^{\circ}$

vs.  $66^{\circ}$ ,  $P = 0.023$ ), 特别是在 12 点钟位置 ( $45^{\circ}$  vs.  $60^{\circ}$ ,  $P = 0.041$ ), 同时导航组术后的模拟骨骼活动范围也有明显改善; 与传统手术相比, 辐射暴露量大、安装时间长是导航的主要缺点。同样, Kobayashi 等<sup>[33,34]</sup> 借助导航生成三维图像, 协助术前计划并提供术中导航支持, 评估 20 例接受导航辅助治疗患者的骨切除面积轮廓, 所有的凸轮切除均在预定区域, 切除深度误差在 3 mm 以内者占 91.3%, 过度切除占 3.6%, 切除不足占 5.1%, 证明计算机导航可提高髌关节镜手术治疗 FAI 的精确度。在治疗 FAI 中, 导航让术前计划更加完善, 从而能更充分地评估切除范围, 指导术中做到精确切割, 从现有的研究中来看较传统手术效果更好, 证明其在髌关节镜手术中的应用前景。

## 2.3 肩关节镜

目前, 关于导航辅助肩关节镜的相关研究并不多见, 在有限的报道中展现了其在肩关节镜中的应用潜力。在治疗肩锁关节损伤中, 关节镜下重建喙锁韧带是其常规手段。重建喙锁韧带时需要在喙突上钻孔建立骨道, 当需要多次尝试才能找到最佳钻孔位置时, 可能会发生喙突骨折, 从而导致手术失败或预后不良。Theopold 等<sup>[35]</sup> 报道导航辅助肩关节镜下喙锁韧带重建 35 例, 术前患侧肩喙锁平均距离为 22.6 mm, 术后平均距离为 8.8 mm; 随访期间患侧肩喙锁的平均差值为 4 mm, 与健侧肩关节差异无显著性 ( $P = 0.06$ )。可见, 导航能够提高喙锁韧带骨隧道定位的精确度, 有效降低相对于传统手术中多次钻探带来的骨折风险, 同时减少了术中辐射暴露。Hoffmann 等<sup>[36]</sup> 使用自主研发的电磁导航, 在 16 具尸体上骨隧道均成功放置, 且 15 例定位在理想的中心位置。在肩袖修补中, 为检验导航辅助下缝合锚插入的准确性和可靠性, Micic 等<sup>[37]</sup> 对 5 名新手外科医生在肩关节模型上进行测试: 无导航和有导航的平均角度误差分别为  $17^{\circ}$  和  $2^{\circ}$  ( $P < 0.05$ ), 平移误差分别为 15、3 mm ( $P < 0.05$ ), 导航的使用确实让误差更小, 缝合锚固定的更准确可靠, 并且其提供的解剖位置的多平面可视化, 能够帮助外科医生更好地了解周围的解剖结构, 在术前规划中更好地决定缝合锚的角度和位置。同时, 对于 Bankart 损伤修复, 适合的缝合锚放置位置十分重要。Pan 等<sup>[38]</sup> 对 20 例进行初步研究 (导航组 10



例,传统组 10 例),将关节盂分为 4 个区,比较 2 组在每个区域内缝合锚的穿透率:在 3 区,传统组和导航组穿透率分别为 40.9% 和 15.7% ( $P=0.077$ ),在 4 区二者穿透率分别为 11.1% 和 16.6%,虽然差异无统计学意义( $P=0.657$ ),但导航辅助缝合锚准确性有提高的趋势,验证了导航在肩关节镜下关节囊修复术中的适用性。

## 2.4 其他关节镜的应用及进展

在踝关节镜中,为避免植入螺钉时距骨内部发生碰撞,Park 等<sup>[39]</sup>自主研发一种外固定器和中空螺钉构建的三维导航钻头导向器,该技术可在螺钉插入之前预测螺钉轨迹,从而防止了螺钉碰撞,并在踝关节模型上进行插入螺钉测试中取得良好效果,展现出其在辅助踝关节融合术经皮螺钉固定的可行性。Shigi 等<sup>[40,41]</sup>的初步研究中,利用导航提供的对手术器械和骨撞击损伤部位的实时跟踪,可以有效实现对病变部位的按计划切除,3 位医生在 15 个 3D 打印的肘关节炎模型上使用导航辅助关节镜下关节清理,整个肘关节的空间误差为 1.13 mm,切除体积比计划平均多 8%,计划面积的 85% 被切除。Zemirline 等<sup>[42]</sup>开发和评估了一台用于腕关节镜检查的基于电磁传感器的导航系统,该系统由关节镜图像采集装置、电磁定位系统和数据处理装置组成,能够在关节镜视图上精确的显示器械的理论位置,将对腕关节镜手术有很大帮助。

近些年,伴随着组织工程、逆向工程、人工智能等技术的发展,计算机导航也不仅以单一辅助技术存在。Liu 等<sup>[43]</sup>将 3D 打印技术与导航结合应用于 ACL 重建中,对 20 例常规手术和 23 例 3D 打印导航模板的比较结果显示:与导航组相比,常规组股骨隧道位置更下、更浅,胫骨隧道位置更靠近胫骨平台前、内侧边缘,股骨止点深度超出推荐范围,并且 3D 打印的导航模板可以直接定位骨隧道中心点,从而缩短术中定位时间,证明了 3D 打印导航模板具有良好的定位精度,可以改善骨隧道位置个体化差异的问题。Chen 等<sup>[44]</sup>针对二维关节镜手术中手眼协调困难,以及小切口对于手术视野限制等问题,提出一种具有增强关节镜信息的新型原位增强现实导航系统。通过关节镜图像获得术中解剖位置,基于组织属性的模型变形方法,利用解剖位置信息对三维膝关节模型进行更新,并将更新后的模型进一步渲

染为无需眼镜的真实 3D 显示,从而实现 AR 视图。该 AR 导航能够准确反映关节内的结构信息,平均误差为 0.32 mm。同时,与 2D 关节镜导航相比,在膝关节模型和离体猪膝关节实验中使用此导航系统分别降低了 2.10、2.70 mm 的定位误差,这将有助于提高关节镜手术中的精确度。

## 3 局限性

现阶段计算机导航技术在关节镜手术中的应用种类较少,领域较窄,除在 ACL 重建和 FAI 的治疗外,其他多停留在模型或尸体试验中,还未广泛应用于临床,仍需大量的临床试验来积累数据和经验,并且缺乏对此项技术的长期随访研究。与任何应用到临床中的新技术一样,其终极目标是反映在患者身上临床效果的改善。在 ACL 重建中使用导航系统可以获得更准确和更具解剖学意义的骨隧道位置,但导航重建和传统重建的临床结果相似,同样的问题也存在于其他关节镜的应用当中。关于其能否带来更好的临床效果,仍需要更加长期和大量的临床研究加以佐证。目前,导航系统仍存在包括术中难以注册、操作复杂性、不十分可靠的准确性等自身技术问题需要解决。导航需要提前安装调试,甚至有些需要额外的操作来植入标志物,不仅延长手术时间,也提高手术风险<sup>[1,45,46]</sup>。同时,导航设备是昂贵的,我们必须考虑购买和维护设备的成本和效益问题。就像任何一项新的技术,由于自身不成熟性和术者经验等原因,存在手术效果提升并不显著,成本效益不高问题也是合理的,相信随着技术的升级再加上一定手术量的积累,以上问题会得到改善。

## 4 小结

目前,计算机导航技术在关节镜手术中的应用尚未成熟。但不可否认的是,导航的加入为关节镜手术的发展带来更多的选择和益处:完善术前规划,术中实时追踪反馈,提供更高的精确度和三维可视化,降低学习曲线等。随着计算机技术和人工智能高速发展与临床的结合愈加紧密,更高精度和更微创的个性化手术需求不断增长,相信计算机导航辅助手术会被越来越多的骨科、运动医学科医生采用,使广大患者受益。

## 参考文献

- Kubicek J, Tomanec F, Cerny M, et al. Recent trends, technical concepts and components of computer-assisted orthopedic surgery systems: a comprehensive review. *Sensors (Basel)*, 2019, 19 (23): 5199.
- Karkenny AJ, Mendelis JR, Geller DS, et al. The role of intraoperative navigation in orthopaedic surgery. *J Am Acad Orthop Surg*, 2019, 27 (19): e849 – e858.
- Minoda Y, Hayakawa K, Hagio K, et al. Usefulness of an accelerometer-based portable navigation system for total knee arthroplasty: a multicenter prospective randomized controlled trial. *J Bone Joint Surg Am*, 2020, 102 (22): 1993 – 2000.
- Kiyohara M, Hamai S, Shiimoto K, et al. Does accelerometer-based portable navigation provide more accurate and precise cup orientation without prosthetic impingement than conventional total hip arthroplasty? A randomized controlled study. *Int J Comput Assist Radiol Surg*, 2022, 17 (6): 1007 – 1015.
- 马崇文, 李睿, 阎亮, 等. 计算机导航技术在全膝关节置换术中的应用进展. *中国医学物理学杂志*, 2019, 36 (3): 369 – 372.
- Mohan R, Webster KE, Johnson NR, et al. Clinical outcomes in revision anterior cruciate ligament reconstruction: a meta-analysis. *Arthroscopy*, 2018, 34 (1): 289 – 300.
- Kamath GV, Redfern JC, Greis PE, et al. Revision anterior cruciate ligament reconstruction. *Am J Sports Med*, 2011, 39 (1): 199 – 217.
- Shafizadeh S, Balke M, Hagn U, et al. Variability of tunnel positioning in ACL reconstruction. *Arch Orthop Trauma Surg*, 2014, 134 (10): 1429 – 1436.
- Tampere T, Devriendt W, Cromheecke M, et al. Tunnel placement in ACL reconstruction surgery: smaller inter-tunnel angles and higher peak forces at the femoral tunnel using anteromedial portal femoral drilling-a 3D and finite element analysis. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*, 2019, 27 (8): 2568 – 2576.
- Dessenne V, Lavallee S, Julliard R, et al. Computer-assisted knee anterior cruciate ligament reconstruction: first clinical tests. *J Image Guid Surg*, 1995, 1 (1): 59 – 64.
- Kawakami Y, Hiranaka T, Matsumoto T, et al. The accuracy of bone tunnel position using fluoroscopic-based navigation system in anterior cruciate ligament reconstruction. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*, 2012, 20 (8): 1503 – 1510.
- Plaweski S, Cazal J, Rosell P, et al. Anterior cruciate ligament reconstruction using navigation: a comparative study on 60 patients. *Am J Sports Med*, 2006, 34 (4): 542 – 552.
- Mauch F, Apic G, Becker U, et al. Differences in the placement of the tibial tunnel during reconstruction of the anterior cruciate ligament with and without computer-assisted navigation. *Am J Sports Med*, 2007, 35 (11): 1824 – 1832.
- Hart R, Krejzla J, Svab P, et al. Outcomes after conventional versus computer-navigated anterior cruciate ligament reconstruction. *Arthroscopy*, 2008, 24 (5): 569 – 578.
- 邱洪九, 李帅峰, 谢川江, 等. 计算机导航系统辅助前交叉韧带重建术定位的准确性及其效果. *中华创伤杂志*, 2020, 36 (2): 183 – 189.
- Cohen D, Yao PF, Uddandam A, et al. Etiology of failed anterior cruciate ligament reconstruction: a scoping review. *Curr Rev Musculoskelet Med*, 2022, 15 (5): 394 – 401.
- 陈国飞, 江长青, 崔磊, 等. 同种异体肌腱混合自体肌腱双束重建法行前交叉韧带重建失败翻修手术. *中国微创外科杂志*, 2019, 19 (12): 1096 – 1099.
- Nakagawa T, Hiraoka H, Fukuda A, et al. Fluoroscopic-based navigation-assisted placement of the tibial tunnel in revision anterior cruciate ligament reconstruction. *Arthroscopy*, 2007, 23 (4): 443. e1 – e4.
- Taketomi S, Inui H, Nakamura K, et al. Three-dimensional fluoroscopic navigation guidance for femoral tunnel creation in revision anterior cruciate ligament reconstruction. *Arthrosc Tech*, 2012, 1 (1): e95 – e99.
- Plaweski S, Schlatterer B, Saragaglia D, et al. The role of computer assisted navigation in revision surgery for failed anterior cruciate ligament reconstruction of the knee: A continuous series of 52 cases. *Orthop Traumatol Surg Res*, 2015, 101 (6 Suppl): S227 – S231.
- Eggerding V, Reijman M, Scholten RJ, et al. Computer-assisted surgery for knee ligament reconstruction. *Cochrane Database Syst Rev*, 2014, 2014 (9): CD007601.
- Margier J, Tchouda SD, Banihachemi JJ, et al. Computer-assisted navigation in ACL reconstruction is attractive but not yet cost efficient. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*, 2015, 23 (4): 1026 – 1034.
- Nakamae A, Ochi M, Deie M, et al. Biomechanical function of anterior cruciate ligament remnants: how long do they contribute to knee stability after injury in patients with complete tears? *Arthroscopy*, 2010, 26 (12): 1577 – 1585.
- Signorelli C, Bonanzinga T, Lopomo N, et al. Do pre-operative knee laxity values influence post-operative ones after anterior cruciate ligament reconstruction? *Scand J Med Sci Sports*, 2013, 23 (4): e219 – e224.
- Yamamoto Y, Tsuda E, Maeda S, et al. Greater laxity in the anterior cruciate ligament-injured knee carries a higher risk of postreconstruction pivot shift: intraoperative measurements with a navigation system. *Am J Sports Med*, 2018, 46 (12): 2859 – 2864.
- Koga H, Muneta T, Yagishita K, et al. The effect of graft fixation angles on anteroposterior and rotational knee laxity in double-bundle anterior cruciate ligament reconstruction: evaluation using

- computerized navigation. *Am J Sports Med*, 2012, 40(3):615–623.
- 27 Nakamae A, Ishikawa M, Nakasa T, et al. Evaluation of the intraoperative kinematics during double-bundle anterior cruciate ligament reconstruction using a navigation system. *Asia Pac J Sports Med Arthrosc Rehabil Technol*, 2020, 19:11–16.
- 28 Ikuta Y, Nakamae A, Shimizu R, et al. A comparison of central anatomic single-bundle reconstruction and anatomic double-bundle reconstruction in anteroposterior and rotational knee stability: intraoperative biomechanical evaluation. *J Knee Surg*, 2022, 35(3):273–279.
- 29 Mansor Y, Perets I, Close MR, et al. In search of the spherical femoroplasty: cam overresection leads to inferior functional scores before and after revision hip arthroscopic surgery. *Am J Sports Med*, 2018, 46(9):2061–2071.
- 30 Brunner A, Horisberger M, Herzog RF. Evaluation of a computed tomography-based navigation system prototype for hip arthroscopy in the treatment of femoroacetabular cam cam impingement. *Arthroscopy*, 2009, 25(4):382–391.
- 31 Almoussa S, Barton C, Speirs AD, et al. Computer-assisted correction of cam-type femoroacetabular impingement: a Sawbones study. *J Bone Joint Surg Am*, 2011, 93(Suppl 2):70–75.
- 32 Van Houcke J, Khanduja V, Nakano N, et al. Accuracy of navigated cam resection in femoroacetabular impingement: A randomised controlled trial. *Int J Med Robot*, 2017, 13(4):e1839.
- 33 Kobayashi N, Inaba Y, Kubota S, et al. Computer-assisted hip arthroscopic surgery for femoroacetabular impingement. *Arthrosc Tech*, 2018, 7(4):e397–e403.
- 34 Abe K, Oba M, Kobayashi N, et al. Accuracy of computer navigation-assisted arthroscopic osteochondroplasty for cam-type femoroacetabular impingement using the model-to-image registration method. *Am J Sports Med*, 2022, 50(5):1272–1280.
- 35 Theopold J, Henkelmann R, Zhang C, et al. Clinical outcomes of arthroscopic and navigation-assisted two tunnel technique for coracoclavicular ligament augmentation of acute acromioclavicular joint dislocations. *BMC Musculoskelet Disord*, 2021, 22(1):528.
- 36 Hoffmann M, Hartel M, Schroeder M, et al. Electromagnetic navigation provides high accuracy for transcoracoid-transclavicular drilling. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*, 2014, 22(9):2237–2242.
- 37 Micic I, Kholinne E, Hong H, et al. Navigation-assisted suture anchor insertion for arthroscopic rotator cuff repair. *BMC Musculoskelet Disord*, 2019, 20(1):633.
- 38 Pan HK, Liu CW, Pan RY. Comparison of suture anchor penetration rate between navigation-assisted and traditional shoulder arthroscopic capsulolabral repair. *PLoS One*, 2022, 17(5):e0267943.
- 39 Park YU, Kim HN. Use of external fixators as a 3-dimensional navigation drill guide for arthroscopic ankle arthrodesis. *Biomed Res Int*, 2020, 2020:6072143.
- 40 Shigi A, Oka K, Tanaka H, et al. Validation of the registration accuracy of navigation-assisted arthroscopic debridement for elbow osteoarthritis. *J Shoulder Elbow Surg*, 2019, 28(12):2400–2408.
- 41 Shiode R, Oka K, Shigi A, et al. Arthroscopic debridement of elbow osteoarthritis using ct-based computer-aided navigation systems is accurate. *Arthrosc Sports Med Rehabil*, 2021, 3(6):e1687–e1696.
- 42 Zemirline A, Agnus V, Soler L, et al. Augmented reality-based navigation system for wrist arthroscopy: feasibility. *J Wrist Surg*, 2013, 2(4):294–298.
- 43 Liu D, Li Y, Li T, et al. The use of a 3D-printed individualized navigation template to assist in the anatomical reconstruction surgery of the anterior cruciate ligament. *Ann Transl Med*, 2020, 8(24):1656.
- 44 Chen F, Cui X, Han B, et al. Augmented reality navigation for minimally invasive knee surgery using enhanced arthroscopy. *Comput Methods Programs Biomed*, 2021, 201:105952.
- 45 Ni J, Li D, Mao M, et al. A method of accurate bone tunnel placement for anterior cruciate ligament reconstruction based on 3-dimensional printing technology: a cadaveric study. *Arthroscopy*, 2018, 34(2):546–556.
- 46 Zaffagnini S, Urrizola F, Signorelli C, et al. Current use of navigation system in ACL surgery: a historical review. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*, 2016, 24(11):3396–3409.

(收稿日期:2023–06–15)

(修回日期:2023–08–24)

(责任编辑:李贺琼)