

手术机器人在玻璃体视网膜手术中的应用

徐爱珍¹, 华佳佳², 李传宝²

引用: 徐爱珍, 华佳佳, 李传宝. 手术机器人在玻璃体视网膜手术中的应用. 国际眼科杂志, 2025, 25(3): 422-427.

基金项目: 山东省自然科学基金青年项目 (No.ZR2020QH149)

作者单位: ¹(272000) 中国山东省济宁市, 济宁医学院临床医学学院; ²(272029) 中国山东省济宁市, 济宁医学院附属医院眼科

作者简介: 徐爱珍, 在读硕士研究生, 研究方向: 视网膜、视神经疾病。

通讯作者: 李传宝, 硕士研究生, 主任医师, 教授, 眼科副主任, 眼底病组组长, 硕士研究生导师, 研究方向: 视网膜、视神经疾病。

13853708298@126.com

收稿日期: 2024-06-29 修回日期: 2025-01-16

摘要

玻璃体视网膜手术作为全身最精细的手术之一, 手术操作空间局限, 任何细微的手术源性创伤均可导致严重的视觉功能损害。手术机器人可显著提高玻璃体视网膜手术过程的精准性和安全性, 具有很好的应用前景。手术机器人作为新兴技术, 近年来, 国内外学者对手术机器人在玻璃体视网膜疾病的手术治疗开展了大量研究, 并取得了一定的研究成果。文章从手术机器人的发展历史入手, 就手术机器人辅助视网膜血管内手术、视网膜下注射、黄斑部手术以及实时远程控制视网膜激光光凝等的安全性和稳定性进行分析和总结, 并简要概括目前手术机器人所面临的挑战, 为手术机器人在玻璃体视网膜疾病中的治疗提供更多的研究方向。

关键词: 手术机器人; 玻璃体视网膜手术; 视网膜疾病

DOI: 10.3980/j.issn.1672-5123.2025.3.15

Application of surgical robot in vitreoretinal surgery

Xu Aizhen¹, Hua Jiajia², Li Chuanbao²

Foundation item: Natural Science Foundation of Shandong Province (No.ZR2020QH149)

¹School of Clinical Medicine, Jining Medical University, Jining 272000, Shandong Province, China; ²Department of Ophthalmology, Affiliated Hospital of Jining Medical University, Jining 272029, Shandong Province, China

Correspondence to: Li Chuanbao. Department of Ophthalmology, Affiliated Hospital of Jining Medical University, Jining 272029, Shandong Province, China. 13853708298@126.com

Received: 2024-06-29 Accepted: 2025-01-16

Abstract

• As one of the most delicate surgeries in the whole body, vitreoretinal surgery requires a high degree of refinement and stability of the surgeon's operation due to the limitation of the operating space, and the fact that any subtle surgical trauma can lead to serious visual function damage. Surgical robots can significantly improve the precision and safety of the vitreoretinal surgical procedures and have good application prospects. As an emerging technology, in recent years, scholars at home and abroad have carried out a lot of research on the surgical robot in the surgical treatment of vitreoretinal diseases, and have achieved certain research results. Starting from the development history of surgical robots, this review analyzes and summarizes the safety and stability of surgical robots assisted retinal endovascular surgery, subretinal injection, macular surgery and real-time manipulation of retinal laser photocoagulation, briefly generalized the challenges that surgical robots still faced, and aim to provide more research directions of surgical robots in the treatment of vitreoretinal diseases.

• KEYWORDS: surgical robot; vitreoretinal surgery; retinal diseases

Citation: Xu AZ, Hua JJ, Li CB. Application of surgical robot in vitreoretinal surgery. Guoji Yanke Zazhi (Int Eye Sci), 2025, 25(3): 422-427.

0 引言

玻璃体视网膜手术是治疗视网膜脱离、玻璃体积血、视网膜前膜和黄斑裂孔等玻璃体视网膜疾病的显微外科手术^[1]。眼内空间狭小, 在脆弱的眼内组织实施精准操作, 对手术的精确性和稳定性要求极高, 如眼内器械尖端定位精度的要求为 10 μm , 玻璃体视网膜手术精确度最低需要达到 20-40 μm 的幅度, 但是人体自身生理特点导致的自发的、不可避免的震颤可达到 100 μm 的幅度, 身体疲劳时人的手部震颤会更加明显^[2-3]。影响玻璃体视网膜手术效果的因素除了不可避免的生理性手颤、长时间手术导致的疲劳、情绪波动、局限的手术视野, 还有触觉反馈的缺乏^[4], 尤其是后者, 据测量 75% 的工具-组织相互作用力小于 7.5 mN, 只有其中的 19% 可以被医生感觉到^[5], 医生只能依赖视觉线索来辨别工具的接近程度^[4], 这将导致术中风险性的增加。另外, 玻璃体视网膜手术医生的学习曲线长, 学习能力差别大, 尽管目前应用先进的手术显微

镜和精细的 27G 玻璃体切除手术器械,仍不能做到对操作点的精准定位及特定组织的精准分层,可导致医源性损伤。而手术机器人克服了此类弊端。眼科手术机器人是集医学、机械学、生物力学及计算力学等多学科于一体的医疗器械综合体,它能消除手颤、解决心理因素波动、克服长时间手术带来的疲劳,同时较常规手术精准性提高,创伤性减少,提升了手术安全性和预后^[6]。

1 手术机器人的发展历史

20 世纪 50 年代,有学者在美国达特茅斯会议上首次提出人工智能(artificial intelligence, AI)的概念^[7-9],它是开发用于模拟、扩展和延伸人类思维的理论、方法、技术及应用的一门学科^[7]。基于人工智能的达芬奇机器人是目前应用最广泛的机器人手术系统^[10-12],自 2001 年以来,已经推出了四款型号:S、Si、Si HD 和 Xi^[13]。目前,机器人辅助手术主要涉及普外科、泌尿外科、妇科、心血管外科等领域^[2]。眼科手术机器人是 1989 年由 Guerrouad 和 Vidal 在立体分类微型机械臂(SMOS)机器人的基础上首先研制成功的^[14-15]。随后,世界各地的研究人员开始设计研制可用于玻璃体视网膜手术的新型机器人系统。随着人类对技术的不断更新,其精度也在不断提高,由 1 mm 以内^[16-17]到现在的微米级^[18]。但手术机器人在玻璃体视网膜手术领域尚处于试验阶段^[19]。根据机器人系统与医生的互动关系,手术机器人分为四类^[4,17,20-21]:(1)手持式,(2)远程操作,(3)协同操作,(4)磁控系统,见表 1。

2 手术机器人在玻璃体视网膜手术的应用

自 1970 年现代玻璃体切除术发明以来,玻璃体视网膜手术领域发生了巨大的变化^[29]。玻璃体视网膜手术所需的定位精度为 10 μm,远小于手部震颤的平均幅度(约 108 μm)^[31-33]。玻璃体视网膜手术是最精细的手术之一,生理性手颤可能带来医源性损害,如视网膜裂孔、视网膜出血、晶状体损伤等^[34]。Chen 等^[35]探讨了机器人辅助系统在离体猪眼玻璃体视网膜手术实验中的应用,研究证实了机器人辅助下的玻璃体视网膜手术并发症发生率较低。任何细微的手术源性创伤均可导致严重的视觉功能损害,而手术机器人在玻璃体视网膜手术中的应用将会带来手术过程的精准性、安全性提高和手术预后的显著改善。

2.1 视网膜血管插管 视网膜静脉阻塞(retinal vein occlusion, RVO)所致的黄斑水肿、新生血管性青光眼或玻璃体出血等并发症可能会引起视力丧失^[26]。视网膜血管内手术(retinal endovascular surgery, REVS)是一种实验性的眼科手术,其目的是通过直接向阻塞的静脉注射抗凝剂来溶解血栓^[36]。

有学者研究介绍了世界上第一个利用手术机器人辅助 REVS 及其所遵循的工作流程^[36],该过程包括以下四个连续步骤的执行:设置程序,术前对齐,术中使用和术后使用。实验开始前,在离体猪眼视网膜血管中通过激光诱导血凝块形成,从而模拟 RVO,在 RVES 期间,目标注入周期为 10 min,在实验中,注射时间为 15 min,其中包括 50%的最小安全余量,实验获得了 100%的成功率。在 I 期临床研究背景下,医生对 4 例患者安全地进行 REVS 治疗,使这项首次人体研究取得了技术上的成功,但该研究对应用 REVS 对 RVO 患者视力的长期影响未作报道^[36]。手术机器人不仅可以消除术者的生理性手颤,还可以帮助指导手术动作,准确地将微插管尖端插入视网膜血管,并将其维持在血管中以输送药物^[37]。迄今为止,在动物模型^[38-40]和人类患者中都证明了手术机器人可成功辅助静脉插管^[36],但作为一种安全有效的治疗选择尚未得到大量的临床验证^[26]。

2022 年,Wang 等^[41]以离体猪眼为研究对象进行视网膜静脉内注射手术,就时间效率、精准度及震颤控制能力等方面将机器人辅助手术与传统手术进行比较,其结果为:机器人辅助的玻璃体视网膜手术更加精确和稳定,但花费时间长。2020 年,日本研究者 Suzuki 等^[42]研发了迷你远程运动中心机器人,对模拟的视网膜静脉进行插管操作并获得成功,使手术机器人远程操作视网膜显微外科手术成为可能。

手术机器人辅助 RVES 的成功也为视网膜动脉阻塞进行 REVS 溶栓治疗提供了借鉴。

2.2 视网膜下注射 视网膜下注射(subretinal injection, SRI)能够将基因、药物或细胞注射到视网膜的特定部位,直接与视网膜色素上皮(retinal pigment epithelium, RPE)或光感受器发生反应,提高疗效并减少脱靶效应^[43]。黄斑中心凹处视网膜厚度为 200-250 μm^[44],靶部位的精准穿刺并保持稳定、持续的药物注入是一项特别精细的操作。如果药物未能准确输送到视网膜指定位置,可能导致眼内炎症、视网膜脱离、出血、药物反应^[45]。研究学者们设计和研制一种能够辅助 SRI 的手术机器人^[46],该研究分为机器人操作组(robot manipulation, RM)和人工操作组(manual manipulation, MM)分别进行 SRI,其 SRI 成功的标准为:(1)穿刺针针尖进入视网膜;(2)注射药物后观察到视网膜浅表隆起;(3)未发生广泛性视网膜脱离;(4)未有液体自视网膜注射部位溢出。每组在完成视网膜下注射后立即进行 OCT 检查, RM 组和 MM 组均无视网膜裂孔或广泛性脱离,成功率为 100%。之后,利用 OCT 仪器的径向线模型从不同角度获取了 16 张视网膜下注射区域的图

表 1 手术机器人分类

种类	主要特性	在视网膜手术中的应用现状或研究
手持式机器人	感知和补偿生理性手颤 ^[22]	内界膜剥离术 ^[23]
协同操作式机器人	无“缩放”位置运动及远程操纵物体的能力;侧重于震颤滤波 ^[24-25]	视网膜静脉插管 ^[26]
远程操作式机器人	提供运动缩放;滤过手部震颤 ^[27]	黄斑裂孔 ^[20] 、视网膜前膜 ^[28]
磁控系统	眼外磁场控制眼内机器人微胶囊 ^[4,29]	视网膜下注射 ^[30]

像,选择其中4个不同象限的OCT图像测量视网膜下横截面积,计算平均横截面积近似视网膜下体积。结果显示,RM组和MM组的平均视网膜下横截面积分别为1.548、1.461 mm²,两组之间差异无统计学意义。该试验中,为了研究机器人和人工操作的稳定性,研究者们使用Kinovea软件逐帧跟踪并分析手术时的震颤,结果显示,RM组和MM组的平均运动幅值分别为0.3681、18.8779像素(x方向),RM组的运动幅值较MM组明显减小,而且MM组的运动幅度随着手术时间的延长而明显增大,RM组则保持了较好的稳定性。另外研究者们使用手术视频计算RM组和MM组的手术时间(考虑到两种操作的术前准备时间的差异,该研究从穿刺针自巩膜隧道进入眼睛开始,到完成视网膜穿刺结束),结果显示,RM组平均手术时间为254.4 s,MM组平均手术时间为82.2 s, RM组比MM组手术时间更长。这些结果表明,机器人手术具有更高的稳定性,但手术时间较长。在OCT引导下进行SRI将会更具精准性。

陈亦棋等^[47]利用玻璃体切除联合眼科手术机器人辅助视网膜穿刺注药治疗息肉状脉络膜血管病变所致黄斑下出血,术中眼科手术机器人通过精细微型注射针将约0.2 mL阿替普酶精准注入视网膜神经上皮与色素上皮之间,术中及术后无其他并发症,恢复良好,术眼视力由眼前手动提高至0.1。该手术的成功为手术机器人在玻璃体视网膜疾病领域的研究提供了经验和参考。

有学者利用手术机器人对因黄斑变性引起视网膜下出血的患者进行SRI,注射药物为rt-PA,所有患者的SRI均顺利完成^[19-20,46,48-49]。此外,王朝董等^[50]研究设计了一种辅助医生完成视网膜下注射干细胞的手术机器人,并通过离体猪眼球视网膜下注射实验验证了机器人辅助操作比徒手操作对视网膜造成的创伤更小、注射更稳定。2021年,黄凯教授和林浩添教授等申请了一种用于人眼视网膜下注射的机器人远程定点控制方法的发明专利。该手术方法一旦应用于临床,很多目前尚无法治愈的疾病也就迎刃而解,如视网膜母细胞瘤和脉络膜黑素瘤的治疗,利用手术机器人,可以将最佳药物剂量注射到瘤体内。目前,视网膜退行性变的基因学和细胞学治疗是一个蓬勃发展的新兴领域,SRI的临床应用将会越来越广泛,手术机器人辅助的SRI也将具有良好的应用前景^[20,37,49]。

2.3 黄斑部视网膜前膜 黄斑部视网膜前膜(macular epiretinal membrane,ERM)患病率为7%~11.8%^[51],可因正常的黄斑中心凹增厚而导致视物变形和中心视力下降^[20]。手术是ERM唯一可选择的治疗方法,目的是通过去除ERM,解除黄斑牵拉,从而改善牵拉性视功能障碍^[52]。2016年,Edwards等^[20]完成了世界首例由机器人实施的ERM切除术,其手术成功率以及视网膜微创程度同人工手术无统计学差异,但手术时间相对较长。2019-05/2020-02, Faridpooya等^[28]研究了手术机器人辅助的ERM剥离术的可行性和安全性、每个手术步骤的持续时间、最佳矫正视力(best-corrected visual acuity, BCVA)和

中央视网膜厚度(central retinal thickness, CRT)的变化。结果显示:手术机器人辅助ERM剥除过程的时间较人工操作组时间长,两组中央视网膜厚度分别下降了99和125 μm,但两组手术均无术中并发症、术后BCVA均提高4行;此外,机器人操作组在剥膜过程中镊子的移动较人工操作组平稳,并实现了更好的解剖结构改善。该研究证明了机器人辅助手术的可行性和安全性,尽管机器人操作组手术时间相对较长,但仍能较理想的替代手术医生完成操作。

2.4 黄斑裂孔 神经视网膜在中心凹处的平均厚度为212 μm,黄斑裂孔(macular hole, MH)是黄斑中心凹神经纤维层的全层缺损,可导致视力下降或中心暗点^[53]。玻璃体切除联合内界膜剥除及气体填充是MH手术的常规技术,其精准无误的操作至关重要^[54]。Edwards等^[20]实施了手术机器人辅助的MH手术,研究结果显示:所有黄斑裂孔都成功闭合,从而验证了手术机器人进行MH手术的可行性;但就手术时间来说,机器人手术(内界膜剥离的中位时间:4 min 55 s)比人工手术(1 min 20 s)长。且手术机器人辅助手术操作时器械震颤细微,稳定性好,提高了玻璃体视网膜手术的安全性和有效性。

2.5 远程控制视网膜激光光凝术 全视网膜光凝术(panretinal photocoagulation, PRP)通过组织对激光的吸收产生热量,引起吸收组织和周围组织的分子变性和坏死,从而减少视网膜的氧耗量,减少组织中的血管内皮生长因子和炎症介质的释放,广泛应用于视网膜裂孔、视网膜脱离、糖尿病视网膜病变及视网膜变性等视网膜疾病的治疗^[55-56]。Chen等^[57]尝试在5G环境下应用导航激光远程治疗糖尿病视网膜病变来验证其可行性,该研究中所应用的实时5G远程光凝的远程医疗平台由四部分组成:(1)激光系统,用于导航视网膜光凝;(2)用于远程计算机控制的TeamViewer平台;(3)用于远程咨询的视频会议软件;(4)5G网络(中国移动通信集团有限公司),用于高速数据传输。研究结果显示:所有治疗均顺利完成,光凝期间无玻璃体出血等不良事件发生。相关研究还发现:与传统激光相比,导航激光可以达到更加均一的激光斑,同时可以显著降低患者的疼痛不适、提高激光效率和减少误差^[32,37,58-61]。

手术机器人的发展可通过远程指导来支持缺乏视网膜专家的地区完成视网膜激光光凝术,开辟了远程指导教育(远程学习)的机会,帮助克服目前视网膜激光学习中的限制,如缺乏专家指导下的实践经验^[62]。手术机器人辅助的视网膜激光光凝术亦可提高手术安全性。通过使用先进的仪器和成像技术在眼内进行手术,手术的侵入性越来越低,且与手持器械相比,手术机器人可执行特别精细的显微手术操作,提高稳定性和精度,并减少术后恢复的时间^[63]。

针对手术机器人在玻璃体视网膜手术中的应用,手术机器人的兴起为玻璃体视网膜手术带来了颠覆性的革新,相对于传统手术而言,手术机器人对降低手术创伤、提高

手术效果、实现远程医疗等方面有着不可替代的优势,但手术时间相对较长。由于手术机器人属于新兴技术,临床研究样本量较少,需进一步将手术机器人与传统方法相比较,以确保手术效果或安全性;同时,对于成本最小化、手术安全性和有效性评估标准的建立亦有待解决。

3 手术机器人面临的挑战

伴随着互联网医疗的发展以及医疗信息化的普及,手术机器人不断优化和升级,在其优势得到不断放大的同时也暴露出很多潜在的问题与挑战^[64]。如与手术机器人相关的伦理道德问题,主要涉及6个方面:个人、人际、团体、制度、社会和部门^[65]。常规诊疗模式为面对面诊疗,充分体现人文关怀,而手术机器人目前尚不能满足。有些患者对手术机器人接纳度低,不愿意将自己的健康系于机器上,且部分患者对其理解不够准确、全面,可能会出现期望高而预后差的局面,这将加剧医患矛盾。同时患者健康信息数据的隐私安全保护亦给手术机器人与医疗卫生的整合带来了重大挑战,在使用这些信息的过程中往往存在伦理问题,如何监管这些信息的使用也是目前存在的问题^[9]。此外,对于手术机器人在手术过程中出现的意外失误,如机器故障、操作失误等,作为医疗团体是否有应急预案,由此所产生的后果患者能否接受,以及责任主体的划分,应该制定相关法律法规来规范或约束该项技术。总之,将手术机器人成功整合到患者的照护中,研究人员、临床医生、行业合作伙伴、监管机构和患者之间的协作至关重要^[66]。

成本限制和与现有手术系统的兼容性也将会影响手术机器人实施玻璃体视网膜手术^[29],当然,其中一些成本可以通过改善治疗效果、缩短恢复时间和智能设计来抵消^[67]。眼科手术机器人手术操作时间长、临床应用时间较短、设备不完善以及相关研究较少等,均是手术机器人面临的问题。此外,过大的尺寸、无菌问题、过长的安装时间、缺乏用户友好性以及识别和管理手术并发症的能力^[68],也是手术机器人有待解决的问题。

4 总结与展望

综上所述,眼科手术机器人在 REVS、SRI、ERM、MH 及远程控制视网膜激光光凝术等极其精细的玻璃体视网膜手术方面取得了一定的研究成果,其可行性和安全性得到证实,同时在缓解地区医疗差异、促进分级诊疗、提升基层医生水平等方面发挥积极作用。但也面临包括技术、临床应用及伦理道德等方面的诸多挑战,有待进一步发展、完善和推广。将手术机器人正式纳入临床实践前,需要多学科、多部门积极参与,建立标准化医疗数据共享平台,进一步加强数据隐私保护和数据安全,健全个人隐私保护制度,提升信息技术,建设相关法律法规和操作指南,通过整合患者隐私保护、伦理道德、法律法规等相关体系共同促进手术机器人的推广应用^[69-70]。

未来眼科手术机器人的发展趋势将会朝着突破人生理局限性的方向发展,如将基因或治疗药物通过 SRI 技术更精准地定位于视网膜病灶部位;给肿瘤的滋养血管插管

给药使瘤体缩小或消失;治疗 MH 手术时对内界膜的精准抓持、指定形态和范围的内界膜的剥除等,此外完全基于 AI 指导的眼科手术机器人系统可能是未来发展的方向。随着技术的进步,眼科手术机器人将具备高精细的力度控制和高精度的操作能力,从而带来玻璃体视网膜手术的重大革新和进展。未来眼科手术机器人将与 5G 技术、光学相干断层扫描、三维重建技术等前沿技术深度融合,以实现手术效率的提升和手术安全性的提高,同时缓解部分医疗资源紧张局面,为更多的玻璃体视网膜疾病提供新的治疗方法。

利益冲突声明:本文不存在利益冲突。

作者贡献声明:徐爱珍论文选题与修改,初稿撰写,文献检索与翻译;华佳佳论文修改,文献翻译;李传宝选题指导,论文修改。所有作者阅读并同意最终的文本。

参考文献

- [1] He X, van Geirt V, Gehlbach P, et al. IRIS: Integrated Robotic Intraocular Snake. *IEEE Int Conf Robot Autom*, 2015,2015:1764-1769.
- [2] Chen YQ, Tao JW, Su LY, et al. Cooperative robot assistant for vitreoretinal microsurgery: development of the RVRMS and feasibility studies in an animal model. *Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol*, 2017, 255(6):1167-1171.
- [3] 林梓豪, 许可正. 机器人辅助系统在眼底手术中的应用. *眼科学报*, 2022,37(3):194-199.
- [4] Ahronovich EZ, Simaan N, Joos KM. A review of robotic and OCT-aided systems for vitreoretinal surgery. *Adv Ther*, 2021, 38(5):2114-2129.
- [5] Griffin JA, Zhu W, Nam CS. The role of haptic feedback in robotic-assisted retinal microsurgery systems: a systematic review. *IEEE Trans Haptics*, 2017,10(1):94-105.
- [6] 王炳, 陈佩, 雍红芳, 等. 显微手术机器人系统在眼底病中的应用现状及进展. *机器人外科学杂志(中英文)*, 2024,5(2):186-193.
- [7] 朱笑莹, 毕徐齐, 税嘉诚, 等. 人工智能技术在中医、西医眼底疾病中的诊疗应用及展望. *中国中医眼科杂志*, 2023,33(6):569-573,600.
- [8] 林喆. 人工智能在眼底病中的应用. *眼科学报*, 2022,37(3):200-207.
- [9] 朱志玲, 李松. 人工智能在耳鼻咽喉头颈外科的运用及展望. *山东大学耳鼻喉眼学报*, 2020,34(2):115-120.
- [10] Wang Y, Sun J, Liu XT, et al. Robot-assisted orbital fat decompression surgery: first in human. *Transl Vis Sci Technol*, 2022,11(5):8.
- [11] Fine HF, Wei W, Goldman R, et al. Robot-assisted ophthalmic surgery. *Can J Ophthalmol*, 2010,45(6):581-584.
- [12] Leal GT, Campos CO. 30 years of robotic surgery. *World J Surg*, 2016,40(10):2550-2557.
- [13] Bourcier T, Chammas J, Becmeur PH, et al. Robot-assisted simulated cataract surgery. *J Cataract Refract Surg*, 2017, 43(4):552-557.
- [14] Molaei A, Abedloo E, de Smet MD, et al. Toward the art of robotic-assisted vitreoretinal surgery. *J Ophthalmic Vis Res*, 2017, 12(2):212-218.
- [15] Guerrouad A, Vidal P. SMOS: stereotaxical microtelemanipulator

for ocular surgery. *Images of the Twenty-First Century. Proceedings of the Annual International Engineering in Medicine and Biology Society.* IEEE, 1989;879-880.

[16] Douglas R. Robotic surgery in ophthalmology: reality or fantasy? *Br J Ophthalmol*, 2007,91(1):1.

[17] Kumari B, Tidake P. Robotic integration in the field of ophthalmology and its prospects in India. *Cureus*, 2022,14(10):e30482.

[18] 姜姗, 吴浩冉, 王娇娇. 眼科显微手术机器人的研究进展与临床应用. *机器人外科学杂志*, 2024,5(1):80-84.

[19] Alafaleq M. Robotics and cybersurgery in ophthalmology: a current perspective. *J Robot Surg*, 2023,17(4):1159-1170.

[20] Edwards TL, Xue K, Meenink HCM, et al. First-in-human study of the safety and viability of intraocular robotic surgery. *Nat Biomed Eng*, 2018,2:649-656.

[21] Hoxha K, Alikhani A, Inagaki S, et al. Modelling and development of a mechanical eye for the evaluation of robotic systems for surgery. *Annu Int Conf IEEE Eng Med Biol Soc*, 2023,2023:1-4.

[22] Ang WT, Riviere CN, Khosla PK. Design and implementation of active error canceling in hand-held microsurgical instrument. *Proceedings 2001 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Expanding the Societal Role of Robotics in the the Next Millennium.* IEEE, 2001:1106-1111.

[23] Stetten G, Wu B, Klatzky R, et al. Hand-held force magnifier for surgical instruments. *Information Processing in Computer-Assisted Interventions.* Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011:90-100.

[24] Üneri A, Balicki MA, Handa J, et al. New steady-hand Eye Robot with micro-force sensing for vitreoretinal surgery. *2010 3rd IEEE RAS & EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechanics.* September 26-29, 2010, Tokyo, Japan. IEEE, 2010:814-819.

[25] Taylor R, Jensen P, Whitcomb L, et al. A Steady-Hand Robotic System for Microsurgical Augmentation. *Int J Robot Res*, 1999,18(12):1201-1210.

[26] Gerber MJ, Pettenkofer M, Hubschman JP. Advanced robotic surgical systems in ophthalmology. *Eye*, 2020,34:1554-1562.

[27] Wu J, Li G, Urias M, et al. An Optimized Tilt Mechanism for a New Steady-Hand Eye Robot. *Rep US*, 2020,2020:3105-3111.

[28] Faridpooya K, van Romunde SHM, Manning SS, et al. Randomised controlled trial on robot-assisted versus manual surgery for pucker peeling. *Clin Exp Ophthalmol*, 2022,50(9):1057-1064.

[29] Ramamurthy SR, Dave VP. Robotics in vitreo-retinal surgery. *Semin Ophthalmol*, 2022,37(7-8):795-800.

[30] Charreyron SL, Boehler Q, Danun AN, et al. A magnetically navigated microcannula for subretinal injections. *IEEE Trans Biomed Eng*, 2021,68(1):119-129.

[31] Ida Y, Sugita N, Ueta T, et al. Microsurgical robotic system for vitreoretinal surgery. *Int J Comput Assist Radiol Surg*, 2012,7(1):27-34.

[32] Nuzzi R, Brusasco L. State of the art of robotic surgery related to vision: brain and eye applications of newly available devices. *Eye Brain*, 2018,10:13-24.

[33] Noda Y, Ida Y, Tanaka S, et al. Impact of robotic assistance on precision of vitreoretinal surgical procedures. *PLoS One*, 2013,8(1):e54116.

[34] Ebrahimi A, Patel N, He C, et al. Adaptive Control of Sclera Force and Insertion Depth for Safe Robot-Assisted Retinal Surgery. *IEEE Int Conf Robot Autom*, 2019,2019:9073-9079.

[35] Chen YQ, Cheng D, Zhu L, et al. Combining robot-assisted surgical system and 3D visualization system for teaching minimally invasive vitreoretinal surgery. *Int J Ophthalmol*, 2022,15(2):255-260.

[36] Gijbels A, Smits J, Schoevaerds L, et al. In-human robot-assisted retinal vein cannulation, A world first. *Ann Biomed Eng*, 2018,46(10):1676-1685.

[37] Channa R, Iordachita I, Handa JT. Robotic vitreoretinal surgery. *Retina*, 2017,37(7):1220-1228.

[38] de Smet MD, Meenink TC, Janssens T, et al. Robotic assisted cannulation of occluded retinal veins. *PLoS One*, 2016,11(9):e0162037.

[39] de Smet MD, Stassen JM, Meenink TC, et al. Release of experimental retinal vein occlusions by direct intraluminal injection of ocriplasmin. *2016,100(12):1742-1746.*

[40] Wilson JT, Gerber MJ, Prince SW, et al. Intraocular robotic interventional surgical system (IRISS): Mechanical design, evaluation, and master-slave manipulation. *2018,14(1):[Epub 2017 Jul 31].*

[41] Wang T, Xia J, Jin L, et al. Comparison of robot-assisted vitreoretinal surgery and manual surgery in different preclinical settings: a randomized trial. *Ann Transl Med*, 2022,10(21):1163.

[42] Suzuki H, Wood RJ. Origami-inspired miniature manipulator for teleoperated microsurgery. *Nat Mach Intell*, 2020,2:437-446.

[43] Huang CW, Yang HY, Chen TC, et al. Analysis on key parameters in subretinal injection facilitating a predictable and automated robot-assisted treatment in gene therapy. *Int J Med Robot*, 2023,19(6):e2560.

[44] Roizenblatt M, Grupenmacher A T, Belfort JR, et al. Robot-assisted tremor control for performance enhancement of retinal microsurgeons. *Br J Ophthalmol*, 2019,103(8):1195-1200.

[45] Mach K, Wei SW, Kim JW, et al. OCT-guided robotic subretinal needle injections: a deep learning-based registration approach. *2022 IEEE International Conference on Bioinformatics and Biomedicine (BIBM).* December 6-8, 2022, Las Vegas, NV, USA. IEEE, 2022:781-786.

[46] Yang KK, Jin X, Wang ZD, et al. Robot-assisted subretinal injection system: development and preliminary verification. *BMC Ophthalmol*, 2022,22(1):484.

[47] 陈亦棋, 叶昕, 陈焕, 等. 眼科手术机器人辅助视网膜穿刺注药术治疗息肉状脉络膜血管病变所致黄斑下出血1例. *中华眼科杂志*, 2024,60(7):618-622.

[48] Nuliqiman M, Xu MY, Sun YM, et al. Artificial intelligence in ophthalmic surgery: current applications and expectations. *Clin Ophthalmol*, 2023,17:3499-3511.

[49] Cehajic-Kapetanovic J, Xue KM, Edwards TL, et al. First-in-human robot-assisted subretinal drug delivery under local anesthesia. *Am J Ophthalmol*, 2022,237:104-113.

[50] 王朝董, 广晨汉, 王丽强, 等. 机器人辅助视网膜下注射系统的设计与实现. *北京航空航天大学学报*, 2023,49(9):2406-2414.

[51] Fung AT, Galvin J, Tran T. Epiretinal membrane: a review. *Clin Exp Ophthalmol*, 2021,49(3):289-308.

[52] Matoba R, Morizane Y. Surgical treatment of epiretinal membrane. *Acta Med Okayama*, 2021,75(4):403-413.

- [53] Pradhan D, Agarwal L, Joshi I, et al. Internal limiting membrane peeling in macular hole surgery. *Ger Med Sci*, 2022,20:Doc07.
- [54] Zvorničanin J, Zvorničanin E, Husić D. Eccentric macular hole formation following successful macular hole surgery. *Acta Med Acad*, 2019,48(3):312-316.
- [55] Naess E, Molvik T, Ludwig D, et al. Computer-assisted laser photocoagulation of the retina—a hybrid tracking approach. *J Biomed Opt*, 2002,7(2):179-189.
- [56] 方伟, 李海东, 徐一珺, 等. 全视网膜光凝术对视网膜黄斑部微循环状态的影响. *眼科新进展*, 2022,42(5):382-385.
- [57] Chen H, Pan XF, Yang JY, et al. Application of 5G technology to conduct real-time teleretinal laser photocoagulation for the treatment of diabetic retinopathy. *JAMA Ophthalmol*, 2021,139(9):975-982.
- [58] Chhablani J, Mathai A, Rani P, et al. Comparison of conventional pattern and novel navigated panretinal photocoagulation in proliferative diabetic retinopathy. *Invest Ophthalmol Vis Sci*, 2014, 55 (6): 3432-3438.
- [59] 金陈进, 周立军. 充分发挥激光光凝治疗的临床应用价值, 不断提升眼底疾病的治疗水平. *中华眼底病杂志*, 2021,37(8):585-588.
- [60] Becker BC, MacLachlan RA, Lobes LA Jr, et al. Semiautomated intraocular laser surgery using handheld instruments. *Lasers Surg Med*, 2010,42(3):264-273.
- [61] Yang S, Lobes LA Jr, Martel JN, et al. Handheld-automated microsurgical instrumentation for intraocular laser surgery. *Lasers Surg Med*, 2015,47(8):658-668.
- [62] Chen H, Sun H, Chen Y. Application of 5G Technology to Conduct Real-Time Teleretinal Laser Photocoagulation for the Treatment of Diabetic Retinopathy – Reply. *JAMA Ophthalmol*, 2022, 140 (2): 205-206.
- [63] Pachtrachai K, Vasconcelos F, Chadebecq F, et al. Adjoint transformation algorithm for hand-eye calibration with applications in robotic assisted surgery. *Ann Biomed Eng*, 2018,46(10):1606-1620.
- [64] 杨玉微. 眼科人工智能在远程医疗中的应用. *眼科学报*, 2022, 37(3):238-244.
- [65] 王妍茜, 王成虎, 张竞月, 等. 人工智能应用于眼科的积极作用及其伦理问题. *国际眼科杂志*, 2022,22(6):1020-1024.
- [66] Peter Wiedemann, 惠延年(译). 眼科学人工智能. *国际眼科杂志*, 2023,23(9):1417-1420.
- [67] deSmet MD, Naus GJL, Faridpooya K, et al. Robotic-assisted surgery in ophthalmology. *Curr Opin Ophthalmol*, 2018, 29 (3): 248-253.
- [68] Jeganathan VS, Shah S. Robotic technology in ophthalmic surgery. *Curr Opin Ophthalmol*, 2010,21(1):75-80.
- [69] 黄韵翰, 周逢海, 郭柏鸿. 基于 5G 通信技术的远程机器人手术应用研究进展及关键技术分析. *中国微创外科杂志*, 2024,24(2):138-142.
- [70] 何明光, 刘驰, 李治玺. 人工智能在眼科真实临床场景的应用: 机遇和挑战. *山东大学学报(医学版)*, 2020,58(11):1-10.