

## 眼科显微手术机器人的研究进展与临床应用

姜姗, 吴浩冉, 王娇娇

(内蒙古医科大学附属医院健康管理中心 内蒙古 呼和浩特 010000)

**摘要** 手术机器人高灵活性、高精度与高重复性等优点已成为医学界共识, 其与微创手术相结合被广泛应用于各科领域。眼科手术作为操作难度较大的手术之一, 术中尤其需要较高的操作精细度, 避免生理性震颤的影响。手术机器人的发展与应用解放了术者的眼与手, 可有效提高操作精准性与手术成功率, 为眼科显微手术提供新思路。国内外学者对眼科显微手术机器人的研究与应用不断进行探索, 虽然取得了突出成就, 但仍面临着重大挑战。本文从眼科显微手术机器人的研究进展与临床应用两大方面进行综述, 以期后续工作的开展提供参考。

**关键词** 显微手术; 眼科; 手术机器人; 研究进展

**中图分类号** R779.6 R608 **文献标识码** A **文章编号** 2096-7721 (2024) 01-0080-05

## Research progress and clinical application of ophthalmic microsurgical robot

JIANG Shan, WU Haoran, WANG Jiaojiao

(Health Management Center, Affiliated Hospital of Inner Mongolia Medical University, Hohhot 010000, China)

**Abstract** With the advantages of high flexibility, high precision and high repeatability, surgical robots have been widely approved by the medical community, and their combination with minimally invasive surgery has been widely used in various fields. As one of the most difficult operations, high precision is especially required in ophthalmic surgery and physiological tremor should be maximally avoided. The development and application of surgical robots have given surgeons high-definition eyes and precision hands, which can effectively improve the accuracy and success rate of surgery. Ophthalmic microsurgery is also benefited from this progress. Domestic and foreign scholars have continuously explored the research and application of ophthalmic microsurgical robot. Although outstanding achievements have been made, great challenges still facing today. The research progress and clinical application of ophthalmic microsurgical robots were reviewed in this paper, hoping to provide references for the development of related works.

**Key words** Microsurgery; Ophthalmology; Surgical Robot; Research Progress

收稿日期: 2023-11-06 录用日期: 2023-12-05

Received Date: 2023-11-06 Accepted Date: 2023-12-05

基金项目: 河南省医学科技攻关计划联合共建项目 (LHGJ20190817)

Foundation Item: Henan Provincial Medical Science and Technology Research Program Joint Construction Project (LHGJ20190817)

通讯作者: 吴浩冉, Email: 1186157130@qq.com

Corresponding Author: WU Haoran, Email: 1186157130@qq.com

引用格式: 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 [J]. 机器人外科学杂志 (中英文), 2024, 5 (1): 80-84.

Citation: JIANG S, WU H R, WANG J J. Research progress and clinical application of ophthalmic microsurgical robot[J]. Chinese Journal of Robotic Surgery, 2024, 5(1): 80-84.

随着临床医生操作技术与显微科技水平不断提高,显微手术被广泛应用于临床,其在眼科的应用也较为广泛,为视网膜手术、角膜移植术等眼部手术治疗提供了极大便利<sup>[1-2]</sup>。但现阶段眼科显微手术受术中视野、操作精细度及人手生理性震颤等因素影响,成功率仍有较大提升空间<sup>[3]</sup>。近年来,医学技术、高精密机械技术及电子信息技术迅速发展,手术机器人应运而生,凭借精准度高、灵活性好、操作稳定等优点,在一定程度上解决了眼科显微手术的弊端,成为提高手术安全性与成功率的重要途径<sup>[4]</sup>。眼科显微手术机器人集显微外科学、传感器技术、生物力学及机构学为一体,研究焦点从样机研发逐步发展至临床应用<sup>[5]</sup>。本文就国内外眼科显微手术机器人的研究进展与临床应用进行综述。

## 1 眼科显微手术机器人的研究进展

### 1.1 不同设计结构的眼科手术机器人

1989年, Vidal P 与 Guerrouad A 描述的 Stereotaxical 遥操作机械臂是最早的眼科机器人系统之一,它由安装在3维平台上的球形机械臂组成,可实现3个自由度,而腕部结构可实现4个自由度,且完成了性能测试试验。Charles S 等人也研发出一种紧凑型的6自由度主从系统显微手术机器人,该机器人系统的运动精度可达10 μm,且能达到足够大的运动幅度<sup>[6]</sup>。2001年,美国研制出达芬奇手术机器人,并获得美国食品药品监督管理局(Food and Drug Administration, FDA)认证。达芬奇手术机器人由医生主控台、机械臂及成像系统3部分组成,不仅能为术者提供三维立体术野,而且能让术者通过主控台直接控制操作手柄与脚踏,保证了手与器械运动一致性,有效提高了手术精准度,因此被广泛应用于各科领域<sup>[7-8]</sup>。达芬奇手术机器人目前也被应用于眼表手术,其误差可控制在毫米之间,但由于眼内结构的复杂性,仍需研究更适合眼科疾病的专属机器人。学者们一直致力于眼科机器人的探索,2009年,东京大学 Ueta T 等人<sup>[9]</sup>

研究出一种显微机械臂原理样机,并通过实验证明该机器人可用于眼后节手术,且效果良好。2020年, HE C Y 等人<sup>[10]</sup>提出了一种由机器人辅助的自动光管驱动系统,并展开静态光跟踪与动态光跟踪实验,结果表明该系统能够用可忽略的偏移量(平均偏移量2.45 mm,标准差1.33 mm)成功照亮所需区域,以此可提高手术效率、改善手术结果。2021年, Yang U J 等人<sup>[11]</sup>提出一种具有机械运动可伸缩性、可用于眼内重建手术的新型显微外科机器人机构,其原理是利用双三角形结构对运动进行机械测量,以实现精确与大运动间的无缝调整。2022年, Chen R 等人<sup>[12]</sup>设计了一个多极性电磁机器人平台,为特定眼内区域的定向治疗提供了一种微创手段,模拟结果表明该平台在眼科手术中具有很大的应用潜力。

### 1.2 不同控制方式的眼科手术机器人

眼科手术机器人经历了不同设计结构的革新与发展,其控制方式也得到了不断优化,以主从式机器人最为常见。Pandey S K 等人<sup>[13]</sup>描述了第1代真正意义上的主从操作外科手术机器人系统 ZEUS,该系统由操作控制台与机械臂组成,通过主操控控制台发出指令控制机械臂进行手术操作,最大限度避免了术者生理性震颤,提高了手术的稳定性。2001年,美国 Intuitive Surgical 公司研制出的达芬奇手术机器人是主从式机器人的典范,术者于主控台通过影像设备传来的三维立体术野直接操控脚踏与手柄,计算机系统将医生的操作过滤颤抖后传递给机械臂进行手术操作,确保了手与器械运动的一致性。2010年,天津医科大学总医院联合天津大学、南开大学两所高校研制出“妙手A”机器人,包括主控制台、成像系统、机械臂3部分,具有体积小、自由度高的特点,可实现主、从操作虚拟力反馈,从而提高操作精准度。“妙手A”是我国第1个具有自主知识产权的主从式手术机器人,在医学领域具有里程碑式的意义<sup>[14]</sup>。2022年,王朝董等人<sup>[15]</sup>提出一种主从控制式视网膜下注射机

机器人, 辅助医生完成视网膜下注射干细胞。该机器人由摇杆主手、从手机械臂、机器人控制柜、工控机及末端自旋控制器组成, 通过建立主手与从手机器人之间的运动映射关系, 解决了巩膜约束运动、稳定器械、准确定位注射位置、微流量注射等难题, 并通过离体猪眼球视网膜下注射试验验证了该机器人系统末端注射针运动的稳定性与精准性。

**1.3 不同应用范围的眼科手术机器人** 眼球结构的复杂性对眼科手术提出了更加精密化的要求, 有关眼科手术机器人的研究也更为细化, 国内外学者针对眼科不同的应用范围研发出了不同的眼科手术机器人。Tejima N 等人于 1988 年研制出一种多关节机器人, 以吸附装置控制角膜切割效果, Lang G K 等人于 1989 年研发出了一套准分子激光角膜切割系统, 可以改变角膜切割形状, 同年 Guerrouad 等人研制出一种用于角膜钻切术、眼科玻璃体切割术、整容术的眼科机器人 SMOS<sup>[16]</sup>。20 世纪末, 有越来越多的学者对角膜自动化切割系统进行多方位研究, 均取得了一定突破, 但仍存在一些弊端 (如机器人末端执行器设计不完善), 限制了角膜移植显微手术机器人的临床应用等<sup>[17-18]</sup>。2017 年, 温州医学院眼科医院联合北京航空航天大学共同研制出一套辅助玻璃体视网膜显微手术机器人系统, 由负控计算机、主刀控制面板、系统控制柜、机器人本体 (2 条机械臂) 4 部分组成, 具有良好的稳定性与精准度, 已成功应用于离体猪眼玻璃体切割手术<sup>[19]</sup>。

## 2 眼科显微手术机器人的应用

目前, 眼科显微手术机器人的报道主要包括眼眶外科手术、角膜移植术、白内障手术及视网膜手术, 虽然多数仍处于仿真模拟或动物实验阶段, 但也有部分已经开始进入临床应用。

**2.1 眼眶外科手术** 眼眶结构复杂且狭小, 毗邻面部及颅底组织结构, 因此外科手术操作复杂、难度大、风险高, 对手术稳定性、精准度等

有较高要求。机器人手术系统不仅能为医生提供放大、高清的视野, 而且具备精准而灵活的控制能力, 用于显微手术可大大提高手术效果与安全性。WANG Y 等人<sup>[20]</sup> 在一项研究中表明, 通过达芬奇 Xi 机器人辅助显微手术对 10 例静止期甲状腺相关眼病患者实施眼眶脂肪减压术, 患者均未发生医源性创伤, 术后 3 个月眼球突出度从  $(20.2 \pm 1.8)$  mm 下降至  $(17.9 \pm 1.4)$  mm, 生活质量也得到明显改善。Jeannon J P 等人<sup>[21]</sup> 报道了 1 例达芬奇 Xi 手术机器人辅助治疗眼恶性肿瘤, 在保留眼球、眼外肌及视力的情况下成功切除了肿瘤、眼眶内壁、泪囊、泪骨与鼻泪管, 且术后 1 年未见复发。

**2.2 角膜移植术** 角膜盲是眼科常见疾病, 位列我国致盲性眼病第 2 位, 角膜移植术是目前帮助患者复明最可靠的治疗方案<sup>[22]</sup>。由于手术对角膜植片形状、缝线操作要求极高, 因此术者的操作直接关系到手术成功率。机器人辅助角膜移植术可提高操作稳定性与精确性, 保障手术成功。Savastano A 等人<sup>[23]</sup> 通过人工和机器人手术系统在猪眼模型上进行角膜移植试验, 观察缝合时间、缝合位置和断层参数, 进一步证实机器人辅助手术的可行性。另一位法国学者 Bourcier T 等人<sup>[24]</sup> 自制了 12 例翼状胬肉模型, 利用达芬奇手术机器人精准完成分离、切割、结膜移植与缝合等操作, 再度证实眼科显微手术机器人的安全性与可靠性。同年, 该研究团队成功完成了第 1 例达芬奇机器人辅助切除人翼状胬肉手术, 使眼科显微手术机器人向临床应用推进了一大步<sup>[25]</sup>。

**2.3 白内障手术** 白内障是发病率较高的眼科疾病之一, 每年约 2000 万人进行手术治疗, 其中白内障超声乳化手术作为微创显微手术的代表取得了良好效果。但是受术者传感能力不足与生理限制, 手术操作中无法避免生理性震颤, 同时人眼对深度的感知分辨力有限, 影响术者对后囊膜深度的判断, 因此难以避免后囊膜破裂、角膜切口渗漏、晶状体摘除不完全等并发症的发



生。机器人手术系统可通过数字显微镜等多种辅助成像技术获取更高深度分辨率，且能通过编程控制机械臂完成无震颤的精准运动，有效提高手术效果，降低并发症发生风险。Bourcier T 等人<sup>[26]</sup>采用达芬奇机器人手术系统联合超声乳化技术对离体猪眼进行实验，证实眼科显微手术机器人安全可靠。Wilson J T 等人<sup>[27]</sup>以眼内 IRISS 系统对离体猪眼进行实验，结果显示在该系统辅助下完成了多个关键步骤，且手术工具末端定位精准控制在 0.2 mm 以内，保障了白内障摘除手术顺利开展。

**2.4 玻璃体视网膜手术** 眼后节疾病是复杂眼科疾病之一，玻璃体视网膜手术是其重要治疗方案，但由于该类疾病病情复杂，对手术技能要求较高，而术者由于视觉感知极限与无法避免的生理性震颤限制了手术成功率，一旦操作不当极易引起严重并发症。机器人辅助玻璃体视网膜手术可解决人手震颤与视觉受限问题，使视网膜操作力得到精准控制。牛津大学外科医生使用远程操控机器人系统为一位 70 岁的患者成功实施了 1 例人体视网膜前膜剥除术，该机器人由 7 个独立的电控发动机提供支持，装置像一个机械手，外部看似很大，但在眼内的移动幅度却很小，操作精度可达千分之一毫米，这一手术的成功实施在临床试验上具有划时代的意义，也为机器人手术系统在眼科的临床应用奠定了坚实基础。2022 年，Faridpooya K 等人<sup>[28]</sup>使用 PPS 机器人手术系统对 15 名患有特发性视网膜前膜的患者行剥离术，结果显示机器人辅助平均手术时间为 56 min，镊子移动平均距离为 403 mm，尽管与传统手术相比耗时更长，但所有手术步骤均是可行的，且没有临床不良事件或并发症发生。2018 年，全球首例视网膜静脉血管插管术的临床手术在一套主从式机器人辅助配合下顺利完成，推动了眼科显微手术机器人临床应用进展<sup>[29]</sup>。2021 年，Willekens K 等人<sup>[30]</sup>对 4 位视网膜中央静脉阻塞患者行机器人辅助视网膜静脉插管术的 I 期试验，在机器人辅助

下将定制的微针插入视网膜分支静脉并注入奥克纤溶酶，结果显示，所有患者均成功完成机器人辅助视网膜静脉插管并输注奥克纤溶酶，术中虽有一支微针的针尖在眼中断裂，但可以通过内窥镜取出，且无相关并发症发生，证实机器人辅助视网膜静脉插管是安全可行的。

### 3 结论

近年来机器人手术系统发展迅猛，相关研究也越来越丰富，其临床应用效果已被多个科室证实，但在眼科的应用较为有限。总体而言，目前临床应用最多的是达芬奇机器人手术系统，国内应用于眼科显微手术的机器人手术系统主要包括角膜移植机器人、玻璃体视网膜手术机器人以及视网膜血管搭桥机器人等。因此，不管是在国外还是国内，眼科手术机器人的发展仍面临着重大的挑战，如缺乏与智能技术的融合、手术方式单一、震颤补偿技术薄弱等缺点限制了眼科手术机器人的临床应用。未来，眼科手术机器人将根据操作空间与操作精度要求设计更多新型的智能手术工具、驱动设计与新型机构，如可从仿生学角度模仿昆虫的虹吸式口器与产卵管运动机制，研制精准度更高的手术刀、手术针、手术镊与导管等；针对目前眼科手术机器人涉及疾病范围的局限性，研发出一种眼病通用型手术机器人或将成为眼科手术机器人发展的一项重大挑战；为了提高疾病诊断、手术决策与方案规划的准确性，为眼科手术机器人辅助操作提供指导，未来有望研发出一套眼科手术智能决策系统。可预见的是，未来眼科手术机器人将朝着设计更加轻巧、智能，操作更为灵活、精准的方向发展。眼科显微手术机器人的研发与临床应用前景广阔，但依然任重道远。

**利益冲突声明：**本文不存在任何利益冲突。

**作者贡献声明：**①姜姍、王娇娇负责文献资料收集与整理；②姜姍负责撰写全文；③吴浩冉负责论文审阅与指导。

## 参考文献

- [1] Maier M, Hattenbach L O, Klein J, et al. Real-time optical coherence tomography-assisted high-precision vitreoretinal surgery in the clinical routine[J]. *Ophthalmologie*, 2020, 117(2): 158–165.
- [2] 王冬艳, 王丽英, 杨娜, 等. 视网膜光凝和玻璃体手术对糖尿病视网膜病变患者眼部功能及并发症的影响[J]. *河北医药*, 2023, 45(8): 1232–1234.
- [3] Soltani Sharif Abadi A, Ordys A, Kukielka K, et al. Review on challenges for robotic eye surgery; surgical systems, technologies, cost-effectiveness, and controllers[J]. *Int J Med Robot*, 2023, 19(4): e2524.
- [4] 王一, 周慧芳. 眼科手术机器人的研究进展[J]. *中华眼科杂志*, 2022, 58(9): 727–730.
- [5] 林铎儒. 眼科手术辅助机器人的发展现状和未来挑战[J]. *中华实验眼科杂志*, 2018, 36(10): 804–807.
- [6] 贺昌岩, 杨洋, 梁庆丰, 等. 机器人在眼科手术中的应用及研究进展[J]. *机器人*, 2019, 41(2): 265–275.
- [7] 王猛, 郑鲁明, 周鹏, 等. 达芬奇机器人手术系统在男性甲状腺手术中的临床应用[J]. *中华内分泌外科杂志*, 2021, 15(1): 15–20.
- [8] Kim D, Sim N S, Kim D, et al. Robot-assisted total thyroidectomy with or without robot-assisted neck dissection in pediatric patients with differentiated thyroid cancer[J]. *J Clin Med*, 2022, 11(12): 3320.
- [9] Ueta T, Yamaguchi Y, Shirakawa Y, et al. Robot-assisted vitreoretinal surgery: development of a prototype and feasibility studies in an animal model[J]. *Ophthalmology*, 2009, 116(8): 1538–1543.
- [10] HE C Y, YANG E, Patel N, et al. Automatic light pipe actuating system for bimanual robot-assisted retinal surgery[J]. *IEEE ASME Trans Mechatron*, 2020, 25(6): 2846–2857.
- [11] Yang U J, Kim D, Hwang M, et al. A novel microsurgery robot mechanism with mechanical motion scalability for intraocular and reconstructive surgery[J]. *Int J Med Robot*, 2021, 17(3): e2240.
- [12] Chen R, Folio D, Ferreira A. Optimal design of a multipole-electromagnet robotic platform for ophthalmic surgery[J]. *Micromachines (Basel)*, 2022, 14(1): 91.
- [13] Pandey S K, Sharma V. Robotics and ophthalmology: Are we there yet?[J]. *Indian J Ophthalmol*, 2019, 67(7): 988–994.
- [14] 胡一达, 李大寨, 宗光华, 等. 角膜移植显微手术机器人系统的研究[J]. *高技术通讯*, 2005, 15(1): 49–53.
- [15] 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[J]. *北京航空航天大学学报*, 2023, 49(9): 2406–2414.
- [16] 朱谷雨, 张景尚, 万修华, 等. 眼科机器人技术[J]. *国际眼科纵览*, 2018, 42(3): 213–216.
- [17] Nishisako S, Yamaguchi T, Kusano Y, et al. The predictability of graft thickness for Descemet's stripping automated endothelial keratoplasty using a mechanical microkeratome system[J]. *Sci Rep*, 2022, 12(1): 22210.
- [18] Ruzza A, Galeone A, Baruzzo M, et al. Eye bank management of irregular descemet stripping automated endothelial keratoplasty lenticules[J]. *Cornea*, 2021, 40(6): 786–789.
- [19] 陈亦棋, 张超特, 洪明胜, 等. 辅助玻璃体视网膜显微手术机器人系统的研制及应用[J]. *中华实验眼科杂志*, 2017, 35(1): 38–41.
- [20] WANG Y, SUN J, LIU X, et al. Robot-assisted orbital fat decompression surgery: first in human[J]. *Transl Vis Sci Technol*, 2022, 11(5): 8.
- [21] Jeannon J P, Faulkner J, Uddin J, et al. Robotic assisted orbital surgery (RAOS) -A novel approach to orbital oncology surgery[J]. *Eye(Lond)*, 2023, 37(5): 1040–1041.
- [22] 中华医学会眼科学分会角膜病学组. 中国人工角膜移植手术专家共识(2021年)[J]. *中华眼科杂志*, 2021, 57(10): 727–733.
- [23] Savastano A, Rizzo S. A novel microsurgical robot: preliminary feasibility test in ophthalmic field[J]. *Transl Vis Sci Technol*, 2022, 11(8): 13.
- [24] Bourcier T, Nardin M, Sauer A, et al. Robot-assisted pterygium surgery: feasibility study in a nonliving porcine model[J]. *Transl Vis Sci Technol*, 2015, 4(1): 9.
- [25] Bourcier T, Chammas J, Becmeur P H, et al. Robotically assisted pterygium surgery: first human case[J]. *Cornea*, 2015, 34(10): 1329–1330.
- [26] Bourcier T, Chammas J, Becmeur P H, et al. Robot-assisted simulated cataract surgery[J]. *J Cataract Refract Surg*, 2017, 43(4): 552–557.
- [27] Wilson J T, Gerber M J, Prince S W, et al. Intraocular robotic interventional surgical system (IRISS): mechanical design, evaluation, and master-slave manipulation[J]. *Int J Med Robot*, 2018, 14(1): 259–265.
- [28] Faridpooya K, van Romunde S H M, Manning S S, et al. Randomised controlled trial on robot-assisted versus manual surgery for pucker peeling[J]. *Clin Exp Ophthalmol*, 2022, 50(9): 1057–1064.
- [29] Gijbels A, Smits J, Schoevaerdt L, et al. In-human robot-assisted retinal vein cannulation, a world first[J]. *Ann Biomed Eng*, 2018, 46(10): 1676–1685.
- [30] Willekens K, Gijbels A, Smits J, et al. Phase I trial on robot assisted retinal vein cannulation with ocriplasmin infusion for central retinal vein occlusion[J]. *Acta Ophthalmol*, 2021, 99(1): 90–96.

编辑: 张笑嫣