

## 眼科手术辅助机器人的发展现状和未来挑战

林铎儒 综述 黄凯 林浩添 审校

510060 广州,中山大学中山眼科中心 眼科学国家重点实验室(林铎儒、林浩添);510275 广州,中山大学数据科学与计算机学院(黄凯)

通信作者:林浩添,Email:gddlht@aliyun.com

DOI:10.3760/cma.j.issn.2095-0160.2018.10.015

**【摘要】** 手术机器人具有灵活性好、精度高和操作稳定等优点,是提高眼科手术操作安全性和精准性的重要途径。国内外学者对眼科手术辅助机器人在眼前节和眼后节手术中的应用进行了探索,并完成了仿真和动物实验验证。但眼科手术辅助机器人要真正进入临床应用还面临着一些挑战,包括缺乏智能化决策系统、手术机器人涉及的眼科疾病范围局限、智能手术工具种类少和高精度导航技术水平不足等。本文将从眼科手术辅助机器人的发展现状和未来挑战两方面进行综述。

**【关键词】** 眼科手术机器人;人工智能;发展现状;未来挑战

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(91546101);中山大学国家重大科技项目前瞻培育专项(2018)

**Development status and future challenges of ocular surgical robot** Lin Duoru, Huang Kai, Lin Haotian

State Key Laboratory of Ophthalmology, Zhongshan Ophthalmic Center, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510060, China (Lin DR, Lin HT); School of Data and Computer Science, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China (Huang K)

Corresponding author: Lin Haotian, Email: gddlht@aliyun.com

**【Abstract】** Surgical robots have the advantages of good flexibility, high precision and stable operation, which is an important way to improve the safety and accuracy of ophthalmic surgical operations. Scholars have carried out preliminary explorations on the application of robots in the anterior and posterior segmental ocular surgeries and completed the simulation and animal experiments. However, there are still some challenges for the ophthalmic surgical robots to enter the clinical application, including the lack of intelligent decision-making systems, the limited scope of ocular diseases involved in surgical robots, the small number of types of intelligent surgical tools, and the lack of high-precision navigation technologies. This article will systematically review the development status and future challenges of ocular surgical robots.

**【Key words】** Ophthalmic surgical robot; Artificial intelligence; Development status; Future challenge

**Fund program:** National Natural Science Foundation of China (91546101); Forward-looking Cultivation Project of National Special Science and Technology Program of Sun Yat-sen University (2018)

随着精密机械技术的发展,手术辅助机器人的应用成为解决有限的眼科医师数量与庞大的患者群体之间的“供需矛盾”和提高手术精准度的重要方向。手术机器人具有灵活性好、精度高和操作稳定等优点,是提高眼科手术操作安全性和精准性的重要途径。早在 30 年前,国内外就开始了眼科手术机器人的探索,研制出具有一定力反馈和震颤补偿功能的眼前节、眼后节手术机器人辅助系统,并进行了动物和模拟实验,显示出机器人辅助在眼科手术中的优势。但目前国内外研发团队也面临着一些共同的问题,如眼科手术机器人可完成的手术方式单一、工具种类少、震颤补偿技术水平不足、缺乏与智能技术的融合、无法智能进行手术方案决策和风险规避等,这些问题是

眼科手术机器人进入临床应用的瓶颈。本文将从眼科手术辅助机器人的发展现状和未来挑战两方面进行综述。

### 1 眼科手术辅助机器人的发展现状

目前,眼科手术辅助机器人的报道涵盖眼前节和眼后节手术,涉及角膜移植、白内障和玻璃体视网膜手术等领域,大部分已完成仿真模拟测试或动物实验,少部分进入临床应用阶段。

#### 1.1 眼前节手术

显微角膜移植手术是各种原因所致的角膜白斑、严重感染性角膜炎和圆锥角膜等病变有效的治疗方法<sup>[1]</sup>。角膜移植手术对角膜植片的几何形状、缝线间距与松紧度等要求极高,手

术的成功率在很大程度上决定于术者的操作,而手术辅助机器人可以提高角膜移植术者操作的稳定性和精准度。早期的研究工作主要针对如何提高角膜植片和植床切割精度展开。1986 年,Tejima 等<sup>[2]</sup>研制出了一种用于角膜切割的多自由度关节机器人,并通过吸附装置和气压测微计保证角膜的切割精度。为了进一步提高角膜植片和植床的精度和对角膜切割形状的精准控制,Lang 等<sup>[3]</sup>研发了低能量的准分子激光角膜切割系统。直到 20 世纪末,Langenbucher 等<sup>[4]</sup>、Seitz 等<sup>[5]</sup>和 Smith 等<sup>[6]</sup>先后对角膜切割工具、切割自动化、角膜特性和系统结构方面展开了全面的研究工作。但这些机器人的末端执行器设计仍存在问题,影响角膜切割效果,限制了角膜移植显微手术机器人在实际手术中的应用。北京航空航天大学机器人研究所于永初等<sup>[7]</sup>设计出角膜移植显微手术机器人系统末端执行器,集成了微力传感器、微型直流电机和环钻。该末端执行器不但体积小、功能完善,而且具有满足实际手术操作要求的精度,触力传感器最小分辨率达 1 mN,位移传感器的精度达 4  $\mu\text{m}$  (手术对深度的精度要求为 10  $\mu\text{m}$ )。改良的末端执行器大大地提高了角膜切割的效果,但如何把角膜植片和植床精准地缝合起来是角膜移植手术机器人进入临床应用的另一难题。手工操作不可避免地存在生理颤抖,且传统的手工缝合高度依赖术者的经验积累和操作技巧,这些因素容易造成进针深度、间距不均匀和线结松紧不一等问题,导致术后医源性角膜散光的发生。魏东等<sup>[8]</sup>和 Yang 等<sup>[9]</sup>对医师手工缝合的动作轨迹进行分析,研发出角膜移植显微外科自动缝合器和控制系统,并完成了离体猪眼角膜缝合实验,结果表明该缝合机构可以很好地完成角膜缝合的系列动作,缝合跨度和深度精准合理,具有较好的缝合操作效果。在角膜植片制作和缝合技术难关突破的基础上,北京航空航天大学机器人研究所、北京市同仁医院眼科中心和北京市眼科研所联合研制了角膜移植显微手术辅助机器人系统,由视觉系统、控制系统、力/位感知系统、末端执行器和自动缝合机构 6 个子系统组成<sup>[10]</sup>。该系统可以辅助医师精准、安全、高效地完成角膜钻切和植片缝合 2 个手术操作。兔眼活体实验结果表明,该系统缝线跨距误差为 0.15 mm,钻切深度和缝合深度误差均在 10  $\mu\text{m}$  以内。此外,法国 Chammas 等<sup>[11]</sup>使用新型达芬奇辅助手术系统进行了 12 例离体动物穿透性角膜移植手术,手术过程顺利,无并发症发生,术后频域光相干断层扫描(optical coherence tomography, OCT)检查确认缝线达到了精准深度。

白内障是人类可逆盲的首要病因,而且白内障患者数量庞大,手术机器人在白内障领域的应用将具有重要的临床意义。然而,目前国内外关于白内障手术辅助机器人的报道较少。除了穿透性角膜移植,法国 Bourcier 等<sup>[12]</sup>使用同一达芬奇辅助手术系统,结合超声乳化技术,进行了 25 例白内障摘出手术的实验室训练,证实了机器人辅助白内障手术安全、可行。达芬奇手术系统在超声乳化过程中体现出其在眼内操作的灵巧性和手术视野的可视化。不同于大型的达芬奇操作系统,美国 Cambridge Consultants 公司研制出一款灵巧的白内障手术机器人原型机 Axxis,术者可以通过屏幕监测机械臂与晶状体的相

对位置和术中情况,应用高刚度的线缆控制 Axxis 多条直径仅 1.8 mm 的柔软机械臂进行手术操作<sup>[13]</sup>。美国 Wilson 等<sup>[14]</sup>也研发了一套眼内机器人干预手术系统 IRISS,经过离体猪眼的实验验证,可完成多种眼科手术关键步骤,并能完整地进行白内障摘出手术。IRISS 系统的操作工具末端嵌合了 OCT 影像设备以保证手术工具的末端定位精度达到 0.2 mm 以内。

## 1.2 眼后节手术

黄斑前膜严重影响患者的视觉质量,在视锐度最高且极其脆弱的黄斑区剥除紧紧贴附的厚度仅为 0.01 mm 的血管性纤维增生膜对眼科医师来说十分具有挑战性,医师力觉的感知极限和 0.1 mm 以上的生理颤抖幅度限制了剥膜手术的成功率。据此,美国卡内基梅隆大学机器人学院研制了一套结合了力觉感应微镊和主动震颤补偿小型机械手 Micron<sup>[15]</sup>,解决了消除人手颤抖和对视网膜操作力的精准控制的需求问题。美国约翰霍普金斯大学也研发出了 3 个自由度力感应微型镊子,用于辅助视网膜玻璃体手术的剥膜操作<sup>[16]</sup>。使用非线性的方法对微型镊轴向和横向力作了准确、全面的测量评估,达到横向平面 0.15 mN、轴向 2.00 mN 均方根误差的精度范围。该团队还把微振动调制原理应用于机器人辅助膜剥离过程中,通过对操作器械诱发一定频率的微振动,促进黏附于视网膜表面的薄纤维膜分离<sup>[17]</sup>。基于上述技术的研究和积累,由牛津大学纳菲尔德眼科实验室发起,荷兰埃因霍温大学一家医学机器人公司制造的视网膜剖割装置 R2D2<sup>[18]</sup>,已经进入人体应用阶段,并成功地完成了 1 例视网膜前膜剥除手术,引起世界各地媒体的广泛关注。

视网膜静脉插管将治疗药物注射到闭塞的视网膜静脉和视网膜血管搭桥手术均是治疗视网膜缺血性病变的重要手段。然而,视网膜静脉血管套管插入术近 85% 的操作穿刺力小于 5 mN<sup>[19]</sup>,远低于人体手生理力感知信息的阈值,使得手术成功率大大降低。北京航空航天大学与温州医科大学附属眼视光医院基于血管套管操作的设计要求,研制出一套视网膜血管搭桥手术机器人系统样机<sup>[20]</sup>。该样机设计采用转动副结合双平行四杆远程运动中心(remote center of motion, RCM)构成 2 个自由度的 RCM 机构作为姿态调整模块,并针对机械臂进行了末端操作器的机构设计,通过步进电机驱动,实现眼内手术工具的精准运动,并进行了 Matlab 仿真测试和乒乓球模拟实验。美国卡内基梅隆大学机器人学院研发的 EyeSLAM 算法可以快速、准确地绘制和定位视网膜血管系统<sup>[21]</sup>,对提高机器人辅助眼内显微手术如视网膜血管插管的有效性和临床应用至关重要。

此外,中山大学无人研究所和德国慕尼黑工业大学合作研发了视网膜注射原型机 iRAMS<sup>[22-23]</sup>。iRAMS 整机具有 5 个自由度,配备 OCT 导航系统,重复定位精度可达 0.02 mm,已经基本完成动物实验验证,目前正与中山大学中山眼科中心筹备早期临床试验。北京航空航天大学与温州医科大学机器人团队还研制了辅助玻璃体视网膜显微手术机器人系统<sup>[24]</sup>。该系统具有 2 个机械手臂,每个手臂能完成 5 个自由度的眼内操作,同样采用了虚拟 RCM 机构以减少器械对穿刺孔的损伤,手术操作的精度达到 10  $\mu\text{m}$ 。借助该系统,低年资医师也可以在人

机协同控制模式下顺利完成离体猪眼玻璃体切割和人造玻璃体后脱离操作,在 15 例手术过程中均无术源性损伤,实验成功率为 100%。美国卡内基梅隆大学机器人学院研发的小型机械手 Micron 可以将激光光凝图像模式的治疗方案应用于视网膜激光治疗的实际操作中,极大地提高手术的准确度并缩短手术时间<sup>[25-26]</sup>。

## 2 眼科手术辅助机器人的未来挑战

手术辅助机器人已经在眼前节和眼后节手术中得到应用,但目前国内外机器人研发团队面临一些挑战,如眼科手术机器人手术方式单一、工具震颤补偿技术水平不足、缺乏与智能技术的融合等,这些问题是眼科手术机器人进入临床应用的瓶颈。

### 2.1 智能化手术决策系统

正确的疾病诊断、手术决策与方案规划是眼科手术成功的重要前提。目前大部分眼科机器人辅助手术都需要经验丰富的医师来主导、判断并执行操作,随着人工智能技术的日益发展,研发眼科手术智能决策系统逐渐可以实现。通过动态时序特征捕获和长循环卷积网络等技术,对青光眼、白内障、玻璃体视网膜疾病等眼病非结构化图像数据和结构化眼部生物参数进行学习,组成各种眼病的特征提取网络,并融合眼科专家的诊疗经验,有望研发出一套能实现精准判断疾病、把握手术指征、评估手术风险和并发症且能为患者制定个性化手术方案的多模块一体化眼病全程诊疗人工智能系统,作为手术机器人的“大脑”,为机器人辅助手术操作提供了循证医学的理论指导依据,减少对医师经验的依赖。中山大学中山眼科中心分析挖掘全球最大的眼科手术大数据资源池<sup>[27]</sup>,利用卷积神经网络实施了白内障的术前智能决策,将眼科专家微创手术经验与人工智能关键技术深度融合,实现了智能手术决策和方案规划<sup>[28]</sup>。目前该项技术已成功转化为实体样机,开启了全球首个人工智能眼科机器人门诊。

### 2.2 眼病通用型手术机器人

眼病种类多达数百种,但目前眼科手术机器人涉及的疾病不足十种,范围非常局限。如何拓展手术机器人在眼科疾病的应用范围,研发出常见眼病通用型辅助手术机器人系统,成为眼科手术机器人发展的另一挑战。在眼病通用型手术平台上搭载多种可替换手术工具的模式是解决手术机器人实现多种常见眼病手术操作和多个操作步骤的重要方法。温州医科大学沈丽君团队研制的辅助玻璃体视网膜显微手术机器人系统<sup>[24]</sup>,具有 2 个机械手臂,均可握持眼科常用的手术器械,如显微镊、玻璃体切割头、导光探头等,可完成玻璃体切割和玻璃体后脱离手术。高度集成和模块化设计可以使机器人机构更加紧凑,为开发更多的手术操作功能提供物理空间。约翰霍普金斯大学采用的曲柄-滑块机构设计,实现可调节虚拟 RCM,使得第二代稳定手的结构更加紧凑<sup>[29]</sup>。

### 2.3 智能手术工具的研发

由于眼科显微手术极为狭窄的操作空间和极高的操作精度要求,目前仍然缺少可行的眼内微米级微观操作智能手术工具。根据眼科手术操作精度和操作空间的要求,可从仿生学角

度,探究新型的智能手术工具,提出新型的机构、驱动设计与综合理论方法。模仿昆虫的虹吸式口器或昆虫产卵管等的运动机制,利用丝驱动的多层滑动模块,可实现工具末端的伸缩和弯曲运动,开发适于局部药物注射及液体吸引的导管工具和适用于精准手术的手术导管、手术针、手术镊和手术刀等。

眼科显微手术操作中,工具与眼内组织间的作用力通常小于 7.5 mN<sup>[30]</sup>,远低于人手生理力感知信息的阈值。在对关键的结构组织进行手术操作时,能保障操作安全的触觉感知技术显得十分必要。具有力/触觉反馈功能的手术工具可以感知超过人类生理极限的作用力,进而对其进行放大和控制,并以触觉的形式反馈给术者,协助医师精准、安全地完成手术。目前触觉反馈技术已经得到了一定程度的发展,研究团队多借助布拉格光纤光栅(fiber bragg grating, FBG)传感器检测并以局部振动或压力的形式向医师提供触觉反馈,以保证手术的安全性<sup>[16,31]</sup>。在此基础上,对反馈形式进行深入研究,探究满足直觉操作的半自动化控制方法和保障手术精度前提下的有效反馈形式,进一步以手术操作的直觉性、准确性以及简便性为目标,设计可靠、有效的智能手术工具。除了力/触觉反馈功能,眼科手术工具震颤补偿水平的进一步提升仍是不小的挑战。研发具有震颤补偿功能的手术工具,主要包括运动检测传感器、驱动器和执行机构 3 个部分。通过检测手/工具的运动状态,识别因人类生理颤抖造成的“错误”运动,进而驱动执行机构对这一“错误”运动进行补偿。应用高速光学跟踪技术、选择悬臂梁双压电晶片或叠层式压电元件可以实现震颤补偿手术工具的研制和进一步提升。

### 2.4 实时导航技术与操作精准性的提升

美国范德堡大学采用机器人辅助以及实时 OCT 反馈技术提高了医师在手术操作中对深度感知的准确性<sup>[32]</sup>,导航技术的融合成为眼科手术机器人发展的新趋势。然而,手术工具可能会遮挡光线的传递,将部分或者全部阴影投影到图像上,影响成像质量,甚至误导医师,这是 OCT 导航技术发展面临的一大挑战。优化手术工具的设计,使用透明材料和 OCT 相容性材料可有效减少阴影效应。此外,通过在不同位置进行多个 OCT 扫描,利用 3D 还原重建技术消除阴影<sup>[33]</sup>,也是解决手术视野阴影问题的有效方法。将 OCT 技术与力/触觉反馈技术结合,并集成多种传感器,包括 FBG、压阻式、光学传感器等,形成闭环控制,实现对手术的实时主动指导,以保证手术工具精准地在预定点或预定轨道上运行。这些研究将会极大地提高手术操作的准确性和安全性。

## 3 总结与展望

眼科手术机器人系统的研发是一项多学科交叉、“产学研医工”结合的协同创新系统工程研究,涉及眼科临床医学、人工智能、机器人控制与评估,以及工程设计基础等多个领域。国内外机器人研发团队利用自动控制、机械设计、显微眼科等多学科技术的融合优势,对眼科手术辅助机器人在眼前节和眼后节手术的应用进行了探索,并完成了实验验证,但要真正进入临床应用还面临着一些挑战。研发智能化手术决策系统以期

为机器人辅助手术操作提供理论指导、加强眼病通用型手术机器人和智能手术工具的研制、优化术中实时导航技术并进一步提升手术操作的精准度是眼科手术机器人发展的方向。

### 参考文献

- Amiri F, Ghiyasvandian S, Navab E, et al. Corneal transplantation: a new view of life [J]. *Electron Physician*, 2017, 9 (4) : 4055–4063. DOI: 10.19082/4055.
- Tejima N, Funakubo H, Dohi T, et al. New microsurgical robot system for corneal transplantation [J]. *IEEE Trans Robot Automat*, 1986, 2 (2) : 106–113.
- Lang GK, Schroeder E, Koch JW, et al. Excimer laser keratoplasty. Part 1: Basic concepts [J]. *Ophthalmic Surg*, 1989, 20 (4) : 262–267.
- Langenbucher A, Seitz B, Kus MM, et al. Graft decentration in penetrating keratoplasty: nonmechanical trephination with the excimer laser (193 nm) versus the motor trephine [J]. *Ophthalmic Surg Lasers*, 1998, 29 (2) : 106–113.
- Seitz B, Langenbucher A, Fischer S, et al. The regularity of laser keratectomy depth in nonmechanical trephination for penetrating keratoplasty [J]. *Ophthalmic Surg Lasers*, 1998, 29 (1) : 33–42.
- Smith N, Betemps M, Jutard A, et al. Penetrating keratoplasty: a robotised cut of cornea [J]. *Proceedings*, 1999, 2 (??) : 740–745.
- 于永初, 毕树生, 李大寨, 等. 角膜移植显微手术机器人末端执行器的设计 [J]. *机器人*, 2004, 26 (3) : 256–258, 262. Yu YC, Bi SS, Li DZ, et al. Design of an end effector used on cornea grafting microsurgery robot [J]. *ROBOT*, 2004, 26 (3) : 256–258, 262.
- 魏东, 杨洋, 李大寨, 等. 角膜移植显微外科自动缝合器的设计 [J]. *机器人*, 2006, 28 (3) : 259–263. Wei D, Yang Y, Li DZ, et al. Design of an automatic suturing mechanism for corneal grafting microsurgery [J]. *ROBOT*, 2006, 28 (3) : 259–263.
- Yang Y, Xu C, Deng S, et al. Insertion force in manual and robotic corneal suturing [J]. *Int J Med Robot*, 2012, 8 (1) : 25–33. DOI: 10.1002/rcs.419.
- 梁庆丰, 李大寨, 胡一达, 等. 辅助角膜移植显微手术机器人系统的实验性应用研究 [J]. *中华眼科杂志*, 2009, 45 (9) : 823–826. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0412-4081.2009.09.013. Liang QF, Li DZ, Hu YD, et al. Operation of cornea grafting microsurgery robot system [J]. *Chin J Ophthalmol*, 2009, 45 (9) : 823–826. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0412-4081.2009.09.013.
- Chammas J, Sauer A, Pizzuto J, et al. Da Vinci xi robot-assisted penetrating keratoplasty [J]. *Transl Vis Sci Technol*, 2017, 6 (3) : 21–26. DOI: 10.1167/tvst.6.3.21.
- Bourcier T, Chammas J, Becmeur PH, et al. Robot-assisted simulated cataract surgery [J]. *J Cataract Refract Surg*, 2017, 43 (4) : 552–557. DOI: 10.1016/j.jcrs.2017.02.020.
- Axis Medical Robotic Concept. Cambridge Consultants, 2017, [2018–03–08]. <https://www.cambridgeconsultants.com/case-studies/axis-medical-robotic-concept>.
- Wilson JT, Gerber MJ, Prince SW, 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. DOI: 10.1002/rcs.1842.
- Gonenc B, Feldman E, Gehlbach P, et al. Towards robot-assisted vitreoretinal surgery: force-sensing micro-forceps integrated with a handheld micromanipulator [J/OL]. *IEEE Int Conf Robot Autom*, 2014, 2014 : 1399–1404 [2018–02–16]. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4228486/>. DOI: 10.1109/ICRA.2014.6907035.
- Gonenc B, Chamani A, Handa J, et al. 3-DOF force-sensing motorized micro-forceps for robot-assisted vitreoretinal surgery [J]. *IEEE Sens J*, 2017, 17 (11) : 3526–3541. DOI: 10.1109/JSEN.2017.2694965.
- Gonenc B, Gehlbach P, Taylor RH, et al. Effects of micro-vibratory modulation during robot-assisted membrane peeling [J/OL]. *Rep U S*, 2015, 2015 : 3811–3816 [2018–02–19]. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4838409/>. DOI: 10.1109/IROS.2015.7353912.
- 王俊美, 编译. 牛津大学实施世界首例机器人眼科手术 [N]. *中国社会科学报*, 2015. 006.
- Ergeneman O, Pokki J, Počepcova V, et al. Characterization of puncture forces for retinal vein cannulation [J]. *J Med Device*, 2011, 5 (4) : 2833–2833.
- 肖晶晶, 杨洋, 沈丽君, 等. 视网膜血管搭桥手术机器人系统的研究 [J]. *机器人*, 2014, 36 (3) : 293–299. DOI: 10.3724/SP.J.1218.2014.00293. Xiao JJ, Yang Y, Shen LJ, et al. A robotic system for retinal vascular bypass surgery [J]. *Robot*, 2014, 36 (3) : 293–299. DOI: 10.3724/SP.J.1218.2014.00293.
- Braun D, Yang S, Martel JN, et al. EyeSLAM: Real-time simultaneous localization and mapping of retinal vessels during intraocular microsurgery [J]. *Int J Med Robot*, 2018, 14 (1) : 759–762. DOI: 10.1002/rcs.1848.
- Barthel A, Trematerra D, Nasser MA, et al. Haptic interface for robot-assisted ophthalmic surgery [J/OL]. *Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc*, 2015, 2015 : 4906–4909 [2018–02–18]. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4838409/>. DOI: 10.1109/EMBC.2015.7319492.
- Chen J, Lin D, Lin Z, et al. Height, weight and body mass index of children with congenital cataracts before surgical treatment [J/OL]. *BMC Ophthalmol*, 2017, 17 (1) : 119 [2018–02–18]. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5504552/>. DOI: 10.1186/s12886-017-0513-4.
- 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. DOI: 10.3760/cma.j.issn.2095-0160.2017.01.008. Chen YQ, Zhang CT, Hong MS, et al. Development of cooperative robot-assistant surgery system for vitreoretinal microsurgery and its feasibility test in an animal model [J]. *Chin J Exp Ophthalmol*, 2017, 35 (1) : 38–41. DOI: 10.3760/cma.j.issn.2095-0160.2017.01.008.
- Becker BC, MacLachlan RA, Lobes LA, et al. Semiautomated intraocular laser surgery using handheld instruments [J]. *Lasers Surg Med*, 2010, 42 (3) : 264–273. DOI: 10.1002/lsm.20897.
- Becker BC, Valdivieso CR, Biswas J, et al. Active guidance for laser retinal surgery with a handheld instrument [J]. *Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc*, 2009, 2009 : 5587–5590. DOI: 10.1109/IEMBS.2009.5333489.
- Lin H, Long E, Chen W, et al. Documenting rare disease data in China [J/OL]. *Science*, 2015, 349 (6252) : 1064 [2018–02–19]. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/26339020>. DOI: 10.1126/science.349.6252.1064-b.
- Long E, Lin H, Liu Z, et al. An artificial intelligence platform for the multihospital collaborative management of congenital cataracts [J]. *Nature Biomedical Engineering*, 2017, 1 : 0024. DOI: 10.1038/s41551-016-0024.
- Uneri A, Balicki MA, Handa J, et al. New steady-hand eye robot with micro-force sensing for vitreoretinal surgery [J]. *Proc IEEE RAS EMBS Int Conf Biomed Robot Biomechatron*, 2010, 2010 (26–29) : 814–819. DOI: 10.1109/BIOROB.2010.5625991.
- Gupta PK, Jensen PS, Jr EDJ. Surgical forces and tactile perception during retinal microsurgery: Springer Berlin Heidelberg, 1999.
- Kumar S, Shrikanth V, Amrutur B, et al. Detecting stages of needle penetration into tissues through force estimation at needle tip using fiber Bragg grating sensors [J/OL]. *J Biomed Opt*, 2016, 21 (12) : 127009 [2018–02–16]. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/28036093>. DOI: 10.1117/1.JBO.21.12.127009.
- Yu H, Shen JH, Shah RJ, et al. Evaluation of microsurgical tasks with OCT-guided and/or robot-assisted ophthalmic forceps [J]. *Biomed Opt Express*, 2015, 6 (2) : 457–472. DOI: 10.1364/BOE.6.000457.
- Zhou M, Roodaki H, Eslami A, et al. Needle segmentation in volumetric optical coherence tomography images for ophthalmic microsurgery [J]. *Applied Sci*, 2017, 7 (7) : 748–752.

(收稿日期: 2018-04-03 修回日期: 2018-08-26)

(本文编辑: 杜娟)