

显微手术机器人系统在眼底病中的应用现状及进展

王晒, 陈佩, 雍红芳, 张红兵

(西安市第一医院·西北大学附属第一医院眼科 陕西 西安 710002)

摘要 眼科手术具有精密性高、操作空间小、学习曲线长等特点, 对手术机器人操作系统要求较高。随着机械学、生物力学及计算机学等多学科的发展, 显微手术机器人系统在眼科中的应用将越来越广泛, 可以解决人生理性震颤、心理因素波动、长时间手术身体疲劳等生理局限, 未来将大大提高眼科手术的成功率。本文就国内外显微手术机器人系统在眼底病手术中的应用和进展做以综述, 并对关键技术进行分析。

关键词 显微外科; 手术机器人; 眼底病; 光学相干断层扫描; 光纤布拉格光栅微触觉感受器; 人工智能

中图分类号 R608 R779.6 **文献标识码** A **文章编号** 2096-7721(2024)02-0186-08

Current status and progress of microsurgical robotic system in fundus disease

WANG Bing, CHEN Pei, YONG Hongfang, ZHANG Hongbing

(Department of Ophthalmology, Xi'an No.1 Hospital/The First Affiliated Hospital of Northwest University, Xi'an 710002, China)

Abstract Ophthalmic surgery is characterized by high precision, small operating space and long learning curve, which has a higher requirement on robotic surgical system. With the development of mechanics, biomechanics and computer science, microsurgical robotic system has been used in various ophthalmic surgeries. It can reduce the physiological tremor of surgeons, relieve fatigue of surgeons caused by long time of operation and improve surgical stability and accuracy, which could greatly improve the success rate of surgery. The application and progress of microsurgical robotic system in eye surgery at home and abroad was reviewed, and the key technologies were analyzed in this paper.

Key words Microsurgery; Surgical Robot; Fundus Disease; Optical Coherence Tomography; Fiber Bragg Grating Micro-tactile Sensor; Artificial Intelligence

人类对外界事物的感知多是通过眼睛获得的, 通过眼睛学到的知识和获得的记忆可以达到 80% 以上。如果视力丧失, 人们会失去对外

部事物的主要感知能力, 造成严重的信息损失。目前, 我国仍然是世界上失明和视觉损伤患者数量最多的国家之一, 随着我国人口老龄化进程加

收稿日期: 2022-10-20 录用日期: 2023-07-03

Received Date: 2022-10-20 Accepted Date: 2023-07-03

基金项目: 陕西省自然科学基金基础研究计划重点项目 (2021JZ-60)

Foundation Item: Key Project of Natural Science Basic Research Plan in Shaanxi Province (2021JZ-60)

通讯作者: 张红兵, Email: zhanghongbing01@163.com

Corresponding Author: ZHANG Hongbing, Email: zhanghongbing01@163.com

引用格式: 王晒, 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 [J]. 机器人外科学杂志 (中英文), 2024, 5(2): 186-193.

Citation: WANG B, CHEN P, YONG H F, et al. Current status and progress of microsurgical robotic system in fundus disease[J]. Chinese Journal of Robotic Surgery, 2024, 5(2): 186-193.

快, 年龄相关性眼病患病率将日益增高。目前视网膜脱离、黄斑裂孔等多种眼底病仍主要依靠手术治疗。尽管当前已经应用了最精细的 27 G 微创玻璃体切割设备和先进的眼科手术显微镜^[1], 但是人手的生理性震颤、情绪波动和长时间手术导致的疲劳, 以及视网膜内界膜超薄透明等因素, 导致眼科医生在进行眼底病手术时, 仍然不能准确撕除特定的组织, 并有可能对邻近的视网膜组织造成损伤, 导致术后视力恢复不理想。

眼科显微手术机器人是集医学、机械学、生物力学及计算机学等多学科于一体的医疗器械综合体, 能够解决人手生理性震颤、心理因素波动、长时间手术身体疲劳、人眼观察程度有限等生理局限, 同时比人手更精准灵活、创伤更小, 显著提高手术效果的同时还能更好地节省医疗资源, 缓解医生人手不足问题^[2]。本研究对显微手术机器人系统在眼底病手术中的应用和进展进行综述, 并对关键技术进行分析。

1 国内外研究现状

眼科显微手术机器人系统按照操作方式可以分为手持式、自动式和主从式。本部分对这 3 种操作系统的研究现状进行简述, 并着重介绍主从式操作系统的研究进展。

1.1 国外研究现状

1.1.1 手持式操作系统 手持式操作系统的机械臂不做任何自由运动, 外科医生在术中手持执行器操作, 这种系统可控性强, 便于拥有多年临床经验的医生使用。典型的手持式眼科操作系统包括美国约翰霍普金斯大学研发的手持式微操作器 Micron 系统^[3]和协同控制的稳定眼科机器人(Steady-hand Eye Robot, SHER)系统^[4], 目前二者主要用于治疗视网膜血管性疾病。

Micron 系统通过光学跟踪和压电致动器感应抵消外界振动, 末端可在 $1\text{ mm} \times 1\text{ mm} \times 0.5\text{ mm}$ 的范围内运动^[5], 采用立体成像进行视觉传感以观察血管和注药器。在视觉控制和震颤补偿作用下, 可将最大误差由 $298\text{ }\mu\text{m}$ 减少至 $73\text{ }\mu\text{m}$ 。

SHER 系统集成于机器操作系统上, 外科医

生和操作系统通过力传感器连接, 协同控制使机械臂末端平滑的跟随人手运动, 系统能够感知操作者施加在工具上的力, 根据针尖检测到的力主动引导操作者运动, 保证末端执行器的运动不受人手生理性震颤干扰, 实现极高的运动控制精度和力矩控制^[6]。该操作系统主要应用于眼底血管穿刺等以前不可能完成的手术。

目前, 手持式机器人操作系统存在的主要问题是系统需借助执行器上的力传感器实现运动控制, 执行器结构的负载会降低系统刚度, 影响运动精度。另一方面, 为获得稳定的随动运动, 通常需要过滤传感器上同样较小的干扰力, 这会导致随动操作的灵敏度显著降低。

1.1.2 自动式操作系统 自动式手术机器人操作系统基于术前图像进行轨迹规划, 机械臂自动执行规划任务, 操作者术中不干预或者极少干预。早期的自动式操作系统主要用于一些高精度、高重复性的手术, 其操作对象与传统工业机器的操作对象同属钢体。随着计算机技术的发展, 机器人操作系统获得了更多类似人类的感知能力, 视觉传感、触觉传感和温度传感等技术使手术机器人操作系统更智能化、自动化地执行更加复杂的手术操作成为可能。相对于坚硬的钢体而言, 软组织手术更难实现自动化, 主要因为软组织在手术中很难固定和追踪。

加利福尼亚大学研制的“微手”^[7]属于微型手术机器人操作系统, 它配备了微机电系统(Micro Electro Mechanical System, MEMS)。该设备模仿人手, 可以通过气动控制稳定抓握力, 用 4 根手指(各长 4 mm)来调节卡尺的重量, 并能在 60 psi 的压缩空气压力下稳定地对猪眼的视网膜组织进行操作。

苏黎世联邦理工学院的 Nelson 等人^[8]研制了一种植入式磁性管状微型机器人操作系统, 用于眼后段药物的注射和微创手术。用磁性材料做成大小可以装入 23 号针头的管状微结构, 并以微创的方式注入眼内, 针对性地输送浓缩药物和氧气, 用以治疗视网膜静脉阻塞等眼底血管性疾

病。目前,管状微结构已广泛用于药物输送、生物传感、微流控制和3D细胞微反应器等领域。

1.1.3 主从式操作系统 主从式手术机器人操作系统的优点为“主手操纵,从手跟随”,一般由操作者操纵主手端,从手端的执行器可以在人难以接近、无法进入或对人体有害的环境中模拟主手端完成复杂操作。主从式的操作方式可以使手术医生完全掌握手术进度,并可通过视觉反馈、触觉反馈和声音反馈获得相当的操作感和临场感。主从式手术机器人操作系统主要有4种类型:弧形/球形导轨安装类型、平行四边形远程运动中心(Remote Center of Motion, RCM)类型、Delta类型、多关节串联型和串联/并联混合型^[9]。加州大学洛杉矶分校的Wilson JT等人^[10]研制的弧形/球形导轨安装类型手术机器人操作系统IRISS,可同时操作多个手术器械,尖端精度为 (0.205 ± 0.003) mm,并用离体猪眼进行了评估。Yu H R团队^[11]在2016年设计了一种新型Delta类型的双臂眼科手术机器人操作系统,手术精度高($<5 \mu\text{m}$),并在动物模型中完成了血管插管和支架安装。

除上述几种主从式机器操作系统类型外,其他典型的主从式手术机器人操作系统还有美国Intuitive Surgical公司的达芬奇机器人操作系统^[12]、荷兰埃因霍温理工大学与Preceyes BV公司联合研发的Preceyes系统^[13]等。随着达芬奇机器人操作系统的不断升级和改进(2000、S、Si、Si HD、X、Xi、SP等版本),该机器人系统先后被用于人和猪的尸眼角膜缝合和角膜移植手术,以及临床上羊膜移植和翼状胬肉手术,获得了一定成功^[14]。但是由于手术操作空间和精度所限,目前的达芬奇手术机器人尚不能用于眼底手术。

荷兰埃因霍温理工大学研究人员研发的Preceyes系统^[13],主手和从手各有5个关节,主手中3个旋转关节轴线的相交点相当于从手的不动点,从手可以模拟主手的运动,操作直观。从手采用双平行四边形不动点结构,器械通过巩膜处穿刺点进入眼球内部,并在手术操作中保

持这个点的固定。该机器人手术精度小于 $10 \mu\text{m}$,医生可以使用该机器人进行视网膜下药物注射操作、剥除黄斑前膜($61 \mu\text{m}$)、对黄斑裂孔进行内界膜撕除($<20 \mu\text{m}$)等操作,控制系统能够实现主从控制、过滤手部震颤、主从运动增益、从主力反馈以及虚拟边界限制等功能。

1.2 国内研究现状 国内对眼科显微手术机器人系统的研究较少,主要操作方式为主从式。2014年,温州医科大学附属眼视光医院的沈丽君教授联合北京航空航天大学杨洋教授共同研发了视网膜血管搭桥手术机器人系统,对视网膜表面平行运动进行了轨迹规划和仿真,并基于乒乓球模型进行了可行性分析实验,但仍需通过动物实验做进一步研究^[15]。2017年,该团队还共同研制一套辅助眼底显微手术机器人系统,该系统具有5个可握持眼科常用手术器械的机械臂,医生通过控制器操控2个机械手臂,成功完成了对15只离体猪眼的玻璃体切割和玻璃体后脱离手术^[16]。但这2套操作系统尚处于实验室研究阶段,仍不能应用于临床。

北京航空航天大学郭如靖等人^[17]针对眼内镊进行了微力感知研究,在标准的眼内镊上进行了光纤布拉格光栅(Fiber Bragg Grating, FBG)传感器的集成设计。在膜镊末端的套筒上布置3根互呈 120° 的FBG传感器,用以感知和测量横向力,并在猪眼进行测试,发现其接触力过小,且由于轴向镊筒的刚度很大,很难精准测量轴向力。

视网膜组织精细娇嫩,机器人辅助操作的视网膜手术需要对操作点进行精准定位。同为北京航空航天大学的周嘉悦等人^[18]通过对比度受限的直方图均衡算法,提取图像中的血管进行立体匹配,同时去除周围背景对立体匹配的影响,最后利用双目视觉中的视差原理,完成对眼底视网膜血管图像的三维重建,实验证实该方法可以精准定位视网膜血管上的手术操作点。

综上所述,国内眼底病手术机器人系统的研究起步较晚,与国外同类设备的发展水平尚

有一定差距，哈尔滨工业大学、上海交通大学、北京理工大学等国内许多科研院所都有从事医疗手术机器人操作系统相关方面的研究，但距离临床应用还有一定距离^[19]。

2 显微手术机器人操作系统相关技术研究进展

2.1 光学相干断层扫描 (Optical Coherence Tomography, OCT) 技术

OCT 技术近年来迅速发展，其利用弱相干光干涉的原理，检测不同深度生物组织对入射弱相干光的反射或散射信号，通过扫描和处理得到生物组织的二维或三维图像（如图 1）。目前已经从时域 OCT、频域 OCT 发展到第三代的扫频光源 OCT^[20]。与超声、血管造影等诊断技术相比，OCT 具有分辨率高、灵敏度强、非接触式、非侵入式、成像时间快等明显优势，术前 OCT 检测图像可以更为清晰直观地展现视网膜组织的横截面图像，可以清楚分辨黄斑裂孔，鉴别假性裂孔与板层裂孔。新近整合到眼科手术显微镜上的术中 OCT，除了具备上述

优点外，还使眼科医生在手术中可以像手术前那样清晰地看到包括黄斑裂孔在内的视网膜横截面图像，同时也为提高眼科显微手术机器人系统中分辨率提供了重要的眼部图像数据获取手段。

最近 OCT 也被用作距离传感器以实现微创玻璃体视网膜手术中的实时观察和控制。连接扫频 OCT 的智能手术器械可以利用 OCT 感知距离信息，同时驱动一个补偿性微马达来消除术者的手部生理性震颤，提高手术的精确性，降低手术风险^[21]。但是在模拟的玻璃体视网膜环境下，有学者对比了医生使用和不使用手术机器人系统操控显微机械臂的手术结果，发现在三维移动的准确性和精确性方面，手术机器人系统对缺乏经验的医生有很大帮助，但是如手术深度的不可视化等诸多因素都将影响控制的成功率。因此，为了使手术机器人系统的辅助功能最大化，手术过程必须清晰可视。越来越多的学者认为将来机器人辅助眼科手术需要摄像机联合其他一些数据源，如术中 OCT 图像、系统末端效应器和压力感应器等。

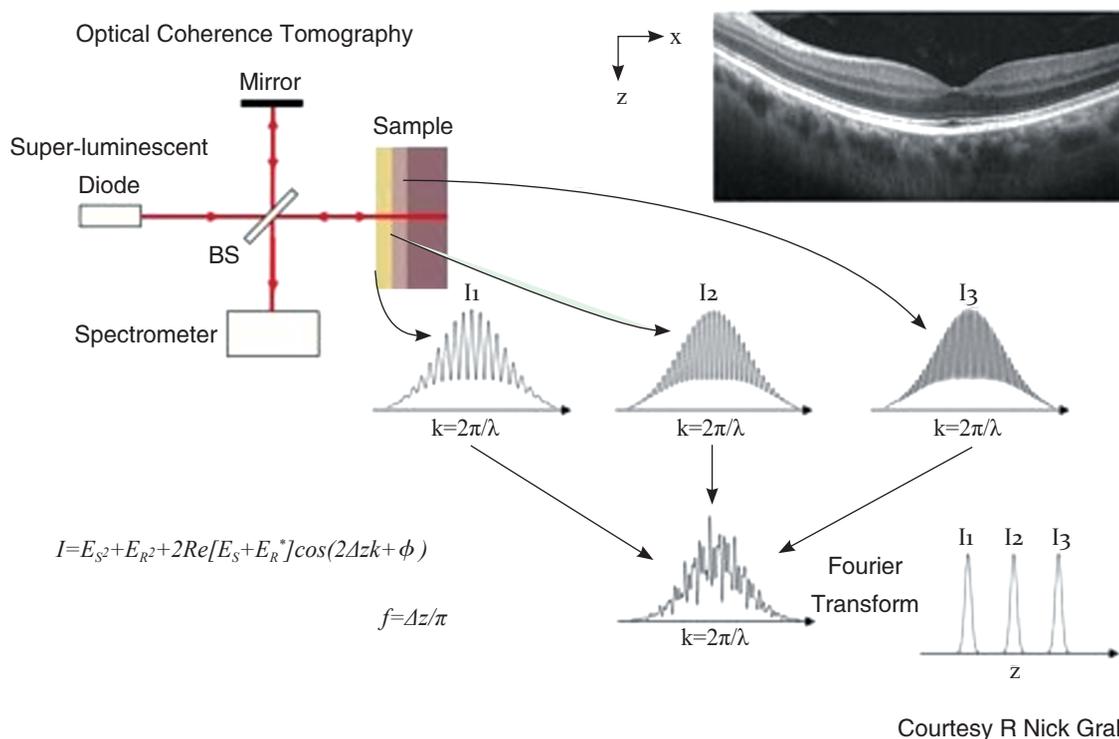


图 1 OCT 设备原理图及检测到的视网膜

Figure 1 Schematic diagram of OCT device and detected retina

2.2 FBG 微触觉感受器 FBG 微触觉感受器是敏感的多维力传感器,具有灵敏度高、电绝缘性好、抗电磁干扰能力强、可在恶劣环境中工作、可重复使用、粘贴数量少、节省成本等优点^[22],目前已得到广泛应用。

韩国 Song H S 等人^[23]研发了一套微创外科手术力传感反馈系统,该反馈系统采用 FBG 传感器对微力进行测量。由于末端的不规则性,系统采用 8 根 FBG 传感器进行测量,其中 4 根用于应变力测量,另外 4 根自然悬挂用于补偿温度带来的影响。该团队还将 FBG 装置在另外的微创手术器械上^[24],用于测量反馈力信息。将 FBG 嵌入微创手术器械末端 4 个梁上,器械末端受力时,4 个梁发生形变,导致 FBG 波峰波长发生偏移,从而测量出梁的形变量,进一步计算出末端器械的接触力。该系统验证了应用 FBG 传感器作为手术机器人微力传感器的可行性与优势,为后续研究奠定基础。

He X C 等人^[25]在 FBG 基础上研发了一款具有 3 个自由度的 FBG 膜钩,实验证实 1 个 FBG 力感受器的重复性为 1.3 μm ,结合横向力的线性模型和轴向力的非线性模型,3 个自由度的力传感器可以提供亚毫牛顿 (Milli-Newton, mN) 的轴向力分辨率和 1/4 mN 的横向力分辨率。

Gonenc B 等人^[26]基于 FBG 应变传感器,开发了一款感觉灵敏的眼底手术器械,用于眼底手术中各种膜的剥离。该装置采用紧凑型机动装置,根据线性回归和非线性的二阶伯恩斯坦多项式来计算力的改变。研究发现线性方法在测定横向力方面提供了足够的精确度,在轴向力方面的平方根误差超过 3 mN,而非线性方法可以精确地提供力的 3D 显示,其横向力误差低于 0.15 mN,而轴向力精确性在 2 mN,为研制新型 FBG 微触觉传感器提供了帮助。

韩国 Lee C 等人^[27]研发了一款智能手持式触觉反馈手术器械,可以探测眼底手术中器械尖端与视网膜之间的接触力并反馈给医生。该器械包括探针和力传感器两部分,其中力传感

器部分包括 3 个电介质驱动器,可以组成触觉显示器来分别刺激医生的拇指、食指和中指,达到触觉复现的效果,该触觉显示器可以为医生提供 170 μm 的位移和 10 Hz 频率的刺激,实验验证效果良好。

与此类似,美国约翰霍普金斯大学的 Üneri A 等人^[4]也研发了一款带触觉反馈的眼科手术机器人操作系统,主要用于视网膜显微手术。该系统末端搭载了触觉力反馈系统,主要依靠 FBG 感知二维横向力,末端手术器械的细长轴上的 FBG 集成,可以有效感知手术过程中产生的触觉微力。研究者采用该机器人操作系统进行了鸡蛋内壳膜的剥除实验,取得了良好的效果。

在此基础上,LV C H 等人^[28]研制了一种新型的 FBG 力传感器,该传感器主要包括 1 个微型力敏曲率装置,内嵌含 FBG 元件的光纤以及相关的连接器和固定器。与常用的直接粘贴 FBG 方法相比,安装的光纤配置在构型的中心线两端粘合,其两端的紧密悬挂可实现更高的分辨率和灵敏度,并避免 FBG 出现故障。在 0~5 N 的测量范围内,该力传感器的分辨率达到了 2.55 mN,并在离体的猪肝压痕试验中得到了验证。这种 FBG 构造方式为提升手术器械触觉灵敏度提供了新的思路。

总之,随着眼底手术微创程度的不断提高,传统的 FBG 传感器受限于其灵敏度和精度,不能很好地适用于眼底病手术机器人操作系统。理想的眼科手术操作精度要求为 10 μm ,因此在视网膜内界膜撕除手术中,要求手术机器人操作系统能将内界膜镊与内界膜间数毫牛的接触力转化为微米级的操作空间并实时反馈给操作医生,所以研制更高灵敏度的 FBG 微触觉传感器就成为解决这一问题的基础和关键所在。

2.3 人工智能 (Artificial Intelligence, AI) 技术和信息技术 AI 理论研究成果在眼科的应用日趋广泛,眼部图像精细、复杂、信息量非常大,与计算机相结合进行机器学习的 AI 在眼科中的应用极大地提高了眼科疾病尤其是眼底病

的诊疗效率^[29]。Perdomo O 等人^[30]将糖尿病视网膜病变和 OCT 结合，建立了针对 OCT 图像的 OCT-Net 网络，用以区分糖尿病视网膜病变、糖尿病性黄斑水肿及年龄相关性黄斑变性 3 种视网膜病变，经 SERI-CUHK 和 A2A 公共数据集上的测试显示，与传统 CNN 相比，OCT-Net 有更强的诊断能力。

信息技术发展和数据科学的应用，也给临床治疗带来了巨大变化。传统的临床治疗决策是以医生的意志为主导，而由于各个医生掌握的专业知识和临床经验不同，极易产生分歧。信息系统的建立可以整合其下各分支（如力学信息、图像信息、传感器信息等）传递的信息，并通过 AI 进行快速智能分析，获得一个更为客观的决策，同时实时指导手术医生的术中动作，从而将医生之间的差异尽可能地减小，进一步保证了医疗诊治系统的稳定性^[31]。

2.4 手术机器人系统震颤和自由度问题研究进展

人手的生理性震颤是一种生理局限，这种局限显著增加了微创手术中医源性视网膜损伤概率，影响术后视网膜的功能恢复。在微米级的精细操作如视网膜前膜和内界膜的剥除中，生理性震颤的影响通常更加明显。最近有研究认为，联合主动震颤消除，同时通过触觉传感器提供的力学反馈限制作用力具有一定的潜在应用价值，使用以上方法，剥除力可以保持在 7 mN 以下，振动频率可以减少 2~20 Hz。为了使显微手术器械的终端稳定，目前已经开发了多种“精确性增强”装置，通过不同的策略，矫正错误移动并缓解手部震颤^[32]。眼底手术机器人系统机械臂的自由度与其灵活性密切相关，有研究者发现通过手术流程分割，使用 4 个自由度的输入装置可以控制 6 个自由度的手术机器人系统。由于眼内手术器械的运动受到 RCM 限制，为了控制手术器械，2 个自由度必须被简化，因此每个部分最大的自由度将是 4 个自由度。Poor H A 等人^[33]研发了一种类似眼科临床使用的传统操纵杆，可以辅助机器人操作系统更好地操控眼内操作。

2.5 柔性机械臂控制技术与手术机器人操作系统

建立一个简单但又不失精确度的柔性机械臂动力学模型是研究柔性机械臂控制的基础。目前，比较常用且成熟的动力学建模理论主要有牛顿-欧拉方程、拉格朗日方程和凯恩法等。例如，李宇庭等人^[34]用牛顿-欧拉法对本质是串联柔性机械臂的 6R 机器人操作系统建立动力学方程并对其模态进行分析；范纪华等人^[35]用拉格朗日方程对不同离散方法的柔性机器人操作系统分别建立动力学方程，并对比不同离散方法下的计算效率。

单一控制方法往往不能满足高精度的柔性机械臂需求，近年来逐渐出现两种或者两种以上不同控制方法的混合控制，如模糊神经网络控制、PID-反演控制、自适应滑模控制等。Chang W 等人提出了一种反演自适应模糊滑模控制的鲁棒控制器^[36]，解决了柔性机械臂系统中可能存在的扰动、摩擦力、建模误差、参数不确定等因素导致的鲁棒性差、控制精度低的问题。YANG H J 等人^[37]提出一种基于自适应神经网络的滑模控制，改善了系统的鲁棒性，对系统中的模型不确定性、建模误差和外界干扰进行补偿。

常用的振动抑制方法有主动振动抑制和被动振动抑制。马天兵等人^[38]提出应用视觉测量结构振动，并结合人工鱼群算法优化的 PID 进行振动控制。李向东等人^[39]提出了一种输入整形器结合线性二次型调节器抑制柔性臂振动的新型控制策略。

之前的眼科手术机器人系统多依赖于手工操作，需要人为操控机器，而无需手术医生、通过拥有手术指令的 AI 引导的眼内机器人手术系统可能是将来的发展方向^[40]。有学者通过虚拟-现实手术模拟器发现，与单纯手工操作比较，机器人辅助下的玻璃体视网膜手术精确性更高，组织损伤更少^[41]。最近 Maberley D A L 等人^[42]使用 Eyesi 手术模拟器作为操作平台，对比了 Preceyes 手术机器人系统和人工视网膜内界膜剥除手术效果，发现人工剥除内界膜约需 5 min，

手术机器人剥除约需 9 min, 但是使用 Preceyes 时眼内器械的移动减少一半, 黄斑视网膜出血量显著减少, 视网膜损伤几乎消除。同时, 该研究团队也认为眼内机器人手术系统仍然处于“婴儿期”, 有必要进行更多的验证工作去认识潜在的收益和新兴技术的局限。

眼科显微手术机器人操作系统绝大多数都使用主从形式进行设计。操作者坐在主控台前, 根据视觉反馈操控主手, 从手在控制系统的控制下跟随复现操作者的手部动作。主控台可以根据需要远离或者靠近手术台。这种主从控制的方式显著增强了手术操作的精确性和可靠性, 更为重要的是, 它可以实现手眼协调, 增强手术的沉浸感和直观感^[43]。

3 总结与展望

综上所述, 国内外关于治疗眼底疾病的手术机器人系统的研究已有 30 余年历史, 但是到现在仅有 Preceyes 机器人系统达到了商用标准^[26], 也只能撕除最简单的黄斑前膜(要求突出视网膜表面、明显比内界膜厚、固定且容易辨认), 而尚无手术机器人系统能够精准做到治疗黄斑裂孔所需的剥除视网膜最内层菲薄透明的内界膜。主要存在以下 3 方面的问题: ①目前的眼科手术机器人尚不能精确分辨视网膜内界膜(厚度 10 μm); ②目前的眼科手术机器人系统对视网膜内界膜微触觉灵敏度有待进一步提高; ③目前的眼科手术机器人系统终端器械尚不能精准抓持内界膜。随着 OCT 技术的革新, 尤其是术中 OCT 的问世, 以及新型 FBG 材料、设计和技术的出现, 加上 AI 和信息技术的显著进步、手术机器人操作中震颤和自由度等问题的突破, 还有手术机器人系统制造水平的提升, 都为解决上述问题奠定了基础。

利益冲突声明: 本文不存在任何利益冲突。

作者贡献声明: ①王昞负责设计论文框架, 起草论文; ②陈佩负责文献检索支持; ③雍红芳负责论文修改; ④张红兵负责拟定写作思路, 指导撰写文章并最后定稿。

参考文献

- [1] Pollack J S, Sabherwal N. Small gauge vitrectomy: operative techniques[J]. *Curr Opin Ophthalmol*, 2019, 30(3): 159–164.
- [2] Molaei A, Abedloo E, de Smet M D, et al. Toward the art of robotic-assisted vitreoretinal surgery[J]. *J Ophthalmic Vis Res*, 2017, 12(2): 212–218.
- [3] Becker B C, Yang S, Maclachlan R A, et al. Towards vision-based control of a handheld micromanipulator for retinal cannulation in an eyeball phantom[C]. *Proc IEEE RAS EMBS Int Conf Biomed Robot Biomechatron*, 2012: 44–49.
- [4] Üneri A, Balicki M A, Handa J, et al. New steady-hand eye robot with micro-force sensing for vitreoretinal surgery[C]. *Proc IEEE RAS EMBS Int Conf Biomed Robot Biomechatron*, 2010: 814–819.
- [5] Gonenc B, Tran N, Gehlbach P, et al. Robot-assisted retinal vein cannulation with force-based puncture detection: Micron vs. the steady-hand eye robot[C]. *Annu Int Conf IEEE Eng Med Biol Soc*, 2016: 5107–5111.
- [6] Gonenc B, Patel N, Iordachita I. Evaluation of a force-sensing handheld robot for assisted retinal vein cannulation[C]. *Annu Int Conf IEEE Eng Med Biol Soc*, 2018: 1–5.
- [7] Hubschman J P, Bourges J L, Choi W, et al. ‘The Microhand’: a new concept of micro-forceps for ocular robotic surgery[J]. *Eye (Lond)*, 2010, 24(2): 364–367.
- [8] Chatzipirpiridis G, Ergeneman O, Pokki J, et al. Electroforming of implantable tubular magnetic microrobots for wireless ophthalmologic applications[J]. *Adv Healthc Mater*, 2015, 4(2): 209–214.
- [9] XIAO J J, WU Q Y, SUN D H, et al. Classifications and functions of vitreoretinal surgery assisted robots—a review of the state of the art[C]. *2019 International Conference on Intelligent Transportation, Big Data & Smart City (ICITBS)*, 2019: 474–484.
- [10] 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): 1–12.
- [11] Yu H R, Shen J H, Joos K M, et al. Calibration and integration of B-mode optical coherence tomography for assistive control in robotic microsurgery[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2016, 21(6): 2613–2623.
- [12] Fujie M G, Zhang B. State-of-the-art of intelligent minimally invasive surgical robots[J]. *Front Med*, 2020, 14(4): 404–416.
- [13] Edwards T L, Xue K, Meenink H C M, et al. First-in-human study of the safety and viability of intraocular robotic surgery[J]. *Nat Biomed Eng*, 2018, 2(6): 649–656.
- [14] Chammas J, Sauer A, Pizzuto J, et al. Da Vinci Xi robot-assisted penetrating keratoplasty[J]. *Transl Vis Sci*

- Technol, 2017, 6(3): 1-7.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 邬如靖, 韩少峰, 广晨汉, 等. 具有微力感知的眼科手术器械的设计与实现 [J]. 机械工程学报, 2020, 56(17): 12-19.
- [18] 周嘉悦, 韩少峰, 郑昱, 等. 基于双目视觉的视网膜血管三维重建 [J]. 中国医疗器械杂志, 2020, 44(1): 13-19.
- [19] 苏铃雅, 陈亦棋, 沈丽君. 眼科手术机器人的研究进展 [J]. 中华实验眼科杂志, 2018, 36(4): 311-316.
- [20] Lains I, Wang J C, Cui Y, et al. Retinal applications of swept source optical coherence tomography (OCT) and optical coherence tomography angiography (OCTA)[J]. Prog Retin Eye Res, 2021, 84, 100951: 1-52.
- [21] de Smet M D, de Jonge N, Iannetta D, et al. Human/robotic interaction: vision limits performance in simulated vitreoretinal surgery[J]. Acta Ophthalmol, 2019, 97(7): 672-678.
- [22] 许会超, 苗新刚, 汪苏, 等. 一种机器人多维光纤光栅力传感器 [J]. 上海交通大学学报, 2016, 50(12): 1881-1884.
- [23] Song H S, Ju W J, Lee J J. Optical fiber Bragg grating (FBG) force reflection sensing system of surgical tool for minimally invasive surgery[C]. 2014 9th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, 2014: 478-482.
- [24] Song H, Kim K, Lee J. Development of optical fiber Bragg grating force-reflection sensor system of medical application for safe minimally invasive robotic surgery[J]. Review of Scientific Instruments, 2011, 82(7): 074301.
- [25] He X C, Handa J, Gehlbach P, et al. A submillimetric 3-DOF force sensing instrument with integrated fiber Bragg grating for retinal microsurgery[J]. IEEE Trans Biomed Eng, 2014, 61(2): 522-534.
- [26] Gonenc B, Chamani A, Handa J, et al. 3-DOF force-sensing motorized micro-forceps for robot-assisted vitreoretinal surgery[J]. IEEE Sensors Journal, 2017, 17(11): 3526-3541.
- [27] Lee C, Lee D H, Nguyen C T, et al. Preliminary design and fabrication of smart handheld surgical tool with tactile feedback[C]. 2013 IEEE RO-MAN, 2013. DOI: 10.1109/ROMAN.2013.6628432.
- [28] LV C H, WANG S X, SHI C Y. A high-precision and miniature fiber Bragg grating-based force sensor for tissue palpation during minimally invasive surgery[J]. Annals of Biomedical Engineering, 2020, 48(2): 669-681.
- [29] Moraru A D, Costin D, Moraru R L, et al. Artificial intelligence and deep learning in ophthalmology-present and future (Review)[J]. Exp Ther Med, 2020, 20(4): 3469-3473.
- [30] Perdomo O, Rios H, Rodríguez F J, et al. Classification of diabetes-related retinal diseases using a deep learning approach in optical coherence tomography[J]. Comput Methods Programs Biomed, 2019, 178(12): 181-189.
- [31] 王延玲, 温明锋, 李迎新. 大数据时代对医疗系统信息化发展的研究 [J]. 当代医学, 2020, 26(10): 114-116.
- [32] Roizenblatt M, Grupenmacher A T, Belfort Junior R, et al. Robot-assisted tremor control for performance enhancement of retinal microsurgeons[J]. Br J Ophthalmol, 2019, 103(8): 1195-1200.
- [33] Poor H A, Zhou M, Lohmann C P, et al. Reducing the number of degrees of freedom to control an eye surgical robot through classification of surgical phases[J]. Annu Int Conf IEEE Eng Med Biol Soc, 2019: 5403-5406.
- [34] 李宇庭, 李波, 闫荣, 等. 6R 机器人柔体动力学建模及模态分析 [J]. 湖北工业大学学报, 2015, 30(4): 65-69.
- [35] 范纪华, 章定国. 基于变形场不同离散方法的柔性机器人动力学建模与仿真 [J]. 力学学报, 2016, 48(4): 843-856.
- [36] LI Y M, TONG S C, LI T S. Adaptive fuzzy output feedback control for a single-link flexible robot manipulator driven DC motor via backstepping[J]. Nonlinear Analysis Real World Applications, 2013, 14(1): 483-494.
- [37] YANG H J, MIN T. Sliding mode control for flexible-link manipulators based on adaptive neural networks[J]. International Journal of Automation and Computing, 2018, 15(2): 239-248.
- [38] 马天兵, 周青, 杜菲, 等. 基于机器视觉和改进 PID 的压电柔性机械臂振动控制 [J]. 光学精密工程, 2020, 28(1): 141-150.
- [39] 李向东, 刘春芳. 伺服驱动式柔性臂的振动抑制策略研究 [C]. 第十六届沈阳科学学术年会论文集 (理工农医), 2019: 717-722.
- [40] Gerber M J, Pettenkofer M, Hubschman J P. Advanced robotic surgical systems in ophthalmology[J]. Eye (Lond) 2020, 34(9): 1554-1562.
- [41] Forslund Jacobsen M, Konge L, Alberti M, et al. Robot-assisted vitreoretinal surgery improves surgical accuracy compared with manual surgery: a randomized trial in simulated setting[J]. Retina, 2020, 40(11): 2091-2098.
- [42] Maberley D A L, Beelen M, Smit J, et al. A comparison of robotic and manual surgery for internal limiting membrane peeling[J]. Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol, 2020, 258(4): 773-778.
- [43] Monsarrat N, Collinet P, Narducci F, et al. Robotic assistance in gynaecological surgery: state-of-the-art[J]. Gynecol Obstet Fertil, 2009, 37(5): 415-424.

编辑: 张笑嫣