

机器人在眼科手术中的应用及研究进展

贺昌岩¹, 杨洋¹, 梁庆丰², 韩少峰¹

(1. 北京航空航天大学机械工程及自动化学院, 北京 100083;

2. 首都医科大学附属北京同仁医院北京市眼科研究所北京市眼科学与视觉科学重点实验室, 北京 100005)

摘要: 首先分析了典型的眼科手术操作, 提出了眼科机器人设计的一般要求. 然后, 从机器人系统和手术器械两方面出发, 介绍了国内外眼科机器人的研究进展. 最后, 总结了当前眼科机器人系统的关键技术, 包括眼组织生物力学分析、机构设计、多维信息传感以及精密运动控制技术, 并分析了发展趋势.

关键词: 眼科手术机器人; 智能手术器械; 眼组织生物力学分析; RCM (远程运动中心) 机构; 多维信号传感; 精密运动控制

中图分类号: TP242.3

文献标识码: A

文章编号: 1002-0446(2019)-02-0265-11

Applications and Research Progress of Robot Assisted Eye Surgery

HE Changyan¹, YANG Yang¹, LIANG Qingfeng², HAN Shaofeng¹

(1. School of Mechanical Engineering and Automation, Beihang University, Beijing 100083, China;

2. Beijing Key Laboratory of Ophthalmology and Visual Sciences, Beijing Institute of Ophthalmology,

Beijing Tongren Hospital, Capital Medical University, Beijing 100005, China)

Abstract: Firstly, the typical eye surgery manipulation is analyzed, and the general design requirements of eye surgical robot is proposed. Secondly, the research progress of eye surgical robot is reviewed at home and abroad, including the robotic systems and the surgical devices. In the end, the key technologies of eye surgical robotic system are summarized including biomechanics analysis of eye tissue, mechanism structure design, multidimensional signal sensing, and precise motion control technology, and the research tendency is analyzed.

Keywords: eye surgical robot; smart surgical instrument; biomechanics analysis of eye tissue; RCM (remote center of motion) mechanism; multidimensional signal sensing; precise motion control

1 引言 (Introduction)

眼睛是人体最重要的感觉器官, 大脑所获得的信息有 80% 是通过眼睛得到的, 眼部疾病或者失明将会给我们的生活带来巨大的不便. 为了提高对白内障、青光眼、玻璃体视网膜疾病等频发眼科疾病的治疗效果, 研究人员相继提出了一些创新性的手术术式, 例如白内障超声乳化吸除术、黏小管手术、视网膜静脉血管插管术、视网膜静脉搭桥术等. 新术式的出现虽然可以有效改善治疗效果, 但却对医生的手术技能提出了很高的要求. 如图 1 所示, 在视网膜静脉血管插管术 (一种治疗视网膜静脉堵塞的新术式) 中, 医生需要在显微镜的视野下, 操作玻璃注射针或显微针^[1] 穿过巩膜切口并刺入壁厚 25 μm 、平均直径 80 μm ~ 120 μm 的堵塞血管中, 并保持 2 min 以注射溶解剂. 但是由于眼科

医生手部颤抖的平均幅度达到 156 μm ^[2], 因此人手难以达到手术操作的精度要求. 同时, 在视网膜手术中, 75% 的器械与血管的接触力都小于 7.5 mN, 医生只能感知其中 19% 的接触力^[3], 可见人手有限的感知能力进一步制约了手术的实施. 除此之外, 眼科手术的操作空间被限制在平均直径为 25 mm 的眼球内, 手术器械的运动始终受到巩膜切口的约束, 医生些微的误操作便会对眼球造成撕扯, 影响术后愈合. 总的来说, 人工进行眼科显微手术有如下困难: ① 由于手部的生理颤抖, 医生进行手术时难以达到手术操作的精度要求; ② 手术操作力尺度微小, 甚至超过人手的感知极限, 医生很难精确感知器械与眼组织的接触力; ③ 手术操作空间狭小且受到巩膜切口的约束, 医生在进行眼内操作时极有可能对切口组织造成撕扯; ④ 手术操作环境的可视性差, 通过显微镜进行手术, 医生很难对深度信息

进行精确感知。

随着医学影像技术、传感器技术及机器人技术的快速发展,医疗机器人已成为先进机器人领域的重要研究方向,机器人辅助外科手术在操作灵活性、稳定性及精准性等方面具有明显优势,促进了眼科手术向微创化、智能化、精准化方向发展。为评估机器人在眼科手术操作中的优势,Noda等^[4]比较了人工操作和机器人辅助操作的手术表现,结果表明机器人辅助操作将器械末端的稳定程度从人工操作情况下的90.9mm降低到14.9mm($p=0.0006$),将器械和组织的碰撞检测灵敏度从人工操作下的20.0mN提高到7.84mN($p=0.046$)。此外,Cutler等利用力感知微型手术镊收集并分析28位医生在视网膜增生膜剥离模拟手术中的操作数据,证明了力反馈可以有效降低术中器械与眼组织的接触力^[5]。因此,借助机器人来辅助医生进行眼科手术,不仅可以过滤人手的颤抖,还可以增强医生的感知能力,提高手术的安全性。

眼科显微手术机器人融合了机构学、显微外科学、生物力学、传感器技术等多种学科,其研究热点也逐渐由样机研发上升到临床应用研究。为对未来眼科机器人的研究以及更多的实际应用提供参考,本文首先介绍了常见的眼科显微手术动作,在此基础上,总结了机器人的一般设计要求;然后从眼科机器人的结构、传感、控制等方面综述了眼科机器人的研究进展与现状;最后,分析了眼科机器人的关键技术,并提出未来眼科机器人的研究趋势。

2 眼科显微手术步骤及机器人设计要求 (Eye micro-surgery procedures and robot design requirements)

根据手术的复杂程度和操作要求的不同,眼科手术可以分为眼外手术和眼内手术2类。眼外手术的手术目标组织为角膜、结膜等,位于眼球外表面,操作难度相对较低,例如角膜移植术、翼状胬肉去除术等。眼内手术的手术目标组织位于眼球内部,其以晶状体后膜为界,又分为眼前节手术(例如白内障超声乳化切除术和小梁切除术等)和眼后节手术(例如玻璃体切除术、视网膜静脉血管插管术和视网膜静脉血管搭桥术等)。以上手术操作中,由于眼后节手术的目标组织最为精密、操作精度要求最高,因此眼科机器人的研究对象主要集中在眼后节手术。本文对典型的眼后节手术——视网膜静脉血管插管术——的手术动作进行剖析,进而总结

眼科显微手术机器人的设计要求。

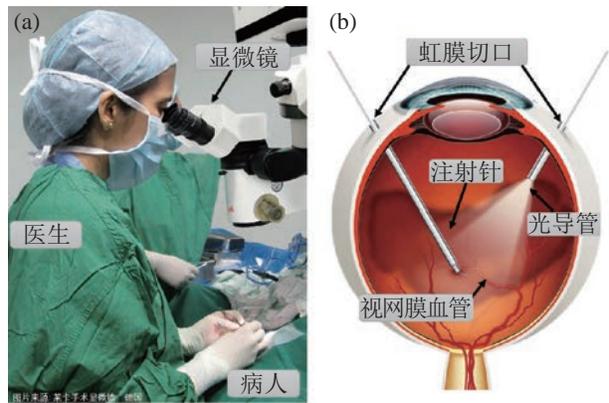


图1 眼科手术场景:(a)宏观场景,(b)器械在眼内的操作示意

Fig.1 Eye surgery scenes: (a) macro scene, (b) illustration of the instruments manipulation inside the eyeball

2.1 视网膜静脉血管插管术

视网膜静脉血管堵塞是一种严重的视网膜疾病,严重时可导致失明,其病因是视网膜静脉血管内出现血栓。传统的治疗方式以药物为主,效果不佳。外科手术是治疗该疾病的另一种方式,例如血管插管术等。这类手术已在动物实验上取得了成功,但由于手术难度太大,临床上鲜有应用。其主要步骤包括^[6]:

- (1) 控制注药针穿过巩膜切口进入眼球内腔;
- (2) 将注药针末端定位到堵塞血管处,并刺破血管壁;
- (3) 将注药针顺着血管方向插入堵塞血管,并保持数分钟进行注药;
- (4) 沿着反方向撤回注药针,处理伤口。

在手术过程中,器械的运动始终受巩膜切口的约束,而且手术中病人的眼球会发生不自主的微小运动,在注药过程中,医生需要控制注药针跟随眼球运动,保持注药针与血管的相对静止。

2.2 眼科机器人设计要求

根据对视网膜静脉血管插管术的手术动作分析,可以得出眼科手术机器人需要具备较高的灵巧性、精准性以及感知能力,具体包括:

(1) 自由度

手术中显微器械需要始终围绕巩膜切口处运动,完成任意方向的旋转(俯仰、翻滚、偏转)、进给以及夹持等动作。因此,眼科机器人需要约束器械绕巩膜切口运动,同时机器人末端能够实现包括绕巩膜切口处转动、轴向进给、绕轴线自转和镊子开合等自由度,如图2所示。

(2) 运动精度

由于眼内组织尺度微小, 因此眼科手术的操作精度要求较高. 针对不同的术式, 眼科机器人的末端运动精度需要高于对目标组织的操作要求. 在白内障手术的撕囊操作中, 晶状体前囊厚度为 $14\mu\text{m}$ ^[7], 手术显微镊若要精确夹持前囊, 则机器人末端的运动分辨率应优于前囊膜的厚度; 在视网膜剥膜手术中, 视网膜的厚度小于 $10\mu\text{m}$ ^[8], 手术器械若要剥除视网膜而不损伤血管, 则机器人的运动精度需要优于视网膜厚度; 在视网膜静脉血管插管术中, 视网膜静脉血管的最小直径仅为 $80\mu\text{m}$ ^[9], 手术显微针若要插入目标血管内, 则机器人末端的运动精度需要小于视网膜血管的半径.

(3) 微力感知

手术器械对视网膜组织的作用力尺度极小. 文 [10] 中测得在视网膜静脉血管注射术中 85% 的穿刺力都小于 5mN ; 在视网膜前膜剥离术中, 剥离力的均值为 7.5mN ^[3]; 这些力都超出了人手的生理感知极限, 因此眼科显微手术中的操作力感知对于手术质量具有关键作用. 针对不同的术式, 眼科机器人需要能够感知最小的操作力, 并将操作力反馈给医生.

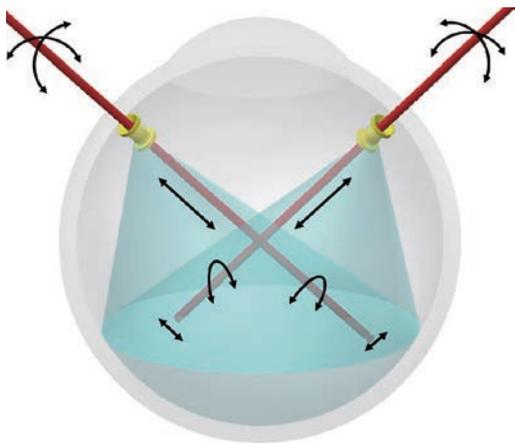


图 2 眼科机器人末端自由度

Fig.2 End effector motion freedom of the eye robot

3 研究进展与现状 (Research progresses and current status)

眼科手术机器人技术的研究起始于 20 世纪 90 年代, 研究者们研发了构型各异的眼科机器人以及智能手术器械, 包括约翰·霍普金斯大学、北京航空航天大学、天主教鲁汶大学、埃因霍温大学以及东京大学等. 本文从眼科机器人 (如表 1 所示) 和智能手术器械两部分出发, 对眼科机器人技术的研究进展与现状进行分析.

3.1 眼科机器人

3.1.1 早期的眼科机器人

1989 年, Guerrouad 和 Vidal 描述了最早的眼科机器人系统之一, Stereotaxical 遥操作机械臂^[11]. 它由安装在 3 维平台上的球形机械臂组成, 其 3 维平台能实现 3 个自由度, 腕部结构能够实现 4 个运动自由度, 并完成了性能测试实验. 1997 年, Charles 等^[12]研制了一种遥操作平台, 显微手术辅助机器人 RAMS, 这一紧凑轻型的 6 自由度主从系统能够达到 $10\mu\text{m}$ 的运动精度和足够大的运动幅度. 同年, 美国西北大学的研究人员为了测量猫眼视网膜显微血管内腔的血压并从中抽取定量的视网膜血液样本, 研发了另一种眼科机器人原理样机, 设计应用了机械工程领域中典型的 Stewart 基准平台^[13]. 1998 年, Yu 等^[14]开发了一个用于血管药物注射的球形机械手, 并成功用微创的方式完成了微量移液管的药物输送和视网膜微电极的植入任务. 以上的原理样机均为对眼科机器人的初期探索, 技术仍不够成熟, 因此并没有得到进一步的临床应用.

3.1.2 眼科机器人研究进展

自 2000 年以来, 研究者们对眼科机器人进行了更深入的探索.

约翰·霍普金斯大学的研究者们首次对眼科机器人提出了远程运动中心 (RCM) 机构的概念^[15-16]和人机协同操作的控制方式, 并依次研发了 SHER (steady-hand eye robot) 1.0、SHER 2.0、SHER 2.1 机器人^[17-18] (图 3(a)). RCM 机构可以约束器械绕空间一定点旋转, 解决了眼科手术时的眼球空间约束问题. 人机协同操作模式的特点在于医生直接握持机器人末端的手术器械, 医生的操纵力通过器械端的 6 轴力传感器传递到机器人控制系统, 进而控制机器人实现相应运动, 这种控制方式为医生提供了更直观的操作方式, 并利于医生缩短学习曲线. 2014 年 SHER 机器人在鸡蛋绒毛囊膜等模型上完成了视网膜静脉插管术、视网膜剥离和远程操作等实验.

Rahimy 等^[19]采用主从操作方式研发了 IRISS (intraocular robotic interventional and surgical system) 机器人系统 (图 3(b)). IRISS 由 2 个主手操作杆和 2 个独立的机械臂构成. 得益于其独特的弧形导轨构型的 RCM 机构, IRISS 腕关节和肘关节转动范围为 120° , 末端具有较大的运动范围, 从而既能进行包括白内障手术等眼前节手术, 又能进行包括玻璃体切除术等眼后节手术. 在与医生的交互方式上,

IRISS 采用了双端口手术显微镜、3D 外科手术相机以及高分辨率的平板显示器搭建了立体视觉系统, 医生可以观察显示器上的立体图像进行手术. 2013 年研究人员操作 IRISS 已在 16 只猪眼球模型上成功进行了晶状体乳化术和平面玻璃体切除术 2 类手术操作, 下一步将会在 IRISS 基础上研发全自动白内障手术机器人系统.

北京航空航天大学自 2006 年起在国家自然科学基金的支持下, 从眼组织的生物力学入手, 研究了器械与眼组织的作用力、角膜缝线打结、角膜环钻变形、视网膜静脉血管搭桥机器人以及眼内运动规划算法等, 形成了一套完整的眼科机器人技术体系. 该团队完成了角膜移植自动缝合器的研究制作^[20], 并开发了角膜移植显微手术机器人控制系统^[21] (图 3(c))、视网膜血管搭桥手术机器人系统^[22-23] (图 3(d)), 并在离体猪眼球和活体兔上成功进行了玻璃体切除、视网膜搭桥手术等实验^[24].

埃因霍温大学的研究者们针对视网膜手术研发了 Preceyes 机器人^[25-27] (图 3(e)). Preceyes 机器人采用主从操作方式, 主从手采用了同构构型, 为医生提供了直观的操作方式. 同时从手采用了霍尔传感器来检测关节的转动, 并通过配重实现了机构的静平衡. 2016 年, Preceyes 机器人在医生的操作下成功从一位病人的视网膜表面上摘掉了 0.01 mm 厚的再生膜, 完成了全球首例机器人辅助操作的视网膜手术^[28].

天主教鲁汶大学针对视网膜静脉血管插管术研了一套主从式机器人^[29-31] (图 3(f)), 其主操作器采用丝驱动, 构型与机械臂的运动同构, 复现了器

械在眼内的自由度. 2017 年, 在医生的控制下, 该机器人成功完成了全球首例视网膜静脉血管插管术的临床手术, 进一步推进了机器人辅助眼科手术的临床化^[32].

此外, 哥伦比亚大学的 Wei 等^[33-35] 于 2007 年提出了一种配有眼内灵巧操作器的双臂机器人, 每个机械臂由 2 自由度的眼内灵巧操作器和 6 自由度的并联机械臂组成, 其末端操作精度优于 $5\mu\text{m}$, 该系统在动物模型上完成了血管插管术和血管支架植入术. 东京大学的 Ueta 等^[36] 于 2009 年设计了一个显微机械臂原理样机, 证明了机器人辅助眼后节手术的可行性, 所设计的机械臂由 1 对球形导轨组成, 能够实现 5 个自由度: XY 平面移动及双向摆动, 以及沿 Z 轴的运动.

3.1.3 达芬奇手术系统在眼科中的应用

达芬奇手术系统作为在临床上已经广泛应用的手术机器人, 能够辅助医生实施包括泌尿、妇科、胃肠道等外科手术, 但由于达芬奇手术系统末端器直径为 10 mm, 远大于眼内手术时的巩膜切口, 因此并不适用于复杂的眼内手术操作. 斯特拉斯堡大学的研究者们^[37] 于 2015 年使用达芬奇手术机器人系统成功进行了翼状胬肉移除临床手术 (一种眼外手术), 法国巴黎第三大学设计了一种并联操作器 HSS (hexapod surgical system)^[38], 安装在达芬奇机器人末端, 可以为达芬奇机器人提供额外的自由度和更好的灵巧性, HSS 与达芬奇 2 个系统相结合理论上可以实现各种眼内手术操作, 但是其不直观的操作方式和其笨重的外形仍对其在眼科手术中的应用造成了障碍.

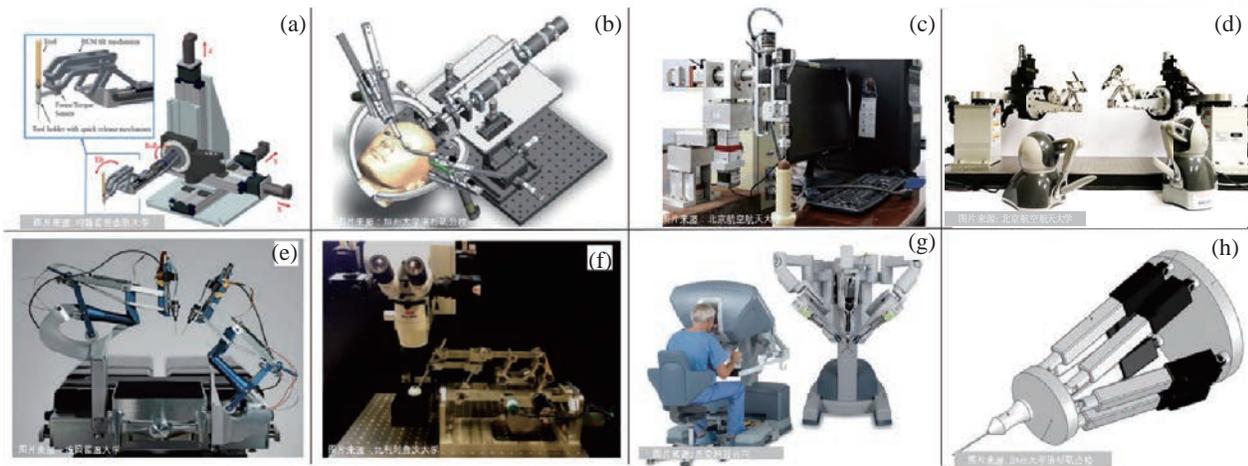


图 3 眼科机器人系统: (a) SHER 机器人, (b) IRISS 机器人, (c)(d) 北京航空航天大学研制的角膜环切机器人和双臂视网膜机器人, (e) Preceyes 机器人, (f) 鲁汶大学研制的视网膜手术机器人, (g) 达芬奇手术系统, (h) HSS 操作臂

Fig.3 Eye robot systems: (a) SHER, (b) IRISS, (c)(d) corneal trephine robot and dual-arm retinal surgery robot from Beihang University, (e) Preceyes, (f) retinal surgery robot from Leuven University, (g) da Vinci surgical system, (h) HSS manipulator

表 1 眼科机器人系统研究进展
Tab.1 Research progresses of eye robot system

研发时间	系统名称	作者	研发机构	结构特征	适用术式	研发进展
1989 年	Stereotaxical	Guerrouad 等	里尔科技大学, 法国	采用球形 RCM 机构	暂无	早期样机
1997 年	RAMS	Steve 等	MicroDexterity 公司, 美国	采用遥操作平台		
1997 年	Stewart	Jensen 等	西北大学, 美国	采用 Stewart 基准平台		
1998 年	血管注药机构	Yu 等人	西澳大学, 澳大利亚	采用球形 RCM 机构		
2007 年	双臂眼科机器人	Wei 等	哥伦比亚大学, 美国	双臂机器人, 机器人由并联机械臂和末端操作器构成	视网膜手术	在动物模型上完成了血管插管术和血管支架植入术
2007 年	SHER	Taylor 等	约翰·霍普金斯大学, 美国	采用人机协同式操作方式, 采用平行四杆 RCM 构型	视网膜手术	在鸡蛋壳绒毛囊以及眼球模型上完成了视网膜囊膜剥离、静脉插管术等实验
2009 年	显微机械臂	Ueta 等	东京大学, 日本	主从操作方式, 采用球形导轨构成 RCM 机构	视网膜手术	在人工眼球模型上完成了性能验证
2011 年	Preceyes	Hendrix 等	埃因霍温大学, 荷兰	主从操作方式, 主从手采用同构构型, 通过配重实现机构静平衡	视网膜手术	2016 年成功进行了视网膜囊膜剥离临床手术
2011 年	HSS	Bourges 等	加州大学洛杉矶分校, 美国	并联操作器, 安装在达芬奇手术机器人末端	眼外手术	尚未进行性能验证试验
2012 年	角膜移植机器人	杨洋等	北京航空航天大学, 中国	主从操作方式, 直角坐标构型, 新型环钻机构	角膜移植术	在猪眼球模型上完成了性能测试实验
2013 年	IRISS	Wilson 等	加州大学洛杉矶分校, 美国	主从操作方式, 采用弧形导轨构型的 RCM 机构, 腕关节和肘关节运动范围可达 120°	白内障手术、玻璃体切除术	在猪眼球模型上完成了晶状体乳化和玻璃体切除术
2013 年	视网膜手术机器人	Gijbels 等	天主教鲁汶大学, 比利时	主从操作方式, 主从手采用同构构型, 主操作器采用丝驱动	视网膜手术	2017 年成功进行了视网膜静脉插管术临床手术
2014 年	视网膜手术机器人	杨洋等	北京航空航天大学, 中国	主从操作方式, 采用虚拟约束运动控制, 双臂机器人	视网膜手术	在离体猪眼球和活体兔上成功进行了玻璃体切除、视网膜搭桥手术等实验
2015 年	达芬奇机器人系统在眼科手术中的应用	Bourcier 等	斯特拉斯堡大学, 法国	探索达芬奇机器人在眼科手术中的应用	眼外手术	成功进行了翼状胬肉移除术

3.2 智能眼科手术器械

手术器械一般作为执行器安装在机器人的末端, 可以进一步扩展机器人的自由度和感知能力. 因此, 为常规的手术器械增加“智能性”或者制作新型的智能手术器械, 引起了众多学者的研究兴趣. 本文将从力检测、位置检测、颤抖抑制和创新构型出发, 分析智能眼科手术器械的研究进展.

3.2.1 具备力检测功能的手术器械

为直接检测手术器械与眼组织(巩膜、视网膜等)的接触力, He 等^[39-41]率先将布拉格光栅光纤(fiber Bragg grating, FBG)传感器嵌入手术器械轴

中, 研发了一系列力感知手术器械, 包括能够检测 2 自由度横向力的手术镊、手术钩、注射针等, 能够检测 3 自由度力信息(横向力和轴向力)的手术钩以及能够检测器械尖端与眼底接触力、器械轴与巩膜接触力的 4 自由度力信息的手术钩等. 以上力感知手术器械的最小分辨率能够达到 0.25 mN, 完全能够检测到细微的手术操作力, 例如视网膜静脉血管插管术中注射针刺破血管^[42]. 上述力感知器械可以直接用于医生手持操作, 也可以集成在机器人中, 为机器人的运动提供反馈. FBG 具有良好的稳定性, 对电磁干扰免疫, 并可以进行消毒清洁操

作, 满足手术环境的需要. 并且 FBG 具有良好的灵敏度, 能够响应 1 pm 的波长变化, 因此能够检测器械微小变形以及术中器械与眼组织的作用力.

3.2.2 具备位置检测功能的手术器械

光学相干断层成像 (optical coherence tomography, OCT) 技术作为一种重要的成像方式被广泛应用于眼科疾病检查中, 其通过断层扫描可以对眼组织切面进行成像. 为检测器械在眼内的位置, Yu、Joos 等^[43-45] 基于 OCT 技术研发了微型距离传感器, 该传感器可以嵌入到手术镊内, 手术过程中医生可以实时观察到镊子前面的断层扫描图, 从而判断镊子末端的位置. Song 等^[46] 利用 OCT 技术研发了能够检测器械末端和眼组织之间距离的智能器械 SMART. 其将单根光纤粘贴到手术器械的侧面, 手术中检测光的反射, 通过计算光纤管与眼组织的距离, 获得器械末端相对眼组织的位置. 鲁汶大学的研究者将 OCT 技术与 FBG 传感器结合, 研制了能够同时检测距离和力信息的手术器械, 实现了多信息的融合检测. He 等^[47] 通过将 2 组 FBG 传感器嵌入器械轴中, 研发了一种可以检测巩膜切口与器械轴接触位置的智能器械, 但由于器械根部的变形较小, 相应的 FBG 的波长变化较小, 因此位置检测的精度为 0.5 mm. 同样, 以上器械可以直接被医生手持使用, 也可以安装在机器人末端, 为机器人提供实时反馈.

3.2.3 具备颤抖抑制功能的手术器械

人手的颤抖严重影响了眼科手术的精密操作. 为帮助医生提高操作的稳定性, 研究者们对手术器械的颤抖抑制进行了大量研究. Becker、Wei 等^[48-51] 研发了一种手持式显微操作器 Micron, 其末端使用压电陶瓷驱动器来产生微振动, 借助光学定位系统来实时获取 Micron 的尖端位置, 通过补偿算法控制压电陶瓷驱动器对医生的手部颤抖进行实时补偿. Micron 具备良好的稳定性, 其在离体猪眼球上成功进行了视网膜静脉血管注射、激光治疗等手术操作. Latt 等^[52] 研发的手持式显微操作器 ITrem, 使用了加速度计来感知器械末端 3 个自由度的运动, 通过滤波算法识别人手颤抖对器械末端的影响, 并使用压电陶瓷驱动器对颤抖进行补偿. Patel 等^[53] 使用离子聚合物金属复合材料作为驱动器研发了一种轻型小巧的手持式手术操作器, 使用加速度计和陀螺仪搭建了 2 组惯性检测单元, 对操作器末端的 6 个自由度的运动进行检测, 并通过滤波算法对人手的颤抖信号进行识别. Kim 等^[54] 使用音圈电机和编码器设计了 Delta 微型操作器, 并

基于此研发了高刚度的显微手术操作器. Delta 微型操作器具有 3 个自由度, 能够对人手的颤抖进行补偿. 在操作器末端位置补偿的基础上, 杨广中等^[55] 将微型力传感器嵌入操作器, 研发了位置-力混合控制的手持式显微操作器, 进一步提高了显微操作器的稳定性. 以上消除人手颤抖的智能器械对于医生来说具有较短的学习曲线, 医生不用改变其以往的手术操作习惯和方式, 且其成本较低, 可以作为一次性器械进行推广使用; 同时, 以上手术器械体积较小、轻便易携, 可以在野外救援等临时救助场景下进行精密的眼科手术.

3.2.4 眼科手术器械的创新构型

为了提高显微操作的安全性和可控性, 美国加利福尼亚大学的研究者们^[56] 采用气体驱动方式研发了一种柔性显微夹持手 Micro-hand. 这一显微机械手专门为眼科手术实验设计, 其机械手指长 4 mm、宽 0.8 mm, 底部带有 6 个超薄充气气球. 当压缩空气充进显微机械手内时, 这些气球关节就会膨胀, 与之相连的硅趾骨就会开始进行沿平面的弯曲运动. 每个机械手指都是由 6 个硅趾骨和 6 个气球组成的系统, 手指可随压缩空气的充入而弯曲, 形象地模拟了人类手指的运动. 由于该显微夹持手采用了柔性材料, 因此可以避免一切医源性的手术损伤.

为了简化眼球切口的缝合操作, 杨洋等^[57] 创新性地使用形状记忆合金研发了眼科自动缝合钉. 缝合时, 医生只需将自动缝合钉刺入切口的两侧, 然后, 缝合钉会在眼球自身温度的加热下, 两端自动勾在一起, 完成缝合. 但是由于形状记忆合金的刚度较低, 不能对切口施加足够的缝合力, 因此缝合效果有限.

另外一个创新构型是由 Kratochvil 等研发的电磁驱动的微创视网膜注药系统^[58-59]. 该注药系统由电磁驱动控制器 OcotMag 和微型无绳注药器组成. 其中 OcotMag 由 8 个电磁铁按照一定的角度布置组成, 微型注药器具有磁性, 其外径小于 500 μm . 在利用该注药器实施视网膜注药时, 无需进行玻璃体切除术, 只需要将微型注药器通过套管针送入眼内, 注药器便会在 OcotMag 的驱动下, 到达病变位置进行药物投放.

此外, 为了提高末端操作器的灵巧度, He 等^[60] 仿照蛇的运动, 将连续体结构集成在器械中, 研发了 IRIS 显微手术镊. IRIS 可以实现手术镊在眼内任意的姿态变化, 增加了手术器械末端的活动空间.

上述手术器械的研发在 2018 年之前仍处于试验阶段, 其可行性仍有待进一步研究验证, 但是其创新构型拓展了眼科手术器械的研发思路。

4 关键技术 (Key technologies)

根据前文对眼科机器人技术的分析和概述, 眼科手术机器人的研究涉及了机构学、传感、控制等多领域的知识, 其主要关键技术包括: 眼组织的生物力学分析、构型设计、多维信息感知以及精密控制技术。

4.1 眼组织的生物力学分析

眼科机器人的设计指标必须符合眼球的各项生理参数, 例如机器人的运动范围需要大于眼球空间、机器人的术中操作力不能超过眼组织的承受极限、机器人的运动路径需要根据眼球结构的约束来优化等, 因此眼组织生物力学的分析对于眼科机器人的研究来说十分重要。总的来说, 眼组织生物力学的研究方法主要包括数值仿真法和模拟实验法。数值仿真法借助有限元分析软件 (如 Abaqus、Ansys 等), 通过定义眼组织的力学属性, 对手术动作进行仿真, 从而得到器械与眼组织的相互作用关系。Su 等^[21]通过数值仿真法模拟了角膜环钻过程, 比较了不同钻切速度和力矩与角膜变形之间的关系, 提出了最佳的钻切参数。模拟实验法是在动物模型或尸体模型上进行模拟的眼科手术, 采集实验数据, 从而得到眼球的生物力学属性。杨洋等^[20]使用离体猪眼球进行了模拟角膜缝合, 比较了角膜缝合中人工操作与机器人操作的不同作用力。Horise 等^[61]根据视网膜手术的常规操作, 在人工眼球模型上进行了模拟实验, 比较了人工操作和机器人操作下的巩膜接触力, 得到视网膜手术中可接受的最大巩膜接触力为 150 mN。

生物力学的研究可以为眼科机器人的研发提供依据。目前的眼组织生物力学研究集中于软件仿真或模型试验, 存在一定的局限性, 在未来的研究中, 通过使用人体眼球模型并优化检测方法, 可以得到更真实的眼组织生物力学数据。同时, 将生物力学融合到机器人的控制中, 将会是未来眼科机器人发展的另一个趋势, 例如根据不同眼组织的最大承受力, 设置器械操作力的安全阈值, 为器械操作提供虚拟约束, 保障手术操作的安全。

4.2 构型设计

在眼内微创手术中, 手术器械需从巩膜刺入点插入病人眼球内, 围绕该点运动来实施手术操作, 即绕刺入点的 3 维转动和沿器械轴线的移动。研究

者们将能够实现上述运动的机构称为 RCM 机构。RCM 机构的设计是眼科机器人本体构型的关键问题。

从运动模式来看, RCM 机构可以分为 6 类, 即 1 维转动 (1R)、2 维转动 (2R)、3 维转动 (3R)、1 转 1 移 (1R1T)、2 转 1 移 (2R1T) 和 3 转 1 移 (3R1T)。其中 1R-RCM 由于结构简单稳定, 在眼科机器人中应用较多, 如 SHER 机器人^[17-18]、北京航空航天大学研制的视网膜机器人^[22]等。裴旭等总结了 1R-RCM 机构的几种基本构型, 提出了若干构造 RCM 机构的方法^[62-63]。首先, 引入了平面虚拟中心 (virtual center, VC) 机构的概念, 如图 4 所示, 图中的点 E 会绕固定点 O 做圆周运动, 而点 O 上并没有安装转动副。然后在 VC 机构的基础上, 提出了 1R-RCM 机构的 3 种型综合方法, 2 个 VC 机构并联、2 个 VC 机构混联和单个 VC 机构扩展, 如图 5 所示。

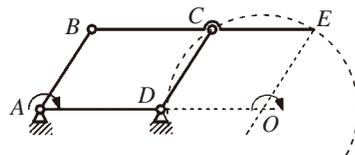


图 4 平行四杆 VC 机构

Fig.4 VC mechanism with four parallel links

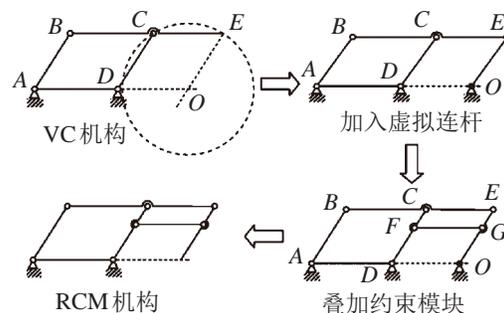


图 5 1R-RCM 的构造方法

Fig.5 Construction methods of 1R-RCM

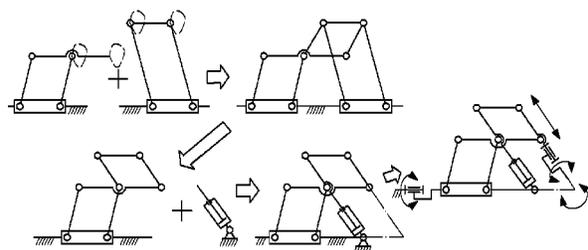


图 6 具有多自由度的 RCM 机构

Fig.6 An RCM with multiple degree of freedom

对于眼内手术来讲, 机器人在操作过程中, 其机构上的 RCM 需要与巩膜上的刺入点实现实时重合, 并保证结构紧凑、灵巧、精密, 同时具有很好

的刚性与稳定性。1R1T-RCM 在保证设计较为简单的同时,满足上述要求。此外 1R1T-RCM 具有较高的可拓展性,黄龙等^[64]基于仿图仪的结构设计了一种 1R1T-RCM (图 6),其在基座铰链处实现了机构的进给自由度,这种构型不仅减轻了机构末端的负载,而且提高了 RCM 的刚性。

前文介绍的机器人系统包括 SHER^[18]、Preceyes^[27]、北京航空航天大学研制的视网膜机器人^[24]等均采用了平行四杆机构构型的 RCM。其原因在于除了能够提供稳定的绕虚拟点的约束运动,平行四杆构型还具有刚度高、结构紧凑小巧、运动精度较高等特点。因此,基于平行四杆构型的 RCM 机构将会是眼科机器人构型设计的趋势。但是,平面平行四杆构型的 RCM 机构运动范围较小,不能适应于对于器械操作空间需求较大的眼前节手术,例如白内障手术等。因此,在未来的研究中,增大 RCM 机构的运动空间将会是研究难点。

4.3 多维信息传感

眼科显微手术涉及到器械与视网膜薄壁、视网膜血管等精密眼组织的操作,为保证手术安全,手术中需要获取包括器械的末端位置、目标眼组织的位置以及器械与眼组织的作用力等多维信息,以此为医生提供全方位的操作引导或反馈,从而实现高精度的手术操作。

眼科手术中的微力检测主要有 2 种方法,一种是使用商用微型传感器(例如 Nano 17, ATI Industrial Automation, Inc.)作为机器人的力感知器件,如 Preceyes 机器人^[25-27]等。由于体积相对较大,Nano17 传感器只能在眼球外进行测量,检测的力信息同时包含了器械与眼内组织的接触力以及器械与巩膜切口的摩擦力,因此不能精确地反映器械在眼内的操作力。另一种力检测方法是 将 FBG 嵌入手术器械末端^[39-41],对器械末端与眼组织的接触力直接进行检测。该检测方法能够隔绝眼外摩擦力的干扰,精确地反馈器械与视网膜表面的作用力。同时,FBG 具有很高的灵敏度,文^[38]提出的基于 FBG 集成的力感知器械的分辨率能够达到 0.25 mN,达到了大多数眼科手术的力感知要求。因此在将来的眼科手术机器人中,基于 FBG 的力检测方式将会得到越来越多的应用。

类似力检测方法,对于器械末端位置的检测也主要包括 2 种方法,一种是将光纤嵌入器械末端,利用 OCT 技术检测末端与眼组织之间的相对距离,如 SMART 手术器械^[46]等。这种方法虽然鲁棒性较好,但是 OCT 的信号采集过程中会引入噪声,因

此检测精度不高。另一种方法是通过图像识别方法来检测器械末端位置,并通过机器学习等人工智能方法来加强检测效果。Rieke 等^[65]利用随机森林算法对器械在眼内的位置和姿态进行了识别,并通过 18 个活体视网膜序列数据组的实验验证了该方法的可行性。图像识别方法能够检测器械上多点的位置信息,获取的信息量更大,同时,借助机器学习等方法可以实现较高的检测精度,因此会在眼科机器人中有更多的应用。

在目标眼组织的检测方面,图像识别和重建是主要的研究方法。卡耐基·梅隆大学的研究者们针对眼底血管的识别和重建,于 2016 年提出了一种 EyeSLAM 算法^[66],可以对视网膜血管实现 30 Hz 的实时定位和重建,具有旋转不变性,并能够适应不同的光照条件。天主教鲁汶大学的研究者也采用图像方法对眼底视网膜血管的重建进行了研究^[67],得到了眼底视网膜的地形图。随着更多高鲁棒性的算法的提出,基于图像识别重建的方法将会极大地提高眼组织的检测精度和效果。

多维信息传感技术能够提供术中器械与眼组织的交互信息,对于保障手术的安全精密操作具有重要作用,因此也是推动眼科机器人的临床应用的关键。但是目前多维信息的研究大多为离线验证,并未应用到眼科机器人的实验验证中。因此,对多维传感信息进行融合并实时地反馈给操作者,是未来的研究方向。

4.4 精密运动控制技术

眼科机器人的控制需要在适应医生操作的基础上,具有足够的可靠性和稳定性,以保证手术过程中的操作安全。总的来看,眼科机器人目前主要有 2 种控制方式:主从式和人机协同式。在主从控制中,主操作器的运动经缩放后映射到从机器人的运动空间,医生的操作尺度被放大,有助于医生实施更为精密的手术操作,目前大多数眼科机器人都采用主从操作方式,如 Preceyes^[25-27]、IRISS^[19]等。与主从控制方式不同,人机协同控制方式允许医生直接把持安装在机器人末端的手术器械,医生的操作意图通过力传感器传递给机器人,从而对机器人进行控制。在人机系统控制方式下,医生的手部颤抖可以被有效地滤除,医生也能获得更为直观的操作环境。SHER 机器人^[17-18]是人机协同控制方式的代表。

眼内手术例如视网膜静脉血管插管术中,眼科机器人需要在眼球巩膜切口的约束下,完成特定的手术动作,手术操作中手术器械不可避免地会对

巩膜切口施加过大的接触力, 或者触碰视网膜的非病变位置. 为实现手术的安全精密操作, 必须根据力、位置等传感信息对机器人进行反馈控制, 或者通过术前的路径规划, 对机器人的运动施加虚拟约束. 肖晶晶等^[22]针对机器人辅助视网膜手术, 提出了基于多刺入点约束的机器人运动规划算法, 实现了器械末端平行于视网膜表面的运动. He 等^[68]将器械与巩膜的接触力信息反馈给机器人, 提出了多变量导纳控制算法, 对手术过程的危险动作(例如拉扯巩膜切口等)进行主动修正.

完善的眼科机器人控制算法会保证手术过程中的安全, 可以更进一步地推进眼科机器人临床应用. 未来的研究中需要综合考虑眼球的空间约束、特定手术动作的要求以及多器械的协同控制等因素. 同时, 基于力信息、图像信息等多维传感信息, 设计运动约束算法, 对机器人的运动施加虚拟约束, 将会是未来的研究热点.

5 结论 (Conclusion)

眼科机器人能够实现优于人工操作的精密运动, 具有高稳定性以及术中信息检测的高灵敏度, 可以有效克服人工手术时的手部颤抖、力和深度信息感知困难等问题, 帮助提高手术效果. 眼科机器人的发展经历了结构设计、样机研发、可行性验证, 其技术成熟度越来越高, 并逐渐进入临床应用阶段, 首例眼科机器人的临床试验已在 2016 年成功完成. 其研究包含眼组织生物力学分析、构型设计、多维信息传感以及精密运动控制等内容, 是一个多学科融合的系统. 本文列举了截至 2018 年国内外研发的眼科机器人系统, 比较分析了各自的特点, 并提出了其关键技术和发展趋势. 眼科机器人和智能手术器械的发展将进一步推动眼科手术方式的创新, 从而加速人类眼健康事业的发展.

参考文献 (References)

- [1] Kadosono K, Yamane S, Arakawa A, et al. Endovascular cannulation with a microneedle for central retinal vein occlusion[J]. *JAMA Ophthalmology*, 2013, 131(6): 783-786.
- [2] Singhy S P N, Riviere C N. Physiological tremor amplitude during retinal microsurgery[C]//*Proceedings of the IEEE Bioengineering Conference*. Piscataway, USA: IEEE, 2002: 171-172.
- [3] Gupta P K, Jensen P S, de Juan Jr E. Surgical forces and tactile perception during retinal microsurgery[M]//*Lecture Notes in Computer Science*, Vol.1679. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 1999: 1218-1225.
- [4] Noda Y, Ida Y, Tanaka S, et al. Impact of robotic assistance on precision of vitreoretinal surgical procedures[J]. *PLoS ONE*, 2013, 8(1). DOI: 10.1371/journal.pone.0054116.
- [5] Cutler N, Balicki M, Finkelstein M, et al. Auditory force feedback substitution improves surgical precision during simulated ophthalmic surgery[J]. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, 2013, 54(2): 1316-1324.
- [6] Gijbels A, Willekens K, Esteveny L, et al. Towards a clinically applicable robotic assistance system for retinal vein cannulation [C]//*IEEE International Conference on Biomedical Robotics and Biomechanics*. Piscataway, USA: IEEE, 2016: 284-291.
- [7] 梁皓, 谭少健. 正常成年男性晶状体前囊膜特性的研究[J]. *眼科研究*, 2002(3): 257-258.
Liang H, Tan S J. Study on the properties of anterior lens capsule in the cadaver eyes of normal adult male[J]. *Chinese Journal of Experimental Ophthalmology*, 2002(3): 257-258.
- [8] Brooks Jr H L. Macular hole surgery with and without internal limiting membrane peeling[J]. *Ophthalmology*, 2000, 107(10): 1939-1948.
- [9] Riviere C N, Jensen P S. A study of instrument motion in retinal microsurgery[C]//*Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*. Piscataway, USA: IEEE, 2000: 59-60.
- [10] Ergeneman O, Pokki J, Počepcova V, et al. Characterization of puncture forces for retinal vein cannulation[J]. *Journal of Medical Devices*, 2011, 5(4). DOI: 10.1115/1.4005318.
- [11] Guerrouad A, Vidal P. SMOS: Stereotaxical microtelemanipulator for ocular surgery[C]//*Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology*. Piscataway, USA: IEEE, 1989: 879-880.
- [12] Charles S, Das H, Ohm T, et al. Dexterity-enhanced telerobotic microsurgery[C]//*International Conference on Advanced Robotics*. Piscataway, USA: IEEE, 1997: 5-10.
- [13] Jensen P S, Grace K W, Attariwala R, et al. Toward robot-assisted vascular microsurgery in the retina[J]. *Graefes' Archive for Clinical and Experimental Ophthalmology*, 1997, 235(11): 696-701.
- [14] Yu D Y, Cringle S J, Constable I J. Robotic ocular ultramicrosurgery[J]. *Australian and New Zealand Journal of Ophthalmology*, 1998, 26(S1): S6-S8.
- [15] Taylor R H, Funda J, Grossman D D, et al. Remote center-of-motion robot for surgery: US5397323[P]. 1995-03-14.
- [16] Stoianovici D, Whitcomb L L, Mazilu D, et al. Remote center of motion robotic system and method: US7021173[P]. 2006-4-4.
- [17] Fleming I, Balicki M, Koo J, et al. Cooperative robot assistant for retinal microsurgery[C]//*11th International Conference on Medical Image Computing & Computer-assisted Intervention*. Berlin, Germany: Springer, 2008: 543-550.
- [18] Uneri A, Balicki M A, Handa J, et al. New steady-hand eye robot with micro-force sensing for vitreoretinal surgery[C]//*IEEE RAS and EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechanics*. Piscataway, USA: IEEE, 2010: 814-819.
- [19] Rahimy E, Wilson J, Tsao T, et al. Robot-assisted intraocular surgery: Development of the IRISS and feasibility studies in an animal model[J]. *Eye*, 2013, 27(8): 972-978.
- [20] Yang Y, Xu C L, Deng S J, et al. Insertion force in manual and robotic corneal suturing[J]. *International Journal of Medical Robotics & Computer Assisted Surgery*, 2012, 8(1): 25-33.
- [21] Su P, Deng S J, Huang L, et al. Analysis and evaluation of a robotic trephination in penetrating keratoplasty[J]. *Journal of Medical Devices*, 2016, 10(2). DOI: 10.1115/1.4032869.

- [22] Xiao J J, Huang L, Shen L, et al. Design and research of a robotic aided system for retinal vascular bypass surgery[J]. *Journal of Medical Devices*, 2014, 8(4). DOI: 10.1115/1.4027230.
- [23] He C Y, Huang L, Yang Y, et al. Research and realization of a master-slave robotic system for retinal vascular bypass surgery[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2018, 31. DOI: 10.1186/s10033-018-0278-6.
- [24] Chen Y Q, Tao J W, Li L, et al. Feasibility study on robot-assisted retinal vascular bypass surgery in an ex vivo porcine model[J]. *Acta Ophthalmologica*, 2017, 95(6). DOI: 10.1111/aos.13457.
- [25] Bedem L V D, Hendrix R, Rosielle N, et al. Design of a minimally invasive surgical teleoperated master-slave system with haptic feedback[C]//*IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*. Piscataway, USA: IEEE, 2009: 60-65.
- [26] de Smet M D, Meenink T C, Janssens T, et al. Robotic assisted cannulation of occluded retinal veins[J]. *PLoS One*, 2016, 11(9). DOI: 10.1371/journal.pone.0162037.
- [27] Hendrix R. Robotically assisted eye surgery: A haptic master console[D]. Eindhoven, Netherlands: Technische Universiteit Eindhoven, 2011.
- [28] 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/OL]. *Nature Biomedical Engineering*, 2018. (2018-06-18) [2018-06-23]. <https://doi.org/10.1038/s41551-018-0248-4>.
- [29] Gijbels A, Wouters N, Stalmans P, et al. Design and realisation of a novel robotic manipulator for retinal surgery[C]//*IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. Piscataway, USA: IEEE, 2013: 3598-3603.
- [30] Gijbels A, Vander Poorten E B, Stalmans P, et al. Design of a teleoperated robotic system for retinal surgery[C]//*IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Piscataway, USA: IEEE, 2014: 2357-2363.
- [31] Gijbels A, Poorten E B V, Gorissen B, et al. Experimental validation of a robotic comanipulation and telemanipulation system for retinal surgery[C]//*IEEE RAS and EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechanics*. Piscataway, USA: IEEE, 2014: 144-150.
- [32] Donald T. Robot assists with injections for RVO[J]. *Retina Today*, 2017, 12(3): 59-61.
- [33] Wei W, Goldman R, Simaan N, et al. Design and theoretical evaluation of micro-surgical manipulators for orbital manipulation and intraocular dexterity[C]//*IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Piscataway, USA: IEEE, 2007: 3389-3395.
- [34] Wei W, Goldman R E, Fine H F, et al. Performance evaluation for multi-arm manipulation of hollow suspended organs[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2009, 25(1): 147-157.
- [35] Wei W, Popplewell C, Chang S, et al. Enabling technology for microvascular stenting in ophthalmic surgery[J]. *Journal of Medical Devices*, 2010, 4(1): 167-190.
- [36] 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.
- [37] Bourcier T, Chammas J, Becmeur P H, et al. Robotically assisted pterygium surgery: First human case[J]. *Cornea*, 2015, 34(10): 1329-1330.
- [38] Bourges J L, Hubschman J P, Wilson J, et al. Assessment of a hexapod surgical system for robotic micro-macro manipulations in ocular surgery[J]. *Ophthalmic Research*, 2011, 46(1): 25-30.
- [39] He X, Gehlbach P, Handa J, et al. Development of a miniaturized 3-DOF force sensing instrument for robotically assisted retinal microsurgery and preliminary results[C]//*IEEE RAS and EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechanics*. Piscataway, USA: IEEE, 2014: 252-258.
- [40] He X C, Balicki M A, Kang J U, et al. Force sensing micro-forceps with integrated fiber Bragg grating for vitreoretinal surgery[M]//*Proceedings of SPIE*, Vol.8218. Bellingham, USA: SPIE, 2012. DOI: 10.1117/12.909602.
- [41] Gonenc B, Balicki M A, Handa J, et al. Preliminary evaluation of a micro-force sensing handheld robot for vitreoretinal surgery [C]//*IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. Piscataway, USA: IEEE, 2012: 4125-4130.
- [42] Gonenc B, Tran N, Riviere C N, et al. Force-based puncture detection and active position holding for assisted retinal vein cannulation[C]//*IEEE International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems*. Piscataway, USA: IEEE, 2015: 322-327.
- [43] Yu H, Shen J H, Joos K M, et al. Design, calibration and preliminary testing of a robotic telemanipulator for OCT guided retinal surgery[C]//*IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Piscataway, USA: IEEE, 2013: 225-231.
- [44] Yu H, Shen J H, Shah R J, et al. Evaluation of microsurgical tasks with OCT-guided and/or robot-assisted ophthalmic forceps[J]. *Biomedical Optics Express*, 2015, 6(2): 457-472.
- [45] Joos K M, Shen J H. Miniature real-time intraoperative forward-imaging optical coherence tomography probe[J]. *Biomedical Optics Express*, 2013, 4(8): 1342-1350.
- [46] Song C, Park D Y, Gehlbach P L, et al. Fiber-optic OCT sensor guided "SMART" micro-forceps for microsurgery[J]. *Biomedical Optics Express*, 2013, 4(7): 1045-1050.
- [47] He X C, Balicki M, Gehlbach P, et al. A novel dual force sensing instrument with cooperative robotic assistant for vitreoretinal surgery[C]//*IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Piscataway, USA: IEEE, 2011: 213-218.
- [48] Wei T A, Riviere C N, Khosla P K. An active hand-held instrument for enhanced microsurgical accuracy[C]//*3rd International Conference on Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention*. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 2000: 878-886.
- [49] MacLachlan R A, Becker B C, Tabares J C, et al. Micron: An actively stabilized handheld tool for microsurgery[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2012, 28(1): 195-212.
- [50] Becker B C, MacLachlan R A, Lobes L A, et al. Position-based virtual fixtures for membrane peeling with a handheld micromanipulator[C]//*IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Piscataway, USA: IEEE, 2012: 1075-1080.
- [51] 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]//*IEEE RAS and EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechanics*. Piscataway, USA: IEEE, 2012: 44-49.
- [52] Latt W T, Tan U X, Shee C Y, et al. A compact hand-held active physiological tremor compensation instrument[C]//*IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*. Piscataway, USA: IEEE, 2009: 711-716.

- [53] Saxena A, Patel R V. An active handheld device for compensation of physiological tremor using an ionic polymer metallic composite actuator[C]//IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Piscataway, USA: IEEE, 2013: 4275-4280.
- [54] Chang D, Gu G M, Kim J. Design of a novel tremor suppression device using a linear delta manipulator for micromanipulation [C]//IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Piscataway, USA: IEEE, 2013: 413-418.
- [55] Payne C J, Kwok K W, Yang G Z. An ungrounded handheld surgical device incorporating active constraints with force-feedback[C]//IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Piscataway, USA: IEEE, 2013: 2559-2565.
- [56] Hubschman J P, Bourges J L, Choi W, et al. 'The Microhand': A new concept of micro-forceps for ocular robotic surgery[J]. Eye, 2010, 24(2): 364-367.
- [57] 王璐, 杨洋, 孙繁新, 等. 基于形状记忆合金的角膜缝合钉的设计 [J]. 机械工程学报, 2010, 46(23): 161-165.
Wang L, Yang Y, Sun F X, et al. Design of a corneal suturing nail based on shape memory alloy[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(23): 161-165.
- [58] Bergeles C, Kummer M P, Kratochvil B E, et al. Steerable intravitreal inserts for drug delivery: In vitro and ex vivo mobility experiments[M]//Lecture Notes in Computer Science, Vol.6891. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 2011: 33-40.
- [59] Kummer M P, Abbott J J, Kratochvil B E, et al. OctoMag: An electromagnetic system for 5-DOF wireless micromanipulation[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway, USA: IEEE, 2010: 1080-1081.
- [60] He X C, van Geirt V, Gehlbach P, et al. IRIS: Integrated robotic intraocular snake[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway, USA: IEEE, 2015: 1764-1769.
- [61] Horise Y, He X, Gehlbach P, et al. FBG-based sensorized light pipe for robotic intraocular illumination facilitates bimanual retinal microsurgery[C]//Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. Piscataway, USA: IEEE, 2015: 13-16.
- [62] Zong G H, Pei X, Yu J J, et al. Classification and type synthesis of 1-DOF remote center of motion mechanisms[J]. Mechanism and Machine Theory, 2008, 43(12): 1585-1595.
- [63] 宗光华, 裴旭, 于靖军, 等. 双平行四杆型远程运动中心机构的设计 [J]. 机械工程学报, 2007, 43(12): 103-108.
Zong G H, Pei X, Yu J J, et al. Design of double parallelogram remote center of motion mechanisms[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(12): 103-108.
- [64] Huang L, Yang Y, Su P, et al. Type synthesis of 1R1T remote center of motion mechanisms based on pantograph mechanisms[J]. Journal of Mechanical Design, 2016, 138(1). DOI: 10.1115/1.4031804.
- [65] Rieke N, Tan D J, Amat di San Filippo C, et al. Real-time localization of articulated surgical instruments in retinal microsurgery[J]. Medical Image Analysis, 2016, 34: 82-100.
- [66] Braun D, Yang S, Martel J N, et al. EyeSLAM: Real-time simultaneous localization and mapping of retinal vessels during intraocular microsurgery[J]. International Journal of Medical Robotics and Computer Assisted Surgery, 2018, 14(1). DOI: 10.1002/rcs.1848.
- [67] Probst T, Maninis K K, Chhatkuli A, et al. Automatic tool landmark detection for stereo vision in robot-assisted retinal surgery [J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2018, 3(1): 612-619.
- [68] He X C, Balicki M, Gehlbach P, et al. A multi-function force sensing instrument for variable admittance robot control in retinal microsurgery[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway, USA: IEEE, 2014: 1411-1418.

作者简介:

贺昌岩 (1993 -), 男, 博士生. 研究领域: 医疗机器人技术.

杨洋 (1962 -), 男, 博士, 教授, 博士生导师. 研究领域: 医疗机器人技术, 灵巧手, 智能机械设计.

梁庆丰 (1971 -), 男, 博士, 主任医师, 教授. 研究领域: 感染眼病病原体发病机理, 睑板腺功能障碍, 角结膜肿瘤.

(上接第 249 页)

- [16] 李盛前. 基于视觉技术的水下焊接机器人系统研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2016.
Li S Q. Study on system of underwater welding robot based on vision technology[D]. Guangzhou: Huanan University of Science and Technology, 2016.
- [17] Lewis F L, Yesildirek A, Liu K. Multilayer neural-net robot controller with guaranteed tracking performance[J]. IEEE Transactions on Neural Networks, 1996, 7(2): 388-399.

作者简介:

周浩 (1994 -), 男, 硕士生. 研究领域: 水下机器人视觉技术.

姜述强 (1978 -), 男, 博士, 助理研究员. 研究领域: 机器人与控制技术.

黄海 (1978 -), 男, 博士, 副教授. 研究领域: 水下机器人与作业技术.