

· 实验研究 ·

辅助玻璃体视网膜显微手术机器人系统的研制及应用

陈亦棋 张超特 洪明胜 苏铃雅 陶继伟 杨洋 肖晶晶 沈丽君

325027 温州医科大学附属眼视光医院 眼视光学院 浙江省眼科医院(陈亦棋、苏铃雅、陶继伟、沈丽君);325000 温州医科大学附属第一医院急诊科(张超特);310000 浙江医院眼科(洪明胜);100191 北京航空航天大学机械工程及自动化学院(杨洋);361000 厦门大学航空航天学院(肖晶晶)

通信作者:沈丽君,Email:slj@mail.eye.ac.cn

DOI:10.3760/cma.j.issn.2095-0160.2017.01.008

【摘要】 **背景** 机器人手术系统已越来越多地用于多个医学领域,也应用于眼科。研究报告显示机器人辅助的手术有许多优点,包括精确性高,灵活性好,减少术者的生理性手颤抖,提高手术的稳定性,缩短学习曲线等,但中国仍无机器人辅助的眼科手术报道。 **目的** 从临床实际出发设计和研制辅助玻璃体视网膜显微手术机器人系统并评估其在玻璃体视网膜手术中的应用能力。 **方法** 由温州医学院眼科医院与北京航空航天大学共同研制一套辅助玻璃体视网膜显微手术机器人系统,该系统本体具备 2 个机械手臂,可以握持眼科常用的手术器械,如玻璃体切割头、导光探头、激光笔和 23G 眼内镊,进行微创的玻璃体视网膜手术操作。由 3 名低年资眼科医师通过控制器操控机器人 2 个机械手臂的运动路径对 15 只离体猪眼行玻璃体切割手术,以验证该系统执行平坦部玻璃体切割和玻璃体后脱离的可行性。玻璃体切割步骤包括制作 3 个 23G 巩膜切口、经切口导入手术器械及用曲安奈德诱导和切除玻璃体后脱离。评估手术持续时间、手术成功率和并发症情况。 **结果** 15 只离体猪眼的玻璃体切割和玻璃体后脱离手术均顺利完成,术中未发现眼球的明显变形,术后未发生医源性视网膜裂孔和视网膜脱离,手术成功率为 100%。15 只眼手术平均持续时间为(12.76±3.44)min,每个术者平均手术持续时间分别为(13.67±4.23)、(10.83±2.30)和(13.77±1.91)min。 **结论** 辅助玻璃体视网膜显微手术机器人系统具有良好的稳定性和精确性,在一定程度上可以代替人手进行玻璃体视网膜手术操作。

【关键词】 机器人手术; 机器人技术/仪器; 计算机辅助手术/方法; 玻璃体切割术/方法; 可行性研究; 猪

基金项目: 国家自然科学基金项目(51175013); 浙江省医药卫生科技计划项目(WKJ2010-2-018); 浙江省教育厅科研项目(Y201431237); 温州医科大学眼视光学院重大科研项目(YNZD201003); 第二批浙江省医学创新学科建设计划项目(眼底外科学)

Development of cooperative robot-assistant surgery system for vitreoretinal microsurgery and its feasibility test in an animal model Chen Yiqi, Zhang Chaote, Hong Mingsheng, Su Lingya, Tao Jiwei, Yang Yang, Xiao Jingjing, Shen Lijun

School of Ophthalmology & Optometry, Eye Hospital, Wenzhou Medical University, Wenzhou 325027, China (Chen YQ, Su LY, Tao JW, Shen LJ); Department of Emergency, Affiliated First Hospital of Wenzhou Medical University, Wenzhou 325000, China (Zhang CT); Department of Ophthalmology, Zhejiang Hospital, Hangzhou 310000, China (Hong MS); School of Mechanical Engineering and Automation, Beihang University, Beijing 100191, China (Yang Y); School of Aerospace Engineering, Xiamen University, Xiamen, 361000, China (Xiao JJ)

Corresponding author: Shen Lijun, Email: slj@mail.eye.ac.cn

[Abstract] **Background** Robotic systems are increasingly utilized in numerous disciplines including ophthalmology. Several reports showed potential benefits of robotic-assisted surgery, such as increased precision and dexterity, elimination of tremor, task automation and shortening of learning curve. However, there is still no relative report in China. **Objective** The present study was to develop a novel robotic-assisted vitreoretinal microsurgery system and assess its overall capacities. **Methods** A robotic-assisted vitreous and retinal microsurgery system was cooperatively built by Eye Hospital of Wenzhou Medical University and Beijing University of Aeronautics. This platform has two mechanical arms, end-effector of each can grip common instruments such as vitrectomy cutter, illumination probe, laser probe, 23-gauge intraocular forceps. The intraocular surgical tasks were performed assisted by

surgical robot on 15 fresh *in vitro* porcine eyes by three interns to test the feasibility of performing pars plana vitrectomy (PPV) and posterior vitreous detachment (PVD). Vitrectomy steps consisted of preparing three 23-gauge scleral incisions, inserting vitreous cutter towards vitreous and retina via the incisions, and using vitreous cutter to induce and remove a PVD assisted with triamcinolone. The duration and the successful completion of the task with or without complications or involuntary events was assessed. **Results** PPV and PVD procedures were successfully finished on 15 porcine eyes, and no noted deformation of eyeballs during surgery and no iatrogenic complication such as retinal tear or retinal detachment occurred after operations, with the successful rate 100%. The mean duration of surgery was (12.76 ± 3.44) minutes among the 15 eyeballs and the mean duration for each operator was (13.67 ± 4.23) , (10.83 ± 2.30) and (13.77 ± 1.91) minutes, respectively. **Conclusions** Robotic-assisted vitreoretinal microsurgery system is verified to have good stability and accuracy in intraocular surgery, and the robotic surgical system may be technically feasible to perform human manual PPV and PVD procedures.

[**Key words**] Robotic surgical procedures; Robotics/instrumentation; Surgery, computer-assisted/methods; Vitrectomy/methods; Feasibility studies; Swine

Fund program: National Natural Science Foundation of China (51175013); Medicine and Health Science and Technology Plan Projects of Zhejiang Province (WKJ2010-2-018); Zhejiang Education Department Scientific Research Projects (Y201431237); Major Scientific Research Project of School of Ophthalmology & Optometry of Wenzhou Medical University (YNZD201003); Innovative Medical Subject Project of Zhejiang Province (Fundus Surgery).

机器人手术系统是指一种自动的、可控的、具有编程能力的机械手臂借助计算机进行临床手术的设备,手术医师通过控制机械手臂可在手术过程中执行定点切割、缝合、注药等一系列操作。机器人手术系统起源于 20 世纪 90 年代,近年来随着精密机械自控技术、虚拟现实情景技术、传感器技术等技术的飞速发展,机器人技术也得到了快速的发展。目前手术辅助机器人系统已广泛用于多个医疗专业的手术中,包括胃肠外科、泌尿外科及心胸外科等^[1-4]。研究表明,机器人手术系统的手术效果优于传统的手术方式^[5-6]。由于眼球结构较复杂及眼科手术更精密的自身特点,眼科手术用机器人的研究和发展速度较为缓慢,尤其是在玻璃体视网膜手术方面。目前国外学者已开始研制用于玻璃体视网膜显微手术的机器人手术系统^[7-8],然而这些研究的临床应用仍有一定的问题。近年来温州医科大学附属眼视光医院与北京航空航天大学进行合作,率先研制开发了玻璃体视网膜手术辅助机器人系统,并对其系统结构、自主控制、实验性应用等方面进行了探索。

1 材料与方法

1.1 材料

1.1.1 实验对象 新鲜离体猪眼 15 只(购买自屠宰厂),制作成人工角膜镜下离体动物眼模型。

1.1.2 玻璃体视网膜手术辅助机器人系统的设计与构成 玻璃体视网膜手术辅助机器人系统设计的总体目标是实现手术者与机器人的合理分工,以精确、高效、安全地完成玻璃体视网膜手术操作,如玻璃体切割及人造玻璃体后脱离等。该系统由以下 4 个部分组

成:辅控计算机、主刀控制面板、系统控制柜、机器人本体(图 1)。其中前 3 个部分为控制端,通过辅控计算机或者主刀控制面板可以向系统控制柜发送指令,后者对指令进行分析和整合,操控机器人本体的运动。机器人本体为执行端,由 2 个相互独立的机械手臂组成,每个机械手臂可以进行 XYZ 3 个维度的运动,并且末端可以握持眼科常用手术器械,遵从控制端的指令完成各项玻璃体视网膜手术操作。该系统有 3 个关键部件:(1)末端握持器:机器人本体的 2 个机械手臂末端有握持器,可以固定不同直径和规格的常规玻璃体视网膜手术器械,如导光头、激光头、玻璃体切割头以及眼内镊等(图 2)。每个末端握持器均可实现一个自由度的运动,即前进/后退运动。而用于控制眼内镊的握持器能实现另外 2 个自由度运动,即控制眼内镊绕自身轴线旋转,改变镊子前端开口的方向以及控制眼内镊头端开口的大小,满足对不同手术对象的挟持要求。(2)远程运动中心(remote center of motion, RCM):不同于一般机器人,玻璃体视网膜手术辅助机器人系统可握持各种规格的细棍状手术器械,经过玻璃体视网膜手术的微创手术路径点(巩膜穿刺口)进入眼内进行手术。因为所有手术操作都受巩膜穿刺口的约束,所以机器人控制手术器械以巩膜穿刺口为支点,在眼内做杠杆运动,实现手术器械的头端在眼内的 X/Y 2 个自由度运动。该系统的 RCM 采取可与巩膜穿刺口重合的设计,所以在手术过程中不会对眼球产生不必要的压力。(3)眼内运动模式:为了实现眼内安全且快速的手术操作,该机器人系统设计了 2 种不同的眼内运动模式(图 3):①视网膜表面的平行运动:为了保障机器人操作的安全性,机械臂握持手术器械

进行 X/Y 方向运动时,系统能自动调控沿眼内器械轴向(Z 轴)的直线运动,以保持眼内器械前段(近视网膜端)与视网膜的固定距离。②非视网膜表面的平行运动:视网膜表面平行运动的规划是基于将眼球近似看为标准的球体为基础,所以由于眼球的实际形状以及作为平行运动的必要补充而设计了非平行运动规划,即系统控制手术器械,使其前端在不同的眼球经纬平面上进行运动。



图 1 玻璃体视网膜手术辅助机器人系统的整体构成 图 2 机械手臂末端握持器 图 3 2 种眼内运动规划示意图

1.1.3 玻璃体视网膜手术辅助机器人系统的性能指标

该系统的性能指标根据眼科玻璃体视网膜手术的特点和要求进行设计(表 1)。

表 1 机器人系统的性能指标	
性能指标	设定值
XYZ 运动范围	±50 mm
XZY 运动精度	1 μm
俯仰/翻滚运动范围	±40°
俯仰/翻滚运动精度	-0.000 5 rad
近视网膜端运动精度	~13 μm
近视网膜端运动速度	<1 mm/s
眼内器械绕自身轴的旋转范围	±360°
眼内器械绕自身轴的旋转精度	<3°
手术器械末端工作空间	60 mm×60 mm×60 mm

1.1.4 手术观察系统 选择 YZ20TP 手术显微镜(苏州六六器械公司)作为手术观察系统,结合手术机器人操作系统,进行实验应用研究。

1.2 方法

1.2.1 人工角膜镜下离体动物眼模

型的制备 用直径 8.0 mm 的旋转式角膜环钻切除离体猪眼的中央角膜,用撕囊镊连续环形撕囊,在晶状体前囊上做直径 5 mm 的环形缺口,完整娩出晶状体,以便术中清晰地观察眼底,把直径 8.25 mm 的 Landers wide-field 临时人工角膜用 8-0 缝线缝合固定在角膜植床上。

1.2.2 测试医师的选择 选定 3 名低年资医师作为测试主刀医师,每位医师各进行 5 例机器人系统辅助下的玻璃体视网膜手术。低年资医师具有短于 1 年的眼表手术操作经验,在眼科手术显微镜下能够完成结膜、巩膜和角膜缝合,但是没有任何玻璃体视网膜手术的经验。

1.2.3 机器人系统辅助的玻璃体视网膜手术模式及

玻璃体切割手术操作 测试主刀医师通过控制器操控机器人 2 个机械手臂的运动路径,再由机械手臂末端握持相关手术器械,经由手术微切口在密闭眼球内进行手术操作。手术过程如下:(1)手术准备:在完成的离体动物眼模型角巩膜缘后 1 mm 处做 3 个常规 23G 巩膜三通道切口,置灌注管行眼内灌注。左右机械手臂末端分别握持 23G 导光头和 23G 玻璃体切割头。在辅控计算机上输入眼球长度及手术切口距离等参数。

(2)眼外操控部分:位于眼球模型处的主刀医师实时观察手术器械与手术 23G 套管的相对位置变化,与助手医师进行交流沟通,助手医师根据主刀医师口头指令,通过辅控计算机控制 2 个机械手臂的运动,将眼外的手术器械顺着 23G 套管进入眼内。(3)眼内操控部分:在手术器械进入巩膜通道后,主刀医师通过主刀控制面板操控机械手臂进行眼内手术操作。控制玻璃体切割头,切除中轴部玻璃体,然后应用曲安奈德染色,进行后极部人造玻璃体后脱离并切除之(图 4)。

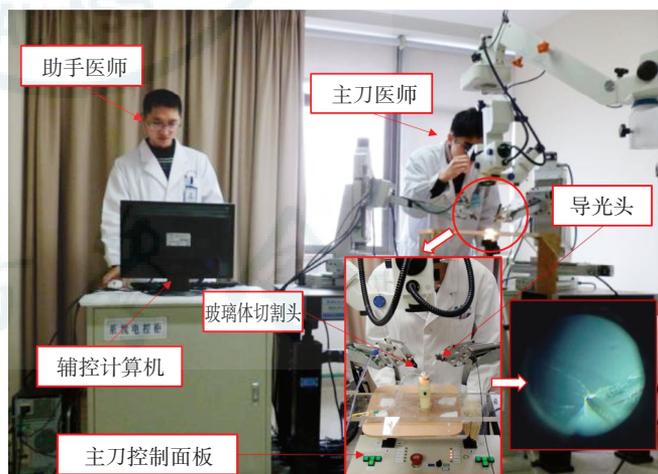


图 4 机器人系统辅助下的玻璃体切割手术示意图

2 结果

3 名主刀医师在人机协同操控模式下顺利完成 15 例玻璃体切割和人造玻璃体后脱离操作,无明显玻璃体残留,手术成功率为 100%。手术过程中眼球形状稳定,无明显变形、塌陷等情况,无术源性视网膜裂孔或视网膜脱离等并发症。15 个眼球手术的平均耗时为(12.76±3.44)min,3 名医师的个人手术耗时分别为

(13.67±4.23)、(10.83±2.30)和(13.77±1.91)min (操作视频请登录 <http://zhshyykzz.yiigle.com>)。

3 讨论

由于手术路径窄、操作空间狭小、视网膜组织脆弱和眼内操作十分繁琐复杂等原因,使得微创玻璃体视网膜手术成为眼科难度最高、学习曲线最长的手术过程,要求手术医师在操作中具备非常好的灵活性、精确性、稳定性和感知能力。有研究表明,玻璃体视网膜手术中要求术者定位的精确度应达 10 μm^[9]。对医师在手术操作过程中手的生理性颤抖幅度进行测量,发现平均颤抖幅度为 108 μm,可见手术医师手的生理性颤抖是影响玻璃体视网膜手术效果的因素之一。机器人手术系统具有切口小、创伤小、手术并发症少、无震颤、稳定性好、精确度高、活动度大、灵活度好等优点,有助于改善手术效果,提高手术成功率^[12]。

相较于其他临床学科,辅助玻璃体视网膜手术机器人的应用研究还远不够活跃和广泛,国外的多数相关研究仍处于动物实验阶段^[7-8],有学者已将目前国际上先进的达芬奇机器人手术系统应用于眼科的角膜裂伤缝合、角膜移植、翼状胬肉切除、羊膜移植等手术中^[11-15],但发现达芬奇机器人存在精确度不够,操作者通过内窥镜观察术野不够清晰以及 RCM 系统与眼球穿刺点不吻合,故对眼球产生压力而导致眼球变形,存在医源性损伤等缺点,故认为达芬奇机器人用于玻璃体视网膜手术其效果尚不理想^[8]。

本研究小组利用自动控制、机械设计、显微眼科及眼科学等多学科技术的融合,从临床实际的需求出发,率先设计和研制了辅助玻璃体视网膜显微手术机器人系统并对其应用效果进行观察,具有如下创新性:(1)该系统具有 2 个机械手臂,各能完成 5 个自由度的眼内手术操作。(2)2 个机械手臂末端握持器能握持、操控并简便更换现有的各种常规玻璃体视网膜手术器械。(3)形成的虚拟 RCM 可与巩膜穿刺口重合,大大降低了操作时器械对穿刺孔造成牵拉损伤的风险。(4)该系统中设计的视网膜表面平行运动的模式提高了在视网膜表面进行手术操作的安全性。(5)眼内手术操作可以实现连续运动和点动运动的自由切换,可灵活地改变运动幅度、角度及速度。(6)眼内手术操作的精度可达 10 μm,满足视网膜手术的操作要求。

本研究中我们选取了较低年资的医师对手术机器人系统进行操作并对机器人本身的性能进行客观评估,消除了操作医师熟练程度给评估结果带来的混杂因素。结果证实辅助玻璃体视网膜显微手术机器人系

统具有良好的稳定性及精确度,在代替人手进行微创玻璃体视网膜手术方面的可行性和安全性好。这项研究填补了国内眼科手术机器人研究的空白,为眼科手术机器人在微创玻璃体视网膜手术中的应用提供了实验基础。本课题组拟依据本研究的结果对机器人系统进行进一步改进和完善,并尝试将该系统进一步用于更加复杂和多样的玻璃体视网膜手术。此外将该系统与 3D 手术显微镜观察系统结合而应用于远程手术也是今后的研究方向。

参考文献

- [1] Talamini M, Campbell K, Stanfield C. Robotic gastrointestinal surgery: early experience and system description [J]. J Laparoendosc Adv Surg Tech A, 2002, 12(4): 225-232. DOI: 10.1089/109264202760267970.
- [2] Langer D, Pudil J, Ryska M. Robotic laparoscopic cholecystectomy [J]. Rozhl Chir, 2006, 85(9): 450-454.
- [3] Biardeau X, Rizk J, Marcelli F, et al. Robot-assisted laparoscopic approach for artificial urinary sphincter implantation in 11 women with urinary stress incontinence: surgical technique and initial experience [J]. Eur Urol, 2015, 67(5): 937-942. DOI: 10.1016/j.eururo.2014.12.041.
- [4] Nakamura H, Suda T, Ikeda N, et al. Initial results of robot-assisted thoracoscopic surgery in Japan [J]. Gen Thorac Cardiovasc Surg, 2014, 62(12): 720-725. DOI: 10.1007/s11748-014-0441-7.
- [5] 王德林, 郑畏三. 机器人经腹腔镜行前列腺根治性切除术: 手术技术 [J]. 中华泌尿外科杂志, 2005, 26(5): 358-360.
- [6] 费夏玮, 李笑弓, 郭宏寿. 腹腔镜和机器人腹腔镜根治性前列腺切除术的疗效比较的 Meta 分析 [J]. 中华腔镜泌尿外科杂志 (电子版), 2013, 7(2): 92-100. DOI: 10.3877/cma.j.issn.1674-3253.2013.02.003.
- [7] Fei XW, Li XG, Guo HQ. Laparoscopic versus robotic-assisted laparoscopic radical prostatectomy: A meta-analysis [J]. Chin J Endourol, 2013, 7(2): 92-100. DOI: 10.3877/cma.j.issn.1674-3253.2013.02.003.
- [8] 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, 1543. DOI: 10.1016/j.ophtha.2009.03.001.
- [9] Rahimy E, Wilson J, Tsao TC, et al. Robot-assisted intraocular surgery: development of the IRISS and feasibility studies in an animal model [J]. Eye (Lond), 2013, 27(8): 972-978. DOI: 10.1038/eye.2013.105.
- [10] Riviere CN, Ang WT, Khosla PK. Toward active tremor canceling in handheld microsurgical instruments [J]. IEEE Trans Rob Autom, 2003, 19(5): 793-800.
- [11] 李春雨, 贾晋太, 王建武, 等. 机器人手术发展历史回顾 [J]. 中华医史杂志, 2010, 40(4): 229-233. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0255-7053.2010.04.008.
- [12] Li CY, Jia JT, Wang JW, et al. Review of the developmental history of robotic surgery [J]. Chin J Med History, 2010, 40(4): 229-233. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0255-7053.2010.04.008.
- [13] Tsribas A, Mango C, Dutson E. Robotic ocular surgery [J]. Br J Ophthalmol, 2007, 91(1): 18-21. DOI: 10.1136/bjo.2006.096040.
- [14] Bourges JL, Hubschman JP, Burt B, et al. Robotic microsurgery: corneal transplantation [J]. Br J Ophthalmol, 2009, 93(12): 1672-1675. DOI: 10.1136/bjo.2009.157594.
- [15] 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. DOI: 10.1167/tvst.4.1.9.
- [16] Bourcier T, Chammas J, Becmeur PH, et al. Robotically assisted pterygium surgery: First human case [J]. Cornea, 2015, 34(10): 1329-1330. DOI: 10.1097/ICO.0000000000000561.
- [17] Bourcier T, Becmeur PH, Mutter D. Robotically assisted amniotic membrane transplant surgery [J]. JAMA Ophthalmol, 2015, 133(2): 213-214. DOI: 10.1001/jamaophthalmol.2014.4453.



欲观视频
即刻扫码

(收稿日期: 2016-6-26)

(本文编辑: 尹卫靖 杜娟)