

## · 实验研究 ·

# 手术机器人辅助兔眼视网膜下注射与手动注射效果比较

许晶晶<sup>1</sup> 陈露璐<sup>2</sup> 戴虹<sup>3</sup>

<sup>1</sup>北京瞳沐医疗科技有限公司眼科人工智能与机器人技术实验室, 北京 100000; <sup>2</sup>中国医学科学院北京协和医院眼科, 北京 100730; <sup>3</sup>北京医院眼科 国家老年医学中心 中国医学科学院老年医学研究院, 北京 100730

通信作者: 陈露璐, Email: chenlulupumch@126.com

**【摘要】 目的** 比较手术机器人辅助兔眼视网膜下注射与手动注射的效果。**方法** 取 5 只普通级 3~4 月龄新西兰大白兔, 每只兔的左右眼分别作为手动注射组和机器人辅助注射组, 分别采用手动和机器人辅助方式进行视网膜下注射, 记录并比较 2 个组的注射成功率、调针次数、针尖震颤幅度、穿刺孔径、并发症发生率、操作时间等。**结果** 2 个组的注射成功率均为 100%。机器人辅助注射组的平均调针次数为 0(0, 0) 次, 低于手动注射组的 0.2(0, 0.5) 次, 但差异无统计学意义 ( $U=10.000, P=0.317$ ); 机器人辅助注射组平均针尖震颤幅度为  $(5.0 \pm 3.6)$  像素, 显著低于手动注射组的  $(18.4 \pm 6.1)$  像素, 差异有统计学意义 ( $t=6.519, P=0.003$ ); 机器人辅助注射组平均穿刺孔径为  $(51.7 \pm 36.3) \mu\text{m}$ , 小于手动注射组的  $(202.8 \pm 136.4) \mu\text{m}$ , 但差异无统计学意义 ( $t=2.185, P=0.094$ )。机器人辅助注射组的操作时间为  $(8.2 \pm 4.0) \text{min}$ , 长于手动注射组的  $(4.6 \pm 1.9) \text{min}$ , 差异有统计学意义 ( $t=-3.674, P=0.021$ )。实验过程中均未观察到视网膜或脉络膜损伤等相关并发症。**结论** 手术机器人辅助兔眼视网膜下注射提高了注射的稳定性和精准度。

**【关键词】** 机器人辅助手术; 视网膜下注射; 动物实验**基金项目:** 首都卫生发展科研专项 (2020-2-4051)

DOI: 10.3760/cma.j.cn115989-20250415-00122

## Comparison of the efficacy of robotic-assisted subretinal injection and manual injection in rabbit eyes

Xu Jingjing<sup>1</sup>, Chen Lulu<sup>2</sup>, Dai Hong<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Ophthalmic Artificial Intelligence and Robotics Laboratory, Beijing Tiromu Medical Technology Co., Ltd., Beijing 100000, China; <sup>2</sup>Department of Ophthalmology, Peking Union Medical College Hospital, Chinese Academy of Medical Sciences, Beijing 100730, China; <sup>3</sup>Department of Ophthalmology, Beijing Hospital, National Center of Gerontology, Institute of Geriatric Medicine, Chinese Academy of Medical Science, Beijing 100730, China  
Corresponding author: Chen Lulu, Email: chenlulupumch@126.com

**【Abstract】 Objective** To compare the outcomes of robotic-assisted subretinal injection and manual injection in rabbit eyes. **Methods** Five conventional-grade 3~4-month-old New Zealand white rabbits were used as the animal model. The left and right eyes of each rabbit were assigned to the manual injection group and the robot-assisted injection group for subretinal injection surgery. The injection success rate, needle adjustment times, the tremor amplitude of needle tip, puncture hole diameter, complication rate, and surgical time were compared between the two groups. This study complied with the Regulations on the Management of Laboratory Animals, and the study protocol was approved by the Ethics Committee of Medical Services Biotechnology Co., Ltd. (No. MDSW-2024-054A). **Results** The injection success rate was 100% for both groups. The average needle adjustment times were 0(0, 0) in the robot-assisted injection group, which was lower than 0.2(0, 0.5) of the manual injection group, but the difference was not statistically significant ( $U=10.000, P=0.317$ ). The average tremor amplitude of needle tip was  $(5.0 \pm 3.6)$  pixels in the robot-assisted injection group, which was significantly lower than  $(18.4 \pm 6.1)$  pixels in the manual injection group ( $t=6.519, P=0.003$ ). The average puncture hole diameter was  $(51.7 \pm 36.3) \mu\text{m}$  in the robot-assisted injection group, which was lower than  $(202.8 \pm 136.4) \mu\text{m}$  of the manual injection group ( $t=2.185, P=0.094$ ). The operative time was  $(8.2 \pm 4.0)$  minutes in the robot-assisted injection group, which was significantly longer than  $(4.6 \pm 1.9)$  minutes of the manual injection group ( $t=-3.674, P=0.021$ ). No complications such as retinal or choroidal damage were observed during the experiment. **Conclusions** The robotic-assisted subretinal injection improve injection stability and accuracy.

**【Key words】** Robotic-assisted surgery; Subretinal injection; Animal experimentation

**Fund program:** Capital Health Development Research Special Project (2020-2-4051)

DOI: 10.3760/cma.j.cn115989-20250415-00122

视网膜下腔是位于视网膜色素上皮 (retinal pigment epithelium, RPE) 层和神经上皮层之间的潜在腔隙。视网膜下注射是通过 38G 或更细的显微注射针, 将药物直接注入视网膜下腔的给药方式。常规玻璃体腔注射给药方式由于受到内界膜和 Müller 细胞屏障效应的限制, 药物难以有效作用于 RPE 细胞和感光细胞, 从而影响治疗效果<sup>[1]</sup>。与玻璃体腔注射给药相比, 视网膜下注射可使药物直接作用于神经上皮层和 RPE 层, 提高了药物递送效率并有效减轻机体的免疫反应。然而, 视网膜下注射也存在一些操作难点。视网膜平均厚度仅 200~300  $\mu\text{m}$ , 神经上皮层和 RPE 层之间贴合紧密, 因此将微针准确插入视网膜下腔, 对术者的手部稳定性和操作精准性提出了极高的要求。既往研究显示, 玻璃体视网膜手术医生手部的平均震颤幅度可达 144~285  $\mu\text{m}$ <sup>[2]</sup>, 稍有不慎就可能损伤 RPE 层及脉络膜层, 进而引发玻璃体积血、脉络膜损伤、视网膜脱离等并发症。

手术机器人的出现为提高视网膜下注射的精准度、稳定性和安全性带来了希望。相对于医生手动操作, 眼科手术机器人可显著提高注射定位精度, 降低手术器械的震颤幅度, 从而减轻穿刺、注药、退针等手术操作过程中的视网膜损伤<sup>[3-5]</sup>。

目前, 国内关于手术机器人与手动视网膜下注射的对比研究较少, 且多数手术机器人尚处于实验室研发阶段, 未获上市许可。本研究对一款拟上市的手术机器人进行性能评估, 通过动物实验比较其辅助视网膜下注射与手动注射的效果, 以期为该设备后续临床试验提供参考依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

**1.1.1 实验动物** 普通级 3~4 月龄新西兰大白兔 5 只, 购自北京迈迪思维生物技术有限公司 [许可证号: SYXK(京)2021-0024], 饲养温度为 16~26  $^{\circ}\text{C}$ , 日温差  $\leq 4^{\circ}\text{C}$ , 相对湿度为 40%~70%, 人工照明维持 12 h 明/12 h 暗周期, 自由摄食饮水, 饲养条件符合医学实验动物饲养要求。本研究遵循《实验动物管理条例》(2017 修订版) 规定, 研究方案经北京迈迪思维生物技术有限公司伦理委员会批准 (批文号: MDSW-2024-054A)。

**1.1.2 主要试剂及仪器** 盐酸替来他明-盐酸唑拉

西洋注射液 (法国维克宠物保健公司 Virbac); 0.5% 荧光素钠注射液 [爱尔康 (中国) 眼科产品有限公司]。眼底注射手术机器人 (TM-YK-002, 北京瞳沐医疗科技有限公司); 巩膜穿刺套管针 (Trocarn)、硅油管、玻璃体切割机 (Constellation, 美国爱尔康公司); 38G 显微注射针、微量注射器 (美国 MedOne Surgical 公司); 光学相干断层扫描 (optical coherence tomography, OCT) 仪 [BM-400K, 图湃 (天津) 医疗科技有限公司]。

**1.1.3 眼底注射手术机器人系统** 北京瞳沐医疗科技有限公司自主研发和生产的眼底注射手术机器人 (TM-YK-002) 是基于主从式控制协作的视网膜下注射手术系统。该系统通过建立主手与机械臂之间的运动映射关系来实现辅助注射功能。手术医生通过手持主手控制笔来操作机械臂, 机械臂夹持注射系统自巩膜切口位置进入眼球内, 围绕远心不动点 (remote center of motion, RCM) 运动来实施眼底手术操作, 有效解决眼内操作时的定位准确性和器械稳定性等问题。

手术机器人由多个关键部分组成, 包括主手、机械臂、夹持系统、升降系统、控制系统台车等 (图 1)。主手具备震颤过滤、运动缩放、离合控制等功能, 手术医生通过操控主手控制笔来精确控制机械臂的运动, 可有效提升手术的微操能力和安全性。机械臂具有 6 个自由度, 包括上下、左右、前后 3 个自由度, 以及进退针、旋转偏摆、俯仰偏摆 3 个自由度 (图 2), RCM 设计可保证针尖在眼内运动时, 针头穿刺巩膜切口的位点保持固定, 从而避免眼球损伤。通过精密运动算法, 手术机器人能够精准控制针尖的细微移动, 可实现 5  $\mu\text{m}$  的高精度操作, 降低因手部震颤等因素导致的并发症风险。

### 1.2 方法

**1.2.1 实验分组** 每只实验兔的左右眼分别作为手动注射组和机器人辅助注射组, 2 个组手术交替进行。机器人辅助注射组 (右眼) 采用手术机器人辅助视网膜下注射, 手动注射组 (左眼) 采用手动视网膜下注射。手术由同一位具备 10 年以上临床经验的眼科副主任医师完成。

**1.2.2 手术操作步骤** 采用注射用盐酸替来他明和盐酸唑拉西洋麻醉剂 (5 ml/kg) 于实验兔股四头肌处进行肌内注射麻醉, 固定在操作台上进行眼部消毒铺巾; 标记角膜缘后 4 mm 位置, 在 10:00~11:00 间插入巩膜穿刺套管针; 连接推注系统, 依次连接 38G 显微

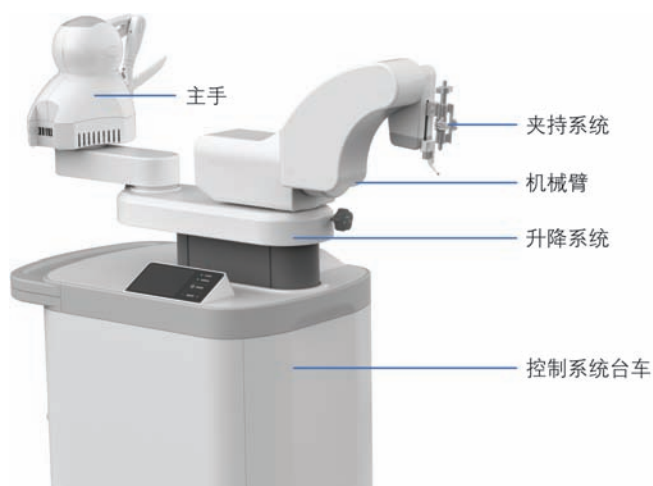


图 1 手术机器人外观

Figure 1 Appearance of the surgical robot

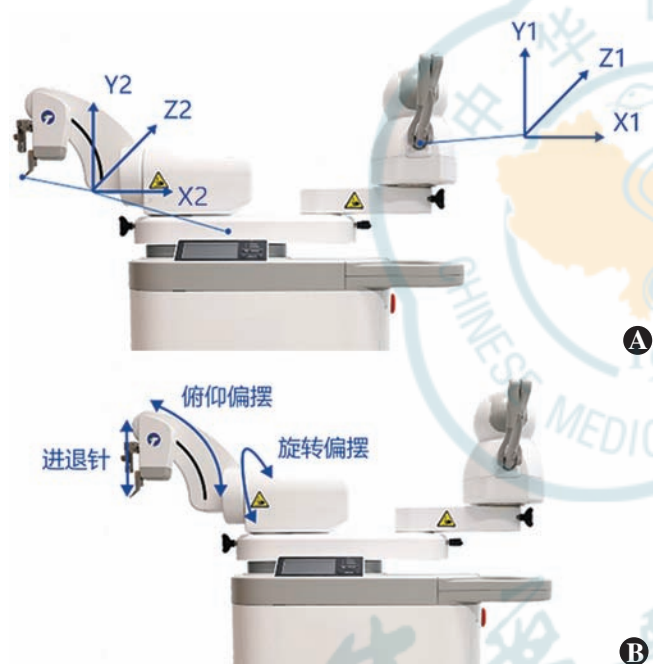


图 2 机械臂自由度示意图 A: 上下、左右、前后自由度 B: 进退针、旋转偏摆、俯仰偏摆自由度

Figure 2 Schematic diagram of degrees of freedom of the robotic arm A: Up and down, left and right, front and back degrees of freedom B: Advancing and retreating needles, rotating and tilting, and pitching and tilting degrees of freedom

注射针、微量注射器、硅油管和玻璃体切割机。手动注射组通过手动操作,机器人辅助注射组通过操控手术机器人,将 38G 显微注射针通过 Trocar 插入玻璃体腔,在显微镜直视下将注射针头插入视网膜下(图 3A、3B);将玻璃体切割机调至硅油注入模式,压力控制在 6~10 psi,向视网膜下注入 100~200  $\mu$ l 0.5% 荧光素钠注射液,观察溶液是否进入视网膜下腔;沿原路径撤出 38G 显微注射针,关闭巩膜切口。术后采用 OCT 设备以注射点为中心进行 6 mm $\times$ 6 mm 线状扫描,观察视

网膜隆起情况、有视网膜损伤,并测量穿刺孔径大小。

**1.2.3 观察指标及检测** (1)注射是否成功 注射成功定义为在手术显微镜下观察到目标区域视网膜神经上皮层隆起且术后 OCT 检查显示视网膜神经上皮层和 RPE 分离。(2)调针次数 记录在手术过程中由于针尖深度等未达到理想注射位置需退出视网膜后再次穿刺的次数。(3)针尖震颤幅度 通过 Kinovea 软件追踪注射时针尖的运动轨迹(图 3C、3D),计算针尖位移的绝对值,即震颤幅度。(4)穿刺孔径大小 连续对比多个层面的 OCT 图像,选取视网膜穿刺孔最大截面,采用 OCT 内置测量工具测量穿刺孔径,测量 3 次,取平均值。(5)术中并发症发生率 通过术中实时录像及 OCT B 扫描图像判断是否存在视网膜出血、RPE 损伤、脉络膜损伤等医源性损伤。(6)操作时间 记录从微针进入眼球到撤出眼球的时间。

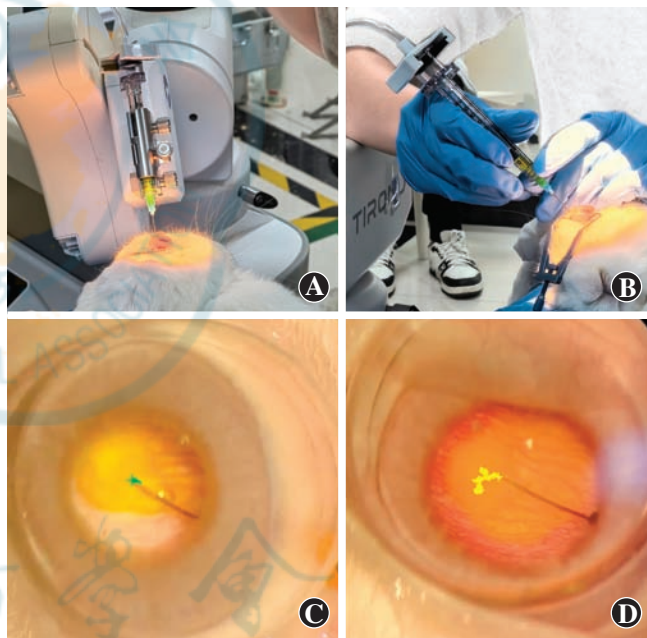


图 3 各组手术操作对比 A: 机器人辅助注射 B: 手动注射 C: 机器人辅助注射过程中针尖运动轨迹(绿色) D: 手动注射过程中针尖运动轨迹(黄色)

Figure 3 Operation in the robot-assisted injection group and manual injection group A: Robot-assisted injection B: Manual injection C: Needle tip trajectory (green) during robot-assisted injection D: Needle tip trajectory (yellow) during manual injection

### 1.3 统计学方法

采用 SPSS 25.0 统计学软件进行统计分析。计量资料数据经 Shapiro-Wilk 检验,证实符合正态分布者以  $\bar{x} \pm s$  表示,组间比较采用配对  $t$  检验;不符合正态分布者以  $M(Q_1, Q_3)$  表示,组间比较采用 Mann-Whitney  $U$  检验。采用 Pearson 相关检验分析针尖震颤幅度与穿刺孔径的相关性。采用双尾检验,  $P < 0.05$  为差异有统计学意义。



## 2 结果

### 2.1 各组观察指标比较

2 个组注射成功率均为 100%。机器人辅助注射组调针次数为 0(0,0) 次, 小于手动注射组的 0.2(0, 0.5) 次, 但差异无统计学意义 ( $U = 10.000, P = 0.317$ )。机器人辅助注射组针尖震颤幅度为  $(5.0 \pm 3.6)$  像素, 明显低于手动注射组的  $(18.4 \pm 6.1)$  像素, 差异有统计学意义 ( $t = 6.519, P = 0.003$ ) (图 4)。

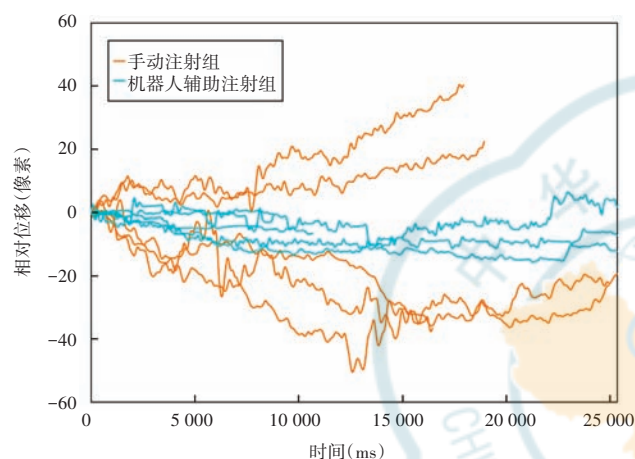


图 4 注射过程针尖运动轨迹分析

Figure 4 Analysis of needle tip trajectory during injection

机器人辅助注射组的视网膜穿刺孔径为  $(51.7 \pm 36.3) \mu\text{m}$ , 明显小于手动注射组的  $(202.8 \pm 136.4) \mu\text{m}$ , 但差异无统计学意义 ( $t = 2.185, P = 0.094$ ) (图 5)。针尖震颤幅度与穿刺孔径呈明显正相关 ( $r = 0.793, P = 0.006$ ) (图 6)。

### 2.2 各组操作时间及术中并发症发生情况比较

机器人辅助注射组操作时间为  $(8.2 \pm 4.0) \text{ min}$ , 明显长于手动注射组的  $(4.6 \pm 1.9) \text{ min}$ , 差异有统计学意义 ( $t = -3.674, P = 0.021$ )。2 个组术中均未出现视网膜及脉络膜损伤等并发症。

## 3 讨论

机器人辅助视网膜下注射手术已在国内外开展多项研究。2010 年, 美国霍普金斯大学研发的稳定手眼机器人具备微力感知和手部震颤过滤等功能, 支持医生直接握持机器人末端的手术器械进行手术操作<sup>[6]</sup>。2016 年, 比利时鲁汶大学研制的主从式眼科手术机器人辅助医生成功完成了视网膜静脉穿刺术, 直接将溶栓药物注入视网膜静脉中<sup>[7]</sup>。2022 年, 英国牛津大学进行的一项涉及 12 例黄斑下出血患者的随机对照临

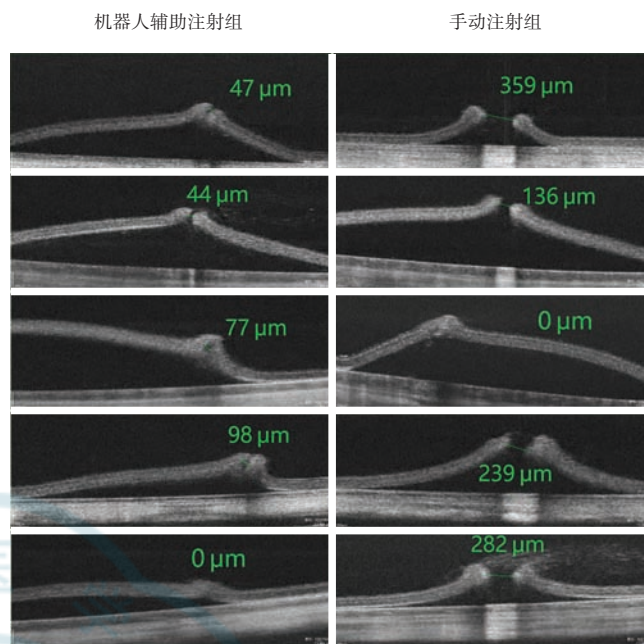


图 5 各组术后穿刺孔最大截面 OCT 图 OCT: 光学相干断层扫描

Figure 5 OCT images with maximum cross-sectional puncture hole in each group OCT: optical coherence tomography

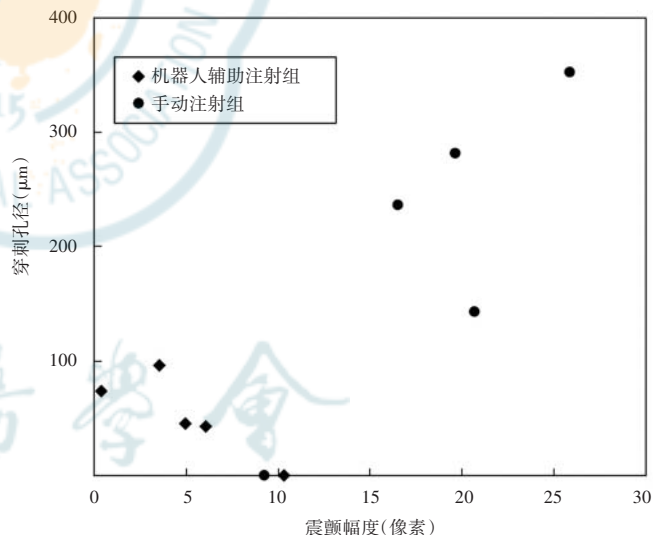


图 6 震颤幅度与穿刺孔径相关性散点图  $r = 0.793, P = 0.006$  (Pearson 相关分析,  $n = 10$ )

Figure 6 Scatter plot of the correlation between tremor amplitude and puncture hole diameter  $r = 0.793, P = 0.006$  (Pearson correlation analysis,  $n = 10$ )

床试验表明, 高精度机器人辅助视网膜下注射具备临床可行性及安全性<sup>[8]</sup>。2025 年, 美国犹他大学研发了一种头戴式手术机器人, 在该手术机器人的辅助下, 可减少头部运动对手术操作的影响, 进一步提高了视网膜下注射的稳定性和精准度<sup>[9]</sup>。在国内, 2022 年北京航空航天大学杨洋教授团队研发了一种基于主从式机

器人的视网膜下注射系统,通过离体猪眼的视网膜下注射实验验证了其操作的精确性和位置维持能力<sup>[10]</sup>。2023 年,沈丽君教授团队使用国内研发的眼科手术机器人,在浙江省人民医院完成了首例黄斑下出血的视网膜下注射手术,取得了良好的手术效果<sup>[11]</sup>。同年,中山大学中山眼科中心林浩添教授团队联合中山大学计算机学院黄凯教授团队研发的“5G 远程微米级眼科手术机器人”在海南省眼科医院成功实施了全球首例 5G 远程视网膜下注射手术,拓展了手术机器人的临床应用场景。

本研究验证了手术机器人辅助视网膜下注射在兔眼中的安全性和有效性,结果显示手动注射组和机器人辅助注射组的注射成功率均为 100%,且术中均未见并发症。视网膜下注射对医生手部的稳定性要求极高,术中震颤易导致医源性损伤。手术机器人的主从控制系统和精密运动算法可使针尖运动更加稳定、精准,从而能够更准确地将药物注入视网膜下腔。本研究采用 Kinovea 软件分析手术机器人辅助与手动操作在视网膜下注射过程中的震颤幅度,发现机器人辅助视网膜下注射可以显著降低手部震颤幅度,使手术操作更加稳定精准。

本研究结果表明,针尖的震颤幅度与视网膜穿刺孔径存在较强的相关性。本研究中 2 个组穿刺孔径比较差异无统计学意义,这可能与样本量较小有关;但机器人辅助注射组的穿刺孔径分布较为均匀,平均穿刺孔径较小,而手动注射组的穿刺孔径分布较为离散。穿刺孔径的减小有助于防止注射液外溢。本研究验证了机器人辅助操作能够提高手术稳定性,避免因手部震颤导致的视网膜穿刺孔扩大,从而减少视网膜脱离等手术并发症的发生。

本研究中,手术机器人辅助注射的操作时间较手动注射稍有延长。这可能是由于医生在初期操作手术机器人的过程中需要学习和适应,进行更多的设备调整和校准操作。人眼手术时,除视网膜下注射步骤外,还可能包含玻璃体切割、气液交换等复杂手术步骤,平均操作时间更长,手术机器人对完整手术时长的影响有待进一步探讨。手术时间的延长可能会增加患者的不适感和手术风险,随着医生对设备熟悉程度的增加、手术机器人操作流程的优化,手术时间有望进一步缩短。

视网膜下注射手术常用于组织型纤溶酶原激活物注射、基因治疗、细胞治疗等领域。随着基因治疗和细胞治疗在眼科疾病中的应用逐渐增多,机器人辅助视网膜下注射手术可能逐步扩大应用场景。手术机器人

不仅可以应用于视网膜下注射,还可以拓展到其他眼科手术领域,如血管内注射、白内障手术、玻璃体切割手术等,复杂手术在机器人辅助下的安全性已显著提升。2015 年起,达芬奇手术机器人在眼科先后应用于翼状胬肉切除手术、角膜移植术和白内障手术<sup>[12-14]</sup>。2018 年,荷兰埃因霍温大学与 Preceyes BV 公司研发的 Preceyes 手术系统在英国牛津大学附属眼科医院完成了全球首批机器人辅助视网膜手术的临床试验,其在黄斑裂孔患者剥膜手术中展现出良好的稳定性和精准性,并于 2019 年获得欧盟 CE 认证<sup>[15]</sup>。这表明了手术机器人在眼科手术领域中具有广泛的应用前景和巨大的发展潜力。

国家卫生健康委员会《“十四五”全国眼健康规划》指出,全国眼科执业医师约 5 万人,其中眼底专科医生仅数千人。手术机器人的使用能够规范手术操作流程,减少人为因素导致的手术差异,有助于提高手术的可重复性和标准化程度,进一步提升眼科手术的整体质量,同时也为眼科手术培训提供了新工具,可帮助年轻医生更快掌握高难度手术技巧,为眼科人才培养提供支持。

本研究仍存在一定不足:(1)纳入实验动物样本量较小,可能在一定程度上限制了研究结果的普适性。(2)由于缺少术中 OCT 等设备,手术操作的精准性未达到最优水平。结合术中 OCT 的手术机器人注射系统能够实现更加精准的手术操作,进一步提高手术的安全性和有效性,有望成为未来眼科手术的重要发展方向。(3)未对不同注射部位进行分析。在实际操作中,围绕 RCM 进行注射操作时,不同区域的注射难易程度可能存在差异,需进行进一步验证。

综上所述,在动物实验中,与手动注射相比,手术机器人辅助注射具有更高的稳定性和精准度,能够显著降低针尖的震颤幅度和减少视网膜损伤,提高注射安全性;但机器人辅助注射较手动注射操作时间稍有延长;未来若能联合术中 OCT 及 3D 导航技术,可进一步提升手术效率及精准度。未来,手术机器人有望在更多眼科手术领域推广应用,为眼科疾病的治疗提供更精准、更安全的解决方案,推动眼科手术技术的创新和规范化。

**利益冲突** 本研究所使用的手术机器人、手术显微镜、玻璃体切割一体机、OCT 仪等,均由北京瞳沐医疗科技有限公司提供。除此之外,无其他商业机构为本研究提供支持。在研究过程中,所有作者均遵循学术规范,未出现任何有可能干扰研究结果公正性的行为。

**作者贡献声明** 许晶晶:数据采集、文章起草;陈露璐:实验设计与实施、统计分析、论文修改及定稿;戴虹:实验设计、文章审阅

## 参考文献

- [1] Peng Y, Tang L, Zhou Y. Subretinal injection: a review on the novel route of therapeutic delivery for vitreoretinal diseases[J]. Ophthalmic Res, 2017, 58(4): 217-226. DOI: 10.1159/000479157.
- [2] Wells TS, Yang S, MacLachlan RA, et al. Comparison of baseline tremor under various microsurgical conditions[J]. Conf Proc IEEE Int Conf Syst Man Cybern, 2013: 1482-1487. DOI: 10.1109/SMC.2013.256.
- [3] 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. DOI: 10.13973/j.cnki.robot.180292.  
He CY, Yang Y, Liang QF, et al. Applications and research progress of robot assisted eye surgery[J]. ROBOT, 2019, 41(2): 265-275. DOI: 10.13973/j.cnki.robot.180292.
- [4] Yang K, Jin X, Wang Z, et al. Robot-assisted subretinal injection system: development and preliminary verification [J]. BMC Ophthalmol, 2022, 22(1): 484. DOI: 10.1186/s12886-022-02720-4.
- [5] 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. DOI: 10.3760/cma.j.issn.2095-0160.2018.04.017.  
Su LY, Chen YQ, Shen LJ. Research progress of the robot-assisted ophthalmology surgery[J]. Chin J Exp Ophthalmol, 2018, 36(4): 311-316. DOI: 10.3760/cma.j.issn.2095-0160.2018.04.017.
- [6] 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.
- [7] Gijbels A, Smits J, Schoevaerdts L, et al. In-human robot-assisted retinal vein cannulation, a world first[J]. Ann Biomed Eng, 2018, 46(10): 1676-1685. DOI: 10.1007/s10439-018-2053-3.
- [8] Cehajic-Kapetanovic J, Xue K, Edwards TL, et al. First-in-human robot-assisted subretinal drug delivery under local anesthesia[J]. Am J Ophthalmol, 2022, 237: 104-113. DOI: 10.1016/j.ajo.2021.11.011.
- [9] Posselli NR, Hwang ES, Olson ZJ, et al. Head-mounted surgical robots are an enabling technology for subretinal injections [J]. Sci Robot, 2025, 10(99): eadp7700. DOI: 10.1126/scirobotics.adp7700.
- [10] 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. DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2021.0667.  
Wang CD, Guang CH, Wang LQ, et al. Design and implementation of robot-assisted subretinal injection system[J]. Chin J Aeronaut, 2023, 49(9): 2406-2414. DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2021.0667.
- [11] 陈亦棋, 叶昕, 陈焕, 等. 眼科手术机器人辅助视网膜穿刺注药术治疗息肉状脉络膜血管病变所致黄斑下出血 1 例[J]. 中华眼科杂志, 2024, 60(7): 618-622. DOI: 10.3760/cma.j.cn112142-20240102-00001.  
Chen YQ, Ye X, Chen H, et al. Ophthalmic surgical robot-assisted retinal puncture and injection for submacular hemorrhage caused by polypoid choroidal vasculopathy: a case report[J]. Chin J Ophthalmol, 2024, 60(7): 618-622. DOI: 10.3760/cma.j.cn112142-20240102-00001.
- [12] 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.
- [13] Chammas J, Sauer A, Pizzuto J, et al. Da Vinci Xi robot-assisted penetrating keratoplasty[J]. Transl Vis Sci Technol, 2017, 6(3): 21. DOI: 10.1167/tvst.6.3.21.
- [14] 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.
- [15] Edwards TL, Xue K, Meenink H, et al. First-in-human study of the safety and viability of intraocular robotic surgery[J]. Nat Biomed Eng, 2018, 2: 649-656. DOI: 10.1038/s41551-018-0248-4.

(收稿日期: 2025-06-13 修回日期: 2025-12-12)

(本文编辑: 张宇)

读者·作者·编者

## 本刊对基金项目的证明和著录要求

文稿所涉及的课题如为国家级、部级、省级等基金资助项目,请分别用中英文表述并分别列于文章中英文摘要关键词之下,“基金项目:”进行标识,并注明基金项目名称,并在圆括号内注明基金项目编号。基金项目名称应按国家有关部门规定的正式名称填写,多个基金资助的项目请全部列出,按资助机构的等级顺序排列,并以“;”隔开。如:基金项目:国家自然科学基金(30271269);国家重点基础研究发展规划(973计划)项目(2013CB532002);Fund program: National Natural Science Foundation of China(30271269); National Key Basic Research Program of China(973 Program)(2013CB532002)。获得基金项目资助的论文投稿时请提供基金项目资助证明的复印件或扫描后发至编辑部信箱。

## 本刊对来稿中电子版图片的要求

自我刊开通网上投稿以来,作者均采用将 Word 文档从网上在线投稿的方式,但部分来稿中所包含的图片像素较低,这些图片便于网上审稿,并不能用于制版印刷。因为显示器与彩印纸品的色彩形成截然不同,显示器应用红、绿、蓝的三原色原理发射光线形成图像,这种色彩形成的原理被称为 RGB 模式;而彩色印刷品是青、品红、黄、黑四色油墨印制在纸制品上来形成彩色图像,这种原理被称为 CMYK 模式。那些在显示器上看起来比较清晰但分辨率较低的图片在实际印刷时不能转换为高质量 CMYK 模式的图片。为了保证论文的刊出质量及本刊的印刷出版质量,如果作者的来稿中附有组织病理图、免疫荧光染色图、免疫组织化学图、细胞图,请作者将原图保存为 TIFF 格式或 JPG 格式,图片的分辨率至少 300 dpi。

(本刊编辑部)

