DOI: 10.3901/JME.2013.01.015

眼科显微手术机器人研究进展及关键技术分析*

肖晶晶 杨 洋 李大寨 黄 龙 张雷雨
(北京航空航天大学机械工程及自动化学院 北京 100191)

摘要: 部分眼科手术由于人类生理颤抖及精细操作限度,手术成功率较低,成功完成手术任务必须融合机器人技术。为促进我国眼科机器人技术的研究和发展,在论述眼科机器人研究意义的基础上,总结国内外眼科手术机器人的研究进展。对研究眼科机器人所涉及的机器人机构设计、微力感知与控制、眼组织的生物力学建模、约束空间运动规划、精密运动控制等关键技术进行了详尽的分析。在总结角膜移植手术机器人研究成果及分析眼内手术机器人关键技术的基础上,指出今后的发展方向、研究思路和面临的挑战,包括末端操作器的集成、新型手术器械的开发等,阐述将眼科手术辅助机器人应用于临床仍需解决的问题。对于医疗外科机器人及相关的研究工作,具有一定的指导意义。

关键词: 眼科手术机器人 远程运动中心点机构 微力控制 约束运动规划 生物力学建模

中图分类号: TP24

Advances and Key Techniques of Ophthalmic Microsurgical Robots

XIAO Jingjing YANG Yang LI Dazhai HUANG Long ZHANG Leiyu
(School of Mechanical Engineering and Automation, Beihang University, Beijing 100191)

Abstract: The successful rate of some ophthalmic surgery is extremely low due to the tremor and delicate manipulation limit of surgeons. Robotic technique must be introduced to make the surgery successful. In order to promote the research and development of ophthalmic microsurgical robots in China, the development and application of ophthalmic microsurgical robots, at home and abroad and such key techniques as robot prototype design, micro-force sense and control, biomechanics modeling of ocular tissue, constrained space motion plan and precision motion control, are reviewed after the significance of ophthalmic robot research has been discussed. On the basis of the summary results of corneal grafting robot and key techniques analysis of intraocular microsurgical robot, the trend of future development, research approach and challenges as the integration of end effectors and development of novel surgical instruments are proposed as well. The unsolved problems for clinical application of ophthalmic robot are discussed. The introduction is instructive for surgical robots and some related research in this field.

Key words: Ophthalmic surgical robot Remote center of motion mechanism Micro-force control Constrained motion plan Biomechanics modeling

0 前言

眼科显微手术在临床上对医生的技术水平有相当高的要求。在现代眼科手术中,显微手术技术已经在角膜移植术、玻璃体切割术、视网膜手术得到广泛的应用,大大促进了眼科显微手术的发展。但是,在眼科手术尤其是眼内手术操作中主要面临以下几个问题:① 手术分辨率及操作精细度要求

高;② 器械通过巩膜刺入点进行操作的手术空间小;③ 手术操作环境的可视性差;④ 由于医生手工操作过程中生理上的颤抖,手术时间长,手术成功率低。因此,利用机器人运动精度高、稳定性好的特点辅助或代替医生进行手术,可以很好地解决以上问题。

1 研究意义

眼科显微手术机器人融合了机器人技术、显微外科技术、生物力学等多种学科,能够帮助或者代

* 国家自然科学基金资助项目(50675008, 51175013)。20120328收到初稿,20121008收到修改稿

替医生完成手工操作等常规方法和医疗设备难以完成的复杂诊断和手术操作,拓展了医生的手术技能。它的出现满足了现代人们对高水平医疗条件的需求,是社会发展的必然趋势。

1.1 手术方式的改进

首先,机器人辅助眼科手术可以为主刀医生提供高清晰、立体的手术视野,可以使医生更清晰准确地进行组织定位和器械操作。其次,仿真手腕手术器械能深入到人手不能触及的狭小空间完成精细手术操作,提高手术精度。另外,机器人眼科手术的微创性使得病人从这种新的手术方式中受益颇多:切口变小、康复时间缩短、手术效果更好等。不仅如此,在达芬奇外科手术机器人系统中^[1],控制模块和机械臂模块分开配置,也为实现远程眼科手术提供了可能,可使远在异地的急性眼疾患者也能及时得到救治。

1.2 临床上的需求

眼科手术对医生操作熟练度的要求很高。如在眼角膜板层移植手术中,缝合深度感知与缝线张力控制完全依靠医生的手术经验,上述因素与医生的疲劳程度在绝大部分程度上决定了手术效果。

据报道^[2],浙江眼科医院率先完成了活体动物眼内视网膜静脉血管搭桥术。手术表明活体动物眼内人工角膜镜下视网膜血管搭桥手术具有可行性。但由于人类生理颤抖及精细操作限度,手术成功率较低,将其应用于临床必须融合机器人技术。因此,研究者基于多年来角膜机器人的研究成果,更深入地开展眼科辅助机器人关键技术的研究,可以为广大眼科病患者恢复光明带来希望,为进一步促进我国眼科医疗机器人技术的研究和发展做出贡献。

1.3 解决眼科手术教学与训练问题

仅仅依靠训练项目实习人员难以学到非常全面的手术经验,导致高水平眼科医务人员的缺乏。目前眼科手术技能培训主要在猪眼球及计算机手术模拟软件上进行,眼科手术机器人的引入为眼科手术教学与训练提供了一种全新的辅助教学方式。另一方面,随着传感器技术的高速发展,临床研究中不仅可以采用最新研发的手术器械运动传感器对眼科医生的手术技能进行评估,也可通过传感器的监测手段对实习医生进行培训。因此,眼科辅助机器人的出现为实习眼科医生提供了高仿真虚拟环境下的动手机会,为眼科医务人员整体技能和临床经验的提升提供了良好的发展平台。

2 眼科手术机器人的发展历程

国外对眼科手术机器人的研究主要涵盖两个

方面。一方面的研究主要针对医生操作时的生理颤抖而开发的便携式抖动抑制装置。ANG等^[3]根据零相位的陷波滤波器对颤抖进行建模和滤波,根据逆运动学求解方法,开发了能够进行自动实时颤抖补偿的智能显微手术器械;CHOI等^[4]通过传感器测量及视觉增强方法,开发了消除震颤的手持显微器械;TAN等^[5]开发了一个3自由度低成本的手持显微手术器械,能实现方均根值为 $7\text{ }\mu\text{m}$ 的定位精度。便携式抖动抑制装置提高了手术精确性,但装置的体积和重量制约了其实用性,医生手术强度仍然很大。因此,基于临床上的需求,多年来很多学者在眼科显微手术辅助机器人系统开发方面也做了不懈的努力。

法国学者 GUERROUAD 等^[6]研究开发了第一个眼科机器人 SMOS,该机器人具有圆弧形轨道的球面机构,主要用于眼科玻璃体摘除术、角膜的钻切术及整容术。图1所示为眼科手术辅助机器人。YU等^[7]开发了一个与SMOS类似的用于血管药物注射的球形机械手(图1a),实现了视网膜显微血管插管术。CHARLES等^[8]开发出一款高精度、线驱动的主从式遥操作机器人系统 RAMS(图1b),具有颤抖过滤、力反馈放大、约束运动可编程的功能。WEI等^[9]提出了一种配有眼内灵巧操作器的双臂机器人(图1c),每个机械臂由2自由度的眼内灵巧操作器和6自由度的并联机器人组成,采用预成型镍钛管来完成眼内的精细操作。另外,日本学者开发了眼内机器人原理样机(图1d),证明了机器人辅助眼后节手术的可行性^[10]。所设计的机械臂由两个环形轨道和一个可插入/抽出的平动轴组成,能够实现包括 OXY 平面运动、双向摆动及沿 Z 轴运动的5个自由度。但是,其与法国学者开发的机器人存在类似的问题:体积较大,难以同时在眼部实施多个手术操作。多年来,约翰霍普金斯大学对显微外科辅助机器人系统进行了大量的研究^[11],开发的新一代稳定手(图1e)通过双平行四边形机构实现真正的

图1 眼科手术辅助机器人

远程运动中心点(Remote center of motion, RCM)机构, 避免了早期设计中通过 XYZ 三轴联动实现虚拟 RCM 所带来的不稳定问题。

在国内, 在国家自然科学基金、“863 计划”支持下, 北京航空航天大学率先开发了角膜移植手术辅助机器人系统(图 1f), 研制了缝合打结机器人样机及微尺度缝针、缝线夹持器, 并在活体兔眼球及离体猪眼球上进行了角膜缝合、打结试验^[12]。

3 眼科手术机器人的关键技术分析

眼科显微手术机器人的研究涉及众多领域的知识, 其关键技术主要融合了以下几个方面。

3.1 眼科机器人的机构设计

工欲善其事, 必先利其器。为了实现高难度的精细手术操作, 所设计的机器人机构必须能够实现精巧灵活的动作。眼科机器人的机构设计主要包括机器人本体及末端操作器两个方面, 机器人本体包括机械手臂和手腕, 实现位置调整和姿态调整, 末端操作器完成特定的手术任务和精密定位。

3.1.1 机器人本体构型

机器人本体采用何种构型, 主要取决于手术任务的具体需求。如在角膜移植手术中, 为了完成钻切病变角膜、角膜植片缝合与缝线打结的手术任务, 北京航空航天大学研究者选用多关节型以及直角坐标型与关节型相结合的机器人构型^[12], 使机器人获得了足够大的工作空间; 为了实现高精度 $20 \sim 130 \mu\text{m}$ 的定位操作, 美国西北大学的研究人员采用了并联六杆机构^[13], 完成了采集猫眼球视网膜血液样本的手术任务; 而在眼内微创手术中, 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。研究学者称这一旋转点为 RCM 或不动点。RCM 的实现是眼内手术辅助机器人本体构型的关键问题。

LOCKE 等^[14]总结出 3 种产生 RCM 的方法: ① 采用机械约束下的运动机构来实现(Da Vinci 机器人), 这种机构刚度高, 安全性好, 但较为庞大, 适应性差; ② 被动式 RCM(Aesop 机器人), 平行四边形机构的设计使其安全性得到了保证, 但却降低了运动精度和刚度; ③ 主动式 RCM, 由机器人通过软件算法来实现, 这种方式的可靠性较低。然而, 由于在保证高刚度的同时降低了成本, 此方式在安全需求不高的场合具有很大的优势。

综合以上三种方法来看, 方法①实现起来最为容易, 安全性最好。具体地, 机械约束下能够实现 RCM 的运动机构包括以下几种。

(1) 球形机构(图 2a)。球心即为 RCM, 从结构上讲, 球形机构的刚度和稳定性相对较低, 尤其是运动学比较复杂。

(2) 圆弧轨道机构(图 2b)。圆弧轨道的圆心即为 RCM。但是, 圆弧轨道的驱动问题不易解决。如果把驱动装置放置于轨道上, 势必增加机构的总体质量, 会影响机构的刚度和稳定性; 若把驱动机构放置在机构一侧的手术平台上, 就需要增加其他机构来实现动力传动, 传动结构设计难度进一步加大。因此, 圆弧机构也比较复杂。

(3) 轴驱动机构(图 2c)。只要使体壁切口位于转动轴的轴线上, 该机构就具有远程运动中心。

(4) 双平行四杆机构(图 2d)。两个转动轴的轴线交点即为 RCM。

图2 机械约束下的 RCM 机构

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。

3.1.2 末端操作器

末端操作器包括末端执行器与末端手术器械操作器。

末端执行器属于新型手术工具, 能够取代传统手术工具完成更加精巧的手术操作。在北京航空航天大学开发的角膜移植手术机器人中, 末端执行器包括末端环钻(图 3a)、缝针夹持器(图 3b)与缝线夹持器(图 3c), 直接用来完成如钻切、夹持缝针进行角膜缝合、夹持缝线进行打结的手术操作。在国外, ISHII 等^[15]开发了双螺旋驱动弯折机构手术操作镊(图 3d), 可实现器械两个方向的弯折。MIYATA 等^[16]针对神经外科手术设计制作了手术操作镊(图 3e), 其弯折动作通过圆柱凸轮机构来实现, 前后动作通过齿轮—齿条实现, 镊子的开合采用线驱动方式。针对眼内手术, IKUTA 等^[17]设计了一种手

图 3 末端执行器

持式手术镊, 该手术镊带有一个主动关节和光纤视镜, 提供了较高的眼内灵活度和可视化效果, 可以弥补眼内手术缺乏灵活性的不足。

末端手术器械操作器通过操纵专用的眼内手术器械(比如眼内镊、持针器、吸管、微剪刀等), 实现模拟医生双手并使精度与灵巧度大幅提高的精细手术操作。不同的手术任务与不同的手术器械要求末端操作器具有不同的功能。如在眼内手术中, 眼内镊操作器需要具有 5 自由度(图 4): 镊子绕自身轴线的转动、沿刺入方向的前后移动、绕刺入点的两个弯折动作及器械头部的开合动作。

图 4 眼内镊的自由度

在相关的研究中, SUZUKI 等^[18]采用摩擦轮和万向节机构设计了针对腹腔镜手术的 4 自由度手术镊操作器(图 5a)。SCHENA 等^[19]针对微创手术, 开发了带有紧凑性驱动的能够实现远程运动中心的手术器械操作器(图 5b), 该操作器采用轴驱动加双平行丝杠机构, 但锥齿轮传动有齿侧间隙, 影响传动精度。

图 5 末端手术器械操作器

眼睛是人体的精密器官, 末端操作器的操作精度是影响手术效果的重要因素。结合机器人本体如

何设计满足自由度需求与精度要求的末端操作器是设计人员面临的重要挑战。

3.2 微力感知与控制

眼科显微手术涉及到薄壁与血管的复杂操作, 手术工具与组织的接触力绝大部分已经超出医生手工操作的感知能力, 医生在手术过程中绝大部分程度上依靠视觉信息进行操作, 影响了手术效果。因此, 微力检测与控制也是显微眼科手术机器人的研究热点之一。

在眼外板层角膜移植手术中, 胡一达等^[20]通过自主研发开发的末端环钻钻切角膜, 对钻切力进行了测量(均值 670 mN), 这一力感知信息显著地提高了机器人完成角膜钻切操作的准确性; 随后, YANG 等^[21]设计了配有六维力传感器 NANO17 的缝针夹持器, 夹持缝针进行角膜缝合操作, 进一步测量了角膜缝合过程中缝针从角膜表面穿破刺入点的刺入力(均值 209 mN)与缝针从角膜组织内穿破刺出点的刺出力(均值 2 019 mN), 研究发现机器人缝合力数据曲线的平滑性优于人工缝合的情况。因此, 角膜移植手术机器人中引入力传感器监测力信息, 可以提高手术操作的精度。

在眼内显微外科手术中, 大部分手术作用力都低于 7.5 mN, 而医生所能感知出的只占其中的 1/5^[22]。BERKELMAN 等^[23]在外科手术中应用末端微力传感器, 协同控制机器人与器械以及生物组织与器械之间的作用力。为了解决由于力传感器体积过于庞大而无法整合到眼内手术器械中的问题, SUN 等^[24]在手术器械轴内引入 160 μm 的光纤光栅力传感器检测手术器械末端的力。

机器人微力控制上可以采用阻抗控制、混合控制、自适应力控制和显式力控制等各种方法。混合控制方法通过控制末端执行器在力子空间和位置子空间来实现顺应控制; 阻抗控制是靠调节末端执行器的位置和接触力之间的动态关系来实现顺应控制, 对扰动和不确定性因素有很好的鲁棒性, 但难于获得末端执行器的参考轨迹和环境的位置、刚度。

由于适用环境、约束条件和模型建立等方面的差异, 微力环境下眼科机器人刚性末端操作器与柔性眼球软组织之间接触力的控制问题仍待解决。

3.3 眼球组织的生物力学建模技术

对于精密的眼组织来说, 机器人操作稍有不恰当就会伤害到病人的眼睛。为了避免此类医疗事故的发生, 有必要在机器人实施手术之前首先利用计算机进行眼科手术作业的力学建模, 建立眼组织(包括角膜、巩膜、视网膜及其显微血管等)的动态生物力学特性的等效数字化模型。通过手术过程的力学建

模和计算机仿真,可以得到眼组织内部的力学信息,保证手术过程的安全可靠。

为了完成眼外板层角膜移植手术,轩新想等^[25]通过微力材料试验机对角膜的生物力学特性进行了一系列测试试验,其中包括测试角膜特性的单向拉伸试验和应力松弛试验;缝针刺入角膜的微小力测量试验;切割和挤压眼球试验等。这些试验得到的数据为建立角膜材料力学特性的本构模型和缝针刺入角膜的数学模型提供了重要依据。

为了完成如视网膜手术等眼内手术,需研究巩膜及视网膜血管的生物力学特性,建立相应的 3D 模型,构建眼内约束条件。靳韬等^[26]对巩膜的生物力学特性进行了研究,发现巩膜具有黏弹性及流变性,并有相当高的蠕变率。CURTIN 等^[27]研究发现,在同等应力的作用下,前部巩膜的变形最小,赤道部的次之,后部巩膜变形最大。牛希炯等^[28]建立了基于人工神经网络、试验数据及数学算法的视网膜模型。CALVO 等^[29]提出了一种针对眼底图像中视网膜血管的分支及交叉的自动检测方法,为治疗视网膜血管阻塞提供了理论基础。

3.4 约束空间运动规划技术

针对复杂的眼内手术,需考虑包括刺入点约束、眼内手术环境的约束、机器人机构的约束及由特定手术任务的要求所引入的约束,这些项目组合起来构成了眼内手术的约束空间。为了在刺入点约束和眼内壁组织的约束环境下实现机器人的灵巧操作,需要进行约束运动规划和控制。

最早的空间约束运动规划问题的研究源于 FUNDA 等^[30]将基于刺入点的机器人运动控制问题归结为约束二次规划问题。为了进行路径规划和控制,实现 RCM 的可变性,一些学者提出了虚拟固定器的概念。LI 等^[31]针对约束环境下器械的运动边界,构建了一种闭环控制器,通过虚拟固定器的概念实现了器械的自由运动和引导模式,同时将机器人关节的运动极限、运动误差、器械的运动约束、器官组织作为环境约束进行建模及优化设计,并以鼻外科手术为例进行了试验研究。KAPOOR 等^[32]提出了约束环境下构造器械虚拟固定器的方法,并应用双臂机器人进行打结作业,对所提出的规划方法进行了验证。

具体在视网膜手术中,手术器械在受到巩膜刺入点约束的前提下,首先需要在眼内空间的约束下完成视网膜表面的复杂运动,同时还要考虑多个手术器械之间的运动干涉。为了准确跟踪在约束条件下的预期路径,就需要进行多操作器的约束运动规划。

3.5 精密运动控制技术

眼科显微手术辅助机器人运动范围小(毫米级)、定位精度高(微米级)。由于机器人关节驱动中电动机死区、机械摩擦力、间隙与机械臂运动震颤等非线性因素的影响,导致运动实时性和末端操作器的定位精度很难达到实际操作要求。机器人关节驱动电动机闭环伺服精度和动态特性决定了其运动实时性和定位精度。在闭环控制中,仅用传统的 PID 控制器已很难满足非线性复杂对象的控制要求。因此,在显微眼科辅助机器人研究领域,为了达到高精度的定位要求,很多现代伺服控制理论都得到了广泛应用和实践。

在现代伺服控制方法中,基于参考模型的自适应控制算法速度快且易于实现,但由于传统的自适应控制方法是基于数学模型的方法,对于复杂非线性对象难以建立有效的参考模型,使得这种控制方法没有用武之地。智能控制中如模糊控制、神经网络等方法同样是伺服控制中应用较广泛的方法^[33],能够解决模型不确定、非线性控制及其他较复杂的问题。但模糊控制的控制规则需要依靠操作人员的经验,而尽管神经网络控制对模型的依赖很小,但收敛时间较长,不能满足眼科辅助机器人实时控制的要求。

变结构控制方法是一种特殊的非线性反馈控制系统。预测变结构控制就是为了从根本上消除滑模变结构控制方法中的抖振而提出的一种不含滑动面的变结构控制方法^[34]。这种方法保持了滑模变结构控制算法简单且鲁棒性好的优点,但该方法条件判断较多,高频性能不佳。

综上,在眼科显微辅助手术机器人的精密定位控制中,仍然没有很好的控制方法可以补偿非线性因素的影响,而解决的途径之一就是非线性系统反馈线性化,用已有的线性控制方法进行综合。

4 未来发展趋势及面临的挑战

眼科手术机器人面临诸多个性化的挑战与机遇,包括以下几点。

(1) 紧凑灵巧的机器人机构设计。手术器械在约束空间的操作灵活性,手术器械的操作精度及手术的可视化程度有待提高。末端器集成方面的研究及人机协同操作是解决这一问题的有效途径。

(2) 传感信息融合的新型手术器械和手术技术的研究。现代眼科手术需要开发大量新型的手术器械和手术技术来满足手术步骤的多样性,而机器人在临床上的应用也会随之取得阶段性进展。

(3) 眼球组织的生物力学建模及器械运动约束条件的建立。视网膜显微血管直径小($20\sim 130\ \mu\text{m}$)^[35], 如何完成包括显微血管在内的眼球软组织的生物力学建模, 是机器人辅助眼科手术具有安全保障的关键问题之一。未来研究中, 可以采用光学相干断层扫描技术对视网膜进行逐层扫描, 利用虚拟器官重建技术建立带有边界约束的 3D 模型。然后根据眼组织 3D 模型和手术器械的几何模型, 结合眼组织生物力学特性, 形成机器人灵巧操作的眼内边界约束条件。

(4) 基于多刺入点约束的约束运动规划方法的研究。研究中可以基于刚性体与柔性软组织的虚拟约束的控制策略以及操作器宏、微运动方向的不同要求, 构造不同权重的多目标约束的加权运动规划算法, 结合机器人逆运动学, 利用非线性优化技术进行操作器的运动规划和控制。

(5) 眼科手术机器人的精密定位控制。实现机器人末端手术器械在目标眼组织上的精确定位, 是眼科机器人运动控制的关键问题。研究中可以在考虑各种非线性环节的基础上, 建立机器人各驱动关节的位置控制模型, 采用非线性补偿器与预测变结构相结合的新型控制方法实现机器人的精确定位。

另外, 总结目前可查阅的文献来看^[11, 36-38], 眼科机器人还只是在动物眼球、生鸡蛋等模型上进行试验可行性研究, 以及在数学模型上进行模拟仿真, 将其应用于临床仍有很多问题亟待解决, 其中最重要的就是安全问题。为了提高机器人系统的鲁棒性, 设计上要考虑到所有可能出现的错误和意外情况, 如机械臂干涉、意外停电、计算机故障、由于不同的手术对象所产生的机器人工作空间的变化等。其次为人机交互界面的设计^[39]。从医生操作方便的角度出发, 所选用的机械接口如手柄的形状、控制按钮的配置、各种操作命令的电气接口都要考虑周全, 最大限度地增加医生对机器人的信息输入能力, 为人机协同操作提供接口。

5 结论

近年来, 随着达芬奇外科手术系统、六足机器人系统、显微机械手、手术传感器等的应用与改进, 机器人辅助眼科手术得到了飞速的发展。眼科手术辅助机器人的引入给医生带来了许多便利条件: 提高了操作精度, 增大了器械运动范围, 消除了颤抖, 使原来不可能实施的眼内手术成为可能, 增强了手术结果的可预测性, 提高了手术成功率。尽管如此,

将眼科机器人广泛应用于临床仍然任重而道远。因此, 进一步开展有关机器人机构、微力感知与控制、眼球组织的生物力学建模、约束空间运动规划、精密运动控制等关键技术方面的研究, 可以为眼科机器人的开发提供理论基础, 在为广大眼疾患者带来福音的同时, 又可以为典型微创手术辅助机器人的研究提供参考。

参 考 文 献

- [1] TSIRBAS A, MANGO C, DUTSON E. Robotic ocular surgery[J]. *British Journal of Ophthalmology*, 2007, 91(1): 18-21.
- [2] SHEN L J, CHEN Y Q, WEI L L, et al. Bypassing occluded retinal main vessel segments in isolated arterially perfused caprine eyes[J]. *Current Eye Research*, 2009, 34(6): 415-420.
- [3] ANG W T, PRADEEP P K, RIVIERE C N. Active tremor compensation in microsurgery[C]// *Proceedings of the 26th Annual International Conference of the IEEE EMBS*, September 1-5, 2004, San Francisco, CA, USA. IEEE, 2004: 2738-2741.
- [4] CHOI D Y, RIVIERE C N. Flexure-based manipulator for active handheld microsurgical instrument[C]// *27th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, September 1-4, 2005, Shanghai, China. IEEE, 2005: 2325-2328.
- [5] TAN U X, LATT W T, SHEE C Y, et al. Design and development of a low-cost flexure-based hand-held mechanism for micromanipulation[C]// *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, May 12-17, 2009, Kobe, Japan. IEEE, 2009: 4350-4355.
- [6] GUERROUAD A, VIDAL P. SMOS: Stereotaxical microtelemanipulator for ocular surgery[C]// *IEEE International Conference on Medicine and Biology Society*, November 9-12, 1989, Seattle, USA. IEEE, 1989: 879-880.
- [7] YU D Y, CRINGLE S J, CONSTABLE I, et al. Robotic ocular ultramicrosurgery[J]. *Australian and New Zealand Journal of Ophthalmology*, 1998, 26(Suppl.): 6-8.
- [8] CHARLES S, DAS H, OHM T, et al. Dexterity-enhanced telerobotic microsurgery[C]// *8th International Conference on Advanced Robotics*, July 7-9, 1997, Monterey, CA, USA. IEEE, 1997: 5-10.
- [9] WEI W, GOLDMAN R, SIMAAN N, et al. Design and theoretical evaluation of micro-surgical manipulators for orbital manipulation and intraocular dexterity[C]// 2007

- IEEE International Conference on Robotics and Automation Roma, April 10-14, 2007, Italy. IEEE, 2007: 3389-3395.
- [10] UETA T, YAMAGUCHI Y, SHIRAKAWA Y. Robot-assisted vitreoretinal surgery-development of a prototype and feasibility studies in an animal model[J]. *Ophthalmology*, 2009, 116(8): 1538-1543.
- [11] ÜNERI A, BALICKI M A, HANDA J, et al. New steady-hand eye robot with micro-force sensing for vitreoretinal surgery[C]// *Proceedings of the 2010 3rd IEEE RAS & EMBS, International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics*, September 26-29, 2010, Tokyo, Japan. IEEE, 2010: 814-819.
- [12] YANG Yang, DENG Shijing, XIAO Jingjing, et al. Design and research of a corneal grafting robotic system[C]// *2010 International Conference on Digital Manufacturing and Automation*, December 18-20, 2010, Changsha, China. IEEE, 2010: 486-490.
- [13] GRACE K W. Kinematic design of an ophthalmic surgery robot and feature extracting bilateral manipulation[D]. Chicago: Northwestern University, 1995.
- [14] LOCKE R C O, PATEL R V. Optimal remote center-of-motion location for robotics-assisted minimally-invasive surgery[C]// *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, April 10-14, 2007, Roma, Italy. IEEE, 2007: 1900-1905.
- [15] ISHII C, KOBAYASHI K, KAMEI Y, et al. Robotic forceps manipulator with a novel bending mechanism[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2010, 15(5): 671-684.
- [16] MIYATA N, KOBAYASHI E, KIM D, et al. Micro-grasping forceps manipulator for MR-guided neurosurgery[J]. *Lecture Notes in Computer Science*, 2002, 2488: 107-113.
- [17] IKUTA K, KATO T, NAGATA S. Development and experimental verification of micro active forceps for microsurgery[C]// *Seventh International Symposium on Micro Machine and Human Science*, October 2-4, 1996, Nagoya, Japan. IEEE, 1996: 229-234.
- [18] SUZUKI T, KATAYAMA Y, KOBAYASHI E, et al. Compact forceps manipulator for laparoscopic surgery[C]// *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, August 2-6, 2005, Shaw Conference Centre, Edmonton, Alberta, Canada. IEEE, 2005: 3678-3683.
- [19] SCHENA B. Robotic manipulator with remote center of motion and compact drive: US, 2008/0314181 A1[P]. 2008-12-25.
- [20] 胡一达, 李大寨, 杨洋, 等. 显微手术机器人末端微小传感器集成研究[J]. *北京航空航天大学学报*, 2005, 31(7): 794-798.
- HU Yida, LI Dazhai, YANG Yang, et al. Integration of microsensor for microsurgery robot's end-effector[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2005, 31(7): 794-798.
- [21] YANG Yang, XU Cunliang, DENG Shijing, et al. Insertion force in manual and robotic corneal suturing[J]. *International Journal of Medical Robotics and Computer Assisted Surgery*, 2012, 8: 25-33.
- [22] GUPTA P K, JENSEN P S, DE JUANE. Surgical forces and tactile perception during retinal microsurgery[J]. *Lecture Notes in Computer Science*, 1999, 1679: 1218-1225.
- [23] BERKELMAN P J, WHITCOMB L L, TAYLOR R H, et al. A miniature microsurgical instrument tip force sensor for enhanced force feedback during robot-assisted manipulation[J]. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 2003, 19(5): 917-921.
- [24] SUN Zhenglong, BALICKI M, KANG Jin, et al. Development and preliminary data of novel integrated optical micro-force sensing tools for retinal microsurgery[C]// *2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, May 12-17, 2009, Kobe, Japan. IEEE, 2009: 1897-1902.
- [25] 轩新想, 杨洋, 王哲, 等. 缝针刺入角膜组织的力学模型[J]. *高技术通讯*, 2009, 19(9): 951-956.
- XUAN Xinxiang, YANG Yang, WANG Zhe, et al. Force modeling for needle insertion into corneal tissue[J]. *Chinese High Technology Letters*, 2009, 19(9): 951-956.
- [26] 靳韬, 王超英. 眼的生物力学研究现状[J]. *华北国防医药*, 2007, 19(2): 22-26.
- JIN Tao, WANG Chaoying. The present state of eyes'bio-dynamics[J]. *Medical Journal of National Defending Forces in North China*, 2007, 19(2): 22-26.
- [27] CURTIN B J. Physiopathologic aspects of scleral stress-strain[J]. *Transactions of the American Ophthalmological Society*, 1969, 67: 417-461.
- [28] 牛希娴, 童善保, 朱贻盛, 等. 视网膜建模的研究进展[J]. *生物医学工程学杂志*, 2008, 25(4): 962-966.
- NIU Xixian, TONG Shanbao, ZHU Yisheng, et al. Review of researches on retinal model[J]. *Journal of*

- Biomedical Engineering, 2008, 25(4): 962-966.
- [29] CALVO D, ORTEGA M, PENEDO M G, et al. Automatic detection and characterisation of retinal vessel tree bifurcations and crossovers in eye fundus images[J]. Computer Methods and Programs in Biomedicine, 2011, 103(1): 28-38.
- [30] FUNDA J, TAYLOR R H, ELDRIDGE B, et al. Constrained cartesian motion control for teleoperated surgical robots[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1996, 12(3): 453-465.
- [31] LI M, ISHII M, TAYLOR R H. Spatial motion constraints using virtual fixtures generated by anatomy[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2007, 23(1): 4-19.
- [32] KAPOOR A, TAYLOR R H. A constrained optimization approach to virtual fixtures for multi-handed tasks[C]// 2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation, May 19-23, 2008, Pasadena, CA, USA. IEEE, 2008: 3401-3406.
- [33] HUBIK V, SVEDA M, SINGULE V. On the development of BLDC motor control run-up algorithms for aerospace application[C]// 13th Power Electronics and Motion Control Conference, September 1-3, 2008, Poznan, Poland. IEEE, 2008: 1620-1624.
- [34] BAO Di, HUO Wei. Servo control using a novel predictive variable structure control approach[C]// The International Conference on Automation Control and Artificial Intelligence, March 24-26, 2012, Xiamen, China. IEEE, 2012: 715-718.
- [35] GLUCKSBERG M R, DUNN R, GIEBS C P. In vivo micropuncture of retinal vessels[J]. Graefe's Archive for Clinical and Experimental Ophthalmology, 1993, 231(7): 405-407.
- [36] 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研制与实验性应用研究[J]. 中华眼科杂志, 2009, 45(9): 823-826.
- LIANG Qingfeng, LI Dazhai, HU Yida, et al. Design and operation of cornea grafting micro-surgery robot system[J]. Chinese Journal of Ophthalmology, 2009, 45(9): 823-826.
- [37] BOURLA D H, HUBSCHMAN J P, CULJAT M, et al. Feasibility study of intraocular robotic surgery with the da Vinci surgical system[J]. Retina, 2008, 28(1): 154-158.
- [38] WEI W. Design and implementation of high-precision hybrid robotic systems with application for ophthalmic micro-surgery[D]. New York: Columbia University, 2010.
- [39] TAYLOR R H, STOIANOVICI D. Medical robotics in computer-integrated surgery[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 2003, 19(5): 765-781.
-
- 作者简介: 肖晶晶, 女, 1985 年出生, 博士研究生。主要研究方向为医疗机器人。
E-mail: jj_xiao@me.buaa.edu.cn
- 杨洋(通信作者), 男, 1962 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为多指灵巧手, 医疗机器人, 精密机械设计。
E-mail: yang_mech@buaa.edu.cn