

文章编号: 1000-5862(2020)03-0231-04

血管介入微创手术机器人系统控制研究

项毓嘉¹, 谢 叻^{1, 2*}

(1. 上海交通大学医疗机器人研究院, 上海 200240; 2. 泉州师范学院, 福建 泉州 362000)

摘要: 医生在进行血管介入手术过程中需要实时的 X 射线图像引导, 而长时间的射线辐射会严重危害医生的健康. 为了减小介入医生在手术过程中受到的辐射伤害, 该文研究了一款基于双主手控制的血管介入微创手术机器人系统, 并对其整体框架和控制方法进行研究. 医生可通过上位机界面交互, 进行主从遥控操作, 驱动从端机构完成介入手术操作. 最后进行了血管模型试验, 验证了该文的介入手术机器人具备多器械协同递送的功能.

关键词: 血管介入; 主从控制; 遥控操作; 多器械协同

中图分类号: R 318.6; TP 391.9 **文献标志码:** A

DOI: 10.16357/j.cnki.issn1000-5862.2020.03.03

0 引言

心血管疾病目前在全球范围内已成为人类的主要死因, 因心血管疾病而死亡的人数约占疾病死亡人数的 1/3. 随着国民生活方式的变化, 中国心血管疾病的患病率和死亡率也处于持续上升阶段, 患心血管病的人数估计为 2.9 亿, 心血管病的死亡人数占居民疾病死亡人数的 40% 以上^[1]. 血管介入手术作为一种微创手术, 被广泛用于冠心病等心血管疾病的治疗中. 在进行介入手术的过程中, 医生需要依靠实时的 X 射线造影图像. 尽管医生通过穿戴铅衣、铅帽来屏蔽辐射, 但长时间的射线辐射仍对他们的健康造成了不可逆的伤害, 如造成对医生颈椎和腰椎的损伤、提高增加医生患白内障、甚至脑部和颈部癌症的风险^[2-3].

随着机器人技术在医疗领域中的深入应用, 手术机器人在血管介入中也具备一些优势. 辅助介入的机器人系统可显著减少医生接触射线辐射, 而几乎不会影响手术效果^[4]. 美国 Corindus 公司研发了介入手术机器人 CorPath 系统. 医生可在驾驶舱内通过使用触摸屏和操作杆来远程控制血管介入设

备. CorPath GRX 系统还增加了主动的导引导管操纵功能, 使分叉病变的治疗更加简单^[5-6]. Hansen 公司的 Sensei 机器人与 Artisan 扩展导管配合完成主从遥控操作, 可实现导管的精确定位和控制^[7]. 北京航空航天大学设计的主从控制介入系统采用摩擦轮送丝的设计, 实现了导管的推送和旋转^[8]. 在北京理工大学研发的主从式导管系统中, 医生可在主端操纵真正的导管, 而从端机构实时复现主端的动作^[9].

以上的手术机器人只能实现单一手术器械的递送, 并不能覆盖医生介入操作的整个过程, 还存在 X 射线辐射的环节, 也不符合医生在传统手术中双手操作的习惯. 因此, 为了突破这些局限, 本文提出了一款多器械递送的血管介入微创手术机器人系统, 基于 2 只主手的操控, 完成介入导丝、导管、球囊导管的协同递送, 以及造影剂的远程注射. 本文主要从介入手术机器人系统的组成、整体控制框架以及验证试验这 3 个部分进行阐述.

1 系统组成

该部分主要介绍血管介入微创手术机器人系统的结构组成, 系统主要分为主端和从端 2 个部分. 主

收稿日期: 2019-12-10

基金项目: 福建省科技计划引导性(2018H0032), 泉州市科技计划(2018Z028), 上海市科委科技支撑(17441903800), 国家自然科学基金(61672341, 61973211, 51911540479), 上海交通大学“医工(理)交叉研究基金”(YG2017ZD03), 上海交通大学医疗机器人研究院和国家重点研发计划(2017YFB1302900)资助项目.

通信作者: 谢 叻(1964-), 男, 江西南昌人, 教授, 博士, 博士生导师, 闽江学者讲座教授, 主要从事医疗机器人技术、虚拟现实技术和数字化制造技术的研究. E-mail: Lexie@sjtu.edu.cn

端包括上位机(计算机)、2个具有力反馈的主手 Falcon. 从端则是由升降台、下位机(树莓派)以及驱动机构组成. 驱动机构包括导丝驱动模块、导管驱动模块、球囊导管驱动模块、造影剂驱动模块(见图1).

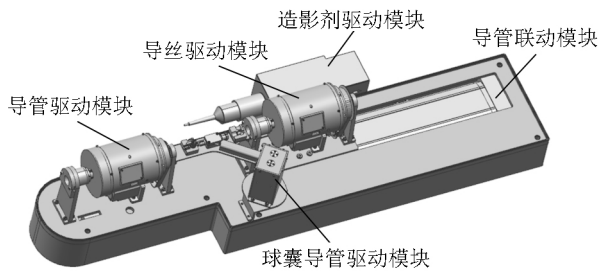


图1 介入微创手术机器人系统驱动机构

导丝、导管在介入手术中的操作包括推送和旋转,因此驱动模块也需要实现这2个自由度的运动. 推送过程采取了渐进式的驱动方式,由前后电动夹具、光电开关和电机协同工作完成. 通过多次短程的步进推送来完成介入导丝、导管的长程运动. 导管的驱动模块还包括滑动模组,二者需要保持相同的运动状态. 由于球囊导管只需要沿着导丝推送,故利用摩擦轮设计,利用主动轮和从动轮之间的摩擦力来

驱动球囊导管的前进和后退. 造影剂驱动模块主要是利用电机驱动丝杠来推动注射器的柱塞,从而完成造影剂的远程注射.

2 主从控制方法

血管介入微创手术机器人系统基于主从异构,设计了整体控制框架,具体如图2所示. 主手控制端的上位机实时采集2个力反馈设备 Falcon 的操作信息. 2个 Falcon 主要是为了模仿医生在介入手术中双手操作的习惯,更好地协同操作导丝和导管. 上位机将主手的数据经过处理和编码之后,通过 TCP/IP 协议发送给从端. 从端的下位机接收到主端发送的数据包后进行数据解码,再通过多线程控制导丝、导管、球囊导管以及造影剂注射模块的协同或单独运动. 驱动电机的编码器也会读取电机运动的实时位置和速度等信息,利用双向数据传输,反馈给主端的上位机. 操作者就可简单地通过交互界面,选择控制模式,并了解从端机构的执行情况.

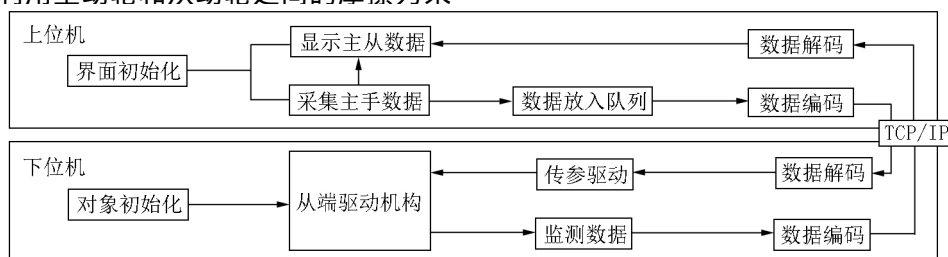


图2 介入微创手术机器人系统控制流程图

主从控制模式的一个优势是可改变主端和从端之间的映射关系来实现不同的效果. 根据血管介入手术的操作流程,设置了2个不同的主从映射比例. 在主动脉递送介入器械的过程中,由于推送通道已经建立,操作较为简单,因此采取1:1的主从映射比例,以便于医生观察推送进度. 而在通过狭窄病变部位时,为了提高操作精度,采用3:1的映射关系,对主端操作进行精细缩小,防止介入器械在推送和旋转过程中损伤血管.

为了使机器人系统从端的驱动机构可以平稳精准地跟随主手的操作,在导丝和导管的推送模块中进行了PID控制研究. 由于传统的PID控制是1个自由度的结构,系统跟踪目标和一直干扰的能力都取决于PID控制环节的传递函数,导致在调参的过程中往往很难使2个特性都达到最优. 为此,本文采用了基于设定值滤波器的2个自由度PID控制,使系统可独立调整系统的目标响应和干扰响应^[10].

本文利用MATLAB的Simulink仿真来比较传统PID和2个自由度PID的控制效果. 直流电机的传递函数为 $P(s) = 1.155 / (2.52 \times 10^{-7} s^2 + 7.62 \times$

$10^{-3} s + 1)$. PID控制器参数都设置为 $k_p = 0.06$, $k_i = 10$, $k_d = 0.05$. 在2个自由度PID控制中的前置补偿环节传递函数为 $G_f(s) = 1 / (0.0001s + 1)$,仿真结果如图3所示. 在传统PID控制下,系统出现了超调,而在2个自由度PID控制前置滤波器的作用下,系统响应明显得到了优化.

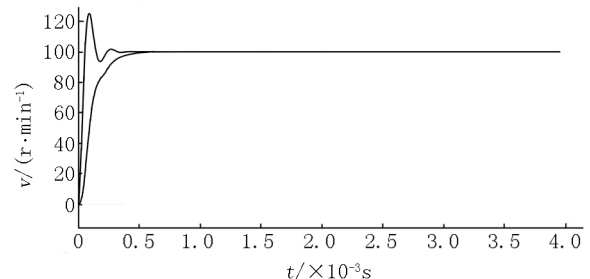


图3 2种PID控制算法的仿真结果图

3 实验验证

为验证血管介入微创手术机器人系统的结构设计和控制方法实现血管介入手术的基本操作,本文

进行了血管模型实验。

模型实验过程主要是验证在双主手的主从遥操作控制模式下,介入导丝和导管是否能按照预期进行交替推送和旋转,最终到达目标病灶。实验过程中导丝、导管的位置变化如图4所示,图4(a)表示模型实验的操作过程,导丝和导管需要从点A递送到血管瘤附近的点E位置。图4(b)和图4(c)分别表示

操纵2端的Falcon进行导丝、导管交替向前推送的过程。当位于图4(d)时,操纵左边的Falcon使导丝进行有效旋转,顺利通过弯曲血管部位后,操纵右边的Falcon交替推送和旋转导管,保持实时跟随,最终使导丝和导管到达目标病灶附近。在实验过程中选择不同的主从映射比例,可明显观察到主从推送速度的变化。

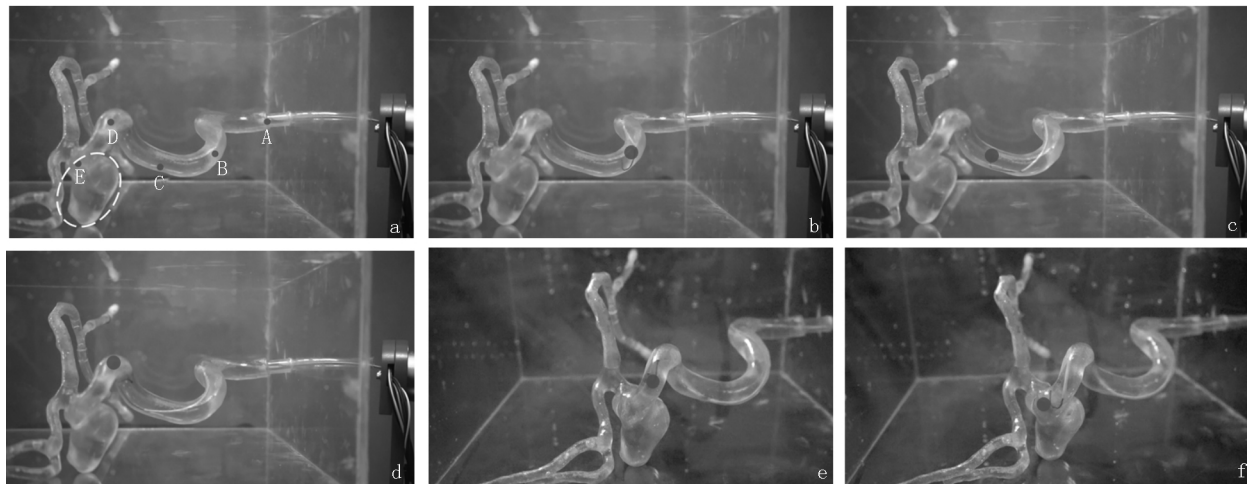


图4 在模型试验中导丝、导管的位置变化

实验结果表明:在主从速度控制模式下,从端驱动机构可实时跟随Falcon主手的推动进行相应运动,介入导丝和导管的驱动分别由2个主手控制,相互之间不会产生任何影响。此外,主从映射比例在主从控制的过程中也可起到精准操控的作用。

4 结论

本文针对介入医生在手术过程中受到射线辐射的问题,研究了一款新型的血管介入微创手术机器人系统,简单介绍了机器人的系统组成和驱动部分的设计原理,并重点围绕控制方法展开阐述。基于模块化、多器械的机器人系统,本文采用双主手完成主从遥操作,并使用多线程协同各个模块之间的运动。基于全双工的TCP/IP协议,上位机和下位机可进行双向、低延迟的数据传输,并对推送模块中的电机增加2个自由度PID控制,提高系统的控制精度和平稳性。通过模型实验,证明机器人系统可利用主从控制完成血管介入的基本操作。

下一步计划增加力反馈功能^[11],恢复医生在手术过程中的力觉,并改进机器人的机构。在设计过程中更多考虑临床面临的清洁性和安全性。此外,还应该进行更多的实验来验证该系统在不同操作环境中的可靠性和有效性,还可以结合3维图像重建等方法进行介入手术器械的精准导航和定位^[12-13]。

5 参考文献

- [1] 胡盛寿,高润霖,刘力生,等.《中国心血管病报告2018》概要[J].中国循环杂志,2019,34(3):209-220.
- [2] Andreassi M G, Piccaluga E, Guagliumi G, et al. Occupational health risks in cardiac catheterization laboratory workers[J]. Circulation: Cardiovascular Interventions, 2016, 9(4): e003273.
- [3] Roguin A, Goldstein J, Bar O, et al. Brain and neck tumors among physicians performing interventional procedures[J]. The American Journal of Cardiology, 2013, 111(9): 1368-1372.
- [4] Menaker S A, Shah S S, Snelling B M, et al. Current applications and future perspectives of robotics in cerebrovascular and endovascular neurosurgery[J]. Journal of Neurointerventional Surgery, 2018, 10(1): 78-82.
- [5] Mahmud E, Dominguez A, Bahadorani J. First-in-human robotic percutaneous coronary intervention for unprotected left main stenosis[J]. Catheter Cardiovasc Interv, 2016, 88(4): 565-570.
- [6] Almasoud A, Walters D, Mahmud E. Robotically performed excimer laser coronary atherectomy: proof of feasibility[J]. Catheterization and Cardiovascular Interventions, 2018, 92(4): 713-716.
- [7] Valderrábano M, Dave A S, Báez-Escudero J L, et al. Robotic catheter ablation of left ventricular tachycardia: initial experience[J]. Heart Rhythm, 2011, 8(12): 1837-1846.
- [8] Wang Tianmiao, Zhang Dapeng, Liu Da. Remote-controlled

- vascular interventional surgery robot [J]. The International Journal of Medical Robotics and Computer Assisted Surgery 2010 6(2): 194-201.
- [9] Guo Jian ,Guo Shuxiang ,Shao Lin ,et al. Design and performance evaluation of a novel robotic catheter system for vascular interventional surgery [J]. Microsystem Technologies 2016 22(9): 2167-2176.
- [10] Kumar M ,Vandana P ,Patel V. Two degree of freedom PID controller for speed control of DC motor [J]. American International Journal of Research in Science ,Technology , Engineering and Mathematics 2015 ,10(1) : 94-98.
- [11] 谢叻 ,神祥龙 ,吴朝丽 ,等. 具有力反馈的心血管介入虚拟手术模拟器的研发 [J]. 江西师范大学学报: 自然科学版 2017 41(4) : 331-337.
- [12] 叶思航 ,谢叻 ,王海鹏 ,等. 基于 3 维动作捕捉的下肢骨折术后步态分析 [J]. 江西师范大学学报: 自然科学版 2018 42(5) : 507-511.
- [13] 周朝政 ,谢叻. 微创人工耳蜗手术导航匹配算法研究 [J]. 江西师范大学学报: 自然科学版 2017 41(4) : 344-347.

The Research on the Control of the Minimally Invasive Surgery Robot for Vascular Intervention

XIANG Yujia¹ ,XIE Le^{1,2*}

(1. Institute of Medical Robot ,Shanghai Jiao Tong University ,Shanghai 200240 ,China;
2. Quanzhou Normal University ,Quanzhou Fujian 362000 ,China)

Abstract: Real-time X-ray image guidance is necessary for the process of vascular interventional surgery ,but long-term radiation exposure becomes a severe issue threatening surgeon's health. In order to reduce the radiation injury , a minimally invasive surgery robot system based on double-master-hand control is introduced ,and its overall framework and control method are mainly studied. Surgeon operates the interactive interface of the upper computer ,and drive the actuator to complete the interventional operation through master-slave remote control. Finally ,a model experiment is carried out to prove that the robot has the function of multi-instrument collaborative delivery.

Key words: vascular intervention; master-slave control; teleoperation; multi-instrument cooperation

(责任编辑: 王金莲)

(上接第 225 页)

The Human-Robot Interaction Strategy of Robot Variable Admittance Control Based on Force Sensor

ZHOU Chaozheng¹ ,YE Zhen¹ ,XIE Le^{2*}

(1. Shanghai Electric Central Research Institute ,Shanghai 200070 ,China;
2. National Digital Manufacturing Technology Center ,Shanghai Jiao Tong University ,Shanghai 200030 ,China)

Abstract: In order to realize the flexibility and adjustment of the posture of surgical robot in the physical human-robot interaction ,a control scheme based on variable admittance is proposed. Human-robot interaction should be very intuitive to the operator. It is particularly difficult in perceiving the surrounding environment and human intentions. However ,the interaction should be adequate ,intuitive and safe. In order to improve the system's intuitiveness , the variable admittance control proposed is based on force/torque sensor to infer the operator's intention ,and the performance of this algorithm is verified by relevant experiments combined with UR5 robot. The results show that the robot control scheme based on variable admittance can meet the requirements of flexible attitude adjustment in human-robot interaction.

Key words: human-robot interaction; surgical robots; admittance control; algorithm

(责任编辑: 王金莲)