

文章编号: 1000-5862(2020)03-0226-05

面向喉部微创手术的经口腔单孔柔性机器人设计

陈炳森¹, 谢 叻^{1, 2*}

(1. 上海交通大学国家数字化制造技术中心, 上海 200030; 2. 泉州师范学院, 福建 泉州 362000)

摘要: 传统喉部微创手术主要是借助于支撑喉镜进行的, 而这种方式建立的手术通道狭长, 手术视野及手术操作空间受限, 存在着视觉盲区及操作盲区. 该文针对以上问题, 设计了一种新型的经口腔单孔柔性机器人, 该柔性机器人可通过弯曲运动改善视觉盲区与手术操作盲区. 柔性臂外径为 10 mm, 最大弯曲角度可达 225°, 并且实现了双段弯曲. 柔性臂内部集成了医用内窥镜, 并预留了 2 个器械通道, 可满足复杂手术需求. 该研究还进行了喉部微创手术模型实验, 验证了柔性机器人进行手术的可行性.

关键词: 喉部微创手术; 经口腔手术机器人; 柔性机器人; 主从控制

中图分类号: R 318.6; TP 391.9 文献标志码: A DOI: 10.16357/j.cnki.issn1000-5862.2020.03.02

0 引言

喉部是人体的重要器官, 结构复杂精巧. 喉部病变对食物吞咽、呼吸以及发声都有很大的影响^[1]. 为了尽量减少手术过程对喉部组织及功能的破坏, 微创手术日益成为喉部手术的主流. 如图 1 所示, 现有喉部微创手术借助于支撑喉镜建立手术通道, 采用显微镜或肉眼获取手术视野, 医生手持手术器械通过支撑喉镜进行手术操作. 然而, 这种手术方式建立的手术通道狭长, 手术视野、手术操作空间受限, 存在着视觉盲区及手术操作盲区^[2-3]. 此外, 放置支撑喉镜会造成周围软组织损伤, 对于老年患者容易发生骨折、崩牙等并发症.

医用机器人的出现使得微创手术变得更加稳定可靠, 为许多手术提供了新的解决方案^[4-6]. 喉部手术机器人具有缩短手术时间、减少病人痛苦、提高手术质量等优点, 近年来受到了国内外学者的广泛关注^[7]. Da Vinci 手术机器人在喉部手术中的应用已被多家研究机构加以研究^[8-10], 验证了其进行喉部手术的可行性. 但 Da Vinci 机器人却存在着整体直径大、可更换的手术刀具少、价格昂贵等问题^[11]. N. Simaan 等^[12-13]设计了一种用于喉部手术的柔性机

器人系统, 该系统具有 3 个蛇形机械臂, 每个机械臂的末端工具可拆卸, 通过多机械臂协同进行喉部手术操作. K. Olds 等^[14-15]基于柔性内窥镜研制了 Robo-ELF 机器人系统, 以改善传统手持方式中存在的手颤、能见度降低等问题. 以上喉部手术机器人主要聚焦在通过机器人辅助手术技术以提高手术精度, 未能解决喉部微创手术中存在的手术盲区与手术操作盲区等问题.



图 1 现有喉部微创手术方式

本文针对喉部微创手术的需求, 设计了一款新型的经口腔单孔柔性机器人, 该柔性机器人不借助于支撑喉镜, 直接通过口腔到达咽喉部位进行手术操作, 可减少手术过程对周围组织的损伤. 利用柔性

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

臂弯曲扩大手术操作空间,实现对难暴露区域的手术操作,提高手术成功率,且集成了医用内窥镜,将手术视野“前移”,从而改善了视觉盲区. 本文的柔性臂采用波纹管内嵌控制环结构,其通过多通道的设计,便于柔性手术器械的布置与更换,可以满足复杂的手术需求. 下面将从机器人系统的机械结构设计、主从控制系统及实验验证 3 个部分进行阐述.

1 机械结构设计

如图 2 所示,本文中的机器人从手由柔性手术

终端模块(包括柔性臂及弯曲驱动机构)与柔性手术终端搭载平台(包括直线运动模块及旋转运动模块)2 大部分组成,共有 8 个自由度.

本设计基于模块化的理念进行设计,将柔性手术终端模块与柔性手术终端搭载平台进行解耦. 柔性手术终端模块用于实现喉部手术的主要功能,其不仅可搭载在本设计的柔性手术终端平台上,而且也可与商业化的机械臂进行结合,具有一定的通用性. 直线运动模块用于推送柔性臂末端到达咽喉部位; 旋转运动模块用于调整柔性臂末端的姿态,以获取最佳手术视野.

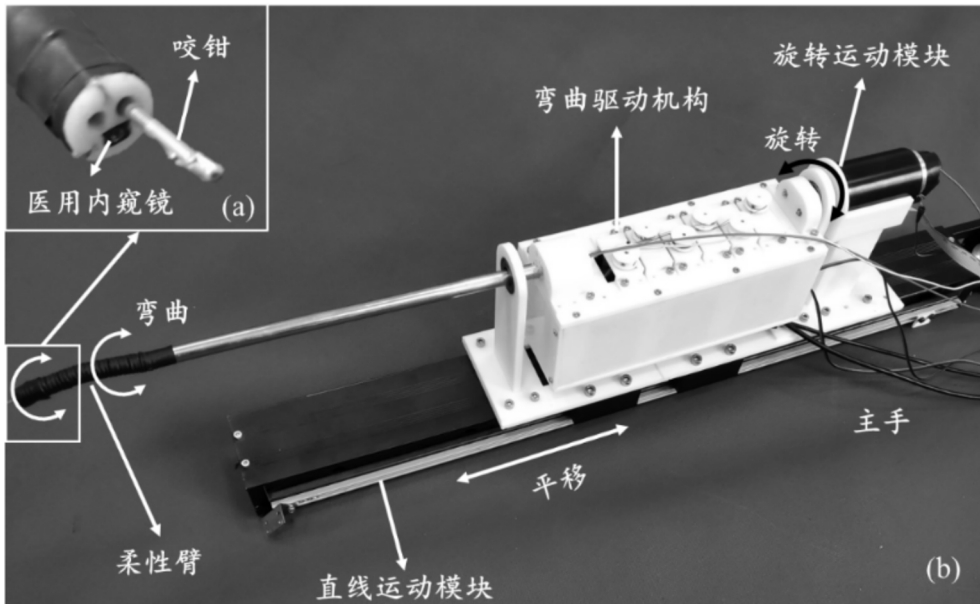


图 2 用于喉部微创手术的柔性机器人系统从手

柔性臂是柔性机器人系统最重要的部分,也是该机械结构设计的核心. 本设计中的柔性臂长 90 mm,直径 10 mm,最大弯曲角度为 225°. 如图 3 所示,本设计采用了波纹管内嵌控制环的结构,选用线驱动作为驱动方式. 波纹管伸缩性好,价格低廉,且其内部具有较大空腔,便于手术机械的布置. 控制环均匀地嵌在波纹管较大节段处. 本设计中共有

7 个控制环,均匀的将波纹管分为 6 段. 当对牵引线进行牵拉时,牵引线的牵引力将转化为控制环对波纹管的挤压力,从而迫使受牵拉一侧产生压缩,从而使柔性臂发生弯曲. 1 根牵引线可控制柔性臂实现 1 个方向上的弯曲运动,3 线牵引可实现柔性臂向空间任意方向上的弯曲,而 6 线牵引的方案可达到双段弯曲的效果.

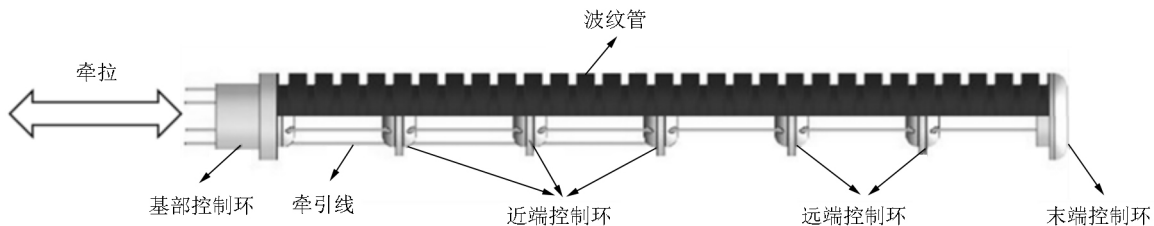
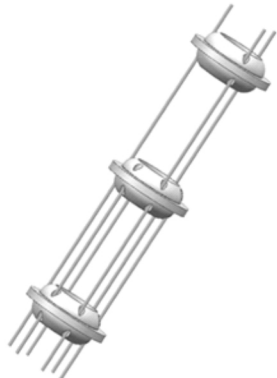


图 3 柔性臂设计原理图

图 4 (b) 为 4 种控制环的设计图. 基部控制环用于连接波纹管与柔性臂; 近端控制环与远端控制环嵌在波纹管中,实现对波纹管的分段控制; 末端控制环用于控制柔性臂的整体弯曲及安装医用内窥镜.

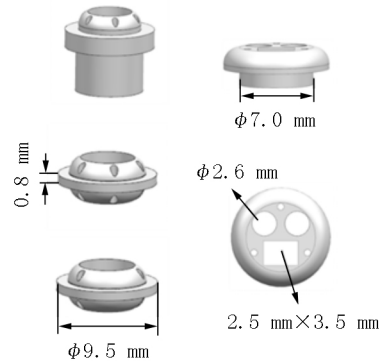
控制环内设置有牵引线孔,用于牵引线的布置(如图 4 (a) 所示). 牵引线孔沿着控制环中心呈均匀分布. 在末端控制环中共留有 3 个器械通道,尺寸分别为 $\varnothing 2.6\text{ mm}$, $\varnothing 2.6\text{ mm}$, $2.5\text{ mm} \times 3.5\text{ mm}$. 其中矩

形通道用于安装医用内窥镜,该内窥镜集成 1 个直径 2.2 mm 的摄像头以及 2 个 LED 灯,不需另外再加光源. 该摄像头的像素为(400 px × 400 px),可满足



(a) 牵引线布置

模型实验的需求. 2 个直径 2.6 mm 的通道为手术器械通道,本文模型实验中加入了直径 2 mm 的咬钳(见图 2(a)).



(b) 控制环设计

图 4 控制环的设计与布置

2 主从控制系统设计

本文选用主从控制方式,主从控制系统架构如图 5 所示. 从图 5 可知,控制系统由主操作手、上位机、图像系统、柔性机器人系统从手等部分组成.

在操作过程中,上位机实时跟踪主操作手的坐标变化,通过特定的主从映射关系,转换为各驱动电机的运动量. 上位机根据计算得到的各电机的运动量,向从手驱动系统发出相应的电机控制指令,电机驱动器驱动电机完成相应的运动,从而实现手术操

作. 由于本设计选用 maxon 电机,该款电机的内置增量式编码器可记录电机的实时运动量,并通过电机控制器反馈到上位机,作为机器人系统运动控制的参考. 上位机同时通过控制摄像系统对手术过程中咽喉部位的医学影像进行实时记录,并通过图像显示系统和提供实时手术视野反馈给医生. 各部分设备通过各自的设备接口连接到上位机上,医生可直接通过人机交互界面对各项设备进行直接管理,如对主操作手、摄像系统等进行调试,以及直接控制各从手关节的运动.

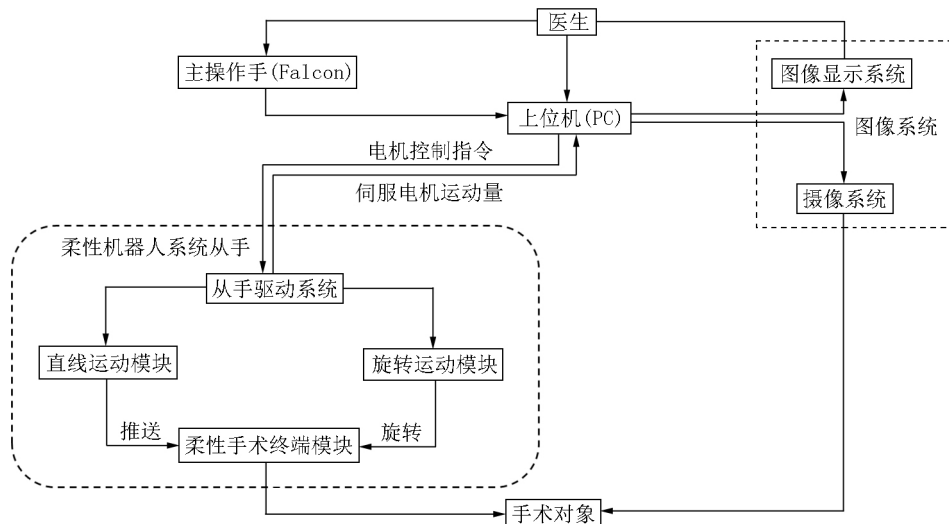


图 5 主从控制系统架构图

3 实验验证

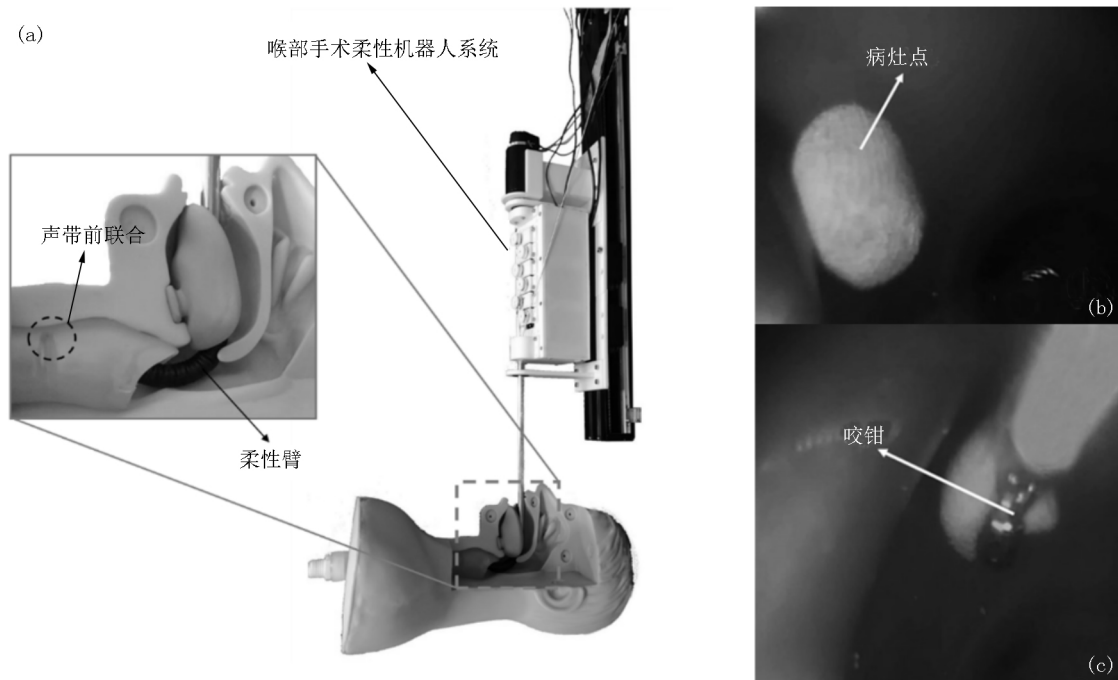
为了验证柔性机器人系统的可行性及对手术盲区、视觉盲区等问题的改善效果,本文进行了如图 6

所示的模型实验. 声带前联合是现有喉部微创手术过程中较难暴露的部位,故本实验选用声带前联合良性肿瘤切除术作为模型实验应用场景.

如图 6(a) 所示,本实验在声带前联合处设置了红色标记点,以模拟病灶点. 在实验过程中,通过直

线运动模块推送柔性臂进入口腔,并结合柔性臂的弯曲使得柔性臂末端到达咽喉部位.从图6可知,柔性臂可利用其大角度弯曲绕过舌根到达指定位置,其尺寸及弯曲角度可满足手术需求.如图6(b)所示,

柔性机器人可通过弯曲、平移及旋转等运动的组合,实现将模拟病灶点置于视野中央,进行良好地暴露.如图6(c)所示,手术器械可通过手术器械通道到达病灶点进行模拟手术操作.



注:(a)为模型实验环境布置;(b)为病灶点暴露;(c)为病灶点夹取.

图6 模型实验环境及结果

4 结论

本文针对喉部微创手术存在的视觉盲区、手术操作盲区等问题,设计了一种新型的经口腔单孔柔性机器人,并对其机械结构设计、主从控制系统设计及进行喉部微创手术的可行性进行了分析.本研究中的柔性臂采用波纹管内嵌控制环的结构,并进行了多通道设计.柔性臂内部集成了医用内窥镜,为具体的手术操作预留了2个手术器械通道.结合声带前联合良性肿瘤切除术,使用柔性机器人系统进行了模型实验.实验结果表明:本设计中的柔性机器人可以完成喉部微创手术的基本操作,机械结构设计及功能满足手术需求.与传统手术方式相比,使用柔性机器人的方案可减少手术过程对周围组织的损伤,扩大手术操作空间及手术视野.

5 参考文献

[1] Dziegielewski P T, Kang S Y, Ozer E. Transoral robotic surgery (TORS) for laryngeal and hypopharyngeal cancers [J]. *Journal of Surgical Oncology*, 2015, 112(7): 702-

706.

- [2] Latuska R F, Kuhl N O, Garrett C G, et al. Severe bradycardia associated with suspension laryngoscopy [J]. *The Laryngoscope* 2016, 126(4): 949-950.
- [3] Gil Z, Kupferman M E, Amit M. Atlas of head and neck robotic surgery [M]. Cham: Springer 2017: 69-81.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] Parmar A, Grant D G, Loizou P. Robotic surgery in ear nose and throat [J]. *European Archives of Oto-Rhino-Laryngology* 2010, 267(4): 625-633.
- [8] Bodner J, Wykypiel H, Wetscher G, et al. First experiences with the da Vinci™ operating robot in thoracic surgery [J]. *European Journal of Cardio-Thoracic Surgery*, 2004, 25(5): 844-851.
- [9] Hockstein N G, Nolan J P, O'Malley B W, et al. Robotic microlaryngeal surgery: a technical feasibility study using

- the daVinci surgical robot and an airway mannequin [J]. *The Laryngoscope* 2005 ,115(5) : 780-785.
- [10] Blanco R G F ,Ha P K ,Califano J A ,et al. Transoral robotic surgery of the vocal cord [J]. *Journal of Laparoendoscopic and Advanced Surgical Techniques* 2011 21(2) : 157-159.
- [11] Hoffmann T K ,Patrick J S ,Bankfalvi A ,et al. Comparative analysis of resection tools suited for transoral robot-assisted surgery [J]. *European Archives of Oto-Rhino-Laryngology* 2014 271(5) : 1207-1213.
- [12] Simaan N ,Taylor R ,Flint P. A dexterous system for laryngeal surgery multi-backbone bending snakelike slaves for teleoperated dexterous surgical tool manipulation [C]// *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. New Orleans: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc 2004:351-357.
- [13] Simaan N ,Xu Kai ,Wei Wei ,et al. Design and integration of a telerobotic system for minimally invasive surgery of the throat [J]. *The International Journal of Robotics Research* 2009 28(9) : 1134-1153.
- [14] Olds K ,Hillel A ,Kriss J ,et al. A robotic assistant for trans-oral surgery: the robotic endo-laryngeal flexible (Robo-ELF) scope [J]. *Journal of Robotic Surgery* 2012 ,6(1) : 13-18.
- [15] Olds K ,Hillel A T ,Cha E ,et al. Robotic endolaryngeal flexible (Robo-ELF) scope: a preclinical feasibility study [J]. *Laryngoscope* 2011 ,121(11) : 2371-2374.

The Design of a Transoral Single-Port Flexible Robot for Laryngeal Minimally Invasive Surgery

CHEN Bingsen¹ ,XIE Le^{1,2*}

(1. National Digital Manufacturing Technology Center ,Shanghai Jiao Tong University ,Shanghai 200030 ,China;

2. Quanzhou Normal University ,Quanzhou Fujian 362000 ,China)

Abstract: Minimally invasive laryngeal surgery is mainly performed with the help of retractor. However ,in this way , the surgical space is narrow ,the surgical vision and the surgical operation space are limited. A novel transoral surgical flexible robot is designed ,which can expand the surgical vision and operation space. The diameter of the flexible robot is 10 mm ,the maximum bending angle can reach 225° ,and double-segment bending is realized. The flexible robot reserves two surgical channels for surgical instruments and integrates an endoscope. A model test of vocal cord benign tumor resection is performed with the robot to verify the feasibility of the flexible robot for laryngeal surgery.

Key words: laryngeal minimally invasive surgery; transoral surgical robot; flexible robot; master-slave control

(责任编辑:王金莲)