

机器人辅助脊柱微创手术的历史演变与前景展望^{*}

于 研 吴洋春 程黎明^{**}

(同济大学附属同济医院脊柱外科, 上海 200065)

中图分类号: R681.5; TP24

文献标识: A

文章编号: 1009-6604(2013)02-0103-03

智能计算机辅助微创手术的开展是人类工效学发展新概念术式的革新趋势, 手术机器人作为新理念的智能载体, 将虚拟现实术野三维动态地呈现在术者的感官世界中, 配准跟踪术者手部动作, 消除不自觉震颤的同时, 快速精准地同步术野空间内的加工器械, 瞬时反馈给智能终端力、位移、速度等相关信息, 经分析整合放大后, 辅助手术程序中的精细化操作, 消除人脑失误或操作不当带来的医源性损伤^[1]。随着微型机器人学科的技术发展, 脊柱微创手术面临着前所未有的发展机遇, 但其临床推广及应用仍存在着争议。脊柱作为人体最为复杂的运动器官之一, 解剖结构复杂, 自然腔道狭窄且不规则, 脊柱骨性椎管内容纳着损伤后不可再生的神经组织, 目前以内窥镜和微创通道为主的微创手术技术也因此受到制约而发展缓慢。由此, 针对机器人辅助脊柱微创化手术的基础研究, 逐渐成为工程师及术者研究的聚焦热点。

1 机器人辅助外科手术的进展与趋势

1985 年美国长滩市纪念医疗中心首次使用 Unimation PUMA 200 的工业机器人进行了 CT 引导下的脑活组织检查。名为 Probot 的机器人在前列腺切除手术中能自主切除大量前列腺组织。此后, 位于德国的 Brain 实验室研发出一种 7 自由度的关节臂型外科机器人——Vectorbot。它的结构非常紧密, 所有的电子设备都整合在关节杆中^[2], 能引导术者准确放置内窥镜、活检穿刺针、深度脑部刺激电极、导管和螺钉, 且精确度极高。上述一代手术机器人是由工业机器人转变而成的自动化外科手术机器人, 其智能系统在无术者直接干预的情况下完成部分任务; 也可通过机器人手臂锁定手术部位, 再由术者利用机器人手臂为支架, 辅以工具来完成手术。一代手术机器人开创了外科手术智能辅助的先河,

但其缺乏与术者之间的信息交互, 开展的手术类型也存在着极大的局限性。

1994 年 Computer Motion 公司研发出具有人机交互方式的伊索声控机器人^[3], 在此基础上开发出了宙斯手术机器人系统^[4]。2000 年美国 Intuitive Surgical 公司成功开发出具有划时代意义的达芬奇外科手术机器人系统^[5], 该系统由术者控制平台、多功能手术床、手术器械和图像处理设备等构成^[6]。达芬奇手术机器人的操作臂能模拟术者的手部动作并过滤震颤^[7]。起初, 由于未引入触觉反馈模块, 达芬奇机器人的操作臂会因术者的不当操作而损坏某些脆弱组织^[8]。而现在升级实载了力反馈系统的达芬奇机器人^[9], 能正确感知震动、温度和力度以弥补术者触觉的失真感, 使手术操作更加精细和安全。2002 年美国 Hansen Medical 公司研发了一种用于心脏介入手术的主从系统——Sensei 机器人导管系统^[10]。它凭借 Stereotaxis 磁导航系统精确控制磁场方向, 定位操控心导管或导丝尖端的前进方向。Acrobot 机器人是一种低功率且具有特殊用途的小型人机交互系统^[11], 其中操作被限制在安全可控的范围内, 以确保手术的安全性。上述二代手术机器人能够以主从交互方式进行集成化手术操控——模拟术者手部动作、反馈术者触觉信息、导航定位操控方向、限制约束安全边界, 从而大大提高手术精确度和安全性。但大多数二代手术机器人的体积大、购置费和维护费高、术前坐标系定位耗时长、术中需进行额外的示踪调整程序, 且缺乏适用于专属疾病的特征性和针对性, 这些弊端也成为制约二代手术机器人发展的重要因素。

具有特殊用途的三代小型机器人多包含导航定位系统, 但其主体设计思路更多针对不同疾病的特征性进行多形态分化, 高度适配手术区域的生理解剖结构, 无需固定患者坐标系或动态示踪, 在很大程

^{*} 基金项目: 上海市科委科技攻关重点项目 (11JC1412100)

^{**} 通讯作者, E-mail: chlm.d@163.com

度上简化了机器人的定位调整过程,使外科手术更加高效便捷。2003 年 Shoham 等^[12]发明了 MiniAture 并联机器人用于脊柱手术,直接将机器人架附在手术区域的骨性结构上定向钻孔,用于如椎弓根螺钉植入、椎体成形及脊柱后凸矫形等脊柱外科手术。另外一种由卡内基梅隆大学发明的三代手术机器人名为 HeartLander^[13],它是一种能在跳动的心脏表面进行微创手术的爬行机器人。三代手术机器人是低成本、易操控、具特殊用途的微型机器人,能高效替代现有的大型集成式机器人进行微创外科手术。然而,此类机器人多处在基础研究阶段,还有一些技术问题亟待解决,例如新的驱动方式、电源和功率管理、传感和通讯系统等,但其应用前景十分广阔。

2 脊柱外科微创手术面临的困境

脊柱外科微创手术在抵达操作目标的路径中,会破坏脊柱重要的力学稳定结构。同时,术者的自然颤动、以暴露为目的的组织剥离、内置物的放置及医用电钻的骨壁开凿,均会对脊髓、神经根、血管等造成干扰甚至损伤。自 20 世纪 90 年代内窥镜技术的成熟,为使重要结构的损伤最小化,微创术式及器械的诞生为术者带来福音,如 MED、Destandau、TESSYS 等,但均存在操作反向、触感不真实、手术指征局限、学习曲线长等缺陷,术者跟踪显示器中器械操作端的运动轨迹时,视觉误差极大程度地降低了精度和稳定性。Latt 等^[14]报道,即使是具有熟练操作经验的医生,在静态持物时仍有 0.32 mm 的误差,而在动态追踪器械末端时可达 0.8 mm 的误差。同时,相对平均耗时较长的脊柱外科微创手术,以及不符合人体工程学的操作环境及方式,给术者带来了生理和心理上的负担,有报道称肩、颈痛的比例分别高达 32% 和 39%^[15]。经调查,在德国的脊柱外科医师中,43% 的人称该模式下的手术大大增加了伤及患者及助手的风险^[16]。

如何在脊柱微创手术显露过程中减少甚至避免对脊柱结构的破坏?如何消除术者在现今脊柱外科微创技术中遇到的困扰?如何改善脊柱外科术者工作的环境及方式?这一系列疑问成为脊柱外科手术机器人的研发动力,或者说促成了脊柱微创手术的革新,它如同协调、稳定术者大脑活动的次级中枢,为脊柱外科手术操作提供安全保护。

3 连续型机器人辅助脊柱微创手术的设想

三代手术机器人不断发展,衍生设计出新类型,利用微创切口和人体生理通道的特色机器人,如基于电磁蠕动的仿蚯蚓微型机器人能进行结肠腔镜手

术^[17],黄蜂产卵管形机器人能穿透颅骨在脑表面爬行收集脑部资料等。但针对脊柱不规则解剖结构的微创手术机器人鲜有报道,因其手术路径规划复杂、周围存在重要的神经与血管组织、安全工作的有效范围狭小等,种种制约因素限制了该类型机器人的基础研发。因此,一种经济微型的、可定位的、同步交互的机器人是目前脊柱微创手术意图寻找的智能辅助手段。

连续型机器人是一种新型仿生机器人,它模仿自然界中象鼻、章鱼触手等动物器官的运动机理,自身不存在运动关节,但能依靠连续柔性变形来实现运动和抓取操作。美国克莱姆森大学的 Gravagne 等^[18]对连续型机器人的结构、算法和运动控制技术进行了大量的研究,研制了多种形式的连续型机器人。Jones 等^[19,20]研制了连续型机器人 Air-Octor 和仿章鱼触手的连续型机器人 OctArm。美国霍普金斯大学的 Simaan 等^[21]研制了一种用于喉部外科手术的连续型机器人。比利时的 Peirs 等研制了一种利用记忆合金丝驱动的内窥镜连续型机器人弯曲关节^[22]。美国斯坦福大学的 Camarillo 等研制了一种线驱动连续型机器人^[23]。美国 Vanderbilt 大学的 Webster 等研制了一种同心管连续型机器人^[22,24]。由此可见,连续型机器人可在任意部位产生柔性变形,故具有很强的避障能力,能够更好地适应脊柱非结构环境,它将在脊柱外科微创手术中具有潜在的应用价值。

4 连续型机器人辅助脊柱微创手术的前景展望

虽然目前对手术机器人的研究及临床应用已经取得了一定进展^[25-27],但连续型机器人辅助微创手术的相关基础研究还不够完善。首先,在连续型机器人的结构设计中,柔性与负载能力是一对矛盾体,因此需要对机器人设计进行整体规划与优化,利用新型复合材料设计出适合于连续机器人的高强度、高柔性的连续型结构。而机器人工作空间的关系求解需进行复杂的运动学分析,它不仅包括关节空间与操作空间的映射关系,还包括驱动空间与关节空间的映射关系,对这三种空间映射关系的分析方能完成连续型机器人的正、逆运动学分析。

其次,连续型机器人行进过程是一个刚性物体和软组织接触的相互作用过程。连续型机器人在行进过程中,不仅受驱动力的作用,还要受外界环境对其产生的作用力。为满足手术作业精细性要求,需要对机器人末端与组织接触过程中的相互作用进行分析,以便在手术机器人作业时,能更好地控制操作轨迹和力度。在传感监控方面,目前具有无限多个自由度的连续型机器人的传感器数量是有限的,这

对连续型机器人的控制提出了挑战。

同时,人机交互技术是连续型机器人运动控制的关键技术之一。连续型机器人与传统仿人类手臂机器人的结构完全不同,传统仿人类手臂机器人由刚性连杆组成多自由度关节,结构直径太大。连续型机器人没有关节电机,利用特种材料做到直径极小。这种结构可能会给术者带来某些错觉,尤其在多脊柱的非结构环境中运动时操作难度会比较大,因此需要设计人机交互性能友好的操作软件和硬件,以给术者提供人性化的输入和反馈。需要根据医学扫描图像得到的手术路径,采用数学模型对路径通道进行数控编程,手术中机器人自动进入并在通道中行走,也可以在电脑屏幕显现下手动引导机器人运行。连续型机器人可以随窄小空间柔顺而灵活地改变自身形状,在空间进行连续变形,因此具有根据环境障碍物的状况而改变自身形状的能力,人体损伤将降到最小。

5 小结

连续型机器人在正式投入临床辅助脊柱微创手术前,仍存在大量基础问题需要研究解决。为解决脊柱疾病微创手术面临的问题,应基于脊柱三维解剖学和脊柱微创外科手术学的理论基础,依据连续型柔性体机器人的主体设计思路,结合影像医学、材料力学、智能控制理论、传感技术等新理念和新技术,进行脊柱微创手术路径规划、运动学分析、力反馈控制及材料优化选择加工等问题的研究,同时应构建连续型机器人辅助脊柱微创手术的基础数理模型和机器人前期研发所需的重要技术参数体系,为机器人辅助脊柱外科微创手术的新方向提供技术与理论基础。

参考文献

- 1 Hashizume M, Tsugawa K. Robotic surgery and cancer; the present state, problems and future vision. *Jpn J Clin Oncol*, 2004, 34(5): 227 - 237.
- 2 Hagn U, Nickl M, Jorg S, et al. The DLR MIRO: a versatile lightweight robot for surgical applications. *Industrial Robot*, 2008, 35(4): 324 - 336.
- 3 Nebot PB, Jain Y, Haylett K, et al. Comparison of task performance of the camera-holder robots EndoAssist and Aesop. *Surg Laparosc Endosc Percutan Tech*, 2003, 13(5): 334 - 338.
- 4 郭跃华, 周汉新. 手术机器人的发展与现状. *中华外科杂志*, 2005, 43(1): 64 - 66.
- 5 崔亮, 高江平. 前列腺癌微创手术治疗进展. *中华医学信息导报*, 2007, 22(5): 14 - 16.
- 6 杜志江, 孙立宁, 富历新. 外科手术机器人技术发展现状及关键技术分析. *哈尔滨工业大学学报*, 2003, 35(7): 773 - 777.
- 7 Winter JM, Talamini MA, Stanfield CL, et al. Thirty robotic adrenalectomies: a single institution's experience. *Surg Endosc*,

- 2006, 20(1): 119 - 124.
- 8 李志俊, 王连朝, 张学民, 等. 微创手术机器人视觉定位系统的研究. *武汉理工大学学报*, 2007, 31(5): 890 - 893.
- 9 Rosen J, Hannaford B, MacFarlane MP, et al. Force controlled and teleoperated endoscopic grasper for minimally invasive surgery-experimental performance evaluation. *IEEE Trans Biomed Eng*, 1999, 46(10): 1212 - 1221.
- 10 Schmidt B, Chun KR, Tilz RR. Remote navigation systems in electrophysiology. *Europace*, 2008, 10(3): 57 - 61.
- 11 Jakopc M, Baena FR, Harris SJ, et al. The hands-on orthopaedic robot "Acrobot": early clinical trials of total knee replacement surgery. *IEEE Trans Rob Autom*, 2003, 19(5): 902 - 911.
- 12 Shoham M, Burman M, Zehavi E, et al. Bone-mounted miniature robot for surgical procedures: concept and clinical applications. *IEEE Trans Rob Autom*, 2003, 19(5): 893 - 901.
- 13 Wood NA, Patronik NA, Zenati MA, et al. Fourier modeling of porcine heartbeat and respiration in vivo for synchronization of HeartLander robot locomotion. *Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc*, 2011, 2011: 7041 - 7044.
- 14 Latt WT, Tan UX, Georgiou A, et al. A Micro Motion Sensing System for Micromanipulation Tasks. *Sens Actuators A Phys*, 2012, 173(1): 254 - 266.
- 15 Mirbod SM, Yoshida H, Miyamoto K, et al. Subjective complaints in orthopedists and general surgeons. *Int Arch Occup Environ Health*, 1995, 67: 179 - 186.
- 16 Matern U, Konecny S. Safety, hazards and ergonomics in the operating room. *Surg Endosc*, 2007, 21: 1965 - 1969.
- 17 王坤东, 颜国正, 施建. 微机器人结肠镜样机及离体肠道试验研究. *中国生物医学工程学报*, 2006, 25(5): 547 - 551.
- 18 Gravagne IA, Walker ID. Manipulability, force, and compliance analysis for planar continuum manipulators. *IEEE Trans Rob Autom*, 2002, 18(3): 263 - 273.
- 19 Jones BA, Walker ID. Kinematics for multisection continuum robots. *IEEE Trans Rob*, 2006, 22(1): 43 - 55.
- 20 Jones BA, Walker ID. Practical kinematics for real-time implementation of continuum robots. *IEEE Trans Rob*, 2006, 22(6): 1087 - 1099.
- 21 Simaan N. Snake-like units using flexible backbones and actuation redundancy for enhanced miniaturization. *IEEE Int Conf Robot Automat*, 2005: 3012 - 3017.
- 22 Dario P, Carrozza MC, Lencioni L, et al. A micro robotic system for colonoscopy. *IEEE Int Conf Robot Automat*, 1997: 1567 - 1572.
- 23 Camarillo DB, Carison CR, Salisbury JK. Configuration tracking for continuum manipulators with coupled tendon drive. *IEEE Trans Rob*, 2009, 25(4): 798 - 808.
- 24 Webster RJ, Romano JM, Cowan NJ. Mechanics of precurved-tube continuum robots. *IEEE Trans Rob*, 2009, 25(1): 67 - 78.
- 25 叶剑飞, 马潞林. 从腹腔镜到机器人辅助肾部分切除术的过渡: 一个资深腹腔镜外科医生的学习曲线. *中国微创外科杂志*, 2012, 12(1): 10 - 11.
- 26 施宏, 朱江帆. 经自然腔道内镜手术: 临床应用与未来展望. *中国微创外科杂志*, 2009, 9(12): 1060 - 1062.
- 27 何晓琴, Mukesh Parekh. 机器人辅助腹腔镜子宫全切除术 41 例报告. *中国微创外科杂志*, 2011, 11(6): 489 - 495.

(收稿日期: 2012 - 07 - 31)

(修回日期: 2012 - 09 - 01)

(责任编辑: 王惠群)