

手术机器人面临的一大挑战——力触觉反馈

郭松 杨明杰 谭军*

(同济大学附属东方医院脊柱外科, 上海 200120)

摘要: 机器人手术作为一种微创手术技术, 由于其高度的精准性, 已经得到了外科医生的广泛认可。但机器人手术最大的局限之一就是外科医生缺乏操作的“手感”(即力触觉反馈), 增加了手术的不确定性和风险性, 从而限制了手术机器人的进一步发展。文中从手术机器人力触觉反馈系统的组成、关键技术、以及当前的研究现状等几个方面, 对该反馈系统进行了综述。力触觉反馈包括力反馈与触觉反馈。该系统的实现依赖力触觉的传感与再现, 本文介绍了常用的力触觉传感器、再现设备及感觉模拟技术, 并分析了各项技术的优缺点。对力触觉反馈系统在手术机器人的研究进展进行了概述。在汇总以前研究的基础上, 对相关研究做了展望。

关键词: 机器人辅助微创外科手术; 力触觉反馈; 力触觉传感器; 力触觉再现

中图分类号 R318 文献标志码 A 文章编号 0258-8021(2013) 04-0499-05

A Big Challenge of Surgical Robot—Haptic Feedback

GUO Song YANG Ming-Jie TAN Jun*

(Department of Spine Surgery, East Hospital, Tongji University, Shanghai 200120, China)

Abstract: Due to high accuracy and minimal invasive, robotic surgery has been widely accepted by surgeons. However, the lack of intraoperative sense of touch (haptic feedback) can increase uncertainty and bring risks in the surgery, which is regarded as the biggest limitation of the robot surgery and require further development. In this article, haptic feedback system was reviewed from the system composition, key techniques and current research status. Haptic feedback includes force feedback and tactile feedback. The implementation of the system relies on the haptic sense and display. Commonly used haptic sensor, display device, sensory substitution techniques and the analysis on the corresponding advantages and disadvantages were introduced in the review. Research progress of the haptic feedback system in surgical robot was outlined as well. At last, the future research direction was suggested on the basis of the previous studies.

Key words: robot-assisted minimally invasive surgery; haptic feedback; haptic sensor; haptic display

引言

在当代外科手术中, 微创手术由于其组织损伤小、术后恢复快、住院时间短等优点, 在临床上得到了广泛的应用。而机器人手术具有更加精准, 更加微创的特点, 受到了外科医生的高度重视。据报道称: 2011 年全球有大约 360 000 台手术是由机器人完成的^[1]。

按照结构形式的不同, 手术机器人可划分为两

种: 主动式手术机器人和主从式手术机器人。文中以技术成熟、临床应用广泛的主从式结构的手术机器人(如达芬奇手术机器人)为代表进行讨论。第三代达芬奇手术机器人由医生控制台(装有三维显示系统)、机械臂移动车(其中 3 个机械臂用来操作器械, 1 个专门用来控制内镜)和内镜图像处理装置组成。外科医生通过操作控制台上的主手, 远程控制机械臂做手术。而术中如何将机械臂所获取的信息, 传递给控制台并反馈给外科医生, 是该机器

doi: 10.3969/j.issn.0258-8021.2013.04.017

收稿日期: 2012-12-20, 录用日期: 2013-06-18

基金项目: 上海市浦东新区学科带头人计划资助(PWRD-2011-02)

* 通信作者。E-mail: dr.tan@139.com

人的关键技术之一。当前应用于临床的手术机器人大多采用视觉反馈系统^[2], 尽管具有该反馈系统的手术机器人, 与传统的腔镜手术相比, 表现出了许多优点: (1) 显示画面实现了由二维平面向三维立体的转变, 使医生恢复了深度感; (2) 恢复了自然的手眼协调, 更加符合医生的操作习惯; (3) 消除了手部颤抖, 使得操作变的更加精确; (4) 节省了医生的体力消耗, 使得医生更易集中精力, 有利于进行较大的手术。该反馈系统也具有许多不足, 其中之一就在于该机器人不能感受到组织的触觉信息^[3-5], 这使得外科医生在控制机械臂做手术时, 不能对病人进行触诊。虽然视觉反馈可以提供部分力触觉反馈的信息, 但是由于手术机器人力触觉反馈系统的缺乏, 即使是有经验的外科医生也必须通过分析视觉信息, 来判断器械对于组织的作用力及其他的组织特性, 这就在无形中延长了手术时间, 影响了手术的自然进程^[4-5]。因此力触觉反馈的缺失, 已经成为制约手术机器人发展的一大挑战。

1 力触觉反馈系统

1.1 概述

力触觉反馈系统包括力反馈系统(类似于人体的深感觉反馈系统)和触觉反馈系统(类似于人体的浅感觉反馈系统)^[6-7]。力触觉反馈不仅能够提供给机械臂合适的操作力, 而且能够使医生感觉到组织的不同特性, 进而可以辨别出病理组织^[5]。总之, 手术机器人的力触觉反馈系统, 能够使医生在做手术时感觉不是在操作机器, 而是感觉在用自己的手做手术。

1.2 力反馈系统

当外科医生远程控制机械臂做手术时, 通过器械末端的力传感器, 能够不断地感受到器械所处的位置及其作用于组织上的力, 并将其以电流的形式进行模拟和传导, 之后将力觉信息再现并传递给医生, 使得医生能够持续地、互动地调整操作力度。该系统的实现主要依赖力传感器(force sensor) 和力觉再现(force display) 技术。

力传感器: 虽然理论上对于一个主从式系统的手术机器人来说, 即使不采用力传感器也能完成力反馈, 但与依靠力传感器的手术机器人相比, 会表现出更大的误差以及更长的时间延迟^[4]。因此, 力传感器具有重要的应用价值。目前, 可以采用两种方法将力传感器与手术器械相连: 一、重新设计出带有力传感器的手术器械, 然而该方法工作量较

大; 二、为机械臂设计一种带有力传感器的机械抓手, 该抓手可与现存的手术器械相连^[8-9]。然而在有些情况下(例如显微操作), 传感器的安装成为一大问题, 在开发力传感器时, 必须考虑其尺寸大小、几何形状、设计成本、组织相容性及可消毒性等特点, 根据不同的要求做出相应的调整, 从而满足临床需要。

力觉再现技术: 主要包括感觉模拟技术和直接再现技术。所谓感觉模拟技术是指将力传感器上所感受到的力觉信息, 模拟成视觉或听觉信息, 并且将这些信息通过显示器显示给外科医生^[10]。有研究者以达芬奇机器人打结为例, 比较了该机器人是否使用感觉模拟技术, 对缝线作用力的不同情况。多次实验结果表明: 从准确度上看, 使用感觉模拟技术时, 机器人打结时对缝线的作用力与医生手打结时的作用力更加接近; 从精确度上看, 使用感觉模拟技术时, 机器人打结时对缝线作用力的变异系数与医生手打结时作用力的变异系数无显著差异; 与未使用感觉模拟技术的机器人相比, 以听觉形式模拟的机器人其精确度提高了 50.2%, 以视觉形式模拟的机器人其精确度提高了 84.1%。该实验证明, 感觉模拟技术可以作为一种实用的力觉再现技术^[6]。但由于医生不习惯于模拟技术, 所以会延长学习时间。直接力觉再现技术, 是通过力觉再现设备将传感器获取的力觉信息转换为相应的刺激, 并且施加于医生的手指, 以复现真实的感觉。这使外科医生能够快速做出相应的调整^[11]。目前广泛使用的力觉再现设备如 PHANTOM 系列^[12]、外骨骼式力反馈数据手套 Cyber Grasp^[13] 和内骨骼式力反馈数据手套 Rutgers Master IIND^[14]。Cyber Grasp 手套运动机构较复杂、重量较重, Rutgers Master IIND 重量轻, 操作者不容易感到疲劳, 但是无法感知小尺寸的物体。以上的力反馈数据手套为便携式装置, 为操作者提供了一个可移动的力接口。但是这些产品主要是通用型的力反馈设备, 在手术机器人方面应用还有一定的局限性, 这将成为深入研究的热点。

力反馈在手术机器人中的研究进展: King 等人将一个力传感器安装在达芬奇手术机器人的机械臂上, 并在医生控制台上安装了一个气压驱动式力再现设备, 使用该反馈系统进行了挂钩转移实验。结果表明: 当力反馈系统打开时, 所有的实验者都能使用合适的抓持力; 当力反馈系统关闭时, 实验者所使用的抓持力通常较大。这表明力反馈系统

的缺失使得手术机器人具有潜在损伤性^[5]。另外,临床实验也表明,由于力反馈系统的缺失,医生控制机器人做手术时,可能会使用过大的力,从而造成组织损伤^[15-16]。Bethea 等设计了一个张力测量装置。该装置可以测量出医生使用达芬奇手术机器人打结时的作用力,其力觉再现技术采用视觉模拟形式,医生采用具有该力反馈系统的机器人进行打结,与无力反馈的机器人相比,前者作用于缝线上的力更加均匀、精确,因此,缝线不易断裂^[10]。分离血管是一项应用广泛的外科技术,Ortmaier 等人采用德国宇航中心(DLR)设计的装有微型力传感器的特殊手术器械,其力觉再现技术采用视觉模拟方式,设计了一个带有力反馈的手术机器人,并且利用该机器人以模拟分离血管的实验为例进行研究。其结果表明:力反馈系统用于机器人分离血管时,能有效地减少机械臂对组织的损伤,提高手术安全性^[17]。Wagner 等将力传感器安装在手术机器人的机械臂上,并且使用 PHANTOM 力觉再现设备,设计了一个具有力反馈系统的手术机器人。他们以该机器人钝性分离组织模型为实验,比较了不同力反馈水平对于组织损伤性的影响。结果表明:随着力反馈水平的提高,器械作用于组织上的力在逐渐的减小,与之相应的组织的损伤性也在减小。该实验的不足之处,在于其实验者并不是手术经验丰富的医生^[18]。针对力反馈系统对于不同资质医生的受益情况进行研究,不同的实验表现出了不同的结果。Reiley 等人以达芬奇机器人打结为实验,其结果表明:与操作无力反馈的手术机器人相比,没有手术机器人操作经验的医生,操作带有力反馈机器人打结时,能够在不增加打结时间的条件下,有效降低打结力,从而减少了缝线断裂情况的发生;对于有经验的医生来说,结果未出现明显差异。因此认为:力反馈主要使无经验的医生获益^[19]。然而,Wagner 等利用 Laprotek 手术机器人(Endovia Medical),并且采用 PHANTOM 力觉再现设备,做了一项机器人置管实验,同样比较了不同资质医生的表现,发现只有那些具有微创手术操作经验的医生,才能够在不增加实验时间的条件下,更好的完成实验。因此认为:对于需要精确定位的操作来说,只有那些具有微创腔镜手术操作经验的医生,才能够从力反馈中充分获益^[8]。以上的实验表明,手术机器人的力反馈系统能够有效地降低机械臂操作时的作用力,降低机器人手术的潜在风险,提高手术安全性。但这些实验都仍局限于实验室,并

没有进行临床实验,尚缺乏说服力。

1.3 触觉反馈系统

手术机器人的触觉反馈,指机械臂操作器械作用于组织时,触觉传感器能够感受到组织表面的信息(例如组织顺应性、硬度、质地、温度等),并将这些信息反馈给医生,从而使医生获得对于组织的真实感觉,并能够对异常组织做出判断。触觉反馈系统主要由 3 部分组成:(1) 触觉信息的感受;(2) 触觉信息的处理,即将所获得信息进行处理,整理得到有用的信息;(3) 触觉信息的再现,将有用的信息再现给医生。

触觉传感器(tactile sensor): Lee 等指出,触觉传感器通过与物体直接接触,能够测定出该物体表面的性质,这些性质主要包括物体的弹性、硬度、质地、温度等^[20]。当前所应用的触觉传感器类型,主要包括电容式传感器、光电式传感器、压电式传感器及压阻式传感器^[20]。为了便于将该传感器与机器人相连,Hidaka 等人模拟人手触觉感受的过程,将 Mukaiibo 等人的设计进行改造,制造出一种“手样传感器”。该传感器能够测定物体表面的粗糙度、硬度及纹理等多种触觉信息,其精密度可以与人手的精密度相比,而且能够长期使用^[21]。另外,苏哲等人将机器人的 3 个手指安装上新型的触觉传感器 BioTac[®]。多模式的 BioTac[®] 传感器中充满了导电流体,其灵活的弹性“皮肤”上的纹路模拟人类指纹,当 BioTac[®] 传感器接触有纹理的物体表面时引起振动,通过流体传导,改变其阻抗,这种改变可被传感器所记录,这样机器人就可以分析出物体的不同质地^[22]。这些传感器的研究大都处于初步实验阶段,还没在手术机器人领域进行实验。另一方面,Leven 等在机器人辅助腹腔镜下肝癌的手术治疗中,使用腔镜超声,成功的获取了组织的触觉信息,并能够将这些信息以二维或三维的图像形式进行再现,从而指导手术切除。该技术能否广泛应用于其他手术有待进一步研究^[23]。

触觉信息处理:触觉信息的处理系统是触觉反馈系统的重要组成部分,该系统可以应用多种算法来处理触觉信息,包括简单的触觉信息和复杂的触觉信息。为了减轻医生负担,对于复杂触觉信息的处理能通过多种方式进行简化,该系统也可以对多种不同的触觉信息进行处理。

触觉再现(tactile display)技术:包括图像模拟技术与直接再现技术。近年来,许多研究者在腔镜系统上采用图像模拟技术,在模型上进行肿块定位

实验取得了较好的效果^[24-26]。直接的再现技术,是指安装在医生手上的触觉再现设备,接受机械臂上的触觉传感器输出的机械臂与组织接触的信息,刺激人体的相应部位,从而再现机械臂与组织接触的情况。该再现技术应用了微型电机技术、记忆合金技术、气压驱动技术^[27-30]。其中, Ottermo 等的微型电机技术充分考虑到了触觉再现时对于尺寸的要求,并且具有高度的保真性^[27]。由于其设计原理是基于电刺激,这容易使医生产生麻刺、振动和灼烧等不舒服感。Lee 等人所采用的气压驱动技术能够刺激手指皮肤的浅层和深层感受,从而产生纹理感觉。气压驱动再现设备具有结构简单、体积小、重量轻、费用低、便于携带等优点,但其存在操作过程控制精度有限、感觉比较模糊等不足^[30]。直觉再现技术充分考虑到医生触觉的特性,符合生理习惯,因此显示出了极大的优势。虽然该技术还处于实验阶段,并没有应用于临床,但其对于手术机器人来说,具有良好的应用前景。

触觉反馈在手术机器人中的研究进展:众所周知,触诊对于外科医生来说是一项重要的检查手段,它可以判断出组织的不同特性。当手术机器人安装了触觉反馈系统时,外科医生在操作机器人做手术时,就可以对组织进行触诊,从而有效弥补微创腔镜手术的不足。在机器人手术中,组织顺应性的判断,对于确定器官肿瘤和心脏中的钙化动脉是有益的。Yamamoto 等制造了一种内含钙化动脉的心脏模型,采用带有图像模拟技术的达芬奇手术机器人,成功地在模型上发现了钙化的动脉^[31]。目前,在手术机器人触觉反馈的研究中,尚缺乏采用触觉再现设备的报道。

2 结论与展望

外科手术的发展趋势是精确和微创。机器人手术的出现和迅速发展,正是不断追求精确和微创的具体体现。尽管该技术在外科手术中已经得到了广泛应用,但目前仍存在许多问题。其中,力触觉反馈作为一种重要的反馈机制,对于手术机器人的发展起着关键作用,因此该领域研究已成为手术机器人研究的一大热点。目前该研究还处于实验阶段,要想将这些研究成果应用于临床,需要在以下几个方面进行深入研究:(1) 必须考虑到要重新设计当前应用于临床的手术器械,使其能够满足力触觉反馈的需要;(2) 由于完整的触觉再现技术涉及形状、纹理、硬度以及温度等物理属性的重现,其

复杂性与难度远远高于立体视觉显示技术,应当加大在这方面的研究;(3) 目前多数研究没有将力反馈系统和触觉反馈系统结合起来考虑,如果将这两种系统有效地结合起来,并能够成功的运用于手术机器人,医生就能够通过触觉反馈系统辨别出不同的组织特性,之后根据所感受到的不同的组织特性,施加给机械臂最佳的作用力,这样就能够更有效的提高手术安全性;(4) 力触觉反馈系统与虚拟现实技术和远程外科技术联合研究,因为手术机器人的力触觉反馈系统使得医生获得了对病人的真实感觉,使远程外科培训更加有效,并能提高远程外科手术的效率和安全性;(5) 由于力触觉反馈的实现有赖于网络的传递,因而不可避免的会出现时间延迟,尤其是在进行远程手术时,这种时间延迟会更加明显,这使得外科医生在一定时间内失去了对机械臂的控制,对于外科手术来说,这种失控状态会导致致命的结果,因此要重点开发相应的控制系统,使得能够减少时间延迟,提高手术安全性;(6) 智能化是机器人发展的核心,然而也是机器人技术的难点,尽管目前人工智能技术已经获得了较大的突破,但相对于人的智能而言,机器人还十分笨拙,处理突发情况的应急能力差,因此在注重开发力触觉反馈系统同时,应当密切结合智能化的研究。总之,该领域的研究能够促进手术机器人的发展,提高机器人手术的精确性与安全性。但目前该研究还处于实验阶段,欲使其能够成功的运用于临床,仍需要外科医生与机器人工程师的共同努力。

参考文献

- [1] Keneki O, Makoto H. Robotic surgery for cancer[J]. *The Cancer Journal*, 2013, 19(2): 130-132.
- [2] Marescaux J, Smith MK, Folscher D, et al. Telerobotic laparoscopic cholecystectomy: initial clinical experience with 25 patients[J]. *Ann Surg* 2001, 234(1): 1-7.
- [3] Kobayashi Y, Moreira P, Liu Chao, et al. Haptic feedback control in medical robots through fractional viscoelastic tissue model[C] // 33rd Annual International Conference of the IEEE EMBS. Boston: 2011: 6074-6078.
- [4] Tavakoli M, Patel RV, Moallem M. Haptic interaction in robot-assisted endoscopic surgery: a sensorized end-effector[J]. *Int J Med Robot*, 2005, 1(2): 53-63.
- [5] King CH, Culjat MO, Franco ML, et al. Tactile feedback induces reduced grasping force in robot-assisted surgery[J]. *IEEE Transactions on Haptics*, 2009, 2(2): 103-110.
- [6] Okamura AM. Methods for haptic feedback in teleoperated robot-assisted surgery[J]. *Ind Rob*, 2004, 31(6): 499-508.
- [7] Burdea GC. Force and Touch Feedback for Virtual Reality[M].

- John Wiley & Sons Inc ,1996 : 3 - 4.
- [8] Wagner CR , Howe RD. Force feedback benefit depends on experience in multiple degree of freedom robotic surgery task [J]. IEEE Transactions on Robotics 2007 , **23**(6) : 1235 - 1240.
- [9] Dargahi J , Sedaghati R , Singh H , *et al.* Modeling and testing of an endoscopic piezoelectric-based tactile sensor [J]. Mechatronics , 2007 , **17**(8) : 462 - 467.
- [10] Bethea BT , Okamura A M , Kitagawa M , *et al.* Application of haptic feedback to robotic surgery [J]. J Laparoendosc Adv Surg Tech A , 2004 , **14**(3) : 191 - 195.
- [11] Wagner CR , Stylopoulos N , Jackson PG *et al.* The benefit of force feedback in surgery: Examination of blunt dissection [J]. Presence: Teleoperators and Virtual Environments 2007 , **16**(3) : 252 - 262.
- [12] Massie TH , Salisbury JK. The PHANTOM haptic interface: a device for probing virtual objects // Proceedings of the ASME Winter Annual Meeting , Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator System. Chicago: Kluwer , 1994: 295 - 300.
- [13] Yin Yingjie , Luo Zhiwei , Svinin M , *et al.* Hybrid control of multi-fingered robot hand for dexterous manipulation [C] // IEEE International conference on System , Man and Cybernetics. Washington , D. C: IEEE , 2003: 3639 - 3644.
- [14] Bouzit M , Popescu G , Burdea G , *et al.* The Rutgers masterII—new design force-feedback glove [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics , 2002 , **7**(2) : 256 - 263.
- [15] Sung GT , Gill IS. Robotic laparoscopic surgery: a comparison of the da Vinci and Zeus systems. [J]. Urology , 2001 , **58**(6) : 893 - 898.
- [16] Hashizume M , Shimada M , Tomikawa M , *et al.* Early experiences of endoscopic procedures in general surgery assisted by a computer-enhanced surgical system [J]. Surgical Endoscopy , 2002 , **16**(8) : 1187 - 1189.
- [17] Ortmaier T , Deml B , Kübler B , *et al.* Robot assisted force feedback surgery [M]. Berlin: Springer-Verlag , 2007: 361 - 379.
- [18] Wagner CR , Stylopoulos N , Howe RD. The role of force feedback in surgery: Analysis of blunt dissection [C] // 10th Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems. Orlando: IEEE , 2002: 73 - 79.
- [19] Reiley CE , Akinbiyi T , Burschka D , Effects of visual force feedback on robot-assisted surgical task performance [J]. The Journal of Thoracic and Cardiovascular Surgery 2008 , **135**(1) : 196 - 202.
- [20] Lee MH , Nicholls HR. Tactile sensing for mechatronics—a state of the art survey [J]. Mechatronics , 1999 , **9**(1) : 1 - 31.
- [21] Hidaka Y , Shiokawa Y , Tashiro K , *et al.* Development of an elastic tactile sensor emulating human fingers for tele-presentation systems [C] // IEEE Sensors 2009 Conference. Christchurch: IEEE 2009 : 1919 - 1922.
- [22] Su Zhe , Fishel JA , Yamamoto T , *et al.* Use of tactile feedback to control exploratory movements to characterize object compliance [J]. Frontiers in Neurobotics 2012 , **6**(7) : 1 - 9.
- [23] Leven J , Burschka D , Kumar R , *et al.* DaVinci canvas: a telerobotic surgical system with integrated , robot-assisted , laparoscopic ultrasound capability [J]. Med Image Comput Assist Interv , 2005 , **8**(1) : 811 - 818.
- [24] Hosseini M , Najarian S , Motaghinasab S , *et al.* Detection of tumours using a computational tactile sensing approach [J]. The International Journal of Medical Robotics and Computer Assisted Surgery , 2006 , **2**(4) : 333 - 340.
- [25] Dargahi J , Najarian S , Ramezani R. Graphical display of tactile sensing data with application in minimally invasive surgery [J]. Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering , 2007 , **32**: 151 - 155.
- [26] Miller , AP , Hammoud , Z , Son , JS , *et al.* Tactile imaging system for localizing lung nodules during video assisted thoroscopic surgery [C] // IEEE International Conference on Robotics and Automation. Roma: IEEE , 2007: 2996 - 3001.
- [27] Ottermo MV , Stavadahl O , Johansen TA. Design and performance of a prototype tactile shape display for minimally invasive surgery [J]. Haptics-E Journal , 2008 , **4**(4) : 1 - 13.
- [28] Howe RD , Peine WJ , Kontarinis DA , *et al.* Remote palpation technology for surgical applications [J]. IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine , 1995 , **14**(3) : 318 - 323.
- [29] King CH , Culjat M O , Franco M L , *et al.* Optimization of a pneumatic balloon tactile display for robot-assisted surgery based on human perception [J]. IEEE Trans Biomed Eng , 2008 , **55**(11) : 2593 - 2600.
- [30] Lee DH , Park J , Yun K. Three-axis tactile display using PDMS pneumatic actuator for robot-assisted surgery [C] // Proceedings of the 16th International Conference of Solid-State Sensors , Actuators and Microsystems. Beijing: IEEE , 出版者 , 2011: 2418 - 2421.
- [31] Yamamoto T , Vagvolgyi B , Balaji K , *et al.* Tissue property estimation and graphical display for teleoperated robot-assisted surgery [C] // Robotics and Automation. Kobe: 举办城市: 出版者 , IEEE , 2009: 4239 - 4245.