· 综述 ·

Clinical progresses of imaging-guided robot in minimally invasive treatment

ZHANG Xiaobo, XIAO Yueyong*
(Department of Radiology, Chinese PLA General Hospital, Beijing 100853, China)

[**Abstract**] Image-guided minimally invasive treatments play an increasingly important role in clinical works. With the progressing of science and technology, image-guided robot technology are mature gradually. It can accomplish parts of clinical minimally invasive treatments, and make up for the deficiencies in the process of surgery. Present situation and application in minimally invasive treatments of image-guided robot system were reviewed in this article.

[**Key words**] Robotic system; Imaging-guided; Minimally invasive treatment
DOI: 10.13929/j.1672-8475.201612034

影像引导机器人系统在微创治疗的临床应用进展

张啸波，肖越勇*
（中国人民解放军总医院放射科，北京　100853）

[**摘　要**] 影像引导的微创治疗技术在临床诊疗工作中发挥着越来越重要作用。随着科技进步，影像引导机器人技术逐步成熟，并可完成一定的临床微创治疗工作，弥补了手术过程中的诸多不足。本文主要对影像引导机器人系统的发展现状及其在微创治疗中应用进行综述。

[**关键词**] 机器人系统；影像引导；微创治疗
[**中图分类号**] R45；TP242　[**文献标识码**] A　[**文章编号**] 1672-8475(2017)05-0310-04

影像引导的微创治疗技术，以其创伤小、准确性高、费用低、并发症少等优点，已成为临床诊疗工作的重要组成部分[1-2]。随着科学技术的不断发展，医学机器人在影像引导微创治疗领域发挥着越来越重要的作用，逐渐弥补手术过程中存在的诸多不足。

1　医学机器人

医学机器人是指应用于诊断、治疗、康复、护理和功能辅助等诸多医学领域由计算机控制的机械设备[3]，是多学科研究和融合发展的成果[4]。随着机械电子技术由传统的机械学、传感技术，发展到与先进的微处理机结合成为新兴技术并迅猛发展，生物医学工程仪器领域中医学机器人技术也得到快速发展。医学机器人工程结合了各个学科最新研究成果，在帮助医师进行精确诊断的同时，也不断促使治疗手段更加微创化、可视化，有效规避一些医疗风险[5]。

1985 年，PUMA 560 机器人首次应用于神经外科领域[4]，之后随着医学领域对安全性、准确性、无菌性等一系列复杂而又苛刻的要求，医学专用机器人行业开始不断发展[6]。在我国，北京航空航天大学最早开展此方面研究，并在影像引导定位、虚拟手术规划与模拟、机器人辅助操作等方面取得显著成果[1,7]。北京理工大学[8]、清华大学[9-10]、哈尔滨工业大学[11-12]及沈阳自动化研究所[13]等单位也均在此领域取得一定成绩。应用在外科及介入医学领域的医学机器人根据其基本输入端的不同方式分为两类[6]，第一类医学机器人由外科医师进行操控，机器人则遵循医生的输入指令，通过机械臂代替或部分代替医师操作手术工具，完成各种手术动作，辅助进行外科治疗，例如达芬奇系

[**基金项目**] 国家自然科学基金(81271674)。
[**第一作者**] 张啸波(1987—)，男，安徽明光人，在读硕士，主治医师。研究方向：放射诊断与介入治疗。E-mail: zhangxiaobo301@126.com
[**通信作者**] 肖越勇，中国人民解放军总医院放射科，100853。
E-mail: xiaoyueyong@vip.sina.com
[**收稿日期**] 2016-12-28　[**修回日期**] 2017-02-09

统[14]。这类机器人能显著提高操作精度、减轻医师疲劳、减小患者创伤,但机器人系统完全听从操作医师指挥,本身无自主行为。第二类医学机器人是通过外接医学成像装置,如 CT[15]、超声[16]、MRI[17]等,以医学影像导航为基础,并在影像反馈基础上允许医师进行控制操作来完成手术,如影像引导机器人系统。这类机器人系统在特殊算法驱动下在有限的影像空间内运作[18],通过这些影像引导方式,机器人系统可在医师的指令和监视下执行任务,较第一类医学机器人具有更高的自主性[6]。

2 影像引导机器人系统

2.1 系统构成及研究内容 影像引导机器人系统在微创治疗领域的研究重点主要包含导航子系统和手术操作子系统[19]。导航子系统是将术中患者的影像数据,经过输出及匹配、计算机三维重建、图像显示等技术处理后对手术过程进行指导。这些影像数据被统一储存在同一个空间坐标系中,即虚拟空间坐标系。而手术操作子系统中的手术器械、靶区及患者体表的实际位置处于成像设备(所处的现实空间中即介入手术室)中,即实际空间坐标系。将这两个坐标系进行匹配,即可通过影像引导机器人系统实现术中实时操作。医生通过导航子系统输出的术中影像对操作子系统下达指令,而操作子系统在导航子系统(虚拟空间坐标系的位置数据)的帮助下解读指令,实时确定手术靶点、器械的空间位置及需要运动的方向和距离,最终使这些信息都以实际位置及动作形式反映在手术室的现实空间中[2-3,6]。医师既能随时了解患者二维或三维的组织结构影像,也能更安全、更精准地完成手术操作[20]。

1986 年,第 1 例影像引导机器人系统由美国 Roberts 引入,其将 CT 影像和手术显微镜结合起来,并运用超声定位引导手术,在临床上获得了成功[21]。随着技术发展,机器人系统逐渐成为影像引导微创治疗领域研究热点[22],但因其开发过程中存在各种技术挑战,故发展进程缓慢,未完全普及[6]。

2.2 成像设备 医学影像作为影像引导机器人的信息源、最终输出及交互资料形式,是系统运转的基础。目前临床中常采用的影像引导方式主要有 CT、超声、MRI 等[21]。不同影像引导方式各有其优劣势:CT 具有较高的空间及密度分辨率,能够快速、清晰地显示各部位解剖结构,特别是对于肺部病变的显像具有无法替代的优势[2],但其在成像过程中会对患者产生一定的辐射,并且其引导的肺部病变穿刺及治疗易受呼吸运动的影响[23-24];超声显示实质脏器及浅表器官的能力较强,并能实时监测诊疗过程,但对于气体、骨骼、深部组织结构等的显像效果较差;MRI 具有独特的功能成像能力,对检出病灶的敏感度较高且对一些超声和 CT 无法显示的特殊部位病灶成像优势明显,但 MR 成像速度较慢、对介入操作器械具有很强的限制性,故其在临床应用中有很大的局限性[25]。

在微创治疗中,仅超声和透视引导可实现术中实时成像,但超声空间及密度分辨率较低,成像范围有限,透视对患者及医师均会产生较大剂量的辐射。而 CT、MRI 引导微创治疗过程多数仍采用体表定位、传统步进式穿刺技术[23,26],医师需根据术前影像凭借个人经验进行操作,且缺乏实时动态影像导航,术中常会产生误差,需通过多次术中成像进行校正,不仅增加了患者的受辐射剂量,也会导致手术时间延长、并发症风险增加等诸多不利后果。随着临床微创治疗要求的日益提高,对术中影像引导的需求也越来越迫切。CT 作为应用范围较广的成像技术,逐渐成为影像引导机器人系统结合热点之一[2,21]。

2.3 影像引导机器人导航系统 目前,根据空间定位技术不同,机器人导航系统分为两类:一类是利用成像设备本身的空间坐标系进行物理定位,即直接将机械臂固定于成像设备或附近区域,并对其位置进行校准(机械定位);一类利用光学系统[27]、电磁传感器、超声传感器、深度相机等方式对器械、患者体表信息进行采集,反馈至系统后进行空间定位[28]。这两类技术的共同目的都是为了两个坐标系的配准。

机械定位系统最早应用于临床,早期采用的框架式机械定位系统体积庞大,严重影响医师操作,故目前多采用机械底座连接机械臂的定位方式,手术器械可固定在机械臂末端上进行操作,空间利用率高。光学定位系统通过探测固定在手术器械和患者体表的目标点的空间位移信息,将数据反馈至系统确定各目标点的空间位置,其精度可达 1 mm[27-28];电磁定位系统包括发射和接收装置,发射装置为三维线圈构成的发射磁场,接收装置是磁接收信号器,通过接收位于患者体表和穿刺针内的位置传感器的实时数据,计算其空间位置并将相对位置关系结合术中影像显示[29]。机械定位系统准确率高,但穿刺过程中易导致器械变形,且缺乏可视化图像引导;光学导航系统及电磁导航系统具有较高精度,但在穿刺过程中易受环境影响、稳定性较差[28],光学导航易受障碍物干扰致缺乏灵活性[27]。

2.4 影像引导机器人手术操作系统 影像引导机器

人手术操作系统由成像反馈设备、空间定位设备、机械操控装置及操作工作站构成。机器人手术操作系统在医师操作下完成一系列微创治疗手术操作。早期影像引导机器人手术操作系统均在机械定位系统上建立，直接将末端操作设备或具有一定自由度的机械臂[30]（通常为 3 个以上自由度[2,28]）连接于工作台，在实时超声或术前 CT、MRI 影像引导下进行手术操作[31]，如约翰霍普金斯大学开发的 AcuBot 机器人[32]。随着新型定位技术的不断产生及机械臂工艺的日趋改善，机器人手术操作系统也经历着从繁至简、从术前图像引导至虚拟实时图像引导、从单针手术到多针手术、从机械辅助至人工操控等诸多变化。发展进程中，操作系统机械臂的自由度最高达到 11 个[33-34]，使手术操作精度高于医师徒手操作。北京航空航天大学所开发的神经外科手术机器人[35]、清华大学与中国人民解放军总医院联合开发的肝脏肿瘤穿刺机器人[36]等也均已完成了相关的动物实验，取得一定成果。

3　现状分析与存在问题

经过 30 年的发展，影像引导机器人系统呈现出多样化的发展趋势，在微创治疗中发挥着越来越重要的作用，但是尚存在一些问题。

（1）各种影像引导方式各有优劣势，其适用靶器官不尽相同[1]。现阶段的影像引导机器人系统多采用单一成像模式进行导航[15]，并未将各类影像引导方式的优点相结合，若能采用多种成像相结合对手术机器人模型进行塑造，将大大提高机器人系统的效能及适用范围。

（2）经皮穿刺微创治疗手术中患者不自主运动及呼吸动度是术中不可控因素，因此术中患者的实时状态能否真实反映在机器人系统的导航图像中，是决定手术准确性及安全性的关键。现有的影像引导机器人系统除超声[37]、CT 透视引导[38]外均不能达到术中实时显像，故目前多数仍采用参照术前图像等多种虚拟实时方法结合呼吸门控等补偿算法来完成术中导航，虽然在一定程度上减小了穿刺误差，但并不能真实反映出术中患者、靶器官及穿刺器械的情况。

（3）我国临床工作中采用影像导航机器人系统只能协助完成导航定位等一部分微创诊疗工作，并不能真正意义上像外科手术机器人那样实现通过医师操控机械装置来完成手术。

综上所述，影像引导机器人系统为临床微创治疗工作的开展提供了一定支持，避免了因医师手术经验不同而产生的误差及并发症，提高了手术安全性及精确性，但是仍有一些问题亟待解决。

［参考文献］

［1］ 张肖，肖越勇．导航机器人系统在肿瘤微创治疗中的临床应用进展．中国介入影像与治疗学，2016，13(2)：111-113．

［2］ Hungr N, Fouard C, Robert A, et al. Interventional radiology robot for CT and MRI guided percutaneous interventions. Med Image Comput Comput Assist Interv, 2011, 14(pt 1): 137-144.

［3］ Schweikard A, Ernst F. Medical robotics. ［2016-12-01］. http://link.springer.com/book/10.1007/978-3-319-22891-4

［4］ Syed Amjad Ali．机器人手术中的力反馈．北京：北京理工大学，2014：1-148．

［5］ Tan A, Ashrafian H, Scott AJ, et al. Robotic surgery: Disruptive innovation or unfulfilled promise? A systematic review and meta-analysis of the first 30 years. Surg Endosc, 2016, 30(10): 4330-4352.

［6］ Dan S, Vigaru B, Petrisor D, et al. Robotic percutaneous interventions. ［2016-12-02］. https://www.researchgate.net/publication/227025160_Robotic_Percutaneous_Interventions

［7］ 邢宏光，王利红，张玉茹．神经外科手术机器人灵活性分析．北京航空航天大学学报，2004，30(4)：312-315．

［8］ 段星光，陈悦，于华涛．微创血管介入手术机器人控制系统与零位定位装置设计．机器人，2012，34(2)：129-136．

［9］ 宋健，丁辉，韩巍，等．一种用于双平面机器人辅助股骨颈骨折内固定手术的运动补偿方法．［2016-12-03］．http://www.paper.edu.cn/releasepaper/content/201511-705．

［10］ 刘少丽，陈恳，吴丹，等．医疗机器人大肿瘤多针穿刺手术规划．机器人，2013，35(6)：692-702．

［11］ 牛国君，潘博，付宜利．腹腔微创机器人远心定位机构优化设计．机器人，2016，38(3)：285-292．

［12］ 胡海燕，李伟达，李娟，等．结肠镜机器人结构设计与通过性研究．哈尔滨工程大学学报，2013，34(2)：233-239．

［13］ 赵希梅，游健康，刘浩，等．血管介入手术主从导管机器人滑模控制．沈阳工业大学学报，2015，37(1)：11-15．

［14］ Hagen ME, Curet MJ. Robotic surgery//The da Vinci surgical®, systems. ［2016-12-04］. http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-4-431-54853-92

［15］ Hungr N, Bricault I, Cinquin P, et al. Design and validation of a CT- and MRI-guided robot for percutaneous needle procedures. IEEE Transactions on Robotics, 2016, 132(4): 973-987.

［16］ Aalamifar F, Khurana R, Cheng A, et al. Enabling technologies for robot assisted ultrasound tomography. Int J Med Robot, 2017, Mar 30. ［Epub ahead of print］.

［17］ Franco E, Ristic M, Rea M, et al. Robot-assistant for MRI-guided liver ablation: A pilot study. Med Phys, 2016, 43(10): 5347.

［18］ Konietschke R, Ortmaier T, Weiss H, et al. Manipulability and accuracy measures for a medical robot in minimally invasive surgery. ［2016-12-05］. http://elib. dlr. de/elib @ dlr _

handbuch.pdf

[19] Huang W, Yang T, Yang LJ, et al. Image guided robotic assisted surgical training system using LabVIEW and CompactRIO. [2016-12-06]. https://www.nuh.com.sg/wbn/slot/u3088/Win.pdf

[20] Marcus HJ, Cundy TP, Nandi D, et al. Robot-assisted and fluoroscopy-guided pedicle screw placement: A systematic review. Eur Spine J, 2014,23(2):291-297.

[21] Roberts DW, Strobehn JW, Hatch JF, et al. A frameless stereotaxic integration of computerized tomographic imaging and the operating microscope. Neurosurg, 1986,65(4):545-549.

[22] Rizqie MQ, Yusof NM, Surakusumah RF, et al. Review on image guided lung biopsy. Singapore:Springer Singapore, 2015:41-56.

[23] 杨杰,肖越勇,张肖,等.电磁导航系统在 CT 引导下经皮穿刺肺活检术中的应用.中国介入影像与治疗学,2012,9(3):172-174.

[24] Chu CM, Yu SC. Robot-assisted navigation system for CT-guided percutaneous lung tumour procedures: Our initial experience in Hong Kong. Cancer Imaging, 2014,14(1):1.

[25] Kettenbach J, Kronreif G, Melzer A, et al. Ultrasound-, CT- and MR-Guided robot-assisted interventions, image processing in radiology. Heidelberg: Springer Berlin,2008:393-409.

[26] 张欣,肖越勇,张肖,等.CT 引导下经皮肺穿刺活检并发出血的预防和处理.中国介入影像与治疗学,2015,12(4):202-205.

[27] Jeon MC, Han MS, Lim HS, et al. The guidelines of laser on lung biopsy under CT guidance. Indian J Sci Technol, 2015,8(S1):488.

[28] 王小平,肖越勇.CT 导航技术及其临床应用研究进展.国际医学放射学杂志,2012,35(1):66-69.

[29] 陈永成,王碧秀.四维(4D)电磁导航系统临床应用的研究与改进.医疗装备,2013,26(8):5-7.

[30] Suligoj F, Jerbic B, Svaco M, et al. Medical applicability of a low-cost industrial robot arm guided with an optical tracking system. [2016-12-06]. https://www.researchgate.net/publication/283268954_Medical_applicability_of_a_low-cost_industrial_robot_arm_guided_with_an_optical_tracking_system

[31] Hungr N, Fouard C, Robert A, et al. Interventional radiology robot for CT and MRI guided percutaneous interventions. Med Image Comput Comput Assist Interv, 2011,14(Pt 1):137-144.,

[32] Stoianovici D, Cleary K, Patriciu A, et al. AcuBot: A robot for radiological interventions. http://research.vuse.vanderbilt.edu/srdesign/2003/group10/Electronic% 20References/acubot%20IEEE%202003%20robot%20ct.pdf

[33] 丑武胜,王田苗.面向脑外科微创手术的医疗机器人系统.机器人技术与应用,2003,4:18-21.

[34] 刘少丽,杨向东,冯涛,等.三维超声影像导航机器人系统的临床应用.中国生物医学工程学报,2009,28(6):878-884.

[35] Cleary KR. CT-directed robotic biopsy testbed: Motivation and concept. Bellingham: Proc Spie, 2001,4319:231-236.

[36] Cleary K, Nguyen C. State of the art in surgical robotics: Clinical applications and technology challenges. Comput Aided Surg, 2001,6(6):312-328.

[37] Kojcev R, Fuerst B, Zettinig O, et al. Dual-robot ultrasound-guided needle placement: Closing the planning-imaging-action loop. Int J Comput Assist Radiol Surg, 2016,11(6):1173-1181.

[38] Rotolo N, Floridi C, Imperatori A, et al. Comparison of cone-beam CT-guided and CT fluoroscopy-guided transthoracic needle biopsy of lung nodules. Eur Radiol, 2016,26(2):381-389.

更 正

《中国介入影像与治疗学》杂志 2017 年第 4 期 218～222 页,刊载的文章“Angiojet 机械血栓清除术中术后血红蛋白尿的原因分析”(作者:韩新强,王雪敏,马 超,等),方法中“Selinger”修改为“Seldinger”,“中心型血栓”修改为“中央型血栓”,“髂静脉及下肢深静脉”修改为“髂股静脉”;结果中第二段“累及部位”修改为“累及血管”;讨论中第二段“可利用导管腔内高速流动液体”中删除“可”,第三段中“大大减少对红细胞的机械性损伤”修改为“大大减少对血液中红细胞的机械性损伤”。

特此更正。

《中国介入影像与治疗学》编辑部

2017 年 4 月 25 日