

编者按 医学与工程技术的融合发展是未来医学的发展趋势之一，工程技术的发展、仪器设备的更新换代，将不断促进医学的发展。当前，机器人技术、大数据、5G 通信技术、新材料等正在加速推进医学工程进入“智慧医学”领域，而医疗机器人是医工融合的典型应用。医疗机器人研究领域涉及医学、生物学、计算机技术、网络通信技术和机械等多个学科，其在医学中的应用能使手术更加精准化、标准化、智能化、远程化，同时具有微创、安全、术后恢复快等优势，因而具有较大的临床应用空间。

作为国内第一本机器人外科学全科学术期刊，本刊不仅聚焦机器人手术新技术，也关注手术机器人研发领域新进展、新成果。本期特开设“医工融合—医疗机器人研发”，以期搭建一个探讨医工交叉学科融合发展的学术交流平台。

机器人辅助手术自主性技术的进展

郭靖¹，吴迪^{2,3}，成卓奇⁴，李长胜⁵，刘超⁶

(1. 广东工业大学自动化学院 广东 广州 510006; 2. 慕尼黑工业大学机械工程学院 德国 慕尼黑 85748; 3. 鲁汶大学机械工程系 比利时 鲁汶 3001; 4. 南丹麦大学 MIMI 研究院 丹麦 欧登塞 5230; 5. 北京理工大学机电学院 北京 100081; 6. 蒙彼利埃大学·法国国家科研中心 LIRMM 研究所 法国 蒙彼利埃 34095)

摘要 自 20 世纪 80 年代中期机器人技术被引入到手术室以来，医生和研究人员就一直寻求把更高智能化的技术与机器人系统进行结合。与常规手术相比，具有更高智能化的手术机器人系统往往需要具备更高的安全性和准确性，并能够通过配套的感知系统和当前所处的手术阶段来进行决策调整。虽然完全自主的手术机器人系统距真正的临床使用还有一定距离，但随着技术的积累和发展，具备半自主和部分医生参与决策的机器人智能技术会逐渐被引入到手术室，并为临床手术的开展提供了更好的平台。本文主要对当前机器人辅助手术及相关智能化技术的进展进行总结和展望。

关键词 手术机器人；自主式操作；人工智能

中图分类号 R608 **文献标识码** A **文章编号** 2096-7721 (2023) 04-0281-18

收稿日期：2021-08-24 录用日期：2022-05-26

Received Date: 2021-08-24 Accepted Date: 2022-05-26

基金项目：国家自然科学基金青年项目 (61803103)

Foundation Item: National Natural Science Foundation of China (61803103)

通讯作者：李长胜，Email: lics@bit.edu.cn

Corresponding Author: LI Changsheng, Email: lics@bit.edu.cn

引用格式：郭靖，吴迪，成卓奇，等. 机器人辅助手术自主性技术的进展 [J]. 机器人外科学杂志 (中英文)，2023，4 (4)：281-298.

Citation: GUO J, WU D, CHENG Z Q, et al. Progress of autonomous technology on robot-assisted surgery: a review [J]. Chinese Journal of Robotic Surgery, 2023, 4 (4): 281-298.

注：吴迪，原单位为德国慕尼黑工业大学机械工程学院，现单位为比利时鲁汶大学机械工程系

Progress of autonomous technology on robot-assisted surgery

GUO Jing¹, WU Di^{2,3}, CHENG Zhuoqi⁴, LI Changsheng⁵, LIU Chao⁶

(1. School of Automation, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China; 2. Technical University of Munich, Faculty of Mechanical Engineering, Munich 85748, Germany; 3. KU Leuven, Department of Mechanical Engineering, Leuven 3001, Belgium; 4. MIMI, Syddansk University, Odense 5230, Denmark; 5. School of Mechatronical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China; 6. LIRMM, University of Montpellier/French National Center for Scientific Research, Montpellier 34095, France)

Abstract Since the first introduction of robotic system into the operating room in the mid-1980s, surgeons and scientific researchers have been trying to integrate higher intelligent technologies with the robot-assisted surgery. Compared with traditional surgeries, the intelligent robotic surgical system should possess higher accuracy and safety, and be able to make decisions based on the results of matched sensing system and current surgical stage. Although fully autonomous robotic surgical systems are still far from real operating room, it is envisioned that the development of related technologies will enable the clinical application of semi-autonomous and partially surgeons-collaborated robotic systems, which would eventually lead to enhanced surgical platforms. In this paper, the current development of autonomy technologies in robot-assisted surgery was introduced and discussed.

Key words Surgical robot; Autonomous operation; Artificial intelligence

机器人自主性是指在执行任务中由智能机器人系统完成部分或全部任务, 常被用到工业、服务业等领域。在机器人辅助手术中, 合理地引入智能化技术也一直受到科研人员和临床医生的关注。机器人辅助手术操作必须保证安全和精准, 因此机器人辅助手术系统需要充分感知环境和患者状态, 并能够在不同情况下做出决策, 以适应环境的变化。在手术操作中, 有一部分比较容易实施的任务已经得到了应用, 如减少手部动作颤抖的工作; 而另外一些自主式操作, 如机器人辅助心脏消融或肿瘤切除等手术, 目前还需要在医生的控制下开展。当前人工智能的发展还远远无法达到完全自主式手术, 但是半自主式机器人以其自动执行重复性操作等优势, 有助于医生将注意力集中在重要的手术任务中, 从而确保和提高手术治疗效果^[1]。而与实现手术机器人智能化操作任务相关的研

究与技术, 如机器人设计与控制、医学图像处理集成、实时信号处理及人工智能和机器学习等, 往往涉及多个领域, 本文将会对这些技术分别进行介绍。

1 自主式手术机器人

1.1 自主式的范畴

作为自主式范畴的基础, 自动化技术在手术机器人中的应用范围较为广阔, 根据用户交互程度不同, 可以分为直接/双边遥操作、共享控制或者监督控制等。杨广中等人^[2]分析了医疗机器人的智能化程度, 并将医疗机器人分为非自主式、辅助性自主、任务自主、有条件自主、高度自主和完全自主 6 个等级 (分别对应 Level 0~5)。同时, 在 ISO/IEC 联合工作组的讨论和技术报告中也对自主式机器人技术进行了类似的 6 个等级的划分^[3]。

1.2 自主式手术机器人优势

自主式手术机器人可在手术过程中对一些手术任务进行自主式处理。外科手术医生擅长对患者的处理进行高水平的决策，但是不一定都具有执行高精度任务的能力，尤其是长时间操作后因疲惫而引起的手抖等因素，容易降低精细手术任务的稳定性。而过度劳累的医生往往会出现注意力不集中等问题，还可能导致人为决策失误等。机器人自主式操作则避免了此类问题的发生，能够保证手术治疗过程的标准和质量。

与传统人工手术相比，机器人手术系统能够提供更大的灵活性^[4]，如目前应用较为广泛的达芬奇机器人手术系统已经在临床得到验证^[5-6]；医学图像导航技术辅助的内窥镜机器人和导管机器人（Hansen 医疗系统）^[7]具备无需临床医生控制即可定位机器人末端来完成相关手术操作的潜在能力，不仅减少了医生学习相关操作所花费的时间^[8]，还可以使手术医生避免受到 X 光机等透视设备产生的辐射^[8-9]。

机器人辅助手术的自主性在医院收治和处理患者方面也具备一定的优势。与传统腹腔镜相比，达芬奇机器人开展手术过程中需要更多熟练的技术人员，如术中的助理人员等需要开展组织取回、缝合、抽吸及消毒等操作。机器人系统如果可以自主完成以上部分操作，则一方面可以提高手术效率，让医生投入到更多的手术中；另一方面可以重新调配熟练手术人员投入到医院其他区域，进一步提高医院运行效率。

2 手术机器人临床应用及相关平台

2.1 临床应用

目前投入临床应用的手术机器人根据应用场景可大致分为骨科、心血管（导管介入）、

神经外科和腹腔镜手术机器人等四大类。外科手术领域的自动化仍处于起步阶段，信息的采集分析、手术计划的制定和手术的执行三个重要阶段仍需大量的研究和积累^[10]。在临床应用中，如何根据病患术前的影像数据制定治疗方案，并根据患者组织结构特征进行匹配尤为重要。但是从术前到术中阶段，患者的组织结构可能会因生理运动或者移动而发生一定偏移，对术前和术中信息匹配造成极大困扰。机器人自主手术早期应用在骨科场景，是因为骨骼一般被认为是非可形变结构并且容易被操作。而针对软组织操作的机器人自主手术尚在研究阶段，主要由于软组织容易发生形变，需要在术中采用多种手段将制定的手术规划与实际软组织环境进行实时匹配与调整，而且相较于骨科手术，其涉及更多的周边血管和神经组织。随着技术的进一步发展，面向软组织的自主式手术机器人也会在更多的临床场景中得到测试和应用。

2.2 商用机器人系统

从 1994 年 AESOP1000 商业化开始，国内外至今已有多款外科手术机器人成功商业化（如图 1）。目前，部分商用手术机器人采用共享控制和监督自治的系统，已具备一定自主性。但是这类产品所执行的手术任务通常是常规性任务，并且需要医生在术前和术中的高度参与。这类产品将机器人在运算和机械化方面的优势与外科医生的场景理解和高层次智能相结合，因此在临床上得到了成功应用。1991 年在英国帝国理工大学开发完成的 Probot，属于最早在外科手术中得到应用的具备监督自主的手术机器人系统之一。该机器人设计用于经尿道镜前列腺切除术。在机器人手术过程中，医生可以通过控制紧急开关来停止机器人实施预料外的动作^[11-12]。

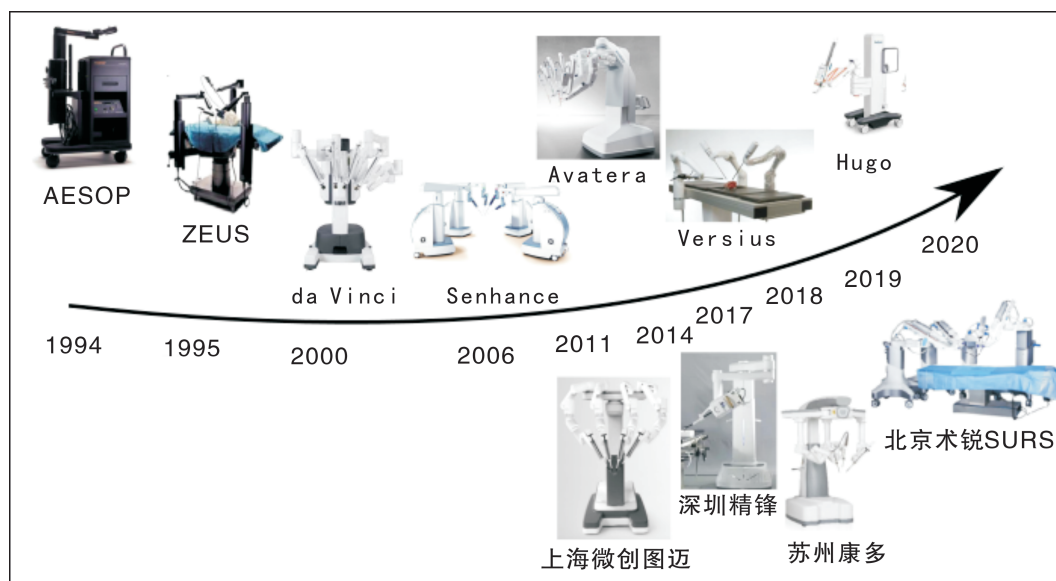


图1 部分国内外商用手术机器人系统

Figure 1 Some commercialized robotic surgical systems at home and abroad

Acrobot 系统于 1991 年由帝国理工学院研究开发,并由 Acrobot 有限公司负责其商业化^[13]。与 Probot 不同的是,Acrobot 系统在操作过程中可以选择医生直接控制系统,并且在手术过程中可以将机器人的运动限制在预先设计好的安全区域内^[13]。如果在手术过程中医生的操作超出该安全区域,则会受到一定阻力,从而避免进一步的错误操作^[14-15]。

ROBODOC 和 CyberKnife 系统是分别用于骨科和立体定向放射外科等临床应用的具有监督自治的手术机器人系统。这两款机器人均利用术前影像数据进行手术规划,并可在术中执行手术规划的过程中不受到外界干扰(紧急情况下除外)。这两款机器人的不同之处在于如何解决术前影像和术中患者之间的配准问题^[16]。ROBODOC 系统要求将患者固定,并利用术前影像来直接生成手术规划;而 CyberKnife 则使用实时的成像和跟踪技术来制定手术规划,因此可以解决由于患者呼吸运动引起的移位等问题^[17-18]。

近些年,随着国内政策的促进和临床需求的增加,国产手术机器人也迅猛发展。上海微创医疗机器人(集团)股份有限公司于 2014 年开始自主研发国产手术机器人系统,截至 2021 年,已经成为世界上第 2 个临床上适用的单孔术式腹腔镜手术机器人,同时已完成用于注册的全部临床试验入组工作,成为国内首个在泌尿外科领域完成多中心注册临床试验病例入组的国产腹腔镜手术机器人。成立于 2017 年的深圳精锋医疗科技股份有限公司则在多孔腹腔镜手术机器人系统、单孔腹腔镜手术机器人系统和超高清立体内窥镜 3 个技术方向上快速发展,均已在 2021 年进入临床试验阶段。苏州康多机器人有限公司成立于 2014 年,主要围绕腹腔镜微创手术机器人进行研发,目前正在进行动物实验和临床试验。北京术锐有限公司成立于 2014 年,依托新一代柔性连续体机械臂的核心技术,成为国内第一家能够完整、独立自主研发第 3 代微创手术机器人系统的企业,已完成大量动物实验,并正在开展临床注册。随着技术的完善

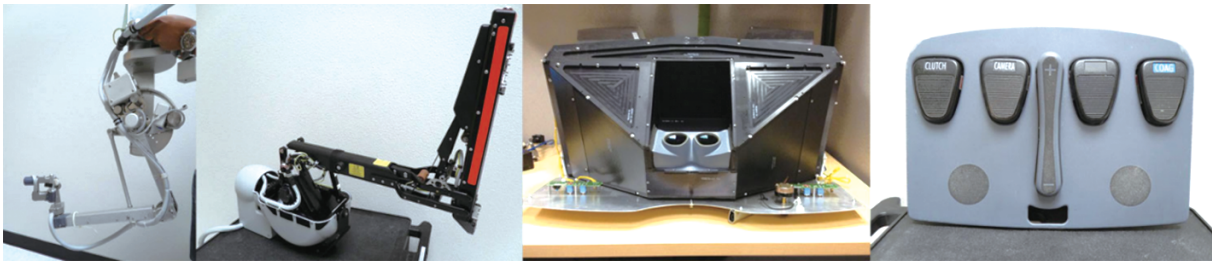


图2 “达芬奇”研究工具包

Figure 2 Da Vinci research kit

注：图片来源于 <https://www.intuitive-foundation.org/dvrk/>

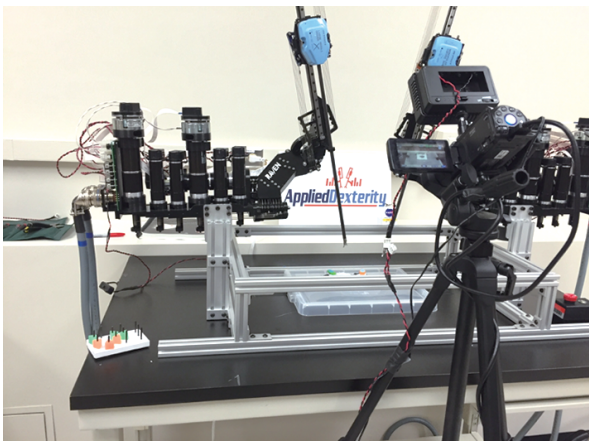


图3 Raven II 手术机器人平台

Figure 3 Raven II surgical robot platform

注：图片来源于 <http://applieddexterity.com/>



图4 MiroSurge 手术机器人平台

Figure 4 MiroSurge surgical robot platform

注：图片来源于 <https://www.dlr.de>

和临床的开展，目前国内外商用手术机器人将会在妇科、介入科、骨科、神经外科等临床场景逐渐得到广泛的应用。

2.3 科研机器人系统

外科手术自主化致力于提高系统的安全性和可靠性，并逐渐成为目前该领域的一个研究热点，吸引了众多研究人员的关注。开源的机器人系统则为促进该领域研究的发展提供了较好的平台。在真正进入临床试验之前，采用开源研究平台模拟手术过程并测试新的技术显得尤为重要。本节将介绍几种主流的开源手术机器人平台。

Da Vinci Research Kit（“达芬奇”研究工具包简称 dVRK，如图 2）是基于第 1 代达芬奇外科手术机器人的系统提供的开源控制系统^[19]，并由美国 Intuitive Surgical 公司提供的硬件来作为研究工具。该系统包括 2 个主段操作手（Master）、2 个进入患者身体的机械臂（Slave）和 1 个高分辨率的内窥镜以及脚踏板等设备。目前，全世界已有超过三十多家高校拥有该平台，并在此平台基础上开展了诸如清创术、组织切割等自主式手术任务的研究^[20]。

Raven II 手术机器人平台是由华盛顿大学开发的用于腹腔镜微创手术的开源机器人平台（如图 3），目前由 Applied Dexterity 公司负责其商业化管理。与 dVRK 不同，Raven II 系统的初衷是鼓励研究人员之间进行跨学科和跨方向的合作以提高平台的智能性与稳定性^[21]。Raven II

系统包括两个线驱动的腹腔镜臂，可以独立安装在手术部位的两侧，并实现在一个空间内 4 条机械臂协作完成手术。目前 Raven II 手术机器人系统已经在全世界近 18 个高校和研究机构完成安装，并被用于肿瘤消融^[22]和清创^[23]等手术任务的自主性研究。

德国航天航空中心（German Aerospace Center）研发的 MiroSurge 系统也是专用于腹腔镜微创手术的研究平台（如图 4）。该系统的大部分组件，包括位置传感器等都安装在机械手上。机械手整体重量较轻，可以安装在天花板甚至墙壁上，具有较好的适应性和通用性。尽管 MiroSurge 能够开展部分自主式手术操作，但是其研究团队目前尚未进行相关的尝试和推广。

除了以上科研平台外，国内外也有研究组利用工业或者协作机械臂来开展部分手术操作自主化的研究工作^[24-25]。这类机械臂在可操作性上为高层次自主式操作提供一定的支持，但很难被应用到临床。然而，其围绕具体临床需求所开发的算法等相关研究仍具有一定的意义和价值，并可以被灵活应用到不同机器人辅助手术平台上，从而进一步促进应用于不同临床场景的手术机器人自主式技术的发展，同时对机器人系统的结构、驱动、感知和控制也提出了更高的要求。

3 自主式机器人辅助手术相关技术

3.1 机构与驱动

3.1.1 手术机器人机构

手术机器人的机构主要包括远心（Remote Center of Motion, RCM）机构、串联机构、并联机构和连续体机构等几大类^[7, 26-28]。远心机构是指机构的输出构件可以围绕空间中的某个固定点转动的机构。典型的 RCM 机构包括双平

行四边形 RCM 机构和双同步带 RCM 机构。其中，双平行四边形 RCM 机构结构简单，刚度和精度较高，如“神刀华佗”微创手术机器人^[26]和“华鹊 I”型腹腔镜手术机器人都采用了该类型机构^[29]。双同步带 RCM 机构关节数和连杆数较少、结构紧凑，如 Da Vinci Surgical System^[30]和“Revo-I”^[31]微创手术机器人；串联机构由一系列结构简单的单自由度刚性关节串联而成，如天津大学的“妙手 S”机器人^[27]；并联机构是由多个并行链构成的闭环机构，具有移动惯量小和可精确控制的特点。LI C 等人^[28]以 3-PRS 并联机构为基础，结合超弹性镍钛合金杆研发了一种柔性并联机构，并应用于自然腔道手术机器人。沈桐等人^[4]通过两个解耦并联机构，提出了一种新型混联的腹腔镜手术机器人；连续体机构是由具有连续切向量曲线的材料构成的可执行机构，利用材料的弹性变形来传递运动和力，如卡内基·梅隆大学研发的用于心脏外科手术的微创手术机器人系统（HARP）^[15-16]已成功应用于心脏外膜手术，以及 XU K 等人^[7]研发的用于单孔腹腔镜手术的机器人系统（SURS）。

3.1.2 手术机器人驱动

手术机器人的驱动方式主要包括绳驱动、智能材料驱动、流体驱动和磁驱动 4 种^[8, 32-34]。绳驱动作为一种柔性传动，可以通过柔性套管和滑轮传递动力，具有质量轻和生物相容性好等优点，广泛应用于各类外科手术机器人。如用于腹腔镜手术的达芬奇 EndoWrist 微创手术机器人^[9]。智能材料驱动是通过智能材料的形变来驱动手术器械末端执行器。典型的智能材料，如形状记忆合金（Shape Memory Alloy, SMA）在温度改变时能够发生有规律的形状变化，通过调控温度实现对 SMA 的形状控制。基于 SMA 驱动，YUAN X 等人^[32]提出了腹腔镜微创手术机器人。流体驱动具有和绳驱动相同的特性。

由于流体具有高灵活性，流体通过导管可以驱动微创器械的末端执行器，如 Eastwood K 等人^[33]利用微型高纯度硅胶管和镀银编织网制成 10 个可收缩的流体驱动执行器。磁驱动通过使用移动的外部永磁体或电磁体驱动内部磁体，将动力和扭矩从外部单元通过腹壁传送到内部执行单元，如 Garbin K 等人^[34]提出了一种基于局部磁驱动（Local Magnetic Actuation, LMA）的单自由度腹腔镜组织牵开器。

3.2 感知与规划

机器人感知系统利用搭载的传感器将机器人内部状态信息及复杂手术环境从物理信号转变为有效数据信息。获取的信息在自主化手术中用于匹配术前规划、实现闭环反馈运动控制、判断系统状态传递、技能增强学习，以及其他相关手术记录和人机交互等。

对手术器械的精准定位是实现手术自主化及保证手术安全的必要条件。由于手术机器人的执行末端往往具有较大的柔顺性，通过逆运动学推导其空间位置很难保证自动化手术的精度要求，最常用的方式是通过内窥镜进行视觉图像处理来获取跟踪器械的位置^[35-36]。近年来，随着深度学习的迅速发展，大量的研究也在关注如何利用深度神经网络从图像中分割并估算器械位姿^[37-40]。此外，对设备的定位方法还包括通过加装激光发射器^[41]、射频标签^[42]以及磁定位^[43]等。

在手术过程中，软组织由于呼吸脉搏等生理运动以及与器械交互时会导致形变移位，对软组织进行实时定位是机器人自主手术操作的一个研究重点。目前研究的热点是通过视觉算法对内窥镜的视觉图像进行重构和位置估算^[44]。针对软组织的周期性运动，Moreira P 等人^[45]和 Bebek O 等人^[46]分别提出通过监测器械接触力

与利用超声波传感对目标软组织位置进行实时跟踪与控制补偿。

另外，手术机器人在执行任务的过程中需要对目标组织（例如病变组织）进行精确识别，相关的工作集中于开发触觉^[47-50]与视觉^[51]的感知技术。为增强目标组织的成像对比度，特别是血管与淋巴，术中荧光显像的技术方法正被普遍使用^[52]。除上述方法外，Cheng Z 等人^[53-54]提出通过测量生物组织电属性识别不同组织的方法，来验证对深层病变组织探测的可行性。

对手术机器人感知的相关研究工作还包括对传感信息进行整合，并提出更准确高效的测量方法。有研究提出了主动搜索（Active Search）的感知方法，将已测量的结果作为前提判断下一个测量点，实现对区域搜索过程的优化^[55-57]。此外，针对多通道传感信息的融合方法，LI Y 等人^[58]和 Ren H 等人^[59]提出了相关系统构架和算法设计。

3.3 控制与学习

3.3.1 控制方式

手术机器人控制的最简单形式是执行用户预先定义的轨迹或操作，且不会在术中更新计划。为安全起见，医生会全程监控这一过程的实施。这一控制形式通常需要一个精准的标定程序，因此常用于骨科手术或神经外科手术中^[60]。主从控制是现有腹腔镜手术机器人和腔内介入机器人中常用的控制方式^[61]。该控制方式由主手和从手两部分构成，医生通常位于主手端，而手术机器人的末端执行器作为从手端。从手端通常拥有较高的自由度，以实现复杂的手术操作。从手能够复现主手的动作，同时从手的位置信息及手术环境也会以视觉信息等反馈方式传递给医生^[62]。这一控制方式使医生能够远程完成手术，减轻电离辐射对于医生的伤害，降低

医生的体力消耗,也提高了手术的精度和安全性^[63]。在上述两种控制方式中,手术机器人没有提供任何辅助或导引,仅机械地执行或复现医生的命令,因此均属于直接非自主式(Level 0)的范畴^[2, 64]。

实现更高度度的自动化有助于辅助医生更好地开展手术。辅助控制是指机器人能够为医生提供主动的辅助。在辅助控制中,手术机器人并没有能力去自主执行任务,医生仍然持续控制系统,手术机器人仅提供辅助或导引,或是对医生的操作做出反应。辅助控制比直接控制拥有更高的自动化程度,其自动化程度介于辅助性自主(level 1)和任务自主(level 2)之间^[2]。

辅助控制中一个例子是主动运动补偿。手术效果会受到患者呼吸或心跳等周期运动的影响,所以如果能够主动补偿这些运动,将会减少手术机器人执行器和环境的不必要接触,从而提高手术的效果。Ruszkowski A等人^[65]针对冠状动脉旁路移植手术,基于达芬奇手术机器人实现了心跳运动的补偿,这一方法可以让医生在手术机器人的帮助下显著降低手术时长。Yuen S G等人^[66]对二尖瓣环的运动进行了建模,并据此模型设计了一款运动补偿装置以帮助医生实现在运动二尖瓣上的操作。

辅助控制中的另一个重要例子是主动约束。主动约束是由软件生成的约束,它可以通过视觉、力觉或听觉对操作者提供反馈来实现辅助控制,亦或是直接将手术机器人的运动范围限定在一个预先定义好的区域内部,或是引导机器人按照设定好的轨迹进行运动^[67]。主动约束可以在缝合等手术任务中提高手术效率^[68]。

随着图像处理和视觉传达相关技术的发展,视觉伺服也作为一种辅助控制技术被运用在外科手术中。在视觉伺服中,经由各种成像方式获

取手术器械及周围环境的信息,这些信息也会被进一步地用于手术机器人的闭环控制中。鉴于手术视觉伺服针对成像方式实时性要求,目前可采用的成像方式有超声图像、MRI、内窥镜图像、X线、CT等^[69]。目前一个代表性的相关研究是自主式内窥镜摄像头的运动,例如Krupa A等人^[70]利用视觉伺服实现了自动将手术器械置于内窥镜图像的中心。

3.3.2 自主式手术

尽管在骨科和神经外科手术机器人系统中,监督自主机器人手术的方式已经得到了验证和应用,但在腹腔镜手术机器人中的自主式操作仍处于探索和研究阶段。随着腹腔镜手术过程中有用数据的大量积累以及对自主式操作标准和分类的完善,未来自主式腹腔镜手术机器人程序有望得到一定的推进^[2, 17]。但是针对软组织或者具有生理运动特性器官操作环境下的自主式手术机器人技术尚存挑战,主要集中于信息获取和任务执行等方面。因此大量的研究工作正在围绕下一代认知型手术机器人开展,以期解决上述难题^[71]。以下将从信息获取和任务执行两方面进行简单阐述。

3.3.2.1 信息获取

视觉反馈是机器人辅助手术中最直接获取信息的来源,包括术野中组织、器官和手术器械等。对操作过程中视觉和运动信息的分割与理解将进一步推动机器人自主手术任务的实施,因此场景检测、位置确定和手术器械跟踪显得尤为重要^[72]。在场景检测中,通常使用的方法包括场景色差^[73]、几何特征配准^[74]、场景色质与纹理特征^[75]等。定位与跟踪的方法则可以采用基于标记物的方式,比如利用特殊设计的黑白混合模式的激光仪与光学标记物结合的方法^[70, 76]。而无标记物的方法也可以被用于定位和跟踪,比如根据机器人末端执行器的几何和在线动力

学模型数据获取末端姿态预估信息等^[77-78]。此外,还可以根据器械先验几何信息的概率算法^[79],运动学融合随机树方法^[80-81],基于形态特征的姿态预估方法^[82],以及基于深度学习的器械分割方法等^[83-84]。在面向软组织操作的机器人系统中,由于在动态环境下对软组织的视觉跟踪和辨识尚存在较多挑战,目前很难实现自主的机器人软组织操作手术^[85]。目前针对手术场景分割和器械跟踪的方法仍依赖于内窥镜反馈视觉信息^[86-87]。利用术前CT等数据可以先初步将组织器官进行图像分割,随后将获取的组织器官模型与内窥镜视野进行配准,并考虑器官的运动和变形,这是一种比较主流的方法,但是必须先获取术前影像数据。此外,还有利用图像处理 and 机器学习的方法来避免利用术前数据,比如简单的阈值融合法^[88]、同质色彩^[89]、基于梯度的方法^[90]和光流法等^[91]。而基于机器学习的分割方法则包括随机森林^[92]、支持向量机^[93]、卷积神经网络^[94]等。随着大量医学数据的公开使用,这些方法有望得到更普及的应用。除了分割针对组织的图像外,在手术过程中对手术器械的跟踪也很重要,一般定义为手术任务分割,这种方式被广泛应用于手术技能评估^[95-96]或者为实现自动化手术所构建的有限状态机^[20, 97]。早期的研究主要集中在监督手术任务分割^[98-100],但是需要提前获取预定义手术动作及相对应的手术场景。考虑到腹腔镜手术操作很难完全按照预定义模式开展及不可避免的手抖等因素,这种监督学习的方式很难有效实现术者动作识别。随着大量数据集的出现,手动标注更加难以实现且很难保证标注的有效性。近期有部分研究者开始关注非监督学习下的手术任务分割^[101-103],并发现该方法也能够很好地实现手术任务分割与重现^[103]。

3.3.2.2 手术任务规划与执行

缝合与打结是腹腔镜微创手术中最基本的两个任务,由于在体内软组织环境下开展,该动作比较耗时且对周边软组织具有一定的风险。在此过程中,由于线的灵活性、定位和拉张力及软组织变形和操作环境限制等因素,针对缝合与打结的自主执行任务非常具有挑战性。在微创手术中第1例机器人自主缝合术的研究中,EndoBot根据手工缝合操作进行观察,并提出一种自主机器人缝合算法,主要分为缝穿、穿线、打结和固定打结4个子任务^[104]。为了避免软组织变形及缝合针位置带来的不确定性,其他相关路径规划方法也被提出,如基于运动学分析和集合建模的缝穿任务^[105]、利用手工缝合数据统计模型^[106]以及序列凸规划^[107]等方法。针对上述操作中的非确定性问题,采用在线学习的方式进行调整也被研究人员所关注,主要包括:

- ①医生指引:由医生利用激光笔在所需要缝合点进行标记,然后采用视觉伺服控制的方式控制机器人自动寻找缝合点位置^[108];
- ②荧光影像:采用红外荧光图像检测和跟踪软组织变形,并自动地计算缝合规划^[109];
- ③软组织变形建模:采用缝合针刺入软组织引起变形矩阵的方式自适应地估测缝合轨迹等^[110]。另外,基于学习的方法也被用来进行手术子任务的动作规划^[1]。如利用EndoPAR机器人基于RNN的自主打结^[111]、基于示教学习的有用动作元分解^[112]、基于迭代学习控制方法^[113]及基于示教场景与测试场景的非结构配准方法等^[114]。除了缝合与打结外,还有其他的自主手术子任务也有开展相关研究,如清创术^[115]、组织切割^[20]、电外科^[116]、触诊^[117]、组织分离^[118]等。这些子任务有望用于机器人手术子任务的实施和规划,并通过一定的整合,最终促进未来自主式手术机器人功能的开发和完善。

4 存在挑战

4.1 技术问题

目前大部分自主式手术机器人相关技术仍然处在实验室研发阶段，可以预计当这些技术被真正运用在实际手术环境中时，将会面临更大的挑战。

当前大多数手术机器人系统仍然只有视觉反馈而缺乏力反馈，所以当手术器械与患者软组织的接触发生在屏幕区域之外时（即医生缺少视觉反馈时）将会非常危险。让手术机器人具备力感知和反馈的能力，能够让医生具有“临场感”，从而显著提高手术的安全性。但是目前为止，即使如著名的达芬奇手术机器人系统，外科医生也无法得到完整的触觉力反馈^[61]。力反馈的基础是力感知，力感知根据原理不同可以分为直接力感知和间接力感知。在直接力感知中，需要在手术机器人末端执行器附近安装力传感器，这一设计通常难以实现，因为其受到传感器大小、几何形状、布线、成本、生物兼容性以及可消毒性等因素的限制^[119]。而间接力感知虽然规避了上述困难，但是需要对机器人系统进行建模、标定等复杂工作，且容易导致力感知不够精确^[119-120]。此外，手术机器人的控制也是一大难点，而连续体手术机器人的建模及控制更是一大难题。连续体手术机器人可以通过自然腔道或小的创口进入人体，经由复杂的腔道完成特定任务，典型代表包括血管介入导管、肠镜、胃镜、支气管镜等等。但是由于驱动方式、制造材料等的非线性特性（如迟滞）^[121]，以及不确定的外部环境的影响，连续体手术机器人的建模、导航和控制也是亟待解决的问题。由于手术机器人的外部环境是人体组织，因此周围环境的不确定性也是一大挑战，例如无法避免的人体运动给手术带来的难度，

如呼吸、心跳等。目前很多研究者提出了不同的方法来实现运动补偿^[122]。其他值得关注的挑战还包括手术机器人部件的小型化设计^[123]、特殊环境下的机器人制造与驱动（如MRI兼容机器人^[124]）、成像技术与传感器信息融合等^[125]。

4.2 伦理问题和相关立法

近年来，机器人辅助手术的发展非常迅速，但是相关立法仍然比较欠缺。随着手术机器人自动化程度的不断提高，由此带来的伦理问题以及相关立法需求仍需关注。

在手术过程中，患者的安全始终处于首要地位。因此在机器人辅助手术普遍运用的情况下，如何保证患者安全是一个值得探讨的问题。在现阶段，由于大部分手术机器人仍然处在较低的自主化程度，没有决策的能力或权限，因此医生仍然是保护患者安全的第一责任人。即便是面对达到辅助性自主（Level 1）和任务自主（Level 2）的机器人系统，医生也需要在机器人执行任何行动前制定手术计划或校验由机器人制定的手术计划，并全程监督手术机器人的自主操作^[1]。除此以外，通过硬件或软件的方式，手术机器人可以进一步采取一些安全辅助措施，在医生监督的基础上，为患者安全提供“双保险”，如前文提到的主动运动约束^[67]，它可以将手术机器人的运动范围约束在一个事先计算好的安全区域内。

与自动驾驶汽车发生事故后的责任划分问题类似，具有一定自动化程度的手术机器人如果发生失误，其责任划分仍然很难界定^[126]。在现阶段，手术机器人仍然被认为是一个辅助性工具，而不是一个具备独立行为能力的个体，因此医生仍需要为机器人辅助手术中的操作失误负责^[127]。但随着手术机器人自动化程度的发展，机器人和医生谁该主导手术、谁该为手术负责是一个亟待讨论的问题。如果手术机器

人发生失误,那么可能承担责任的个体包括手术机器人的使用者(医生)、医院、机器人的设计和制造商以及保险公司^[1]。如何顺应手术机器人自动化的发展,开展相应的立法工作,明确所有环节参与者的责任仍需持续关注与思考。

5 展望

使手术机器人具备类似甚至超越人类外科医生的操作技能是手术机器人发展的终极目标,同时也是全自主机器人外科手术的必要条件。为了实现全自主机器人手术的目标,医生、机器人、人工智能等领域内的研究人员需要紧密配合,推进跨学科合作。为了达到这一目标,各业内领先的研究队伍和学者都在开展进一步的研究工作,所涉及的方向包含软件、硬件2个方面。

在软件方面,主要借助于近年来在人工智能领域取得的突破性科技成果,如机械学习、深度学习、计算机视觉、虚拟现实/增强现实等。所要提升的方面包括机器人对环境尤其是复杂环境的感知能力以及在此基础上学习人类医生手术技能的能力。现有的手术机器人感知能力仍以模拟和扩展人类操作所需要的信息为主,譬如三维视觉、力觉和触觉等。未来手术机器人的自主操作和决策要求对所有可能的操作环境都有精确的建模、检测及预判,这对现有感知能力提出了更高的要求。一些超出人类直观感受的感知能力也将成为必须,如通过术中操作区域的实时超声检测、浅层光学扫描、精确手术器械与环境定位等获取操作表面下肿瘤、血管、神经等的三维分布信息和计算手术器械与操作对象的相对位置从而自动规划手术路径和操作动作等。强大的感知能力是手术机器人学习人类医生手术技能的重要基础。外科医生的手术技能从本质上来讲可以分为较低层面的

操作技能(Operation/Motor Skills)和较高层面的认知技能(Cognition Skills)。操作技能主要涉及具体手术步骤的执行,其相对容易在多模态传感器的观测下进行建模和学习。认知技能主要涉及操作流程、术中决策、突发情况的处理等,其相较于操作技能更加难以建模和学习。未来手术机器人在这两个层面的技能学习能力将直接决定其在手术过程中自主性程度,比如在手术机器人操作技能方面的进展^[128-130]和在认知技能方面的进展^[131-133]等。

为适应软件的发展和需要,自主手术机器人在多模态传感器和灵巧操作器械方面对硬件也提出了更高的要求。在进一步提高传统传感器精确度的基础上,新型传感器的发展将使得手术机器人对操作环境有更加深入和全面的感知,如用于血管检测的光学相干断层扫描血管造影(Optical Coherence Tomography Angiography, OCTA)以及用于器械定位的GPS系统等。另外,对于外科医生的手术技能学习也需要尽可能多类型的传感器信息采集和融合,以及在此基础上通过人工智能技术对于多模态传感器数据的分析和学习。在手术操作层面,新型操作器械的发展将缓解控制器设计的负担并提高特定传统操作的效率,从而提高自主操作的可行性和可靠性。如目前处于研究热点的柔性手术操作器械使得通过复杂路径到达操作区域的微创或无创手术成为可能,将来机器人辅助的柔性手术器械辅以更加精确和全面的感知和规划功能将使得复杂环境下的手术操作更加高效。得益于计算机运算能力及机械设计精度的提高,在不影响操作准确性和灵巧性的情况下,机器人辅助器械可以实现小型化和紧凑化,从而拓宽其应用范围。此外,因为不受人手生理结构的限制,全自主机器人手术器械的机械结构及操控设计可以更加灵活,譬如机械

结构上采用多自由度、转并联混合结构等,操控上采用执行单元和动力单元分离(无线通信及无线动力传输)等方式。

参考文献

- [1] Yip M, Das N. Robot autonomy for surgery. In the encyclopedia of MEDICAL ROBOTICS: volume 1 minimally invasive surgical robotics[M]. New Jersey: World Scientific, 2019: 281–313.
- [2] Yang G Z, Cambias J, Cleary K, et al. Medical robotics—regulatory, ethical, and legal considerations for increasing levels of autonomy[J]. *Sci Robot*, 2017, 2(4): 8638.
- [3] Haidegger T. Autonomy for surgical robots: concepts and paradigms[J]. *IEEE Trans Med Robot Bionics*, 2019, 1(2): 65–76.
- [4] 沈桐, 宋成利, 徐兆红. 新型混联腹腔镜手术机器人的运动学建模与优化[J]. *机械科学与技术*, 2016, 35(1): 56–62.
- [5] Degani A, Choset H, Wolf A, et al. Highly articulated robotic probe for minimally invasive surgery[C]// *Proceedings 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2006. ICRA 2006. Piscataway: IEEE, 2006: 4167–4172.
- [6] Ota T, Degani A, Schwartzman D, et al. A highly articulated robotic surgical system for minimally invasive surgery[J]. *Ann Thorac Surg*, 2009, 87(4): 1253–1256.
- [7] XU K, ZHAO J R, FU M X. Development of the SJTU unfoldable robotic system (SURS) for single port laparoscopy[J]. *IEEE ASME Trans Mechatron*, 2014, 20(5): 2133–2145.
- [8] Kim Y H, Park Y J, In H K, et al. Design concept of hybrid instrument for laparoscopic surgery and its verification using scale model test[J]. *IEEE ASME Trans Mechatron*, 2015, 21(1): 142–153.
- [9] Breedveld P, Stassen H G, Meijer D W, et al. Manipulation in laparoscopic surgery: overview of impeding effects and supporting aids[J]. *J Laparoendosc Adv Surg Tech A*, 1999, 9(6): 469–480.
- [10] Manzey D, Strauss G, Trantakis C, et al. Automation in surgery: a systematic approach[J]. *Surg Technol Int*, 2009, PMID: 19579188.
- [11] Harris S J, Arambula-Cosio F, Mei Q, et al. The Probot—an active robot for prostate resection[J]. *Proc Inst Mech Eng H*, 1997, 211(4): 317–325.
- [12] Mei Q, Harris S J, Arambula-Cosio F, et al. PROBOT—a computer integrated prostatectomy system[C]// *In International Conference on Visualization in Biomedical Computing*. Berlin, Heidelberg: Springer, 1996: 581–590.
- [13] Rodriguez Y, Baena F, Davies B. Robotic surgery: from autonomous systems to intelligent tools[J]. *Robotica*, 2010, 28(2): 163–170.
- [14] Jakopec M, Harris S J, Baena y, et al. Acrobot: a “hands-on” robot for total knee replacement surgery[C]// *In 7th International Workshop on Advanced Motion Control. Proceedings (Cat. No. 02TH8623)*. Piscataway: IEEE, 2002: 116–120.
- [15] Hagag B, Abovitz R, Kang H, et al. RIO: Robotic-arm interactive orthopedic system MAKOpasty: user interactive haptic orthopedic robotics[M]. Boston, MA: Springer, 2011: 219–246.
- [16] Eggers G, Mühling J, Marmulla R. Image-to-patient registration techniques in head surgery[J]. *Int J Oral Maxillofac Surg*, 2006, 35(12): 1081–1095.
- [17] Moustiris G P, Hiridis S C, Deliparaschos K M, et al. Evolution of autonomous and semi-autonomous robotic surgical systems: a review of the literature[J]. *Int J Med Robot*, 2011, 7(4): 375–392.
- [18] Sayeh S, Wang J, Main W T, et al. Respiratory motion tracking for robotic radiosurgery. In *Treating tumors that move with respiration*[M]. Berlin, Heidelberg: Springer, 2007: 15–29.
- [19] Chen Z H, Deguet A, Taylor R, et al. An open-source hardware and software platform for telesurgical robotics research[J]. *SACAI Workshop at MICCAI 2013*, 2013. DOI: 10.54294/2dcog6.
- [20] Murali A, Sen S, Kehoe B, et al. Learning by observation for surgical subtasks: multilateral cutting of 3D viscoelastic and 2D orthotropic tissue phantoms[C]// *In 2015 IEEE International Conference on Robotics and*

- Automation (ICRA). Piscataway: IEEE. 2015: 1202–1209.
- [21] Hannaford B, Rosen J, Friedman D W, et al. Raven-II: an open platform for surgical robotics research[J]. IEEE Trans Biomed Eng, 2012, 60(4): 954–959.
- [22] Hu D, Gong Y, Hannaford B, et al. Semi-autonomous simulated brain tumor ablation with RAVEN II surgical robot using behavior tree[C]// In 2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Piscataway: IEEE, 2015: 3868–3875.
- [23] Kehoe B, Kahn G, Mahler J, et al. Autonomous multilateral debridement with the raven surgical robot[C]// In 2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA) . Piscataway: IEEE, 2014: 1432–1439.
- [24] Su H, Danioni A, Mira R M, et al. Experimental validation of manipulability optimization control of a 7-DoF serial manipulator for robot-assisted surgery[J]. Int J Med Robot, 2021, 17(1): 1–11.
- [25] Maris B, Tenga C, Vicario R, et al. Toward autonomous robotic prostate biopsy: a pilot study[J]. Int J Comput Assist Radiol Surg, 2021. DOI: 10.1007/s11548-021-02437-7.
- [26] TANG A, CAO Q, TAN H, et al. Motion Control of a Master-Slave Minimally Invasive Surgical Robot based on the Hand-Eye-Coordination. In Computer Aided Surgery[M]. Tokyo: Springer, 2016: 57–71.
- [27] LUO D, LIU Y, ZHU H, et al. The MicroHand S robotic-assisted versus Da Vinci robotic-assisted radical resection for patients with sigmoid colon cancer: a single-center retrospective study[J]. Surg Endosc, 2020, 34(8): 3368–3374.
- [28] LI C, GU X, XIAO X, et al. Flexible robot with variable stiffness in transoral surgery[J]. IEEE ASME Trans Mechatron, 2019, 25(1): 1–10.
- [29] FENG M, FU Y, PAN B, et al. Development of a medical robot system for minimally invasive surgery[J]. Int J Med Robot Comp, 2012, 8(1): 85–96.
- [30] Sun L W, Van Meer F, Bailly Y, et al. Design and development of a da vinci surgical system simulator[C]//2007 International Conference on Mechatronics and Automation. Piscataway: IEEE, 2007: 1050–1055.
- [31] Kim D K, Park D W, Rha K H. Robot-assisted partial nephrectomy with the REVO-I robot platform in porcine models[J]. Eur Urol, 2016, 69(3): 541–542.
- [32] YUAN X, LIU D, GONG M. Design and research on a shape memory alloy-actuated single-port laparoscopic surgical robot[C]// 2014 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. Piscataway: IEEE, 2014: 1654–1658.
- [33] Eastwood K, Looi T, Naguib H E, et al. Fluidic actuators for minimally invasive neurosurgical instruments[C]// In The Hamlyn Symposium on Medical Robotics. 2014: 75.
- [34] Garbin N, Di Natali C, Buzzi J, et al. Laparoscopic tissue retractor based on local magnetic actuation[J]. J Med Device, 2015, 9(1): 011005.
- [35] ZHANG L, YE M, CHAN P L, et al. Real-time surgical tool tracking and pose estimation using a hybrid cylindrical marker[J]. Int J Comput Assist Radiol Surg, 2017, 12(6): 921–930.
- [36] Pratt P, Jaeger A, Hughes-Hallett A, et al. Robust ultrasound probe tracking: initial clinical experiences during robot-assisted partial nephrectomy[J]. Int J Comput Assist Radiol Surg, 2015, 10(12): 1905–1913.
- [37] ZHAO Z, CAI T, CHANG F, et al. Real-time surgical instrument detection in robot-assisted surgery using a convolutional neural network cascade[J]. Healthc Technol Lett, 2019, 6(6): 275.
- [38] Zhao Z, Voros S, Weng Y, et al. Tracking-by-detection of surgical instruments in minimally invasive surgery via the convolutional neural network deep learning-based method[J]. Comput Assist Surg (Abingdon), 2017, 22(sup1): 26–35.
- [39] CLaina I, Rieke N, Rupprecht C, et al. Concurrent segmentation and localization for tracking of surgical instruments[C]// In International conference on medical image computing and computer-assisted intervention. Cham, Switzerland: Springer, 2017: 664–672.
- [40] Nwoye C I, Mutter D, Marescaux J, et al. Weakly supervised convolutional LSTM approach for tool tracking in laparoscopic videos[J]. Int J Comput Assist Radiol Surg, 2019, 14(6): 1059–1067.
- [41] Krupa A, Gangloff J, Doignon C, et al. Autonomous

- 3-D positioning of surgical instruments in robotized laparoscopic surgery using visual servoing[J]. *IEEE Trans Rob Autom*, 2003, 19(5): 842–853.
- [42] Kranzfelder M, Schneider A, Fiolka A, et al. Real-time instrument detection in minimally invasive surgery using radiofrequency identification technology[J]. *J Surg Res*, 2013, 185(2): 704–710.
- [43] Ha X T, Ourak M, Al-Ahmad O, et al. Robust catheter tracking by fusing electromagnetic tracking, fiber bragg grating and sparse fluoroscopic images[J]. *IEEE Sens J*, 2021, 21(20): 23422–23434.
- [44] Penza V, Ortiz J, Mattos L S, et al. Dense soft tissue 3D reconstruction refined with super-pixel segmentation for robotic abdominal surgery[J]. *Int J Comput Assist Radiol Surg*, 2016, 11(2): 197–206.
- [45] Moreira P, Zemiti N, Liu C, et al. Viscoelastic model based force control for soft tissue interaction and its application in physiological motion compensation[J]. *Comput Methods Programs Biomed*, 2014, 116(2): 52–67.
- [46] Bebek O, Cavusoglu M C. Intelligent control algorithms for robotic-assisted beating heart surgery[J]. *IEEE Trans Robot*, 2007, 23(3): 468–480.
- [47] Kim U, Lee D H, Yoon W J, et al. Force sensor integrated surgical forceps for minimally invasive robotic surgery[J]. *IEEE Trans Robot*, 2015, 31(5): 1214–1224.
- [48] Suzuki H, Masuda H, Hongo K, et al. Development and testing of force-sensing forceps using FBG for bilateral micro-operation system[J]. *IEEE Robot Autom Lett*, 2018, 3(4): 4281–4288.
- [49] Back J, Dasgupta P, Seneviratne L, et al. September. Feasibility study-novel optical soft tactile array sensing for minimally invasive surgery[C]// In 2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS) . Piscataway: IEEE, 2015: 1528–1533.
- [50] Trejos A L, Jayender J, Perri M T, et al. Robot-assisted tactile sensing for minimally invasive tumor localization[J]. *Int J Rob Res*, 2009, 28(9): 1118–1133.
- [51] Moccia S, De Momi E, Mattos, et al. Supervised tissue classification in optical images: towards new applications of surgical data science[M]. 2018, https://nearlab.polimi.it/wp-content/uploads/2019/02/thesis_moccia_compressed.pdf.
- [52] Dell'Oglio P, Meershoek P, Maurer T, et al. A DROP-IN gamma probe for robot-assisted radioguided surgery of lymph nodes during radical prostatectomy[J]. *Eur Urol*, 2021, 79(1): 124–132.
- [53] Cheng Z, Dall'Alba D, Foti S, et al. Design and integration of electrical bio-impedance sensing in surgical robotic tools for tissue identification and display[J]. *Front Robot AI*, 2019. DOI: 10.3389/frobt.2019.00055.
- [54] Cheng Z Q, Schwaner K L, Dall'Alba D, et al. An electrical bioimpedance scanning system for subsurface tissue detection in robot assisted minimally invasive surgery[J]. *IEEE Trans Biomed Eng*, 2021. DOI: 10.1109/TBME.2021.3091326.
- [55] Salman H, Ayvali E, Srivatsan R A, et al. Trajectory-optimized sensing for active search of tissue abnormalities in robotic surgery[C]// In 2018 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA) . Piscataway: IEEE, 2018: 5356–5363.
- [56] Garg A, Sen S, Kapadia R, et al. Tumor localization using automated palpation with gaussian process adaptive sampling[C]// In 2016 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE), Piscataway: IEEE, 2016: 194–200.
- [57] YAN Y, PAN J. Fast Localization and Segmentation of Tissue Abnormalities by Autonomous Robotic Palpation[J]. *IEEE Robot Autom Lett*, 2021, 6(2): 1707–1714.
- [58] Li Y, Richter F, Lu J, et al. Super: A surgical perception framework for endoscopic tissue manipulation with surgical robotics[J]. *IEEE Robot Autom Lett*, 2020, 5(2): 2294–2301.
- [59] Ren H, Rank D, Merdes M, et al. Multisensor data fusion in an integrated tracking system for endoscopic surgery[J]. *IEEE Trans Inf Technol Biomed*, 2011, 16(1): 106–111.
- [60] Rosen J, Hannaford B, Satava R M. Medical devices: surgical and image guided technologies[M]. Wiley, 2011: 301–306.
- [61] CHEN Y, WU Z, YANG B, et al. Review of surgical

- robotic systems for keyhole and endoscopic procedures: state of the art and perspectives[J]. *Front Med*, 2020, 14(4): 382–403.
- [62] Simorov A, Otte R S, Kopietz C M, et al. Review of surgical robotics user interface: what is the best way to control robotic surgery?[J]. *Surg Endosc*, 2012, 26(8): 2117–2125.
- [63] ZHAO Y, XING H, GUO S, et al. A novel noncontact detection method of surgeon's operation for a master-slave endovascular surgery robot[J]. *Med Biol Eng Comput*, 2020, 58(4): 871–885.
- [64] Attanasio A, Scaglioni B, De Momi E, et al. Autonomy in surgical robotics[J]. *Annu Rev Control Robot Auton Syst*, 2020, 4(1): 441–463.
- [65] Ruszkowski A, Mohareri O, Lichtenstein S, et al. On the feasibility of heart motion compensation on the daVinci® surgical robot for coronary artery bypass surgery: Implementation and user studies[C]// In 2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Piscataway: IEEE, 2015: 4432–4439.
- [66] Yuen S G, Kettler D T, Novotny P M, et al. Robotic motion compensation for beating heart intracardiac surgery[J]. *Int J Rob Res*, 2009, 28(10): 1355–1372.
- [67] 肖晶晶, 杨洋, 沈丽君, 等, 视网膜显微手术机器人的约束运动规划及仿真 [J]. *机器人*, 2018, 40(6): 870–877.
- [68] Fontanelli G A, Yang G Z and Siciliano B. A comparison of assistive methods for suturing in MIRS[C]// In 2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). Piscataway: IEEE, 2018: 4389–4395.
- [69] Azizian M, Khoshnam M, Najmaei N, et al. Visual servoing in medical robotics: a survey. Part I: endoscopic and direct vision imaging-techniques and applications[J]. *Int J Med Robot Comp*, 2014, 10(3): 263–274.
- [70] Krupa A, Gangloff J, Doignon C, et al. Autonomous 3-D positioning of surgical instruments in robotized laparoscopic surgery using visual servoing[J]. *IEEE Trans Rob Autom*, 2003, 19(5): 842–853.
- [71] Hoeckelmann M, Rudas I J, Fiorini P, et al. Current capabilities and development potential in surgical robotics[J]. *Int J Adv Robot Syst*, 2015, 12(5): 61.
- [72] M ü nzer B, Schoeffmann K, Böszörményi L. Content-based processing and analysis of endoscopic images and videos: a survey[J]. *Multimed Tools Appl*, 2018, 77(1): 1323–1362.
- [73] Wei G Q, Arbter K, Hirzinger G. Real-time visual servoing for laparoscopic surgery. Controlling robot motion with color image segmentation[J]. *IEEE Eng Med Biol Mag*, 1997, 16(1): 40–45.
- [74] Voros S, Long J A, Cinquin P. Automatic detection of instruments in laparoscopic images: a first step towards high-level command of robotic endoscopic holders[J]. *Int J Rob Res*, 2007, 26(11–12): 1173–1190.
- [75] Pezzementi Z, Voros S, Hager G D. Articulated object tracking by rendering consistent appearance parts[C]// In 2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway: IEEE, 2009: 3940–3947.
- [76] Nageotte F, Zanne P, Doignon C, et al. Visual servoing-based endoscopic path following for robot-assisted laparoscopic surgery[C]// In 2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Piscataway: IEEE, 2006: 2364–2369.
- [77] Frangi A F, Schnabel J A, Davatzikos C, et al. Medical image computing and computer assisted intervention-MICCAI 2018[M]. Cham, Switzerland: Springer, 2018. DOI: 10.1007/978-3-030-00931-1.
- [78] Ye M L, Zhang L, Giannarou S, et al. Real-time 3d tracking of articulated tools for robotic surgery[C]// In International Conference on Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention. Cham, Switzerland: Springer, 2016: 386–394.
- [79] Wolf R, Duchateau J, Cinquin P, et al. 3D tracking of laparoscopic instruments using statistical and geometric modeling[C]// In International Conference on Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention. Berlin, Heidelberg: Springer, 2011: 203–210.
- [80] Allan M, Ourselin S, Thompson S, et al. Toward detection and localization of instruments in minimally invasive surgery[J]. *IEEE Trans Biomed Eng*, 2012, 60(4): 1050–1058.
- [81] Reiter A, Allen P K, Zhao T. Appearance learning for

- 3D tracking of robotic surgical tools[J]. *Int J Rob Res*, 2014, 33(2): 342–356.
- [82] Reiter A, Goldman R E, Bajo A, et al. A learning algorithm for visual pose estimation of continuum robots[C]// In 2011 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Piscataway: IEEE, 2011: 2390–2396.
- [83] Garcia-Peraza-Herrera L C, Li W, Fidon L, et al. Toolnet: holistically-nested real-time segmentation of robotic surgical tools[C]// In 2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). Piscataway: IEEE, 2017: 5717–5722.
- [84] Shvets A A, Rakhlin A, Kalinin A A, et al. Automatic instrument segmentation in robot-assisted surgery using deep learning[C]// In 2018 17th IEEE International Conference on Machine Learning and Applications (ICMLA). Piscataway: IEEE, 2018: 624–628.
- [85] Shademan A, Decker R S, Opfermann J D, et al. Supervised autonomous robotic soft tissue surgery[J]. *Sci Transl Med*, 2016. DOI: 10.1126/scitranslmed.aad9398.
- [86] Nakamoto M, Ukimura O, Gill I S, et al. Realtime organ tracking for endoscopic augmented reality visualization using miniature wireless magnetic tracker[C]// In International Workshop on Medical Imaging and Virtual Reality. Berlin, Heidelberg: Springer, 2008: 359–366.
- [87] Nosrati M S, Peyrat J M, Abinahed J, et al. Efficient multi-organ segmentation in multi-view endoscopic videos using pre-operative priors[C]// In International Conference on Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention. Cham, Switzerland: Springer, 2014: 324–331.
- [88] Bilodeau G A, Shu Y, Cheriet F. Multistage graph-based segmentation of thoracoscopic images[J]. *Comput Med Imaging Graph*, 2006, 30(8): 437–446.
- [89] Tjoa M P, Krishnan S M, Kugean C, et al. Segmentation of clinical endoscopic image based on homogeneity and hue[C]// In 2001 Conference Proceedings of the 23rd Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. Piscataway: IEEE, 2001, 3: 2665–2668.
- [90] Figueiredo I N, Moreno J C, Prasath V S, et al. A segmentation model and application to endoscopic images[C]// In International Conference Image Analysis and Recognition. Berlin, Heidelberg: Springer, 2012: 164–171.
- [91] Wu S Q, Nakao M, Matsuda T. Continuous lung region segmentation from endoscopic images for intra-operative navigation[J]. *Comput Biol Med*, 2017. DOI: 10.1016/j.compbimed.2017.05.029.
- [92] Bodenstedt S, Wagner M, Mayer B, et al. Image-based laparoscopic bowel measurement[J]. *Int J Comput Assist Radiol Surg*, 2016, 11(3): 407–419.
- [93] Chhatkuli A, Bartoli A, Malti A, et al. Live image parsing in uterine laparoscopy[C]// In 2014 IEEE 11th international symposium on biomedical imaging (ISBI). Piscataway: IEEE, 2014: 1263–1266.
- [94] Moccia S, Foti S, Rossi S M, et al. FCNN-based segmentation of kidney vessels-Towards constraints definition for safe robot-assisted nephrectomy[C]// In Joint Workshop on New Technologies for Computer/ Robot Assisted Surgery. 2018: 1–2.
- [95] Rosen J, Hannaford B, Richards C G, et al. Markov modeling of minimally invasive surgery based on tool/tissue interaction and force/torque signatures for evaluating surgical skills[J]. *IEEE Trans Biomed Eng*, 2001, 48(5): 579–591.
- [96] Lin H C, Shafran I, Yuh D, et al. Towards automatic skill evaluation: detection and segmentation of robot-assisted surgical motions[J]. *Comput Aided Surg*, 2006, 11(5): 220–230.
- [97] Padoy N, Blum T, Ahmadi S A, et al. Statistical modeling and recognition of surgical workflow[J]. *Med Image Ana*, 2012, 16(3): 632–641.
- [98] Ahmadi N, Tao L, Sefati S, et al. A dataset and benchmarks for segmentation and recognition of gestures in robotic surgery[J]. *IEEE Trans Biomed Eng*, 2017, 64(9): 2025–2041.
- [99] Tao L, Elhamifar E, Khudanpur S, et al. Sparse hidden markov models for surgical gesture classification and skill evaluation[C]// In International conference on information processing in computer-assisted interventions. Heidelberg, Berlin: Springer, 2012: 167–177.
- [100] Zappella L, Béjar B, Hager G, et al. Surgical gesture

- classification from video and kinematic data[J]. *Med Image Ana*, 2013, 17(7): 732–745.
- [101] Despinoy F, Bouget D, Forestier G, et al. Unsupervised trajectory segmentation for surgical gesture recognition in robotic training[J]. *IEEE Trans Biomed Eng*, 2015, 63(6): 1280–1291.
- [102] Murali A, Garg A, Krishnan S, et al. Tsc-dl: Unsupervised trajectory segmentation of multi-modal surgical demonstrations with deep learning[C]// In 2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Piscataway: IEEE, 2016: 4150–4157.
- [103] Krishnan S, Garg A, Patil S, et al. Transition state clustering: unsupervised surgical trajectory segmentation for robot learning[J]. *Int J Rob Res*, 2017, 36(13–14): 1595–1618.
- [104] Kang H, Wen J T. Endobot: a robotic assistant in minimally invasive surgeries[C]// In Proceedings 2001 ICRA. IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No. 01CH37164). Piscataway: IEEE, 2001, 2: 2031–2036.
- [105] Nageotte F, Zanne P, Doignon C, et al. Stitching planning in laparoscopic surgery: towards robot-assisted suturing[J]. *Int J Med Robot*, 2009, 28(10): 1303–1321.
- [106] Jackson R C, Çavuşoğlu M C. Needle path planning for autonomous robotic surgical suturing[C]// In 2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway: IEEE, 2013: 1669–1675.
- [107] Sen S, Garg A, Gealy D V, et al. Automating multi-throw multilateral surgical suturing with a mechanical needle guide and sequential convex optimization[C]// In 2016 IEEE international conference on robotics and automation (ICRA). Piscataway: IEEE, 2016: 4178–4185.
- [108] Staub C, Osa T, Knoll A, et al. Automation of tissue piercing using circular needles and vision guidance for computer aided laparoscopic surgery[C]// In 2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway: IEEE, 2010: 4585–4590.
- [109] Leonard S, Wu K L, Kim Y, et al. Smart tissue anastomosis robot (STAR): a vision-guided robotics system for laparoscopic suturing[J]. *IEEE Trans Biomed Eng*, 2014, 61(4): 1305–1317.
- [110] ZHONG F X, WANG Y Q, WANG Z R, et al. Dual-arm robotic needle insertion with active tissue deformation for autonomous suturing[J]. *IEEE Robot Autom Lett*, 2019, 4(3): 2669–2676.
- [111] Mayer H, Gomez F, Wierstra D, et al. A system for robotic heart surgery that learns to tie knots using recurrent neural networks[J]. *Adv Robotics*, 2008, 22(13–14): 1521–1537.
- [112] Mayer H, Nagy I, Burschka D, et al. Automation of manual tasks for minimally invasive surgery[C]// In Fourth International Conference on Autonomic and Autonomous Systems (ICAS' 08). Piscataway: IEEE, 2008: 260–265.
- [113] Van Den Berg J, Miller S, Duckworth D, et al. Superhuman performance of surgical tasks by robots using iterative learning from human-guided demonstrations[C]// In 2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway: IEEE, 2010: 2074–2081.
- [114] Schulman J, Gupta A, Venkatesan S, et al. A case study of trajectory transfer through non-rigid registration for a simplified suturing scenario[C]// In 2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Piscataway: IEEE, 2013: 4111–4117.
- [115] Kehoe B, Kahn G, Mahler J, et al. Autonomous multilateral debridement with the raven surgical robot[C]// In 2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Piscataway: IEEE, 2014: 1432–1439.
- [116] Le H N, Opfermann J D, Kam M, et al. Semi-autonomous laparoscopic robotic electro-surgery with a novel 3D endoscope[C]// In 2018 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Piscataway: IEEE, 2018: 6637–6644.
- [117] Nichols K A, Okamura A M. Autonomous robotic palpation: Machine learning techniques to identify hard inclusions in soft tissues[C]// In 2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway: IEEE, 2013: 4384–4389.
- [118] Nagy D Á, Nagy T D, Elek R, et al. Ontology-based surgical subtask automation, automating blunt dissection[J]. *J Med Robot Res*, 2018. DOI: 10.1142/S2424905X18410052.
- [119] Marbú n A, Casals A, Fernández J, et al. Haptic

- feedback in surgical robotics: Still a challenge[C]// In ROBOT2013: First Iberian Robotics Conference. Cham, Switzerland: Springer. 2014: 245–253.
- [120] Van den Dobbelsteen J J, Lee R A, van Noorden M, et al. Indirect measurement of pinch and pull forces at the shaft of laparoscopic graspers[J]. Med Biol Eng Comput, 2012, 50(3): 215–221.
- [121] Wu D, Zhang Y, Ourak M, et al. Hysteresis modeling of robotic catheters based on long short-term memory network for improved environment reconstruction[J]. IEEE Robot Autom Lett, 2021, 6(2): 2106–2113.
- [122] Aviles A I, Casals A. On genetic algorithms optimization for heart motion compensation[C]// In ROBOT2013: First Iberian Robotics Conference. Cham, Switzerland: Springer. 2014, 252: 237–244.
- [123] Francis P, Eastwood K W, Bodani V, et al. Miniaturized instruments for the da Vinci research kit: design and implementation of custom continuum tools[J]. IEEE Robot Autom Mag, 2017, 24(2): 24–33.
- [124] Wu D, Li G, Patel N, et al. Remotely actuated needle driving device for mri-guided percutaneous interventions[C]// In 2019 International Symposium on Medical Robotics (ISMR) . Piscataway: IEEE, 2019: 1–7.
- [125] Ha X T, Ourak M, Al-Ahmad O, et al. Robust catheter tracking by fusing electromagnetic tracking, fiber bragg grating and sparse fluoroscopic images[J]. IEEE Sens J, 2021, 21(20): 23422–23434.
- [126] Graur F, Frunza M, Elisei R, et al. Ethics in Robotic Surgery and Telemedicine[C]// Pislă D, Ceccarelli M, Husty M, et al. In New Trends in Mechanism Science. Berlin: Springer, 2010: 457–465.
- [127] O’Sullivan S, Nevejans N, Allen C, et al. Legal, regulatory, and ethical frameworks for development of standards in artificial intelligence (AI) and autonomous robotic surgery[J]. Int J Med Robot Comp, 2019, 15(1): e1968.
- [128] YANG C, GUO S X, BAO X Q, et al. A vascular interventional surgical robot based on surgeon’s operating skills[J]. Med Biol Eng Comput, 2019, 57(9): 1999–2010.
- [129] Su H, Mariani A, Ovr S E, et al. Toward teaching by demonstration for robot-assisted minimally invasive surgery[J]. IEEE Trans Autom Sci Eng, 2021, 18(2): 484–494.
- [130] GUO S X, WANG Y X, ZHAO Y, et al. A surgeon’s operating skills-based non-interference operation detection method for novel vascular interventional surgery robot systems[J]. IEEE Sens J, 2019, 20(7): 3879–3891.
- [131] Shafiei S B, Hussein A A, Guru K A. Cognitive learning and its future in urology: surgical skills teaching and assessment[J]. Curr Opin Urol, 2017, 27(4): 342–347.
- [132] Kinross J M, Mason S E, Mylonas G, et al. Next-generation robotics in gastrointestinal surgery[J]. Nat Rev Gastroenterol Hepatol, 2020, 17(7): 430–440.
- [133] De Rossi G, Minelli M, Sozzi A, et al. Cognitive robotic architecture for semi-autonomous execution of manipulation tasks in a surgical environment[C]// In 2019 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). Piscataway: IEEE, 2019: 7827–7833.

欢迎投稿 欢迎订阅 欢迎指导