



达芬奇手术机器人系统技术分析

杜志江

哈尔滨工业大学机器人研究所

1 引言

自上世纪90年代起, 机器人辅助微创外科手术逐渐成为一个显著的发展趋势。以AESOP、ZUES和da Vinci (达芬奇) 系统为代表的外科手术机器人在临床上的成功应用引起了国内外医学界、科技界极大的兴趣。当前, 以达芬奇为代表的微创手术机器人逐渐成为国际机器人领域的前沿和研究热点^[1]。由Intuitive Surgical公司研发的达芬奇机器人2000年通过美国FDA认证, 是目前最先进的机器人手术辅助系统。该系统融合诸多新兴学科, 实现了外科手术微创化、智能化和数字化。截止2010年, 达芬奇微创手术机器人系统已在全世界装机1752台, 已经成功开展了25万多例机器人手术, 手术种类涵盖泌尿外科、妇产科、心脏外科、胸外科、肝胆外科、胃肠外科、耳鼻喉科等学科^[2]。

2 达芬奇手术系统

达芬奇手术系统主要由控制台系统、操作臂系统和成像系统组成, 其中控制台系统由计算机系统、手术操作监视器、操作手柄、脚踏板及其他输入输出设备组成。手术时外科医生可坐在远离手术台的控制台前, 借助三维视觉, 双手控制主操作手, 手部动作传达到机械臂及手术器械, 完成手术操作。这种主从控制的工作方式增加了操作的精确性和平稳性^[3], 其技术优势见表1。

达芬奇机器人的技术优势源自出色的设计, 下面就控制台系统、臂系统、系列化微器械、视觉系统的技术特点分别加以介绍。

表1 三种外科手术技术特点的比较^[4]

	传统开放手术	传统腹腔镜手术	daVinci 机器人手术
眼手协调	自然的眼手协调	眼手协调降低, 视觉范围和操作器械的手不在同一个方向。	图像和控制手柄在同一个方向, 符合自然的眼手协调。
手术控制	术者直接控制手术视野, 但不精细, 有时受限制。	术者须和持镜的助手配合, 才能看到自己想看的视野。	术者自行调整镜头, 直接看到想看的视野。
成像技术	直视三维立体图像, 但细微结构难以看清。	二维平面图像, 分辨率不够高, 图像易失真。	直视三维立体高清图像, 放大若干倍, 比人眼更清晰。
灵活性、准确	直观、灵活, 但有时达不到理想的精度。	器械只有4个自由度, 不如人手灵活、精确。	仿真手腕器械有7个自由度, 比人手更灵活、准确。
器械控制方式	直观的同向控制。	套管逆转器械的动作, 医生需反向操作器械。	器械完全模仿术者的动作, 直观的同向控制。
稳定性	人手存在自然的颤抖。	套管通过器械放大了人手的震颤。	控制器自动滤除震颤, 比人手稳定。
创伤性	创伤较大, 术后恢复慢。	微创, 术后恢复较快。	微创, 术后恢复较快。
安全性	常规的手术风险。	常规的手术风险外, 存在一些机械故障的可能。	常规的手术风险外, 机械故障的概率大于腹腔镜手术系统。
术者姿势	术者站立完成手术。	术者站立完成手术。	术者采取坐姿, 利于完成长时间、复杂的手术。

2.1 控制台系统技术特点

以达芬奇Si系统为例, 其控制台系统由计算机系统、手术操作监视器、三维图像观察器、操作手柄、脚踏板及其他输入输出设备组成。控制台系统同样拥



有计算机硬件及软件，其计算机硬件包括4~5个奔腾

许器械或摄像机绕其可旋转关节手动摆位。持镜臂可



控制台

左侧面板

右侧面板

图1 达芬奇Si控制台系统



臂系统

助力推车

图2 达芬奇Si臂系统

处理器，并留有扩展槽以备进一步升级（图1）。

主操作手采用串联结构，具有较大的工作空间和高度的灵活性。主操作手在所有方向上可实现自由独立运动，允许对器械和摄像机进行直观控制。Si系统还将原脚踏板的摄像机调焦功能转移到了主操作手上面，扩展了主操作手的功能。

随着达芬奇系统的升级换代，其脚踏控制器的形式随之发生变化，如Si系统去掉了调焦踏板，并对踏板进行了分层排布，以防止踏错。达芬奇脚踏实际上是一个具有切换功能的开关电源控制器，是通过切换控制线路来工作的。当踩下摄像机踏板时，主操作手与机械臂的控制线路断开，此时主操作手可以调整摄像机的位置，直接实现视野的上下左右移动及旋转。放开摄像机脚踏可使主操作手与机械臂重新获得连接。离合器脚踏板可以实现主操作手和控制端的脱离，在机械臂系统完全不动的情况下，主操作手可以移动到符合人机工程学的位置。达芬奇还有一个脚踏板控制电热系统，此外还有一个备用脚踏板。

达芬奇系统Si以前的版本还设置许多输入装置，如控制面板上设置的摄像机和内窥镜校准、主从动作比例、控制键、紧急停止键和待命键等。

2.2 臂系统技术特点

达芬奇Si臂系统具有三个固定于可移动基座的机械臂，底座通过线缆和高可靠性航空插头与控制台相连。中心机械臂是持镜臂，负责握持摄像机系统。其余机械臂是持械臂，负责握持特制外科手术器械。整个台车高为2m，长宽各接近1m，重544kg（各型达芬奇以上指标略有不同）。臂系统整车依靠具有自锁能力的脚轮支撑，可以实现手工移动；设有助力装置，在没有外部动力源的情况下，仍可提供5min左右的动力支持，见图2所示。

每个机械臂具有一系列多位置关节和可旋转的末端关节与套管相连，这样在安装时易于摆位，并保证可达手术要求的运动空间。手工进行机械臂摆位时需要借助一个控制开关以放松全部关节，放开此开关则机械臂将重新锁定在当前位置。每一个机械臂上有一个单独的键作为末端可旋转关节的离合器，允

以握持任一标准的12mm套管及通过此套管的摄像机。外周臂与特制的8mm套管固连。出于安全性和人机工学考虑，机械臂通过机械及电力来平衡。机械臂通常不必消毒处理，而是通过无菌塑料袋进行包装以实现与手术环境的隔离^[5]。

2.3 手术微器械技术特点

为适应手术多样化的需求，达芬奇专用外科手术器械呈现系列化的特点，如爪钳、针持、电凝钩。借助独特设计的快速接口，术中可以极为方便地对器械



图3 达芬奇 Endo Wrist系列化器械

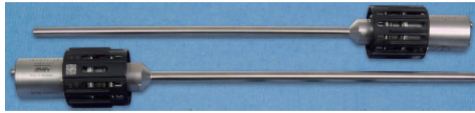
进行快速更换（图3）。微器械的关节由连接到其端部四个轮子的线路系统控制，后端采用四个小轮将来自电机的运动传递给钢丝，进而带动各关节运动。位置刷新率接近1500Hz，因此可有效去除机械震颤。

微器械尖端通过独特的机械设计实现6种自由度，可以通过活动器械本身提供第7种自由度（如切割或抓持）。器械具有可重复消毒的特性。但每个器械只能用10次，系统自动进行倒计时。微器械安装后，其剩余使用次数会显示在观察屏幕上^[6]。

2.4 视觉系统技术特点

视觉系统主要由三维内窥镜、摄像机及处理器、观察系统组成，分别位于持镜臂、成像系统和控制台上。特制的内窥镜具有两路透镜系统，有0°和30°两种。内窥镜在持镜臂上具有向上和向下两种安装方式，因此30°镜可以实现向上看和向下

看。通过放置于成像系统上的两台松下三晶片摄像机可以产生两个具有高清晰度和色彩还原性的高质量图像，并分别输出到控制台中的两台手术操作监视器。通过三维图像观察器，两路略带视差的图像分别被发送至术者的左右眼，从而



特制三维内窥镜



三维观察器

成像系统

图4 视觉系统

形成高质量的三维图像（图4）。内窥镜照明采用高质量冷光源，使光线亮度达到最优，术者可以通过调整摄像机深度和角度来获得需要的观察区域和放大倍数^[7]。

此外，成像系统上面还设置了外置观察监视器、二氧化碳充气机、光源及摄像机。外置监视器的信号来自两台摄像机中的一台，代表了左眼或者右眼的视觉。成像系统还包括两个图像同步器和一个聚焦控制器，以实现可控的高质量三维图像。

3 专利及技术分析

前述达芬奇系统的技术特点基本已经被其生产厂家进行了专利覆盖。据不完全统计，达芬奇系统申请相关专利700余项，专利保护点几乎覆盖全部技术。相关专利主要集中于从手机械臂设计技术、微小手术器械设计、主从控制策略、三维立体视觉、人机工效学等方面。统计数据表明，微创外科手术机器人技术的大部分专利申请的专利权人为Intuitive Surgical公司。由此可见，当前达芬奇系统在微创外科手术机器人技术领域的垄断地位十分稳固。

达芬奇系统面世以来不断进行着技术改进，比如语音对讲机、分支光缆、螺旋锁定套以及为肥胖病人准备的长套管等，另外更主要的是改进和发展了第四臂、有效的内窥镜心脏手术稳定器和超声器



达芬奇

达芬奇S

达芬奇Si

图5 各型达芬奇系统

表2 达芬奇机器人技术升级一览表

	达芬奇	达芬奇S	达芬奇Si
核心技术	人机工程学控制台；3D视觉(标准分辨率\最大10倍放大)；直觉操作(动作比例、震颤滤除)；微器械(7自由度、关节180°、回转540°、系列品种大于50种)。	人机工程学控制台；3D视觉；直觉操作；微器械。	人机工程学控制台；3D视觉；直觉操作；微器械。
技术升级		3D HD视觉(720P、数字缩放、高亮冷光源)；快捷、防呆设计(推车助力、高速光纤接头、器械快换)；实现跨象限工作(扩展了臂与微器械的运动空间和运动形式)。	3D HD视觉；快捷、防呆设计；实现跨象限工作；交互式视觉。
技术升级			双控制台能力(两个术者可以同时协调控制同一台手术)；增强的3D高清视觉(达到1080i)；控制台升级设计(全触摸屏、脚踏板升级、按钮开关升级等)；主手调焦(放弃脚踏调焦，扭动主手夹持器即可调焦)。

械等。达芬奇的技术改进主要是伴随着系统的升级换代进行的，先后出现了图5中的达芬奇、达芬奇S和达芬奇Si系统，比较大的技术改进见表2。

尽管达芬奇系统在不断进行改进，但是仍然存在一些尚未克服的技术缺陷，比如由于机械臂触手无传感器，因而机械手指无触觉反馈，术者手指无触觉感知，无法判断组织的质地、弹性、有无搏动等性质。另外体积重量过大，术前准备工作量较大等问题也比较突出。Intuitive Surgical公司也十分清楚达芬奇系统的技术缺陷，正在进行相关研究以争取技术突破，未来极有可能出现更为轻型化、小型化的具有力反馈的达芬奇系统。此外，Intuitive Surgical公司还在研发集成化程度非常高、体积非常微小的单孔手术机器人，未来极有可能取得一定的技术突破。

参考文献

- [1]杜志江,孙立宁,富历新. 医疗机器人发展概况综述. 机器人, 2003(02):182-187.
- [2]Taylor RH. A perspective on medical robotics. Proceedings of the Ieee 2006, 94(9):1652-1664.
- [3]微创外科手术机器人—da Vinci S手术系统. 微创医学, 2010(05):433-434.
- [4]稽武,李宁,黎介寿. 达芬奇手术机器人的应用进展. 东南国防医药, 2010(05):427-430.
- [5]Himpens J, Leman G, Cadiere G B. Telesurgical laparoscopic cholecystectomy. Surgical Endoscopy—Ultrasound and Interventional Techniques, 1998, 12(8):1091-1091.
- [6]Balllentyne G H, Jacques. Premier of robotic and telerobotic surgery, 2004:56-58.
- [7]王天珍,王兰兰. 达芬奇立体视觉研究. 生物物理学报, 2009, S1:277-278.