

立体定向技术发展史

汪业汉

【摘要】 自 1947 年以来,适用于人类的立体定向技术的发展共经历了 5 个阶段:有框架立体定向技术之初期(1947-1972 年)、有框架立体定向技术之计算机时代(1973 年至 20 世纪末)、无框架立体定向技术之神经外科导航时代(1987 年至今)、无框架立体定向技术之功能神经外科导航时代(20 世纪末期至今),以及立体定向技术与机器人时代(2000 年至今)。近 70 年间,随着人类科学技术水平的不断提高与进步,立体定向技术已覆盖神经外科乃至所有临床医学领域。

【关键词】 立体定位技术; 医学史; 综述

The history of stereotactic technology

WANG Ye-han

Department of Neurosurgery, Anhui Provincial Hospital Affiliated to Anhui Medical University; Anhui Provincial Stereotactic Neurosurgical Institute, Hefei 230001, Anhui, China (Email: 13305693587@189.cn)

【Abstract】 This paper takes an overall review on the development of stereotactic technology. During the year 1947-2015, the history of stereotactic technology can be divided into five stages: 1) frame-based and stereotactic technology (1947-1972); 2) frame - based and computer assisted stereotactic technology (1973-the end of 20th century); 3) frameless stereotactic technology or neuronavigation era (since 1987); 4) frameless stereotactic technology and functional neuronavigation era (since late 20th century); 5) stereotactic combined with robotic technology era (since 2000).

【Key words】 Stereotactic techniques; History of medicine; Review

立体定向技术自构思产生至广泛应用于临床已经历时 500 余年。近 70 年来,随着计算机应用的飞速发展,该项技术已从有框架立体定向逐步进步到无框架神经外科导航系统,尤其是经机器人无框架立体定向手术辅助系统(ROSA)施行脑深部病变手术,更是功能神经外科的大胆创新。目前,立体定向技术已从神经外科范畴进入到其他临床医学领域。

一、有框架立体定向技术之初期

早在 15 世纪末,意大利科学家和画家列奥纳多·达·芬奇[Leonardo Da Vinci(1452-1519 年)]即首次描绘了人类头骨形态及脑部不同交叉截面图,并提出了立体定向构思。由于当时科学技术水平不发达,难以将其设想转化为实际应用。直至 19 世纪 70 年代初(约 1873 年),德国神经生理学家

Dittmar^[1]才系统地在 *Berl Saechs Ges Wiss(Leipzig)* 上介绍了有框架立体定向装置的构造原理并付诸动物实验;十数年后(1889 年),俄国外科医师 Zernov^[2]根据 Dittmar 的原理首次研制出极坐标有框架立体定向装置,并利用颅骨表面解剖学标记对人类颅内结构进行了定位。

在有框架立体定向技术研究初期,以英国伦敦皇家医院 Robert H. Clarke 医生(1850-1926 年)和 Victor Horsley 医生(1857-1916 年)的贡献最为突出。他们根据几何学原理,于 1908 年完成了三维笛卡尔坐标系统的制作,并在机械师 James Swift 的协助下制造出首台立体定位仪(图 1)^[3-4],此即为有框架立体定位仪之雏形,之后出现的不同类型定位仪均是以此为基础的改良版。该项装置通过螺钉固定于颅骨表面,由定位框架(黄铜所制)和数根调节杆共同组成。Clarke 和 Horsley 以猴或猫作为实验对象,将框架固定于动物两耳孔和眼窝下缘使头部固定,以连接这些固定点的平面作为基准面,将与基准面相垂直的平面和头骨矢状面规定为 2 个垂直

doi: 10.3969/j.issn.1672-6731.2015.09.003

作者单位: 230001 合肥,安徽医科大学附属省立医院神经外科 安徽省脑立体定向神经外科研究所, Email: 13305693587@189.cn

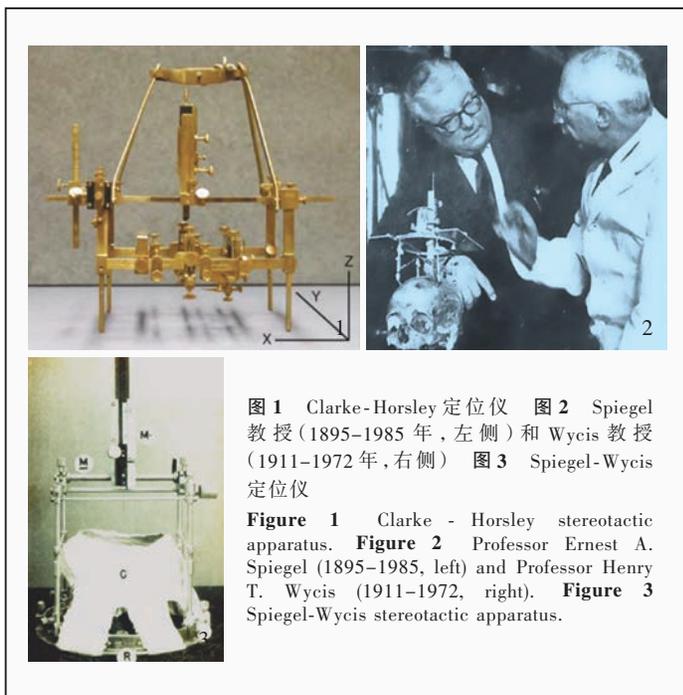


图1 Clarke-Horsley定位仪 图2 Spiegel教授(1895-1985年,左侧)和Wycis教授(1911-1972年,右侧) 图3 Spiegel-Wycis定位仪

Figure 1 Clarke - Horsley stereotactic apparatus. Figure 2 Professor Ernest A. Spiegel (1895-1985, left) and Professor Henry T. Wycis (1911-1972, right). Figure 3 Spiegel-Wycis stereotactic apparatus.

基准面,以这3个基准面作为坐标面即可逐一标注皮下所有解剖结构。第一次世界大战的爆发使他们的研发工作处于停顿状态。随着战争的结束,这项科学研究重新受到人们的重视,1947年奥地利神经病学家Ernest A. Spiegel(1895-1985年)和美国神经外科医生Henry T. Wycis(1911-1972年,图2)共同推出了适用于人类的有框架立体定位仪(图3)。至此,立体定向技术才再次进入神经外科手术研究者的视野。Spiegel和Wycis利用该套装置,通过脑室空气造影和高频电凝毁损术对一例亨廷顿病(HD)患者的颅内病灶成功进行定位并实施手术治疗,其研究结果发表在1947年的*Science*,文中首次提出了“立体定向技术”的概念^[5]。1952年,他们发表了有关《人脑立体定向图谱和方法学》的专著^[6],该书后来成为立体定向技术的经典工具书,从此确立了Spiegel和Wycis在立体定向技术领域的先驱者地位。

20世纪40年代末至70年代初(1947-1972年)CT尚未应用于临床,功能神经外科主要通过立体定位仪、X线靶点定位和毁损灶制作等技术开展微侵袭手术的临床探索。

1. 立体定位仪 在1947-1972年出现的有框架立体定位装置均是在笛卡尔坐标原理基础上改制而成,其基本类型分别为直角型(Spiegel-Wycis、Talairach和Schaltenbrand-Bailey)、球形(Kandel、Riechert)和圆柱形(Guiot-Gallingham、Asenjo-

Imbernón)坐标定位仪。这些定位仪均须安装在患者头部,手术过程中术者操作范围明显受限,且x、y、z坐标不能随意转动,故先后被淘汰。另有一些混合定位仪,多由直角坐标与球形坐标联合而成,其操作灵活方便,如Todd-Wells、Cooper、Leksell(A、B、D、G)、Riechert-Mundinger、Z-D、Laitinen或CRW/BRW等型定位仪。

2. 脑室造影X线定位法 X线定位法系通过X线透射物体,使三维立体解剖结构成像为二维平面图像。由于人体不同组织器官对X线的吸收率无明显差异,故而不能形成对比鲜明的影像图像,尤其是软组织完全不显影。为了能够准确定位颅内组织,最初采用的影像学定位方法为过滤性脑室空气造影,即以过滤的空气或氧气为对比剂,经腰椎穿刺注入蛛网膜下隙,借助气体的低密度影

以显示椎管或脑室系统之形态。20世纪60年代(1960年)后,我国上海华山医院(现复旦大学附属华山医院)神经外科蒋大介教授、安徽省立医院神经外科许建平教授先后推出JP-I~IV型和XZ-II~IV型立体定位仪^[7],这两种定位装置通过X线进行定位,采用气脑造影或脑室空气造影进行运动障碍性疾病或精神障碍的立体定向毁损术。由于,空气造影显影清晰度欠佳,难以分辨病变部位,故逐渐改进为Conray、Amipaque等的碘剂脑室造影方法。碘剂脑室造影法对比度明显、患者不良反应轻微且可清晰地显示脑室大小、前后连合和大脑中心“O”点位置。手术医师可通过X线透射并结合丘脑基底核解剖图谱[如德国Schaltenbrand和Wahren^[8]编著的《人脑立体定向图谱》和国内姚家庆等^[9]编著的《脑内一些灰质结构的立体定位解剖学》]给出的参考坐标值,推算出颅内结构的定位,再计算其投影至定位仪上的坐标值(x、y、z值),以指导手术。但是脑室造影X线定位误差较大,术中病灶切除不完全、术后并发症多,难以达到有效治疗目的。Spiegel和Wycis自1947年首次采用脑室空气造影和电凝毁损方法治疗一例亨廷顿病病例后^[5],还以该项技术治疗过数例锥体外系疾病和精神障碍病例^[10]。

3. 毁损灶制作 毁损灶的制作方法复杂多样,因此手术效果也不尽一致。具体制作方法包括Cooper-Bravo球囊扩张法(1958年)、Cooper的乙醇靶点毁损术(1959年)、Narabayashi油或蜡靶点毁损

术(1959年)、Obrador-Bertrand 白质切割器(1956-1961年),以及 Leksell 高频电凝法(1960年);其他毁损灶制作方法还有冷冻法、同位素法、超声聚焦法等,但手术疗效均未达到理想效果^[11]。理想的毁损灶制作标准为^[12]:(1)毁损方法确切有效。(2)毁损灶大小、形态可人工控制。(3)可灭活神经组织或病变组织,但对血管损伤极小且毁损灶与正常脑组织界限清晰。(4)毁损具有可逆性,出现神经功能失调后即刻停止手术操作可使神经功能恢复。(5)操作简便。1983年,美国麻省理工学院的 Eric R. Cosman 教授经对高频电凝技术的数年研究发现:毁损灶的形成、大小、范围和神经功能损伤程度与电极植入部位、输入功率、所产生的温度等因素密切相关,同时还与电极针粗细、裸露长短、靶点内停留时间有关,只要上述参数“组合”恰当,即可形成理想的毁损灶^[13]。Cosman 的研究结果为立体定向毁损术的规范化操作程序提供了参考标准,自此临床疗效有所提高。目前,仍有部分医疗中心将温控射频热凝毁损术作为治疗一些功能性疾病的首选方法之一。

二、有框架立体定向技术之计算机时代

1. CT 与立体定向技术相结合 自 1972 年 CT 扫描仪问世,立体定向技术迎来了计算机时代。计算机发明于 1947 年,1951 年实现商业化。1969 年,英国电子工程师 Godfrey N. Hounsfield(1919-2004 年)发明了计算机断层摄影装置即 CT,可通过计算机图像处理系统调节图像密度和灰度,从而鉴别人体正常组织和病变组织^[14]。该项成果在 1972 年的英国放射学会学术会议首次报告,次年发表于 *Br J Radiol*, Hounsfield 也因此获得 1979 年的诺贝尔医学奖。CT 的问世,使人类对疾病的诊断发生了“新理念”性改变,许多原来无法获知的疾病得以明确诊断并获及时治疗。20 世纪 70~80 年代,CT 与有框架立体定位仪结合首次应用于临床并获得成功^[15],此后临床上陆续开展了 CT 定位颅内血肿定向排空术^[16]、CT 辅助立体定向活检术^[17]等多种手术。与此同时,与 CT 相匹配的一些扫描设备和立体定位系统亦伴随而生,例如 CT 适配器^[18]、计算机辅助立体定向导航系统(CASS)^[19]等。这些辅助系统大大地推动了有框架立体定向技术跨入与 CT 相结合的新时代,并在功能神经外科推广应用。自此,关于 CT 辅助下有框架立体定向技术的研究日益受到关注,且文献报道逐渐增多。至 20 世纪 90 年代,安徽省

立医院神经外科汪业汉教授率先在我国推广 CT 辅助下有框架立体定向脑组织活检术,成功率超过 95%^[20]。立体定向活检术为炎症、脱髓鞘疾病、获得性免疫缺陷综合征(AIDS)等疾病的诊断提供了可靠依据,亦为患者获得早期治疗赢得了宝贵时间。目前,除了帕金森病(PD)等运动障碍性疾病外,CT 辅助下立体定向技术对抑郁症或强迫症等精神障碍、癫痫、难治性疼痛或胶质瘤等疾病亦具有明显的临床优势^[21-22]。

2. MRI 与立体定向技术相结合 通过 X 线和 CT 辅助下立体定向技术进行多种功能性疾病的治疗取得巨大成就后,各国学者又寻找到一种更佳的手术定位方法,即 MRI 扫描仪。1946 年,美国斯坦福大学 Felix Bloch 教授(1905-1983 年)和美国哈佛大学 Edward M. Purcell 教授(1912-1997 年)发现磁共振,1978 年英国阿伯丁大学生物医学物理与工程系 John R. Mallard 教授、Jennifer M. Hutchison 教授及美国科学家 Paul Lauterbur 教授(1929-2007 年)通过 MRI 扫描获得人类头部、胸部和腹部图像^[23],1980 年 MRI 实现商业化。Lauterbur 和英国科学家 Peter Mansfield(1933 年至今)也以此于 2003 年获得诺贝尔医学奖。1985 年后,于 MRI 导航下开展的功能神经外科手术类型逐渐增多,包括多种颅内肿瘤切除术(如脑深部或重要功能区胶质瘤和脑膜瘤等)^[24-25]、脑干肿瘤活检术^[26]。由于 MRI 扫描序列种类多且组合灵活,为颅内病变的定位拓展了思路,而且其定位方式安全、便捷、图像清晰、定位准确,因而逐步替代了 X 线和 CT 定位方法。我国该项技术的应用始于 1995 年,目前,大多数大型医疗中心均在神经外科基础上成立了立体定向技术相关亚专科,即立体定向/功能神经外科或功能神经外科。于 MRI 导航下进行的立体定向技术几乎涵盖了神经外科范畴所有疾病的治疗。

三、无框架立体定向技术之神经外科导航系统

CT 和 MRI 技术的进步,催生了神经外科智能化立体定向系统——神经导航系统(neuronavigation)的问世,即无框架立体定向外科(frameless stereotaxy)或影像学导向神经外科(image-guided neurosurgery)。王忠诚院士曾于 1998 年对神经外科导航系统作出了完整评价^[27]:神经外科导航系统是经典的立体定向技术与计算机医学影像学技术、人工智能技术、微侵袭手术相结合的产物,在虚拟数字化影像学技术与实际神经系统解剖结构之间建

立动态联系,达到术前虚拟手术规划、术中实时客观指导手术操作,以保证手术精确定位和最小化损伤,配合手术医师的丰富经验和娴熟技术,使神经外科禁区得到突破,产生巨大的社会和经济效益。他预言,不久的将来借助遥控技术,神经外科专家可于千里之外遥控机器人完成复杂的精细外科手术操作。

第一代神经外科导航系统由美国斯坦福大学医学院的 David W. Roberts 医生设计并制造^[28],于 1986 年应用于临床,此后 10 余年间,该项技术在全球范围内迅速推广。设计类型包括日本 Watanabe 和德国 Schlondroff 设计的关节臂神经导航系统(1987 年)^[29-30]、德国 Brainlab 公司生产的 VectorVision 光学数字化导航仪(1998 年)、美国 Medtronic 公司的 Stealthstation 电磁数字化导航仪(1986 年),其中以光学数字化导航仪多用。我国自 1998 年陆续有深圳安科高技术股份有限公司、上海复旦数字医疗科技有限公司生产的 ASA-610V 型和 Excelim-04 型神经外科手术导航系统在临床试用,但由于这两种型号的影像学融合处理技术尚不成熟,仍需改进。

四、无框架立体定向技术之功能神经外科导航系统

随着计算机技术的发展,神经导航不再是辅助切除病变的单一工具,而是同时具备术中保护神经功能、达到最小化损害,从而避免术后出现认知功能障碍等多种功能的神经导航系统。该系统的主要功能为:计算机图像处理 and 融合技术、持续追踪系统,以及神经导航工具和手术器械。三者结合,可提供多角度动态图像以替代有框架立体定向,手术医师可根据术中 MRI(iMRI)或其他设备进行虚拟实时互动,完成手术操作。首先,需要多模态影像学融合技术软件将人体形态信息的解剖图像(如 X 线、CT、MRI、MRA、MRV、DSA、CTA 等)和代谢功能信息图像[如 PET、SPECT、fMRI、扩散张量成像(DTI)、脑磁图(MEG)等]经过对位和配准使同一器官的多种信息融合在一起,达到信息互补;并于术前将上述原始解剖图像和功能图像数据导入神经导航工作站,通过对点融合,制定虚拟手术规划,再运用注册、配准技术将影像学坐标系统与实际病灶位置动态联合,提供术中实时持续定位。神经导航系统与手术显微镜的结合实现了显微镜下神经导航。若同时应用 iMRI,可纠正神经外科导航系统的

偏差,进行及时更新(图 4)。

1987 年,法国科学院院士 Alim-Louis Benabid 完成首例 MRI 导航下立体定向活检术^[25],1998 年美国哈佛大学医学院神经外科医师 Claudia Martin 报告首例 MRI 导航下胶质瘤切除术病例^[31]。我国最早开展 MRI 导航外科手术的医疗中心为复旦大学附属华山医院,其神经外科的周良辅和吴劲松教授于 2006 年在低场强 iMRI 导航下实施了国内首例颅内肿瘤切除术^[32];2009 年解放军总医院许百男教授完成首例颅内肿瘤患者的高场强神经外科导航系统手术^[33]。于高场强 MRI 导航下实施功能神经外科手术,需有手术医师、神经放射科医师、工程技术人员、麻醉师和护士的共同配合。随着神经导航系统的推广应用,位于脑深部或脑组织重要功能区的病变,可通过多模态影像学融合技术,配合高场强 iMRI 切除位于脑深部或脑组织重要功能区的病变,从而避免造成神经功能缺损^[34-38]。迄今为止,仅美国、欧洲、日本、中国等国家和地区的较大型医疗中心的神经外科配备有 MRI 导航系统。

五、立体定向技术与机器人

近年来,医用机器人(robot)的发展与应用颇受关注。“Robot”一词源于捷克语“强制劳动”。赋予其严格的定义较为困难,机器人是一种自动的、位置可控的定向装置,是具有编程能力的多功能机械手,可通过编程程序和特定的神经外科导航仪来执行各种任务。因此,机器人完全依赖于计算机技术,而立体定向技术的进步与计算机的发展息息相关,由于计算机技术和三维成像技术的发展,以及多模态影像学的融合,才能使计算机技术与手术直接整合,对外科手术进行规范化和虚拟化操作,最终实现传感机器人的辅助定位和手术操作。始于 20 世纪 80 年代的计算机和机器人辅助外科手术研究,经大量动物实验积累了相应的经验。其开创者之一的 Kuoh,于 1985 年率先将 PUMA260 机器人与有框架立体定位仪联合用于颅内穿刺活检术^[39];术中若 PUMA260 发生障碍即可重新安装立体定位仪,人工继续完成手术。1994 年,美国食品与药品管理局(FDA)批准在手术室内使用 AESOP 手术机器人(美国 Computer Motion 公司),2000 年批准 Da Vinci 手术机器人(美国 Intuitive Surgical 公司)用于泌尿科、肝胆外科和腹腔镜手术。此后,各种类型的机器人与立体定位仪相结合应用于神经外科。例如,加拿大 Calgary 大学与多家公司合作生产的

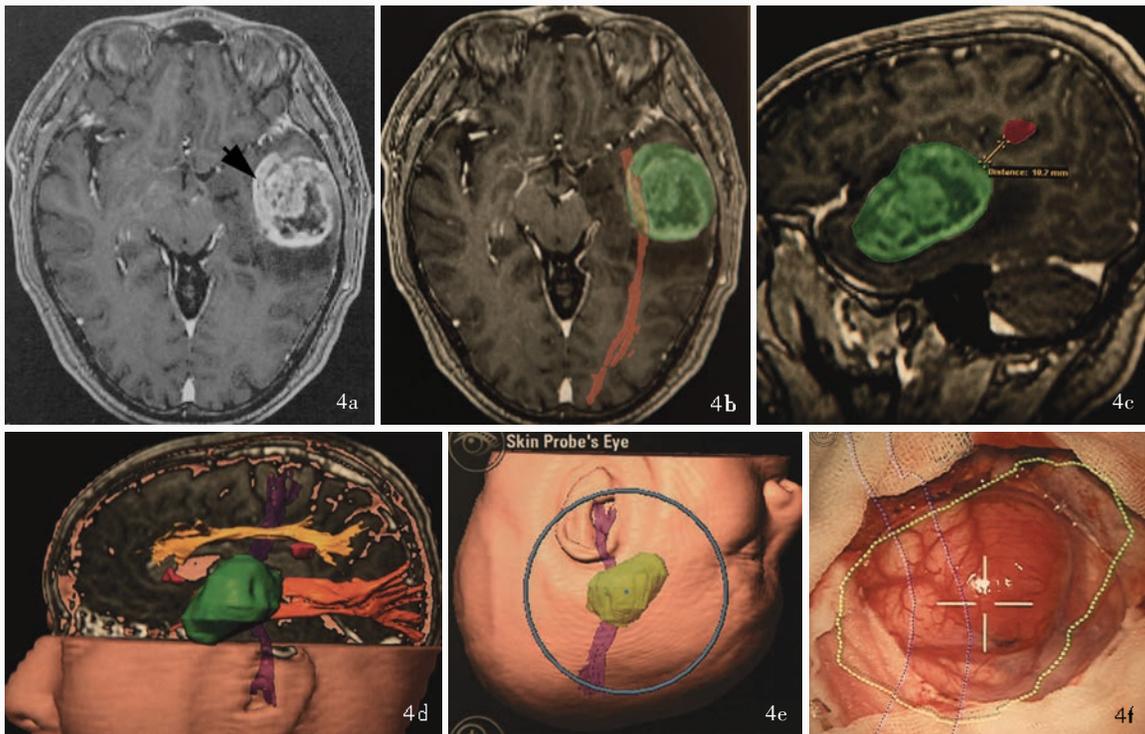


图 4 女性患者, 64 岁。临床诊断为多形性胶质母细胞瘤 (WHO IV 级)。多模态影像学融合技术所见 4a 横断面增强 T₁WI 显示左侧颞叶占位性病变 (箭头所示) 4b 横断面 T₁WI 显示肿瘤 (绿色区域所示) 与视辐射腹侧束的关系 4c 矢状位 T₁WI 显示肿瘤 (绿色区域所示) 与感觉性语言中枢的关系 4d 矢状位三维成像显示肿瘤 (绿色区域所示) 与周围组织结构的关系 4e 矢状位三维成像显示手术显微镜下视野 (蓝色圆圈内绿色区域示肿瘤) 4f 术中神经导航系统可见手术显微镜下图像 (黄色虚线示肿瘤范围, “十”字标记示肿瘤中心点)

Figure 4 A 64-year-old female patient was diagnosed as glioblastoma multiforme (WHO IV). Multimodal imaging fusion technology findings. Axial enhanced T₁WI showed space-occupying lesion in left temporal lobe (arrow indicates, Panel 4a). Axial T₁WI revealed the relationship between tumor (green area indicates) and ventral optic radiation tract (Panel 4b). Sagittal T₁WI revealed the relationship between tumor (green area indicates) and sensitive speech area (Panel 4c). Sagittal three-dimensional imaging revealed the relationship between tumor (green area indicates) and surrounding structures (Panel 4d). Sagittal three-dimensional imaging showed the field of view under microscope (green area within the blue circle indicating tumor, Panel 4e). Intraoperative neuronavigation showed screenshot under microscope (yellow dotted line indicating range of tumor and cross mark revealing the central point, Panel 4f).

NeuroArm 神经外科机器人和美国 Accuray 公司生产的 CyberKnife 机器人, 均适用于立体定向放射外科领域; 德国 Physik Instrumente 公司生产的 Hexapod 机器人可辅助完成脑和脊髓的无框架立体定向手术; 我国北京航空航天大学 and 海军总医院共同研制的计算机辅助外科机器人——CAS-R 系统也于 2000 年应用于临床。在上述类型中, 以 ROSA 机器人 (图 5) 颇受临床青睐。1987 年, Benabid 等^[40] 初次报告其采用 ROSA 机器人对帕金森病患者施行脑深部电极植入术之疗效, 至 1991 年又报告 140 例患者的手术经验^[41]。ROSA 机器人还可通过立体定向脑电图 (SEEG) 进行致痫灶定位, 我国有多所大型医疗中心自 2000 年以来即开展这项研究。例如, 海军总医院神经外科田增民等^[42] 采用 CAS-R-2 机器人施行立体定向毁损术以治疗帕金森病或颅咽管瘤穿

刺术辅助治疗多种疾病, 以及广东省三九脑科医院、首都医科大学三博脑科医院、解放军总医院等均通过 ROSA 机器人^[43] 进行功能性疾病立体定向脑深部电极植入术。

机器人的临床应用范围较为广泛, 凡可施行立体定向手术的患者均为 ROSA 机器人手术治疗的适应证^[44-46], 但迄今为止仅适用于以下情况: (1) 脑深部血肿定向排空术。(2) 脑脓肿引流术。(3) 颅内异物 (包括颅内弹片) 摘除术。(4) 脑深部病变活检术。(5) 颅内病变药物注射。(6) 神经核团毁损术和电极植入术。(7) 脑组织致痫灶定位等。其禁忌证主要包括^[47]: (1) 颅后窝、脑干病变, 以及富血管病变。(2) 存在严重出血倾向。(3) 存在严重心脏、肝脏、肾脏、肺部疾病和高血压。(4) 拒绝接受机器人手术者。应正确理解立体定向技术与机器人之间



图 5 ROSA 机器人

Figure 5 Neurosurgical ROSA system.

的关系,机器人辅助立体定向技术的研究刚刚起步,其研究目标并非是外科手术的自动化或试图替代外科医师,而是充分利用机器人的高技术开发出一种外科辅助装置或有效工具,以帮助外科医师进行精确定位或完成部分手术操作,从而提高外科手术的医疗水平。此外,通过临床试验,发现并非所有情况均需主动式(active)机器人辅助操作。事实上,在许多场合被动式(passive)机器人辅助操作系统因其简单、安全、易于操作等优点,更易被手术医师所接受。机器人辅助立体定向技术将作为一种空间定位或测量设备,或作为一种手术操作引导装置,或作为一种连接辅助设备用于某点二维图像在三维图像中的识别。机器人辅助立体定向技术的研究和应用前景十分广阔,随着该项技术的不断发展,越来越多的脑深部禁区将被打破,越来越多的颅内疾病将得到有效治疗。

为了促进立体定向和功能神经外科的发展,各国之间积极开展了学术交流,1961年国际立体定向脑手术研究会在美国费城成立,同年于同地召开了首次国际学术会议。该研究会于1973年在日本东京召开会议,重新命名为世界立体定向及功能神经外科学会(WSSFN)。1991年,亚洲-澳洲立体定向与功能神经外科学会(AASSFN)成立,2001年第四次AASSFN学术会议在中国北京召开。我国的立体定向和功能神经外科专业委员会于1997年在河北省承德市筹备、同年9月在安徽省合肥市正式成立;1986年《立体定向及功能性神经外科杂志》(现为《立体定向和功能神经外科杂志》)创刊;在1987-2015年期间,共召开10届全国立体定向和功能神经外科学术研讨会^[7]。上述学术团体的建立及

学术的交流对立体定向技术的发展起了巨大的推动作用。

参 考 文 献

- [1] Dittmar C. Ueber die Lage des sogenannten Gefaesszentrums in der Medulla oblongata. Berl Saechs Ges Wiss (Leipzig), 1873, 25:449-469.
- [2] Zernov DN. Encephalometer: device for estimation of parts of brain in human. Proc Soc Physicomed Moscow Univ, 1889, 2:70-80.
- [3] Clarke RH, Horsley V. On a method of investigating the deep ganglia and tracts of the central nervous system (cerebellum). Br Med J, 1906, 2:1799-1800.
- [4] Horsley V, Clark RH. The structure and function of the cerebellum examined by a new method. Brain, 1908, 31:45-125.
- [5] Spiegel EA, Wycis HT, Marks M, Lee AS. Stereotactic apparatus for operations on the human brain. Science, 1947, 106:349-350.
- [6] Lozano AM, Gildenberg PL, Tasker RR. Textbook of stereotactic and functional neurosurgery. 2nd ed. Berlin: Springer-Verlag, 2009: 26.
- [7] Wang YH, Wu CY, Liu YG, Meng FG. Stereotactic and functional neurosurgery in China. Li Ti Ding Xiang He Gong Neng Xing Shen Jing Wai Ke Za Zhi, 2004, 17:1-8. [汪业汉, 吴承远, 刘玉光, 孟凡刚. 中国立体定向和功能神经外科. 立体定向和功能神经外科杂志, 2004, 17:1-8.]
- [8] Schaltenbrand G, Wahren W. Atlas for stereotaxy of the human brain. 2nd ed. Stuttgart: Thieme, 1977: 25-54.
- [9] Yao JQ, Dai HR, Zhang ZK, Yang RH. Stereotaxic anatomy of some gray matter structures. Beijing: Science Press, 1983: 91-93. [姚家庆, 戴蕻茹, 张作楷, 杨仁惠. 脑内一些灰质结构的立体定位解剖学. 北京: 科学出版社, 1983: 91-93.]
- [10] Spiegel EA, Wycis HT. Pallidothalamotomy in chorea. Arch Neurol Psychiatry, 1950, 64:495-496.
- [11] Prog H. Progress in neurological surgery: v.5. New York: S. Karger, 1973: 24-30.
- [12] Prog H. Progress in neurological surgery: v.5. New York: S. Karger, 1973: 23-78.
- [13] Cosman ER, Nashold BS, Bedenbaugh P. Stereotactic radiofrequency lesion marking. Appl Neurophysiol, 1983, 46(1-4):160-166.
- [14] Hounsfield GN. Computerized transverse axial scanning (tomography). 1. Description of system. Br J Radiol, 1973, 46: 1016-1022.
- [15] Bergstrom M, Greite T. Stereotaxic computed tomography. AJR Am J Roentgenol, 1976, 127:167-170.
- [16] Backlund EO, Vonholst H. Controlled subtotal evacuation of intracerebral haematomas by stereotactic technique. Surg Neurol, 1978, 9:99-101.
- [17] Piskun WS, Stevens EA, Lamorgese JR, Paullus WS, Myers PW. A simplified method of CT assisted localization and biopsy of intracranial lesions. Surg Neurol, 1979, 11:413-417.
- [18] Brown RA, Roberts TS, Osborn AG. Stereotaxic frame and computer software for CT-directed neurosurgical localization. Invest Radiol, 1980, 15:308-312.
- [19] Kelly PJ, Kall BA, Goerss S, Earnest F 4th. Computer-assisted stereotaxic laser resection of intra-axial brain neoplasms. J Neurosurg, 1986, 64:427-439.
- [20] Wang YH, Xu JP, Dong YJ, Cheng LZ, Fu XM, Zhou YN, Chen DC, Cui JG. CT-oriented brain tumor biopsy (38 cases report). Li Ti Ding Xiang Ji Gong Neng Xing Shen Jing Wai Ke Za Zhi,

- 1990, 3:11-13.[汪业汉, 许建平, 董以健, 成良正, 付先明, 周一农, 陈东潮, 崔建国. CT 导向下脑肿瘤活检(附 38 例报告). 立体定向及功能性神经外科杂志, 1990, 3:11-13.]
- [21] Li XG, Gu YJ, Zhang C. CT-brain stereotactic apparatus and progress of its clinical application. *Li Ti Ding Xiang Ji Gong Neng Xing Shen Jing Wai Ke Za Zhi*, 1990, 3:35-41.[李新钢, 顾跃捷, 张成. CT-脑立体定向仪及其临床应用进展. 立体定向及功能性神经外科杂志, 1990, 3:35-41.]
- [22] Zhao YL, Wang ZC, Zhao JZ, Zhang JT, Yu CJ, Zhang MZ, Wang CY, Gao ZX. Clinical use of a neuronavigation system: results of 55 cases. *Zhonghua Shen Jing Wai Ke Za Zhi*, 1998, 14:198-201.[赵元立, 王忠诚, 赵继宗, 张俊廷, 于春江, 张懋植, 王彩云, 高之宪. 导航系统在神经外科显微手术中的应用. 中华神经外科杂志, 1998, 14:198-201.]
- [23] Gao YG, Cai YQ, Cai ZL. Magnetic resonance imaging diagnostics. Beijing: People's Military Medical Press, 1992: 3. [高元桂, 蔡幼铨, 蔡祖龙. 磁共振成像诊断学. 北京: 人民军医出版社, 1992: 3.]
- [24] Kelly PJ, Kall BA, Goerss S, Earnest F. Present and future developments of stereotactic technology. *Appl Neurophysiol*, 1985, 48(1-6):1-6.
- [25] Mercier C, Le Bas JF, Benabid AL, Pasquier B. MRI contribution to the stereotactic management of cerebral tumours. *Appl Neurophysiol*, 1987, 50(1-6):155-158.
- [26] Bradford R, Thomas DG, Bydder GM. MRI-directed stereotactic biopsy of cerebral lesions. *Acta Neurochir Suppl (Wien)*, 1987, 39:25-27.
- [27] Wang ZC. Application status and development prospect of neuronavigation. *Zhonghua Shen Jing Wai Ke Za Zhi*, 1998, 14: 197.[王忠诚. 神经导航系统的应用现状与发展前景. 中华神经外科杂志, 1998, 14:197.]
- [28] Roberts DW, Strohbehn JW, Hatch JF, Murray W, Kettenberger H. A frameless stereotaxic integration of computerized tomography imaging and the operating microscope. *J Neurosurg*, 1986, 65:545-549.
- [29] Watanabe E, Watanabe T, Manaka S, Mayanagi Y, Takakura K. Three-dimensional digitizer (Neuronavigator): new equipment for computed tomography guided stereotactic surgery. *Surg Neurol*, 1987, 27:543-547.
- [30] Zhang X, Wang SS. Computer-assisted operative neurosurgery. Beijing: People's Medical Publishing House, 2013: 12.[章翔, 王守森. 计算机辅助神经外科手术学. 北京: 人民卫生出版社, 2013: 12.]
- [31] Martin C, Alexander EI 3rd, Wong T, Schwartz R, Jolesz F, Black PM. Surgical treatment of low - grade gliomas in the intraoperative magnetic resonance imager. *Neurosurg Focus*, 1998, 4:E8.
- [32] Wu JS, Mao Y, Yao CJ, Zhuang DX, Zhou LF. Preliminary application of intraoperative magnetic resonance imaging in glioma surgery: experience with 61 cases. *Zhongguo Wei Qin Xi Shen Jing Wai Ke Za Zhi*, 2007, 12:105-109.[吴劲松, 毛颖, 姚成军, 庄冬晓, 周良辅. 术中磁共振影像神经导航治疗脑胶质瘤的临床初步应用(附 61 例分析). 中国微侵袭神经外科杂志, 2007, 12:105-109.]
- [33] Xu BN. Accurate neurosurgery: intraoperative MRI and functional neuronavigation. Beijing: People's Medical Publishing House, 2013: 3-15.[许百男. 精准神经外科: 术中磁共振和功能神经导航. 北京: 人民卫生出版社, 2013: 3-15.]
- [34] Mikuni N, Okada T, Enatsu R, Miki Y, Urayama S, Takahashi JA, Nozaki K, Fukuyama H, Hashimoto N. Clinical significance of preoperative fibre-tracking to preserve the affected pyramidal tracts during resection of brain tumours in patients with preoperative motor weakness. *J Neurol Neurosurg Psychiatry*, 2007, 78:716-721.
- [35] Abhinav K, Yeh FC, Pathak S, Suski V, Lacomis D, Friedlander RM, Fernandez - Miranda JC. Advanced diffusion MRI fiber tracking in neurosurgical and neurodegenerative disorders and neuroanatomical studies: a review. *Biochim Biophys Acta*, 2014, 1842:2286-2297.
- [36] Krieg SM, Buchmann NH, Gempt J, Shibani E, Meyer B, Ringel F. Diffusion tensor imaging fiber tracking using navigated brain stimulation: a feasibility study. *Acta Neurochir (Wien)*, 2012, 154:555-563.
- [37] Coenen VA, Kieselbach K, Mader I, Reinacher PC. Diffusion tensor magnetic resonance imaging (DTI) tractography - guided deep brain stimulation in neuropathic pain. *Acta Neurochir (Wien)*, 2015, 157:739-741.
- [38] Rossler K, Sommer B, Grummich P, Hamer HM, Pauli E, Coras R, Blümcke I, Buchfelder M. Risk reduction in dominant temporal lobe epilepsy surgery combining fMRI/DTI maps, neuronavigation and intraoperative 1.5 - Tesla MRI. *Stereotact Funct Neurosurg*, 2015, 93:168-177.
- [39] Tian ZM, Lu WS, Yin F. Application of medical robot in neurosurgery//Zhang X, Wang SS. Computer-assisted operative neurosurgery. Beijing: People's Medical Publishing House, 2013: 51-65.[田增民, 卢旺盛, 尹丰. 医用机器人在神经外科的应用//章翔, 王守森. 计算机辅助神经外科手术学. 北京: 人民卫生出版社, 2013: 51-65.]
- [40] Benabid AL, Cinquin P, Lavallo S, Le Bas JF, Demongeot J, de Rougemont J. Computer - driven robot for stereotactic surgery connected to CT scan and magnetic resonance imaging: technological design and preliminary results. *Appl Neurophysiol*, 1987, 50(1-6):153-154.
- [41] Benabid AL, Pollak P, Gervason C, Hoffmann D, Gao DM, Hommel M, Perret JE, de Rougemont J. Long-term suppression of tremor by chronic stimulation of the ventral intermediate thalamic nucleus. *Lancet*, 1991, 337:403-406.
- [42] Tian ZM, Zhao QJ, Du JX, Wang TM, Liu D, Lü HB. Use of robot in frameless stereotactic neurosurgery. *Zhongguo Wei Qin Xi Shen Jing Wai Ke Za Zhi*, 2000, 5:129-130.[田增民, 赵全军, 杜吉祥, 王田苗, 刘达, 吕洪波. 机器人辅助无框架脑立体定向手术. 中国微侵袭神经外科杂志, 2000, 5:129-130.]
- [43] Guo Q, Zhu D, Chen JX, Su JP, Hua G, Tan HP. The application of robotized stereotactic assistant for depth electrodes implantation in epilepsy surgery. *Li Ti Ding Xiang He Gong Neng Xing Shen Jing Wai Ke Za Zhi*, 2013, 26:257-260.[郭强, 朱丹, 陈俊喜, 苏菊萍, 华刚, 谭红平. 机器人立体定向辅助系统在癫痫外科深部电极植入中的应用价值. 立体定向和功能性神经外科杂志, 2013, 26:257-260.]
- [44] Young RF. Application of robotics to stereotactic neurosurgery. *Neurol Res*, 1987, 9:123-128.
- [45] Drake JM, Joy M, Goldenberg A, Kreindler D. Computer- and robot-assisted resection of thalamic astrocytomas in children. *Neurosurgery*, 1991, 29:27-33.
- [46] Boctor EM, Webster RJ 3rd, Mathieu H, Okamura AM, Fichtinger G. Virtual remote center of motion control for needle placement robots. *Comput Aided Surg*, 2004, 9:175-183.
- [47] Wang YH, Wu CY. Stereotactic operative neurosurgery. Beijing: People's Medical Publishing House, 2005: 332-339.[汪业汉, 吴承远. 立体定向神经外科手术学. 北京: 人民卫生出版社, 2005: 332-339.]

(收稿日期: 2015-08-10)