

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2013.11.002

基于模块化理念的便携式立体定向仪*

王 栋¹, 曹 彤^{1*}, 刘 龙¹, 曹旭东¹, 刘 帅²

(1. 北京科技大学 机械工程学院, 北京 100083; 2. 北京航空航天大学 机器人研究所, 北京 100191)

摘要:为了欠发达地区能够进行微创脑外科立体定向手术,根据机器人原理,设计出一种方便携带外出进行异地医疗救护的立体定向仪。开展了机器人结构类型的分析,建立了结构和整机性能之间的关系,提出了基于液压锁紧、关节结构的整体设计方案;采用模块化的理念,分别对立体定向仪的装夹底座、关节结构、导向器、外部注油系统和制动锁紧系统等进行了设计,得到了在工作空间内灵活运动且可在任意位置固定的立体定向仪;采用便捷的标定方法对立体定向仪进行调试,最终得到了定位精度小于2 mm的仪器,并成功应用于脑外科临床手术。从理论上对其进行了性能分析,并进行了相关的实验验证和临床应用。研究表明:该便携式立体定向仪具备运动灵活、锁紧可靠的性能和小于2 mm的定位精度,达到了临床应用的要求,具有较高的实际应用价值。

关键词:便携;立体定向仪;模块化;精度;临床手术

中图分类号:TH772;TH122;TP242.3

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2013)11-1301-05

Portable stereospecofic apparatus based on modular concept

WANG Dong¹, CAO Tong¹, LIU Long¹, CAO Xu-dong¹, LIU Shuai²

(1. School of Mechanical Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;

2. Robotics Institute, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: Aiming at the less developed areas to be provided for the minimally invasive stereotactic brain surgery, a kind of stereotactic instrument which was convenient to be carried out for long-distance medical aid was designed according to the principle of the robot. Structure types of robot were analysed, the relationship between the structure and the whole machine performance was established, and the overall design scheme based on the hydraulic locking, joint structure was presented. The clamping base, joint structure, guide, external injection system and brake locking system of the stereotactic apparatus were respectively designed with the modular concept, and the stereotactic instrument which was in agile movement and could be fixed in any position in the work space was obtained. The convenient calibration was used for debugging, and the final positioning accuracy was less than 2 mm, and the stereotactic instrument was used for brain clinical surgery successfully. The performance was analyzed theoretically, and the relevant experiments and clinical applications were done, the results indicate that the stereotactic instrument has flexible movement, reliable locking performance and the positioning precision is less than 2 mm, which has reached the requirement of clinical application, and has the high use value.

Key words: portable; stereospecofic; modular; accuracy; clinical surgery

0 引 言

近几年来,机器人与计算机辅助外科技术已经成为医疗领域的热点,并成为机器人应用的重要研究课

题之一^[1-2]。这方面的研究主要集中在两个方面:一是手术定位精度、创伤、手术质量等方面的一些变革;二是开发、研制新型的、更具适应性的医疗装备^[3-4]。

目前,国外对脑外科手术机器人的研究已经比较

收稿日期:2013-05-21

基金项目:国家高技术研究发展计划(“863”计划)资助项目(2007AA04Z246)

作者简介:王 栋(1988-),男,江苏徐州人,主要从事医疗机器人技术方面的研究. E-mail:wangdong19880315@yahoo.cn

通信联系人:曹 彤,女,副教授,硕士生导师. E-mail:caotong1601@163.com

成熟,如:美国 ISS 公司于 1999 年推出的无框架的 NeumMate 机器人系统和美国加利福尼亚大学 RH. Taylor 已经开发出的用于治疗帕金森氏症的无框架神经外科手术系统,都取得了巨大的成功。国内北京航空航天大学机器人所从 1997 年开始研究机器人与计算机辅助立体定向手术系统,在这一方面也取得了很大的成就,但是以往开发的机器人不便于携带外出到条件受限的地区进行手术。

因此,本研究设计的新一代的立体定向仪定位于结构简单、质量轻,方便携带外出进行异地手术。该系统主要由计算机导航系统和立体定向仪两部分组成,利用机器人和计算机技术辅助医生进行手术操作^[5],其中,立体定向仪的主要作用是:进行病灶区靶点的空间定位;为医生提供手术平台。因此要求其机构灵活、轻便、精度高、锁紧可靠,并易于操作。

1 总体方案

该立体定向仪的主要设计目标是方便携带,考虑简化其结构并保证手术的可行性,本研究将其设计为被动式。该立体定向仪实质上就是一个没有驱动和传动系统的机器人,因此可以根据机器人的设计拟定其设计方案。

对于机器人的结构类型,经分析比较,本研究选用结构可紧凑化、操作灵活且工作空间大的关节结构。根据机器人与计算机辅助立体定向外科手术系统的要求,该立体定向仪设计为:本体具有 5 个转动关节自由度,外加末端导向器具有 1 个移动自由度,如此不仅满足了手术的需要,而且使运动更加灵活。

该便携式立体定向仪的三维模型结构如图 1 所示。

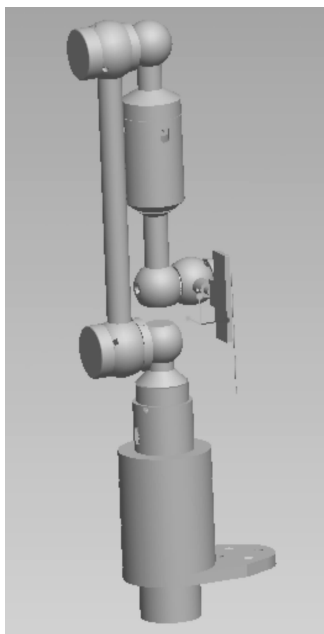


图 1 便携式立体定向仪的整体结构

2 模块设计

2.1 关节制动锁紧设计

立体定向仪要在手术空间保持指定的位置和姿态,必须使其关节在给定的位姿下锁紧,因此,关节锁紧是其机构设计不可或缺的部分。在此提出 3 种关节锁紧机构:

- (1)电磁离合器锁紧机构。利用通断电后电磁离合器的开合实现关节的锁放;
- (2)弹簧锁紧机构。利用弹簧拉紧关节外圈,使外圈与摩擦片抱紧实现锁紧功能;
- (3)液压锁紧机构。利用活塞往复运动压缩液压油传递的压力使关节与摩擦环抱紧与松脱。

比较以上锁紧机构发现:电磁离合器体积大、安装复杂,使得系统体积增加;弹簧锁紧中弹簧容易变形失效,锁紧能力减弱;液压锁紧主要靠摩擦环与关节端面的摩擦力,锁紧力矩大,不易磨损,而且关节锁紧靠流体压力,操作方便,使系统结构紧凑,提高其灵活性。

立体定向仪的关节锁紧结构简图如图 2 所示。摩擦力矩的产生机理:弹簧预紧状态下的弹力通过顶杆传递到活塞上,活塞压缩液压介质使关节结合面与摩擦环抱紧产生压力;通过钢丝绳拉顶杆压缩弹簧,使得活塞后退,从而关节松脱。

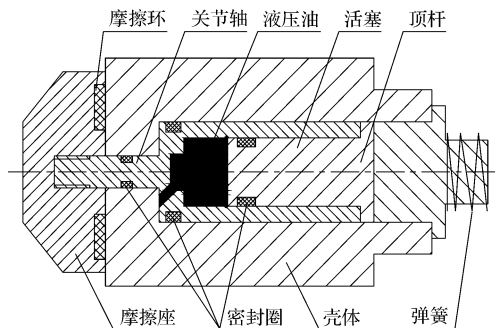


图 2 关节液压锁紧结构

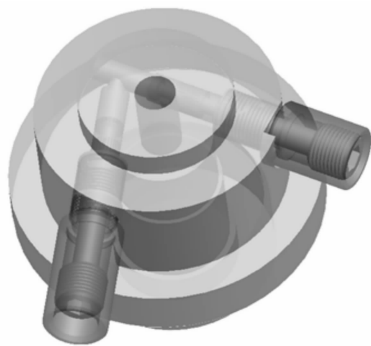
为了满足立体定向仪末端承重 2 kg 的设计要求,本研究进行了一系列的理论分析并得到了摩擦力矩与活塞直径、系统油腔直径、摩擦环的材料和直径、弹簧刚度和形变量等参数的关系,并结合相关实验确定了各相关参数,由于篇幅所限,此处不作详述。

2.2 外部注油系统设计

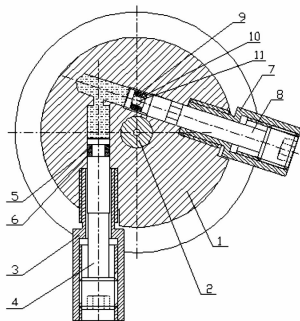
在立体定向仪的物理样机制造完成并进行相关试验后,发现一些问题:由于活塞频繁的反复运动会造成液压油的少量损失,然而关节制动锁紧能力和关节灵活性会与油量有直接关系,从而就需要对该定向仪液压源部分进行拆卸,对油量进行调节以达到满意状态;

然而这个满意状态难以把握,需要操作者用手代替弹簧挤压活塞,通过力觉感受系统油压并凭借经验作出判断,若组装后关节性能不达标则需再次进行拆卸、调节。这样,不仅对操作者提出了力觉感受并形成经验的要求,而且反复拆装也会对立体定向仪的关节产生一定的影响,进而影响到其定位精度。

鉴于上述油量调节方式存在的不足,本研究综合考虑立体定向仪的液压油路特点和结构特点,设计了外部注油系统,其立体图和剖面图如图 3 所示。



(a) 外部注油系统立体



(b) 外部注油系统剖面

图 3 外部注油系统立体图和剖面图

1—液压源壳体;2—第一关节轴;3—注油延长套;4—注油活塞;5—密封圈 1;6—挡圈 1;7—隔断延长管;8—隔断活塞;9—密封圈 2;10—挡圈 2;11—主油路连接孔;12—密封圈;13—挡圈 3;14—密封圈 4;15—挡圈 4;16—液压系统油路;17—液压

由图 3 可知:该外部注油系统主要由隔断活塞和注油活塞组成,隔断活塞主要起到将主油路和外部注油油路隔断的作用,注油活塞主要起到添加油液并调节整个油路压力的作用。正常工作状态下,隔断活塞不对主油路连接孔进行封闭,此时外部注油油路跟主油路共享压力;需要注油时,封闭主油路连接孔,将主油路和外部注油油路隔断,旋出注油活塞进行注油,然后通过注油活塞的旋入/旋出来调节整个油路的压力以满足关节运动和锁紧性能的需要。

外部注油系统的设计,不仅解决了上述反复拆装、力觉感触困难、使用寿命减少等一系列问题,而且可以

实现压力的微调,平衡末端负载与立体定向仪灵活性的问题,使其长期处于良好的工作状态,以延长其使用寿命。

2.3 关节设计

该立体定向仪是基于关节结构设计的,所以其关节结构是系统的核心部分。本研究综合考虑系统的结构要求、使用性能要求,并结合关节锁紧结构设计了关节结构,关节机构示意图如图 4 所示。

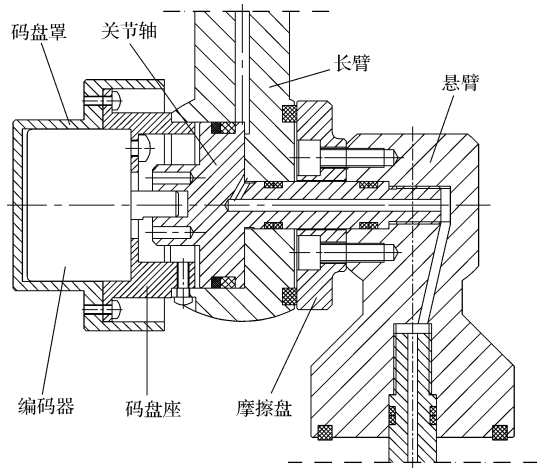


图 4 关节机构示意图

由图 4 可知:立体定向仪的关节结构主要由前臂、后臂、关节轴、密封系统、摩擦锁紧系统和运动检测系统组成。关节轴和前臂采用螺纹配合的连接定位方式,该方式虽然存在微小的间隙误差,可在后期标定中对其进行误差补偿,暂且忽略;关节轴和后臂的连接方式,考虑到系统的小型化、装配方便易于拆卸维护等因素,没有采用轴承,而是直接采用最小间隙的轴孔配合,该方案减小了因轴承而存在的加工、装配难度,而且能够满足关节运动的需要;关节轴和运动检测系统中的码盘采用异形轴孔连接,通过码盘检测关节转角进而计算出末端针尖点的空间位置。

关节结构决定了立体定向仪的关节参数,也是系统误差的主要来源,因此关节结构很大程度上决定了系统精度和能否应用于临床。基于此点考虑,本研究在设计时提出了一些保证其精度的要求:所有的轴孔配合采用最小的间隙配合;码盘和轴的异型孔连接可考虑配作,更加准确地测得关节转角;贴合端面有端面圆跳动要求、轴孔配合均有同轴度要求以保证运动灵活、密封可靠;摩擦锁紧系统中摩擦环的厚度作为设计中尺寸链的开环部分,采用配作的方式,对其他零件微小的加工偏差加以补偿,而且可以尽可能地减小关节间隙,从而减小关节误差。

尽管对关节结构做了相关的要求,但关节误差的存

在是难以避免的,可以在后期的调试中进行误差补偿。

2.4 装夹底座设计

便携式立体定向仪具有质量小、结构简单、方便携带等特点,而且手术过程中要求立体定向仪和病人头部保持空间位置相对固定。基于以上考虑,本研究采用将立体定向仪固定装夹于手术床体的方案。

针对手术床侧边是否方便拆卸的不同情况,设计了两套装夹底座。对于侧边可拆卸的床体,设计的装夹底座如图 5(a)所示;对于侧边难以拆卸的床体,设计的装夹底座如图 5(b)所示。

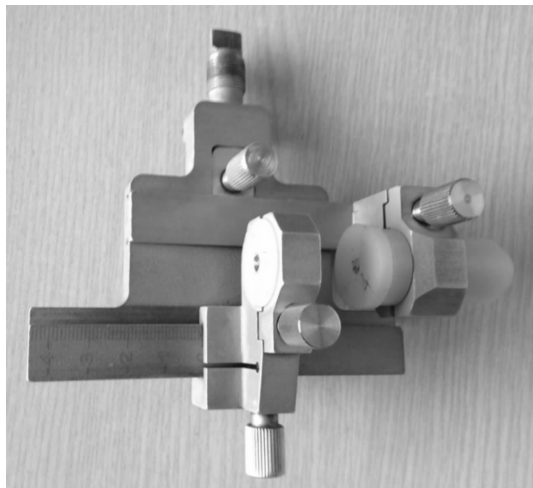
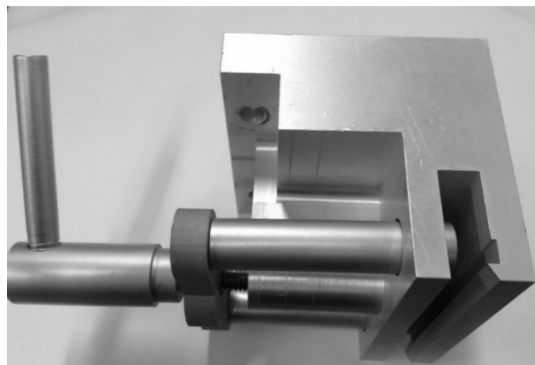


图 6 导向器



(a) 装夹底座1



(b) 装夹底座2

图 5 装夹底座示意图

图 5(a)所示的底座是基于螺纹传动,借助偏心轮使卡盘紧压于床体下平面,通过挡块和摩擦力进行固定锁紧,该方案定位牢固可靠;图 5(b)所示的底座也是基于螺纹传动,通过顶杆挤压床体侧边进行固定锁紧,同时勾爪勾住下侧产生平衡力矩,使得固定更加可靠。

2.5 导向器设计

为了满足空间定位功能和提供手术平台的要求,导向器在整个立体定向仪系统中占据了举足轻重的地位。根据脑外科手术过程的需要和手术精度的要求,并考虑方便拆装,本研究设计了如图 6 所示的导向器。

由图 6 可知,导向器和定向仪本体通过螺纹连接、

紧固,导向器主要由基座、主导向套、辅助导向套组成。由于手术过程中需要对穿刺针进行深入、浅出固定深度的操作,为了保证准确操作,基座上设有刻度线,且主导向套拥有一个移动自由度,在主预紧螺钉松开的前提下,可沿刻度线方向自由滑动;为了保证穿刺针的轴向方向固定不变,基于两点确定直线的准则,本研究设计了辅助导向套,以提高手术精度;导向套采用对开式设计,以满足不同直径穿刺针的需要。

3 参数标定

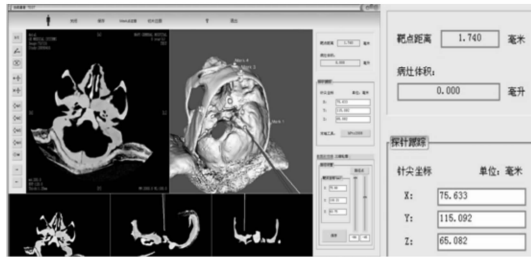
实体样机能否应用于临床,主要取决于该立体定向仪的定位精度,因此需要采取必要的措施将其系统误差降低以适用于临床手术。在立体定向仪的设计过程中存在一些误差因素,例如摩擦环与摩擦座之间存在微量间隙;关节轴与后臂之间轴孔配合的微量间隙。立体定向仪本身的加工、装配过程中也会产生影响最终精度的关节参数误差,这些都属于系统误差,本研究采用参数优化的方法对关节误差进行补偿,利用距离误差模型对关节参数进行标定,使得立体定向仪最终的重重复定位精度小于 1 mm,绝对定位精度小于 2 mm,实验数据如图 7 所示。由于篇幅所限,具体的标定方法^[6-8]和过程不再详述。

4 临床应用

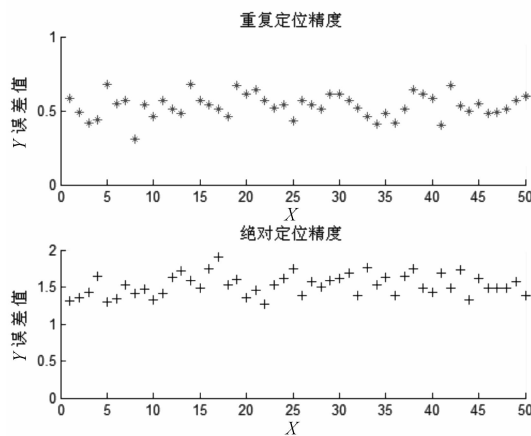
在海军总医院,本研究采用该立体定向仪进行了脑外科立体定向手术的临床应用。手术过程主要为:病人头部贴标记点,CT 扫描,将扫描图像导入计算机的导航系统进行三维模型重建,医生进行手术规划并确定虚拟穿刺针的定位;将病人和立体定向仪固定于手术床并保证两者相对位置固定不变,手动引导立体



(a) 标定后的重复定位精度



(b) 标定后的绝对定位精度



(c) 多次试验精度验证

图 7 标定后立体定向仪的重复定位精度和绝对定位精度

定向仪对病人头部标记点进行空间注册,以建立机器人坐标系和病人头部坐标系之间的空间位置关系;在导航系统实时反馈和已定位虚拟穿刺针的指导下,医生引导立体定向仪进行空间定位,待实时反馈的穿刺针和虚拟穿刺针重合后进行固定锁紧,此时穿刺针针尖到达了手术靶点;然后医生以立体定向仪为手术平台进行手术操作^[9-13]。整个手术过程顺利,手术效果较好。

该次临床应用之后,本研究又陆续利用该立体定向仪进行了数十例临床手术,均取得了令人满意的效果。

5 结束语

相比于其他脑外科手术机器人,该立体定向仪具有机构简单、体型小、无需摄像头,价格低廉、方便维护等优点,而且其自身具备定位精度小于 2 mm、制动锁紧性能可靠、方便携带等便携式立体定向仪的必备条件,完全满足随身携带外出辅助立体定向手术的要求。

6 致谢

本研究所述便携式立体定向仪的设计、调试和临床应用,得到了导师、师兄的提示,工厂操作工的配合,师弟的实验协助以及海军总医院医生的帮助,在此表示感谢。

参考文献 (References) :

- [1] 王田苗,李 伟,刘 达,等. 机器人技术在中医正骨手术中的应用研究[J]. 机器人,2003,25(3):46-50.
- [2] 姜 杉,杨志永,李 佳. 医用机器人研究、应用与发展[J]. 机床与液压,2005(5):1-5.
- [3] 王田苗,宗光华,张启先. 新应用领域的机器人医疗外科机器人[J]. 机器人,1996(9):603-606.
- [4] 林良明,丁 洪. 机器人技术在医疗和福利工程中的应用研究[J]. 世界医疗器械,1997(1):46-50.
- [5] 田增民,卢旺盛. 遥操作脑立体定向手术的临床初步应用[J]. 中华外科杂志,2007,45(14):1679-1681.
- [6] 王荣军,刘 达,贾培发. 医用机器人运动学参数最优化设计[J]. 机器人,2007,29(4):368-373.
- [7] 刘振宇,陈英林. 机器人标定技术研究[J]. 机器人,2002,24(5):447-451.
- [8] 任永杰,郝继贵,杨学友,等. 利用激光跟踪仪对机器人进行标定的方法[J]. 机械工程学报,2007,43(9):195-200.
- [9] 陈梦东,田增民,张启先. 机器人辅助微损伤神经外科手术系统的研究及其临床应用[J]. 中国生物医学工程学报,2000,19(2):38-44.
- [10] 田增民. 立体定向神经外科进展[J]. 国外医学神经病学神经外科学分册,1999,9(1):3-5.
- [11] 劳立辉,窦争宝,刘凤臣. 移动机器人控制系统[J]. 轻工机械,2012,30(3):50-53.
- [12] 石 磊,冉 超. 一种软件协作的机器人仿真方法[J]. 组合机床与自动化加工技术,2012(4):91-93.
- [13] 田增民,王田苗,刘宗惠,等. 机器人系统辅助脑立体定向手术[J]. 军医进修学院学报,1998,19(1):4-6.

[编辑:罗向阳]

本文引用格式:

王 栋,曹 彤,刘 龙,等. 基于模块化理念的便携式立体定向仪[J]. 机电工程,2013,30(11):1301-1305.

WANG Dong, CAO Tong, LIU Long, et al. Portable stereoscopic apparatus based on modular concept[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2013,30(11):1301-1305.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>