

带辅助运动平台的手术机器人设计与分析

武超, 高雪官, 曹其新, 谭宏冰

(上海交通大学机器人研究所, 上海 200240)

(中图分类号) TH777 (文献标识码) A (文章编号) 1002-2376 (2012) 02-0001-05

摘要: 文章介绍了手术机器人的国内外研究现状, 并做了类比分析, 重点讲述了基于辅助运动平台的七自由度外科手术机器人的结构设计基本方案, 以“达芬奇”手术机器人等为参考进行了优化设计, 以期更好的实现辅助移动、遥控操作、稳定支撑、精确定位等主要作用, 并结合实际要求, 针对具体设计思路进行了系统运动可靠性和工作稳定性分析。

关键词: 辅助运动平台; 机械臂; 主动关节; 运动仿真; 稳定性

0 引言

随着医疗科学的进步, 微创医疗得到了长足的发展, 这也是未来外科手术的必然要求。众所周知, 传统的人工手术对于医生的经验和技术水平依赖很大, 也不能实现微创, 病人恢复周期较长, 对于健康组织的损害也较大。内窥镜技术的发展部分解决了这一问题, 可以实现微创, 但是应用存在局限性, 也不能实现远程操控。

目前, 国外的全方位手术辅助机器人技术已经非常成熟, 达芬奇手术机器人系统就是其中一个很好的实践成果, 目前已经发展到第三代, 在国外得到广泛应用。其主要的技术特点是, 采用四机械臂结构, 其中两个相当于左右手, 第三个是“助手”, 起牵引、稳定作用, 第四个相当于内窥镜, 形成真实的三维立体图像, 同时, 手臂腕部有自由活动的手术器械, 实现夹紧、转动、切割、缝合操作。与其他的手术机器人如 Zeus 机器人系统不同的是, Zeus 机器人没有从动操作车, 在手术台上直接安装三个独立的机械手臂, 医生通过两个圆形的主动装置来控制手术机械。而达芬奇机器人系统有辅助的运动平台、振动消除系统和定位系统, 确保精确操作和实现区域移动。

设计国产化的自动化手术辅助机器人, 显得尤为关键。目前国内有许多高校都已经投入了这一领域的研究, 其中包括哈尔滨工业大学的腹腔微创外科手术机器人、天津大学的“妙手”(MicroHand)机器人等, 都取得了不错的阶段性成果。本文主要

介绍手术机器人辅助运动平台的设计思路。

1 手术机器人机械臂结构原理

机械臂运动简图如图 1 所示, 图示为单一机械臂结构, 整个系统共需要 3 个手术机械臂以及一个 3D 摄像探头, 每一个机械臂共配置 7 个自由度, 其中 1-4 自由度为被动关节, 5-7 为机械臂自由度, 由电机和缆线驱动。自由度 1 为上下平动, 整个机械臂以滑动轨道的形式配置在辅助平台上, 依靠顶端定滑轮以及安放在滑轨柱内部的配重实现升降; 自由度 2-4 为被动转动关节, 每个关节由转轴、滚动轴承、轴承座、电磁制动器构成, 从而在开始前实现手术位置的确定; 自由度 5-7 为主动关节, 依靠电机驱动, 在实际手术过程中依靠关节 5 和 6 的转动以及 7 的伸缩实现末端手术机械空间任意位置的定位。

结合图 2 的机械臂三维建模仿真, 分析具体的运动形式如下:

(1) 停机时, 所有四个手术机械臂都处于收缩状态, 全部自由度都收缩到末端的支撑台上。

(2) 手术开始前, 当病人的位置以及手术点确定后, 推动手术机器人小车, 使其到达最理想的手术位置, 便于主刀医生及助理医生的操作, 然后关闭被动关节电磁制动器, 依靠助理医生将末端手术机械定位于病人手术点, 随即开启制动器使被动关节固定。

(3) 手术过程中, 5-7 三个自由度依靠驱动电机进行驱动, 主刀医生的手部动作通过控制系统控制 5-7 自由度的运动, 三个自由度进行匹配, 实现末端手术器具在病人体内任意位置的操控。

收稿日期: 2011-11-21

医疗装备 2012 第 02 期

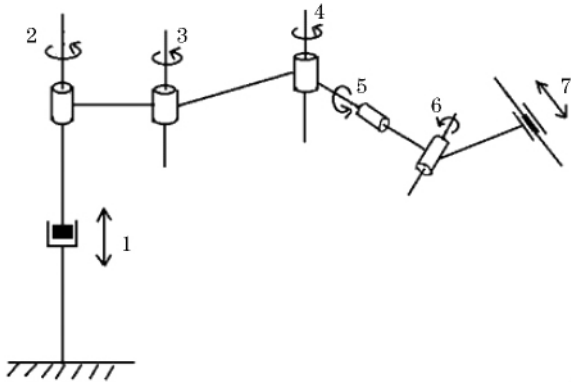


图1 手术机器人机械臂运动原理

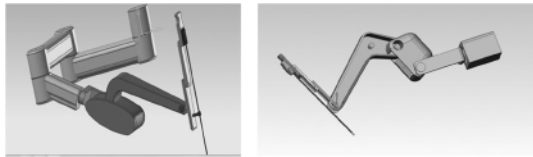


图2 手术机械臂主动关节实体建模

在手术开始之前，需要在病人的身体上进行微创切口，插入手术套筒，由于病人和运动平台处于相对静止状态，因此必须确保在手术过程中手术机械臂末端插入点相对辅助平台不动，即医生控制台操控仪器安装臂时仪器安装臂的远程中心将保持不变。这就对主动关节的配置和尺寸提出了难题。

为解决这一问题，我们采用平行四边形分布方法，并以此确定远程中心。如图3所示。

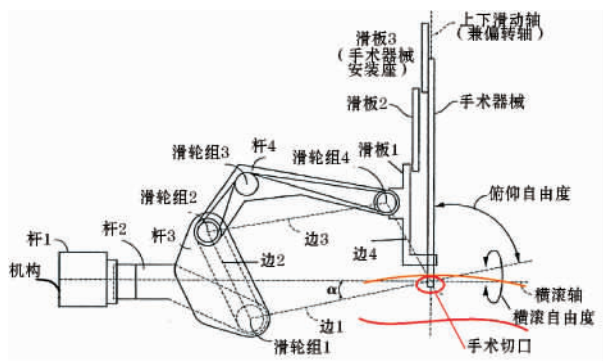


图3 主动关节远程中心确定示意图

仪器安装臂的远程中心机构主要由杆1、2、3、4和滑板1、2、3组成。其中，杆1包含一个机械与电气接口，可以和定位关节的末端方便地连接。同时，杆1一种安装有电机和减速器，可以驱动远程中心的横滚关节。杆2为一根弯杆，主要其连接杆1和后面平行四边形机构的作用。杆3，杆4通过滑轮组1-4之间的金属带的连接，可以组成一个平行四边形机构（图中虚线1-4组成）。滑板1-3组成一个两级的滑动关节，其中滑板2相对滑板1可以通过

过医生控制台的主操作手控制上下运动，而滑板3相对滑板2可以被辅助医生进行手动调节。上下滑动轴与横滚轴交于平行四边形的一个顶点，该点称为远程中心。可以看出，当定位关节定位好后，也就意味着杆1的位置和方向都确定了。从而横滚轴确定了，然后边1的长度与边3的长度相等，边3的长度由杆4决定，从而线1的长度也就确定了。而 α 角由杆2的弯折角度决定。这样，远程中心就被确定了。即当定位关节定位确定之后，远程中心就确定了。同时可以从图上看，远程机构可以绕远程中心做俯仰，横滚和上下滑动的运动。

经实验确定， α 角 = $10 - 20^\circ$ ，俯仰角 = $\pm 75^\circ$ ，横滚角 = $\pm 90^\circ$ ，转动角 = $\pm 180^\circ$ ，由此确定驱动电机和各杆尺寸。

远程中心机构为了节省结构空间和重量，不采用传统的平行四杆机构，而是采用两杆加金属带约束的方式实现平行四边形机构，这是一个机构上的创新点。实现了机构在完成既定要求的基础上的紧凑性和稳定性。

3 手术机器人辅助运动平台结构原理

如图4所示为外科手术机器人辅助运动台车系统的示意图。手术机械臂含三个被动转动关节和三个主动关节，手术过程中，被动关节锁死，依靠三个主动关节以及末端手术执行器实现手术动作。机械臂固定在手术台车上，确保手术稳定性和可移动性。辅助运动平台主要由两部分组成：底部为支撑

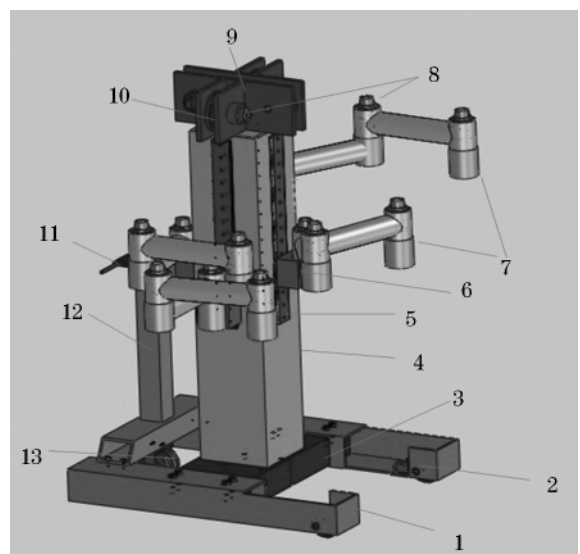


图4 手术机器人辅助运动平台建模图

1 底盘右架、2 驱动轮系统、3 底盘支撑架、4 垂直支撑架、5 滑动导轨、6 滑块、7 机械臂被动关节、8 电磁制动器、9 滑轮支架、10 滑轮、11 手柄、12 手柄支架、13 驱动脚轮

整个机器系统的台车，含底盘左右架与中间支撑架作为底盘主要配件，台车不仅支撑整个手术机器人系统，也为工控机、电源等提供装配空间；中间竖直方形架为机械臂的支撑架，内置配重，装配滑轨和滑块，支撑机械臂。

底部台车由四个轮子组成，驱动总成 2 含驱动电机、减速器、控制器和驱动轮，驱动轮分别由 Maxon 电机独立驱动，通过控制左右驱动轮差速的方式实现转向，后端两轮 13 连在一起，主要起支撑作用，且装有脚踏刹车片，确保在平台运动到指定地点后实现系统静止不动。

台车竖直架的四个面上分别布置有竖直方向上的滑动导轨 5，导轨滑块与机械臂的被动关节相连，通过滑块的上下移动实现机械臂整体的上下位移。医生在手术之前需要将机械臂固定在合适的位置，以确保机械臂末端能方便插入病人身体某一点的手术孔中。这一动作是通过滑块的垂直自由度与 3 个被动关节的转动自由度实现的。

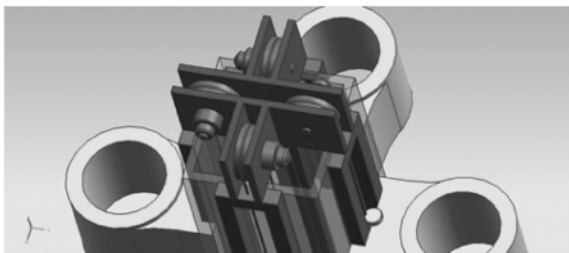


图 5 机械臂垂直自由度驱动示意图

如图 4、5 所示，垂直滑动的具体原理是：缆绳绕过滑轮 10，一端连接机械臂滑块 6，另一端连接配重（置于支撑架内，配重的重量约等于机械臂静止重量，以实现二者配重平衡。），滑轮 10 装有电磁制动器 8，其主要作用是在手术过程中锁止滑轮，防止滑轮滚动。当制动器打开时，滑轮转动，用很小的力作用于配重，即可实现机械臂的上下滑动，滑动到指定位置之后，关闭电磁制动器，实现位置固定。传感器通过缆绳与滑块 6 或配重耦合，其含有精准电位器，电位器生成电信号，信号随滑块位置变化而变化，从而实现滑块的定位。

被动关节运行原理与此类似，手术之前电磁制动器 8 打开，待手动转动被动关节将末端执行器安放至指定位置之后，关闭电磁制动器，锁紧被动关节，手术过程中保证被动关节和滑块位置不动。

此外，四个机械臂的总体重心配置应沿竖直轴，以提高系统的稳定性。

台车底座的四个角上还分别装配有小型千斤顶（图 6 所示），这样做的目的是使在手术过程中保证台车的固定，防止由于误操作引起台车位置移动，从而影响机械臂的定位，确保驻车稳定性。手术过程中依靠千斤顶作为支撑，而手术台需要移动的时候，旋转千斤顶把手则可撤回其支撑作用，重新变为轮子支撑，以移动机身位置。

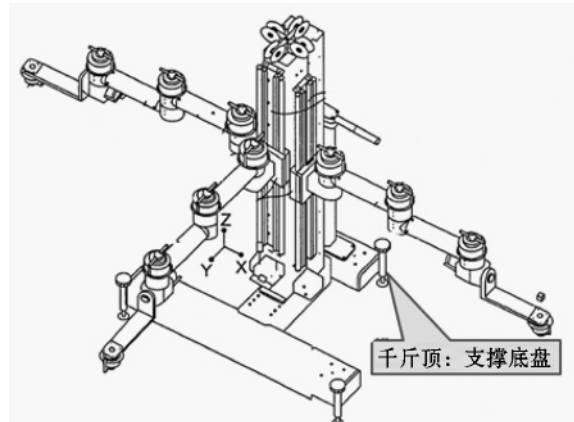


图 6 台车系统底盘稳定配件——千斤顶机构

以上便是手术机器人辅助运动平台的基本结构原理，其主要起到支撑机械臂、定位末端手术位置、辅助移动等作用，要求确保系统稳定性和过程可靠性。

4 手术机器人动力学分析

4.1 运动学仿真

通过计算机软件，对机械臂进行运动学仿真（如图 7 所示），仿真的结果与实际要求十分相符，同时也为系统的优化提供了直观数据。

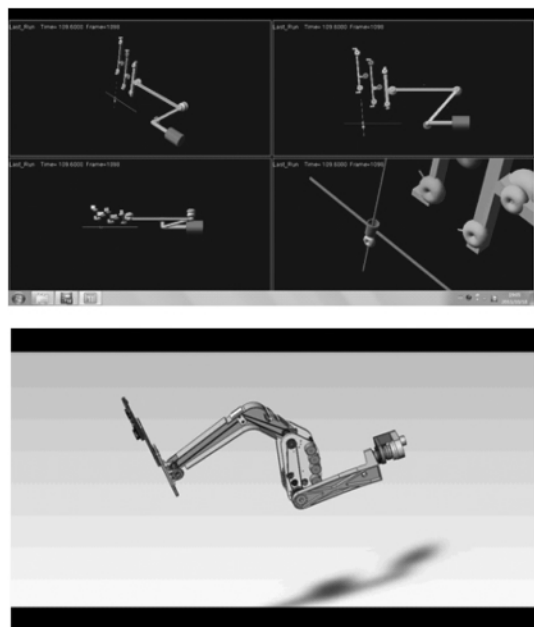


图 7 手术机械臂运动学仿真

4.2 动力学分析

为了验证系统的可靠性和稳定性,我们对部分核心部件进行了动力学参数的有限元分析,按照最大使用条件进行预载荷,得出了最大变形、拉(压)应力等数据,所有的材料都在许用范围之内。

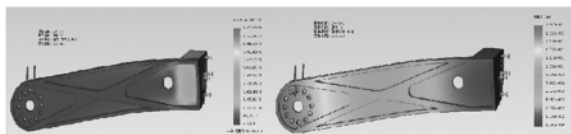


图8 主动关节L型杆的有限元分析

如针对主动关节的主要承重件L型杆进行了系统分析(如图8所示),L杆作为整个主动关节机构中的一个重要的结构件,又是一个悬臂结构,因此需要对其做应力应变分析。经solidworks有限元软件分析,在100N的载荷作用下,其最大变形量为0.4mm,可以满足刚度要求。而且,应力也在许用范围内。同时,其设计采用两段驳接方式,减少加工难度。

同时,本手术机械臂主体部分采用镁铝合金,镁铝合金具有密度小,强度、硬度高等特点,具有良好的应用性能。如5052号AL-Mg系合金,抗拉强度为170-305MPa,条件屈服强度大于65MPa,弹性模量E为69.3-70.7GPa。分析可知,在机械臂系统中,始端位置即机械臂在滑轨处受力、力矩作用最大,因此取该部分进行重点分析。

初步可预估机械臂总重量为25kg,展开后总长度为1.5m,则考虑极限情况为机械臂全部展开,此时对滑轨的作用力及作用力矩最大,此时机械臂重心位置距滑轨约为1m。将作用力平移至滑轨处,可得机械臂对滑轨的总用力等效为mg及倾覆力矩M的和作用。同时,由于机械臂受到竖直滑轨内与其质量相等的重物的拉力,因此其对滑轨的作用可视为倾覆力矩M。经计算,得到滑轨处受最大倾覆力矩 $M=245\text{NM}$ 。在导轨选型时,采用双滑块结构,可以极大地提高最大倾覆力矩。

辅助运动平台主体采用型钢材料,除必要的焊接外,核心部件的装配均采用铆接,垂直架上增加三角加强筋,这样也能够极大的提高系统可靠性。

4.3 稳定性分析

首先,要确保辅助运动平台在行驶过程中的稳定性,与其他手术机器人装配不同,本装置采用前轮驱动,利用左右车轮差速实现转向,在结构上实现了轻量化设计,减少了复合零件及系统的设计,

车轮采用高强度聚氨酯材料,确保了行驶稳定性。

其次,是需要保证手术过程中的稳定性,考虑到手术是微创医疗,因此对于手术过程中的定位务必要精确,通过采用千斤顶结构,依靠四个千斤顶底部的吸盘牢牢锁紧地面,确保在驻车时不出现滑车,同时,滑轮系统及被动关节上的高精度电磁制动器的使用,也能够确保在手术过程中的定位稳定。

5 结论

七自由度手术机械臂的构造能够灵活实现手术的自动化操作,同时,手术机器人辅助运动平台承担着重要的辅助职能,是确保机械臂正常工作的重要保障,也是实现系统可移动、遥操作的关键因素,本文基于这一原理进行了结构设计及初步分析,此项研究主要实现了以下技术特点:

(1) 手术机械臂上的关节具有多个活动自由度,使得系统更加灵活,拓展了手术人员的操作能力,减少手术误操作;

(2) 紧凑型、轻便型的手术机器人辅助运动平台设计,保证了在任何地点进行手术的可能性;

(3) 此项研究基于临床应用,在完成既定要求的前提下,在机械结构上力求简单实用,从而极大的增强了整体系统可靠性;

(4) 系统采用高分辨率的三维图像处理设备,便于外科医生清晰精确地进行组织定位和器械操作,提高了手术精度。

目前,手术机器人系统还停留在理论设计和计算机仿真阶段,结合实际需要做出更多的优化和改进,期待在临床应用上可以得到进一步的检验。

[参考文献]

- [1] 嵇武、李宁、黎介,达芬奇手术机器人的应用进展,东南国防医药2010年9月.
- [2] 杜志江、孙立宁、富历新,医疗机器人发展概况综述[J],机器人第25卷第2期2003年3月.
- [3] 朴明波,腹腔微创外科手术机器人仿真平台搭建及操作仿真研究,哈尔滨工业大学
- [4] 刘万平、赵臣,妙手II手术机器人双目视觉系统研究,天津大学
- [5] Ceiling and floor mounted surgical robot setup arms, United States Patent Application Publication, Pub. No.: US 2004/0261179A1
- [6] Tool guide and method for introducing an end effector to a surgical site in minimally invasive surgery, United States Patent Application Publication, Pub. No.: US 2002/0045905A1

