**南方科技大学本科生毕业设计（论文）中期自查表**

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 学生姓名 | 李奥齐 | 学号 | 11910413 | | 专业 | | 机器人工程 |
| 指导教师 | 付成龙 | 职称 | 教授 | | 系/研究中心 | | 机械与能源工程系 |
| 设计（论文）题目 | 双通道内窥镜柔性手术机器人操纵端设计 | | | | | | |
| 个人精力  实际投入 | 平均工作时间（6）小时/天 | | | 出勤率% | | 90 | |
| 指导教师  指导情况 | 经常（√）  一般（ ）  很少（ ） | 指导（1）次/周 | | 指导（2）小时/周 | | 其他说明： | |
| 个人自述（简要陈述毕业设计（论文）工作进度、完成情况、存在问题及解决方案）：   1. **毕业设计工作进度**   本项目计划设计一种内窥镜末端搭载两个微型连续体机械臂的手术机器人操纵端，采用主从控制方式，将外科手术医生手臂与手的动作以直觉的方式映射为柔性臂及其末端夹持机构的动作，结合内窥镜提供的高清视频图像，协助外科外科医生开展消化道的微创手术。研究主要分为四个模块，包括操纵端的机械结构设计、操作者手部姿态捕获传感模块设计、操作端与执行端运动学模型的建立，以及最终控制效果仿真平台的搭建，因此工作主要围绕上述四个部分展开：   * 1. **机械结构设计**   该部分的要求是设计不影响手术医生上肢自由运动的运动采集机构，使得柔性手术机械臂及其末端夹持器的运动能通过人体的肘关节、腕关节以及手指的运动直觉控制，也即人体肘、手腕动作与手指开闭动作能同步按比例映射到柔性臂及其末端执行器的运动，协助手术医生更安全、方便的开展消化道微创手术。    图 1 系统输入与输出关系图  如上流程图，操作端的核心作用是连接操作者和从端执行器之间的运动，因此在设计机械结构时，既要考虑能操纵端与人体手臂自由度之间的配合，又要考虑操纵端与执行端每个自由度之间控制关系，操纵器具体自由度布局如下图：  人体手部自由度 的图像结果  图2 人手-操纵端-执行端自由度分布  如上图，从端执行器具有一个前后伸缩的自由度，因此操纵端也镜像了一个前后进退自由度，该关节由操纵者手臂前后运动驱动；为了提供手术所需的三角性，柔性臂需要先展开后交叉相较于一点，因此具有一个类似于人体手臂张开的自由度，对应操作端上绕轴旋转的，由操纵者小臂偏置控制；执行端核心的运动由远端2自由度连续体的偏转加连续体末端可自由绕轴旋转的手术器械实现，对应操纵端三个转轴交于一点的三个R-P-Y旋转关节实现，该点对应操纵者手腕关节，因此可以跟随操纵者的手腕运动。  连接关系如下表格：   |  |  |  | | --- | --- | --- | | 操纵者 | 操纵端 | 执行端 | | 手臂前后运动 | 底座前后运动 | 手术臂伸缩 | | 手臂左右摆动 | 支架绕轴转动 | 手术臂开合 | | 手腕左右偏转 | 二连杆左右偏转 | 手术臂左右偏转 | | 手腕上下偏转 | 二连杆上下偏转 | 手术臂上下偏转 | | 手腕绕轴转动 | 手持器转动 | 手术器械绕轴转动 | | 手指开合 | 指夹器开合 | 手术器械开合 |   表格1 操纵者-操纵端-执行端运动关系  装置的直线运动通过两根平行的导轨滑块实现，旋转关节均采用轴承标准件，小臂偏转时需要沿着圆弧运动，该结构借助定向轮实现，定向轮既能提供沿圆弧切线方向的运动，又能提供一定的载荷；指端的开关借助扭簧实现开合。传感器主要有旋转增量式编码器，用于旋转关节角度；以及压敏电阻用于检测指端开关的开合；对于直线平动，为了考虑成本和精度，舍弃了较为常用的TOF激光测距的方法，采用旋转编码器和同步带的方式测量直线位移，其他部分目前均使用3D打印机进行测试，结构具体的模型和按照模型搭建的初步实物如下：    图3 机械结构布局(左)搭建实物(右)   * 1. **传感电路布局与调试**   为了后续运动学及动力学计算，需要测量每个关节实时的角度，在机械结构设计的基础上已经完成了传感器的布局，因此该部分的主要任务是借助下位机将读取的传感器的信号转化为角度，并将这些数据传送到上位机。传感电路的简要布局如下：  图示  描述已自动生成  图4 传感电路布局  使用单片机Arduino读取每个编码器的电信号，转化为对应角度后，通过串口的方式发送到上位机，并将结果进行可视化绘图，由于编码器额定电压为5V直流电源，因此需要额外引入一个整流降压模块，将220V 交流电源转化为 5V 直流电源。  对于ABZ相增量式编码器，其测量角度的原理是读取的是三个相位对应的电平，通过判断A相上升沿触发时B相电平情况判断转动方向，每一个A相触发沿代表转动一个分辨率，多个触发沿累计的结果表现为转动角度，因此测量编码器角度的算法较为简单，只需在检测到A相上升沿时，判断此时B相电平情况，从而决定加减单个分辨率角度。Z相标记了一个固定角度，转动到该角度时Z相产生一个高电平，且该角度不随断电改变，因此Z相被用于工作时标定，避免长时间工作累计的失真偏差。  指端转动需要体积较小的编码器，因此选择了不同的模拟量绝对式编码器，其工作原理相对简单，将读取的模拟量直接线性映射为角度即可，因此在精度和稳定性上都劣于ABZ相编码器。  在这里插入图片描述  图5 两种编码器工作原理：ABZ相(左)，模拟量(右)  对单个编码器进行调试时，发现工业用编码器的精度值极高，因此也带来了一个问题，其抗干扰能力较差，手部细微的抖动会精准的反馈在从端执行器，因此需要对采集的信号进行滤波处理，这里采用的卡尔曼滤波器，一阶信号系统的状态方程如下：  该状态方程对应标准状态方程参数如下：  卡尔曼滤波算法迭代过程如下：  该算法主要分为两个阶段，第一阶段根据之前的输出值预测下一时刻的值，记为预测值，第二个阶段根据预测值和实际观测值的权重综合两个结果。Q，R为可调参数，Q与R的比值越小表示预测值的权重越大，最终结果抗干扰越强，但是会丢失一定精度；反之，比值越大越靠近标准值。通过如下图多组对比实验，得到较为合理的Q，R值为：    图6 卡尔曼滤波参数调试过程  根据上述参数实际滤波结果如下：    图7滤波优化结果  完成实物装配以及电路调试后，同时对多个编码器进行了调试，由于装配连接件不够紧凑，在运动时存在明显的晃动，因此滤波效果不如单个调试时理想，同时机械结构也存在较多问题，其中最明显的为人机交互不够协调，手部在运动时明显感受到阻碍。   * 1. **主从端运动学建模与映射关系建立**      1. **主端运动学建模**   通过设计的机械结构得到操纵端的机构运动简图如下，其中圆柱代表旋转关节，正方体代表平动关节，紫色箭头表明运动方向，每个运动关节根据DH坐标法配备了合适的坐标系。    图8 操纵端机构运动简图及坐标系配置  根据上图坐标系得到对应DH表：    表2 操纵端DH表  计算得到对应末端和起始端齐次变换矩阵：  其中：   * + 1. **单连续体运动学建模：**   由于执行端为柔性的连续体，该结构没有显示的关节结构，因此无法直接对该结构使用DH方法直接建模分析，在这里引用一篇论文中的方法，将一段曲率恒定的柔性机构等效为含有刚性关节的机构，从而适应传统机器人运动学。  图示, 工程绘图  描述已自动生成 图示  描述已自动生成  图9 DH方法对柔性连续体建模过程  根据上图DH坐标系可以得到每段连续体的DH表以及对应的齐次变化矩阵：    表3 连续体DH表  文本  描述已自动生成  其中为绕主轴z“旋转角度”，k为曲率，反映弯曲程度，s为连续体长度，可以直接测得。  图示  描述已自动生成  图10 从端执行器运动简图及坐标系配置  从端执行器由一个可前后缩进的单自由度连续体连接一个双自由度连续体组成，以及末端可绕轴旋转的手术器械，因此得到单个连续体运动学模型后可以推导出从端整体运动学。但是在映射关系中，某些自由度可以进行简单的线性映射，因此一下主要推导连续体相关自由度与操纵端自由度之间的映射关系。   * + 1. **主从端映射关系推导**   下图阐述了从主端构型空间，也即读取的编码器角度信息到从端驱动空间，也即控制绳长变化的电机转动角度之间的映射关系。  **图形用户界面, 文本, 应用程序, 聊天或短信  描述已自动生成**  图11 输入到输出映射流程图  先推导主从两端构型空间映射关系：根据直觉式控制方式的需求，主从系统之间需要满足以下约束：   * 约束一：在标定模式（不进行运动缩放）从端柔性手术机械臂带朝向要时刻主端手指的朝向保持一致 * 约束二：从端沿内窥镜通道轴向方向的伸缩运动与主端小臂前后的运动呈比例缩放关系   根据约束一中关系，需要保证在初始末端坐标系和世界坐标系相同的情况下，主从两端旋转矩阵部分相同。常规的思路是通过主端正运动学计算主端齐次变换矩阵的旋转矩阵，再借助从端逆运动学求解使从端旋转等于的参数。但该方法可能存多个解或者无解的情况，而且主从两端存在明显的对应关系，因此可以根据对应关系分布求解。  旋转矩阵和只由四个偏转关节决定，因此只需要考虑从坐标系 与 坐标系 之间的关系。其中坐标 对应的小臂偏转与手腕偏转完全独立，因此可以分开分析，以下推导主端关节变量 与 从端两端连续体变量之间映射关系。其中从端变量 分别表示近端连续体曲率和长度，由于近端只有在一个平面的自由度，因此对应的偏转角度为0，同理后面三个参数分别对应远端连续体偏转角度，曲率和长度。  **小臂偏转关节与近端连续体：**  单独考虑小臂只有一个旋转过程，对应的旋转矩阵为 ，  根据前文中连续体运动学建模结构，近端平面连续体齐次变化矩阵中的旋转矩阵  由于两者坐标系刚好差，因此只需满足  **手腕偏转关节与远端连续体：**  为了使得初始状态下末端与起始段坐标系关系一致，在现有坐标系基础上添加两个额外坐标系如下图：  图示, 示意图  描述已自动生成  图12 操纵端额外坐标系配置  构造新的DH表格：  表格  描述已自动生成  表4 添加额外坐标系后的DH表  计算坐标系 在坐标系 下的齐次变换矩阵  同样根据之前连续体模型，可以得到远端连续体末端坐标系与起事端坐标系 之间的齐次变化矩阵 如下:  通过观察 和 ，其中旋转矩阵部分无法保证恒相等。为了解决该问题，使用几何法，通过观察旋转轴之间的角度关系求解：  下图描述了二连杆先绕 旋转后，再绕 旋转后得到最终二连杆末端坐标系的过程，观察下图可以发现，该结果同样可也通过先绕旋转 角度后得到坐标系，再绕 旋转得到坐标系 该坐标系满足于坐标系z轴同向，因此这里主要的问题是如何借助几何关系，根据已知的 求解 。    图12 二连杆运动过程坐标姿态变化  借助图中两组投影关系：在平面上的投影为，在平面上的投影为，借助这两组投影关系和三余弦定理（见附件）可以构建三个等式如下：   * 三余弦组合1: * 三余弦组合2： * 三余弦组合3：   由等式联立求解可得  使用matlab验证上述结论:    图13 matlab验证上述映射关系  其中绿色坐标系为世界坐标系，红色坐标系为主端二连杆末端朝向，蓝色坐标系为连续体末端朝向，通过可视化坐标系变换可以验证该公式可以满足z轴同一朝向，但是x-y平面存在一个偏置，需要继续借助下图几何关系求解该偏置角度。图中左右两个平面分别对应上图中平面和平面，两个平面之间的夹角为，主端二连杆最终x轴对应为，因此与OC之间的夹角为，从端连续体最终x轴对应，因此与*OB*之间的夹角为。为了求解与之间的夹角，同样需要借助投影关系以及三余弦定理，作辅助线*OQ*为*OP*在平面*OBA*上的投影，可以得到三组等式：   * 三余弦组合1:: * 三余弦组合2:: * 三余弦组合2::   其中可根据直线在另一个平面上投影夹角的几何关系求得，这里省略求解过程：  联立等式(4)(5)(6)(7)可以求解偏置角度；    图14 目前映射关系存在的偏置问题  同样使用matlab对上述结论进行验证，对坐标变换后的结果可视化如下：  图表, 折线图  描述已自动生成  图15 matlab验证修改后的映射关系  两个坐标系完全重合可以正面结论正确。需要注意的是，几何法求解过程中多次使用到了反三角函数，求解的角度只能是正数，因此需要正负号的变化，通过验证正负关系满足如下结果：    表5 几何法中正负变化  因此从端手术器械为了保持和主端指尖姿态一致，在运动过程中需要实时的调节，也即：  由此可以得到主端驱动空间 到从端构型空间 之间的映射关系：  目前只完成第一步映射关系推导，从端构型空间到其驱动空间的映射关系仍在整理中。   * 1. **仿真平台搭建**   目前没有一个可直观、量化评价设计优劣的系统，可以通过搭建一个仿真平台，对设计的结果可视化，验证设计的可行性，同时设定一些列标准对设计进行量化评估。该环节目前只根据推导的正运动学进行了可视化绘图，结果如下：    图16 根据运动学和映射关系绘制的简易仿真  该运动仿真的数据在仿真前已经设定好，如果要做到实时的仿真，需要将下位机读取的数据实时的传递到仿真程序中，并通过制作的GUI程序实时的绘制出来，目前该部分任务计划在4月末前完成。   1. **完成情况**   根据前期开题报告计划，需要在中期前完成包括参考文献检索整理、械结构设计、购买所需材料搭建平台、建立运动学模型和映射关系，以及传感模块硬件搭建与调试，自我评估以上任务大致在中期前顺利完成，同时开启了一部分计划后期展开的工作，但是之前的工作有许多地方仍存在一些问题，需要后期改进迭代。   1. **存在问题**  * 机械设计上没有做到完全不妨碍医生的手部运动，实际的体验感不佳，需要优化设计，可尝试添加自由度，使结构冗余更灵活； * 机械设计的连接件存在问题，使得实体装配完后不够牢固存在晃动，极大的影响了传感器的精度； * 滤波算法在精度和抗干扰之间存在取舍问题，需要优化滤波算法使其能够只能识别抖动信号，并只在抖动出现时对信号进行滤波处理；  1. **附录：**   [三余弦定理](https://zhuanlan.zhihu.com/p/401766934)描述的是空间中满足投影关系的三个角满足以下关系:  fig:    学生（签名）：  2023年 3月 14日 | | | | | | | |
| 指导教师意见：  已按计划开展，工作内容饱满，建议通过中期考核。    　　　　　　　　　　　　　指导教师（签名）：  　 　　　　　 2023年 3 月 16 日 | | | | | | | |