

摘 要

腹腔微创手术机器人控制系统研究

机器人辅助微创手术可减小患者的创伤，缩短术后康复的时间，因此受到患者的青睐。本文针对自主研发的机器人辅助微创手术系统，进行了微创手术机器人控制系统的研究，研究内容主要包括主-从直观控制、柔性手术器械运动学和主操作手操控舒适性研究。

首先根据微创手术机器人的结构建立了主操作手、从端机器人和柔性手术器械运动学模型，并建立驱动绳缆长度变化与柔性器械末端位置变化的对应关系。软硬件方面：硬件系统采用上下位机的控制模式，由运动控制卡实现多轴实时运动控制，提高了系统实时性，软件系统模块化实现多机械臂主-从切换控制。控制策略方面：根据主-从异构和主-从控制特点，提出了位姿分离的控制策略实现主-从增量控制；并根基根据微创手术切口位置固定的工作特点，建立了内窥镜到手术器械坐标系的变换关系，实现了主-从直观控制。

为了提高医生操控的舒适性，针对自主开发的七自由度位姿解耦的串联型主操作手提出了一种杆长优化方法。该方法根据微创手术要求，利用人机工程学和主操作手运动学建立了关于主操作手工作空间和操作灵巧度的多个优化指标，并采用组合赋权法通过合理赋予不同优化指标权重建立了主操作手杆长优化的综合性能指标。

设计主操作手性能测试实验，验证了优化后的主操作手工作空间覆盖了人手极限操作空间和人手操作舒适空间，在人手极限操作空间内具有较高的灵巧度。使用自主研制主操作手在内窥镜视野下控制柔性器械，操作者通过主操作手控制器械，使器械在内窥镜反馈的图像与主操作手具有相同的运动趋势，验证了机器人系统的运动学和主-从控制策略的有效性，实验证明在所提出的运动学求解方法和主-从控制策略下，从端机器人可以在主操作手的控制下完成主-从直观操控，并通过 3D 动作捕捉系统记录主-从跟随轨迹，通过主-从跟随轨迹对比，验证了机器人系统具有良好的运动精度。最后通过小环抓取实验验证该机器人系统能在主-从式控制下实现精细化操作。

关键词：腹腔微创手术机器人，运动学，主-从控制策略，主操作手

ABSTRACT

Research on the robot control system for minimally invasive abdominal surgery

Robot assisted minimally invasive surgery can reduce the trauma of patients and shorten the time of postoperative rehabilitation, so it is favored by patients. In this paper, the control system of robot assisted minimally invasive surgery system is studied, including master-slave visual control, kinematics of flexible surgical instruments and comfort of master manipulator.

Firstly, according to the structure of the minimally invasive surgical robot, the kinematics models of the master manipulator, the slave robot and the flexible surgical instrument are established, and the corresponding relationship between the change of the length of the driving rope and the change of the end position of the flexible instrument is established. Software and hardware: the hardware system adopts the control mode of upper and lower computer, and the motion control card realizes the multi axis real-time motion control, which improves the real-time performance of the system, and the software system modularizes to realize the master-slave switching control of multi manipulator. Control strategy: according to the characteristics of master-slave heterogeneity and master-slave control, a control strategy of pose separation is proposed to realize master-slave incremental control; According to the working characteristics of minimally invasive surgery incision position fixed, the transformation relationship between endoscope and surgical instrument coordinate system is established, and the master-slave visual control is realized.

In order to improve the comfort of the doctor's manipulation, a rod length optimization method is proposed for the self-developed 7-DOF pose decoupled series main manipulator. According to the requirements of minimally invasive surgery, this method established several optimization indexes about the workspace and dexterity of the main manipulator by using ergonomics and kinematics of the main manipulator,

and established the comprehensive performance index of the main manipulator rod length optimization by using the combination weighting method.

The main manipulator performance test experiment is designed to verify that the optimized main manipulator workspace covers the human limit operation space and human comfort space, and has high dexterity in the human limit operation space. Using the self-developed master manipulator to control the flexible instrument in the field of view of endoscope, the operator controls the instrument through the master manipulator, so that the feedback image of the instrument has the same movement trend as the master manipulator, which verifies the effectiveness of the kinematics and master-slave control strategy of the robot system, The slave robot can complete the master-slave visual control under the control of the master manipulator, and record the master-slave follow-up trajectory through the 3D motion capture system. Through the comparison of the master-slave follow-up trajectory, it is verified that the robot system has good motion accuracy. Finally, the small ring grasping experiment shows that the robot system can achieve fine operation under master-slave control.

Keywords: Minimally invasive abdominal surgery robot, Kinematics, Master-slave control strategy, Master manipulator

目 录

第 1 章 绪论.....	1
1.1 研究背景目的及意义.....	1
1.2 微创手术机器人研究现状.....	1
1.2.1 国外研究现状.....	1
1.2.2 国内研究现状.....	5
1.3 主操作手研究现状.....	6
1.3.1 国外研究现状.....	7
1.3.2 国内研究现状.....	8
1.4 本文课题来源.....	10
1.5 本文主要研究内容.....	10
第 2 章 微创手术机器人控制系统设计.....	13
2.1 引言.....	13
2.2 微创手术机器人系统组成.....	13
2.2.2 主操作手.....	13
2.2.2 从端机器人.....	14
2.2.3 末端执行器械.....	16
2.3 硬件设计.....	17

2.4	软件设计.....	20
2.5	本章小结.....	22
第 3 章	微创手术机器人主-从控制策略研究.....	23
3.1	引言.....	23
3.2	微创手术机器人系统运动学分析.....	23
3.2.1	从端机器人运动学分析.....	23
3.2.2	远心机构运动学分析.....	25
3.2.3	主操作手运动学分析.....	26
3.2.4	柔性器械精确控制分析.....	28
3.3	微创手术机器人主-从控制策略.....	34
3.3.1	位姿增量控制.....	34
3.3.2	手眼协调直观控制.....	37
3.4	本章小结.....	38
第 4 章	主操作手控制舒适性研究.....	39
4.1	引言.....	39
4.2	人手操作空间分析.....	39
4.3	主操作手运动空间分析.....	40
4.4	主操作手优化函数建立.....	41

4.5 本章小结.....	44
第 5 章 主操作手及主-从控制实验.....	45
5.1 引言.....	45
5.2 主操作手性能验证.....	45
5.2.1 主操作手运动空间实验.....	45
5.2.2 主操作手灵巧度实验.....	47
5.3 机器人运动实验.....	49
5.4 主-从控制实验.....	51
5.5 本章小结.....	52
第 6 章 结论与展望.....	55
6.1 结论.....	55
6.2 展望.....	56
参考文献.....	57
作者简介及科研成果.....	63
致谢.....	65

第 1 章 绪论

1.1 研究背景目的及意义

二十世纪八十年代微创外科手术得到快速发展,胸腹腔外科手术从开放式手术转为微创手术。在传统的微创手术(MIS)中,外科医生通过三个或四个小切口将手术器械及工具插入患者体内完成手术,这种方式减少了患者的创伤和恢复时间使手术质量得到提升^[1,2]。近年来随着机器人技术的应用,机器人辅助微创手术(RMIS)得到了快速发展。在机器人辅助微创手术过程中,医生操作控制台上的主操作手将手部运动信息映射给机器人机械臂上的手术器械,手术器械复现医生手部动作以完成各种手术操作^[3,4]。RMIS使医生可以通过两副主操作手切换控制多个机械臂进行手术,并且机器人的运动控制系统可以避免杠杆效应,使医生可以根据内窥镜系统反馈的图像进行直观的操作。并且机器人运动精度高可以长时间稳定的提供手术操作所需的力,所以使用机器人辅助微创手术可以使手术操作更加精细灵活,手术过程更加稳定,从而减少了手术所需时间,使手术风险大大降低^[5-8]。然而微创手术机器人的控制系统的性能,对手术操作的稳定性,灵活性,以及对医生长时间手术而产生的生理和心理疲劳都有直接影响。因此,主-从控制系统的研究对于提高手术操作直观性、稳定性、灵活性,以及缓解医生疲劳、提高手术质量具有重要意义。

本文针对自主研发的机器人辅助微创手术系统,搭建了软硬件结构实现了主-从控制,并基于此进行了控制系统技术的研究,包括主-从控制直观性研究、机器人系统运动学分析和主操作手操控舒适性研究。

1.2 微创手术机器人研究现状

1.2.1 国外研究现状

AESOP-1000 辅助微创手术系统是 Computer Motion 公司在 1994 年推出的产品,该系统可以代替医生或者助手把持内窥镜,由医生控制移动内窥镜的位置,机械臂把持内窥镜给医生带来了更好的操控性和图像稳定性,避免了医生或助手

长时间把持内窥镜带来的图像抖动^[9-11]，但是医生操作方向与内窥镜图像运动方向不匹配使得该系统操作手眼协调性差。所以在 AESOP-1000 的基础上，Computer Motion 公司又开发出 AESOP-200^[12]和 AESOP-300^[13]。AESOP-2000 可以语音输入操作指令；AESOP-3000 系统的机械臂具有七个自由度，虽然更加灵活但操作实时性较差^[14]。图 1.1 为 AESOP 系列机器人辅助微创手术系统。



图 1.1 AESOP 系列机器人辅助微创手术系统

Fig.1.1 Aesop series robot assisted minimally invasive surgery system

Intuitive Surgical 公司的工程师团队在 1996 年至 1999 年，研发了 3 代微创手术机器人样机。通过样机技术迭代积累和大量试验数据指导，Intuitive Surgical 公司推出了 Da Vinci 手术机器人系统^[15,16]。Da Vinci 手术系统于 2001 年得到 FDA 批准，允许其应用与胸腔手术适应症和根治性前列腺切除术适应症。Da Vinci 手术机器人系统由主控台、图像处理车和集成式手术机器人车组成，主控台上有两副主操作手立体显示器和脚踏开关，集成式手术机器人车有四条机械臂，其中三条机械臂上安装手术器械，一条机械臂上安装内窥镜，手术器械和内窥镜均为快换式，它们之间可以任意交换。手术时医生在内窥镜反馈的 3D 图像，操作主操作手控制机械臂上的手术器械完成各种手术动作。至今 Intuitive Surgical 公司已经推出以一系列产品^[17-19]，2003 年从端增加为四条机械臂，能够给医生提供更强的手术控制能力（比如牵扯组织），同时也增加了能够切换不同臂之间控制的功能，手术器械的种类已经从 6 种扩充到了 50 种。da Vinci S 系统于 2006 年发布，通过人机工程学设计把术前调整时间减少了一倍（减少了一半的术前调整步

骤), 大大提升了病人端机器人的操作体验, 病人端从手改进的更小, 更轻, 更容易被制造和维护, 运动空间也变得更大。同时提高了机器人可靠性和容错率。如图 1.2 所示为 2009 年发布的最新款的 da Vinci Si 改进包括医生操作台更加符合人机工程学, 提供了更高清的 3D 显示器, 将主操作手的走线全部改为内部, 最后, da Vinci Si 设置了双医生控制台方案, 采用“交换控制”的方案允许医生共同控制机器人的器械, 这样可以更方便医生培训以及协作手术。



图像处理车 手术机器人车 主控台

图 1.2 Da Vinci 手术机器人系统

Fig.1.2 Da Vinci surgical robot system

1998 年, 美国 Computer Motion 公司在 AESOP 微创手术机器人系统的研究基础上, 开发出了 ZEUS 微创手术机器人系统^[20-22]。ZEUS 系统获得美国 FDA 认证用于临床微创手术。如图 1.3 所示: 该系统包括主控台、三个机械臂。该微创手术机器人系统的主操手和从手机械臂在结构上是不同的, 医生通过主控台上的显示器观察手术视野, 同时使用具有七自由度的串联型主手来控制从手机械臂的运动。该系统的两个持械臂各自具有七个运动自由度, 其中六个自由度可以实现位姿调整, 一个自由度实现位置调整。位姿调整机构又分为两个无动力的被动关节和四个由电机驱动的主动关节。所以医生可以借助 ZEUS 完成更加精细的手术操作, 但是由于机械臂关节较多, 机械臂容易发生碰撞, 为了避免避碰情况的发生, 手术器械工作空间受到了很大限制。



图 1.3 ZEUS 微创手术机器人系统

Fig.1.3 Zeus minimally invasive surgery robot system

2009 年，德国宇航中心（DLR）针对手术机器人体积庞大、无力反馈、柔顺性差等问题，设计了 Miro Surge 微创手术机器人系统^[23,25]，如图 1.4 所示。该机器人系统采用独立机械臂布局，与 ZEUS 不同的是 Miro 系统机械臂仿人手臂关节，并且机型机电一体化设计，使机械臂布置更加方便，运动空间更加充裕。MIRO 机器人主要有两种控制模式，一种是位置控制模式，一种是柔顺控制模式。其中柔顺控制模式也可以称为重力补偿模式，主要是补偿了摩擦力和机器人的重力，这样使得机器人可以被随意移动，但是控制系统增加了“禁飞区”保证机器人不会碰撞到人体部位例如血管等；同时由于机器人具有冗余自由度，可以实现零空间控制。



图 1.4 Miro Surge 微创手术机器人系统

Fig.1.4 Miro surge minimally invasive surgery robot system

Senhance 手术机器人系统^[26-28]是由意大利 TransEnterix 公司研发产品，如图 1.5 所示，目前 Senhance 系统已经通过 FDA 认证。该系统有多个从端机器人车和一个主控台组成，每个独立的机器人车都有一条机械臂，医生可以根据手术需求选择小车的使用数量和布置方式，主操作手采用了与传统手术器械相同的握把，并加入力反馈系统，但是其力反馈分辨率不高。



图 1.5 Senhance 手术机器人系统

Fig.1.5 Senhance surgical robot system

1.2.2 国内研究现状

近些年我国微创手术机器人技术相关工作研究人员和公司的增多和大量研究经费的投入，我国微创手术机器人领域也取得了一定的成果。

天津大学于 2013 年成功研发了“妙手 S”手术机器人系统^[29-31], 如图 1.6 所示, 并在 2017 年 9 月通过了国家食品药品监督管理总局的创新医疗器械特别审批。“妙手 S”系统由医生控制台和从手台组成, 其中医生控制台包括: 立体图像观察窗、主操作手、控制面板、控制脚踏。



图 1.6 妙手系统

Fig.1.6 Smart hand s system

哈尔滨工业大学机器人研究所依托 863 计划项目研发了“华鹊”系列机器人^[32,35], 目前为止 “华鹊”系列微创手术机器人系统已经迭代到了第二代, 如图 1.7 所示为“华鹊 II”手术系统。该系统的三个机械臂分别集成在三个独立的可移动机器人上, 每个机械臂都安装有平行四边形远心机构, 以提供刚性器械所需的远心运动; 主操作手采用 Force Dimension 公司产品 omega 7 并联式主操作手。手术

时可根据不同术式手术切口位置的分布,布置三个移动机器人位置,然后锁定并标定小车与手术床的位置关系,从而实现多臂协作完成手术操作。



图 1.7 “华鹊 II”微创手术机器人系统

Fig.1.7 "HuaQue II" minimally invasive surgery robot system

1.3 主操作手研究现状

在机器人辅助微创手术中,外科医生操纵一对主操作手,手的运动通过主-从控制映射到机械臂末端安装的手术器械上,手术器械再现手的运动来进行手术。由于主操作手的工作空间通常比手术器械运动空间小,因此外科医生在控制手术器械到达目标位置之前,主操作手到达工作空间极限的情况经常发生,此时外科医生需要切断主-从通信以调整主操作手的位置,主操作手到达医生操作的舒适位置后,恢复主-从通信以继续手术。为了避免频繁调整主操作手的位置,在设计主操作手时应考虑其工作空间与手术时人手的操作空间的交互情况。此外,一些大型和复杂的手术可以持续 3~4 小时。主操作手控制的运动学性能和舒适性对外科医生有直接的生理和心理影响,特别是随着手术持续时间的增加,不舒适的操作方式会大大降低手术操作的精度,影响手术效果。综上所述,研制主操作手应充分考虑工作空间、运动学性能、人机工程学等影响外科医生舒适度的因素。一种工作性能优良的主操作手,可以大大减轻手术人员的疲劳,提高手术质量。

1.3.1 国外研究现状

瑞士 Force Dimension 公司产品 3.DOF omega 3 和 6.DOF Delta 型力觉主操作手是并联主操作手的早期产品，如图 1.8 所示，3.DOF 主操作手仅能实现三个平动自由度，不具备转动能力，但和串联主操作手相比有刚度大、低惯性的优点，但运动空间小、不灵活成为很大的劣势。6.DOF Delta 型力觉主操作手工作空间可达到 $\Phi 360\text{mm} \times 300\text{mm}$ ，20N 最大持续力反馈，刚度较高，但体积大、转动自由度有限^[36]。



a. 3.DOF omega 3 力觉主操作手

b. 6.DOF Delta 型力觉主操作手

图 1.8 Force Dimension 公司产品

Fig.1.8 Force Dimension products

美国 Sensable Technologies 公司开发出 PHANTOM 系列触觉交互设备是一款桌面主操作手，它包含 PHANTOM desktop 系列、PHANTOM Omni 系列和 PHANTOM Premium 系列^[37]，操作舒适、结构轻巧，在目前的力交互设备中比较成功。

PHANTOM desktop 系列如图 1.9 a 所示，该系列具有六自由度，可反馈三个移动方向上的力，可以进行位置检测，同时允许操作者操作虚拟窗口，具有便携紧凑、并行接口方便快捷的特点，十分适合办公室环境操作。

PHANTOM Omni 系列是目前比较经济实用的力反馈设备，如图 1.9 b 所示，但是这款设备的运动精度和输出力较低，工作空间也比较小。

PHANTOM Premium 系列，如图 1.9 c 所示。该系列具有三自由度力反馈，能采集三自由度位置信号，相比 desktop 系列，其运动空间和输出力都有所增大。



a. PHANTOM desktop 主操作手



b. PHANTOM Omni 主操作手



c. PHANTOM Premium 主操作手

图 1.9 PHANTOM 系列操作手

Fig.1.9 Phantom series manipulator

1.3.2 国内研究现状

目前还没有公司开发主操作手,尤其是力反馈主操作手投资研发,从事这方面研究的只有部分科研人员^[38]。近年来,随着研究人员的重视和努力,依托不同应用背景的主操作手相继开发出来。

2007 年哈尔滨工业大学开发了一款缩放式力觉主操作手,该主操作手应用于正骨手术系统^[39],如图 1.10 所示。该主操作手有六个自由度,固定在底座上的电机驱动平行四边形机构的下方两杆,使装置的运动惯量有效降低,但该装置逆运动学求解过程较复杂^[40],体积较大且工作空间较小。

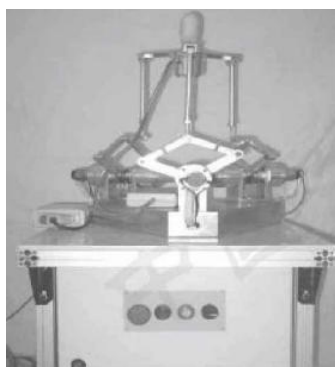


图 1.10 遥操作正骨手术缩放式力觉主操作手

Fig.1.10 Master operator of zoom force sense in teleoperation orthopedic surgery

2010 年，天津大学研发了具有力反馈功能的主操作手，如图 1.11 所示，该主操作手已应用在在“妙手”系统中，完成了猪胆囊切除实验。该主手采用电机与配重平衡的方法，平衡自重减小了机构惯性变化，另外采用了丝传动的传动方式，使传动无回差、低摩擦，提高了主操作手的精度^[41]，但是该主操作手的操作空间和灵活度较差，长时间操作易疲劳。



图 1.11 天津大学力反馈型主操作手

Fig.1.11 Force feedback type main operator of Tianjin University

2010 年哈尔滨工业大学研发的串并联混合型主操作手^[42]，如图 1.12 所示，该主操作手具有力反馈，考虑了机构重力平衡，并综合了串联机构和并联机构的优点，主操作手刚度大，操作范围较广，但运动学求解复杂，虎克铰效率低，且实际应用中存在延迟现象^[43]。



图 1.12 哈尔滨工业大学串并联混合型主操作手

Fig.1.12 Series parallel hybrid master manipulator of Harbin Institute of Technology

2013 年哈尔滨工业大学针对微创手术机器人主-从控制需求,设计了一种具有冗余腕部结构的主操作手^[44,45],虽然冗余腕部结构大大提升了主操作手的灵活性,但存在整体结构复杂,可靠性低,成本高的问题。

1.4 本文课题来源

本课题来源于吉林省发改委项目《辅助胸腹腔微创手术的新型机器人系统》(项目编号 2019C048-3)。

1.5 本文主要研究内容

本文针对课题组自主研制的微创手术机器人系统,进行手术机器人控制系统研究,搭建机器人软硬件系统,进行运动学分析根据微创手术特点对主-从直观控制策略进行了研究,并基于人机工程学提出了主操作手杆长优化函数,提高了主操作手的操控舒适性,具体研究如下几个内容:

(1) 微创手术机器人控制系统介绍:搭建微创手术机器人控制系统软硬件结构:采用上下位机的控制模式,由下位机运动控制卡实现多轴实时运动控制;模块化控制软件实现多机械臂主-从切换控制。

(2) 微创手术机器人运动学分析:将微创手术机器人按照关节形式分为被动关节部分和主动关节部分进行运动学分析,并提出了一种求解柔性手术器械运动学方法,通过分析柔性手术器械结构特征建立了手术器械运动驱动的钢丝绳长与末端位姿的关系。

(3) 微创手术机器人主-从控制策略研究:根据手术器械与主操作手主-从异构的结构特点,提出了一种位姿分离的控制方式实现增量式主-从控制;并根据手术过程中手术切口位置不变的特点,提出了一种空间变换方法,使主-从直观控制的实现更加方便。

(4) 主操作手操控舒适性研究:基于人机工程学和主操作手运动学提出了多个主操作手优化指标,并采用组合赋权法为优化指标赋予权重,建立主操作手结构优化的综合性能指标。使优化后主操作手工作空间较大,并有较好的操作舒适性和人手运动空间覆盖率。

(5) 实验研究：通过主操作手性能验证实验验证了主操作手杆长结构优化函数的合理性，通过机器人运动实验和主-从控制实验验证了运动学求解和主-从控制策略的有效性，实验证明在所提出的运动学求解方法和主-从控制策略下，从端机器人可以在主操作手的控制下完成主-从直观操控。

第 2 章 微创手术机器人控制系统设计

2.1 引言

本章首先对自主研发的微创手术机器人系统的结构功能进行介绍, 然后根据结构功能特点构建系统的软件结构和硬件结构, 采用上下位机的方式实现多轴实时控制、信息采集和控制信号发送, 并将控制软件模块化使所开发的控制软件有易用易扩展。

2.2 微创手术机器人系统组成

本文自主研发的微创手术机器人系统概况如图 2.1 所示, 主要由从端机器人、主控制台和图像处理台三部分组成。操作者根据操作主控制台上的一副主操作手, 根据图像处理台传输到显示器的图像操控从端机器人进行手术操作^[46-47]。

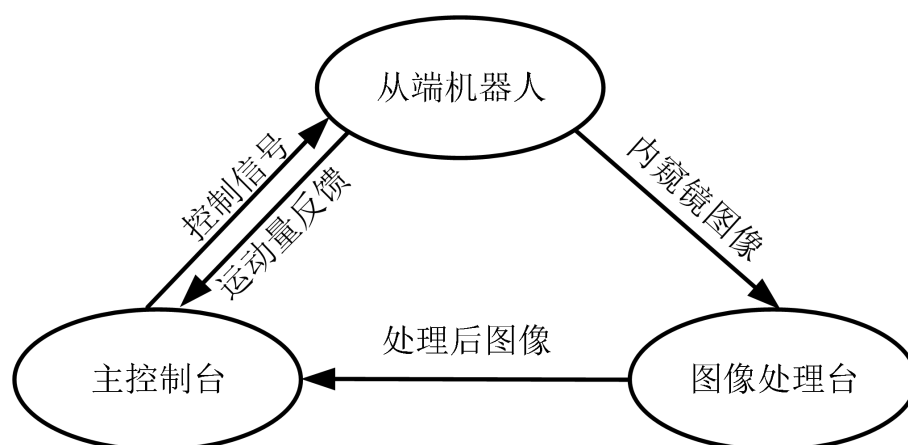


图 2.1 微创手术机器人系统

Fig.2.1 Minimally invasive surgical robot system

2.2.2 主操作手

主操作手构型按机械结构分为串联型和并联型, 按主-从的运动映射关系分为同构型和异构型。根据所设计主操作手工作空间大、结构简单紧凑、操作灵活, 且具有一定的通用性的要求, 选择串联异构型, 而串联异构存在的运动惯性问题, 由于主操作手运动速度低, 影响较小, 且可以通过结构轻量化降低运动惯性。主操作手构型是将各个关节连接起来组成运动链, 将各个自由度合理地分布在运动

链上。考虑实际手术情况，医生先操作主手使手术器械达到病灶位置然后再调整手术器械的姿态进行手术，因此应将主操作手的三个位置自由度放置在整個构型的始端，三个姿态自由度和夹持自由度应放置在整個构型的末端。运动副的组合，常用的组合类型有直角坐标型、圆柱坐标型、球坐标型和关节型，鉴于关节型具有结构紧凑、体积小、工作空间大的特点，课题组采用串联关节的形式设计了主操作手，如图 2.2 所示，该主操作手具有 7 个自由度，关节 1~3 用于实现末端执行器在 x, y, z 方向上的位置调整，关节 4~6 用于实现末端执行器的姿态调整，且为避免主操作手运动的位姿耦合，关节 4~6 的运动轴线交于一点，关节 7 用于末端执行器上小爪的开合。上述关节运动可映射为从端机器人末端执行器的位置调整、姿态调整和末端执行器夹持所需的开合运动。

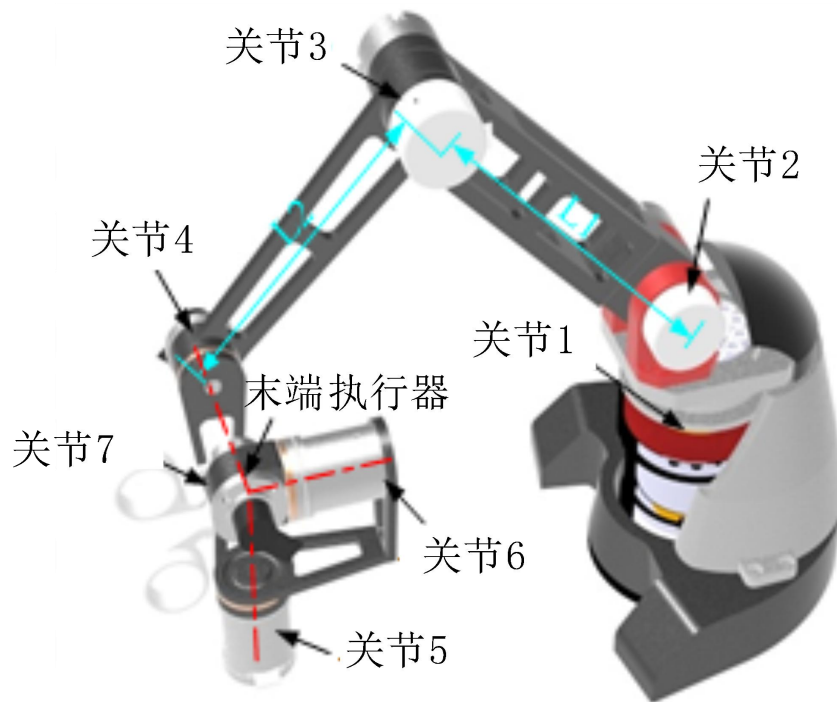


图 2.2 主操作手

Fig.2.2 Main operator

2.2.2 从端机器人

从端机器人概况如图 2.3 所示，主要由机器人车、持镜臂、持械臂和手术器械构成。从端机器人可以通过底座的四个车轮移动到手术台附近并固定，机器人车的直线关节可以将集成式机械臂调整到适当高度，使机械臂系统到达患者腹

腔上方,被动式定位关节 1~3,用于调整持镜臂和持械臂到达患者手术切口附近;左侧和右侧持械臂各有两个被动式定位关节 5~8,用于调整左右持械臂的初始位置,使手术器械可以通过手术切口进入人体腹腔。持镜臂末端安装有新型远心机构,新型远心机构结构紧凑,体积小,在手术过程中能有效的避免机械臂之间的运动干涉;左右持械臂末端安装有柔性手术器械,柔性手术器械能够在病人的身体中实现体位的改变,因此左右持械臂不需要有远心机构,使持械臂得到简化。

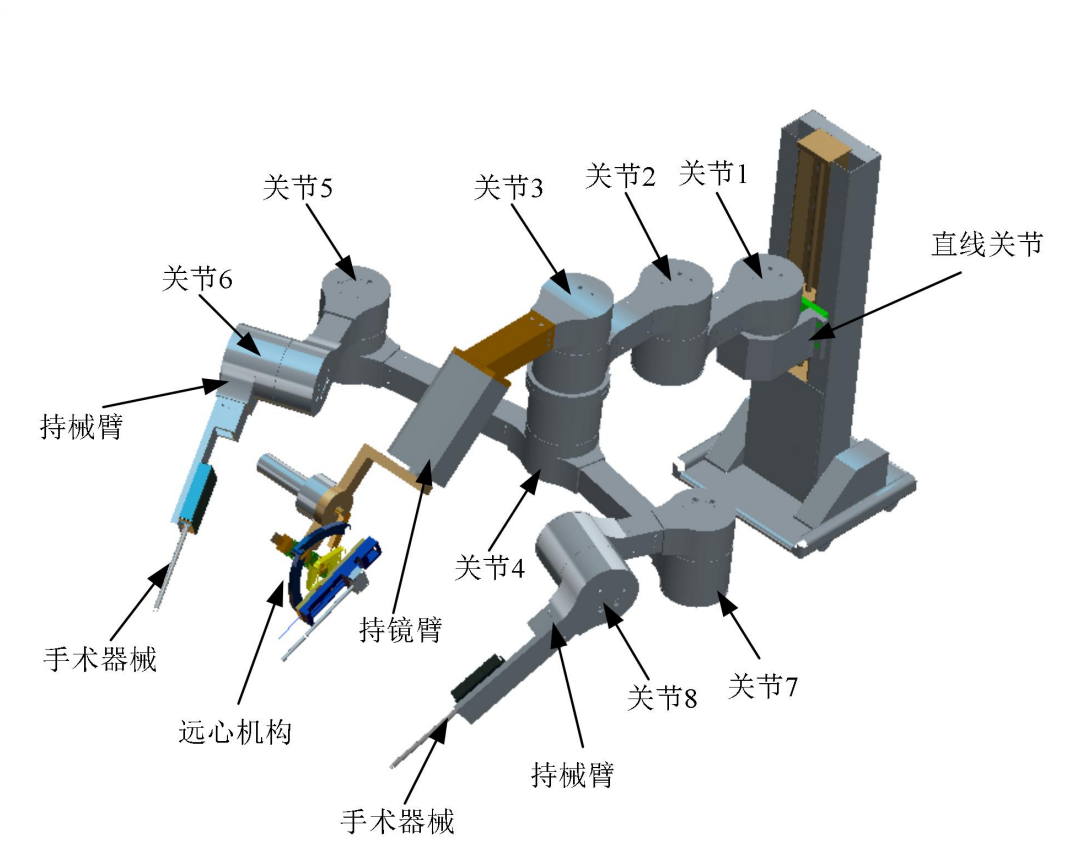


图 2.3 从端手术机器人

Fig.2.3 Slave surgical robot

在微创外科手术过程中,为了避免划破患者皮肤,手术器械被限制只能围绕患者手术切口运动:两个绕体表切口旋转自由度(俯仰和偏航),一个沿器械轴线的平移自由度(探入运动)。目前实现手术器械约束绕远心点运动的结构形式有被动式关节、主动控制和机械约束式远心机构。其中机械约束式远心机构因其成本低、安全性高的优点被广泛采用,课题组自主研发的新型机械约束式远心机构为内窥镜提供三自由度的远心运动,如图 2.4 所示:

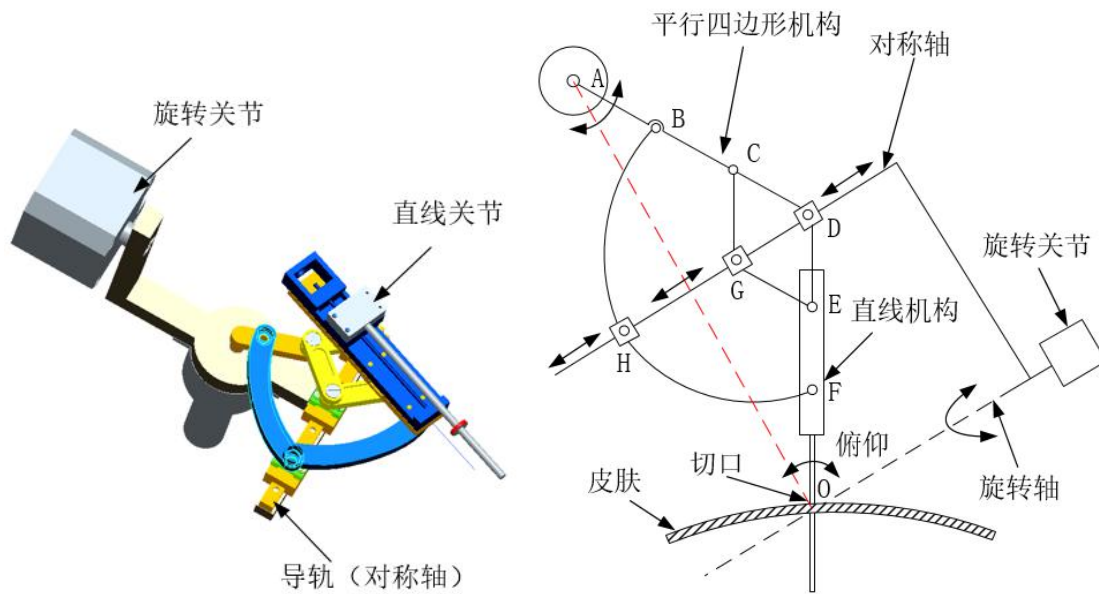


图 2.4 远心机构

Fig.2.4 Telecentric mechanism

新型远心机构由一个旋转关节、一个双平行四边形结构和一个线性关节组成。旋转关节的旋转轴通过切口，因此旋转轴旋转带动内窥镜偏航时，内窥镜在切口 O 处没有压力；双平行四边形结构具有对称结构，内窥镜做俯仰运动时，铰链点 E 和 F 的速度分别等于铰链点 C 和 B 的速度，使得腹腔镜所在杆 EF 与杆 AC 保持相同的运动；手术切口 O 是旋转轴和腹腔镜的交点，O 点与铰接点 A 对称且具有相同的速度。所以，自主研发的远心机构可以使内窥镜在做俯仰、偏航、探入运动时都不会对手术切口产生压力，并且结构紧凑，体积小，能够有效的避免机械臂之间的运动干涉问题。

2.2.3 末端执行器械

上述结构完成了定位与视觉引导部分的术前准备工作，手术器械和内窥镜通过手术切口探入患者的体内，医生根据内窥镜视觉反馈图像，用主操作手控制手术器械在人体内完成夹持、剥离、缝合、打结等动作，以上动作需要手术器械具有很好的灵活性和操控性。为了使手术器械具有足够的灵活性以满足微创手术操作的要求，课题组基于线驱动的传动方式，设计了一种柔性手术器械如图 2.5 所示：

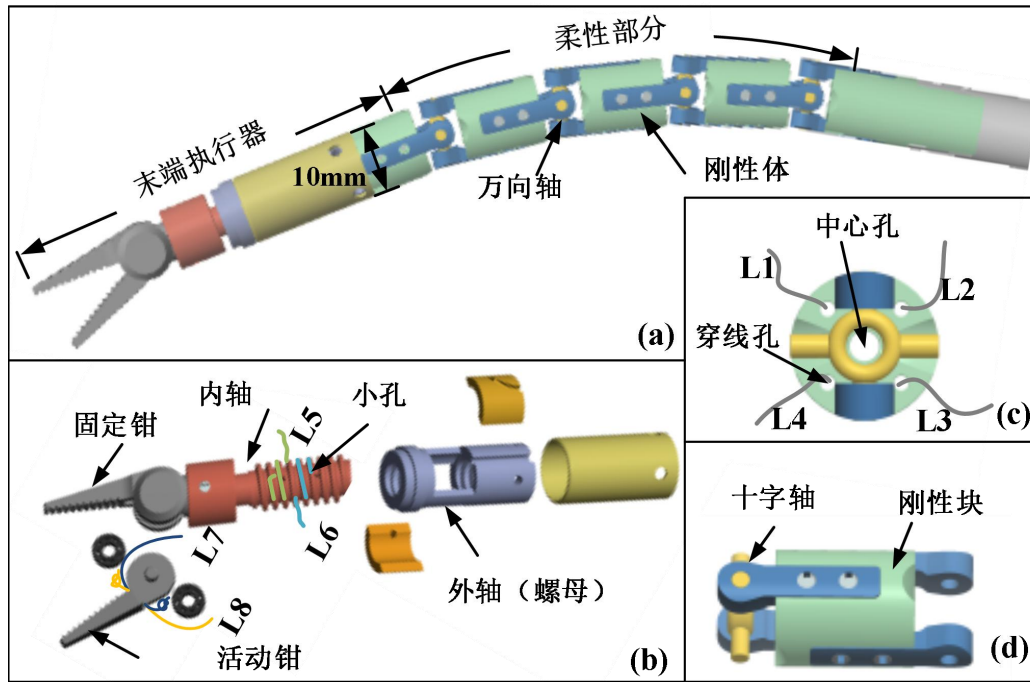


图 2.5 柔性手术器械

Fig.2.5 Flexible surgical instruments

该器械采用了仿生蛇结构来实现柔性^[23]。柔性部分由一系列由万向轴连接的节段组成，通过钢丝绳驱动实现柔性部分的弯曲运动。如图 2.5 (c) 所示，每个节段由一个万向联轴器和一个刚性块组成，刚性块上有四个圆孔和一个中心孔，四个圆孔用于穿过四根钢丝绳 L1、L2、L3 和 L4 (图 2.5 (c))，用于驱动柔性部分的弯曲，由于 L1、L2、L3 和 L4 四根钢丝绳是分别驱动的，因此通过控制四根钢丝绳的长度，可以实现柔性部分向任意方向的弯曲角度。中心孔用于穿过控制末端执行器 (钢丝绳 L5、L6) 和活动夹 (钢丝绳 L7、L8) 旋转的钢丝绳，如图 2.5 (b) 所示，末端执行器由一个固定夹和一个活动夹组成，两根驱动绳固定在活动夹上并反向缠绕驱动手术夹开合；为了方便调整手术夹开合方向，我们将固定夹一端作为丝杠，柔性杆末端作为螺母，用两根驱动绳打结在固定夹上，沿螺纹反向缠绕，两根驱动绳的收放即可驱动手术夹旋转。

2.3 硬件设计

本节针对上述自主开发的机器人系统的结构特点和使用要求设计了机器人硬件结构：采用上下位机的控制模式，以上位机 PC 机作为运算处理单元，以多轴运动控制卡作为数据采集、信号处理单元，上下位机之间通过千兆网口进行通

讯，下位机通过多个串联轴卡实现与各个关节电机驱动器连接，从而实现多轴运动控制。如图 2.6 所示为机器人控制系统结构：

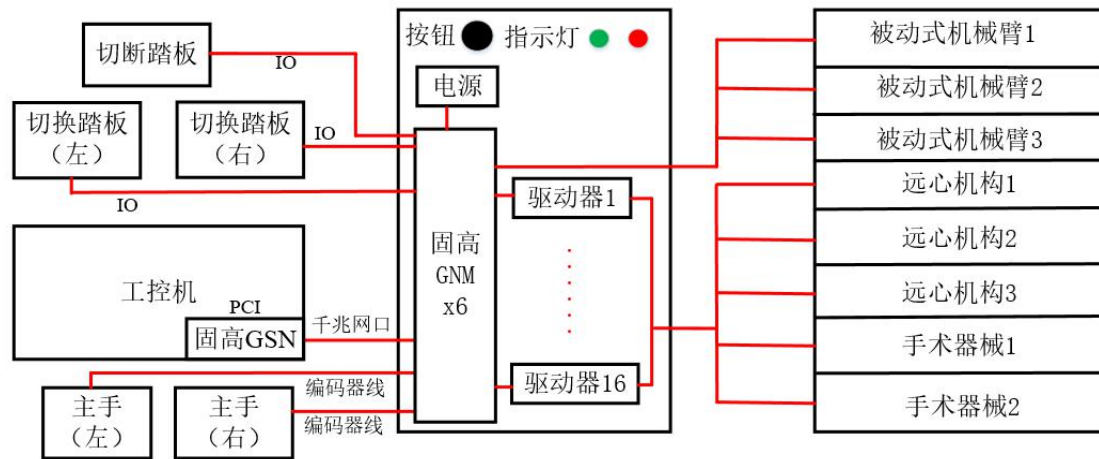


图 2.6 机器人控制系统结构图

Fig.2.6 Structure diagram of robot control system

（1）上位机

上位机为整个系统的运算单元，需要对采集到的信息进行实时处理，并发布控制信号和运动信息，因此采用运算能力较强、运行稳定、通讯接口较多的工控机作为上位机。

（2）下位机

下位机为整个系统的控制单元，主要用于采集处理传感器和控制开关信号，将上位机发出的关节运动信号转化为脉冲指令发送给电机驱动器。根据上述功能要求，采用固高运动控制卡 GSN 作为机器人控制系统的下位机，该运动控制卡可以实现高速的点位运动控制和复杂的控制功能；支持扩展可根据使用要求配置具有不同的功能的轴卡，本系统采用 GNM 602 型号轴卡，该轴卡可以采集编码器，光栅尺，磁栅尺数据并转换为运动量，同时提供原点、限位、切换开关 I/O 接口，如图 2.7 所示，使控制系统集成更加方便。

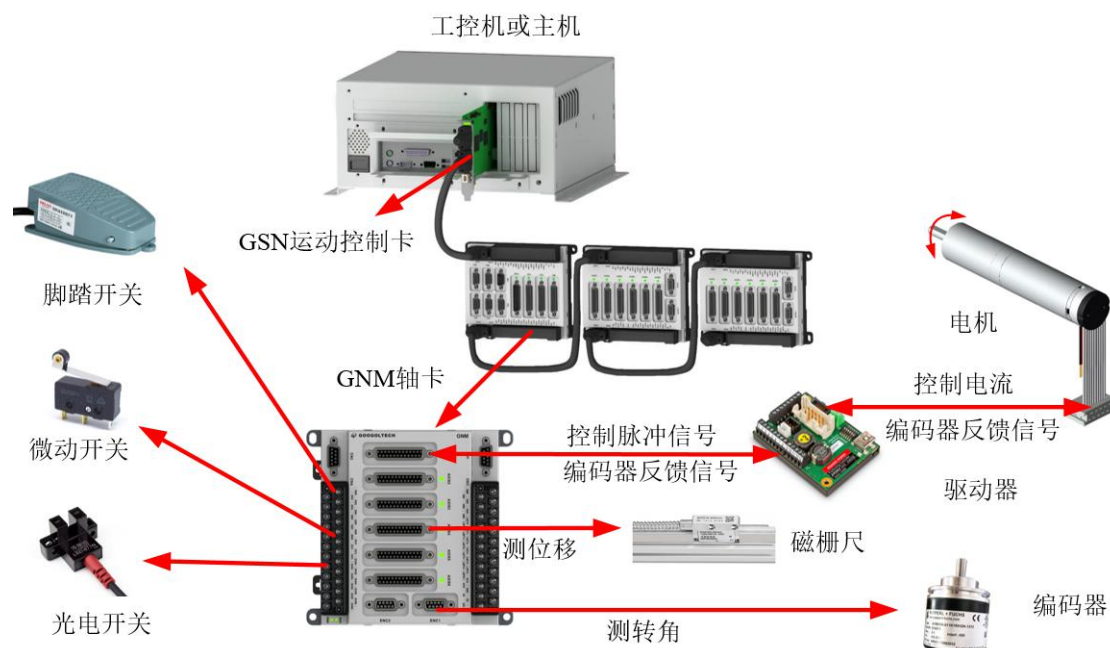


图 2.7 运动控制卡功能示意图

Fig.2.7 Function diagram of motion control card

（3）控制开关

控制开关分为三类：原点开关、限位开关和切换脚踏板；其中原点开关和限位开关直线关节和转动关节的定位和限位，非接触式开关采用光电开关，接触式开关微动开关，脚踏板开关用于切换控制模式。由于 GNM 轴卡的 I/O 接口为低电平触发，所以控制开关均采用 NPN 型常开或长闭型。

（3）运动检测单元

机器人旋转关节运动量检测采用增量式编码器检测，直线关节运动量采用磁栅尺检测，增量式编码器和磁栅尺不具备断电记录位置功能，所以配合原点开关使用，被动关节开机前均位于程序零点位置，主动关节开机后自动寻零，触发原点开关以后位置归零，归零以后上位机即可读取各个关节的绝对位置，进行运动学求解。

（4）电机和驱动器

根据机器人结构布局紧凑，运动控制精确可靠的要求，电机及驱动器选用 Maxon 公司的产品。关节电机运动扁平化的盘式电机 flat 系列，具有扁平化扭矩大的特点，符合远心机构关节使用要求；器械电机选用 DCX 系列电机，该电机

径向尺寸小转速高，响应速度快，符合器械空间布局紧凑，工作扭矩大，以及快速响应的要求；驱动器选用 EPOS2 24/2 和 EPOS2 50/5，EPOS2 系列驱动器带有位置闭环功能，运动控制卡通过 I/O 接口接收发送脉冲控制电机位置，驱动器、电机与控制卡接线如图 2.8 所示。

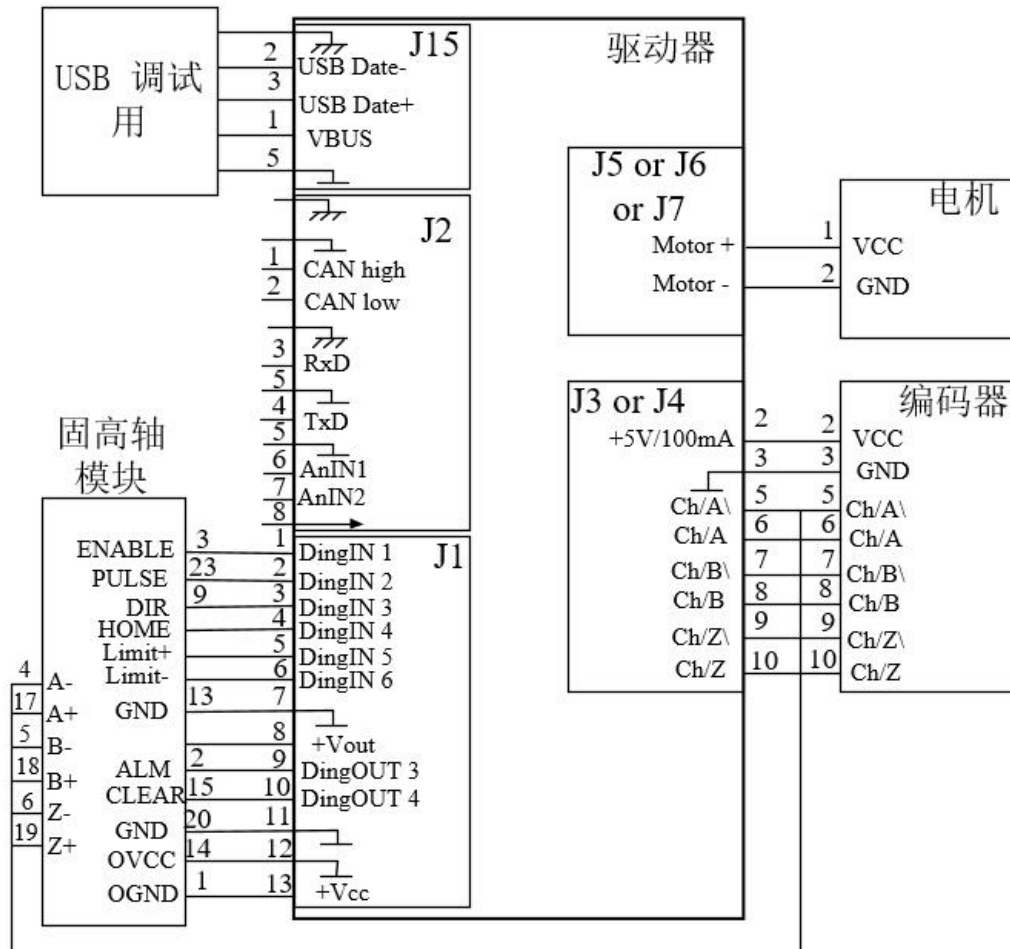


图 2.8 驱动器、电机与控制卡接线图

Fig.2.8 Wiring diagram of driver, motor and control card

2.4 软件设计

为了便于程序的实现、使用、维护和迭代，将控制系统软件按照其实现功能的不同分为三个模块：人机交互模块、数据处理模块和动作实现模块；各个模块功能以及模块之间数据传递结构，如图 2.9 所示：

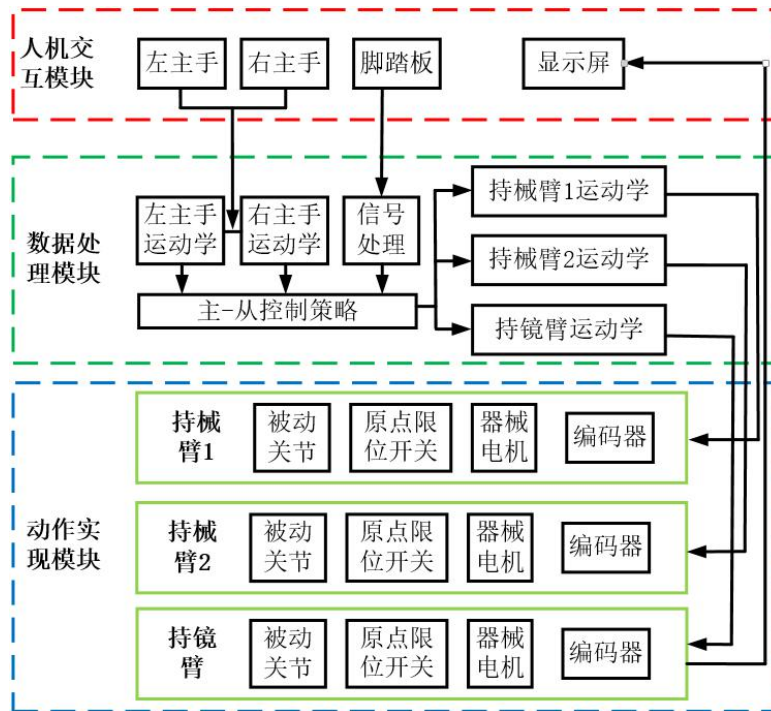


图 2.9 机器人控制系统软件结构图

Fig.2.9 Software structure of robot control system

(1) 人机交互模块实现：该模块包括与操作者交互的主操作手、脚踏板和显示器信息采集程序。主操作手采集人手部动作信息控制手术器械；脚踏板采集操作者切换控制模式的信号；显示器反馈手术器械动作并为操作者将要实现的动作做视觉参考。

(2) 数据处理模块实现：该模块包括数据信号处理、运动学求解和主-从控制策略；信号处理：根据脚踏板控制信号不同主操作手控制信息对应控制不同机械臂上的手术器械，并且切断脚踏板踩下后可以切断主-从控制，可调整主操作手到达舒适位置再进行主-从控制；运动学求解：根据采集主操作手编码器数据求解主操作手的位置变化和姿态变化，并求解得到增量数据用于控制机械臂；由于操作者对手术器械的控制是基于内窥镜图像引导的，所以机械臂的逆运动学是基于内窥镜坐标系建立的，以使操作者得到直观的操作体验；主-从控制策略：主-从控制采用增量控制，实现采集两个操作手位姿运动控制两个手术器械和一个内窥镜运动。

(3) 动作实现模块：该模块将手术器械运动数据解算为脉冲数发送给电机驱动器，控制电机运动；处理编码器磁栅尺反馈数据发送到数据处理模块，并根据原电开关信号使编码器数据归零，根据限位开关对电机进行平滑制动。

2.5 本章小结

本章介绍了自主设计的微创手术机器人系统，包括主操作手，新型远心机构，柔性手术器械，从端机器人结构，以及控制系统硬件结构和软件结构。硬件系统采用上下位机的控制模式，由运动控制卡实现多轴实时运动控制，提高了系统实时性软件系统模块化实现多机械臂主-从控制。

第 3 章 微创手术机器人主-从控制策略研究

3.1 引言

在手术机器人使用过程中，医生根据显示屏反馈的病灶区域和手术器械图像进行手术操作，主操作手端的运动映射到手术器械和内窥镜运动，为实现良好的直观操作性，本章根据微创手术机器人系统结构、运动和控制方式的特点，对主操作手和从端机器人进行运动学分析求解，并将从端机器人分为定位部分和运动部分两部分进行分析，基于此进行主-从控制策略的研究，实现了主-从控制的直观操作。

3.2 微创手术机器人系统运动学分析

本节通过对从端机器人、主操作手和手术器械的运动学分析，为机器人主-从控制算法提供基础。主操作手和从端机器人定位部分的关节由被动关节组成，被动关节在外部驱动下运动，根据关节运动角度，通过正运动学得到主操作手和从端机器人定位部分的位姿，所以主操作手和从端机器人定位部分只需要进行正运动学求解。从端机器人远心机构和手术器械的关节由内窥镜和手术器械的驱动关节组成，手术器械和内窥镜末端位姿跟随主操作手运动，根据手术器械和内窥镜末端位姿变化求解驱动关节变化量，所以从端机器人远心机构和手术器械需要进行正、逆运动学求解。

3.2.1 从端机器人运动学分析

本节根据从端机器人结构，将从端机器人分为：被动式定位关节和远心机构两部分。并采用 Denavit-Hartenberg (D-H) 参数表示法进行运动学建模。从端机器人被动式定位关节部分的运动学模型如图 3.1 所示，术前准备通过调整被动关节 0-4 使机械臂到达患者手术切口上方，使持镜臂的远心点与探入内窥镜的手术切口重合，被动关节 0-3 锁死，机器人相对患者的位置关系不再发生变化^[48]。然后调整被动关节 4,7，使手术器械通过手术切口探入腹腔，因此当机器人车位姿和手术切口确定以后被动关节的位置是确定的，并在手术操作过程中不需要调节。所以对从端机器人被动式定位关节部分进行正运动学求解，

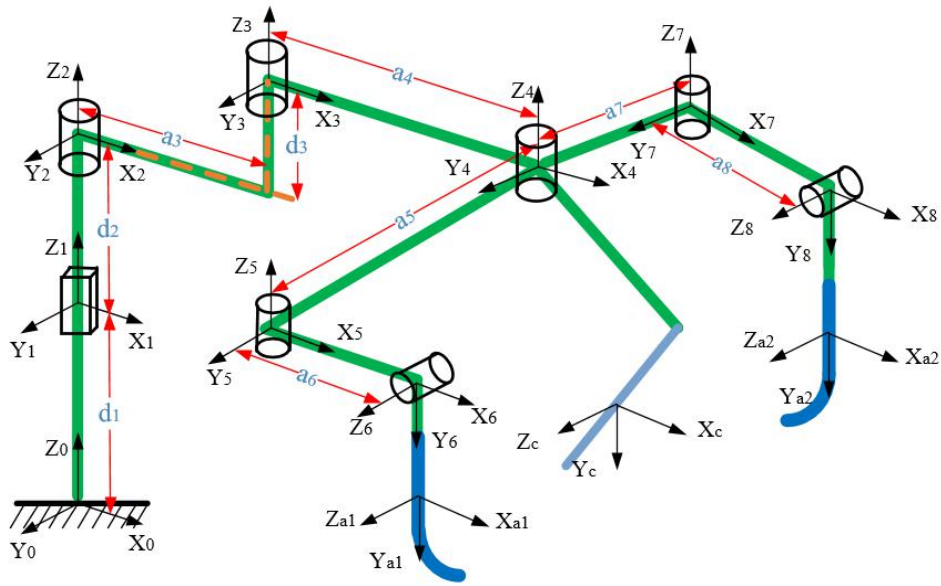


图 3.1 从端机器人被动式定位关节部分运动学模型

Fig.3.1 Kinematic model of passive positioning joint of slave robot

由于两条持械臂结构相同，且持械臂定位关节包含持镜臂定位关节，所以以持械臂 1 为例求解正运动学，持械臂 1 D-H 表如下：

表 3.1 持械臂 1 D-H 参数表

Table3.1 D-H parameters of arm 1

关节	θ	d	a	α
1	0	d_1	0	0
2	θ_2	d_2	0	0
3	θ_3	d_3	a_3	0
4	θ_4	0	a_4	0
5	θ_5	0	a_5	90
6	θ_6	0	a_6	0

由坐标系 {i-1} 到坐标系 {i} 的变换矩阵 ${}^{i-1}T_i$ 变换通式：

$${}^{i-1}T_i = \begin{bmatrix} c\theta_i & -s\theta_i c\alpha_i & s\theta_i s\alpha_i & a_i c\theta_i \\ s\theta_i & c\theta_i c\alpha_i & -c\theta_i s\alpha_i & a_i s\theta_i \\ 0 & s\alpha_i & c\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (3.1)$$

其中, $s\theta$ 是 $\sin \theta$ 的缩写, $c\theta$ 是 $\cos \theta$ 的缩写, $s\alpha$ 是 $\sin \alpha$ 的缩写, $c\alpha$ 是 $\cos \alpha$ 的缩写, 则关节矩阵为:

$$\begin{aligned}
 {}^0T_1 &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} {}^1T_2 = \begin{bmatrix} c\theta_2 & -s\theta_2 & 0 & 0 \\ s\theta_2 & c\theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 {}^2T_3 &= \begin{bmatrix} c\theta_3 & -s\theta_3 & 0 & a_3c\theta_3 \\ s\theta_3 & c\theta_3 & 0 & a_3s\theta_3 \\ 0 & 0 & 1 & d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} {}^3T_4 = \begin{bmatrix} c\theta_4 & -s\theta_4 & 0 & a_4c\theta_4 \\ s\theta_4 & c\theta_4 & 0 & a_4s\theta_4 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 {}^4T_5 &= \begin{bmatrix} c\theta_5 & 0 & s\theta_5 & a_5c\theta_5 \\ s\theta_5 & 0 & -c\theta_5 & a_5s\theta_5 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} {}^5T_6 = \begin{bmatrix} c\theta_6 & -s\theta_6 & 0 & a_6c\theta_6 \\ s\theta_6 & c\theta_6 & 0 & a_6s\theta_6 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

由各关节矩阵相乘可得持械臂 1 末端被动关节坐标系相对于基座坐标系的齐次变换矩阵:

$${}^0T_5 = {}^0T_1 \times {}^1T_2 \times {}^2T_3 \times {}^3T_4 \times {}^4T_5 \times {}^5T_6 \cdots \cdots \quad (3.2)$$

同理可得持械臂 1 和持镜臂末端被动关节坐标系相对于基座坐标系的齐次变换矩阵:

$${}^0T_8 = {}^0T_1 \times {}^1T_2 \times {}^2T_3 \times {}^3T_4 \times {}^4T_5 \times {}^5T_6 \times {}^6T_7 \times {}^7T_8 \cdots \cdots \quad (3.3)$$

$${}^0T_4 = {}^0T_1 \times {}^1T_2 \times {}^2T_3 \times {}^3T_4 \cdots \cdots \quad (3.4)$$

每个手术切口点是其对应机械臂末端被动关节坐标系内的定点, 所以根据式 (3.2) (3.3) (3.4) 可以得到手术切口间坐标系变换矩阵。

3.2.2 远心机构运动学分析

持镜臂上的远心机构为内窥镜提供绕手术切口的远心运动, 在手术过程中通过控制远心机构的主动关节来调整内窥镜的位置, 由于手术过程中手术切口固定, 所以以内窥镜手术切口处坐标系为基坐标系求解内窥镜运动学, 如图 3.2 所示:

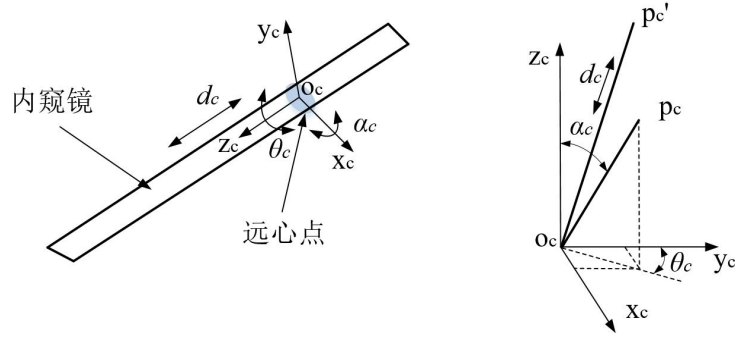


图 3.2 远心机构运动学分析图

Fig.3.2 Kinematics analysis of telecentric mechanism

在内窥镜远心点处建立坐标系 $\{o_c\}$ ，远心机构为内窥镜提供沿内窥镜杆轴向的探入运动、绕轴 x_c 的旋转运动和绕轴 y_c 的旋转运动。由于上述三个运动的轴线交于一点因此内窥镜末端 p_c 在坐标系 $\{o_c\}$ 中任意位置的坐标，都可以由内窥镜末端到手术切口（远心点）的距离 d_c ，内窥镜绕轴 x_c 的旋转角度 θ_c ，内窥镜绕轴 y_c 的旋转度 α_c 来表示：

$$\begin{aligned} P_{cx} &= d_c \sin \alpha_c \sin \theta_c \\ P_{cy} &= d_c \sin \alpha_c \cos \theta_c \quad \dots\dots\dots (3.5) \\ P_{cz} &= d_c \cos \alpha_c \end{aligned}$$

根据式（3.5）可以求得远心机构逆运动学：

$$\begin{aligned} \theta_c &= \arctan \frac{P_{cx}}{P_{cy}} \\ \alpha_c &= \arctan \frac{\sqrt{P_{cx}^2 + P_{cy}^2}}{P_{cz}} \quad \dots\dots\dots (3.6) \\ d_c &= \sqrt{P_{cx}^2 + P_{cy}^2 + P_{cz}^2} \end{aligned}$$

在控制内窥镜运动时，主操作手给出内窥镜末端 p_c 在坐标系 $\{o_c\}$ 下的坐标，根据式（3.6）得到远心机构三个关节运动量。

3.2.3 主操作手运动学分析

根据主操作手构型，构建主操作手的运动学模型如图 3.3 所示，并进行正运动学分析。

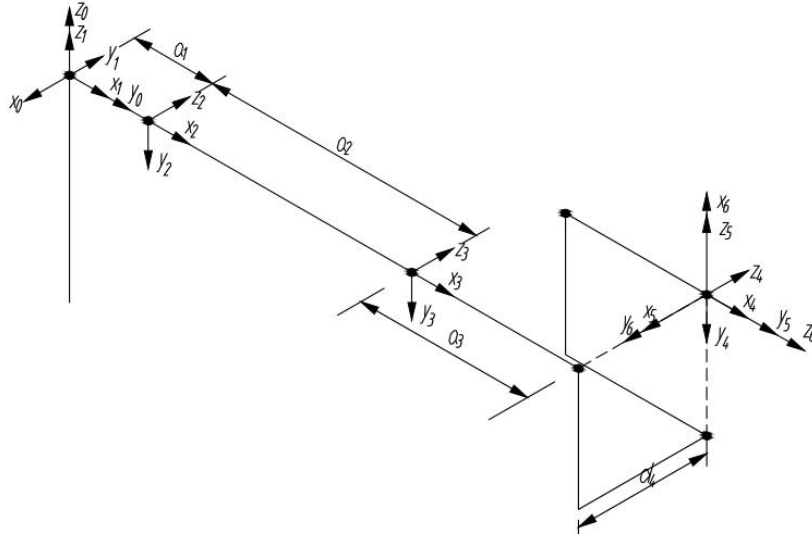


图 3.3 主操作手运动学模型

Fig.3.3 Kinematics model of main manipulator

表 3.2 主操作手 D-H 参数表

Table3.2 D-H parameters of main operator

i	连杆夹角 θ	连杆距离 d	连杆长度 a	连杆扭角 α
1	θ_1	0	0	0
2	θ_2	0	a_1	90
3	θ_3	0	a_2	0

由于主操作手关节均为被动式关节，正运动学分析是已知各关节转角求解机器人末端位置和姿态的过程。

将 D-H 参数表中各变量的值带入变换通式中得到各个 D-H 变换矩阵：

$${}^0_1T = \begin{bmatrix} c\theta_1 & -s\theta_1 & 0 & 0 \\ s\theta_1 & c\theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad {}^1_2T = \begin{bmatrix} c\theta_2 & -s\theta_2 & 0 & a_1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -s\theta_2 & -c\theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^2_3T = \begin{bmatrix} c\theta_3 & -s\theta_3 & 0 & a_2 \\ s\theta_3 & c\theta_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

各连杆变换矩阵相乘，得到主操作手变换矩阵

$${}^0_3T = {}^0T_1 \times {}^1T_2 \times {}^2T_3 \cdots \cdots (3.7)$$

3.2.4 柔性器械精确控制分析

由于末端执行器的姿态依赖于各节段（刚性块）的运动，因此有必要分析弯曲时各刚性块的摆动角度。选择刚性块 E+1 的器械柔性部件截面，分析图 3.5 所示的柔性段。在图 3.5 中，器械在钢丝绳 L1 和 L3 的拉力作用下弯曲，忽略钢丝绳的重量、钢丝绳与孔内表面的摩擦力和万向轴的摩擦力，钢丝绳上的力在任何地方都是相等的，因为钢丝绳处于预紧状态以传递拉力，因此刚性块 E1 处于拉力作用下钢丝绳 L1 的力 f_1 和钢丝绳 L3 的力 f_2 。末端刚性块 E 与末端刚性块 E+1 连接，根据牛顿第三定律，末端刚性块 E 受到来自末端刚性块 E+1 支架的力 $-f_1$ 、力 $-f_2$ 和力 $-F_e$ 的拉力，根据末端刚性块 E 的力平衡，可以得出：

$$-F_e \cos \varphi = -(f_1 + f_2) \cos \alpha \cdots \cdots (3.8)$$

$$-F_e \sin \varphi = -(f_1 + f_2) \sin \alpha \cdots \cdots (3.9)$$

其中 φ 和 α 是力与刚性块 E+1 端面之间的夹角，如图 3.4 所示。将式（3.8）除以式（3.9）可得：

$$\text{ctg} \varphi = \text{ctg} \alpha \cdots \cdots (3.10)$$

通过方程（3.10）得到 φ 、 α 相等的两个角，即：

$$\varphi = \alpha \cdots \cdots (3.11)$$

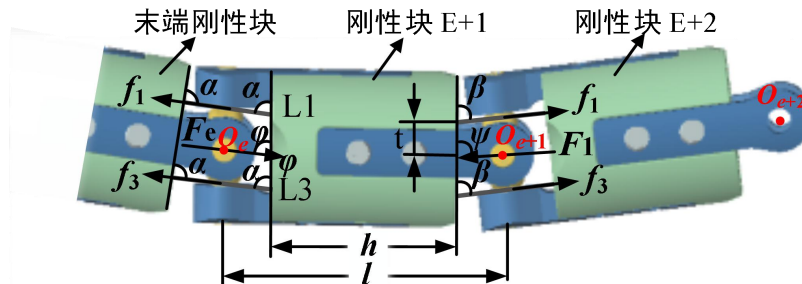


图 3.4 器械柔性部分受力分析

Fig.3.4 Force analysis of a section of the flexible part

根据末端刚性块 E 的力平衡，得到：

$$F_e = f_1 + f_3 \cdots \cdots (3.12)$$

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/725144324020011241>