

DOI: 10.3724/SP.J.1218.2013.00081

主被动混合式微创手术机械臂机构设计及灵巧度优化

马如奇, 董 为, 杜志江, 李 刚

(哈尔滨工业大学机器人技术与系统国家重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘 要: 研制出一款可开展微创手术的双机械臂机器人系统, 该系统配合手术微器械可以实现精确的腹腔内手术操作. 通过分析微创手术的手术环境及手术操作特点, 提出了采用机器人开展微创手术对机器人自身机构设计的基本要求, 并在此基础上重点对机械臂机构进行设计和优化. 该机械臂可以按照微创手术的实际需求, 实现机器人的术前摆位、术中器械操作及器械的快速拆装更换, 并且可以从机构上保证术中器械在患者腹壁切口处位置不变, 避免术中因手术器械运动而对腹壁切口造成非手术性损伤. 此外, 借助于机器人雅可比矩阵的奇异值, 构造了基于条件数和可操作度的综合灵巧度评价指标函数, 并采用序列二次规划算法对机械臂杆件参数进行优化. 优化结果表明, 机械臂具有良好的各向同性及可操作度, 很好地满足了微创手术对机械臂机构灵活性的要求.

关键词: 微创外科手术; 机械臂优化; 机构灵巧度; 机构设计

中图分类号: TP241.3

文献标识码: A

文章编号: 1002-0446(2013)-01-0081-09

Mechanical Design and Dexterity Optimization for Hybrid Active-Passive Minimally Invasive Surgical Manipulator

MA Ruqi, DONG Wei, DU Zhijiang, LI Gang

(State Key Laboratory of Robotics and System, Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, China)

Abstract: A robot system with double manipulators used for minimally invasive surgery (MIS) is developed, which can perform operation precisely in the abdomen through cooperation with the instruments. By analyzing the operation environment and characteristics of the MIS, the basic requirements for the mechanical design of manipulator to perform MIS operations are presented. Based on those analysis and requirements, the paper mainly focuses on the mechanical design and optimization of the manipulator. According to the actual requirements of MIS, the manipulator can execute preoperative incision positioning, intraoperative instruments operating and instruments dismounting and replacing. Moreover, the mechanical design of the manipulator can also guarantee the instruments to stay unchangeably at the incision of the patient, which can avoid the non-operative damage to the incision caused by the instrument's operating movements. Furthermore, by using the singular value of the robotics Jacobian matrix, a comprehensive dexterity evaluation index function based on conditional number and operability of the manipulator is proposed, and the dimensional parameters of the manipulator are optimized by adopting the sequential quadratic programming (SQP) algorithm. The optimization results indicate that the manipulator features isotropy and operability, and meets the MIS requirements for commendable mechanical dexterity.

Keywords: minimally invasive surgery; manipulator optimization; mechanical dexterity; mechanical design

1 引言 (Introduction)

微创外科手术具有创口小、术中失血少、疼痛轻、手术感染风险低、住院时间短以及术后患者康复快等许多优点^[1], 被认为是外科手术领域的一次革命性变革. 然而, 在实际的临床手术过程中, 普通微创外科手术也暴露出一些亟待解决的问题: 比如, 长时间站立操作手术器械很容易导致医生疲劳, 甚至会导致医生膝关节损伤; 医生自身生理活动及

情绪所引起的手部抖动等客观因素很容易影响手术的最终效果^[2-3]. 机器人不存在人类的疲劳感和生理抖动, 不受人类主观情绪的影响, 并且具有高精度、高分辨率及操作灵活等优点, 因此将机器人技术引入到外科手术中, 有利于开展更加精细的手术操作, 可以极大地拓展医生的手术能力并提高手术质量, 同时也能够有效地改善医生的工作环境, 为医生提供一个更加舒适的手术界面. 目前, 微创外科手术

机器人已成为机器人领域的研究热点,世界许多知名研究机构都在积极开展相关技术的研究^[4-5]。

1994年,美国率先研制出 AESOP 外科手术机器人系统,并获得美国食品与药品管理局(FDA)批准,开创了采用机器人开展微创外科手术的新时代^[6]。AESOP 系统最重要的组成部分是一条6自由度的机械臂,用于术中为医生提供稳定的腔内手术场景图像。英国于1998年成功研制出 Endo Assist 系统^[7],该系统能够使腹腔镜绕患者腹壁切口中心转动,因此不会对皮肤造成压力,从而避免腹腔镜运动对患者腹壁切口造成非手术性损伤。1996年,美国 Computer Motion 公司在 AESOP 机器人系统的基础上,研制出 ZEUS 机器人微创外科手术系统^[8-9],其主体部分是一台集成有3条独立机械臂的手术床,每条手术机械臂均配置有7个自由度,医生可以在比较舒适的环境下,通过操作控制台的主操作手来控制各机械臂进行相应的手术操作,整个操作以主从控制方式完成。2001年,美国 Intuitive Surgical 公司成功研制出目前世界上最为成功的微创外科手术机器人系统——da Vinci 系统,并在获得美国 FDA 认证后,迅速将该系统商品化。与 ZEUS 系统不同,da Vinci 系统有4条机械臂,且集成于同一个移动平台,可以根据手术需要方便地移动;额外增加的机械臂主要负责夹持及操作辅助器械,极大地扩展了机器人开展微创外科手术的能力;同时 Intuitive Surgical 公司还为该机器人系统研制了多种不同功能的手术微器械,能够实现对病灶组织的分离、夹持以及缝合等;然而,该系统昂贵的价格极大地限制了其临床推广,仅在少数大医院得到了实际应用。da Vinci 系统昂贵的价格也直接导致世界各国均大力支持本国的科研机构开展相关技术的研究。目



图1 双臂微创手术机器人系统

Fig.1 MIS robotic system with double manipulators

前,德国宇航中心(DLR)^[10],日本东京大学^[11-12],美国哥伦比亚大学^[13]、约翰霍普金斯大学^[14]等研究机构都在积极开展相关方面的研究,并取得了一定的成果,但都还处于研究阶段,尚不能开展实际的临床手术。

通过分析国外众多研究机构在微创外科手术机器人系统及其相关技术方面的研究,本文研制了一款可以用于微创外科手术的机器人系统,如图1所示。该机器人主要由2条手术操作机械臂、1条持镜臂及不同的手术微器械组成,采用主从控制方式开展腹腔微创手术。

2 机械机构设计(Mechanical design)

2.1 微创手术环境分析

在采用机器人开展微创手术之前,首先有必要对微创手术实现方式展开研究。目前比较通用的微创手术流程是:1)根据实际手术,在患者腹壁手术位置切出3~5个10mm~12mm的切口,以建立术中手术器械和腹腔镜进出患者腹腔的手术通道;2)采用气腹仪向腹腔内部充入CO₂气体制造气腹环境,使患者腹壁与内脏组织有效分离,为手术建立足够的腔内手术空间和良好的腔内可视环境;3)医生借助不同功能的手术器械,实现对病灶组织的剥离、切除及缝合等一系列手术操作。以胆囊切除手术为例,通常的微创胆囊摘除术需要建立3个手术通道(2个器械通道和1个腹腔镜通道),具体的切口位置如图2所示。手术时,医生根据腹腔镜反馈的腔内手术场景图像,借助人手术器械对胆囊进行剥离切除等手术操作。

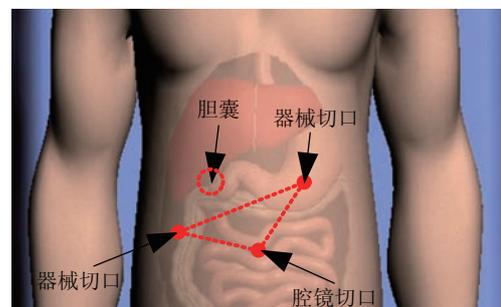


图2 胆囊切除手术切口位置

Fig.2 Incision positions of the cholecystectomy

在整个微创胆囊摘除术中,手术器械是以切口点作为支点进行手术操作,为了避免术中手术器械对患者腹壁切口造成非手术性伤害,整个手术过程中器械在切口处的位置必须保持不变,器械仅实现以切口为中心的3自由度倒圆锥运动:以切口为中心的圆锥摆动及沿器械轴线的直线移动,如图3所

示. 器械摆动角度及直线移动位移直接决定手术操作空间范围的大小.

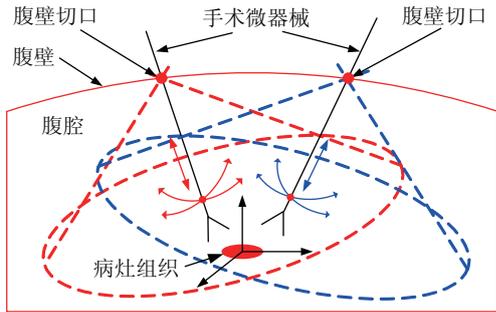


图 3 以切口为中心的器械运动

Fig.3 Instruments motion around the incision

一般来讲, 不同的微创手术对腹壁切口位置、腔内手术空间范围及手术器械应具备的功能等有不同的要求, 但是从微创胆囊摘除术的手术过程中可以看出, 不同的微创手术在手术操作方面具有一些相同的特点: 1) 定点运动: 微创手术的特点是通过患者体表的切口进行手术操作, 为了避免术中对切口造成伤害, 手术器械必须在切口处保持不动; 2) 圆锥工作空间: 在保证手术器械在切口点不动的前提下, 器械在腹腔内部的工作空间是一个圆锥, 因此所有手术操作必须在圆锥空间内进行; 3) 器械更换: 不同的手术操作需要使用不同功能的手术器械, 术中需要频繁快速地更换手术器械; 4) 安全性: 微创手术也需要考虑手术过程中的安全性.

通过对微创手术实施过程及手术工作环境进行分析, 结合机器人技术的特点, 我们认为只要为机器人配置合适的自由度和优化的杆件参数, 保证机器人具有足够的灵活度和操作空间, 以及为机器人设计可快速高效更换的器械接口和不同功能的手术器械, 就可以使机器人具备开展微创外科手术的能力, 从而使机器人操作精细及稳定性好等优势在外科手术领域得以发挥, 解决目前普通微创外科手术中存在的一些问题.

2.2 机构设计

针对上述对微创手术过程及手术环境的分析, 本文对机械臂机构设计提出如下基本要求: 1) 根据手术对切口位置的要求, 机械臂应能够通过术前摆位, 在避免术中多机械臂发生碰撞干涉的同时, 迅速建立起手术通道; 2) 为了避免手术过程中微器械对患者切口点造成非手术性损害, 需要确保术中微器械在切口点处位置保持不变; 3) 机械臂应具备完成微创手术所需的自由度, 能够提供手术所需的倒锥形手术操作空间, 并能在该空间内实现灵活的手术操作; 4) 机械臂需提供标准化的器械接口, 能够

根据手术需要实现器械的快速更换.

综合考虑以上要求, 在本文研制的外科手术机器人系统中, 机械臂主要包括以下 3 个部分: 1) 切口定位机构: 根据手术对腹壁切口位置的实际需求, 实现机械臂的术前摆位, 快速建立微创手术通道; 2) 器械定位机构: 为手术提供倒锥形手术空间及手术操作所要自由度, 并配合切口定位机构, 保证术中器械在腹壁切口处位置不变; 3) 标准器械接口: 根据手术操作需要, 实现手术器械快速更换. 机械臂 3 维结构如图 4 所示.

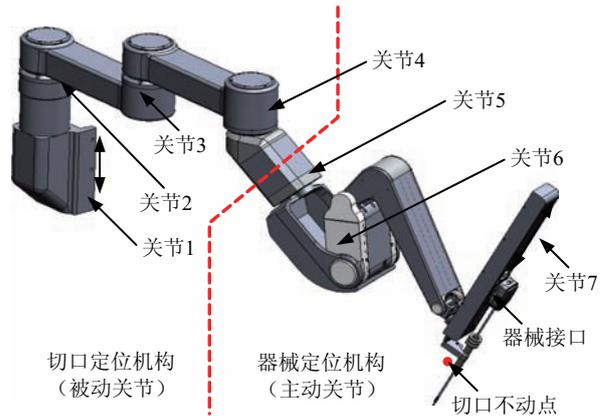


图 4 手术器械机械臂结构设计

Fig.4 The mechanical structure of the proposed manipulator

2.2.1 切口定位机构

机械臂切口定位机构主要用于术前切口位置确定及手术通道建立, 术中配合器械定位机构保证器械在腹壁切口处位置不变, 以免对患者腹壁切口造成非手术性伤害; 同时, 通过术前摆位保证多个手术机械臂在手术台上方均有足够的手术空间, 尽量避免或减小术中多机械臂之间的干涉或碰撞. 冗余机构在保证工作空间的同时, 具有较高的灵活性和较好的避障能力, 故本文采用平面冗余机构 (在手术平面布置 3 个回转关节) 实现术前摆位, 以保证切口定位机构具有良好的灵活性和避碰性能, 减小术中多手术机械臂间的碰撞干涉; 同时在垂直方向配置一个移动自由度, 以便根据手术科目或患者体形来调整手术平面. 切口定位机构示意图如图 5 所示.

由于切口定位机构在术前将手术器械定位至腹壁切口处后, 在整个手术过程中基本不予再次调整, 故出于对系统整体安全性及可控性考虑, 本文将切口定位机构设计为被动形式, 这样既可以很好地满足术前快速摆位需求, 又可以简化机械臂机械结构, 降低整个系统控制难度. 关节 1 实现机械臂在垂直方向的定位, 承受整个机械臂的重力和重力矩,

本文采用高精度直线导轨保证关节刚度和运动平稳性，并通过设计配重来平衡机械臂自身重力，较好地实现了机械臂在竖直方向的零力手动快速摆位；此外，考虑到术中系统安全性，该关节采用液压缸支撑，通过液压阀实现关节的可靠锁定，并在关节上安装高精度直线编码器，以准确检测该关节位置。关节 2、3、4 用于机械臂在水平方向的定位，由于水平方向的摆位不受重力矩的影响，故通过控制关节处的电磁制动器，即可实现术前回转关节零力手动摆位及术中回转关节可靠锁定，关节上的旋转编码器可实时准确检测关节转动角度。

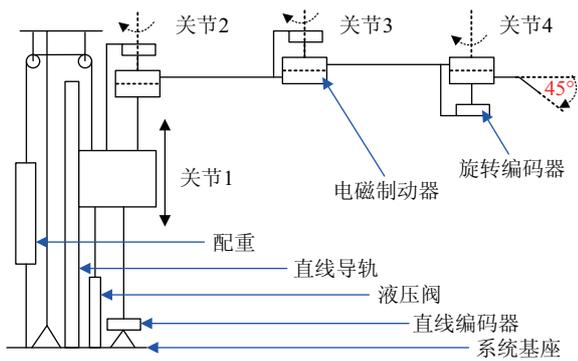


图 5 机械臂切口定位机构

Fig.5 Incision positioning mechanism of the manipulator

2.2.2 器械定位机构

器械定位机构主要用于提供手术操作所需自由度及倒锥形手术操作空间，保证手术器械可以实现灵活的位姿调整；同时，器械定位机构从机构学上保证了术中手术器械在腹壁切口点位置不变，避免对患者造成意外的非手术性损伤，确保整个微创手术的安全性。本文设计的器械定位机构采用平行四边形原理，其结构原理图如图 6 所示。

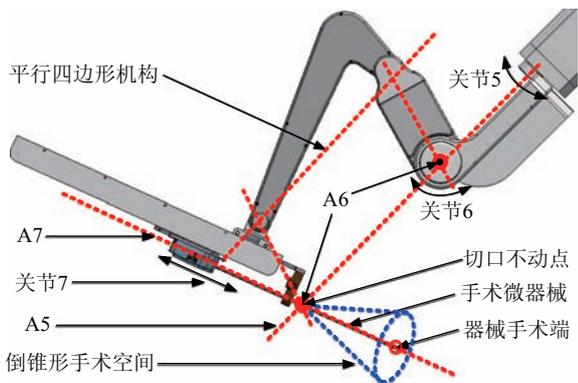


图 6 机械臂器械定位机构

Fig.6 Instrument positioning mechanism of the manipulator

A5 与 A6 分别为回转关节 5、6 的回转轴，两个回转关节分别实现末端器械绕腹壁切口点的转动，为手术操作提供倒锥形操作空间，并根据手术

需要调整器械操作端在倒锥形操作空间的位置，配合器械自身自由度进行手术操作；由于两个回转关节的回转轴（A5、A6）相交于腹壁切口不动点，即两个关节运动时都不会改变切口点的位置，从机构学上保证了机器人不会对腹壁切口点造成非手术性损伤，很好地满足了微创手术对切口点的基本要求。关节 7 实现手术器械沿自身轴线的直线移动，器械进入腔内的长度直接决定手术操作空间大小。由于关节 7 的轴线经过切口不动点，关节的术中运动不会造成腹壁切口的损伤。器械定位机构中的 3 个关节均为主动关节，由直流伺服电机驱动，采用谐波减速器实现扭矩的传递；为减小机械臂末端体积和质量，关节 7 的驱动电机安装在关节 6 处，采用绳传动式直线滑轨结构实现器械的直线运动，绳传动示意图如图 7 所示。

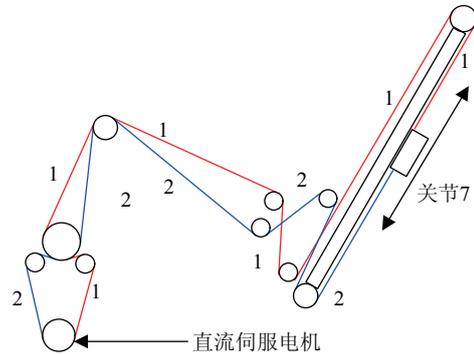


图 7 直线关节定位机构

Fig.7 Positioning mechanism of the linear joint

2.2.3 器械接口机构

在微创手术中，根据不同的手术操作需要频繁地更换不同功能的手术器械（如分离组织用的分离钳、切除组织用的剪刀、止血用的电凝刀及术后缝合用的针持等）^[15]，机器人辅助的微创手术也必须具备快速更换手术器械的能力。为此，本文为机械臂和不同功能的手术器械设计了统一的标准化接口，在确保机械臂能够准确可靠地将运动和动力传递给手术器械的同时，还可以实现手术器械的快速拆装和更换，机械臂端器械接口如图 8 所示。

考虑到电机直驱方式会导致整个机械臂末端重量及体积增大，影响机械臂整体动态性能，降低手术操作灵活性，本文将电机布置于第 6 关节处，采用钢丝将伺服电机的动力和运动传递给机械臂接口驱动轮，有效地减小了机械臂末端重量，接口中的导轮可用于钢丝的导向及张紧，保证钢丝传动的准确性。驱动轮的运动和动力通过安装于驱动轮上的滑键传递给手术器械，使手术器械按照医生给定的动作进行手术操作，如图 9 所示。

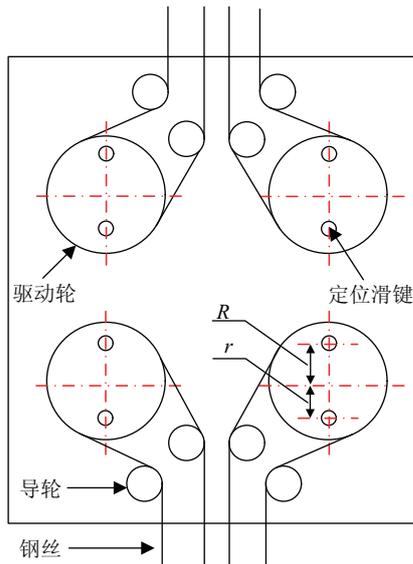


图 8 标准手术器械接口

Fig.8 Standard interface of the surgical instrument

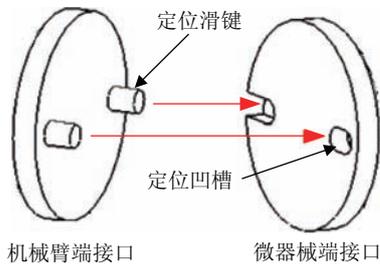


图 9 器械接口传动结构

Fig.9 Transmission structure of the instrument interface

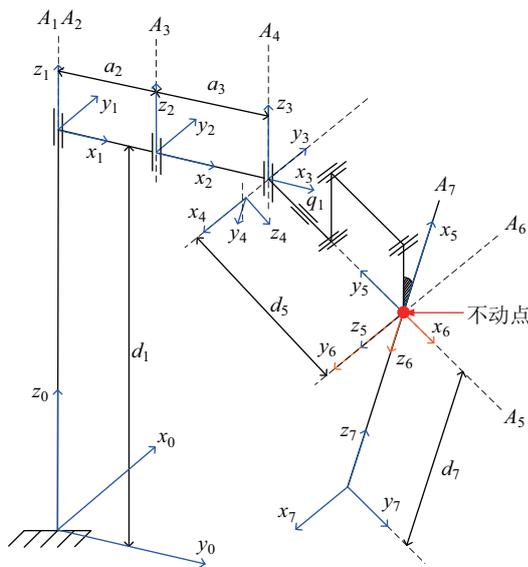


图 10 机械臂 D-H 坐标系

Fig.10 D-H coordinates system of the manipulator

驱动轮上的滑键可以沿着自身轴线的方向进行滑动, 滑键上的复位弹簧可确保滑键与器械端凹槽可靠连接, 该接口可以实现器械的快速拆装和更换.

3 运动学分析 (Kinematics analysis)

运动学分析是机械臂结构优化以及运动控制的基础, 本文采用 D-H 方法对所设计机械臂进行运动学分析. 由于在本文设计的机器人系统中, 两条机械臂具有相同的结构, 故本文仅以单个机械臂为例, 对其进行运动学分析及杆件参数优化. 机械臂坐标系如图 10 所示, 杆件参数如表 1 所示.

表 1 机械臂杆件 D-H 参数

Tab.1 D-H parameters of the manipulator

关节	l_i / mm	$\alpha_i / (^\circ)$	d_i / mm	$\theta_i / (^\circ)$	运动范围
1	0	0	d_1	0	$0 \sim 350 \text{ mm}$
2	α_2	0	0	0	$0 \sim 180^\circ$
3	α_3	0	0	0	$-150^\circ \sim 150^\circ$
4	0	$-(90 + q_1)$	0	-90	$-240^\circ \sim 60^\circ$
5	0	-90	d_5	-90	$-160^\circ \sim 20^\circ$
6	0	90	0	$-(90 + q_2)$	$-115^\circ \sim 0$
7	0	0	d_7	0	$0 \sim 350 \text{ mm}$

根据表 1 中给出的杆件参数, 可得到机械臂关节空间变化矩阵及末端相对于基坐标系的齐次变换矩阵:

$$A_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} c_2 & -s_2 & 0 & a_2 c_2 \\ s_2 & c_2 & 0 & a_2 s_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_3 = \begin{bmatrix} c_3 & -s_3 & 0 & a_3 c_3 \\ s_3 & c_3 & 0 & a_3 s_3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_4 = \begin{bmatrix} c_4 & \sin q_1 s_4 & -\cos q_1 s_4 & 0 \\ s_4 & -\sin q_1 c_4 & \cos q_1 c_4 & 0 \\ 0 & -\cos q_1 & -\sin q_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_5 = \begin{bmatrix} c_5 & 0 & -s_5 & 0 \\ s_5 & 0 & c_5 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & d_5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned} \mathbf{A}_6 &= \begin{bmatrix} c_6 & 0 & s_6 & 0 \\ s_6 & 0 & -c_6 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ \mathbf{A}_7 &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_7 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ {}^0\mathbf{T}_7 &= \mathbf{A}_1\mathbf{A}_2\mathbf{A}_3\mathbf{A}_4\mathbf{A}_5\mathbf{A}_6\mathbf{A}_7 = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1) \end{aligned}$$

其中

$$\begin{aligned} s_{ij} &= \sin(\theta_i + \theta_j) \\ c_{ij} &= \cos(\theta_i + \theta_j) \\ n_x &= (c_{234}c_5 + \sin q_1 s_{234}s_5)c_6 + \cos q_1 s_{234}s_6 \\ n_y &= (s_{234}c_5 - \sin q_1 c_{234}s_5)c_6 - \cos q_1 c_{234}s_6 \\ n_z &= -\cos q_1 s_5 c_6 + \sin q_1 s_6 \\ o_x &= -c_{234}s_5 + \sin q_1 s_{234}c_5 \\ o_y &= -s_{234}s_5 - \sin q_1 c_{234}c_5 \\ o_z &= -\cos q_1 c_5 \\ a_x &= (c_{234}c_5 + \sin q_1 s_{234}s_5)s_6 - \cos q_1 s_{234}c_6 \\ a_y &= (s_{234}c_5 - \sin q_1 c_{234}s_5)s_6 + \cos q_1 c_{234}c_6 \\ a_z &= -\cos q_1 s_5 s_6 - \sin q_1 c_6 \\ p_x &= ((c_{234}c_5 + \sin q_1 s_{234}s_5)s_6 - \cos q_1 s_{234}c_6)d_7 \\ &\quad - \cos q_1 s_{234}d_5 + a_3c_{23} + a_2c_2 \\ p_y &= ((s_{234}c_5 - \sin q_1 c_{234}s_5)s_6 + \cos q_1 c_{234}c_6)d_7 \\ &\quad + \cos q_1 c_{234}d_5 + a_3s_{23} + a_2s_2 \\ p_z &= (-\cos q_1 s_5 s_6 - \sin q_1 c_6)d_7 - \sin q_1 d_5 + d_1 \end{aligned}$$

4 机构优化 (Mechanism optimization)

4.1 机械臂优化目标函数

作为运动学性能的重要评价指标, 机器人机构灵巧度分析被广泛应用到机器人机构优化中. 机构灵巧度是指机构在给定位姿下沿任意方向运动的能力. 机器人雅可比矩阵的奇异值常被用来构造灵巧度指标, 并以此指标来对机器人的结构参数进行优化. 雅可比矩阵描述了机器人关节空间速度 $\dot{\mathbf{q}}$ 和末端操作空间广义速度 $\dot{\mathbf{x}}$ 之间的映射关系:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{J}(\mathbf{q})_{6 \times n} \dot{\mathbf{q}} \quad (2)$$

式 (2) 中的雅可比矩阵具体形式可定义为

$$\mathbf{J}(\mathbf{q}) = \begin{bmatrix} \mathbf{J}_{11} & \cdots & \mathbf{J}_{1i} & \cdots & \mathbf{J}_{1n} \\ \mathbf{J}_{a1} & \cdots & \mathbf{J}_{ai} & \cdots & \mathbf{J}_{an} \end{bmatrix}_{6 \times n} \quad (3)$$

式 (3) 中, \mathbf{J}_{li} 与 \mathbf{J}_{ai} 分别为第 i 个关节空间变量对末端广义线速度与角速度的变换系数. 矢量积法常被用来构造机器人的雅可比矩阵, 其构造方法与关节的运动副有关. 若关节 i 为平移关节, 其变换系数可描述为

$$\begin{bmatrix} \mathbf{J}_{li} \\ \mathbf{J}_{ai} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^0\mathbf{R}_1{}^1\mathbf{R}_2 \cdots {}^{i-2}\mathbf{R}_{i-1} \mathbf{b} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

若第 i 个关节为回转关节, 其变换系数为

$$\begin{bmatrix} \mathbf{J}_{li} \\ \mathbf{J}_{ai} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^0\mathbf{R}_1{}^1\mathbf{R}_2 \cdots {}^{i-2}\mathbf{R}_{i-1} \mathbf{b} \times \mathbf{r}_{i-1,e} \\ {}^0\mathbf{R}_1{}^1\mathbf{R}_2 \cdots {}^{i-2}\mathbf{R}_{i-1} \mathbf{b} \end{bmatrix} \quad (5)$$

在以上的描述中, $\mathbf{b} = [0 \ 0 \ 1]^T$ 为 z_{i-1} 轴单位向量, $\mathbf{r}_{i-1,e} = \overrightarrow{OO_n} - \overrightarrow{OO_{i-1}}$ 为向量 $\overrightarrow{O_{i-1}O_n}$ 在基坐标系中的表示. 为了便于表述, 定义 $\mathbf{r}_{i-1,e}$ 的齐次坐标为 $\mathbf{x}_{i-1,e}$, 并定义 $\mathbf{x} = [0 \ 0 \ 0 \ 1]$ 为各坐标系的原点, 则 $\mathbf{x}_{i-1,e}$ 可表述为如下形式:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_{i-1,e} &= \begin{bmatrix} \mathbf{r}_{i-1,e} \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{A}_1\mathbf{A}_2 \cdots \mathbf{A}_n \mathbf{x} - \mathbf{A}_1\mathbf{A}_2 \cdots \mathbf{A}_{i-1} \mathbf{x} \\ &= [P_x \ P_y \ P_z \ 1]^T - \mathbf{A}_1\mathbf{A}_2 \cdots \mathbf{A}_{i-1} \mathbf{x} \quad (6) \end{aligned}$$

综合以上各式即可求得雅可比矩阵:

$$\mathbf{J} = (\mathbf{J}_1, \mathbf{J}_2, \mathbf{J}_3, \mathbf{J}_4, \mathbf{J}_5, \mathbf{J}_6, \mathbf{J}_7) \quad (7)$$

其中:

$$\begin{aligned} \mathbf{J}_1 &= [0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0]^T \\ \mathbf{J}_2 &= \begin{bmatrix} -c_5s_6d_7s_{234} - m \cdot c_{234} - a_3s_{23} - a_2s_2 \\ c_5s_6d_7c_{234} - m \cdot s_{234} + a_3c_{23} + a_2c_2 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \\ m &= -\sin q_1 s_5 s_6 d_7 + \cos q_1 c_6 d_7 + \cos q_1 d_5 \end{aligned}$$

$$J_3 = \begin{bmatrix} -c_5 s_6 d_7 s_{234} + n \cdot c_{234} - a_3 s_{23} \\ c_5 s_6 d_7 c_{234} + n \cdot s_{234} + a_3 c_{23} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$n = \sin q_1 s_5 s_6 d_7 - \cos q_1 c_6 d_7 - \cos q_1 d_5$$

$$J_4 = \begin{bmatrix} -c_5 s_6 d_7 s_{234} - k \cdot c_{234} \\ c_5 s_6 d_7 c_{234} - k \cdot s_{234} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$k = -\sin q_1 s_5 s_6 d_7 + \cos q_1 c_6 d_7 + \cos q_1 d_5$$

$$J_5 = \begin{bmatrix} -s_5 s_6 d_7 c_{234} + \sin q_1 c_5 s_6 d_7 s_{234} \\ -s_5 s_6 d_7 s_{234} - \sin q_1 c_5 s_6 d_7 c_{234} \\ -\cos q_1 c_5 s_6 d_7 \\ -\cos q_1 s_{234} \\ \cos q_1 c_{234} \\ -\sin q_1 \end{bmatrix}$$

$$J_6 = \begin{bmatrix} c_5 c_6 d_7 c_{234} + (\cos q_1 s_6 d_7 + \sin q_1 s_5 c_6 d_7) s_{234} \\ c_5 c_6 d_7 s_{234} - (\cos q_1 s_6 d_7 + \sin q_1 s_5 c_6 d_7) c_{234} \\ -\cos q_1 s_5 c_6 d_7 + \sin q_1 s_6 d_7 \\ -s_5 c_{234} + \sin q_1 c_5 s_{234} \\ -s_5 s_{234} - \sin q_1 c_5 c_{234} \\ -\cos q_1 c_5 \end{bmatrix}$$

$$J_7 = \begin{bmatrix} c_5 s_6 c_{234} - (-\sin q_1 s_5 s_6 + \cos q_1 c_6) s_{234} \\ c_5 s_6 s_{234} + (-\sin q_1 s_5 s_6 + \cos q_1 c_6) c_{234} \\ -\cos q_1 s_5 s_6 - \sin q_1 c_6 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

机器人雅可比矩阵的奇异值可以用来构造条件数和可操作度两种机构灵巧度评价指标:

1) 条件数 k : 定义为雅可比矩阵最大与最小奇异值的比值, 即 $k = \sigma_{\max} / \sigma_{\min}$ ($1 \leq k \leq \infty$), 当条件数 $k = 1$ 时, 机构表现为各向同性, 此时机构的灵巧度最高. 在实际的优化过程中, 一般使条件数 k 尽量为 1, 以保证机构具有较高灵巧度.

2) 可操作度 W : $W = \sqrt{\det(JJ^T)}$, 当 $W = 0$ 时, 机构处于奇异形位; 当 $W = \infty$ 时, 机构处于不定形位; 当 $W > 0$ 时, 机构处于非奇异形位. W 能直观地反映机构远离奇异形位和不定形位的程度.

综合以上两种评价指标, 建立全工作空间内的灵巧度综合评价指标 $f = w_1 k + w_2 / W$, 其中 w_1, w_2 分别为条件数和可操作度权重系数, 该评价指标可综合考虑机械臂的各向同性及可操作性. 本文将 w_1, w_2 设为相等, 即 $w_1 = w_2 = 0.5$, 由条件数和可操作度定义可知, 综合评价指标 f 越小, 机械臂越趋向于各向同性, 且具有越好的可操作性, 故本文将 $f_{\min} = \min(w_1 k + w_2 / W)$ 作为机构的优化目标函数.

4.2 设计变量及约束条件

由雅可比矩阵可知, 切口定位机构的雅可比矩阵由机构的杆件参数以及机构关节变量共同描述, 而器械定位机构的雅可比矩阵只与机构关节变量有关, 与机构杆件参数无关. 本文主要目的是对机械臂杆件参数进行优化, 主要考虑切口定位机构在全域工作空间内的灵巧度指标, 故将杆件参数 a_2, a_3, d_5 作为机构优化设计变量. 为了保证整个机器人系统满足实际临床手术空间要求, 必须使机械臂具有覆盖整个手术环境及适应大多数腹腔微创手术的能力, 故本文以切口不动点的位置范围及机械臂的最小机构尺寸作为约束条件, 同时考虑到关节 2 和关节 3 具有相同的机械机构, 优化过程中令 $a_2 = a_3$. 综合以上描述, 得出本文机构优化的约束条件如下:

$$\begin{cases} 750 \text{ mm} \leq -\cos q_1 s_{234} d_5 + a_3 c_{23} + a_2 c_2 \leq 1150 \text{ mm} \\ -250 \text{ mm} \leq \cos q_1 c_{234} d_5 + a_3 s_{23} + a_2 s_2 \leq 100 \text{ mm} \\ a_2 \geq 300 \text{ mm} \\ a_3 \geq 300 \text{ mm} \\ d_5 \geq 800 \text{ mm} \\ a_2 = a_3 \end{cases}$$

4.3 优化模型及优化算法

综合考虑本文的优化目标函数、设计变量及优化约束条件, 采用序列二次规划法对机构进行灵巧度优化. 序列二次规划算法 (SQP) 可将某一优化问题转化为一系列二次规划子问题, 通过对各子问题的求解, 来获得原问题的最优解. 该方法非常适合处理中小规模非线性规划问题, 其具体计算流程如图 11 所示. 本文利用 Matlab 提供的序列二次规划优化函数 `fmincon` 对机械臂切口定位机构进行优化.

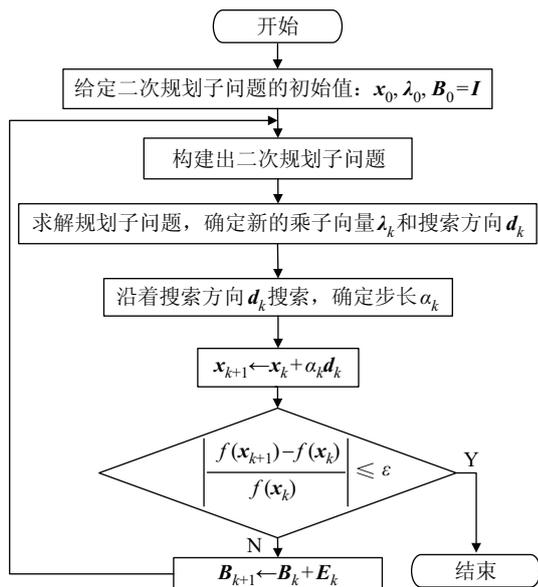


图 11 序列二次规划算法流程图
Fig.11 Flowchart of the SQP algorithm

4.4 优化结果分析

由机械臂的雅可比矩阵可知，机械臂杆件参数及关节变量均会影响到机械臂的灵活性，但是机械臂杆件参数优化的主要目的是使机械臂在其常用工作空间内有较高的灵活性，且考虑到切口定位机构摆位完成后在整个手术过程中保持位形不变，故本文根据临床手术实际常用摆位位姿，在机械臂关节空间内选取多组关节变量组合来实现对机械臂杆件参数的优化。具体关节变量组选取及优化结果如表 2 所示。

表 2 杆件参数优化结果
Tab.2 Optimization results of link parameters

	joint angle			pole parameters		
	θ_2 /(°)	θ_3 /(°)	θ_4 /(°)	a_2 /mm	a_3 /mm	d_5 /mm
1	90	-120	-90	533.0	533.0	1056.1
2	85	-110	-100	492.6	492.6	1009.2
3	80	-100	-115	494.8071	494.8071	977.9976
4	75	-90	-130	492.8929	492.8929	962.2009
5	65	-70	-150	440.6040	440.6040	937.0194
6	60	-60	-160	432.9975	432.9975	931.9348

本文对不同关节变量组合下得到的杆件优化参数求取平均值，并加以圆整，然后将其作为机械臂切口定位机构各杆件的最终优化值： $a_2 = 470 \text{ mm}$ ， $a_3 = 470 \text{ mm}$ ， $d_5 = 980 \text{ mm}$ 。在该优化杆件参数下，机械臂灵巧度评价指标在其全域工作空间的分布如图 12 所示。

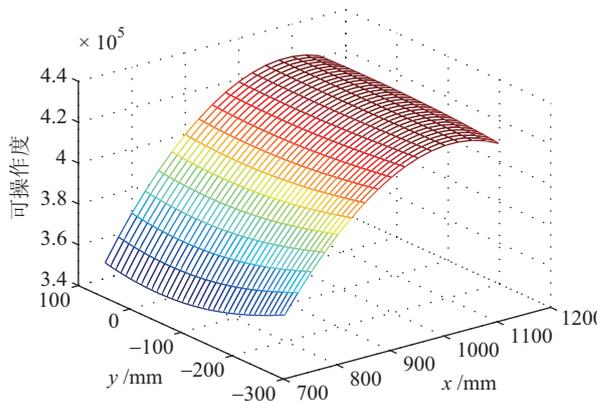
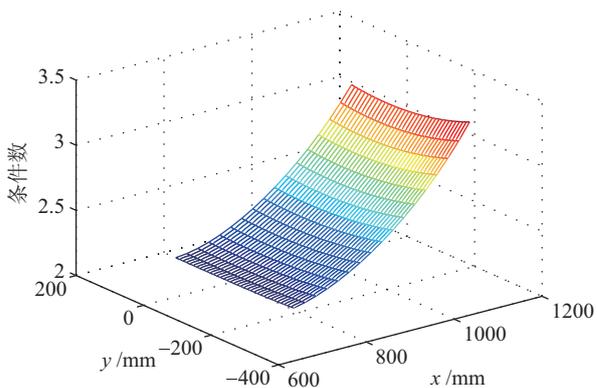


图 12 灵巧度评价指标分布图
Fig.12 Distribution of the dexterity evaluation index

从条件数及可操作度评价指标的分布图中可以看出，机械臂在其工作空间不存在奇异点，具有比较好的各向同性以及可操作性，达到了优化的目标。

5 结论 (Conclusion)

本文通过分析微创手术环境及其操作特点，提出了采用机器人开展微创手术对机器人自身机构的基本要求，并在此基础上设计了可用于开展机器人微创手术的冗余机械手臂。该机械臂的切口定位机构可以灵活地实现术前的零力摆位，器械定位机构配合手术器械可以实现腔内的手术操作，标准器械接口可以根据手术需要实现对手术微器械的快速拆装和更换；与此同时，整个机械臂从机构学上保证了术中手术器械在患者腹壁切口点的位置不变，避免术中器械运动对患者腹壁造成非手术性损伤。此外，借助于机械臂雅可比矩阵的奇异值，构造了基于条件数和可操作度的综合灵巧度评价指标，以运动灵巧度指标作为优化目标函数，实现了对机械臂杆件参数的优化，优化结果表明机械臂具有良好的各向同性及可操作性，在功能上具备开展临床微创手术的能力。

参考文献 (References)

- [1] Sun L W, van Meer F, Bailly Y, et al. Design and development of a da Vinci surgical system simulator[C]//IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2007: 1050-1055.
- [2] Dankelman J. Surgical robots and other training tools in minimally invasive surgery[C]//IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2004: 2459-2464.
- [3] Lee Y J, Kim J, Ko S Y, et al. Design of a compact laparoscopic assistant robot: KaLAR[C]//Proceedings of the International Conference on Control Automation and Systems. 2003: 2648-2653.
- [4] Taylor R H, Stoianovici D. Medical robotics in computer-integrated surgery[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 2003, 19(5): 765-781.
- [5] Taylor R H. A perspective on medical robotics[J]. Proceedings of the IEEE, 2006, 94(9): 1652-1664.
- [6] Wang Y F, Uecker D R, Wang Y L. A new framework for vision-enabled and robotically assisted minimally invasive surgery[J]. Computerized Medical Imaging and Graphics, 1998, 22(6): 429-437.
- [7] Finlay P A, Ornstein M H. Controlling the movement of a surgical laparoscope[J]. IEEE Engineering in Medicine and Biology, 1995, 14(3): 289-291.
- [8] Guthart G S, Salisbury Jr J K. The IntuitiveTM telesurgery system: Overview and application[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2000: 618-621.
- [9] Ghodoussi M, Butner S E, Wang Y L. Robotic surgery – The transatlantic case[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2002: 1882-1888.
- [10] Tobergte A, Konietschke R, Hirzinger G. Planning and control of a teleoperation system for research in minimally invasive robotic surgery[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2009: 4225-4232.
- [11] Mitsuishi M, Iizuka Y, Watanabe H, et al. Remote operation of a micro-surgical system[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 1998: 1013-1019.
- [12] Mitsuishi M, Watanabe T, Nakanishi H, et al. A tele-microsurgery system that shows what the user wants to see[C]//IEEE International Workshop on Robot and Human Communication. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 1995: 237-246.
- [13] Xu K, Goldman R E, Ding J N, et al. System design of an insertable robotic effector platform for single port access (SPA) surgery[C]//IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2009: 5546-5552.
- [14] Taylor R, Jensen P, Whitcomb L, et al. A steady-hand robotic system for microsurgical augmentation[J]. International Journal of Robotics Research, 1999, 18(12): 1201-1210.
- [15] Ma R Q, Wu D M, Yan Z Y. Research and development of micro-instrument for laparoscopic minimally invasive surgical robotic system[C]//IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2010: 1223-1228.

作者简介:

马如奇 (1983-), 男, 博士生. 研究领域: 医疗机器人技术, 机器人机构设计及控制.

董为 (1978-), 男, 博士, 副教授. 研究领域: 医疗机器人, 工业机器人, 并联机器人.

杜志江 (1972-), 男, 博士, 教授. 研究领域: 医疗机器人, 移动机器人, 机器人机构, 机器人视觉.