

微创手术机器人机械臂结构设计与工作空间分析

李良敏¹, 何超², 宋成利¹, 袁帅², 张志阳¹, 陈力¹

(1. 上海理工大学 医疗器械与食品学院, 上海 200093; 2. 上海微创医疗器械(集团)有限公司, 上海 201203)

摘要:目的 现有双平行四边形机构设计的机械臂需要串联一个伸缩自由度机构,导致机械臂体积增大,运动灵活性降低,持镜臂与持器械臂发生干涉。针对这一问题,提出一种新型机械臂结构,增强运动灵活性、减小机械臂的体积。**方法** 采用 5 连杆机构、滑块与滑轨的低副机构和丝传动机构设计机械臂,实现末端执行器的伸缩运动,建立机械臂的运动学模型,以 MATLAB 为仿真工具验证零位关节角 D-H 参数的正确性,求解出机械臂的运动方程;同时运用蒙特卡洛算法,得到末端执行器的三维工作空间范围,并对 3 条机械臂作术前动物实验规划;最后,在猪体内进行胆囊切除等操作,验证机械臂的双 5 连杆 2 自由度设计的合理性和可操作性。**结果** 蒙特卡洛算法在 MATLAB 环境下得到的工作空间范围为: $-650.4\text{ mm}<x<649\text{ mm}$, $163.8\text{ mm}<y<1\ 202\text{ mm}$, $-254.6\text{ mm}<z<829.8\text{ mm}$, 并成功完成 16 例猪的胆囊切除实验,平均操作时间为 51 min。**结论** 新型设计的双 5 连杆 2 自由度机械臂在猪体内成功完成胆囊切除等操作,且猪术后无其他不良症状,机械臂之间的运动无干涉,充分验证了所提出的微创手术机器人机械臂设计方案的可行性。

关键词: 微创手术机器人; 双 5 连杆机构; 蒙特卡洛算法

中图分类号: R 318.01 **文献标志码:** A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2019.01.007

Structure Design and Workspace Analysis of Robotic Arm for Minimally Invasive Surgical Robot

LI Liangmin¹, HE Chao², SONG Chengli¹, YUAN Shuai², ZHANG Zhiyang¹, CHEN Li¹

(1. School of Medical Instrument and Food Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China; 2. Shanghai Minimally Invasive Medical Devices (Group) Co., Ltd., Shanghai 201203, China)

Abstract: Objective The current manipulator with double parallel quadrilateral mechanism should be connected in series with a flexible degree of freedom (DOF) mechanism, which increases the volume of the manipulator, decreases the motion flexibility and creates the interference between the mechanical arms that hold the mirror and the device. Aimed at solving this problem, a novel mechanical arm was put forward to enhance the motion flexibility and reduce the volume of the manipulator. **Methods** The mechanical arm was designed by using the mechanism of five-link, slider and slide rail lower pair and wire transmission to realize the telescopic movement of the end effector. The kinematics model of the manipulator was established, and the MATLAB was used as the simulation tool to verify the correctness of the D-H parameters under the specific zero joint angle, and the motion equation of the manipulator was solved. Meanwhile, the three-dimensional workspace of the end effector was obtained by using Monte Carlo algorithm, and the preoperative plan of animal experiment for 3 arms was per-

formed. Finally, cholecystectomy and other operations were acted in pigs, to verify the rationality and maneuverability of the design of double 5-link 2-DOF manipulator. **Results** The working space of Monte Carlo algorithm under MATLAB environment was $-650.4 \text{ mm} < x < 649 \text{ mm}$, $163.8 \text{ mm} < y < 1202 \text{ mm}$ and $-254.6 \text{ mm} < z < 829.8 \text{ mm}$. Sixteen cases of pig cholecystectomy were successfully completed, with an average operation time of 51 minutes. **Conclusions** The novel double 5-link 2-DOF manipulator could successfully complete cholecystectomy and other operations in pigs, which had no other symptoms after the operation. There was no interference between the mechanical arms, which fully verified the feasibility of the design scheme of the robot manipulator for minimally invasive surgery.

Key words: minimally invasive surgical robot; double 5-link mechanism; Monte Carlo algorithm

20 世纪 80 年代出现的微创手术 (minimally invasive surgery, MIS) 是外科手术领域的一大革命, 它的应用使部分手术告别了开放式手术模式。MIS 的技术原理是利用人体天生管腔或手术小孔来导入细长的医疗器械, 透过插入人体内的专用摄像头, 帮助医生操作医疗器械以及处理解剖组织与病灶的技术^[1]。由于手术过程中专用摄像头和器械的运动增大切口创面, 故研究者融合机器人技术, 希望解决 MIS 固有的切口约束与限制的问题, 手术机器人也因此应运而生。MIS 机器人具有以下 3 个优点: ① 运动灵活性高; ② 动作稳定连续, 有利于提高手术质量, 降低安全风险; ③ 具有三维立体视觉, 且能够实现眼手协调运动^[2]。这些优点促使越来越多的学者与研究机构致力于 MIS 机器人的研究与开发工作。

1995 年, Computer Motion 公司成功研制出 Zeus MIS 机器人。Zeus 系统安装了 3 条机械臂, 在一定程度上满足了手术的技术要求, 但存在机械臂灵活度不足、自由度较少以及机械臂体积大等缺陷^[3-5], 不利于 MIS 的精准操作。2008 年, Intuitive Surgical 公司研发了第 3 代 da Vinci 机器人系统, 该系统由医生主控制台、从机械臂和成像设备 3 个部分组成。为解决 MIS 固有的切口约束与限制, 采用双平行四边形机构设计机械臂, 使得器械各自由度的操作运动都是围绕该切口展开, 形成器械末端与切口的不动点约束, 但机械臂存在体积大、运动灵活性不足、缺乏力学反馈性能和成本昂贵等问题^[6-8], 需要进一步优化。国内针对 MIS 机器人的研究起步较晚。2011 年, 哈尔滨工业大学团队研制了腹腔镜机器人系统, 采用双平行四边形结构设计机械臂, 增加了机械臂的自由度; 该机器人系统虽实现了器械末端

与不动点的约束, 有较大运动角度范围, 但存在机械质量增大、运动灵活性低、持镜臂与器械臂运动干涉等问题。

基于此, 本文提出一种新型的机械臂机构, 能够简化结构设计, 减小体积, 提高运动灵活性和增大操作工作空间, 最终达到 MIS 安全精准的要求。

1 机械臂的结构设计

1.1 双平行四边形机构

双平行四边形机构^[10]是在 MIS 机器人中应用的最广泛的机构形式, 将两个平行四边形耦合, 形成两个转动关节。当驱动转动关节 I 和 II 时, 工具始终通过 P 点, 实现 MIS 中器械末端与创口形成 1 个不动点[见图 1(a)]。da Vinci 机器人采用丝传动双平行四边形机构设计机械臂的结构^[11], 其机械臂设计原理为: 第 1、2 丝轮形成 1 个平行四边形机构, 第 2、3 丝轮形成另 1 个平行四边形机构, 两个平行四边形机构耦合形成双平行四边形机构[见图 1(b)]; 传动机构由多根丝和多个丝轮组成, 增加了结构的复杂性; 在转动关节的驱动下, 伸缩关节所持的器械与患者接触的创口部分形成 1 个不动点。

哈尔滨工业大学机器人研究研发的腹腔镜手术机器人^[12]采用了双平行四边形机构设计机械臂, 无论关节 6、7、8 如何运动, 远心点始终保持不变; 旁床机械臂系统包括 3 条机械臂, 1 条机械臂装有内窥镜用于提供腹腔内部图像, 另两条机械臂末端安装不同的手术器械双臂协调完成各种手术操作。该机械臂的结构由 3 个被动旋转关节、远心机构^[13]、手术器械组成, 3 个被动关节(关节 2、3、4)用于调整从操作手的位姿, 工作时将被锁紧[见图 1(c)]。因此, 腹腔镜手术机器人具有结构紧凑、机械臂的调整灵活度

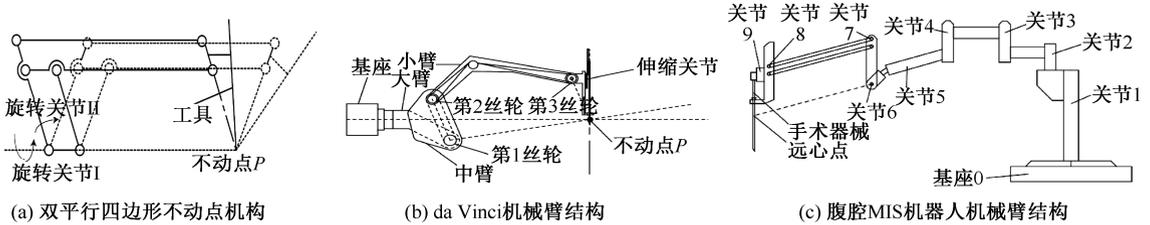


图1 平行四边形机构的演绎

Fig.1 Deduction of two parallel quadrilateral mechanisms (a) Double parallelogram remote center of motion, (b) Da Vinci manipulator, (c) Robotic arm for celiac MIS robot

高、自由度增多的优点,但存在体积大、运动灵活度低和术中的3条臂易发生干涉等问题。

1.2 双5连杆2自由度不动点机构

为解决上述单自由度机构中存在的问题,本文基于5连杆机构2自由度的输出原理,独创地开发了一种新型的机械臂结构,实现双5连杆2自由度不动点的运动功能。

双5连杆2自由度不动点机构的设计原理如图2(a)所示。第1个5连杆机构由第1、2、3、4连杆和滑块机构组成;第2个5连杆机构由第1、2、5、6连杆和不动点 P 组成,两个5连杆机构耦合成双5连杆机构,实现了器械绕不动点 P 的运动。机械臂采用丝传动方式,丝传动机构由主驱丝轮、过渡丝轮、从动丝轮和柔性丝组成^[14][见图2(b)]。丝的两端固定在主驱丝轮与从动丝轮上,实现第3、7连杆的同步运动。机械臂实体构型由基关节、悬吊梁、大臂、中臂、小臂和伸缩关节组成[见图2(c)],通过实体构型的设计,在SolidWorks 2014中设计机械臂的三维模型[见图2(d)]。当1个电机驱动第1连杆或者滑块运动,同时另1个电机驱动第4或第6连杆运动时,双5连杆机构能实现绕不动点 P 摆动和伸缩的双自由度运动。

对于该双5连杆2自由度不动点机构,设定第

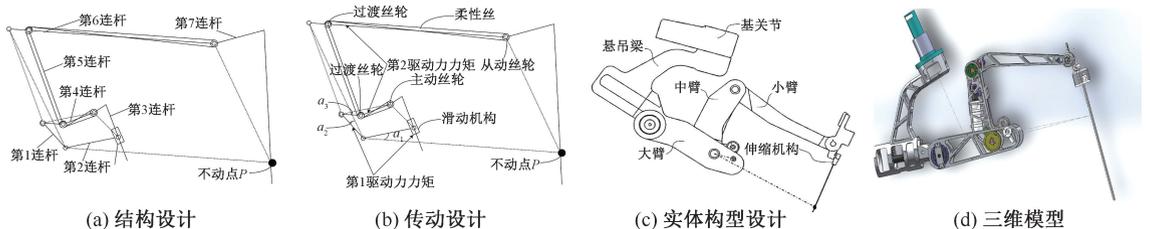


图2 5连杆2自由度不动点机构机械臂的设计原理

Fig.2 Design principle of manipulator with double-5 link and 2 DOF fixed point mechanism (a) Structural design, (b) Transmission design, (c) Solid configuration design, (d) 3D model

1~4转轴的轴心长度与第1~8转轴之间的距离之比为 m ,第3~4转轴的距离与第6连杆的长度之比为 n (m 和 n 设定为 $1/12 \sim 1/2$)。本机构创新点如下:

(1) 只有当 m, n 满足相等时,使得第3、7连杆做相同运动,最终实现第1、2个5连杆做相同的运动;

(2) 设计当 $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3$ (3个角度优选的范围为 $-30^\circ \sim 15^\circ$)时,机械臂上安装的手术器械与患者接触的创口部分形成1个不动点 P ;

(3) 采用在第3连杆上固连滑轨,在第2连杆固连滑块,滑块起到限位的作用,限制第3连杆做幅度过大的摆动,同时第3连杆带着滑轨相对滑块的上下移动,使得第7连杆做同步的伸缩运动^[15]。

1.3 机器人的灵活度分析

机器人的灵活度是保证机械臂高效完成MIS的前提。在MIS中的操作,机械臂的运动灵活度与转动惯量的大小有关^[15]。当电机的转速一定时,转动惯量越大,机械臂的灵活度越低。转动惯量是刚体绕轴转动时惯性的度量,其数学模型为:

$$J = MR^2 \quad (1)$$

式中: M 为测试零件的质量; R 为各测试点轴心到质心的距离。

转动惯量测试方法为:①使用 SolidWorks 2014 建立 da Vinci 机械臂与微创机械臂的三维模型,在软件中定义各个零件的材料属性(本文设计的机械臂的结构均采用硬质铝合金);②分别在悬吊梁、基关节、大臂关节和伸缩关节处建立三维坐标;③固定各关节,分别在 SolidWorks 2014 中提取 da Vinci 机械臂与微创机械臂的各关节的 M 与 R 的值,代入式(1)中,得到两种机械臂各关节的转动惯量。当固定悬吊梁、基关节、大臂关节和伸缩关节时,da Vinci 机械臂的转动惯量都大于微创机械臂的转动惯量(见图 3)。因此,双 5 连杆机构设计的新型机械臂的操作灵活度优于 da Vinci 机械臂的灵活度,说明新型机械臂的结构设计的正确性。

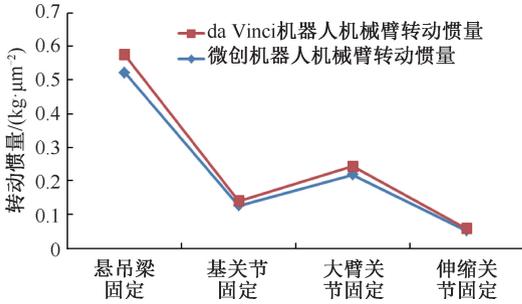


图 3 不同机械臂各关节转动惯量比较

Fig.3 Rotational inertia comparison for the joints of different robotic arms

2 机器人的运动学和工作空间分析

2.1 D-H 参数建立与验证

机器人的正运动学^[16-18]为工作空间的分析提供依据。本文采用改进 D-H 法建立机械臂各关节坐标系,各关节处于零位关节角,通过描述 x 轴和 z 轴的运动,得到机械臂的 D-H 参数,各关节坐标系如图 4 所示。

根据图 4 的机械臂各关节坐标系,得到表 1 中 D-H 参数。其中,连杆参数如下定义: a_i 连杆长度,即沿 x_i 轴从 z_i 移动到 z_{i+1} 的距离; α_i 为连杆扭角,即绕 x_i 轴从 z_i 旋转到 z_{i+1} 的角度; d_i 为连杆间距,即沿 z_i 轴从 x_{i-1} 移动到 x_i 的距离; θ_i 为转角变量,即绕 z_i 轴从 x_{i-1} 旋转到 x_i 的角度。

为验证零位关节角的 D-H 参数的准确性,采用了 MATLAB 环境的 Robotics Toolbox 工具箱对机器人进行运动学仿真。表 1 所列的 D-H 参数和 Robotics

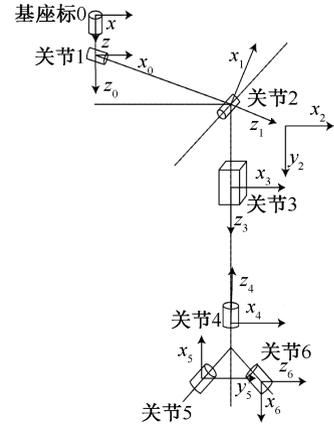


图 4 机械臂各关节坐标系

Fig.4 Coordinate system of each joint in manipulator

Toolbox 8.0 中连杆函数指令 Link 与串联函数指令 Serial-Link 建立起串联多杆机械手模型^[19]。在 MATLABR 2015b 命令窗口输入代码,得到机械臂处于零位时的仿真模型。由图 5 所包含的位姿信息可知,机械臂各关节坐标系建立正确,同时验证了运动学仿真模型的正确性,即 D-H 参数的准确性。

表 1 机器人零位连杆 D-H 参数

Tab.1 Parameters of the connecting rod D-H in the zero position of a robot

| 关节量, i | $\alpha_{i-1}/$ ($^{\circ}$) | $a_{i-1}/$ mm | $d_i/$ mm | $\theta_i/$ ($^{\circ}$) | 关节范围/ ($^{\circ}$) |
|----------|-----------------------------------|------------------|--------------|-------------------------------|-------------------------|
| 0 | 0 | 0 | 351.25 | $\theta_0(0)$ | 0 |
| 1 | -72 | 0 | -573.46 | $\theta_1(0)+90$ | -90~90 |
| 2 | 90 | 0 | 0 | $\theta_2(0)+72$ | -110~10 |
| 3 | -90 | 0 | 0 | $\theta_3(0)$ | 0~228 |
| 4 | 180 | 0 | -328.42 | $\theta_4(0)$ | -270~270 |
| 5 | -90 | 0 | 0 | $\theta_5(0)-90$ | -90~90 |
| 6 | -90 | 0 | 0 | $\theta_6(0)+180$ | -90~90 |

2.2 正运动学分析

通过对零位关节角 D-H 参数的验证,将表 1 的各关节参数代入变换矩阵中,各连杆之间的齐次变换矩阵为 ${}^{i-1}T_i$ 进行正运动学运算:

$${}^{i-1}T_i = \begin{bmatrix} c\theta_i & -s\theta_i & 0 & \alpha_{i-1} \\ s\theta_i c\alpha_{i-1} & c\theta_i c\alpha_{i-1} & -s\alpha_{i-1} & s\alpha_{i-1} d_i \\ s\theta_i s\alpha_{i-1} & c\theta_i s\alpha_{i-1} & c\alpha_{i-1} & c\alpha_{i-1} d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

各矩阵相乘,便得到机械臂末端执行器的变换矩阵为:

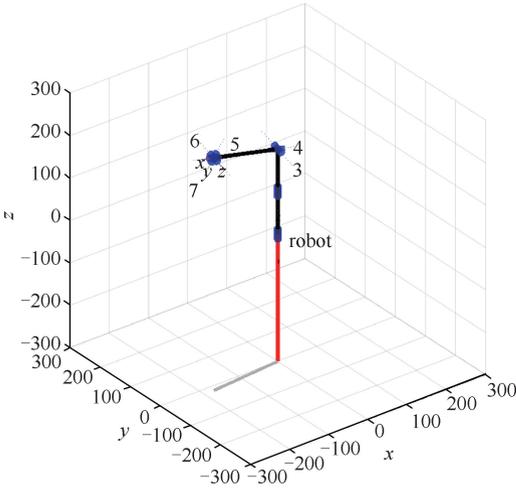


图5 动力学仿真模型

Fig.5 Kinematic simulation model

$${}^b T = {}^b T_1^0 T_2^1 T_3^2 T_4^3 T_5^4 T_6^5 T = \begin{bmatrix} n_x & o_x & \alpha_x & p_x \\ n_y & o_y & \alpha_y & p_y \\ n_z & o_z & \alpha_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: $[n_x \ n_y \ n_z]^T$, $[o_x \ o_y \ o_z]^T$, $[a_x \ a_y \ a_z]^T$ 为机械臂末端执行器的姿态; $[p_x \ p_y \ p_z]^T$ 为机械臂末端执行器相对基座坐标系的位置。在 MATLAB 中编程计算, 得到末端执行器的矩阵, 其中零位关节角度下位置与位姿分别为:

$$P_y = 0, \quad P_y = 545.4 \text{ mm}, \quad P_z = 830.9 \text{ mm} \quad (4)$$

$$[n \ o \ \alpha] = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

由图5实际计算出关节6相对基座的三维坐标值为:

$$\left. \begin{aligned} P_x &= 0 \\ P_y &= d_i \sin 72^\circ = 545.4 \text{ mm} \\ P_z &= d_0 + d_1 \cos 72^\circ + d_4 = 830.9 \text{ mm} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

通过机器人正运动学所得到末端执行器的姿态与位置, 验证图4中关节6相对基座位置理论与实际的正确性。因此, D-H 参数的正确性和机械臂的结构设计对末端姿态定位有直接影响, 并为机械臂的工作空间计算提供重要数据。

2.3 机械臂的工作空间分析

机械臂的工作空间是机器人末端参考点所能

到的所有位置的集合, 工作空间的大小代表了机器人的运动范围^[20]。随着计算机的广泛应用, 对机械臂工作空间越来越倾向于数值法进行研究, 其中“蒙特卡洛法”应用尤为广泛^[21]。蒙特卡洛法是一种借助于随机抽样来解决数学问题的数值方法。MATLAB 中利用蒙特卡洛法求解机械臂工作空间的具体步骤如下:

(1) 由机器人的正运动学, 求出机械臂末端执行器相对基座的位置向量 $[p_x \ p_y \ p_z]^T$ 。

(2) 根据关节角的取值范围, 利用 $\text{rand}(j)$ 函数, 可以产生 7 个 0~1 之间的随机值作为随机步长变量 ($j=1, 2, \dots, 7$), 即 $(\theta_{i\max} - \theta_{i\min}) \text{rand}(j)$, 从而得到机械臂各关节变量的伪随机值为

$$\theta_i = \theta_{i\min} + (\theta_{i\max} - \theta_{i\min}) \text{rand}(j) \quad (7)$$

式中: $\theta_{i\min}$ 、 $\theta_{i\max}$ 分别为关节变量的下、上限; i 为连杆数目, 取 0~6。

(3) 将步骤(2)中求得的 7 个关节变量的伪随机值代入运动学正解方程中, 求出机械臂末端点相对应的位置向量。

(4) 将所得机械臂末端位置向量值按照比例, 用描点方式显示在计算机图形设备中, 得到机械臂的工作空间点云图。

取样本容量 $N=60\ 000$, 在 MATLAB 中得到机械臂的工作空间点云图(见图6)。在 MATLAB 中得出机械臂工作空间范围为: $x \in [-650.4, 649] \text{ mm}$, $y \in [163.8, 120.2] \text{ mm}$, $z \in [-254.6, 829.8] \text{ mm}$ 。模拟的工作空间符合各关节实际转角范围, 能有效反映机械臂各关节的设计参数, 各投影面上输出均匀, 没有明显空洞。因此, 该微创机械臂工作空间形状紧凑, 为胆囊摘除实验提供了有效数据。

3 实验验证

动物实验是验证机器人使用性能的最佳方法。本实验采用 MIS 机器人及其手术工具进行猪的胆囊摘除手术(见图7)。1~2 名辅助医生在猪体表规划机械臂所持内窥镜与器械的入口, 使得 3 条臂与提供气的戳卡形成 1 个四边形, 3 条臂之间的间距为 100 mm, 避免发生干涉。具体实验过程为: ① 对实验动物注射镇静剂, 并实施诱导麻醉; ② 固定实验动物, 接呼吸机及心肺监护设备; ③ 实施静脉全麻, 并给实验动物备皮和消毒处理; ④ 首先确定

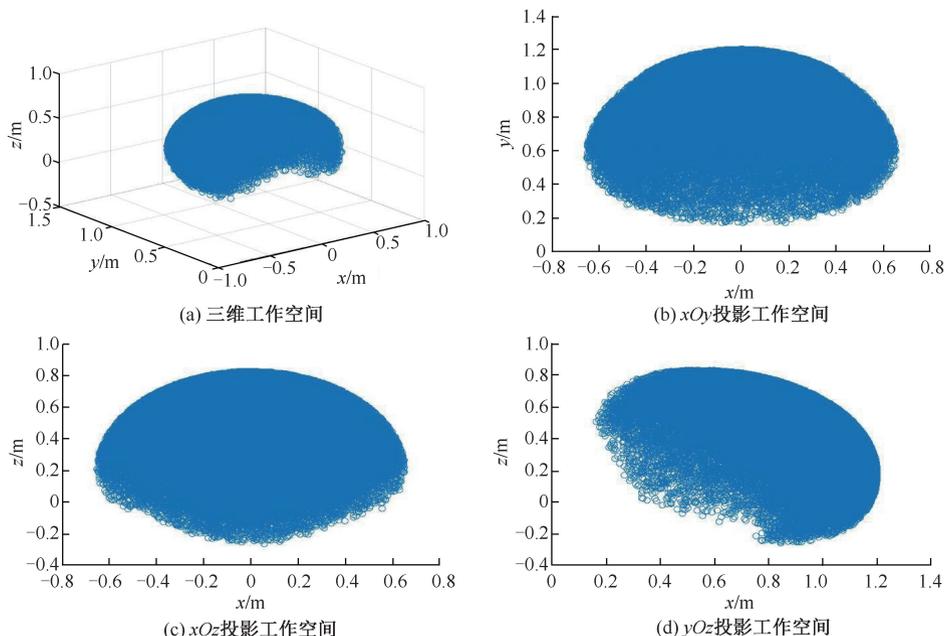


图6 蒙特卡洛法分析机械臂的工作空间

Fig.6 Monte Carlo method analysis workspace of manipulator (a) 3D workspace, (b) xOy projection workspace, (c) xOz projection workspace, (d) yOz projection workspace

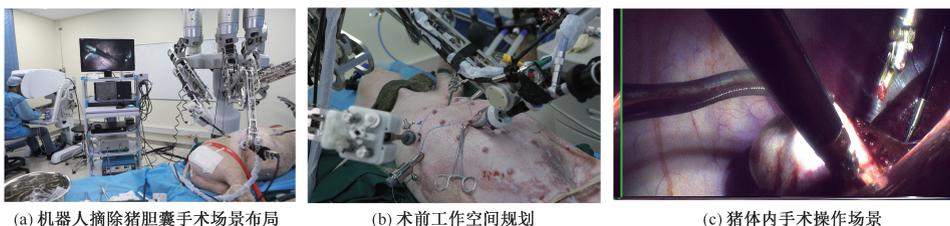


图7 动物实验

Fig.7 Animal experiment (a) Layout of the cholecysto surgery in a pig, (b) Pre-operation workspace planning, (c) Operation scene in pigs

内窥镜插入位置并固定戳卡,接通气腹机;⑤ 插入内窥镜,实施腹腔探查,确定胆囊及胆管位置;⑥ 确定工具臂的切口位置和助手辅助切口位置,并固定戳卡;⑦ 调整从机械臂,使主动操作臂本身约束形成的空间不动点位置与动物体表切口位置相适应,并将戳卡固定在机械臂上;⑧ 根据内窥镜所提供的图像信息,小心地插入手术工具,并对机械臂进行手动调整,使手术工具末端位于内窥镜视野范围之内;⑨ 启动机器人,开始辅助实施手启动机器人系统后,通过零位关节角的工作空间范围对3条机械臂进行手术操作。医生操作主手,通过主从控制算法,控制从机械臂在猪的体内做胆囊的切割和伤口缝合。手术中,通过零位状态

下,操作从机械臂在指定的空间中运动,能够实现动物的胆囊切除实验,并对猪体内的组织没有任何伤害(见图8)。

最终成功实施了16例动物实验,平均实际操作手术时间为51 min。术后猪状态良好,未出现并发症与不良反应。手术过程中,从机械臂操作灵活,持镜臂与持器械臂未发生干涉,机械臂未出现抖动和运动连续等。因此,双5连杆2自由度机构设计机械臂的方法合理。

4 讨论与结论

本文研究了 da Vinci 机器人和哈尔滨工业大学机器人采用双平行四边形机构设计的机械臂串联

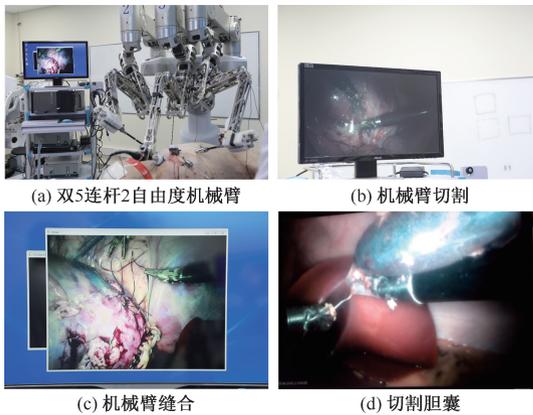


图8 胆囊切除操作

Fig.8 Operation of cholecystectomy (a) Double 5-link 2 DOF fixed point manipulator, (b) Cutting by manipulator, (c) Suture by manipulator, (d) Cutting gallbladder

1个伸缩自由度机构造成体积大、操作灵活性不足和机械臂之间存在运动干涉等问题,基于5连杆机构双自由度的输出原理,结合丝传动的传动特性,以及机器人运动学的研究,成功开发了一种新型机械臂。该机械臂可满足 MIS 对机器人的工作空间范围大和操作灵活等要求,对促进 MIS 机器人技术的发展具有重大意义。

尽管本研究为今后微创机器人的临床测试提供重要依据,但仍有以下几个问题需深入探讨:

(1) 作为一种辅助手术工具, MIS 机器人机械臂除了需具备精准的操作性能外,还应满足安全性、操作舒适性等手术要求;

(2) 双5连杆2自由度机械臂的结构设计过程应充分考虑系统的刚度、精度、质量等因素;

(3) 综合考虑末端执行器、夹持内窥镜的不动点机构的手术工作的活动范围、灵活度、手术切口等位置要求,对机械臂的结构设计做进一步的优化,满足手术的要求。

参考文献:

[1] TAYLOR RH, STOIANOVICI D. Medical robotics in computer-integrated surgery [J]. IEEE T Robotic Autom, 2003, 19(5): 765-781.

[2] LI J, ZHOU N, WANG S, *et al.* Design of an integrated master-slave robotic system for minimally invasive surgery [J]. Int J Med Robot, 2012, 8(1): 77-84.

[3] BOYD WD. Robotic surgery using Zeus™ Micro Wrist™ technology [J]. J Cardiac Surg, 2003, 18(18): 1-5.

[4] ZHOU HX, GUO YH, YU XF, *et al.* Clinical characteristics of remote Zeus robot-assisted laparoscopic cholecystectomy: A report of 40 cases [J]. World J Gastroenterol, 2006, 12(16): 2606-2609.

[5] STOIANOVICI D, WEBSTER R, KAVOUSSI L. Robotic tools for minimally invasive urologic surgery [M]// MOORE RG, BISHOFF JT, LOENIG S, *et al.* Minimally invasive urologic surgery. London: CRC Press, 2005.

[6] SUN LW, MEER FV, YAN B, *et al.* Design and development of a Da Vinci surgical system simulator [C]// Proceedings of International Conference on Mechatronics and Automation. Harbin: IEEE, 2007: 1050-1055.

[7] Hanly EJ, Marohn MR, Bachman SL, *et al.* Multiservice laparoscopic surgical training using the da Vinci surgical system [J]. Am J Surg, 2004, 187(2): 309-315.

[8] 李建民, 王树新, 张建勋, 等. 微创手术机器人控制策略 [J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2011, 44(10): 884-889.

[9] 潘博. 腹腔镜操作机器人研制及其关键技术研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009.

[10] 李建民. 微创机器人机构设计方法与主从映射策略研究 [D]. 天津: 天津大学, 2012.

[11] 库珀 T, 所罗门 T. 偏移遥控中心的操纵器: CN 102327152 A [P], 2012.

[12] 赵旭东. 腹腔微创手术机器人手术器械的结构设计 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.

[13] KUO CH, DAI JS. Robotics for minimally invasive surgery: A historical review from the perspective of kinematics [C]// Proceedings of International Symposium on History of Machines and Mechanisms. Netherlands: Springer, 2009: 337-354.

[14] 何超. 微创手术机器人手术工具丝传动设计方法研究 [D]. 天津: 天津大学, 2013.

[15] 管奕颖. 6-DOF 工业机器人的工作空间与灵巧性分析及其应用 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2015

[16] 郭发勇, 梅涛, 赵江海. D-H 法建立连杆坐标系存在的问题及改进 [J]. 中国机械工程, 2014, 25(20): 2710-2714.

[17] TONDU B. Kinematic modelling of anthropomorphic robot upper limb with human-like hands [C]// International Conference on Advanced Robotics. Munich: IEEE, 2009: 1-9.

[18] CRAIG JJ, 著. 负超, 译. 机器人学导论 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.

[19] 陈亮. 机械手的运动学分析及在屏幕贴合中的应用 [J]. 机器人技术与应用, 2014(2): 26-28.

[20] 林海峰, 王姮. 多关节机器人工作空间仿真方法 [J]. 微型机与应用, 2014(2): 72-74.

[21] RASTEGAR J, FARDANESH B. Manipulation workspace analysis using the Monte Carlo method [J]. Mech Mach Theory, 1990, 25(2): 233-239.