

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2019.02.013

基于远心机构的主操作手建模与仿真研究*

王 杰,管声启*,雷 鸣,陈林梓

(西安工程大学 机电工程学院,陕西 西安 710048)

摘要:针对泌尿外科微创手术机器人的末端执行器如何在有限空间中完成给定任务,以提高泌尿外科微创手术的安全性问题,对其主操作手的运动学和工作空间进行了研究。根据泌尿外科微创手术特点和技术要求,基于远心机构,设计了具有6个自由度主操作手,用于控制该手术机器人的末端执行器;采用修正后的D-H参数法,建立了运动学模型,求得了主操作手的末端空间位置与各关节变量之间的函数关系和运动学逆解;利用Matlab和ADAMS软件对主操作手进行了运动学和理论工作空间仿真,并进行了结果对比分析。研究表明:该主操作手结构设计合理、模型建立准确、灵活度高,可以完成给定手术任务。

关键词:远心机构;主操作手;运动学模型;工作空间

中图分类号:TH776;TP242.3

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2019)02-0179-06

Modeling and simulation of master manipulator based on the remote center motion mechanism

WANG Jie, GUAN Sheng-qi, LEI Ming, CHEN Lin-zi

(School of Mechanical and Electronic Engineering, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China)

Abstract: Aiming at the problem how the robotic end effector for minimally invasive urology surgery can accomplish a given task in limited space to improve the safety of minimally invasive urology surgery, the kinematics and workspace of the master manipulator were studied. According to the characteristics and technical requirements of minimally invasive urology surgery, a master manipulator with 6-DOF was designed based on the remote centre motion (RCM) mechanism, which was used to control the robotic end effector. And the kinematics model of master manipulator was established with the improved D-H method, the functional relationship between the end of master manipulator and the spatial position of each joint variable and the kinematics solution of inverse was obtained. The simulation of the kinematics and workspace for master manipulator was carried out by ADAMS and Matlab, and the results were compared and analyzed. The results indicate that the master manipulator is reasonable, the model is established accurately, the flexibility is high, and the given operation task can be completed.

Key words: remote-centre-motion mechanism (RCM); master manipulator; kinematics model; workspace

0 引 言

微创外科机器人可以自主地将手术器械按医生术前规划好的路径送达病灶位置,在一定程度上减少了手术创伤,消除了手部震颤,还能够降低手术医生的工作强度^[1-3]。在手术过程中,手术医生主要通过主操作

手来实现对泌尿外科微创手术机器人及其手术工具的位置和方向控制,进而完成手术中的激光切除等操作,因此,对主操作手的灵活运动有很大的要求。

目前,国内外许多用于外科手术的主操作手仍然存在各种不足。特别是大多数主操作手都是通用型的,工作空间较小、针对性较差^[4]。美国 Sensable

收稿日期:2018-07-24

基金项目:西安市科技计划资助项目(2017074CG,RC037(XAGC006))

作者简介:王 杰(1993-),男,陕西渭南人,硕士研究生,主要从事医疗机器人技术方面的研究。E-mail:wangxiaomujerry@163.com

通信联系人:管声启,男,教授,硕士生导师。E-mail:sina1300841@163.com

Technologies 公司研发的 PHANTOM 系列力反馈操作手,操作舒适、结构轻巧,是迄今为止开发研制最成功的力反馈主操作手之一^[5];文献[6-7]提出了两种多自由度高精度力反馈主操作手,可满足大力矩和大角度反馈;文献[8]对六自由度并联主手进行了设计研究,但由于液压驱动的特点导致该主手操控不够灵活;文献[9]设计开发了一种串并混联的6自由度力反馈主手,采用五杆万向节机构进行位置定向;此外,美国 Intuitive Surgical 公司研发的达芬奇系统串联主操作手具有 7+1 个自由度,可以避免工作空间内奇异点,提高灵活度^[10]。

本文将针对泌尿外科微创手术机器人末端执行器在有限空间中的任务要求,基于远心机构设计一种主操作手。

1 主操作手建模

主操作手需要采集医生手部动作指令传达给机器人从手,并将从手反馈回来的力信息传递给医生,实现医生和从手之间的信息采集、转换和传递^[11]。

主操作手的信息反馈过程框图如图 1 所示。

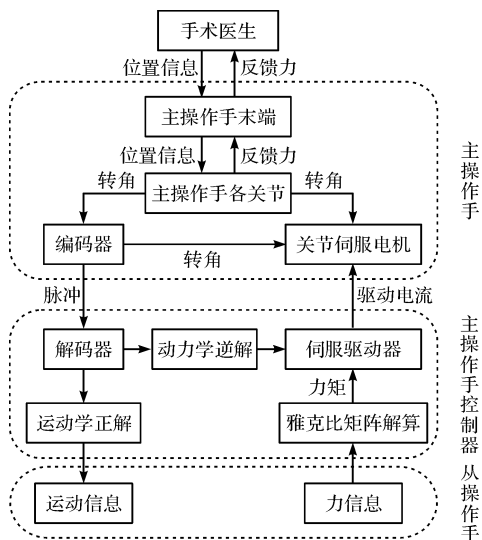


图 1 主操作手的信息反馈过程框图

根据文献[12]相关研究,手术器械在微创手术中因受到切入点的约束作用,会丧失两个自由度,使得手术器械末端可达运动空间变为以腹腔切入点作为顶点的类圆锥体空间。

手术器械的工作空间示意图如图 2 所示。

手术器械的主要运动分为两种:(1)机器人从手运动确保手术器械定位;(2)腕部关节旋转确保手术器械定向。具体来说,手术切入点允许手术器械有 5 个旋转自由度和 1 个直线自由度,来分别实现俯仰、偏

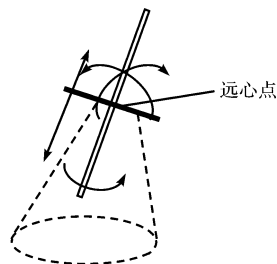


图 2 手术器械的工作空间示意图

航、绕自身轴线旋转和沿自身轴线的线性运动。此外,为了增强主操作手和手术器械之间操纵动作的直观性,主操作手的远心点在手术医生的侧面。

根据实际动作需求,本文基于远心机构设计的主操作手具有 3 个位置自由度、3 个姿态自由度^[13]。

主操作手结构示意图如图 3 所示。

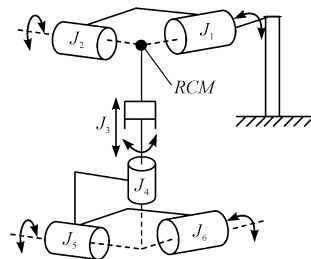


图 3 主操作手结构示意图

图 3 中:2 个旋转关节和 1 个柱型关节相交于远心点(RCM),用于主操作手定位;3 个旋转关节和分别作为万向腕关节的横摇、俯仰和偏航关节轴线交于一点,用于主操作手定向。

本研究通过丝传动调整主操作手臂做 3 自由度远心运动来确定主操作手的位置,模拟手术器械的运动;在主操作手腕上采用 3 自由度旋转关节组成远心机构来模拟手术工具的定向。

整个系统中,驱动电机前置于基座,可以减小主操作手机构的总质量,进而减小了主操作手的惯量;同时,有效减小了机构的体积,使其机构更加紧凑^[14]。

2 主操作手运动学分析

手术医生在进行手术操作时,主操作手各关节都处于被动状态,手术医生凭借手术经验操作主操作手末端的信息会通过主操作手的各连杆传递给各关节电机及编码器,编码器会根据检测到的各关节电机运动信息,通过运动学正解获得主操作手末端点的位姿信息。而主操作手与机器人从手存在工作空间上的映射关系^[15],确定主操作手的末端位姿信息即确定机器人从手的末端位姿信息。因此,对于主操作手进行运动学分析非常关键。

2.1 主操作手正运动学分析

运动学正解是对工作空间分析的基础^[16],正运动学是已知主操作手各关节变量和连杆参数,求解末端相对于基坐标的齐次变换矩阵。本文通过修正后的D-H法对机器人运动学进行建模分析,建立机器人各个关节的参考坐标系,求出主操作手的运动学正解。

主操作手的D-H坐标系如图4所示。

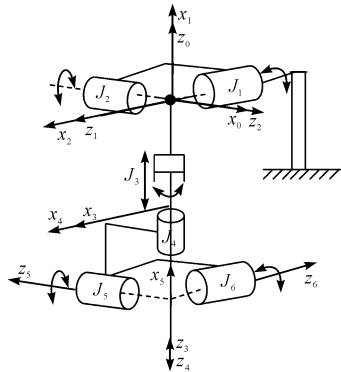


图4 主操作手D-H坐标系

根据主操作手的连杆坐标系可得其D-H参数,如表1所示。

表1 操作机构D-H参数表

i	α_{i-1}	α_{i-1}/mm	d_i/mm	θ_i	变量范围
1	90°	0	0	$\theta_1 + 90^\circ$	$-60^\circ \sim 60^\circ$
2	90°	0	0	$\theta_2 + 90^\circ$	$-60^\circ \sim 60^\circ$
3	-90°	0	$d_3 + l_3$	0	$0 \sim 230 \text{ mm}$
4	0°	0	0	θ_4	$-180^\circ \sim 180^\circ$
5	-90°	0	0	$\theta_5 + 90^\circ$	$-90^\circ \sim 90^\circ$
6	-90°	0	0	θ_6	$-180^\circ \sim 180^\circ$

α_{i-1} —相邻坐标系 z 轴间的夹角; α_{i-1} —相邻坐标系 z 轴间的距离; θ_i —相邻坐标系 x 轴间的夹角; d_i —相邻坐标系 x 轴间的距离; l_3 —移动关节的初始伸长量,且 $l_3 = 20 \text{ mm}$

基于表1的D-H参数,可以通过齐次坐标系变换矩阵 A_i 来求得各关节参考坐标系相对于相邻杆件坐标系的坐标,即:

$$A_i = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i & 0 & \alpha_{i-1} \\ \cos\alpha_{i-1}\sin\theta_i & \cos\alpha_{i-1}\cos\theta_i & -\sin\alpha_{i-1} & -d_i\sin\alpha_{i-1} \\ \sin\alpha_{i-1}\sin\theta_i & \sin\alpha_{i-1}\cos\theta_i & -\cos\alpha_{i-1} & d_i\cos\alpha_{i-1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

将表1中的各关节参数代入式(1),可得到相邻连杆之间的坐标转换矩阵,即:

$$A_1 = \begin{bmatrix} -\sin\theta_1 & -\cos\theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ \cos\theta_1 & -\sin\theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} -\sin\theta_2 & -\cos\theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ \cos\theta_2 & -\sin\theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$A_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_3 + l_3 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$A_4 = \begin{bmatrix} \cos\theta_4 & -\sin\theta_4 & 0 & 0 \\ \sin\theta_4 & \cos\theta_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$A_5 = \begin{bmatrix} -\sin\theta_5 & \cos\theta_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -\cos\theta_5 & \sin\theta_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$A_6 = \begin{bmatrix} \cos\theta_6 & -\sin\theta_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta_6 & -\cos\theta_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

通过相邻连杆之间坐标转换矩阵,可求得该操作机构末端相对基坐标系的坐标转换矩阵,即:

$$T_6 = A_1 \cdot A_2 \cdot A_3 \cdot A_4 \cdot A_5 \cdot A_6 = \begin{bmatrix} n_x & 0_x & a_x & p_x \\ n_y & 0_y & a_y & p_y \\ n_z & 0_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\begin{cases} n_x = C_6(S_5(C_1S_4 - C_4S_1S_2) - C_2C_5S_1) + S_6(C_1C_4 + S_1S_2S_4) \\ n_y = C_6(C_5S_2 - C_2C_4S_5) - C_2S_4S_6 \\ n_z = C_6(S_5(S_1S_4 + C_1C_4S_2) + C_1C_2C_5) + S_6(S_1C_4 - C_1S_2S_4) \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} o_x = C_6(C_1C_4 + S_1S_2S_4) - S_6(S_5(C_1S_4 - S_1S_2C_4) - S_1C_2C_5) \\ o_y = S_6(C_5S_2 - C_2C_4S_5) - C_2S_4C_6 \\ o_z = C_6(S_1C_4 + C_1S_2S_4) - S_6(S_5(S_1S_4 - C_1S_2C_4) - C_1C_2C_5) \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{cases} a_x = C_5(C_1S_4 + S_1S_2C_4) + S_1C_2S_5 \\ a_y = S_2S_5 + C_2C_4C_5 \\ a_z = C_5(S_1S_4 + C_1S_2C_4) - C_1C_2C_5 \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} p_x = (d_3 + l_3) S_1 C_2 \\ p_y = (d_3 + l_3) S_2 \\ p_z = -(d_3 + l_3) C_1 C_2 \end{cases} \quad (12)$$

式中： $S_i = \sin\theta_i$ ； $C_i = \cos\theta_i$ ； $i \in [1, 2, 4, 5, 6]$ 。

主操作手的 3 个关节轴线交于一点的结构使得主手正运动学矩阵里末端点位置只应与位置变量 p_x 、 p_y 、 p_z 有关，而与姿态变量无关。由位置变量 p_x 、 p_y 、 p_z 的表达式可知，位置坐标 p_x 、 p_y 、 p_z 只与前 3 个位置关节的变量 θ_1 、 θ_2 、 θ_3 有关，而与腕部姿态变量 θ_4 、 θ_5 、 θ_6 无关，因此，求解出的主操作手的运动学正解正确。

2.2 主操作手逆运动学分析

主操作手逆运动学是正运动学的逆过程。由于主操作手的腕部三轴相交于一点，其位置逆解与腕部无关，因此，可根据末端执行器的参考点位置逆解出前 3 个位置关节变量的表达式，从而减小计算量^[17]。式 (13) 给出了主操作手在空间中的位置坐标，则主操作手的位置变量 θ_1 、 θ_2 、 d_3 的值为：

$$\begin{cases} x = (d_3 + l_3) \sin\theta_1 \cos\theta_2 \\ y = (d_3 + l_3) \sin\theta_2 \\ z = -(d_3 + l_3) \cos\theta_1 \cos\theta_2 \end{cases} \quad (13)$$

由式(13)化简可得：

$$\theta_1 = \text{atan2}(x, z) \quad (14)$$

$$\theta_2 = \arcsin \frac{y}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}} \quad (15)$$

$$d_3 = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} - l_3 \quad (16)$$

3 主操作手仿真实验与分析

3.1 运动学仿真及结果分析

为验证运动学模型的正确性，本研究根据主操作手位置的向量表达式 (12)，分别利用 Matlab 软件和 ADAMS 软件分别对主操作手进行空间位置计算和仿真，并将 Matlab 软件的计算结果和 ADAMS 软件的仿真结果进行对比分析，其结果如图 5 所示。

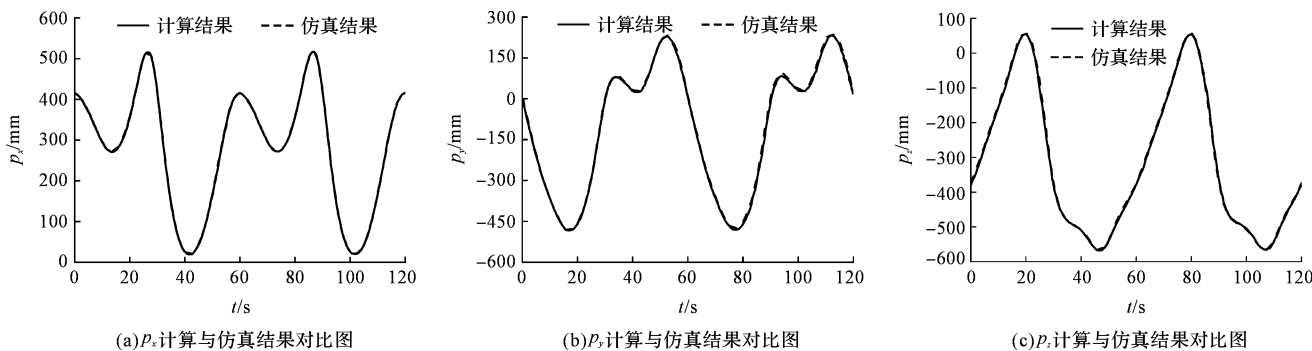


图 5 主操作手空间位置的计算与仿真结果对比图

由图 5 可知：对于主操作手在某个时刻的空间位置曲线，计算结果与仿真结果一致。这说明建立的主操作手的运动学模型是有效的。

3.2 工作空间仿真及结果分析

实际手术对手术器械的可达空间要求即为对主操作手工作空间的要求^[18]，因此，有必要对主操作手进行空间仿真与分析。主操作手的工作空间是指主操作手末端执行器坐标系的原点能在空间活动的最大范围，即可达空间。其大小代表了主操作手的活动范围，是衡量主操作手工作能力的一个重要的运动学指标。

在泌尿外科手术中，手术工具的运动范围可近似看成底面半径为 150 mm，高度为 130 mm 的类锥形空间。将主操作手的可达空间记为 $W_{(p)}$ ，则其各关节变量和可达空间的关系可表示为：

$$W_{(p)} = \{P(\theta_i, d_i) \mid \theta_i \in Q, d_i \in Q\} \quad (17)$$

式中： θ_i — 旋转关节变量，且 $\theta_i = [\theta_1, \theta_2]$ ； d_i — 旋转关节

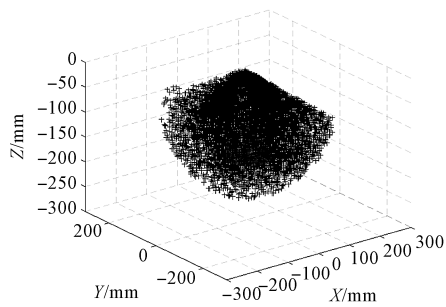
变量，且 $d_i = [d_3]$ ； Q — 空间约束， $Q = \{(\theta, d) \mid \theta_i^{\min} \leq \theta_i \leq \theta_i^{\max}, d_i^{\min} \leq d_i \leq d_i^{\max}, i = 1, 2, 3\}$ ； θ_i^{\min} — 主操作手旋转关节转动的下限； θ_i^{\max} — 主操作手旋转关节转动的上限； d_i^{\min} — 主操作手移动关节直线运动的下限； d_i^{\max} — 主操作手移动关节直线运动的上限。

因此，主操作手的工作空间可进一步表示为：

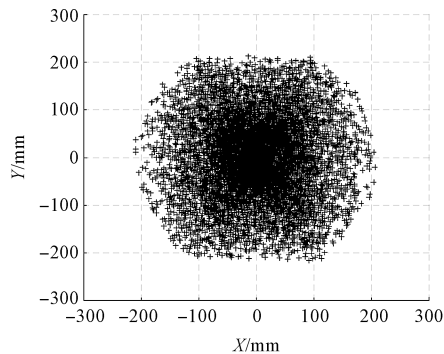
$$W_{(p)} = \begin{cases} p_x(\theta_i, d_i) \\ p_y(\theta_i, d_i) \\ p_z(\theta_i, d_i) \end{cases} \quad (18)$$

基于蒙特卡洛法利用 Matlab 软件编程，本文得到了主操作手末端的工作空间图^[19]，如图 6 所示。

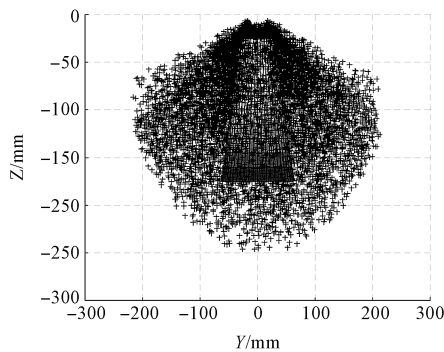
由图 6 可知：主操作手工作空间符合各关节实际转角范围，形状紧凑，没有明显空洞；仿真结果与实际工作空间相符合，且覆盖了手术工具的类锥形运动范围，从而验证了主操作手建模的合理性。



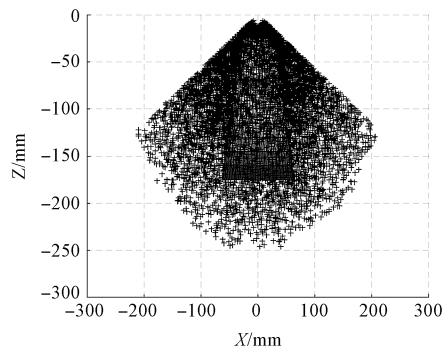
(a) 主操作手末端工作空间位置图



(b) 主操作手末端工作空间XOY平面投影



(c) 主操作手末端工作空间XOZ平面投影



(d) 主操作手末端工作空间YOZ平面投影

图6 主操作手末端工作空间图

4 结束语

本研究针对泌尿外科微创手术机器人末端执行器在有限空间中工作问题,提出了一种泌尿外科手术机器人专用的主操作手;通过修正后的 D-H 法建立了机器人的运动学模型,描述了主操作手各关节间的齐次

坐标变换,得到了主操作手的运动学解;通过比较 Matlab 和 ADAMS 对主操作手的运动学仿真结果,验证了主操作手参数设计的合理性。

本研究利用蒙特卡洛法在 Matlab 中对主操作手的工作空间进行了仿真,求解了主操作手的工作可达空间,证实了主操作手的有效性。

参考文献(References):

- [1] CADEDDU J A. A new robot for flexible ureteroscopy: development and early clinical results (IDEAL Stage 1-2b). [J]. *European Urology*, 2014,66(6):1092-100.
- [2] TAO S, NELSON C A, WARBURTON K, et al. Design and analysis of a novel articulated drive mechanism for multifunctional NOTES robot [J]. *Journal of Mechanisms & Robotics*, 2015,7(1):1104-1112.
- [3] 倪自强,王田苗,刘 达. 医疗机器人技术发展综述[J]. *机械工程学报*,2015,51(13):45-52.
- [4] 屈金星. 微创手术机器人力反馈型主操作手设计与研究[D]. 天津:天津大学机械工程学院,2014.
- [5] SILVA A J, VEGA V P, OLIVER J P O. PHANTOM OMNI haptic device: kinematic and manipulability [C]. *Electronics, Robotics and Automotive Mechanics Conference, IEEE Computer Society, Nanjing:IEEE*,2009.
- [6] MORTIMER M, HORAN B, STOJCEVSKI A. 4 Degree-of-Freedom haptic device for surgical simulation [C]. *IEEE World Automation Congress, Beijing:IEEE*,2014.
- [7] VU M H, NA U J. A new 6-DOF haptic device for teleoperation of 6-DOF serial robots [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement*, 2011,60(11):3510-3523.
- [8] 唐照坤. 七自由度力反馈主手结构设计与仿真[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学机电工程学院,2015.
- [9] VULLIEZ M, ZEGHLOUL S, KHATIB O. Kinematic analysis of the delthaptic, a new 6-DOF haptic device [J]. *Advances in Robot Kinematics*,2016(4):181-189.
- [10] 王 杰,管声启,夏齐霄. 手指康复外骨骼机器人的结构优化设计[J]. *中国机械工程*,2018,29(2):224-229.
- [11] 王连香. 运动约束型微创手术机器人运动学分析及仿真[D]. 北京:中国科学院大学计算机与控制工程学院,2016.
- [12] WIJK V V D, DEMEULENAERE B, GOSSELIN C, et al. Comparative analysis for low-mass and low-inertia dynamic balancing of mechanisms [J]. *Journal of Mechanisms & Robotics*, 2012,4(3):031008.
- [13] 牛国君,潘 博,付宜利. 腹腔微创机器人远心定位机构优化设计[J]. *机器人*,2016,38(3):285-292.
- [14] 张顺心,王晓东,尹立轶,等. 六自由度植牙手术机器人

- 设计及动态特性分析[J]. 河北工业大学学报, 2017, 46(4): 28-33.
- [15] LEE H, CHEON B, HWANG M, et al. A master manipulator with a remote-center-of-motion kinematic structure for a minimally invasive robotic surgical system [J]. **Int J Med Robot**, 2017(1): 1865-1877
- [16] 蔡自兴. 机器人学基础[M]. 2版. 北京: 机械工业出版社, 2013.
- [17] 吕坤勇, 朱 勋, 沈 桐, 等. 多自由度手术器械的结构设计与工作空间仿真[J]. 机械科学与技术, 2016, 35(12): 1888-1893.
- [18] 赵建文, 宋胜涛, 李瑞琴, 等. 2-RPR + RRP 球面混联机构的可达工作空间研究[J]. 机械传动, 2017(1): 24-27.
- [19] 孙 野, 殷凤龙, 王香丽, 等. 六自由度机械臂运动学及工作空间分析[J]. 机床与液压, 2015(3): 76-81.

[编辑: 李 辉]

本文引用格式:

王 杰, 管声启, 雷 鸣, 等. 基于远心机构的主操作手建模与仿真研究[J]. 机电工程, 2019, 36(2): 179 - 184.

WANG Jie, GUAN Sheng-qi, LEI Ming, et al. Modeling and simulation of master manipulator based on the remote center motion mechanism[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2019, 36(2): 179 - 184. 《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>

(上接第 123 页)

- [9] 余永维, 殷国富, 蒋红海, 等. 磁瓦表面图像的自适应形态学滤波缺陷提取方法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2012, 24(3): 351-356.
- [10] 蒋红海, 殷国富, 刘培勇, 等. 基于 Curvelet 变换和支持向量机的磁瓦表面缺陷识别方法[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2012, 44(3): 147-152
- [11] 李雪琴, 蒋红海, 刘培勇, 等. 非下采样 Contourlet 域自适应阈值面的磁瓦表面缺陷检测[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2014, 26(4): 553-558.
- [12] 杜柳青, 余聘南, 余永维. 一种基于混沌特性的磁瓦表面缺陷视觉提取方法[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(11): 2620-2625.
- [13] LIX Q, JH H, YIN G F. Detection of surface crack defects on ferrite magnetic tile [J]. **NDT & E International**, 2014, 62(3): 6-13.
- [14] CHEN L Y, LIU P Y, YIN G F, et al. Defect detection in magnetic tile images based on stationary wavelet transform [J]. **NDT & E International**, 2016, 83(10): 78-87
- [15] LUO F X, LI J L, MING YIN, et al. A novel surface defect inspection algorithm for magnetic tile [J]. **Applied Surface Science**, 2016, 375(1): 118-126.
- [16] 张振尧, 白瑞林, 过志强, 等. 磁瓦表面缺陷的机器视觉检测方法[J]. 光学技术, 2014(14): 25-31.

[编辑: 周昱晨]