

文章编号: 1002-0446(2008)04-0298-06

CT 导航微创外科机器人关节液压锁紧结构研究

刘 达, 唐 粲

(北京航空航天大学机器人研究所, 北京 100083)

摘 要: 分析了目前微创外科机器人关节锁紧机构的发展现状和存在的问题, 讨论了机器人关节摩擦力矩产生的机理以及影响摩擦力矩的因素. 针对当前医疗机器人锁紧结构不足之处, 基于关节摩擦理论, 提出并设计了三种不同形式的 CT 导航微创外科机器人关节锁紧结构, 分别阐述了它们的工作原理和实现形式. 通过对不同结构的性能对比实验, 确定采用基于外摩擦环的机器人关节锁紧结构, 并初步验证基于该结构的机器人系统可以满足 CT 导航微创外科临床手术需求.

关键词: CT 导航; 微创外科机器人; 液压; 摩擦锥; 摩擦环; 关节锁紧
中图分类号: TP242 **文献标识码:** B

On Hydraulically Locking Structure of Robot Joint for Minimally Invasive CT-guided Surgery

LIU Da, TANG Can

(Robotics Institute, Beihang University, Beijing 100083, China)

Abstract: The development status and existing problems of the joint locking mechanism of minimally invasive surgery robot guided by computerized tomography (CT) are analyzed. The principle of robot joint friction torque and the influence factors on friction torque are discussed. According to the deficiencies existed in the locking structure of current medical robot, three locking structures of minimally invasive surgery robot with CT navigation are presented based on joint friction theory, and their working principles and realization forms are expatiated respectively. Experiments are made on different structures to compare their performance, and the locking structure of robot joint with exterior friction ring is determined. It is validated that robot system with the presented structure can meet the requirements of clinical operation for minimally invasive surgery with CT navigation.

Keywords: computerized tomography (CT) navigation; minimally invasive surgery robot; hydraulic pressure; friction cone; friction ring; joint locking

1 引言 (Introduction)

近十年来, 医疗外科机器人是机器人应用发展最快的领域^[1]. 目前, 机器人技术在医疗外科手术规划模拟、微创定位操作、无损伤诊疗、新型手术治疗方法等方面得到了广泛的应用, 不仅促进了传统医学的革命, 也带动了新技术、新理论的发展, 并形成了新的高技术产业^[2]. 作为医疗外科手术的重要分支, 微创外科手术^[3]对健康组织的创伤小, 术后恢复时间短, 住院费用低, 因此, 受到医生和患者的普遍欢迎. 特别是近几年来, 伴随

数字成像技术的发展, 在图像设备 (CT、X 射线 C 型臂) 引导下的微创手术已经广泛应用于胸、腹等外科领域^[4]. 术中使用 CT 具有显著的优势^[5], 这是因为它可以动态显示病变体的空间位置, 从而有利于提高手术定位精度, 保证手术安全.

北航机器人研究所于 20 世纪 90 年代中期开始了医疗机器人的研究, 目前开发的五代医疗机器人的关节锁紧机构采用的是如下结构: 一种是机械锁紧, 靠弹簧在关节外圈拉紧摩擦片实现功能, 但弹簧容易变形和损坏, 摩擦片于关节轴之间长期摩擦, 导致摩擦系数越来越小, 锁紧能力

下降,同时,这种结构的关节体积大,导致机器人外形尺寸大,影响机器人的灵活性;另一种是电磁制动,即在关节上安装电磁制动器,该结构不但增加了系统成本,也增大了维护难度,同时,因电磁制动器的安装导致了关节结构的复杂性,也使机器人外形尺寸较大。

柴明晓^[6]设计了一种液压锁紧平面多路阀,其阀杆与电机相连,该结构不能用于关节锁紧;潘保安^[7]设计了一种液压锁紧缸,它虽然锁紧力可调,但也无法用于机器人关节锁定;潘高峰^[8]设计了双动液压机内外滑块液压锁紧机构,它由电机、油泵和一系列阀和锁紧机构组成,系统庞杂,不适合医疗机器人。

针对上述锁紧结构存在的问题,本文提出并设计了机器人的三种关节锁紧结构,基于固体干摩擦理论中的粘着摩擦理论,阐述了机器人关节摩擦力矩形成机理,分析了三种关节锁紧结构的工作原理,对它们的锁紧性能进行了实验和性能对比,确定了本文所采用的锁紧结构形式。

2 关节摩擦力矩产生原理 (Principle of joint friction moment)

文[9]总结出四个经典摩擦定律:摩擦力与载荷成正比、摩擦系数与表面接触面积无关、静摩擦系数大于动摩擦系数、摩擦系数与滑动速度无关。上述四个定律适用于滑动摩擦。

机构锁紧与固体摩擦、摩擦力以及摩擦力矩的产生密切相关。经典摩擦理论的机械啮合理论或分子作用理论都很不完善,它们得出的摩擦系数与粗糙度的关系都是片面的^[9]。Bowden 和 Tabor^[10]经过系统的实验研究,建立了较完整的粘着摩擦理论,它认为粘着效应和犁沟效应产生阻力的总和,奠定了现代固体摩擦的理论基础。但其不完善之处是认为摩擦系数不随法向载荷的变化而变化。前苏联学者 Крагельский 等^[11]给出了固体摩擦的二项式定律,认为滑动摩擦是克服表面粗糙峰的机械啮合和分子吸引力的过程,因而摩擦力就是机械作用和分子作用阻力的总和,该定律的不足是不适用于摩擦面积较小的干摩擦问题。

根据压缩性或液体容积弹性模数的定义,由文[12]可知容积增量、压力增量以及外界施加的作用力的关系为:

$$\therefore \Delta p = \Delta V \cdot C / V_0 = \Delta V \cdot \beta_e / V_0 = A_p \cdot \Delta x_p \cdot \beta_e / V_0 \quad (1)$$

$$\therefore \Delta p \cdot A_p = (A_p^2 \cdot \beta_e / V_0) \cdot \Delta x_p = K_e \cdot \Delta x_p = K \cdot \Delta x = F \quad (2)$$

式中, C 、 β_e 为液体的压缩系数、容积弹性模量, A_p 、 Δx_p 、 Δx 分别为活塞的面积、活塞位移、外弹簧位移, K 、 F 分别为外弹簧刚度和外力。

上式等效液压弹簧刚度为 $K_e = A_p^2 \cdot \beta_e / V_0$, 它与活塞面积平方成正比,与初始容积成反比。图1给出了机器人关节液压锁紧结构简图,其中, D_f 为关节摩擦力矩的作用直径。由于外界作用力必须与外界弹簧力平衡,液压系统内腔所能形成压力的大小必然与弹簧的性能有关。所以,如果不考虑医疗机器人关节的具体锁紧结构,并假设液压油在不同锁紧结构上的作用面积相等、液压油无泄漏、系统受到的各种阻尼不计,要使关节的锁紧能力尽量大,则必须使机器人内腔具有尽量高的压强。

关节摩擦面上产生的摩擦力矩为:

$$M_j = (A_p^2 \cdot \beta_e / V_0) \cdot \Delta x_p \cdot f \cdot D_f \quad (3)$$

由(2)式可以得出如下结论:液压机器人关节锁紧能力(力矩)主要与液压系统的六个参数有关,即活塞面积 A_p 、活塞位移量 Δx_p 、初始容积 V_0 、外弹簧刚度 K 、关节摩擦面摩擦系数 f 以及摩擦力矩作用直径 D_f 。也就是说,设计中要提高关节的摩擦力矩,主要是增大活塞的面积、液压油的容积弹性模量、活塞的行程、外弹簧刚度、摩擦系数和接触面的摩擦半径,并尽量减小机器人内腔液压油总的初始体积(指的是压缩前的体积)。

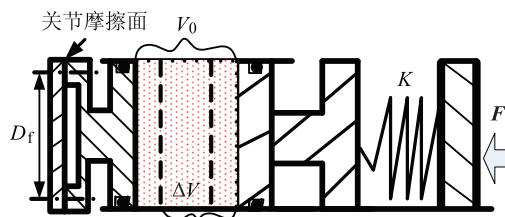


图1 关节液压锁紧结构示意图

Fig.1 Sketch of hydraulic locking structure of joint

3 关节锁紧结构原理 (Principle of locking structure of robot joint)

本文提出并设计了如下几种锁紧结构。

3.1 基于摩擦锥的结构

图2所示为本文提出的第一种机器人关节锁紧结构。它主要由前臂、后臂、关节轴、码盘、承压活塞和锁紧锥等部件组成。液压油充满关节内腔,当通过外弹簧给腔体增压时,承压活塞受到压力作用向右移动,挤压紧靠承压活塞右侧的锁

紧锥. 由于锁紧锥沿它的中轴线方向开有通槽, 因此, 受到挤压时, 能够沿半径方向收缩, 从而使锁紧锥的内圈与关节轴产生摩擦力矩, 外圈锥面与前臂内腔紧密结合, 也产生一个摩擦力矩. 关节轴与后臂固连, 且前臂和后臂端面存在间隙, 因此摩擦力矩只产生在锁紧锥内圈与关节轴之间以及外圈锥面与前臂内腔之间.

将机器人卸压以后, 承压活塞对锁紧锥不再产生压力或压力很小, 并且锁紧锥被设计成弹性非自锁结构, 所以此时关节松开, 这样便实现了机器人关节的液压锁紧. 这种结构靠锥面摩擦和柱面摩擦实现关节的锁紧, 但由于柱面半径较小, 所以实际上主要是锥面摩擦起作用.

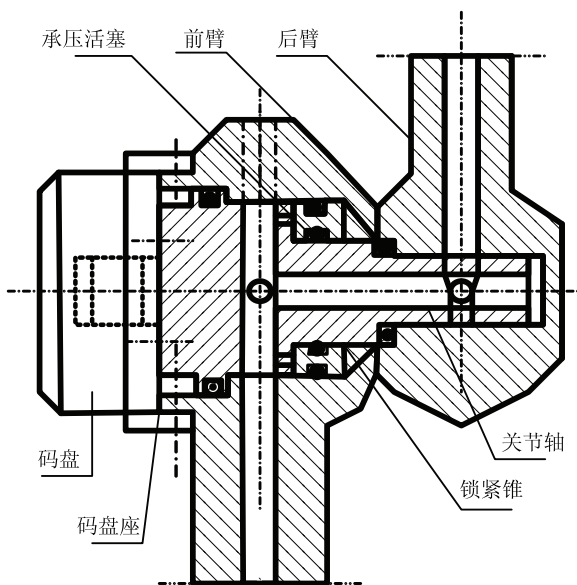


图2 摩擦锥式机器人关节

Fig.2 Robot joint with friction cone

3.2 基于内摩擦环的结构

图3所示为本文提出的第二种机器人关节锁紧结构. 该结构大部分与图2类似, 只是将图2中的摩擦锥改为摩擦环, 也就是说, 将锥面摩擦变为平面摩擦. 在关节轴上固定了两个摩擦环, 在前臂上两个摩擦环中间固定一个配对的摩擦轮, 压盖与前臂固联. 当机器人内腔压力逐渐增大时, 承压活塞推动紧靠它的摩擦环, 使摩擦环与摩擦轮之间产生正压力, 从而在两个摩擦面上产生双倍的摩擦力矩. 在摩擦环表面烧结粉末冶金, 而摩擦轮为一般不锈钢, 在油压不变的情况下, 便大幅度提高了关节的锁紧能力. 这种摩擦形成于前臂腔体内部, 所以本文称之为“内摩擦环”结构.

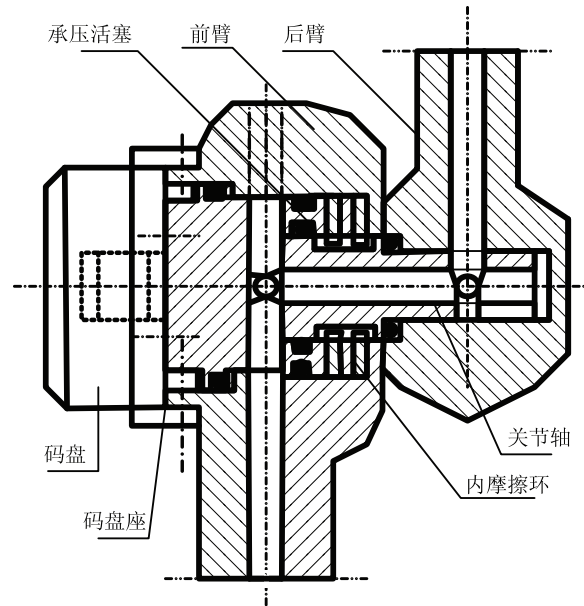


图3 内摩擦环式机器人关节

Fig.3 Robot joint with inner friction ring

与摩擦锥结构相比, 内摩擦环结构具有以下优点: 一是摩擦环结构更为简单, 因为摩擦锥上要开一系列通槽, 结构比较复杂; 二是工艺更简单, 摩擦环通过一般加工后, 到专业厂家进行外表面粉末冶金的烧结, 工艺上比较容易实现, 而摩擦锥体积小, 要保证径向能够自由收缩, 同时也要保证在摩擦锥的周向, 切割后留下来的金属体厚度只有0.2~0.3 mm, 而不与其它部分脱离, 线切割精度要求非常高, 加工工艺困难; 三是使用寿命更长, 为了使摩擦锥在受压后易于收缩, 切割后作为一个整体的摩擦锥每一部分之间只有较薄金属相连, 比较脆弱, 而摩擦环结构稳固, 是由金属基体摩擦环与粉末进行冶金烧结而成, 因此有较长的使用寿命.

内摩擦环结构的主要不足是它的摩擦半径较小, 所以加压后产生的摩擦力矩不大; 另外, 摩擦环与摩擦轮同关节轴和前臂内腔均为键连接, 即使能够保证加工精度, 使用时间长了以后, 锁紧时也会在关节周向存在一定间隙, 造成关节转动的位置检测存在误差. 因此本文尝试了其它结构的锁紧机构.

3.3 基于外摩擦环的结构

图4为本文提出的第三种机器人关节锁紧结构. 它实际上还是属于摩擦环结构, 但与图3的主要区别是将摩擦环置于前臂右边外侧, 因此本文称之为“外摩擦环”结构. 这里去掉了承压活塞, 实际上是将承压活塞与关节轴做成一体, 承压盖

与后臂固连, 关节轴也与后臂固连. 当给机器人内腔升压时, 液压油通过关节轴上的斜孔进入关节轴中间的右端面, 沿环形端面产生水平方向的挤压力, 推动关节轴拉紧后臂及承压盖, 使承压盖紧靠嵌入前臂的摩擦环, 在摩擦环上产生沿环面的水平正压力, 从而形成了摩擦力矩, 将关节轴牢牢抱死.

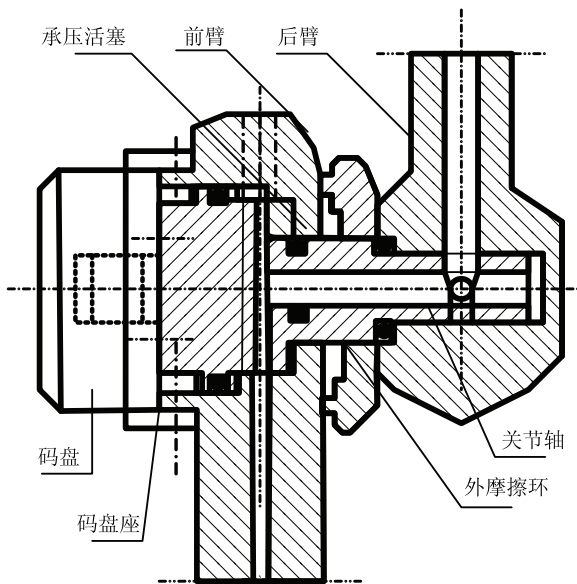


图4 外摩擦环式机器人关节

Fig.4 Robot joint with exterior friction ring

该结构的主要特点是: (1) 将承压活塞与关节轴融为一体, 它结构简单; (2) 关节上四道密封变为三道密封, 降低了因密封太多给制造工艺提出的更高要求; (3) 抛弃了键槽式的摩擦环固定方式, 消除了周向锁紧时的回程间隙, 提高了关节位置编码器的检测精度; (4) 与前两种结构比较, 在关节外形尺寸相同的前提下, 摩擦半径大幅度增加, 从而使摩擦力矩大大提高, 也就提高了关节的锁紧能力.



图5 机器人关节锁紧性能测试实验

Fig.5 Test for robot joint locking characteristics

4 实验及分析 (Experiment and analysis)

CT 导航手术要求机器人末端静态承载不小于 3 kg, 其末端可以与手术操作器械相连. 因手臂伸展长度已知, 所以机器人关节需要产生 13.5 Nm 的摩擦力矩. 实际手术定位时, 机器人手臂伸展的几率较小, 所以关节锁紧力矩的设计指标初定为 12 Nm.

下面分别对本文提出的三种锁紧结构进行锁紧性能测试. 将手动油压泵连接在关节上, 使关节内腔随时可以升降压, 用量程为 10 kg 的弹簧秤测量关节锁紧时在一定力臂上承受的拉力, 见图 5.

4.1 摩擦锥锁紧实验

表 1 前 5 行给出了摩擦锥式结构的锁紧能力测试的实验数据. 图 6 为锁紧性能对应的折线图. 其中 θ 为全锥角, 单槽表示摩擦锥轴向开槽的数量是 2 个, 双槽表示开槽的数量是 4 个. 机械臂主体材料为硬铝. 这里选择 12 MPa 低压作为最高测试压强, 是为了保证机器人在进行手术时的安全性.

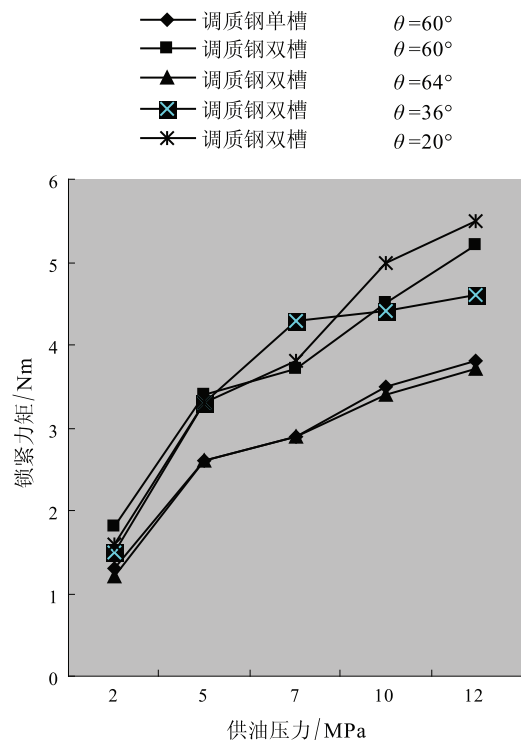


图6 摩擦锥的关节锁紧性能图

Fig.6 Characteristics chart of joint locking for friction cone

由上述图表得出如下结论: (1) 锁紧力矩随供油压力升高而增大; (2) 摩擦锥角越大, 锁紧能力越差, 但锥角太小, 容易自锁; (3) 摩擦锥上开槽数

量越多, 关节锁紧能力越强, 原因是摩擦锥易于形变和收缩; (4) 不同摩擦锥结构的锁紧能力均远未达到设计水平.

4.2 内摩擦环锁紧实验

内摩擦环结构的关节锁紧能力实验结果见表 1, 这里未选择非金属材料做内摩擦环的原因是: 内摩擦环要做成键与键槽结构以与关节轴配合, 而非金属材料经过长期使用后, 在周向与轴容易产生间隙, 影响关节编码器的位置检测精度. 根据

表 1 绘制了关节锁紧力矩随内部供油压力变化的曲线, 见图 7. 由图可以得到如下结论: (1) 在机械臂基体材料为硬铝不变的条件下, 不锈钢 1Cr17Ni2 产生的摩擦力大于黄铜 H62; (2) 不锈钢对硬铝基体材料的损伤较大, 经过反复 200 次转动关节, 拆开后发现黄铜摩擦环对机械臂基本没有损伤; (3) 在油压设计成 12 MPa 的前提下, 关节锁紧能力最大值还未达到实际要求; (4) 要提高关节使用寿命, 采用黄铜与硬铝配合作摩擦材料较好.

表 1 不同锁紧结构和材料对锁紧性能的影响

Tab.1 Influence on locking performance with different locking structure and material

摩擦副配对材料	锁紧结构		供油压力 (MPa)				
			2	5	7	10	12
调质钢	摩擦锥	$\theta = 60^\circ$, 单槽	1.3	2.6	2.9	3.5	3.8
		$\theta = 60^\circ$, 双槽	1.8	3.4	3.7	4.5	5.2
		$\theta = 64^\circ$, 双槽	1.2	2.6	2.9	3.4	3.7
		$\theta = 36^\circ$, 双槽	1.5	3.3	4.3	4.4	4.6
		$\theta = 20^\circ$, 双槽	1.6	3.3	3.8	5.0	5.5
H62	内摩擦环		1.6	2.9	4.0	4.6	5.1
	外摩擦环		7.6	8.6	9.5	10.5	11.7
1Cr17Ni2	内摩擦环		2.5	3.6	4.7	5.7	6.4
	外摩擦环		8.5	10.2	11.4	12.7	14.1

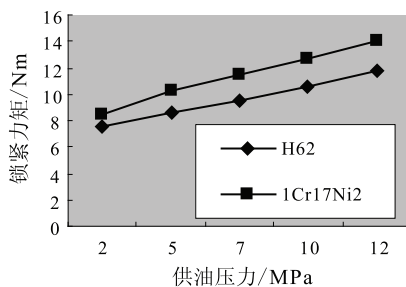


图 7 外摩擦环的锁紧性能图

Fig.7 Characteristics chart of locking for exterior friction ring

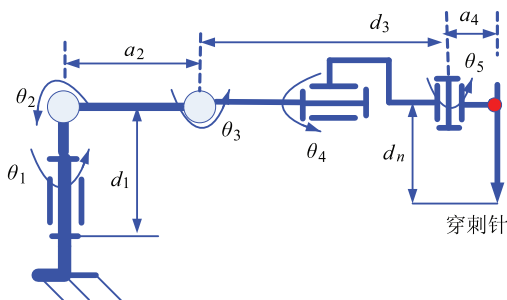


图 8 CT 导航机器人拓扑结构

Fig.8 Topological structure of CT-guided robot



图 9 CT 导航机器人样机模型

Fig.9 Prototype model of CT-guided robot

4.3 外摩擦环锁紧实验

由于上述两种锁紧结构都无法满足设计要求, 因此需要探索新的结构. 据此, 提出了一种新型的摩擦锁紧方案, 如图 4 所示. 测得该结构的关节锁紧性能见表 1 和图 7. 这里可以得到下述结论: (1)

与铝基材料配对,其它条件不变情况下,黄铜所产生的摩擦力矩比不锈钢高;(2)不锈钢不宜用作本文所指铝基材料的配对摩擦副材料,因为它对铝基材料有比较大的磨损;(3)该结构在一定油压下产生的摩擦力矩接近或已经满足设计指标,可以用于微创外科机器人关节的锁定。

选择关节式五自由度串联结构作为CT导航微创外科机器人的拓扑结构,要实现空间的位置和姿态定位,其拓扑结构见图8。该锁紧结构对应的CT导航微创外科机器人样机如图9所示。

5 结论 (Conclusion)

(1) 根据CT导航微创外科手术对机器人的基本要求,针对目前医疗机器人锁紧机构存在的不足,提出了三种不同结构的锁紧机构。

(2) 给出了各自的原理分析和优缺点对比,确定并实现了CT导航微创外科机器人关节的一种新型锁紧装置,即基于外摩擦环的锁紧机构。

(3) 实验讨论了三种结构的锁紧性能,验证了基于外摩擦环的锁紧机构的锁紧能力优于其它两种结构。

(4) 与传统机器人相比,因为有了关节间隙、啮合和传动误差,在末端手术操作器重量不超过其承载能力的情况下,其定位精度显著提高。

(5) 工作空间大,结构小巧,基于外摩擦环的锁紧机构伸展长度为520 mm,工作空间为 $1040 \times 1040 \times 980 \text{ mm}^3$ 。另外,液压机械臂总重7.5 kg,操作维护和携带方便。

(6) 锁紧能力大。最大锁紧力矩为23 Nm,末端静态有效承载(伸展时)达到3~4 kg可调。根据前面提到的承载指标可知,承载能力满足手术需要。

(7) 通过脚踩板升压降压实现关节的锁定和松开,手术过程只需一个医生即可完成手术路径的定位,从而提高了手术的方便程度。

参考文献 (References)

- [1] 王田苗,宗光华,张启先. 新应用领域的机器人——医疗外科机器人[J]. 机器人技术与应用, 1996, (2): 7~9.
Wang Tian-miao, Zong Guang-hua, Zhang Qi-xian. A robot for new application - surgical robot[J]. Robot Technique and Application, 1996, (2): 7~9.
- [2] 杜志江,孙立宁,富历新. 外科手术机器人技术发展现状及关键技术分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2003, 35(7): 773~777.

- Du Zhi-jiang, Sun Li-ning, Fu Li-xin. Present status and key techniques of surgical robotics[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2003, 35(7): 773~777.
- [3] 陈寅,林良明,高立明,等. 微型电子机械系统应用于微创外科手术的研究[J]. 中国医疗器械杂志, 2000, 24(5): 283~286.
Chen Yin, Lin Liang-ming, Gao Li-ming, et al. Applications of micro-mechatronics in minimally invasive surgery[J]. Chinese Journal of Medical Instrumentation, 2000, 24(5): 283~286.
- [4] Patriciu A, Solomon S, Kavoussi L R, et al. Robotic kidney and spine percutaneous procedures using a new laser-based CT registration method[A]. Proceedings of the 4th International Conference on Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention[C]. London, UK: Springer, 2001. 249~257.
- [5] 王洪武. 现代肿瘤靶向治疗技术[M]. 北京: 中国医药科技出版社, 2005: 77~123.
Wang Hong-wu. Modern Targeted Therapy Technique for Tumors[M]. Beijing: China Medicinal Science and Technology Press, 2005: 77~123.
- [6] 柴明晓. 一种液压锁紧平面多路阀 [P]. 中国: 97234994.4, 1999-03-04.
Cai Ming-xiao. A Multi-route Plane Valve Based on Hydraulically Locked-up Structure[P]. China: 97234994.4, 1999-03-04.
- [7] 潘保安. 锁紧力可调的液压锁紧缸 [P]. 中国: 01262152.8, 2002-07-10.
Pan Bao-an. A Hydraulically Locked-up Jar with Adjustable Locking Force[P]. China: 01262152.8, 2002-07-10.
- [8] 潘高峰. 双动液压机内外滑块液压锁紧机构 [P]. 中国: 200520122977.7, 2006-12-13.
Pan Gao-feng. A hydraulically Locked-up Mechanism of the Inner and Exterior Slide Block of Bidirectional Hydraulic Machine[P]. China: 200520122977.7, 2006-12-13.
- [9] 温诗铸,黄平. 摩擦学原理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.
Wen Shi-zhu, Huang Ping. The Principle of Tribology[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002.
- [10] Bowden F P, Tabor D. The Friction and Lubrication of Solids: Part 2[M]. Oxford, UK: Oxford University Press, 1964.
- [11] 汪一麟. 摩擦磨损计算原理[M]. 北京: 机械工业出版社, 1982.
Wang Yi-lin. The Principle of Friction and Abrasion[M]. Beijing: China Machine Press, 1982.
- [12] 卢长耿,李金良. 液压控制系统的分析与设计[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1991.
LU Chang-geng, LI Jin-liang. Analysis and Design of Hydraulic Control System[M]. Beijing: Coal Industry Press, 1991.

作者简介:

刘 达(1972-),男,博士,讲师. 研究领域: 医疗机器人技术.

唐 桑(1973-),男,博士生. 研究领域: 医疗机器人机构和智能控制技术.