腹腔微创手术机器人主从控制技术与实验

潘 博^{1,2}, 付宜利¹, 冯 美¹, 王树国¹, 徐殿国²

(1. 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;

2. 哈尔滨工业大学电气工程及自动化学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘 要: 针对机器人微创手术的任务特点, 在分析主从控制功能需求的基础上, 采用工控机结合运动控制卡的控制体系构建机器人主从控制系统硬件平台. 研究基于微分变换的主从操作实时控制算法, 设计主从控制的辅助功能. 在机器人系统集成基础上开展主从控制实验、生物组织实验及动物试验研究. 实验表明所研制的机器人具有较好的主从控制性能, 能够满足微创外科手术的实际需求.

关键词: 微创手术; 机器人构型; 主从操作; 动物试验

中图分类号: TP241

文献标识码: A

文章编号: 1002-0446(2012)-06-0646-06

Mater-slave Control Technology for Abdominal Minimally Invasive Surgery Robot and Its Experiments

PAN Bo^{1,2}, FU Yili¹, FENG Mei¹, WANG Shuguo¹, XU Dianguo²

(1. State Key Laboratory of Robotics and System, Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, China;

2. School of Electrical Engineering and Automation, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: According to task features of RMIS (robot-assisted minimally invasive surgery), based on the functional requirement analyses of master-slave control, a hardware platform of robot master-slave control system is constructed by adopting control architecture of industrial computer and motion control card. A real-time control algorithm of master-slave operation is investigated based on differential transformation method, and then the auxiliary function of master-slave control is designed. Master-slave control experiment, experiment on biological tissue and animal experiment are carried out after robot system integration. Experiments demonstrate that the system has good master-slave control performance, which satisfies the actual demand of minimally invasive surgery.

Keywords: minimally invasive surgery; robot configuration; master-slave operation; animal experiment

1 引言 (Introduction)

腹腔微创手术是在腹腔切开 4 ~ 6 个 0.5 cm ~ 1 cm 大的切口, 把手术器械插入腹腔, 在视觉显示系统的引导下, 切除病变的脏器、肿物并完成相应的手术治疗任务. 微创手术具有不开腹、创伤小、痛苦小、恢复快等优点, 因此在世界范围内得到广泛应用^[1]. 但其存在医生操作手眼协调性较差, 手术器械末端灵活度低, 手部震颤被放大, 长时间操作时医生易于疲劳等缺点. 为解决微创手术中所存在的问题, 把机器人技术引入到微创手术当中. 机器人技术与微创外科手术技术相结合, 改进了医生进行微创手术的环境和工具, 克服了微创手术的缺点, 提高了微创外科手术质量.

目前, 美国及欧洲相关研究机构的机器人辅助微创手术技术在国际上处于领先地位, 在相关研究计划的支持下研制了多种原理样机, 并有部分微创手术机器人系统实现了商品化. 其中以美国的 Computer Motion 公司研发的 AESOP 腹腔镜操作机器人^[2]、Zeus 微创手术机器人系统^[3]及 Intuitive Surgical 公司研发的 da Vinci 微创手术机器人系统^[4]最具代表性, 而 da Vinci 系统在世界范围内的广泛应用可看作是机器人技术与外科医学技术成功结合的典范. 国内近些年针对外科手术机器人开展了大量研究工作, 并取得了一系列成果, 缩短了与国际微创手术机器人的技术差距. 北京航空航天大学机器人研究所王田苗教授与解放军海军总医院田增民教

授经过多年努力, 研制出基于立体定向技术的脑外科手术机器人系统, 已进行临床手术应用^[5]. 天津大学研制了“妙手A”微创手术机器人系统, 并进行了动物试验^[6]. 北京大学口腔医学院联合北京理工大学及清华大学开展了颅颌面外科精确治疗机器人系统的研究, 突破了医学图像处理、术中导航及机器人机构综合等技术难点^[7]. 目前, 国内在医疗机器人基础理论和技术研究方面取得了长足的发展. 本文以哈尔滨工业大学研制的腹腔微创手术机器人系统作为研究对象, 重点开展微创手术机器人主从控制的研究, 推进我国微创医疗机器人共性关键技术创新.

2 机器人构型 (Configuration of the robot)

腹腔微创手术机器人采用主从式体系结构, 医生操作主手实现对从手机机器人的控制. 主手采用瑞士商品化产品 Omega 7.0 设备, 具有 7 个自由度, 2 个主手实现对 3 个机械臂的控制. 从手机机器人作为系统的执行部分负责夹持手术器械和腹腔镜完成微创手术操作. 从手机机器人由 3 只机械臂组成, 中间机械臂用于夹持腹腔镜, 其余两只机械臂用来夹持手术器械. 3 只机械臂主体结构相似, 具有 7 个自由度. 关节 1 为直线关节, 关节 2~4 是具有相同结构的被动式旋转关节, 便于医生术前进行机械臂的水平位置调整. 关节 5~7 实现器械或腹腔镜围绕腹腔切口做定点运动, 手术器械安装到关节 7 上. 器械机械臂与主手构型如图 1 所示, 其中 dx 、 dy 、 dz 分别表示主手 x 、 y 、 z 方向上位置变化量, $d\alpha$ 、 $d\beta$ 、 $d\eta$ 、 $d\gamma$ 分别表示主手 4 个转动关节变化量.

图1 机器人结构图片

Fig.1 Picture of the robot's configuration

3 主从控制技术 (Master-slave control technology)

腹腔微创手术机器人的控制系统采用主从控制工作模式. 操作者操纵主手将运动信息通过控制系统传递给从手机机器人, 使从手机机器人能够重现主手运动, 保持与主手运动信息的一致性, 进而完成对病灶区域的手术操作, 视觉反馈将病灶区域的信息通过视觉显示系统反馈给医生, 使医生能够有效地进行下一步操作. 腹腔微创手术机器人主从控制的实现需满足主从操作的基本功能, 其研究涉及到机器人控制系统硬件、软件及相关算法等方面.

3.1 主从控制系统硬件结构

为满足腹腔微创手术机器人控制系统对数据处理、高速运算、精确驱动等性能的需求, 机器人控制系统采用工控机、运动控制卡的上下位机控制体系构建机器人控制系统的硬件平台. 操作者通过控制系统输入接口 (如主手、操作面板和脚踏板等), 将控制命令发送给工控机, 工控机依据控制指令进行机器人运动学求解、轨迹规划等上层运算, 下位机接收工控机规划结果实现对电机的精确控制, 数据采集卡采集机器人运动信息为上位机提供监视控制. 机器人主从控制系统硬件结构框图如图 2 所示.

3.2 主从映射方案分析

根据主手和从手机械臂的关节配置特点, 操作者通过主手 7 自由度运动来控制从手机械臂关节 5~7 及手术器械 4 个关节的运动. 主手位置坐标用于实现器械末端位置的定位, 对应从手关节 5~7, 此时主从手关节不是一一对应, 需要进行运动学求解建立联系, 即笛卡儿空间控制. 而主手空间姿态与手术器械 4 个自由度一一对应, 只需进行关节空间控制. 此外, 在手术过程中医生需进行沿器械轴线方向牵拉组织操作, 而在实际操作中医生很难通过操作主手以笛卡儿控制方式准确地实现此运动, 因此增加关节空间控制方式来实现器械轴线方向的位置控制. 机器人主从映射方案如图 3 所示.

3.3 基于位姿分解的主从控制

在主从控制中, 在将主手 x 、 y 、 z 方向上的位移增量映射给末端器械过程中, 需要求解机器人逆运动学来获得机器人关节运动信息, 最终实现器械末端对主手运动的跟随. 从手机械臂具有 7 个自由度, 需要进行冗余运动学求解, 增大了运动学运算量, 降低了主从控制算法的稳定性. 因此, 根据机械臂的工作模式及结构特点, 基于位姿分解的思想, 采

图 2 主从控制系统硬件结构框图

Fig.2 Hardware architecture of the master-slave control system

图 3 机器人主从映射分析

Fig.3 Analysis on master-slave mapping for the robot

用等效微分方法来求解机械臂逆运动学。这种方法不但可以唯一求得运动学逆解，还极大地降低了求解的运算量，提高了算法的效率，利于主从控制系统的实时控制^[8]。

机械臂关节 1 ~ 4 用于术前调整机械臂远心点与患者体表切口相重合，完成后锁死关节 1 ~ 4，术中关节 5 ~ 7 运动实现器械的位姿调整。因此，可将器械末端在基坐标系 $\{o\}$ 中的位置 (p_x, p_y, p_z) 转化为其在关节 4 坐标系 $\{o_4\}$ 中的位置 (p'_x, p'_y, p'_z) ，然后在坐标系 $\{o_4\}$ 中进行逆运动学求解得到关节 5 ~ 7 关节运动量 $(\theta_5, \theta_6, d_7)$ ，降低了计算量，利于系统

的快速响应。器械末端在坐标系 $\{o_4\}$ 中的位置表示为

$$\begin{bmatrix} p'_x & p'_y & p'_z & 1 \end{bmatrix}^T = ({}^0T_4)^{-1} \begin{bmatrix} p_x & p_y & p_z & 1 \end{bmatrix}^T \quad (1)$$

某时刻器械末端位置 w 和机器人各关节位置 q_j 的运动学关系可表示为

$$w = x(q_j) \quad j = 1, 2, 3 \quad (2)$$

经过下一个时刻的采样，获得下一时刻器械末端的位置，并对该时刻的位置表达式进行泰勒展开，可得：

$$\begin{aligned} x(q_j + \Delta q_j) = & x(q_j) + \frac{\partial x(q_j)}{\partial (q_j)} \Delta q_j + \dots + \\ & \frac{1}{n!} \frac{\partial^n x(q_j)}{\partial^n (q_j)} (\Delta q_j)^n \end{aligned} \quad (3)$$

使用简化误差 e 代替公式的高阶项，可得：

$$x(q_j + \Delta q_j) = x(q_j) + \frac{\partial x(q_j)}{\partial (q_j)} \Delta q_j + e \quad (4)$$

从公式中可得器械末端的位置增量 Δw 和各关节运动增量 Δq_j 的关系为

$$\Delta w = x(q_j + \Delta q_j) - x(q_j) = J(q_j) \Delta q_j + e \quad (5)$$

公式中 $J(q)$ 为机械臂的雅可比矩阵, 忽略简化误差 e 可得:

$$J(q) = \frac{\Delta w}{\Delta q_j} = \frac{\partial x(q_j)}{\partial q_j} \quad (6)$$

则在每段采样时间内, 关节 5、6 和 7 的位移是

$$[\Delta \theta_5 \ \Delta \theta_6 \ \Delta d_7]^T = J^{-1}(q_j) [\Delta p'_x \ \Delta p'_y \ \Delta p'_z]^T \quad (7)$$

由于在求解过程中忽略了简化误差 e , 因此逆运动学的求解存在一定的误差, 为了消除这种误差, 在求解过程中加入了误差反馈补偿环节, 如图 4 所示. 图中 $\dot{X}_m$ 为采集主手的运动信息, k 为主从运动映射比例, q_s 为机器人关节运动量, s 为微分因子, X_m 和 X_s 分别为器械末端理论运动量和实际运动量. X_s 是通过逆运动学求解获得的器械末端运动量, 误差反馈补偿环节将 X_m 和 X_s 进行比较, 并将误差 e_j 加入下一个采样周期的主从运动映射中, 这样就消除了由于逆运动学求解产生的主从跟随误差.

图 4 逆运动学误差反馈补偿

Fig.4 The error feedback compensation for inverse kinematics

3.4 主从控制功能实现

数据采集、监测功能: 机械臂关节 2~6 安装外置编码器用于实时获取关节的运动角度. 当机械臂进行术前位置设置时, 机械臂在捕捉到各关节零点位置时开始进行关节位置读取, 其数据在监控界面上显示. 术前位置调整结束后, 关节 2~4 被锁死, 关节 5、6 运动并实时反馈关节实际位置, 实现关节运动状态监测与运动补偿功能.

比例缩放功能: 在腹腔微创手术中, 需要医生完成毫米级操作, 要求主从控制系统具有较小主从映射系数, 使得医生在操作主手时器械能够实现微小动作. 主从尺度映射系数 k 值越大, 主手运动幅度和从手跟随运动幅度比值越大, 主手、从手所对应的工作空间越小, 器械末端操作精度越高. 在主从控制中医生可以通过脚踏板选择从手按 1:1、3:1、5:1 三种不同映射系数进行手术操作, 并可通过软件滑动条手动设置映射系数.

主手调整功能: 由于从手工作空间要比主手工作空间大很多, 因此, 在主从控制中会出现主手到

达工作空间极限无法使从手到达期望位置的情况, 当比例缩放系统 k 大于 1 时更为突出. 由于主从控制采用增量控制方式, 当主手达到工作空间极限的时候, 可通过脚踏开关将主从控制断开, 调整好主手位置后再继续操作. 这样就可以操作从手达到工作空间的任意位置, 还能使医生在较为舒适的姿态下操作主手, 降低了手术操作中的劳动强度.

主手切换功能: 医生需操作两个主手来控制三个机械臂, 因此, 主手切换用于实现主手对于器械机械臂和持镜机械臂的交替控制. 控制系统启动时默认主手对器械机械臂的控制, 当踩下相应脚踏板开关后会将右主手切换成对持镜机械臂的控制, 左主手处于非使能状态. 在调整持镜机械臂以输出较好的手术病灶区域的图像后再次踩下脚踏开关, 恢复主手对器械机械臂的控制.

抖动去除功能: 在主从控制中, 人手的动作会最终反映到从手的运动上, 而在手术操作中医生手部不可避免地会有自然抖动, 其在长时间的手术过程中更为突出. 因此, 首先对主手采样数据进行一次滑动均值滤波, 减小人手抖动对从手的影响, 再对通过主从计算得到的从手关节角度数据进行二次滤波, 实现抖动去除功能.

操作模式转换功能: 医生控制器械机械臂对病灶组织进行手术操作, 大多数操作需要符合医生的操作习惯, 因此采用笛卡儿空间控制模式, 使医生在 3 维空间上能够直观地进行手术操作. 而在手术中有时要求医生在关节运动方向上进行操作, 如夹持切削下的病灶组织沿器械轴线方向移出体外操作, 此情况采用关节空间控制模式更为适宜. 因此, 设计了操作模式转换功能实现器械机械臂及持镜机械臂在两种操作模式上的实时转换.

4 实验 (Experiment)

4.1 主从控制实验

为验证主从控制技术的有效性, 操作主手控制从手机器人夹持手术器械运动, 器械末端依次到达棋盘的 4 个目标位置, 4 个目标位置构成 80 mm × 80 mm 矩形. 操作器械末端依次经过 4 个位置点并回到初始位置. 采用 Optotrak Centus 系统测量器械末端的位置信息. 图 5 为实验过程照片.

采集得到的器械末端位置信息如图 6 所示, 可知器械末端的实际运动轨迹与实验设计的运动轨迹大致相符. 由于采集的运动信息是粘贴在手术器械表面 Marker 点处的位置信息, 因此采集的运动轨迹包络出的矩形面积稍小于实验设定的矩形面积. 而

操作者通过视频显示系统进行位置跟随, 很难在空间上准确地操作主手实现相应轨迹, 且器械在运动过程中姿态也发生变化, 导致 Marker 点朝向改变, 测量值产生一定的误差. 以上因素导致了最终的数据曲线会有一定的误差.

图 5 主从控制实验图片

Fig.5 The master-slave control experiment

图 6 器械末端运动轨迹

Fig.6 Movement trajectory of the end of the instrument

在主从操作实验中, 由于主手工作空间小于从手机械臂工作空间, 当主手到达自身工作空间边缘、并需要继续沿原方向控制机器人运动时, 需要进行主手调整, 将主手调整到一个新的位姿, 扩展主手的工作空间, 继续进行主从控制. 采集获得的主手在其 x 、 y 方向上的运动轨迹如图 7 所示, 图中主手位置发生突变的时刻进行了主手调整, 主手调整结束后, 主手以调整后的位姿为起点继续进行主从控制. 采集获得的关节 5 和关节 6 运动数据经运动学计算后, 对应的器械末端轨迹如图 8 所示, 可知器械末端能够较好地跟踪主手运动.

4.2 生物组织实验

应用腹腔微创手术机器人对生物组织进行切割、夹持等操作, 以验证机器人的工作性能, 并为动物试验奠定基础. 实验采用假人模型来模拟机器人微创手术中的切口限制, 并依据人体胆囊位置将生物组织放入假人模型内, 由医生操作机器人完成模拟胆囊切除的手术操作, 照片如图 9 所示.

(a) 主手x方向轨迹

(b) 主手y方向轨迹

图 7 主手运动轨迹

Fig.7 Movement trajectory of the master manipulator

(a) 从手x方向轨迹

(b) 从手y方向轨迹

图 8 从手运动轨迹

Fig.8 Movement trajectory of slave manipulator

实验中采集右器械臂在某段时间内 x 、 y 、 z 方向上的主从运动数据, 来测试主从跟随精度. 主从映射比例设置为 1:1, 运动 40s 后修改为 2:1, 采集的关节运动数据经运动学计算后获得器械末端在 x 、 y 、 z 方向上的运动轨迹, 实验结果如图 10 所示, 可知从手机器人能够较为准确地重现主手运动.

图 9 生物组织操作实验图片

Fig.9 Pictures of the experiment of operation on biological tissue

(a) x 方向主从运动轨迹 (b) y 方向主从运动轨迹 (c) z 方向主从运动轨迹图 10 x, y, z 方向上的主从手运动轨迹Fig.10 Movement trajectories of the master-slave manipulator in x, y, z directions

4.3 动物试验

为进一步研究机器人主从控制技术在具有生命体征对象上应用的稳定性及可操作性,与哈尔滨医科大学附属第四医院合作,应用腹腔微创手术机器人开展猪胆囊切除手术试验。

试验中选取的猪的质量约为 40 kg,手术所需要

的仪器设备有高频电刀、气腹机、麻醉机、腹腔镜系统、电子吸附器、医用手术器械等。动物试验图片如图 11 所示。手术时间约为 3 h,出血量为 15 ml ~ 25 ml。小猪术后约 60 min 苏醒,术后 7 h 开始进食。猪胆囊切除术的成功及医生对机器人手术操作的适应性表明机器人具有较好的主从操作性能。机器人动物试验为进一步的临床应用研究奠定了技术基础。

图 11 动物试验图片

Fig.11 Pictures of animal experiment

5 结论 (Conclusion)

本文在研究腹腔微创手术机器人主从控制系统的硬件平台及主从控制算法基础上,结合主从控制的相关辅助功能,最终实现了腹腔微创手术机器人主从控制。通过机器人的主从控制实验、生物组织实验及动物试验研究,验证了机器人主从控制技术的有效性。

参考文献 (References)

- [1] 林良明. 机器人辅助微创外科手术的发展 [J]. 中国医疗器械信息, 2003, 9(2): 16-18.
Lin L M. The development of robot-assisted minimally invasive surgery[J]. China Medical Device Information, 2003, 9(2): 16-18.
- [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] Ginhoux R, Gangloff J, de Mathelin M, et al. Active filtering of physiological motion in robotized surgery using predictive control[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2005, 21(1): 67-79.
- [4] Broeders I A M J, Ruurda J. Robotics revolutionizing surgery: The intuitive surgical "Da Vinci" system[J]. Industrial Robot, 2001, 28(5): 387-391.
- [5] 唐黎, 王田苗, 丑武胜, 等. 脑外科机器人控制系统的设计和实现 [J]. 机器人, 2004, 26(6): 543-547, 552.
Tang C, Wang T M, Chou W S, et al. Design and realization of robot control system for neurosurgery[J]. Robot, 2004, 26(6): 543-547, 552.

(下转第 679 页)

6 结论 (Conclusions)

为了解决移动机器人在未知环境下对存在伪观测值的机动目标的跟踪问题, 本文提出一种基于概率数据关联交互多模滤波的解决算法, 其中交互多模滤波部分解决了目标运动模式不确定问题, 概率数据关联部分解决了目标伪观测值问题. 算法采用扩展式卡尔曼滤波框架使得系统各对象状态之间产生足够的关联性, 进而保证了机器人定位和目标定位的准确性. 文章从仿真实验和实体机器人实验两方面验证了该算法的准确性和实用性.

参考文献 (References)

- [1] Vu T D, Aycard O, Appenrodt N. Online localization and mapping with moving object tracking in dynamic outdoor environments[C]//IEEE Intelligent Vehicles Symposium. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2007: 190-195.
- [2] Vidal R, Rashid S, Sharp C, et al. Pursuit-evasion games with unmanned ground and aerial vehicles[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2001: 2948-2955.
- [3] Huang F F, Wang L, Wang Q N, et al. Coordinated control of multiple mobile robots in pursuit-evasion games[C]//Proceedings of the American Control Conference. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2008: 2861-2866.
- [4] Wang C C, Thorpe C, Thrun S, et al. Simultaneous localization, mapping and moving object tracking[J]. International Journal of Robotics Research, 2007, 26(9): 889-916.
- [5] Wang C C, Thorpe C, Thrun S. Online simultaneous localization and mapping with detection and tracking of moving objects: Theory and results from a ground vehicle in crowded urban areas[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2003: 842-849.
- [6] Borrmann D, Elseberg J, Lingemann K, et al. Globally consistent 3D mapping with scan matching[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2008, 56(2): 130-142.
- [7] 伍明, 孙继银. 基于扩展式卡尔曼滤波的移动机器人未知环境下动态目标跟踪[J]. 机器人, 2010, 32(3): 334-343.
Wu M, Sun J Y. Extended Kalman filter based moving object tracking by mobile robot in unknown environment[J]. Robot, 2010, 32(3): 334-343.
- [8] 伍明, 孙继银. 一种机器人未知环境下动态目标跟踪交互多模滤波算法[J]. 智能系统学报, 2010, 5(2): 127-138.
Wu M, Sun J Y. An interacting multiple model filtering algorithm for mobile robots to improve tracking of moving objects in unknown environments[J]. CAAL Transactions on Intelligent Systems, 2010, 5(2): 127-138.
- [9] Wu M, Sun J Y. Simultaneous localization, mapping and detection of moving objects with mobile robot in dynamic environments[C]//Proceedings of the 2nd International Conference on Computer Engineering and Technology. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2010: 696-701.
- [10] Cameron S, Probert P. Advanced guided vehicles: Aspects of the Oxford AGV project[M]. Hackensack, NJ, USA: World Scientific, 1994.
- [11] Bar-Shalom Y. Tracking and data association[M]. Boston, USA: TE Fortmann Academic Press, 1988.
- [12] Arras K O. Feature-based robot navigation in known and unknown environments[D]. Lausanne, Switzerland: Swiss Federal Institute of Technology, 2003.
- [13] Musicki D, Evans R. Joint integrated probabilistic data association: JIPDA[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2004, 40(3): 1093-1099.
- [14] Musicki D, Morelande M. Gate volume estimation for target tracking[C]//Proceedings of the International Conference on Information Fusion. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2004: 455-462.
- [15] Musicki D, Evans R, Stankovic S. Integrated probabilistic data association (IPDA)[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1994, 39(6): 1237-1241.
- [16] Wolf D F, Sukhatme G S. Mobile robot simultaneous localization and mapping in dynamic environments[J]. Autonomous Robots, 2005, 19(1): 53-65.
- [17] Wu M, Huang F F, Wang L, et al. A distributed multi-robot cooperative hunting algorithm based on limit-cycle[C]//Proceedings of 2009 International Asia Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2009: 156-160.

作者简介:

- 伍明 (1981-), 男, 博士, 讲师. 研究领域: 自主机器人控制, 多机器人协作, 机器人环境构建.
- 李琳琳 (1974-), 女, 博士, 副教授. 研究领域: 信息融合, 信息栅格技术, 物联网技术.
- 孙继银 (1952-), 男, 教授. 研究领域: 多媒体系统, 图像处理, 人工智能.

(上接第651页)

- [6] Sang H Q, Li J M, He C, et al. Evaluation of a novel robotics assisted surgery system – MicroHand A[C]//Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2010: 1388-1392.
- [7] 段星光, 郭传琛, 陈超. 颅颌面外科辅助手术机器人系统[J]. 机器人技术与应用, 2011, 18(4): 38-42.
Duan X G, Guo C B, Chen C. The robotic system for cranio facial surgery[J]. Robot Technique and Application, 2011, 18(4): 38-42.
- [8] 谢琪, 潘博, 付宜利, 等. 基于腹腔镜微创手术机器人的主从控制技术研究[J]. 机器人, 2011, 33(1): 53-58.
Xie Q, Pan B, Fu Y L, et al. Master-slave control technology research based on abdominal minimally invasive surgery robot[J]. Robot, 2011, 33(1): 53-58.

作者简介:

- 潘博 (1981-), 男, 博士, 讲师. 研究领域: 机器人结构、控制, 医疗机器人技术.