

DOI: 10.7652/xjtuxb201312020

手术机器人运动再现及最优布置系统

闫志远, 杜志江, 吴冬梅

(哈尔滨工业大学机器人技术与系统国家重点实验室, 150080, 哈尔滨)

摘要: 针对外科手术机器人培训和术前布置困难的特点,提出了一种辅助医生实施机器人手术培训和优化机器人术前布置的方法。该方法使用位姿分离的运动映射策略建立了虚拟机器人主从运动控制模型,在三维虚拟现实环境中再现了手术机器人的基本动作;以多臂协作能力为目标函数构建了粒子群优化模型,在兼顾手术机器人性能和手术空间内部差异的前提下可以直观地引导医生完成复杂的术前设置工作,优先保证手术空间内部重要区域的多臂协作能力。实验结果表明,基于该方法构建的系统可以准确模拟手术机器人的动作以辅助机器人手术的预演及训练,可以有效获取术前最优布置从而有效地提高手术机器人的工作性能。

关键词: 机器人手术;机器人布置;虚拟现实;运动仿真;布置优化

中图分类号: O121.8;G558 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2013)12-0116-07

Motion Simulation and Optimal Position System of Surgical Robots

YAN Zhiyuan, DU Zhijiang, WU Dongmei

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

Abstract: A method that is used to position surgical robot and to train the surgeons is proposed to reduce difficulties of surgical robot training and preoperative setup. The position and posture of the surgical robot are respectively considered, and the master-slave motion of the surgical robot is simulated in a 3D virtual environment. The cooperation between the arms is used as the object function and the particle swarm optimization method is used to optimize the robot position. Doctors are intuitively guided to complete the complex preoperative arrangement by considering both the robot performance and the internal difference of operation space, and the priority is given to the cooperation of multi-arms in the important region of surgical space. Experimental results show that the system accurately simulates surgical operations and facilitates the rehearsal and training of robotic surgery, and that the system effectively achieves the best robot position and enhances the robot performance.

Keywords: robotic surgery; robot position; virtual reality; motion simulation; position optimization

机器人辅助外科手术作为第三代外科技术已经成为外科发展的趋势^[1-2],其最大优势是扩展了传统手术工具的自由度,但是与传统手术方式差异极大。为发挥手术机器人的优越性能,必须解决两个问题:

一是术前布置,即机器人摆位和切口布置问题;二是术中操作的适应,即手术培训问题^[3]。这两个问题关系到机器人外科的普及和推广^[4-5]。

由于虚拟现实技术可实现无限重复^[6-7],一方面

收稿日期: 2013-06-30。 作者简介: 闫志远(1983—),男,讲师;杜志江(通信作者),男,教授。 基金项目: 国家高技术研究发展计划资助项目(2009AA044001)。

网络出版时间: 2013-07-19 网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20130719.0910.004.html>

可以解决术前可视化引导问题,另一方面可以解决使用尸体和动物成本过高和伦理约束的问题,因此机器人手术仿真具有重要意义。随着 da Vinci 等手术机器人的广泛应用,对手术机器人的切口布置和术前摆位这两个问题的研究也逐渐开展^[4],例如,香港中文大学、东京慈惠医院等对手术机器人 da Vinci 和 ZUES 的摆位问题进行了可视化仿真^[8-9]。一些机构还针对其自身研制的手术机器人构建了虚拟系统,例如德国的 KISMET 系统和法国的 INRIA 系统^[6]。国内天津大学、哈尔滨工业大学等对机器人系统也开展了仿真研究^[10-12],但是上述研究一般关注可视化引导。个别系统也考虑了全局各向同性^[6]和全局条件数^[10]等灵巧度指标,但很少有充分考虑多臂协作能力的摆位仿真研究。

本文为实现手术机器人最优布置及运动再现,提出基于多臂协作能力的粒子群优化算法,实现了术前布置的可视化引导,提出位姿分离的运动映射策略,建立了虚拟机器人主从运动控制模型,实现了手术机器人的运动再现。

1 手术机器人虚拟系统

本文针对课题组研制的手术机器人系统开展研究。如图 1 所示,所构建的虚拟系统与手术机器人结构一致。

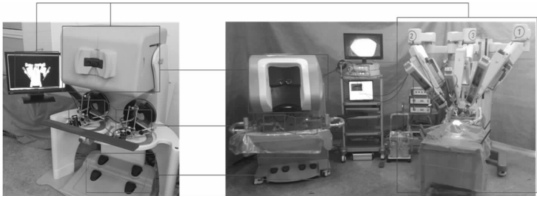


图 1 机器人手术系统与仿真系统对照关系

如图 2 所示,本系统包含三维和二维屏幕。操作手兼有输入人手位姿以及反馈力的功能,操作者通过可调托架来操作主操作手。脚踏开关用于主手复位、三维视觉以及内外视野等基本功能的切换。

2 手术机器人运动再现

2.1 虚拟机器人主从运动分析

达芬奇等手术机器人都是串联结构,靠近基座具有若干被动关节,远离基座具有若干主动关节,这种构型已逐渐成为代表构型。如图 3 所示,本课题基于课题组研制的外科手术机器人开展研究。

关节 1~6 联动组合出工具末端手术位姿,关节 7~9 组合出被动部分位姿,并影响末端位姿。为避

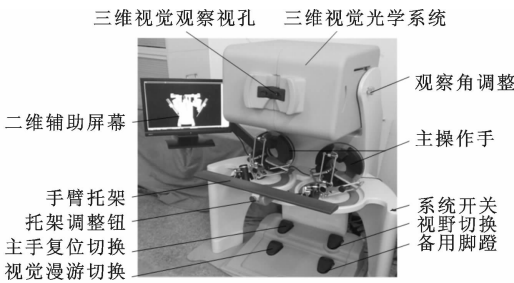


图 2 机器人手术虚拟仿真系统

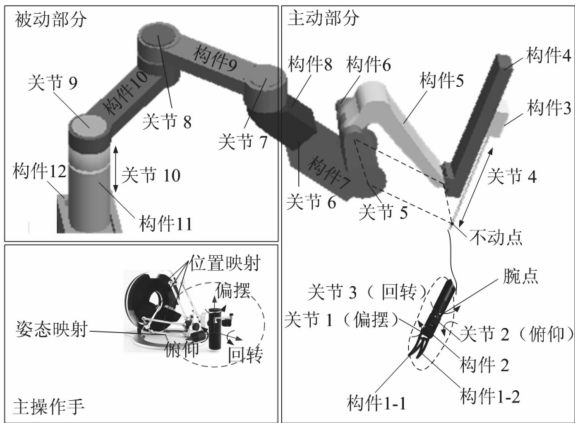


图 3 虚拟手术机器人主从运动映射关系

免皮肤伤害,机器人运动部分必须存在一个不动点,该点称为远心点。如图 3 所示,将末端执行机构的姿态自由度与主操作手姿态自由度形成一一映射,据此可计算构件 1-1、构件 1-2 和构件 2 的位姿。

虚拟环境运动模型转化为两个运动学求解问题:一是已知主手映射给腕点的位置,逆解机械臂构件 3-11 的位姿;二是已知主手映射给末端执行器的 3 个姿态角和开合角,正解构件 1-1、构件 1-2 和构件 2 的位姿。这两个问题通过腕点联系在一起。

2.2 虚拟手术机器人运动学建模

根据主手映射给腕点的位置求解机械臂构件的位姿。如图 4 所示,由于远心点在术中是一个不动

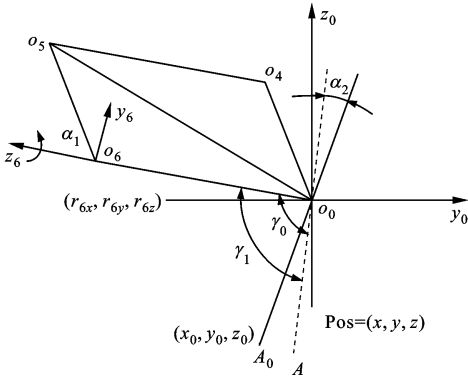


图 4 远心点虚拟坐标系

(1)构件 8 位置和姿态。构件 8 无相对运动,其位置为 (r_{8x}, r_{8y}, r_{8z}) 。

(2)构件 9 位置和姿态。构件 9 无相对位移,位置为 (r_{9x}, r_{9y}, r_{9z}) 。其姿态矩阵为

$$\mathbf{R}_9 = \begin{bmatrix} \cos(\theta_1 + \theta_2 - 180) & -\sin(\theta_1 + \theta_2 - 180) & 0 \\ \sin(\theta_1 + \theta_2 - 180) & \cos(\theta_1 + \theta_2 - 180) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (15)$$

(3)构件 10 位置和姿态。构件 10 的初始位置为 $(r_{10x}, r_{10y}, r_{10z})$,设其位置为 (x_{10}, y_{10}, z_{10}) ,则

$$\left. \begin{aligned} x_{10} &= d_{10} \sin \theta_1 - d_9 \sin(180 - \theta_1 - \theta_2) \\ y_{10} &= r_{9y} - d_9 \cos(180 - \theta_1 - \theta_2) - d_{10} \cos(\theta_1) \\ z_{10} &= r_{10z} \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

构件 10 绕 z 轴旋转,其姿态矩阵为

$$\mathbf{R}_{10} = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & -\sin \theta_1 & 0 \\ \sin \theta_1 & \cos \theta_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (17)$$

(4)构件 11 位置和姿态。构件 11 的位置与构件 10 相同,相对基坐标没有旋转变换,姿态固定。

(5)构件 12 位置和姿态。构件 12(即支座)相对基坐标无旋转,姿态固定,其位置 (x_{12}, y_{12}, z_{12}) 为

$$\left. \begin{aligned} x_{12} &= 0 \\ y_{12} &= r_{12y} \\ z_{12} &= r_{12z} - h \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

设主手输出回转角为 α ,俯仰角为 θ ,偏摆角为 β ,开合角为 2δ ,求解构件 1-1、构件 1-2 和构件 2 的位置和姿态。当 $\alpha, \theta, \beta, \delta$ 为 0 时,构件 1-1、构件 1-2 和构件 2 的初始姿态矩阵均为 $\mathbf{R}_3$,而构件 2 的位置与构件 3 重合在腕点位置,因此可求得构件 1-1、构件 1-2 和构件 2 的位姿矩阵如下。

(1)构件 2 的位置和姿态矩阵。设构件 3 回转 α ,构件 2 回转 θ , P_3 为构件 3 的位置,构件 2 的位姿矩阵为

$$\mathbf{T}_2 = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_3 & \mathbf{P}_3 \\ \mathbf{0} & 1 \end{bmatrix}.$$

$$\begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 & 0 \\ \sin \alpha & \cos \alpha & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (19)$$

(2)构件 1-1、构件 1-2 的位置和姿态矩阵。设两个夹子先偏摆 β ,再分别摆 δ 和 $-\delta$,构件 1-1、构

件 1-2 的位姿矩阵分别为

$$\mathbf{T}_{1-1} = \begin{bmatrix} \cos \beta & -\sin \beta & 0 & 0 \\ \sin \beta & \cos \beta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \delta & -\sin \delta & 0 & 0 \\ \sin \delta & \cos \delta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (20)$$

$$\mathbf{T}_{1-2} = \begin{bmatrix} \cos \beta & -\sin \beta & 0 & 0 \\ \sin \beta & \cos \beta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \delta & \sin \delta & 0 & 0 \\ -\sin \delta & \cos \delta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (21)$$

2.3 虚拟机器人手术动作仿真

如图 6 所示,观察区可以通过切换开关观察到手术空间外部的机械臂工作情形,工作空间内部可以实现手术基本动作的训练。

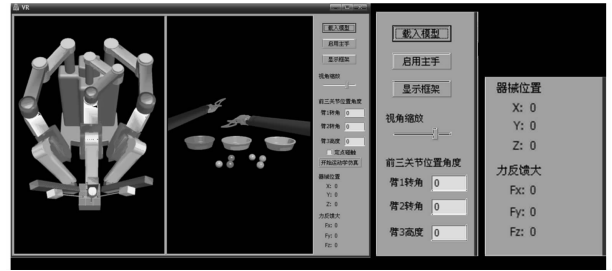


图 6 机器人手术动作训练模块界面

为验证虚拟从手能否与手形形成动作映射,本文设计了夹取和缝合两个任务。如图 7 所示,夹取最左侧球,移送至最右侧盘内。实验证明了夹取、释放以及碰撞检测模型的有效性。

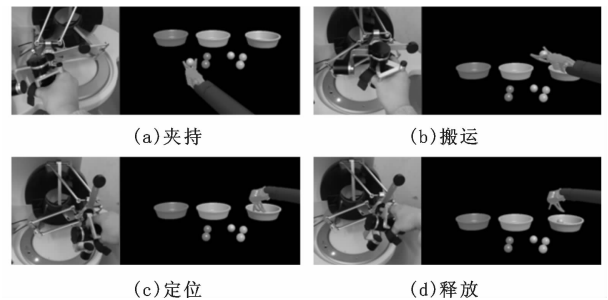


图 7 机器人夹持动作再现

缝合较为复杂,如图 8 所示,持针时须调整器械位姿,至目标位置后需根据进针点再次调整,穿针时还需关注针的走向,保证针尖从预定的出针点刺出。实验结果表明,该系统可实现持针、移针、定位、穿针等动作,实现缝合仿真。

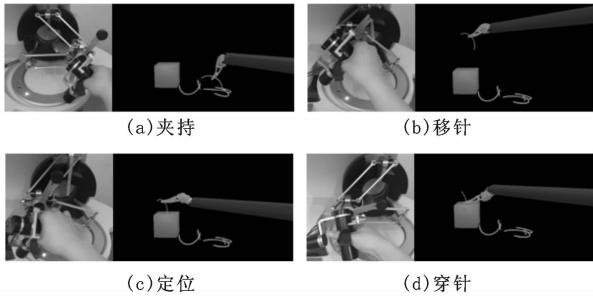


图 8 缝合动作再现

3 基于仿真的手术机器人术前引导

3.1 基于多臂协作能力优化的术前布置

本文基于持械机械臂和持镜机械臂末端位置之间的关系,提出多臂协作能力作为术前引导优化的目标函数。根据机器人手术的特点,术中手术器械的执行末端一直在同一操作位置密切配合,即全部的手术器械末端都应该具有同时达到同一个操作位置的能力,可称其为多臂可达性。只有满足多臂可达性要求的位置才能实现多个手术器械的配合动作。

若操作点位于腹腔镜的轴线上,并且距离镜子末端的距离为最佳观察物距 d (最佳物距取物距范围的一半,这样可以为缩放留出余地),则视野可以实现最大范围的前后缩放和上下左右调整,本文称该操作点实现了最佳可视化。

对于一个具备多臂可达性同时实现了最佳可视化的操作点 p ,一定能够实现图 9 的位置关系。如果器械末端均可达到 p 点,并且腹腔镜可实现以最佳物距 d 进行观察,则表明该点 p 实现了多臂可达性和最佳可视化,本文称这类空间位置为可协作位置。

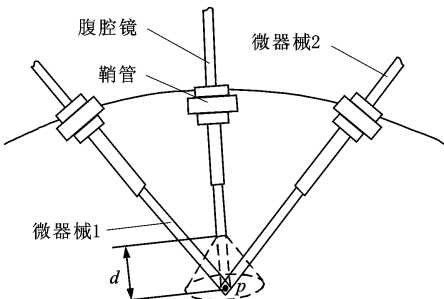


图 9 器械与腹腔镜的协作关系

在手术空间内,可协作位置的集合形成了一个空间区域,对于该空间区域内的任意位置,手术器械都可以有效配合,并且便于观察和视野缩放,因此该空间代表了手术器械与腹腔镜的可协作空间。本文将该空间占据整个手术空间的比例定义为合作能力系数 (Cooperation Capability Index),记为 C 。

$$C = \frac{V(Q_l \cap Q_r \cap Q_e)}{V(W)} \quad (22)$$

式中: Q_l 、 Q_r 、 Q_e 分别代表左臂、右臂执行末端和腹腔镜虚拟末端(从实际末端延长 d 后的位置)在手术工作空间 W 中的有效可达空间; V 表示计算空间体积的函数。

根据人体腹腔的生理结构,估计腹腔段工作空间大小为 $250 \times 250 \times 150$ mm 左右。本文将手术空间均分为上下两层,底层均分为 9 等分,根据医生手术需要可以对 9 个子空间设计权值,整个手术空间的协作能力系数可以表达为

$$C_w = \sum \gamma_i C_i \quad (23)$$

式中: C_i 代表子空间 S_i 的协作能力系数; γ_i 代表对子空间权重。

根据医生经验给出 $\mathbf{P}$ 和 θ_1 的一组初值。 $\mathbf{P}$ 对应 3 个坐标参数 P_x 、 P_y 、 P_z ,其中 P_z 根据所定义的工作空间的上表面位置关系即可确定, P_z 与切口的竖直方向差值为定值。因此,确定待优化参数为 P_x 、 P_y 和 θ_1 。为便于数学描述,以 θ 代替 θ_1 ,设所构建的粒子种群规模为 n ,则每个粒子表示为 $x_i = (px_i, py_i, \theta_i)$, $i=1, 2 \dots n$ 。由此可知所构建的粒子的搜索空间为三维空间,每个粒子对应的速度可以表示为 $v_i = (vx_i, vy_i, v_{\theta_i})$ 。

每个粒子在空间中搜索时要考虑两个因素,一是自己搜索到的历史最优值 $p_i = (p_{ix}, p_{iy}, p_{i\theta})$, $i=1, 2 \dots n$ 。二是全部粒子搜索到的最优值 $p_g = (p_{gx}, p_{gy}, p_{g\theta})$,在每次搜索中只有一个 p_g 。下面给出粒子位置和速度的更新公式

$$v_{id}^{k+1} = \omega v_{id}^k + c_1 \xi (p_{id}^k - a_{id}^k) + c_2 \eta (p_{gd}^k - a_{id}^k) \quad (24)$$

$$a_{id}^{k+1} = a_{id}^k + r v_{id}^{k+1} \quad (25)$$

式中:上角标 k 和 $k+1$ 分别表示相应变量是当前变量和下一次迭代搜索后的变量;角标 d 表示相应变量是参与迭代运算的值; ω 是保持原来速度的系数; c_1 是粒子跟踪自己历史最优值的权重系数; c_2 是粒子跟踪群体最优值的权重系数; ξ 和 η 是 $[0, 1]$ 内均匀分布的随机数; r 是位置更新时在速度前面加的约束因子,设置为 1。具体设置如表 1 所示。

表 1 粒子群优化模型的参数设置

参数	K	n	r	ω	c_1	c_2
赋值	100	20	1.0	0.8	2.0	2.0

为阐明权值 γ_i 的影响,针对底层 9 个空间给出一组权值分布,如表 2 所示。

表 2 子空间权重分布

γ_1	γ_2	γ_3	γ_4	γ_5	γ_6	γ_7	γ_8	γ_9
0.2	0.2	0.05	0.2	0.2	0.05	0.05	0.00	0.05

优化函数和约束条件具备后,利用粒子群算法更新 P_x 、 P_y 和 θ_1 ,获取表 3 所示的优化结果。

表 3 带权优化结果和优化函数最优适应值

	p_x/mm	p_y/mm	θ_1/rad	C_w
左臂	-511.9	-511.2	-0.93	0.724 6
中臂	-601.7	-106.0	-1.44	
右臂	-585.6	390.3	-2.05	

为验证结果有效性,图 10 给出了协作空间占据

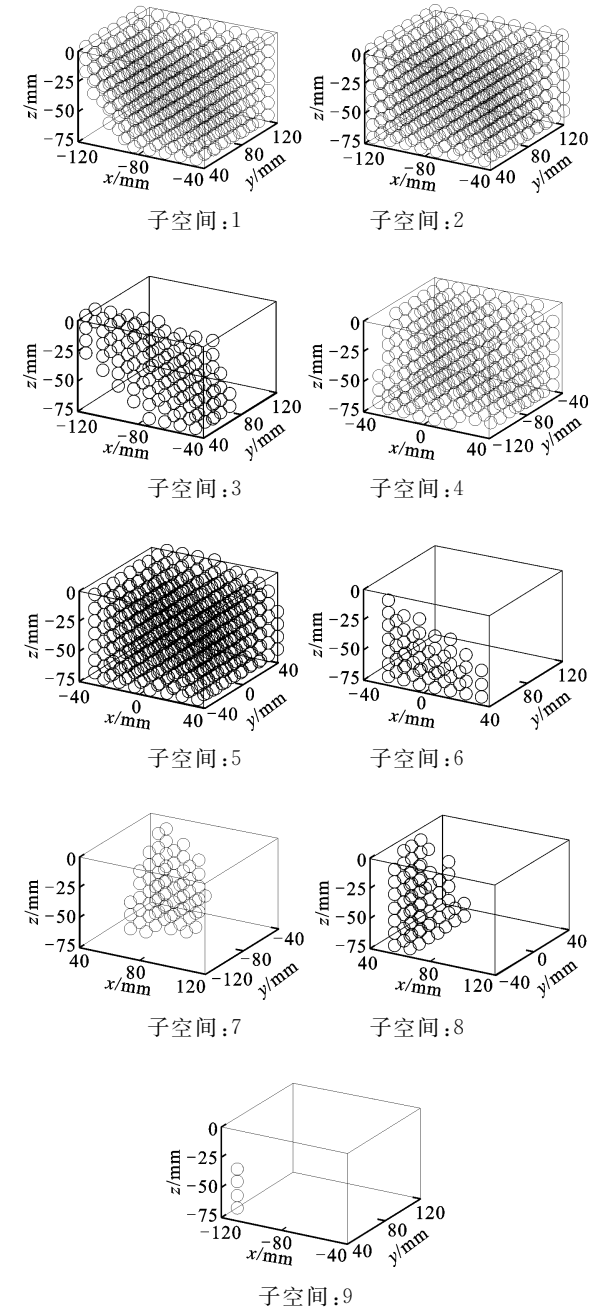


图 10 三臂协作空间在子空间中的分布

相应子空间的比例。协作空间占据子空间 1、2、4、5 的比例明显较大,与预设权值分配一致。

3.2 术前布置实验

优化结束后,3 个被动关节的旋转量和 3 个切口可通过几何关系确定。如图 11 所示,利用仿真系统的优化数据对机器人进行摆位实验。

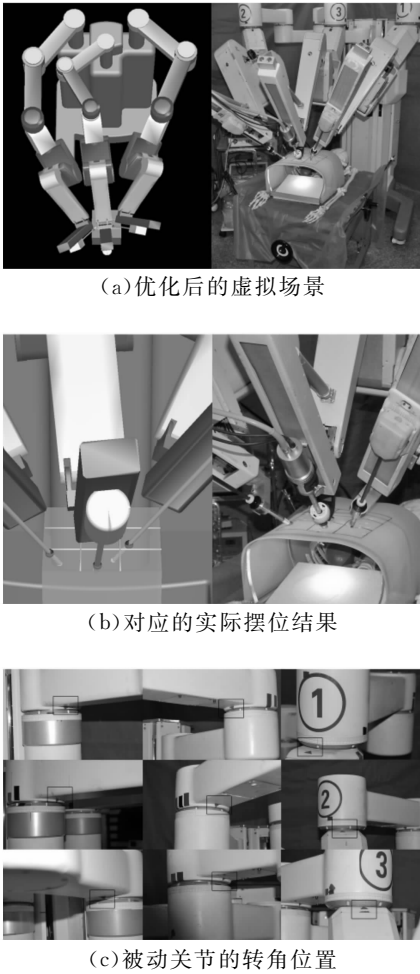


图 11 手术机器人摆位实验

在人体腹腔镜手术空间模型上,首先根据优化数据划定切口并植入器械鞘管和一个腹腔镜鞘管,然后根据被动关节角度值手动配置被动部分,再调整主动关节使机械臂与鞘管相连接,最后安装器械和腹腔镜。图 11a、图 11b 给出了优化后的虚拟场景和对应的实际摆位结果,图 11c 给出了全部被动关节的转角位置。在被动调整过程中,以图中方框内的标记为参考。摆位后,通过操纵实际机器人,验证了在预定区域完全可以达到性能要求。

4 结 论

为实现手术机器人的动作再现和获取手术机器人的最佳术前布置,本文构建了手术机器人虚拟现

实系统,通过夹取任务和缝合任务仿真实验验证了本文提出的位置和姿态分离的虚拟机器人运动控制方法是有效的,完全可以再现手术机器人的手术动作。基于粒子群优化算法提出一种以多臂协作能力为优化函数的术前布置引导方法,实际机器人摆位后的操作实验表明该方法可以在兼顾手术机器人性能和手术空间内部重要度差异的前提下直观地引导术前设置工作,并优先满足手术空间内部重要区域对多臂协作能力的需求。

参考文献:

- [1] TAYLOR R H. A perspective on medical robotics [J]. Proceedings of the IEEE, 2006, 94(9): 1652-1664.
- [2] 杜志江, 孙立宁, 富历新. 医疗机器人发展概况综述 [J]. 机器人, 2003, 25(2): 182-187.
DU Zhijiang, SUN Lining, FU Lixin. The development situation of medical robots [J]. Robot, 2003, 25(2): 182-187.
- [3] SUTHERLAND L M, MIDDLETON P F, ANTHONY A J. et al. Surgical simulation: a systematic review [J]. Annals of Surgery, 2006, 243(3): 291-300.
- [4] MARESCAUX J, LEROY J, RUBINO M, et al. Transcontinental robot-assisted remote telesurgery: feasibility and potential applications [J]. Annals of Surgery, 2002, 235(4): 487-492.
- [5] 黄凯. 具有力反馈的微创腹腔镜手术机器人虚拟手术技术研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
- [6] TORKINGTON J, SMITH S G, REES B I, et al.

The role of simulation in surgical training [J]. Annals of the Royal College of Surgeons of England, 2000, 82(2): 88-94.

- [7] ALBANI J M, LEE D I. Virtual reality-assisted robotic surgery simulation [J]. Journal of Endourology, 2007, 21(3): 285-287.
- [8] HAYASHIBE M, SUZUKI N, HASHIZUME M, et al. Robotic surgery setup simulation with the integration of inverse-kinematics computation and medical imaging [J]. Computer Methods and Programs in Biomedicine, 2006, 83(1): 63-72.
- [9] SUZUKI S, SUZUKI N, HASHIZUME M, et al. Tele-training simulation for the surgical robot system "da Vinci" [C]// Proceedings of the International Congress and Exhibition on Computer Assisted Radiology and Surgery. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2004: 86-91.
- [10] 王田苗, 张大朋, 刘达. 医用机器人的发展方向 [J]. 中国医疗器械杂志, 2008, 32(4): 235-238.
WANG Tianmiao, ZHANG Dapeng, LIU Da. The development direction of medical robot [J]. Chinese Journal of Medical Instrumentation, 2008, 32(4): 235-238.
- [11] 朴明波. 腹腔微创外科手术机器人仿真平台搭建及操作仿真研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2009.
- [12] 曾妍文. 面向显微外科手术的虚拟血管缝合仿真系统的研究 [D]. 天津: 天津大学出版社, 2006.

(编辑 武红江)

(上接第12页)

- YOU Yanjun, KANG Fengju, ZHANG Sen. Development of underwater weapon confrontation simulation system based on composability [J]. Computer Measurement and Control, 2011, 19(10): 2462-2471.
- [9] PLEBANI P, PERNICI B. URBE: web service retrieval based on similarity evaluation [J]. IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, 2009, 21(11): 1629-1642.
- [10] GARAVEL H. CADP 2006: a toolbox for the construction and analysis of distributed processes [C]// Proceedings of the 19th International Conference on Computer Aided Verification. Berlin, Germany:

Springer-Verlag, 2007: 158-163.

- [11] SZABO C, TEO Y M, SEE S. A time-based formalism for the validation of semantic composability [C]// Proceedings of the Winter Simulation Conference. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2009: 1411-1422.
- [12] CLAUDIA S, TEO Y M. On validation of semantic composability in data-driven simulation [C]// Proceedings of the 2010 IEEE Workshop on Principles of Advanced and Distributed Simulation. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2010: 1-8.

(编辑 武红江)