论著

文章编号:1000-5404(2012)13-1314-04

CT与C型臂辅助遥控型脊柱微创手术机器人系统打孔可靠性研究

张 鹤[1],王洪伟[1],韩建达[2],赵忆文[2],周 跃[1] (400037 重庆,第三军医大学新桥医院骨科[1];110016 沈阳,中国科学院沈阳自动化研究所机器人学重点实验室[2])

[摘要] **目的** 利用术前电子计算机X射线断层扫描技术(CT)和术中C型臂X线机辅助遥控型脊柱微创手术机器人系统进行牛脊骨标本打孔,评价该系统的精确性。探讨实验前CT、术中C型臂系统辅助遥控型脊柱手术机器人系统打孔的可行性。**方法** 遥控型脊柱微创手术机器人系统由中科院沈阳自动化研究所与第三军医大学新桥医院骨科合作研发,可进行遥控打孔。由于该系统目前尚不能与虚拟手术系统或导航系统结合,因此本实验中预先在牛脊骨标本棘突置入克氏针作为标志物,然后进行CT摄影并以此为依据进行术前计划。根据C型臂X线机影像调整手术机器人系统前端夹持气钻位置,当C型臂X线机影像显示该气钻位置与椎弓根理想置钉位置重合时,遥控机器人系统进行打孔操作。之后再次拍摄CT并评估该系统精确性。**结果** 遥控脊柱微创手术机器人系统进行打孔操作,可避免打孔过程中X射线对医师的损伤,该系统平均打孔时间为330(280~378) s/孔,平均X线透视次数为6(5~8)次。打孔数据与计划角度差值无统计学差异($P=0.209$)。该系统存在一定的学习曲线,熟悉该系统后,应用此方法角度偏差能控制在4°之内。**结论** 脊柱微创手术机器人系统打孔精确,利用实验前CT扫描结果进行实验前计划,根据该计划辅以C型臂系统遥控脊柱微创手术机器人系统进行打孔具有可行性。

[关键词] 计算机辅助骨科手术;机器人;微创脊柱外科

[中图法分类号] R197.39; R319; R681.5 [文献标志码] A

Feasibility of pre-clinical drilling in minimally invasive spine surgery robotic system (remote type)

Zhang He[1], Wang Hongwei[1], Han Jianda[2], Zhao Yiwen[2], Zhou Yue[1] ([1]Department of Orthopedics, Xinqiao Hospital, Third Military Medical University, Chongqing, 400037; [2]Key Laboratory of Robotics, Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang, Liaoning Province, 110016, China)

[**Abstract**] **Objective** To evaluate the drilling accuracy of minimally invasive spine surgery robotic system (remote type) assisted by computed tomography (CT) and C-arm system, and preliminary investigate the possibility of the combination of the imaging equipment and this robotic system. **Methods** Minimally invasive spine surgery robotic system (remote type), which is researched and developed jointly by Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences and our department, is used to drill (remote) in spine surgery. Since the robotic system still lack of the assistant of the navigation system or virtual surgery system, this study in advance was designed to drill holes into the spinous process of bovine spine specimens and put K-wires into the holes as markers, with CT scanning as a basis for surgical planning. In the experiment, under the guide of the C-arm X-ray machine operation robot system, the gas drilling clamp's position was adjusted. Remote drilling was performed till the coincidence of the image of the gas drilling position and ideal hole position in the spinous process. Then CT scanning was carried out again after the experiment for assessing. **Results** Minimally invasive spine surgery robotic system (remote type) could drill precisely and avoid radiation injury to the doctor. And the system average drilling time was 330 s/hole (ranging from 280 to 378 s), while the average number of X-ray was 6 times (5 to 8 times). The results of the statistical analysis showed that P value was 0.209 (>0.05) between the data of the drilling by CT photography and the surgical plan (one-

[基金项目] 军队临床高新技术重大项目(2010gxjs072)

[通信作者] 周 跃,电话:(023)68755608,E-mail: happyzhou@vip.163.com

sample *t*-test). The system had a certain learning curve, and the angle of deviation could be controlled within 4 after profound learning. **Conclusion** Minimally invasive spine surgery robotic system (remote type) is precise in drilling, with no statistical difference between the preoperative plan and the drilling hole, though a learning process is needed. It is feasible to make drilling with the robotic system assisted by CT scanning.

[**Key words**] computer assistant orthopedic surgery; robot; minimally invasive spine surgery

Supported by the Major Project of Clinical High and New Technology of PLA (2010gxjs072). Corresponding author, Zhou Yue, Tel: 86-23-68755608, E-mail: happyzhou@vip.163.com

近几十年来,微创外科技术在外科领域的应用日趋广泛,其以手术创伤小,术后恢复快等特点备受医师及患者的喜爱,在脊柱外科也是如此。但由于脊柱解剖结构复杂,手术区域毗邻重要的神经、血管与脏器,对手术的精确性要求高,而微创技术术野小,对脊柱的解剖结构辨认困难,因此,对手术操作者的技术要求也就更高。为避免微创脊柱外科手术对患者手术区域重要解剖结构的损伤,手术操作的关键步骤常需在术中影像学设备(如 C 型臂 X 线机)辅助下完成。由于长时间、大剂量的 X 射线辐照会对医护人员的身体造成较大的伤害,故一部分临床医师对此项技术敬而远之。而机器人技术能很好地解决术中 X 线辐照问题,因为操作医师可在安全距离遥控操作机器人系统完成关键手术步骤的操作(如打孔操作)。中国科学院沈阳自动化研究所机器人实验室(国家机器人学重点实验室)与第三军医大学新桥医院骨科合作研发的遥控型脊柱微创手术机器人系统具有 6 个自由度的机械臂,尖端可夹持进行打孔操作的气钻,医师能够遥控该系统进行打孔操作,以避免术中 X 射线造成的损伤。但由于该系统尚不能与虚拟手术系统或导航系统结合,因此本实验中预先在牛脊骨标本棘突置入克氏针作为标志物,再通过 CT 及 C 型臂 X 线机辅助该机器人系统进行打孔操作以检验其精确性,探讨术前 CT、术中 C 型臂系统辅助遥控型脊柱手术机器人系统打孔的可行性。

1 材料与方法

1.1 实验材料

遥控型脊柱微创手术机器人系统 1 台、电子计算机 X 线断层扫描机(CT)1 台、C 型臂 X 线机 1 台、自制牛骨标本夹具 1 个、木质实验台 1 张、克氏针(Φ2.0×300)18 根、克氏针(Φ1.2×220)(定位针)1 根,保鲜袋 1 卷、Mark 笔 1 支、三角尺 1 把、半圆仪 1 把、牛脊骨标本 7 具、计时器 1 个。遥控型脊柱微创手术机器人系统主要由 4 部分组成:机械臂、机械臂基座、医师控制台以及视觉监视系统(图 1)。操纵界面中共有 5 种操作模式,分别是人手牵引模式、平移骨钻模式、偏转骨钻模式、骨钻钻孔模式以及停止操作模式。视觉监视系统主要由钻头附近的摄像头和医师控制台上面的显示器组成。



1:机械臂; 2:机械臂基图座;3:视觉监视系统;4:医师控制台

图 1 遥挂型脊柱微创手术机器人系统的组成

1.2 遥控型脊柱微创手术机器人系统辅助打孔步骤

1.2.1 实验前牛脊骨标本的准备及术前计划 在实验前 CT 扫描结果上进行相关实验计划,再根据该计划通过 C 型臂辅助遥控脊柱微创手术机器人系统进行打孔,将打孔结果与实验前计划进行统计学等相关分析,测量该手术机器人系统的精确性。由于目前该系统尚不能与相关虚拟手术软件或导航系统相连接,因此采用根据实验前影像数据人工进行相关实验计划再根据计划进行实验的方法,不仅能有效检验该系统精确性,还能为该系统进一步与相关智能系统(如虚拟手术系统、导航系统等)的结合奠定基础。实验前先应用遥控型脊柱微创手术机器人系统在牛脊骨标本棘突中点和腰 5 或骶 1 关节突部位(左侧或右侧)打孔并置入克氏针,并对置入克氏针后的牛脊骨标本进行 CT 摄影,根据 CT 影像数据进行术前计划,确定椎弓根理想置钉位置(该位置与预先放置的克氏针轴线间夹角简称理想置钉夹角),具体方法如下(图 2):利用 GE 公司 64 排 CT 系统进行 CT 扫描,将扫描结果刻录光盘时,同时会在光盘上自动刻录 Centricity DICOM Viewer 3.0 软件,该软件中有相关线段测量工具及角度测量工具。首先,利用线段工具在置入克氏针轴线位置及椎弓根理想置钉位置放置两条线段(L1 和 L2),利用角度工具放置夹角,使其非角部顶点分别与 L1 和 L2 的同一端顶点重合,而角部顶点位置则在 L1 和 L2 的交点处(∠α)。再利用角度工具放置一个夹角(∠β),使其三个顶点与(∠α)3 个顶点重合,同时使其角部顶点位于 L2 上,调整(∠β)度数为 90°,测量线段 L3 的距离。此时,(∠α)为实验前置入克氏针轴线位置及椎弓根理想置钉位置之间的夹角(简称理想置钉夹角),而 L3 则为实验前置入克氏针顶点与椎弓根理想置钉位置轴线之间的距离。

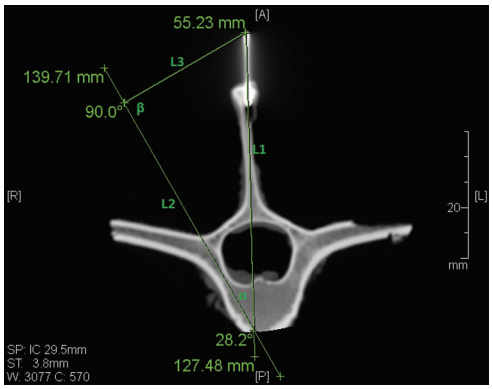


图2 利用 Centricity DICOM Viewer 3.0 在实验前 CT 影像基础上进行打孔计划

牛脊骨标本棘突中点置入克氏针有助于术前计划的设计和术中 C 型臂 X 线机影像与术前计划的匹配,而关节突部位克氏针则能确定该标本的方位(关节突有克氏针侧和关节突无克氏针侧)。

1.2.2 实验中 C 型臂 X 线机辅助定位 将牛脊骨标本放置在自制牛脊骨标本夹具上,确定需要打孔的牛脊骨节段以及方位,将暂无需打孔的牛脊骨节段棘突克氏针取下,并把定位针放置在需要打孔节段牛脊骨棘突上,拍摄 C 型臂 X 线机侧位片,调整遥控型脊柱微创手术机器人系统前端夹持的气钻与牛脊骨棘突置入克氏针的影像重合。调整 C 型臂 X 线机,使其投射轴(C 型臂 X 线机射线发射器与接收器正中连线所在轴线)与牛脊骨标本纵轴平行进行摄影(即拍摄横断位片)。在 C 型臂 X 线机屏幕上覆盖保鲜袋(由于保鲜袋表面有静电,会吸附在显示器屏幕上)。测量 C 型臂 X 线机屏幕上显示的预先置入克氏针顶点到定位针与该克氏针交点距离,并与术前 CT 影像显示的该段距离进行比对,作为此时 C 型臂 X 线机屏幕图像与实际情况的比例尺。应用该比例尺换算术前计划中的距离,并在保鲜袋上进行绘制,即可将术前的手术计划展现在 C 型臂 X 线机屏幕上(图3)。

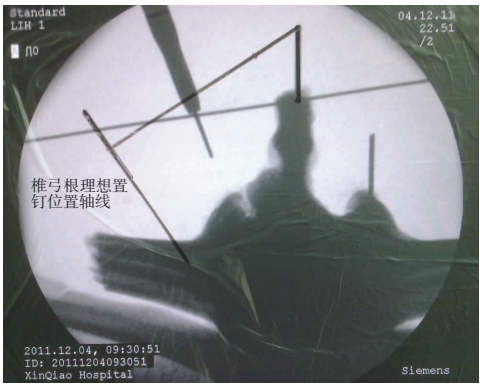


图3 C 型臂 X 线机屏幕重现实验前计划

1.2.3 遥控机器人系统打孔 通过 C 型臂 X 线机影像辅助,遥控调整脊柱微创手术机器人系统前端夹持气钻位置与方向,使该气钻轴线位置与 C 型臂 X 线机屏幕上显示的椎弓根理想置钉位置一致时,遥控脊柱微创手术机器人系统进行打孔操作,并在孔洞中放置克氏针。

1.3 测量及统计学处理

对实验后牛脊骨标本进行 CT 摄影,采用 Adobe PhotoShop CS3 Extended 软件,根据 CT 结果测量预先放置的克氏针轴线与实际打孔后置入克氏针轴线之间的夹角(简称实际置钉夹角)。将测量的实际置钉夹角与理想置钉夹角做差,并对其差值进行单样本 t 检验,统计软件使用 PASW Statistics 18。

2 结果

2.1 打孔及计时结果

通过遥控脊柱微创手术机器人系统进行打孔操作,通过该系统辅助打孔时间平均为 330(280~378)s/孔,平均 X 线透视次数为 6(5~8)次。实验后牛脊骨标本 CT 图像可测量数据共 55 个,其中有 3 枚克氏针置入椎弓根之外,其偏离角度分别为 11.0°、10.9°和 17.4°。对置入椎弓根内的 52 个数据与相应实验前打孔计划数据相减,并进行统计学分析:$t = -1.271$,SD = 3.640 19,双侧 t 检验概率 $P = 0.209$,99% 可信区间为 −1.992 4~0.709 0,说明置入椎弓根的克氏针情况与实验前打孔计划无统计学差异。

2.2 学习曲线

将置入椎弓根内的 52 个数据分为 4 个等级:A, 0.0~2.0°; B, 2.1~4.0°;C, 4.1~6.0°;D, 6.1~8.0°。其中,A 级 29 个,B 级 12 个,C 级 8 个,D 级 3 个。将 7 具牛骨按打孔先后顺序分为 2 组,前 3 具(共 23 个孔)为第 1 组,后 4 具(共 29 个孔)为第 2 组。第 1 组偏离分别为 A 级 8 个(34.8%)、B 级 4 个(17.4%)、C 级 8 个(34.8%)、D 级 3 个(13.0%);第 2 组偏离分别为 A 级 21 个(72.4%)、B 级 8 个(27.6%),C 级和 D 级均为 0 个。第 2 组偏差较第 1 组明显减小,说明该系统有一定的学习曲线。对这两组打孔结果进行偏离程度分析,第 1 组打孔结果在 1 倍标准差(1SD)之内的有 12 个(52.2%),第 2 组打孔结果在 1 倍标准差之内有 28 个(96.4%),相比第 1 组,第 2 组打孔结果偏离程度有明显提高。

3 讨论

第三军医大学新桥医院骨科联合中国科学院沈阳自动化研究所,自 2008 年开展脊柱微创手术机器人相关研究,针对脊柱微创外科的特点,充分考虑骨科手术室现状及未来外科发展方向,自主研发了遥控型脊柱微创手术机器人系统,由 4 部分组成,其中系统机械臂可以提供 6 个自由度的全方位活动,具有无颤动锁定的实时锁定系统,同时可进行医疗消毒;机械臂基座是控制机械臂运动的核心部件,与机械臂和医生控制台相连,能处理医师控制台的指令以控制机械臂;医师控制台提供操作界面和操纵杆,操纵界面中共有 5 种操作模式;视觉监视系统可以远距离观察钻孔情况。医师可在安全距离遥控机械臂进行打孔操作,避免术中 X 射线造成的损伤。

本研究应用术前 CT 摄影及术中 C 型臂 X 线机辅

助定位遥控脊柱微创手术机器人系统进行打孔操作，以评价该系统精确性。结果显示，通过 CT 与 C 型臂 X 线机的辅助，该机器人系统可按照术前计划精确打孔。但其中仍有 3 枚克氏针未置入牛脊骨标本椎弓根内，且均出现在第 1 组牛脊骨标本内。此时对于 C 型臂 X 线机侧位片的拍摄，还难以保证该手术机器人系统夹持气钻与预先置入克氏针在同一平面内。由于 C 型臂 X 线机不能同时拍摄两个平面，因此在侧位片将该手术机器人系统夹持的气钻与预先置入克氏针放置在同一平面尤为重要，如放置不当，会导致克氏针置入位置与术前计划偏差较大。本研究并未采用临床上应用的 C 型臂 X 线机正、侧位片影像辅助，而是采取 C 型臂 X 线机侧、横断位片影像为依据确定实际打孔位置，一方面是由于横断位片与 CT 片方向一致，便于绘制术前计划；另一方面牛脊骨标本各节段脊柱相对位置不会发生变化，同时也能解决由于工业设计，致使该手术机器人系统关节 5 和关机 6 在 C 型臂 X 线机正位片出现的遮挡问题[1]。尽管该方法不适应于临床，但也为该系统的临床应用奠定了一定的基础。

近年来，随着先进机器人技术[2]、导航技术及计算机技术等的发展，计算机辅助骨科手术的应用日渐广泛，而骨科手术机器人系统除了 Robodoc 系统[3]、CASPAR 系统[4]、Arthrobot 系统[5]、Praxiteles 系统[6]、BRIGIT 系统[7]等关节外科手术机器人系统外，微创脊柱外科亦出现了以色列生产的 SpineAssist 系统[8-9]、韩国的 SPINEBOT 系统[10-11]及德国的微创手术机器人系统[12-14]等，这些系统能增加置入物的准确性并减少神经源性损伤的风险[15-16]。同时，导航系统、虚拟手术系统的发展也为各种手术机器人系统提供了新的突破点，为将来把导航系统、机器人系统、数字化手术室、智能麻醉诱导系统及手术患者运输系统融为一体的手术系统提供了可能。

目前，遥控型脊柱微创手术机器人系统尚不能与虚拟手术或导航系统结合，因此需要对该系统与影像学设备的结合方式进行相关研究，并探讨出一种新的结合方式。而随着该手术机器人系统相关软硬件的完善，其与虚拟手术或导航系统结合之后，由虚拟手术系统执行术前计划及术中匹配的任务，导航系统则指引机器人系统完成具体操作，再加上医师的监督指导，相信能达到理想的手术效果。当然，要达到这个目标还有很长的一段路要走。

参考文献：

[1] 张鹤，韩建达，周跃. 脊柱微创手术机器人系统辅助打孔的实验研究[J]. 中华创伤骨科杂志，2011，13(12)：1166－1169.

[2] 饶芸，骆群，李雪玲，等. 达芬奇机器人系统全胃切除术的围手术期护理[J]. 第三军医大学学报，2011，33(1)：44，49.

[3] Taylor R H，Paul H A，Kazandzides P，*et al*. An image-directed robotic system for precise orthopaedic surgery[J]. IEEE Trans Robot and Automation，1994，10(3)：261－275.

[4] Petermann J，Kober R，Heinze J. Computer-assisted planning and robot-assisted reconstruction[J]. Operat Tech Orthop，2000，10(1)：50－55.

[5] Kwon D S，Yoon Y S，Lee J J，*et al*. ARTHROBOT：a new surgical robot system for total hip arthroplasty[J]. Proc IEEE/RSJ Int Conf Intelligent Robots and Systems，2001，1123－1128.

[6] Plaskos C，Cinquin P，Lavallee S，*et al*. Praxiteles：a miniature bone-mounted robot for minimal access total knee arthroplasty[J]. Int J Med Robot，2005，1(4)：67－79.

[7] Maillet P，Nahum B，Blondel L，*et al*. BRIGIT，a robotized tool guide for orthopedic surgery[R]. Barcelona：IEEE International Conference on Robotics and Automation，2005：211－216.

[8] Lieberman I H，Togawa D，Kayanja M M，*et al*. Bone-mounted miniature robotic guidance for pedicle screw and translaminar facet screw placement：Part I--Technical development and a test case result[J]. Neurosurgery，2006，59(3)：641－650.

[9] Togawa D，Kayanja M M，Reinhardt M K，*et al*. Bone-mounted miniature robotic guidance for pedicle screw and translaminar facet screw placement：part 2--Evaluation of system accuracy[J]. Neurosurgery，2007，60(2 Suppl 1)：ONS129－ONS139.

[10] Chung G B，Kim S，Yi B J，*et al*. Cadaver study for spinal fusion surgery using an image-guide surgical robotic system[J]. International Journal of Control Automation and System，2010，8(3)：564－573.

[11] Lee J，Hwang I，Kim K，*et al*. Cooperative robotic assistant with drill-by-wire end-effector for spinal fusion surgery[J]. Ind Robot：An Int J，2009，36(1)：60－72.

[12] Ortmaier T，Weiss H，Dobele S，*et al*. Experiments on robot-assisted navigated drilling and milling of bones for pedicle screw placement[J]. Int J Med Robot，2006，2(4)：350－363.

[13] Zemiti N，Morel G，Ortmaier T，*et al*. Mechatronic design of a new robot for force control in minimally invasive surgery[J]. IEEE/ASME Transactions On Mechatronics，2007，12(2)：143－147.

[14] Hussong A，Rau T S，Ortmaier T，*et al*. An automated insertion tool for cochlear implants：another step towards atraumatic cochlear implant surgery[J]. Int J Comput Assist Radiol Surg，2010，5(2)：163－171.

[15] Konovalov N A，Shevelev I N，Kornienko V N，*et al*. Application of robotic assistance in surgical treatment of degenerative disease of lumbosacral spine[J]. Zh Vopr Neirokhir Im N N Burdenko，2011，(3)：10－15.

[16] Devito D P，Kaplan L，Dietl R，*et al*. Clinical acceptance and accuracy assessment of spinal implants guided with SpineAssist surgical robot：retrospective study[J]. Spine (Phila Pa 1976)，2010，35(24)：2109－2115.

（**收稿**：2011-12-19；**修回**：2012-02-13）

（编辑 龙 亮）