

实时跟踪和虚拟成像技术辅助创伤骨科手术机器人治疗股骨颈骨折

娄伟钢, 陈剑明, 汪帅伊, 李海洋, 徐丁

(宁波市第六医院创伤骨科, 浙江 宁波 315042)

【摘要】 目的: 探究实时跟踪和虚拟成像技术(real-time tracking and virtual reality technology, RTVI)辅助创伤骨科手术机器人术中配准治疗股骨颈骨折的治疗效果。方法: 回顾分析 2020 年 9 月至 2022 年 9 月应用创伤骨科机器人手术治疗的 60 例股骨颈骨折患者, 根据术中是否使用 RTVI 技术辅助机器人手术将患者分成两组: RTVI 组 28 例, 男 12 例, 女 16 例; 年龄 28~60(46.2±9.3)岁。单纯天玑手术机器人组 32 例, 男 15 例, 女 17 例; 年龄 32~58(48.2±7.8)岁。观察并记录两组配准透视次数、手术时间、术中透视次数、术中出血量、住院时间。所有患者术后接受定期随访, 常规复查髋关节 X 线片, 记录 Garden 对线指数、骨折愈合时间、术后并发症、Harris 评分。结果: 60 例患者均获得随访, 其中 RTVI 组随访 9~16(13.0±1.2)个月, 单纯天玑手术机器人组随访 10~14(12.0±1.3)个月, 两组比较差异无统计学意义($P>0.05$)。随访期间两组股骨颈骨折均愈合良好, 无内固定松动、切口感染等并发症发生。RTVI 组配准透视次数、手术时间、术中透视次数优于单纯天玑手术机器人组($P<0.01$)。而两组术中出血量、住院时间、Garden 对线指数、骨折愈合时间、髋关节 Harris 评分比较, 差异无统计学意义($P>0.05$)。总结: RTVI 技术辅助天玑手术机器人治疗股骨颈骨折手术虽然对其术后疗效影响不大, 但可以有效减少手术时间, 减低术中 X 线投射次数, 降低患者术中辐射暴露风险。同时也缩短了术者的学习曲线, 更好体现创伤骨科手术机器人的精准和高效。

【关键词】 实时跟踪和虚拟成像技术; 骨科机器人; 外科手术; 股骨颈骨折

中图分类号: R683.42

DOI: 10.12200/j.issn.1003-0034.20230342

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Real-time tracking and virtual reality technology-assisted trauma orthopaedic surgery robot for femoral neck fractures

LOU Wei-gang, CHEN Jian-ming, WANG Shuai-yi, LI Hai-yang, XU Ding (Department of Orthopaedic Trauma, Ningbo No.6 Hospital, Ningbo 315042, Zhejiang, China)

ABSTRACT Objective To investigate the effectiveness of real-time tracking and virtual reality technology (RTVI) used to assist the intraoperative alignment of the trauma orthopaedic surgery robot for the treatment of femoral neck fractures and its impact on the treatment outcome. **Methods** A retrospective analysis was conducted on 60 patients with femoral neck fractures treated with trauma orthopedic robotic surgery from September 2020 to September 2022. Patients were divided into two groups according to whether RTVI technology was used during surgery to assist robotic surgery. There were 28 patients in the RTVI group (12 males and 16 females), with an average age of (46.2±9.3) years old ranging from 28 to 60 years old. There were 32 patients in the simple Tianji surgical robot group, including 15 males and 17 females, aged (48.2±7.8) years old ranging from 32 to 58. The number of registered fluoroscopy, operation time, total number of intraoperative fluoroscopy, intraoperative blood loss, and hospitalization time of the two groups of patients were observed and recorded. All patients received regular follow-up after surgery, and hip X-rays were routinely reviewed to record Garden alignment index, fracture healing time, postoperative complications, and Harris score. **Results** All 60 patients were followed up. The RTVI group was followed up for 9 to 16 months with an average of (13.0±1.2) months, and the Tianji surgical robot group alone was followed up for 10 to 14 months with an average of (12.0±1.3) months. During the follow-up period, the femoral neck fractures of both groups of patients healed well, and no complications such as internal fixation loosening and incision infection occurred. The number of registered fluoroscopy, operation time, and number of intraoperative fluoroscopy of patients in the RTVI group were significantly better than those in the simple Tianji surgical robot group ($P<0.01$). There was no statistically significant difference in intraoperative blood loss, hospital stay, Garden alignment index, fracture healing time, and hip Harris score between two groups ($P>0.05$). **Conclusion**

基金项目: 宁波市医学科技计划项目(编号: 2021Y56)

Fund program: Ningbo Medical Science and Technology Program(No. 2021Y56)

通讯作者: 徐丁 E-mail: xuding831129@126.com

Corresponding author: XU Ding E-mail: xuding831129@126.com

Although RTVI technology assisted by the surgical robot for femoral neck fracture surgery has little impact on its postoperative outcome, it can effectively reduce the operating time, the number of intraoperative X-ray projections, and the risk of intraoperative radiation exposure to patients. It also shortened the learning curve of the operator and better reflected the precision and efficiency of the trauma orthopaedic surgery robot.

KEYWORDS Real-time tracking and virtual reality technology, RTVI; Orthopaedic robot; Surgical operation; Femoral neck fracture

在国家推进智能制造和机器人发展的政策鼓励下,创伤骨科迎来了自己的机器人时代。手术机器人开始进入全国各大医疗中心,以其独特的精准性、微创性和安全性为患者带来了福音^[1]。创伤骨科手术机器人手术过程中,配准是第一步,极其重要^[2]。目前创伤骨科手术机器人主要依靠 C 形臂 X 线机的拍摄和影像学资料进行术前规划以及术中配准。但在实际操作中发现通过二维 X 线要实现精确配准是非常困难的,它也是导致机器人手术时间延长的主要原因。如何在现有条件下达到快速的精确配准以缩短手术时间、减少术中辐射、提高创伤骨科手术机器人手术效率成为了关注和研究的重点。本研究采用实时跟踪和虚拟成像技术(real-time tracking and virtual reality technology, RTVI)技术^[3-4]辅助创伤骨科手术机器人术中配准治疗股骨颈骨折,探究其对于治疗效果的影响。

1 资料与方法

1.1 病例选择

纳入标准:单纯股骨颈骨折,无神经、血管损伤者;患者能耐受该手术;具备完整随访资料者;年龄 45~60 岁。排除标准:开放性骨折患者;陈旧性骨折或病理性骨折患者;未签署知情同意书。

1.2 一般资料

本研究回顾性分析 2020 年 9 月至 2022 年 9 月收治的 60 例股骨颈骨折患者,根据术中是否使用 RTVI 技术辅助机器人手术将患者分成两组:RTVI 组 28 例,男 12 例,女 16 例;年龄 28~60(46.2±9.3)岁。骨折 Garden 分型^[5]:Ⅱ型 5 例,Ⅲ型 19 例,Ⅳ型 4 例。单纯手术机器人组 32 例,男 15 例,女 17 例;年龄 32~58(48.2±7.8)岁;Garden Ⅱ型 4 例,Ⅲ型 22 例,

Ⅳ型 6 例。所有患者采用闭合复位下空心螺钉固定术。两组性别、年龄、致伤原因、骨折分型、受伤至手术时间比较,差异无统计学意义($P>0.05$),具有可比性,见表 1。本研究经宁波大学附属宁波市第六医院医学伦理委员会批准(编号:S2021011)。所有患者知情同意并签署知情同意书。

1.3 手术方法

手术中使用的手术机器人为天玑 II 骨科手术机器人系统(北京天智航医疗科技股份有限公司)。其他还有 RTVI 系统、移动式 C 形臂 X 线机(德国西门子股份公司)、空心螺钉(山东威高医疗器械有限公司)等。所有手术由同一组手术医师完成,患者均接受椎管内麻醉。麻醉成功后患者仰卧于碳纤维手术床上,进行骨折牵引复位,复位完成后进行手术。

1.3.1 RTVI 组 启动机器人设备,确认其正常运行,然后使用无菌手术套隔离设备。术区常规消毒、铺巾后先在患肢股骨外侧髁上安装示踪器并调校定位尺。利用 RTVI 系统辅助 C 形臂 X 线机扫描患者髋关节前后位及侧位图像,确保在最短时间内获取所有图像,而且均符合术中规划的要求。将 C 形臂 X 线机采集到的二维图像传输至机器人操作台后完成目标螺钉的规划。然后运行机器人机械臂,根据规划路径导航定位导针的入口及放置方向。术者根据机械臂所展示的位置在体表皮肤做长为 1 cm 的手术切口,切开筋膜,分离肌肉组织后将导针套筒置入直至骨面,沿套筒方向置入 3 枚导针。导针置入位置满意后沿其方向依次置入长度合适的空心螺钉。

1.3.2 单纯手术机器人组 仅凭手术人员经验进行 C 形臂 X 线机扫描患者髋关节前后位及侧位图像,直至获取的图像符合术中规划的要求。其余手术

表 1 两组股骨颈骨折患者一般资料比较

Tab.1 Comparison of general data between two groups of patients with femoral neck fracture

组别	例数	年龄($\bar{x}\pm s$)/岁	性别/例		致伤原因/例		Garden 分型/例			受伤至手术时间($\bar{x}\pm s$)/d
			男	女	车祸伤	高处坠落伤	Ⅱ型	Ⅲ型	Ⅳ型	
RTVI 组	28	46.2±9.3	12	16	18	10	5	19	4	3.2±1.9
单纯手术机器人组	32	48.2±7.8	15	17	20	12	4	22	6	3.4±1.6
<i>t</i> 值		0.335								0.333
<i>P</i> 值		0.717		0.551*		0.473*		0.893*		0.718

注:*采用 Fisher 确切检验,无检验值

步骤均与 RTVI 组相同。

1.3.3 RTVI 技术 在 C 形臂 X 线机的基础上配合深度相机和软件系统。深度相机可同时采集图像信息和物体表面的三维信息，软件系统用于将术前三维重建影像和使用深度相机采集到的三维术中图像进行配准、追踪，并模拟 C 形臂 X 线成像原理进行虚拟 C 形臂 X 线成像（软著登记号：2022SR0795000），见图 1。具体操作流程见图 2。

1.3.4 术后处理 术后常规预防性使用抗生素、预防深静脉血栓形成、止痛等治疗。常规复查髋关节 X 线片，指导患者早期行下肢功能锻炼。

1.4 观察项目与方法

术后 1、2、3、6、12 个月分别对患者进行随访。观察并记录两组配准透视次数、手术时间、术中共透视次数、术中出血量、住院时间、Garden 对线指数^[5]、骨折愈合时间、术后并发症。术后 6、12 个月随访时采用髋关节 Harris 评分^[6]从疼痛、功能、畸形、活动度 4 个方面评价髋关节功能情况

1.5 统计学处理

采用 SPSS 20.0 软件进行统计学分析。定量资料首先应用 Shapiro Wilk 检验判断数据是否符合正态

分布。年龄、伤后手术时间、配准透视次数、手术时间、住院时间、术中出血量等符合正态分布的定量数据以均数±标准差($\bar{x}\pm s$)表示，两组间比较采用成组设计定量资料 *t* 检验。性别、受伤因素等定性资料采用 Fisher 确切概率法进行比较。以 $P<0.05$ 为差异具有统计学意义。

2 结果

60 例患者均获得随访，RTVI 组随访 9~16 (13.0±1.2)个月，单纯天玑手术机器人组随访 10~14 (12.0±1.3)个月，两组比较，差异无统计学意义 ($P>0.05$)。随访期间两组股骨颈骨折均愈合良好，无内固定松动、切口感染等并发症发生。

2.1 围术期指标比较

RTVI 组配准透视次数、手术时间、术中共透视次数优于单纯天玑手术机器人组 ($P<0.01$)。而两组术中出血量、住院时间、Garden 对线指数、骨折愈合时间比较，差异无统计学意义 ($P>0.05$)，见表 2。

2.2 髋关节功能评分比较

术后 6 个月 RTVI 组 Harris 评分 (92.6±2.4)分，与单纯手术机器人组 (92.8±2.6)分比较，差异无统计学意义 ($P>0.05$)。术后 12 个月 RTVI 组 Harris 评分

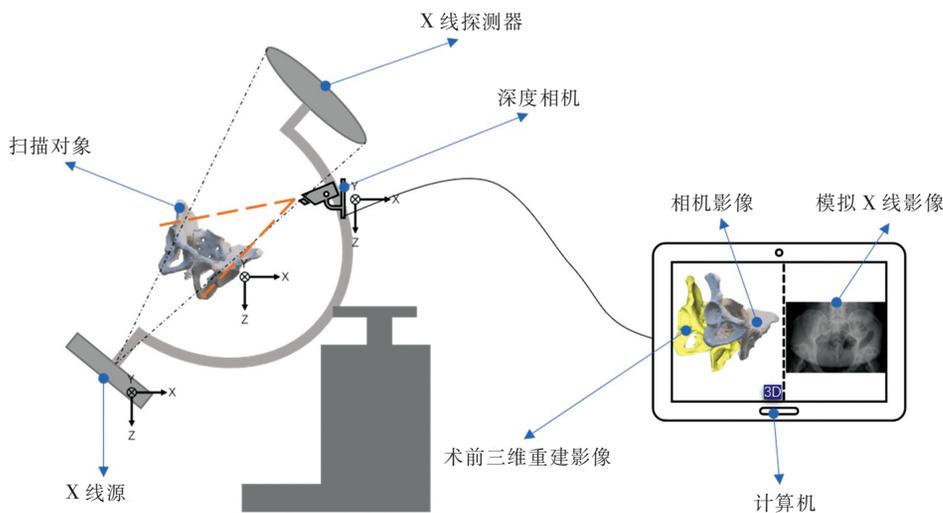


图 1 RTVI 技术结构原理图

Fig.1 RTVI technical structure schematic diagram

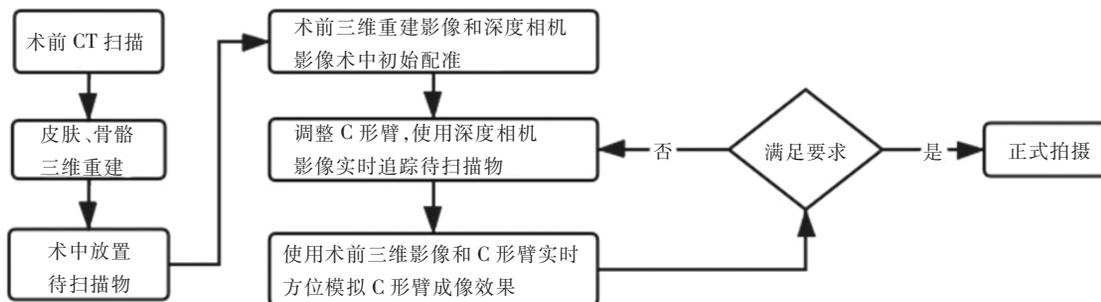


图 2 系统操作流程图

Fig.2 System operation flow chart

表 2 两组股骨颈骨折患者围术期指标比较

Tab.2 Comparison of perioperative indexes between two groups of patients with femoral neck fracture

组别	例数	配准透视次数 ($\bar{x}\pm s$)/次	手术时间 ($\bar{x}\pm s$)/min	术中透视次数 ($\bar{x}\pm s$)/次	术中出血量 ($\bar{x}\pm s$)/ml	住院时间 ($\bar{x}\pm s$)/d	Garden 对线指数/例		骨折愈合时间 ($\bar{x}\pm s$)/月
							I 级	II 级	
RTVI 组	28	4.5±1.5	53.2±4.9	5.3±1.6	5.4±1.9	8.2±1.5	24	4	6.7±1.5
单纯机器人组	32	13.6±2.8	72.5±6.4	15.9±3.4	5.7±2.0	8.4±1.2	27	5	6.6±1.4
<i>t</i> 值		7.984	7.562	7.896	0.562	0.498			0.457
<i>P</i> 值		<0.01	<0.01	<0.01	0.981	0.892	0.346*		0.763

注: *为采用 Fisher 确切检验, 无检验值

表 3 两组股骨颈骨折患者 Harris 评分比较($\bar{x}\pm s$)

Tab.3 Comparison of Harris score between two groups of patient with femoral neck fracture($\bar{x}\pm s$)

单位: 分

组别	例数	疼痛		功能		畸形		活动度		总分	
		术后 6 个月	术后 12 个月								
		RTVI 组	28	41.4±2.2	43.4±2.0	43.4±2.1	42.6±2.1	3.2±0.2	3.6±0.3	4.6±0.1	4.8±0.2
单纯机器人组	32	42.4±1.8	43.5±2.1	42.3±2.2	43.2±2.0	3.4±0.2	3.5±0.2	4.7±0.1	4.7±0.1	92.8±2.6	94.0±3.2
<i>t</i> 值		-0.832	-0.461	0.336	0.584	0.457	0.252	-0.273	0.428	-0.215	0.131
<i>P</i> 值		0.410	0.647	0.738	0.563	0.650	0.802	0.787	0.671	0.830	0.897

(94.4±3.5)分,与单纯手术机器人组(94.0±3.2)分比较,差异无统计学意义($P>0.05$)。见表 3。

3 讨论

3.1 骨科手术机器人的配准难题

骨科手术机器人手术过程分为配准、规划、执行 3 个部分。配准是第 1 步。在脊柱、关节外科中可以使用 C 形臂 X 线机以三维 CT 的形式采集图像,操作简单精确。但由于术中影像采集设备 C 形臂 X 线机的限制,术中三维 CT 的拍摄仅限于脊椎等尺寸较小的部位,对于骨盆、髌臼等大的部位,往往需价格在千万级别以上的大型 C 形臂 X 线机才能拍摄,一般医院难以承受。所以创伤骨科的机器人手术常常通过二维 X 线多角度的拍摄来采集图像数据。但在实际操作中仅用有限的 3 个角度拍摄无法完全真实还原三维空间信息,同时拍摄角度的选取需要满足严格的要求,往往需要多次摄片,浪费大量时间和精力。特别是骨盆、髌臼手术,二维配准时需要精确的骨盆入口位、出口位、髌骨侧位等影像资料,经验丰富的术者也很难在极短时间内一次性获得满意的图像。因此术中配准时间是导致机器人手术时间延长的主要原因。

3.2 RTVI 技术的发展

近年来,RTVI 技术在医学领域的应用愈发成熟,部分复杂手术已经可以实现可视化、精准化与微创化^[3-4]。该技术最早可以追溯到 1998 年,美国普林斯顿西门子公司申请了有关叠加 X 射线和视频图

像的反射镜系统专利^[7-11]。2006 年术中重新定位的概念被提出^[12]。研究涉及对相机增强型 C 形臂系统的扩展,例如在创伤外科手术中跟踪手术钻的多视图 3D 导航系统。2010 年使用 CAMC 系统进行了 40 次骨科和创伤外科手术。后面的几年中,进行了无视差图像拼接的研究,以实现全景 X 射线视图。TUCKER 等^[13]使用基于 2D/3D 强度的术中 X 射线与术前采集的 CT 进行配准。通过结合 C 形臂上的 RGBD 传感器将光学信息与患者术前医学数据融合在一起,并提供增强的现实环境^[13]。最近的研究使用了基于无标记和动态 SLAM 的环境(手术室)跟踪,以提供手术部位术前和术中 3D 医学数据的原位可视化^[14]。

3.3 RTVI 技术辅助创伤骨科机器人手术

受启发于虚拟成像技术的直观化、实时化的特点,笔者开发出一套基于 RTVI 技术应用的创伤骨科手术机器人术中配准辅助系统,希望可以帮助术者术中快速找到 C 形臂 X 线机的最佳拍摄方位,在最短的时间内完成配准工作。笔者的临床回顾性研究也证明了该系统的有效性,RTVI 组的配准透视次数低于单纯手术机器人组($P<0.01$)。同时,在手术时间、术中共透视次数中 RTVI 组也优于单纯手术机器人组($P<0.01$)。这对减轻术者和患者的 X 线暴露剂量意义重大。在术中出血量、住院时间、Garden 对线指数、骨折愈合时间、髌关节 Harris 评分比较中,两组差异并无统计学意义。虽然在术后的 Harris 疗

效评、骨折愈合时间、术中出血量、术后并发症等方面 RVIT 组并没有体现出优势,但也不能否认其在缩减手术时间、减少透视次数上的作用,避免手术中需要使用大量的 X 线照射,从而减少患者的辐射暴露风险。

3.4 本研究的局限

本研究也存在一些局限性。首先,本研究是单中心的回顾性研究,缺乏多中心、多地域、前瞻性的临床验证。其次,本研究样本数量相对较小,未来的研究可以考虑扩大样本量,增加多中心的研究数据以更全面、客观地评估技术的有效性和安全性。最后,本研究只关注了术中和术后的一些指标,缺乏如术后股骨头坏死等需要长时间观察的指标,需要更长时间的随访。

总之,本研究证明了 RTVI 技术辅助天玑手术机器人治疗股骨颈骨折手术虽然对其术后疗效影响不大,但可以有效减少手术时间,减低术中 X 线投射次数,降低患者术中辐射暴露风险。同时也缩短了术者的学习曲线,更好地体现创伤骨科手术机器人的精准和高效。

参考文献

- [1] CHEN X Y, FENG F, YU X S, et al. Robot-assisted orthopedic surgery in the treatment of adult degenerative scoliosis: a preliminary clinical report[J]. *J Orthop Surg Res*, 2020, 15(1): 282.
- [2] LI Y Q, ZHANG D H, WU H Z, et al. Minimally invasive versus conventional fixation of tracer in robot-assisted pedicle screw insertion surgery: a randomized control trial[J]. *BMC Musculoskelet Disord*, 2020, 21(1): 208.
- [3] WATANABE R, ANDO T, OSAWA M, et al. Second-look US using real-time virtual sonography, a coordinated breast US and MRI system with electromagnetic tracking technology: a pilot study[J]. *Ultrasound Med Biol*, 2017, 43(10): 2362–2371.
- [4] LEE J, AHN B. Real-time human action recognition with a low-cost RGB camera and mobile robot platform[J]. *Sensors*, 2020, 20(10): 2886.
- [5] YAMAKAWA Y, YAMAMOTO N, TOMITA Y, et al. Reliability of the garden alignment index and Valgus tilt measurement for nondisplaced femoral neck fractures[J]. *J Pers Med*, 2022, 13(1): 53.
- [6] XIONG H Z, YANG L D, BAO G, et al. Improved surgical exposure and early clinical outcomes using a femoral-release-first technique in direct anterior approach during total hip arthroplasty[J]. *J Orthop Surg Res*, 2023, 18(1): 878.
- [7] KARATAS O H, TOY E. Three-dimensional imaging techniques: a literature review[J]. *Eur J Dent*, 2014, 8(1): 132–140.
- [8] LIU Y H, YUAN Q, ZHANG S W. Three-dimensional intravital imaging in bone research[J]. *J Biophotonics*, 2019, 12(12): e201960075.
- [9] QURESHI S, LU Y, MCANANY S, et al. Three-dimensional intraoperative imaging modalities in orthopaedic surgery: a narrative review[J]. *J Am Acad Orthop Surg*, 2014, 22(12): 800–809.
- [10] BEHEIRY M E, DOUTRELIGNE S, CAPORAL C, et al. Virtual reality: beyond visualization[J]. *J Mol Biol*, 2019, 431(7): 1315–1321.
- [11] LIN H H, LO L J. Three-dimensional computer-assisted surgical simulation and intraoperative navigation in orthognathic surgery: a literature review[J]. *J Formos Med Assoc*, 2015, 114(4): 300–307.
- [12] NAVAB N, WIESNER S, BENHIMANE S, et al. Visual servoing for intraoperative positioning and repositioning of mobile C-arms [M]//LARSEN R, NIELSEN M, SPORRING J., Eds. *Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention-MICCAI 2006*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2006: 551–560.
- [13] TUCKER E W, FOTOUHI J, LEE S C, et al. Towards clinical translation of augmented orthopedic surgery: from pre-op CT to intra-op X-ray via RGBD sensing[C]//*Medical Imaging 2018: Imaging Informatics for Healthcare, Research, and Applications*. February 10–15, 2018. Houston, USA. SPIE, 2018.
- [14] HAJEK J, UNBERATH M, FOTOUHI J, et al. Closing the calibration loop: an inside-out-tracking paradigm for augmented reality in orthopedic surgery[C]//*International Conference on Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention*. Cham: Springer, 2018: 299–306.

(收稿日期:2023-12-17 本文编辑:朱嘉)