

## 创伤骨科远程手术机器人系统远程治疗股骨颈骨折的疗效分析

贺杰<sup>1,2,5</sup>, 赵晶鑫<sup>1</sup>, 刘光平<sup>1</sup>, 曹文豪<sup>1</sup>, 刘浩宇<sup>1,2</sup>, 詹纳智<sup>1,2</sup>, 郭浩<sup>2,3</sup>, 祁麟<sup>1</sup>, 何昆仑<sup>6</sup>, 陈华<sup>1,2,4</sup>

<sup>1</sup>解放军总医院第四医学中心骨科医学部, 北京 100048; <sup>2</sup>解放军医学院, 北京 100853; <sup>3</sup>武警北京市总队医院外二科, 北京 100027; <sup>4</sup>国家骨科与运动康复临床医学研究中心, 北京 100048; <sup>5</sup>联勤保障部队第989医院, 河南洛阳 410000; <sup>6</sup>解放军总医院医学创新研究部, 北京 100853

**摘要:**背景 股骨颈骨折发生率高, 其治疗时闭合复位、微创置钉空间小, 易导致螺钉切出至关节囊, 产生严重并发症, 如何闭合微创精准置入螺钉是临床技术难题。目的 比较远程交互式手术与徒手经皮置钉治疗股骨颈骨折的疗效。方法 回顾性分析2023年1月—2024年6月解放军总医院骨科医学部创伤骨科收治的股骨颈骨折患者临床资料, 按照手术方式分为远程手术组和徒手置钉组。比较两组患者手术时间、术中出血量、术中导针调整次数、术中透视次数、骨折愈合时间、髋关节功能Harris评分及术后并发症等。结果 共纳入30例患者, 其中远程手术组15例, 男10例, 女5例, 年龄(48.20±14.09)岁; 徒手置钉组15例, 男9例, 女6例, 年龄(47.33±16.44)岁; 两组年龄、性别差异无统计学意义( $P>0.05$ )。远程手术组手术时间[(1.70±0.24) h vs (2.19±0.63) h,  $P=0.008$ ]、术中出血量[(23.67±9.35) mL vs (55.00±36.29) mL,  $P=0.004$ ]、导针调整次数(1.93±0.88 vs 6.33±2.77)和术中透视次数(5.13±1.35 vs 11.67±4.04)均低于徒手置钉组, 差异有统计学意义( $P<0.01$ )。两组均得到随访, 远程手术组术后骨折愈合时间低于徒手置钉组[(17.00±2.33)周 vs (25.00±2.85)周], Harris评分高于徒手置钉组(82.73±6.31 vs 72.27±12.52), 差异均有统计学意义( $P<0.01$ )。术后并发症中, 徒手置钉组有3例螺钉部分切出, 导致骨折端不稳, 存在骨折延迟愈合; 远程手术组螺钉均在位。结论 创伤骨科远程手术机器人系统可对骨折端进行良好复位, 缩短手术时间, 减少术中透视次数, 术后随访髋关节功能Harris评分有优势, 是一种治疗股骨颈骨折的效果良好的手术方式。

**关键词:**股骨颈; 空心钉; 骨折; 远程医学; 手术机器人

中图分类号: R687.1; R683.4

文献标志码: A

文章编号: 2095-5227(2025)08-0737-06

DOI: 10.12435/j.issn.2095-5227.24112401

引用本文: 贺杰, 赵晶鑫, 刘光平, 等. 创伤骨科远程手术机器人系统远程治疗股骨颈骨折的疗效分析 [J]. 解放军医学院学报, 2025, 46 (8): 737-742.

### Clinical outcomes of trauma orthopedic telesurgical robotic system for remote treatment of femoral neck fractures

HE Jie<sup>1,2,5</sup>, ZHAO Jingxin<sup>1</sup>, LIU Guangping<sup>1</sup>, CAO Wenhao<sup>1</sup>, LIU Haoyu<sup>1,2</sup>, ZHAN Nazhi<sup>1,2</sup>, GUO Hao<sup>2,3</sup>, QI Lin<sup>1</sup>, HE Kunlun<sup>6</sup>, CHEN Hua<sup>1,2,4</sup>

<sup>1</sup>Department of Orthopaedic Surgery, the Fourth Medical Center of PLA General Hospital, Beijing 100048, China; <sup>2</sup>Chinese PLA Medical School, Beijing 100853, China; <sup>3</sup>The Second Surgical Department, Beijing Municipal Corps Hospital of Chinese People's Armed Police Force, Beijing 100027, China; <sup>4</sup>National Clinical Research Center for Orthopedics, Sports Medicine & Rehabilitation, Beijing 100048, China; <sup>5</sup>No. 989 Hospital of the Joint Logistics Support Force of the Chinese People's Liberation Army, Luoyang 410000, Henan Province, China; <sup>6</sup>Medical Innovation Research Department of PLA General Hospital, Beijing 100853, China

Corresponding author: CHEN Hua. Email: chenhua0270@126.com

**Abstract: Background** Femoral neck fractures have a high incidence rate. During treatment, closed reduction and minimally invasive screw placement are challenging due to limited space, which can easily lead to screw cut-out into the joint capsule, resulting in serious complications. Achieving accurate, minimally invasive, and closed screw placement is a significant clinical technical challenge. **Objective** To compare the efficacy of remote interactive surgery with freehand percutaneous nailing for the treatment of femoral neck fractures. **Methods** Clinical data about patients with femoral neck fracture admitted to the Department of Trauma Orthopaedics, Department of Orthopaedic Medicine, Chinese PLA General Hospital from January 2023 to June 2024 were retrospectively analyzed. According to the methods, patients were divided into tele-surgery group (treated by telesurgery) and freehand nailing group (freehand nailing). The operation time, intraoperative bleeding, number of intraoperative guide pin

收稿日期: 2024-11-24

基金项目: 科技创新2030-新一代人工智能重大项目(2021ZD0140410)

第一作者: 贺杰, 在读硕士, 主治医师。Email: 1041748569@qq.com

通信作者: 陈华, 主任医师, 教授, 博士生导师。Email: chenhua0270@126.com

adjustments, number of intraoperative fluoroscopy, fracture healing time, Harris score of hip function and postoperative complications were compared between the two groups. **Results** A total of 30 patients were included, including 15 patients in the telesurgery group, 10 males and 5 females, aged (48.20±14.09) years old; 15 patients in the freehand nailing group, 9 males and 6 females, aged (47.33±16.44) years old, and the differences in age and gender between the two groups were not statistically significant ( $P>0.05$ ). The operation duration ([1.70±0.24] h vs [2.19±0.63] h,  $P=0.008$ ) and intraoperative haemorrhage ([23.67±9.35] mL vs [55.00±36.29] mL,  $P=0.004$ ) in the telesurgery group were lower than those in the freehand pinning group. The differences in the number of guide pin adjustments (1.93±0.88 vs 6.33±2.77) and the number of intraoperative fluoroscopies (5.13±1.35 vs 11.67±4.04) between the two groups were statistically significant (both  $P<0.01$ ). Both groups were followed up, and the postoperative fracture healing time in the telesurgery group was lower than that in the unarmed nailing group ([17.00±2.33] weeks vs [25.00±2.85] weeks), and the Harris score was higher than that in the unarmed nailing group ([82.73±6.31] vs [72.27±12.52]), with statistically significant differences (both  $P<0.01$ ). In postoperative complications, 3 cases of partial screw cut-out were observed in the freehand screw placement group, resulting in mechanical instability at the fracture site and subsequent delayed union, whereas all screws remained in anatomical position in the robot-assisted surgical group. **Conclusion** This system can provide good repositioning of the fracture end, shorten the operation time, reduce the number of intraoperative fluoroscopies, and have the advantage of Harris score of hip function in postoperative follow-up, which is an effective surgical procedure for the treatment of femoral neck fracture.

**Keywords:** femoral neck; hollow nail; fracture; telemedicine; remote interaction

**Cited as:** He J, Zhao JX, Liu GP, et al. Clinical outcomes of trauma orthopedic telesurgical robotic system for remote treatment of femoral neck fractures[J]. Acad J Chin PLA Med Sch, 2025, 46(8): 737-742.

股骨颈骨折是极为常见的髋部骨折类型，占全身骨折的3.6%，髋部骨折的48%~54%<sup>[1]</sup>。目前保髋手术方式通常采用透视下闭合徒手螺钉置入，但因个人经验和操作习惯，存在需要反复调整导针或空心螺钉的可能<sup>[2-3]</sup>，这会导致股骨头血运受到破坏，存在骨不愈合或股骨头坏死可能<sup>[4-5]</sup>；同时，透视次数多，也存在医源性放射性损伤可能<sup>[6-7]</sup>。为解决术中精准复位、固定和可视化的问题，解放军总医院骨科医学部团队研发创伤骨科远程手术机器人系统。此系统精准度高，可实时监测术中复位情况，全程透视无遮挡，术中可完成C臂视觉跟随及术中置钉螺钉通道规划。伴随着5G时代的到来，信息传输同步化技术的成熟，本团队联合开发混合增强现实功能的远程操作系统，应用优质医疗资源下沉，指导基层医院开展技术，缩短患者转诊就诊的距离差，并有效缩短术前待术时间的时差。本研究分别对采用远程交互式手术机器人系统和传统徒手经皮置钉治疗股骨颈骨折的患者进行回顾性分析，比较两种方式在置钉精准性方面(导针调整次数和术中透视次数)的差异，并探讨创伤骨科远程手术机器人系统在股骨颈骨折复位与固定方面的优势，促进外科手术简单化、标准化。

## 1 对象与方法

### 1.1 研究对象

本研究为类实验研究，选取2023年1月—2024年6月解放军总医院第四医学中心骨科医学部创伤骨科收治的患者。纳入标准：(1)新鲜闭合性

单侧股骨颈骨折；(2)同意采用远程交互式手术辅助置钉或徒手经皮置钉；(3)临床及影像学资料均完备。排除标准：(1)病理性股骨颈骨折；(2)闭合难复性股骨颈骨折；(3)局部软组织条件感染，不满足经皮内固定；(4)严重心肺疾病无法耐受手术；(5)随访期间资料不全的患者。本研究经解放军总医院第四医学中心医学伦理委员会批准(编号：2023KY147-KS001)，所有患者签署知情同意书。

### 1.2 创伤骨科远程手术机器人系统

创伤骨科远程手术机器人系统主要由全透视多功能手术牵引床、HoloSight知见创伤手术机器人、105°大开口三维透视C臂机及混合智能远程操作系统组成(北京诺亦腾科技发展有限公司，编号G2302001-001，型号DY001)。见图1。

(1) HoloSight知见创伤手术机器人：应用“体素学注册方法”和“特征识别与一键匹配技术”，基于光学定位与追踪技术，实现虚拟骨折部分与真实结构的耦合匹配，三维配准精度0.29 mm，注册精度0.24 mm，实施监视复位效果。解决了骨折微创手术治疗中“对不准”“看不见”的难题。

(2) 全透视多功能手术床：该手术床系统为全碳纤维台面，采用H型双立柱整版设计，通透性高，可实现全身上下多维度、无死角透视，解决了术中透视遮挡的难题。

(3) 105°大开口三维透视C臂机：该系统具备12寸CMOS大平板、105°扫描范围，纠正15°股骨前倾角，实现髋部标准侧位透视，可适配包括Holosight系统，以监视术中复位及置钉，提高精确度。



图1 创伤骨科远程手术机器人系统组成

Fig. 1 Composition of orthopaedic trauma telesurgical robotic system

(4)混合智能远程操作系统：该系统基于远程医疗协同云平台和医疗虚拟专网，可实现与医疗设备无缝对接、远程手术操控，双向时延优化到150 ms内，确保手术安全、手眼同步。

### 1.3 手术方式

**1.3.1 远程手术组** 远程专家位于解放军总医院第一医学中心远程医学中心；临床手术操作医师和患者位于解放军总医院第四医学中心手术室的远程手术室，相距6 000 m。(1)术前准备：利用术前三维CT数据导入HoloSight系统中，建立三维骨折模型，通过骨骼模型与实时光学数据的自动智能注册，实现虚拟现实的高精度匹配。通过混合智能远程操作系统建立手术室与远程手术中心信息传输链，专家可远程进行HoloSight 主控台操作共享，实时监视术中操作并予以指导。(2)术区准备：患者采取仰卧位，全透视多功能手术床调整至合适操作高度并确保HoloSight 光学定位无遮挡，将HoloSight 创伤手术机器人系统注册并激活其示踪器、标准仪及导针套筒。透视医师使用105°大开口三维透视镜对患侧髋关节正位、侧位进行透视，确保辅助定位器内部的刚性标记全部可见，结合辅助定位器按照特定序列分布的标记点进行图像分析匹配，通过屏幕上数字的改变以保证在复位过程中的复位质量。(3)手术操作：术区常规消毒铺单，远程专家在远程手术中心通过混合智能远程操作系统，实时追踪复位质量，可视频指导手术医师如何进行良好复位。股骨颈牵引复位后，专家通过远程系统控制HoloSight 手术机器人主控台，规划螺钉路径，并指导选取与患者骨折部位长度及粗细相匹配的螺钉。手术医师按照专家规划螺钉路径，将导针与带有标

记点的套筒组合，观察“置钉模块”窗口，调整套筒方向，当屏幕显示为相匹配的位置时(即同心圆画面)，导针连同套筒经皮直至骨盆骨皮质表面，再次利用“置钉模块”窗口监测套筒位置，移动套筒以确定进针方向及深度，导针延长线穿过预设路径后，钻入导针，到达指定位置及深度后，按照专家选取的匹配螺钉拧入并加压固定。

**1.3.2 徒手置钉组** 手术医师根据术中C臂透视镜监测股骨近端正侧位，于大转子下方5~8 cm处经皮徒手置入平行于股骨颈轴线的第1枚导针。然后将“品”字形定位器置入导针中，按照标定的第1枚导针方向，依次置入第2、3枚导针。通过反复透视调整入针位置、角度及深度，确认导针无切出，位置良好后，依次拧入3枚空心螺钉加压固定。

### 1.4 围术期处理

术前完善双下肢血管彩超排除下肢深静脉血栓，如有必要可多学科会诊进行合并伤的诊疗。术后常规予以镇痛、抗感染、补充血容量及抗凝治疗。及早指导患者行髋、膝、踝关节的功能康复锻炼(如股四头肌等长训练及踝泵训练)，促进患肢功能尽早恢复。术后2周复查X线检查，观察术中复位效果及术后骨折愈合情况。

### 1.5 疗效评价指标

(1)主要评价指标：即术中指标评价，包括术中记录手术时间、术中出血量、术中导针调整次数、术中透视次数等。(2)次要评价指标：即术后指标评价，包括术后记录骨折愈合时间、髋关节功能Harris评分及术后并发症等。远程手术组和徒手置钉组均为同一组手术医师操作完成。

## 1.6 统计学方法

采用SPSS 26.0软件进行统计学分析。计量资料以 $\bar{x}\pm s$ 表示,计数资料以例数(百分比)表示,组间比较采用独立样本 $t$ 检验;以 $P<0.05$ 为差异有统计学意义。

## 2 结果

### 2.1 两组一般资料比较

2023年1月—2024年6月解放军总医院骨科医学部创伤骨科治疗股骨颈患者15例,其中采用远程交互式手术15例(远程手术组),男10例,女5例,年龄(48.20±14.09)岁;徒手置钉15例(徒手置钉组),男9例,女6例,年龄(47.33±16.44)岁。两组患者术前一般资料见表1。

表1 两组患者一般资料

Tab. 1 General information of patients in the two groups

指标	远程手术组 (n=15)	徒手置钉组 (n=15)	$\chi^2/t$ 值	$P$ 值
性别(男/女)/例	10/5	9/6	-	-
年龄(岁, $\bar{x}\pm s$ )	48.20±14.09	47.33±16.44	0.878	0.250
受伤时间距离入院 平均时间/(h, $\bar{x}\pm s$ )	16.54±0.74	17.35±1.59	0.093	0.633

### 2.2 两组围术期指标比较

远程手术组的手术时间、术中出血量、术中导针调整次数及术中透视次数均小于徒手置钉组( $P<0.01$ )。见表2。

表2 两组术中评价指标比较( $\bar{x}\pm s$ )

Tab. 2 Comparison of intraoperative evaluation indexes between the two groups ( $\bar{x}\pm s$ )

指标	远程手术 组(n=15)	徒手置钉组 (n=15)	$t$ 值	$P$ 值
手术时间/h	1.70±0.24	2.19±0.63	4.975	0.008
术中出血量/mL	23.67±9.35	55.00±36.29	17.379	0.004
术中导针调整次数/次	1.93±0.88	6.33±2.77	3.440	<0.001
术中透视次数/次	5.13±1.35	11.67±4.04	13.109	<0.001

### 2.3 两组疗效指标比较

远程手术组的骨折愈合时间和术后髋关节Harris评分相比徒手置钉组均具有明显优势( $P<0.01$ ),差异有统计学意义。见表3。

### 2.4 两组术后并发症比较

两组术后均无切口感染、下肢深静脉血栓形成。远程手术组骨折良好愈合14例,股骨头坏死1例。徒手置钉组骨折良好愈合10例,骨折延迟愈合3例,均为螺钉切出所致骨折端固定不稳所致,

表3 两组患者术后疗效评价指标对比( $\bar{x}\pm s$ )

Tab. 3 Comparison of postoperative clinical outcomes between the two groups ( $\bar{x}\pm s$ )

指标	远程手术组 (n=15)	徒手置钉组 (n=15)	$t$ 值	$P$ 值
骨折愈合时间/周	17.00±2.33	25.00±2.85	2.304	<0.001
髋关节Harris评分	82.73±6.31	72.27±12.52	7.066	0.008

股骨头坏死2例。远程手术组术后并发症发生率为6.67%,徒手置钉组术后并发症为33.3%。见表4。

表4 两组患者术后并发症情况

Tab. 4 Postoperative complications of patients in the two groups

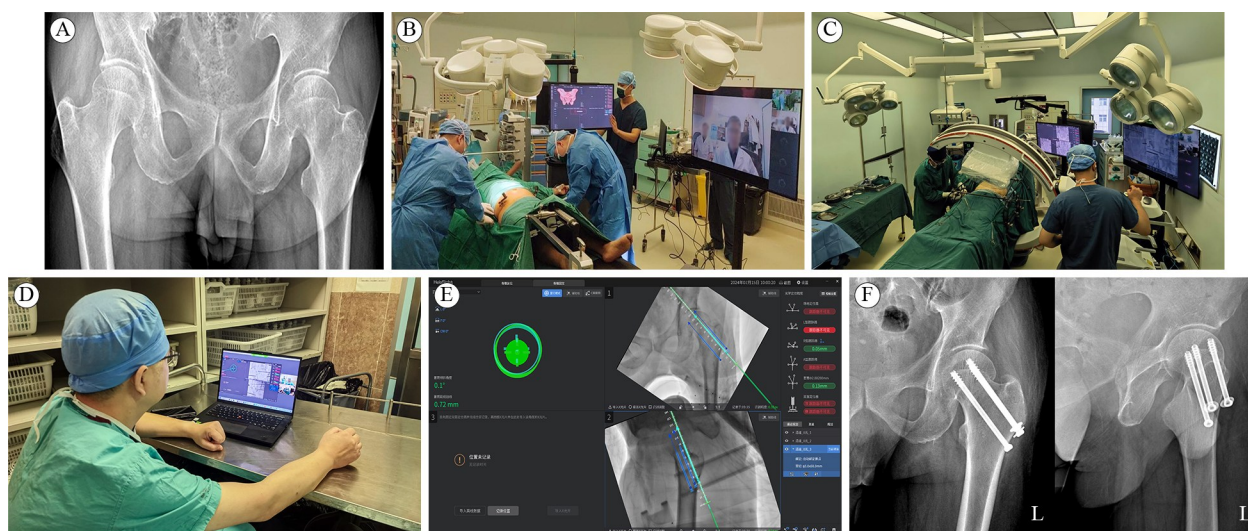
指标	远程手术组(n=15)	徒手置钉组(n=15)
骨折端延迟愈合/例	0	3
股骨头坏死/例	1	2
并发症发生率/%	6.67	33.3

### 2.5 典型病例

患者男,67岁,主因外伤至左侧股骨颈骨折入住解放军总医院第四医学中心骨科医学部,入院完善相关术前检查后,术前左下肢呈外旋、外展、短缩畸形于解放军总医院第一医学中心远程手术中心行远程交互式手术,术中手术时间1.5 h,出血量10 mL,术中透视次数4次,术后2周复查骨折解剖复位,螺钉无切出。见图2。

## 3 讨论

随着微创技术的普及,闭合复位空心螺钉固定已成为股骨颈骨折治疗的重要术式。然而,股骨颈特殊的解剖结构导致后上方螺钉易发生切出,可能损伤上支持带动脉,增加医源性血管损伤风险,进而引发术后骨不连、股骨头坏死等并发症<sup>[8-10]</sup>。为提高手术精准性,生物力学和机械动力学的研究不断深入,骨科手术机器人辅助置钉技术不断发展,相比传统手术其置钉的精准性显著提高<sup>[11-12]</sup>。为解决复杂手术的快速就诊,把握治疗黄金时间窗,基于网络通讯技术的研发,各类远程手术逐步发展。2001年Marescaux等<sup>[13]</sup>使用Zeus机器人手术系统在美国为身处法国患者实行腹腔镜手术,打开了人体远程手术先河<sup>[14]</sup>。2019年,Acemoglu等<sup>[15]</sup>依托5G传输为远距离实验室实施激光纤维声带手术<sup>[16]</sup>;同年国内学者使用5G传输为3 000 km以外的患者远程实施帕金森“脑起搏器”植入手术,为世界首例超远程人体手术<sup>[17]</sup>。本研究采用创伤骨科远程手术机器人系统,集成了体



A: 术前正位片; B~C: 远程手术机器人手术间布局; D: 远程专家远程规划画面; E: HoloSight 知见创伤手术机器人术中规划主机界面; F: 术后2周复查(左侧髋关节正侧位)。

图2 典型病例: 67岁男性患者左侧股骨颈骨折

Fig. 2 Typical case of a 67-year-old male patient with fracture of left femoral neck

素学注册法、高精度光学追踪和混合智能远程操作系统,通过术前精准规划和术中远程专家协同操作,远程交互式手术中在手术时间(缩短32%)、术中出血量(减少45%)、导针调整次数(降低3.8次/例)和透视次数(减少7.2次/例)等核心指标上均显著优于徒手置钉组。这一技术性突破性进展有利于微创闭合治疗股骨颈骨折,便于临床开展。

既往研究表明,传统闭合复位空心螺钉固定术后螺钉切出率居高不下,继而导致继发性医源性损伤可能。在Yuan等<sup>[8]</sup>的报道中,104例股骨颈骨折患者采用闭合复位空心螺钉内固定治疗,术后复查髋关节三维CT显示,54%患者出现螺钉切出表现。Kutter等<sup>[9]</sup>报道,在73例股骨颈骨折患者中,有43例患者术后复查髋部CT显示存在螺钉切出。即使伴随着导航技术的发展,He等<sup>[10]</sup>报道应用机器人导航辅助经皮置钉,仍存在16.67%的患者术后复查髋部CT显示螺钉切出可能。在本组研究中,操作医师均为年轻骨科医师,徒手置钉组中,有3例患者因螺钉切出导致固定结构不稳定而出现骨折延迟愈合,术后并发症发生率高于远程手术组(33.3% vs 6.7%)。相比之下,本研究中远程手术机器人系统通过路径监测预警模块和实时影像反馈,有效降低了螺钉切出风险。此外,与传统Mako机器人相比,其主要应用于全髋关节置换术、全膝关节置换术及单髌关节置换术,采用术中导航与反馈技术,可实现亚毫米级别的精准植入物定位和截骨控制<sup>[12]</sup>,HoloSight知见创伤骨科

手术机器人系统利用手持套筒及刚性固定影像相匹配,解决了“骨折看不见,复位对不准,操作不便捷”的难题,可为闭合复位提供了更适配的解决方案。

本研究应用创伤骨科远程手术机器人系统,其优势如下。(1)精准化操作体系:基于体素学注册法和高精度光学追踪技术,系统可实时显示手持套筒与骨折复位虚拟影像;结合混合智能远程操作系统,远程专家能够同步监测HoloSight工作窗数据变化,指导术者精准复位与置钉,显著缩短术中注册时间<sup>[18]</sup>;相较于天玑机器人机械臂置钉<sup>[1]</sup>,HoloSight知见机器人系统是在“不改变医师操作习惯的情况下”进行辅助通道螺钉的规划及置入,便捷性和灵活度更高。(2)远程协作与低损伤优势:通过可视化操作减少导针反复调整次数,可保护股骨头血供与髓腔骨量,还显著降低医源性放射性损伤(透视次数减少)<sup>[19-20]</sup>。本研究中,与徒手置钉组相比,远程手术组在导针调整次数( $1.93 \pm 0.88$  vs  $6.33 \pm 2.77$ )和术中透视次数( $5.13 \pm 1.35$  vs  $11.67 \pm 4.04$ )上具有明显优势。(3)多维度安全保障:术中路径监测预警模块可实时识别螺钉切出风险,结合全透视多功能手术床的无遮挡影像验证,确保螺钉位置符合规划要求<sup>[21]</sup>,提高精准度,术后即刻透视验证减少复位偏差,从而降低骨不连及股骨头坏死风险。本研究术后结果显示,远程手术组术后骨折愈合时间低于徒手置钉组[( $17.00 \pm 2.33$ )周 vs ( $25.00 \pm 2.85$ )周],Harris评分

高于徒手置钉组(82.73±6.31 vs 72.27±12.52), 术后并发症发生率低于徒手置钉组(6.67% vs 33.3%)。 (4)网络传输技术创新: 该系统采用多链路聚合网络传输系统, 基于广域网多途径传输算法研究, 根据数据优先级, 建立多条路径, 实时分析网络, 预测瓶颈, 并智能调度路径, 感知医疗内容的广域多路径传输算法, 增强传输效率, 具备强大的故障容灾与自恢复能力; 通过提供差异化的QoS (Quality of Service)保障, 优先保障远程手术等高优先级数据的传输, 提高远程交互式手术的精确度和安全性。15例远程手术平均总延迟为(95.53±24.12) ms, 未出现数据包丢失现象, 数据传输稳定, HoloSight知见创伤骨科手术机器人在远程控制下置入螺钉导针的精度始终保持在0.26 mm内, 实现了低延时、高清晰度远程影像传输, 可保证术中操作者与远程专家实现手眼同步。远程专家“手把手”式跨空间指导, 助力基层医师实现手术标准化与同质化<sup>[22]</sup>。通过建立完备的远程医疗系统有利于扩大优质医疗资源的覆盖范围, 降低患者转诊需求, 减少途中转运风险和费用。特殊时期尤其具有重要意义, 如战时或灾难期间, 后方优势医疗资源前伸至一线救治单元, 通过远程系统指导, 复杂骨折手术可在前线完成, 牢牢把握黄金救治时间窗, 降低死亡率和致残率。为实现信息在偏远地区、高海拔地区及特殊救治环境下的弱网环境下的信息通畅, 在多链路信息聚合传输技术的研发中, 开发多链路优先级聚合算法, 支持接入互联网、4G、5G和卫星等各种可利用的网络异构链路, 通过智能调度算法来实现多链路的带宽叠加、负载均衡、拥塞避让、故障自修复, 以达到低延时和高可靠的稳定传输目的。

本研究的局限性在于样本量较小, 可能影响结果稳定性和普适性, 如术后并发症发生率等指标。未来需通过多中心大样本临床研究进一步验证该技术的有效性。此外, 当前系统对极端网络环境的适应性仍需优化, 尽管多链路算法已初步解决弱网传输问题, 但复杂地形下的实时影像交互效率仍有提升空间。

创伤骨科远程手术机器人系统通过精准规划、实时监测与智能网络传输, 显著提升了股骨颈骨折闭合复位的安全性及效率, 为降低螺钉切出率和术后并发症发生率提供了创新解决方案, 其远

程协作模式不仅推动优质医疗资源下沉, 更在特殊救治场景中展现出突破时空限制的潜力。随着AI与深度学习技术的进一步融合, 未来有望实现骨折自动复位与智能化决策, 为数字化骨科发展提供新的参考。

**作者贡献** 贺杰: 文章撰写, 文章构思, 框架设计; 赵晶鑫、刘光平、曹文豪、刘浩宇、詹纳智、郭浩、祁麟: 资料收集和整理; 何昆仑、陈华: 对文章的知识性内容作批评性审阅。

**利益冲突** 所有作者声明无利益冲突。

**数据共享声明** 本论文相关数据可依据合理理由从作者处获取, Email: 1041748569@qq.com。

#### 参考文献

- 1 黄复铭, 张信哲, 李伟雄, 等. 机器人辅助导航与徒手经皮空心螺钉治疗中青年股骨颈骨折的疗效比较 [J]. 中华创伤骨科杂志, 2023, 25 (11): 979-985.
- 2 舒杉, 庄乐彬, 王钢, 等. 成年人股骨颈骨折分型的研究进展 [J]. 中华创伤骨科杂志, 2022, 24 (3): 272-276.
- 3 安林, 汤欣, 张健. 股骨颈骨折倒三角空心螺钉内固定时后上方螺钉 in-out-in 的研究进展 [J]. 中华创伤骨科杂志, 2024, 26 (9): 824-828.
- 4 中华医学会骨科学分会创伤骨科学组, 中国医师协会骨科医师分会创伤专家工作委员会. 成人股骨颈骨折诊治指南 [J]. 中华创伤骨科杂志, 2018, 20 (11): 921-928.
- 5 Li JR, Xing KY, Wang WZ, et al. Dynamic parallel traction theoretical model for the application and validation in femoral neck fractures - a finite element analysis [J]. J Orthop, 2025, 64: 7-12.
- 6 胡婷婷, 袁伟, 于明, 等. 老年股骨颈骨折患者保守治疗2年生存率影响因素分析 [J]. 解放军医学院学报, 2020, 41 (7): 701-704.
- 7 Honkanen J, Forsbacka N, Strengell I, et al. Comparable results for the Femoral Neck System and three-screw fixation in femoral neck fracture treatment [J]. OTA Int, 2024, 8 (1): e351.
- 8 Yuan BJ, Shamaa MT, Aibinder WR, et al. High incidence of “in-out-in” posterosuperior screws after cannulated screw fixation of femoral neck fractures [J]. Eur J Orthop Surg Traumatol, 2020, 30 (8): 1417-1420.
- 9 Kuttner NP, Hoggard TM, Cancio-Bello AM, et al. The use of the piriformis Fossa radiographic landmark to predict “In-out-In” placement of the posterosuperior femoral neck screw [J]. J Orthop Trauma, 2023, 37 (7): 330-333.
- 10 He M, Han W, Zhao CP, et al. Evaluation of a bi-planar robot navigation system for insertion of cannulated screws in femoral neck fractures [J]. Orthop Surg, 2019, 11 (3): 373-379.
- 11 黄海, 欧阳钧. 内固定治疗成人股骨颈骨折的研究进展 [J]. 中国临床解剖学杂志, 2023, 41 (6): 751-753.
- 12 马桥桥, 郝亮, 蒋守海, 等. 双侧同期Mako机器人辅助与传统全膝关节置换术治疗膝关节关节炎的疗效比较 [J]. 中华解剖与临床杂志, 2024, 29 (6): 405-411.
- 13 Marescaux J, Leroy J, Gagner M, et al. Transatlantic robot-assisted telesurgery [J]. Nature, 2001, 413 (6854): 379-380.
- 14 刘蓬然, 叶哲伟. 中国骨科人工智能的发展现状与未来 [J]. 中华实验外科杂志, 2024, 41 (5): 906-911.