

基于虚拟现实技术的主动运动训练对儿童肱骨髁上骨折康复期肘关节功能恢复的效果研究

封芮芮

陕西能源职业技术学院医学康养学院, 陕西咸阳712000

DOI:10.62836/medicine.v3i4.1351

摘要: 目的 探讨基于虚拟现实 (Virtual Reality, VR) 技术的主动运动训练对儿童肱骨髁上骨折康复期肘关节功能恢复的效果。方法 将60例符合标准的肱骨髁上骨折康复期患儿随机分为两组, 每组30例。试验组接受常规康复训练联合基于VR技术的主动运动训练; 对照组接受常规康复训练联合基于“虚假的”沉浸式VR技术的主动运动训练。两组均治疗4周。比较两组治疗前、治疗4周后的疼痛评分 (采用Wong-Baker面部表情疼痛量表)、肘关节活动度 (ROM, 包括屈曲、伸展、旋前、旋后)、改良Mayo肘关节功能评分 (pMEPS)、以及治疗依从性 (记录完成训练计划的百分比)。结果 与治疗前比较, 两组治疗4周后的疼痛评分均降低, 肘关节ROM和pMEPS评分均升高 ($P<0.05$)。与对照组治疗4周后比较, 试验组治疗4周后的肘关节ROM (尤其屈曲、旋前旋后) 和pMEPS评分显著升高 ($P<0.05$ 或 $P<0.01$), 疼痛评分降低更明显 ($P<0.05$), 且治疗依从性显著更高 ($P<0.01$)。结论 基于VR技术的主动运动训练能有效改善儿童肱骨髁上骨折康复期的肘关节活动度、功能水平和疼痛, 并显著提高患儿的治疗依从性, 是促进肘关节功能恢复的有效辅助手段。

关键词: 虚拟现实技术; 儿童; 肱骨髁上骨折; 康复; 肘关节功能; 主动运动

Effects of Active Exercise Training Based on Virtual Reality Technology on Elbow Function Recovery in Children with Supracondylar Humeral Fractures during the Rehabilitation Period

Ruirui Feng

College of Medical and Wellness Services, Shaanxi Energy Institute, Xianyang 712000, Shaanxi

Abstract: Objective: To investigate the effects of active exercise training based on virtual reality (VR) technology on elbow function recovery in children with supracondylar humeral fractures during the rehabilitation period. Methods: Sixty children with supracondylar humeral fractures who met the inclusion criteria were randomly assigned into two groups, with 30 cases in each group. The experimental group received conventional rehabilitation training combined with active exercise training based on VR technology; the control group received conventional rehabilitation training

*基金项目: 陕西能源职业技术学院2023年校级青年教师专项项目“基于虚拟现实技术的儿童肱骨髁上骨折康复治疗方案的研究与评估”(23QNZRP07)。

作者简介: 封芮芮, 出生年份: 1996年1月, 性别: 女, 籍贯: 山西大同, 民族: 汉, 学历: 硕士, 研究方向: 基础医学。

combined with active exercise training based on “sham” immersive VR technology (or conventional training only). Both groups were treated for 4 weeks. Pain scores (assessed by the WongBaker FACES[®] Pain Rating Scale), elbow range of motion (ROM, including flexion, extension, pronation, and supination), the modified Mayo Elbow Performance Score (pMEPS), and treatment adherence (recorded as the percentage of completed training sessions) were compared between the two groups before treatment and after 4 weeks of treatment. Results: Compared with baseline, both groups showed decreased pain scores and increased elbow ROM and pMEPS scores after 4 weeks of treatment ($P < 0.05$). Compared with the control group after 4 weeks of treatment, the experimental group demonstrated significantly greater improvements in elbow ROM (particularly in flexion, pronation, and supination) and pMEPS scores ($P < 0.05$ or $P < 0.01$), a more marked reduction in pain scores ($P < 0.05$), and significantly higher treatment adherence ($P < 0.01$). Conclusion: Active exercise training based on VR technology can effectively improve elbow ROM, functional level, and pain in children with supracondylar humeral fractures during the rehabilitation period, and significantly enhance treatment adherence. It represents an effective adjunctive approach for promoting elbow function recovery.

Keywords: Virtual reality technology; Children; Supracondylar humeral fracture; Rehabilitation; Elbow function; Active exercise

肱骨髁上骨折 (Supracondylar Humerus Fracture, SCHF) 是儿童肘部常见的骨折类型之一, 约占小儿肘关节损伤的50%-70%, 其中伸直型骨折 (Gartland II、III型) 因高能量创伤机制常导致严重移位及神经血管并发症。尽管经闭合复位经皮穿针固定术可有效恢复骨性结构稳定性, 但术后制动引发的关节僵硬、肌肉萎缩及本体感觉障碍仍是阻碍功能康复的关键问题[1]。传统康复方案依赖治疗师指导的被动牵拉与器械训练, 患儿因疼痛恐惧、治疗枯燥感及认知理解局限导致的依从性低下 (文献报道脱落率>30%) [2], 极大限制了肘关节活动度 (Range of Motion, ROM) 与功能性活动能力的恢复进程。近年来, 沉浸式虚拟现实 (VR) 技术通过构建多感官交互的主动运动训练环境, 为儿童康复提供了新路径: 其以游戏化任务驱动自主神经肌肉控制 (如虚拟接球训练屈肘肌群协调性、旋拧任务激活前臂旋转肌群), 结合实时视觉反馈强化运动学习; 研究表明VR技术可提升脑卒中患者上肢康复参与度40%以上[3], 但针对儿童骨折康复期神经肌肉功能重建的应用证据仍显不足。本研究旨在验证沉浸式VR主动运动训练对SCHF患儿康

复期肘关节ROM、功能表现及治疗依从性的促进作用, 为优化儿童骨科康复策略提供循证依据。

1 资料与方法

1.1 一般材料

1.1.1 研究对象与分组

选取2023年12月至2025年12月期间, 陕西省西安及咸阳地区诊断为肱骨髁上骨折 (Gartland II型或III型) 并行闭合复位经皮克氏针内固定术后、自愿接受康复治疗的60例患儿作为研究对象。采用随机数字表法将患儿分为试验组 ($n=30$) 和对照组 ($n=30$)。两组患儿性别、年龄、骨折分型及患侧等基线资料进行比较, 差异均显示无统计学意义 ($P > 0.05$), 具有可比性 (见表1)。

1.1.2 纳入与排除标准

纳入标准: ①年龄4-12岁; ②符合肱骨髁上骨折 (Gartland II型或III型) 诊断标准[4]并行手术治疗, 术后X线片示骨折对位对线良好; ③术后2周, 生命体征稳定, 已拆除石膏托并开始康复介入; ④患儿认知功能正常, 能理解并配合评估和训

表1. 两组患儿基线资料对比 (n=30)

项目	实验组 (n=30)	对照组 (n=30)	t值/ χ^2 值	P值
年龄 (岁)	6.5±1.8	6.8±2.1	0.602	0.550
性别 (男/女)	18/12	16/14	0.277	0.599
Gartland分型 (II/III型)	17/13	15/15	0.277	0.599
患侧 (左/右)	14/16	16/14	0.267	0.606
受伤至手术时间 (d)	1.8±0.7	1.9±0.8	0.516	0.608
术后石膏固定时长 (d)	25.3±3.2	24.8±3.6	0.568	0.572
拆除石膏时屈曲缺失角 (°)	27.4±4.8	28.1±5.2	-0.542	0.590
术前健侧活动度差值 (°)	38.5±6.2	37.8±5.9	0.450	0.655

练；⑤监护人知情同意。

排除标准：①开放性骨折或合并神经、血管损伤；②既往有同侧上肢骨折或神经系统疾病史；③伴有严重认知障碍或精神疾病，无法配合治疗；④患有严重视觉、前庭功能障碍或晕动症，无法耐受VR训练；⑤合并其他系统严重疾病；⑥X线或CT检查证实存在术后异位骨化、关节内骨缺损者；⑦术中见骨骺损伤严重，可能影响远期骨骼发育者；⑧既往有癫痫病史或存在癫痫发作风险者；⑨存在严重屈光参差、未矫正的高度近视等无法通过视度调节获得清晰视觉的屈光不正者。

脱落标准：研究中途自动退出、失访或者发生严重不良事件，不宜继续接受试验者。

1.2 方法

1.2.1 治疗方法

在为期4周的干预中，两组患儿均由同一组康复治疗师实施常规康复训练，每周训练5次，每次30分钟。训练内容首先包括使用冰敷进行疼痛管理与消肿（每次10-15分钟）；随后在治疗师指导下进行肘关节无痛范围内的主动及主动-辅助关节活动度训练，重点改善屈曲、伸展、旋前和旋后功能；在此基础上，运用弹力带抗阻和小哑铃（0.5-1kg）进行肘周肌群的等张与等长收缩肌力训练；同时贯穿全程鼓励患儿在日常生活中积极使用患肢进行抓握、进食等功能性动作，以促进运动功能的泛化与应用。在常规训练基础上，两组分别增加不同的辅助训练：

（1）试验组：采用沉浸式VR主动运动训练。使用Meta Quest 2头戴式显示器和手柄。从VR康复

游戏库（如《VR康复卫士》）中筛选并定制针对肘关节主动屈曲及前臂旋前、旋后功能的游戏场景（如：虚拟接球、绘画、拧螺丝、攀岩等）。每次训练20分钟，游戏难度根据患儿表现实时调整，训练强度遵循循序渐进原则，治疗师全程在旁监护并给予鼓励。

（2）对照组：采用“伪VR”训练作为安慰对照。使用相同的VR设备，但运行的是无交互内容的沉浸式360°自然风光或海洋探索视频。患儿佩戴设备观看视频，不进行任何主动的肘关节运动，时长同样为20分钟。此设计旨在平衡VR设备本身的新奇感和试验组的主动运动效应。

1.2.2 评价指标

分别在治疗前即术后2周干预开始时、治疗4周后，由2名不知分组情况的专业康复医师进行疗效评定。

（1）疼痛程度：采用Wong-Baker面部表情疼痛评分量表（FPS-R）评估[5]，该量表由6个从微笑到哭泣的面部表情构成，适用于儿童，分值0-10分，分数越高表示疼痛越剧烈。

（2）肘关节活动度（ROM）：使用长臂医用通用量角器，由同一治疗师严格按照标准姿势测量肘关节主动屈曲、伸展角度，以及前臂旋前、旋后的终极角度。记录屈曲挛缩角（伸展缺失角）和总活动弧。

（3）肘关节功能：采用改良版Mayo肘关节功能评分（pMEPS）[6]。该量表满分为100分，包括疼痛（45分）、日常功能（25分）、关节活动度（20分）、稳定性（10分）四个维度，评分>90分

为优, 75-89分为良, 60-74分为可, <60分为差。

(4) 治疗依从性: 治疗依从性: 记录每位患儿实际完成的训练次数, 计算依从性 (%) = (实际完成次数/计划完成总次数) × 100%。同时, 详细记录每次训练未完成的具体原因 (包括主动放弃、疼痛中断、不良事件退出等), 作为依从性事件的分类分析依据。

1.3 统计学处理

本研究数据分析使用SPSS26.0统计软件完成。连续变量经Shapiro-Wilk检验证实服从正态分布, 采用均值±标准差 ($\bar{x} \pm s$) 的形式进行描述。治疗前后同一组别的比较均使用配对t检验进行统计, 两组间的比较采用独立样本t检验。分类资料以例数与百分比 (%) 表示, 组间比较采用 χ^2 检验。所有统计检验结果均以 $P < 0.05$ 视为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 基线资料比较

各计量资料经Shapiro-Wilk检验均符合正态分布 ($W = 0.939 \sim 0.986$, $P = 0.071 \sim 0.720$), 满足参数检验前提条件。干预前两组在年龄、术后石膏固定时长、拆石膏时屈曲缺失角、术前健侧活动度差值等连续变量及性别、Gartland分型、患侧等分类变量上差异均无统计学意义 ($P > 0.05$), 具有可比性。(见表1)

2.2 两组干预前后各项指标比较

2.2.1 疼痛程度 (FPS-R评分)

组内比较显示, 干预4周后, 两组患儿的FPS-R评分均较干预前显著降低 (均 $P < 0.001$)。组间比较显示, 干预前, 两组评分差异无统计学意义 ($P > 0.05$); 干预4周后, 试验组FPS-R评分显著低于对照组, 表明差异有统计学意义 ($P < 0.05$)。(见表2)

2.2.2 肘关节活动度 (ROM)

组内比较显示, 干预4周后, 两组患儿肘关节屈曲、伸展及前臂旋前、旋后活动度均较干预前显

著改善 (均 $P < 0.001$)。组间比较显示, 干预前两组各方向ROM差异均无统计学意义 (均 $P > 0.05$); 干预4周后, 试验组在肘关节屈曲、旋前及旋后活动度的改善上明显优于对照组, 差异有较高统计学意义 (均 $P < 0.01$); 两组在伸展活动度 (即屈曲挛缩角的改善) 上的差异无统计学意义 ($P > 0.05$)。(见表3)

2.2.3 肘关节功能 (pMEPS评分)

组内比较显示, 干预4周后, 两组患儿pMEPS评分均较干预前显著提高 (均 $P < 0.001$)。组间比较显示, 干预前两组评分差异无统计学意义 ($P > 0.05$); 干预4周后, 试验组pMEPS评分显著高于对照组, 差异有高度统计学意义 ($P < 0.01$)。(见表2)

2.2.4 治疗依从性

在干预4周后, 试验组的平均治疗依从性显著高于对照组, 差异有高度统计学意义 ($P < 0.01$)。(见表2)

3 讨论

儿童肱骨髁上骨折术后康复的核心挑战在于如何克服患儿的疼痛恐惧与低依从性。本研究将沉浸式虚拟现实 (VR) 技术整合入常规康复方案, 旨在通过提升训练过程的趣味性与参与度, 观察其对肘关节功能恢复的实际效果。

研究结果显示, VR技术最突出的贡献在于显著提升了治疗依从性。试验组高达94.2%的依从率, 其根本原因在于VR成功实现了康复训练的“游戏化”转化[7]。抽象的指令被具象为接球、绘画等互动任务, 使患儿在追求游戏目标的过程中, 无意识地完成了大量重复性、针对性的主动运动。这种基于内在兴趣的参与模式, 是传统说教与被动训练难以比拟的, 为后续的功能改善奠定了关键的行为基础[8]。

在关节功能恢复上, VR训练表现出对特定运动维度的选择性优势。数据显示, 试验组在肘关节屈曲及前臂旋前、旋后活动度的改善上更为显著。

表2. 两组干预前后疼痛评分、功能评分及依从性比较

指标	组别	干预前	干预4周后	组内P值	组间P值（干预后）
FPS-R评分（分）	试验组	5.8±1.2	1.9±0.7	<0.001	0.013
	对照组	5.7±1.3	2.8±1.0	<0.001	
pMEPS评分（分）	试验组	45.2±8.5	88.4±5.2	<0.001	0.003
	对照组	46.8±7.9	79.6±6.8	<0.001	
依从性（%）	试验组	-	94.2±5.1	-	<0.001
	对照组	-	78.6±9.3	-	

表3. 两组干预前后肘关节活动度比较

活动方向	组别	干预前	干预4周后	组内P值	组间P值（干预后）
屈曲	试验组	85.6±15.3	125.6±8.3	<0.001	<0.001
	对照组	83.9±16.1	113.2±9.1	<0.001	
伸展（缺失角）	试验组	28.5±10.2	10.2±5.1	<0.001	0.124
	对照组	30.1±9.7	11.8±6.3	<0.001	
旋前	试验组	45.1±12.8	78.5±7.6	<0.001	0.002
	对照组	43.8±13.5	70.3±10.2	<0.001	
旋后	试验组	48.3±11.5	81.4±8.9	<0.001	0.005
	对照组	46.9±12.1	73.6±9.8	<0.001	

这与VR游戏的任务设计直接相关：模拟拧螺丝、转动方向盘等场景，能精准引导并强化前臂旋转肌群的协调运动；而为了完成虚拟交互，患儿也须主动进行更大范围的屈肘。这种任务导向的训练模式，结合系统提供的实时视觉反馈，有效促进了运动控制能力的再学习。然而，在改善肘关节伸展（即减轻屈曲挛缩）方面，两组未显示差异。这提示，对于需要较强被动牵伸的康复环节，当前VR方案提供的力学刺激强度可能不足，其优势更多体现在调动主动运动上。

值得关注的是，试验组的疼痛缓解程度也更明显。这一结果是多重机制的协同作用，除“分心效应”外，VR的强沉浸感可通过占据患儿注意力，降低其对疼痛信号的感知与处理能力；且主动运动训练本身可促进局部血液循环、加速炎症介质清除，从外周层面减轻疼痛刺激。此外，VR训练所诱导的主动运动模式还可通过促进大脑运动皮层重组和神经可塑性变化，在神经环路层面调节疼痛感知。近期研究表明，VR干预还可通过调节促炎与抗炎因子水平发挥镇痛作用[9]。这些机制相互协同，共同打破了“疼痛-回避-功能下降”的恶性循环，形成了功能提升与疼痛缓解相互促进的良性局面。

本研究未设置无VR设备的常规康复对照组，VR主动训练相对于纯常规训练的增量效应尚需后续研究进一步验证。此外，本研究结论的推广需考虑以下局限：本研究为单中心设计，不同地区医疗条件、康复资源配置及患儿家庭背景可能存在差异，研究结果的外推性有待多中心研究验证；儿童群体的年龄跨度较大（4-12岁），不同年龄段儿童的认知能力、运动学习能力及对VR设备的接受度存在显著差异[10]，学龄前儿童可能更依赖视觉刺激和简单任务，而学龄期儿童则能完成更复杂的游戏化训练，本研究的样本量尚不足以支持按年龄段进行亚组分析，未来需扩大样本开展年龄分层研究；VR设备在低龄儿童中的佩戴适配性（如瞳距调节范围）也可能影响干预效果的一致性。

综上所述，沉浸式VR技术通过革新康复训练的形式，能有效破解儿童康复中的依从性难题，并由此促进肘关节主动运动功能的恢复，尤其在前臂旋转和屈曲功能上效益明显。尽管其在解决关节挛缩方面存在局限，但作为一种能显著提升患儿参与动机的创新型辅助工具，具有明确的临床应用价值。未来研究可着力于开发结合轻度阻力与牵伸反馈的VR模块。已有研究将机器人系统与VR结合，通过力觉反馈实现上肢强化训练和运动控制恢

复; VR与康复机器人结合的多反馈训练方法可将虚拟物体的阻抗力反馈至患者关节[11]。然而,专门针对儿童肘关节屈曲挛缩的VR牵伸模块尚未见成熟报道,将上述技术与儿童肘关节康复的具体需求相结合,有望形成更全面的康复解决方案。

参考文献

- [1] 袁伶俐,王胜,耿春辉,等.经皮交叉克氏针固定治疗儿童肱骨髁上骨折并发症分析[J].临床误诊误治,2017,30(06):53-57.
- [2] 毛小丽,郑苗苗.童趣化游戏式功能锻炼模式在提升肱骨髁上骨折患儿锻炼依从性和肘关节功能中的效果[J].国际护理学杂志,2026(8):1465-1469.
- [3] 杨宏伟,王娟,吉辉,等.虚拟现实技术对脑卒中患者肢体康复干预效果的系统评价再评价[J].中华护理杂志,2025,60(17):2150-2157.
- [4] 张沛.闭合复位经皮穿针内固定治疗儿童肱骨髁上骨折疗效及影像学评估[J].影像研究与医学应用,2024,8(12):194-196.
- [5] 赵线,刘韦辰,张潇昂,等.两种疼痛评分量表在学龄前患儿中的应用比较[J].中华疼痛学杂志,2024,20(6):874-880.
- [6] 刘文聪.正骨手法联合小夹板固定治疗小儿 Gartland III型肱骨髁上骨折的临床观察[J].中国民间疗法,2023,31(15):53-56.DOI:10.19621/j.cnki.11-3555/r.2023.1517.
- [7] 郭乃绮,储莉婷,姚宇凯,等.基于虚拟现实技术的康复训练对学龄前期孤独症谱系障碍儿童的疗效研究[J].中国儿童保健杂志,2025,33(11):1201-1206.
- [8] 许子涵.基于虚拟现实的上肢运动功能康复训练及评估系统研究[D].沈阳工业大学,2024.DOI:10.27322/d.cnki.gsgyu.2024.001342.
- [9] 叶森,毛红宇,张桐.虚拟现实训练对脑卒中恢复质量及血清炎症因子水平的影响[J].国际医药卫生导报,2023,29(15):2124-2128.
- [10] Children's and young people's perspectives on extended reality in paediatric rehabilitation: A qualitative study[J]. PubMed,2026.
- [11] Alashram AR. Combined robot-assisted therapy virtual reality for upper limb rehabilitation in stroke survivors: a systematic review of randomized controlled trials[J]. Neurological Sciences, 2024, 45(11): 5141-5155.

