

运动学变化情况。

便携式动态步态分析系统是一种可以实现步态参数实时动态解析的可穿戴步态分析系统，已经被国内学者应用于步态分析中，并获得良好的评估效果^[3]。

本研究采用此系统对 TKA 患者术前 1 周及术后 3 个月步态进行量化评估，总结 TKA 前后患者步态变化特点，以便更好地指导 TKA 术后患者的临床康复治疗。

1 临床资料

1.1 一般资料

患者组选取 2024 年 1 月—2024 年 10 月山东第一医科大学第二附属医院收治的 46 例行单侧 TKA 的 KOA 患者，均符合 KOA 终末期诊断标准且伴膝内翻畸形，单侧初次置换术，影像学评估显示患膝关节间隙显著狭窄或完全闭锁（Kellgren-Lawrence 分级 $\geq$ Ⅲ级），且健侧膝关节无骨关节炎表现。合并神经系统功能障碍或脊柱/足踝/髋关节等下肢运动系统病变（可能影响步态分析准确性）者及 MRI 检查膝关节内韧带/软骨等伴随损伤者排除在外。健康人组纳入同期 20 名健康成人进行步态参数测量。本临床研究经医院医学伦理委员会审批（审批编号：2024-H-035）。受试者均签署知情同意书并确认理解研究目的及风险。

1.2 手术方法

本研究手术均由同一医疗组医师完成。采用椎管内复合麻醉，选择膝关节前正中纵行切口联合内侧髌旁关节囊入路，充分暴露股骨及胫骨关节结构。术中切除前后交叉韧带、内外侧半月板及全部滑膜，并清除增生骨赘。先行股骨远端多平面截骨，后行胫骨平台截骨。同期修整髌骨表面及边缘，并清除残留滑膜组织。安装相应规格的试模假体及聚乙烯垫片，评估膝关节屈伸活动度（ROM $>120^\circ$ ）及髌骨轨迹稳定性。移除试模假体，脉冲三维冲洗关节腔，利用骨水泥分别固定股骨端和胫骨平台假体，同时处理髌骨，配合间隙垫片加压固化 12 min 后清除多余骨水泥。确认假体稳定性及关节运动学功能达标后，冲洗术野，逐层缝合切口，松止血带并评估肢体血液循环情况。

术后康复阶段Ⅰ（术后 0~7 d）：（1）关节活动度渐进性训练；（2）下肢肌群激活序列；（3）早期负重适应性训练。阶段Ⅱ（术后 4 周内）：（1）动态抗阻训练系统；（2）闭链运动训练；（3）下肢功能整合训

练。阶段Ⅲ（术后 6 周内）：（1）全负重状态下的动态稳定性训练；（2）多平面运动模式训练；（3）步态重塑基础训练。阶段Ⅳ（术后 3 个月内）：（1）多轴关节活动度强化训练；（2）三维运动分析指导的步态矫正；（3）功能性力量进阶。

1.3 步态分析方法

两组均采用便携式动态步态分析系统进行相关步态数据采集。该系统采用分布式架构设计进行数据采集（图 1）。正式测试时，受试者以平常自然的速度在平地上直线行走约 100 s。初始 40 s 为适应性行走阶段，后续 60 s 为数据采集阶段，连续采集有效步态周期数据。

检测时间为术前及术后 3 个月。分析方法与测量指标，包括步幅、着地仰角、离地仰角、步高、摆动期峰值速度等运动学指标，以及单足支撑时长、单侧摆动时长、单足支撑时长等时间参数。

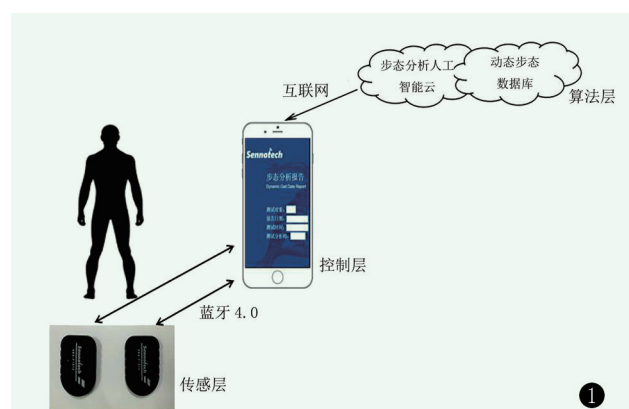


图 1. 便携式动态步态分析系统。受试者选择适配鞋垫，并安装传感器模块。穿戴后连接移动终端 APP，执行零偏校准（持续 10 s 静态站立），同步录入体重指数（BMI）、足弓类型等临床参数，建立档案。测试并采集数据，数据经双冗余校验后上传至云端，最终输出报告。

Figure 1. Portable dynamic gait analysis system. The subjects select the appropriate insoles with sensor modules installed. After wearing it, connect to the mobile terminal APP, perform zero-bias calibration (stand still for 10 seconds continuously), and simultaneously enter parameters such as body mass index (BMI) and arch type of the foot to establish a file. Test and collect data. After double-redundancy verification, the data is uploaded to the cloud and the final report is output.

1.4 统计学方法

采用 SPSS 22.0 软件进行统计学分析。计量数据以 $\bar{x} \pm s$ 表示，资料呈正态分布时，采用单因素方差分析，两两比较采用 LSD 法；资料呈非正态分布时，采用秩和检验。 $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

2 结 果

2.1 患者组与健康人组比较

术前患者组在步幅、步高、单足支撑时长、单侧摆动时长、单足支撑时长、着地仰角、离地仰角、最大摆动速度与健康人组相比差异均有统计学意义 ($P<0.05$)。患者组术后 3 个月的步幅、步高、离地仰角、单足支撑时长、单侧摆动时长及单足支撑时长与

健康人组相比无明显差异 ($P>0.05$)，着地仰角和最大摆动速度虽有改善，但与健康人组相比仍存在差异 ($P<0.05$)。

2.2 患者组术前与术后 3 个月比较

患者组术后 3 个月患侧肢体的步幅、步高、着地仰角、离地仰角、最大摆动速度、单足支撑时长、单侧摆动时长等参数与术前相比均显著改善 ($P<0.05$)。见表 1。

表 1. 46 例患者组手术前后与 20 例健康人组资料 ($\bar{x} \pm s$) 以及两两比较						
Table 1. Comparison between 46 patient groups before and after surgery and 20 healthy individuals in pairs ($\bar{x} \pm s$)						
指标	患者组术前 ($n=46$)	患者组术后 3 个月 ($n=46$)	健康人组 ($n=20$)	P 值		
				术前与术后 3 个月	术前与健康人	术后 3 个月与健康人
步幅 (cm)	81.9 $\pm$ 2.6	110.6 $\pm$ 7.4	112.8 $\pm$ 5.5	<0.001	<0.001	0.180
步高 (cm)	10.5 $\pm$ 2.2	20.6 $\pm$ 1.5	21.2 $\pm$ 1.4	<0.001	<0.001	0.118
单侧总支撑时长 (%)	49.1 $\pm$ 3.1	63.8 $\pm$ 1.1	64.1 $\pm$ 1.4	<0.001	<0.001	0.444
单侧摆动时长 (%)	50.9 $\pm$ 3.1	36.2 $\pm$ 1.3	35.7 $\pm$ 1.4	<0.001	<0.001	0.146
单足支撑时长 (%)	30.1 $\pm$ 0.5	35.3 $\pm$ 0.7	35.4 $\pm$ 1.4	<0.001	<0.001	0.634
着地仰角 (°)	11.7 $\pm$ 1.6	19.5 $\pm$ 1.4	20.5 $\pm$ 1.5	<0.001	<0.001	0.012
离地仰角 (°)	47.4 $\pm$ 1.6	60.7 $\pm$ 2.8	62.9 $\pm$ 3.2	<0.001	<0.001	0.067
最大摆动速度 (m/s)	2.7 $\pm$ 0.2	3.9 $\pm$ 0.3	4.1 $\pm$ 0.2	<0.001	<0.001	0.006

3 讨 论

TKA 作为终末期病变的有效干预手段，其临床疗效已被多项研究证实^[4, 5]。TKA 虽能重建关节解剖结构，但其疗效依赖术后系统性康复干预。研究表明，规范化康复可实现组织修复加速、肌肉功能重塑、代谢循环优化等^[6, 7]。而通过高精度步态量化分析，可揭示膝关节在动态载荷下的运动学异常及力学失衡特征，为制定个体化矫正策略提供生物力学依据。现行临床评价体系过度依赖患者主观报告，存在感知偏差及功能误判风险^[8]，严重制约康复方案的精准化实施。因此，对术后功能恢复的精准评估已成为提升 TKA 疗效的关键环节与研究热点。

三维运动捕捉系统结合测力平台虽被视为步态分析的黄金标准，但其操作复杂性、高成本及数据处理耗时等缺陷制约了临床推广。本研究采用的便携式动态步态分析系统突破传统局限，通过实时采集时空参数与即时反馈机制，为临床评估提供了新型工具。

本研究揭示了 KOA 的代偿性步态特征及其术后恢复规律。在空间参数方面，术前患侧步幅、步高及最大摆动速度均显著低于健康人组，与文献报道的

KOA 患者步态特征一致^[9, 10]。三维运动学分析显示，患者通过缩小重心与膝关节中心的内外向距离，有效缩短地面反作用力力臂，从而降低膝关节内侧应力，这种代偿机制可能导致关节运动轨迹异常^[11]。TKA 术后 3 个月，手术侧肢体支撑时长参数与健康人组无明显差异，这印证了周萌等^[12]关于 TKA 术后支撑相重构的研究结论。值得注意的是，术后步幅和步高等指标已接近正常水平，着地仰角和最大摆动速度虽有改善，但仍存在显著性差异，这提示术后早期恢复存在选择性改善特征。这种不完全恢复可能与关节本体感觉重塑滞后、股四头肌肌力恢复不足等因素相关，后续可以通过靶向性神经肌肉训练进一步优化运动功能。

综上所述，TKA 结合康复训练对 KOA 治疗效果良好，可促进膝关节周围肌肉功能协调，恢复下肢步态及运动学功能。便携式动态步态分析系统能够实时量化监测全膝关节置换手术前后患者的步态特点，对术前病情评估、术中技术优化和术后康复指导都具有重要价值。

利益冲突声明 所有作者声明无利益冲突
作者贡献声明 聂琛：课题设计和实施、论文写作、采集分析和解释数据、统计分析、获取研究经费及行政、技术或材料支持及支持

性贡献;王敏:课题设计和实施、论文写作、分析和解释数据、统计分析及支持性贡献;邵岩:实施研究、采集分析和解释数据、论文审阅及行政、技术或材料支持;王成龙:论文写作、采集分析和解释数据及支持性贡献;朱庄臣:课题设计、实施研究、采集分析和解释数据、论文审阅、统计分析及指导;张国玲:课题设计、实施研究、分析和解释数据、论文审阅及行政、技术或材料支持及指导

参考文献

- [1] 晏润祺. 中西医治疗膝关节骨性关节炎的研究进展[J]. 临床医学研究与实践, 2025, 10 (2): 193-198. DOI: 10.19347/j.cnki.2096-1413.202502049.
- Yan RQ. Research progress on the treatment of knee osteoarthritis with traditional Chinese medicine and Western medicine [J]. Clinical Research and Practice, 2025, 10 (2): 193-198. DOI: 10.19347/j.cnki.2096-1413.202502049.
- [2] 陈红, 阙晓文. 膝骨性关节炎患者膝关节表面置换术后的康复治疗分析[J]. 中国现代药物应用, 2024, 18 (20): 27-30. DOI: 10.14164/j.cnki.cn11-5581/r.2024.20.007.
- Chen H, Que XW. Rehabilitation treatment analysis of knee osteoarthritis with knee joint surface replacement surgery [J]. Chinese Journal of Modern Drug Application, 2024, 18 (20): 27-30. DOI: 10.14164/j.cnki.cn11-5581/r.2024.20.007.
- [3] 黄浩然, 陈俊, 王思哲, 等. 足部空间姿态评估分析系统在 ACL 重建前后步态分析中的应用[J]. 中国骨与关节损伤杂志, 2018, 33 (12): 1255-1258. DOI: 10.7531/j.issn.1672-9935.2018.12.008.
- Huang HR, Chen J, Wang SZ, et al. Analysis of gait before and after anterior cruciate ligament reconstruction using footspace pose assessment system [J]. Chinese Journal of Bone and Joint Injury, 2018, 33 (12): 1255-1258. DOI: 10.7531/j.issn.1672-9935.2018.12.008.
- [4] 陈宇, 孙海宁, 于秀淳, 等. 单髁关节置换术治疗高龄患者膝骨性关节炎的疗效分析[J]. 局解手术学杂志, 2018, 27 (1): 47-53. DOI: 10.11659/jjssx.09E017006.
- Chen Y, Sun HN, Yu XC, et al. Efficacy of unicompartmental knee arthroplasty in knees arthritis among elderly patients [J]. Journal of Regional Anatomy and Operative Surgery, 2018, 27 (1): 47-53. DOI: 10.11659/jjssx.09E017006.
- [5] 许昊天, 黄健. 全膝关节置换前后人体矢状位生物力学改变[J]. 中国矫形外科杂志, 2025, 33 (4): 335-339. DOI: 10.20184/j.cnki.Issn1005-8478.110323.
- Xu HT, Huang J. Biomechanical changes in sagittal plane of human body before and after total knee arthroplasty [J]. Orthopedic Journal of China, 2025, 33 (4): 335-339. DOI: 10.20184/j.cnki.Issn1005-8478.110323.
- [6] 陈蓉蓉. 阶段性康复训练对全膝关节置换术患者疼痛程度及关节活动度的影响[J]. 中外医学研究, 2024, 22 (36): 102-105. DOI: 10.14033/j.cnki.cfmr.2024.36.027.
- Chen Rongrong. The effect of staged rehabilitation training on the pain level and joint mobility of patients undergoing total knee arthroplasty [J]. Chinese and Foreign Medical Research, 2024, 22 (36): 102-105. DOI: 10.14033/j.cnki.cfmr.2024.36.027.
- [7] 陈茹, 施春香, 单亚维, 等. 全膝关节置换术后患者居家康复锻炼方案的构建[J]. 护理学杂志, 2024, 39 (1): 88-92, 115. DOI: 10.3870/j.issn.1001-4152.2024.01.088.
- Chen R, Shi CX, Shan YW, et al. Development of a home-based rehabilitation program for patients receiving total knee arthroplasty [J]. Journal of Nursing Science, 2024, 39 (1): 88-92, 115. DOI: 10.3870/j.issn.1001-4152.2024.01.088.
- [8] Baker PN, Rushton S, Jameson SS, et al. Patient satisfaction with total knee replacement cannot be predicted from pre-operative variables alone: A cohort study from the National Joint Registry for England and Wales [J]. Bone Joint J, 2013, 95-B (10): 1359-1365. DOI: 10.1302/0301-620X.95B10.32281.
- [9] 李宏恩, 马恺, 石春花, 等. 步态分析用于膝骨性关节炎诊断与功能评定的研究进展[J]. 生物医学工程与临床, 2024, 28 (2): 281-286. DOI: 10.13339/j.cnki.sglc.20240223.019.
- Li HE, Ma K, Shi CH, et al. Progress in gait analysis for diagnosis and functional assessment of knee osteoarthritis [J]. Biomedical Engineering and Clinical Medicine, 2024, 28 (2): 281-286. DOI: 10.13339/j.cnki.sglc.20240223.019.
- [10] Sagawa Y Jr, Armand S, Lubbeke A, et al. Associations between gait and clinical parameters in patients with severe knee osteoarthritis: a multiple correspondence analysis [J]. Clin Biomech (Bristol), 2013, 28 (3): 299-305. DOI: 10.1016/j.clinbiomech.2013.01.008.
- [11] Hurwitz DE, Ryals AB, Case JP, et al. The knee adduction moment during gait in subjects with knee osteoarthritis is more closely correlated with static alignment than radiographic disease severity, toe out angle and pain [J]. J Orthop Res, 2002, 20 (1): 101-107. DOI: 10.1016/S0736-0266(1)00081-X.
- [12] 周萌, 曹光磊, 张宽, 等. 便携式步态分析仪量化评价全膝关节置换病人的步态特征[J]. 中国矫形外科杂志, 2015, 23 (7): 615-619. DOI: 10.3977/j.issn.1005-8478.2015.07.08.
- Zhou M, Cao GL, Zhang K, et al. Evaluation of the usefulness of a portable motion analyzer in gait analysis in patients who had undergone total knee replacement [J]. Orthopedic Journal of China, 2015, 23 (7): 615-619. DOI: 10.3977/j.issn.1005-8478.2015.07.08.

(收稿:2025-05-06 修回:2025-06-23)
(同行评议专家:孙其志, 吴彬, 步国强)
(本文编辑:郭秀婷)