

## · 临床研究 ·

## 基于人工智能动态影像识别的全膝关节置换术后早期步态分析研究

张明<sup>1,2</sup>, 眭亚楠<sup>3</sup>, 王铖<sup>1</sup>, 张浩冲<sup>1</sup>, 蔡志威<sup>1</sup>, 张权磊<sup>2</sup>, 张宇<sup>4</sup>, 夏天天<sup>5</sup>, 祖潇然<sup>2</sup>, 黄一健<sup>2</sup>, 黄从书<sup>5</sup>, 李想<sup>1</sup>

(1. 解放军总医院第四医学中心骨科医学部, 北京 100048; 2. 解放军医学院, 北京 100853; 3. 清华大学, 北京 100084; 4. 滨州市人民医院, 山东 滨州 256600; 5. 中国人民解放军军事科学院军事医学研究院, 北京 100039)

**【摘要】目的:**探讨全膝关节置换术(total knee arthroplasty, TKA)术后的早期步态特征及临床结果。**方法:**自 2023 年 2 月到 2023 年 7 月采用 TKA 治疗单侧膝骨关节炎(knee osteoarthritis, KOA)患者 26 例, 男 4 例, 女 22 例; 年龄 57~85 (67.58±6.49)岁; 身体质量指数(body mass index, BMI)为 18.83~38.28 (26.43±4.15) kg·m<sup>-2</sup>; 左膝 14 例, 右膝 12 例; Kellgren-Lawrence 分级, III 级 6 例, IV 级 20 例; 病程 1~14 (5.54±3.29)年。使用智能手机分别于术前、术后 6 周拍摄患者起立行走、行走侧拍、蹲起、仰卧屈膝的影像视频, 通过人体姿势估计框架 OpenPose 分析步频、步长、步长时间、步速、膝关节主动屈膝角度、步幅、双下肢支撑相时间以及蹲姿中最大屈髋、屈膝角度。分别于术前及术后 6 周采用 Western Ontario and McMaster 大学骨关节炎指数 (Western Ontario and McMaster Universities Osteoarthritis Index, WOMAC)评分和美国膝关节协会(Knee Society score, KSS)进行临床疗效评价。**结果:**所有患者获得随访, 时间 5~7 (6.00±0.57)周。WOMAC 总分由术前的 (64.85±11.54)分, 减少至术后 6 周的 (45.81±7.91)分 ( $P<0.001$ ); KSS 由术前 (101.19±9.58)分, 提高至术后 6 周的 (125.50±10.32)分 ( $P<0.001$ )。患侧步速、步频、步幅分别由术前的 (0.32±0.10) m·s<sup>-1</sup>、(96.35±24.18)步·分<sup>-1</sup>、(0.72±0.14) m, 提高至术后的 6 周的 (0.48±0.11) m·s<sup>-1</sup>、(104.20±22.53)步·分<sup>-1</sup>、(0.79±0.10) m ( $P<0.05$ )。双下肢支撑时间和主动屈膝角度由术前的 (0.31±0.38) s、(125.21±11.64)°, 减少至术后 6 周的 (0.11±0.04) s、(120.01±13.35)° ( $P<0.05$ )。术前可以完成蹲起动作的 11 例, 术后 6 周可以完成的 13 例, 术前和术后 6 周同时可以完成的 9 例。9 例蹲姿最大屈膝角度由术前的 76.29°~124.11°提高至术后 6 周的 91.35°~134.12°, 最大屈髋角度由术前的 103.70°~147.25°提高至术后 6 周的 118.61°~149.48°。**结论:**基于人工智能影像识别步态分析技术是一种安全、有效的方法可以定量识别出患者步态的变化。KOA 患者在行 TKA 后膝关节疼痛缓解, 功能得以改善, TKA 术后患肢的支撑能力有所改善, 患者的步频、步幅、步速得到了提升, 双下肢整体运动节律更为协调。

**【关键词】** 全膝关节置换术; 人工智能; 膝骨关节炎

中图分类号: R684.3

DOI: 10.12200/j.issn.1003-0034.20240321

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



### Early gait analysis after total knee arthroplasty based on artificial intelligence dynamic image recognition

ZHANG Ming<sup>1,2</sup>, SUI Ya-nan<sup>3</sup>, WANG Cheng<sup>1</sup>, ZHANG Hao-chong<sup>1</sup>, CAI Zhi-wei<sup>1</sup>, ZHANG Quan-lei<sup>2</sup>, ZHANG Yu<sup>4</sup>, XIA Tian-tian<sup>5</sup>, ZU Xiao-ran<sup>2</sup>, HUANG Yi-jian<sup>2</sup>, HUANG Cong-shu<sup>5</sup>, LI Xiang<sup>1</sup> (1. Department of Orthopaedics, the Fourth Medical Center of Chinese PLA General Hospital, Beijing 100048, China; 2. Chinese PLA Medical College, Beijing 100853, China; 3. Tsinghua University, Beijing 100084, China; 4. Binzhou People's hospital, Binzhou 256600, Shandong, China; 5. Academy of Military Medical Sciences PLA Academy of Military Sciences, Beijing 100039, China)

**ABSTRACT Objective** To explore early postoperative gait characteristics and clinical outcomes after total knee arthroplasty (TKA). **Methods** From February 2023 to July 2023, 26 patients with unilateral knee osteoarthritis (KOA) were treated with TKA, including 4 males and 22 females, aged from 57 to 85 years old with an average of (67.58±6.49) years old; body mass index (BMI) ranged from 18.83 to 38.28 kg·m<sup>-2</sup> with an average of (26.43±4.15) kg·m<sup>-2</sup>; 14 patients on the left side, 12 patients on the right side; according to Kellgren-Lawrence (K-L) classification, 6 patients with grade III and 20 patients with

基金项目: 国家自然科学基金(编号: U22A2052)

Fund program: National Natural Science Foundation of China (No.U22A2052)

通讯作者: 李想 E-mail: stevelee301@163.com

Corresponding author: LI Xiang E-mail: stevelee301@163.com

共同通讯作者: 眭亚楠 E-mail: ysui@tsinghua.edu.cn

Co-corresponding author: SUI Ya-nan E-mail: ysui@tsinghua.edu.cn

grade IV; the courses of disease ranged from 1 to 14 years with an average of (5.54±3.29) years. Images and videos of standing up and walking, walking side shot, squatting and supine kneeling were taken with smart phones before operation and 6 weeks after operation. The human posture estimation framework OpenPose were used to analyze stride frequency, step length, step length, step speed, active knee bending angle, stride length, double support phase time, as well as maximum hip flexion angle and maximum knee bending angle on squatting position. Western Ontario and McMaster Universities (WOMAC) arthritis index and Knee Society Score (KSS) were used to evaluate clinical efficacy of knee joint. **Results** All patients were followed up for 5 to 7 weeks with an average of (6.00±0.57) weeks. The total score of WOMAC decreased from (64.85±11.54) before operation to (45.81±7.91) at 6 weeks after operation ( $P<0.001$ ). The total KSS was increased from (101.19±9.58) before operation to (125.50±10.32) at 6 weeks after operation ( $P<0.001$ ). The gait speed, stride frequency and stride length of the affected side before operation were (0.32±0.10) m·s<sup>-1</sup>, (96.35±24.18) steps·min<sup>-1</sup>, (0.72±0.14) m, respectively; and increased to (0.48±0.11) m·s<sup>-1</sup>, (104.20±22.53) steps·min<sup>-1</sup>, (0.79±0.10) m at 6 weeks after operation ( $P<0.05$ ). The lower limb support time and active knee bending angle decreased from (0.31±0.38) s and (125.21±11.64) ° before operation to (0.11±0.04) s and (120.01±13.35) ° at 6 weeks after operation ( $P<0.05$ ). Eleven patients could able to complete squat before operation, 13 patients could able to complete at 6 weeks after operation, and 9 patients could able to complete both before operation and 6 weeks after operation. In 9 patients, the maximum bending angle of crouching position was increased from 76.29° to 124.11° before operation to 91.35° to 134.12° at 6 weeks after operation, and the maximum bending angle of hip was increased from 103.70° to 147.25° before operation to 118.61° to 149.48° at 6 weeks after operation. **Conclusion** Gait analysis technology based on artificial intelligence image recognition is a safe and effective method to quantitatively identify the changes of patients' gait. Knee pain of KOA was relieved and the function was improved, the supporting ability of the affected limb was improved after TKA, and the patient's stride frequency, stride length and stride speed were improved, and the overall movement rhythm of both lower limbs are more coordinated.

**KEYWORDS** Total knee arthroplasty; Artificial intelligence; Knee osteoarthritis

随着全膝关节置换术(total knee arthroplasty, TKA)手术量逐年增加,手术患者日常活动量增大及接受 TKA 患者年龄年轻化,患者对术后的运动功能要求更高<sup>[1]</sup>。TKA 术后患者行走姿态是自身感受的最直观要求,也是评价术后功能恢复满意度的重要因素<sup>[2-3]</sup>。近年来,出现了三维动作捕捉、仪表化步态垫和各种可穿戴设备等<sup>[4]</sup>步态分析工具。这些技术实现了在实验室环境中分析患者步态的要求,但使用时需要专门的实验室环境和技术人员,其设备价格昂贵,且数据采集流程繁琐,限制了其临床应用。BELIC 等<sup>[5]</sup>最早使用了基于视频的人工智能(artificial intelligence, AI)工具,对帕金森病患者的治疗效果进行了步态评价,获得了良好的评价结果。这种方法的优势在于仅需要输入数字视频,即可自动分析患者的运动模式<sup>[6-8]</sup>。人体姿势估计方法的核心算法通常来自不同人的图像上进行训练的网络,从而形成能够检测关键点的强大网络训练数据集之外的新图像<sup>[9-10]</sup>。通过这些新图像可以识别步态特征及功能情况,提高了步态分析的效率。本研究拟分析 TKA 患者手术前后行走及特定动作影像视频,应用人体姿态估计框架 OpenPose 进行图像分析,探讨 TKA 手术前后早期步态参数变化情况,现报告如下。

## 1 资料与方法

### 1.1 病例选择

纳入标准:(1)参照《骨关节炎诊治指南》中膝骨关节炎(knee osteoarthritis, KOA)的诊断标准<sup>[11]</sup>。

(2)近 1 个月膝关节反复疼痛。(3)单侧 KOA(Kellgren-Lawrence 分级为 III-IV 级),对侧膝无骨关节炎或轻度骨关节炎症状(Kellgren-Lawrence 分级为 II 级以下)<sup>[12]</sup>。(4)术前 X 线片示关节间隙变窄(站立正位)、软骨下硬化或囊性变、关节边缘有骨赘形成。(5)患者基础状况良好,可耐受手术。(6)无其他下肢疾病及手术史。(7)采取 TKA 治疗。

排除标准:(1)患有严重心肺、脑疾病。(2)心理、精神异常。(3)类风湿关节炎或其他炎性关节病。(4)既往有膝关节、髋关节或踝关节假体的患者。(5)可能影响步态或平衡的神经或骨科疾病的患者。(6)既往膝关节手术、神经肌肉疾病、双侧骨关节炎或副韧带不足。(7)术后严重并发症,如深静脉血栓和跌倒。(8)其他术后行走受限条件。(9)感染指标异常、周围软组织功能不全的病变量者。

### 1.2 临床资料

选择 2023 年 2 月至 2023 年 7 月采用 TKA 治疗的单侧 KOA 患者 26 例,其中男 4 例,女 22 例;年龄 57~85(67.58±6.49)岁;身体质量指数(body mass index, BMI)为 18.83~38.28(26.43±4.15) kg·m<sup>-2</sup>;病程 1~14(5.54±3.29)年;左膝 14 例,右膝 12 例;Kellgren-Lawrence 分级 III 级 6 例,IV 级 20 例。本研究经中国人民解放军总医院伦理委员会批准(批号:2022KY127-KS001)。

### 1.3 治疗方法

**1.3.1 手术方法** 患者全身麻醉满意后,取平卧

位,大腿根部捆扎气囊止血带,膝关节术野常规乙醇消毒,铺无菌巾单。取膝前正中切口,起于髌骨上方腱腹交界处,止于胫骨结节内侧 1 cm。切开皮肤、皮下组织,自股直肌与股内侧肌间隙腱腹交界处,向远端沿髌骨内侧切开肌腱、关节囊及髌内侧支持带,切除髌下脂肪垫,伸直膝关节,于胫骨结节内侧 1 cm 处切开骨膜,外旋小腿,沿骨膜下锐性剥离,初步松解内侧关节囊。切断外侧髌股韧带及增生组织,半屈曲膝关节,切除股骨及胫骨增生组织骨赘,切断内侧半月板前角及前、后交叉韧带止点。板钩撬出胫骨平台并屈曲膝关节,清理残余滑膜、半月板及骨赘,安装胫骨髓外定位器,保持胫骨髓外定位器位于胫骨结节中点,与胫骨中心线相一致,保持定位杆指向踝关节中心。平行胫骨力线,于胫骨近端安装胫骨截骨器。垂直胫骨力线沿外侧平台高点定位,胫骨平台截骨板截骨,用摆锯切除胫骨平台关节面,修剪平台边缘。再于股骨髁间窝上方,股骨外侧髁内缘,髁间窝中点置入股骨髓内杆,安放股骨远端截骨器,行股骨远端截骨,测股骨远端假体大小。安放股骨四合一截骨器,行标准截骨,安放股骨髁间截骨器,并行髁间截骨。以间隙试模测伸直间隙及屈膝间隙,见间隙合适,膝关节可完全伸直,力线正常,侧向稳定。胫骨平台按照假体试模打出匹配假体隧道,测试胫骨平台假体大小。髌骨周缘行去神经支配,切除边缘骨赘,予以股骨及胫骨平台假体试模及垫块测伸直及屈膝间隙,见间隙合适,膝关节可完全伸直,力线正常,侧向稳定。复位后见力线好,关节松紧适宜,见屈伸间隙合适。取出试模,骨块填补股骨髓腔开口,配制鸡尾酒注入后方关节囊。脉冲冲洗切口,调配骨水泥,计时开始,正式安放假体,然后伸直位保持计时至 15 min。缓慢松开止血带并止血,待骨水泥固化后测试髌骨运行轨迹良好,内外侧关节稳定性良好松紧适宜,关节屈伸活动度  $150^{\circ}\sim 0^{\circ}$ ,再次清除溢出的骨水泥。鸡尾酒依次注入切口周围软组织。大量生理盐水冲洗,维持膝关节屈曲  $30^{\circ}$ ,缝合关节囊后见无明显渗出后,逐层缝合深筋膜、皮下、皮肤。无菌敷料包扎切口。术毕用弹力绷带稍加压包扎,患者安返病房。

**1.3.2 术后处理** 术后所有患者执行标准康复计划,包括冰袋、持续被动运动(从完全伸展到  $100^{\circ}\sim 110^{\circ}$  屈曲)以及物理治疗师指导下的主动和被动锻炼。从第 2 天开始可以完全负重使用助行器行走。术后第 3、4 天,如果患者能够独立从仰卧到坐位、从坐位到站立,借助助行器安全活动即可出院。

#### 1.4 观察项目与方法

**1.4.1 临床功能评分** 分别于术前和术后 6 周时采用 Western Ontario and McMaster 大学骨关节炎指

数<sup>[15]</sup>(Western Ontario and McMaster Universities Osteoarthritis Index, WOMAC)和美国膝关节协会评分<sup>[14]</sup>(Knee Society score, KSS)评价膝关节整体的功能和形态。WOMAC 骨关节炎指数总分 96 分,包括疼痛 20 分、僵硬 8 分和功能 68 分,评分越高代表膝关节功能障碍越严重。KSS 总分 200 分,包括疼痛 50 分、膝评分 50 分和功能 100 分,评分越高代表关节功能越好。

**1.4.2 步态评估** 由关节外科医生进行操作。每例患者测试前要求穿贴身衣服。使用智能手机于术前及术后 6 周时记录运动视频,要求执行 4 种不同的运动任务:(1)起立行走。拍摄点距离被试者 7 m,距离地面高度 1.2 m,患者首先坐在椅子上,拍摄被试者从椅子上起身,直走 5 m,转身,走向椅子坐下的连续动作(图 1a),观察健患侧步频和双支撑时间。(2)仰卧屈膝。距离被试者 2 m,高度 1.2 m,患者仰卧做主动屈膝动作,左右分别拍摄(图 1b),观察健患侧主动屈膝角度。(3)行走侧拍。拍摄点距离患者 5 m,距离地面高度 1.2 m,侧面拍摄被试者行走过程,患者来回连续行走,单程  $>5$  m(图 1c),观察健患侧步长、跨步时间、步幅以及步速。(3)蹲起。拍摄点距离被试者 2 m,高度 1.2 m,拍摄正面、左侧面、背面、右侧面,每次提示患者尽可能站直,再做蹲起,手臂抱胸或前伸,不要遮挡髌部及以下(图 1d),观察患者蹲姿最大屈膝、屈髌角度。每次试验至少重复 3 次。整个测试过程中可以休息,直到获得受试者自我舒适的行走速度行走。

**1.4.3 AI 数据分析** 调用移动端拍摄患者术前及术后 6 周时的视频。使用人体姿态估计框架 OpenPose,通过计算机视觉与深度学习结合,获取人体关键点与人体骨架,提取各关节位置及其运动轨迹(图 2),设计有效算法,在起立行走动作中分析健患侧步频和双下肢支撑时间;于行走侧拍摄动作中计算健患侧步长、跨步时间、步幅、步速参数;在仰卧屈膝动作中计算健患侧最大主动屈膝角度;在蹲起动作中计算最大屈髌、屈膝角度。

#### 1.5 统计学处理

采用 SPSS 26.0 软件进行统计学分析。符合正态分布的定量资料 WOMAC 评分、KSS 评分采用均数 $\pm$ 标准( $\bar{x}\pm s$ )差表示,手术前后改善情况比较采用配对设计定量资料  $t$  检验。以  $P<0.05$  为差异有统计学意义。

## 2 结果

所有患者获得随访,时间  $5\sim 7(6.00\pm 0.57)$  周。

### 2.1 WOMAC 和 KSS 比较

术后 6 周 WOMAC 中膝关节疼痛、功能及总分

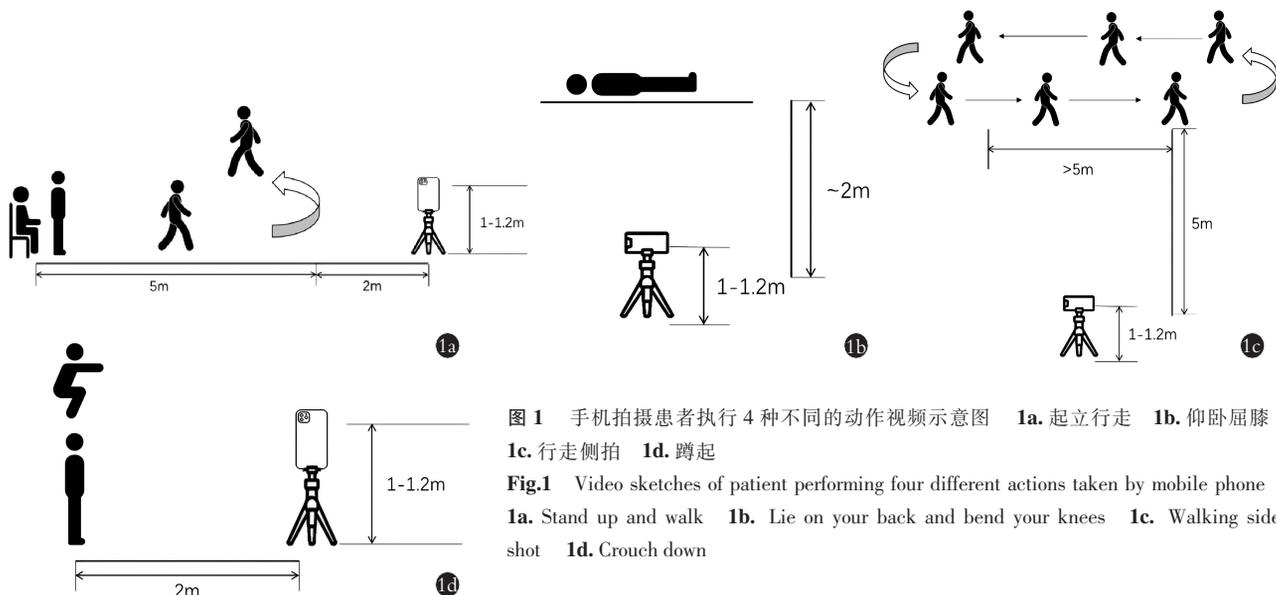


图 1 手机拍摄患者执行 4 种不同的动作视频示意图 1a. 起立行走 1b. 仰卧屈膝 1c. 行走侧拍 1d. 蹲起  
Fig.1 Video sketches of patient performing four different actions taken by mobile phone 1a. Stand up and walk 1b. Lie on your back and bend your knees 1c. Walking side shot 1d. Crouch down

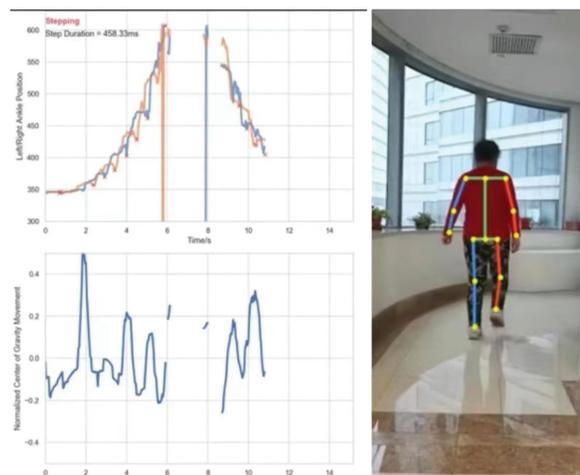


图 2 步态分析,通过相应解剖标记捕捉躯体运动轨迹  
Fig.2 Gait analysis to capture trajectory of body movement using anatomical markers

较术前减少( $P<0.001$ ),膝关节僵硬评分无明显变化( $P>0.05$ )。术后 6 周 KSS 中疼痛、膝评分、功能评分及 KSS 总分较术前提高( $P<0.05$ )。见表 1、表 2。

### 2.2 步态参数比较

患侧步速、步频、步幅分别由术前  $(0.32 \pm 0.10) \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $(96.35 \pm 24.18) \text{ 步} \cdot \text{分}^{-1}$ ,  $(0.72 \pm 0.14) \text{ m}$ , 提高至术后 6 周的  $(0.48 \pm 0.11) \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $(104.20 \pm 22.53) \text{ 步} \cdot \text{分}^{-1}$ ,  $(0.79 \pm 0.10) \text{ m}$  ( $P<0.05$ )。双下肢支撑时间和主动屈膝角度由术前的  $(0.31 \pm 0.38) \text{ s}$ ,  $(125.21 \pm 11.64)^\circ$ , 减少至术后 6 周的  $(0.11 \pm 0.04) \text{ s}$ ,  $(120.01 \pm 13.35)^\circ$  ( $P<0.05$ )。术前和术后 6 周,步长时间、步长比较,差异无统计学意义( $P>0.05$ )。见表 3。

术前可以完成蹲起动作的有 11 例,术后 6 周可以完成蹲起动作的有 13 例,术前和术后 6 周同时可以完成蹲起动作的患者 9 例。9 例蹲姿最大屈膝角

表 1 单侧膝骨关节炎患者 26 例术前和术后 6 周 WOMAC 比较 ( $\bar{x} \pm s$ )

Tab.1 Comparison of WOMAC in 26 patients with unilateral knee osteoarthritis before operation and 6 weeks after operation ( $\bar{x} \pm s$ )

单位:分

时间	疼痛	僵硬	关节功能	总分
术前	14.96±2.03	3.23±0.95	46.65±10.89	64.85±11.54
术后 6 周	11.27±2.75	3.08±0.63	31.46±6.43	45.81±7.91
t 值	6.03	1.28	5.75	6.49
P 值	<0.001	0.210	<0.001	<0.001

表 2 单侧膝骨关节炎患者 26 例术前和术后 6 周 KSS 比较 ( $\bar{x} \pm s$ )

Tab.2 Comparison of KSS of 26 patients with unilateral knee osteoarthritis before operation and 6 weeks after operation ( $\bar{x} \pm s$ )

单位:分

时间	膝评分	疼痛	功能	总分
术前	24.31±3.86	21.35±3.84	55.54±9.02	101.19±9.58
术后 6 周	24.81±4.01	32.46±4.33	68.23±9.67	125.50±10.32
t 值	-2.31	-10.89	-5.03	-10.47
P 值	0.030	<0.001	<0.001	<0.001

度由术前的  $76.29^\circ \sim 124.11^\circ$  提高至术后 6 周的  $91.35^\circ \sim 134.12^\circ$ 、最大屈髋角度由术前的  $103.70^\circ \sim 147.25^\circ$  提高至术后 6 周的  $118.61^\circ \sim 149.48^\circ$ 。9 例患者临床资料见表 4。

### 3 讨论

#### 3.1 基于 AI 影像识别技术评价步态研究的优势

在 TKA 手术中,步态对手术结果和患者的康复过程具有重要影响。步态是人体运动功能的综合体现,通过步态分析可以了解患者行走时的姿势、步

表 3 单侧膝骨关节炎患者 26 例术前和术后 6 周步态参数比较 ( $\bar{x} \pm s$ )

Tab.3 Comparison of gait parameters of 26 patients with unilateral knee osteoarthritis before and 6 weeks after operation ( $\bar{x} \pm s$ )

时间	步速/(m·s <sup>-1</sup> )	步长时间/s	步频/(步·分 <sup>-1</sup> )	步长/cm	双下肢支撑时间/s	步幅/m	屈膝角度/°
术前	0.32±0.10	0.66±0.34	96.35±24.18	19.23±2.90	0.31±0.38	0.72±0.14	125.21±11.64
术后 6 周	0.48±0.11	0.70±0.32	104.20±22.53	19.57±3.71	0.11±0.04	0.79±0.10	120.01±13.35
t 值	-4.707	-0.660	-2.339	-0.488	2.127	-2.825	2.800
P 值	0.001	0.515	0.029	0.630	0.048	0.017	0.011

表 4 完成蹲起动作 9 例患者临床资料

Tab.4 Clinical data of 9 patients complete perform squat

患者序号	年龄/岁	性别	BMI/(kg·m <sup>-2</sup> )	K-L 分级	病程/年	最大屈膝角度/°		最大屈髋角度/°	
						术前	术后 6 周	术前	术后 6 周
1	65	男	38.28	IV	2	119.07	134.12	147.25	149.48
2	64	女	31.23	IV	2	76.29	91.35	118.79	128.45
3	76	女	26.44	IV	9	90.10	91.86	103.70	119.53
4	69	女	22.67	IV	3	104.05	113.51	113.60	118.61
5	69	女	29.30	III	3	124.11	127.07	143.21	139.82
6	64	女	29.30	IV	2	85.38	92.38	125.94	133.52
7	70	女	27.11	IV	4	105.33	107.21	133.98	130.54
8	63	女	18.83	IV	4	90.45	95.33	108.19	134.44
9	64	女	29.30	IV	2	85.23	91.60	127.51	138.30

速、步频、步幅、步长、支撑时间等参数,从而评估膝关节的功能状态。TKA 术前,步态评估有助于医生了解患者的膝关节病变程度和功能受限情况,为手术方案的制定提供依据;TKA 术后,步态评估可以指导患者进行康复训练,根据步态分析结果制定个性化的康复计划,提高康复效果。同时,TKA 患者通过术后步态训练,可以改善膝关节的活动范围、肌肉力量和平衡能力,从而恢复正常的步态模式。步态训练还有助于减少 TKA 术后的并发症,如深静脉血栓、关节僵硬等,提高患者的生活质量<sup>[15]</sup>。因此,在 TKA 手术前后应重视步态评估的作用,并采取相应的措施优化步态评估过程和提高评估结果的准确性。

目前,进行步态分析的主流研究领域集中于基于探测器定位动态摄像机步态分析。较为精准的三维运动和步态分析可采用专业的运动捕捉系统,特别是基于光学运动捕捉系统被认为是目前步态分析技术的金标准<sup>[16]</sup>。然而,这一技术在实际应用中仍面临诸多限制:不仅需要专业的步态实验室和昂贵的设备支持,还要求操作人员具备丰富的培训和经验,以确保数据收集的准确性和处理的精确性<sup>[17]</sup>。值得一提的是,STENUM 等<sup>[18]</sup>研究发现,在几乎任何环境下利用 OpenPose 人体姿态估计框架进行图像分析,均具备进行定量步态分析的能力,这一创新技术为

患者接受临床步态分析提供了可能性。它不仅显著降低了设备和操作的成本,还极大地提升了步态分析的准确性和效率,让更多患者能够享受到及时、准确的步态评估服务。

通过视频进行步态分析,能够全面且客观地捕捉 TKA 患者的行走动态。这一方法借助连续的图像序列,让医生细致观察患者的静态站立姿态以及行走的全过程,为临床实践提供更为真实、可靠的疗效评估依据,进而实现精准的步态评估。此外,运用 AI 步态图像分析技术,不仅能获取单个关节的运动学数据,还能基于体表点的分布,分析多个关节乃至整个躯干的运动状态。该技术更进一步能为步态异常的患者探寻潜在的病因,并据此调整治疗方案,从而积极影响疾病的走向。值得一提的是,该技术的另一显著优势在于远程收集患者的行走姿态影像资料。患者可以在家中录制行走视频,通过互联网发送,便可轻松接受步态评估,极大地提升了评估的可行性和便捷性。

### 3.2 TKA 手术前后临床疗效的评价

TKA 术后患者步速的恢复是评估其健康与功能恢复状况的重要指标<sup>[19]</sup>。本研究结果发现 TKA 术后患者的 WOMAC 和 KSS 疼痛评分均得到显著改善,同时,步态速度和膝关节活动度也呈现出一定程度

的提升。然而,值得注意的是,据文献<sup>[20-21]</sup>报道,30~60 岁的健康成年人的步态速度在  $1.2\sim 1.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。本研究中的患者,无论是术前还是术后,其步速均未达到这一健康成年人的标准范围。对于术后 6 周步速与标准成年人步速之间存在的差距,可能的原因包括:首先,患者普遍年龄偏大,随着年龄的增长,步态速度自然会有所减缓<sup>[22]</sup>;其次,根据 FARY 等<sup>[23]</sup>的研究步行速度的完全恢复可能需要至少 22 周的时间。因此,可以推断,在 TKA 术后 6 周这一时间点,虽然患者的行走速度相对于术前有所改善,但膝关节的正常行走功能尚未完全恢复。

在评估 TKA 术后功能恢复时,步幅和步频都被视为极其重要的参数<sup>[24]</sup>。有研究<sup>[25]</sup>指出,TKA 术后不仅疼痛得到缓解,关节力线得到改善,股四头肌的收缩效率也有所提升,这些因素共同促进了患肢在行走时的运动速度,从而提高了步幅和步频。笔者推测,步频的增加是患肢屈髋伸膝运动功能改善的直接体现。此外,患者的心理因素也可能对步幅和步频产生积极影响。TKA 术后疼痛减轻,患者对于行走时的疼痛恐惧心理减少,因此,在行走时展现出更加积极和迅速的步伐,这种心理效应在一定程度上也促使了步幅和步频的增加。

探讨病理相关步态模式时,步长的重要性不言而喻<sup>[26]</sup>。术前,笔者预期术后患者因患肢疼痛缓解、稳定性增强以及下肢支撑能力提升,会在行走过程中将重心更多地转移至患侧,并维持更长时间,从而增大步长。然而,术后 6 周步长与术前比较,差异无统计学意义( $P>0.05$ )这与先前关于 TKA 术后 6~7 周<sup>[27]</sup>步长开始恢复的研究结果并不相同。这一发现提示,步长的恢复可能需要更长时间,后续笔者将通过更长时间的随访来验证这一假设。与此同时,本研究患者术后双下肢支撑时间的缩短,不仅意味着单足负重时间占比的增加,更代表着下肢肌肉效率、关节稳定性等功能的显著提升。这种改善使得患者在行走时能更快速地完成重心转移,从而在视觉上呈现出更为流畅和平衡的步态。这种“流畅性”和“平衡感”不仅关乎患者对手术满意度的自我评价,也会间接影响可能因术后跌倒所致假体周围骨折、韧带损伤、假体磨损等远期并发症的发生率。

### 3.3 本研究的局限性

(1)虽然患者均被要求着紧身衣物,但患者所穿鞋类的变化可能会影响 AI 系统跟踪特定关键点的能力。(2)本研究未纳入健康对照组作比较,后续会纳入健康人进行分析。(3)本研究虽然进行了蹲起、行走侧拍、起立行走、仰卧屈膝等动作,但由于场地限制,对一些其他日常生活动作,如上下楼梯、跑步

等,未进行测试。后续研究将会纳入更多的患者,增加运动项目,并继续增加随访时间,对患者步态恢复情况进行更全面更系统的跟踪分析。

综上所述,KOA 患者在行 TKA 术后膝关节疼痛缓解,功能得以改善,患肢的支撑能力有所改善,患者的步频、步幅、步速得到了提升,双下肢整体的运动节律更为协调。

### 参考文献

- [1] INACIO M C S, PAXTON E W, GRAVES S E, et al. Projected increase in total knee arthroplasty in the United States-an alternative projection model[J]. *Osteoarthritis Cartilage*, 2017, 25(11): 1797-1803.
- [2] LEVINGER P, MENZ H B, MORROW A D, et al. Lower limb biomechanics in individuals with knee osteoarthritis before and after total knee arthroplasty surgery[J]. *J Arthroplasty*, 2013, 28(6): 994-999.
- [3] MCCLELLAND J A, WEBSTER K E, FELLER J A. Gait analysis of patients following total knee replacement: a systematic review [J]. *Knee*, 2007, 14(4): 253-263.
- [4] STENUM J, ROSSI C, ROEMMICH R T. Two-dimensional video-based analysis of human gait using pose estimation[J]. *PLoS Comput Biol*, 2021, 17(4): e1008935.
- [5] BELIC M, BOBIC V, BADŽA M, et al. Artificial intelligence for assisting diagnostics and assessment of Parkinson's disease-a review [J]. *Clin Neurol Neurosurg*, 2019, 184: 105442.
- [6] CAO Z, HIDALGO G, SIMON T, et al. OpenPose: realtime multi-person 2D pose estimation using part affinity fields[J]. *IEEE Trans Pattern Anal Mach Intell*, 2021, 43(1): 172-186.
- [7] TOSHEV A, SZEGEDY C. DeepPose: human pose estimation via deep neural networks[C]//2014 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Columbus, OH, USA. IEEE, 2014: 1653-1660.
- [8] MARTINEZ J, HOSSAIN R, ROMERO J, et al. A simple yet effective baseline for 3d human pose estimation [C]//2017 IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV). Venice, Italy. IEEE, 2017: 2659-2668.
- [9] LIN T Y, MAIRE M, BELONGIE S, et al. Microsoft COCO: common objects in context[C]//European Conference on Computer Vision. Cham: Springer, 2014: 740-755.
- [10] SATO K, NAGASHIMA Y, MANO T, et al. Quantifying normal and parkinsonian gait features from home movies: Practical application of a deep learning-based 2D pose estimator [J]. *PLoS One*, 2019, 14(11): e0223549.
- [11] 中华医学会骨科学分会. 骨关节炎诊治指南(2007年版)[J]. *中国矫形外科杂志*, 2014, 22(3): 287-288. CHINESE ORTHOPAEDIC ASSOCIATION. Guidelines for Diagnosis and Treatment of Osteoarthritis (2007 Edition)[J]. *Orthop J China*, 2014, 22(3): 287-288. Chinese.
- [12] LIAO W X, LI Z L, WANG H L, et al. Proteomic analysis of synovial fluid: insight into the pathogenesis of knee osteoarthritis[J]. *Int Orthop*, 2013, 37(6): 1045-1053.
- [13] MCCONNELL S, KOLOPACK P, DAVIS A M. The Western Ontario and McMaster Universities Osteoarthritis Index (WOMAC): a review of its utility and measurement properties[J]. *Arthri-*

- tis Rheum, 2001, 45(5):453-461.
- [14] XU S, LIM W J, CHEN J Y, et al. The influence of obesity on clinical outcomes of fixed-bearing unicompartmental knee arthroplasty: a ten-year follow-up study[J]. Bone Joint J, 2019, 101-B(2): 213-220.
- [15] ARMAND S, DECOULON G, BONNEFOY-MAZURE A. Gait analysis in children with cerebral palsy[J]. EFORT Open Rev, 2016, 1(12):448-460.
- [16] MORO M, PASTORE V P, TACCHINO C, et al. A markerless pipeline to analyze spontaneous movements of preterm infants[J]. Comput Methods Programs Biomed, 2022, 226:107119.
- [17] LONINI L, MOON Y, EMBRY K, et al. Video-based pose estimation for gait analysis in stroke survivors during clinical assessments: a proof-of-concept study[J]. Digit Biomark, 2022, 6(1):9-18.
- [18] STENUM J, HSU M M, PANTELYAT A Y, et al. Clinical gait analysis using video-based pose estimation: Multiple perspectives, clinical populations, and measuring change[J]. PLoS Digit Health, 2024, 3(3):e0000467.
- [19] BADE M J, KOHRT W M, STEVENS-LAPSLEY J E. Outcomes before and after total knee arthroplasty compared to healthy adults[J]. J Orthop Sports Phys Ther, 2010, 40(9):559-567.
- [20] PALOMBARO K M, CRAIK R L, MANGIONE K K, et al. Determining meaningful changes in gait speed after hip fracture[J]. Phys Ther, 2006, 86(6):809-816.
- [21] BLANKE D J, HAGEMAN P A. Comparison of gait of young men and elderly men[J]. Phys Ther, 1989, 69(2):144-148.
- [22] FANG X, JIANG Z L. Three-dimensional thoracic and pelvic kinematics and arm swing maximum velocity in older adults using inertial sensor system[J]. PeerJ, 2020, 8:e9329.
- [23] FARY C, CHOLEWA J, ABSHAGEN S, et al. Stepping beyond counts in recovery of total knee arthroplasty: a prospective study on passively collected gait metrics[J]. Sensors, 2023, 23(12):5588.
- [24] STAAB W, HOTTOWITZ R, SOHNS C, et al. Accelerometer and gyroscope based gait analysis using spectral analysis of patients with osteoarthritis of the knee[J]. J Phys Ther Sci, 2014, 26(7):997-1002.
- [25] LOU Y W, LI L, CHEN Q. Effect of torso training on unstable surface on lower limb motor function in patients with incomplete spinal cord injury[J]. Zhejiang Da Xue Xue Bao Yi Xue Ban, 2023, 52(2):214-222.
- [26] BAHL J S, NELSON M J, TAYLOR M, et al. Biomechanical changes and recovery of gait function after total hip arthroplasty for osteoarthritis: a systematic review and meta-analysis[J]. Osteoarthritis Cartilage, 2018, 26(7):847-863.
- [27] LEBLEU J, POILVACHE H, MAHAUDENS P, et al. Predicting physical activity recovery after hip and knee arthroplasty? A longitudinal cohort study[J]. Braz J Phys Ther, 2021, 25(1):30-39.

(收稿日期:2024-07-02 本文编辑:李宜)