

文章编号: 1004-7220(2021)04-0633-05

膝关节单髁置换术后膝关节登梯动作生物力学分析

杜刚^{1,2}, 李政甜¹, 劳山¹

(1. 广西医科大学第一附属医院 骨关节外科, 南宁 530021; 2. 美国匹兹堡大学 骨科, 匹兹堡 15217)

摘要:目的 探讨内侧膝关节单髁置换(unicompartmental knee arthroplasty, UKA)手术对登楼梯时膝关节生物力学的影响。方法 9例接受固定平台内侧UKA骨关节炎患者,术前3周及术后(7±2)月对其进行登楼梯动作的生物力学测试。采用双平面X线装置收集患者UKA手术前后行走时的影像资料,健侧膝关节作为对照组。通过CT扫描建立股骨、胫骨三维模型,通过自动匹配软件,将股骨、胫骨3D模型与X线中股骨、胫骨相匹配并同步。测量股骨、胫骨3D模型运动力学参数,包括前后向移位、内外翻、旋转及内侧间室间隙、接触中心点及外侧间室间隙。结果 术前UKA侧膝关节较健侧内翻4.8°,术后UKA侧较术前外翻3.1°,术前UKA侧膝关节较健侧外旋4.4°,术前UKA侧内侧间室接触中心点较健侧后移2.5 mm($P<0.05$)。外侧间隙UKA手术前后及与健侧相比无明显变化($P>0.05$)。结论 UKA可以有效改善膝关节内外翻,同时能够恢复患侧膝关节旋转的生物力学特性,不影响外侧间室间隙的接触中心,但内外侧间室的接触中心仍有变化。

关键词: 膝关节单髁置换; 旋转; 力线; 生物力学

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2021.04.020

Biomechanical Analysis of the Knee after Unicompartmental Knee Arthroplasty during Stair Ascent

DU Gang^{1,2}, LI Zhengtian¹, LAO Shan¹

(1. Department of Bone and Joint, the First Affiliated Hospital of Guangxi Medical University, Nanning 530021, China; 2. The Orthopedic Department, Pittsburgh University, Pittsburgh 15217, USA)

Abstract: Objective To investigate the effect of medial unicompartmental knee arthroplasty (UKA) surgery on knee biomechanics during stair ascent. **Methods** Nine osteoarthritis patients who received fixed-bearing medial UKA participated in this study. All patients completed pre-surgical (3 weeks before UKA surgery) and post-surgical [(7±2) months after UKA surgery] test. Their synchronized biplane radiographs during stair ascent were collected. Motion of the femur, tibia, and implants were tracked using an automated volumetric model-based tracking process that matched subject-specific 3D models of the bones and prostheses to the biplane radiographs with sub-millimeter accuracy. Anatomic coordinate systems were created within the femur and tibia and used to calculate tibiofemoral kinematics. Additional outcome measures included the center of contact in the medial and lateral compartments, and the lateral compartment dynamic joint space. **Results** The UKA knee was in 4.8° varus compared with the pre-surgical contralateral knee. The post-surgical UKA knee was in 3.1° valgus compared with the pre-surgical knee. The post-surgical UKA knee was 4.4° externally rotated compared with the pre-surgical contralateral knee. However, the medial tibia contact center of the UKA knee moved

收稿日期: 2020-05-23; 修回日期: 2020-07-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(81660372), 广西自然科学基金项目(桂科 AB19110030, 2017GXNSFAA198159)

通信作者: 杜刚, 副主任医师, E-mail: dugangxmu@outlook.com

posteriorly 2.5 mm compared with that of the contralateral knee ($P < 0.05$). No obvious changes were found in lateral compartment joint space before and after surgery ($P > 0.05$). **Conclusions** UKA can effectively improve varus of the knee joint and restore biomechanical characteristics of UKA knee rotation, without affecting lateral compartment joint space. However, changes are found in contact center of the medial tibia compartment of the UKA knee after surgery.

Key words: unicompartmental knee arthroplasty (UKA); rotation; alignment lines; biomechanics

骨关节炎 (osteoarthritis, OA) 是影响我国老年人生活质量及致残的主要疾病之一。对于晚期 OA 患者,多采取手术治疗。其中,全膝关节置换 (total knee arthroplasty, TKA) 是目前应用最多的手术,具有良好的长期疗效。但由于 TKA 创伤较大,且会改变膝关节生物力学特性,患者术后满意度较低。膝关节单髁置换 (unicompartmental knee arthroplasty, UKA) 主要用于治疗单侧关节间室的 OA 患者,相比 TKA 而言,其具有微创、快速康复、出血量少、死亡率较低等优势^[1-2]。但也有研究表明,UKA 的术后长期生存率较低。随着假体技术的不断改进,UKA 长期生存率得到大幅度提升^[3]。此外,相对于 TKA,UKA 由于保留了膝关节前后交叉韧带,只改变内侧间室的骨性结构,理论上会更好地保留膝关节的生物力学特性,提高患者的满意度及功能^[4-5]。然而,目前关于 UKA 术后体内的生物力学研究较少。本文通过收集测量患者 UKA 手术前后患侧膝关节登楼梯时的生物力学及运动学参数,并与健侧膝关节作为对比,探讨 UKA 对膝关节生物力学的影响。

1 资料与方法

1.1 一般资料

9 例接受内侧固定平台 UKA 患者,其中男 5 例,女 4 例,年龄 (62.3±5) 岁。所有患者在手术前后均

接受双侧膝关节 CT 扫描,并通过 Mimics 软件构建股骨、胫骨及假体 3D 模型。UKA 术前 3 周及术后 7 个月时分别接受生物力学测试,采用实时双平面 X 线收集患者行走时的资料。本研究方案已通过美国 UPMC Magee 医院伦理委员会审核,所有参与者均签署知情同意书。

纳入标准:单纯内侧间室 OA 患者;内翻畸形 < 10°; 屈曲 > 115°, 伸直受限 < 5°; 前后交叉韧带功能完好; Kellgren and Lawrence 评分 > 2; 对侧膝关节为健康膝关节,未合并 OA 或者其他疾病。排除标准: 类风湿关节炎; 创伤性关节炎; 身体质量指数 (body mass index, BMI) > 40 kg/m²; 合并骨质疏松患者; 对侧膝关节合并 OA 或者有过手术史; 合并心脑血管疾病。

1.2 数据收集 如图 1(a) 所示,患者在楼梯上做登楼梯动作,同步双平面 X 线装备对膝关节进行透视 (100 帧/s, 最大功率为 90 kV, 160 mA, 1 ms 脉冲宽度)。经过 PCXMC 软件测试,所有测试当中,最大辐射量为 0.48 mSv。

使用双能 CT 扫描患者两侧膝关节,扫描范围为从膝关节中心线远近各 10 cm,分辨率为 0.6×0.6 mm,扫描层厚度为 1.25 mm [见图 1(b)]。使用商业软件 Mimics 17.0 识别骨组织并进行股骨及胫骨的三维重建,CT 平均辐射量为 1.0 mSv。通过自动示踪软件技术将 3D 股骨及胫骨模型分别与 X

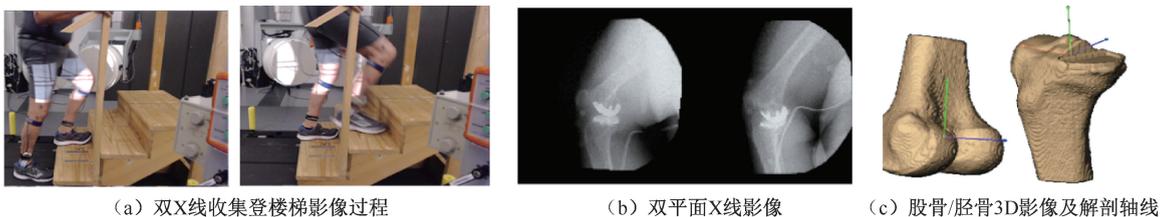


图 1 生物力学数据采集

Fig.1 Collection of the kinematics data (a) Biplane radiographic imaging of the knee during stair ascent, (b) Synchronized biplane radiograph, (c) 3D images of femur/tibia and anatomic axis

线中的股骨与胫骨相匹配,该技术在体内的精确度为 0.7 mm,旋转精度为 0.9° [6]。

1.3 数据处理 建立股骨胫骨解剖参照系统,股骨内外髁中心点的连线中心点作为股骨的中心点,内外髁中心连线作为 X 轴,股骨中心点与髌关节中心点的连线为 Y 轴(髌关节中心由通过髌关节 CT 扫描确认)。垂直 XY 轴并通过中心点,作为 Z 轴。胫骨平台内外侧最边缘的中心点作为胫骨的中心点,内外侧平台边缘点连线作为 X 轴,中心点与踝关节中心点的连线作为 Y 轴(踝关节中心点通过踝关节 CT 层面获取),垂直于 XY 轴并通过中心点的轴线作为 Z 轴[见图 1(c)]。

收集股骨胫骨的旋转运动学参数,如内旋/外旋、内收/外展、屈曲/伸直。同时,参照胫骨的解剖参照系统,测量股骨相对于胫骨的前移/后移、近端/远端、内侧/外侧的移位距离。使用 Butterworth 过滤器对所有运动学结果进行矫正。

1.4 统计学分析

采用配对 *t* 检验对膝关节 UKA 手术前后以及患侧、健侧膝关节的差异进行统计分析。所有统计分析使用 SPSS 24.0 软件进行, $P < 0.05$ 表示差异有统计学意义。

2 结果

所有数据均与根据解剖轴建立的参照系(X、Y、Z 轴)对比。UKA 术前健侧、患侧膝关节内翻角度分别为 $1.2^{\circ} \pm 2.7^{\circ}$ 、 $3.6^{\circ} \pm 2.5^{\circ}$;UKA 术后健侧、患侧膝关节内翻角度分别为 $1.1^{\circ} \pm 3.0^{\circ}$ 、 $0.9^{\circ} \pm 2.3^{\circ}$ (数值为负值表示内翻)。UKA 术前健侧、患侧膝关节内外旋角度分别为 $10.5^{\circ} \pm 3.0^{\circ}$ 、 $6.0^{\circ} \pm 4.5^{\circ}$;UKA 术后健侧、患侧旋转角度分别为 $10.5^{\circ} \pm 4.0^{\circ}$ 、 $8.7^{\circ} \pm 5.0^{\circ}$ (正值表示内旋)。UKA 术前健侧、患侧内侧间隙分别为 (4.9 ± 1.5) 、 (4.7 ± 1.2) mm;UKA 术后健侧、患侧内侧间隙分别为 (4.5 ± 0.8) 、 (4.5 ± 1.2) mm。UKA 术前健侧、患侧内侧膝关节间室接触中心分别前移 (0.5 ± 2.0) 、 (-0.8 ± 3.4) mm;UKA 术后健侧、患侧内侧膝关节间室接触中心分别前移 (0.2 ± 1.6) 、 (-2.3 ± 2.0) mm(正值代表胫骨接触中心点前移)。UKA 术前健侧、患侧内侧间隙分别为 (5.4 ± 2.9) 、 (4.1 ± 3.5) mm;UKA 术后健侧、患侧内侧间隙分别为 (6.3 ± 2.0) 、 (4.5 ± 3.0) mm。

图 2 所示为 UKA 手术前后双膝关节不同步态周期中的平均动力学参数。图 2 中的 9 种不同颜色线条代表 9 例患者。由于第 7 例患者失访,故缺少第 7 例患者数据。横坐标为膝关节不同的屈伸角度,登梯动作从屈曲开始,伸直位结束,即从右向左观察,为登梯的开始与结束。图 2(a)纵坐标正值为内翻,负值为外翻。图 2(b)纵坐标正值为内旋,负值为外旋。图 2(c)纵坐标正值为有间隙,负值为软骨接触面有重叠。图 2(d)、(e)纵坐标正值为前向移位,负值为后向移位。

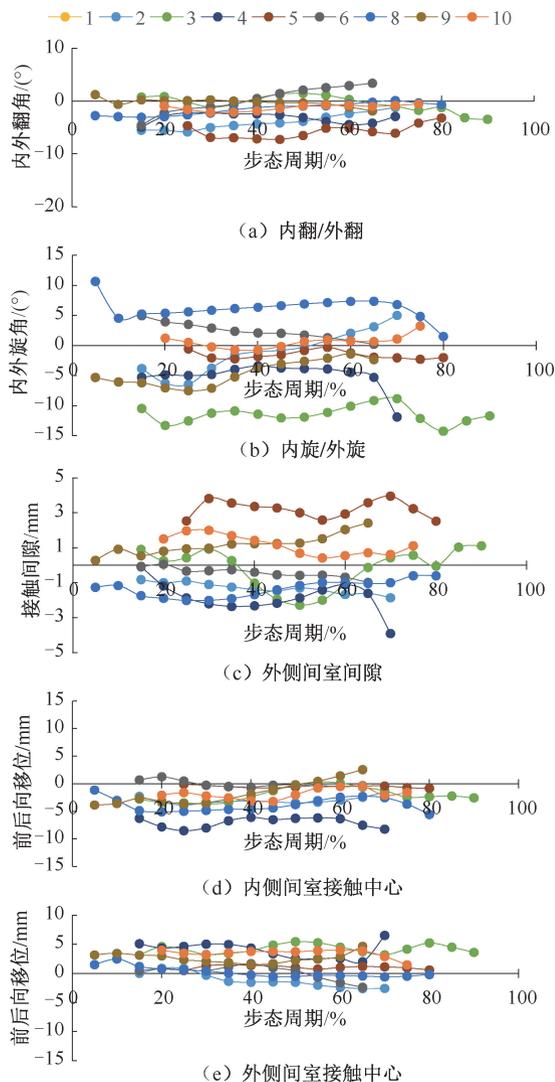


图 2 UKA 术后患者生物力学参数对比

Fig. 2 Comparison of biomechanical parameters after UKA surgery (a) Varus/valgus, (b) Internal/external rotation, (c) Distance of lateral compartment, (d) Contact center of medial compartment, (e) Contact center of lateral compartment

测量并统计患侧-健侧、术前-术后不同步态周期中侧侧差异,并进行汇总。UKA 术后,患侧膝关节较术前外翻 3.1° ,差异具有统计学意义;术前患侧与健侧相比,平均外翻 4.8° ,术后患侧与健侧之间无明显差异。UKA 术前患侧膝关节较健侧外旋 4.4° ,差异具有统计学意义;术后患侧膝关节与术前相比,内旋 2.4° ,但差异无统计学意义;术后患侧与健侧相比无

明显差异。外侧关节间隙,患侧与健侧相比,患侧术前与术后相比,均无明显变化。同时,UKA 术前患侧膝关节与健侧膝关节相比,内侧间室胫骨的接触中心点后移 1.3 mm ,差异无统计学意义;术后患侧与健侧相比,仍然有 2.5 mm 后移,差异均有统计学意义。外侧胫骨平台接触中心点术后患侧与健侧相比,前移 1.8 mm ,差异有统计学意义(见表 1)。

表 1 双侧膝关节及 UKA 手术前后参数变化(* $P < 0.05$)

Tab.1 Parameter changes in bilateral knee joints, before and after UKA surgeries

参数	术前与术后差异		患膝与健侧膝关节差异	
	患侧	健侧	术前	术后
内外翻角/ $^\circ$	$3.1 \pm 2.4^*$	-0.0 ± 0.4	$-4.8 \pm 2.7^*$	-2.0 ± 2.1
内外旋角/ $^\circ$	2.4 ± 6.2	0.0 ± 1.3	$-4.4 \pm 3.0^*$	-1.8 ± 5.3
外侧关节间隙/mm	-0.0 ± 1.4	-0.5 ± 1.6	-0.2 ± 0.8	0.1 ± 1.7
内侧胫骨接触中心/mm	-2.3 ± 4.1	-0.5 ± 0.6	-1.3 ± 2.8	$-2.5 \pm 2.2^*$
外侧胫骨接触中心/mm	-0.7 ± 2.3	-1.0 ± 2.1	1.3 ± 2.5	$1.8 \pm 2.0^*$

3 讨论

膝关节单髁假体作为治疗 OA 单间室病变的有效手段,一直备受争议。早期 UKA 由于假体设计及技术不成熟,失败率及翻修率均明显高于 TKA。随着假体设计及工艺的不断改进,其 10 年生存率可达 90% 以上^[7-10]。近 10 年来,单髁假体的应用越来越广泛,然而关于单髁假体生物力学方面的研究却相对缺乏。登楼梯时膝关节需要承受约 3 倍体质量,其对膝关节的稳定性及股四头肌力的要求更高。同时,膝关节内外翻的幅度也更大。因此,将 UKA 侧膝关节与健侧膝关节进行对比,更能反映出膝关节在负重情况下是否接近健康膝关节,以及其维持膝关节固有生物力学特性的能力。针对 UKA 患者登梯动作,本文比较患侧膝关节与健侧的差异、UKA 侧膝关节手术前后的差异、膝关节内外侧间室接触中心及外侧间室间隙。结果表明,患侧膝关节术前较健侧内翻 4.8° ,差异具有统计学意义。而术后患侧膝关节与健侧相比,内外翻角度无明显差异,患侧膝关节术后与术前相比,外翻了 3.1° 。该结果说明 UKA 有效纠正了冠状面的内翻畸形,恢复了膝关节冠状面原有的生物力学特性。

在旋转方面,患侧膝关节术前与健侧相比,外旋 4.4° ,差异具有统计学意义,而在 UKA 术后,患侧膝关节与健侧相比,无明显差异,这表明 UKA 有

效地恢复了膝关节旋转的生物力学特性。在内侧接触中心的变化中,术后 UKA 侧与健侧相比,内侧接触中心后移了 2.5 mm ,说明 UKA 手术改变了内侧的接触中心,这可能与 UKA 假体本身设计与股骨内髁原本骨骼形态不能完全一致有关。此外,结合外侧间室接触中心,UKA 侧较健侧术后接触中心前移 1.8 mm ,这与术前胫骨较健侧内旋 4.4° 而术后则无明显差异相符合,即 UKA 术后胫骨相对于股骨外旋,而内侧间室接触中心前移,外侧间室接触中心后移。

许多学者认为,内侧 UKA 假体矫正了内侧间室的病变,会继发外侧间室负重的增加,进而引起外侧间室 OA 的发展,从而需要翻修手术^[11-12]。本文通过研究 TKA 手术前后外侧间室间隙的变化发现,外侧间室间隙在 UKA 手术前后与健侧均无明显差别,表明 UKA 假体不会影响外侧间室的固有间隙,不会增加外侧间室的负重。

既往生物力学研究多采用定位于皮肤的追踪器,通过摄像机采集各追踪位置,并进行生物力学的分析。因为固定于皮肤的追踪器并不固定于骨骼,鉴于皮肤肌肉组织的活动,故由此采集的生物力学参数会有较大的误差。相比之下,本文采用双平面 X 线结合股骨、胫骨 3D 模型方法,首先通过双平面 X 线收集患者膝关节骨骼的动态录像,然后将

股骨、胫骨 3D 模型与动态录像中的股骨、胫骨进行匹配,形成股骨、胫骨 3D 模型的动态录像,再通过设立解剖参照线,测算股骨、胫骨的相关生物力学参数。经过测算,本文所建模型的距离误差为 0.7 mm,旋转误差为 0.9° ^[6]。因此,本研究中的数据相比以前模型更加精确。但本文也存在小样本研究且随访时间较短的局限性。

4 结论

UKA 可以有效地矫正膝关节登楼梯时内翻畸形,维持其冠状面及旋转的固有生物力学,但由于假体本身的设计,会引起内外侧间室的接触中心点位置的改变。

参考文献:

- [1] EPINETTE JA, BRUNSCHWEILER B, MERTL P, *et al.* Unicompartmental knee arthroplasty modes of failure: Wear is not the main reason for failure: A multicentre study of 418 failed knees [J]. *Orthop Traumatol Surg Res*, 2012, 98 (6 Suppl): S124-S130.
- [2] 祁昕征, 张家铭, 谭传明, 等. 从生物力学角度评价单髁置换术与腓骨截骨术[J]. *医用生物力学*, 2015, 30(6): 479-485.
- QI XZ, ZHANG JM, TAN CM, *et al.* valuation of unicompartmental knee arthroplasty and fibulectomy from a biomechanical viewpoint [J]. *J Med Biomech*, 2015, 30 (6): 479-485.
- [3] WADA K, HAMADA D, TAKASAGO T, *et al.* Native rotational knee kinematics is restored after lateral UKA but not after medial UKA [J]. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*, 2018, 26(11): 3438-3443.
- [4] HEYSE TJ, EI-ZAYAT BF, CORTE R, *et al.* UKA closely preserves natural knee kinematics *in vitro* [J]. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*, 2014, 22(8): 1902-1910.
- [5] LONNER JH. Robotically assisted unicompartmental knee arthroplasty with a handheld image-free sculpting tool [J]. *Orthop Clin*, 2016, 47(1): 29-40.
- [6] ANDERST W, ZAUDEL R, BISSHOP J, *et al.* Validation of three-dimensional model-based tibio-femoral tracking during running [J]. *Med Eng Phys*, 2009, 31(1): 10-16.
- [7] ARGENSON JNA, BLANC G, AUBANIAC JM, *et al.* Modern unicompartmental knee arthroplasty with cement: A concise follow-up, at a mean of twenty years, of a previous report [J]. *J Bone Joint Surg Am*, 2013, 95(10): 905-909.
- [8] ALNACHOUKATI OK, BARRINGTON JW, BEREND KR, *et al.* Eight hundred twenty-five medial mobile-bearing unicompartmental knee arthroplasties: The first 10-year US multi-center survival analysis [J]. *J Arthroplasty*, 2018, 33 (3): 677-683.
- [9] EMERSON RH, ALNACHOUKATI O, BARRINGTON J, *et al.* The results of Oxford unicompartmental knee arthroplasty in the United States: A mean ten-year survival analysis [J]. *Bone Joint J*, 2016, 98B(10 Suppl B): 34-40.
- [10] LUSTIG S, LORDING T, FRANK F, *et al.* Progression of medial osteoarthritis and long term results of lateral unicompartmental arthroplasty: 10 to 18 year follow-up of 54 consecutive implants [J]. *Knee*, 2014, 21 (Suppl 1): 26-32.
- [11] MOCHIZUKI T, SATO T, TANIFUJI O, *et al.* Unicompartmental knee arthroplasty cannot restore the functional flexion axis of a living knee to normal [J]. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*, 2015, 23 (12): 3736-3742.
- [12] BECKER R, MAUER C, STARKE C, *et al.* Anteroposterior and rotational stability in fixed and mobile bearing unicompartmental knee arthroplasty: A cadaveric study using the robotic force sensor system [J]. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*, 2013, 21(11): 2427-2432.