

# 犁式滑雪转弯膝关节软骨有限元分析

付彦铭<sup>1,2</sup>, 于天彪<sup>1</sup>, 王 新<sup>2</sup>, 王宛山<sup>1</sup>  
(1. 东北大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 沈阳 110819; 2. 沈阳体育学院 运动人体科学学院, 辽宁 沈阳 110102)

**摘 要:** 随机挑选 200 名实验对象,记录他们的基本信息、关节角度和滑行速度,对其中 181 个有效数据进行分析.根据 1 名志愿者的 MR、CT 数据建立了膝关节 140°软骨与骨的三维模型.根据运动学分析结果和膝关节解剖学结构定义载荷及约束,在 Abaqus 6.14 中得出转弯膝关节应力集中出现的位置.研究表明:体重过大、速度过快时应适当增大转弯半径以减少向心力对膝关节软骨施加的应力;犁式转弯的过弯速度应控制在 3 m/s 之内.

**关 键 词:** 膝关节软骨;有限元分析;犁式滑雪;转弯侧膝关节;生物力学

**中图分类号:** G 804.6      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1005-3026(2017)10-1431-05

## Finite Element Analysis of Knee Joint Cartilage at Turning of Plough Type Ski

FU Yan-ming<sup>1,2</sup>, YU Tian-biao<sup>1</sup>, WANG Xin<sup>2</sup>, WANG Wan-shan<sup>1</sup>  
(1. School of Mechanical Engineering & Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China;  
2. School of Human Movement Science, Shenyang Sport University, Shenyang 110102, China. Corresponding author: FU Yan-ming, E-mail: fym8188@163.com)

**Abstract:** Two hundred subjects were randomly selected to record their basic information, joint angle and sliding speed, and 181 valid data were analyzed. According to a volunteer's MR, CT data, a 3D cartilage and bone model of the knee 140° was established. According to the result of kinematic analysis and knee anatomy structure, the load and constraints were defined. The stress concentration position on the knee cartilage was obtained in the Abaqus6.14. The results showed that the slider with large weight or sliding too fast should increase the turning radius in order to reduce the stress of the centripetal force on knee joint cartilage. It is advisable to control the speed of plough type turn within 3 m/s.

**Key words:** knee joint cartilage; finite element analysis; plough type ski; turning side of knee joint; biomechanics

双板滑雪初学者多采用犁式滑行.由于身体过度紧张、肌肉僵直,经常出现不能有效减速、转弯等情况,从而导致碰撞或摔倒.因此,对于初学者而言,膝关节存在一定的损伤风险.犁式滑雪普遍速度较慢,小腿呈“内八”姿态,在转弯时大多数体重转移至转弯腿膝关节内侧.在错误动作、速度、体重、关节角度等多种外界条件的影响下,内侧半月板存在极大的损伤风险<sup>[1-2]</sup>.在犁式转弯阶段,对转弯侧膝关节软骨进行有限元分析,揭示犁式转弯过程中膝关节软骨损伤机理.

### 1 实验对象和方法

#### 1.1 实验对象

本研究实验对象来自大众滑雪人群.在沈阳体育学院白清寨滑雪场随机选出男女各 100 名初

学者,并从中挑选 1 名无膝关节损伤史的志愿者.

1.2 实验方法

通过影像分析得出犁式滑雪转弯时转弯腿膝关节角度和转弯速度. 对 1 名志愿者进行膝关节 CT 和 MR 检测,将得到的 DICOM 数据导入 Mimics Research 17.0 × 64 软件中进行图像分割与重建. 分别将 CT 和 MR 数据进行阈值分割,从某些像素点出发,以组织边缘为界限进行逐层修复,最终实现目标提取<sup>[3]</sup>. 对滑雪模型进行 3 维度的受力分析,模拟实际运动过程并结合解剖学相关内容对各模型施加约束,推导出有限元分析中所需的边界条件,对膝关节模型中的半月板进行有限元分析.

2 结果与讨论

2.1 采集结果

对实验对象信息、膝关节角度、转弯速度和问卷等数据进行分析,共整理出有效数据 181 个. 其中男子 87 个,女子 94 个,统计数据见表 1. 成功获取 1 位无膝关节损伤史的 27 岁男性志愿者的膝关节 CT 和 MR 数据,得到 CT 平扫图片 377 张,MR 矢状面 224 张,均为 DICOM 格式.

在犁式转弯过程中,人体重心向转弯膝侧偏

移,约占体重的 60% ~ 80%,取中间值 70%. 根据采集的关节角度数据可知:在犁式滑行整个过程中膝关节始终在 112° ~ 169°之间往复运动,平均在 140°左右持续时间最长、频率最高.

表 1 实验对象信息统计表  
Table 1 Information statistics of experimental objects

类别	男性	女性	平均
身高/m	1.74 ± 0.07	1.61 ± 0.05	1.67 ± 0.09
体重/kg	79.24 ± 11.04	57.26 ± 8.01	68.42 ± 14.64
速度/(m·s <sup>-1</sup> )	1.65 ± 0.23	1.69 ± 0.49	1.67 ± 0.38
滑行膝角度/(°)	150.74 ± 10.56	141.88 ± 12.55	146.38 ± 12.37
转弯膝角度/(°)	142.90 ± 10.58	135.22 ± 12.49	139.63 ± 12.32

2.2 建模结果

以选取的骨组织区域为例,将股骨用单独颜色标记. 经过手工填补缺失部分,应用 Calculate 3D 将股骨三维重建<sup>[4]</sup>,如图 1 所示. 分别对胫骨、腓骨、髌骨和股骨等关键部位进行三维重建. 在实际情况各骨组织之间通过韧带相互连接. 由于本研究只针对膝关节软骨展开,因此骨模型的建立只是为了确定软骨模型的准确性. 基于以上模型的建立并利用 MR 数据对膝关节软骨组织进行提取,最终建立膝关节 140°时软骨组织模型,如图 2 所示.

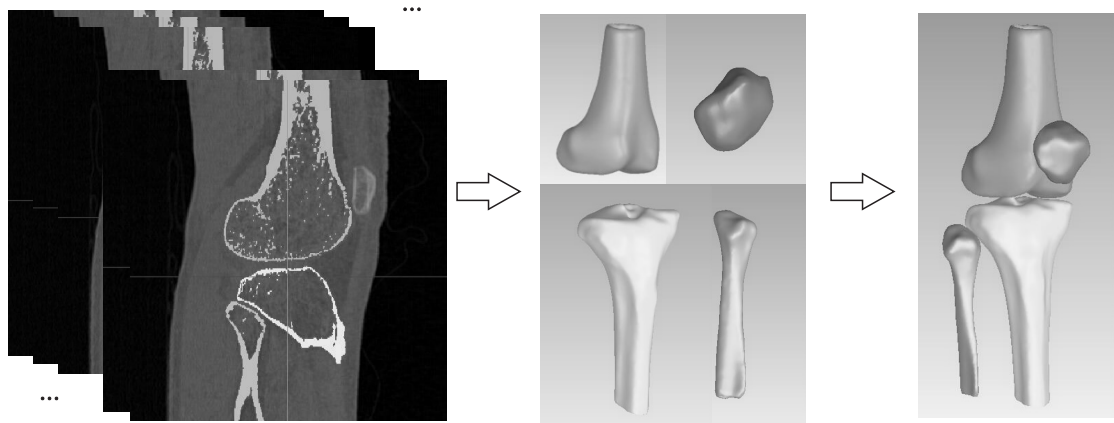


图 1 骨组织三维重建  
Fig. 1 3D reconstruction of bone tissue

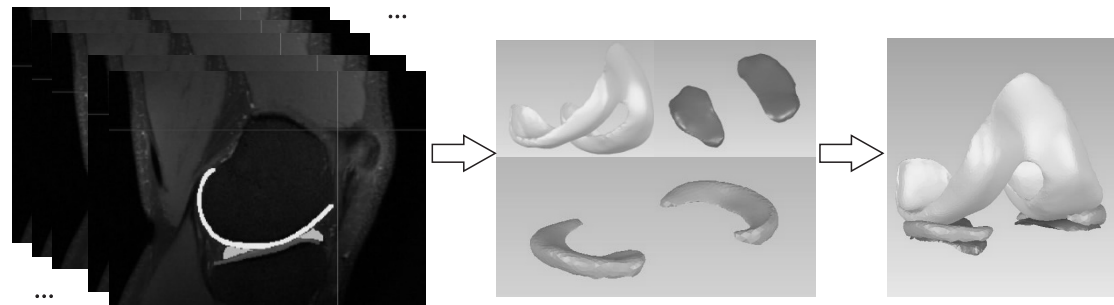


图 2 软骨组织三维重建  
Fig. 2 3D reconstruction of cartilage

2.3 力学模型

将犁式滑雪模型简化为棍图后进行 XYZ 三个方向的受力分析,如图 3 所示。其中  $V$  是犁式转弯时的最大速度; $G'$ 和  $G''$ 分别为转弯侧足底和转弯膝所受的重力; $F'$ 为转弯膝所受的向心力; $N'$ 与  $N''$ 分别为足底和转弯膝所受的支持力; $R$ 为极限时的转弯半径; $\alpha$ 和  $\theta$ 分别为转弯侧膝关节角度和场地坡度; $f'$ 为速度方向上的滑动摩擦力。随后分别在  $XY'$ 坐标轴(由于雪板与雪面之间存在夹角  $\gamma$ ,故胫骨平台面与雪面也存在一定夹角  $\gamma'$ ,这里  $\lambda \approx \gamma'$ ,  $\gamma$  的大小与转弯半径负相关,如图 4 所示)和  $XZ$ 坐标轴下进行分析,如图 5,6 所示。

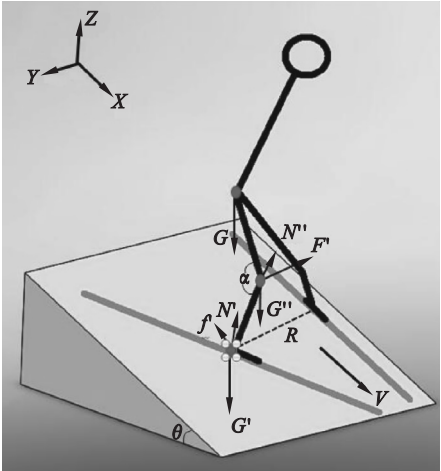


图 3 转弯侧受力分析图

Fig. 3 Stress analysis of turning side

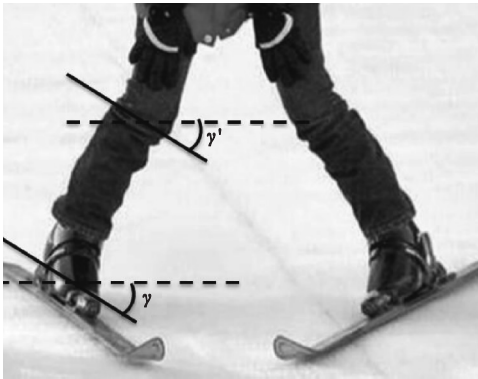


图 4 雪板、胫骨平台水平夹角示意图

Fig. 4 Horizontal angle of skis and tibial platform

假设在犁式转弯过程中,动能没有损耗,为求出有限元分析中的  $F$  和  $F'$  的大小,需要将最大速度转换为角速度,即  $\omega = V/R$ 。双膝关节承受膝以上体重约为总体重的 85.6%,因此转弯膝此时受到的重力约为  $G' = 70\% \times G \times 85.6\% = 402\text{ N}$ ,转弯膝所受向心力约为  $F' = m' \cdot \omega^2 R = 195\text{ N}$ ,其中  $m' = G \times 85.6\%$  为膝关节以上环节的体重,  $R = 0.6\text{ m}$ 。此时,若只考虑转弯膝受到向心力作用,则

膝关节所受  $Y$  和  $Z$  向分力:  $F'_y = m' \omega^2 R \cdot \cos\gamma'$ ,  $F'_z = m' \omega^2 R \cdot \sin\gamma'$ 。当人体保持直立,膝关节内外侧所受的重力分布均匀。犁式转弯时,膝关节屈曲,胫骨内旋,此时膝关节内侧压力增大,约为总载荷的 70%。在图 5 中,  $f'' \approx f'$ , 为速度方向上滑动摩擦力的近似值;  $F''$  为膝关节所受向心力的反作用力,其大小为内侧和外侧所受向心力的合力。本研究中雪的摩擦系数  $\mu = 0.1$ , 因此  $f'' \approx f' = N' \cdot \mu$ 。

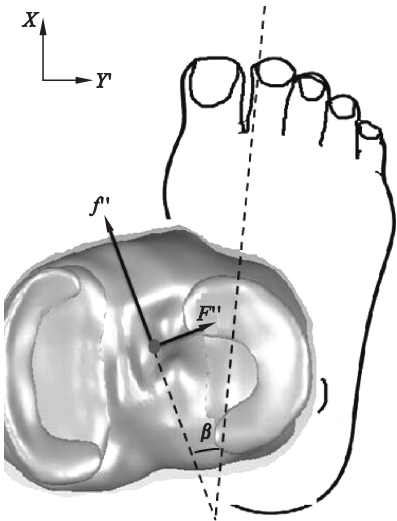


图 5 胫骨平台面受力示意图

Fig. 5 Stress analysis of tibial platform

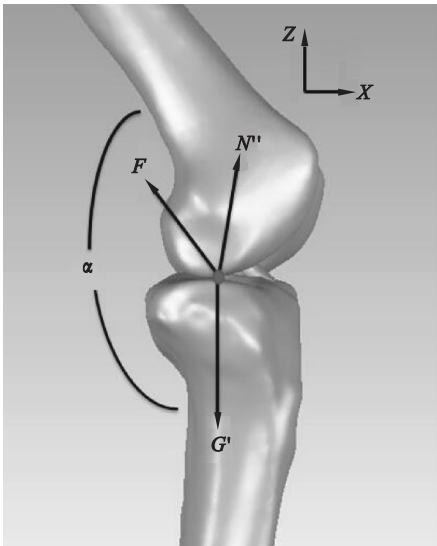


图 6 膝关节竖直方向受力示意图

Fig. 6 Vertical stress analysis of knee joint

2.4 有限元分析结果

2.4.1 有限元模型参数设定与有效性验证

使用 Abaqus 6.14 对膝关节软骨进行生物力学特性分析。由于相关文献中鲜有提及人种之间半月板和关节软骨的弹性模量、泊松比和软骨密度差异问题,故设置半月板和关节软骨的弹性模

量分别为 59,20 MPa,泊松比分别为 0.49,0.46,密度分别为  $1 \times 10^{-6}$ ,  $1.98 \times 10^{-6} \text{ kg/mm}^3$ <sup>[5-9]</sup>. 模型中共计 50 105 个节点,26 839 个单元(C3D10). 选取内侧半月板,对其进行破坏性试验. 结果内侧半月板最大压力约为 789 N,最大抗压强度约为 35.8 MPa. 此测试结果与尸体生物力学实验的测试结果较接近,说明本研究所建模型与实际膝关节半月板的材料力学特性具有相似性<sup>[10-13]</sup>.

2.4.2 膝关节软骨有限元分析结果

在本研究中,股骨与股骨软骨、胫骨与胫骨软骨之间定义为面与面接触且无滑动约束,内外侧半月板上下表面与胫骨软骨和股骨软骨之间、股骨软骨与胫骨软骨之间也为面与面接触,其中只

有内外侧半月板前脚与后脚处由于有韧带连接故存在绑定约束. 利用所建立的有限元模型对犁式滑雪转弯膝下滑转弯过程进行了分析,如图 7 所示. 可知:在膝关节角度为 140°,下滑速度为 3 m/s 时,在自身重力的作用下,膝关节存在应力集中现象;股骨软骨不存在应力集中现象;内侧半月板出现明显的应力集中现象,位置出现在中部和后脚处;外侧半月板出现较为明显的应力集中现象,位置出现在中部和中后部;内侧胫骨软骨出现较为明显的应力集中现象,位置出现在中后部及内侧边缘中部;外侧胫骨软骨出现明显的应力集中现象,位置出现在外侧边缘中部.

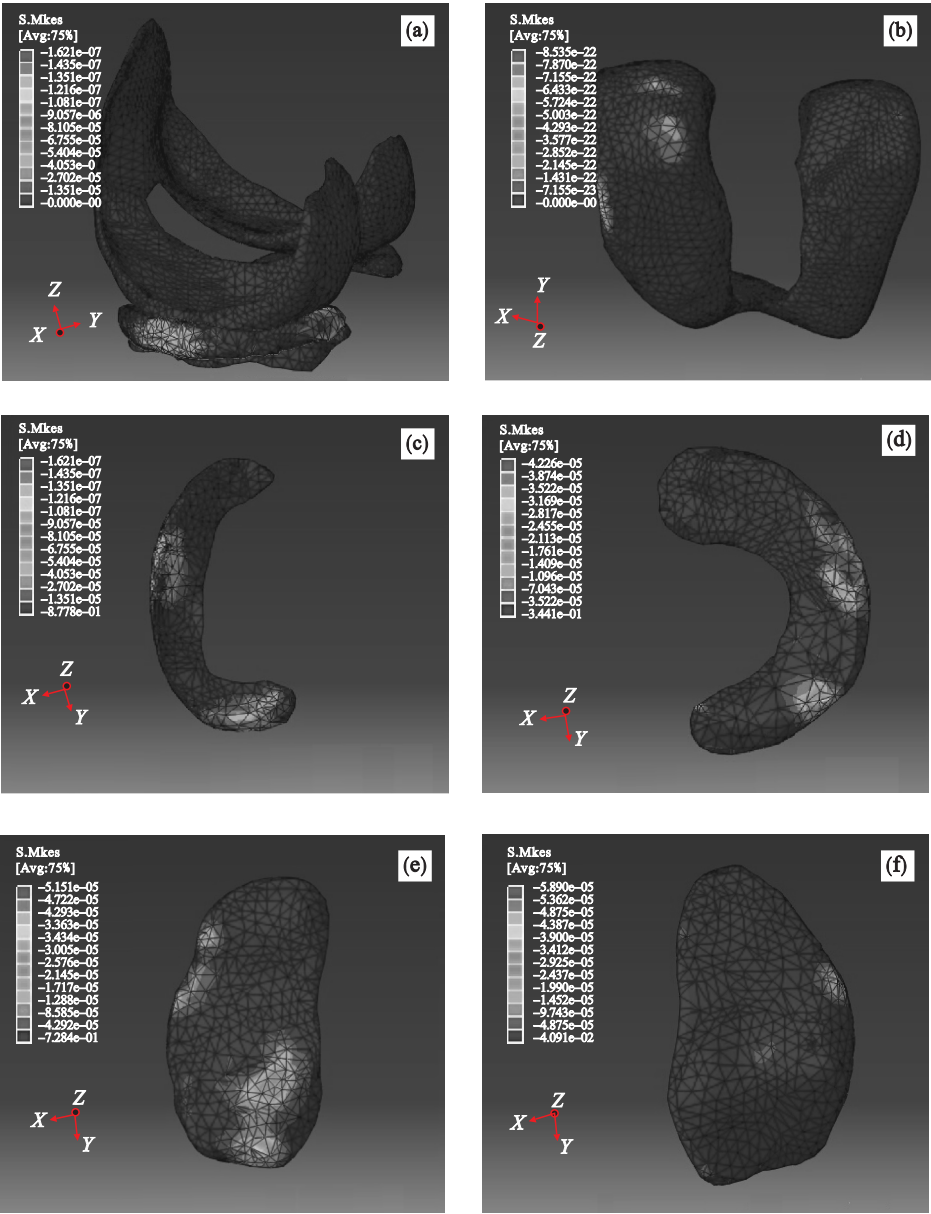


图 7 转弯膝有限元分析

Fig. 7 Finite element analysis on turning side of knee

(a)—膝关节软骨; (b)—股骨软骨; (c)—内侧半月板俯视图; (d)—外侧半月板俯视图; (e)—内侧胫骨软骨; (f)—外侧胫骨软骨.

3 结 论

- 1) 在下滑过程中应力集中点出现在犁式转弯时转弯膝内侧半月板中部和后脚处、外侧半月板中部和中后部、内侧胫骨软骨中后部和内侧边缘中部及外侧胫骨软骨外侧边缘中部。
- 2) 从内侧半月板受力并结合解剖结构来看，内侧半月板的应力会使其中部挤压到内侧副韧带，使得内侧副韧带更加收紧，此种情况是导致犁式滑雪过程中膝关节内侧酸胀的成因之一。
- 3) 在规范的犁式滑雪技术动作前提下，合理地调整运动强度、滑行速度和转弯半径，可有效降低犁式滑雪时对膝关节软骨的损伤。

参考文献：

[ 1 ] 王西十,白瑞浦.关于人膝关节生物力学模型的研究现状 [ J ]. 力学进展,1999,29(2):244-250.  
( Wang Xi-shi, Bai Rui-pu. The research status of biomechanics of the knee joint model [ J ]. *Advances in Mechanics*,1999,29(2):244-250. )

[ 2 ] Iesaka K,Tsumura H,Sonoda H,et al. The effects of tibial component inclination on bone stress after unicompartmental knee arthroplasty [ J ]. *Journal of Biomechanics*,2002,35:969-974.

[ 3 ] 付彦铭. 逆向工程技术在人体膝关节三维重建中的应用 [ J ]. 科技创新导报,2015,35(1):14-15.  
( Fu Yan-ming. Application of reverse engineering technology in human knee joint of 3D reconstruction [ J ]. *Science and Technology Innovation Herald*,2015,35(1):14-15. )

[ 4 ] 张宇,郝智秀,金德闻,等.基于磁共振图像的人体膝关节三维模型的建立 [ J ]. 中国康复医学杂志,2007,22(4):339-342.  
( Zhang Yu,Hao Zhi-xiu,Jin De-wen,et al. A method of vivo

human knee joint 3D model reconstruction based on MR images [ J ]. *Chinese Journal of Rehabilitation Medicine*,2007,22(4):339-342. )

[ 5 ] Bin S I,Kim J M,Shin S J. Radial tears of the posterior horn of the medial meniscus [ J ]. *Arthroscopy*,2004,20(4):373-378.

[ 6 ] Bottcher P,Zeissler M,Maierl J,et al. Mapping of split-line pattern and cartilage thickness of selected donor and recipient sites for autologous osteochondral transplantation in the canine stifle joint [ J ]. *Veterinary Surgery*,2009,38(6):696-704.

[ 7 ] Guess T M,Thiagarajan G,Kia M,et al. A subject specific multibody model of the knee with menisci [ J ]. *Medical Engineering & Physics*,2010,32(5):505-515.

[ 8 ] Li I G,Gill J,Kanamori A,et al. A validated three-dimensional computational model of a human joint [ J ]. *ASME Journal of Biomechanical Engineering*,1999,121:657-662.

[ 9 ] Pefia E,Calvo B,Martinez M A,et al. A three-dimensional finite element analysis of the combined behavior of ligaments and menisci in the healthy human knee join [ J ]. *Journal of Biomechanics*,2006,39:1686-1701.

[ 10 ] Kozanek M,Hosseini A,Liu F,et al. Tibiofemoral kinematics and condylar motion during the stance phase of gait [ J ]. *Journal of Biomechanics*,2009,42(12):1877-1884.

[ 11 ] Donahue T L,Hull M L,Rashid M M,et al. A finite element model of the human knee joint for the study of tibiofemoral contact [ J ]. *Journal of Biomechanical Engineering*,2002,124(3):273-280.

[ 12 ] Joseph M. Changes in articular cartilage mechanics with meniscectomy:a novel image-based modeling approach and comparison to patterns of OA [ J ]. *Journal of Biomechanics*,2011,44(12):2307-2312.

[ 13 ] Wang Y X,Fan Y B,Zhang M. Comparison of stress on knee cartilage during kneeling and standing using finite element models [ J ]. *Medical Engineering & Physics*,2014,36(4):439-447.