

应用逆向工程技术测量人膝关节内外侧间室间隙和体积

钟锦然¹, 何坚^{1,2}, 陈剑³, 陈菁华¹, 林颖¹, 王芑斌^{1,2} (福建中医药大学康复医学院, 福建省福州市 350122; ²福建省运动功能康复重点实验室, 福建省福州市 350003; ³福建中医药大学附属康复医院, 福建省福州市 350003)

文章亮点:

- 1 文章首次基于计算机虚拟模型和逆向工程技术对膝关节间室体积进行测量。
- 2 文章结果发现, 膝关节内外侧间室间隙距离有差别, 但进行体积测量后发现差别不大。
- 3 Mimics 和 Gemagic studio 软件可以在个人电脑上流畅实现模型建立和测量, 方便临床工作者使用。

关键词:

植入物; 数字化骨科; 膝关节; 逆向工程; 三维模型; Mimics; 生物力学; 国家自然科学基金

主题词:

膝关节; 成像, 三维; 生物力学

基金资助:

国家自然科学基金(81273819)

摘要

背景: 膝关节是人体骨骼中形态及结构最为复杂的部分, 临床上常使用 X 射线片反映膝关节间隙狭窄程度。但 X 射线片是将三维的关节结构进行二维投射, 因此关节拍摄定位的不同会影响测量结果, 很难保证重复测量的准确性。

目的: 建立膝关节间隙三维模型并测量其距离和体积, 为后续模型、生物力学及相关临床研究提供基础。

方法: 基于逆向工程原理, 采用膝关节 CT 断层图像, 使用 Mimics 进行膝关节和内侧间室三维结构重建, 最后导入 Geomagic Studio 对模型进行光滑处理并计算膝关节内、外侧间室体积。

结果与结论: 利用膝关节 CT 断层图像分别重建出膝关节三维模型的骨性结构如股骨、胫骨、腓骨, 并成功构建出膝关节间隙模型。构建的膝关节三维模型和间隙模型可以任意角度或单独观察, 并可以进行体视学测量。发现膝关节内外侧间隙虽然距离有差异, 但体积接近, 说明通过计算膝关节内、外间室的体积, 可以全面的反映膝关节间隙的狭窄程度。

钟锦然, 何坚, 陈剑, 陈菁华, 林颖, 王芑斌. 应用逆向工程技术测量人膝关节内外侧间室间隙和体积[J]. 中国组织工程研究, 2015, 19(31):5046-5050.

doi:10.3969/j.issn.2095-4344.2015.31.024

Application of reverse engineering techniques to measure the distance and volume of medial and lateral compartments of human knee joint

Zhong Jin-ran¹, He Jian^{1,2}, Chen Jian³, Chen Jing-hua¹, Lin Ying¹, Wang Xiang-bin^{1,2} (¹School of Rehabilitation Medicine, Fujian University of Traditional Chinese Medicine, Fuzhou 350122, Fujian Province, China; ²Fujian Provincial Key Laboratory of Motor Function Rehabilitation, Fuzhou 350003, Fujian Province, China; ³Rehabilitation Hospital Affiliated to Fujian University of Traditional Chinese Medicine, Fuzhou 350003, Fujian Province, China)

Abstract

BACKGROUND: Knee joint is the most complicated structure of human body, and X-ray is often used to reflect the stenosis of knee compartment. However, radiographs are two-dimensional projection of three-dimensional joint structure. Thus, different joint shooting locations can impact the outcomes of measurement, and it is difficult to ensure the accuracy of repeated measurements.

OBJECTIVE: To build three-dimensional model of knee compartment, measure the distance and volume, and provide the basis for subsequent models, biomechanics and relevant clinical studies.

METHODS: Based on the principle of reverse engineering, using CT images of the knee joint and the software of Mimics, three-dimensional model of medial compartment knee structure was reconstructed. After the model was imported and smoothed, the medial and lateral compartment volumes were finally calculated by the software of Geomagic Studio.

RESULTS AND CONCLUSION: Three-dimensional model of the knee compartment, including femur, tibia and fibula, was successfully structured by CT images. The models of knee and knee compartment could be observed at any angle or observed individually, and could be measured. It was discovered that the volume of medial and lateral compartments of knee is close, although the joint space width of them is different, which illustrates that the procedure can accurately reflect the degree of knee joint space width in the round by calculating the volume of

钟锦然, 男, 1990 年生, 重庆市人, 汉族, 福建中医药大学在读硕士, 主要从事骨科康复方面的研究。

通讯作者: 王芑斌, 博士, 副教授, 福建中医药大学康复医学院, 福建省福州市 350122; 福建省运动功能康复重点实验室, 福建省福州市 350003

中图分类号: R318

文献标识码: A

文章编号: 2095-4344

(2015)31-05046-05

稿件接受: 2015-05-27

http://www.crter.org

Zhong Jin-ran, Studying for master's degree, School of Rehabilitation Medicine, Fujian University of Traditional Chinese Medicine, Fuzhou 350122, Fujian Province, China

Corresponding author: Wang Xiang-bin, M.D., Associate professor, School of Rehabilitation Medicine, Fujian University of Traditional Chinese Medicine, Fuzhou 350122, Fujian Province, China; Fujian Provincial Key Laboratory of Motor Function Rehabilitation, Fuzhou 350003, Fujian Province, China

Accepted: 2015-05-27

medial and lateral compartments of knee joint through computer.

Subject headings: Knee Joint; Imaging, Three-Dimensional; Biomechanics

Funding: the National Natural Science Foundation of China, No. 81273819

Zhong JR, He J, Chen J, Chen JH, Lin Y, Wang XB. Application of reverse engineering techniques to measure the distance and volume of medial and lateral compartments of human knee joint. Zhongguo Zuzhi Gongcheng Yanjiu. 2015;19(31):5046-5050.

0 引言 Introduction

膝关节是人体中最大, 亦可能是最复杂的关节, 它是由胫股关节(Tibiofemoral Joint)和髌股关节(Patellofemoral Joint)组成的双关节结构^[1-4]。膝关节间隙是指股骨内外侧髁到胫骨平台之间的距离^[5-6]。临床上, 膝关节间隙是测量股骨和胫骨之间的内外侧间室的最近距离^[7-13]。膝关节间隙的准确测量具有重要的临床指导意义。如内翻膝人工全膝关节置换过程中, 需要测量屈膝90°外侧胫骨关节间隙以确定胫骨截骨量^[14]; 在膝关节早期诊断中, 需要使用X射线片对膝关节间隙进行测量^[7]。

X射线片是测量胫股关节间隙的标准方法^[7], 临床上常常使用, 但是这种方法具有一定的局限性。X射线片是将三维的关节结构进行二维投射, 因此关节拍摄定位的不同会影响测量结果, 保证重复测量的准确性较为困难^[15]。而MRI和CT可以提供丰富的3D信息, 进行体积测量可以更加全面反映膝关节间隙的狭窄程度, 克服X射线片距离测量的不足^[16]。

由比利时Materialise公司开发的Mimics是一套高度整合而且易用的3D图像生成及编辑处理软件, 能输入各种扫描的数据(CT、MRI)建立3D模型进行编辑^[17]。例如采用Mimics进行膝关节三维重建, 或对成年人膝关节标本行CT、MRI扫描, 然后利用Mimics及逆向工程软件Geomagic对图像进行三维重建及图像配准, 构建膝关节骨、关节软骨结构等^[18-19]。到目前为止, 约有10余篇文献报道将Mimic和Geomagic软件结合使用进行膝关节三维有限元模型的建立。此外, Mimics结合Geomagic软件除了有强大建模能力之外, 还能够进行模型距离测量、角度计算, 其中Geomagic将模型进行抽壳处理后还可以进行精确的体积计算, 例如通过软件测量膝关节横断面中股骨上髁轴线与股骨后髁轴线之间的夹角及Whiteside's线的垂线与股骨后髁轴线的夹角^[20]、模拟膝关节置换来确定解剖轴线机械轴线来测量股骨外翻角^[21], 以及结合Mimics和Proteries软件进行脊髓容积测量等^[22], 而目前使用Geomagic进行体积测量的方法未见报道。

文章介绍了一种基于三维螺旋CT、逆向工程软件技术, 通过CT断层图像的灰度值进行模型建立及处理, 合理、准确的构建膝关节和内、外侧间室三维模型, 并对模型体积和宽度进行测量的方法, 以期为后续的模式、生物力学及相关临床研究提供基础。

1 材料和方法 Materials and methods

设计: 计算机辅助虚拟模型研究。

时间及地点: 于2014年7至9月在福建中医药大学康复医学院完成。

材料: 本次实验虚拟人膝关节数据集来源于美国国立医学图书馆(National Library of Medicine, NLM)“可视人研究计划(Visible Human Project, VHP)”网上公开数据集(http://www.nlm.nih.gov/research/visible/visible_human.html)。实验选择NLM提供的CT断面数据集(CT平扫横断面, 350张, DICOM格式)进行后续的三维重建。

方法:

图像分割: 实验采用Mimics 10.0软件根据膝关节在CT断层图像的特点, 选择不同分割算法进行膝关节解剖组织分割。CT图像上膝关节组织有不同的X射线吸收系数, 基于此, 本实验利用最基本阈值分割(Threshold Segmentation)算法, 首先设定分割阈值为226-1 838 HU, 将CT图像上骨组织与软组织自动分离。考虑到骨性膝关节由股骨下端、胫骨上端构成, 重建出的骨性结构之间有间隙, 因此利用Mimics软件自带的分离功能(Split)可以自动地把股骨、胫骨、腓骨从软组织中分割出来, 得到CT断层需要的骨组织蒙板(Mask)。然后设定分割阈值为-311-729 HU, CT图像上的软组织自动分离。同时使用(Boolean Operations)功能, 用CT骨组织的蒙板减去软组织生成的蒙板, 得到膝关节间室和骨组织拟合度较好的新的边界蒙板。因为自动提取软组织分割方法会产生其他不需要的组织结构, 所以采用蒙板裁剪(crop mask)功能, 定位到需要分割的区域, 然后利用蒙板编辑和多层编辑(Edit Mask, Multiple Slice Mask)功能, 在专业影像科医生的指导下, 手工修出膝关节间室部分。

三维重建: 利用Mimics软件分割(Segmentation)菜单下的三维重建(Calculate 3D)功能, 把阈值分割出的骨骼和膝关节间室进行重建。为了方便区分骨骼和膝关节间室, 分别用不同的颜色来显示。使用mimics自带的magic软件将膝关节间室模型导入进行平滑处理(smoothing), 修整因为手工编辑图层过程产生的噪声, 增强模型的精确性。最后对所建立的模型使用形态学操作工具(Morphology Operations)关闭小的空洞和平滑边缘。关运算(close)操作可去除模型边界上一些小的毛糙, 而开运算(open)操作可以填补模型中一些小的空洞, 为了使模型更加准确, 需分别进行两次关运算和开运算。

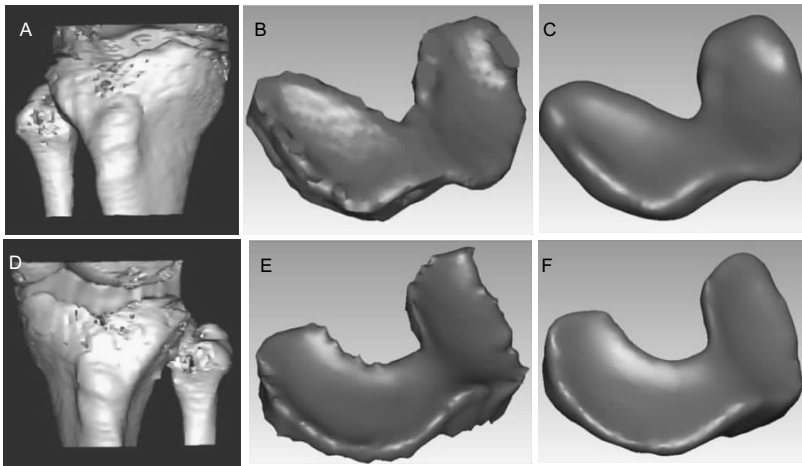


图 1 膝关节及其间室三维数字模型

Figure 1 Three-dimensional digital model of knee joint and compartments

图注: 图中所示为膝关节三维数字模型。A 为右侧膝关节; B 为右侧膝关节间室; C 为降噪处理后的右侧膝关节间室; D 为左侧膝关节三维模型; E 为左侧膝关节间室; F 为降噪处理后的左侧膝关节间室。

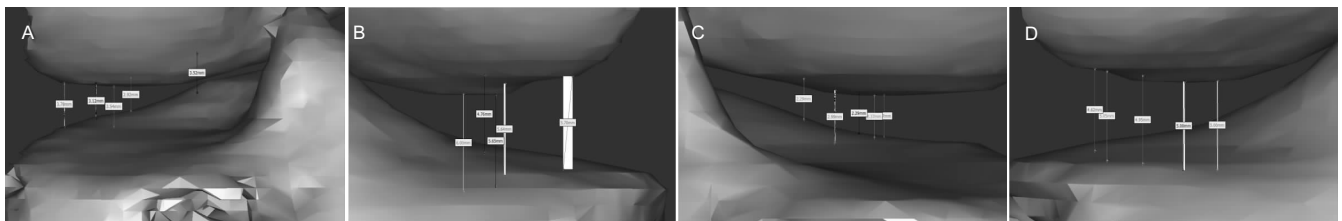


图 2 膝关节内、外侧间室距离测量

Figure 2 Measurements on medial and lateral compartments of knee joint

图注: 图 A 为右侧膝关节间室内侧间室; B 为右侧膝关节外侧间室; C 为左侧膝关节内侧间室; D 为左侧膝关节外侧间室。

测量膝关节间隙并计算体积: 使用Mimics软件工具(tool)菜单下的距离测量(Measure Distance)功能, 通过模型任意角度旋转, 能较好分辨出股骨下端最低点和该点到胫骨平台关节面的垂直距离, 分别测量膝关节内、外侧间室最狭窄处距离。将Mimics膝关节间室以ASCII STL格式输出, 导入Geomagic Studio 12软件中进行处理。使用“多边形”下拉菜单中“松弛”命令平滑模型, 使边界噪音降低; 再使用“多边形”下拉菜单中的“磨砂”命令去除突出明显的边界, 最后得到更加精细的关节间室模型。模型处理完后, 进行体积计算: 首先使用“多边形”菜单下的“平面截面”功能, 将膝关节间室分割为内侧间室和外侧间室, 并分别计算其体积。

主要观察指标: 测量膝关节内、外侧间室间隙距离和体积。

统计学分析: 测量数据使用SPSS 12.0软件进行统计分析。

2 结果 Results

2.1 三维重建结果 基于逆向工程原理, 利用虚拟人膝关节连续 CT 断面图像分别重建出膝关节的骨性结构(如股骨内外侧髁、胫骨、腓骨、膝关节内外侧间室), 见图 1。上述重建的结构在计算机中可以进行任意角度旋转和独立观察, 并进行体视学测量。

2.2 膝关节模型测量 构建的膝关节在 Mimics 软件中可以单独显示, 在计算机中观察膝关节内、外侧间室最狭窄处分别进行 5 次重复测量, 见图 2。将内、外侧间室导入

geomagic studio 中进行体积计算。膝关节内、外间室距离和体积测量结果见表 1。

表 1 左右膝关节间隙和体积

Table 1 Joint space width and volume of left and right knees

项目	左侧膝关节			右侧膝关节		
	内侧间室	外侧间室	内外比值	内侧间室	外侧间室	内外比值
间隙 ($\bar{x} \pm s$, mm)	2.25±0.3	4.92±0.17	0.46	3.38±0.35	5.53±0.46	0.61
体积(cm ³)	7.82	9.23	0.85	8.08	9.13	0.88

表注: 建立的模型在三维空间中可以任意的旋转, 方便从任意角度进行观察。内外侧间室在降噪处理后, 可以进行更加精准的体积计算。

2.3 可能影响结果的因素 由于选取的人体膝关节数据集来自国外, 和国内人体膝关节解剖特征可能存在差异。

后期可以收集国人 CT 数据集进行研究。建模阶段使用软件自动进行阈值分割, 而建立的三维模型在股骨和胫骨的表面始终存在噪音, 影响模型的准确性, 因此可能会对测量结果产生影响。

3 讨论 Discussion

膝关节间隙是由两个骨性关节面之间的关节软骨、半月板、少量滑液和潜在的解剖间隙厚度综合^[23-25]。临床上常使用放射摄影术对关节炎进行诊断和监控。放射摄影术能清晰再现骨性结构特征, 例如关节炎的特征改变: 骨刺、软骨下囊肿和硬化。并且放射摄影术可以通过胫股关节间隙对软骨厚度和半月板是否完整进行间接评估^[26-30]。目前, 放射摄影

术用于诊断膝骨关节炎使用半定量的Kellgren-Lawrence分级法。其分级依据2个X射线特征：骨刺和关节狭窄程度。2级或以上可被认为患有膝骨关节炎。不论膝关节是否关节炎的症状，只要外侧或内侧胫骨关节间隙变窄，都被诊断为膝骨关节炎。关节炎的进展评价标准普遍使用关节狭窄程度这一指标。膝负重下前向后的X射线如果表现出关节间隙的完全消失，是进行膝关节置换的重要考虑因素之一^[31]。因为费用低、拍摄方便、时间短和较少不适感等优势，放射技术被广泛使用^[32]。目前，美国FDA依然把关节间隙狭窄的放射学诊断作为终止临床实验的指标。欧洲将放射学诊断作为三期临床关节炎药物实验中减缓病情的证据。根据最近OARSI的指南建议，关节间隙的放射学诊断标准用于观察骨性结构改变，仍是临床推荐诊断方法^[33]。而引起发育中的膝关节炎间隙变窄的常见原因有很多，如化脓性关节炎的中晚期引起关节软骨的破坏，这种破坏所引起的狭窄在承受体重的部分出现较早，也较明显。早期的全关节结核和晚期关节软骨破坏，均可引起间隙变窄。佝偻病所致的膝内翻或膝外翻时一侧间隙常明显变窄；中晚期的类风湿关节炎所致的膝改变；大骨节病常可致膝关节炎间隙变窄等。其中，膝关节炎间隙测量常用在膝骨性关节炎的诊断和分级中。Kellgren-Lawrence分级法是诊断膝骨性关节炎严重程度的金标准，通过关节间隙狭窄、软骨硬化和骨刺对病情严重程度进行分级^[11, 26]。X射线片虽然是测量胫骨关节间隙的标准方法，目前公认用于膝关节炎中的胫股关节改变的定量分析，是根据膝关节的X射线片，测量膝关节股骨和胫骨之间的内外侧间室最近的距离。通过测量膝关节最小间隙，判断膝关节狭窄程度，从而推断软骨损失的情况^[4-7]。但由于膝关节拍摄时摆放的位置不同会造成测量的误差，保证重复测量的准确性较为困难，导致反映软骨损失敏感性低(23%)^[29]。应用X射线在膝关节炎负重情况下对其间隙的测量，不同的研究会结果差异较大，杨立伟等^[26]发现内侧间隙为(8.45±1.51) mm，外侧间隙为(8.42±1.47) mm。而在王亦进等^[22]发现内侧间隙为(6.15±1.14) mm，外侧间隙为(5.2±0.98) mm。而基于CT断层扫描丰富的3D信息对膝关节进行三维重建后，可以在任意角度对膝关节间隙进行测量，并通过计算膝关节炎内、外间室的体积，可以全面的反应膝关节炎的狭窄程度。与传统的X射线片相比，膝关节炎3D图像信息可以提高膝关节炎的诊断和监控^[16]。

本次实验对膝关节内外间室间隙进行测量，从测量结果来看，左、右侧膝关节内侧间隙均小于外侧间隙，如果内侧间室和外侧间室比值越接近1，说明膝关节内外间隙越相等；越接近0说明内侧间隙较外侧间隙更窄。结果显示，右膝关节内外间隙比值为0.61，而左侧膝关节间隙比值为0.46，表明左侧膝关节内侧间室更为狭窄；但是在实际的体积计算中发现，左右膝关节体积较为接近，而且内外侧间室体积比值接近，左侧膝关节为0.85，右侧膝关节为0.88。并没有像间隙距离测量那样，左右两侧膝关节出现

较大的差异。因为本实验所采用的是正常男性人体膝关节CT断层图像，考虑两侧膝关节间隙应趋于一致，说明膝关节体积在反映膝关节间隙时可能更加准确和全面。

最新研究调查显示，全球大约有2.5亿人口受到膝骨关节炎的影响^[34]。膝关节的疼痛导致他们日常活动受限和降低其生活质量。在65岁以上人群中，膝骨性关节炎所造成移动失能(指帮助下的步行或爬楼梯)的风险超过其他所有情况风险的总和^[35]。提前预防、早期诊断、早期治疗是对关节炎高危人群进行防止工作的重中之重。对习惯性关节炎的有效防治，可以减少国家、家庭和个人的经济负担，节约医疗资源。

关节间隙变化，常常发生单侧改变，也可以双侧关节间隙同时累及，随后膝关节出现对位不齐，膝内翻会增加内侧胫骨关节压力载荷，与此同时膝外翻也会增加外侧胫骨关节的压力载荷^[36]，关节力线也会随之发生变化，最终形成软骨应力分布改变，从而导致膝骨性关节炎病情进展^[37]。关节间隙的改变早于力学指标发生变化，并且是膝骨性关节炎的危险因素，所以关节间隙的准确测算具有重要意义。本实验中的关节间隙体积是通过计算机对三维空间仿真后进行测算，这一指标能够更加全面的反应关节间隙的变化情况。同时，计算仿真模拟的膝关节间隙体积计算指标今后可以应用于临床药物试验的疗效评价和膝关节炎辅助治疗器具的研发评价中。

致谢: 感谢王芑斌老师和陈剑师兄对本次实验的指导和帮助。

作者贡献: 第一作者钟锦然负责相关论文查阅、资料收集、实验实施及论文撰写。王芑斌负责课题背景知识介绍、科研方法指导、论文修改。陈剑负责技术指导和论文指导及修改。

利益冲突: 文章及内容不涉及相关利益冲突。

伦理要求: 无涉及伦理冲突的内容。

学术术语: 膝关节间隙-是由2个骨性关节面之间的关节软骨、半月板、少量滑液和潜在的解剖间隙厚度综合。临床上常使用放射摄影术对关节炎进行诊断和监控。放射摄影术能清晰再现骨性结构特征，例如关节炎的特征改变：骨刺、软骨下囊肿和硬化。并且放射摄影术可以通过胫股关节间隙对软骨厚度和半月板是否完整进行间接评估。

作者声明: 文章为原创作品，无抄袭剽窃，无泄密及署名和专利争议，内容及数据真实，文责自负。

4 参考文献 References

- [1] 邝适存,郭霞.肌肉骨骼系统基础生物力学(译本)[M].北京:人民卫生出版社,2008:117.
- [2] McAlindon TE, Bannuru RR. Osteoarthritis: is viscosupplementation really so unsafe for knee OA? *Nat Rev Rheumatol.* 2012; 8:635-636.
- [3] Berenbaum F, Grifka J, Cazzaniga S, et al. A randomised, double-blind, controlled trial comparing two intra-articular hyaluronic acid preparations differing by their molecular weight in symptomatic knee osteoarthritis. *Ann Rheum Dis.* 2012; 71:1454-1460.

- [4] Maheu E, Zaim M, Appelboom T, et al. Comparative efficacy and safety of two different molecular weight (MW) hyaluronans F60027 and Hylan G-F20 in symptomatic osteoarthritis of the knee (KOA): results of a non inferiority, prospective, randomized, controlled trial. *Clin Exp Rheumatol*. 2011; 29:527-535.
- [5] Mazucca SA, Brandt KD. Is knee radiography useful for studying the efficacy of a disease-modifying osteoarthritis drug in humans? *Rheum Dis Clin North Am*. 2003;29(4): 819-830.
- [6] Mazucca SA, Brandt KD, Buckwalter KA, et al. Pitfalls in the accurate measurement of joint space narrowing in semiflexed, anteroposterior radiographic imaging of the knee. *Arthritis Rheum*. 2004;50(8):2508-2515.
- [7] Emrani PS, Katz JN, Kessler CL, et al. Joint space narrowing and Kellgren-Lawrence progression in knee osteoarthritis: an analytic literature synthesis. *Osteoarthritis Cartilage*. 2008;16(8):873-882.
- [8] Rutjes AW, Jüni P, da Costa BR, et al. Viscosupplementation for osteoarthritis of the knee: a systematic review and meta-analysis. *Ann Intern Med*. 2012;157:180-191.
- [9] Strand V, Baraf HS, Lavin PT, et al. A multicenter, randomized controlled trial comparing a single intraarticular injection of Gel-200, a new cross-linked formulation of hyaluronic acid, to phosphate buffered saline for treatment of osteoarthritis of the knee. *Osteoarthritis Cartilage*. 2012; 20:350-356.
- [10] McAlindon TE, Bannuru RR, Sullivan MC, et al. OARSI guidelines for the nonsurgical management of knee osteoarthritis. *Osteoarthritis Cartilage*. 2014; 22:363-388.
- [11] Kijowski R, Blankenbaker DG, Stanton PT, et al. Radiographic findings of osteoarthritis versus arthroscopic findings of articular cartilage degeneration in the tibiofemoral joint. *Radiology*. 2006; 239(3):818-824.
- [12] Beattie KA, Duryea J, Pui M, et al. Minimum joint space width and tibial cartilage morphology in the knees of healthy individuals: a cross-sectional study. *BMC Musculoskelet Disord*. 2008;9:119.
- [13] Schiphof D, Boers M, Bierma-Zeinstra SM. Differences in descriptions of Kellgren and Lawrence grades of knee osteoarthritis. *Ann Rheum Dis*. 2008;67(7):1034-1036.
- [14] Guermazi A, Hunter DJ, Roemer FW. Plain radiography and magnetic resonance imaging diagnostics in osteoarthritis: validated staging and scoring. *J Bone Joint Surg Am*. 2009;91 Suppl:154-162.
- [15] Roemer FW, Crema MD, Trattinig S, et al. Advances in imaging of osteoarthritis and cartilage. *Radiology*. 2011; 260(2): 332-354.
- [16] 吴涛,王卉. Mimics三维重建模型在人体解剖学学习中的应用[J]. 中国医学教育技术, 2012, 26(6):664-667.
- [17] 张美超,赵卫东,原林,等.建立数字化虚拟中国男性一号膝关节的有限元模型[J].第一军医大学学报, 2003, 23(6):527-529.
- [18] 李鉴轶,赵卫东,余正红,等. 膝关节关节软骨的三维构建[J].解剖学杂志, 2007, 30(6):695-697.
- [19] 向湘松,李峰,蒲丹,等. Mimics软件在测量股骨远端旋转力线的应用[J].临床医学工程, 2010, 17(2):48-50.
- [20] 肖建林,刘潼,秦彦国,等. 基于CT图像三维重建测量股骨外翻角[J].中国实验诊断学, 2011, 15(12):2041-2043.
- [21] 邱锋,马向阳,杨进城.应用Mimics测量脊髓容积[J].中国脊柱脊髓杂志, 2013, 23(11):1043-1045.
- [22] 王亦进,郭新全,陈敬武,等.健康成人与老年性骨关节炎病人卧、立位膝关节内、外侧间隙宽度的测量研究[J].中国临床医学影像杂志, 2000, 11(5):329.
- [23] Kalinosky B, Sabol JM, Piacsek K, et al. Quantifying the tibiofemoral joint space using x-ray tomosynthesis. *Med Phys*. 2011;38(12):6672-6682.
- [24] Hochberg MC, Altman RD, April KT, et al. American College of Rheumatology 2012 recommendations for the use of nonpharmacologic and pharmacologic therapies in osteoarthritis of the hand, hip, and knee. *Arthritis Care Res (Hoboken)*. 2012; 64:465-674.
- [25] Jevsevar DS. Treatment of osteoarthritis of the knee: evidence-based guideline, 2nd edition. *J Am Acad Orthop Surg*. 2013;21:571-576.
- [26] 杨立伟,张礼荣,王冬青,等.3.0 T MRI与X线平片上分别测量膝关节间隙宽度的对比研究[J].临床放射学杂志, 2013, 32(7): 1003-1007.
- [27] Crema MD, Roemer FW, Marra MD, et al. Articular cartilage in the knee: current MR imaging techniques and applications in clinical practice and research. *Radiographics*. 2011;31:37-61.
- [28] Wang Y, Hall S, Hanna F, et al. Effects of Hylan G-F 20 supplementation on cartilage preservation detected by magnetic resonance imaging in osteoarthritis of the knee: a two-year single-blind clinical trial. *BMC Musculoskelet Disord*. 2011;12:195.
- [29] 陈利军,刘文刚,叶振中,等.下肢力线变化与胫股关节退行性变的相关性[J].中医正骨, 2003, 15(10):9-10.
- [30] Hellio Le Graverand MP, Mazucca S, Duryea J, et al. Radiographic-based grading methods and radiographic measurement of joint space width in osteoarthritis. *Radiol Clin N Am*. 2009;47:567-579.
- [31] Duryea J, Neumann G, Niu J, et al. Comparison of radiographic joint space width with magnetic resonance imaging cartilage morphometry: analysis of longitudinal data from the Osteoarthritis Initiative. *Arthritis Care Res (Hoboken)*. 2010;62:932-937.
- [32] Guermazi A, Hunter DJ, Roemer FW. Plain radiography and magnetic resonance imaging diagnostics in osteoarthritis: validated staging and scoring. *Bone Joint Surg Am*. 2009;91:54-62.
- [33] Conaghan PG, Hunter DJ, Maillfert JF, et al. Summary and recommendations of the OARSI FDA osteoarthritis Assessment of Structural Change Working Group. *Osteoarthritis Cartilage*. 2011;19:606-610.
- [34] Murray CJ, Vos T, Lozano R, et al. Disability-adjusted life years (DALYs) for 291 diseases and injuries in 21 regions, 1990-2010: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2010. *Lancet*. 2012; 380:2197-2223.
- [35] Hunter DJ. Viscosupplementation for osteoarthritis of the knee. *N Engl J Med*. 2015;372(11):1040-1047.
- [36] Runhaar J, van Middelkoop M, Reijman M, et al. Malalignment: a possible target for prevention of incident knee osteoarthritis in overweight and obese women. *Rheumatology (Oxford)*. 2014;53(9):1618-1624.
- [37] Hinman RS, Bennell KL. Advances in insoles and shoes for knee osteoarthritis. *Curr Opin Rheumatol*. 2009;21(2): 164-170.