

前交叉韧带损伤膝关节6个自由度静态加载体的稳定性*☆

李凭跃¹, 尹庆水¹, 黄华扬¹, 李鉴轶², 沈洪园¹, 王泽锦¹, 王庆¹

Six degrees of freedom *in vivo* stability of the knee with anterior cruciate ligament injury under anterior loading

Li Ping-yue¹, Yin Qing-shui¹, Huang Hua-yang¹, Li Jian-yi², Shen Hong-yuan¹, Wang Ze-jin¹, Wang Qing¹

Abstract

BACKGROUND: Because *in vitro* specimen of knee joint cannot simulate real movement of knee joint, and *in vivo* movement test cannot obtain movement information of bone structure, so accurate stability data of knee joint is not obtain which causes further study on early diagnosis and prevention measures of knee injury is unable.

OBJECTIVE: To study *in vivo* stability of the 6 degrees of freedom knee kinematics in patients with anterior cruciate ligament (ACL) injury under 134 N anterior loading by using three-dimensional (3D) reconstruction, two-dimensional (2D)/3D image registration and image processing technology.

METHODS: Totally 8 volunteers with unilateral ACL rupture and contralateral normal knee, CT (3D) images and 2D orthogonal images of the knee at 0°, 30°, 60°, and 90° under 134 N anterior loading were captured. These orthogonal images were used to recreate the *in vivo* knee positions at each of the targeted flexion angles by the method of 2D/3D registration. Comparison between the motion data of the mirror imaging uninjured knee and the injured knee was to get the 6 degrees of freedom kinematic difference of the intact and ACL deficient knee.

RESULTS AND CONCLUSION: After ACL injury, tibia antelocation were all increased. Tibia antelocation was minimal at 0°, maximal at 30°, gradually decreased at 60° and 90° and all the differences in each angle have statistical significance ($P=0.000$). The ACL injury knee has increased internal tibial rotation and internal tibial shift than intact knee ($P=0.000$). It is indicated that *in vivo* stability analysis of knee joint under static loading can achieve by the method of 2D/3D registration technique, and the ACL injured knee has increased tibia antelocation, internal tibial rotation and internal tibial shift.

Li PY, Yin QS, Huang HY, Li JY, Shen HY, Wang ZJ, Wang Q. Six degrees of freedom *in vivo* stability of knee with anterior cruciate ligament injury under anterior loading. *Zhongguo Zuzhi Gongcheng Yanjiu*. 2012;16(4): 613-617.

[http://www.crter.cn http://en.zglckf.com]

摘要

背景: 由于膝关节的体外标本无法模拟膝关节的真实运动, 而体内的运动测试又无法获得骨结构的运动信息, 因而不能得到准确的膝关节稳定性数据, 也就无法对膝关节损伤的早期诊断及防治措施进行深入的研究。

目的: 应用计算机三维重建技术、2D/3D 图像配准技术及图像处理技术对前交叉韧带损伤膝关节 6 个自由度变化进行静态加载体内稳定性测试。

方法: 8 例患者单侧膝关节前交叉韧带断裂而对侧正常, 膝关节在屈曲 0°, 30°, 60°和 90°时分别进行 134 N 前加载。采集各角度相互垂直的 2D 图像, 与 3D CT 图像在虚拟 X 射线投射系统进行 2D/3D 图像配准, 还原膝关节不同角度时的股骨和胫骨相对 3D 位置关系, 获得膝关节 6 个自由度数据。

结果与结论: 前交叉韧带断裂后胫骨前移均明显增加, 在完全伸直(0°)时胫骨前移最小, 胫骨前移在 30°时达到最大; 胫骨前移在 60°和 90°时逐渐减小, 各角度间比较差异均有显著性意义($P=0.000$)。前交叉韧带断裂后, 膝关节胫骨内旋、内移均较健侧增加($P=0.000$)。提示通过 2D/3D 图像配准技术可以实现对膝关节静态加载的体内稳定性分析; 前交叉韧带损伤后膝关节前移、内旋和内移均明显增加。

关键词: 前交叉韧带损伤; 膝关节; 三维重建; 2D/3D 图像配准; 稳定性测试; 体内

doi:10.3969/j.issn.1673-8225.2012.04.010

李凭跃, 尹庆水, 黄华扬, 李鉴轶, 沈洪园, 王泽锦, 王庆. 前交叉韧带损伤膝关节 6 个自由度静态加载体的稳定性[J]. 中国组织工程研究, 2012, 16(4):613-617. [http://www.crter.org http://cn.zglckf.com]

0 引言

对已知的三维结构通过二维平面图像进行位置配准, 再现三维结构的位置关系, 简称 2D/3D 配准技术。应用计算机三维重建技术、2D/3D 图像配准技术及图像处理技术可实现膝关节骨性结构的三维仿真运动, 这样就可以进行膝关节体内稳定性研究, 全面地评价膝关节的稳定性, 国内目前还少见膝关节的体内稳定

性研究相关报道。作者已另文报道了膝关节的动态运动还原体内稳定性, 但膝关节加载稳定性研究对完整评价膝关节的稳定性是必不可少的^[1-3]。

本实验通过对体内加载中膝关节骨结构运动信息的获取, 采取 2D/3D 图像配准技术^[4-6], 对前交叉韧带(anterior cruciate ligament, ACL) 断裂膝关节进行了膝关节静态加载 6 个自由度体内稳定性测试, 以期 ACL 损伤膝关节的体内稳定性评价提供依据。

¹Department of Orthopedic Trauma Center, Guangzhou General Hospital of Guangzhou Military Command, Guangzhou 510010, Guangdong Province, China; ²Key Laboratory of Biomechanics, Southern Medical University, Guangzhou 510515, Guangdong Province, China

Li Ping-yue*☆, Doctor, Associate chief physician, Department of Orthopedic Trauma Center, Guangzhou General Hospital of Guangzhou Military Command, Guangzhou 510010, Guangdong Province, China
lipingyue09@126.com

Supported by: the National Natural Science Foundation of China, No. 30600302*

Received: 2011-08-03
Accepted: 2011-11-15

¹解放军广州军区广州总医院全军创伤骨科中心, 广东省广州市 510010; ²南方医科大学广东省重点生物力学实验室, 广东省广州市 510515

李凭跃☆, 男, 1976 年生, 江西省九江市人, 汉族, 2009 年南方医科大学毕业, 博士, 副主任医师, 主要从事关节外科及运动医学研究。
lipingyue09@126.com

中图分类号:R318
文献标识码:A
文章编号:1673-8225 (2012)04-00613-05

收稿日期: 2011-08-03
修回日期: 2011-11-15
(20110628023/G·G)

1 对象和方法

设计: 重复实验。

时间及地点: 于2008-01/06在解放军广州军区广州总医院骨科完成。

对象: 选取2008-01/06在解放军广州军区广州总医院住院的单侧ACL断裂而对侧膝关节正常的患者8例, 男7例, 女1例, 平均年龄26岁。5例左膝ACL断裂, 3例右膝ACL断裂, 所有患者均体内内稳定性测试结束后的关节镜手术中确诊。每例患者均详细了解实验过程并签署了实验同意书, 并在实验过程对测试部位以外的身体采取严格的防辐射措施^[7-9]。

诊断标准: 符合膝关节ACL损伤的诊断标准者^[1-3]。

纳入标准: ①通过磁共振和体格检查确认的单侧ACL损伤而对侧关节正常、并在测试结束后的关节镜检中确认损伤的患者。②对治疗方案知情同意者。

排除标准: 排除合并有半月板损伤、后交叉韧带损伤和侧副韧带损伤及软骨损伤等其他合并伤的患者。

方法:

三维图像的采集: 由16排螺旋CT(GE Medical System/Lightspeed16)采集每例患者膝关节标本断层扫描数据共681层, 层厚为0.499 mm, 断层上像素为0.65 mm。采用三维图像重建软件(Mimics 10.01)对膝关节的骨结构进行三维重建, 见图1, 显示膝关节骨结构的三维形态。将股骨和胫骨分别以stl文件格式导出。

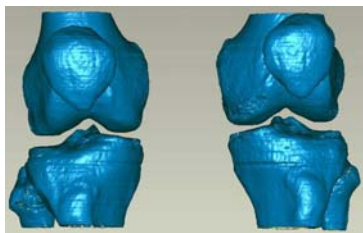


Figure 1 Three-dimensional reconstruction models of the knee
图1 膝关节三维重建模型

二维数据的采集: 模拟临床检查中的前后抽屉实验和Lchman实验设计膝关节加载方法。加载通过自行设计的加载架实施, 见图2, 加载架由股骨固定架和胫骨加载架组成, 大腿下段和小腿分别由德林假肢公司设计的腿套包裹(充分考虑了人体的解剖外形进行塑性设计), 将股骨下段牢靠固定, 加载时胫骨下段固定, 通过滑轮装置对胫骨结节部位在膝关节屈曲0°, 30°, 60°和90°时, 分别进行134 N前、后加载。加载架的大小充分考虑了G型臂的大小和手术床的高低, 股骨固定架的腿套及胫骨固定部分均可调高度和角度, 以达到每个角度前后加载的目的。加载时志愿者平躺在手术床上, 测试侧

下肢固定在加载架上, 将身体其他暴露部分用铅衣包裹。调节手术床和加载架的高度, 将膝关节置于G型臂二维摄像的中心点, 并将G型臂稍旋转以避免髌骨的阻挡。先摄取加载前静止状态的二维X射线图像, 然后实施每个角度的前、后加载, 摄取加载状态的二维X射线图像, 依次保存, 图像通过图像采集仪输出, 见图3。由于G型臂的球管位置是固定的, 所以仅在首次摄像时采集标定图像, 以校正参数^[10-12]。



Figure 2 Experiment photo of the knee and G-arm X-ray machine
图2 G型臂X射线机及膝关节实验照片



Figure 3 Experiment photo of the knee showed on G-arm X-ray machine
图3 图像采集仪同步采集G型臂X射线机显示器上膝关节实验照片

患者平卧于手术床上, 健侧及患侧膝关节分别位于屈曲0°, 30°, 60°, 90°位置, 通过自制的加载装置对膝关节实施134 N的前加载, 利用G臂X射线机(Biplanar 400)采集麻醉前/后患者互成直角的膝关节X射线影像, 见图4。



Figure 4 "liu hua qiao hospital" was "General Hospital of Guangzhou Military Command" on G-arm screen
图4 G臂机屏幕显示“liu hua qiao hospital”即“广州军区广州总院”

膝关节虚拟X射线放射系统的建立: 根据G型臂X射线机的参数, 采用3ds max 7软件中建立虚拟X射线放射系统, 见图5。其中摄像机代表X射线机的放射源, 屏幕代

表X射线机的影像增强器。两组摄像机-屏幕系统相互垂直。

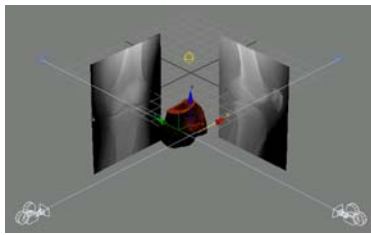


Figure 5 Virtual X-ray emission system
图5 虚拟X射线放射系统

2D/3D图像配准: 在建立的虚拟X射线放射系统中导入股骨的三维重建模型, 分别由两个摄像机模拟X射线放射源, 将三维模型投影至屏幕上, 再现2张互成直角的虚拟X射线影像, 并与由G型臂X射线机获取的膝关节正、侧位X射线影像进行轮廓配准。不断地平移及旋转三维模型, 比较虚拟X射线片与真实X射线片的轮廓, 直至正侧位投影中两者轮廓重合, 见图6, 即实现了2D/3D配准, 从而还原出G型臂摄X射线正侧位片时股骨的三维位置。继续对胫骨使用相同操作, 获得胫骨的配准。将配准后的膝关节以stl格式输出, 此时膝关节模型记录了新的位置。

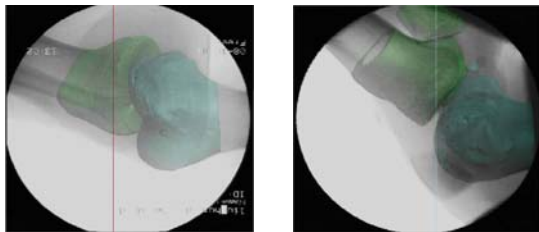


Figure 6 2D/3D image registration of the knee
图6 膝关节2D/3D图像配准图

膝关节运动学数据的获取: 将配准后的图像先在3Dmax软件中进行坐标系调整, 以胫骨平台的横轴为X轴, 胫骨平台的纵轴为Y轴, 胫骨的轴线为Z轴, 建立坐标系。在Geomagic软件中将坐标原点选在胫骨髁间窝的中心, 实现坐标原点归0。在图像处理软件Geomagic 8.0 (Raindrop Geomagic公司, 美国)中导入两种位置的膝关节胫/股骨stl文件, 以胫骨为基准, 对两者进行位置配准, 使其位于同一坐标系中, 并将股骨从膝关节模型中分割出来并进行位置配准, 见图7, 利用软件中Edit transform功能计算两种位置的股骨在6个自由度的相对运动, 见图8。

本实验只提取了胫骨前移位、内旋、内移等参数。其他参数将在后续的实验中继续提取、统计和分析。

主要观察指标: 患者胫骨前移、胫骨内移和胫骨内旋情况。

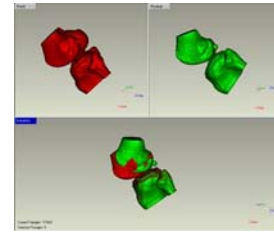


Figure 7 Based on the tibia, the knee joint in two positions was aligned in the same coordinate

图7 以胫骨为基准, 两种位置的膝关节位于同一坐标系

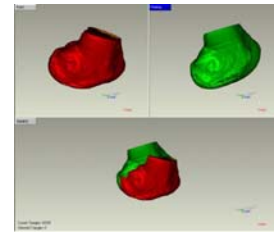


Figure 8 Relative motion calculation of the knee joint between the two positions

图8 两位置之间股骨相对运动计算

统计学分析: 采集的数据采用南方医科大学医学统计学教研室SPSS 13.0软件进行分析。统计指数采用 $\bar{x}\pm s$ 描述, 同一状态不同角度间采用重复测量方差分析和两两比较的LSD方法; 两组不同的状态间比较采用配对t检验。统计学检验的显著性设在 $\alpha=0.05$ 。

2 结果

2.1 参与者数量分析 采用意向性处理分析, 纳入观察对象8例, 全部进入结果分析, 无脱落。

2.2 胫骨前移结果 ACL断裂前后在膝关节前加载稳定性测试在不同状态和角度下的胫骨前移见表1。

表1 患者膝关节加载前交叉韧带正常与断裂下胫骨前移情况
Table 1 The tibia antelocation of the knee under 134 N anterior tibial load ($\bar{x}\pm s$, $n=8$, mm)

Angle (°)	Normal	Injury	Total	t/F	P
0	4.60±2.07	9.10±2.86	6.85±3.35	-12.585	0.000
30	7.50±2.26 ^a	17.30±2.50 ^a	12.40±5.56	-22.785	0.000
60	6.30±2.02 ^{ab}	14.50±3.09 ^{ab}	10.40±4.93	-16.890	0.000
90	6.10±2.00 ^{ab}	11.20±2.48 ^{abc}	8.65±3.41	-12.305	0.000
Total	6.12±2.25	13.02±4.11	9.57±4.78	566.364	0.000
F	60.792	178.702	360.518	69.639	
P	0.000	0.000	0.000	0.000	

^aP < 0.05, vs. 0°; ^bP < 0.05, vs. 30°; ^cP < 0.05, vs. 60°

经重复测量方差分析, 结果显示正常和断裂间差异有显著性意义($F=566.364$, $P=0.000$), 与正常组比较, ACL断裂组胫骨前移明显增加。不同角度间差异有显著性意义($F=360.518$, $P=0.000$); 状态同角度之间有交互

作用($F=69.639, P=0.000$), 提示胫骨前移随角度的增加两者趋势不同, 从表1可看出, ACL断裂后胫骨前移在30°有明显的增加。

ACL断裂后胫骨前移均明显增加, 在完全伸直(0°)时胫骨前移最小, 胫骨前移在30°时达到最大。胫骨前移在60°和90°时逐渐减小, 各角度间比差异均有显著性意义($F=178.702, P=0.000$)。

ACL断裂后和正常相比胫骨前移在各角度间差异有显著性意义(P 均 < 0.000)。胫骨前移距离在0°时增加了4.5 mm, 在30°增加最明显, 增加了9.8 mm, 60°时增加8.2 mm, 在90°增加了5.1 mm。

2.3 胫骨内旋结果 ACL断裂前后在膝关节前加载稳定性测试在不同状态和角度下的胫骨内旋, 见表2。

表2 患者膝关节加载前交叉韧带正常与断裂下胫骨内旋情况
Table 2 The internal tibial rotation of the knee under 134 N anterior tibial load ($\bar{x}\pm s, n=8, ^\circ$)

Angle (°)	Normal	Injury	Total	t/F	P
0	-5.30±0.74	-2.10±0.37	-3.70±1.74	-10.840	0.000
30	5.90±0.69 ^a	9.10±0.83 ^a	7.50±1.81	-8.137	0.000
60	6.20±0.90 ^a	9.50±0.96 ^a	7.85±1.93	-7.099	0.000
90	6.80±0.86 ^a	9.80±1.45 ^a	8.30±1.93	-4.550	0.003
Total	3.40±5.17	6.57±5.18	4.98±5.37	186.078	0.000
F	492.354	340.831	935.728	0.025	
P	0.000	0.000	0.000	0.994	

^a $P < 0.05, vs. 0^\circ$

经重复测量方差分析, 结果显示正常和断裂间差异有显著性意义($F=186.078, P=0.000$), 与正常组相比, ACL断裂组胫骨内旋增加。不同角度间差异有显著性意义($F=935.728, P=0.000$); 状态同角度之间无交互作用($F=0.025, P=0.994$), 提示胫骨内旋随角度的增加两者趋势相同。

2.4 胫骨内移结果 ACL断裂前后在膝关节前加载稳定性测试在不同状态和角度下的胫骨内移, 见表3。

表3 患者膝关节加载前交叉韧带正常与断裂下胫骨内移情况
Table 3 The internal tibial shift of the knee under 134 N anterior tibial load ($\bar{x}\pm s, n=8, mm$)

Angle (°)	Normal	Injury	Total	t/F	P
0	2.11±0.21	3.18±0.35	2.64±0.61	-9.590	0.000
30	0.76±0.23 ^a	1.98±0.22 ^a	1.37±0.66	-8.956	0.000
60	1.15±0.24 ^{ab}	2.05±0.34 ^a	1.60±0.54	-8.253	0.000
90	1.55±0.31 ^{abc}	2.45±0.48 ^{ab}	2.00±0.61	-3.567	0.009
Total	1.39±0.56	2.41±0.59	1.90±0.77	156.656	0.000
F	65.537	20.089	65.285	1.361	
P	0.000	0.003	0.000	0.355	

^a $P < 0.05, vs. 0^\circ; ^b P < 0.05, vs. 30^\circ; ^c P < 0.05, vs. 60^\circ$

经重复测量方差分析, 结果显示正常和断裂间差异有显著性意义($F=156.656, P=0.000$), 与正常组相比, ACL断裂组胫骨内移增加。不同角度间差异有显著性意义($F=65.285, P=0.000$); 状态同角度之间无交互作用

($F=1.361, P=0.355$), 提示胫骨内移随角度的增加两者趋势相同。

3 讨论

3.1 膝关节静态加载体内稳定性研究及其意义 膝关节损伤是最常见的运动损伤之一, 早期作出准确的诊断对膝关节损伤的治疗具有重要的意义^[13-16]。临床上膝关节稳定性测试通常被视为诊断膝关节损伤和不稳的重要措施, 目前关节的稳定性测试已较多地应用于膝关节运动功能的评价。

膝关节加载稳定性研究对完整评价膝关节的稳定性是必不可少的。目前关于膝关节稳定性和膝关节韧带的动力学特性均是由体外标本加载实验获得的^[17], 但由于人体内复杂的生理状态无法模拟和离体标本无肌张力及神经反射, 无法模拟人体膝关节的真实三维运动和无法准确评价膝关节的稳定性。

本实验在膝关节动态运动还原体内稳定性研究的基础上, 在国内外率先开展了膝关节静态加载体内稳定性研究; 通过采集ACL断裂膝关节静态加载不同角度时的二维图像, 采取2D/3D图像配准技术, 还原出静态加载膝关节在不同角度时的瞬间三维空间位置; 提取、分析静态加载过程的体内稳定性数据, 获得ACL断裂膝关节静态稳定性参数, 并与正常膝关节静态体内稳定性参数对比, 为ACL断裂膝关节的静态加载体内稳定性诊断提供参数标准, 静态加载稳定性各项参数的异常改变都提示膝关节稳定性的改变。

3.2 ACL损伤对膝关节自由度的影响 膝关节内结构的破坏必然引起膝关节稳定性的变化^[18]。通过对8例膝关节ACL完全损伤患者的伤膝的静态加载体内稳定性研究, 可看出, 在胫骨134 N的前加载中, 在各个角度时胫骨的向前位移均明显增加, ACL断裂后和正常相比胫骨前移在各角度间差异均有显著性意义(P 均 < 0.000)。胫骨前移距离在0°时增加了4.5 mm, 在30°增加最明显, 增加了9.8 mm, 60°时增加8.2 mm, 在90°增加了5.1 mm。在30°时胫骨前移增加最大, 说明Lachman试验的敏感性高于前抽屉试验。

自0°~90°, 胫骨在前加载下均有明显的内移和内旋。和动态运动还原不同, 加载实验中的胫骨在所有的屈曲角度均有内旋和内移, 这是因为在加载实验中均保持胫骨向前的134 N的加载, 而在运动还原中, 胫骨只有在较低的角度时才有向前的趋势, 故其只有在较低的屈曲角度时有胫骨的内旋。Andriacchi等^[19]在用光电跟踪系统测试了ACL断裂后的膝关节运动后, 同样发现了明显的胫骨前移和外旋的减少, 与Georgoulis等^[20]报道的结果也一致。

3.3 临床意义 目前在国外已经进行了较多2D/3D配

准体内稳定性研究^[21-30], 国内尚未见相关报道。应用2D/3D配准体内稳定性理论上可实现对患者术前的稳定性评价和关节不稳诊断、术后的功能评价等, 还可以对不同术式尤其是对交叉韧带重建后的膝关节稳定性恢复情况进行测试, 比传统的体外标本稳定性测试和其他体内稳定性测试有较大优势。作者将进一步开展系统2D/3D配准体内稳定性研究, 随着图像采集器材的提高、图像处理技术的进步及实验精度的提高, 可以较早地发现膝关节稳定性和运动学上的变化, 实现膝关节不稳的早期诊断。

4 参考文献

- [1] Aglietti P, Buzzi R, Giron F, et al. Arthroscopic-assisted anterior cruciate ligament reconstruction with the central third patellar tendon: a 5-8-year follow-up. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* 1997;5:138-144.
- [2] Aglietti P, Buzzi R, Menchetti PM, et al. Arthroscopically assisted semitendinosus and gracilis tendon graft in reconstruction for acute anterior cruciate ligament injuries in athletes. *Am J Sports Med.* 1996;24:726-731.
- [3] Balthis H, Perlick L, Tingart M, et al. Alignment in total knee arthroplasty. A comparison of computer-assisted surgery with the conventional technique. *J Bone Joint Surg Br.* 2004;86(5):682.
- [4] Li JY, Jiao PF, Zhang MC, et al. *Zhongguo Guyuguanjie Sunshang Zazhi.* 2007;22(6):471-473.
李鉴轶, 焦培峰, 张美超, 等. 膝关节在体稳定性评价系统的建立[J]. *中国骨与关节损伤杂志.* 2007,22(6):471-473.
- [5] Nie LY, Tang L, Li ZY, et al. *Zhongguo Linchuang Jiepouxue Zazhi.* 2010;28(4):445-447.
聂兰英, 唐雷, 李泽宇, 等. 基于影像的人体铸型标本三维计算机建模研究[J]. *中国临床解剖学杂志.* 2010,28(4):445-447.
- [6] Jiao PF, Qin A, Zhao WD, et al. *Yiyong Shengwu Lixue.* 2010;25(6):460-464.
焦培峰, 秦安, 赵卫东, 等. 基于单幅X线图像和CT数据的2D/3D配准系统[J]. *医用生物力学.* 2010,25(6):460-464.
- [7] Li PY, Yin QS, Huang HY, et al. *Zhongguo Linchuang Jiepouxue Zazhi.* 2010;28(5):571-574.
李凭跃, 尹庆水, 黄华扬, 等. 基于2D/3D配准技术的正常膝关节运动还原在体稳定性参数研究[J]. *中国临床解剖学杂志.* 2010,28(5): 571-574.
- [8] Li PY, Yin QS, Huang HY, et al. *Zhongguo Jiaoxing Waike Zazhi.* 2010;18(19):1640-1643.
李凭跃, 尹庆水, 黄华扬, 等. 前交叉韧带损伤膝关节侧副韧带侧副韧带变化的静态加载在体稳定性研究[J]. *中国矫形外科杂志.* 2010, 18(19):1640-1643.
- [9] Li PY, Yin QS, Huang HY, et al. *Zhonghua Chuangshang Guke Zazhi.* 2010;12(7):659-663.
李凭跃, 尹庆水, 黄华扬, 等. 前交叉韧带损伤对膝关节侧副韧带影响的运动还原在体稳定性研究[J]. *中华创伤骨科杂志.* 2010, 12(7):659-663.
- [10] Li PY, Yin QS, Huang HY, et al. *Zhongguo Jiaoxing Waike Zazhi.* 2010;18(19):1640-1643.
李凭跃, 尹庆水, 黄华扬, 等. 前交叉韧带损伤膝关节侧副韧带侧副韧带变化的静态加载在体稳定性研究[J]. *中国矫形外科杂志.* 2010, 18(19):1640-1643.
- [11] Li PY, Yin QS, Huang HY, et al. *Nanfang Yike Daxue Xuebao.* 2010;30(12): 2625-2628.
李凭跃, 尹庆水, 黄华扬, 等. 静态加载时肌力对膝关节的稳定性的影响[J]. *南方医科大学学报.* 2010, 30(12): 2625-2628.
- [12] Li PY, Yin QS, Huang HY, et al. *Zhongguo Zuzhi Gongcheng Yanjiu yu Linchuang Kangfu.* 2010;14(50): 9480-9484.
李凭跃, 尹庆水, 黄华扬, 等. 前交叉韧带损伤膝关节侧副韧带长度的变化[J]. *中国组织工程研究与临床康复.* 2010,14(50): 9480-9484.
- [13] Mahfouz MR, Hoff WA, Komistek RD, et al. Effect of segmentation errors on 3d-to-2d registration of implant models in X-ray images. *J Biomech.* 2005;38:229
- [14] Fitzpatrick DC, Sommers MB, Kam BC, et al. Knee stability after articulated external fixation. *Am J Sports Med.* 2005;33(11): 1735-1741.
- [15] Li G, Most E, Sultan PG, et al. Knee kinematics with a high-flexion posterior stabilized total knee prosthesis: an in vitro robotic experimental investigation. *J Bone Joint Surg Am.* 2004;86-A(8):1721-1729.
- [16] Park SE, DeFrate LE, Suggs JF, et al. The change in length of the medial and lateral collateral ligaments during in vivo knee flexion. *Knee.* 2005;12(5):377-382.
- [17] Yamamoto Y, Hsu WH, Woo SL, et al. Knee stability and graft function after anterior cruciate ligament reconstruction: a comparison of a lateral and an anatomical femoral tunnel placement. *Am J Sports Med.* 2004;32(8):1825-1832.
- [18] Buckwalter JA, Lane NE. Athletics and osteoarthritis. *Am J Sports Med.* 1997;25:873-881.
- [19] Andriacchi TP, Mundermann A, Smith RL, et al. A framework for the in vivo pathomechanics of osteoarthritis at the knee. *Ann Biomed Eng.* 2004;32:447-457.
- [20] Georgoulis AD, Papadonikolakis A, Papageorgiou CD, et al. Three-dimensional tibiofemoral kinematics of the anterior cruciate ligament-deficient and reconstructed knee during walking. *Am J Sports Med.* 2003;31:75-79.
- [21] Li G, DeFrate LE, Park SE, et al. In vivo articular cartilage contact kinematics of the knee: an investigation using dual-orthogonal fluoroscopy and magnetic resonance image-based computer models. *Am J Sports Med.* 2005;33(1):102-107.
- [22] Beynon BD, Fleming BC. Anterior cruciate ligament strain in vivo: a review of previous work. *J Biomech.* 1998;31:519-525.
- [23] Sim JA, Gadikota HR, Li JS, et al. Biomechanical Evaluation of Knee Joint Laxities and Graft Forces After Anterior Cruciate Ligament Reconstruction by Anteromedial Portal, Outside-In, and Transtibial Techniques. *Am J Sports Med.* 2011.
- [24] Hosseini A, Gill TJ, Van de Velde SK, et al. Estimation of in vivo ACL force changes in response to increased weightbearing. *J Biomech Eng.* 2011;133(5):051004.
- [25] Gill TJ, Van de Velde SK, Wing DW, et al. Tibiofemoral and patellofemoral kinematics after reconstruction of an isolated posterior cruciate ligament injury: in vivo analysis during lunge. *Am J Sports Med.* 2009;37(12):2377-2385.
- [26] Gill TJ, Li G, Hosseini A. In vivo anterior cruciate ligament elongation in response to axial tibial loads. *J Orthop Sci.* 2009; 14(3):298-306.
- [27] Moynihan AL, Varadarajan KM, Hanson GR, et al. In vivo knee kinematics during high flexion after a posterior-substituting total knee arthroplasty. *Int Orthop.* 2010;34(4):497-503.
- [28] Varadarajan KM, Moynihan AL, D'Lima D, et al. In vivo contact kinematics and contact forces of the knee after total knee arthroplasty during dynamic weight-bearing activities. *J Biomech.* 2008;41(10):2159-2168.
- [29] Jordan SS, DeFrate LE, Nha KW, et al. The in vivo kinematics of the anteromedial and posterolateral bundles of the anterior cruciate ligament during weightbearing knee flexion. *Am J Sports Med.* 2007;35(4):547-554.
- [30] Van de Velde SK, DeFrate LE, Gill TJ, et al. The effect of anterior cruciate ligament deficiency on the in vivo elongation of the medial and lateral collateral ligaments. *Am J Sports Med.* 2007; 35(2):294-300.

来自本文课题的更多信息——

基金资助: 国家自然科学基金(30600302): 运动员膝关节在体稳定性评价及运动损伤防治的研究。

作者贡献: 实验设计者为李鉴轶、李凭跃, 实施、评估为李凭跃、李鉴轶, 均经过正规培训。

利益冲突: 课题未涉及任何厂家及相关雇主或其他经济组织直接或间接的经济或利益的赞助。

伦理批准: 患者对治疗方案均知情同意, 且得到医院伦理委员会批准。

本文创新性: ①应用计算机三维重建技术、2D/3D图像配准技术及图像处理技术在国内最早构建了膝关节2D/3D体内稳定性测试系统。②在国内外率先开展了膝关节静态加载体内稳定性研究, 获得了膝关节静态加载体内稳定性参数。③较早开展了ACL损伤膝关节的2D/3D体内稳定性研究, 系统地对ACL损伤后膝关节的体内静态和动态体内稳定性变化进行了描述, 同时诊断为其他膝关节不稳提供了思路。