

## 骨科虚拟手术系统辅助前交叉韧带重建手术流程的建立

李松<sup>1)</sup>, 何飞<sup>1)</sup>, 杨光<sup>2)</sup>, 许明卿<sup>1)</sup>, 华闻达<sup>1)</sup>, 刘洋<sup>1)</sup>

(1) 昆明医科大学第一附属医院骨科, 云南昆明 650032; 2) 常州市第四人民医院骨科, 江苏常州 231000)

**[摘要]** **目的** 建立骨科虚拟手术系统辅助前交叉韧带重建术的手术流程, 以期提高重建韧带骨隧道定位的准确性. **方法** 利用螺旋 CT 对 1 名健康志愿者的双侧膝关节进行扫描, 扫描结果以 DICOM 格式导入自主研发的骨科虚拟手术系统 (BioMxsf 软件), 实现对膝关节三维模型的重建, 在重建出的三维模型中对 ACL 股骨、胫骨止点及骨道出口位置进行确定并标记, 结合前交叉韧带重建手术的要求, 利用 VR 和 MPR 成像技术通过 MPR 轴位、矢状位和冠状位重建, 实现在前交叉韧带重建手术中进行骨道长度、角度的测量及骨道定位, 并建立骨科虚拟手术系统辅助前交叉韧带重建术的标准操作流程, 进行手术操作模拟, 满足前交叉韧带重建手术术前计划的需要. **结果** 建立了骨科虚拟手术系统辅助前交叉韧带重建手术流程: 通过术前 CT 扫描, 获得 DICOM 格式 CT 数据, 然后将数据导入骨科虚拟手术系统并重建出膝关节三维模型, 进行术前膝关节相关参数的测量, 最后进行手术模拟. **结论** 骨科虚拟手术系统辅助前交叉韧带重建术的手术流程的建立, 能够帮助医生形成更加直观立体的膝关节形象, 并提供准确的骨道长度、角度等数据, 使前交叉韧带重建手术的骨道定位更精确、手术方式的选择更合理, 从而验证了骨科虚拟手术系统支持下前交叉韧带重建手术的可行性.

**[关键词]** 前交叉韧带; 虚拟手术系统; 三维重建; 外科手术

**[中图分类号]** R684.7 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 2095 - 610X (2014) 07 - 0078 - 06

## The Establishment of a Virtual Surgery System-assisted Anterior Cruciate Ligament Reconstruction Surgery Process

LI Song<sup>1)</sup>, HE Fei<sup>1)</sup>, YANG Guang<sup>2)</sup>, XU Ming-qing<sup>1)</sup>, HUA Wen-da<sup>1)</sup>, LIU Yang<sup>1)</sup>

(1) Dep. of Orthopaedics, The 1st Affiliated Hospital of Kunming Medical University, Kunming Yunnan 650032, 2) Dep. of Orthopaedics, The Fourth People's Hospital of Changzhou, Changzhou Jiangsu 213001, China)

**[Abstract]** **Objective** To improve the accuracy of bone tunnel for reconstruction by establishing a method for anterior cruciate ligament reconstruction surgery process. **Methods** Spiral CT was used to scan bilateral knee joint of a healthy volunteer, the data was exported as DICOM format, and 3D model of knee joint was reconstructed by self designed software (BioMxs), and ACL femur, tibia endpoint and exit of bone tunnel were marked. Base on the demand of surgery, axial, sagittal, coronal reconstruction was done through MPR imaging technique, to measure the bone tunnel positioning, length, angles, then the virtual surgery system-assisted surgery process was built to satisfy the demand of anterior crucial ligament reconstruction surgery. **Results** A virtual surgery system-assisted anterior cruciate ligament reconstruction surgery process was established: perform preoperation CT scan, acquire DICOM data and export to BioMxs for knee 3D reconstruction, measure parameters related to surgery, simulate operation. **Conclusion** The establishment of the virtual surgery system-assisted anterior cruciate ligament reconstruction surgery process produces more stereoscopic image and provides parameters needed like length and angles for doctors

**[基金项目]** 昆明市社会发展科技计划重点资助项目(08S100311); 云南省科技计划联合专项基金资助项目(2008C0013R)

**[作者简介]** 李松 (1987 ~), 男, 云南大姚县人, 在读硕士研究生, 主要从事创伤外科临床及实验研究工作.

**[通讯作者]** 何飞. E-mail: drhefei@sina.com

to get more precise locations, and optimize operation method. This paper confirms the feasibility of virtual system in the anterior cruciate ligament reconstruction surgery.

[**Key words**] Anterior cruciate ligament; Virtual surgery system; Three-dimensional reconstruction, Surgery

膝关节前交叉韧带 (anterior cruciate ligament, ACL) 是保持膝关节稳定的重要结构之一<sup>[1-3]</sup>. 自1989年 Billotti<sup>[4]</sup>首次在关节镜下完成单股半腱肌重建 ACL 后, 该技术以其视野清晰、创伤少、固定牢靠、术后康复快等优势, 现已成为治疗前交叉韧带损伤的常用术式, 但因镜下视野所获得的信息有限, 术中对于重建韧带股骨、胫骨端内口的定位主要是依靠手术医生个人经验进行, 经验不足的操作将影响手术效果, 甚至导致手术失败<sup>[5,6]</sup>. 笔者结合当前虚拟手术系统辅助手术的趋势和优势, 针对骨道定位这一手术关键点, 通过采用自主研发的骨科虚拟手术系统 (BioMxsf 软件)<sup>[7]</sup>, 研究并建立膝关节前交叉韧带重建手术的手术流程, 个体化提高骨道定位、骨道长度测量、角度测量的精度, 提高该手术的安全性及准确性.

## 1 资料与方法

### 1.1 实验对象

随机选择健康志愿者1名, 29岁, 男性, 既往体健, 双侧膝关节无畸形, 无膝关节疼痛病史, 无膝关节创伤病史.

### 1.2 实验设备及软件

64层螺旋CT机 (Somatom Definition, Siemens, Germany) 图形工作站: DELL7400 (CPU XEON X5482 3.20GHz); RAM 32.0GB; 电脑显卡: Quadro Fx 4800 1.5GB; 搭载系统: 64位 Windows7 操作系统, 自主研发的以面向对象的 C++ 语言结合 VTK/ITK 和 OpenGL 软件开发包编制程序的骨科虚拟手术系统 (BioMxsf 软件).

### 1.3 实验方法

**1.3.1 膝关节 CT 原始 DICOM 数据采集** 志愿者取仰卧位, 分别于将志愿者双膝关节利用外固定支具固定成 0°、30°、60°、90° 角, 然后用 64 排螺旋 CT 进行连续断层扫描. 螺旋 CT 的扫描条件: 层厚为 0.75 mm, 间距为 0.5 mm, 电压为 120 KV, 电流为 92 mAs. 扫描的原始数据按 DICOM (Digital Imaging and Communications in Medicine) 格式自动保存之后刻录成数据光盘.

**1.3.2 虚拟手术系统重建** 将获取的膝关节 DICOM 数据导入到自主开发的骨科虚拟手术系统 (BioMxsf 软件) 中, 通过体绘制和面绘制进行三维重建生成膝关节三维图像, 使用模型切割工具栏中的面切割工具快速切割非目标结构, 获得目标膝关节三维影像模型 (图 1).

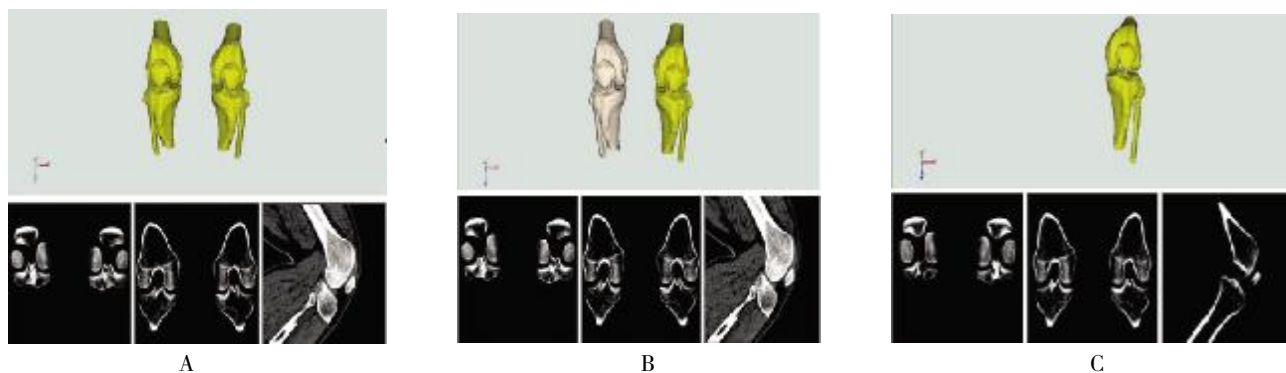


图 1 建立膝关节三维影像模型

Fig. 1 Establishment of the three-dimensional image model of the knee joint

A:三维重建; B:使用模型切割工具标定非目标结构; C:快速切除非目标结构.

**1.3.3 胫骨股骨骨道的建立及相关参数的测量**  
胫骨骨隧道的建立: 在获得的目标膝关节三维模型中, 找到位于膝关节外侧髁间嵴的斜坡处的胫骨骨道的关节内出口, 利用软件的实物标定工具

进行标定; 股骨骨隧道的建立: 在获得的目标膝关节三维模型中, 采用股骨髁间窝时钟定位法在冠状位建立十字坐标系, 找到股骨骨道位于髁间窝外侧壁从后到前 5 mm 处的关节内出口, 左膝位于十字

坐标系的 1:30 处,右膝位于十字坐标系的 10:30 处,确定 ACL 股骨隧道关节内出口位置,然后利用 BioMxsf 软件的实物标定工具进行标定(图 2)。

骨道相关参数的测量:膝关节三维模型的股骨、胫骨隧道标定完成后,在 2D 模式下利用软件的角度测量工具在冠状面测出胫骨骨道与胫骨平台关节面的角度为  $62.69^\circ$ 。在利用 VR 和 MPR 成像技术同时显示的三维图像和二维图像中,利用器械

置入工具植入圆柱体模具,依据以关节内胫骨骨道出口标定点和股骨骨道出口标定点为依据,调整圆柱体模具的角度与方位,模拟创建出胫骨和股骨骨道。在确定胫骨骨道和股骨骨道的膝关节外出口位置后,利用软件的实物标定工具进行标定。最后利用软件的 3D 测量工具分别测量胫骨和股骨的骨道长度,测得胫骨骨道长度: 39.92 cm, 股骨骨道长度: 49.58 cm (图 3)。

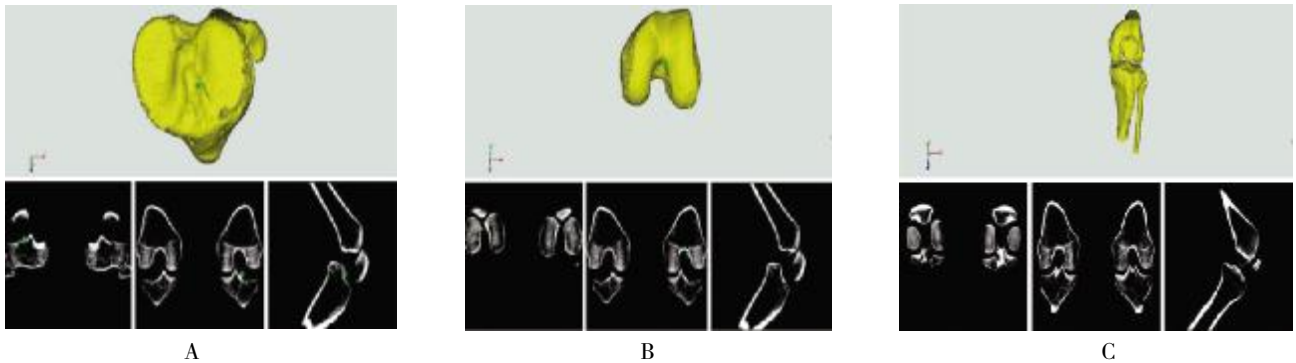


图 2 虚拟骨道的定位及创建

Fig. 2 Re-construction of the bone tunnel positioning

A: 标定胫骨骨道关节内出口; B: 标定股骨骨道关节内出口; C: 置入模具, 标定骨道在胫骨和股骨外侧的出口。

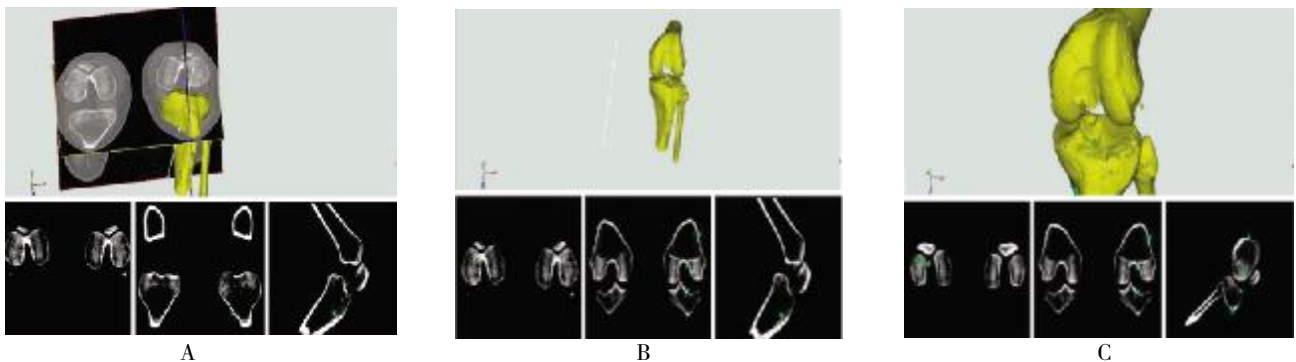


图 3 骨隧道角度及长度的测量

Fig. 3 Measurement of the length and angle of the bone tunnel

A: 测量胫骨骨道与关节面的角度; B: 用 3D 测量工具测量骨道的长度; C: 测量胫骨骨道两侧出口的直线距离。

## 2 结果

建立了膝关节前交叉韧带重建手术的虚拟手术流程: (1) CT 数据的采集: 通过术前 CT 扫描获取 DICOM 格式的膝关节 CT 数据; (2) 膝关节三维模型的建立: 将获取的膝关节 DICOM 数据导入到自主开发的骨科虚拟手术系统(BioMxsf 软件)中进行三维重建,生成膝关节三维影像模型,使用软件中的面切割工具快速切割非目标结构,获得目标膝关节三维影像模型; (3) ACL 股骨、胫骨止点

位置的确定: 在获得的目标膝关节三维影像模型中,结合图像分割技术反映出膝关节的空间构象和准确位置,显示与 ACL 重建有关的解剖关系,按原止点足迹定位原则确定并标记 ACL 股骨、胫骨止点位置,胫骨骨道的关节内出口位于膝关节外侧髁间嵴的斜坡处,股骨骨道的关节内出口位于髁间窝外侧壁从后到前 5 mm 处,确定 ACL 股骨、胫骨止点位置后利用 BioMxsf 软件的实物标定工具进行标定; (4) 胫骨和股骨骨道的创建: 利用 VR 和 MPR 成像技术同时显示三维图像和二维图像,

通过旋转 VR 重建像观察膝关节的整体结构和空间关系, 进行个体化分析, 以明确 ACL 股骨、胫骨止点的实物标定点位置, 然后在 MPR 成像技术重建的轴位、矢状位、冠状位二维图像中找到实物标定点, 经过实物标定点设定理想胫骨和股骨骨道, 使用器械置入工具植入圆柱体模具, 实现胫骨和股骨骨道的准确定位及模拟创建, 并利用软件的实物标定工具对胫骨骨道和股骨骨道的膝关节外出口进行标定; (5) 膝关节重建相关参数的测量: 在利用 VR 和 MPR 成像技术同时显示的三维图像和二维图像中, 首先使用 3D 测量工具在利用 VR 成像技术显示的三维图像中找到 ACL 股骨、胫骨止点以及胫骨骨道和股骨骨道的膝关节外出口的实物标定点, 通过测定与股骨、胫骨骨道相对应的实物标定点之间的距离和圆柱体模具的直径对胫骨和股骨骨道的长度和内径进行测量, 然后在 2D 模式下通过测量胫骨骨道与胫骨平台关节面的角度, 完成对膝关节重建相关参数的测量; (6) 进行手术模拟、指导手术操作。

### 3 讨论

#### 3.1 关节镜治疗前交叉韧带损伤的关键环节

前交叉韧带 (anterior cruciate ligament, ACL) 是维持膝关节稳定的主要韧带, 损伤之后常导致严重膝关节不稳<sup>[8-10]</sup>。随着对 ACL 结构功能和生物力学的研究不断深入, 伴随着关节镜微创技术的发展, 利用关节镜重建 ACL 已经成为治疗 ACL 损伤的标准术式。治疗前交叉韧带损伤的目的是恢复前交叉韧带的解剖和生理学功能, 有文献报道<sup>[11,12]</sup>目前关节镜下交叉韧带重建术仍有 10%~15% 的失败率和 10%~20% 的翻修率, 国外一些学者认为技术性错误和生物学因素是造成手术失败的两个主要原因, 据报道<sup>[13-15]</sup>由于手术的技术性错误引起的原因占初次 ACL 重建失败原因的 83%~92%, 其中骨隧道定位不准确占技术性错误的 70%~80%, 围绕这些因素国内学者们有广泛的争论, 通常认为 ACL 重建术的核心在于恢复等距特性, 相比而言股骨隧道位置对等距性的影响较大。敖英芳<sup>[16]</sup>等对 ACL 重建后失败原因进行分析后认为错误的骨道位置对移植物产生异常负荷, 易造成移植物失效。因此正确的胫骨、股骨隧道位置是 ACL 重建术成功的关键<sup>[17]</sup>。造成骨道定位不准确的原因有术中关节镜视野局限、无法进行准确的解剖定位、存在个体性差异等, 所以目前采用理论上的解剖知识对隧道位置进行准确定位还很困难<sup>[18-20]</sup>。在传统的术中, 骨

道定位主要是依靠手术医生的个人经验进行, 然而手术时镜下视野所能获得的信息有限, 不能实现骨道的最佳定位, 骨道定位不佳将直接影响术后病人的膝关节功能恢复, 严重时会导致手术失败。

#### 3.2 计算机辅助前交叉韧带损伤治疗的现状

关节镜下 ACL 重建术成为目前 ACL 损伤的主要治疗方法, 关节镜下微创手术切口较小, 组织损伤较轻, 但关节镜同时也会给术者带来失去膝关节组织结构形态全面观的危险, 计算机辅助手术技术的出现为解决这一难题提供了新的思路, 1994 年 Julliard 在 Bone Morphing 系统的导航下在活体上完成首例 ACL 重建术<sup>[21,22]</sup>。随后国外的许多学者对此进行大量的研究, Panisset 等<sup>[23]</sup>在导航下完成 ACL 重建手术 50 例, 手术效果满意; Tsuda 等<sup>[24]</sup>对 15 例在导航下完成 ACL 重建并评估, 重建后比术前提高 52% 稳定性; 国内对计算机辅助下 ACL 重建方面的研究尚处于起步阶段, 北京积水潭医院的王雪松等人做了较早探索, 王雪松等<sup>[25]</sup>在导航下完成 ACL 重建手术 30 例, 与同期传统关节镜下 ACL 重建手术 40 例进行对比研究, 结果论证了导航下 ACL 重建手术是安全、可行的, 通过术前规划, 可以使股骨、胫骨隧道位置更精确。张辉等<sup>[26]</sup>导航下完成 ACL 重建手术 40 例, 结果说明导航下完成 ACL 重建的可重复性较好。Wu 等<sup>[27]</sup>认为计算机辅助下 ACL 重建有效提高了骨隧道位置的准确性, 避免 ACL 重建后出现髁间窝撞击, 认为计算机辅助下的 ACL 重建是实现个体化重建前交叉韧带的理想方法。

计算机辅助外科技术运用于前交叉韧带重建手术, 提高了骨隧道位置定位的准确性, 完善了手术的评估, 减少术后并发症。虽然计算机辅助技术在术中骨隧道定位和术后功能评价上有明显优势, 但还存在一些不足, 如延长手术时间, 特别是导航系统价格昂贵, 增加患者手术费用, 手术相关人员如医生, 护士等需要专门培训, 存在学习曲线过程。

#### 3.3 虚拟手术系统辅助前交叉韧带重建手术流程的建立

计算机辅助外科技术通过虚拟技术进行术前规划、术前模拟、术中配准和手术导航等, 缩短了手术操作的时间, 提高了手术的精确性<sup>[28]</sup>。目前常用的交叉韧带重建导航系统大致分为两大类, 即应用医学影像的导航系统和无需医学影像的导航系统, 目前具有代表性的计算机辅助 ACL 重建系统主要有, 德国 Tuttingen 公司的 OrthoPilot 系统、法国 Praxim 公司的 Bone Morphing 系统以及透视导航的 ACL 重建系统。据目前国外报道<sup>[29,30]</sup>利用导航系统

辅助 ACL 重建手术, 可以提高骨隧道定位的精确度、稳定性和可重复性, 可以有效避免因隧道定位不准引起的手术失败。国内的一些学者也在将医学数据可视化技术用于前交叉韧带重建方面进行了一些初步的探索, 胡岩君等<sup>[31]</sup>利用比利时的 Mimics 医学可视化软件对 16 例正常受试者膝关节进行研究, 认为基于医学影像的三维重建对 ACL 损伤的诊断及治疗具有指导意义。

在 ACL 重建手术导航方面, 欧美等国家研究较早, 技术领先, 与国外相比我国的研究规模和应用与国外的差距较大, 然而国外的导航系统在国内推广应用方面仍存在很多限制, 如购买或租赁导航系统的费用十分昂贵, 导航系统的设备安装, 器械校准和数据的输入与配准需要花费较长时间, 还存在刚体松动后会对系统精确度造成较大影响, 系统的学习曲线较长等问题<sup>[32,33]</sup>。在医学数据可视化方面, 当前手术虚拟系统已具备将术前采集的 CT、MRI 等影像数据进行三维重建, 实现三维可视化等功能, 但由于国外软件产权保护、价格较贵、设计思路需要与国内医生理解水平相一致等原因, 目前在国内利用三维可视化软件辅助 ACL 重建的临床应用研究较少, 鉴于此, 我们将自主研发的骨科虚拟手术系统 (BioMxsf 软件) 与关节镜技术相结合用于 ACL 重建手术, 通过对其工作原理、手术流程、手术技巧及术后评价等方面进行分析研究, 建立了一个用于 ACL 重建的标准化手术流程, 寻求更适合计算机辅助下 ACL 重建手术的定位方法。

### 3.4 虚拟手术系统辅助前交叉韧带重建手术中存在的优势及不足

笔者自行设计的骨科虚拟手术系统 (BioMxsf 软件) 在进行 ACL 重建手术时, 首先通过螺旋 CT 三维重建技术获得高质量的膝关节图像, 然后利用 VR 成像技术进行解剖结构的直观显示及独立动态观察, 同时利用 MPR 成像模拟骨道建立并精确测量骨道长度及角度等数据, 据此手术医生可以在术前得到准确的膝关节内部解剖结构细节展示、作出合理的术前规划以及获得个体化的测量数据, 让手术不再仅仅依赖个人的手感和经验, 从而提高了手术的准确性、安全性和有效性。骨科虚拟手术系统具备良好的交互性、便捷性和可扩展性, 基于该系统的前交叉韧带重建手术流程的建立有望提高 ACL 重建手术骨道定位的准确性, 从而提高手术路径的准确性, 减少手术时间, 提高手术成功率。结果表明, 骨科虚拟手术系统 (BioMxsf 软件) 进行骨隧道定位、角度测量及内径测量, 具有一定的准确性, 然而本研究还需进一步通过临床应用验证其

效果。

### [参考文献]

- [1] TASHMAN S, ARAKI D. Effects of anterior cruciate ligament reconstruction on in vivo, dynamic knee function[J]. *Clinics in Sports Medicine*, 2013, 32(1):47 - 59.
- [2] BULL A M J, EARNSHAW P H, SMITH A, et al. Intraoperative measurement of knee kinematics in reconstruction of the anterior cruciate ligament [J]. *Journal of Bone & Joint Surgery, British Volume*, 2002, 84(7):1 075 - 1 081.
- [3] SIEGEL L, VANDENAKKER-ALBANESE C, SIEGEL D. Anterior cruciate ligament injuries: anatomy, physiology, biomechanics, and management [J]. *Clinical Journal of Sport Medicine*, 2012, 22(4):349 - 355.
- [4] BILLOTTI J D, MEESE M A, ALBERTA F, et al. A prospective, clinical study evaluating arthroscopic ACL reconstruction using the semitendinosus and iliotibial band: 2-to 5-year follow up [J]. *Orthopedics*, 1997, 20 (2): 125 - 131.
- [5] FORSYTHE B, KOPF S, WONG A K, et al. The location of femoral and tibial tunnels in anatomic double-bundle anterior cruciate ligament reconstruction analyzed by three-dimensional computed tomography models[J]. *The Journal of Bone & Joint Surgery*, 2010, 92(6):1 418 - 1 426.
- [6] BROWN JR C H, SPALDING T, ROBB C. Medial portal technique for single-bundle anatomical anterior cruciate ligament(ACL)reconstruction[J]. *International Orthopaedics*, 2013, 37(2):253 - 269.
- [7] 代耀军, 余伟巍, 曹珺, 等. 脊柱手术模拟系统的设计与研发 [J]. *中华创伤骨科杂志*, 2010, 12 (5):148 - 150.
- [8] BOURKE H E, GORDON D J, SALMON L J, et al. The outcome at 15 years of endoscopic anterior cruciate ligament reconstruction using hamstring tendon autograft for 'isolated' anterior cruciate ligament rupture[J]. *Journal of Bone & Joint Surgery, British Volume*, 2012, 94 (5): 630 - 637.
- [9] DAVIES H, TIETJENS B, VAN STERKENBURG M, et al. Anterior cruciate ligament injuries in snowboarders: a quadriceps-induced injury [J]. *Knee Surgery Sports Traumatology Arthroscopy*, 2009, 17(9):1 048 - 1 051.
- [10] PRODRAMOS C C, HAN Y, ROGOWSKI J, et al. A meta-analysis of the incidence of anterior cruciate ligament tears as a function of gender, sport, and a knee injury reduction regimen[J]. *Arthroscopy: The Journal of Arthroscopic & Related Surgery*, 2007, 23(12):1 320 - 1 325.
- [11] AIT SI SELMI T, FITHIAN D, NEYRET P. The evolution of osteoarthritis in 103 patients with ACL reconstruction at 17 years follow-up[J]. *The Knee*, 2006, 13(5):353 - 358.

- [12] HART A J, BUSCOMBE J, MALONE A, et al. Assessment of osteoarthritis after reconstruction of the anterior cruciate ligament. A study using single-photon emission computed tomography at ten years [J]. *Journal of Bone & Joint Surgery British Volume*, 2005, 87(11):1 483 – 1 487.
- [13] GOUGOULIAS N, KHANNA A, GRIFFITHS D, et al. ACL reconstruction: can the transtibial technique achieve optimal tunnel positioning? A radiographic study [J]. *The Knee*, 2008, 15(6):486 – 490.
- [14] MUNETA T, KOGA H, MOCHIZUKI T, et al. A prospective randomized study of 4-strand semitendinosus tendon anterior cruciate ligament reconstruction comparing single-bundle and double-bundle techniques [J]. *Arthroscopy: The Journal of Arthroscopic & Related Surgery*, 2007, 23 (6): 618 – 628.
- [15] ALLEN C R, GIFFIN J R, HARNER C D. Revision anterior cruciate ligament reconstruction [J]. *Orthopedic Clinics of North America*, 2003, 34(1):79 – 98.
- [16] 敖英芳, 马勇, 崔国庆, 等. 前交叉韧带重建失败的原因分析 [J]. *中华外科杂志*, 2009, 45(2):86 – 89.
- [17] MEUFFELS D E, REIJMAN M, VERHAAR J A N. Computer-assisted surgery is not more accurate or precise than conventional arthroscopic ACL reconstruction: a prospective randomized clinical trial [J]. *The Journal of Bone & Joint Surgery*, 2012, 94(17):1 538 – 1 545.
- [18] WOLF B R, RAMME A J, WRIGHT R W, et al. Variability in ACL tunnel placement: observational clinical study of surgeon ACL tunnel variability [J]. *The American Journal of Sports Medicine*, 2013, 41(6):1 265 – 1 273.
- [19] MCCONKEY M O, AMENDOLA A, RAMME A J, et al. Arthroscopic agreement among surgeons on anterior cruciate ligament tunnel placement [J]. *The American Journal of Sports Medicine*, 2012, 40(12):2 737 – 2 746.
- [20] SULLIVAN J P, MATAVA M J, FLANIGAN D C, et al. Reliability of tunnel measurements and the quadrant method using fluoroscopic radiographs after anterior cruciate ligament reconstruction [J]. *The American Journal of Sports Medicine*, 2012, 40(10):2 236 – 2 241.
- [21] DESSENNE V, LAVALLE S, JULLIARD R, et al. Computer-assisted knee anterior cruciate ligament reconstruction: first clinical tests [J]. *Computer Aided Surgery*, 1995, 1 (1):59 – 64.
- [22] JULLIARD R, LAVALLE S, DESSENNE V. Computer assisted reconstruction of the anterior cruciate ligament [J]. *Clinical orthopaedics and related research*, 1998, 354 (2): 57 – 64.
- [23] PANISSET J C, DE CASSON F B. Navigated anterior cruciate ligament reconstruction: correlation between computer data and radiographic measurements [J]. *Orthopedics*, 2006, 29(10):133 – 136.
- [24] TSUDA E, ISHIBASHI Y, FUKUDA A, et al. Validation of computer-assisted double-bundle anterior cruciate ligament reconstruction [J]. *Orthopedics*, 2007, 30 (10): 136 – 140.
- [25] 王雪松, 冯华, 洪雷, 等. 导航下前交叉韧带重建手术与关节镜下重建手术骨隧道位置的对比研究 [J]. *中国运动医学杂志*, 2006, 25(5):564 – 567.
- [26] 张辉, 冯华, 洪雷, 等. X线影像导航系统辅助关节镜下前交叉韧带重建术 [J]. *中华外科杂志*, 2007, 45(2): 90 – 93.
- [27] WU H, PLAWESKI S, MERLOZ P. Computer assisted systems for arthroscopic reconstruction of anterior cruciate [J]. *Chinese Journal of Reparative and Reconstructive Surgery*, 2008, 22(1):19 – 22.
- [28] GOERTZEN M J, CLAHSSEN H, BURRIG K F, et al. Sterilisation of canine anterior cruciate allografts by gamma irradiation in argon. Mechanical and neurohistological properties retained one year after transplantation [J]. *Journal of Bone & Joint Surgery British Volume*, 1995, 77 (2): 205 – 212.
- [29] PLAWESKI S, ROSSI J, MERLOZ P, et al. Analysis of anatomic positioning in computer-assisted and conventional anterior cruciate ligament reconstruction [J]. *Orthop Traumatol Surg Res*, 2011, 97(2):80 – 85.
- [30] JENNY J Y. Coronal plane knee laxity measurement: Is computer-assisted navigation useful [J]. *Orthopaedics & Traumatology: Surgery & Research*, 2010, 96(5):583 – 588.
- [31] 胡岩君, 余斌, 苏秀云, 等. 基于 MRI, CT 影像下膝关节及交叉韧带重建可视化的初步应用研究 [J]. *中华创伤骨科杂志*, 2007, 9(5):469 – 472.
- [32] HART R, KREJZLA J. et al. Outcomes after conventional versus computer-navigated anterior cruciate ligament reconstruction [J]. *Arthroscopy: The Journal of Arthroscopic & Related Surgery*, 2008, 24(5):569 – 578.
- [33] ISHIBASHI Y, TSUDA E, FUKUDA A, et al. Future of double-bundle anterior cruciate ligament (ACL) reconstruction: incorporation of ACL anatomic data into the navigation system [J]. *Orthopedics*, 2006, 29(10):108 – 112.

(2014 – 03 – 19 收稿)